吉兰泰盐湖沉积物孢粉记录的季风边缘区全新世气候演化*

吴雅玲¹, 王永波^{1**}, 刘兴起¹, 于志同², 倪振宇¹

(1: 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

(2: 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875)

摘要: 全新世气候具有不稳定性, 且存在着区域差异, 在季风边缘区尤为显著. 因此, 本研究选取季风边缘区吉兰泰盐湖沉积物的孢粉记录并结合 AMS¹⁴C 测年结果, 对该地区全新世的古植被演化及古气候变化历史进行了重建. 结果表明, 在全新世阶段, 该地区植被类型未发生变化, 以干旱的荒漠植被为主. 早全新世 (10.5–8.5 cal ka BP), 以蒿属孢粉为主, 伴随出现少量藜科、禾本科及麻黄属孢粉, 蒿藜比 (A/C 比值) 相对稳定 (4.11 左右), 指示全新世早期气候逐步转湿的过程, 在 8.5 cal ka BP, 蒿属孢粉数量下降且被藜科孢粉取代, 指示一次明显气候干旱事件; 中全新世 (8.5–3.5 cal ka BP), 蒿属孢粉含量增加及藜科孢粉含量降低, A/C 比值在 7.1 cal ka BP 左右达到峰值, 指示该地区中全新世气候最为湿润; 晚全新世 (3.5 cal ka BP 至今), 藜科孢粉含量增加且超过早全新世, A/C 比值低至 3.66, 区域呈现明显的干旱化趋势. 此外, 结合吉兰泰盐湖沉积物矿物组成结果, 发现中全新世湖泊沉积物中, 钙芒硝大量出现, 一定程度上指示降水量增多所带来的淡水注入, 与孢粉指标指示该阶段湿润的结果一致. 通过区域对比, 发现吉兰泰地区在全新世时期的气候演化模式与东亚季风区具有较好的一致性, 表明该地区受到东亚夏季风的影响较大, 尤其是在中全新世, 东亚夏季风增强, 带来较多的降水, 气候湿润.

关键词: 吉兰泰盐湖; 全新世; 孢粉; 古植被; 东亚夏季风

Holocene climate evolution in the monsoonal margin region revealed by the pollen record from Jilantai Playa

WU Yaling¹, WANG Yongbo^{1**}, LIU Xingqi¹, YU Zhitong² & NI Zhenyu¹

(1: College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, P.R.China)

(2: College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China)

Abstract: Holocene climate is not stable, together with many regional differences, especially in the monsoon margin region. Hence, this study chose the pollen record preserved in the Jilantai Playa sediments from the monsoon margin region to reconstruct the evolution history of past vegetation and climate during the Holocene. The pollen analyses results indicate that the vegetation type didn't change in the study area during the Holocene. During the early Holocene (10.5–8.5 cal ka BP), the samples contain high amount of *Artemisia*, together with relatively lower contributions of *Chenopodiaceae*, *Poaceae* and *Ephedra*. The A/C ratio was relatively low and stable (about 4.11), indicating a gradual increase in available moisture during the early Holocene. At 8.5 cal ka BP, the proportion of *Artemisia* pollen decreased sharply, which was replaced by *Chenopodiaceae*, indicating an apparent dry climate event. In the mid-Holocene stage (8.5–3.5 cal ka BP), the content of *Artemisia* increased significantly while *Chenopodiaceae* decreased, resulting in the maximal A/C ratio at around 7.1–6.0 cal ka BP, pointing to the most humid interval during the Holocene. Then, in the late Holocene stage (3.5 cal ka BP to present), the composition of *Chenopodiaceae* increased again and exceeded that in the early Holocene stage, with A/C ratio as low as 3.66, the region showed an obvious tendency of drought. Especially in the mid Holocene, the enhanced EASM brought sufficient moisture to the Jilantai region, forming the wettest condition during the whole Holocene, which is consistent with the mineral composition of the Jilantai Playa sediments, i.e. the appearance of

* 国家自然科学基金项目 (41502325, 41372176) 和首都师范大学研究生国际交流与联合培养项目 (028175534000, 011185516000) 联合资助. 2017-09-30 收稿; 2017-11-23 收修改稿. 吴雅玲 (1992 ~), 女, 硕士研究生; E-mail: yalingwu_92@163.com.

** 通信作者; E-mail: yongbowang@cnu.edu.cn.

Glauberite, during the mid-Holocene. Compared with regional climate records, the climate evolution pattern of Jilantai region is consistent with the East Asian Summer Monsoon (EASM), suggesting that the area is dominated by the EASM with the wettest period during the mid-Holocene.

Keywords: Jilantai Playa; Holocene; pollen; paleovegetation; East Asian Summer Monsoon

全新世作为地质历史时期中距离现在最近的一个阶段,与人类活动的关系十分密切,气候变化对人类的生存和发展有重要影响,而人类活动在一定程度上也影响着气候变化^[1-4]. 在太阳辐射、大气和海洋环流以及区域地形等因素共同影响下,全新世的气候变化并非稳定而是存在着明显的区域差异,引发众多学者的关注^[5-10]. 尤其是我国西北广泛分布的干旱半干旱地区,因其受到西风和亚洲季风的双重影响,备受古气候研究的关注^[11-45](图1 A、B,表1). 研究表明,该地区全新世气候演化主要遵循由北大西洋及高纬空气块所控制而形成的西风模式以及因海洋与地表热力条件不同而形成的亚洲夏季风(包括印度夏季风和东亚夏季风)^[6, 10]. 目前,研究结果尚存在争议,具体表现为:在空间上,西风、印度夏季风以及东亚夏季风在干旱半干旱地区等地的影响范围不明确,如位于河西走廊的花海(E1),在全新世时期的气候干湿变化过程,与西风控制区和季风控制区的干湿变化模式均有明显不同^[46];而与花海相距不远的盐池(E2)在全新世时期受到了西风和季风的双重影响^[23],那么西风区和季风区的影响范围是不确定的. 在时间上,对全新世湿润期的持续时间和起止时间范围仍有异议,例如糜地湾(E10)在早全新世为相对湿润^[31],而马家湾(E8)在中全新世相对湿润^[29];再如马家湾(E8)在中全新世湿润期的持续时间明显长于青土湖(E6)的记录^[27]. 因此,干旱半干旱地区可以记录全新世时期的气候变化过程,选取合适的研究区域,可深入理解有效湿度演变模式及潜在的驱动机制^[8].

吉兰泰盐湖处于现代夏季风边缘区,其沉积物可以敏感地记录历史时期气候变化. 近半个世纪以来,通过对吉兰泰地区开展地貌结构和特征、沉积相、湖岸堤、台地、遥感影像、矿物成分和风沙活动等方面的分析,结合 OSL 和 ^{14}C 测年结果重建了湖泊演化过程和波动历史,取得了显著的成果^[47-56]. 然而,受区域气候因素及盐湖沉积环境制约,尚未开展有效地生物指标研究. 孢粉作为一种广泛分布并保存的生物指标,尤其是在缺少生物相关指标的干旱半干旱地区,可以有效地指示过去植被及气候演化的历史. 其中,孢粉的种属组合可以有效地指示植被及气候变化的趋势,例如,班公湖的孢粉组成中,藜科孢粉浓度较高时,代表相对干旱的气候环境,而蒿属孢粉浓度较高时,代表相对湿润的特点^[57];同时,不同生长环境下孢粉种属之间的比值,如蒿藜比(A/C)、蒿属与莎草科比(A/Cy),具有相对清晰的气候指示意义,也被广泛应用于古气候演化的重建^[24, 58].

因此,位于季风边缘区的吉兰泰盐湖,可以利用盐湖沉积物孢粉指标,结合钻孔岩性特征及 AMS ^{14}C 年代等资料,对该地区全新世的古植被与古气候演化进行探讨. 拟解决以下两个问题:(1)吉兰泰盐湖地区在全新世时期的古气候变化过程是怎样的?(2)吉兰泰地区在全新世时期气候演化过程的驱动机制是什么?

1 研究区概况

吉兰泰盐湖($39^{\circ}36'\sim 39^{\circ}48'\text{N}$, $105^{\circ}35'\sim 105^{\circ}45'\text{E}$; 1022 m a.s.l.)位于内蒙古自治区西北部,贺兰山与巴音乌拉山之间,腾格里沙漠以北,乌兰布和沙漠以西,属于蒙新高原地区的构造湖,湖盆地势西高东低. 研究区属温带大陆性气候,年均温 10.1°C ,年均降水量 150 mm(乌海气象站)^[59]. 湖泊无明显入湖及出湖河流,湖水补给方式主要为间歇性地表、地下径流、湖面降水及承压水^[60]. 现为一个硫酸亚镁型盐湖^[52],湖水 pH 值为 6.7,矿化度为 304.9 g/L ;目前,为无湖表卤水的干盐湖阶段,化学沉积作用显著,沉积物以石膏、石盐及芒硝为主^[59].

吉兰泰地区周围被沙漠环绕,以荒漠植被为主,多为盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、籽蒿(*Artemisia sphaerocephala krasch*)、西伯利亚白刺(*Nitraria sibirica*)和四合木(*Tetraena mongolica*)等. 此外,盐湖保护区种植着花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙冬青(*Ammodendron mongolicum*)、胡杨(*Populus euphratica*)和沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等植物^[55, 59-60].

图 1 A. 影响我国气候的主要大气环流系统: 西风环流 (Westerlies)、印度夏季风 (ISM)、东亚夏季风 (EASM) 及古气候记录: 赛里木湖 (W1); 博斯腾湖 (W2); 乌伦古湖 (W3); 巴里坤湖 (W4); 古里雅冰芯 (A1); 和尚洞 (A2); 董哥洞 (A3) (图中虚线为 400 mm 等降水量线); B. 季风边缘区相关记录的位置 (尕斯库勒湖 (S1); 茶卡盐湖 (S2); 青海湖 (S3); 达连海 (S4); 小沟 (S5); 苏家湾 (S6a); 大地湾 (S6b); 花海 (E1); 盐池 (E2); 居延古湖 (E3); 哈溪剖面 (E4); 猪野泽 (E5); 青土湖 (E6); 乌兰布和沙漠 (E7); 马家湾 (E8); 盐海子 (E9); 糜地湾 (E10); 靖边 (E11); 定西 (E12); 巴汗淖 (E13); 锦界 (E14); 库布奇沙漠 (E15); 察素齐 (E16); 公海 (E17); 调角海子 (E18); 岱海 (E19); 查干诺尔湖 (E20); 黄旗海 (E21); 巴彦查干湖 (E22); 浑善达克沙漠 (E23)); C. 吉兰泰盐湖以及采样点

Fig.1 A. The atmospheric circulations that influence climate change China, including the Westerlies, the Indian Summer Monsoon (ISM) and the East Asian Summer Monsoon (EASM), as well as palaeoclimate records from Lake Sayram (W1); Lake Bosten (W2); Lake Wulungu (W3); Lake Balikun (W4); Guliya Ice Core (A1); Heshang Cave (A2); Dongge Cave (A3); the dotted line is 400 mm isohyet); B. Location of relevant records in the monsoonal margin region (Lake Gahai (S1); Lake Chaka Salt (S2); Lake Qinghai (S3); Lake Dalianhai (S4); Xiaogou (S5); Sujiawan (S6a); Dadiwan (S6b); Lake Huahai (E1); Yanchi Playa (E2); Juyan Palaeolake (E3); Haxi Section (E4); Lake Zhuyeze (E5); Lake Qingtu (E6); Ulanbuh Desert (E7); Majiawan (E8); Lake Yanhaizi (E9); Midiwan (E10); Jingbian (E11); Dingxi Section (E12); BaaharNuur (E13); Jinjie (E14); Hobq Desert (E15); Chasuqi (E16); Lake Gonghai (E17); Lake Diaojiao (E18); Lake Daihai (E19); Lake Qagan Salt (E20); Lake Huangqihai (E21); Bayanchagan (E22); Otindag Desert (E23)); C. Jilantai Playa and the core sites

表1 西风区和季风边缘区的33个古气候记录(从西至东)

Tab.1 33 palaeoclimate records in the westerlies dominated and monsoonal margin region (from west to east)

序号	研究区(经纬度)	海拔/ m a.s.l.	载体类型	年代/ cal ka BP	研究指标	参考文献
W1	赛里木湖(44.53°N, 81.17°E)	n.d.	湖泊沉积物	14.0—0	孢粉、炭屑	[11]
W2	博斯腾湖(41.93°N, 86.67°E)	1048	湖泊沉积物	8.0—0	岩性特征、粒度、孢粉	[12]
W3	乌伦古湖(46.98°N, 87.00°E)	478	湖泊沉积物	9.5—0	粒度、孢粉、有机质含量、碳酸盐含量	[13]
W4	巴里坤湖(43.60°N, 92.70°E)	1575	湖泊沉积物	>8.6—0	粒度、孢粉、磁化率、矿物分析、有机质含量	[14]
S1	尕斯库勒湖(37.16°N, 97.55°E)	3480	湖泊沉积物	11.3—0	粒度、孢粉	[15]
S2	茶卡盐湖(36.70°N, 99.15°E)	3200	盐湖沉积物	17.2—0	岩性特征、矿物分析、有机质含量	[16]
S3	青海湖(37.00°N, 100.00°E)	3200	湖泊沉积物	18.0—0	孢粉、介形虫、氧同位素	[17-18]
S4	达连海(36.20°N, 100.40°E)	2850	湖泊沉积物	14.5—0	矿物分析、碳酸盐含量、粒度、孢粉	[19]
S5	小沟(36.00°N, 105.00°E)	2000	剖面	25.0—0	岩性特征、孢粉	[20]
S6a	苏家湾(35.54°N, 104.53°E)	1700	黄土	9.0—0	粒度、孢粉、有机质含量、软体动物	[21]
S6b	大地湾(35.01°N, 105.92°E)	1400	黄土	9.0—0		
E1	花海(40.67°N, 98.10°E)	1150~1250	湖泊沉积物	12.0—0	岩性特征、矿物分析、元素分析	[22]
E2	盐池(39.75°N, 99.30°E)	1348	盐湖沉积物	11.2—0	磁化率、光度、色度、粒度、有机质含量	[23]
E3	居延古湖(41.89°N, 101.85°E)	892	古湖泊沉积物	10.7—1.7	岩性特征、孢粉	[24]
E4	哈溪剖面(37.50°N, 102.40°E)	2450	资料	10.9—0	岩性特征、磁化率、有机质含量、碳酸盐含量	[25]
E5	猪野泽(39.00°N, 103.33°E)	1320	干盐湖沉积物	13.0—0	介形虫、软体动物、粒度、碳酸盐含量、有机质含量、孢粉	[26]
E6	青土湖(39.05°N, 103.67°E)	1309	干盐湖沉积物	11.0—0	孢粉	[27]
E7	乌兰布和沙漠(40.04°N, 105.78°E)	1026	剖面	>90.0—0	孢粉、粒度	[28]
E8	马家湾(36.00°N, 108.16°E)	1400	黄土	11.5—0	粒度、碳酸盐含量、有机质含量、磁化率、元素分析、岩性特征	[29]
E9	盐海子(40.15°N, 108.45°E)	1180	湖泊沉积物	>15.0—0	岩性特征、碳酸盐含量、有机质含量、碳氮比、元素分析、矿物分析、磁化率	[30]
E10	糜地湾(37.65°N, 108.62°E)	1400	泥炭	15.4—0	岩性特征、孢粉、有机质含量、碳同位素	[31]
E11	靖边(37.50°N, 109.00°E)	n.d.	沟槽	10.0—0	岩性特征、粒度、碳酸盐含量	[32]
E12	定西(39.10°N, 109.20°E)	1450	盐湖沉积物	>13.8—0	岩性特征、磁化率、粒度、碳酸盐含量、孢粉	[33]
E13	巴汗淖尔(39.32°N, 109.27°E)	1278	干盐湖沉积物	>7.7—0	岩性特征、粒度、有机质含量、碳酸盐含量、碳氮比、碳同位素、氧同位素	[34]
E14	锦界(38.74°N, 110.17°E)	1159	黄土	>7.2—0	元素分析、岩性特征	[35]
E15	戈壁沙漠(39.67°~40.80°N, 107.13°~111.5°E)	n.d.	古土壤	11.5—0	孢粉、磁化率、有机质含量、粒度	[36]
E16	察素齐(40.67°N, 111.12°E)	n.d.	湖泊沉积物	10.2—0	孢粉	[37]
E17	公海(38.9°N, 112.23°E)	1860	湖泊沉积物	14.7—0	磁化率、孢粉	[38]
E18	调角海子(41.30°N, 112.35°E)	1800	湖泊沉积物	9.6—0	孢粉	[39]
E19	岱海(40.55°N, 112.75°E)	1221	湖泊沉积物	11.2—0	碳酸盐含量、有机质含量、岩性特征、孢粉	[40-41]
E20	查干诺尔(43.27°N, 112.90°E)	1000~1400	盐湖沉积物	18.0—0	孢粉	[42]
E21	黄旗海(40.77°N, 113.45°E)	n.d.	剖面	14.5—0.9	粒度、磁化率、元素分析	[43]
E22	巴彦查干(41.65°N, 115.21°E)	1355	湖泊沉积物	12.5—0	孢粉	[44]
E23	浑善达克沙地(41.41°~43.69°N, 114.97°~117.66°E)	n.d.	剖面	9.9—0	孢粉、磁化率、粒度	[45]

2 材料与方法

2.1 样品采集与年代学

2010 年 10 月利用 XY-1B 型钻机在吉兰泰盐湖近湖心处获取约 28 m 的连续长岩芯柱(图 1C),孔径 108 mm,本文以盐湖沉积物上部 598 cm 全新世阶段岩芯为研究对象,以 2 cm 分样,岩性特征如下:

598~578 cm:浅灰绿色砂或泥质粉砂,含少量石膏和盐类;578~324 cm:灰褐色细砂夹大量的石盐、石膏和钙芒硝;324~0 cm:以粒状石盐为主,含少量的灰黑色泥、黄褐色泥质粉砂以及石膏等^[54].

选取盐湖沉积物上部不同深度的 8 个总有机质样品进行 AMS¹⁴C 年代测定(表 2),在新西兰国家同位素测试中心拉夫特放射性实验室完成^[54]. 由于近地表样品容易受到现代卤水沉积环境的影响,且含有大量的石膏芒硝等盐类,有机质含量低,利用²¹⁰Pb/¹³⁷Cs 的测年结果不理想. 故选择深度约 6~8 cm 的样品作为第一个¹⁴C 测年点,其测年结果为 1593 a BP,推测为碳库效应引起的年代偏老^[54]. 将 8 个 AMS¹⁴C 年代扣除 1593 年碳库效应后,在 R 程序中利用 Bacon 模型校正为日历年龄并进行插值^[61],建立钻孔年代—深度关系(图 2),获得钻孔 598 cm 深度年代为 10.5 cal ka BP. 整个全新世阶段沉积速率较为稳定,约 0.57 mm/a,仅在 274~201 cm 处沉积速率较快,为 4.7 mm/a.

表 2 吉兰泰盐湖 JLT-2010 孔 AMS¹⁴C 及日历年龄^[54]

Tab.2 AMS¹⁴C dates and calendar ages of the core JLT-2010 in Jilantai Playa

样品 编号	深度/ cm	AMS ¹⁴ C 年龄/ a BP	$\delta^{13}\text{O}/$ ‰	扣除 1593 a 后的 AMS ¹⁴ C 年龄/a BP	日历年龄/ cal a BP
JLT-1-8	6~8	1593±20	-33.9	0±20	-4—245(120)
JLT-2-11	67~69	3415±35	-21.9	1822±35	1751—1813(1782)
JLT-4-31	200~201	5156±20	-20.4	3563±20	3839—3884(3861)
JLT-5-25	272~274	5311±20	-19.1	3718±20	3993—4039(4016)
JLT-6-21	326~328	6468±40	-20.0	4875±40	5589—5622(5605)
JLT-6-27	338~340	7015±40	-22.5	5422±40	6208—6254(6231)
JLT-8-30	474~476	9246±35	-19.1	7653±35	8401—8457(8429)
JLT-15-16	936~938	14886±50	-22.1	13293±50	16123—16656(16389)

2.2 孢粉分析

以 14 cm 为间隔选取 JLT-2010 孔不同深度的 47 个样品进行孢粉分析. 每个样品取约 10~40 g,先使用蒸馏水浸泡、清洗并通过 200 μm 筛网去除样品中的可溶性盐类和大颗粒的不溶物质,然后采用氢氟酸法对样品进行孢粉提取^[62]. 主要步骤如下:样品中加入一片石松孢子后添加 10% 稀盐酸(HCl)去除碳酸盐,加入 10% 的氢氧化钾溶液(KOH)并水浴加热去除有机质,随后加浓度大于 40% 氢氟酸(HF)去除硅酸盐;最后过 7 μm 筛网富集花粉. 提取出的孢粉样品制片后在 Olympus 光学显微镜(40×10 倍)下进行鉴定与统计,参考已有孢粉形态学研究资料^[63],保证每个样品统计孢粉数量在 300 粒以上.

用 Tilia 软件对吉兰泰沉积物样品中各陆生孢粉种属的组成和数量进行画图,利用 CONISS 结果划分孢粉带^[64]. 为获取各孢粉种属之间的联系和相应的气候指示意义,利用 CANOCO 软件对 47 个样品 13 种陆生孢粉种属(孢粉种属含量超过 2%或在连续 3 个样品中出现)进行统计学分析,即去趋势对应分析(DCA),分析结果小于 2 倍标准偏差,推荐使用主成分分析法(PCA). 同时,将基于中国干旱半干旱地区大型湖泊表层花粉数据建立的现代花粉—降水定量转换函数应用到吉兰泰盐湖沉积物全新世孢粉序列,利用 WA-PLS 法重建了过去年均降水量的变化^[65]. 对现代花粉—气象资料的分析表明^[65],干旱半干旱地区的孢粉记录可以更敏感的记录过去降水量的变化,将该方法应用到吉兰泰盐湖孢粉记录,重建结果 r^2 为 0.81,均方根误差(RMSE)为 76.6 mm.

图2 吉兰泰盐湖 JLT-2010 孔上部 598 cm 处的岩性特征及 AMS¹⁴C 测年结果与深度的关系

Fig.2 The lithology of the upper 598 cm of core JLT-2010 in Jilantai Playa and the relationship between AMS¹⁴C dating results and depth

3 结果

3.1 吉兰泰盐湖沉积物孢粉组成

对吉兰泰盐湖沉积物样品进行孢粉处理后,所有样品统计的孢粉粒数均在 300 粒以上,共鉴定出 15 个科属的植物花粉,包含乔木类花粉:桦木科 (Betulaceae)、胡桃科 (Juglandaceae) 和松属 (*Pinus*);灌木类花粉:麻黄属 (*Ephedra*)、白刺属 (*Nitraria*) 和柳属 (*Salix*);草本类花粉:蒿属 (*Artemisia*)、菊科 (Asteraceae)、藜科 (Chenopodiaceae)、旋花科 (Convolvulaceae)、唇形科 (Labiatae)、禾本科 (Poaceae)、蓼科 (Polygonaceae)、蔷薇科 (Rosaceae) 和唐松草属 (*Thalictrum*)。其中蒿属与藜科之和占孢粉统计总数的 85% 以上,其次是禾本科 2.97%、麻黄属 1.29%、菊科 0.85%、桦木科 0.63%、松属 0.63%、唇形科 0.29%、白刺属 0.27%,其他孢粉数量所占比例小于 0.2%。

3.2 吉兰泰盐湖沉积物孢粉组合带及重建降水量

根据吉兰泰盐湖沉积物孢粉的组成特征,可将其划分为 3 个孢粉组合带(图 3):

孢粉带 JLT-Z1 (598~480 cm, 10.5—8.5 cal ka BP):以蒿属和藜科为主,二者占孢粉总量的 89.18%,A/C 平均值为 4.11,以桦木科、松属、胡桃科为主的乔木类和麻黄属、白刺属为主的灌木类孢粉共占 4.5%,为全新世时期最高的一个阶段。在 8.5 cal ka BP 前后蒿属花粉突降至 35.76%,藜科花粉剧增至 53.16%,A/C 比明显下降,达到剖面最低值(0.67),重建的年均降水量降为 55 mm。

孢粉带 JLT-Z2 (480~200 cm, 8.5—3.5 cal ka BP):仍以蒿属和藜科为主,占孢粉总量的 91.34%,桦木科、松属孢粉含量下降,以及麻黄属含量平均减少;相比前一阶段,蒿属花粉略有增加而藜科花粉含量降低,A/C 平均值增高至 9.58,重建的年均降水量为 246 mm,且在 7.1 cal ka BP 左右达到峰值,即 A/C 平均值为 32.89,重建的年均降水量达到 395 mm。

孢粉带 JLT-Z3 (200~0 cm, 3.5 cal ka BP 至今):草本类孢粉保持在较高的含量,桦木科和麻黄属的孢粉含量持续降低,松属含量略有增加;藜科花粉呈现持续性增加的趋势,A/C 比值较前一阶段有所降低,平均值为 3.66,重建的年均降水量为 204 mm,最低值为 143 mm;此外,蓼科、菊科和白刺属等花粉含量在此阶段明显升高。

3.3 统计分析

对吉兰泰盐湖沉积物中 13 个孢粉种属的 PCA 分析结果表明,轴 1 和轴 2 可以解释 71.5% 的孢粉组成

图 3 吉兰泰盐湖 JLT-2010 孔孢粉图谱
Fig.3 Pollen diagram of core JLT-2010 in the Jilantai Playa

变化(其中轴 1 可解释 58.3%,轴 2 可解释 13.2%)。如图 4 所示,PCA 分析 Bi-plot 中轴 1 的正半轴以藜科为代表,负半轴以蒿属为代表;轴 2 正半轴为白刺属、负半轴为麻黄属最为突出。根据样品孢粉组成特征及其在 PCA Bi-plot 上的分布可分为 3 组:组 1 为早全新世阶段(孢粉带 JLT-Z1)的 11 个样品以藜科、麻黄属、桦木科、松属、胡桃科、唐古草属和禾本科为主;组 2 是中全新世阶段(孢粉带 JLT-Z2)的 24 个样品,则以蒿属和唇形科为主;组 3 为晚全新世阶段(孢粉带 JLT-Z3)的 12 个样品,该组主要包括白刺属、菊科和藜科。

图 4 吉兰泰盐湖 JLT-2010 孔孢粉组成 PCA 分析结果
Fig.4 The result of principal component analysis of pollen data of core JLT-2010 in Jilantai Playa

4 讨论

4.1 孢粉指标的气候指示意义

在吉兰泰盐湖地区,蒿属和藜科在草本植物中占绝对优势,在荒漠草原中藜科生长在相对干旱的气候环境,而蒿属存在于气候相对湿润的地点^[58],其比值具有指示相对湿度的含义:A/C 比值越高,相对湿度越高,反之,相对湿度越低^[24]。

在干旱地区,蒿属和藜科之和应占孢粉总数的一半以上,才具有良好的气候指示意义,一般认为:荒漠区 A/C 比值小于 0.5 以下;荒漠草原约在 0.5~1.2 之间;草原区一般大于 1^[66]。但是吉兰泰盐湖的 A/C 比值整体偏高,平均值为 7.05,最低值为 0.67,最高值为 32.89。这与普通值差异较大,总体数值偏高的原因可能为以下几点:在卤水环境下,因样品是盐湖沉积物,孢粉长时间受到高矿化度卤水浸泡,与表土的沉积环境不同,则其指标意义可能存在差异^[67];同时,碱性和氧化性强的沉积环境均不利于花粉的保存,尤其是藜科花粉外壁薄,厚度在 2 μm 左右,容易腐蚀掉表面纹饰和孢粉结构,保存性差^[68-69]。然而,在吉兰泰盐湖沉积物孢粉鉴定过程中发现花粉颗粒保持相对完整,排除沉积过程中被破坏的可能性。另一方面,蒿属和藜科是当地主要的植被建群种和优势种,李月丛等^[70]在对我国北方表土花粉研究表明蒿属花粉产量高于藜科。赵艳等^[71]对中国干旱半干旱地区表土孢粉的 A/C 比值的分析显示,沙漠草甸和草甸等的 A/C 比值最高可达到 23.09 和 33.33,与我们的研究结果基本一致。此外,与吉兰泰距离相近的湖泊或地区,包括居延古湖(E3)^[24]、糜地湾(E10)^[31]、察素齐(E16)^[37]、调角海子(E18)^[39]和岱海(E19)^[41]在内,均显示出较高的 A/C 比值,表明该地区的主要植被类型为蒿属且蒿属相对偏高的孢粉产量造成 A/C 比值偏高。

在 PCA 分析中,轴 1 的正半轴以藜科为代表,数值越高,表明相对干旱的气候条件;负半轴以蒿属为代表,数值越高代表相对湿润的气候环境,故认为轴 1 代表相对湿度的变化。

轴 2 的正半轴以白刺属为代表,负半轴以麻黄属为代表。在中国西北地区,麻黄属和白刺属均是典型的灌木类植被,与干旱的气候条件呈正相关的关系。但麻黄属的生态位宽度大于白刺属,表明麻黄具备优势种的条件,在环境变迁过程中具有更高的稳定性,可出现在多种生态环境中,而白刺属具有超旱生性的特征,仅出现在沙漠草甸中^[72-75];轴 2 的正半轴分布着以菊科和藜科为主的草本植物,由于鉴定中的菊科和藜科的孢粉数量偏少,无法明确指示此阶段的气候特征。轴 2 的负半轴分布着以桦木科、松属和胡桃科为主的乔木类,可能为巴彦乌拉山和贺兰山在东亚夏季风风力较强的时段内带来的乔木类孢粉。

4.2 吉兰泰盐湖沉积物孢粉记录的全新世阶段植物与气候演化过程

根据吉兰泰盐湖沉积物孢粉的组成变化,该地区全新世阶段的气候环境演化历史为:

早全新世(10.5—8.5 cal ka BP),以蒿属孢粉为主,伴随出现少量藜科、禾本科及麻黄属孢粉,A/C 比值相对稳定(4.11 左右),指示全新世早期气候逐步转湿的过程。在 8.5 cal ka BP,蒿属孢粉数量下降且被藜科孢粉取代,A/C 比值明显下降,平均值为 1.06,重建的年均降水量也降低为 64 mm,指示一次明显的干旱气候事件。

中全新世(8.5—3.5 cal ka BP),以蒿属和藜科为主,蒿属孢粉含量增加及藜科孢粉含量降低,A/C 平均值增高至 9.58,重建的年均降水量为 246 mm,A/C 比值在 7.1 cal ka BP 左右达到峰值,植被生长茂盛,东亚夏季风增强带来丰沛的降水,重建的年均降水量升至 395 mm,指示该地区全新世阶段气候最为湿润的时期。

晚全新世(3.5 cal ka BP 至今),藜科孢粉含量增加且超过早全新世阶段,乔木类和灌木类植被浓度最低,而藜科、菊科和白刺属含量明显升高,A/C 比值低至 3.66,重建的年均降水量为 204 mm,最低值为 143 mm,接近现代年均降水量。距今 2.0 ka 前后,已有秦人采盐食用的历史^[59],推测当时的湖泊已经进入卤水沉积阶段或者干盐湖方向发展,人类活动影响着当地的生态环境,整体的气候条件朝着干旱化方向发展。

4.3 区域对比

4.3.1 吉兰泰地区的演化过程对比 过去半个世纪,众多学者开展了至吉兰泰盐湖的演化过程和波动历史的研究^[49-58]。针对全新世阶段,有学者利用矿物组成重建了盐湖全新世以来的演化过程,认为全新世时,该湖逐渐萎缩,使得盐度增高,成盐作用持续加强,中全新世时期,吉兰泰盐湖的萎缩成化加剧^[54]。然而,本研究中基于孢粉记录对该地区全新世阶段气候演化的研究表明,该地区在中全新世阶段是湿润的,与矿物组成

的结果有所出入. 分析其原因, 可能是由于不同气候代用指标所反映的气候过程有所差异, 孢粉记录更多的指示区域气候演化的历史, 而矿物组成的变化更多的代表湖泊自身水体演化的过程, 关于孢粉记录与湖泊水生生物指标和沉积学指标指示结果的差异性, 已经在青藏高原地区的苦海^[76]和冬及错那湖^[65]有所报道. 内蒙古地区的蒿属和藜科等植物花期主要集中在夏秋之际(5—9月)^[77]与东亚夏季风的影响同步(详见下文), 因而孢粉记录可以有效地记录东亚夏季风的演化历程, 表明在全新世中期(8.5—3.5 cal ka BP)东亚夏季风达到强盛状态. 另一方面, 吉兰泰盐湖与青土湖(E6)^[27]、岱海(E19)^[40-41]、巴彦查干(E22)^[44]以及 Wang 等^[7]的结果基本一致, 为中全新世时期湿润的气候特点(图 5).

图 5 太阳辐射与吉兰泰盐湖的蒸发盐含量、A/C 比值以及季风边缘区的湖泊在全新世时期的记录

(a: 39°N 地区 6 月太阳辐射量^[78]; b: 39°N 地区 12 月太阳辐射量^[78];

c: 吉兰泰盐湖蒸发盐含量^[56]; d: 吉兰泰盐湖钙芒硝含量^[56]; e: 吉兰泰盐湖 A/C;

f: 吉兰泰盐湖 PCA 轴 1 得分; g: 吉兰泰盐湖孢粉重建降水量; h: 青土湖孢粉总浓度^[27];

i: 岱海 TOC 含量^[41]; j: 巴彦查干木本孢粉含量^[44]; k: 东亚夏季风 PC2 记录^[7])

Fig.5 The relationship of solar insolation, content of evaporates, A/C, and records of lakes of the monsoon

margin region in the Holocene period(a: 39°N insolation in Jun.^[78]; b: 39°N insolation in Dec.^[78];

c: the content of evaporite of Jilantai Playa^[56]; d: the content of Glauberite of Jilantai Playa^[56];

e: A/C of Jilantai Playa; f: the scores of PCA axis 1 of Jilantai Playa; g: reconstructed P_{ann} of Jilantai Playa;

h: the content of pollen conc. of Lake Qingtu^[27]; i: the content of TOC of Lake Daihai^[41];

j: the content of tree pollen of Bayanchagan^[44]; k: PC2 records of EASM^[7])

矿物分析表明自全新世中期开始出现高含量的蒸发盐矿物, 表明湖水盐度逐步增加^[54]. 冬季太阳辐射的增强引起冬季温度升高而导致的蒸发量加大, 在湖泊演化过程中可能起到一定作用, 如图 5 所示, 吉兰泰盐湖沉积物中钙芒硝的含量变化与蒿藜比具有较好的一致性, 尤其是在全新世中期阶段. 研究表明, 钙芒硝的形成是由于浓缩湖水中因淡水注入, 流经地表时带来部分溶解物质(如钙离子), 与浓缩的湖水混合后形成钙芒硝^[79]. 钙芒硝的含量变化与蒿藜比、重建降水量和 PCA 轴 1 得分均有相似的变化趋势, 指示在中全新世时期吉兰泰盐湖有淡水的注入, 这与孢粉指标记录的结果相一致(图 5). 因此, 吉兰泰盐湖沉积物中保存的孢粉记录反映了区域气候的演化过程, 指示了东亚夏季风在全新世阶段的演化历史, 沉积物矿物组成指示湖泊水文演化过程. 有学者研究吉兰泰盐湖地区沙丘的沉积序列, 结合 OSL 测年, 恢复该地全新世以来的风沙活动历史, 指出在 7.8—6.4 cal ka BP 时期为相对湿润的气候特征^[56], 这与本文的研究结果相近. 另外, 在 4.0—3.8 cal ka BP(即岩芯深度为 274~201 cm)时, 吉兰泰盐湖沉积物的沉积速率加快, 表明在气候即将由相对湿润转化为相对干旱的过渡时期时, 湖泊的水位变浅, 导致沉积加快.

4.3.2 吉兰泰地区全新世气候演化驱动因素 吉兰泰盐湖及其周边区域受到由北大西洋和高纬空气块所控制而形成的西风,以及因印度洋、太平洋与地表热力条件不同而形成的印度夏季风和东亚夏季风的影响,各气团的演化过程可以影响区域降水量的变化^[80-81],导致不同的研究区域内所对应的全新世湿润期是不一致的(图6)。

图6 西风区和季风边缘区33个研究记录以及吉兰泰盐湖记录在全新世时期的干湿变化序列 (W1~E23的详细名称请见图1)

Fig.6 The sequences of Jilantai Playa and the 33 records of wet-dry changes from the westerly dominated and monsoon margin region during the Holocene period (the detailed name of W1-E23 could be check in the Fig.1)

新疆高纬度地区的赛里木湖(W1)^[11]、博斯腾湖(W2)^[12]、乌伦古湖(W3)^[13]和巴里坤湖(W3)^[14],在早全新世时期,由于夏季辐射量增强,夏季温度升高,蒸发强烈以及受西风减弱、水汽输送减少等原因,导致气候偏干旱;中全新世和晚全新世西风环流增强,带来充足的水分,气候转向湿润^[11]。

吉兰泰盐湖西南方向青藏高原以东33°~37°N位置的湖泊或地区,如尕斯库勒(S1)^[15]、茶卡盐湖(S2)^[16]、青海湖(S3)^[17-18]、达连海(S4)^[19]、小沟(S5)^[20]、苏家湾和大地湾(S6)^[21]等地文献资料表明,在早全新世和中全新世时期,低纬度地区太阳辐射量的增加使印度季风增强,降水量丰富,气候湿润,晚全新世随着太阳辐射减少自6~5 cal ka BP后逐渐减弱,气候逐步干旱。

吉兰泰盐湖西北或东南方向37°~45°N位置的季风边缘区,如花海(E1)^[22]、盐池(E2)^[23]、居延古湖(E3)^[24]、哈溪剖面(E4)^[25]、猪野泽(E5)^[26]、青土湖(E6)^[27]、乌兰布和沙漠(E7)^[28]、马家湾(E8)^[29]、靖边(E11)^[32]、定西(E12)^[33]、巴汗淖(E13)^[34]、锦界(E14)^[35]、库布奇沙漠(E15)^[36]、察素齐(E16)^[37]、公海(E17)^[38]、调角海子(E18)^[39]、岱海(E19)^[40-41]、查干诺尔(E20)^[42]、黄旗海(E21)^[43]、巴彦查干湖(E22)^[44]以及浑善达克沙漠(E23)^[45]等地的研究结果与吉兰泰盐湖孢粉记录基本一致,显示早全新世和晚全新世气候相对干旱,中全新世降水量偏多,气候湿润。然而,湿润期的持续时间和起止时间不同,位于区域中部的戈壁沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格尔沙漠、乌兰布和沙漠等区域的记录(居延古湖(E3)^[24]、猪野泽(E5)^[26]、青土湖(E6)^[27]、乌兰布和沙漠(E7)^[28]、靖边(E11)^[32]、巴汗淖(E13)^[34]和察素齐(E16)^[37]),中全新世湿润期的持续时间偏短,与吉兰泰盐湖最为湿润期相近,这可能与研究区域处于沙漠或者是沙漠中的尾间湖有关^[28],因距离东亚夏季风影响的区域较远,在东亚夏季风强盛时期,与东部的湖泊和地区相比,水汽输送量偏少,导致湿润期的持续时间偏短。相比之下,查干诺尔(E20)^[42]、黄旗海(E21)^[43]、巴彦查干(E22)^[44]以及浑善达克沙漠(E23)^[45]湿润期开始的时间较早且持续时间长,推测为与距离东亚夏季风水源区近,水汽充足,受东亚夏季风影响较大。同时也注意到,糜地湾(E10)^[31]的记录与周边结果均不一致,显示早全新世相对湿润,中全新世相对干旱。综上,在全新世阶段吉兰泰盐湖地区植被、气候变化主要受到东亚夏季风的影响,呈现出中全新世相对湿润的状态,与周边众多的研究记录一致。

4.3.3 与“8.2 ka事件”的对比 在全新世早期,由北大西洋的倒转环流造成的一次持续了160年左右的气候异常的事件,保存在了格陵兰岛的冰芯记录中,即“8.2 ka事件”^[82]。在其他地方的全新世记录中也保存了该次事件的证据(图7)。例如,有学者在阿曼 Qunf 洞穴的石笋中,利用 $\delta^{18}\text{O}$ 含量的变化记录了该事件^[83];

董哥洞和尚洞的石笋记录中 $\delta^{18}\text{O}$ 含量^[84-85], 古里雅冰芯记录的 $\delta^{18}\text{O}$ 含量^[86] 等显示了由太阳辐射量改变引起大气和海洋环流的异常, 季风迅速变化的现象。

值得注意的是, 吉兰泰盐湖孢粉指标在 8.5 cal ka BP 左右, 蒿属花粉含量急剧降低到 35.76%, A/C 比值突然降至 0.67, 远低于中全新世时期水平, 指示一次明显的气候干旱事件, 在时间上与北大西洋地区的“8.2 ka 事件”相一致。但吉兰泰盐湖记录的此次事件与北大西洋地区差距 300 年时间, 其原因可能是碳库效应导致的测年误差造成的, 吉兰泰盐湖表层沉积物获取的碳库效应为 1590 年, 该效应可能随时间变化, 造成这 300 年的时间差。该事件表明, 在一定程度上, 吉兰泰地区全新世气候演化同样受到北大西洋环流的影响。

图 7 吉兰泰盐湖孢粉沉积物指示的气候事件与 6 个“8.2 ka 事件”记录的对比

(a: 格陵兰岛 GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ 含量^[82]; b: 阿曼 Qunf 洞 $\delta^{18}\text{O}$ 含量^[83]; c: 董哥洞 $\delta^{18}\text{O}$ 含量^[84]; d: 和尚洞 $\delta^{18}\text{O}$ 含量^[85]; e: 古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 含量^[86]; f: 吉兰泰盐湖蒿属含量)

Fig.7 Comparison with climatic event indicated by pollen sediment in Jilantai Playa and six records concerning “8.2 ka event” (a: the content of GISP $\delta^{18}\text{O}$ in the Greenland^[82]; b: the content of $\delta^{18}\text{O}$ of Qunf Cave in the Oman^[83]; c: the content of $\delta^{18}\text{O}$ in the Dongge Cave^[84]; d: the content of $\delta^{18}\text{O}$ in the Heshang Cave^[85]; e: the content of $\delta^{18}\text{O}$ in the Guliya Ice Core^[86]; f: the content of Artemisia in the Jilantai Playa)

5 结论

通过对吉兰泰盐湖沉积物的孢粉数据分析, 建立湖泊古气候演化序列, 并与季风边缘区的湖泊或地区进行对比, 得到以下结论: (1) 吉兰泰盐湖地区在全新世阶段植被类型未发生大的变化, 以荒漠植被为主, 沉积物孢粉记录的气候变化整体上受东亚夏季风的影响, 表现为早全新世气候逐步转湿的过程, 中全新世时期气候湿润, 晚全新世时期气候向干旱化方向发展; (2) 吉兰泰盐湖沉积物孢粉记录了 8.5 cal ka BP 时期的一次干旱事件, 表明该地区气候演化一定程度上受到北大西洋地区的影响; (3) 吉兰泰盐湖自身演化过程, 尤其是在中全新世时期钙芒硝的大量出现, 一定程度上指示降水量增多所带来的淡水注入, 与孢粉指标指示该阶段湿润的结果一致。

6 参考文献

- [1] Zhang HC, Ma YZ, Wünnemann B *et al.* A Holocene climatic record from arid northwestern China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2000, **162**(3): 389-401. DOI: 10.1016/S0031-0182(00)00139-5.
- [2] Fang JY, Zhu JL, Wang SP *et al.* Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties. *Sci China Earth Sci*, 2011, **54**(10): 1458. DOI: 10.1007/s11430-011-4292-0.
- [3] Wang X, Xiao J, Cui L *et al.* Holocene changes in fire frequency in the Daihai Lake region (north-central China): Indica-

- tions and implications for an important role of human activity. *Quat Sci Rev*, 2013, **59**(2): 18-29. DOI: 10.1016/j.quascirev.2012.10.033.
- [4] Mu Y, Qin X, Zhang L *et al.* Holocene climate change evidence from high-resolution loess/paleosol records and the linkage to fire-climate change-human activities in the Horqin dunefield in northern China. *J Asian Earth Sci*, 2016, **121**(1): 1-8. DOI: 10.1016/j.jseaes.2016.01.017.
- [5] An Z, Porter SC, Kutzbach JE *et al.* Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon. *Quat Sci Rev*, 2000, **19**(8): 743-762. DOI: 10.1016/S0277-3791(99)00031-1.
- [6] Chen FH, Yu ZC, Yang ML *et al.* Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. *Quat Sci Rev*, 2008, **27**(3/4): 351-364. DOI: 10.1016/j.quascirev.2007.10.017.
- [7] Wang YB, Liu XQ, Herzschuh U. Asynchronous evolution of the Indian and East Asian Summer Monsoon indicated by Holocene moisture patterns in monsoonal central Asia. *Earth-Sci Rev*, 2010, **103**(3/4): 135-153. DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.09.004.
- [8] Zhao Y, Yu ZC. Vegetation response to Holocene climate change in East Asian monsoon-margin region. *Earth-Sci Rev*, 2012, **113**(1/2): 1-10. DOI: 10.1016/j.earscirev.2012.03.001.
- [9] Guo C, Ma YZ, Hu CL *et al.* Holocene humidity changes in inland China inferred from lake sediments. *Prog Geogr*, 2014, **33**(6): 786-798. DOI: 10.11820/dlkxjz.2014.06.007. [郭超, 马玉贞, 胡彩莉等. 中国内陆区湖泊沉积所反映的全新世干湿变化. 地理科学进展, 2014, **33**(6): 786-798.]
- [10] Wang PL, Clemens S, Beaufort L *et al.* Evolution and variability of the Asian monsoon system: State of the art and outstanding issues. *Quat Sci Rev*, 2005, **24**(5): 595-629. DOI: 10.1016/j.quascirev.2004.10.002.
- [11] Jiang QF, Ji JF, Shen J *et al.* Holocene vegetation and climate change of pollen records of the Sayram Lake in the inland westerly area. *Sci China: Ser D: Earth Sci*, 2013, (2): 243-255. DOI: 10.1360/zd-2013-43-2-243. [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: D 辑: 地球科学, 2013, (2): 243-255.]
- [12] Chen FH, Huang XZ, Yang ML *et al.* Westerly dominated Holocene climate model in arid central Asia-case study on Bosten Lake, Xinjiang, China. *Quat Sci*, 2006, **26**(6): 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**(6): 881-887.]
- [13] Liu XQ, Herzschuh U, Shen J *et al.* Holocene environmental and climatic changes inferred from Wulungu Lake in northern Xinjiang, China. *Quat Res*, 2008, **70**(3): 412-425. DOI: 10.1016/j.yqres.2008.06.005.
- [14] An C, Lu Y, Zhao J *et al.* A high-resolution record of Holocene environmental and climatic changes from Lake Balikun (Xinjiang, China): Implications for central Asia. *Holocene*, 2012, **22**(1): 43-52. DOI: 10.1177/0959683611405244.
- [15] Chen BS, Pan AD, Zhang YF. Grain-size characteristics and their environmental significance of Gahai Lake sediments in Qaidam Basin. *Marine Geol Quat Geol*, 2010, (2): 111-119. [陈碧珊, 潘安定, 张元芳. 柴达木盆地尕斯库勒湖沉积物粒度特征及其古气候意义. 海洋地质与第四纪地质, 2010, (2): 111-119.]
- [16] Liu XQ, Dong HL, Jason AJ *et al.* Evolution of Chaka Salt Lake in NW China in response to climatic change during the Latest Pleistocene-Holocene. *Quat Sci Rev*, 2008, **27**(7/8): 867-879. DOI: 10.1016/j.quascirev.2007.12.006.
- [17] Liu XQ, Shen J, Wang SM *et al.* A 16000-year pollen record of Qinghai Lake and its paleoclimate and paleoenvironment. *Chin Sci Bull*, 2002, **47**(22): 1931-1936. DOI: 10.1360/02tb9421.
- [18] Liu XQ, Shen J, Wang SM *et al.* Southwest monsoon changes indicated by oxygen isotope of ostracode shells from sediments in Qinghai Lake since the late Glacial. *Chin Sci Bull*, 2007, **52**(4): 539-544. DOI: 10.1007/s11434-007-0086-3.
- [19] Sun QF, Colin C. Paleoclimate and paleoenvironment of Gonghe Basin, Qinghai-Tibet plateau, during the last deglacial: weathering, erosion and vegetation cover affect clay mineral formation. *Acta Geol Sin-Engl*, 2014, **88**(2): 647-660. DOI: 10.1111/1755-6724.12220.
- [20] Wu HN, Ma YZ, Feng ZD *et al.* A high resolution record of vegetation and environmental variation through the last ~25,000 years in the western part of the Chinese Loess Plateau. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2009, **273**(2): 191-199. DOI: 10.1016/j.palaeo.2008.12.023.
- [21] An CB, Feng ZD, Tang LY. Evidence of a humid mid-Holocene in the western part of Chinese Loess Plateau. *Chin Sci Bull*, 2003, **48**(22): 2472-2479. DOI: 10.1360/03wd0042.
- [22] Li ZL, Chen Q, Wang NA *et al.* Discovery of dolomite deposition during the Holocene and its environmental significance in

- Lake Huahai, Hexi Corridor. *J Lake Sci*, 2013, **25**(4): 558-564. DOI: 10.18307/2013.0414. [李卓仑, 陈晴, 王乃昂等. 河西走廊花海古湖泊全新世白云石的发现及其环境意义. 湖泊科学, 2013, **25**(4): 558-564.]
- [23] Yu YT, Yang TB, Li JJ *et al.* Millennial-scale Holocene climate variability in the NW China drylands and links to the tropical Pacific and the North Atlantic. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2006, **233**(2): 149-162. DOI: 10.1016/j.palaeo.2005.09.008.
- [24] 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): 1-17. DOI: 10.1016/j.palaeo.2004.04.001.
- [25] Wu GJ, Pan BT, Guan QY *et al.* Climatic changes in the north piedmont of eastern Qilian Mountains since 10 ka B.P. *J Desert Res*, 1998, **18**(3): 193-200. [邬光剑, 潘保田, 管清玉等. 祁连山东段北麓近 10 ka 来的气候变化初步研究. 中国沙漠, 1998, **18**(3): 193-200.]
- [26] Mischke S, Lai ZP, Long H *et al.* Holocene climate and landscape change in the northeastern Tibetan Plateau foreland inferred from the Zhuyeze Lake record. *Holocene*, 2016, **26**(4): 643-654. DOI: 10.1177/0959683615612570.
- [27] Li Y, Wang NA, Li ZL *et al.* Holocene palynological records and their responses to the controversies of climate system in the Shiyang River drainage basin. *Chin Sci Bull*, 2011, **56**(6): 535-546. DOI: 10.1007/s11434-010-4277-y.
- [28] Chen FH, Li GQ, Zhao H *et al.* Landscape evolution of UlanBuh Desert in northern China during late quaternary. *Quat Res*, 2014, **81**(3): 476-487. DOI: 10.1016/j.yqres.2013.08.005.
- [29] Huang CC, Pang JL, Zhou QY *et al.* Holocene pedogenic change and the emergence and decline of rain-fed cereal agriculture on the Chinese Loess Plateau. *Quat Sci Rev*, 2004, **23**(23/24): 2525-2535. DOI: 10.1016/j.quascirev.2004.06.003.
- [30] Chen CTA, Lan HC, Lou JY *et al.* The dry Holocene megathermal in Inner Mongolia. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2003, **193**(2): 181-200. DOI: 10.1016/S0031-0182(03)00225-6.
- [31] Li XQ, Zhou WJ, An ZS *et al.* The vegetation and monsoon variations at the desert-loess transition belt at Midiwan in northern China for the last 13 ka. *Holocene*, 2003, **13**(13): 779-784. DOI: 10.1191/0959683603hl664rr.
- [32] Xiao JL, Nakamura T, Lu HY *et al.* Holocene climate changes over the desert/loess transition of north-central China. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, **197**(1/2): 11-18. DOI: 10.1016/S0012-821X(02)00463-6.
- [33] Feng ZD, Wang WG, Guo LL *et al.* Lacustrine and eolian records of Holocene climate changes in the Mongolian Plateau: Preliminary results. *Quat Int*, 2005, **136**(1): 25-32. DOI: 10.1016/j.quaint.2004.11.005.
- [34] Guo LL, Feng ZD, Li XQ *et al.* Holocene climate change recorded of the Baahar Nuur in the Ordos Plateau. *Chin Sci Bull*, 2007, **52**(5): 584-590. [郭兰兰, 冯兆东, 李心清等. 鄂尔多斯高原巴汗淖湖泊记录的全新世气候变化. 科学通报, 2007, **52**(5): 584-590.]
- [35] Liu B, Jin HL, Sun LY *et al.* Geochemical evidence for Holocene millennial-scale climatic and environmental changes in the south-eastern Mu Us Desert, northern China. *Int J Earth Sci*, 2015, **104**(7): 1889-1900. DOI: 10.1007/s00531-015-1161-7.
- [36] Sun J, Li SH, Han P *et al.* Holocene environmental changes in the central Inner Mongolia, based on single-aliquot-quartz optical dating and multi-proxy study of dune sands. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2006, **233**(1): 51-62. DOI: 10.1016/j.palaeo.2005.09.016.
- [37] Wang FY, Song CQ, Sun XJ. Palynological record of paleovegetation change during Holocene at north tumd plain in Inner Mongolia, China. *Chinese Geogr Sci*, 1999, **9**(1): 87-91. DOI: 10.1007/s11769-999-0026-z.
- [38] Chen FH, Xu QH, Chen JH *et al.* East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation. *Sci Rep*, 2015, **5**: 11186. DOI: 10.1038/srep11186.
- [39] Shi PJ, Song CH. Palynological records of environmental changes in the middle part of Inner Mongolia, China. *Chin Sci Bull*, 2003, **48**(14): 1433-1438. DOI: 10.1360/02wd0259.
- [40] Xiao JL, Wu JT, Si B *et al.* Holocene climate changes in the monsoon/arid transition reflected by carbon concentration in Daihai Lake of Inner Mongolia. *Holocene*, 2006, **16**(4): 551-560. DOI: 10.1191/0959683606hl950rp.
- [41] Xiao JL, Xu QH, 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**(14/15): 1669-1679. DOI: 10.1016/j.quascirev.2004.01.005.

- [42] Jiang DX, Wei JC. Late Pleistocene to Holocene palynofloras and paleoclimate of Qagan Salt Lake, Inner Mongolia. *Acta Sedimentol Sin*, 1997, **15**(Suppl): 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**(增刊): 147-152.]
- [43] Hao C, Wang Y, Dong J. Environmental changes during the past 14500 years inferred from multiple proxies of Huangqihai Lake sediments. *J Arid Land Resour Environ*, 2016, **30**(2): 139-146. [郝彩, 王永, 董进. 14.5 cal ka BP 以来黄旗海沉积物环境指标特征及其反映的环境变化. 干旱区资源与环境, 2016, **30**(2): 139-146.]
- [44] Jiang WY, Guo ZT, Sun XJ *et al.* Reconstruction of climate and vegetation changes of Lake Bayanchagan (Inner Mongolia): Holocene variability of the East Asian monsoon. *Quat Res*, 2006, **65**(3): 411-420. DOI: 10.1016/j.yqres.2005.10.007.
- [45] Zhou YL, Lu HY, Joseph M *et al.* Optically stimulated luminescence dating of aeolian sand in the Otindag dune field and Holocene climate change. *Sci China; Ser D: Earth Sci*, 2008, **51**(6): 837-847. DOI: 10.1007/s11430-008-0057-9.
- [46] Wang NA, Li ZL, Li Y *et al.* The chronology and characteristics of sediments since Late Glacial in Huahai Lake, Hexi Corridor, NW China. *Acta Sedimentol Sin*, 2011, **29**(3): 552-560. [王乃昂, 李卓仑, 李育等. 河西走廊花海剖面晚冰期以来年代学及沉积特征研究. 沉积学报, 2011, **29**(3): 552-560.]
- [47] Pang XL, Hu DS. Environment evolution and salt forming process of Jilantai salt lake since 22 ka BP. *J Desert Res*, 2009, **29**(2): 193-199. [庞西磊, 胡东生. 近 22 ka 以来吉兰泰盐湖的环境变化及成盐过程. 中国沙漠, 2009, **29**(2): 193-199.]
- [48] Geng K, Chen YF. Formation, development and evolution of Jilantai Salt Lake, Inner Mongolia. *Acta Geogr Sin*, 1990, (3): 341-349. DOI: 10.11821/xb199003010. [耿侃, 陈育峰. 吉兰泰盐湖的形成、发育和演化. 地理学报, 1990, (3): 341-349.]
- [49] Zhang H, Han FQ, Liu XQ. Studies on the environment of the deserts in Jilantai Salt Lake region by remote sense monitor. *J Salt Lake Res*, 2001, **9**(4): 48-51. [张辉, 韩凤清, 刘兴起. 吉兰泰盐湖地区沙漠环境变化的遥感研究. 盐湖研究, 2001, **9**(4): 48-51.]
- [50] Chen FH, Fan YX, Chun X *et al.* Preliminary research on Megalake Jilantai-Hetao in the arid areas of China during the Late Quaternary. *Chin Sci Bull*, 2008, **53**(10): 1207-1219. DOI: 10.1360/csb2008-53-10-1207. [陈发虎, 范育新, 春喜等. 晚第四纪“吉兰泰-河套”古大湖的初步研究. 科学通报, 2008, **53**(10): 1207-1219.]
- [51] Chun X, Wang ZL, Xia DS *et al.* Formation of Jilantai Salt Lake and its environmental significance. *J Salt Lake Res*, 2008, **16**(3): 11-18. [春喜, 王宗礼, 夏敦胜等. 吉兰泰盐湖的形成及指示的环境意义. 盐湖研究, 2008, **16**(3): 11-18.]
- [52] Chun X, Fan YX, Xia DS *et al.* Jilantai Palaeolake evolution in the MIS 3. *J Arid Land Resour Environ*, 2008, **22**(12): 56-61. [春喜, 范育新, 夏敦胜等. MIS 3 阶段吉兰泰古湖演化的初步研究. 干旱区资源与环境, 2008, **22**(12): 56-61.]
- [53] Chen FH, Fan YX, Db M *et al.* Preliminary study on the formation mechanism of the "Jilantai-Hetao" Megalake and the lake evolutionary history in Hetao region. *Quat Sci*, 2008, **28**(5): 866-873. [陈发虎, 范育新, Db M 等. 河套地区新生代湖泊演化与“吉兰泰-河套”古大湖形成机制的初步研究. 第四纪研究, 2008, **28**(5): 866-873.]
- [54] Yu ZT, Liu XQ, Wang Y *et al.* Evolution of Jilantai Salt Lake, Inner Mongolia in the last 13.8 ka. *J Lake Sci*, 2012, **24**(4): 629-636. DOI: 10.18307/2012.0418. [于志同, 刘兴起, 王永等. 13.8 ka 以来内蒙古吉兰泰盐湖的演化过程. 湖泊科学, 2012, **24**(4): 629-636.]
- [55] Jia WN, Huang XZ, Fan YX *et al.* Lake status and palaeoclimate in Jilantai Salt Lake area during the Last Glacial Maximum. *J Desert Res*, 2015, **35**(3): 602-609. [贾宛娜, 黄小忠, 范育新等. 末次冰盛期时吉兰泰盐湖的湖泊状态与古气候特征. 中国沙漠, 2015, **35**(3): 602-609.]
- [56] Fan Y, Chen X, Liu W *et al.* Formation of present desert landscape surrounding Jilantai Salt Lake in northern China based on OSL dating. *Front Earth Sci*, 2015, **9**(3): 497-508. DOI: 10.1007/s11707-014-0482-3.
- [57] Huang CX, Van Campo E, Li SK. Holocene environmental changes of western and northern Qinghai-Xizang Plateau based on pollen analysis. *Acta Micropalaeobiol Sin*, 1996, (4): 423-432. [黄赐璇, Van Campo E, 李拴科. 根据孢粉分析论青藏高原西部和北部全新世环境变化. 微体古生物学报, 1996, (4): 423-432.]
- [58] Herzschuh U. Reliability of pollen ratios for environmental reconstructions on the Tibetan Plateau. *J Biogeogr*, 2007, **34**(7): 1265-1273. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2006.01680.x.

- [59] Wang SM, Dou HS eds. China lakes. Beijing: Science Press, 1998: 327. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 327.]
- [60] Zheng XY ed. China salt lakes. Beijing: Science Press, 2002: 371-374. [郑喜玉. 中国盐湖志. 北京: 科学出版社, 2002: 371-374.]
- [61] Blaauw M, Christen JA. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*, 2011, **6**(6): 457-474. DOI: 10.1214/ba/1339616472.
- [62] Fægri K, Iversen J eds. Textbook of pollen analysis (4th ed). Chichester: John Wiley & Sons, 1989: 76-81. DOI: 10.1016/0048-9697(91)90087-U.
- [63] Wang FX ed. Chinese pollen morphology. Beijing: Science Press, 1995. [王伏雄. 中国植物花粉形态. 北京: 科学出版社, 1995.]
- [64] Grimm EC. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Comput Geosci*, 1987, **13**(1): 13-35. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0098-3004\(87\)90022-7](http://dx.doi.org/10.1016/0098-3004(87)90022-7).
- [65] Wang YB, Herzschuh U, Shumilovskikh LS *et al*. Quantitative reconstruction of precipitation changes on the NE Tibetan Plateau since the Last Glacial Maximum-extending the concept of pollen source area to pollen-based climate reconstructions from large lakes. *Clim Past*, 2014, **10**(1): 536-552. DOI: 10.5194/cp-10-21-2014.
- [66] Sun XJ, Du NQ, Weng CY *et al*. Palaeovegetation and palaeoenvironment of Manasi Lake, Xinjiang, N.W. China during the last 14000 years. *Quat Sci*, 1994, **14**(3): 240-248. [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, **14**(3): 240-248.]
- [67] Ye CY, Wang ZM, Zhao SQ *et al*. Preliminary Study of the Relationship between Pollen Assemblages and Uranium Distribution in Gasikule Salt Lake's sediments, Qaidam Basin. *Geol Rev*, 2013, **59**(3): 479-488. [叶传永, 王志明, 赵世勤等. 青海尕斯库勒盐湖沉积物孢粉组合特征与铀分布关系初探. 地质论评, 2013, **59**(3): 479-488.]
- [68] Li XQ, Du NQ. The acidalkalifree analysis of Quaternary pollen. *Acta Bot Sin*, 1999, **41**(7): 109-111. [李小强, 杜乃秋. 第四纪花粉的无酸碱分析法. 植物学报, 1999, **41**(7): 109-111.]
- [69] Havinga AJ. Palynology and pollen preservation. *Rev Palaeobot Palyno*, 1967, **2**(1-4): 81-98. DOI: 10.1016/0034-6667(67)90138-8.
- [70] Li YC, Bunting MJ, Xu QH *et al*. Pollen-vegetation-climate relationships in some desert and desert-steppe communities in northern China. *Holocene*, 2011, **21**(6): 997-1010. DOI: 10.1177/0959683611400202.
- [71] Zhao Y, Liu H, Li F *et al*. Application and limitations of the *Artemisia*/*Chenopodiaceae* pollen ratio in arid and semi-arid China. *Holocene*, 2012, **22**(12): 1385-1392. DOI: 10.1177/0959683612449762.
- [72] Chang ZF, Han FG, Zhong SN *et al*. Preliminary study on the natural regeneration and degenerated succession of the plant community of desert grassland in Minqin. *Pratac Sci*, 2008, **25**(8): 13-18. [常兆丰, 韩福贵, 仲生年等. 民勤荒漠草场植物群落自然更新和退化演替初探. 草业科学, 2008, **25**(8): 13-18.]
- [73] Chang ZF, Li FJ, Han FG *et al*. Comparative research on habitat of main plant community in desert grassland in Minqin. *Pratac Sci*, 2009, **26**(7): 12-18. [常兆丰, 李发江, 韩福贵等. 民勤荒漠草地主要植物群落生境条件的比较研究. 草业科学, 2009, **26**(7): 12-18.]
- [74] Chang ZF, Zhang DB, Duan XF *et al*. Determination of relative ecological function of desert vegetation based on layered projection cover. *Arid Land Geo*, 2016, **39**(4): 777-784. [常兆丰, 张大彪, 段小峰等. 基于分层投影盖度的荒漠植被相对生态功能测定. 干旱区地理, 2016, **39**(4): 777-784.]
- [75] Qin F, Wang YH, Ferguson DK *et al*. Utility of surface pollen assemblages to delimit eastern Eurasian steppe types. *PLoS One*, 2015, **10**(3): e0119412. DOI: 10.1371/journal.pone.0119412.
- [76] Wischniewski J, Mischke S, Wang Y *et al*. Reconstructing climate variability on the northeastern Tibetan Plateau since the last late glacial—A multi-proxy, dual-site approach comparing terrestrial and aquatic signals. *Quat Sci Rev*, 2011, **30**(1/2): 82-97. DOI: 10.1016/j.quascirev.2010.10.001.
- [77] Song L, Zhao FX, Zhang J *et al*. Pollen dispersion in summer and autumn in Wuhai City of Inner Mongolia and its clinical analysis. *Mod Prevent Med*, 2014, **41**(18): 3304-3309. [宋岚, 赵方新, 张静等. 内蒙古乌海市夏秋季空气中花粉飘散状况与临床分析. 现代预防医学, 2014, **41**(18): 3304-3309.]
- [78] Laskar J, Robutel P, Joutel F *et al*. A long term numerical solution for the insolation quantities of the earth. *Astron Astrophys*, 2004, **428**(1): 261-285. DOI: 10.1051/0004-6361:20041335.

- [79] Yang QT. The origin and sedimentary environment analysis of Glauberite. *Acta Sedimentol Sin*, 1989, (3): 137-141. [杨清堂. 钙芒硝的成因和沉积环境简析. 沉积学报, 1989, (3): 137-141.]
- [80] Zhou TJ, Gong DY, Li J *et al*. Detecting and understanding the multi-decadal variability of the East Asian Summer Monsoon-Recent progress and state of affairs. *Meteorol Z*, 2009, **18**(4): 455-467. DOI: 10.1127/0941-2948/2009/0396.
- [81] Liu ZY, Wen XY, Brady EC *et al*. Chinese cave records and the East Asia Summer Monsoon. *Quat Sci Rev*, 2014, **83**(1): 115-128. DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.10.021.
- [82] Thomas ER, Wolff EW, Mulvaney R *et al*. The 8.2 ka event from Greenland ice cores. *Quat Sci Rev*, 2007, **26**(1): 70-81. DOI: 10.1016/j.quascirev.2006.07.017.
- [83] Fleitmann D, Burns SJ, Mudelsee M *et al*. Holocene forcing of the Indian Monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman. *Science*, 2003, **300**(5626): 1737. DOI: 10.1126/science.1083130.
- [84] Dykoski CA, Edwards RL, Cheng H *et al*. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, **233**(1/2): 71-86. DOI: 10.1016/j.epsl.2005.01.036.
- [85] Liu YH, Henderson GM, Hu CY *et al*. Links between the East Asian monsoon and North Atlantic climate during the 8,200 year event. *Nat Geosci*, 2013, **6**(2): 117-120. DOI: 10.1038/ngeo1708.
- [86] Wang NL, Yao TD, Thompson LG *et al*. Evidence for cold events in the early Holocene from the Guliya ice core, Tibetan Plateau, China. *Chin Sci Bull*, 2002, **47**(17): 1422-1427. DOI: 10.1360/02tb9313.