新疆地区全新世植被演替与气候环境演变

姚轶锋^{①*}, 王霞^{①②}, 谢淦^{①②}, 李金锋^①, 王宇飞^①, 李承森^①

① 中国科学院植物研究所, 系统与进化植物学国家重点实验室, 北京 100093;

② 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: yaoyf@ibcas.ac.cn

2015-05-18 收稿, 2015-07-14 接受, 2015-09-16 网络版发表

国家重大科学研究计划(2014CB954201)、国家自然科学基金(41271222)和国家留学基金(201204910043)资助

摘要 综述了近20年来新疆地区全新世高分辨率的孢粉记录, 通过时间序列和空间格局的对比, 初步认识了新疆地区全新世气候环境的变化特征与荒漠植被格局的演变规律. 早全新世气候温暖干旱, 北疆地区出现荒漠植被, 南疆地区发育荒漠草原和荒漠植被, 但荒漠植被在不同区域出现和持续的时间有差异. 中全新世气候环境逐渐改善, 北疆地区植被由荒漠类型向荒漠草原和草原转变, 南疆地区仍以荒漠、荒漠草原为主. 晚全新世气候环境趋向干旱化方向发展, 北疆地区以荒漠草原和草甸草原占优势, 但是旱生成分明显增加, 南疆地区覆盖荒漠植被. 新疆不同区域全新世植被演替具有一定的可比性, 也存在差异性, 而研究地点的地理位置、地形地貌、海拔、天山山脉的阻挡和西风环流的演化等因素可能是导致这种差异的原因.

关键词

孢粉
新疆
全新世
植被演替
气候环境演变

新疆地处亚欧内陆干旱区, 是全球变化的敏感地区. 近年来, 有关新疆干旱区全新世气候环境变化研究已经积累了大量丰硕的成果, 其中以湖泊沉积为载体的研究颇多. 通过梳理已经发表的相关文献资料, 发现前人的研究集中在北疆的巴里坤湖、玛纳斯湖、乌伦古湖、艾比湖、伊犁河谷, 以及南疆的博斯腾湖和罗布泊等区域^[1-17]. 在诸多研究中, 既有短尺度(近千年以来)的研究, 例如, 探讨干旱区百年尺度^[18-21]、中世纪暖期^[22-24]和小冰期^[25]的气候环境变化; 同时也不乏长尺度的研究, 例如, 许英勤^[3]重建了博斯腾湖全新世11.7 ka BP以来的植被和气候变化历史. Tao等人^[13]对晚更新世-全新世16.7 ka BP巴里坤湖的植被和环境变化进行了研究.

然而, 前人在干旱区的水热组合、湿度和气候演化模式等方面仍然存在争议. 一种观点认为干旱区的温度和水分以暖湿、冷干方式组合^[26-27]; 另一种观点则认为以暖干和冷湿方式组合^[28-30]. 在气候影响机制方面, 一种观点认为西风主导的中亚干旱区在

全新世经历了步调一致的湿度变化过程, 但是干旱区的湿度演化历史与亚洲季风区不同步, 全新世时期季风很难到达中亚地区^[31]; 另一种观点则认为西风携带的湿气对于中亚地区的环境变化并不是主要的, 而亚洲季风在早中全新世起到了更重要的作用^[32-34].

在前人发表的众多成果中, 也有部分综述性文章涉及新疆地区全新世植被演替与气候环境变化. 例如, 阎顺^[35]对20世纪80年代新疆第四纪孢粉工作的主要收获和第四纪地层中出现的主要孢粉类型进行了阶段性总结. 冯晓华等人^[36]运用全球植物功能型分类系统和生物群区化定量技术对新疆地区20世纪80年代以来的全新世孢粉数据进行了区域尺度上的集成, 定量重建了新疆全新世植被格局. 此外, Zhao等人^[37]综述了中国西部干旱半干旱区全新世植被与气候变化的时空格局, 以及Wang和Feng^[38]探讨了蒙古高原及周边地区全新世湿度演变特征. 在这些综述性成果中, 前人把新疆若干湖泊也包括在内,

引用格式: 姚轶锋, 王霞, 谢淦, 等. 新疆地区全新世植被演替与气候环境演变. 科学通报, 2015, 60: 2963-2976

Yao Y F, Wang X, Xie G, et al. Holocene vegetation succession and climate-environment change in Xinjiang Region (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 2963-2976, doi: 10.1360/N972015-00548

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972015-00548>

但是有的湖泊沉积测年样品数相对较少, 时间分辨率较低. 随着近年来测年技术的发展, 高分辨率的研究工作逐渐增多. 本文从荒漠植被演替的角度出发, 选取具有较高分辨率的孢粉资料, 综述近年来新疆地区全新世植被演替与气候环境变化方面取得的新进展, 以期能够更好地认识和理解干旱区全新世气候环境的变化特征与荒漠植被的格局演变规律.

1 区域概况

新疆地域辽阔, 总面积约166万平方公里. 地质构造复杂, 以深大断裂为分界线形成了“三山两盆”的地貌格局, 由南向北依次为昆仑山脉、塔里木盆地、天山山脉、准噶尔盆地和阿尔泰山脉. 由于常年受西风带的控制, 冬季受蒙古-西伯利亚高压带的影响, 气候类型上属于典型的大陆性气候, 以干旱少雨、冬季严寒、昼夜温差大为特点. 新疆大致以天山为界, 北疆为温带大陆性干旱半干旱气候, 南疆为暖温带大陆性干旱气候. 年均温北疆为4~9℃, 南疆为7~14℃; 年均降水量约150 mm, 北疆较多, 阿尔泰、天山山脉可达600 mm, 南疆很少, 且末、若羌一带仅10 mm左右^[39]. 新疆植被以盐生和耐盐的旱生、中生

植物为主, 包括36科123属300多种^[40]. 植被具有纬向水平地带性分布规律, 并且明显受湿度和降雨量的影响, 新疆在盆地的植被自周边山麓至盆地中央具有圈层分布的特点^[41].

2 数据来源

本文所用数据来源于前人正式发表的孢粉资料, 研究钻孔和剖面的选取遵循以下两点原则: (i) 测年分辨率较高(至少有4个以上有效测年数据); (ii) 时间尺度尽可能涵盖整个全新世. 根据这两点原则, 最终选择乌伦古湖、玛纳斯湖和艾比湖等8个湖泊钻孔和剖面的高分辨率孢粉资料(表1). 各研究地点的地理位置见图1.

3 孢粉组合与植被演替

3.1 北疆地区

(i) 乌伦古湖. 早-中全新世(9550~6730 cal a BP), 孢粉组合(图2)以黑三棱(*Sparganium*)花粉和芦苇(*Phragmites australis*)为主的禾本科植物花粉占优势, 反映湖岸区域以湿地植被为主. 同时, 蒿属花粉

图1 (网络版彩色)研究地点分布图

Figure 1 (Color online) Location map showing the selected sites

表 1 新疆地区全新世主要孢粉记录^{a)}Table 1 Holocene major pollen records in Xinjiang region^{a)}

序号	研究地点	经纬度	海拔 (m)	钻孔/ 剖面深度 (cm)	采样 间距 (cm)	测年 材料	测年 方法	测年 个数	沉积 类型	时间 跨度	代用 指标	参考 文献
1	乌伦古湖	46°59'~47°25' N 87°00'~87°35' E	478.6	223	1(粒度) 2(其他)	总有机碳	AMS ¹⁴ C	7	钻孔	9.55 ka	孢粉、粒度、 地球化学 元素	[11]
2	玛纳斯湖	45°49.8' N 86°00' E	251	324	5.4	有机质	常规 ¹⁴ C	6	钻孔	14 ka	孢粉	[1]
3	艾比湖	44°54'~45°08' N 82°35'~83°10' E	200	400	2	有机质	AMS ¹⁴ C	8	钻孔	~27 ka	孢粉	[17]
4	赛里木湖	44°34'59.0" N, 81°09'12.3" E	2071.9	300	2	有机质	AMS ¹⁴ C	11	钻孔	9.6 ka	孢粉、炭屑	[42]
5	伊犁河谷 [*]	43°51'25.7" N 81°57'54.3" E	928	900	5	炭屑、蜗牛	AMS ¹⁴ C	9	剖面	15 ka	孢粉	[14]
6	巴里坤湖	43°36'~43°45' N 92°42'~92°54' E	1585	446	1	有机质、植物 化石、花粉 浓缩物	AMS ¹⁴ C	13	钻孔	16.7 ka	孢粉	[13]
7	托勒库勒湖	43°18'~43°23' N 94°09'~94°16' E	1890	270	1(粒度) 6(孢粉)	有机质	AMS ¹⁴ C	6	钻孔	15 ka	孢粉、粒度	[43]
8	博斯腾湖	42°12.6' N 86°38.4' E	1500	350	10	有机质	常规 ¹⁴ C	4	剖面	11.7 ka	孢粉	[3]

a) *: 缺 3 ka 以来的沉积。AMS: accelerator mass spectrometry, 加速器质谱法

/藜科花粉(*Artemisia*/*Chenopodiaceae*, A/C)比值波动较大,表明周边覆盖植被在草原和荒漠草原之间变化,总体上反映了当时温暖干旱的气候环境,期间也存在短暂的冷干事件(7440 cal a BP)。中全新世-晚全新世早期(6730~560 cal a BP),水生植物黑三棱消失,水体面积增大,湖区植被经历了草原-荒漠(6730~4200 cal a BP)、荒漠-草原(4200~1850 cal a BP)、草原(1850~560 cal a BP)的转变,表明此时有效湿度逐渐增加,但在6700~4820 cal a BP期间气候仍然干旱。晚全新世晚期(560 cal a BP~至今),典型荒漠植物(例如,驼蹄瓣属(*Zygophyllum*)、麻黄属(*Ephedra*))花粉增多,A/C比值较低,表明植被类型由草原过渡到荒漠,反映有效湿度显著降低^[11]。

(ii) 玛纳斯湖。10500 a BP以前,孢粉组合(图3)以旱生非乔木花粉藜科、蒿属为主,其他还有禾本科(*Gramineae*/*Poaceae*)、麻黄属、沙拐枣属(*Calligonum*)、白刺属(*Nitraria*)等,水生植物花粉香蒲(*Typha*)和黑三棱偶见。此时花粉沉积率极低,A/C比值较低(平均0.28),代表以藜科植物为主的稀疏荒漠植被,气候寒冷干燥;10500~9000 a BP,禾本科、伞形科(*Umbelliferae*)、菊科(*Compositae*)及水生植物花粉略有增加,花粉沉积率及A/C比值(0.8)增加,指示荒漠向荒漠草原发展,中生及水生植物花粉

的增加,表明此时气候略比前一时期温暖湿润;9000~4200 a BP,蒿属花粉明显增加,藜科花粉有所减少,花粉沉积率及A/C比值(1.2~1.4)进一步增加,说明研究区域由蒿属为主的草原植被所覆盖,气候更加湿润;4200~800 a BP,花粉沉积率及A/C比值波动较大,此时发育了荒漠草原为主的植被^[1]。

(iii) 艾比湖。13870~7430 cal a BP,花粉浓度急剧增加,水生植物黑三棱、眼子菜(*Potamogeton*)和芦苇为主的禾本科花粉频繁出现,藜科花粉丰度增加,蒿属花粉丰度降低,孢粉组合反映了早全新世以荒漠植被为主,湿地环境逐渐改善。7430~3620 cal a BP,花粉浓度显著增加,旱生植物藜科和白刺属花粉丰度增加,中生植物蒿属、毛茛科(*Ranunculaceae*)、唇形科(*Labiata*/*Lamiaceae*)、唐松草属(*Thalictrum*)、蓼属(*Polygonum*)、伞形科和十字花科(*Brassicaceae*/*Cruciferae*)等花粉丰度降低,莎草科(*Cyperaceae*)花粉首次出现,本阶段植被类型向着草原-荒漠发展,水生植物黑三棱和禾本科花粉的消失,以及沉水植物眼子菜花粉的持续存在,说明湖泊水位更深,气候环境更加湿润。3620~1400 cal a BP,本阶段蒿属花粉含量增加(39.16%→44.11%),藜科花粉含量有所下降(45.31%→41.47%),A/C比值由0.88上升到1.07,花粉浓度显著增加,水生植物黑三棱、眼子菜和莎草

图2 乌伦古湖 9550 年以来花粉含量变化(改自文献[11])

Figure 2 The change of pollen content in Wulungu Lake since 9550 a BP (revised from [11])

图3 玛纳斯湖 14000 年以来花粉含量变化(改自文献[1])

Figure 3 The change of pollen content in Manasi Lake since 14000 a BP (revised from [1])

科花粉全部消失。A/C比值和花粉浓度的增加表明植被向荒漠-草原发展, 气候环境更加湿润, 湖面更加宽阔, 水体更深。1400~1150 cal a BP, 孢粉组合以蒿属和藜科为主, A/C比值与前一时期基本相似, 花粉浓

度的显著下降表明气候环境有所恶化。1150~250 cal a BP, 蒿属花粉含量增加, 并且保持很高的水平(平均49.89%), 然而藜科花粉含量下降到相对较低的水平(平均35.10%), A/C比值上升到1.45。阔叶树花粉

(如桦木属(*Betula*)、榆属(*Ulmus*)、柳属(*Salix*))和中生草本植物花粉(如蒲公英属(*Taraxacum*)、紫菀属(*Aster*)、毛茛科、唇形科等)存在,但是早生草本植物花粉(如麻黄属、白刺属、胡颓子科(*Elaeagnaceae*))几乎消失.孢粉组合表明湖盆周围可能由草原植被覆盖.250 cal a BP以来,早生草本植物花粉含量上升,中生草本植物花粉含量降低,A/C比值下降到很低的水平.孢粉组合反映了区域植被和气候环境逐渐恶化,此时人类活动可能对植被变化也产生了一定的影响(图4)^[17].

(iv) 赛里木湖. 9600 cal a BP以前,孢粉组合以草本植物花粉占优势(87.8%),藜科、禾本科、茄科(*Solanaceae*)和唇形科花粉含量达到整个钻孔的最高值,蒿属花粉含量波动较大,在本阶段达到最低值(43.0%).灌木花粉含量达到最高值,主要包括麻黄属、沙棘属(*Hippophae*)和白刺属.木本植物花粉达到最低值.盘藻含量在本阶段晚期达到最高值.花粉浓度达到钻孔最低值.孢粉组合反映荒漠植被,气候温暖干旱.9600~6500 cal a BP,孢粉组合仍以草本植物花粉占绝对优势(90.3%),木本植物花粉含量达到6.2%,伴随着松属(*Pinus*)和桦木属花粉达到钻孔最高值.由于沙棘属和白刺属花粉的消失,导致灌木花粉含量显著降低.蒿属花粉含量显著增加,藜科、禾本科、茄科、豆科、唇形科和虎耳草科花粉含量明显下降.花粉浓度波动起伏较大,但平均值增加.孢粉组合反映了荒漠草原/草原植被,降水和温度显著增加.6500~5500 cal a BP,随着藜科花粉含量的增加,草本植物花粉含量继续增加(96.2%),木本和灌木花

粉含量下降,尤其是麻黄属花粉显著降低.花粉浓度上升到整个钻孔的最高值.孢粉组合反映了荒漠植被,气候极其温暖干旱.5500~3400 cal a BP,草本植物花粉含量有所下降(93.7%),伴随着藜科花粉的下降以及蒿属花粉达到最高值,花粉浓度下降.孢粉组合反映了草原植被.3400 cal a BP以来,草本植物花粉含量下降,但仍然占据优势地位.木本植物花粉达到整个钻孔的最高值(9.4%),松属和云杉属(*Picea*)在本阶段晚期达到最高值.绣线菊(*Spiraea*)花粉含量达到最大值.蒿属花粉下降,禾本科和莎草科花粉增加.花粉浓度波动显著.孢粉组合代表了晚全新世以来草甸草原植被覆盖着湖区周围,5500年以后温度逐渐下降(图5)^[42].

(v) 伊犁河谷. 15000~12900 cal a BP以前,孢粉组合以草本和灌木花粉占优势,乔木花粉含量早期较高,后来逐渐下降,A/C比值在0.1~4.7波动,植被经历了荒漠、亚高山草甸、温带草原的转变过程.12900~11700 cal a BP,孢粉组合以藜科为主,蒿属、菊科和禾本科等植物的花粉也相当丰富,A/C比值为0.1~1.8,孢粉组合代表亚高山草甸植被,当时气候寒冷干燥,晚期藜科花粉大幅增加,说明荒漠植被发育.11700~10600 cal a BP,以蒿属花粉为主,豆科(*Leguminosae*)和怪柳属(*Tamarix*)含量有所增加,A/C比值上升(0.7~1.7),此阶段有效湿度增加,发育灌木-草原植被.10600~7600 cal a BP,蒿属花粉含量继续增加,紫菀型(*Aster-type*)、蓼科(*Polygonaceae*)、蒲公英型(*Taraxacum-type*)和菊科花粉也保持相对高的含量,藜科花粉含量有所降低,A/C比值达到全剖面最

图4 艾比湖 13870 年以来花粉含量变化^[17]

Figure 4 The change of pollen content in Aibai Lake since 13870 a BP^[17]

图5 赛里木湖 9600 年以来花粉含量变化^[42]

Figure 5 The change of pollen content in Sayram Lake since 9600 a BP^[42]

高值(2.0~5.5, 平均3.4), 孢粉组合和A/C比代表了沉积时期最湿润的阶段, 有利于温带草原植被的发展。7600~6500 cal a BP, 藜科花粉急剧增加, 禾本科花粉含量也有所上升, 蒿属、紫菀型和蓼科花粉含量下降, A/C比值较低(0.2~0.9), 反映了干旱气候条件下的灌木-荒漠草原植被类型。6500~5200 cal a BP, 蒿属、菊科、蓼科和蒲公英型花粉含量上升, 藜科和紫菀型花粉含量下降, A/C比值为0.3~4.5(平均2.0), 说明此时发育了湿润环境下的温带草原植被。5200~3300 cal a BP, 藜科花粉占优势, 蒲公英型、禾本科和豆科花粉含量增加, 蒿属花粉含量下降, 桤柳

花粉常见, A/C比值稳定在0.7, 说明研究区域发育了以藜科和蒿属为主的荒漠草原植被, 在4400~4000 cal a BP期间, 老鹳草属(*Geranium*)、蓼科、蒲公英型和禾本科花粉含量增加, 以及藜科和蒿属花粉降低, 说明这期间温度有所下降, 发育了亚高山草甸植被。3300年以来的沉积缺失(图6)^[14]。

(vi) 巴里坤湖。16700~7900 cal a BP, 孢粉组合以藜科占绝对优势, A/C比值低(<0.3), 指示荒漠植被, 沉积时期气候极端干旱, 有效湿度低。7900~4300 cal a BP, 以桦木属为代表的乔木花粉和蒿属花粉含量显著增加, 藜科花粉含量明显降低,

图6 伊犁河谷 15000 年以来花粉含量变化^[14]

Figure 6 The change of pollen content in Yili Valley since 15000 a BP^[14]

图 8 托勒库勒湖 15000 年以来花粉含量变化^[43]
Figure 8 The change of pollen content in Tuolekule Lake since 15000 a BP^[43]

图 9 博斯腾湖 11700 年以来花粉含量变化(改自文献[3])
Figure 9 The change of pollen content in Bosten Lake since 11700 a BP (revised from [3])

比(图10),可以看出北疆地区早全新世基本以荒漠植被为主,但荒漠植被在不同区域出现和持续的时间有差异.例如,玛纳斯湖地区在10500年以前表现为荒漠植被^[1],艾比湖地区荒漠植被一直延续到全新世(~7430 cal a BP)^[17],赛里木湖地区荒漠植被出现在9600 cal a BP以前^[42],巴里坤湖和托勒库勒湖地区

在7900 cal a BP以前由荒漠植被覆盖^[13,43].北疆地区荒漠植被的出现指示了早全新世总体上温暖干旱的气候环境.南疆地区博斯腾湖孢粉组合记录了同时期以荒漠草原和荒漠植被为主^[3].新疆地区早全新世植被与气候环境特征可以与其他邻近地区进行对比.内蒙古阿拉善高原居延海湖泊沉积记录了10700~

5400 cal a BP期间气候干旱,湖面较低,湖区周围由荒漠植被覆盖^[44]。内蒙古查干诺尔盐湖孢粉记录了15000~10000 a BP期间湖区以荒漠草原为主,反映了温凉干燥的气候环境^[45]。

北疆地区中全新世气候环境逐步改善,植被类型由荒漠向荒漠草原、草原转变。例如,玛纳斯湖地区在9000~4200 cal a BP期间发育草原植被^[1],赛里木湖在9600~6500 a BP和5500~3400 cal a BP以荒漠草原和草原为主^[42],伊犁河谷地区从早全新世延续到中全新世(10600~3300 cal a BP)以温带草原和荒漠草原为主^[14],巴里坤湖地区在7900~4300 cal a BP也发育了荒漠草原/草原植被^[13]。中全新世气候环境在得到改善的过程中,也伴随着短暂的干旱事件发生。例如,赛里木湖和巴里坤湖孢粉组合分别记录了6500~5500 a BP和4300~3800 cal a BP为气候持续干旱的时期,荒漠植被再次出现。南疆地区经历了由早全新世的荒漠草原向中全新世的荒漠、荒漠草原的过渡^[3]。内蒙古阿拉善高原居延海湖泊沉积记录了5400~3200 cal a BP期间为气候湿润阶段,湖区周围

以半荒漠或干草原植被为主^[44]。内蒙古查干诺尔盐湖在10000~5000 a BP期间湖区植被为森林-草原植被,反映了相对温暖湿润的气候环境^[45]。岱海孢粉气候序列记录了中全新世7900~4400 cal a BP期间气候湿润^[46]。

北疆地区晚全新世气候环境逐渐向干旱化方向发展,近4000年以来玛纳斯湖、艾比湖、赛里木湖和巴里坤湖地区的植被类型虽然以荒漠草原、草甸草原为主,但植被组分中的耐旱成分逐渐增加^[1,13,17,42]。尤其近500年以来,气候环境条件更加恶化,在乌伦古湖和巴里坤湖地区出现了荒漠植被^[1,13]。南疆博斯腾湖地区近3000年以来一直都由荒漠植被所覆盖^[3]。内蒙古阿拉善高原居延海湖泊沉积也记录了气候环境在3900 cal a BP以后逐渐变干,湖泊在1700 cal a BP之后最终干涸^[44]。内蒙古查干诺尔盐湖近5000年以来气候再度变干变冷,气候温凉干燥,湖区植被由荒漠草原为特征^[45]。内蒙古鄂尔多斯高原泊江海子在4000~1590 cal a BP为湖退阶段,气候较如今干旱,为湖泊形成以来的最干时段^[47]。

图 10 新疆地区全新世区域植被演替序列对比

Figure 10 Comparison of regional vegetation change in Xinjiang during the Holocene

4.2 空间格局对比

从地理位置上, 博斯腾湖分布在天山以南, 其他湖泊分布在天山以北, 其中巴里坤湖和托勒库勒湖分布在天山东段, 赛里木湖、艾比湖和伊犁河谷分布在天山西段, 乌伦古湖和玛纳斯湖距离天山稍远. 根据这8个研究地点的海拔高度以及在天山南北两侧的大致分布(图11), 对全新世不同海拔高度的植被对气候环境变化的响应进行了对比分析.

在海拔高度基本相同(约1500 m)的前提下, 天山南坡的博斯腾湖全新世以来植被经历了荒漠草原→荒漠→荒漠草原→荒漠的转变, 北坡的巴里坤湖则经历了荒漠→荒漠草原(草原)→荒漠→荒漠草原(草甸草原)→荒漠的发展过程^[3,13]. 通过比较可以发现, 早全新世巴里坤湖周围分布的荒漠植被出现早结束晚, 持续时间(约4000年)比博斯腾湖周围荒漠植被持续时间(约3000年)长. 晚全新世博斯腾湖周围荒漠植被持续时间长达约2800年, 而巴里坤湖周围的荒漠植被出现晚, 仅持续约500年, 初步推测可能与博斯腾湖所处的地理位置有一定关系(更接近塔克拉玛干沙漠边缘).

在海拔高度基本接近的情况下, 天山东侧的托勒库勒湖(1890 m)与西侧的赛里木湖(2071.9 m)在荒漠植被的出现和持续时间上差别较大. 从晚更新世晚期(15000 cal a BP)开始, 直到中全新世(7900 cal a BP), 托勒库勒湖周围以荒漠植被为主, 持续时间长达7000年; 7900 cal a BP以后, 湿度稍微有所改善, 植被转变为草原荒漠. 然而赛里木湖除了在早全新世(9600 cal a BP以前)和中全新世(6500~5500 cal a BP)出现荒漠植被以外, 全新世其他时间段均以草原(包括荒漠草原和草甸草原)为主. 通过比较可以看出, 天山西侧全新世气候环境要好于东侧.

位于天山西侧的艾比湖(200 m)、伊犁河谷(928 m)和赛里木湖(2071.9 m)存在明显的海拔差异, 孢粉组合记录了荒漠植被出现和持续时间也存在显著的不同. 低海拔艾比湖地区孢粉组合记录了该地区荒漠植被出现于13870~7430 cal a BP期间, 持续了近6400年, 随后气候环境有所好转, 植被逐渐转变为草原荒漠、荒漠草原. 中海拔伊犁河谷地区孢粉组合记录了该地区在新仙女木期(12900~11700 cal a BP)气候寒冷干燥的环境下出现荒漠植被, 进入全新世有效湿度增加, 出现多种类型的草原植被, 包括灌木草原、温带草原、荒漠草原等. 高海拔赛里木湖地区孢粉组

合记录了该地区在9600 cal a BP以前和6500~5500 cal a BP期间出现荒漠植被. 比较结果初步表明, 高海拔地区全新世荒漠植被持续时间比低海拔地区稍短, 这可能受气温随海拔升高而降低、降水量随海拔升高而增加的区域性分布特征的影响.

地理位置上距离天山稍远的玛纳斯湖(251 m)在海拔高度上与天山北坡的艾比湖(200 m)相近, 孢粉组合反映的全新世植被演替序列存在一定的相似性, 但植被类型在出现和持续时间上存在一定差异. 例如, 玛纳斯湖周围在早全新世(10500 a BP以前)以荒漠植被为主, 艾比湖周围分布的荒漠植被自晚更新世晚期一直延续到中全新世(7430 cal a BP). 玛纳斯湖(4200 a BP以来)和艾比湖(3620 cal a BP以来)晚全新世都由荒漠草原植被覆盖.

由以上分析可以看出, 沿天山山脉南北两侧分布的研究地点的全新世植被空间变化因各自的地理位置、海拔不同而存在一定的相似性和差异性. 此外, 地球上植被分布的模式还主要受水热组合状况的影响, 前人对于新疆第四纪以来一直处于干旱的大背景下这一观点是普遍认同的, 但对于全新世气候变化中的水热组合模式却存在颇多争议^[26~30,36], 所以仍有待进行深入的研究. 另外, 新疆地处内陆腹地, 地质构造复杂, 地貌以山盆结构为主, 气候常年受西风带的控制. 由于气候是影响植被分布的关键因素之一, 所以西风环流的强弱变化对新疆全新世植被演替也起了重要的作用. 中新世以后天山山脉的快速抬升以及两侧盆地的强烈下沉^[48,49], 对西风环流也产生了一定影响. 因为新疆的西部地区是西风环流的通道, 可以带来大西洋的湿润气流, 加上地形的影响, 在天山北侧的迎风坡有较大的降水. 而天山南坡由于被山脉阻挡, 湿润气流无法进入, 降水量较小.

5 结语与展望

新疆地区全新世孢粉记录了气候环境总体上经历了早期温暖干旱、中期有所改善、晚期趋向干旱化发展的演化过程, 不同区域的植被类型具有一定的可比性, 但是也存在一定的差异性, 这可能与研究地点所处的地理位置、地形地貌、海拔、天山山脉的阻挡和西风环流的演化等因素有很大的关联.

为了更加全面地理解干旱区全新世气候环境的变化特征与荒漠植被的格局演变规律, 今后需要对新疆地区更多的湖泊沉积进行研究(尤其是研究程度

图 11 (网络版彩色)不同研究地点沿天山山脉南北两侧海拔梯度分布示意图

Figure 11 (Color online) Sketch map showing the distribution of different study sites along the altitudinal gradient of Tianshan range

相对较低的湖泊,如台特玛湖^[50]),加强高分辨率的年代学和多项环境代用指标的综合分析,有助于得到更多高质量的气候序列,而且不同代用指标得到的气候序列之间可以相互对比,从而得到广泛接受

的气候变化框架。此外,目前对于干旱区进行古气候重建普遍用的是半定量方法(如A/C),尽管干旱环境下鉴定得到的花粉类群有限,但是今后的工作中可以尝试用定量方法(如共存因子分析法)进行气候重建。

参考文献

- 1 Sun X J, Du N Q, Weng C Y, et al. Paleovegetation and paleoenvironment of Manasi Lake, Xinjiang, NW China during the last 14000 years (in Chinese). *Quat Sci*, 1994, 3: 239–248 [孙湘君, 杜乃秋, 翁成郁, 等. 新疆玛纳斯湖盆周围近14000年以来的古植被古环境. 第四纪研究, 1994, 3: 239–248]
- 2 Wu J L, Wang S M, Wang H D. Characters of the evolution of climate and environment of Holocene in Aiby Lake basin in Xinjiang (in Chinese). *Oceanol Limnol Sin*, 1996, 27: 524–530 [吴敬禄, 王苏民, 王洪道. 新疆艾比湖全新世以来的环境变迁与古气候. 海洋与湖沼, 1996, 27: 524–530]
- 3 Xu Y Q. The assemblage of Holocene spore pollen and its environment in Bosten Lake area Xinjiang (in Chinese). *Arid Land Geogr*, 1998, 21: 43–49 [许英勤. 新疆博斯腾湖地区全新世以来的孢粉组合与环境. 干旱区地理, 1998, 21: 43–49]
- 4 Yan S, Mu G J, Kunihiro E, et al. Environmental evolution information from Aiby Lake since the last 2500 a (in Chinese). *Arid Land Geogr*, 2003, 26: 227–232 [阎顺, 穆桂金, 远藤邦彦, 等. 2500年来艾比湖的环境演变信息. 干旱区地理, 2003, 26: 227–232]
- 5 Wünnemann B, Chen F H, Riedel F, et al. Holocene lake deposits of Bosten Lake, southern Xinjiang, China. *Chin Sci Bull*, 2003, 48: 1429–1432
- 6 Wünnemann B, Mischke S, Chen F H. A Holocene sedimentary record from Bosten Lake, China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2006, 234: 223–238
- 7 Chen F H, Huang X Z, Yang M L, et al. Westerly dominated Holocene climate model in arid central Asia-case study on Bosten Lake, Xinjiang, China (in Chinese). *Quat Sci*, 2006, 26: 881–887 [陈发虎, 黄小忠, 杨美临, 等. 亚洲中部干旱区全新世气候变化的西风模式-以新疆博斯腾湖记录为例. 第四纪研究, 2006, 26: 881–887]

- 8 Xiao X Y, Jiang Q F, Liu X Q, et al. High resolution sporo-pollen record and environmental change since Holocene in the Wulugu Lake, Xinjiang (in Chinese). *Acta Micropalaeontol Sin*, 2006, 23: 77–86 [肖霞云, 蒋庆丰, 刘兴起, 等. 新疆乌伦古湖全新世以来高分辨率的孢粉记录与环境变迁. *微体古生物学报*, 2006, 23: 77–86]
- 9 Jiang Q F, Shen J, Liu X Q, et al. A high-resolution climatic change since Holocene inferred from multi-proxy of lake sediment in western area of China. *Chin Sci Bull*, 2007, 52: 1970–1979 [蒋庆丰, 沈吉, 刘兴起, 等. 西风区全新世以来湖泊沉积记录的高分辨率古气候演化. *科学通报*, 2007, 52: 1042–1049]
- 10 Li Z F, Lü Y B, Tao S C, et al. Holocene climate changes in eastern Xinjiang—A case study on Barkol Lake (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2008, 28: 107–112 [李志飞, 吕雁斌, 陶士臣, 等. 新疆东部全新世气候变化特征—以巴里坤湖为例. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28: 107–112]
- 11 Liu X Q, Herzschuh U, Shen J, et al. Holocene environmental and climatic changes inferred from Wulungu Lake in northern Xinjiang, China. *Quat Res*, 2008, 70: 412–425
- 12 Zhu Q, Wang F B, Cao Q Y, et al. Grain size distribution characteristics and changes of Lop Nur Lake sediments during the past 10000 years (in Chinese). *J Stratigr*, 2009, 33: 283–290 [朱青, 王富葆, 曹琼英, 等. 罗布泊全新世沉积特征及其环境意义. *地层学杂志*, 2009, 33: 283–290]
- 13 Tao S C, An C B, Chen F H, et al. Pollen-inferred vegetation and environmental changes since 16.7 cal ka BP at Balikun Lake, Xinjiang. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 2449–2457 [陶士臣, 安成邦, 陈发虎, 等. 孢粉记录的新疆巴里坤湖 16.7 cal ka BP 以来的植被与环境. *科学通报*, 2010, 55: 1026–1035]
- 14 Li X Q, Zhao K L, Dodson J, et al. Moisture dynamics in central Asia for the last 15 kyr: New evidence from Yili Valley, Xinjiang, NW China. *Quat Sci Rev*, 2011, 30: 3457–3466
- 15 Jia H J, Liu J Q, Qin X G. Early Holocene climatic changes and agricultural activities inferred from spore-pollen of Lop Nur (in Chinese). *J Jilin Univ (Earth Sci Ed)*, 2011, 41: 181–194 [贾红娟, 刘嘉麒, 秦小光. 全新世早期罗布泊气候变化和耕作活动的孢粉证据. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41: 181–194]
- 16 Xue J B, Zhong W. Holocene climate variation denoted by Barkol Lake sediments in northeastern Xinjiang and its possible linkage to the high and low latitude climates. *Sci China Earth Sci*, 2011, 54: 603–614 [薛积彬, 钟巍. 新疆巴里坤湖全新世气候环境变化与高低纬间气候变化的关联. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41: 61–73]
- 17 Wang W, Feng Z D, Ran M, et al. Holocene climate and vegetation changes inferred from pollen records of Lake Aiby, northern Xinjiang, China: A potential contribution to understanding of Holocene climate pattern in East-central Asia. *Quat Int*, 2013, 311: 54–62
- 18 Han S T. The environment variations in Lake Barkol in the northern of Xinjiang in recent 500 years (in Chinese). *J Xinjiang Univ (Nat Ed)*, 1991, 8: 80–89 [韩淑堤. 北疆巴里坤湖 500 年来环境变迁. *新疆大学学报(自然科学版)*, 1991, 8: 80–89]
- 19 Zhong W. Paleoclimatic significance of geochemical elements from the lacustrine sediments of Barkol Lake, Xinjiang since last 500 years (in Chinese). *Arid Land Geogr*, 1993, 16: 38–44 [钟巍. 近 500 年来新疆巴里坤湖相沉积物地球化学元素的古气候意义. *干旱区地理*, 1993, 16: 38–44]
- 20 Han S T, Wang C Y, Yuan Y J. Environmental changes of Aiby Lake and Balikun Lake in northern Xinjiang over 200 years (in Chinese). *J Xinjiang Univ (Nat Ed)*, 1994, 11: 77–83 [韩淑堤, 王成义, 袁玉江. 北疆艾比湖、巴里坤湖 200 年来环境变化若干特征. *新疆大学学报(自然科学版)*, 1994, 11: 77–83]
- 21 Wu J L, Ma L. Characteristics of the climate and environment in arid regions over the past 150 years recorded by the core sediments of Chaiwopu Lake, Xinjiang, China (in Chinese). *Quat Sci*, 2010, 30: 1137–1144 [吴敬禄, 马龙. 新疆干旱区柴窝堡湖沉积记录的 150 年来气候环境特征. *第四纪研究*, 2010, 30: 1137–1144]
- 22 Zhang Y, Kong Z C, Yan S, et al. “Medieval Warm Period” in Xinjiang—Re-discussion on paleoenvironment of the Sichanghu profile in Gurbantunggut Desert (in Chinese). *Quat Sci*, 2004, 24: 701–708 [张芸, 孔昭宸, 阎顺, 等. 新疆地区的“中世纪温暖期”—古尔班通古特沙漠四厂湖古环境的再研究. *第四纪研究*, 2004, 24: 701–708]
- 23 Ma C M, Wang F B, Cao Q Y, et al. Climate and environment reconstruction during the Medieval Warm Period in Lop Nur of Xinjiang, China. *Chin Sci Bull*, 2008, 53: 3016–3027 [马春梅, 王富葆, 曹琼英, 等. 新疆罗布泊地区中世纪暖期及前后的气候与环境. *科学通报*, 2008, 53: 1942–1952]
- 24 Zhang Y, Kong Z C, Yan S, et al. “Medieval Warm Period” on the northern slope of central Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L11702
- 25 Chen F H, Huang X Z, Zhang J W, et al. Humid Little Ice Age in arid central Asia documented by Bosten Lake, Xinjiang, China. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 2006, 49: 1280–1290 [陈发虎, 黄小忠, 张家武, 等. 新疆博斯腾湖记录的亚洲内陆干旱区小冰期湿润气候研究. *中国科学D辑: 地球科学*, 2007, 37: 77–85]
- 26 Yuan B Y, Wei L Y, Wang Z H, et al. The paleohydrological evolution sequence of Barkol Lake since 150000 a BP (in Chinese). *Quat Sci*, 1998, 4: 319–327 [袁宝印, 魏兰英, 王振海, 等. 新疆巴里坤湖十五万年来古水文演化序列. *第四纪研究*, 1998, 4: 319–327]

- 27 Fang X M, Lu L Q, Yang S L, et al. Loess in Kunlun Mountains and its implications on desert development and Tibetan Plateau uplift in west China. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 2002, 45: 289–299 [方小敏, 吕连清, 杨胜利, 等. 昆仑山黄土与中国西部沙漠发育和高原隆升. *中国科学D辑: 地球科学*, 2001, 31: 177–184]
- 28 Li J J. The patterns of environmental changes since late Pleistocene in northwestern China (in Chinese). *Quat Sci*, 1990, 3: 197–204 [李吉均. 中国西部地区晚更新世以来环境变迁模式. *第四纪研究*, 1990, 3: 197–204]
- 29 Han S T, Qu Z. The characteristics of inland-type climate during the Holocene in Balikun Lake, northern Xinjiang (in Chinese). *Sci China Ser B*, 1992, 11: 1201–1209 [韩淑堤, 瞿章. 北疆巴里坤湖内陆型全新世气候特征. *中国科学B辑*, 1992, 11: 1201–1209]
- 30 Yang X P, Zhu Z D, Jaekel D, et al. Late Quaternary palaeoenvironment change and landscape evolution along the Keriya River, Xinjiang, China: The relationship between high mountain glaciation and landscape evolution in foreland desert regions. *Quat Int*, 2002, 97/98: 155–166
- 31 Chen F H, Yu Z C, Yang M L, et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. *Quat Sci Rev*, 2008, 27: 351–364
- 32 Mischke S, Wünnemann B. The Holocene salinity history of Bosten Lake (Xinjiang, China) inferred from ostracod species assemblages and shell chemistry: Possible palaeoclimatic implications. *Quat Int*, 2006, 154–155: 100–112
- 33 Rudaya N, Tarasov P, Dorofeyuk N, et al. Holocene environments and climate in the Mongolian Altai reconstructed from the Hoton-Nur pollen and diatom records: A step towards better understanding climate dynamics in Central Asia. *Quat Sci Rev*, 2009, 28: 540–554
- 34 Zhong W, Xue J B, Li X D, et al. A Holocene climate denoted by geochemical from Barkol Lake in the northeastern Xinjiang, NW China. *Geochem Int*, 2010, 48: 792–800
- 35 Yan S. The characteristics of Quaternary sporo-pollen assemblage and the vegetation succession in Xinjiang (in Chinese). *Arid Land Geogr*, 1991, 14: 1–9 [阎顺. 新疆第四纪孢粉组合特征及植被演替. *干旱区地理*, 1991, 14: 1–9]
- 36 Feng X H, Yan S, Ni J. Pollen-based reconstruction of vegetation in Xinjiang during the Holocene (in Chinese). *Quat Sci*, 2012, 32: 304–317 [冯晓华, 阎顺, 倪健. 基于孢粉的新疆全新世植被重建. *第四纪研究*, 2012, 32: 304–317]
- 37 Zhao Y, Yu Z C, Chen F H. Spatial and temporal patterns of Holocene vegetation and climate changes in arid and semi-arid China. *Quat Int*, 2009, 194: 6–18
- 38 Wang W, Feng Z D. Holocene moisture evolution across the Mongolian Plateau and its surrounding areas: A synthesis of climatic records. *Earth Sci Rev*, 2013, 122: 38–57
- 39 SinoMaps Press. Atlas of China (in Chinese). Beijing: SinoMaps Press, 1984 [中国地图出版社. 中华人民共和国分省地图集. 北京: 中国地图出版社, 1984]
- 40 Majit H, Xu J G. Xinjiang Higher Vegetation Index (in Chinese). Urumqi: Xinjiang University Press, 2000 [米吉提·胡达拜尔地, 徐建国. 新疆高等植被检索表. 乌鲁木齐: 新疆大学出版社, 2000]
- 41 Shi Q D, Xiao J D, Pan X L, et al. Study on the change of vegetation coverage in Xinjiang since recent 20 years (in Chinese). *Arid Zone Res*, 2004, 21: 389–394 [师庆东, 肖继东, 潘晓玲, 等. 近20 a来新疆植被覆盖变化特征研究. *干旱区研究*, 2004, 21: 389–394]
- 42 Jiang Q F, Ji J F, Shen J, et al. Holocene vegetational and climatic variation in westerly dominated areas of Central Asia inferred from the Sayram Lake in northern Xinjiang, China. *Sci China Earth Sci*, 2013, 56: 339–353 [蒋庆丰, 季峻峰, 沈吉, 等. 赛里木湖孢粉记录的亚洲内陆西风区全新世植被与气候变化. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43: 243–255]
- 43 An C B, Zhao J J, Tao S C, et al. Dust variation recorded by lacustrine sediments from arid Central Asia since ~15 cal ka BP and its implication for atmospheric circulation. *Quat Res*, 2011, 75: 566–573
- 44 Herzschuh U, Tarasov P, Wünnemann B, et al. Holocene vegetation and climate of the Alashan Plateau, NW China, reconstructed from pollen data. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2004, 211: 1–17
- 45 Jiang D X, Wei J C. Late Pleistocene to Holocene palynofloras and paleoclimate of Qagan Salt Lake, Inner Mongolia (in Chinese). *Acta Sedimentol Sin*, 1997, 15: 147–152 [江德昕, 魏俊超. 内蒙古查干诺尔盐湖晚更新世至全新世孢粉植物群与古气候. *沉积学报*, 1997, 15: 147–152]
- 46 Xiao J L, Xu Q H, Nakamura T, et al. Holocene vegetation variation in the Daihai Lake region of north-central China: A direct indication of the Asian monsoon climatic history. *Quat Sci Rev*, 2004, 23: 1669–1679
- 47 Jiang Y J, Wang W, Ma Y Z, et al. A preliminary study on Holocene climate change of Ordos Plateau, as inferred by sedimentary record from Bojianghaizi Lake of Inner Mongolia, China (in Chinese). *Quat Sci*, 2014, 34: 654–665 [姜雅娟, 王维, 马玉贞, 等. 内蒙古鄂尔多斯高原泊江海子全新世气候变化初步研究. *第四纪研究*, 2014, 34: 654–665]
- 48 Lu D Y, Li Q S, Gao R, et al. A deep seismic sounding profile across the Tianshan Mountains (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2000, 45: 2100–2106 [卢德源, 李秋生, 高锐, 等. 横跨天山的人工爆炸地震剖面. *科学通报*, 2000, 45: 2100–2106]
- 49 Zhang P Z. Late Cenozoic tectonic deformation in the Tianshan Mountain and its foreland basins. *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 311–313 [张培震. 天山及其前陆盆地的晚新生代构造变形. *科学通报*, 2003, 48: 2249–2250]

- 50 Zhong W, Tuerxun, Keyimu, et al. Paleoclimatic and paleoenvironmental evolution since about 25 ka BP in the Taitema Lake area, South Xinjiang (in Chinese). *Arid Land Geogr*, 2005, 28: 183–187 [钟巍, 吐尔逊, 克依木, 等. 塔里木盆地东部台特玛湖近25.0 ka BP以来气候与环境变化. *干旱区地理*, 2005, 28: 183–187]

Holocene vegetation succession and climate-environment change in Xinjiang Region

YAO YiFeng¹, WANG Xia^{1,2}, XIE Gan^{1,2}, LI JinFeng¹, WANG YuFei¹ & LI ChengSen¹

¹ State Key Laboratory of Systematic and Evolutionary Botany, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Xinjiang Uygur Autonomous Region is located in the internal arid area of Eurasia which is highly sensitive to global climate change. A large number of publications related to Holocene environmental change in dry area of Xinjiang are available based on different time scales. This paper reviews the Holocene high-resolution pollen records in Xinjiang during the last two decades. By means of temporal and spatial comparison, we recognize the evolution of climate-environment and desert vegetation in the Holocene in Xinjiang. During the early Holocene, desert vegetation occurred in northern Xinjiang and desert-steppe and desert vegetation covered in southern Xinjiang, reflecting a warm and dry climate condition. However, occurrence and duration times of desert vegetation were different in each region. In the middle Holocene, the climate and environment developed toward a better condition. The vegetation shifted to desert-steppe and steppe in northern Xinjiang, while desert and desert-steppe still dominated in southern Xinjiang. In the late Holocene, the climate and environment became more and more arid. The desert-steppe and meadow-steppe dominated in northern Xinjiang with an increasing of dry-tolerant elements. Southern Xinjiang was covered by desert vegetation. Holocene vegetation succession in each region of Xinjiang is comparable and also has difference due to the geographical position, topography and altitude of the study site, obstruction of the Tianshan Mountains, and evolution of the westerly circulation.

pollen and spores, Xinjiang, Holocene, vegetation succession, climate and environment change

doi: 10.1360/N972015-00548