近70年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望

陈发虎^{1,2,3*}, 傅伯杰^{4,18}, 夏军^{5,20}, 吴铎², 吴绍洪⁶, 张镱锂^{3,6}, 孙航⁷, 刘禹^{8,21}, 方小敏^{3,9}, 秦伯强¹⁰, 李新^{3,11}, 张廷军², 刘宝元¹², 董治宝¹³, 侯书贵^{3,14}, 田立德^{3,15}, 徐柏青^{3,16}, 董广辉^{2,3}, 郑景云⁶, 杨威^{3,16}, 王鑫², 李再军², 王飞², 胡振波², 王杰², 刘建宝^{1,3}, 陈建徽², 黄伟², 侯居峙^{1,3}, 蔡秋芳^{8,21}, 隆浩^{10,21}, 姜明¹⁷, 胡亚鲜¹², 冯晓明¹⁸, 莫兴国¹⁹, 杨晓燕^{1,3}, 张东菊², 王秀红⁶, 尹云鹤⁶, 刘晓晨^{3,11}

1. 中国科学院青藏高原研究所高寒生态重点实验室, 北京 100010;
2. 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;
3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;
4. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875;
5. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;
6. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;
7. 中国科学院昆明植物研究所东亚植物多样性与生物地理学重点实验室, 昆明 650201;
8. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061;
9. 中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室, 北京 100010;
10. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008;
11. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100010;
12. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;
13. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119;
14. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023;
15. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500;
16. 中国科学院青藏高原研究所青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100010;
17. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012;
18. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;
19. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;
20. 中国科学院水资源研究中心, 北京 100101;
21. 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心, 西安 710061

* E-mail: fhchen@itpcas.ac.cn

收稿日期: 2019-08-07; 收修改稿日期: 2019-09-12; 接受日期: 2019-10-11; 网络版发表日期: 2019-11-04

国家自然科学基金项目(批准号: 41842050)资助

中文引用格式: 陈发虎, 傅伯杰, 夏军, 吴铎, 吴绍洪, 张镱锂, 孙航, 刘禹, 方小敏, 秦伯强, 李新, 张廷军, 刘宝元, 董治宝, 侯书贵, 田立德, 徐柏青, 董广辉, 郑景云, 杨威, 王鑫, 李再军, 王飞, 胡振波, 王杰, 刘建宝, 陈建徽, 黄伟, 侯居峙, 蔡秋芳, 隆浩, 姜明, 胡亚鲜, 冯晓明, 莫兴国, 杨晓燕, 张东菊, 王秀红, 尹云鹤, 刘晓晨. 2019. 近70年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望. 中国科学: 地球科学, 49: 1659–1696, doi: 10.1360/SSTe-2019-0174

英文引用格式: Chen F, Fu B, Xia J, Wu D, Wu S, Zhang Y, Sun H, Liu Y, Fang X, Qin B, Li X, Zhang T, Liu B, Dong Z, Hou S, Tian L, Xu B, Dong G, Zheng J, Yang W, Wang X, Li Z, Wang F, Hu Z, Wang J, Chen J, Huang W, Hou J, Cai Q, Long H, Jiang M, Hu Y, Feng X, Mo X, Yang X, Zhang D, Wang X, Yin Y, Liu X. 2019. Major advances in studies of the physical geography and living environment of China during the past 70 years and future prospects. Science China Earth Sciences, 62: 1665–1701, <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9522-7>

摘要 自然环境是人类赖以生存和发展的基础, 探索自然环境及其各要素(如地貌、气候、水文、土壤等)的特征、演变过程、地域分异规律以及驱动机制是自然地理学的重点研究内容. 中国自然地理要素类型丰富且区域差异较大, 为开展自然地理研究提供了难得的机遇. 文章主要围绕青藏高原隆升与亚洲内陆干旱化及河流发育、高原冰冻圈环境演化、全新世多时间尺度季风与西风气候变化、湖泊与湿地、流域模型与土壤侵蚀、过去人-地关系演化、生物地理及中国三维地带性规律等几个方面, 梳理了近70年来中国自然地理与生存环境研究的重大理论进展与重要贡献. 在简要交代国际前沿研究进展的基础上, 回顾并梳理了中国自然地理学各分支领域的研究脉络, 进一步聚焦重大研究成果或具有较大争议、重大影响的学术争鸣问题, 归纳目前研究现状, 并进行未来工作展望. 最后提出在推进生态文明建设的国家需求下, 应发挥中国自然地理研究的优势, 厘清自然地理要素变化的过程、规律与机制, 持续推进中国自然地理研究为国家战略服务, 在全球视野下做出具有中国特色的自然地理学理论贡献.

关键词 中国自然地理, 生存环境, 气候变化, 青藏高原, 人-环境相互作用

1 引言

地理科学(Geographical Science)是研究地球表层人类生存环境的空间差异、时间演化以及人-环境相互作用的科学, 具有区域性、综合性和文理工交叉的学科属性. 自然地理学是研究地球表层自然环境的空间特征、演变过程及其地域分异规律的一门自然科学, 是地理学的三个重要分支学科(自然地理学、人文地理学、信息地理学)之一, 亦是地理科学的基础学科和地理科学研究的基石(蔡运龙等, 2009; 傅伯杰, 2018), 其重点研究对象是人类生存环境中的地球陆地表层自然环境系统, 或者称为自然地理环境系统, 研究对象既可以是地貌、水文、气候、生物、土壤等某一种自然环境要素, 也可以针对景观、土地等自然地理综合体, 还可以是以冰冻圈、干旱环境这样的典型对象为目标的区域自然环境(郑度等, 2015). 自然地理学重视了解当代地球环境必不可少的空间变异和时间过程, 其目的是认识地球自然环境怎样成为人类活动的基础并受人类活动的影响(Gregory, 2000; 蔡运龙等, 2009).

中国地域辽阔, 自然地理类型丰富, 研究中国自然地理环境及其组成要素的形成、发展、结构和区域差异, 有助于掌握中国自然环境的状况. 中国的地形以山地和高原为主, 素有“第三极”之称的青藏高原雄踞西部, 由西向东地势逐渐下降; 中国地处中纬度大陆东岸, 濒临全球最大海洋, 季风气候异常发达; 但大兴安

岭、阴山、贺兰山、乌鞘岭、巴颜喀拉山和昆仑山一线西北的中国内陆, 终年受大陆性气团控制, 气候异常干旱, 与中亚一起构成了世界上最大的内陆干旱区. 因此, 中国的自然地理总体格局形成了东部季风湿润区、西北内陆干旱区, 以及青藏高原高寒区三大部分(图1; 赵松乔, 1956; 黄秉维, 1959; 郑度等, 2015). 东部季风区整体水热配置良好, 具有得天独厚的资源优势和夏季温暖湿润的气候特征; 该区跨越热带、亚热带、暖温带、中温带以及寒温带等几个温度带, 形成了植被与土壤等的纬向地带性分布规律; 该区亦是中国人口密集分布区, 是长期人-地相互作用的高强度区. 西北干旱区具有和缓起伏的高原和高山冰雪-盆地绿洲地貌特点, 分布有多个沙漠, 河湖众多但水资源贫乏; 该区主要受西风影响, 具有典型的大陆性气候特征和气候变化的西风模态特征(Chen等, 2019a). 青藏高原高寒区具有高寒气候的特殊性, 以及受全球变化和西风-季风协同作用影响强烈的特点(Yao等, 2012); 因其高亢的地势, 青藏高原广泛分布冰川、冻土与积雪, 构成了地球中、低纬度最大的冰雪与寒冻作用中心, 也造就了生物区系和群落分布的垂直地带性规律(郑度等, 2015).

中华人民共和国成立之初, 以中国自然环境和自然资源摸底为目标的大规模区域综合科学考察为地理区域划分、国家与地区有计划地建设发展, 提供了可靠的科学依据, 也获取了第一手研究资料, 奠定了中国自然地理学研究的基础(陈传康等, 1994). 改革开放以来, 在新技术新方法的运用下, 中国自然地理与生存

图1 中国地势与自然地理区划

据郑度等(2015)

环境研究取得了长足的进展,由定性描述向定量实验推进,也由单一过程向综合研究深化。在青藏高原隆升与内陆干旱化、青藏高原冰冻圈环境(冰川、冻土)、季风与西风气候变化等领域开展了多时间尺度的系统研究,进而在全球变化区域响应方面取得了突出成就;针对湖泊污染与水土流失,开展了机理与卓有成效的应对措施研究;也在区域自然地理环境的特征、类型、分布、过程方面取得了重大进展,推动了对包括生物地理分布在内的中国自然地理地带性规律的认知;特别地,中国的自然地理学研究聚焦地理学的核心问题,即人与环境的相互作用研究,从较长的时间尺度,跨越旧石器时代、新石器时代到历史时期,探讨了人-地关系的演化规律。今年是中华人民共和国成立70周年,回顾过去70年的中国自然地理学发展,成绩斐然。中国前辈自然地理学家对不同时期中国自然地理及其分支学科的进展均作了较好的总结(如黄秉维, 1960; 陈传康等, 1994; 郑度和陈述彭, 2001; 蔡运龙等, 2009; Fu和Pan, 2016; 傅伯杰, 2018),本文针对中国自然地理学的主要基础研究领域,梳理其近70年来的发展脉络,不求面面俱到,仅是总结最重要的有中国特色的研究进展和成果,并提出未来展望。中国自然地理学的重大应用研究进展将另文发表;此外,涉及中

国台湾的自然地理与生存环境研究在相应主题中有所提到,但未进行单独深入讨论。

2 中国自然地理与生存环境研究进展

2.1 干旱环境与沙漠演化

亚洲内陆干旱区是全球面积最大、最典型的中纬度内陆干旱区。由于植被覆盖度低且有持续的物质供应,该地区裸露地表的碎屑物质被西风环流和冬季风携带向北半球输送大量的粉尘物质,对区域乃至全球气候变化有深远影响(Creamean等, 2013)。新生代亚洲内陆干旱环境演变经历了早期干旱化、干旱化的显著加剧和以大型沙漠形成成为标志的最终形成三个阶段。

2.1.1 干旱环境演化

地质证据表明,亚洲内陆经历了由早新生代副特提斯海主导的湿热环境到现今极端干旱环境的显著转变,被视为亚洲内陆干旱化(如刘东生, 1985; An等, 2001; Guo等, 2002),进而形成了多个大型沙漠(图2)。

20世纪50~80年代,刘东生领导的研究团队明确了中国黄土的风成成因,基于中国黄土是内陆干旱化产物的科学假设,提出了内陆干旱环境至少自约

图2 亚洲内陆沙漠、黄土分布图

KR, Karakum沙漠; KZL, Kyzylkum沙漠; MYK, Muryunkum沙漠; TK, 塔克拉玛干沙漠; GB, 古尔班通古特沙漠; KM, 库姆塔格沙漠; QD, 柴达木沙漠; BJ, 巴丹吉林沙漠; TG, 腾格里沙漠; MU, 毛乌素沙地; CLP, 黄土高原; EAWM, 东亚冬季风; ISM, 印度夏季风; EASM, 东亚夏季风。据王鑫等(2016)

2.4~2.6Ma(年代指距今,下同)开始形成(Heller和Liu, 1982; 刘东生, 1985)。20世纪90年代,主体黄土高原晚新生代红粘土序列的研究,将内陆干旱环境的形成年代提前至7~8Ma(如Sun等, 1998; Ding等, 1999)。21世纪初,西部黄土高原中新世黄土的不断发现,将内陆干旱化启动时代进一步提前至22~25Ma(如Guo等, 2002; 强小科等, 2010)。近年来,西北内陆大型沉积盆地新生代气候环境变化取得了众多突破性研究进展,例如,Zheng等(2015)提出塔克拉玛干沙漠自约26.7~22.6Ma已经形成,但关键的年代学证据尚存争议(Sun等, 2015);紧邻中国的塔吉克在约37Ma时副特提斯海退出这一区域(Wang等, 2019),随后经历了指示干旱的风沙环境和黄土沉积环境(王鑫等, 2016);西宁盆地(Licht等, 2014)、索尔库里盆地(Li J X等, 2018)也陆续发现了始新世-渐新世不同时间段的干旱化事件,揭示了新生代内陆干旱化更为复杂的时空演变历史。

2.1.2 沙漠演化

大型沙漠的形成是内陆干旱化的直接体现,也是现今干旱环境最终形成的重要标志。比如世界第一大沙漠撒哈拉沙漠出现于~7Ma(Schuster等, 2006);中国最大的塔克拉玛干沙漠最早认为出现于~5.3Ma(Sun和Liu, 2006),后来的研究却有约26.7~22.6Ma(Zheng等, 2015)、~12.2Ma(Heermance等, 2018)、~7.0Ma(Sun等, 2009)和~3.4Ma(Sun等, 2011)的不同认识。造成这一差异的主要原因在于大型沙漠因沙丘覆盖,沙漠内部完

整的地层记录难以获取。

早在20世纪80年代至21世纪初,以董光荣为首的研究团队就开展了中国地质历史时期沙漠形成演变的研究工作(董光荣, 2002),根据片段露头剖面中的古风成砂记录建立了中国沙漠演化的大致框架:提出白垩纪至古近纪热带红色沙漠期、新近纪亚热带红色沙漠期和第四纪温带黄色沙漠期。在此基础上,为了获取沙丘之下沙漠内部连续的地层记录,明确沙漠的形成年代与演化历史,兰州大学研究团队实施了“中国沙漠钻探计划”。团队先后在腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠、古尔班通古特沙漠进行了岩芯钻探,获得了第一手资料。钻孔沉积相和年代学研究结果显示:现代意义的腾格里沙漠(Li Z等, 2014)和巴丹吉林沙漠(Wang F等, 2015)分别出现于0.9和1.1Ma;乌兰布和沙漠(Li G等, 2015)和库布齐沙漠(Li等, 2017)由于钻孔未见基底,沙漠的具体年代尚不确定,但至少要早于晚更新世;古尔班通古特沙漠钻孔初步结果也指示了沙漠出现可能在早-中更新世过渡期(未发表)。

2.1.3 风沙地貌

风是除流水之外塑造地球景观的第二大流体,形成的风沙地貌在全球干旱区广泛分布,甚至在一些地外星球,如火星、金星和土卫六也广泛发育(Pye和Tsoar, 2009),因其与人类生存环境关系密切,及蕴含现代地表过程和地球环境演化的丰富信息,风沙地貌

研究自19世纪末以来受到国际学术界的持续关注, 成为干旱区地貌学的主要组成部分. 中国广袤的干旱区是研究风沙地貌的天然实验室, 中国风沙地貌研究始于20世纪50年代末, 60多年来取得了丰硕的成果, 在多个领域为风沙地貌学的发展做出了重要贡献.

以沙区资源利用与改造为目的中国早期风沙地貌学研究的突出特点, 这也成为了风沙地貌学应用研究的典范. 以朱震达为代表的中国第一代风沙地貌学家基于定位观测开展了沙丘移动规律研究, 总结出沙丘移动的形式、速率及其与沙丘形态参数的定量关系(朱震达等, 1964). 《塔克拉玛干风沙地貌研究》(朱震达等, 1981)对风沙地貌形成的古地理背景、类型与分布规律、风沙地貌条件的改造利用和区划等的全面论述, 使其成为区域风沙地貌综合研究的经典著作. 改革开放以来, 中国风沙地貌研究更多地借鉴欧美的研究, 在沙丘动力学方面取得了一系列成就, 如在敦煌鸣沙山金字塔沙丘、塔克拉玛干沙漠的复杂线形沙垄、腾格里沙漠格状沙丘、灌丛沙丘、巴丹吉林沙漠高大沙山、库姆塔格沙漠的“羽毛状”沙丘、雅丹地貌和戈壁等中国干旱区特有风沙地貌形成方面的研究成果是对风沙地貌研究的重要贡献, 成果被广泛地引用(董治宝等, 2011; Livingstone和Warren, 2019; Lu等, 2019).

近10年来, 中国风沙地貌在两个方面的研究对丰富和完善风沙地貌学理论具有重要意义. 一是在腾格里沙漠建立风沙地貌动力学野外试验场, 基于长期野外监测结果, 提出不同类型沙丘的动力学关系, 发现沙源丰富度在控制沙丘形态中的重要作用, 对广为沿用的沙丘“形态-风况”理论提出质疑(Lü等, 2014, 2017). 二是青藏高原高寒环境的风沙地貌研究以及类火星风沙地貌的发现对地外星球风沙地貌研究具有重要启发, 指出火星风沙地貌与地球风沙地貌的重要不同在于: 地球风沙地貌是气候控制型, 而火星风沙地貌是沙源控制型, 这为理解火星风沙地貌的特点提供了重要线索(Dong等, 2017).

2.2 青藏高原地貌演化与大江大河发育

海拔普遍在4000m以上, 面积达 $250 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的青藏高原, 其隆升是整个新生代地球演化史上最伟大的地质地理现象之一. 它不仅改变了整个亚洲的地貌格局、大江大河发育, 也改变了整个亚洲的地理和环境格局, 并且对全球变化产生了深远影响.

2.2.1 青藏高原隆升与新生代环境

青藏高原的隆升是印度板块与亚欧板块碰撞导致地球内部岩石圈地球动力学作用过程的结果, 其碰撞的时间、过程及机制一直是地学界关注的焦点. 1964年施雅风和刘东生在希夏邦马峰北坡考察中发现上新世地层中高山栎化石, 揭示该区第四纪以来上升了约3000m, 开创了高原隆升研究先河. 此后至90年代间大规模的第一次青藏科考, 发现高原由一系列小板片拼贴而成, 地壳加厚主要由地壳内部变形缩短造成(Chang等, 1986); 提出了高原隆升是多阶段、非均匀、不等速的, 存在三期抬升和两度夷平的发育模式(李吉均等, 1979). 20世纪90年代后进入针对具体科学问题的重点地区半定量研究阶段, 首次获得中国约30Ma以来完整地层高精度年代序列, 揭示高原东北部至少从渐新世已响应印度板块碰撞, 自约8Ma开始明显隆升、3.6Ma开始一系列强烈阶段性快速隆升(称为青藏、昆黄和共和运动), 约1.7Ma现代黄河水系形成(Li, 1995; 方小敏等, 1997; Fang等, 2003). 最近在西宁盆地建立起54Ma以来高精度年代序列, 揭示印度板块碰撞初期变形应力就已传递到高原东北部, 形成该区系列盆地(Fang等, 2019). 周边祁连山、阿尔金、昆仑山也大致经历相似的多幕次隆起, 副特提斯海从约47Ma开始穿时退出塔里木盆地(Sun和Jiang, 2013). 高原南部隆升亦是多阶段、不均匀的(钟大赉和丁林, 1996), 冈底斯山可能在碰撞前就已存在, 碰撞初始已达现在高度(Ding等, 2014), 但其南面的喜马拉雅山迟至约中新世初才开始明显隆升, 15Ma才隆升到现今类似高度(Ding等, 2017), 而其北面的高原中南部(羌塘和拉萨块体)可能在40Ma前已隆升到现在高度, 称为原西藏高原(Wang等, 2008), 或者至少是“两山夹一盆”的地貌格局(Ding等, 2014). 相应地, 发现印度板块的碰撞时间也明显更早且不同步, 中部可能于65或59Ma已经与亚洲板块碰撞, 东西两侧则在约52Ma前才与亚洲板块发生碰撞(Ding等, 2005).

高原隆升产生显著的环境效应. 早期地层岩性和生物定性统计揭示中国东南和西南季风在中新世中期形成, 奠定了中国现代环境格局轮廓, 青藏高原隆升和全球冰盖发展均对季风产生影响(刘东生等, 1998). 高原东北部获得的约30Ma以来的连续地层岩相和气候代用指标记录, 揭示22Ma时植被由疏林草原转变为森

林, 环境变湿, 东亚夏季风形成, 约8Ma显著阶段性干旱化开始(李吉均和方小敏, 1998; 施雅风等, 1998). 进一步研究发现指示冬季风形成的黄土于22~25Ma开始堆积(如Guo等, 2002), 约8~7Ma扩展到黄土高原中部(如Ding等, 1997), 冬、夏季风在约3.6Ma同时强化, 与青藏高原此时的急剧隆起密切相关(An等, 2001). 南部早期隆升也产生明显环境效应, 植物化石重建结果表明晚古新世时南亚季风已存在, 后经喜马拉雅山脉隆起对水汽阻挡, 喜马拉雅山北坡逐步旱化(Ding等, 2017).

2.2.2 青藏高原周缘河流发育与演化

河流敏感地响应构造活动、气候变化和基准面调整, 最终呈现出水系格局的演变(Schumm等, 2000). 青藏高原是亚洲水塔(Immerzeel等, 2010), 特殊的地貌格局决定了亚洲主要大河均发源于青藏高原, 它们的形成过程书写了东亚地貌和构造格局演化以及气候变化的历史, 将河流发育研究推上地球圈层相互作用的讨论高度, 具有重大研究价值(Burbank等, 2003). 近年来随着测年精度的提高和物源示踪技术的发展, 全球围绕高原周缘的河流发育研究已经上升到构建不同地质历史时期水系格局层面, 重点探讨整个流域水系发育与宏观构造格局演化和气候变化的关系(Clift和Blusztajn, 2005).

在中国关于河流发育的真正科学研究始于1866年Pumpelly对黄土成因的讨论. 20世纪初Clapp(1922)率先关注黄河水系宏观发育过程, 至张保升(1957)提出黄河曾取道永定河后, 已形成多种先成水系发育模式(王乃梁, 1956), 直至德日进和杨钟健(1930)主张黄河是由若干河段衔接形成后, 内陆河湖系统袭夺重组的河流发育模式开始崭露头角(张伯声, 1956; 潘保田, 1991; 李吉均等, 1996). 受当时技术条件限制, 这些认识仍然停留在定性描述阶段, 支撑证据主要源于宏观地貌和沉积分析.

进入21世纪, 更多的研究聚焦于长江三峡的贯通时代, 主要提出了中新世(Zheng等, 2013)、上新世(Jia等, 2010)和早更新世(Li等, 2001)三种观点. 此外, 上游金沙江的形成过程也得到重视, 多数学者支持袭夺说, 但在发生的时间上分歧较大, 部分学者认为时代较老, 可以追溯到渐新世晚期(Clift等, 2006), 而多数学者认为袭夺发生在早更新世(Kong等, 2009). 在黄河流域,

随着测年精度的提高, 已经开始构建不同地质历史阶段水系格局, 认为上游在青藏高原隆升的驱动下于3.6Ma左右开始孕育(Nie等, 2015), 此后地势高差加大导致水系重组(Pan等, 2011), 黄土高原南部和崤山东麓的局地河流依次向北和向西袭夺河套和三门古湖的河湖系统(Hu等, 2016), 最终于3.6~1.2Ma间贯通这两大盆地(Hu等, 2017), 形成黄河东流水系格局(Hu Z B等, 2019), 近1.2Ma以来随着高原进一步隆升, 上游开始不断向高原内部袭夺延伸(Craddock等, 2010), 最终形成流经中国三大地貌阶梯的现代黄河水系格局.

2.3 冰冻圈: 冰川、冻土及其变化

青藏高原及其毗邻山地是除全球两极之外中低纬度最大的冰冻作用区, 分布有大面积的冰川、冻土(姚檀栋, 2007), 因此青藏高原是开展第四纪冰川演化、高亚洲现代冰川变化、冻土变化及其对全球响应研究的理想场所.

2.3.1 第四纪冰川研究的争论和进展

第四纪冰川的演化对气候及其作用区内地表过程都有极为重要的影响, 青藏高原第四纪冰川的时代、范围及其侵蚀方式等都是学者们最为关注的科学问题(Schaefer等, 2006; Egholm等, 2009). 中国第四纪冰川研究相对于欧美起步较晚, 但发展历程相似, 主要经历了冰期序列的相对年代划分和冰川遗迹的数值定年两个阶段(Zhou等, 2011).

研究过程中也出现了数次激烈的学术争论. 李四光首先提出了中国东部中低山地第四纪广泛存在多期(次)冰川作用的观点(李四光, 1947), 但一经提出即受到了广泛质疑. 随着国内冰川学研究的深入, 学者们结合山地冰川发育条件、地貌组合、判别原则以及东亚古气候环境记录等, 确认中国东部仅有台湾山地、长白山、贺兰山与太白山等主峰高于2500m以上的山地发生过晚更新世以来的冰川作用, 不支持中国东部山地泛冰川论观点(施雅风等, 1989; Zhou等, 2011), 但相关争论推动了对中国东部山地冰期环境和地貌发育的研究. 在此之后, 中国西部的青藏高原是否发育过第四纪大冰盖问题又引起国际学术界高度关注(Kuhle, 1988; Zheng, 1989); 众多中国学者则基于高原山地冰川沉积范围和物质平衡线波动值、冰缘地貌与古湖遗迹等证据, 系统地否定了大冰盖假说(Zheng和Rutter,

1998), 也得到国际同行的一致认可(Rutter, 1995).

绝对定年技术的发展, 促使中国冰期-间冰期尺度上第四纪冰川序列的数值年表被建立起来(昆仑冰期、中梁赣冰期、古乡冰期、大理冰期和多次全新世冰进); 并发现青藏高原隆升过程中昆-黄运动和共和运动与全球冰期气候相耦合, 对高原第四纪冰川发育有决定性意义, 最老冰期时代也远晚于全球其他地区(Zhou等, 2011). 之后, 为了更深入探究区域间冰期同时或异时性的驱动机制, 学者们开始关注末次冰期以来亚轨道尺度上古冰川的演化模式. 首先发现青藏高原季风控制区局地末次冰盛期可能发生于MIS(深海氧同素阶段)3, 而西风控制区则出现于MIS 4, 均与MIS 2的全球末次冰盛期不同步(Owen等, 2002; Wang等, 2013; Li Y K等, 2014); 确认晚冰期和全新世存在多次亚轨道尺度冰进事件, 并尝试探讨该尺度冰川演化是受高纬降温还是低纬季风降水驱动的科学问题(Seong等, 2009; Dong G C等, 2018). 近年来, 已经开展基于冰川作用范围利用模型定量重建古冰川发育所需的气候条件研究(Wang J等, 2015; Cui等, 2018), 冰川侵蚀过程的数值模拟(杨少华和石耀霖, 2015)和冰川侵蚀的量化分析(Wang等, 2018)也有新进展.

2.3.2 青藏高原冰芯研究

冰芯记录因其保真度好、分辨率高、信息量大等优势, 已成为全球重要的气候变化和大气环境研究载体. 目前全球最长时间的冰芯记录来自南极EPICA Dome C冰芯, 提供了过去800ka以来大气CO₂浓度和温度变化等的良好记录(Jouzel等, 2007); 而来自北极格陵兰冰芯的氧同位素记录提出了末次间冰期以来地球温度的不稳定性问题(Dansgaard等, 1993; NGRIP, 2004).

青藏高原是中低纬度重要的冰川分布区, 1987年钻取的祁连山敦德冰芯正式开启了青藏高原冰芯研究的序幕(姚檀栋和Thompson, 1992), 该支冰芯最初被认为年龄老于100ka(Thompson等, 1989). 1992年在西昆仑山古里雅冰帽钻取的308.6m透底冰芯是中、低纬地区钻取的深度最深、时间尺度最长的冰芯(姚檀栋等, 1997; Thompson等, 1997); 基于古里雅冰芯放射性元素³⁶Cl的测量结果, 估算古里雅冰芯底部年代老于500ka, 甚至最高可达760ka(Thompson等, 1997). 1997年在希夏邦马达索普冰川海拔7000m钻取了全球最高

海拔的冰芯(Thompson等, 2000). 三十余年以来, 在青藏高原及其毗邻地区二十余处钻取了多支冰芯, 在不同时空尺度揭示了青藏高原地区的气候环境变化特征(姚檀栋等, 1997; 田立德和姚檀栋, 2016).

对青藏高原冰芯年代框架的认识一直在不断推进中(图3), 例如后来对采自敦德冰芯靠近冰-岩界面的一个冰芯样品进行了¹⁴C测年, 结果仅为(6.24±0.33)ka(Thompson等, 2005). 最近亦有学者对青藏高原古里雅冰帽的年代框架提出了新的认识, 对距离古里雅冰芯钻取点约30km的崇测冰芯底部沉积物细颗粒石英的光释光(OSL)定年结果, 得到其年龄不超过(42±4)ka(Zhang Z等, 2018). 此后, 基于崇测冰芯的¹⁴C、²¹⁰Pb、氡和β活化度等分析结果, 界定崇测冰芯的底部年龄为~9ka(Hou等, 2018). 对古里雅冰帽边缘冰样进行的⁸¹Kr定年测量, 得到其年龄上限为15~74ka(Tian等, 2019). 毫无疑问, 迫切需要寻找更多的证据进一步厘清青藏高原冰芯的年代范围.

2.3.3 青藏高原现代冰川变化

青藏高原冰川变化不仅影响冰川融水径流, 而且与高原湖泊水位上升、冰川灾害(冰崩、冰碛湖溃决、冰川泥石流等)等具有紧密的联系. IPCC第四次评估报告曾错误指出喜马拉雅冰川将可能于2035年甚至更早前消失. 自此以后在《Nature》、《Science》上发表了数十篇文章, 围绕高亚洲地区冰川变化特征、机制及影响等开展了大量的研究(Bolch等, 2012; Yao等, 2012; Brun等, 2017). 汤森路透集团通过对2009~2016年文献聚类分析, 遴选出地球科学十大热点前沿问题, 冰川变化及其环境影响于2015年和2016年分别连续入选, 反映出学术界对冰川变化的关注.

中国现代冰川研究起步于20世纪50~60年代的登山活动(崔之久, 1958), 随着第一次青藏高原综合科学考察的实施, 系统地开展了中国现代冰川学的观测与研究, 基本摸清中国冰川的水热发育状态及物理性质(李吉均等, 1986), 开展了定点与半定点典型冰川监测, 建立了中国第一个长期冰川监测站-中国科学院天山冰川观测试验站. 基于20世纪60~80年代的资料开展了第一次中国冰川编目, 基本查清了冰川数量、面积与空间分布(施雅风, 2005). 2000年之后, 随着对地观测技术的发展, 开展了大量冰川遥感与实地调查研究. 依据2004~2011年遥感资料完成了第二次中国

图3 目前已提供底部绝对年代信息的青藏高原冰芯钻取点位置示意图

除古里雅冰芯外, 其他冰芯下面的数字是各自冰芯测量得到的最大 ^{14}C 年龄, 崑崙冰芯下面括号里的数字是应用冰川2p模型获得的冰-岩界面处年龄(据Hou等, 2018)

冰川编目, 共统计冰川总面积约 $5.18 \times 10^4 \text{ km}^2$, 与第一次冰川编目相比, 中国冰川面积缩小约18%(刘时银等, 2015). 随着全球气候变暖, 近期中国冰川变化呈现明显的空间差异: 中国大部分冰川末端处于后退状态, 冰量呈加速亏损的特征, 但青藏高原西部及帕米尔-西昆仑地区部分冰川表现出稳定状态, 少量冰川出现微弱的冰量增加和末端前进态势(Yao等, 2012). 气温升高是中国西部冰川退缩的决定性因素, 同时人类活动排放的吸光性物质(如黑碳气溶胶)在冰川表面的富集也部分加速了冰川消融. 在此情景下, 施雅风和刘时银(2000)预估中国冰川面积21世纪末期相对于20世纪80年代将减少45%, 预计冰川融水径流量至21世纪中叶大致呈增加趋势, 随后冰川融水径流量逐渐下降(Huss和Hock, 2018).

2.3.4 多年冻土

多年冻土区约占北半球24%的陆地面积(Zhang T等, 2008), 近地表土冻融是高纬度和高海拔地区非常重要的地表过程, 通过多年冻土南(下)界在向北(上)移动(IPCC, 2013; Biskaborn等, 2019)、活动层厚度的变

化(Peng等, 2018)以及北极地区大面积的热融滑塌(Lewkowicz和Way, 2019)响应和影响全球气候变暖. 这些变化必将导致冻结在活动层和多年冻土中的1330~1580Pg有机碳(Hugelius等, 2014)融化和分解, 最终以温室气体的形式释放到大气中. 青藏高原是中低纬地区多年冻土最大分布区, 储存有机碳(160 ± 87)Pg(Mu等, 2015).

中国从20世纪50年代开始了对多年冻土的调查和研究, 20世纪60年代开展了对青藏高原多年冻土更深入调查、地球物理勘探和室内冻土力学和热学性质的试验. 1975年编制了第一幅中国冻土分布图(周幼吾等, 2000). 20世纪80年代初期, 中国多年冻土的基本特征和分布发育的地带性、区域性规律已有全面论述(周幼吾和郭东信, 1982), 初步查明中国多年冻土区面积为 $2.15 \times 10^6 \text{ km}^2$, 提出了高海拔多年冻土分布的三向地带性理论和被学界称为“程氏假说”的地下冰重复分凝机制的新学说(Cheng, 1983). 2000年出版的《中国冻土》专著(周幼吾等, 2000)是对中国冻土研究全面系统的总结. 在全球变化的背景下, 青藏高原多年冻土变化的监测表明多年冻土处于全面退化状态中, 主

要表现在多年冻土温度在升高、活动层厚度在增加、多年冻土下界在上移(Wu和Zhang, 2008; Hu G等, 2019). 在冻土工程方面, 青藏铁路建设中改变过去全世界采用的被动隔热保护多年冻土的做法, 进而采用主动降温等综合调控的方法(程国栋等, 2009), 解决了青藏铁路保护多年冻土的工程地质问题. 在多年冻土图的编制方面, 早期的多年冻土图主要以年平均气温或海拔高度等主要因素来界定, 误差较大. 最近发展到应用卫星地表温度资料、实测资料以及模型相结合, 编制多年冻土图(Zou等, 2017)以及基于多气候要素(如气温、积雪和植被)与多年冻土的关系建立的多年冻土概率分布图(图4; Cao等, 2019), 为今后开展多年冻土研究打下基础. 同时, 中国的冻土研究也已经从国内扩展到北半球, 例如利用陆面过程模式对北半球多年冻土变化预测(Guo和Wang, 2016), 以及利用Stefan近似解对活动层厚度变化的预估等(Peng等, 2018).

2.4 中国气候及气候变化

气候和气候变化研究是自然地理学的重要研究内容. 中国自然地理学家开展的气候变化研究多侧重于“过去气候变化”, 尤其是全新世(11700年以来, 亦称现代间冰期)气候变化, 全新世既是地球气候史上的最新篇章, 也是人类文明蓬勃兴起的阶段, 因此成为研究人-地关系及其演变的极佳时窗. 中国较大规模的全新世气候变化研究始于20世纪70年代, 基于历史文献、黄土-古土壤序列、湖泊沉积、泥炭、石笋、树轮等载体, 揭示了全新世以来多时间尺度气候环境变化的时空特征, 特别是在季风-西风气候变化及其差异、全新世温度历史重建、近2000年气候环境变化等方面, 取得了丰硕的研究成果.

2.4.1 季风气候及变化

经典季风概念是指由于海陆热力差异引起的季节性风向变化. 但随着研究的推进, 对季风的认识已经上升到了全球尺度, 认为其代表了热带辐合带的南北移动, 形成“全球季风”的概念(Trenberth等, 2000; 汪品先, 2009). 作为全球季风系统的重要组成部分, 亚洲夏季风包括了东亚夏季风和印度夏季风, 控制了季风亚洲的自然环境变化. 国际上对季风的研究在其长期变化趋势(如An等, 2011)、快速衰退事件及其与高纬气候系统的联系(如Wang等, 2005), 以及季风变化与

文明演替(如Zhang P等, 2008)等方面取得了一系列重大成果.

中国的季风研究最早可追溯到20世纪30年代, 曾任中国地理学会理事长的竺可桢最早注意到中国的夏季风变化(竺可桢, 1934); 李吉均于20世纪80年代提出了“季风三角”的概念(Li等, 1988), 其中影响中国东部地区的是东亚夏季风, 其属于亚热带季风. 学者们对全新世东亚夏季风变化的认知经历了多个阶段. 20世纪90年代, 通过收集和总结1970年以来发表的所有关于中国的古气候资料, 施雅风等(1993)提出了中国全新世气候存在8.5~3ka的中全新世气候适宜期(夏季风最强盛时期). 随后, An等(2000)提出了全新世适宜期在发生时序上由东北向华南逐渐退却的假说. 然而后来的石笋氧同位素记录(如Wang等, 2005)并不支持东亚夏季风演化的非同步性, 而是夏季风最强盛的阶段同步出现于早全新世. 但是, 石笋氧同位素能否忠实记录东亚夏季风变化正受到越来越多的挑战(如Tan, 2014; Liu等, 2015). 来自中国北方山西公海的基于孢粉定量重建的降水结果显示, 早全新世东亚夏季风逐渐增强, 距今7.8~5.3ka的中全新世夏季风最强盛; 5ka以来持续减弱, 尤其3ka之后快速衰退(Chen F H等, 2015a; 图5a); 同时, 中全新世气候适宜期也得到了中国北方土壤发育证据的支持(Wang等, 2014; 图5b). 新的研究也发现, 代表东亚夏季风强盛的中国北方多雨时期, 中国南方长江流域则为降水减少时期, 南北降水变化存在反位相的变化模态, 即“南涝北旱”或者“北涝南旱”模态. 例如, 全新世期间, 来自长江流域的神农架大九湖泥炭藓含量记录(Xie等, 2013)和华南地区的江西大湖有机质含量记录(Zhou等, 2004)显示该区域7~3ka相对干旱, 这与中全新世华北的高降水形成了鲜明对比, 使得东亚季风在中全新世增强的情况下呈现出北湿南干的现象(陈建徽等, 2016; Rao等, 2016). 近千年来, 这种降水的南北反位相模态也存在, 例如中世纪暖期中国华北多雨而长江流域少雨(刘建宝等, 2011; Chen J H等, 2015). 新的研究也发现, 甚至在末次冰消期中国北方与南方的干湿变化也是相反的(Chen F H等, 2015a; Zhang H B等, 2018). 全新世东亚夏季风变化总体上受到北半球夏季太阳辐射的驱动(图5e), 但高纬变化, 例如高纬冰盖以及冰川融水注入北大西洋引起的北大西洋经向环流(AMOC)(图5f)的减弱对东亚夏季风有重要的调控作用(Chen F H等,

图4 青藏高原多年冻土概率分布图

据Cao等(2019)

2015a). 受到北半球夏季太阳辐射的控制, 作为热带季风的印度夏季风在早-中全新世(11.7~6ka)最为强盛, 体现在中国西南地区该时段降水最多(Wang等, 2005; Chen等, 2014; Wu D等, 2018; 图5c和5d). 更长时间尺度亚洲季风特别是东亚夏季风演化多由地质学家开展.

2.4.2 西风气候及变化

探讨西风环流控制区气候环境变化特征及其机理, 是当前全球变化研究中备受关注的前沿问题(如 Overland等, 2016; Routson等, 2019). 作为北半球西风区的重要组成部分, 亚洲中部干旱区既是世界上最大的非地带性干旱区, 也是绿色丝路建设的核心区域; 并且, 它还与亚洲季风区一起, 构成了中国及周边的气候环境总格局. 可见, 系统研究该区域全新世以来多尺度气候环境变化过程和动力机制, 及其与东部季风区的异同, 具有重要的理论和现实意义.

对中国西风区全新世气候环境演变的研究兴起于20世纪80年代, 基于湖泊、冰芯、黄土等地质载体, 学者们在内陆干旱区全新世或更长时间尺度干湿变化、水热配置及其与全球气候系统的联系等方面做出了开拓性贡献(如施雅风和曲耀光, 1989; 李吉均, 1990; 姚檀栋等, 1997). 随着后续高质量单点代用记录的积累, 较大空间范围内的集成研究发现, 在全新世亚轨道尺

度, 亚洲中部干旱区具有早全新世干旱、中晚全新世相对湿润的气候变化特征, 并据此提出该区域存在显著不同于季风区的气候变化“西风模态”(Chen等, 2008, 2016, 2019a; 图6). 不仅如此, 在过去千年的特征气候时期中世纪暖期和小冰期(Chen等, 2010; Chen J H等, 2015), 以及近百年的全球变暖时期(马柱国和符淙斌, 2006; 陈发虎等, 2011), “西风模态”也具有百年-年代际尺度上的适用性. 进一步地, 利用气候模拟、观测资料和再分析数据综合研究, 揭示出气候系统外部驱动(北半球太阳辐射)是亚轨道尺度上“西风模态”形成的主导因素(Jin等, 2012), 而百年-年代际尺度上“西风模态”则主要由气候系统内部变率(环流遥相关/丝绸之路遥相关)控制(Huang等, 2015). “西风模态”研究将中国气候环境作为一个整体来考虑, 揭示出西风-季风主控区域不仅具有“静态”上环境状况(干旱-湿润)的显著差异, 而且表现出“动态”上气候变化的不同特征, 实际上体现了在地理学空间思想指导下对全球变化科学的丰富和发展.

2.4.3 中国全新世温度变化

在20世纪80年代之前基于冰芯氧同位素记录, 一度认为全新世处于温度变化稳定的间冰期(Johnsen等, 1972), 但后来Bond等(1997)发现全新世在北大西洋发生过多次千年尺度的冰筏(冷)事件, 揭示出全新世气

图 5 全新世东亚夏季风与印度夏季风变化及其驱动机制

东亚夏季风记录: (a) 山西公海孢粉重建的年均降水(Chen F H等, 2015a), (b) 黄土高原古土壤发育年代频率分布曲线(Wang等, 2014); 印度夏季风记录: (c) 云南星云湖沉积物碳酸盐氧同位素(Wu D等, 2018), (d) 云南星云湖孢粉重建的年均降水(Chen等, 2014); (e) 65°N夏季太阳辐射变化(Berger和Loutre, 1991); (f) 不同指标反映的AMOC变化(紫线-劳伦泰德冰盖融化所致海平面上升速率; 浅绿线-北半球融水流量; 三角点-亚热带西太平洋 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 记录; 圆点-东北大西洋粉砂记录)(据Chen F H等, 2015a及其参考文献), 灰色底纹表示2次显著的AMOC减弱阶段

图6 西风区全新世湿度变化及其与季风强度的关系示意图

据Chen等(2019a)

候并不稳定。随着实验分析技术的进步和研究思路的拓展,重建过去温度变化逐渐从定性转向定量,近年来全球有许多高质量的全新世定量温度记录发表(如Marsicek等, 2018)。Marcott等(2013)利用全球73条定量温度记录综合重建了全新世温度变化,认为早全新世温度较高,而在中晚全新世至工业革命前温度则逐渐降低约0.7℃(图7a),这之前众多记录相符。然而Liu等(2014)利用三个海洋-大气耦合的气候模型模拟发现全新世以来温度呈现增加趋势(图7b),因此,温度记录与温度模拟这一分歧被称为“全新世温度谜题”。国际上目前常用的温度变化指标一般是生物性指标,均具有一定的季节偏向性,若不加仔细区分而全部当作年均温(如Marcott等, 2013),就可能导致指标记录与气候模型模拟的年均温存在差异。同时,最新研究发现,温度变化幅度也随纬度和海拔有所差异,如全新世高纬度地区的温度变率比低纬度地区低(Rehfeld等, 2018),高海拔地区的变率也远远大于低海拔地区(EDW, 2015)。

中国学者很早之前就尝试重建中国的温度变化,最具有代表性的是竺可桢(1972)通过物候变化重建了

过去5000年温度变化的经典曲线(图7c)。20世纪90年代,施雅风等(1993)主要基于孢粉等代用资料,提出了“中全新世大暖期”的概念,认为8.5~3ka中国年均温较现在高。近年来,研究者们利用湖泊沉积物中生物分子标志物、摇蚊、孢粉,以及树轮轮宽等指标对全新世不同时段温度进行了定量重建,取得了丰硕成果。如Hou等(2016)利用青海湖沉积物岩芯中烯酮化合物重建了全新世夏季温度变化; Zhang E L等(2017)等利用云南天才湖摇蚊重建了七月温度变化; Huang等(2013)重建了大九湖温度变化。但是中国幅员辽阔,不同区域重建的温度变化也具有显著的不一致性。此外,模式模拟结果却显示中国中全新世年均温较现在还要低(Jiang等, 2012)。因此关于中国全新世温度变化的模式目前仍没有共识。

过去2000年是温度变化研究中一个极具特殊意义的时间段。中国历史悠久,拥有丰富、连续的历史气象记录,其定年准确、气候意义明确;利用这些记录研究过去2000年温度变化是中国在全球变化领域独具特色的方向。在竺可桢(1925, 1972)开创历史气候变化研究工作基础上,后继学者不断努力,通过查阅正史、地方志、档案、日记等史料中的气象、物候、灾异及其影响记载,完善并细化了中国过去2000年温度变化认知(郑景云等, 2002; Ge等, 2003, 2013; 葛全胜, 2011)。根据历史文献重建的中国东中部过去2000年冬半年温度变化序列显示: 期间存在4个暖期(210BC~AD210; AD571~780; AD931~1320; AD1921~2010)和3个冷期(AD211~570; AD781~930; AD1321~1920)(图7d)。对比表明,过去2000年中国温度变化与北半球温度变化具有一致性,即存在三个特征时期: 中世纪暖期、小冰期和20世纪的全球变暖时期(现代暖期),同时中国隋唐暖期也较为突出(Mann等, 2008; Ge等, 2003, 2013)。

2.4.4 树木年轮与中国近2000年来年分辨率气候变化

树木年轮具有分辨率高、定年准确、指标可量化且样本地理分布广泛等特点,是解译过去2000年来全球气候变化的主要资料来源,特别是高分辨率重建全球与区域温度(Esper等, 2002)以及干湿变化(Liu Y等, 2017)的重要研究载体。中国树轮研究始于20世纪30年代,21世纪以后得到快速发展。除了常用的松、杉、柏外,目前部分灌木(Liang和Eckstein, 2009)也被用于气

图7 全球及中国全新世温度变化

(a) 集成的全球温度变化(Marcott等, 2013); (b) 模式模拟的全球温度变化(Liu等, 2014); (c) 过去5000年中国温度(竺可桢, 1972); (d) 中国东中部过去2000年冬半年温度距平(基准时段1851~1950)(Ge等, 2003)

候学研究。树轮气候学指标不仅包括宏观的树轮宽度、密度和稳定同位素(C、H、O)记录, 还包括细胞尺度上的多种指标。近年来开展的野外树木生长监测, 则为基于树轮指标与气候要素关系统计分析基础上的气候重建奠定了树木生理学基础。研究地点覆盖中国大部分地区, 由于中国气候类型差异较大, 树轮响应气候因子的区域特征明显, 以600mm降水等值线为界, 干旱半干旱过渡区主要响应湿度和降水变化, 高海拔的一级阶地对生长季温度更敏感, 而中国东南冬季温度是主要限制因子(图8; Liu Y等, 2019a)。

由于中国不同地区的地形和气候存在较大差异, 加上人类活动对原始森林的破坏, 使得不同区域的树

轮年表长度差异较大。青藏高原的祁连圆柏可生存千年以上(Gou等, 2010), 将其与死树和古柏木结合, 建立的年表可达3500年(Shao等, 2010); 台湾地区树轮年表长度可达近1000年(Liu Y等, 2017); 而中国其他地区树轮年表长度多在500年以下。基于这些年表的气候重建, 发现青藏高原东北部气候变化在年代际甚至更长时间尺度上存在冷干-暖湿的组合模态, 这种气候的低频变化受太阳活动的影响(Yang等, 2014)。基本确认了中国北方中世纪暖期和现代暖期相对温暖湿润, 而小冰期期间总体寒冷干燥(刘禹等, 2009; Yang等, 2014)。但高原过去几个世纪南北干湿变化并不完全同步(Zhang等, 2015)。在全球变暖背景下, 高原东北部总体

图8 利用树轮宽度重建气候因子的地理分布

紫色区域为中国一级阶梯; 黄色为二级阶梯; 绿色为三级阶梯。蓝点代表降水(P); 绿点代表帕尔默干旱指数(PDSI); 红点代表生长季温度(Tg); 粉点代表冬半年温度(Tw)。桔黄、绿色及蓝色线条分别代表200、400和600mm降水等值线(Liu Y等, 2019a); EASM, 东亚夏季风; WM, 冬季风; IM, 印度季风

向湿润化发展(Yang等, 2014), 而东南部及邻近的云贵高原表现出干旱化趋势(Deng等, 2017)。近年来, 高分辨率的树轮气候重建与模式模拟结合, 使得人类活动的影响得以识别: 发现青藏高原1870年以来的冬夏温差逐渐减小, 可能与人类活动排放的硫酸盐气溶胶或温室气体有关(Duan等, 2017, 2019); 受东亚夏季风影响, 中国北方环境敏感带东、西部过去400多年来的降水在年尺度上不相关, 但在十年尺度上干湿同步变化。最近80年季风边缘带降水减少可归因于人类活动硫酸盐气溶胶的增加(Liu Y等, 2019b)。在亚热带地区, 以台湾树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 首次重建中太平洋Niño 4区818年的海表温度(SST)变化, 发现20世纪后期中太平洋SST最高、变率最大, 可能与人类活动有关(Liu Y等, 2017)。

2.5 中国湖泊与湿地

湖泊与湿地是地球表层系统中极为重要的自然地理单元, 具有供水、防洪、养殖、休闲旅游、调节区域气候和维护生物多样性等生态功能。地理学家在湖

泊湿地资源调查和保护(如王苏民, 1998)、湖泊演化与全球变化(尤其是湖面变化)、湖泊污染和富营养化、湖泊湿地生态系统保护等方面开展了基础研究。2015年和2018年国际古湖沼大会和国际湖沼学大会在中国的召开, 标志着中国湖沼和古湖沼研究进入国际前沿的新阶段。

2.5.1 古湖沼学研究及大湖期争论

自20世纪60年代以来, 大量古湖岸堤或湖相沉积遗存地貌被报道和发现, 其年代学研究表明, 位于季风-西风过渡区的许多湖泊自晚更新世以来都出现过剧烈的水位波动和湖面扩张与收缩(Chen和Bowler, 1986; Yang等, 2011), 其中位于河西走廊东段的腾格里沙漠古大湖是研究晚更新世“大湖期”的典型代表之一(Pachur等, 1995; Zhang等, 2004)。这些广泛存在的“大湖期”事件, 其形成及古气候驱动机制不仅对于干旱-半干旱区的水文气候变化和近地表粉尘释放产生重大影响, 而且与季风环流(Shi等, 2001)、西风环流(Yang等, 2004)和

新构造运动(陈发虎等, 2008a)等重要气候环境系统演化密切相关, 成为开展特征地质时期气候环境变化以及亚洲季风和西风环流系统演化的关键议题之一。

对于大湖期的争论主要是对其形成时代的认识存在巨大分歧(Lai等, 2014; 隆浩和沈吉, 2015; Yu等, 2019)。青藏高原及周边沙漠和新疆等地, 早期大量的 ^{14}C 测年结果显示大湖期出现在约40~25ka(对应于MIS 3a), 据此提出了“MIS 3a大湖期”假说(李炳元, 2000), 并结合古气候模式分析, 认为主要是亚洲季风环流或中纬度西风环流增强带来的充沛降水所致(Shi等, 2001)。随着新的定年技术在湖泊沉积物测年中的应用, 大湖期的年代框架得到了重新厘定。湖岸堤石英OSL或钾长石的红外光测年结果显示, 青海湖高湖面出现在末次间冰期(MIS 5)(Madsen等, 2008); 尕斯库勒湖(Fan等, 2009)、居延海(Li G等, 2018)和黄旗海(Zhang J等, 2016)等湖泊晚更新世最高湖面也出现在MIS 5甚至更老。铀系等时线技术获得的纳木错古湖岸堤年代结果显示其大湖期出现于MIS 5(朱大岗等, 2004; 郑绵平等, 2006); 而“吉兰泰-河套”OSL测年表明, 该地区大湖期形成于60~50ka之前的某一时期(陈发虎等, 2008b)。对典型“大湖期”的腾格里沙漠古大湖系统的OSL和 ^{14}C 测年对比研究结果发现, 两种测年方法所得结果差别较大, OSL数据表明大湖期形成于MIS 5, 而传统研究基于 ^{14}C 的年代普遍年轻于实际沉积年龄。测年机理研究表明, 两种测年结果的差异源自 ^{14}C 测年上限和后期污染造成对样品真实年龄的低估(Long等, 2012, 2015), 这对重新认识晚更新世大湖期及环境意义具有重要的参考价值(隆浩和张静然, 2016)。

2.5.2 湖泊污染与富营养化

湖泊水体的富营养化是全球性普遍现象。20世纪80年代以来, 中国大多数湖泊都呈现出不同程度的污染与富营养化问题; 但由于基础研究不足, 对于如何治理存在许多争议, 如浅水湖泊底泥内源污染要不要控制(濮培民等, 2000)? 蓝藻水华暴发的机制是什么(孔繁翔和高光, 2005)? 如何通过生态修复治理富营养化(李文朝, 1996)? 通过一系列国家和部委资助的研究, 基本厘清了上述基础理论问题(秦伯强和谢平, 2005; Qin等, 2007, 2018; Qin, 2009)。

针对大型浅水湖泊复杂的生态环境问题, 发展了以“抓过程、释机理”为指导的浅水湖泊系统研究思想

和多学科协同的野外原位观测、模拟与实验研究方法(秦伯强等, 2004), 基于遥感和高频自动监测技术, 实现了对水文气象、水质、生物和蓝藻水华等多指标的高频在线监测(Qin等, 2015; Wu T F等, 2018), 在中国湖泊污染和富营养研究方面取得了方法与理论的重要进展(Qin, 2009; Qin等, 2019)。揭示了大型浅水湖泊风浪扰动引起沉积物再悬浮致使内源营养盐大量释放, 促进藻类大量生长繁殖, 并在水动力扰动碰撞过程中形成大群体, 在风浪减弱时快速上浮形成肉眼可见的藻类水华(Qin等, 2004; 秦伯强等, 2016)。同时, 蓝藻水华堆积腐烂会造成沉积物表层极度缺氧, 使得外源汇入蓄积湖底的磷不断被活化释放而增加内源污染负荷, 加速营养盐循环利用, 有助于蓝藻水华频繁暴发(Zhu等, 2013; Ding等, 2015, 2018; Yang等, 2016)。另一方面, 全球气候变暖和风速下降引起的湖泊温度升高、温跃层深度增加及湖泊化学性质改变等效应, 也在一定程度上加剧富营养化, 影响水体透明度从而导致水生植物消亡(Zhang Y L等, 2016; Deng等, 2018; Yao等, 2018); 并造成湖泊中浮游动物小型化, 减弱下行效应更有利于蓝藻水华的维持(Chen等, 2012)。在更长时间尺度上的暖期(如隋唐暖期和中世纪暖期), 夏季风增强引起的土壤侵蚀加剧导致输入湖泊营养物质的增加, 也会引起自然条件下的高山湖泊富营养化, 这对未来全球变暖背景下的湖泊富营养化预测和预防具有重要意义(Liu J B等, 2017)。

2.5.3 中国湿地研究进展

湿地是分布于陆地系统和水体系统之间的、由陆地系统和水体系统相互作用形成的自然综合体(陈宜瑜和吕宪国, 2003), 在全球生态系统中占有重要的地位, 发挥着“地球之肾”和“碳库”等生态系统功能(Millennium Ecosystem Assessment, 2005), 在中国有广泛分布, 尤其在东北和长江中下游地区(吕宪国, 2008)。中国远在古代就已有湿地记载, 历史悠久(吕宪国, 2008)。中华人民共和国成立后中国科学院在东北布置地理研究所, 重点开展湿地研究。2003年中国第一本湿地专业学术期刊《湿地科学》创刊, 2016年第十届中国国际湿地大会首次在中国举办。从20世纪90年代开始, 中国也对水稻田的 CH_4 排放开展了大量的实验监测研究工作, 发现冬灌田是 CH_4 排放量最高的一类稻田, 纠正了国际上严重高估中国和世界稻田的 CH_4 排放量的

错误(Cai等, 1997, 2000). 70年来, 湿地学科在中国经历了从探索到创建新学科的艰苦历程, 目前已初步形成了完整的学科体系(中国科学技术协会, 2012; 姜明等, 2018), 中国湿地研究逐渐形成了自己的特色, 在湿地生物地球化学循环和温室气体排放、湿地生态水文与水资源、湿地生物多样性、湿地生态系统服务、湿地生态恢复与重建等方面取得了长足进展(如Lu和Conrad, 2005).

2.6 流域模型与水土流失

流域是地球系统的缩微, 是由“水-土-气-生-人”构成的一个具有层次结构和整体功能的复杂系统(Cheng等, 2014; Li等, 2018a). 流域也是开展水土流失等自然地理学要素过程和以流域模型为主的自然地理综合体研究的重要方面. 本小节将回顾流域模型的发展, 介绍黑河流域生态-水文-经济集成模型; 回顾土壤侵蚀的研究历程, 阐述土壤侵蚀的研究内容与方法; 简述历史时期黄土高原的水土流失问题, 分析“退耕还林”政策的利弊影响; 最后, 阐述流域径流形成与转化的非线性机理, 以及蒸散发的研究进展.

2.6.1 流域模型

流域模型是认识水土资源时空演化规律及成因的重要手段, 是流域水土资源综合管理的重要工具, 是自然地理及其分支学科水文地理学的研究热点. 半个世纪以来, 流域模型迅速发展, 显著提升了人们对流域复杂行为与过程的理解(Lutz等, 2014). 国内自主研发了一系列流域模型, 主要包括分别基于蓄满产流和超渗产流理念发展的“新安江模型”和“陕北模型”(赵人俊, 1984), 结合水文循环机理与水文非线性系统理论的“分布式时变增益水循环模型”(夏军等, 2003), 基于模块化结构的“水循环模拟系统(HIMS)”(刘昌明等, 2008), 基于能水循环过程的“大流域分布式水文模型(WEP-L)”(Jia等, 2006)及在此基础上发展的“自然-社会”二元水循环模型(王浩等, 2013), 耦合冰冻圈水文过程的分布式生态水文模型GBEHM(Yang等, 2015), 以及耦合地表水-地下水-生态过程和水资源管理模块的三维分布式生态水文模型HEIFLOW(Tian等, 2018). 这些模型在流域生态水文过程认识、水资源管理以及洪水预报等方面发挥了举足轻重的作用, 促进了中国流域水文科学的迅速发展.

近年来, 在国家自然科学基金委员会重大研究计划——“黑河计划”的支持下, 由程国栋领衔的多学科研究团队针对中国干旱区内陆河流域的典型特征, 成功研制了黑河流域生态-水文-经济集成模型. 该集成模型包括了两大系统, 即自然系统模型(流域生态水文模型GBEHM和HEIFLOW)与经济系统模型, 以及连接自然系统和经济系统的界面模型——土地利用和水资源模型. 基于先进的代理建模技术, 该集成模型被成功地嵌入到一个兼容联合国可持续发展目标(SDGs)的流域决策支持系统, 真正实现以科学模型为骨架的流域发展可持续性决策支持. 该集成模型在功能完备性、适应性, 以及模拟与预测能力等方面具有明显的优势(Gao等, 2018; Li等, 2018b; Tian等, 2018), 也实现了水-生态-经济的耦合, 从而可更好地服务于流域综合管理和可持续发展目标(程国栋和李新, 2015).

2.6.2 土壤侵蚀

土壤侵蚀是指水、风等外营力对土壤的消损过程, 可导致水土流失, 引起土地退化, 影响粮食安全, 并淤积河道, 加剧洪水灾害风险, 威胁水安全. 从全球角度来说, 土壤侵蚀是土壤功能和可持续发展最大的威胁(FAO和ITPS, 2015). 目前国际上关注全球土壤侵蚀评价(Borrelli等, 2017)、人类活动对土壤侵蚀的影响(Wang等, 2016), 以及土壤侵蚀与碳氮磷循环(Van Oost等, 2007; Quinton等, 2010)等几个方面.

中国水土流失的大规模研究始于20世纪50年代, 黄秉维(1955)基于考察结果编制了黄河中游土壤侵蚀分区图, 朱显谟(1956)提出了土壤侵蚀分类系统. 中国土壤侵蚀第一个定量研究出现在1953年(刘善建, 1953). 龚时旸和蒋德麒(1978)研究小流域泥沙来源, 认为黄土高原沟间地和沟谷地土壤流失量各占一半左右, 对20世纪80年代以小流域为单元的水土保持实践起到了重要的指导作用. 钱宁等(1980)提出黄河下游河道淤积主要是由粒径 $>0.05\text{mm}$ 的粗泥沙造成, 主要来自黄河中游的粗沙多沙区. 水利部于1985年组织了第一次土壤侵蚀遥感调查, 促进了1991年水土保持法的颁布. 通过多年研究朱显谟提出了黄土高原水土保持的“28字方略”. 唐克丽(1985)科学论证了“退耕还林还草是控制水土流失最有效措施”的观点, 也有力促进了1999年退耕还林(草)重大生态工程的实施. 21世纪以来, 中国土壤侵蚀研究在侵蚀动力、过程、预报与

研究方法等方面得到了全面发展. Liu B Y等(2002)建立了中国土壤流失方程(CSLE), 在陡坡侵蚀预报和其他水土保持措施因子提取方面比美国通用土壤流失方程(USLE)更准确方便, 用于全国水土流失调查, 完成了土壤侵蚀定量制图(图9). 土壤侵蚀示踪技术也在这一阶段取得了重要进展. 例如, 张信宝等(1988)推动了 ^{137}Cs 方法在中国土壤侵蚀研究中的应用, 田均良等(1992)完善了稀土元素(REE)示踪方法.

2.6.3 黄土高原水土过程和生态系统服务

位于黄河中上游的黄土高原是黄河重要的来水区和主要的来沙区, 黄河泥沙的90%来源于黄土高原, 因此黄土高原水土流失具有全球典型性(任美镠, 2006). 从中华人民共和国成立初期到20世纪末, 长期的农业开发导致天然林草植被大面积丧失, 再加上黄土高原土质疏松, 易于侵蚀, 严重的水土流失导致地形切割破碎(Fu, 1989; Shi和Shao, 2000), 生态环境愈来愈恶化. 1999年国家实施退耕还林还草工程以来, 黄土高原土地覆盖类型发生了显著变化, 林地、草地面积增加了11.5%, 农地减少了10.8%(Feng等, 2013). 黄土高原植被覆盖影响黄河水沙变化(刘昌明, 2013; Wang等, 2016), 局部水土流失得到一定控制, 2000~2008年, 年土壤侵蚀由 3362 t km^{-2} 减至 2405 t km^{-2} , 平均年生态减沙 $5.74\times 10^8\text{ t}$ (Fu等, 2011). 黄土高原整体生态环境仍十分脆弱, 黄土高原气候干旱化会导致其土壤干燥化、土壤水植被承载力趋于弱化(郭忠升和邵明安, 2003), 但黄土高原植被恢复导致水土过程和功能的改变对当地和黄河下游的影响利弊共存, 受水分限制的影响出现高度治理区林草植被退化的现象(邵明安等, 2010). 研究也发现, 随森林覆盖率增加, 径流量反而显著减少(Feng等, 2012), 年径流量减少 10.3 mm (折合水量 $61.8\times 10^8\text{ m}^3$). 与1956~2000年间相比, 在相近降雨情况下, 2003年以来河口镇-潼关区间天然径流量减少约47%, 2010~2012年黄河中游多沙粗沙区来水来沙锐减(刘昌明, 2013). 黄土高原植被恢复应综合考虑区域的产水、耗水和用水的综合需求, 目前黄土高原植被恢复已接近自然-社会-经济水资源可持续利用阈值(Feng等, 2016). 黄土高原植被的减水减沙及其组合影响黄河下游大型水利工程安全运行、取水工程功能发挥、河道泥沙冲淤平衡乃至现行河道的健康和生命(Wang等, 2016).

2.6.4 流域径流形成与转化的非线性机理

降雨形成河川径流的过程称为径流形成与转化, 由降雨准确推断径流是水文地理学的核心问题之一. 国际上关于流域径流形成与转化的机理研究聚焦在降水-产流和土壤水的蒸散发过程的量化上. 20世纪70年代国际上水文学的主流理论是J. Dooge的水文系统线性理论, 认为降水-产汇流过程是线性化的(Beven, 2001). 土壤水的蒸散发过程则基于Monteith改进的Penman方程, 即Penman-Monteith模型(Monteith, 1965), 其奠定了流域水循环研究的基础.

中国的流域径流形成与转化机理研究始于20世纪60年代(赵人俊和庄一翎, 1963; 刘昌明等, 1965). 在湿润区, 降雨-径流的关系主要是基于蓄满产流理论, 在干旱和半干旱地区则采用超渗产流理论. 20世纪90年代以来, 受控于土壤湿度、降雨强度和下垫面组合的时变非线性产流规律被发现(Xia, 1991; Xia等, 1997), 从理论上揭示了水文非线性系统响应函数的物理机制, 创建了水文时变增益非线性系统模型, 显著提高了径流估算的准确性(图10). 在流域径流形成与转化过程中, 土壤-植物-大气系统(SPAC)是联系下垫面、土壤、植被的关键物理过程, 其中蒸散发是径流形成与“五水”转化研究中的一个薄弱环节. 中国蒸散发的研究开始于20世纪50年代以来开展的农田水量平衡、水面蒸发和蒸渗仪观测, 邓根云(1979)和傅抱璞(1981)等对Penman蒸发公式、Budyko公式进行了改进, 用于水文预报和农业灌溉指导. 20世纪90年代以后微气象、遥感技术逐步应用于不同尺度的蒸散发研究, 也开发了系列数学计算模型. Liu C M等(2002)和Mo等(2005)通过大量野外观测实验和模拟研究, 揭示了华北平原蒸散发时空变化规律, 确定年尺度土壤蒸发与总蒸散发比例约为30%. 在SPAC系统水分能量转换研究的基础上, 提出了与植被动态过程、流域空间变异性相联系的蒸散发估算模型(Mo等, 2004). 集成单元时变增益非线性机理和SPAC系统界面过程水热交换的非线性机制, 通过DEM和GIS, 将机理认识拓广到流域空间分异性的水文模拟, 同时耦合了水库闸坝及调水工程、工农业取用水等人类活动, 构建了基于物理过程的流域水循环模拟系统平台(夏军等, 2004), 用于预测和评估变化环境下流域水文水资源的响应, 以及径流形成过程与流域下垫面、人类活动和气候变化的相互

图9 中国土壤水力侵蚀强度图

作用机制。

2.7 过去人-地相互作用

人-地关系演变的过程与机制研究是地理学研究的核心科学问题之一,而过去人与环境相互作用研究是探讨不同时间尺度人地关系演化规律和影响因素的重要途径,也是自然地理学研究的热点。该领域的研究在近几十年取得了很多重要的进展,尤其在新石器文化演化与农业起源、史前人类定居青藏高原和欧亚大陆东西方交流的历史等方面,中国学者取得了国际领先水平的研究成果,为认识人类文明和人地关系演化的轨迹和动力奠定了重要基础。

2.7.1 新石器时代与农业文明

大约一万年,人类从旧石器时代进入新石器时代,生计模式也从狩猎采集过渡到动植物的驯养与利用。研究现代农作物的野生祖本何时、何地、何因、何种方式被人类驯化并传播到世界各地,是多学科领域关注的前沿科学问题。从20世纪90年代开始,浮选

法、植硅体和淀粉粒分析在中国考古学的广泛应用为推进该问题的研究起到了重要作用。中华文明是农耕文明,起源于黄河流域的粟作农业(种植粟(*Setaria italica*)与黍(*Panicum miliaceum*))和起源于长江流域的稻作农业是形成这套文明系统的经济基础。对大量考古遗址出土的植物遗存的研究表明,华北分布着中国北方最为密集的20~10ka BP(指距今)的重要考古遗址,这些遗址的植物遗存证据显示人类在末次冰盛期时已经选择类似狗尾草一类的植物进行采集和加工(Liu等, 2013); 11~9ka BP, 人类对粟的野生祖本青狗尾草进行了驯化(Yang等, 2012); ~8ka BP, 驯化完成, 粟作农业基本形成(Lu等, 2009); ~6ka BP, 中国北方黄河流域已经进入到粟作农业阶段(Barton等, 2009)。在长江中下游,人类在10ka BP前后已开始驯化野生水稻(Zhao, 1998; Zuo等, 2017); 8.5~8.0ka BP, 水稻在长江中游地区完成驯化(Deng等, 2015), 但直到~6.0ka BP, 长江下游成熟的稻作农业才得以建立(Fuller等, 2009; Ma等, 2018)。

成熟的粟作农业和稻作农业向四周扩散, 距今

图 10 非线性降雨径流形成转化原理

8000年前后在黄河以南长江以北形成粟-稻混作区(He等, 2017), 距今4000年粟-稻组合出现在福建和台湾的考古遗址(Yang等, 2018). 粟作农业向西扩散, 距今4000多年前在中亚东部与西亚来的小麦相遇(董广辉等, 2017a). 在农业起源和传播研究的基础上, 探寻人类怎样主动或被动地通过生业模式的调整来应对环境变化(Chen F H等, 2015b), 逐渐成为研究过去人-地关系演化的主要内容, 形成了环境考古这一文理交叉的新的学科生长点. 而古环境DNA提取等技术的发展, 将会推动该领域研究不断取得新进展.

2.7.2 史前人类定居青藏高原

史前人类对生存环境的适应, 是过去人与环境相互作用研究的重要方向. 青藏高原作为世界上面积最大、海拔最高的地理单元, 是对人类生存(尤其是永久定居)最具挑战性的地区之一. 因此, 史前人类向青藏高原扩散与定居的历史, 以及人类适应高寒缺氧环境的过程与机制, 是备受关注的热点科学问题, 而中国科学家则在该领域的研究中发挥了重要的作用.

最迟从20世纪70年代开始, 西藏卡若、曲贡等遗址的发现和发掘正式开启了青藏高原史前人类活动历史的研究, 随后大量地表石器地点的发现则昭示着人类进入青藏高原的时间可能早至几万年前(黄慰文等, 1987). 然而, 由于多数遗址缺少埋藏地层和直接测年

结果, 青藏高原史前人类活动的时空框架直到2000年以后才开始逐步得以建立(张东菊等, 2016). 邱桑手脚印遗址的测年结果显示, 人类在末次盛冰期(Zhang和Li, 2002)或者在全新世早期(Meyer等, 2017)已经生活在高原海拔4200m以上地区. 第二次青藏科考研究发现, 泉华中保存的邱桑手脚印可能是多期形成的. 中外合作团队的研究, 揭示人类最晚于距今1.5万年前到达青藏高原东北部, 而在全新世早中期人类活动强度则明显增加(Brantingham和Xing, 2006). 最新研究表明, 携石叶技术的现代人已于距今3~4万年前到达青藏高原腹地(Zhang X L等, 2018), 而在距今16万年前丹尼索瓦人已经生活在青藏高原东北部(Chen等, 2019b), 这不仅将青藏高原人类活动历史向前推进几万甚至十几万年, 而且获得了人群种属和文化内涵等重要信息. 史前人类对高海拔环境适应机制研究近年也取得了关键突破, Chen F H等(2015b)研究显示耐寒农作物大麦和家畜羊的引进和利用, 是促成人类在距今3600年之后大规模永久定居青藏高原的主要动力. 然而, 也有学者提出狩猎采集人群已于全新世早期定居青藏高原的观点(Meyer等, 2017), 但存在较大争议(Zhang D J等, 2017). 此外, 遗传学和语言学研究也得出了与考古学研究基本一致的结论, 并发现了高海拔人群的环境适应基因EPAS1, 且认为该基因来自丹尼索瓦人(Huerta-Sánchez等, 2014).

2.7.3 欧亚大陆史前时代东西方文化交流

欧亚大陆史前东西方文化交流历史研究是地理学、考古学和人类学等多学科长期关注的科学问题。21世纪初以来, 该方向的研究取得了快速的发展。一方面, 欧亚大陆不同地区考古材料的积累为研究东西方文化交流历史提供了关键的材料; 另一方面, 自然科学的研究方法和模型模拟在考古学研究中的广泛应用(Frachetti等, 2017), 使更多古人类信息得到有效的提取。通过对欧亚大陆出土文化遗存史前遗址时空分布的梳理, 西亚起源文化元素(如金属器、权杖头等)东传, 东亚起源文化元素(如东亚风格的彩陶)西传的历史脉络逐渐清晰。在此基础上, 史前东西方文化交流的时空框架也得到了重建(Kuzmina和Mair, 2008)。

相对于器物遗存, 分别起源于东亚的农作物粟黍和西亚的农作物小麦大麦与家畜羊的遗存由于可以被直接测年, 成为研究欧亚大陆史前东西方文化交流历史更有效的材料。Zhao(2009)提出小麦跨大陆传入中国的三条可能路线, Long等(2018)根据山东省赵家庄和丁公等遗址出土的小麦遗存直接测年结果, 提出小麦在龙山文化时期(4.6~4ka BP)已从欧亚草原传入黄河下游。Liu X Y等(2019)系统总结了植物考古的研究结果, 探讨了主要农作物水稻、粟黍、小麦、大麦和高粱在欧亚非大陆的传播历史。董广辉等(2017b)从农作物传播的视角, 梳理了欧亚大陆史前东西方交流的时空过程, 认为东西方文化交流在4.5ka BP左右在哈萨克斯坦东部出现, 3.5ka BP之前主要集中在中亚东部和中国西北地区, 在汉代之前东西方文化交流的范围已经扩展至欧亚大陆东西两侧。

欧亚大陆史前东西方文化交流对人与环境相互作用的模式产生了重要影响(董广辉等, 2017a; Dong等, 2019)。以丝绸之路关键组成部分的甘青地区为例, 该地区的东西方文化交流在4ka BP左右出现(Dong G H等, 2018)。在此之前, 气候冷干事件是导致新石器文化转型和人类生存空间收缩的重要因素, 人类活动对环境虽然有影响但非常微弱。西亚文化元素传入后, 4~3.5ka BP的气候冷干趋势则导致多支青铜文化的空间分异(Ma等, 2016), 而青铜文化遗址的分布空间则较新石器时代显著拓展, 耐寒的作物大麦和家畜羊的传入和利用促使人类在气候冷干背景下大规模永久定居至青藏高原高海拔地区(Chen F H等, 2015b)。此外, 冶

金技术的传入, 还促使人类活动对生存环境的影响显著增强(Yang等, 2017)。

2.8 生物地理

生物地理学是研究生物圈中各种生物的地理分布规律、生物圈各结构单元(各地区)的生物种类组成、特征及其与自然环境之间相互关系的科学, 分为植物地理学和动物地理学等。在全球变化和经济全球化的趋势下, 从微观和宏观尺度两个方向深化生物地理学的研究, 探讨动植物的适应性和竞争性的变化趋势及其驱动机制, 对学科理论和方法进步以及生态文明建设具有重要作用。20世纪初, 西方学者如L. Diels、Handel-Mazzetti、F. K. Ward等及中国学者胡先骕、刘慎谔、李惠林等开启了早期中国植物地理学研究。20世纪中后期, 吴征镒(1965)发表的“中国植物区系的热带亲缘”成为中国植物区系地理学系统全面研究的标志。吴征镒(1979)将中国植物区系划分为2个植物区、7个亚区和22个地区、11个亚地区; 此后完善中国植物区系的分区系统, 将中国植物区系分为4个植物区、7个亚区、24个地区和49个亚地区(陈灵芝等, 2014)。此外, 吴征镒和王荷生(1983)将中国种子植物属划分为15大分布区类型和31个变型, 此后又进一步完善(Wu和Wu, 1998; 陈灵芝等, 2014)。吴征镒等(2003)基于传统的系统进化并结合地理分布式样, 系统阐明了中国科属植物地理特征。伴随分子生物地理学的诞生, 中国已有超过300个以上的科属或支系开展了分子生物地理学的研究, Chen等(2018)综合分析了中国种子植物主要支系的分子生物地理进化, 并结合古植物学证据等指出中国植物区系是中新世以来, 在季风气候形成的背景下发展起来的年轻的植物区系, 并将中国植物区系的核心分成了西翼的“杜鹃植物区系”和东侧的“水杉植物区系”。谱系地理学的出现, 为探讨植物区系的种群分化历史供了直接的证据(Liu等, 2012), 至今为止, 也有超过120个物种开展了谱系地理学的研究, 揭示了中国植物区系冰期的避难所(Qiu等, 2011)。

植物地理学研究已步入了多学科交叉融合、各类数据集成的大数据时代, 植物地理学的研究由定性的现象认识和描述阶段, 逐步进入到了定量解释植物地理现象和探索其形成机制的纪元(孙航等, 2017)。利用大数据, 可客观地揭示中国植物地理空间格局、特有中心及分区等(Huang等, 2012; Zhang D C等, 2016;

Zhang M G等, 2016). 结合分子系统发育和分子生物地理甚至基因组进化等, 能揭示区系的起源、形成时间与进化机制. 近年来, 整合系统发育信息到不同尺度的植物地理研究中, 用以探讨区系的系统发育多样性、进化潜力及形成时间, 并形成了系统发育区系学, 如中国植物区系的研究(Chen等, 2018; Lu等, 2018)、青藏高原植物区系的来源(Wen等, 2014; Sun等, 2017)、云南植物区系分区(Li R等, 2015)等. 近来谱系地理学证据也为探讨植物区系的次级分区及地理分界线等提供了新的视野(Lin等, 2018), 生态位模型或物种分布模型概念的提出为分析物种空间格局提供了新的方法, 这也是生物地理学发展的新趋势, 如华南及越南北部有众多古老支系的成因分析(Tang等, 2018).

动物地理学研究方面, 以张荣祖为代表的中国科学工作者做了开创性和系统性的工作. 首先, 阐明了陆栖脊椎动物区系起源和演变概貌, 提出中国动物的种数, 陆栖脊椎动物约有2000余种, 约占全世界总种数的10.2%(张荣祖, 2011). 其次, 研究发现中国陆栖脊椎动物的主要分布型可归为10类, 物种相似分布型的产生是物种为适应外在条件在分布上趋同演化所形成的, 与地质发育与自然地理条件相联系. 第三, 陆栖脊椎动物对自然条件的适应, 不仅表现在区系分布的特征上, 而且也表现在同一环境中各种动物在生态习惯上有不同程度的相似性. 中国气候-植被带各具不同的动物生活条件, 所以在各带中动物的组成和生态也各不相同. 中国范围内可划分为8个基本的生态地理动物群. 第四, 根据对中国现代陆栖脊椎动物及昆虫地理分布的研究, 中国大陆的动物区系分属于世界动物地理区划的两个界(古北界和东洋界), 此两界在中国大致以淮河-秦岭一线为限. 界内进一步划分为若干地理区和地理亚区(张荣祖, 2011).

2.9 自然地理地带性

德国学者C. Troll最早提出了“三维地带性”的概念(Troll, 1959), 拟阐明山地或高原地理环境具有多向变化的特点, 是对地理环境复杂性的重要认识方式. 中国是一个多山和拥有独特地域单元(特别是青藏高原)的国家, 其三维地带性的研究经历了类型划分、规律性探讨、驱动力分析、规律应用等几方面. 中国老一代学者对中国山地植被垂直带系统归属、划分和变化规律做了详细的调查和科学分析. 比如, 黄锡畴(1962)从

气候空间分异角度, 明确了中国北方山地垂直带结构类型的归属问题. 张新时(1994)从宏观上概括了中国山地植被垂直带系统的基本类型及其与水平地带的关系. 在3S技术系统和现代地理信息图谱理论发展的大环境下, 中国新一代学者将垂直带空间规律和山体效应研究推向新的发展高度. 相关研究(张百平和姚永慧, 2015; Zhang和Yao, 2016)建立了中国及欧亚大陆山地垂直带谱信息系统, 并通过山体效应的量化研究, 全面系统地揭示了全球林线、雪线等关键地理界限的高度变化规律和机理.

青藏高原是研究地理现象三维地带性的天然实验室. 中国老一代学者对青藏高原三维地带性的研究做了开创性和基础性的贡献(图11). 郑度(1996)对青藏高原的三维地带性进行了全面深入的研究, 包括垂直自然带谱结构类型的划分, 主要带谱系统的基本特征及空间分布模式. 王金亭等(1994)则从不同地理要素归纳了关于青藏高原的植被地带性的不同观点. 在可持续发展和生态文明建设背景下, 相关研究中突出了高原土地利用和土地覆被主要类型的三维格局分布、动态变化及生态作用(张懿铨, 2012), 注重典型区三维空间特征与人类活动关系的相互作用, 以及高原区域适应对策; 特别对珠峰地区土地覆被的三维地带性进行了精确刻画, 提出了适于山地垂直带定量分析的垂直带的“垂直分布上/下限”“核心分布带”和“优势带”等科学术语与科学表述某类型的垂直分布型的分布模式系统, 并对三维分布变化的驱动力进行了探索(张懿铨等, 2019); 基于三维地带性规律提出的加强青藏高原生态与环境监测和研究、区域适应和生态建设等建议, 为青藏高原国家生态安全屏障保护与建设做出了实际贡献(孙鸿烈等, 2012; Zhang Y等, 2014, 2016).

3 结论与展望

地貌与气候是自然环境的两个最主要的基本要素, 相应的地貌学和气候学就成为了自然地理学的基础学科, 这就奠定了自然地理学在地貌演化、气候环境变化, 特别是第四纪环境演变等研究方面的突出地位. 在地貌和气候两个因素作用下, 水文、土壤、生物等随时间和空间发生变化, 相应的水文地理学、土壤地理学、生物地理学、环境地理学也成为自然地

图 11 青藏高原垂直自然带结构类型分布模式

1, 冰雪带; 2, 亚冰雪带; 3, 高山荒漠带; 4, 高山荒漠草原带; 5, 高山草原带; 6, 高山草甸、座垫植被带; 7, 高山草甸带; 8, 高山灌丛草甸带; 9, 山地荒漠带; 10, 山地荒漠草原带; 11, 山地草原带; 12, 山地森林、草原带; 13, 山地灌丛草甸; 14, 干旱河谷灌丛带; 15, 山地暗针叶林带; 16, 山地针阔叶混交林带; 17, 山地(暖热性)松林; 18, 山地常绿阔叶林带; 19, 现代雪线; 20, 森林上线; 21, 山麓线。据郑度和李炳元(1990)

理学重要的二级学科, 并在水资源管理、土地利用(土壤侵蚀)、生态系统服务、污染防治研究方面成为自然地理学家的研究对象。纵观中国自然地理学研究走过的道路, 可以概括为: 国家发展需求带动了中国自然地理学的整体发展; 中国自然环境要素的多样性丰富、格局的差异性显著、区域的特色性独特, 加之中国具有悠久的强烈人-环境相互作用历史和连续的文明演化历程, 促成了中国自然地理学研究整体处于国际研究的第一方阵; 从国外如欧美发达国家留学回国的自然地理学者及其积极主动的国际合作, 促进了中国自然地理学研究处于国际前沿; 坚持观测-分析-模拟-预测相结合的现代化研究手段和方法, 是推动中国自然地理学研究达到国际领先水平的必经之路; 利用中国自然环境要素和综合体的独特性, 在全球视野下开展中国特色自然地理研究, 今后才有可能引领国际自然地理学的发展。下面作者对中国自然地理学的未来发展提出思考与展望, 仅供大家讨论。

3.1 中国自然地理与生存环境研究正在全面走向国际研究第一方阵

国际上自然地理学均是伴随着国家需求驱动发展起来的。大航海全球殖民时代的葡萄牙、西班牙, 工业化时代的英国, 一战二战前后的德国, 扩张时期的苏联和崛起的俄罗斯, 以及现代以美国为代表的经济发达国家, 都出现了一批对理解全球和区域自然环境格局和过程有重要贡献的科学家, 如提出自然地带性规律的德国科学家亚历山大·洪堡、提出土壤地带性规律的苏联地理学家道库恰耶夫(蔡运龙, 2010)。中国的自然地理学是在国家组织的综合考察和调查的基础上发展起来的(陈传康等, 1994)。中华人民共和国成立以后, 国家急需摸清自然资源和自然环境家底, 建设更美好的生存环境, 中国在原有中国科学院地理研究所的基础上, 在不同区域设立了针对不同自然地理要素和类型的研究机构, 许多省份亦成立了地理研究所; 在中国科学院知识创新工程科技布局和组织结构调整中,

于2003年还成立了以独具特色的青藏高原地球系统科学(核心是地球表层系统)研究为核心的青藏高原研究所. 以上举措形成了中国自然地理学研究的主体力量. 同时, 基于国家需求, 主要大学纷纷成立地理系, 多数以自然地理为重点, 成为了中国自然地理与生存环境研究的重要力量. 中华人民共和国成立70年以来中国自然地理研究取得的重要进展、重大成果均来自中国科学院地理研究机构和具有区域研究特色的重要大学, 不论在国际SCI刊物的总发文量, 还是在如《Nature》《Science》等具有重大影响的国际重要学术刊物上的发文量, 以及获得国际重要奖项(如瑞典人类学和地理学会的维加奖)等方面均逐步走向国际自然地理研究的第一方阵, 个别自然地理要素研究处于国际领先水平.

中国在亚洲内陆干旱环境和地貌景观演化方面的研究是自然地理学中自然环境演化研究的典型案例. 今后需要统筹考虑副特提斯海退缩、青藏高原隆升、新生代全球降温等构造/气候事件在干旱化进程中的相对作用; 实施沙漠钻探以探究沙漠景观和内陆干旱化的异同, 并需要在基于可靠年代和可信代用指标的气候重建下, 开展与模式模拟结果的对比. 干旱化研究中的风沙地貌研究应当拓展到地外行星, 例如火星风沙地貌形成机制与地球上最高大沙山(巴丹吉林沙漠地貌)的类比研究, 自然地理学研究应当主动拓展到“三深一系统”中的“深空”研究, 为认识地外行星的现代表面过程和演化历史提供重要信息.

中国低海拔区域主要可以划分为受季风环流影响的季风区和主要受西风环流控制的内陆干旱区. 关于亚洲夏季风变化, 自然地理学主要关注晚第四纪, 尤其是现代间冰期(全新世)的季风变化. 未来基于降水指标的夏季风强度定量重建将为更进一步深刻认知东亚夏季风提供有效的途径, 进而为研究轨道时间尺度上东亚夏季风影响下中国东部降水的南北空间模态提供可能; 在青藏高原南部、中国西南等地的印度夏季风变化研究, 是推动理解印度夏季风变化规律及其与东亚夏季风相位关系的重要举措; 在全球变暖和人类活动影响下的未来季风变化及其影响也将会是科学界和社会关注的重点问题. 关于西风区气候变化, 不仅在区域上需要考虑整个中西亚干旱区, 在时间尺度上还需要拓展到冰期-间冰期尺度, 探索西风区和季风区湿度是否确如黄土记录指示的(Ding等, 2002)出现同步

变化, 机理如何? 西风区温度变化有何特征, 不同时间尺度水热配置怎样? 随着全球进一步升温, 西风区会变得更湿还是更干, “西风模态”是否仍然存在? 此外, 不论是中国季风区还是西风区, 主要气候因子的定量重建方法成为未来主攻的方向, 包括生物标志化合物重建温度的季节偏向性问题, 孢粉的定量温度、降水重建显著性检验的主控气候因子提取(如陈建徽等, 2018)和分时段主控因素变化的定量重建困难, 以及实现模拟与记录重建的相互验证支持问题. 在年分辨率的树轮气候重建中, 如何解决低频变化重建困难、获得更长时间序列, 以及探索新指标提高重建的可信性, 提供可信树轮重建网格化气候变化资料为模式预测气候变化趋势服务问题是今后应当主攻的方向. 过去人-环境相互作用也是自然地理学的重要研究方向, 应当加强研究人类演化的不同阶段和不同空间尺度过去人与环境的相互作用, 理解智人在全球扩散过程中的适应和影响, 研究农业起源和传播的自然环境驱动作用及其对生存环境的影响, 深化理解文明演化与环境变化关系. 充分利用中国的材料, 研究中国本土早期智人、丹尼索瓦人、尼安德特人及与现代智人的关系和环境影响, 北方粟作农业、南方稻作农业的起源、扩散和影响, 理解跨大陆人群、技术交流和史前人类向青藏高原扩散并最终定居的过程和机制. 随着研究资料的积累和研究方法的不断进步, 过去人与环境相互作用的研究有望取得更多的国际性前沿成果.

3.2 国际接轨和手段现代化的研究推动中国自然地理研究走向国际前沿

作为地理科学基础学科的自然地理学, 近70年来取得了显著发展, 主要原因可能是中国的自然地理学研究不但立足中国具有特色的自然地理环境要素和综合体开展研究工作, 而且始终保持在国际层面的交流和竞争, 更重要的是研究手段的定量化和现代化. 过去70年的中国自然地理研究, 在开展气候与自然环境要素(如温度、降水、植被、沙漠、冰川、湖泊等)时间演化历史和规律, 以及理解过去人-环境相互作用方向, 基本与国际保持同步发展, 采用了研究对象的样品采集、实验室分析和概念模型机理探讨; 在自然环境空间格局研究方向多采用了定位观测、定量化分析和模型模拟的现代化研究手段. 中国自然地理学发展应当建立星空地定位观测体系, 采用实验室分析测试和

指标探索,开展模型模拟和预测,达到理解过去,把握现状、预测未来的目标。聚焦人类生存环境中的地球陆地表层系统,重视了解当代人类生存环境必不可少的空间变异和时间过程,认识地球自然环境怎样成为人类活动的基础并受人类活动的影响(Gregory, 2000; 蔡运龙等, 2009; 刘焱序等, 2018),牢牢占据中国地球科学倡导的“三深一系统”国家战略中的地球表层系统,并发扬在国际视野和国际层面竞争的传统,在现有国际相关大型研究计划,如地圈-生物圈计划(IGBP)、国际全球环境变化人文因素计划(IHDP)、全球环境变化(GEC)、千年生态系统评估(MA)、未来地球计划(FE)、可持续发展目标(SDGs)中发挥着重要作用。中国自然地理学尤其还应当注重开展中国特色的自然地理研究,如中国生存环境和宜居性、生态服务、地缘战略、全球化、环境地理等,逐步走向国际自然地理学研究的前沿。

中国多样性的自然环境加上强烈的人类活动以及受全球变化影响显著等特点,在湖泊湿地研究方面,未来应以建立系统定位观测和模式模拟为基础,统筹考虑污染、富营养化和全球变化等多因子胁迫下湖泊变化,建立湖泊水动力、水质和水生态不同单元之间的关系,揭示地理差异对湖泊生态系统的影响,深化对浅水湖泊生态系统演替规律、机理以及人类活动影响的认识,发展中国特色的浅水湖泊湖沼学,理解湖泊湿地水文过程和生态功能,为湿地保护与恢复提供科学基础;在自然地理学家开展的水文研究方面,应侧重社会水文学的探索与研究,包括全球变化影响和社会经济发展联系的水与气候、水与环境、水与生态、水与社会联系的水系统科学复杂性。同时,在流域系统定位观测基础上,开展以流域为单元的流域水文模型研究,提升流域模型对自然过程(如生态水文与区域气候之间的互馈影响)的刻画能力,并加强流域自然过程模型与社会经济系统模型之间的深度耦合。此外,应重视流域模型在科学与决策之间的桥梁作用,通过整合多源观测、专家知识、网络大数据,实现定性到定量信息的融合,充分发挥流域模型的决策支持作用;土壤地理的研究方面,重点应是土壤侵蚀和水土流失基础和防止研究,应加强开展全国水土流失动态监测,利用遥感技术提取土壤侵蚀因子,对土壤侵蚀进行预报,今后还应当将研究区域扩展到泛第三极地区,进行国际土壤侵蚀制图,重点解决尺度转化问题;生物地理

方面,自然地理学研究应当实现研究手段的现代化,借鉴生物学的最新手段,注重大数据和分子生物学手段,解决学科交融中的突出科学问题,开展热点和关键地区生物区系特征、区系起源与历史演化、人类扩散与区域生物组成变迁的关系研究,开展生态文明建设的生物地理学相关研究,服务国家生态文明建设的需求;综合自然地理研究方面,黄土高原的地质均一性为研究提供了难得的典型区域,其气候-生态-水文系统的反馈机制仍是今后的重点。

3.3 立足中国特色在全球视野下的自然环境研究推动中国自然地理研究引领国际前沿

20世纪地球科学的最大突破是板块构造理论,青藏高原成为验证板块构造理论的最佳试验场。21世纪地球系统科学是地球科学新的突破方向,青藏高原最有可能成为地球系统科学重大原始创新理论新突破的策源地,将带动地球科学许多关键核心技术从0到1的突破。青藏高原是世界屋脊、亚洲水塔、地球第三极,亦是地球上六大圈层(岩石圈、水圈、冰冻圈、大气圈、生物圈和人类圈)发育最全和相互作用最为剧烈的地区,以其强烈的多圈层相互作用和局域、广域资源环境效应而闻名于世,是国际地球系统科学研究的天然实验室,是开展自然环境形成演化和全球变暖下地表响应及其区域与全球影响的最理想场所。印度大陆与欧亚大陆于距今6500万年前首先在中部碰撞,然后向两侧逐渐关闭,从大洋俯冲到大陆俯冲的转换及大陆岩石圈俯冲的壳幔作用过程,导致印度与欧亚大陆岩石圈的南北双向俯冲,形成独特的青藏高原岩石圈大地构造(Ding等, 2007),再到大气圈、生物圈、水圈和冰冻圈等的链式响应和反馈作用,无疑为开展地球系统研究中最核心的圈层相互作用研究提供了最难得的条件(Yao等, 2015),尤其是为自然地理学开展地球表层系统研究提供了发挥作用的场所。中国自然地理学家在青藏高原隆起的地貌过程、河流演化、生物效应、气候变化方面已经开展了国际前沿的研究,发起了第三极环境(TPE)国际计划,研究区域从青藏高原扩展到第三极,再到发起泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设研究(姚檀栋等, 2017),自然地理学家积极发挥作用推进“三极环境与气候变化”国际大科学计划这一国家大战略,中国的自然地理才有可能引领全球研究。中国科学院的“丝路环境”A类先导专项和即将

实施的第二次青藏高原综合科学考察研究国家专项,必将极大带动多学科交叉和综合集成,为中国自然地理学研究引领世界研究提供了持续的经费支持。

在现有研究基础上,在青藏高原隆升、地貌演化、冰川和大江大河发育方面,先进测年手段和可靠测年材料是年代突破的关键,建立可靠可信年代序列是基础,开发新的古高度计精确确定不同部位古高程是高原隆升研究的核心。自然地理学研究应当与地质研究结合,统筹考虑沉积和地貌记录,大力发展数值模拟手段,才能全面揭示高原隆升导致的河流演化、自然环境(如冰川发育)响应及其对区域和全球的影响,提出中国自己的构造-地貌-气候作用假说。青藏高原隆起的链式响应过程和反馈研究将为地球科学研究提供范例,也为“三极环境与气候变化”国际大科学计划的实施打好基础。

在目前全球变暖背景下,青藏高原自然地理系统(地表系统)产生了显著变化和相互作用。抢救性地钻取青藏高原冰芯,建立完整的冰芯样品库已刻不容缓;发展新的测年手段,突破冰芯年龄瓶颈,发展冰芯新环境指标尤其重要。快速变化的冰川需要新的监测手段(重点利用卫星遥感技术),尤其是冰崩(如2016年阿汝冰崩(Kääb等, 2018))、冰湖溃决及冰川泥石流等潜在风险的监测和预报更为迫切,提出冰川变化假说并结合模式模拟给出可信的未来变化趋势显得更重要;青藏高原特色的冻土变化、湖泊变化和植被变化需要在定位观测、卫星遥感监测基础上,开发新的研究方法及探测技术,结合模型理解其在全球变化驱动下的区域变化差异和全球共性问题。青藏高原自然地理要素和地表系统变化及其相互作用,更需要开发中国自己的青藏高原区域地球系统变化模式。这些研究将会为国家发起的“三极环境与气候变化”国际大科学计划提供表层系统研究的范例,最终引领国际自然地理学的发展。

综上所述,在全球环境变化和全球经济一体化的宏观背景下,中国自然地理学需要重点研究的科学问题是自然地理要素特征及其变化的成因机理,以及这种变化所造成的影响和人类如何适应,其中包括变化的幅度和速率,以及自然和人文驱动要素的归因。自然地理学的重点研究内容包括:(1)自然要素相互作用的机制研究,通过理解自然要素相互作用过程的机理,揭示其动态变化的规律,预估未来发展的趋势;(2)

基于区域研究的视角,通过“要素-过程-格局”的综合研究模式,提高区域社会经济建设中对资源环境的认识,降低对生态环境的压力;(3)应用现代先进技术,针对未来发展的情景,从生态环境和人类福祉之间的内在关系,提出解决阻碍社会经济可持续发展的科学对策,实现对自然资源和生态环境的有效调控和管理。

致谢 本文是《中国科学: 地球科学》发起为中华人民共和国成立70周年献礼而特邀的学科发展综述论文,文中自然地理学各分支学科和方向的进展都是相关学科的领军科学家完成的,多数作者的排名按照学科和单位统筹考虑。论文在完成过程中,有非常多的学者先后参与了这项工作,不能全部列为作者,在此一并致谢。

参考文献

- 蔡运龙. 2010. 当代自然地理学态势. 地理研究, 29: 1–12
- 蔡运龙, 宋长青, 冷疏影. 2009. 中国自然地理学的发展趋势与优先领域. 地理科学, 29: 619–626
- 陈传康, 郑度, 申元村, 杨勤业. 1994. 近10年来自然地理学的新进展. 地理学报, 49: 684–690
- 陈发虎, 范育新, Madsen D B, 春喜, 赵晖, 杨丽萍. 2008a. 河套地区新生代湖泊演化与“吉兰泰-河套”形成机制的初步研究. 第四纪研究, 28: 866–873
- 陈发虎, 范育新, 春喜, Madsen D B, Oviatt C G, 赵晖, 杨丽萍, 孙洋. 2008b. 晚第四纪“吉兰泰-河套”古大湖的初步研究. 科学通报, 53: 1207–1219
- 陈发虎, 黄伟, 靳立亚, 陈建徽, 王劲松. 2011. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异. 中国科学: 地球科学, 41: 1647–1657
- 陈建徽, 吕飞亚, 黄小忠, Birks H J B, Telford R J, 张生瑞, 许清海, 赵艳, 王海鹏, 周爱锋, 黄伟, 刘建宝, 魏国英. 2018. 基于孢粉的古气候参数定量重建: 一种新思路及其在中国的应用实例. 中国科学: 地球科学, 48: 42–50
- 陈建徽, 饶志国, 刘建宝, 黄伟, Feng S, 董广辉, 胡玉, 许清海, 陈发虎. 2016. 全新世东亚夏季风最强盛期出现在何时?——兼论中国南方石笋氧同位素的古气候意义. 中国科学: 地球科学, 46: 1494–1504
- 陈灵芝, 孙航, 郭柯. 2014. 中国植物区系与植被地理. 北京: 科学出版社. 596
- 陈宜瑜, 吕宪国. 2003. 湿地功能与湿地科学的研究方向. 湿地科学, 1: 7–11
- 程国栋, 李新. 2015. 流域科学及其集成研究方法. 中国科学: 地球科学, 45: 811–819
- 程国栋, 吴青柏, 马巍. 2009. 青藏铁路主动冷却路基的工程效果. 中

- 国科学: 技术科学, 39: 16–22
- 崔之久. 1958. 贡嘎山现代冰川的初步观察-纪念为征服贡嘎山而英勇牺牲的战友. 地理学报, 24: 318–342
- 德日进, 杨钟健. 1930. 山西西部陕西北部蓬蒂纪后黄土期前之地层观察. 地质专报甲种8号, 1–19
- 邓根云. 1979. 水面蒸发量的一种气候学计算方法. 气象学报, 37: 87–96
- 董光荣. 2002. 中国沙漠形成演化气候变化与沙漠化研究. 北京: 海洋出版社. 734
- 董广辉, 杨谊时, 韩建业, 王辉, 陈发虎. 2017a. 农作物传播视角下的欧亚大陆史前东西方文化交流. 中国科学: 地球科学, 47: 530–543
- 董广辉, 刘峰文, 陈发虎. 2017b. 不同空间尺度影响古代社会演化的环境和技术因素探讨. 中国科学: 地球科学, 47: 1383–1394
- 董治宝, 苏志珠, 钱广强, 罗万银, 张正偲, 吴晋峰. 2011. 库姆塔格沙漠风沙地貌. 北京: 科学出版社. 484
- 方小敏, 李吉均, 朱俊杰, 陈怀录, 曹继秀. 1997. 甘肃临夏盆地新生代地层绝对年代测定与划分. 科学通报, 42: 1457–1471
- 傅抱璞. 1981. 土壤蒸发的计算. 气象学报, 39: 23–31
- 傅伯杰. 2018. 新时代自然地理学发展的思考. 地理科学进展, 37: 1–7
- 葛全胜. 2011. 中国历朝气候变化. 北京: 科学出版社. 709
- 龚时旸, 蒋德麒. 1978. 黄河中游黄土丘陵沟壑区沟道小流域的水土流失及治理. 中国科学A辑, 21: 671–678
- 郭忠升, 邵明安. 2003. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力. 生态学报, 23: 1640–164
- 黄秉维. 1955. 编制黄河中游流域土壤侵蚀分区图的经验教训. 科学通报, 12: 15–21
- 黄秉维. 1959. 中国综合自然区划草案. 科学通报, 18: 594–602
- 黄秉维. 1960. 自然地理学一些最主要的趋势. 地理学报, 26: 149–154
- 黄慰文, 陈克造, 袁宝印. 1987. 青海小柴达湖的旧石器. 见: 中国-澳大利亚第四纪学术讨论会论文集. 北京: 科学出版社. 168–175
- 黄锡畴. 1962. 欧亚大陆温带山地垂直带结构类型. 中国地理学会和中国科学院地学部, 编. 一九六〇年全国地理学术会议论文选集. 北京: 科学出版社. 356
- 姜明, 邹元春, 章光新, 佟守正, 武海涛, 刘晓辉, 张仲胜, 薛振山, 吕宪国. 2018. 中国湿地科学研究进展与展望——纪念中国科学院东北地理与农业生态研究所建所60周年. 湿地科学, 16: 279–287
- 孔繁翔, 高光. 2005. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. 生态学报, 25: 589–595
- 李炳元. 2000. 青藏高原大湖期. 地理学报, 55: 174–182
- 李吉均. 1990. 中国西北地区晚更新世以来环境变迁模式. 第四纪研究, 3: 197–204
- 李吉均, 方小敏, 马海洲, 朱俊杰, 潘保田, 陈怀录. 1996. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起. 中国科学D辑: 地球科学, 26: 316–322
- 李吉均, 方小敏. 1998. 青藏高原隆起与环境变化研究. 科学通报, 43: 1569–1574
- 李吉均, 文世宣, 张青松, 王富葆, 郑本兴, 李炳元. 1979. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨. 中国科学, 6: 608–616
- 李吉均, 郑本兴, 杨锡金. 1986. 西藏冰川. 北京: 科学出版社. 328
- 李四光. 1947. 冰期之庐山. 国立中央研究院地质研究所专刊. 乙种第二号, 1–60
- 李文朝. 1996. 浅型富营养湖泊的生态恢复——五里湖水生植被重建实验. 湖泊科学, 8: 1–10
- 刘昌明. 2013. “绿水”研究与生态维护的探讨. 北京: 流域水环境保护与技术创新论坛
- 刘昌明, 洪宝鑫, 曾明煊, 程义. 1965. 黄土高原暴雨径流预报关系初步实验研究. 科学通报, 2: 158–161
- 刘昌明, 王中根, 郑红星, 张穆, 吴险峰. 2008. HIMS系统及其定制模型的开发与应用. 中国科学E辑: 技术科学, 48: 350–360
- 刘东生. 1985. 黄土与环境. 北京: 科学出版社. 497
- 刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 1998. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性. 第四纪研究, 18: 194–204
- 刘建宝, 陈发虎, 陈建徽, 许清海, 夏敦胜, 王宗礼, 李月丛. 2011. 山西宁武公海湖泊岩芯的环境磁学特征及中世纪暖期湿润气候探讨. 科学通报, 56: 2580–2590
- 刘善建. 1953. 天水水土流失测验的初步分析. 科学通报, 12: 59–65
- 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 许君利, 上官冬辉, 魏俊峰, 鲍伟佳, 吴立宗. 2015. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. 地理学报, 70: 3–16
- 刘焯序, 杨思琪, 赵文武, 傅伯杰. 2018. 变化背景下的当代中国自然地理学——2017年全国自然地理学大会述评. 地理科学进展, 37: 163–171
- 刘禹, 安芷生, Linderholm H S, Chen D, 宋慧明, 蔡秋芳, 孙军艳, 田华. 2009. 青藏高原中东部过去2485年以来温度变化的树轮记录. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 166–176
- 隆浩, 沈吉. 2015. 青藏高原及其邻区晚更新世高湖面事件的年代学问题——以柴达木盆地和腾格里沙漠为例. 中国科学: 地球科学, 45: 52–65
- 隆浩, 张静然. 2016. 晚第四纪湖泊演化光释光测年. 第四纪研究, 36: 1191–1203
- 吕宪国. 2008. 中国湿地与湿地研究. 石家庄: 河北科学技术出版社. 922
- 马柱国, 符淙斌. 2006. 1951–2004年中国北方干旱化的基本事实. 科学通报, 51: 2429–2439
- 潘保田. 1991. 黄河发育与青藏高原隆起问题. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学
- 濮培民, 王国祥, 胡春华, 胡维平, 范成新. 2000. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? 湖泊科学, 12: 269–279
- 钱宁, 王可钦, 闫林德, 府仁寿. 1980. 黄河中游粗泥沙来源区对黄河

- 下游冲淤的影响. 第一次河流泥沙国际学术讨论会论文集. 53–62
- 强小科, 安芷生, 宋友桂, 常宏, 孙有斌, 刘卫国, 敖红, 董吉宝, 符超峰, 吴枫, 卢凤艳, 蔡演军, 周卫健, 曹军骥, 徐新文, 艾莉. 2010. 晚渐新世以来中国黄土高原风成红粘土序列的发现: 亚洲内陆干旱化起源的新记录. 中国科学: 地球科学, 40: 1469–1488
- 秦伯强, 胡维平, 陈伟民. 2004. 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社. 397
- 秦伯强, 谢平. 2005. 长江中下游地区湖泊内源营养负荷、循环与富营养化. 中国科学D辑: 地球科学, 35(增刊): 1–202
- 秦伯强, 杨桂军, 马健荣, 邓建明, 李未, 吴挺峰, 刘丽贞, 高光, 朱广伟, 张运林. 2016. 太湖蓝藻水华“暴发”的动态特征及其机制. 科学通报, 61: 759–770
- 任美镔. 2006. 黄河的输沙量: 过去、现在和将来——距今15万年以来的黄河泥沙收支表. 地球科学进展, 21: 551–563
- 邵明安, 郭忠升, 夏永秋, 王延平. 2010. 黄土高原土壤水分植被承载力研究. 北京: 科学出版社. 342
- 施雅风. 2005. 简明中国冰川目录. 上海: 上海科学普及出版社. 194
- 施雅风, 崔之久, 李吉均. 1989. 中国东部第四纪冰川与环境问题. 北京: 科学出版社. 462
- 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 唐领余, 王富葆, 姚檀栋, 赵希涛, 张丕远, 施少华. 1993. 中国全新世大暖期鼎盛阶段的气候与环境. 中国科学B辑, 23: 865–873
- 施雅风, 刘时银. 2000. 中国冰川对21世纪全球变暖响应的预估. 科学通报, 45: 434–438
- 施雅风, 曲耀光. 1989. 柴窝堡-达坂城地区水资源与环境. 北京: 科学出版社. 192
- 施雅风, 汤懋苍, 马玉贞. 1998. 青藏高原二期隆升与亚洲季风孕育关系探讨. 中国科学D辑: 地球科学, 28: 263–271
- 孙航, 邓涛, 陈永生, 周卓. 2017. 植物区系地理研究现状与发展趋势. 生物多样性, 25: 111–122
- 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张懿铨. 2012. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, 67: 3–12
- 唐克丽. 1985. 黄河泥沙与黄土高原水土流失综合治理问题. 中国水土保持, 12: 10–12
- 田均良, 周佩华, 刘普灵, 吴普特, 郑世清, 李雅琦, 武春龙. 1992. 土壤侵蚀REE示踪法研究初报. 水土保持学报, 6: 23–27
- 田立德, 姚檀栋. 2016. 青藏高原冰芯高分辨率气候环境记录研究进展. 科学通报, 61: 926–937
- 汪品先. 2009. 全球季风的地质演变. 科学通报, 5: 535–556
- 王浩, 贾仰文, 杨贵羽, 周祖昊, 仇亚琴, 牛存稳, 彭辉. 2013. 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟. 科学通报, 58: 1064–1077
- 王金亭, 陈伟烈, 李渤生. 1994. 青藏高原植物生态学研究的回顾与展望. 见: 姜恕, 编. 植被生态学研究. 北京: 科学出版社. 112–119
- 王乃梁. 1956. 对于张伯声先生“从黄土线说明黄河河道的发育”一文的意见. 科学通报, 7: 67–72
- 王苏民. 1998. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社. 580
- 王鑫, Brain K, 孟津, Carrapa B, Decelles P, Clementz M, Abdulov S, 陈发虎. 2016. 塔吉克盆地东北缘海相-风成沉积序列与中亚晚始新世-早中新世干旱化的初步研究. 中国科学: 地球科学, 46: 674–690
- 吴征镒. 1965. 中国植物区系的热带亲缘. 科学通报, 1: 25–33
- 吴征镒. 1979. 论中国植物区系的分区问题. 云南植物研究, 1: 1–24
- 吴征镒, 路安民, 汤彦承, 陈之端, 李德铎. 2003. 中国被子植物科属综论. 北京: 科学出版社. 1209
- 吴征镒, 王荷生. 1983. 中国自然地理-植物地理. 北京: 科学出版社. 129
- 夏军, 王纲, 吕爱锋, 谈戈. 2003. 分布式时变增益流域水循环模拟. 地理学报, 5: 789–796
- 夏军, 王纲胜, 谈戈, 叶爱中, 黄国和. 2004. 水文非线性系统与分布式时变增益模型. 中国科学D辑: 地球科学, 34: 1062–1071
- 姚檀栋. 2007. 青藏高原及毗邻地区冰川湖泊图. 西安: 西安地图出版社
- 姚檀栋, Thompson L, 施雅风, 秦大河, 焦克勤, 杨志红, 田立德, Mosley-Thompson E. 1997. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究. 中国科学D辑: 地球科学, 27: 447–452
- 姚檀栋, Thompson L. 1992. 敦德冰芯记录与过去5ka温度变化. 中国科学B辑: 化学 生命科学 地学, 10: 1089–1093
- 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 马耀明, 徐柏青, 朱立平, 张凡, 王伟财, 艾丽坤, 杨晓新. 2017. 从青藏高原到第三极和泛第三极. 中国科学院院刊, (9): 12–19
- 杨少华, 石耀霖. 2015. 冰川槽谷形成过程的三维数值模拟. 中国科学: 地球科学, 45: 1208–1219
- 张百平, 姚永慧. 2015. 山体效应研究. 北京: 中国环境出版社. 250
- 张保升. 1957. 黄河河道地形的发育. 科学通报, 8: 231–237
- 张伯声. 1956. 从黄土线说明黄河河道发育. 科学通报, 3: 5–10
- 张东菊, 董广辉, 王辉, 任晓燕, 哈比布, 强明瑞, 陈发虎. 2016. 史前人类向青藏高原扩散的历史过程和可能驱动机制. 中国科学: 地球科学, 46: 1007–1023
- 张荣祖. 2011. 中国自然地理系列专著: 中国动物地理. 北京: 科学出版社. 330
- 张新时. 1994. 中国山地植被垂直带的基本生态地理类型. 见: 姜恕, 编. 植被生态学研究. 北京: 科学出版社. 77–92
- 张信宝, 李少龙, 王成华, 谭万沛, 赵庆昌, 张一云, 严美琼, 刘亚伦, 蒋锦江. 1988. ^{137}Cs 法测算梁家峡坡耕地土壤侵蚀量的初探. 水土保持通报, 8: 18–22
- 张懿铨. 2012. 青藏高原土地利用与土地覆被变化及区域适应. 北京: 气象出版社. 740
- 张懿铨, 吴雪, 郑度. 2019. 喜马拉雅山脉中段土地覆被的垂直分异. 地理学报, 出版中
- 赵人俊. 1984. 流域水文模拟-新安江模型与陕北模型. 北京: 水利电力出版社. 106–130

- 赵人俊, 庄一翎. 1963. 降雨径流关系的区域规律. 华东水利学院学报: 水文分册, S2: 53–68
- 赵松乔. 1956. 中国三大景观地带交汇处的天祝. 地理知识, 7: 249–252
- 郑度. 1996. 青藏高原自然地域系统研究. 中国科学D辑: 地球科学, 26: 336–341
- 郑度, 陈述彭. 2001. 地理学研究进展与前沿领域. 地球科学进展, 16: 599–606
- 郑度, 李炳元. 1990. 青藏高原自然环境的演化与分异. 地理研究, 9: 1–9
- 郑度, 杨勤业, 吴绍洪. 2015. 中国自然地理总论. 北京: 科学出版社. 767
- 郑景云, 郝志新, 狄小春. 2002. 历史环境变化数据库的建设与应用. 地理研究, 21: 146–154
- 郑绵平, 袁鹤然, 赵希涛, 刘喜方. 2006. 青藏高原第四纪泛湖期与古气候. 地质学报, 80: 170–180
- 中国科学技术协会. 2012. 生态学科发展报告(2011–2012). 北京: 中国科学技术出版社. 215
- 钟大赉, 丁林. 1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. 中国科学D辑: 地球科学, 26: 289–295
- 周幼吾, 郭东信. 1982. 中国多年冻土的主要特征. 冰川冻土, 4: 1–19
- 周幼吾, 邱国庆, 郭东信, 程国栋, 李树德. 2000. 中国冻土. 北京: 科学出版社. 1–450
- 朱大岗, 孟宪刚, 赵希涛, 邵兆刚, 杨朝斌, 马志邦, 吴中海, 王建平. 2004. 西藏纳木错和藏北高原古大湖晚更新世以来的湖泊演化与气候变迁. 中国地质, 31: 269–277
- 朱显谟. 1956. 黄土区土壤侵蚀的分类. 土壤学报, 4: 99–115
- 朱震达, 陈治平, 吴正, 李钜章, 李炳元, 吴功成. 1981. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究. 北京: 科学出版社. 100
- 朱震达, 郭恒文, 吴功成. 1964. 塔克拉玛干沙漠西南地区绿洲附近沙丘移动的研究. 地理学报, 30: 35–50
- 竺可桢. 1925. 中国历史上气候之变迁. 东方杂志, 22: 58–68
- 竺可桢. 1934. 东南季风与中国之雨量. 地理学报, 1: 1–28
- 竺可桢. 1972. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. 考古学报, 1: 15–38
- An Z S, Clemens S C, Shen J, Qiang X K, Jin Z D, Sun Y B, Prell W L, Luo J J, Wang S M, Xu H, Cai Y J, Zhou W J, Liu X D, Liu W G, Shi Z G, Yan L B, Xiao X Y, Chang H, Wu F, Ai L, Lu F Y. 2011. Glacial-Interglacial Indian summer monsoon dynamics. *Science*, 333: 719–723
- An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, Porter S C. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times. *Nature*, 411: 62–66
- An Z S, Porter S C, Kutzbach J E, Wu X H, Wang S M, Liu X D, Zhou W J. 2000. Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon. *Quat Sci Rev*, 19: 743–762
- Barton L, Newsome S D, Chen F H, Wang H, Guilderson T P, Bettinger R L. 2009. Agricultural origins and the isotopic identity of domestication in northern China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 106: 5523–5528
- Berger A, Loutre M F. 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quat Sci Rev*, 10: 297–317
- Beven K J. 2001. Rainfall-Rainoff Modelling. Chichester: John Wiley & Sons. 359
- Biskaborn B K, Smith S L, Noetzli J, Matthes H, Vieira G, Streletskiy D A, Schoeneich P, Romanovsky V E, Lewkowicz A G, Abramov A, Allard M, Boike J, Cable W L, Christiansen H H, Delaloye R, Diekmann B, Drozdov D, Etzelmüller B, Grosse G, Guglielmin M, Ingeman-Nielsen T, Isaksen K, Ishikawa M, Johansson M, Johannsson H, Joo A, Kaverin D, Kholodov A, Konstantinov P, Kröger T, Lambiel C, Lanckman J P, Luo D, Malkova G, Meiklejohn I, Moskalenko N, Oliva M, Phillips M, Ramos M, Sannel A B K, Sergeev D, Seybold C, Skryabin P, Vasiliev A, Wu Q, Yoshikawa K, Zheleznyak M, Lantuit H. 2019. Permafrost is warming at a global scale. *Nat Commun*, 10: 264
- Bolch T, Kulkarni A, Kääb A, Huggel C, Paul F, Cogley J G, Frey H, Kargel J S, Fujita K, Scheel M, Bajracharya S, Stoffel M. 2012. The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*, 336: 310–314
- Bond G, Showers W, Cheseby M, Lotti R, Almasi P, Demenocal P, Priore P, Cullen H, Hajdas I, Bonani G. 1997. A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 278: 1257–1266
- Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, Lugato E, Ballabio C, Alewell C, Meusburger K, Modugno S, Schütt B, Ferro V, Bagarello V, Oost K V, Montanarella L, Panagos P. 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat Commun*, 8: 1–3
- Brantingham P J, Xing G. 2006. Peopling of the northern Tibetan Plateau. *World Archaeol*, 38: 387–414
- Brun F, Berthier E, Wagnon P, Kääb A, Treichler D. 2017. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016. *Nat Geosci*, 10: 668–673
- Burbank D W, Blythe A E, Putkonen J, Pratt-Sitaula B, Gabet E, Oskin M, Barros A, Ojha T P. 2003. Decoupling of erosion and precipitation in the Himalayas. *Nature*, 426: 652–655
- Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, Xu H, Tsuruta H, Yagi K, Minami K. 1997. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management. *Plant Soil*, 196: 7–14
- Cai Z C, Tsuruta H, Minami K. 2000. Methane emission from rice fields in China: Measurements and influencing factors. *J Geophys Res*, 105: 17231–17242

- Cao B, Zhang T, Wu Q, Sheng Y, Zhao L, Zou D. 2019. Permafrost zonation index map and statistics over the Qinghai-Tibet Plateau based on field evidence. *Permafrost Periglac Process*, 30: 178–194
- Chang C F, Chen N S, Coward M P, Deng W M, Dewey J F, Gansser A, Harris N B W, Jin C W, Kidd W S F, Leeder M R, Li H, Lin J L, Liu C J, Mei H J, Molnar P, Pan Y, Pan Y S, Pearce J A, Shackleton R M, Smith A B, Sun Y Y, Wardlill M, Watts D R, Xu J T, Xu R H, Yin J X, Zhang Y Q. 1986. Preliminary conclusions of the Royal Society and Academia Sinica 1985 geotraverse of Tibet. *Nature*, 323: 501–507
- Chen F H, Chen J H, Holmes J, Boomer I, Austin P, Gates J B, Wang N L, Brooks S J, Zhang J W. 2010. Moisture changes over the last millennium in arid central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region. *Quat Sci Rev*, 29: 1055–1068
- Chen F H, Chen X M, Chen J H, Zhou A F, Wu D, Tang L Y, Zhang X J, Huang X Z, Yu J Q. 2014. Holocene vegetation history, precipitation changes and Indian Summer Monsoon evolution documented from sediments of Xingyun Lake, south-west China. *J Quat Sci*, 29: 661–674
- Chen F H, Dong G H, Zhang D J, Liu X Y, Jia X, An C B, Ma M M, Xie Y W, Barton L, Ren X Y, Zhao Z J, Wu X H, Jones M K. 2015b. Agriculture facilitated permanent human occupation of the Tibetan Plateau after 3600 B.P. *Science*, 347: 248–250
- Chen F H, Welker F, Shen C C, Bailey S E, Bergmann I, Davis S, Xia H, Wang H F, Fischer R, Freidline S E, Yu T L, Skinner M M, Stelzer S, Dong G R, Fu Q M, Dong G H, Wang J, Zhang D J, Hublin J J. 2019b. A late Middle Pleistocene Denisovan mandible from the Tibetan Plateau. *Nature*, 569: 409–412
- Chen F H, Xu Q H, Chen J H, Birks H J B, Liu J B, Zhang S R, Jin L Y, An C B, Telford R J, Cao X Y, Wang Z L, Zhang X J, Selvaraj K, Lü H Y, Li Y C, Zheng Z, Wang H P, Zhou A F, Dong G H, Zhang J W, Huang X Z, Bloemendal J, Rao Z G. 2015a. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation. *Sci Rep*, 5: 11186
- Chen F H, Yu Z C, Yang M L, Ito E, Wang S M, Madsen D B, Huang X Z, Zhao Y, Sato T, Birks H J B, Boomer I, Chen J H, An C B, Wunnemann B. 2008. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. *Quat Sci Rev*, 27: 351–364
- Chen F Z, Chen M J, Kong F X, Wu X D, Wu Q L. 2012. Species-dependent effects of crustacean plankton on a microbial community, assessed using an enclosure experiment in Lake Taihu, China. *Limnol Oceanogr*, 57: 1711–1720
- Chen F, Chen J, Huang W, Chen S, Huang X, Jin L, Jia J, Zhang X, An C, Zhang J, Zhao Y, Yu Z, Zhang R, Liu J, Zhou A, Feng S. 2019a. Westerlies Asia and monsoonal Asia: Spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales. *Earth-Sci Rev*, 192: 337–354
- Chen F, Jia J, Chen J, Li G, Zhang X, Xie H, Xia D, Huang W, An C. 2016. A persistent Holocene wetting trend in arid central Asia, with wettest conditions in the late Holocene, revealed by multi-proxy analyses of loess-paleosol sequences in Xinjiang, China. *Quat Sci Rev*, 146: 134–146
- Chen J H, Chen F H, Feng S, Huang W, Liu J B, Zhou A F. 2015. Hydroclimatic changes in China and surroundings during the Medieval Climate Anomaly and Little Ice Age: Spatial patterns and possible mechanisms. *Quat Sci Rev*, 107: 98–111
- Chen K, Bowler J. 1986. Late pleistocene evolution of salt lakes in the Qaidam basin, Qinghai province, China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 54: 87–104
- Chen Y S, Deng T, Zhou Z, Sun H. 2018. Is the East Asian flora ancient or not? *Natl Sci Rev*, 5: 920–932
- Cheng G D, Li X, Zhao W Z, Xu Z M, Feng Q, Xiao S C, Xiao H L. 2014. Integrated study of the water-ecosystem-economy in the Heihe River Basin. *Natl Sci Rev*, 1: 413–428
- Cheng G D. 1983. The mechanism of repeated-segregation for the formation of thick layered ground ice. *Cold Regions Sci Tech*, 8: 57–66
- Clapp F G. 1922. The Hwang Ho, Yellow River. *Geogr Rev*, 12: 1–8
- Clift P D, Blusztajn J. 2005. Reorganization of the western Himalayan river system after five million years ago. *Nature*, 438: 1001–1003
- Clift P D, Blusztajn J, Nguyen A D. 2006. Large-scale drainage capture and surface uplift in eastern Tibet-SW China before 24 Ma inferred from sediments of the Hanoi Basin, Vietnam. *Geophys Res Lett*, 33: 1–5
- Craddock W H, Kirby E, Harkins N W, Zhang H, Shi X, Liu J. 2010. Rapid fluvial incision along the Yellow River during headward basin integration. *Nat Geosci*, 3: 209–213
- Creamean J M, Suski K J, Rosenfeld D, Cazorla A, DeMott P J, Sullivan R C, White A B, Ralph F M, Minnis P, Comstock J M, Tomlinson J M, Prather K A. 2013. Dust and biological aerosols from the Sahara and Asia influence precipitation in the western U.S. *Science*, 339: 1572–1578
- Cui H, Wang J, Yu B, Hu Z, Yao P, Harbor J M. 2018. Marine Isotope Stage 3 paleotemperature inferred from reconstructing the Die Shan ice cap, northeastern Tibetan Plateau. *Quat Res*, 89: 494–504
- Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, Dahl-Jensen D, Gundestrup N S, Hammer C U, Hvidberg C S, Steffensen J P, Sveinbjörnsdóttir A E, Jouzel J, Bond G. 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364: 218–220
- Deng J, Paerl H W, Qin B, Zhang Y, Zhu G, Jeppesen E, Cai Y, Xu H.

2018. Climatically-modulated decline in wind speed may strongly affect eutrophication in shallow lakes. *Sci Total Environ*, 645: 1361–1370
- Deng Y, Gou X, Gao L, Yang M, Zhang F. 2017. Spatiotemporal drought variability of the eastern Tibetan Plateau during the last millennium. *Clim Dyn*, 49: 2077–2091
- Deng Z, Qin L, Gao Y, Weisskopf A R, Zhang C, Fuller D Q, Parida S K. 2015. From early domesticated rice of the middle Yangtze Basin to millet, rice and wheat agriculture: Archaeobotanical macroremains from Baligang, Nanyang Basin, Central China (6700–500 BC). *PLoS ONE*, 10: e0139885
- Ding L, Kapp P, Wan X Q. 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet. *Tectonics*, 24: TC3001
- Ding L, Kapp P, Yue Y, Lai Q. 2007. Postcollisional calc-alkaline lavas and xenoliths from the southern Qiangtang terrane, central Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, 254: 28–38
- Ding L, Spicer R A, Yang J, Xu Q, Cai F, Li S, Lai Q, Wang H, Spicer T E V, Yue Y, Shukla A, Srivastava G, Khan M A, Bera S, Mehrotra R. 2017. Quantifying the rise of the Himalaya orogen and implications for the South Asian monsoon. *Geology*, 45: 215–218
- Ding L, Xu Q, Yue Y, Wang H, Cai F, Li S. 2014. The Andean-type Gangdese Mountains: Paleoelevation record from the Paleocene-Eocene Linzhou Basin. *Earth Planet Sci Lett*, 392: 250–264
- Ding S M, Chen M S, Gong M D, Fan X F, Qin B Q, Xu H, Gao S S, Jin Z F, Tsang D C W, Zhang C S. 2018. Internal phosphorus loading from sediments causes seasonal nitrogen limitation for harmful algal blooms. *Sci Total Environ*, 625: 872–884
- Ding S, Han C, Wang Y, Yao L, Wang Y, Xu D, Sun Q, Williams P N, Zhang C. 2015. *In situ*, high-resolution imaging of labile phosphorus in sediments of a large eutrophic lake. *Water Res*, 74: 100–109
- Ding Z L, Ranov V, Yang S L, Finaev A, Han J M, Wang G A. 2002. The loess record in southern Tajikistan and correlation with Chinese loess. *Earth Planet Sci Lett*, 200: 387–400
- Ding Z L, Rutter N W, Liu T S. 1997. The onset of extensive loess deposition around the G/M boundary in China and its palaeoclimatic implications. *Quat Int*, 40: 53–60
- Ding Z L, Xiong S F, Sun J M, Yang S L, Gu Z Y, Liu T S. 1999. Pedostratigraphy and paleomagnetism of a ~7.0 Ma eolian loess-red clay sequence at Lingtai, Loess Plateau, north-central China and the implications for paleomonsoon evolution. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 152: 49–66
- Dong G C, Zhou W J, Yi C L, Fu Y C, Zhang L, Li M. 2018. The timing and cause of glacial activity during the last glacial in central Tibet based on ¹⁰Be surface exposure dating east of Mount Jaggang, the Xainza range. *Quat Sci Rev*, 186: 284–297
- Dong G H, Li R, Lu M X, Zhang D J, James N. 2019. Evolution of human-environmental interactions in China from the Late Paleolithic to the Bronze Age. *Prog Phys Geog*, doi: 10.1177/0309133319876802
- Dong G H, Yang Y S, Liu X Y, Li H M, Cui Y F, Wang H, Chen G K, Dodson J, Chen F H. 2018. Prehistoric trans-continental cultural exchange in the Hexi Corridor, northwest China. *Holocene*, 28: 621–628
- Dong Z B, Hu G Y, Qian G Q, Lu J F, Zhang Z C, Luo W Y, Lyu P. 2017. High-altitude Aeolian research on the Tibetan Plateau. *Rev Geophys*, 55: 864–901
- Duan J P, Esper J, Buntgen U, Li L, Xoplaki E, Zhang H, Wang L, Fang Y, Luterbacher J. 2017. Weakening of annual temperature cycle over the Tibetan Plateau since the 1870s. *Nat Commun*, 8: 14008
- Duan J P, Ma Z G, Wu P L, Xoplaki E, Hegerl G, Li L, Schurer A, Guan D B, Chen L, Duan Y W, Luterbacher J. 2019. Detection of human influences on temperature seasonality from the nineteenth century. *Nat Sustain*, 2: 484–490
- EDW (Mountain Research Initiative EDW Working Group). 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nat Clim Chang*, 5: 424–430
- Egholm D L, Nielsen S B, Pedersen V K, Lesemann J E. 2009. Glacial effects limiting mountain height. *Nature*, 460: 884–887
- Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. 2002. Low frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*, 295: 2250–2253
- Fan Q S, Lai Z P, Long H, Sun Y J, Liu X J. 2009. OSL chronology for lacustrine sediments recording high stands of Gahai Lake in Qaidam Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Quat Geochronol*, 5: 223–227
- Fang X M, Fang Y H, Zan J B, Zhang W L, Song C H, Appel E, Meng Q Q, Miao Y F, Dai S, Lu Y, Zhang T. 2019. Cenozoic magnetostratigraphy of the Xining Basin, NE Tibetan Plateau, and its constraints on paleontological, sedimentological and tectonomorphological evolution. *Earth-Sci Rev*, 190: 460–485
- Fang X M, Garzione C, Van V R, Li J J, Fan M J. 2003. Flexural subsidence by 29 Ma on the NE edge of Tibet from the magnetostratigraphy of Linxia Basin, China. *Earth Planet Sci Lett*, 210: 545–560
- FAO, ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (Main Report). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Also available at <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>
- Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. 2013. How ecological restoration alters ecosystem services: An analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. *Sci Rep*, 3: 2846

- Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z D, Lu Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. 2016. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nat Clim Change*, 6: 1019–1022
- Feng X M, Sun G, Fu B J, Su C H, Liu Y, Lamparski H. 2012. Regional effects of vegetation restoration on water yield across the Loess Plateau, China. *Hydrol Earth Syst Sci*, 16: 2617–2628
- Frachetti M D, Smith C E, Traub C M, Williams T. 2017. Nomadic ecology shaped the highland geography of Asia's Silk Roads. *Nature*, 543: 193–198
- Fu B J. 1989. Soil erosion and its control in the loess plateau of China. *Soil Use Manage*, 5: 76–82
- Fu B J, Liu Y, Lv Y H, He C S, Zeng Y, Wu B F. 2011. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecol Complex*, 8: 284–293
- Fu B J, Pan N Q. 2016. Integrated studies of physical geography in China: Review and prospects. *J Geogr Sci*, 26: 771–790
- Fuller D Q, Qin L, Zheng Y, Zhao Z, Chen X, Hosoya L A, Sun G P. 2009. The domestication process and domestication rate in rice: Spikelet bases from the Lower Yangtze. *Science*, 323: 1607–1610
- Gao B, Yang D, Qin Y, Wang Y, Li H, Zhang Y, Zhang T. 2018. Change in frozen soils and its effect on regional hydrology, upper Heihe basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Cryosphere*, 12: 657–673
- Ge Q, Hao Z, Zheng J, Shao X. 2013. Temperature changes over the past 2000 yr in China and comparison with the Northern Hemisphere. *Clim Past*, 9: 1153–1160
- Ge Q, Zheng J, Fang X, Man Z, Zhang X, Zhang P, Wang W C. 2003. Winter half-year temperature reconstruction for the middle and lower reaches of the Yellow River and Yangtze River, China, during the past 2000 years. *Holocene*, 13: 933–940
- Gou X H, Deng Y, Chen F H, Yang M X, Fang K Y, Gao L L, Yang T, Zhang F. 2010. Tree ring based streamflow reconstruction for the Upper Yellow River over the past 1234 years. *Chin Sci Bull*, 55: 4179–4186
- Gregory K J. 2000. The Changing Nature of Physical Geography. London, UK: Arnold. 384
- Guo D, Wang H. 2016. CMIP5 permafrost degradation projection: A comparison among different regions. *J Geophys Res-Atmos*, 121: 4499–4517
- Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, Wu H B, Qiao Y S, Zhu R X, Peng S Z, Wei J J, Yuan B Y, Liu T S. 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 416: 159–163
- He K, Lu H, Zhang J, Wang C, Huan X. 2017. Prehistoric evolution of the dualistic structure mixed rice and millet farming in China. *Holocene*, 27: 1885–1898
- Heermance R V, Pearson J, Moe A, Langtao L, Jianhong X, Jie C, Richter F, Garzzone C N, Junsheng N, Bogue S. 2018. Erg deposition and development of the ancestral Taklimakan Desert (western China) between 12.2 and 7.0 Ma. *Geology*, 46: 919–922
- Heller F, Liu T S. 1982. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China. *Nature*, 300: 431–433
- Hou J Z, Huang Y S, Zhao J T, Liu Z H, Colman S, An Z S. 2016. Large Holocene summer temperature oscillations and impact on the peopling of the northeastern Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 43: 1323–1330
- Hou S, Jenk T M, Zhang W, Wang C, Wu S, Wang Y, Pang H, Schwikowski M. 2018. Age ranges of the Tibetan ice cores with emphasis on the Chongce ice cores, western Kunlun Mountains. *Cryosphere*, 12: 2341–2348
- Hu G, Zhao L, Li R, Wu X, Wu T, Xie C, Zhu X, Su Y. 2019. Variations in soil temperature from 1980 to 2015 in permafrost regions on the Qinghai-Tibetan Plateau based on observed and reanalysis products. *Geoderma*, 337: 893–905
- Hu Z B, Li M H, Dong Z J, Guo L Y, Bridgland D, Pan B T, Li X H, Liu X F. 2019. Fluvial entrenchment and integration of the Sanmen Gorge, the Lower Yellow River. *Glob Planet Change*, 178: 129–138
- Hu Z B, Pan B T, Bridgland D, Vandenberghe J, Guo L Y, Fan Y L, Westaway R. 2017. The linking of the upper-middle and lower reaches of the Yellow River as a result of fluvial entrenchment. *Quat Sci Rev*, 166: 324–338
- Hu Z, Pan B, Guo L, Vandenberghe J, Liu X, Wang J, Fan Y, Mao J, Gao H, Hu X. 2016. Rapid fluvial incision and headward erosion by the Yellow River along the Jinshaan gorge during the past 1.2 Ma as a result of tectonic extension. *Quat Sci Rev*, 133: 1–14
- Huang J H, Chen B, Liu C, Lai J, Zhang J, Ma K. 2012. Identifying hotspots of endemic woody seed plant diversity in China. *Divers Distrib*, 18: 673–688
- Huang W, Feng S, Chen J, Chen F. 2015. Physical mechanisms of summer precipitation variations in the Tarim Basin in Northwestern China. *J Clim*, 28: 3579–3591
- Huang X, Meyers P A, Jia C, Zheng M, Xue J, Wang X, Xie S. 2013. Paleotemperature variability in central China during the last 13 ka recorded by a novel microbial lipid proxy in the Dajihu peat deposit. *Holocene*, 23: 1123–1129
- Huerta-Sánchez E, Jin X, Asan X, Bianba Z, Peter B M, Vinckenbosch N, Liang Y, Yi X, He M, Somel M, Ni P, Wang B, Ou X, Huasang X, Luosang J, Cuo Z X P, Li K, Gao G, Yin Y, Wang W, Zhang X, Xu X, Yang H, Li Y, Wang J, Wang J, Nielsen R. 2014. Altitude adaptation in Tibetans caused by introgression of Denisovan-like DNA. *Nature*, 512: 194–197

- Hugelius G, Strauss J, Zubrzycki S, Harden J W, Schuur E A G, Ping C L, Schirmermeister L, Grosse G, Michaelson G J, Koven C D, O'Donnell J A, Elberling B, Mishra U, Camill P, Yu Z, Palmtag J, Kuhry P. 2014. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences*, 11: 6573–6593
- Huss M, Hock R. 2018. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nat Clim Change*, 8: 135–140
- Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. 2010. Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, 328: 1382–1385
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. Climate change 2013: The physical science basis. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, eds. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press
- Jia J T, Zheng H B, Huang X T, Wu F Y, Yang S Y, Wang K, He M Y. 2010. Detrital zircon U-Pb ages of Late Cenozoic sediments from the Yangtze delta: Implication for the evolution of the Yangtze River. *Chin Sci Bull*, 55: 1520–1528
- Jia Y W, Wang H, Zhou Z H, Qiu Y Q, Luo X Y, Wang J H, Yan D H, Qin D Y. 2006. Development of the WEP-L distributed hydrological model and dynamic assessment of water resources in the Yellow River Basin. *J Hydrol*, 331: 606–629
- Jiang D B, Lang X M, Tian Z P, Wang T. 2012. Considerable model-data mismatch in temperature over China during the mid-Holocene: Results of PMIP simulations. *J Clim*, 25: 4135–4153
- Jin L, Chen F, Morrill C, Otto-Bliesner B L, Rosenbloom N. 2012. Causes of early Holocene desertification in arid central Asia. *Clim Dyn*, 38: 1577–1591
- Johnsen S J, Dansgaard W, Clausen H B, Langway C C. 1972. Oxygen isotope profiles through the Antarctic and Greenland ice sheets. *Nature*, 235: 429–434
- Jouzel J, Masson-Delmotte V, Cattani O, Dreyfus G, Falourd S, Hoffmann G, Minster B, Nouet J, Barnola J M, Chappellaz J, Fischer H, Gallet J C, Johnsen S, Leuenberger M, Loulergue L, Luethi D, Oerter H, Parrenin F, Raisbeck G, Raynaud D, Schilt A, Schwander J, Selmo E, Souchez R, Spahni R, Stauffer B, Steffensen J P, Stenni B, Stocker T F, Tison J L, Werner M, Wolff E W. 2007. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800000 years. *Science*, 317: 793–796
- Kääb A, Leinss S, Gilbert A, Bühler Y, Gascoin S, Evans S G, Bartelt P, Berthier E, Brun F, Chao W A, Farinotti D, Gimbert F, Guo W, Huggel C, Kargel J S, Leonard G J, Tian L, Treichler D, Yao T. 2018. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability. *Nat Geosci*, 11: 114–120
- Kong P, Granger D E, Wu F Y, Caffee M W, Wang Y J, Zhao X T, Zheng Y. 2009. Cosmogenic nuclide burial ages and provenance of the Xigeda paleo-lake: Implications for evolution of the Middle Yangtze River. *Earth Planet Sci Lett*, 278: 131–141
- Kuhle M. 1988. The pleistocene glaciation of Tibet and the onset of ice ages ? An autocycle hypothesis. *Geo J*, 17: 581–595
- Kuzmina E E, Mair V H. 2008. The Prehistory of the Silk Road. Philadelphia: University of Pennsylvania Press. 1–108
- Lai Z P, Mischke S, Madsen D. 2014. Paleoenvironmental implications of new OSL dates on the formation of the “Shell Bar” in the Qaidam Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *J Paleolimnol*, 51: 197–210
- Lewkowicz A G, Way R G. 2019. Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a High Arctic environment. *Nat Commun*, 10: 1329
- Li B F, Sun D H, Xu W H, Wang F, Liang B Q, Ma Z W, Wang X, Li Z J, Chen F H. 2017. Paleomagnetic chronology and paleoenvironmental records from drill cores from the Hetao Basin and their implications for the formation of the Hobq Desert and the Yellow River. *Quat Sci Rev*, 156: 69–89
- Li G, Jin M, Chen X, Wen L, Zhang J, Madsen D, Zhao H, Wang X, Fan T, Duan Y, Liu X, Wu D, Li F, Chen F. 2015. Environmental changes in the Ulan Buh Desert, southern Inner Mongolia, China since the middle Pleistocene based on sedimentology, chronology and proxy indexes. *Quat Sci Rev*, 128: 69–80
- Li G, She L, Jin M, Yang H, Madsen D, Chun X, Yang L, Wei H, Tao S, Chen F. 2018. The spatial extent of the East Asian summer monsoon in arid NW China during the Holocene and Last Interglaciation. *Glob Planet Change*, 169: 48–65
- Li J J. 1995. Uplift of Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and Global Change. Lanzhou: Lanzhou University Press. 207
- Li J J, Feng Z D, Tang L Y. 1988. Late Quaternary monsoon patterns on the loess plateau of China. *Earth Surf Process Landf*, 13: 125–135
- Li J X, Yue L P, Roberts A P, Hirt A M, Pan F, Guo L, Xu Y, Xi R G, Guo L, Qiang X K, Gai C C, Jiang Z X, Sun Z M, Liu Q S. 2018. Global cooling and enhanced Eocene Asian mid-latitude interior aridity. *Nat Commun*, 9: 3026
- Li J, Xie S, Kuang M. 2001. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation. *Geomorphology*, 41: 125–135
- Li R, Kraft N J B, Yang J, Wang Y. 2015. A phylogenetically informed delineation of floristic regions within a biodiversity hotspot in Yunnan, China. *Sci Rep*, 5: 9396
- Li X, Cheng G D, Ge Y C, Li H Y, Han F, Hu X L, Tian W, Pan X D, Nian Y Y, Zhang Y L, Ran Y H, Zheng Y, Gao B, Yang D W, Zheng C M, Wang X S, Liu S M, Cai X M. 2018b. Hydrological cycle in the Heihe River Basin and its implication for water resource

- management in endorheic basins. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 890–914
- Li X, Cheng G D, Lin H, Cai X M, Fang M, Ge Y C, Hu X L, Chen M, Li W Y. 2018a. Watershed system model: The essentials to model complex human-nature system at the river basin scale. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 3019–3034
- Li Y K, Liu G N, Chen Y X, Li Y N, Harbor J M, Stroeve A P, Caffee M W, Zhang M, Li C C, Cui Z J. 2014. Timing and extent of Quaternary glaciations in the Tianger Range, eastern Tian Shan, China, investigated using ^{10}Be surface exposure dating. *Quat Sci Rev*, 98: 7–23
- Li Z, Sun D, Chen F, Wang F, Zhang Y, Guo F, Wang X, Li B. 2014. Chronology and paleoenvironmental records of a drill core in the central Tengger Desert of China. *Quat Sci Rev*, 85: 85–98
- Liang E Y, Eckstein D. 2009. Dendrochronological potential of the alpine shrub *Rhododendron nivale* on the south-eastern Tibetan Plateau. *Ann Bot*, 104: 665–670
- Licht A, van Cappelle M, Abels H A, Ladant J B, Trabuccho-Alexandre J, France-Lanord C, Donnadiou Y, Vandenberghe J, Rigaudier T, Lécuyer C, Terry Jr D, Adriaens R, Boura A, Guo Z, Soe A N, Quade J, Dupont-Nivet G, Jaeger J J. 2014. Asian monsoons in a late Eocene greenhouse world. *Nature*, 513: 501–506
- Lin N, Deng T, Moore M J, Sun Y, Huang X, Sun W, Luo D, Wang H, Zhang J, Sun H. 2018. Phylogeography of *parasynclathium souliei* (asteraceae) and its potential application in delimiting phylogeoregions in the Qinghai-Tibet Plateau (QTP)-Hengduan Mountains (HDM) hotspot. *Front Genet*, 9
- Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. 2002. An empirical soil loss equation. In: *Proceedings-Process of Soil Erosion and its Environment Effect* (Vol. II). 12: 21–25
- Liu C M, Zhang X, Zhang Y. 2002. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Agric For Meteorol*, 111: 109–120
- Liu J B, Chen J H, Zhang X J, Li Y, Rao Z G, Chen F H. 2015. Holocene East Asian summer monsoon records in northern China and their inconsistency with Chinese stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records. *Earth-Sci Rev*, 148: 194–208
- Liu J B, Rühland K M, Chen J H, Xu Y Y, Chen S Q, Chen Q M, Huang W, Xu Q H, Chen F H, Smol J P. 2017. Aerosol-weakened summer monsoons decrease lake fertilization on the Chinese Loess Plateau. *Nat Clim Change*, 7: 190–194
- Liu J Q, Sun Y S, Ge X J, Gao L M, Qiu Y X. 2012. Phylogeographic studies of plants in China: Advances in the past and directions in the future. *J Syst Evol*, 50: 267–275
- Liu L, Bestel S, Shi J, Song Y, Chen X. 2013. Paleolithic human exploitation of plant foods during the last glacial maximum in north china. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110: 5380–5385
- Liu X Y, Jones P J, Matuzeviciute G M, Lister D L, An T, Przelomska N, Kneale C, Zhao Z J, Jones M K. 2019. From ecological opportunism to multi-cropping: Mapping food globalisation in prehistory. *Quat Sci Rev*, 206: 21–28
- Liu Y, Cai W, Sun C, Song H, Cobb K M, Li J, Leavitt S W, Wu L, Cai Q, Liu R, Ng B, Cherubini P, Büntgen U, Song Y, Wang G, Lei Y, Yan L, Li Q, Ma Y, Fang C, Sun J, Li X, Chen D, Linderholm H W. 2019b. Anthropogenic aerosols cause recent pronounced weakening of Asian Summer Monsoon relative to last four centuries. *Geophys Res Lett*, 46: 5469–5479
- Liu Y, Cobb K M, Song H, Li Q, Li C Y, Nakatsuka T, An Z, Zhou W, Cai Q, Li J, Leavitt S W, Sun C, Mei R, Shen C C, Chan M H, Sun J, Yan L, Lei Y, Ma Y, Li X, Chen D, Linderholm H W. 2017. Recent enhancement of central Pacific El Niño variability relative to last eight centuries. *Nat Commun*, 8: 15386
- Liu Y, Song H, Sun C, Song Y, Cai Q, Liu R, Lei Y, Li Q. 2019a. The 600-mm precipitation isoline distinguishes tree-ring-width responses to climate in China. *Natl Sci Rev*, 6: 359–368
- Liu Z, Zhu J, Rosenthal Y, Zhang X, Otto-Bliesner B L, Timmermann A, Smith R S, Lohmann G, Zheng W, Elison Timm O. 2014. The Holocene temperature conundrum. *Proc Natl Acad Sci USA*, 111: E3501–E3505
- Livingstone I, Warren A. 2019. *Aeolian Geomorphology: A New Introduction*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 336
- Long H, Lai Z P, Fuchs M, Zhang J R, Li Y. 2012. Timing of Late Quaternary palaeolake evolution in Tengger Desert of northern China and its possible forcing mechanisms. *Glob Planet Change*, 92–93: 119–129
- Long H, Shen J, Wang Y, Gao L, Frechen M. 2015. High-resolution OSL dating of a late Quaternary sequence from Xingkai Lake (NE Asia): Chronological challenge of the “MIS 3a Mega-paleolake” hypothesis in China. *Earth Planet Sci Lett*, 428: 281–292
- Long T W, Leipe C, Jin G Y, Wagner M, Guo R Z, Schröder O, Tarasov P E. 2018. The early history of wheat in China from ^{14}C dating and Bayesian chronological modelling. *Nat Plants*, 4: 272–279
- Lu H Y, Wang X Y, Wang X Y, Chang X, Zhang H Z, Xu Z W, Zhang W C, Wei H Z, Zhang X J, Yi S W, Zhang W F, Feng H, Wang Y C, Wang Y, Han Z Y. 2019. Formation and evolution of Gobi Desert in central and eastern Asia. *Earth-Sci Rev*, 194: 251–263
- Lu H, Zhang J, Liu K, Wu N, Li Y, Zhou K, Ye M, Zhang T, Zhang H, Yang X, Shen L, Xu D, Li Q. 2009. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10000 years ago. *Proc Natl Acad Sci USA*, 106: 7367–7372
- Lu L M, Mao L F, Yang T, Ye J F, Liu B, Li H L, Sun M, Miller J T,

- Mathews S, Hu H H, Niu Y T, Peng D X, Chen Y H, Smith S A, Chen M, Xiang K L, Le C T, Dang V C, Lu A M, Soltis P S, Soltis D E, Li J H, Chen Z D. 2018. Evolutionary history of the angiosperm flora of China. *Nature*, 554: 234–238
- Lü P, Narteau C, Dong Z, Rozier O, Courrech du Pont S. 2017. Unravelling raked linear dunes to explain the coexistence of bedforms in complex dunefields. *Nat Commun*, 8: 14239
- Lü P, Narteau C, Dong Z B, Zhang Z C, Courrech P S. 2014. Emergence of oblique dunes in a landscape-scale experiment. *Nat Geosci*, 7: 99–103
- Lu Y H, Conrad R. 2005. *In situ* stable isotope probing of methanogenic archaea in the rice rhizosphere. *Science*, 309: 1088–1090
- Lutz A F, Immerzeel W W, Shrestha A B, Bierkens M F P. 2014. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation. *Nat Clim Change*, 4: 587–592
- Ma M M, Dong G H, Jia X, Wang H, Cui Y F, Chen F H. 2016. Dietary shift after 3600 cal yr BP and its influencing factors in northwestern China: Evidence from stable isotopes. *Quat Sci Rev*, 145: 57–70
- Ma Y, Yang X, Huan X, Gao Y, Wang W, Li Z, Ma Z, Perry L, Sun G, Jiang L, Jin G, Lu H, Biehl P F. 2018. Multiple indicators of rice remains and the process of rice domestication: A case study in the lower yangtze river region, china. *PLoS ONE*, 13: e0208104
- Madsen D B, Haizhou M, Rhode D, Brantingham P J, Forman S L. 2008. Age constraints on the late Quaternary evolution of Qinghai Lake, Tibetan Plateau. *Quat Res*, 69: 316–325
- Mann M E, Zhang Z, Hughes M K, Bradley R S, Miller S K, Rutherford S, Ni F. 2008. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proc Natl Acad Sci USA*, 105: 13252–13257
- Marcott S A, Shakun J D, Clark P U, Mix A C. 2013. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science*, 339: 1198–1201
- Marsicek J, Shuman B N, Bartlein P J, Shafer S L, Brewer S. 2018. Reconciling divergent trends and millennial variations in Holocene temperatures. *Nature*, 554: 92–96
- Meyer M C, Aldenderfer M S, Wang Z, Hoffmann D L, Dahl J A, Degering D, Haas W R, Schlütz F. 2017. Permanent human occupation of the central Tibetan Plateau in the early Holocene. *Science*, 355: 64–67
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis. Washington DC: World Resources Institute. 1–2
- Mo X G, Liu S X, Lin Z H. 2004. Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the Lushi basin. *J Hydrol*, 285: 125–142
- Mo X G, Liu S X, Lin Z H, Xu Y, Xiang Y, McVicar T R. 2005. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. *Ecol Model*, 183: 301–322
- Monteith J L. 1965. Evaporation and environment. *Symp. SocExp Biol*, 19: 205–224
- Mu C, Zhang T, Wu Q, Peng X, Cao B, Zhang X, Cao B, Cheng G. 2015. Editorial: Organic carbon pools in permafrost regions on the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau. *Cryosphere*, 9: 479–486
- Nie J, Steven T, Rittner M, Stockli D, Garzanti E, Limonta M, Bird A, Ando S, Vermeesch P, Saylor J, Lu H, Breecker D, Hu X, Liu S, Resentini A, Vezzoli G, Peng W, Carter A, Ji S, Pan B. 2015. Loess Plateau storage of Northeastern Tibetan Plateau-driven Yellow River sediment. *Nat Commun*, 6: 8511
- North Greenland Ice Core Project members (NGRIP). 2004. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, 431: 147–151
- Overland J E, Dethloff K, Francis J A, Hall R J, Hanna E, Kim S J, Screen J A, Shepherd T G, Vihma T. 2016. Nonlinear response of mid-latitude weather to the changing Arctic. *Nat Clim Change*, 6: 992–999
- Owen L A, Finkel R C, Caffee M W. 2002. A note on the extent of glaciation throughout the Himalaya during the global Last Glacial Maximum. *Quat Sci Rev*, 21: 147–157
- Pachur H J, Wünnemann B, Zhang H. 1995. Lake evolution in the Tengger Desert, Northwestern China, during the last 40000 years. *Quat Res*, 44: 171–180
- Pan B, Hu Z, Wang J, Vandenberghe J, Hu X. 2011. A magnetostratigraphic record of landscape development in the eastern Ordos Plateau, China: Transition from Late Miocene and Early Pliocene stacked sedimentation to Late Pliocene and Quaternary uplift and incision by the Yellow River. *Geomorphology*, 125: 225–238
- Peng X, Zhang T, Frauenfeld O W, Wang K, Luo D, Cao B, Su H, Jin H, Wu Q. 2018. Spatiotemporal changes in active layer thickness under contemporary and projected climate in the Northern hemisphere. *J Clim*, 31: 251–266
- Pye K, Tsoar H. 2009. Aeolian Sand and Sand Dunes. Heidelberg: Springer-Verlag. 458
- Qin B Q. 2009. Lake eutrophication: Control countermeasures and recycling exploitation. *Ecol Eng*, 35: 1569–1573
- Qin B Q, Hu W P, Gao G, Luo L C, Zhang J S. 2004. Dynamics of sediment resuspension and the conceptual schema of nutrient release in the large shallow Lake Taihu, China. *Chin Sci Bull*, 49: 54–64
- Qin B Q, Li W, Zhu G W, Zhang Y L, Wu T F, Gao G. 2015. Cyanobacterial bloom management through integrated monitoring and forecasting in large shallow eutrophic Lake Taihu (China). *J Hazard Mater*, 287: 356–363

- Qin B Q, Liu Z W, Havens K. 2007. Preface. *Hydrobiologia*, 581: 1–2
- Qin B Q, Paerl H W, Brookes J D, Liu J G, Jeppesen E, Zhu G W, Zhang Y L, Xu H, Shi K, Deng J M. 2019. Why Lake Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10 years (2007–2017) efforts. *Chin Sci Bull*, 64: 354–356
- Qin B Q, Yang G J, Ma J R, Wu T F, Li W, Liu L Z, Deng J M, Zhou J. 2018. Spatiotemporal changes of cyanobacterial bloom in large shallow eutrophic Lake Taihu, China. *Front Microbiol*, 9: 451
- Qiu Y X, Fu C X, Comes H P. 2011. Plant molecular phylogeography in China and adjacent regions: Tracing the genetic imprints of Quaternary climate and environmental change in the world's most diverse temperate flora. *Mol Phylogenets Evol*, 59: 225–244
- Quinton J N, Govers G, van Oost K, Bardgett R D. 2010. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. *Nat Geosci*, 3: 311–314
- Rao Z G, Li Y X, Zhang J W, Jia G D, Chen F H. 2016. Investigating the long-term palaeoclimatic controls on the δD and $\delta^{18}O$ of precipitation during the Holocene in the Indian and East Asian monsoonal regions. *Earth-Sci Rev*, 159: 292–305
- Rehfeld K, Münch T, Ho S L, Laepple T. 2018. Global patterns of declining temperature variability from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Nature*, 554: 356–359
- Routson C C, McKay N P, Kaufman D S, Erb M P, Goosse H, Shuman B N, Rodysill J R, Ault T. 2019. Mid-latitude net precipitation decreased with Arctic warming during the Holocene. *Nature*, 568: 83–87
- Rutter N. 1995. Problematic ice sheets. *Quat Int*, 28: 19–37
- Schaefer J M, Denton G H, Barrell D J A, Ivy-Ochs S, Kubik P W, Andersen B G, Phillips F M, Lowell T V, Schlüchter C. 2006. Near-synchronous interhemispheric termination of the last glacial maximum in mid-latitudes. *Science*, 312: 1510–1513
- Schumm S A, Dumont J F, Holbrook J M. 2000. Active Tectonics and Alluvial Rivers. Cambridge: Cambridge University Press. 276
- Schuster M, Düringer P, Ghienne J F, Vignaud P, Mackaye H T, Likius A, Brunet M. 2006. The age of the Sahara Desert. *Science*, 311: 821
- Seong Y B, Owen L A, Yi C, Finkel R C. 2009. Quaternary glaciation of Muztag Ata and Kongur Shan: Evidence for glacier response to rapid climate changes throughout the Late Glacial and Holocene in westernmost Tibet. *Geol Soc Am Bull*, 121: 348–365
- Shao X, Xu Y, Yin Z Y, Liang E, Zhu H, Wang S. 2010. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Quat Sci Rev*, 29: 2111–2122
- Shi H, Shao M G. 2000. Soil and water loss from the Loess Plateau in China. *J Arid Environ*, 45: 9–20
- Shi Y F, Yu G, Liu X D, Li B Y, Yao T D. 2001. Reconstruction of the 30–40 ka BP enhanced Indian monsoon climate based on geological records from the Tibetan Plateau. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 169: 69–83
- Sun D H, Shaw J, An Z S, Cheng M Y, Yue L P. 1998. Magnetostratigraphy and paleoclimatic interpretation of a continuous 7.2 Ma late Cenozoic eolian sediments from the Chinese Loess Plateau. *Geophys Res Lett*, 25: 85–88
- Sun D, Bloemendal J, Yi Z, Zhu Y, Wang X, Zhang Y, Li Z, Wang F, Han F, Zhang Y. 2011. Palaeomagnetic and palaeoenvironmental study of two parallel sections of late Cenozoic strata in the central Taklimakan Desert: Implications for the desertification of the Tarim Basin. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 300: 1–10
- Sun H, Zhang J W, Deng T, Boufford D. 2017. Origins and evolution of plant diversity in the Hengduan Mountains, China. *Plant Diversity*, 39: 161–166
- Sun J M, Alloway B, Fang X, Windley B F. 2015. Refuting the evidence for an earlier birth of the Taklimakan Desert. *Proc Natl Acad Sci USA*, 112: E5556–E5557
- Sun J M, Jiang M S. 2013. Eocene seawater retreat from the southwest Tarim Basin and implications for early Cenozoic tectonic evolution in the Pamir Plateau. *Tectonophysics*, 588: 27–38
- Sun J, Liu T. 2006. The age of the Taklimakan Desert. *Science*, 312: 1621
- Sun J, Zhang Z, Zhang L. 2009. New evidence on the age of the Taklimakan Desert. *Geology*, 37: 159–162
- Tan M. 2014. Circulation effect: Response of precipitation $\delta^{18}O$ to the ENSO cycle in monsoon regions of China. *Clim Dyn*, 42: 1067–1077
- Tang C Q, Matsui T, Ohashi H, Dong Y F, Momohara A, Moraira S H, Qian S H, Yang Y C, Ohsawa M, Luu H T, Grote P J, Krestov P V, LePage B, Werger M, Robertson K, Hobohm C, Wang C Y, Peng M C, Chen X, Wang H C, Su E H, Zhou R, Li S F, He L Y, Yan K, Zhu M Y, Hu J, Yang R H, Li W J, Tomita M, Wu Z L, Yan H Z, Zhang G F, He H, Yi S R, Gong H D, Song K, Song D, Li X S, Zhang Z Y, Han P B, Shen L Q, Huang D S, Luo K, Pujol J L. 2018. Identifying long-term stable refugia for relict plant species in East Asia. *Nat Commun*, 9: 4488
- Thompson L G, Davis M E, Mosley-Thompson E, Lin P N, Henderson K A, Mashiotta T A. 2005. Tropical ice core records: Evidence for asynchronous glaciation on Milankovitch timescales. *J Quat Sci*, 20: 723–733
- Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, Bolzan J F, Dai J, Klein L, Yao T, Wu X, Xie Z, Gundestrup N. 1989. Holocene-Late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai-Tibetan Plateau. *Science*, 246: 474–477
- Thompson L, Yao T, Davis M, Henderson K, Mosley-Thompson E, Lin P, Beer J, Synal H, Cole-Dai J, Bolzan J. 1997. Tropical climate

- instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core. *Science*, 276: 1821–1825
- Thompson L G, Yao T, Mosley-Thompson E, Davis M E, Henderson K A, Lin P N. 2000. A high-resolution millennial record of the south Asian monsoon from Himalayan ice cores. *Science*, 289: 1916–1919
- Tian L, Ritterbusch F, Gu J Q, Hu S M, Jiang W, Lu Z T, Wang D, Yang G M. 2019. ^{81}Kr dating at the Guliya Ice Cap, Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 46: 6636–6643
- Tian Y, Zheng Y, Han F, Zheng C, Li X. 2018. A comprehensive graphical modeling platform designed for integrated hydrological simulation. *Environ Model Software*, 108: 154–173
- Trenberth K E, Stepaniak D P, Caron J M. 2000. The global monsoon as seen through the divergent atmospheric circulation. *J Clim*, 13: 3969–3993
- Troll C. 1959. Die tropischen Gebirge, Ihre dreidimensionale klimatische und pflanzengeographische Zonierung. Bonner geographische Abhandlungen. Heft 25, Bonn 1959
- Van Oost K, Quine T A, Govers G, De Gryze S, Six J, Harden J W, Ritchie J C, McCarty G W, Heckrath G, Kosmas C, Giraldez J V, Marques da Silva J R, Merckx R. 2007. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle. *Science*, 318: 626–629
- Wang C S, Zhao X X, Liu Z F, Lippert P C, Graham S A, Coe R S, Yi H S, Zhu L D, Liu S, Li Y L. 2008. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau. *Proc Natl Acad Sci USA*, 105: 4987–4992
- Wang F, Sun D, Chen F, Bloemendal J, Guo F, Li Z, Zhang Y, Li B, Wang X. 2015. Formation and evolution of the Badain Jaran Desert, North China, as revealed by a drill core from the desert centre and by geological survey. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 426: 139–158
- Wang H P, Chen J H, Zhang X J, Chen F H. 2014. Palaeosol development in the Chinese loess plateau as an indicator of the strength of the East Asian summer monsoon: Evidence for a mid-Holocene maximum. *Quat Int*, 334–335: 155–164
- Wang J, Cui H, Harbor J M, Zheng L, Yao P. 2015. Mid-MIS3 climate inferred from reconstructing the Dalijia Shan ice cap, north-eastern Tibetan Plateau. *J Quat Sci*, 30: 558–568
- Wang J, Kassab C, Harbor J M, Caffee M W, Cui H, Zhang G. 2013. Cosmogenic nuclide constraints on late Quaternary glacial chronology on the Dalijia Shan, northeastern Tibetan Plateau. *Quat Res*, 79: 439–451
- Wang J, Yao P, Yu B, Zou L, Wang F, Harbor J M. 2018. Controls on spatial variations of glacial erosion in the Qilian Shan, northeastern Tibetan Plateau. *Geomorphology*, 318: 128–138
- Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. 2016. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nat Geosci*, 9: 38–41
- Wang X, Carrapa B, Chapman J B, Henriquez S, Wang M, Decelles P G, Li Z J, Wang F, Oimahmadov I, Gadoev M, Chen F H. 2019. Parathethys last gasp in central Asia and late Oligocene accelerated uplift of the Pamirs. *Geophys Res Lett*, doi: 10.1029/2019GL084838
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, He Y Q, Kong X G, An Z S, Wu J Y, Kelly M J, Dykoski C A, Li X D. 2005. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 308: 854–857
- Wen J, Zhang J Q, Nie Z L, Zhong Y, Sun H. 2014. Evolutionary diversifications of plants on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Front Genet*, 5: 1–14
- Wu D, Chen X M, Lv F Y, Brenner M, Curtis J, Zhou A F, Chen J H, Abbott M, Yu J Q, Chen F H. 2018. Decoupled early Holocene summer temperature and monsoon precipitation in southwest China. *Quat Sci Rev*, 193: 54–67
- Wu Q, Zhang T. 2008. Recent permafrost warming on the Qinghai-Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 113: D13108
- Wu T F, Qin B Q, Ding W H, Zhu G W, Zhang Y L, Gao G, Xu H, Li W, Dong B L, Luo L C. 2018. Field observation of different wind-induced basin-scale current field dynamics in a large, polymictic, eutrophic lake. *J Geophys Res-Oceans*, 123: 6945–6961
- Wu Z Y, Wu S G. 1998. A proposal for a new floristic kingdom (realm)-the E. Asiatic kingdom, its delineation and characteristics. In: Zhang A L, Wu S G, eds. *Floristic Characteristics and Diversity of East Asian Plants*. Beijing & Berlin: China Higher Education Press & Springer. 3–42
- Xia J. 1991. Identification of a constrained nonlinear hydrological system described by Volterra functional series. *Water Resour Res*, 27: 2415–2420
- Xia J, O'Connor K M, Kachroo R K, Liang G C. 1997. A non-linear perturbation model considering catchment wetness and its application in river flow forecasting. *J Hydrol*, 200: 164–178
- Xie S C, Evershed R P, Huang X Y, Zhu Z M, Pancost R D, Meyers P A, Gong L F, Hu C Y, Huang J H, Zhang S H, Gu Y S, Zhu J Y. 2013. Concordant monsoon-driven postglacial hydrological changes in peat and stalagmite records and their impacts on prehistoric cultures in central China. *Geology*, 41: 827–830
- Yang B, Qin C, Wang J, He M, Melvin T M, Osborn T J, Briffa K R. 2014. A 3500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau. *Proc Natl Acad Sci USA*, 111: 2903–2908
- Yang B, Shi Y, Braeuning A, Wang J. 2004. Evidence for a warm-humid climate in arid northwestern China during 40–30 ka BP. *Quat Sci Rev*, 23: 2537–2548

- Yang D W, Gao B, Jiao Y, Lei H M, Zhang Y L, Yang H B, Cong Z T. 2015. A distributed scheme developed for eco-hydrological modeling in the upper Heihe River. *Sci China Earth Sci*, 58: 36–45
- Yang X, Chen Q, Ma Y, Li Z, Hung H, Zhang Q, Jin Z, Liu S, Zhou Z, Fu X. 2018. New radiocarbon and archaeobotanical evidence reveal the timing and route of southward dispersal of rice farming in south China. *Chin Sci Bull*, 63: 1495–1501
- Yang X, Scuderi L, Paillou P, Liu Z, Li H, Ren X. 2011. Quaternary environmental changes in the drylands of China—A critical review. *Quat Sci Rev*, 30: 3219–3233
- Yang X, Wan Z, Perry L, Lu H, Wang Q, Zhao C, Li J, Xie F, Yu J, Cui T, Wang T, Li M, Ge Q. 2012. Early millet use in Northern China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 109: 3726–3730
- Yang Y, Dong G, Zhang S, Cui Y, Li H, Chen G, Dodson J, Chen F. 2017. Copper content in anthropogenic sediments as a tracer for detecting smelting activities and its impact on environment during prehistoric period in Hexi Corridor, Northwest China. *Holocene*, 27: 282–291
- Yang Z, Zhang M, Shi X, Kong F, Ma R, Yu Y. 2016. Nutrient reduction magnifies the impact of extreme weather on cyanobacterial bloom formation in large shallow Lake Taihu (China). *Water Res*, 103: 302–310
- Yao T, Thompson L, Yang W, Yu W, Gao Y, Guo X, Yang X, Duan K, Zhao H, Xu B, Pu J, Lu A, Xiang Y, Kattel D B, Joswiak D. 2012. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nat Clim Change*, 2: 663–667
- Yao T, Wu F, Ding L, Sun J, Zhu L, Piao S L, Deng T, Ni X, Zheng H, Ouyang H. 2015. Multispherical interactions and their effects on the Tibetan Plateau's earth system: A review of the recent researches. *Natl Sci Rev*, 2: 468–488
- Yao X, Zhang L, Zhang Y, Du Y, Jiang X, Li M. 2018. Water diversion projects negatively impact lake metabolism: A case study in Lake Dazong, China. *Sci Total Environ*, 613–614: 1460–1468
- Yu S Y, Colman S M, Lai Z P. 2019. Late-Quaternary history of 'great lakes' on the Tibetan Plateau and palaeoclimatic implications—A review. *Boreas*, 48: 1–19
- Zhang B, Yao Y. 2016. Implications of mass elevation effect for the altitudinal patterns of global ecology. *J Geogr Sci*, 26: 871–877
- Zhang D C, Ye J X, Sun H. 2016. Quantitative approaches to identify floristic units and centres of species endemism in the Qinghai-Tibetan Plateau, south-western China. *J Biogeogr*, 43: 2465–2476
- Zhang D D, Li S H. 2002. Optical dating of Tibetan human hand- and footprints: An implication for the palaeoenvironment of the last glaciation of the Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 29: 1069
- Zhang D J, Zhang N M, Wang J, Ha B, Dong G H, Chen F H. 2017. Comment on "Permanent human occupation of the central Tibetan Plateau in the early Holocene". *Science*, 357: eaam8273
- Zhang E L, Chang J, Cao Y M, Sun W W, Shulmeister J, Tang H Q, Langdon P G, Yang X D, Shen J. 2017. Holocene high-resolution quantitative summer temperature reconstruction based on subfossil chironomids from the southeast margin of the Qinghai-Tibetan plateau. *Quat Sci Rev*, 165: 1–12
- Zhang H B, Griffiths M L, Chiang J C H, Kong W W, Wu S T, Atwood A, Huang J H, Cheng H, Ning Y F, Xie S C. 2018. East Asian hydroclimate modulated by the position of the Westerlies during Termination I. *Science*, 362: 580–583
- Zhang H C, Peng J L, Ma Y Z, Chen G J, Feng Z D, Li B, Fan H F, Chang F Q, Lei G L, Wünnemann B. 2004. Late Quaternary palaeolake levels in Tengger Desert, NW China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 211: 45–58
- Zhang J, Tsukamoto S, Jia Y, Frechen M. 2016. Lake level reconstruction of Huangqihai Lake in northern China since MIS 3 based on pulsed optically stimulated luminescence dating. *J Quat Sci*, 31: 225–238
- Zhang M G, Slik J W F, Ma K P. 2016. Using species distribution modeling to delineate the botanical richness patterns and phytogeographical regions of China. *Sci Rep*, 6: 22400
- Zhang P, Cheng H, Edwards R L, Chen F, Wang Y, Yang X, Liu J, Tan M, Wang X, Liu J, An C, Dai Z, Zhou J, Zhang D, Jia J, Jin L, Johnson K R. 2008. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. *Science*, 322: 940–942
- Zhang Q B, Evans M N, Lyu L. 2015. Moisture dipole over the Tibetan Plateau during the past five and a half centuries. *Nat Commun*, 6: 8062
- Zhang T, Barry R G, Knowles K, Heginbottom J A, Brown J. 2008. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere. *Polar Geogr*, 31: 47–68
- Zhang X L, Ha B B, Wang S J, Chen Z J, Ge J Y, Long H, He W, Da W, Nian X M, Yi M J, Zhou X Y, Zhang P Q, Jin Y S, Bar-Yosef O, Olsen J W, Gao X. 2018. The earliest human occupation of the high-altitude Tibetan Plateau 40 thousand to 30 thousand years ago. *Science*, 362: 1049–1051
- Zhang Y L, Liu X H, Qin B Q, Shi K, Deng J M, Zhou Y Q. 2016. Aquatic vegetation in response to increased eutrophication and degraded light climate in Eastern Lake Taihu: Implications for lake ecological restoration. *Sci Rep*, 6: 23867
- Zhang Y, Hu Z, Qi W, Wu X, Bai W, Li L, Ding M, Liu L, Wang Z, Zheng D. 2016. Assessment of effectiveness of nature reserves on the Tibetan Plateau based on net primary production and the large sample comparison method. *J Geogr Sci*, 26: 27–44
- Zhang Y, Qi W, Zhou C, Ding M, Liu L, Gao J, Bai W, Wang Z, Zheng D. 2014. Spatial and temporal variability in the net primary

- production of alpine grassland on the Tibetan Plateau since 1982. *J Geogr Sci*, 24: 269–287
- Zhang Z, Hou S, Yi S. 2018. The first luminescence dating of Tibetan glacier basal sediment. *Cryosphere*, 12: 163–168
- Zhao Z J. 2009. Eastward spread of wheat into China—New data and new issues. *Chin Archaeol*, 1: 1–9
- Zhao Z. 1998. The middle Yangtze region in China is one place where rice was domesticated: Phytolith evidence from the Diaotonghuan Cave, Northern Jiangxi. *Antiquity*, 72: 885–897
- Zheng B X. 1989. Controversy regarding the existence of a large ice sheet on the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau during the Quaternary Period. *Quat Res*, 32: 121–123
- Zheng B X, Rutter N. 1998. On the problem of Quaternary glaciations, and the extent and patterns of Pleistocene ice cover in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Quat Int*, 45-46: 109–122
- Zheng H B, Wei X C, Tada R, Clift P D, Wang B, Jourdan F, Wang P, He M Y. 2015. Late Oligocene-Early Miocene birth of the Taklimakan Desert. *Proc Natl Acad Sci USA*, 112: 7662–7667
- Zheng H, Clift P D, Wang P, Tada R, Jia J, He M, Jourdan F. 2013. Pre-Miocene birth of the Yangtze River. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110: 7556–7561
- Zhou S Z, Li J J, Zhao J D, Wang J, Zheng J X. 2011. Quaternary glaciations: Extent and chronology in China. *Dev Quat Sci*, 15: 981–1002
- Zhou W, Yu X, Jull A J T, Burr G, Xiao J Y, Lu X, Xian F. 2004. High-resolution evidence from southern China of an early holocene optimum and a mid-Holocene dry event during the past 18000 years. *Quat Res*, 62: 39–48
- Zhu M Y, Zhu G W, Zhao L L, Zhang Y L, Gao G, Qin B Q. 2013. Influence of algal bloom degradation on nutrient release at the sediment-water interface in Lake Taihu, China. *Environ Sci Pollut Res*, 20: 1803–1811
- Zou D, Zhao L, Sheng Y, Chen J, Hu G, Wu T, Wu J, Xie C, Wu X, Pang Q, Wang W, Du E, Li W, Liu G, Li J, Qin Y, Qiao Y, Wang Z, Shi J, Cheng G. 2017. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau. *Cryosphere*, 11: 2527–2542
- Zuo X, Lu H, Jiang L, Zhang J, Yang X, Huan X, He K, Wang C, Wu N. 2017. Dating rice remains through phytolith carbon-14 study reveals domestication at the beginning of the Holocene. *Proc Natl Acad Sci USA*, 114: 6486–6491

(责任编辑: 郭华东)