青藏高原生态变化

张宪洲^{①*}, 杨永平^②, 朴世龙^③, 包维楷^④, 汪诗平^③, 王根绪^⑤, 孙航^②, 罗天祥^③, 张扬建^①, 石培礼^①, 梁尔源^③, 沈妙根^③, 王景升^①, 高清竹^⑥, 张懿铨^①, 欧阳华^①

① 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

② 中国科学院昆明植物研究所, 昆明 650201;

③ 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101;

④ 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041;

⑤ 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

⑥ 中国农业科学院, 北京 100081

* 联系人, E-mail: zhangxz@igsrr.ac.cn

2015-05-15 收稿, 2015-07-25 接受, 2015-08-10 网络版发表

中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)(KFJ-EW-ST5-074)资助

摘要 青藏高原是全球平均海拔最高的自然地理单元. 近几十年乃至上百年来, 在气候变化和人类活动双重影响下, 青藏高原生态系统的结构和功能以及重要物种的种群数量和结构均发生了深刻的变化. 近几十年的研究表明: 青藏高原植被返青期提前, 生长期延长, 覆盖度和生产力增加, 碳汇功能增强, 青藏高原植被总体趋于向好, 局部变差. 气候变化是高原生态系统变化的主控因子, 气候变暖对青藏高原生态系统的影响是正面的, 但这种影响仍存在时间和空间上的不平衡性, 尤其是降水在时间和空间上的变化对于干旱和半干旱地区植被产生较大影响, 在干旱的年份叠加人类放牧活动等会导致这些区域, 尤其是青藏高原西部地区植被产生严重的退化, 但随着青藏高原生态安全屏障保护与建设工程的实施, 高原生态系统退化的态势得到了进一步遏制, 人类对高原特有珍稀植物资源, 如虫草、雪莲和胡黄连的过度采收以及对野牦牛、藏羚羊和藏野驴的盗猎等现象得到进一步缓解, 近期高原的野牦牛、藏羚羊和藏野驴的种群数量得到恢复. 青藏高原的隆起不仅对本区而且对其毗邻地区的气候与环境都产生着深刻的影响, 其生态系统对全球变化的响应与影响研究具有特殊重要的地位, 今后迫切需要加强生态系统结构和功能变化的地面监测和遥感技术的应用, 加大大型生态保护工程建设的实施力度, 整体提高高原地区应对全球变化的能力.

关键词

青藏高原
生态变化
生态系统
评估

青藏高原地处低纬, 面积辽阔, 地势高亢, 平均海拔超过4000 m, 是全球海拔最高的一个独特地域单元. 青藏高原独特复杂的生态环境导致了高原生物区系地理成分复杂、特有种丰富、珍稀濒危物种多、物种地域分布极不均匀. 从东南到西北, 随着海拔和纬度的升高, 在热量和水分驱动下, 高原植被生态系统类型也发生了重大变化, 分布着森林、灌丛、草甸、草原和荒漠等生态系统. 近几十年乃至上

百年来, 在气候变化和人类活动双重影响下, 青藏高原生态系统的结构和功能以及重要物种的种群数量和结构均发生了深刻的变化, 正确认识青藏高原生态变化特征及其机制, 对开展青藏高原生态安全屏障保护与建设, 保证青藏高原生态安全都有重要的指导意义.

本文“生态变化”泛指与生物有机体相关的变化, 尤其是生态系统和物种水平两个层次的变化. 生态

引用格式: 张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 等. 青藏高原生态变化. 科学通报, 2015, 60: 3048–3056

Zhang X Z, Yang Y P, Piao S L, et al. Ecological change on the Tibetan Plateau (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 3048–3056, doi: 10.1360/N972014-01339

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972014-01339>

系统水平, 主要包括森林、草地和湿地生态系统, 重点评估生态系统的结构和功能的变化; 物种水平, 主要是指高原特有关键物种, 重点评估种群数量和结构的变化。

1 高原植被生态系统变化

1.1 森林生态系统

青藏高原横跨西藏、青海以及四川西北部的三州(阿坝、甘孜和凉山)和云南省西北部三州(怒江、迪庆与丽江), 其林地面积约占高原面积的27%。基于2005年7月的遥感数据(NOAA/AVHRR)解译, 青藏高原森林覆盖率约为11.3%^[1]。地带性森林主要为云冷杉林、落叶松林、圆柏林、高山松林、高山栎林及其混交林等, 高原南部(藏东南、滇西北、川西南)较低海拔区也存在常绿阔叶林及常绿落叶阔叶混交林与针阔混交林。高原的东部与南部是青藏高原森林集中分布区, 一直是中国第二大林区——西南林区的主

体, 也是西南林区森林经营管理重点之一, 而原始云冷杉针叶林一直是过去近50年(1950~1998年)来重要的商品木材生产对象。过去60年(1950~2010年)来, 青藏高原森林历经了大规模采伐(1950~1985年)、采伐与造林恢复并存(1986~1998年)到近10年(1998~2010年)来以保育和恢复为主的转变过程, 森林资源在面积、蓄积、类型及空间分布格局等方面发生了显著变化。

(i) 面积和蓄积量变化。在20世纪90年代前, 整体上青藏高原森林资源是急剧缩减的, 不仅面积减小, 蓄积量也显著降低, 自1998年起实施天然林保护工程后才逐步扭转下降趋势, 实现森林面积与活立木蓄积量的双增长, 但区域内部各森林经营单元间的趋势变化程度差异明显。西藏自治区有林地面积一直呈增长趋势, 其中天然林资源保护工程启动(2000年)前增长趋势慢于之后的10余年, 而林木活立木蓄积量前期呈现类似的增长规律, 但后期有减少趋势(图1(a), (b))。青海省有林地面积前期呈减少趋

图1 西藏((a), (b))与青海((c), (d))有林地面积与活立木蓄积量变化趋势(数据来源自文献[2~6])

Figure 1 Change of forest land area and standing forest stock in Tibet Autonomous Region (data source: Ref. [2]) ((a), (b)) and Qinghai Province (data source: Ref. [3~6]) ((c), (d))

势,而后期为增长趋势;林木活立木蓄积量一直呈增长趋势(图1(c), (d)). 整体而言,1998年之前青藏高原森林面积、蓄积量及覆盖率变化主要与木材采伐量和造林成效紧密相关,而1998年后主要受造林面积及其成效影响^[2-6].

(ii) 林种组成结构变化. 林种结构优化调整是青藏高原森林变化的一个重要特点. 随着20世纪80年代末防护林工程的启动和1996年以来森林分类经营管理政策的贯彻实施,青藏高原森林中的公益林(包括防护林、特用林、薪炭林等)面积急剧增长,而商品林(如用材林、工业原料林)面积基本维持不变. 从年龄结构变化来看,青藏高原森林的总体趋势是老龄林所占比例显著减少,而幼中龄林比例逐步增加^[7-9]. 上述变化说明,处于相对稳定的演替顶级阶段的森林面积在1998年前逐年减少,而处于演替早中期阶段的森林面积增大,这必会带来森林生产力的增长. 青藏高原森林地上净第一性生产力1991~2000年间的平均值为 0.19 Pg C a^{-1} ,年际变化基本上处于平稳的波动上升趋势^[1].

(iii) 类型与林分结构变化. 森林资源的强烈干扰直接影响林分类型、优势树种组成与林分结构的变化. 60年来在长期人类活动影响下,青藏高原的森林类型与林分结构发生了显著变化. 近30年来,森林类型表现出阔叶林、针阔混交林面积与蓄积增长的变化趋势,而针叶林面积所占比例呈现前期下降而后期略呈增加趋势. 例如,九寨沟在1974~2002年的近30年间,针叶林面积减少,代之的是针阔叶混交林和落叶阔叶林面积的迅速增加^[10]. 自然恢复演替在森林类型变化过程中起到了不容忽视的作用. 林分结构不良化变化趋势也是青藏高原森林变化另一不容忽视的特点. 面积增大的幼、中龄人工林针叶化趋势明显,组成树种单一,林木密度大,株间竞争剧烈,乔木层分化困难,缺乏灌木、草本与苔藓层,导致林分立体结构简单化,林下生物多样性贫乏,生物地球化学物质循环不畅,形成大面积的低效林^[11].

(iv) 高山林线变化. 高山林线(timberline)变化一直是森林分布格局研究中的一个热点. 过去100~200年来,青藏高原的高山林线位置均未发生显著变化^[12-14],但林线树种种群密度与100~150年前相比得到了显著增加^[14,15]. 林线气候变化尤其是极端事件及伴随放牧活动的干扰、树种种群种内种间竞争与自然更新过程等单一或综合作用控制着林线森林及其

种群变化趋势^[13,16].

1.2 草地生态系统

(i) 物候变化. 物候指植物受环境影响而出现的以年为周期的自然现象,是全球变化最敏感的指示器. 全球变化背景下,青藏高原植被的物候变化显著,但表现出明显的时空差异. 基于遥感监测的结果表明,自20世纪80年代至今,青藏高原高寒的物候整体表现为返青期提前、枯黄期推迟、生长季延长的趋势^[17-19],返青期提前趋势尤其在20世纪80和90年代显著^[20,21]. 有关最近10年青藏高原物候变化趋势的争议较大,在区域尺度上过去10年青藏高原春季物候并没有显示出显著的提前趋势^[19],主要由温度上升和降水增加引起东北地区物候提前和降水减少引起的西南地区物候推迟所导致^[22].

(ii) 净初级生产力变化. 近几十年来,随着气候变暖和人类活动的加剧,青藏高原草地植被生产力发生了显著变化. 模拟气候变暖的短期开顶箱增温试验研究表明,增温降低了高寒草甸植物多样性及其生产力^[23],但短期红外增温试验研究却得到了不同的研究结果,增温显著地提高了高寒草地的生产力,增温对植物多样性影响也不大^[24]. 但长期模型模拟研究的结果却较为一致,自20世纪80年代以来,青藏高原高寒草地净初级生产力得到了显著提高^[25,26],尤其是20世纪80和90年代的20年间,青藏高原变暖变湿,草地植被净初级生产力整体增加明显;最近10年,青藏高原草地植被净初级生产力亦呈增加态势,草地植被净初级生产力增加了8.1%(图2). 虽然最近10年青藏高原草地净初级生产力增加,但存在区域性不平衡,青藏高原的西部地区变暖相对变干,草地生产力呈减少态势,东部地区变暖变湿,草地生产力呈增加态势^[26]. 1982~2009年,青藏高原高寒草地植被年均净初级生产力呈波动上升趋势,平均净初级生产力增加区域的面积是减少的5倍以上^[27]. 总体上,近几十年来的气候变化对青藏高原草地生产力的影响是正面的,气候变化主导了青藏高原大部分地区的草地生产力的变化,放牧等人类活动对青藏高原草地并未构成根本性威胁^[26].

(iii) 高寒草地生态系统碳汇功能变化. 在碳循环方面,目前青藏高原的工作主要限于碳储量估算以及与空间环境因子关系方面,而对其时间变化方面的研究和积累的知识则比较少. 来自于青海海北

图2 青藏高原草地返青期、植被指数(NDVI)、净第一性生产力和净生态系统生产力变化

Figure 2 Changes of green up date (DOY, day of year), normalized differential vegetation index (NDVI), net primary productivity (NPP) and net ecosystem productivity (NEP) in the Qinghai-Tibet Plateau

站的碳通量观测数据表明,该地区的草地起着碳汇的作用^[28,29],但仍然无法准确回答区域尺度上青藏高原高寒生态系统在全球碳循环中起的是碳汇还是碳源的作用.来自于全球大气CO₂浓度反演模型表明,区域尺度上青藏高原高寒生态系统是碳汇,其大小为26 Tg C a⁻¹(1 Tg C=10¹² g C)^[30].这一结果与基于生态系统过程模型模拟结果相似(14~22 Tg C a⁻¹)^[31],CO₂和降水是碳汇的主要驱动力(图2).值得注意的是,不同草地类型的碳循环过程对温度的响应有差别,受温度限制的高寒草甸碳循环过程对于温度变化的响应更敏感^[32];而受水分限制的高寒草原碳循环过程对降水变化的响应更敏感^[33].

1.3 湿地生态系统

(i) 面积变化. 青藏高原沼泽和河湖湿地主要

分布在青海湖及其北部祁连山前、柴达木盆地北部、三江源区、若尔盖地区以及羌塘高原南部和东部地区.过去48年间(1960~2008年),青藏高原湿地总体呈现持续退化状态,总面积减少了2970.31 km²,但其变化幅度从2000年以后逐渐减弱,大部分地区退化幅度明显减缓并出现局部逆转趋势^[34].其中湖泊湿地面积持续减少,河流湿地、沼泽湿地、泥炭湿地面积先减少后增加,而湖泊水体面积总体持续增加.

(ii) 物种多样性变化. 西藏地区沼泽湿地植物约有142种,分属于33科84属;青海省湿地植物有428种,分属于39科146属,占青海省总植物种数的16.1%;青藏高原湿地在特殊的生境中形成了众多特有物种,据不完全统计,湿地系统中青藏高原特有种占20%左右,湿地动物有鸟类73种、鱼类55种、哺乳类14种以及两栖类9种,其中列为国家重点保护的珍稀物种

约为21种^[35]。湿地物种多样性变化较为显著,以西藏拉鲁湿地为例,伴随湿地退化,植物物种增加了32种13科,动物物种减少了12科20种,总体湿地生态服务功能总价值损失 41.20×10^8 元^[36]。

2 高原关键生物物种的变化

气候变暖和人类活动是导致物种资源减少的主要因素。气候变暖导致的后果是高山“冷界”的大门敞开,破坏原生态系统的平衡,造成特殊生境中植物种质资源的减少和灭绝。人类活动的影响主要体现在对野生植物资源的过度采收,加上工程、旅游的活动影响生存环境,进而导致一些重要的经济植物资源急剧下降或种群退化,甚至达到灭绝的边缘。

2.1 虫草

虫草又称冬虫夏草,藏药称Yartsa Gunbu,是麦角菌科真菌冬虫夏草菌寄生在蝙蝠蛾科昆虫幼虫上的子座及幼虫尸体的复合体,生于青藏高原及喜马拉雅南坡海拔3000~5000 m的高山草地灌木带上面的雪线附近的草坡上,为传统的名贵中药材^[37,38]。关于青藏高原虫草的年产量,一直缺乏准确的统计数据。有研究估计青藏高原每年虫草的产量在100~200 t之间,其中青海占39.3%、西藏32.1%、四川17.9%、甘肃5.7%、云南1.4%,国外的尼泊尔、印度和不丹共占3.5%^[39]。关于气候变化对虫草产量的影响,目前缺乏可靠的监测数据和研究成果,有研究推测气温升高有利于灌木侵占高寒草地,导致虫草生境的减少^[40]。在人类活动中,过度放牧很可能对虫草产量的影响最大,草地退化和沙化以及毒杂草泛滥不利于虫草的生长^[41]。

2.2 雪莲

在藏区有6种雪莲可作药用(如水母雪莲、雪兔子、绵头雪兔子、三指雪兔子、红雪莲等),均生长在高海拔冰缘环境。近年来由于需求的增加以及旅游业的发展,雪莲被当作旅游商品出售,致使雪莲的采挖量急剧增加。以藏区东南部的迪庆的数据为例(不完全统计),1997年前年收购量大约是5000 kg,1997年后年收购量猛增到55000 kg^[42]。过度的采收除了导致资源匮乏外,还导致了种群的退化。近期的研究表明,过度采集雪莲花导致了该其种群植株平均高度减少了近10 cm,整个植物种群已经呈现出被

其他植物种类替代和迅速萎缩的征兆^[43],雪莲的种质资源受到前所未有的威胁。

2.3 胡黄连

胡黄连是中国-喜马拉雅特有高山植物,属于国家二级保护植物。由于长期大量的过度采挖及其放牧等人为活动致使居群大小日益缩减,胡黄连资源量急剧下降^[44]。据刘小利等人^[45]对西藏聂拉木的调查,2008年样地中还能见到胡黄连幼株,到2010年调查已很难见到大量个体。通过对胡黄连居群保护遗传学分析发现,胡黄连在居群间的遗传分化较大,但居群内遗传变异极低,过度的采集会导致物种种群退化^[46]。

2.4 大型保护动物

随着羌塘、可可西里和阿尔金山国家级自然保护区的建设,特别是国家和地方政府加大高原野生动物的保护力度,青藏高原的野牦牛、藏羚羊和藏野驴的种群数量得到恢复^[47,48]。研究表明,目前青藏高原的野牦牛数量约4万头,比2003年的1.5万头明显增加,主要分布于西藏的羌塘和阿尔金两个保护区内。与21世纪初相比,藏羚羊的数量由8万头增加到约15万头,藏野驴由5万头增加到9万头,棕熊、狼、沙狐等大型野生动物的数量也明显增加^[49,50]。近年来,随着大型野生动物数量的增加,人与野生动物的冲突事件也越来越多,应引起高度重视^[51]。冲突不仅为当地牧民群众造成严重的生命和财产损失,而且不断激化人与野生动物的矛盾^[52]。

3 结论与展望

由于高、寒、旱的特点,青藏高原生态系统极为脆弱,随着全球变暖和人类活动的加剧,青藏高原植物物种、群落和生态系统都发生了前所未有的变化。近几十年的研究表明:(1)高原植被物候总体表现为返青期提前,枯黄期退后,生长期延长,但同时也存在明显的空间差异,在降水减少的区域植被生长期延长并不显著。(2)高原草地植被净初级生产力和生态系统碳汇呈总体增加态势,尤其在20世纪80和90年代的20年间,青藏高原变暖变湿,植被净第一性生产力和生态系统碳汇增加显著;(3)过去100~200年来,虽然青藏高原地区的树线位置未发生显著的位置变化,但树线过渡带内种群密度显著增加。过去30

年来,青藏高原森林资源变化显著,20世纪90年代以来青藏高原林地面积和蓄积量显著增加。(4)从总体上看,青藏高原植被返青期提前,生长期延长,覆盖度和生产力增加,碳汇功能增强,青藏高原植被总体趋于向好,局部变差。气候变化是高原生态系统变化的主控因子,气候变暖对青藏高原生态系统的影响是正面的,但这种影响仍存在时间和空间上的不平衡性,尤其是降水在时间和空间上的变化对干旱和半干旱地区植被产生较大影响,在干旱的年份叠加人类放牧活动等会导致这些区域、尤其是青藏高原西部地区植被产生严重的退化,但随着青藏高原生态安全屏障保护与建设工程的实施,高原生态系统退化的态势得到了进一步遏制,人类对高原特有珍稀植物资源、如虫草、雪莲和胡黄连的过度采收以及对野牦牛、藏羚羊和藏野驴的盗猎等现象得到进一步缓解,近期高原的野牦牛、藏羚羊和藏野驴的种群数量得到恢复。

强烈的气候变暖和更加脆弱的生态系统是青藏高原最大的特点,今后青藏高原生态系统研究应更加聚焦于以下两个重大科学问题:一是青藏高原生态系统的结构和功能对全球变化的响应是否更为敏感;二是如何量化辨识气候变暖和人类活动对生态系统的影响。前一个科学问题的意义除了阐明高原生态系统本身对全球变化的响应机制之外,更重要的意义在于作为高原下垫面的生态系统对全球变化的反馈。如果青藏高原生态系统的结构和功能对全

球变化更为敏感,则会促使高原地-气能量与物质循环加快,进而影响高原天气系统的改变,进一步影响中国乃至东亚大气环流、天气和气候型式,因此,高原生态系统的变化是否更为敏感是探讨青藏高原远程效应关键一环,是预测中国乃至东亚气候变化的重要方面。后一个科学问题,关于如何量化辨识气候变暖和人类活动对高原生态系统的影响,它的重要意义在于优化生态系统的后续管理。如果高原生态系统主要受气候变化的影响,我们则要采取适应性的方法对生态系统进行管理,如果主要受人类活动的影响,我们则要采取主动的人为干预措施对生态系统进行管理,这一问题的解决对中国在青藏高原实施的生态安全屏障保护与建设规划的实施、重大生态工程的布局及其治理技术与模式的选择都有重要的参考意义。为此,今后迫切需要加强以下几个方面的工作:一是加强地面定位试验站和高寒地区定位研究网络建设。目前的定位研究很少,且大多分布在高原东部,对其广阔的西部腹地还存在盲点。二是加强遥感技术的应用。随着遥感技术的进步和大面积的监测的精度进一步提高,遥感技术已经成为实现由点到面的监测的最为重要的手段与途径,遥感技术通过与地面监测、模型模拟的结合,有利于解决区域性的一些不确定问题。三是加大大型生态保护工程建设的支持力度,强化落实国家生态补偿政策,整体提高高原地区应对全球变化的能力。

参考文献

- 1 He H Y. Modeling forest NPP patterns on the Tibetan Plateau and its responses to climate change (in Chinese). Master Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Forestry Science, 2008 [何红艳. 青藏高原森林生产力格局及对气候变化响应的模拟. 硕士学位论文. 北京: 中国林业科学研究院, 2008]
- 2 Gao X C, Wang J S. Analysis on current situation of forest resources in Tibet (in Chinese). Forest Res Manage, 2007, 5: 49-52 [高述超, 王景升. 西藏森林资源现状分析. 林业资源管理, 2007, 5: 49-52]
- 3 Dong X. Evaluation of forest resources in Qinghai Province (in Chinese). J Anhui Agri Sci, 2009, 37: 5727-5728, 5751 [董旭. 青海省森林资源评价. 安徽农业科学, 2009, 37: 5727-5728, 5751]
- 4 Li Q F. Forest vegetation's investigation by remote sensing technique and the capacities sustainable assessment in Qinghai Province (in Chinese). Master Dissertation. Northwest A & F University, 2005 [李强峰. 青海省森林植被的遥感调查与可持续评价. 硕士学位论文. 西安: 西北农林科技大学, 2005]
- 5 Su D J, Ma M Y. Forest resources assets assessment and ecological compensation in Qinghai (in Chinese). Qinghai Soc Sci, 2008, 6: 76-79 [苏多杰, 马梅英. 青海森林资源资产评估及生态补偿. 青海社会科学, 2008, 6: 76-79]
- 6 Xin X F, Dong J L. Strategic position of forest resources and its protection countermeasures in Qinghai (in Chinese). Forest Res Manage, 1997, 3: 54-57 [邢小方, 董君来. 青海森林资源的战略地位及其保护对策. 林业资源管理, 1997, 3: 54-57]
- 7 Wang J L, Jiao Y M, Ma J, et al. Analysis on the diversity of forest landscape ecological system in Sanjiang and the area of Northwest Yunnan (in Chinese). Forest Res Manage, 2000, 5: 42-46 [王金亮, 角媛梅, 马剑, 等. 滇西北三江并流区森林景观生态系统多样性变化分析. 林业资源管理, 2000, 5: 42-46]

- 8 Bao W K, Zhang Y L, Wang Q, et al. Rehabilitation and degradation for subalpine coniferous forest on the upper reaches of Dadu river of eastern Tibetan Plateau (in Chinese). *J Mt Sci*, 2002, 20: 194–198 [包维楷, 张懿铨, 王乾, 等. 青藏高原东缘大渡河上游林区的森林退化及其恢复与重建. *山地学报*, 2002, 20: 194–198]
- 9 Bao W K, Zhang Y L, Wang Q, et al. Plant diversity along a time sequence (1–30 years) of artificial forest rehabilitation on subalpine cut land in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese). *Acta Phytoecol Sin*, 2002, 26: 330–338 [包维楷, 张懿铨, 王乾, 等. 青藏高原东部森林采伐迹地早期人工重建序列梯度上植物多样性的变化. *植物生态学报*, 2002, 26: 330–338]
- 10 Hao Y Q, Jiang H, Wang J X, et al. Vegetation landscape change pattern and habitats fragmentation in Jiuzhaigou nature reserve (in Chinese). *Chin Geogr Sci*, 2009, 29: 886–892 [郝云庆, 江洪, 王金锡, 等. 九寨沟保护区植被景观变化与生境破碎化研究. *地理科学*, 2009, 29: 886–892]
- 11 Bao W K, Lei B, Pang X Y, et al. Species composition and synusia structure of ground bryophyte communities under different aged spruce plantations and primary forest in the upper reaches of the Dadu River, Sichuan (in Chinese). *Biodivers Sci*, 2009, 17: 201–209 [包维楷, 雷波, 庞学勇, 等. 大渡河上游不同林龄云杉人工林与原始林下地表苔藓层片结构与物种组成评估. *生物多样性*, 2009, 17: 201–209]
- 12 Wong M, Duan C, Long Y, et al. How will the distribution and size of subalpine *Abies georgei* forest respond to climate change? A study in northwest Yunnan, China. *Phys Geogr*, 2010, 31: 319–335
- 13 Liang E, Wang Y, Eckstein D, et al. Little change in the fir tree-line position on the southeastern Tibetan Plateau after 200 years of warming. *New Phytol*, 2011, 190: 760–769
- 14 Guo X, Zhang F, Deng Y, et al. Patterns and dynamics of tree-line response to climate change in the eastern Qilian Mountains, northeastern China. *Dendrochronologia*, 2012, 30: 121–126
- 15 Zhang L J, Liu H. Response of *Picea Crassifolia* population to climate change at the treeline ecotones in Qilian Mountains (in Chinese). *Sci Silvae Sin*, 2012, 48: 18–21 [张立杰, 刘鹤. 祁连山林线区域青海云杉种群对气候变化的响应. *林业科学*, 2012, 48: 18–21]
- 16 Wang Y, Camarero J, Luo T, et al. Spatial patterns of Smith fir alpine treelines on the southeastern Tibetan Plateau support that contingent local conditions drive recent treeline patterns. *Plant Ecol Divers*, 2012, 5: 311–321
- 17 Song C Q, You S C, Ke L H, et al. Spatio-temporal variation of vegetation phenology in the Northern Tibetan Plateau as detected by MODIS remote sensing (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2011, 8: 853–863 [宋春桥, 游松财, 柯灵红, 等. 藏北高原植被物候时空动态变化的遥感监测研究. *植物生态学报*, 2011, 8: 853–863]
- 18 Zhang G L, Zhang Y J, Dong J W, et al. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 4309–4314
- 19 Shen M, Zhang G, Cong N, et al. Increasing altitudinal gradient of spring vegetation phenology during the last decade on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Agric For Meteorol*, 2014, 189–190: 71–80
- 20 Yu H, Luedeling E, Xu J. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 22151–22156
- 21 Piao S L, Cui M D, Wang X H, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau. *Agric For Meteorol*, 2011, 151: 1599–1608
- 22 Shen M G, Piao S L, Cong N, et al. Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau. *Glob Change Biol*, 2015, doi: 10.1111/gcb.12961
- 23 Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Experimental warming, not grazing, decreases rangeland quality on the Tibetan Plateau. *Ecol Appl*, 2007, 17: 541–557
- 24 Wang S P, Duan J C J, Xu G P, et al. Effects of warming and grazing on soil N availability, species composition and ANPP in alpine meadow. *Ecology*, 2012, 93: 2365–2376
- 25 Piao S L, Wang X H, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Glob Change Biol*, 2011, 17: 3228–3239
- 26 Chen B X, Zhang X Z, Tao J, et al. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. *Agric For Meteorol*, 2014, 189–190: 11–18
- 27 Ding M J, Zhang Y L, Sun X M, et al. Spatiotemporal variation in alpine grassland phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau from 1999 to 2009. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 396–405 [丁明军, 张懿铨, 孙晓敏, 等. 近10年青藏高原高寒草地物候时空变化特征分析. *科学通报*, 2012, 57: 3185–3194]
- 28 Kato T, Tang Y, Gu S, et al. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Agric For Meteorol*, 2004, 124: 121–134
- 29 Kato T, Tang T Y, Gu S, et al. Temperature and biomass influences on interannual changes in CO₂ exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Glob Change Biol*, 2006, 12: 1285–1298

- 30 Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The Carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458: 1009–1013
- 31 Piao S L, Tan K, Nan H J, et al. Impacts of climate and CO₂ changes on the vegetation growth and carbon balance of Qinghai-Tibetan grasslands over the past five decades. *Glob Planet Change*, 2012, 98–99: 73–80
- 32 Chang X F, Wang S P, Luo C Y, et al. Responses of soil microbial respiration to thermal stress in alpine steppe on the Tibetan Plateau. *Eur J Soil Sci*, 2012, 63: 325–331
- 33 Peng S S, Piao S L, Wang T, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China. *Soil Biol Biochem*, 2009, 41: 1008–1014
- 34 Xing Y, Jiang Q G, Li W Q, et al. Landscape spatial patterns changes of the wetland in Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *Ecol Environ Sci*, 2009, 18: 1010–1015 [邢宇, 姜琦刚, 李文庆, 等. 青藏高原湿地景观空间格局的变化. *生态环境学报*, 2009, 18: 1010–1015]
- 35 Bai J H, Ouyang H, Xu H F, et al. Advances in studies of wetlands in Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *Prog Geog*, 2004, 2: 1–9 [白军红, 欧阳华, 徐惠凤, 等. 青藏高原湿地研究进展. *地理科学进展*, 2004, 2: 1–9]
- 36 Wang Q L, Zhang Y L, Wang Z F, et al. Changes of wetland ecosystem service value in the Lhasa River Basin of Tibetan Plateau (in Chinese). *Res Sci*, 2010, 32: 2038–2044 [王春连, 张懿锂, 王兆锋, 等. 拉萨河流域湿地生态系统服务功能价值变化. *资源科学*, 2010, 32: 2038–2044]
- 37 Yang D R. Regional distribution and ecogeography distribution of Chinese caterpillar fungus *Cordyceps sinensis* (in Chinese). *J Anhui Agric Univ*, 1999, 26: 143–149 [杨大荣. 中华虫草菌 *Cordyceps sinensis* 的区域分布和生态地理分布. *安徽农业大学学报*, 1999, 26: 143–149]
- 38 Li H. Chinese *Cordyceps* Resources in Tibet (in Chinese). Kunming: Yunnan Science Press, 2012 [李晖. 西藏冬虫夏草资源. 昆明: 云南科技出版社, 2012]
- 39 Winkler D. *Cordyceps sinensis*: A precious parasitic fungus infecting Tibet. *Field Mycol*, 2010, 11: 60–67
- 40 Weckerle C, Franek B, Kelly J, et al. Ancestral differences in Associations between disease manifestations and serum Ifn-Alpha in SLE patients. *J Invest Med*, 2011, 58: 662
- 41 Xu H F. Ecological investigation of *Cordyceps sinensis* in Zaduo of Qinghai Province (in Chinese). *Pratacul Husband*, 2007, 2: 30–34 [徐海峰. 青海杂多县冬虫夏草的生态调查. *草业与畜牧*, 2007, 2: 30–34]
- 42 Yang Q S, Chen S T, Zhou Z K. Protection and sustainable utilization of traditional tibetan medicine “snow lotuses” (*Saussurea*) in Diqing Autonomous Prefecture, Yunnan (in Chinese). *Acta Botan Yunnan*, 2003, 25: 297–302 [杨青松, 陈绍田, 周浙昆. 云南迪庆州传统藏药雪莲资源的保护和可持续利用. *云南植物研究*, 2003, 25: 297–302]
- 43 Law W, Salick J. Human-induced dwarfing of Himalayan snow lotus, *Saussurea laniceps* (Asteraceae). *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102: 10218–10220
- 44 Yang S H, Chen C, Guo C G, et al. Study of biological characters, endangered reasons and protecting measures of *Picrorhiza scrophulariiflora* pannel in Yunnan (in Chinese). *Southwest China J Agric Sci*, 2009, 22: 1482–1485 [杨少华, 陈翠, 郭承刚, 等. 云南胡黄连生物学特性、濒危原因及保护对策. *西南农业学报*, 2009, 22: 1482–1485]
- 45 Liu X L. Genetics and quality evaluation of the endangered and medicinal plants *Picrorhiza kurroa* Royle (in Chinese). Doctor Dissertation. Kunming: Yunnan University, 2011 [刘小莉. 濒危药用植物胡黄连保护遗传学和质量评价. 博士学位论文. 昆明: 云南大学, 2011]
- 46 Liu X L, Qian Z G, Liu F H, et al. Genetic diversity within and among populations of *Neopicrorhiza scrophulariiflora* (Scrophulariaceae) in China, an endangered medicinal plant. *Biochem Syst Ecol*, 2011, 39: 297–301
- 47 Liu W L, Schaller G B. Distribution and current situation of wild yak (in Chinese). *Tibet Sci Tech*, 2003, 127: 17–23 [刘务林, 夏勒. 野牦牛的分布和现状. *西藏科技*, 2003, 127: 17–23]
- 48 Zhou W, Zhong X H. Wild animal management in the areas outside of natural reserves: A case study in Qiangtang Natural Reserve (in Chinese). *Chin J Ecol*, 2006, 25: 800–804 [周伟, 钟祥浩. 保护区外野生动物的管理: 以藏北羌塘自然保护区为例. *生态学杂志*, 2006, 25: 800–804]
- 49 Liu W L. Tibetan Antelope (in Chinese). Beijing: China Agricultural Press, 2009 [刘务林. 西藏藏羚羊. 北京: 中国农业出版社, 2009]
- 50 Schaller G B. China steps up conservation work in ecological protection on Tibet (in Chinese). *Res Recycl*, 2013, 3: 70–72 [夏勒. 中国正加快西藏生态保护步伐. *资源再生*, 2013, 3: 70–72]
- 51 Dava Ciugene. The harm and preventive measures of people and wildlife conflict in Qiangtang area (in Chinese). *Tibet Mag*, 2010, 49: 71–78 [达瓦次仁. 羌塘地区人与野生动物冲突的危害以及防范措施. *中国西藏*, 2010, 49: 71–78]
- 52 Kang A L. Qiangtang: The wild animal and local residents (in Chinese). *Tibet Mag*, 2008, 47: 28–31 [康霭黎. 羌塘巴岭: 野生动物与当地居民之间. *中国西藏*, 2008, 47: 28–31]

Ecological change on the Tibetan Plateau

ZHANG XianZhou¹, YANG YongPing², PIAO ShiLong³, BAO WeiKai⁴, WANG ShiPing³,
WANG GenXu⁵, SUN Hang², LUO TianXiang³, ZHANG YangJian¹, SHI PeiLi¹, LIANG ErYuan³,
SHEN MiaoGen³, WANG JingSheng¹, GAO QingZhu⁶, ZHANG YiLi¹ & OUYANG Hua¹

¹ Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201, China;

³ Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

⁴ Chengdu Institute of Biology, Chengdu 610041, China;

⁵ Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

⁶ Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

The Tibetan Plateau is the highest physiographic unit regarding average elevation globally. In recent history, the ecosystem structure and function of the Tibetan Plateau, and population size and composition of the dominant species have shown profound changes due to the dual effect of climatic change and human activities. Studies during recent decades on this ecosystem showed that the green-up date of vegetation has advanced resulting in an extended growing period. Generally, the vegetation on the Plateau has improved, but with some local areas becoming degraded. Climatic warming has been a key factor responsible for the positive ecosystem change; however, this effect has been varied, especially the spatiotemporal changes of precipitation, which resulted in large changes of vegetation growth in arid and semi-arid regions. In drought years, the dual effect of climatic change and human activities caused the severe degradation of grasslands, particularly in the western region. However, with the implementation of a constructive project to protect the security of the ecological barrier on the Tibetan Plateau, the degradation of alpine ecosystems has been reduced, and the overexploitation of rare plant resources (e.g., *Cordyceps* spp., *Saussurea* spp., *Picrorhiza scrophulariiflora*) and poaching of wild animals (e.g., yak, Tibetan antelope, and Tibetan wild ass) have decreased, and their populations are recovering. The uplift of the Tibetan Plateau has affected its climate and environment and those of the adjacent areas. Future studies should consider the impact of global change on the Tibetan Plateau, and monitor the changes in ecosystem structure and function through field investigations and the application of remote sensing technology. Further implementation of large-scale ecological engineering to improve the ability of local residents to respond to global change on the Tibetan Plateau is necessary.

Tibetan Plateau, ecological change, ecosystem assessment

doi: 10.1360/N972014-01339