

末次冰期 40 ka 以来阿拉善高原地区 的环境演变与地貌演化

杨立敏^{1, 2)}, 朱秉启¹⁾

1) 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;

2) 中国科学院大学, 北京, 100049

内容提要:阿拉善高原末次冰期(40 ka)以来的环境演变研究是揭示中纬度沙漠的发展变化与物质来源的重要依据,为不同尺度区域乃至全球气候变化间的比较提供依据,进一步揭示气候要素的发展变化。目前已有大量的研究工作及成果见诸文献报道,但缺乏系统性的总结与对比分析,尤其是 40 ka 以来的环境演变过程及其原因。本文通过对中西方已有文献的系统总结和对比研究,从末次冰期、全新世早、中、晚期的古气候变化记录、地貌演化记录及环境变化的原因、可能存在的问题等方面,分析了阿拉善高原地区末次冰期以来的环境演变历史。指出约 40 ka 到末次盛冰期结束时的环境比现在湿润,之后至更新世结束环境普遍干旱,风沙活动增强;但是乌兰布和沙漠的环境演变与区域总体的变化结果不同,即整个末次冰期均表现为干旱的环境;全新世早期和中期环境普遍湿润,湖泊、植被等进一步发育,风沙活动弱,全新世晚期环境干旱,沙漠或进一步扩大。但是,腾格里沙漠全新世早期表现为干旱的环境,并且存在争议最大的是巴丹吉林沙漠全新世中期的干旱事件,这些问题仍需要进一步研究。此外,西风带、东亚季风在不同时期对研究区气候变化的影响不同,关于研究区与全球气候变化的具体关系的研究很少,缺少代表性事件的证据。沙源的研究结果存在不一致性,由于研究方法的局限性和地貌营力作用的复杂性,沙源的定性和量化分析具有一定的难度;沙丘的形态、分布与风的方向、能量具有相互指示性,适当的风能才是沙丘建造的关键;从气候变化的全球尺度分析,沙漠的形成普遍与冰期或者气候寒冷干燥时期相对应。

关键词:末次冰期(40 ka);全新世;西风带;季风环流;阿拉善高原;中纬度沙漠

地处北半球中纬度地带的我国西北部干旱、半干旱地区,大范围分布沙漠和沙地两种风成地貌景观(Yang Xiaoping et al., 2016),地貌学中给予的解释为:沙漠主要以移动沙丘为主,主要分布在贺兰山西部的干旱地区,而沙地主要以固定和半固定沙丘为主,主要分布于贺兰山东部的半干旱地区(Yang Xiaoping et al., 2004),后者被描述为有植被的、稳定的沙丘地,年均降水量介于 200~450 mm 之间(Yang Xiaoping et al., 2012)。然而,这些沙漠和沙地出现,就全球沙漠景观的形成条件而言,具有独特性(Gou Zhengtang, 2017)。纵观全球,沙漠的分布具有特定的地理特征,一般受纬度地带性的气候分布、洋流活动的影响,而我国的沙漠成因一般被认为是亚洲内陆的陆率性和海陆对比增强以及青藏高原的隆起所致(Guo Zhengtang, 2017; Guo Zhengtang et al., 2008; Zhang Zhongshi et

al., 2007a; Zhang Zhongshi et al., 2007b)。但是对于不同时期沙漠形成的具体原因仍然存在争议,包括沙源、沙漠内部和外围环境中各种地貌过程的作用和产生的影响,这涉及构造活动、冰盖/冰川、环流/风场、降水以及河流与湖泊之间时空上的相互作用和气候要素的变化;另一方面沙漠的存在又不利于当地生态环境的发展,制约社会和经济的进步,对区域乃至全球景观的发展产生影响。因此荒漠区环境演变的研究,在小的时空尺度上更有助于揭示不同地区环境变化的原因和区域之间的相互作用关系,在大的时空尺度上利于揭示地区气候对全球气候变化的响应程度,进一步探索驱动不同地区气候变化的机制;更重要的是,它为遥相关作用机制的研究提供了可参考的依据,利于揭示不同纬度间海洋活动和大气环流的时空作用。

阿拉善高原有三个大型沙漠,地理位置上处于

注:本文为国家重点研发计划项目(No. 2016YFA0601900)和国家自然科学基金项目(No. 41771014)资助的成果。

收稿日期:2017-12-01;改回日期:2018-03-17;责任编辑:黄敏。

作者简介:杨立敏,女,1992 年生,在读硕士研究生,主要从事干旱区环境演变研究。通讯作者:朱秉启,zhubingqi@igsnr.ac.cn;主要从事干旱区地貌与环境演变的研究工作,地址:北京市朝阳区大屯路甲 11 号中科院地理资源所一段 1409,邮编 100101。

副热带高压带(全球沙漠主体分布区)的外围和西风带环流控制区(温和湿润区),并非沙漠景观发育的理想地区。关于该地区沙漠的形成和演化,目前已有大量的研究成果,但对阿拉善高原的气候变化与沙漠形成演化之间的关系解释不够完善,缺少气象学与气候学的支撑,且存在较大的争议;同一时间尺度内,三大沙漠区域之间的气候变化缺少系统性的对比分析,气候变化过程在区域之间表现为相对一致性还是差异性,与全球气候变化的关系如何,对沙漠形成演化的研究缺少不同沙源的对比分析及差异性的解释,对风的作用及高大沙山的形成在理论上的阐述需要完善等。近年来的文献报导中,全新世以来的阿拉善高原环境变化研究较为集中,而末次冰期以来的研究相对薄弱。因此本文试图根据这些文献资料,对阿拉善高原地区末次冰期 40 ka 以来的环境演变研究进行归纳和总结。

1 自然背景

阿拉善高原位于内蒙古自治区西部,介于 $37^{\circ}30' \sim 42^{\circ}36'N$ 和 $93^{\circ}6' \sim 106^{\circ}36'E$ 之间,海拔 1000~1500 m 左右,最低处为居延湖,约 820 m。整个高原地势南高北低,最西边是马鬃山,最东边为贺兰山,南部界限不明显,北为中蒙国边界(图 1)。高原景观主要为沙漠、戈壁、裸露山地、荒漠干草原和片状移动的沙丘地等,一些约 100~200 m 高的干旱剥蚀丘陵把高原分成许多内陆盆地(Li Zhuolun et al., 2015)。地质上,阿拉善高原是一个稳定的抬升剥蚀台地,中部的杂多—雅布赖断裂带和狼山—日喀则断裂带将高原分为东西两部分(Chen Jiansheng et al., 2014; Zheng Rongguo et al., 2016),断裂带对水运输有影响。

高原西北部分布着广阔的戈壁,被认为是中亚粉尘排放的重要源区(Wang Xunming et al., 2008);根据戈壁物质组成可将其划分为岩漠和砾漠两大类。高原内部分布着三个大型沙漠,分别为中西部的巴丹吉林沙漠、南部的腾格里沙漠、东部的乌兰布和沙漠(图 1)。

高原中西部的巴丹吉林沙漠,面积 49000 km²,是我国的第二大流动沙漠,以高大沙丘和大量的丘间湖泊著称,一共拥有 119 个永久性湖泊,并且大部分的矿化度都很高,主要位于沙漠东南部沙丘斜坡下风向的丘间凹地(Li Zhuolun et al., 2015)。沙漠南边以北大山为界,东边以雅布赖山为界,海拔介于东南部的 1600 m 和西北部的 900 m 之间,沙漠

景观以活动沙丘地为中心,四周被沙漠平原包围(Yang Xiaoping et al., 2003)。沙漠南部、东南部密集地分布着高度约 200~300 m 米的大沙丘,最大的为 460 m(Yang Xiaoping et al., 2011a);其南部主要为复杂的沙山和金字塔型沙丘,东部边缘主要为星状沙丘。地质构造上,巴丹吉林沙漠主要发育在断陷盆地之上;气候上,年均温在沙漠东南边缘(如额肯呼都格)为 7.7℃,西北部(如达莱呼布)为 8.2℃(Yang Xiaoping et al., 2003),年均降水量的变化范围为南部的 120 mm 到北部的 40 mm,多年平均降水量 84.5 mm(Hu Fangen et al., 2016)。

腾格里沙漠位于阿拉善高原的南部,面积约 36000 km²,是我国的第四大沙漠;其西南以祁连山为界,西北以雅布赖山为界(Zhang Hucai et al., 2004),海拔 1000~1500 m,以活动沙丘为主(Zhao Yan et al., 2008b);约 93% 的沙丘为移动型沙丘,并且沙丘地被湖泊盆地和岩丘分开(Yang Xiaoping et al., 2004);气候上,夏季受西风急流带和东亚夏季季风的影响,冬季受蒙古西伯利亚高压的影响,气候冷干,年均温 7.8℃,年均降水量 115 mm(Zhang Hucai et al., 2004)。

乌兰布和沙漠位于阿拉善高原的东部,面积约 11000 km²,东部为黄河,北面是狼山,巴彦乌拉山位于西面,贺兰山在东南边。沙漠中南部的沙丘高,北部的沙丘低,南部主要是高约 100 m 的金字塔形沙丘和复合型高大沙山,北部主要是固定、半固定沙丘(Zhao Yan et al., 2012),吉兰泰盐湖位于乌兰布和沙漠西南部;地质上,乌兰布和沙漠是河套平原的一部分,被鄂尔多斯新生代断陷盆地包围;气候上,年均温 7.8℃,年均降水量 102.9 mm(Zhao Yan et al., 2012)。

2 末次冰期(40ka)以来的高原环境演变——古气候记录及其指示

2.1 古气候记录与环境重建

在气候地貌学上,气候是自然地理环境不可或缺的五大要素之一,它作为外营力控制一个地区自然地理环境和地貌的变化;特定的气候条件控制特定的植被和与之联系的景观特征;但不同地区受气候变化的影响和程度还表现出不同的抗干扰和适应能力。末次冰期以来,阿拉善高原地区的气候演变就显得至关重要,因为它是高原沙漠地貌演变的重要基础。根据已有的研究成果,末次冰期气候变化的研究主要集中在 40 ka 到更新世结束(11 ka)。

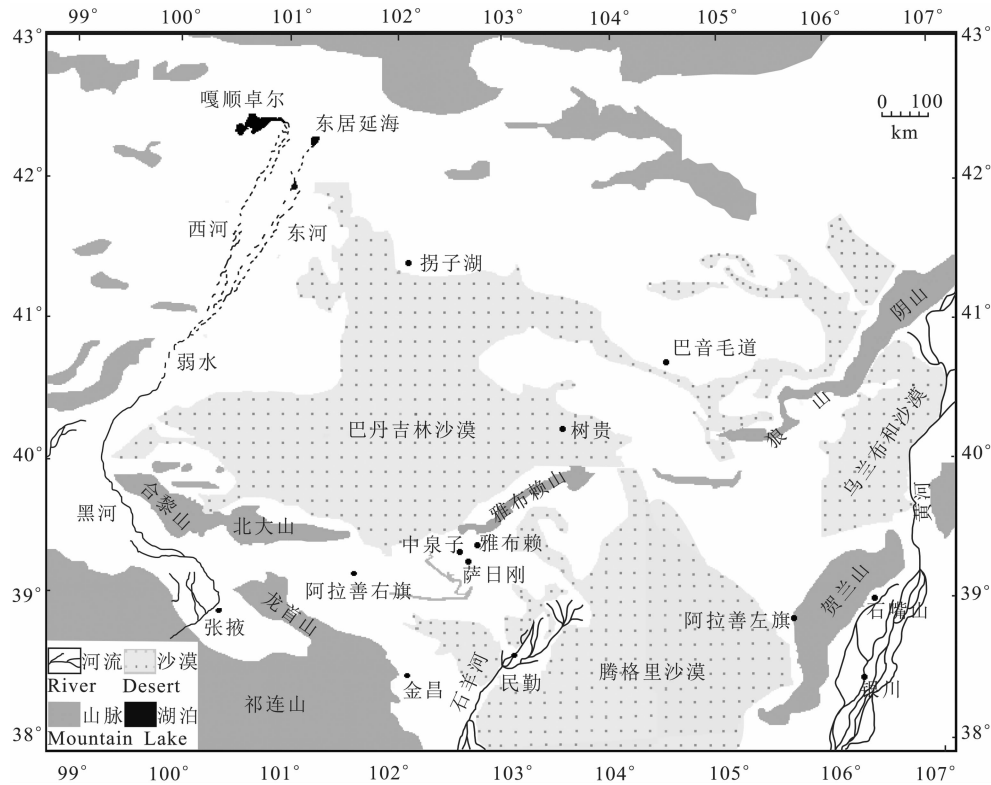


图 1 阿拉善高原概况(修改于 Yang Xiaoping et al. , 2010)

Fig. 1 Overview of the Alashan Plateau (modified from Yang Xiaoping et al. , 2010)

具体来说,在巴丹吉林沙漠,Yang Xiaoping (2002)根据地貌景观的考察发现,末次冰期山麓平原(山麓侵蚀平原与 150~300 mm 年均降水量及冷冬有关)作用扩大,即此时具有更高的降水和更寒冷的气候(表 1)。Wünnemann et al. (2002)根据居延海古湖芯氧同位素记录认为,约 37~34 ka,31 ka 和 28~26 ka 湖水位高(表 1),与 Yang Xiaoping (2000a)报导的 Sugunuoer 最高湖水位发生于 ca. 33 ka BP(^{14}C 测年结果)的研究结果一致。同时,来自 Gashunnuoer 的岩芯记录表明,最高湖水位发生于 ca. 34 ka BP 和 ca. 21ka BP (Pachur et al. , 1995),与以上的研究结果在时间上具有互补性(表 1)。Yang Xiaoping(2000a)对巴丹吉林沙漠高大沙丘的地貌、沉积和地质年代进行研究,分析过去 30000 年的景观演变和降水变化,结果表明古沙丘中胶结层存在的 ca. 30 ka BP、ca. 20 ka BP、ca. 19 ka BP 时期,气候比目前的湿润(表 1),并且沙漠气候在末次冰期普遍寒冷的阶段也比目前的湿润。Yang Xiaoping(2004)对巴丹吉林沙漠东部和东南部边缘的五个沉积剖面进行热释光和放射性碳测年分析后发现,干旱指数在 ca. 30~20 ka 时期降低,且沙漠东南边缘沙黄土沉积的测年结果为 ca 25~

18 ka,说明此时期气候不是很干旱(表 1); Yindeertu 古岸线的位置也说明湖泊在末次冰期末期为高水位阶段,并且这与 Badain Lake 沉积物中的发现一致。除上述地质学证据, Li Zhuolun (2012)通过建立水量平衡和能量平衡模型,计算了巴丹吉林沙漠腹地 31 cal ka 时期的降水约为 260 mm,均高于现代该地区的降水量,证实了该时期湿润的气候环境;但是,大约 19~14 ka 时期气候是干旱的,且在 18.6~12.8 ka BP 期间没有发现有机物质的存在,暗示此时期的环境是极端干旱的(Yang Xiaoping et al. , 2004)。

对于腾格里沙漠,来自沉积构造、地球化学组成和介形虫的证据表明腾格里沙漠在 39~23 ka ^{14}C BP 时期可能存在大的古湖泊 (Pachur et al. , 1995),此研究结果与 Zhang Hucai et al. (2004)的相对一致,即腾格里沙漠的大湖建立于约 35 ka ^{14}C BP,并且一直维持到 22 ka ^{14}C BP(表 1)。地层证据进一步表明,腾格里沙漠在末次盛冰期大约 18 ka ^{14}C BP 时无湖泊存在(Zhang Hucai et al. , 2004); Zhang Hucai et al. (2002, 2004)的研究表明,石羊河形成之前的内陆湖在约 18 ka ^{14}C BP 时完全变干,约 13 ka BP 时再次出现;Pachur et al. (1995)

对腾格里沙漠湖泊沉积物的研究也表明,ca. 20 ka ¹⁴C BP 之后这里的气候变干,并且伴随着风沙活动的增强和湖水位的下降。上述文献报道表明,末次冰期时腾格里沙漠气候变化的研究结果具有较好的一致性。

来自乌兰布和沙漠的古环境研究相对较少。最

近,Li Guoqiang et al. (2015)基于钻孔中的沉积记录表明,整个末次冰期一直到全新世早期,乌兰布和沙漠一直都有风沙活动和沙丘沉积,这里的环境非常干旱;Chen Xuemei et al. (2013)对 WL10ZK-1 孢粉记录的研究也显示,末次冰期时荒漠植被在乌兰布和沙漠占主导地位,气候干旱。

表 1 阿拉善高原 40ka-更新世结束时期环境湿润的研究

Table 1 A study of the environmental wetness between 40ka and the end of the Pleistocene, Alashan Plateau

区域	地点	物质	测年方法	结果	作者
巴丹吉林沙漠	山麓平原	地貌景观	气候地貌学	末次冰期	Yang Xiaoping (2002)
	沙山	钙胶结物	¹⁴ C	ca. 30, 20, 19 ka BP	Yang Xiaoping (2000a)
	东南边缘	黄土沉积物	TL	ca. 30~20 ka	Yang Xiaoping (2004)
	居延海	湖泊岩芯	古地磁、同位素分析法、TL/IRSL	37~34, 31 28~26 ka BP	Wünnemann et al. (2002)
腾格里沙漠	嘎顺诺尔	碳酸钙	¹⁴ C	ca. 34, 21 ka BP	Pachur et al. (1995)
	断头梁、白鲸湖	碳酸钙贝壳	¹⁴ C	39~23 ka BP	Pachur et al. (1995)
	古湖泊	有机物、贝壳、碳酸钙	¹⁴ C	35~22 ka BP	Zhang Hucai et al. (2004)

通过对上述研究成果的对比,可以发现巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠的研究结果相对一致,即约 40 ka 到末次盛冰期结束(19 ka)气候普遍比目前湿润,此后至更新世结束气候干旱;而乌兰布和沙漠气候变化模式在第一阶段与前两者的研究结果相反。当然,这些气候变化阶段存在不同程度的冷暖干湿波动。

就整个阿拉善高原来看,相对于末次冰期,全新世气候变化的研究相对更多,更完善。

具体来说,巴丹吉林沙漠全新世气候变化的研究结果也存在不一致性,目前主要有两种观点。(1)全新世早期和中期气候湿润,晚期干旱;(2)全新世中期干旱。支持第一种观点的研究相对较多,例如:Yang Xiaoping et al. (2003)对巴丹吉林沙漠晚更新世以来的气候变化和景观演化,尤其是沙丘、湖泊沉积和水化学方面的分析显示,沙漠中的湖水位在全新世早期和中期更高,ca. 5 ka BP 时湖水位开始下降,沙丘开始重新活动(虽然 ca. 2 ka BP 时湖水位可能有短期的上升)。根据对巴丹吉林沙漠高大沙丘的地貌、沉积和地质年代学的分析, Yang Xiaoping(2000a)显示全新世开始时期的气候是更湿润的,这与 Yang Xiaoping et al. (2003), Yang Xiaoping et al. (2010)的另一些研究结论一致:根据放射性碳测年和 U 系列测年发现,巴丹吉林沙漠的高湖位和湿润的气候始于 ca. 10 ka,一直持续到全新世中期末期(Yang et al. , 2010);沙漠丘间低地的湖岸线重建表明全新世早期和中期湖水位高(Yang Xiaoping et al. , 2003);湖泊在全新世中期水资源量最大,即巴丹吉林沙漠中的气候在全新世

早期相对湿润,中期达到最大(Yang Xiaoping, 2002)。以上来自不同环境记录的研究结果具有一致性,均说明全新世早期和中期气候湿润,晚期干旱(表 2)。支持第二种观点的研究相对较少,来自巴丹吉林沙漠南部、西部(Chen Fahu et al. , 2003)和北部(Hartmann et al, 2009)内陆湖岩芯沉积物的研究结果认为,全新世中期是干旱的。但是, Yang Xiaoping et al. (2010)、Yang Xiaoping et al. (2011)指出,对这些湖泊岩芯的早期工作的解释可能是不准确的,8~5cal ka BP 期间的气候确实比全新世早期和晚期的更湿润。目前,这两种观点还没有得到很好的统一,需要进一步的工作来验证。

对于腾格里沙漠,Zhao Yan et al. (2008b)对青土湖古湖一个 348 cm 的沉积剖面的岩性和孢粉化石记录的研究,均说明全新世早期气候极其干旱,中期湿润,晚期干旱;红水湖剖面的孢粉记录也说明全新世中期气候是湿润的(表 2)。Long Hao et al. (2012)对腾格里沙漠湖泊和岸线层序地层的分析也表明,全新世中期 8~5 ka 气候湿润(表 2),自 5.0 ka 开始潞野泽古湖表现为缩小的趋势,全新世晚期气候变干。Chen Fahu et al. (2003)对潞野泽古湖岩芯的研究也表明,这里的气候在全新世早期是暖干的,中期冷湿,晚期干旱环境增加。Li Zhuolun (2012)通过对腾格里沙漠中 16 处根管的碳十四测年研究,发现这些根管绝大部分形成于全新世中期,指示了此时期的湿润气候。但是,Chen Fahu et al. (2006)的另一项研究却显示了完全相反的结果:即全新世中期 7.1~3.8 cal ka BP 时气候是干旱的,全新世早期和晚期气候更湿润,但由于这里被推断

的三个孢粉样本主要来自祁连山, 所以其结果暂不作考虑。

对乌兰布和沙漠的全新世气候, Zhao Yan et al. (2008b) 认为全新世早期和中期这里的气候湿润, 主要表现为湖泊环境, 6.5 ka 之后古湖泊缩小并且发生分离, 表明全新世晚期气候干旱; 孢粉记录显示全新世中期 8.6~6.4 ka 湿润的气候有利于湖泊的发育, 这与 Fan Yuxin et al. (2010) 的研究结果

一致, 即此时期沙漠北部被浅湖和沼泽覆盖, 环境湿润(表 2)。Chen Fahu et al. (2008) 基于对古兰泰古湖¹⁴C 测年的结果指出, 约 5.5 cal ka BP 时湖泊开始退化并形成现代盐湖, 这也说明全新世晚期气候的干旱。然而, 也有研究认为乌兰布和沙漠在全新世中期气候可能是干旱的(Chun Xi et al., 2007)。产生这两种不同结论的原因目前仍有待进一步的研究和记录来解释。

表 2 阿拉善高原全新世时期环境湿润的研究
Table 2 A study of the environmental wetness since the Holocene, Alashan Plateau.

区域	地点	物质	测年方法	结果	作者
	沙山	钙胶结层	¹⁴ C	ca. 9, 2 ka BP	Yang Xiaoping (2000a)
巴丹 吉林 沙漠	湖泊	有机物	¹⁴ C	9~4 ka BP	Yang Xiaoping et al. (2003)
	音德尔图, 巴丹	有机物、沙	¹⁴ C、TL	7 ka ¹⁴ C BP, ca. 1 ka	Yang Xiaoping (2004)
	呼和吉林	有机物、沙	¹⁴ C、TL	8~7 cal ka BP	Yang Xiaoping et al. (2010)
	湖泊	有机/无机碳、贝壳、石灰华	¹⁴ C、U 系	ca. 10 ka, 9~4 cal ka BP	Yang Xiaoping et al. (2010)
腾格里沙漠	居延泽	碳酸钙	AMS	10.7~8.9, 5.4~5 cal ka BP	Hartmann et al. (2009)
	青土湖	有机物、碳酸钙	AMS	7.2~3.5 cal ka BP	Zhao Yan et al. (2008b)
	红水湖	孢粉	AMS	7.4~5.7, 4.5~3.5 cal ka BP	Zhao Yan et al. (2008b)
	猪野泽	沉积沙	OSL	8~5 ka	Long Hao et al. (2012)
乌兰布和 沙漠	古湖泊	沉积沙	OSL	8.3~6.5 ka	Zhao Hui et al. (2012)
	沙漠北部	沉积沙	OSL	8.6~6.4 ka	Fan Yuxin et al. (2010)

通过上述的研究成果, 可以发现全新世阶段巴丹吉林沙漠和乌兰布和沙漠的气候变化模式相对一致, 即全新世早期和中期气候湿润, 晚期干旱; 而腾格里沙漠气候变化普遍被认为全新世早期和晚期干旱, 中期湿润。显然, 这些研究结果揭示的这一时期高原不同地区的沙漠环境演变, 其模式有明显的不一致。但这种不一致到底是人为解释上的误差, 还是真实的区域环境差异, 目前还难以定论。

2.2 末次冰期高原气候变化的原因

在成因上, 学术界普遍认为末次冰期以来阿拉善高原地区的气候变化与西风带、东亚季风有关。其中, 末次冰期的湿润气候更多的受西风带的影响(Yang Xiaoping, 2000b, 2001b; Zhao Yan et al., 2008a), 并且此水汽来自北大西洋(Yang Xiaoping, 2001b), 因为冰川时期东亚夏季风很弱(Yang Xiaoping et al., 2003)。除此, 向南移动的极地高压也从北极地区带来了水汽(Yang Xiaoping, 2004); 末次盛冰期结束后的干旱气候, 可能与东亚夏季风的减弱有关(Yang Xiaoping et al., 2004)。从上述可以看出, 阿拉善高原气候变化的驱动机制这一问题, 涉及到了西风、东亚季风和极地气团三者之间的相互作用过程。由于这三种气团在起源地和环流范围上具有海陆性、半球性或全球性尺度, 因此阿拉善高原的古气候变化问题不仅是一个区域性的

问题, 同时也响应着全球的气候变化, 因而引起国际学者的广泛关注。

由上述阿拉善高原的环境记录研究可以看出, 末次冰期气候演变的争议不是很大, 从气候变化的区域尺度考虑, 很多周边地区的研究也具有相似的结论。例如, 由于夏季风的侵入和北半球西风强度的变化, 在约 41~30 ka 期间, 中国西北部气候普遍湿润, 并且与邻近的青藏高原最大湖存在的时期相对应; 除此, 末次盛冰期中国西部沙漠再一次经历了更湿润的环境(图 2)(Yang Xiaoping et al., 2010), 此时期中国西部湖泊的水更淡, 而比目前显著高的水位与正的降水/蒸发异常、低温和减少的蒸发联系在一起, 并且这种异常是西风带增强和向东向南移动的结果(Yu Ge et al., 2000); Yang Xiaoping (2002) 通过重建中国西北沙漠区的干旱指数发现, 末次冰期的气候比目前的湿润; 由于东亚夏季风环流的增强, 青藏高原的湖泊在约 40 ka、35~30 ka 时大范围扩大(Zheng Mianping et al., 2000); 塔里木盆地、准噶尔盆地和阿拉善高原 ca. 30 ka BP 时的气候均湿润, 并且此时阿拉善西部地区降水的增加是西风带气团作用的结果(Yang Xiaoping, 2001b; Yang Xiaoping, 2004); Yang Xiaoping et al. (2010) 指出, 中国西部大部分地区在 40~30 ka 期间表现为湿润的环境(图 2); 中国沙漠带东部的古

环境在约 21~13 ka 时期以沙丘形成范围的扩大为特征,反映了东亚夏季风的减弱(Yang Xiaoping et al. , 2004);蒙古西部沙丘光释光测年结果和地层分析表明,末次冰期 18~13 ka 期间细沙被强烈地从湖泊凹地中吹走,反映环境的干旱(Yang Xiaoping et al. , 2006)。由此可知,阿拉善高原地区末次冰期的气候变化具有与我国北方大区域尺度气候变化相一致的信号。

当然,除了这种区域性尺度的强烈信号,也叠加着高原局地尺度气候变化的信号。例如,从上述古气候记录来看,相对于另外两个沙漠,乌兰布和沙漠在末次冰期第一阶段的气候变化模式有所不同,但这种不同并没有相关的解释。笔者推测,可能因为此沙漠相对于前两个沙漠而言更靠近高原的东北端即西风的下风向和边缘,再加上雅布赖山(沙漠西部)和狼山(沙漠西北—北部)的地形夹持作用的影响,西风带传输的水汽不能到达,北极气团也受到抑制。但相对来说,西风带和极地高压对末次冰期湿润气候的解释,笔者认为前者可能更具有说服力,因为后者(极地冷涡)通常难以带来水汽。

从全球尺度来看,末次冰期全球普遍处于寒冷时期,但环境是否比目前的湿润还需要进一步分析。上述所给予的区域性湿润气候变化的解释,阿拉善高原除了受西风雨带的影响外,还可能受到亚洲夏

季风雨带的影响。但是这两种都能带来降水的环流系统在冰期时的高原气候变化中的动态关系如何,目前仍然缺乏详细的研究成果。Jin Liya et al. (2007)和 An Zhisheng et al. (2012)的研究认为,西风带的变化与夏季风的变化在冰期时可能相反,这提供了一种探索途径,但上述的解释有待进一步从机理上推敲和确认。

2.3 全新世高原气候变化的原因

相对于末次冰期,阿拉善高原全新世气候变化的原因存在的争议较大,尤其是全新世早期和中期。

首先是关于全新世中期气候湿润的看法。与末次冰期的西风带影响不同,如果阿拉善高原全新世早期和中期的气候是湿润的(图 3),则普遍地被认为是东亚夏季风所导致的(Yang Xiaoping, 2000; Chen Fahu et al. , 2003; Zheng Mianping et al. , 2000)。如 Yang Xiaoping(2000a, 2002)认为全新世中期东亚夏季风(雨带)北部边缘到达了巴丹吉林沙漠,为戈壁地区带来了更高的降水。但是,Zhao Yan et al. (2008b)认为,腾格里沙漠全新世气候变化的模式,既不是对北半球西风带也不是对东亚夏季风的响应,而与青藏高原附近上升和下沉的区域性气团运动有关;即 7.2 cal ka BP 以前(全新世早期),强的夏季日照增强了青藏高原附近低地地区空气的下沉运动,从而导致气候的干旱;在 7.2~5.2

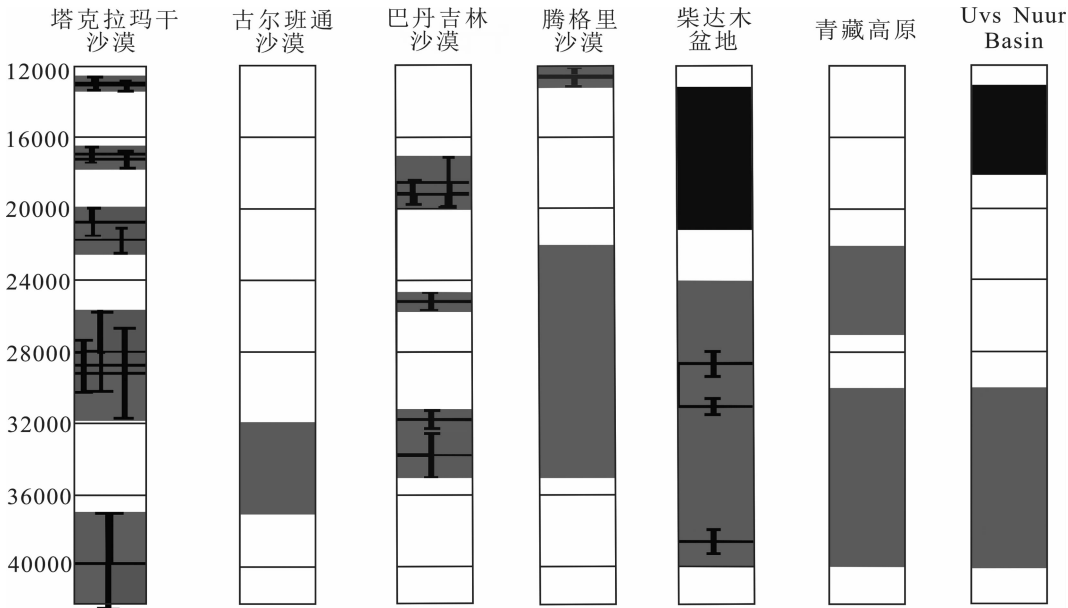


图 2 中国沙漠区更新世干湿期柱状图;灰色代表更湿润的环境,黑色代表更干旱的环境
(稍作修改于 Yang Xiaoping et al. , 2010)

Fig.2 Pleistocene wetter epochs (gray) and distinct drier periods (black) recognized in Chinese deserts
(Slightly modified from Yang Xiaoping et al. , 2010)

cal ka BP(全新世中期)时,由于夏季日照相对早期减弱,下沉空气变少,同时季风强,因此气候相对湿润;而下沉气流和直接的季风降水减少在低地间的相互作用是导致高原在 5.2~3.0 cal ka BP 时气候变化的主要原因;而 3.0 cal ka BP 以后(全新世晚期),由于日照持续减弱,高原周围空气的下沉运动减弱,同时季风降水变弱,气候干旱。显然,这一观点强调了青藏高原对周边区域在千年尺度气候变化上的调节作用。相似的,Zhao Yan et al. (2008a)、Qin Xiaoguang et al. (2017)认为柴达木盆地全新世干湿气候变化的空间模式也与青藏高原空气的上升和下沉运动有关。然而,前述古气候记录所显示的全新世时期腾格里沙漠与另两个沙漠在气候变化模式上的差异,似乎难以仅仅用青藏高原的区域性影响来解释阿拉善高原在全新世时期的气候变化。因为在地理位置上,我们无法排除同一下风向区域内仅腾格里沙漠受到青藏高原影响而巴丹吉林沙漠和乌兰布和沙漠不受到青藏高原的影响。

其次,是阿拉善高原全新世中期的干旱事件。这个争议有一个隐含的问题,就是全新世中期的干旱,仅是局地气候的特征还是区域甚至全球气候变化的反映? Su Zhihao et al. (2013)对中国西北部的研究得出结论,全新世中期沙漠和戈壁进一步扩大,干旱持续发展。Wang Wei et al. (2013)对蒙古高原的研究显示全新世中期也是干旱的(图 4),并且认为相比湖泊孢粉记录中没有发现此干旱事件而言,更愿意相信此时期的干旱是存在的,并且做了相关说明。Yin Yi et al. (2013)对蒙古 Angili Nuur 湖高分辨率岩芯记录的研究发现,全新世中期气候干旱,并且指出美国西部和地中海半干旱地区也表现为相同的气候特征;该作者认为它可能是由大尺度高温引起的蒸发效应增强导致的,因而具有全球性。还有一些学者对蒙古高原全新世中期气候干旱也给予了相同的解释(Wang Wei et al., 2011; An Chengbang et al., 2008)。

显然,上述这两个全新世中期的湿润与干旱问题,又带来了一个新的问题,即尺度性问题。如果全新世中期的干旱事件在全球都真实存在,为什么阿拉善高原一些地区的环境记录显示当时的气候是湿润的? 后者是小尺度区域性事件么? 但很多来自我国和中亚其他地区的研究也记录了全新世中期的气候湿润,如中国西北干旱区/中国西部沙漠区(Yang Xiaoping et al., 2011b)、中国半干旱地区(Wang Wei et al., 2013)、古尔班通沙漠(Yang Xiaoping,

2010)、北疆甚至是中亚地区(图 4)(Wang Wei et al., 2013)等。学者对此的解释是东亚夏季风的影响(这种影响一般是夏季风的北移或增强),或者是西风带作用的结果;然而,无论是夏季风还是西风带,这种环流系统影响的范围一般也很大,很难出现区域内某个地方的气候特征在较大的时间尺度内的不符。所以综合以上分析可知,不管是全新世中期的气候是干旱还是湿润,其机理性的解释在时空尺度上都有待进一步研究。

3 关于高原古环境变化的争议:潜在的原因

针对上述不同研究对象、环境记录所获得的不同研究结果,进而产生对高原古环境变化的认识上的不一致,笔者认为,有一些原因可能导致这些问题的出现,在此做一阐述。

3.1 环境代用指标的准确性以及区域环境要素的复杂性、不确定性

对于区域内部气候变化的空间差异性,应该首先考虑研究方法和环境代用指标的准确性,如测年方法等(Wang Nai'Ang et al., 2011; Liu Siwen et al., 2016)。例如,Herzschug et al. (2004)对东居延古湖气候变化重建中出现了与前人研究结果相反的结论,他们的解释是,可能由于孢粉记录的分辨率太低或者测年不准确造成的;Wang Nai'Ang et al. (2011)对阿拉善高原晚第四纪高湖面与大湖期的研究发现,OSL 测年方法与 ^{14}C 测年方法的年代数据存在较大分歧。其次,不同学者对同一气候代用指标所指示的环境意义的理解可能也是不同的。例如,有学者认为高碳酸钙是高湖泊水位和湿润的气候环境的代表(如 Yang Xiaoping, 2000; Yang Xiaoping et al., 2003; Long Hao et al., 2012),但是 Shi Qi et al. (2002)将高碳酸钙解释为低湖泊水位和干旱的气候环境,因此认为石羊河流域在全新世中期表现为干旱化的趋势。第三,不同自然地理条件下的各大环境要素(如小气候、地貌、水文、生物、土壤等五大要素)对区域气候变化的指示和影响可能不同。由于阿拉善高原三大沙漠的土壤环境相似,因此相对于土壤,气候、地貌、水文和生物等要素的影响可能相对较大。但在长时间尺度而言,气候和地貌对高原不同地区的影响差异又不会太大。由于高原古气候记录大多基于湖泊或孢粉记录,因此水文、生物因素的影响比较重要。如湖泊大小涉及水量的多少,其变化会影响对气候变化程度的判断。

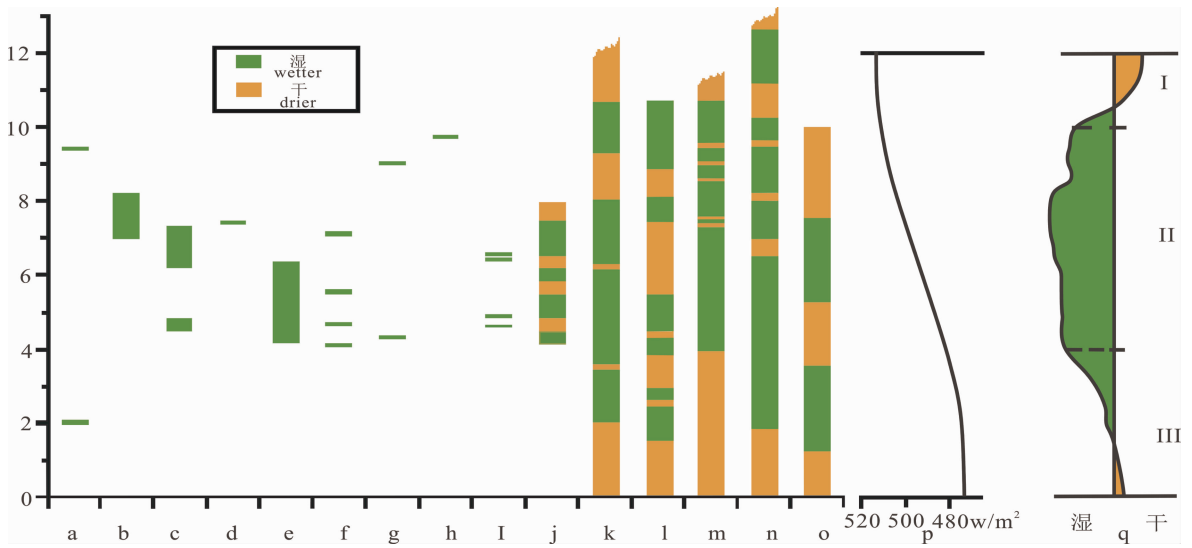


图3 巴丹吉林沙漠和中国干旱区全新世古气候记录中的干湿期分布图

Fig. 3 Dry and wet epochs inferred from palaeoenvironmental records

in the Badain Jaran Desert and other dryland regions in China

(a)—巴丹吉林沙漠沙丘表面的钙胶结物;(b)—Huhejilin Lake;(c)—Zhalate Lake;(d)—苏木吉林湖;(e)—诺尔图湖;(f)—Shaobaijilang Lake;(g)—Aomenjilin Lake;(h)—Sayinwusu Lake;(i)—巴丹湖;(j)—巴丹吉林东部边缘的树贵湖;(k)—巴丹吉林南部边缘的风成沙序列;(l)—居延泽,黑河的终端湖;(m)—腾格里沙漠中的一个终端湖;(n)—青藏高原东北部的青海湖;(o)—古尔班通古特北部边缘的乌伦古湖;(p)—40°N 夏季(5~9 月)太阳辐射;(q)—上述记录的综合结果(稍作修改于 Yang Xiaoping et al. , 2010)

(a)—calcareous cementations on the dune surface in the Badain Jaran;(b)—Huhejilin Lake;(c)—Zhalate Lake;(d)—Sumujilin Lake;(e)—Nuoertu Lake;(f)—Shaobaijilang Lake;(g)—Aomenjilin Lake;(h)—Sayinwusu Lake;(i)—Badain Lake;(j)—Shugui Lake in the eastern margin of Badain Jaran;(k)—aeolian sequence in the southern margin of Badain Jaran;(l)—Juyanze, the terminal lake of the Heihe River;(m)—a terminal lake in the Tengger Desert;(n)—Qinghai Lake in the northeastern Tibetan Plateau;(o)—Wulungu Lake on the northern margin of Gurbantunggut;(p)—Holocene changes of summer (May-September) solar insolation at 40°N;(q)—deciphered from the synthesis of these records (Slightly modified from Yang Xiaoping et al. , 2010)

例如,同样的气候条件下的小型湖泊可能变干,但是大湖泊却可能不变或由于袭夺了小湖泊的水量而表现得更为湿润,那么基于这两种湖泊的沉积记录可能会带来不同甚至完全相反的结论。不同生物对气候变化的响应程度也会不同,从而其环境指示性也会有所差异。例如,Yin Yi et al. (2013)的研究发现,干旱气候条件下森林被干草原取代的时间与气候变化的速率不一致,表现为明显的落后。因此,综合各种环境要素来看,虽然区域气候演变的研究尺度较大,单一要素的差异及其影响可能微不足道,但是在此基础上多种要素相互作用的叠加却不可忽视。例如,巴丹吉林沙漠湖泊众多,腾格里沙漠也存在很多湖泊,并且大部分为淡水湖(Li Zhelun et al. , 2015; Yang Xiaoping et al. , 2011b),而与黄河相邻的乌兰布和沙漠却无湖泊存在;黄河及其源头的变化可能限制/影响了乌兰布和湖泊的形成(Li Guoqiang et al. , 2014),进一步对沙漠环境产生影响(Zhao Hui et al. , 2012)。因此,当我们所研究的区域气候变化的时空尺度较大时,边界条件和外界

条件对不同区域气候变化的影响范围和程度可能会至关重要,如青藏高原的隆升作用及黄河变化对邻近地区的影响。

3.2 对季风和西风两大环流系统在中纬度地区的作用的差异性认识

在中纬度地区的古气候重建研究中,存在对季风和西风两大环流系统在作用于我国西北地区的气候变化时有不同的环境效应的解释,因而产生这些地区古环境变化的争议。

许多学者认为阿拉善高原及其周边地区全新世早期的气候是湿润的,且这种湿润期普遍具有大尺度的区域性,受到了季风环流雨带效应的影响。例如,通过孢粉组合和风沙沉积记录的环境重建研究揭示,蒙古在全新世早期的温度和湿度增加(An Chengbang et al. , 2008),内蒙古中部的湖泊沉积物确定了全新世早期约 8.5 ka 时期大湖的存在(Lehmkuhl et al. , 2001);中国西北干旱区全新世早期的气候是湿润的,它可能是由比目前更强的亚洲夏季风所导致的(Yang Xiaoping, 2001b);亚洲

季风区气候在全新世早期的湿润达到最大(Zhao Yan et al., 2012)。

由上述解释可以看出,对阿拉善高原全新世早期气候湿润的解释基本上都是归因于亚洲夏季风的增强。这一解释隐含了一个前提条件,那就是西风环流不足以导致区域性的、湿润的气候变化;甚至,更有学者认为西风环流会导致气候的干旱,如很多关于阿拉善高原周边地区全新世早期气候干旱的研究,认为这些地区的气候变化是受西风带的影响。例如,有研究指出蒙古阿尔泰地区全新世早期气候寒冷干旱,受到了西风带的影响(Rudava et al., 2008);北疆由于受西风带的影响在全新世早期约 11.5~10.0 到 7.5~6.7 cal ka BP 期间气候干旱(图 4)(Wang Wei et al., 2013);西风带控制的中亚干旱区在全新世早期最干旱(Zhao Yan et al., 2012),等等。

然而,也有很多学者认为西风环流能够给中国西北地区带来更多的水汽,全新世晚期新疆和蒙古阿尔泰地区的气候湿润。如 Yang Xiaoping et al. (2006)对塔克拉玛干沙漠南缘和中心的风成和湖泊沉积物的分析,地层证据表明全新世晚期气候湿润,全球西风带和移动的极地高压驱动了降水的波动,但却是冬季风的强度主要控制温度的变化;有研究显示古尔班通古特沙漠 5.3 cal ka BP 以后气候干旱,并且主要受西风带的影响(Yang Xiaoping et al., 2010)。显然,这些关于西风环流的矛盾性解释,需要进一步工作来甄别,其核心是深入理解西风环流与亚洲季风环流的动力学关系。

3.3 中纬度区域西风、季风环流效应与海洋环流的动力学联系的复杂性

中国作为世界主要的季风区域,由于疆域宽广下垫面类型复杂多样,是否每个地区都可以作为季风研究区,还是一个值得探讨的问题;尤其是中国北部的中纬度地区,为季风边界区和西风控制区,气候类型非常复杂。这两大环流系统对该区域气候环境演变的影响如何,至今争论不断(Wang Sumin et al., 1998; Li Baosheng et al., 2001; Li Seng et al., 2004; Wang Pinxian, 2009; Wang Yongjin et al., 2008; Chen Quan et al., 2017)。有学者提出,晚更新世以来我国西北地区千年尺度气候变化存在“季风”和“西风”两种模式(新疆地区服从西风带规律,甘肃、青海等地区主要受季风影响)(Li Jijun, 1990);而另有学者则认为末次冰期以来东亚干旱区存在早中全新世湖泊水位相对较高以及末次盛冰期

和早全新世湖泊水位均较高两种演变规律(Li Yu et al., 2016),阿拉善高原南部(如石羊河流域)在千年尺度上受到亚洲季风与西风带环流的共同影响(Li Yu et al., 2011)。不管争议如何,很多学者一致认为其影响域和影响强度会随着这两大风系强迫源的变化(如全球变化、纬圈经向热力差异变化、海陆热力差异变化等)而变化(Wang Keli et al., 2005),大尺度上主要受控于北半球大气环流与海洋环流间的动力学联系。如东亚季风区是世界上最大的大洋(太平洋)和最大的大陆(亚欧大陆)之间的海陆气温对比和季节变化引起的,而西风这一行星风系则与大西洋密切相关,源于大西洋的西风系统与源于太平洋的季风系统在欧亚大陆的中纬度地区有着复杂多样的环流模式。总体来看,中纬度地区的大气环流受海洋环流的影响,主要表现为平均纬向环流、平均水平环流和平均经向环流(Zhou Shuzhen, 2012)。

近地面的纬向环流表现为从地面向上都是西风,即所谓的盛行西风带;西风带的南北移动受到低纬副热带高压南北移动的影响;而副高的南北移动、太平洋表层海水温度、高压系统则对东亚夏季风的变化有直接的作用(Zhou Shuzhen, 2012)。季风和西风都受到副高南北移动的影响,因此来自两大洋的这两个环流系统之间必然存在着动力学联系,并反映了中纬与低纬大气环流相互作用和影响,具有复杂性。

大气的平均水平环流是指受到外界扰动后发展起来的槽、脊和高、低压环流,在对流层不同高度、不同地区(大西洋和太平洋)的大气平均水平环流,其形式是不同的。对流层高层的平均水平环流形式是西风带存在着的大尺度的平均槽、脊,如东亚大槽(太平洋系统)、欧洲浅槽(大西洋系统)等;对流层低层的水平环流在月平均气压图中主要表现为巨大的高、低压系统,如冰岛低压和亚速尔高压(大西洋系统),阿留申低压和西伯利亚高压(太平洋系统)等。因此,两大环流系统在对流层不同高度和不同区域有着不同表现,其相互作用方式也必然不同。

平均经向环流上,欧亚大陆主要受北大西洋涛动的影响。北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation,简称NAO)主要表现为北大西洋上的两个大气活动中心(冰岛低压和亚速尔高压),它们的变化为明显的负相关关系;当两者的气压差大时,北大西洋涛动为正相位(Seager et al., 2007; Visbeck, 2002),此时大气运动方向为从高压指向

低压,最大水分输送轴横跨大西洋转移到更西南到东北的方向,表现为大西洋经向翻转环流(Atlantic Meridional Overturning Circulation,简称 AMOC)的增强及西风带的北移和减弱(气候上表现为欧洲南部、中部和地中海地区甚至是中东、中亚更干旱的环境);而大西洋经向翻转环流的变化又导致副热带高压的增强和北移,这种北移又进一步推动西风带的北移,同时西风急流位置的偏北又会导致东亚夏季风的增强;而后的变化会使槽脊的位置发生很大变动,即东亚大槽东移入海(变浅、偏弱),由此导致西伯利亚高压和阿留申低压(太平洋系统)减弱,冬季风变弱;相反,此时北大西洋表层海水温度暖异常(由低纬向极地热量输送增强导致的),将更多的暖水向极地输送;该洋流活动与中低纬太平洋海域洋流活动的增强对应,此时 Walker 环流增强,利于 La Niña 事件的发生,即与太平洋十年振荡(Pacific Decadal Oscillation,简称 PDO)冷相位对应(Zhu Xiaojie et al., 2006)。由此可见,太平洋环流异常与北大西洋环流异常密切相关,且两大海洋环流的异常均导致西风和季风环流的变化,存在明显的时空关联性和复杂性。

上述两大海洋环流异常的关系表明,海洋环流异常导致夏季气压带的风带发生北移,此时东亚夏季风盛行。这一系列变化很好地解释了气候寒冷时期大西洋经向翻转环流变弱、发生北大西洋涛动负相位的概率大,以及夏季风和西风带强度相反的变化趋势,即夏季风强度变弱,西风强度则增加;它也同样揭示了大西洋上的冰岛低压与北太平洋上的阿留申低压的跷跷板模式,并且有大量的研究支持上述大气活动之间作用关系的结论,如北大西洋涛动对中高纬气候变化的影响(Chen Fahu et al., 2003; Visbeck, 2002; Hurrell, 1995; Chen Fahu et al., 2010)、太平洋十年震荡(Lü Junmei et al., 2005; Yang Chunxia et al., 2014)与阿留申低压(Zhu Xiaojie et al., 2006; Dong Xiao et al., 2014; Cheng Jun et al., 2004)、北大西洋涛动与 La Niña (Visbeck, 2002)、大西洋经向翻转环流与东亚季风(Sun Youbin et al., 2012)之间的关系,以及东亚大槽(Sun Bomin et al., 1997; Huang Xiaomei et al., 2013)、西风急流(Yang Lianmei et al., 2007a, 2007b; Kuang Xueyuan et al., 2008)和与东亚季风相关的大气活动(Wang Keli et al., 2005; Jhun et al., 2004; Chang Hong et al., 2017)的研究等。

综合上述分析,基于西风和季风两大环流系统

的强度变化以及北半球日照量(太阳辐射强度,图3)的变化,可以从不同时段三者之间的关系来理解阿拉善高原末次冰期的环境变化。总体来看,阿拉善高原末次冰期第一阶段的气候变化应主要受西风带的影响,因为此时期东亚夏季风弱,冬季风强;但是冬季风作用强度小于西风带,因为冬季风气候主要以冷干为特征,而西风相对冷湿,同时此时的日照量很小,温度低。末次冰期第二阶段温度呈现增加的趋势,此时日照也增加,西风带和冬季风的强度减弱,夏季风的强度增加,但是冬季风的作用占主导地位,因此此时期水汽很少,气候干旱。全新世早期日照量较高(图3),气候湿润应主要是东亚夏季风增强所致,而温度的增加主要是高日照强度导致的,所以此时期气候暖湿。全新世中期西风带的强度增加,并且远大于冬季风的强度,而此时夏季风相对减弱,但是由于日照量仍然较大(图3)所以夏季风强度还是较大;此阶段西风带也会传输一些水汽,但是由于地理位置的限制,水汽到达此地区的量不多,气候的暖湿仍然主要受夏季风的影响。全新世晚期日照量继续减小(图3),夏季风继续减弱,冬季风和西风带继续增强,但是此地区冬季风的影响大于西风带,导致气候干旱。

另外,还可以从两大环流系统的水汽输送效应来理解阿拉善高原及其周边地区不同时期的湖泊水位变化。末次盛冰期时(如 21 ka BP)高原及其周边地区的高湖面,可以归因于此时期北半球高纬度地区亚洲大陆西侧大陆冰盖比较强盛,迫使西风带向南迁移,海陆温差缩小,东亚夏季风萎缩,诱使西风带全年强盛,同时冰期中的低温引起了蒸发量降低,从而导致湖水损失比较少湖面比较高(Yu Jin et al., 2000)。也就是说,西风降水和低蒸发是末次盛冰期高湖面的原因。而中全新世时期该地区湖泊水位也较高,但这应当是此时期夏季风增强雨量增加所导致。对比来看,中全新世湖泊水位要高于末次盛冰期时的湖泊水位,是因为末次盛冰期时西风降雨较少蒸发也少(输出少),而中全新世季风降雨较多(输入多),这应是两者的主要差别所在,也表明西风环流系统对阿拉善高原地区的水汽效应远小于季风环流的水汽效应。

在空间上,从阿拉善高原向西进一步延伸到毗邻的我国西北新疆和中亚干旱区内陆,这里的湖泊水位受到的季风水汽效应由于源区距离的增加而递减,西风的水汽效应则增强,导致该地区的水汽主要来自西风环流系统。与来自夏季太平洋源区的季风

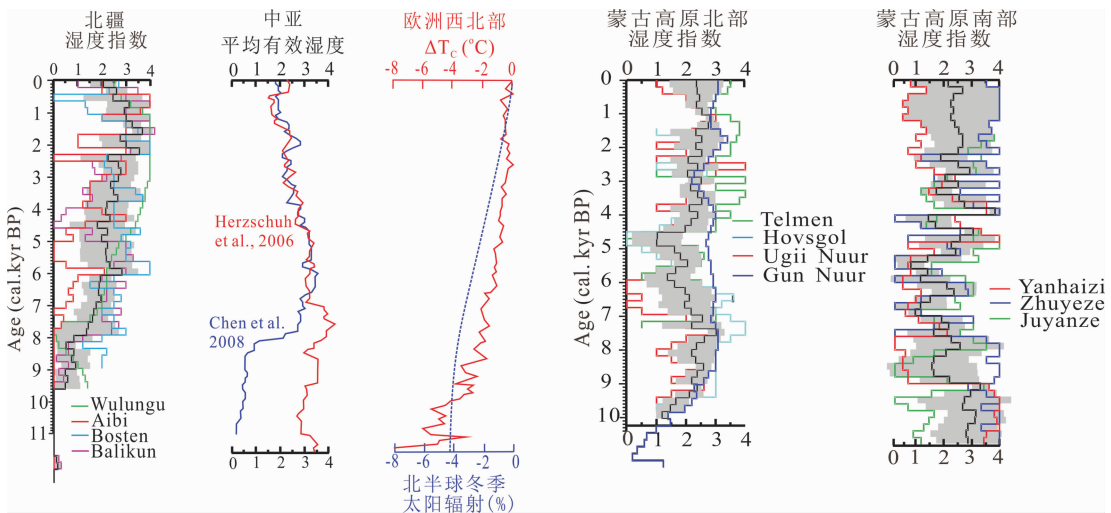


图 4 不同地区湿度指数和相关气候系统的比较(稍作修改于 Wang Wei et al. , 2013)

Fig. 4 Moisture index in different area and compared with other relative climate system

(Slightly modified from Wang Wei et al. , 2013)

水汽不同,西风带的水汽源是大西洋、北冰洋、地中海以及黑海(Li Wanli et al. , 2008),冬季降水占全年降水的比例非常大。也就是说,季风环流水汽受夏季太阳辐射影响大,而西风水汽受冬季太阳辐射影响大。从全球范围来看,虽然北半球总太阳辐射量从早全新世到 PI(Pre-Industrial, 1800 AD)期间一直在减少(图 3),但是冬季太阳辐射量却从早全新世到 PI 期间一直增加(Berger, 1978),使得该地区的冬季降雨量从早全新世到晚全新世一直增加,即西风水汽效应增强,季风水汽效应减弱。因此,在中亚干旱区,早全新世期间的低湖泊水位主要是由于降水量较少(冬季降水,西风水汽效应低,蒸发强)引起的,而中全新世的高湖面主要是由于降水的增加(夏季和冬季降水均增加,即季风和西风水汽效应均增强)。

目前,从全球尺度探讨关于末次冰期以来阿拉善高原气候演变与全球气候变化之间的关系的研究并不多,因此各种典型气候事件间的相关性也并不清楚。但普遍认为,在轨道、亚轨道和千年时间尺度上两者的气候变化具有一致性,如末次冰期气候寒冷,全新世的气候温暖。对于驱动末次冰期以来气候变化的机制,全球气候变化的驱动要素应在阿拉善高原占主导地位,如轨道尺度驱动的太阳辐射的变化;在此基础上,亚轨道尺度中海洋活动的影响也至关重要,如北大西洋经向翻转环流的变化;更小的时间尺度如北大西洋涛动(NAO)、太平洋十年际振荡(PDO)和厄尔尼诺(EI Niña)的影响,这些变化都会直接或间接地作用于西风带和东亚季风,均对阿

拉善地区的气候变化可能产生影响。除此之外,区域性的因子,如青藏高原和黄河的作用,也很重要。

4 讨论:阿拉善高原的沙漠演化与环境

由大范围风成沙丘组成的沙漠是阿拉善高原的主体地貌景观之一,尤其是由众多高大沙山组成的巴丹吉林沙漠为全球干旱区所独有,仅在火星上存在类似的风成地貌。上述有关阿拉善高原古环境变化的记录,尤其是高分辨率且连续的记录,多数来自高原上的古湖泊等古水文沉积。从气候地貌学理论来说,沙漠本身就是气候变化的产物,蕴藏着过去气候变化的记录(Yang Xiaoping, 2000a; Yang Xiaoping et al. , 2004; Yang Xiaoping et al. , 2011a; Yang Xiaoping et al. , 2011b),如沙漠腹地广泛存在的风—水复合沉积地层等(Yang Xiaoping et al. , 2006; Yang Xiaoping et al. , 2011a; Yang Xiaoping et al. , 2011b)。这里我们试图从高原沙漠形成与环境的关系对已有文献做一个追踪和总结。

4.1 沙漠沙的物源

从成因上说,沙漠的形成需要三个基本要素:沙源、搬运介质(环流条件与风—水营力作用)、堆积地的下垫面条件(地形地貌特征,植被等)(Yang Xiaoping et al. , 2004, 2012)。沙源是沙漠形成的第一要素,可提供的沙量从根本上决定沙漠的大小(Yang Xiaoping et al. , 2012)。目前对阿拉善高原沙漠物源的研究,显示这里的沙物质来源较为复杂,

不仅在源区距离上有就地、近源、远源之分,在沉积物类型上也存在多样性,包括湖泊沉积物、与河流相关的物源(冲积扇、洪积物、干涸河道)、周围戈壁、沙漠区互源(沙漠沙混合)、基岩风化产物等。例如, Yang Xiaoping(2001b)根据矿物成分的分析,认为巴丹吉林沙漠的沙颗粒主要来自当地(丘间地或沙漠外围)的湖泊沉积物,其矿物成分与高大沙山区的活动沙丘、残余沙丘相似; Yan Mancun et al. (2001)认为巴丹吉林沙漠源于西部和西北部干湖床中的大量湖泊沉积物; Yang Xiaoping et al. (2003)认为巴丹吉林沙漠的沉积物源于弱水的河流沉积和沙漠周围的湖泊沉积,而 Wang Fei et al. (2015)认为源于祁连山的黑河形成的冲积扇也是巴丹吉林的沙源之一; Hu Fangen et al. (2016)通过对风成沙和湖泊沉积物的元素地球化学的分析,认为巴丹吉林沙漠的沙丘沙主要来源于祁连山,它们通过河流搬运而来;而沙漠北部的红色沙丘源于阿尔泰山和蒙古戈壁,周围沙漠区风成沙的供应也是一个重要来源,如大量的沙从巴丹吉林沙漠供应到腾格里沙漠(Yang Yanyan et al., 2014);除此,基岩的风化作用在沙丘形成的物质供给中也扮演着重要的角色(Yang Xiaoping, 2001b)。

从上可以看出,目前已有的各研究结果之间存在不一致性,阿拉善高原沙漠沙源的研究并没有统一的定论。这些问题可能存在以下方面的原因。首先,从研究区的选择来看,大量的研究集中于巴丹吉林沙漠,关于腾格里沙漠和乌兰布和沙漠的研究较少,沙漠外围的研究则更少。其次,很多研究缺少确切的沉积物动力学(物质搬运与循环)证据。由于地貌营力(如风、水)作用的复杂性和多变性,物质搬运过程中的迁移途径、分异过程、外来物质干扰以及沉积后的再循环过程、混合过程等因素的不确定性,给沙源的定性和量化分析都带来很多的困难。比如,即使两个地区风成沙的矿物成分或相关元素比值相似,也很难说明彼此之间的母源关系或根本的沙源区,因为二者可能都源于同一地区甚或同一中间产物或经历了相似的高度混合等。另外,许多风成沙母源的研究缺乏对潜在源区样品的采集和直接对比分析,一些结论依然是“跳跃性”和假设性的。风成沙物源的研究应该在可能的源区到沙丘地之间做系统的碎屑沉积物的物质循环、物质改造—变异与源—汇分析等,如大范围、不间断的典型碎屑样品采集和多样化样品组成分析,潜在母源涉及戈壁碎屑、岩石风化碎屑、河流沉积、湖泊沉积、冲洪积扇沉积物

等,同时考虑沿途的局地地形地貌梯度、地质营力(如搬运介质)特征、岩性变化以及气候参数(如风向、风速)的动态变化及其对碎屑沉积物物质组成的改造等复杂影响。这部分工作,显然需要未来更多的研究。

4.2 风成沙的搬运介质

除了上述潜在源区的通盘考虑,阿拉善高原风成沙搬运介质的复杂性及其动力学特征也是一个需要重点考虑的问题。基于环境参数和气候地貌营力的分析,阿拉善高原的地貌营力主要是流水、风和风化作用(如干燥剥蚀作用和盐风化)等(Yang Xiaoping, 2000b, 2001a; Zhu Bingqi et al., 2015);其中,流水和风不仅是沙漠沙物质的主要搬运介质,它们彼此间的复合作用已成为非冰川环境下地貌演化研究的热点问题(Langford, 1989; Langford et al., 1989; Bullard et al., 2002; Bullard et al., 2003; Zhu Bingqi et al., 2014a; Zhu Bingqi et al., 2014b; Al-Masrahy et al., 2015; Zhang Feng et al., 2016),后者更是对风成沙的出现乃至沙丘的建立和发育都格外重要(Kocurek G et al., 1999; Yang Bai et al., 2011)。从风沙物理学分析,风向决定沙丘形成的类型和走向。如阿拉善高原常年处在西北风及其相应输沙势的控制下(图5),沙漠沙主要从西北运输到东南,沙丘向东南方向移动(Yang Xiaoping, 2001b, 2006a; Dong Zhibao et al., 2004);反过来,根据沙丘迎风坡和背风坡的分布特点以及沙丘脊线走向可以判断区域主导风向和大气环流方向,并进一步反映环流乃至气候变化对沙丘形成的作用。Yang Xiaoping(2001b)通过对古日乃盆地的观察,推测沙丘的原始方向为北—东向,表明北风在沙丘形成时期比目前更强,高大沙山地区几个古老的沙丘形成于东北风的风况下,可以推断过去盛行风的方向,偏北风导致气候更干旱。Yang Yanyan et al. (2014)根据巴丹吉林—腾格里交界处(雅玛利克沙漠)的风场数据判断了高原主体输沙风属性及其对沙物质的贡献,发现高原输沙风有三个盛行方向(西北、西北西和北北西),占输沙风总频率的62%;盛行风的频率在春季均最大;输沙量在西北西、北西和北北西三个方向的百分比分别为36%、35%和6%,占研究区总输沙的77%;发生在春季和冬季的输沙风其运输的沙量占年均值的99.8%。这些研究表明:阿拉善高原沙丘地貌的建造期主要发生在冬春季气候相对干旱的环境下而非夏季,冬季风系统在高原风沙地貌形成

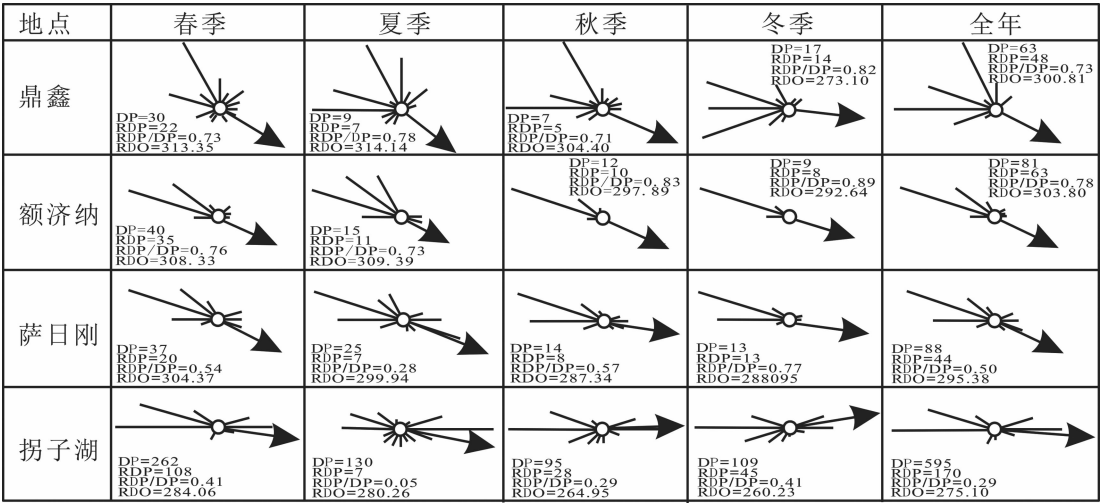


图 5 巴丹吉林沙漠的输沙势(稍作修改于 Dong Zhibao et al. , 2004)

Fig. 5 The sand drift potential in the Badain Jaran Desert (Slightly modified from Dong Zhibao et al. , 2004)

DP—输沙势;RDP—合成输沙势;RDP/DP—方向变率指数;RDD—合成输沙方向

DP—sand drift potential; RDP—resultant drift potentials; RDP/DP—directional factor; RDD—resultant drift direction

中占主导地位。另外,关于风强/风能在高原沙漠形成中的作用,有研究发现,一般局地尺度内高大沙丘和区域尺度内沙漠的出现,相对于稳定环境下的沙地而言,其风能是较低的(Dong Zhibao et al. , 2004; Yang Xiaoping et al. , 2011a; Yang Xiaoping, 2016)。这表明沙丘乃至沙漠的形成尽管与风的强度有关,但低风能环境更利于沙的积累和高沙丘的建造,而高风能环境更利于沙的搬运和侵蚀,但不利于风沙的堆积和沙丘的形成;然而,过低的风能环境也不利于沙丘的建立。

4.3 高大沙山的形成

高大沙山已成为阿拉善高原区别于世界其他沙漠的地貌学标志,主要分布在高原中部的巴丹吉林沙漠。关于这些高大沙丘成因的研究由来已久,争议也最为激烈。从风成沙堆积地的地形地貌特征来看,我国沙漠分布的地形包括三级阶地(Jäkel, 2002),主要分布在盆地低洼中和高原台面上;山地不会出现此景观,因为太陡峭,物质不易堆积(Yang Xiaoping, 2006b),并且古代沙丘主要由钙质胶结固定(Kuang Xueyuan et al. , 2008; Zhang Zhoushi et al. , 2007a),后者的形成需要特定的环境条件,如适度的降雨量等(Yang Xiaoping, 2000)。下伏地貌对高大沙丘的影响还存在争议,主要表现为:早期的研究认为高大沙丘的模式受下伏地貌的控制,然而,后期的研究认为下伏地貌并不决定高大沙丘的总体格局(Yang Xiaoping et al. , 2011a; Yang Bai et al. , 2011; Dong Zhibao et al. , 2004),但是

古沙丘是维持高大沙丘的一个主要因素,现代沙丘是由覆盖在这些古代的固定沙丘之上的流动沙经过累积形成的(Yang Xiaoping et al. , 2011a)。

除上述的风营力作用和下伏地貌的影响外,Chen Jiansheng et al. (2004)的研究认为高大沙丘是由来自青藏高原东北部山区的地下水维持的;Yan Mancun et al. (2001)认为,沙山的形成取决于沙的供给、风况、下伏地貌和灌木植被多种因素;Yang Xiaoping et al. (2011a)基于地质年代学和地球物理方法的综合研究,认为沙山的基岩地貌、沙漠边缘河流作用产生的大量沉积物供给、复杂的风况、古老沙丘的胶结作用和干湿交替的气候变化,都对这个地球上最高沙丘的形成产生了重要作用。

综合已有的研究,可以认为阿拉善高原高大沙山与世界其他地方典型气候和环境影响下的沙丘地貌的形成要素一致,首先丰富的沙源供应量作为第一要素决定了高大沙丘形成的潜在物质基础;其次,古沙丘是高大沙丘建立的关键,而古沙丘的多期建造过程不仅与沙源有关,而且与过去的气候变化(如降水或有效湿度变化)相关,这包括高大沙丘的维持需要相对湿润的气候环境、钙质胶结的形成或植被对外界干扰的阻挡,也包括丰富的地下水和丘间湖的作用;另外,高大沙丘的高度受风强(侵蚀力)的影响。正如上述所言,高大沙山形成时的风能环境相对较低,但是这个“低”的标准并不知晓。最后,下伏地貌也是影响沙山高度的另一重要因素。下伏沙山的基岩地形和地质相对更利于早期沙丘的建立、维

持和最大高度的形成,犹如这里的沙丘是“站在巨人的肩膀上”形成的。除此之外,区域性大气环流边界层的稳定性及其紊流高度(风的侵蚀面高度),可能也是影响巴丹吉林高大沙山的潜在因素,因为后者是影响火星上最大沙山高度的重要因素(Schatz et al., 2006; Bourke et al., 2006; Parteli et al., 2007)。

4.4 沙漠演化与环境变化

在全球尺度内,沙丘的建立与传统的冰期干旱相联系,即气候寒冷干旱时期风沙活动强,利于沙丘的建立和发展;相反,气候温暖时期风沙活动弱,利于沙丘的稳定与胶结面的形成。从上述阿拉善高原风成沙搬运介质与沙丘的走向和分布特征可知,冬季风盛行时期更利于高原沙漠的形成和扩大,而此时一般气候寒冷干旱。古气候记录也显示,末次冰期和全新世早期乌兰布和沙漠北部、吉兰泰地区风沙环境盛行(Li Guoqiang et al., 2014; Chen Xiaolong, 2014),6.5 ka BP 之后沙漠中的古湖泊缩小并且发生分离,即现代沙漠大约在 6.5 ka BP 时期出现(Zhao Hui et al., 2012);相对湿润的冲积/河流环境向干旱的沙漠环境转变反映了巴丹吉林沙漠至少形成于约 1.1 Ma 之前(Wang Fei et al., 2015)。虽然阿拉善高原区沙漠的最初形成时间尚有争论,并且其演化过程中伴随着湿润环境(湖泊、钙质胶结等的出现)和沙漠景观的交替和变换,但是从气候变化的全球尺度角度分析,沙漠的形成普遍与冰期或者气候寒冷时期相对应。如 An Zhisheng et al. (2012)的研究指出,末次冰期西风带的影响占主导地位,表现为显著的富沙期,并且与 Heinrich 事件相关,反映了与北半球高纬度气候相关的西风带的加强;Zheng Mianping et al. (2007)的研究也指出扎布耶盐湖的湖芯沉积记录与北极、青藏高原冰芯的冷事件具有很好的一致性。相对于末次冰期寒冷的气候,全新世气候普遍温暖,由上述论述也可知研究区普遍湖泊扩大,水位升高,沙漠正向发育弱。

5 结论

综述目前已有的国内外文献资料和研究结果,本文对阿拉善高原末次冰期 40 ka 以来的环境变化和地貌演化有如下小结和展望:

(1)末次冰期以来阿拉善高原地区气候演变在轨道、亚轨道和千年尺度上与全球气候变化有较好的对应,但是相对缺乏典型气候事件的记录和证据,

还有待进一步研究。

(2)末次冰期约 40 ka 到末次盛冰期结束环境比目前湿润,不利于高原主体景观(沙漠)的进一步发育;之后至更新世结束环境普遍干旱,风沙活动增强,但是此时期乌兰布和沙漠区的环境依旧较湿润,原因有待进一步研究。

(3)全新世温度升高,早期和中期环境普遍湿润,湖泊进一步发育,风沙活动弱;晚期环境干旱,风沙活动强。其中,腾格里沙漠全新世早期的环境演变与高原总体变化趋势相反,其原因还需要进一步分析;另外是全新世中期的干旱事件,在空间尺度上是局域性或是区域性分布存在争议还有待解决。

(4)在环境演变的原因上,影响研究区环境变化的解释普遍认为与西风带、东亚季风两大环流系统有关,不同时期两者的作用效果不同,虽然关于东亚季风演变在地质学方面取得了很大的成果,但是两者具体的作用机制和影响程度需要更多气候学与气象学证据的证实和完善。除此,青藏高原和黄河的影响也不可忽视,人类活动的影响也应在不同时间尺度上予以考虑。然而千年时间尺度内这种影响相对较小,但在局地或区域尺度近期以来的影响则不可忽略。

(5)在地貌成因上,阿拉善高原因高大沙山的存在而显得与众不同,但是沙漠沙物质来源问题并没有统一的定论,特别是以高大沙丘和永久性湖泊这种传统气候地貌学理论难以解释的地貌共存现象,其形成机制与演化过程的解释需要更多的地学证据(如地球物理学和地质年代学)来进一步研究;沙丘的走向、分布特征指示的风的方向和能量,风场数据反映的输沙风的属性和对沙物质的贡献,进一步证实了沙漠的形成普遍与气候寒冷干旱时期相对应,但是作为沙漠地貌景观之一的沙丘的建立却需要适当的风能,而这个“适当”的范围有待进一步研究。从研究区的选择上,相对于腾格里沙漠和乌兰布和沙漠,巴丹吉林沙漠的研究相对更全面。

(6)未来的工作,由于阿拉善高原的环境演变以冷干和冷湿(或温湿)的气候特征为主,这样更利于我们对比分析变暖背景下区域尺度气候变化的趋势,进一步明确阿拉善高原环境变化与全球气候变化的关系。这一问题的解答可能有一个关键,就是需要综合西风、东亚季风环流、大西洋—太平洋海洋环流异常效应以及青藏高原—极地环境效应和黄河水文效应等的地球系统科学知识,综合更多气候学、水文学和海洋学者与地质地貌、地理物理学和古气

候学者的合作研究。另外,由于风成碎屑物质从源到汇研究的复杂性,阿拉善高原沙漠物源的研究需要结合更多环境要素,尽可能地在碎屑物质的潜在源区(如高原山地)、过渡带(如山麓夷平面、冲洪积扇、戈壁、河流三角洲、尾间湖)和沉积区(如沙丘地)之间尽可能的大范围综合采样和实验分析,通过构造地质地貌和地理物理、沉积地层和年代学、矿物和同位素地球化学、流体力学和水文学、遥感和地理信息系统技术等综合手段,来识别碎屑物质的起源、搬运、变异/改造与沉积过程。局域、区域和全球典型环境演变的对比研究和对已有研究结果的拼合整合、总结也是至关重要的。

致谢:此项工作得到了国家重点研发计划项目(No. 2016YFA0601900)和国家自然科学基金(No. 41771014)的资助。

References

Al-Masrahy M A, Mountney N P. 2015. A classification scheme for fluvial-aeolian system interaction in desert-margin settings. *Aeolian Research*, 17: 67~88.

An Chengbang, Chen Fahu, Barton L. 2008. Holocene environmental changes in Mongolia; A review. *Global and Planetary Change*, 63: 283~289.

An Zhisheng, Colman S M, Zhou Weijian, Li Xiaoqiang, Brown E T, Timothy Jull A J, Cai Yanjun, Huang Yongsong, Lu Xuefeng, Chang Hong, Song Yougui, Sun Youbin, Xu Hai, Liu Weiguo, Jin Zhangdong, Liu Xiaodong, Cheng Peng, Liu Yu, Ai Li, Li Xiangzhong, Liu Xiuju, Yan Libin, Shi Zhengguo, Wang Xulong, Wu Feng, Qiang Xiaoke, Dong Jibao, Lu Fengyan, Xu X W. 2012. Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32ka. *Scientific Reports*, 2: 619, doi: 10.1038/srep00619.

Berger A. 1978. Long-term variations of caloric insolation resulting from the earth's orbital elements. *Quaternary Research*, 9 (2): 139~167.

Bourke M C, Balme M, Beyer R A, Williams K K, Zimbelman J. 2006. A comparison of methods used to estimate the height of sand dunes on Mars. *Geomorphology*, 81(3): 440~452.

Bullard J E, Livingstone I. 2002. Aeolian-fluvial interactions in dryland environments: examples, concepts and Australia case study. *Area*, 34(1): 8~16.

Bullard J E, McTainsh G H. 2003. Aeolian-fluvial interactions in dryland environments: examples, concepts and Australia case study. *Progress in Physical Geography*, 27(4): 471~501.

Chang Hong, An Zhisheng, Wu Feng, Song Yougui, Qiang Xiaoke, Li Leyi. 2017. Late Miocene-early Pleistocene climate change in the mid-latitude westerlies and their influence on Asian monsoon as constrained by the K/Al ratio record from drill core

Ls2 in the Tarim Basin. *Catena*, 153: 75~82.

Chen Fahu, Cheng Bo, Zhao Yan, Zhu Yan, Madsen D. 2006. Holocene Environmental Change Inferred from High Resolution Pollen Records of Inland Lake Deposits, Arid China. *The Holocene*, 16: 675~684.

Chen Fahu, Fan Yuxin, Chun Xi, Madsen D B, Oviatt C G, Zhao Hui, Yang Liping, Sun Yang. 2008. Preliminary research on Megalake Jilantai-Fletao in the arid areas of China during the Late Quaternary. *Chinese Science Bulletin*, 53 (11): 1729~1735.

Chen Fahu, Song Shengrong, Lee T Q, Löwemark L, Chi Zhengqing, Wang Yong, Hong E. 2010. A multiproxy lake record from Inner Mongolia displays a late Holocene teleconnection between Central Asian and North Atlantic climates. *Quaternary International*, 227: 170~182.

Chen Fahu, Wu Wei, Holmes J A, Madsen D B, Zhu Yan, Jin Min, Oviatt C G. 2003. A mid-Holocene drought interval as evidenced by lake desiccation in the Alashan Plateau, Inner Mongolia, China. *Chinese Science Bulletin*, 48 (14): 1401~1410.

Chen Jiansheng, Li Ling, Wang Jiyang, Barry D A, Sheng Xuefen, Gu Weizu, Zhao Xia, Chen Liang. 2004. Groundwater maintains dune landscape. *Nature*, 432: 459~460.

Chen Jiansheng, Chen Qianqian, Wang Ting. 2014. Isotopes tracer research of wet sand layerwater sources in Alxa Desert. *Advances in Water Science*, 25(2): 196~206 (in Chinese with English abstract).

Chen Quan, Liu Zhifei, Kissel C. 2017. Clay mineralogical and geochemical proxies of the East Asian summer monsoon evolution in the South China Sea during Late Quaternary. *Scientific Reports*, 7, 42083, doi: 10.1038/srep42083.

Chen Xiaolong. 2014. Analysis of the formation of the present sand desert landscape in the Alxa Plateau, northern China, based on OSL dating. Gansu; the Master thesis of the Lanzhou University (in Chinese with English abstract).

Chen Xuemei, Li Guoqiang, Huang Xiaozhong, Zhao Hui. 2013. The vegetation changes in Ulan Buh desert since the last glacial: pollen evidence from core WL10ZK-1. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 33 (4): 169~174 (in Chinese with English abstract).

Cheng Jun, Yu Fei, Pu Shuzhen, Guo Pinwen. 2004. Features of interdecadal variation of North Pacific Heat Storage and their relationship to the Aleutian Low. *Advances in Marine Science*, 22(4): 417~428 (in Chinese with English abstract).

Chun Xi, Chen Fahu, Fan Yuxin, Xia Dunsheng, Zhao Hui. 2007. Formation of Ulan Buh Desert and its environmental evolution. *Journal of Desert Research*, 27(6): 927~931 (in Chinese with English abstract).

Dong Xiao, Xue Feng, Zeng Qingcun. 2014. Observational analysis and numerical simulation of the Decadal Variation in the relationship between the Aleutian Low and the Iceland Low during Boreal Winter. *Climatic and Environmental Research*,

- 19(5): 523~535 (in Chinese with English abstract).
- Dong Zhibao, Wang Tao, Wang Xunming. 2004. Geomorphology of the megadunes in the Badain Jaran Desert. *Geomorphology*, 60: 191~203.
- Fan Yuxin, Chen Fahu, Fan Tianlai, Zhao Hui, Yang Liping. 2010. Sedimentary documents and Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating for formation of the present landform of the northern Ulan Buh Desert, northern China. *Science China Earth Sciences*, 53(11): 1675~1682.
- Guo Zhengtang. 2017. Loess Plateau attests to the onsets of monsoon and deserts. *Scientia Sinica Terrae*, 47:421~437 (in Chinese with English abstract).
- Guo Zhengtang, Sun Bai, Zhang Zhongshi, Peng Shuzhen, Xiao Guoqiao, Ge Junyi, Hao Q Z, Qiao Yansong, Liang M Y, Liu J F, Yin Qiuzhen, Wei Jianjing. 2008. A major reorganization of Asian climate regime by the early Miocene. *Climate of the Past Discussion*, 4: 535~584.
- Hartmann K, Wünnemann B. 2009. Hydrological changes and Holocene climate variations in NW China, inferred from lake sediments of Juyanze palaeolake by factor analyses. *Quaternary International*, 194: 28~44.
- Herzschuh U, Tarasov P, Wünnemann B, Hartmann K. 2004. Holocene vegetation and climate of the Alashan Plateau, NW China, reconstructed from pollen data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 211: 1~17.
- Hu Fangen, Yang Xiaoping. 2016. Geochemical and geomorphological evidence for the provenance of aeolian deposits in the Badain Jaran Desert, northwestern China. *Quaternary Science Reviews*, 131: 179~192.
- Huang Xiaomei, Guan Zhaoyong, Dai Zhujun, Mei Haixia. 2013. A further look at the interannual variations of East Asian through intensity and their impacts on winter climate of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(3): 416~428 (in Chinese with English abstract).
- Hurrell J W. 1995. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation; Regional Temperatures and Precipitation. *Science*, 269: 676~679.
- Jäkel D. 2002. Storeys of aeolian relief in North Africa and China. In Yang X. (Ed.) *Desert and alpine environments-Advances in Geomorphology and Palaeoclimatology*, dedicated to Jürgen Hövermann. China Ocean Press, Beijing, pp. 6~21.
- Jhun J G, Lee E J. 2004. A New East Asian Winter Monsoon Index and Associated Characteristics of the Winter Monsoon. *Journal of Climate*, 17: 711~726.
- Jin Liya, Chen Fahu, Ganopolski A, Claussen M. 2007. Response of East Asian climate to Dansgaard/Oeschger and Heinrich events in a coupled model of intermediate complexity. *Journal Of Geophysical Research*, 112, D06117, doi: 10.1029/2006JD007316.
- Kocurek G, Lancaster N. 1999. Aeolian system sediment state: theory and Mojave Desert Kelso dune field example. *Sedimentology*, 46: 505~515.
- Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun, Liu Jian. 2008. Relationship between Subtropical Upper-Tropospheric Westerly Jet and East Asian Winter Monsoon. *Plateau Meteorology*, 27(4): 701~712 (in Chinese with English abstract).
- Langford R P, Chan M A. 1989. Fluvial-aeolian interactions: part II, ancient systems. *Sedimentology*, 36: 1037~1051.
- Langford R P. 1989. Modern and ancient fluvial-aeolian systems: part I, modern systems. *Sedimentology*, 36: 1023~1035.
- Lehmkuhl F, Lang A. 2001. Geomorphological investigations and luminescence dating in the southern part of the Khangay and the valley of the Gobi lakes (Central Mongolia). *Journal of Quaternary Science*, 16(1): 69~87.
- Li Baosheng, Wu Zheng, Zhang D D, Fan Ankang, Yan Mancun, Sun Wu, Jin Heling, Dong Guangrong, Zhu Yizhi, Gao Quanzhou, Zhang Jiashen. 2013. Environment and its changes in the monsoon sandy region of China during the Late Pleistocene and Holocene. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 127~137 (in Chinese with English abstract).
- Li Guoqiang, Jin Ming, Chen Xuemei, Wen Lijuan, Zhang Jiawu, Madsen D, Zhao Hui, Wang Xin, Fan Tianlai, Duan Yanwu, Liu Xiaokang, Wu Duo, Li Fangliang, Chen Fahu. 2015. Environmental changes in the Ulan Buh Desert, southern Inner Mongolia, China since the middle Pleistocene based on sedimentology, chronology and proxy indexes. *Quaternary Science Reviews*, 128: 69~80.
- Li Guoqiang, Jin Ming, Wen Lijuan, Zhao Hui, Madsen D, Liu Xiaokang, Wu Duo, Chen Fahu. 2014. Quartz and K-feldspar optical dating chronology of eolian sand and lacustrine sequence from the southern Ulan Buh Desert, NW China: Implications for reconstructing late Pleistocene environmental evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 393: 111~121.
- Li Jijun. 1990. The patterns of environmental changes since late Pleistocene in northwestern China. *Quaternary Sciences*, (3): 197~204 (in Chinese with English abstract).
- Li Sen, Qiang Mingrui, Li Baosheng, Gao Shangyu. 2004. Rapid climate changes at northwestern margin of East Asian Monsoon region during the last deglaciation. *Geological Review*, 50(1): 106~112 (in Chinese with English abstract).
- Li Wangli, Wang Keli, Fu Shenming, Jiang Hao. 2008. The interrelationship between regional Westerly Index and the water vapor budget in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 30(1): 28~34 (in Chinese with English abstract).
- Li Yu, Liu Yuan. 2016. The response of lake records to the circulation system and climate zones in China since the Last Glacial Maximum. *Acta Geographica Sinica*, 71(11): 197~204 (in Chinese with English abstract).
- Li Y, Wang N, Li Z, Zhang H. 2011. Holocene palynological records and their responses to the controversies of climate system in the Shiyang River drainage basin. *Chinese Science Bulletin*, 56(6): 535~546.

- Li Zhuolun, 2012. PALAEOLAKE chronology and climate background on Badain Jaran Desert and its marginal area during the Late Quaternary. Gansu: the Ph. D thesis Lanzhou University (in Chinese with English abstract).
- Li Zhuolun, Wang Naiang, Cheng Hongyi, Ning Kai, Zhao Liqiang, Li Ruolan. 2015. Formation and environmental significance of late Quaternary calcareous root tubes in the deserts of the Alashan Plateau, northwest China. *Quaternary International*, 372: 167~174.
- Liu Siwen, Chu Guoqiang, Lai Zhongping. 2016. Determination of age and sedimentation rates using radionuclide (^{210}Pb and ^{137}Cs) dating in inter-dune lakes of the Badain Jaran Desert, China. *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 2013~2022.
- Long Hao, Lai Zhongping, Fuchs M, Zhang Jingran, Li Yu. 2012. Timing of Late Quaternary palaeolake evolution in Tengger Desert of northern China and its possible forcing mechanisms. *Global and Planetary Change*, 92~93: 119~129.
- Lü Junmei, Ju Jianhua, Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2005. The Characteristics of ENSO cycle in different phases of Pacific Decadal Oscillation. *Climatic and Environmental Research*, 10(2): 238~249 (in Chinese with English abstract).
- Pachur H J, Wünnemann B. 1995. Lake Evolution in the Tengger Desert, Northwestern China, during the Last 40000 Years. *Quaternary Research*, 44: 171~180.
- Parteli E J, Herrman H J. 2007. Dune formation on the present Mars. *Physical Review E Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics Part 1 of 2 Soft Matter and Biological Physics*, 76(1): 041307.
- Qin Xiaoguang, Yin Zhiqiang, Wang Meihua, Zhao Wuji, Mu Yan, Zhang Lei. 2017. Loess records of the Holocene climate change of Gonghe and Guide basins in the northeastern Boundary of the Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 91(1): 266~286 (in Chinese with English abstract).
- Rudaya N A, Tarasov P E, Dorofeyuk N I, Kalugin I A, Andreev A A, Diekmann B, Daryin A V. 2008. Environmental changes in the Mongolian Altai during the Holocene. *Archaeology Ethnology & Anthropology of Eurasia*, 36(4): 2~14.
- Schatz V, Tsoar H, Edgett K S, Parteli E J R, Herrmann H J. 2006. Evidence for indurated sand dunes in the Martian North polar region. *Journal of Geophysical Research*, 111(E4): 290~290.
- Seager R, Graham N, Herweijer C, Gordon A L, Kushnir Y, Cook E. 2007. Blueprints for Medieval hydroclimate. *Quaternary Science Reviews*, 26: 2322~2336.
- Shi Qi, Chen Fahu, Zhu Yan, Madsen D. 2002. Lake evolution of the terminal area of Shiyang River drainage in arid China since the last glaciation. *Quaternary International*, 93~94: 31~43.
- Su Zhihao, Zhang Mingli. 2013. Evolutionary response to Quaternary climate aridification and oscillations in north-western China revealed by chloroplast phylogeography of the desert shrub *Nitraria sphaerocarpa* (Nitrariaceae). *Biological Journal of the Linnean Society*, 109: 757~770.
- Sun Bomin, Li Chongyin. 1997. Relationship between East Asian trough disturbance and tropical convective activity in winter. *Chinese Science Bulletin*, 42(5): 500~503 (in Chinese without English abstract).
- Sun Youbin, Clemens S C, Morrill C, Lin Xiaopei, Wang Xulong, An Zhisheng. 2012. Influence of Atlantic meridional overturning circulation on the East Asian winter monsoon. *Nature Geoscience*, 5: 46~49.
- Visbeck M. 2002. The Ocean's Role in Atlantic Climate Variability. *Science*, 297: 2223~2224.
- Wang Fei, Sun Donghua, Chen Fahu, Bloemendal J, Guo Feng, Li Zaijun, Zhang Yuebao, Li Baofeng, Wang Xin. 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. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 426: 139~158.
- Wang Keli, Jiang Han, Zhao Hongyan. 2005. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the Northwest China. *Advances in Water Science*, 16(3): 432~438 (in Chinese with English abstract).
- Wang Naiang, Li Zhuolun, Cheng Hongyi, Li Yu, Huang Yinzhou. 2011. High lake levels on Alxa Plateau during the late Quaternary. *Chinese Science Bulletin*, 56(17): 1799~1808.
- Wang Pinxian. 2009. Global monsoon in a geological perspective. *Chinese Science Bulletin*, 54(7): 1113~1136.
- Wang Sumin, Xuebin. 1998. The regional differences of environmental changes and their relationship with the Asian monsoon since the middle Pleistocene revealed by lacustrine records in China. *Acta Geologica Sinica*, 72(3): 288.
- Wang Wei, Feng Zhaodong. 2013. Holocene moisture evolution across the Mongolian Plateau and its surrounding areas: A synthesis of climatic records. *Earth-Science Reviews*, 122: 38~57.
- Wang Wei, Ma Yuzhen, Feng Zhaodong, Narantsetseg T, Liu K B, Zhai Xin Wei. 2011. A prolonged dry mid-Holocene climate revealed by pollen and diatom records from Lake Ugii Nuur in central Mongolia. *Quaternary International*, 229: 74~83.
- Wang Xunming, Xia Dunsheng, Wang Tao, Xue Xian, Li Jinchang. 2008. Dust sources in arid and semiarid China and southern Mongolia: impacts of geomorphologic setting and surface materials. *Geomorphology*, 97: 583~600.
- Wang Yongjun, Cheng Hai, Edwards R L, Kong Xinggong, Shao Xiaohua, Chen Shitao, Wu Jiangyin, Jiang Xiuyang, Wang Xianfeng, An Zhisheng. 2008. Millennial-and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years. *Nature*, 451: 1090~1093.
- Wünnemann B, Hartmann K. 2002. Morphodynamics and paleohydrography of the Gaxun Nur Basin, Inner Mongolia, China. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 126: 147~168.
- Yan Mangcun, Wang Guangqian, Li Baosheng, Dong Guangrong. 2001. Formation and Growth of high megadunes in Badain Jaran Desert. *Acta Geographica Sinica*, 56(1): 83~91 (in

- Chinese with English abstract).
- Yang Bai, Wang Naiang, Liao Kongtai, Klenk P. 2011. Geomorphological Evolution Revealed by Aeolian Sedimentary Structure in Badain Jaran Desert on Alxa Plateau, Northwest China. *China Geographical Science*, 21(3): 267~278.
- Yang Chunxia, Dou Taotan, Li Qian, Hao Weiwei, Tang Minxuan. 2014. Study on the relationships between the Arctic Oscillation and the Pacific Decadal Oscillation and Atlantic Multidecadal Oscillation. *Journal of Tropical Meteorology*, 30(6): 1181~1187.
- Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2007a. Relationships between perturbation kinetic energy anomaly along East Asian Westerly Jet and Subtropical High in summer. *Journal of Applied Meteorological Science*, 18(4): 452~459 (in Chinese with English abstract).
- Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2007b. Anomalous perturbation kinetic energy of Rossby Wave along East Asian Westerly Jet and its association with summer rainfall in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 31(4): 586~595 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoping. 2000. Discovery of calcareous cementation layer and its paleoclimate significance in Badain Jaran Desert. *Quaternary Sciences*, 20(3): 295 (in Chinese without English abstract).
- Yang Xiaoping, Forman S, Hu Fangen, Zhang Deguo, Liu Ziting, Li Hongwei. 2016. Initial insights into the age and origin of the Kubuqi sand sea of northern China. *Geomorphology*, 259: 30~39.
- Yang Xiaoping, Li Hongwei, Conacher A. 2012. Large-scale controls on the development of sand seas in northern China. *Quaternary International*, 250: 74~83.
- Yang Xiaoping, Liu T S, Xiao Honglang. 2003. Evolution of megadunes and lakes in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China during the last 31,000 years. *Quaternary International*, 104: 99~112.
- Yang Xiaoping, Ma Nina, Dong Jufeng, Zhu Bingqi, Xu Bing, Ma Zhibang, Liu Jiaqi. 2010. Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, western China. *Quaternary Research*, 73: 10~19.
- Yang Xiaoping, Preusser F, Radtke U. 2006. Late Quaternary environmental changes in the Taklamakan Desert, western China, inferred from OSL-dated lacustrine and aeolian deposits. *Quaternary Science Reviews*, 25: 923~932.
- Yang Xiaoping P, Rost K T, Lehmkuhl F, Zhu Zhengda, Dodson J. 2004. The evolution of dry lands in northern China and in the Republic of Mongolia since the Last Glacial Maximum. *Quaternary International*, 118~119: 69~85.
- Yang Xiaoping, Scuderi L, Liu Tao, Paillou P, Li Hongwei, Dong Jufeng, Zhu Bingqi, Jiang Weiwei, Jochems A, Weissmann G. 2011a. Formation of the highest sand dunes on Earth. *Geomorphology*, 135: 108~116.
- Yang Xiaoping, Scuderi L, Paillou P, Liu Ziting, Li Hongwei, Ren Xiaozong. 2011b. Quaternary environmental changes in the dry lands of China-A critical review. *Quaternary Science Reviews*, 30: 3219~3233.
- Yang Xiaoping, Scuderi L A. 2010. Hydrological and climatic changes in deserts of China since the late Pleistocene. *Quaternary Research*, 73: 1~9.
- Yang Xiaoping, Williams M A J. 2003. The ion chemistry of lakes and late Holocene desiccation in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China. *Catena*, 51: 45~60.
- Yang Xiaoping. 2000a. Landscape evolution and precipitation changes in the Badain Jaran Desert during the last 30000 years. *Chinese Science Bulletin*, 45(11): 1042~1047.
- Yang Xiaoping. 2000b. Late Quaternary variation of the aridity index in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China-a deduction from landscape evolutions. *Scientia Geologica Sinica*, 9(2): 205~214.
- Yang Xiaoping. 2001a. Landscape evolution and palaeoclimate in the deserts of northwestern China. *Chinese Science Bulletin*, 46 (Supp): 6~11.
- Yang Xiaoping. 2001b. Late Quaternary evolution and paleoclimates, western Alashan Plateau, Inner Mongolia, China. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1: 1~16.
- Yang Xiaoping. 2002. Changes of the aridity index in the arid regions of northwestern China since the Late Pleistocene-An understanding based on climate geomorphology. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 126: 169~181.
- Yang Xiaoping. 2004. Late Quaternary wetter epochs in the southeastern Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 133: 129~141.
- Yang Xiaoping. 2006a. Chemistry and late Quaternary evolution of ground and surface waters in the area of Yabulai Mountains, western Inner Mongolia, China. *Catena*, 66: 135~144.
- Yang Xiaoping. 2006b. Desert research in northwestern China-a brief review. *Geomorphologie-relief, processus, environment*, (4): 275~283.
- Yang Yanyan, Qu Zhiqiang, Shi Peijun, Liu Lianyou, Zhang Guoming, Tang Yan, Hu Xia, Lv Yanli, Xiong Yiying, Wang Jingpu, Shen Lingling, Lv Lili, Sun Shao. 2014. Wind regime and sand transport in the corridor between the Badain Jaran and Tengger deserts, central Alxa Plateau, China. *Aeolian Research*, 12: 143~156.
- Yin Yi, Liu Hongyan, Liu Guo, Hao Qian, Wang Hongya. 2013. Vegetation responses to mid-Holocene extreme drought events and subsequent long-term drought on the southeastern Inner Mongolian Plateau, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 178~179: 3~9.
- Yu Ge, Xue Bin, Wang Sumin, Liu Jian. 2000. Lake records and LGM climate in China. *Chinese Science Bulletin*, 45(13): 1158~1164.
- Zhang Feng, Fu Xudong. Relationships between oxygen isotope compositions of quartz and grain size from dune sands and fluvial-lacustrine sediments in the Taklimakan Desert. *Geological Review*, 62(1): 73~82.

Zhang Hucai, Peng Jinlan, Ma Yuzhen, Chen Guangjie, Feng Zhaodong, Li Baofeng, Fan H F, Chang F Q, Lei G L, Wünnemann B. 2004. Late Quaternary palaeolake levels in Tengger Desert, NW China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 211: 45~58.

Zhang Huicai, Wünnemann B, Ma Yuzhen, Peng J L, Pachur H J, Li J J, Qi Y, Chen Guangjie, Fang H B, Feng Zhaodong. 2002. Lake Level and Climate Changes between 42,000 and 18,000 ¹⁴C yr B. P. in the Tengger Desert, Northwestern China. *Quaternary Research*, 58: 62~72.

Zhang Zhongshi, Wang Huijun, Guo Zhengtang, Jiang Dabang. 2007b. What triggers the transition of palaeoenvironmental patterns in China, the Tibetan Plateau uplift or the Paratethys Sea retreat? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 245: 317~331.

Zhang Zhongshi, Wang Huijun, Guo Zhengtang, Jiang Dabang. 2007a. Impacts of tectonic changes on the reorganization of the Cenozoic paleoclimatic patterns in China. *Earth and Planetary Science Letters*, 257: 622~634.

Zhao Hui, Li Guoqiang, Sheng Yongwei, Jin Ming, Chen Faha. 2012. Early-middle Holocene lake desert evolution in northern Ulan Buh Desert, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 331~332: 31~38.

Zhao Yan, Yu Zicheng. 2012. Vegetation response to Holocene climate change in East Asian monsoon margin region. *Earth Science Reviews*, 113: 1~10.

Zhao Yan, Yu Zicheng, Chen Fahu, Liu Xiujun, Ito E. 2008a. Sensitive response of desert vegetation to moisture change based on a near annual resolution pollen record from Gahai Lake in the Qaidam Basin, northwest China. *Global and Planetary Change*, 62: 107~114.

Zhao Yan, Yu Zicheng, Chen Fahu, Li J. 2008b. Holocene vegetation and climate change from a lake sediment record in the Tengger Sandy Desert, northwest China. *Journal of Arid Environments*, 72: 2054~2064.

Zheng Mianping, Meng Yifeng, Wei Lejun. 2000. Evidence of the pan-lake stage in the period of 40~28ka B.P. on the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 74: 266~272.

Zheng Mianping, Yuan Heran, Liu Junying, Li Yanhe, Ma Zhibang, Sun Qing. 2007. Sedimentary Characteristics and Palaeoenvironmental Records of Zabuye Salt Lake, Tibetan Plateau, since 128ka BP. *Acta Geologica Sinica*, 81(5): 861~879.

Zheng Rongguo, Li Jinyi, Xiao Wenjiao, Liu Jianfeng, Wu Tairan. 2016. *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 1725~1736.

Zhou Shuzhen. *Meteorology and Climatology (Chinese Edition)*. Beijing: Higher Education Press Pub, 101~170.

Zhu Bingqi, Yu Jingjie, Rioual P, Gao Yan, Zhang Yichi, Min Leilei. 2015. Geomorphoclimatic characteristics and landform information in the Ejina Basin, Northwestern China. *Environmental Earth Sciences*, 73: 7547~7560.

Zhu Bingqi, Yu Jingjie, Rioual P, Ren Xiaozong. 2014a. Particle size variation of aeolian dune deposits in the lower reaches of the Heihe River basin, China. *Sedimentary Geology*, 301: 54~69.

Zhu Bingqi, Yu Jingjie. 2014b. Aeolian sorting processes in the Ejina desert basin (China) and their response to depositional environment. *Aeolian Research*, 12: 111~120.

Zhu Xiaojie, Sun Jilin. 2006. Positive feedback of winter ocean-atmosphere interaction in Northwest Pacific. *Chinese Science Bulletin*, 51(18): 2268~2274.

参 考 文 献

陈建生, 陈茜茜, 王婷. 2014. 阿拉善沙漠湿沙层水分来源同位素示踪. *水科学进展*, 25(2): 196~206.

陈晓龙. 2014. 阿拉善高原现代风沙地貌景观形成的光释光年代与机制——以腾格里和吉兰泰地区为例. 甘肃: 兰州大学硕士学位论文.

陈雪梅, 李国强, 黄小忠, 赵晖. 2013. 乌兰布和沙漠钻孔 WL10ZK-1 孢粉记录的末次冰期以来的植被变化. *海洋地质与第四纪地质*, 33(4): 169~174.

程军, 于非, 蒲书箴, 郭品文. 2004. 北太平洋热含量的年代际变化特征及其与阿留申低压的关系. *海洋科学进展*, 22(4): 417~428.

春喜, 陈发虎, 范育新, 夏敦胜, 赵辉. 2007. 乌兰布和沙漠的形成与环境变化. *中国沙漠*, 27(6): 927~931.

董啸, 薛峰, 曾庆存. 2014. 北半球冬季阿留申低压-冰岛低压相关关系的年代际变化及其模拟. *气候与环境研究*, 19(5): 523~535.

郭正堂. 2017. 黄土高原见证季风和荒漠的由来. *中国科学地球科学*, 47(4): 421~437.

黄小梅, 管兆勇, 戴竹君, 梅海霞. 2013. 冬季东亚大槽强度年际变化及其与中国气候联系的再分析. *气象学报*, 71(3): 416~428.

况雪源, 张耀存, 刘健. 2008. 对流层上层副热带西风急流与东亚冬季风的关系. *高原气象*, 27(4): 701~712.

李保生, 吴正, Zhang D D, 范安康, 闫满存, 孙武, 靳鹤龄, 董光荣, 祝一志, 高全洲, 张甲申. 2001. 中国季风沙区晚更新世以来环境及其变化. *地质学报*, 75(1): 127~137.

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.

李森, 强明瑞, 李保生, 高尚玉. 2004. 末次冰消期东亚季风西北缘气候快速变化事件. *地质论评*, 50(1): 106~112.

李万莉, 王可丽, 傅慎明, 江灏. 2008. 区域西风指数对西北地区水汽输送及收支的指示. *冰川冻土*, 2008, 30(1): 28~34.

李育, 刘媛. 2016. 末次盛冰期以来中国湖泊记录对环流系统及气候类型的响应. *地理学报*, 71(11): 1898~1910.

李育, 王乃昂, 李卓伦, 张华安. 2011. 石羊河流域全新世孢粉记录及其对气候系统响应争论的启示. *科学通报*, 56(2): 161~173.

李卓伦. 2012. 巴丹吉林沙漠及周边地区晚第四纪湖泊年代学与气候背景. 甘肃: 兰州大学博士学位论文.

刘斯文, 储国强, 赖忠平. 2016. 放射性核素 ²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 测定巴丹

吉林沙漠湖泊岩芯的年代及沉积速率. 地质学报, 90(8): 2013~2022.

吕俊梅, 琚建华, 张庆云, 陶诗言. 2005. 太平洋年代际振荡冷、暖背景下 ENSO 循环的特征. 气候与环境研究, 2005, 10(2): 238~249.

秦小光, 尹志强, 汪美华, 赵无忌, 穆燕, 张磊. 2017. 青藏高原东北缘共和——贵德盆地全新世气候变化. 地质学报, 91(1): 266~286.

孙柏民, 李崇银. 1997. 冬季东亚大槽的扰动与热带对流活动的关系. 科学通报, 42(5): 500~503.

王可丽, 江灏, 赵红岩. 2005. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送. 水科学进展, 16(3): 432~438.

王乃昂, 李卓仑, 程弘毅, 李育, 黄银洲. 2011. 阿拉善高原晚第四纪高湖面与大湖期的再探讨. 科学通报, 56(17): 1367~1377.

汪品先. 2009. 全球季风的地质演变. 科学通报, 54(5): 535~556.

王苏民, 薛滨. 1998. 湖泊记录揭示的中更新世以来我国区域环境分异与亚洲季风的关系. 地质学报, 72(3): 288.

闫满存, 王光谦, 李保生, 董光荣. 2001. 巴丹吉林沙漠高大沙山的形成发育研究. 地理学报, 56(1): 83~91.

杨春霞, 窦焘焘, 李倩, 郝微微, 汤旻轩. 2014. 北极涛动与北太平洋和北大西洋年代际振荡的关系研究. 热带气象学报, 30(6): 1181~1187.

杨莲梅, 张庆云. 2007a. 夏季东亚西风急流扰动异常与副热带高压关系研究. 应用气象学报, 18(4): 452~459.

杨莲梅, 张庆云. 2007b. 夏季东亚西风急流 Rossby 波扰动异常与中国降水. 大气科学, 31(4): 586~595.

杨小平. 2000. 巴丹吉林沙漠地区钙质胶结层的发现及其古气候意义. 第四纪研究, 20(3): 295.

于革, 薛滨, 王苏民, 刘健. 2000. 末次盛冰期中国湖泊记录及其气候意义. 科学通报, 45(3): 250~255.

张峰, 付旭东. 2016. 塔克拉玛干沙漠石英氧同位素与粒级关系的研究. 地质论评, 62(1): 73~82.

郑荣国, 李锦轶, 肖文交, 刘建峰, 吴泰然. 2016. 阿拉善地块北缘恩格尔乌苏地区发现志留纪侵入体. 地质学报, 90(8): 1725~1736.

周淑贞. 2012. 气象学与气候学. 北京: 高等教育出版社, 101~170.

朱小洁, 孙即霖. 2006. 冬季西北太平洋阿留申低压—南北向海温差—西风急流正反馈过程分析. 科学通报, 51(9): 1097~1102.

Environmental Changes and Landform Evolution of the Alashan Plateau Region during the Last Glacial Period since 40 ka

YANG Limin^{1, 2)}, ZHU Bingqi¹⁾

1) *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

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

Abstract

Study of environmental change in the Alashan Plateau since the last glacial period (40 ka) is an important basis not only for understanding the climate changes and sediment sources of the mid-latitude deserts in the Northern Hemisphere, but also for comparison of climate changes in different scales or global level, further revealing the evolution and change of climate factors. A large number of research and results have been reported in scientific literatures, but a systematic summary and comparison analysis has been absent, especially about environment changes of the plateau and reasons since the last glacial period. In this paper we reviewed the historical environmental evolution of the Alashan Plateau since the last glacial epoch through a systematic summary and comparative study of Chinese and Western literatures. It can be pointed out that from 40ka to the end of the last glacial period, the climate in the plateau was wetter than that of today, and after the end of the Pleistocene the drought environment was prevailing, with aeolian activity enhancement. However, the environmental change in the Ulanbuhe Desert of the northwestern plateau is different from that of the holistic plateau, i. e. it showed a continue drought conditions during the whole last glacial period. The early and middle Holocene environment was generally humid in the plateau. With the further development of lakes and vegetation and the weakness of aeolian activity, the late Holocene environment was arid and the desert likely expanded. However, the early Holocene environment in the Tengger Desert was supposed to be arid, and the most controversial issue is about the existence of the drought events in the Badanjilin Desert during the middle Holocene. These problems need to be further researched. In addition, the westerly and the East Asian monsoon systems have different effects on climate change in the study area in different periods. Classic studies about the linkage of environmental changes between the Alashan Plateau and the global climate are still rare, especially lack of the representative evidence of environmental change's events. The study results about the aeolian sediment sources remain inconsistency, mainly due to the limits of the study methods and the complexity of geomorphologic agents. It is difficult to carry out qualitative and quantitative analyses on sediment sources. The morphology and distribution of sand dunes and the related direction and dynamics of the wind agent are mutually indicated, and proper wind energy is the key for construction of the aeolian dunes. Judged from the climate change in a global scale, the formation of sandy desert usually corresponds to the ice age or the cold and dry climate conditions.

Key words: Last glacial period (40 ka); Holocene; Westerlies; East Asian Monsoon circulation; Alashan Plateau; Mid-latitude deserts