

王娜,春喜. 乌兰布和沙漠晚第四纪以来环境演化研究进展[J]. 中国沙漠, 2022, 42(1): 175–183.

乌兰布和沙漠晚第四纪以来环境演化研究进展

王娜^{abc}, 春喜^{ab}

(内蒙古师范大学 a. 内蒙古自治区湿地环境修复工程实验室, b. 蒙古高原气候变化与区域响应高校重点实验室,
c. 地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要: 乌兰布和沙漠晚第四纪以来环境演化呈现湖泊与沙漠多次反复的更替模式, 湖相层与松散风成砂层迭覆出现。湖泊发育时间段为 120—90 ka、60—50 ka、40—20 ka 和 8—5.5 ka; 沙漠扩展时间段为 150—130 ka、90—60 ka、50—40 ka、20—10 ka 和 5.5 ka—近现代时期。由于时空尺度差异, 构造活动、气候变化和黄河变迁是更新世以来乌兰布和沙漠环境演化的主要原因, 直到全新世晚期人类活动加剧了沙漠的进一步扩张。乌兰布和沙漠环境变化剧烈, 成为中国北方地区的关键地带。未来研究需准确提炼科学问题, 丰富时空尺度和测年方法, 将湖岸阶地剖面与岩芯相结合, 以准确认识复杂的沙漠化过程, 这在应对气候变化、生态文明建设和区域可持续发展等方面将发挥关键作用。

关键词: 干旱区; 环境演化; 时空尺度; 驱动机制

文章编号: 1000-694X(2022)01-175-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00180

中图分类号: K903

文献标志码: A

0 引言

干旱地区的生态环境演化问题是全球变化研究的热点^[1], 而沙漠是干旱地区的主要地貌类型, 对气候变化反应敏感。中国西北部沙漠和沙地分布集中, 是北半球主要的沙尘暴和沙源区^[2]; 此外, 沙漠环境演变研究对了解干旱地区的环境和气候变化非常重要。全新世时期中国西部地区发生了以干旱化-沙漠化为主的地质-古气候事件^[3], 然而该事件的形成演化过程与机制还有待深入研究。辽阔的沙漠时常会掩盖区域沉积地层信息^[4], 沙丘沉积过程复杂, 沉积序列不连续, 从沙漠内部获取时间跨度长、相对连续的沉积序列困难^[5]。近 30 年来对风成砂沉积序列和沙漠周边地层的研究, 有助于厘清干旱区沙漠形成和演化过程。20 世纪 60 年代, 历史地理学者多次进入沙漠地区进行实地考察, 通过查看文献和古城遗址考证指出西北地区沙漠化形成时代、成因和演变模式^[6], 证明沙漠主要产生于人类历史时期, 在自然因素基础上由人为不合理经济活动造成, 包括过度开垦、放牧、樵采以及

不合理利用水资源等^[7], 但该研究在时间跨度和空间广度上都具有局限性。由于部分研究时段的重合, 第四纪地质学者也成为主要力量, 认为沙漠是在干旱气候和丰富沙物质来源等自然条件下长期发展演变而形成, 是一种纯自然过程, 即气候地貌过程, 干旱是致使沙漠化的主导因素^[8-9]。两个领域的学者都承认历史时期干旱地区环境产生了巨大变化, 然而对于环境变迁的起止时间和主导因素观点相悖。对乌兰布和沙漠(Ulan Buh Desert, UBD)地貌景观的形成问题, 侯仁之等^[10]根据汉朝古墓遗迹的考古材料, 认为西汉期间汉民大规模的垦荒和后期的弃荒导致了沙漠的形成。而湖泊沉积¹⁴C 测年结果显示, 沙漠形成于晚更新世末至全新世早期, 干旱气候变化导致了沙漠的形成^[11]。乌兰布和沙漠演变的机制在地学界至今仍然存在争议, 所以对沙漠的演化有待归纳和总结。

作为中国北方典型沙漠, 乌兰布和沙漠的演化一直是备受关注的科学问题, 吸引了许多研究者的长期广泛关注。乌兰布和沙漠是黄河中游地区农

收稿日期: 2021-09-21; 改回日期: 2021-11-20

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2019GG020)

作者简介: 王娜(1996—), 女, 内蒙古乌兰察布人, 硕士研究生, 研究方向为环境变化与管理研究。E-mail: 1678829592@qq.com

通信作者: 春喜(E-mail: chunxi@imnu.edu.cn)

牧交错带的重要组成部分,人与环境系统协同演化较为复杂,由于靠近东亚夏季风边界,该地域对季风强度的波动较为敏感,是中国沙漠化问题最严重的地区之一。本文在前人工作基础上,综合研究历史时期不同时空尺度的沙漠演化过程,加深干旱地区地表形成过程以及历史环境变化的认识,明确自然要素与人类活动在沙漠化过程中的地位,为解决“自然成因观”与“人类历史形成观”这一争论提供了新的思路。

1 研究区概况

乌兰布和沙漠位于中国北方内蒙古自治区的西南部,居于中国干旱和半干旱之间的过渡地带,属于夏季风与西风区的交界地带^[12]。沙漠被黄河(东)、狼山(北)、巴音乌拉山(西)和贺兰山(南)所

环绕,被鄂尔多斯新生代断陷盆地包围(图1)。南部高沙丘区由约100 m高的金字塔状沙丘和复合巨型沙丘构成;北部第四纪湖泊沉积广泛;西部的低沙丘区分布吉兰泰盐湖,以约10 m高的固定沙丘和半固定沙丘为主^[13];东部的沙区由山脉附近的低线状沙丘和远离山脉相对较高的金字塔状沙丘组成^[14]。受贺兰山和巴音乌拉山的影响,该沙漠南北地势高,中央腹地为低地,同时在古黄河和吉兰泰古湖共同作用下,低地堆积松散沉积物,为沙漠的孕育和扩张提供物质来源^[15]。乌兰布和沙漠地区具有典型的大陆性气候,年降水量为90—140 mm,80%发生于7—8月,年蒸发量为2 240 mm。年平均气温7.6℃,无霜期136 d,全年日照时数3 200 h。年均风速为3.1 m·s⁻¹,最大风速达到15.1 m·s⁻¹^[16]。

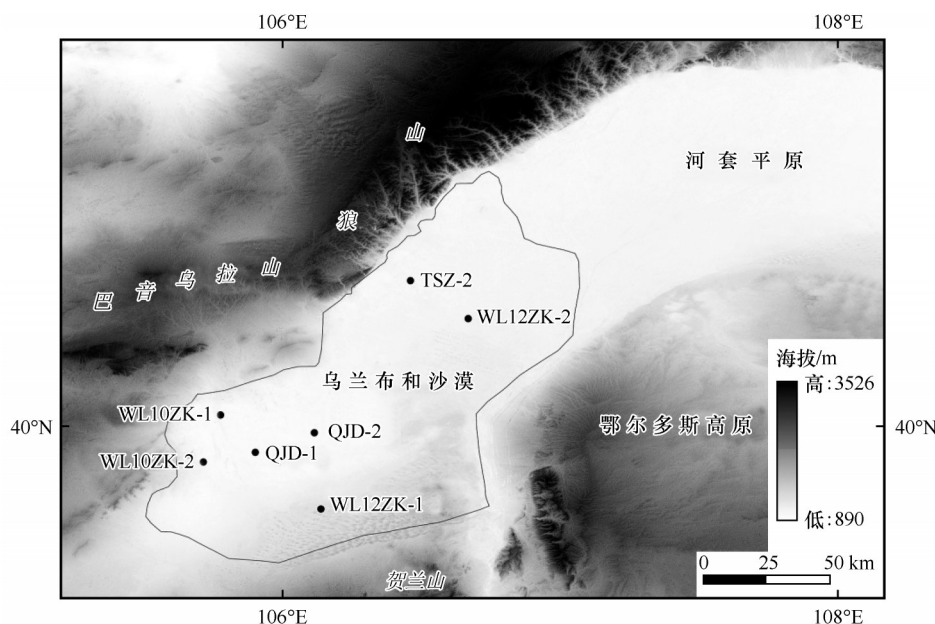


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the Ulan Buh Desert

2 湖泊-沙漠耦合关系

中国干旱和半干旱地区在晚第四纪发生广泛而明显的环境变化和气候波动现象,沙漠和沙地中存在不同时间尺度形成的湖相沉积物,如湖岸堤沙砾石沉积及深湖黏土沉积,沙漠和湖泊环境之间频繁转换^[9,17]。

I阶段(150—120 ka): 钻孔 WL10ZK-1 岩芯最深处风成砂年龄为153.95±25.34 ka,说明150 ka前该地区基本一直是干旱环境,有沙漠或草原植被,

有机物和碳酸钙含量趋近0,沙丘广泛分布。但由于岩芯深度的限制,没有明确沙漠形成的起始年龄,这有待更深的钻孔岩芯的研究结果来推断。

II阶段(120—90 ka): “吉兰泰-河套古大湖”覆盖整个乌兰布和沙漠的高湖面阶段可能为120—90 ka。WL12ZK-1 岩芯59.6—37 m处存在典型湖相沉积,高含量香蒲花粉指示周围地区为湿润的水生环境^[18]。钾长石释光测年表明,淡水古湖泊在155 ka前由黄河水注满^[13]。并且 WL10ZK-1 岩芯湖相年龄120—90 ka,即“吉兰泰-河套古大湖”高湖面阶段

可能为 120 ka。

III阶段(90—60 ka):“吉兰泰—河套古大湖”解体,乌兰布和沙漠地区发育沙漠环境。WL12ZK-1岩芯 120—59.6 m处由风成沉积构成,沉积物粒度频率曲线为单峰,主要分布在 200—400 μm ,这是一种典型的风沙分布证明,并且建群种是蒿属、藜科、怪柳和蒺藜科等旱生或盐生植物。

IV阶段(60—50 ka):在研究岩芯之前,前人基于对地貌的考察和吉兰泰盐湖周围古湖岸线和湖泊沉积记录,结合粗颗粒石英测年、遥感图像和生物残留物的分析,首次提出在乌兰布和沙漠地区和河套平原地区形成统一古大湖。海拔 1 080—1 070 m 和 1 060 m 湖岸堤沉积物的 OSL 测年结果表明“吉兰泰—河套古大湖”高湖面出现在 60—50 ka 间,面积为 34 000 km^2 [19]。

V阶段(50—40 ka): WL10ZK-1 岩芯风砂沉积

在 87 ka 出现,表明湖泊开始衰退缩小。由于气候条件的恶化和黄河的影响,水生植物生产力急剧减弱,湖泊水位下降或干涸 [20],黄河古河道改变 [21],细粒沉积物含量减少,中粗粒沉积物含量增大 [22]。

VI阶段(40—20 ka):“吉兰泰—河套古大湖”在 40—20 ka 期间湖水位 1 052—1 055 m,次一级的湖岸沉积物测定年代分别为 36.9 ka 和 19.6 ka,湖泊面积达 23 000 km^2 [23]。VI、IV阶段均存在石英饱和剂量较低的限制,对于最高一级湖岸阶地形成时代是否被低估有待考究。

VII阶段(20—8 ka):“吉兰泰—河套古大湖”解体,乌兰布和沙漠地区再次发育沙漠环境。WL10ZK-1 岩芯 9 m 和 3.7 m 处风成砂石英年龄为 19.43 ± 1.21 ka 和 13.03 ± 1.08 ka, WL10ZK-2 岩芯 1.4 m 处为 11.56 ± 1.76 ka,表明末次盛冰期主要为沙漠环境(图 2)。

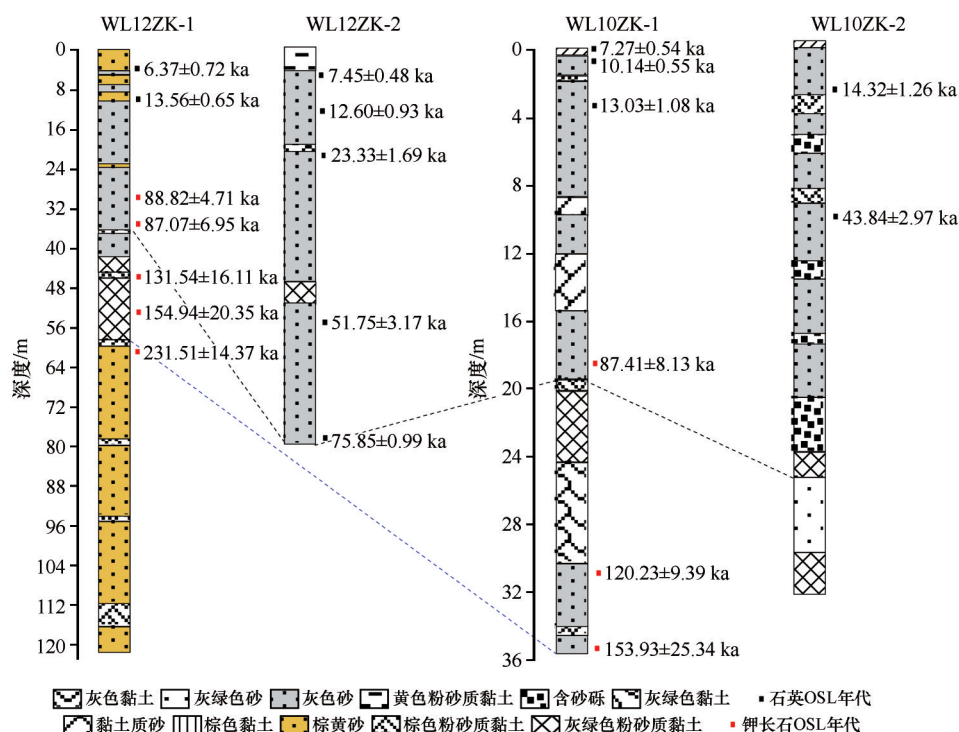


图2 乌兰布和沙漠更新世时期剖面测年结果(WL12ZK-1、WL12ZK-2剖面引自文献[24]; WL10ZK-1、WL10ZK-2剖面引自文献[13])

Fig.2 The stratigraphic subdivisions of sections and dating results during the Pleistocene

VIII阶段(8—5.5 ka):剖面FAN中 8.4 ka 左右出现积水环境,说明在距今 8—7 ka 前后为“湖泊—湿地阶段” [24—26],形成了古屠申泽、吉兰泰古湖和乌兰布和沙漠北部的统一古湖(命名为“乌兰布和古湖”),但其面积远小于“吉兰泰—河套古大湖”。对沙漠腹地湖滨沉积物的 OSL 年代测定结果表明,存

在东西向延伸长 11 km 的贺日木西尼沙嘴,地表海拔从 1 052 m 逐渐降低到 1 035 m [27—29],沙嘴沉积物 OSL 测年结果为 8.1—7.7 ka [23],标志在 8 ka 前后湖水的面积较大,水动力较强,发育面积较大的吉兰泰古湖 [27]。黄河从现今的乌兰布和沙漠东南部流入形成古屠申泽, ^{14}C 测年表明古屠申泽湖泊形成于

约7.2 ka左右,存在着时间上以及与其相对应的空间上的演化过程^[11]。然而在南部高沙丘地带没有发现全新世湖泊沉积,因此推断湿地、池塘和浅水湖泊仅在北部形成^[24]。

7.0—6.5 ka“乌兰布和古大湖”开始解体萎缩、碎片化,湖泊沉积物提供了大量的沙物质^[30],开始出现沙漠环境,剖面QJD-1顶部年龄为 7.66 ± 0.37 ka的风成砂验证此现象。古屠申泽的西岸向东收缩,TSZ-2红褐色含黏土粉砂层的年龄为6.47—4.48 ka,表明6.5 ka时古屠申泽已经萎缩,直至距今1.5 ka左右消亡^[31]。现在吉兰泰盐湖周围及沙漠南部丘间低地湖相地层下部出现风成砂,表明吉兰泰古湖在6.0—4.7 ka发生了退化,向西逐渐萎缩,萎缩过程中残留了众多面积不同且不连贯的湖泊。残留湖泊演变成盐湖,产生了大量的石膏和芒硝,最终发育成大型的盐湖矿床^[28,32]。湖泊和沙漠之间存在耦合关系,沙漠形成和扩张的过程与“乌兰布和古湖”的干涸、吉兰泰古湖和古屠申泽的衰退、盐碱化过程同步发生^[15]。

IX阶段(5.5 ka—近现代时期):全新世晚期大约2 ka再次形成风成砂沉积^[33]。结合现代水文、河流、地貌、沉积等特征和废弃耕地、古城遗址和坟墓位置的研究认为乌兰布和沙漠北部在秦朝仍残留有收缩分化后的古屠申泽。但由于黄河河道东移,出现南北两汉,古屠申泽干涸^[31],仅留存小面积绿洲^[34]。西汉所置窳浑、临戎、三封3县即位于河湖之滨的绿洲之上^[35]。汉王朝在该地区大规模发展农业,但移民屯垦弃荒和游牧民族的大规模放牧活动导致土地沙漠化,使绿洲地区形成沙漠环境。范育新等^[33]通过探地雷达反射剖面 and 岩芯剖面的分析验证北部沙丘是浅湖或浅湖相沉积的覆盖物,岩芯地层OSL结果显示2 ka左右开始形成风成砂,并逐渐发展成沙丘等沙漠地貌景观。沙漠东部发生了沙漠化和巴丹吉林沙漠流沙侵入过程^[24],新的相对高大沙丘在东部沙区形成^[10,36]。

1887年天主教在乌兰布和沙漠招民垦荒;20世纪60年代末建设兵团大规模农垦,破坏植被和土壤结构,使得沙漠化严重^[37];1982—2018年乌兰布沙漠经历了全面的绿化趋势,实施大规模的环境或生态恢复和保护项目,生态环境明显变化的地区主要分布于黄河流域,这与该地区的水域、湿地、林地变化有关^[38]。防风治沙林、人工绿洲的增加,阻止或减缓荒漠化^[12],沙丘活动最近有所减缓^[39-40];2018年

土地利用变化显著,流动沙丘占比大幅降低,固定沙丘及半固定沙丘面积增加^[41](图3—4)。

3 湖泊-沙漠演替成因

驱动力作用-沙漠化动态响应这一过程的发生与演化、时空分布、相互耦合等特性依赖不同的时间尺度,否则结果往往不具有可比性^[44],因此需要分别探讨沙漠化过程的驱动力。

3.1 晚更新世时期

早更新世时期狼山、巴音乌拉山、贺兰山以及鄂尔多斯高原在燕山运动构造格局基础上持续隆起^[45-46],其间河套平原^[47]和吉兰泰断陷盆地则持续下沉^[48],在磴口-敖龙布鲁格一线以南广大地区形成统一的大湖^[49]。155 ka之前沙漠形成是中更新世时期干旱增加的结果,青藏高原强烈隆起^[50],青藏高原的上升使邻近的地区变成了沉积盆地^[51],阻挡了来自印度洋的暖湿气团^[52],对来自西风带的水汽屏障作用也加强了,中国大陆气候较为干冷,西北地区的干旱化趋势明显。“吉兰泰-河套古大湖”取代了风成沙丘环境,其变化过程可能由于鄂尔多斯高原东北边缘距今120 ka前后开始的快速构造隆升^[45],致使晋陕峡谷黄河外流受到阻碍^[49],最终在河套盆地积水形成统一湖泊,末次冰期期间冰段相对湿润的气候环境进一步促进了古大湖的发育^[19]。Vostok冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 在120 ka达到峰值;90—80 ka阶段,太阳辐射逐渐增加,夏季风盛行,气候逐渐变湿润,有利于湖泊发育(图5)。80 ka直至全新世早期东亚夏季风强度减弱,冬季形成强风,较强的日照导致了较高的温度和较强的蒸发,气候干燥^[53]。吉兰泰盐湖末次冰盛期到冰消期的矿物组成变化表明,该地区环境可能受到夏季太阳辐射、全球与区域温度变化以及夏季风演化的影响^[54]。图5b显示,80 ka为转折点,太阳辐射减少,指示气候变冷干,湖泊水位衰减;60—50 ka却存在显著上升趋势。 C_4 植被含量在85 ka之后开始增加,气候逐渐变干。湖相沉积的平均粒径基本维持稳定,在约85 ka时存在一个弱峰值,指示一次粒度变大事件。磁化率在80—20 ka明显低于120—80 ka,指示了夏季风环流在80 ka之后减弱。古湖最终消亡可能与末次冰期极端寒冷的气候和河套盆地周缘强烈的构造运动有关,总有机碳值的突然下降、 $\delta^{13}\text{C}$ 值的增加、风成砂和沙漠沙含量的增加均表明在此期间气候干燥、寒

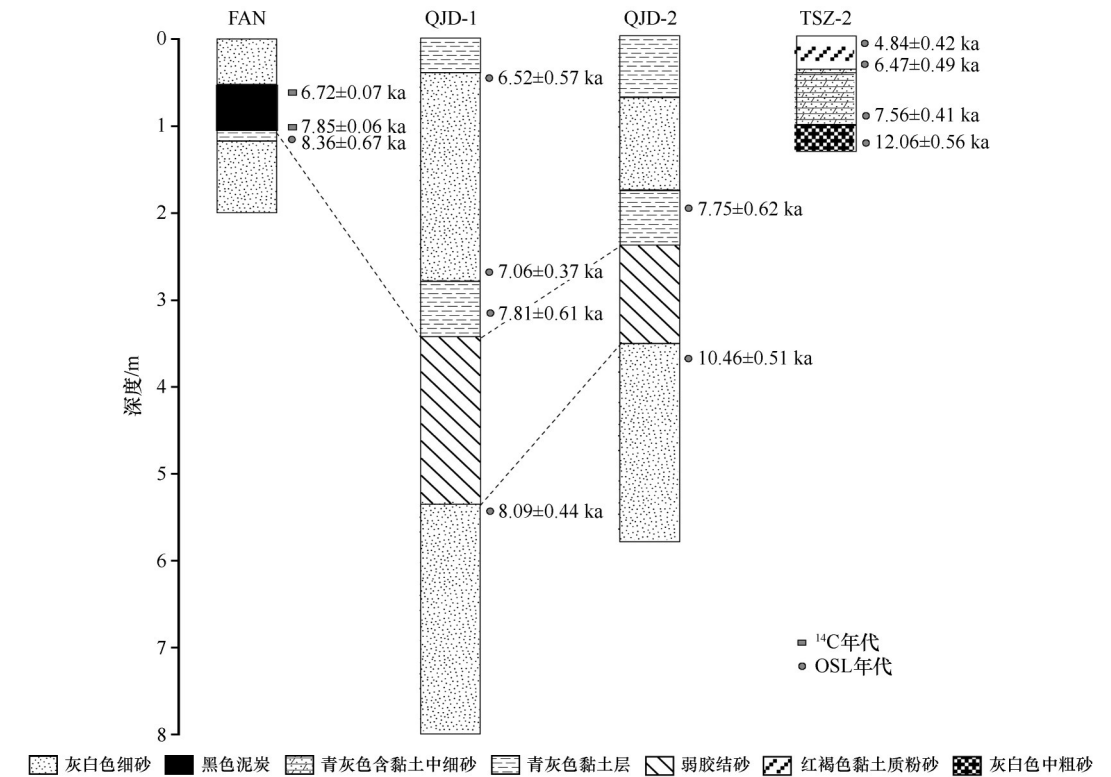


图3 乌兰布和沙漠全新世时期剖面测年结果(FAN剖面引自文献[42];QJD-1、QJD-2、TSZ-2引自文献[43])

Fig.3 The stratigraphic subdivisions of sections and dating results during the Holocene

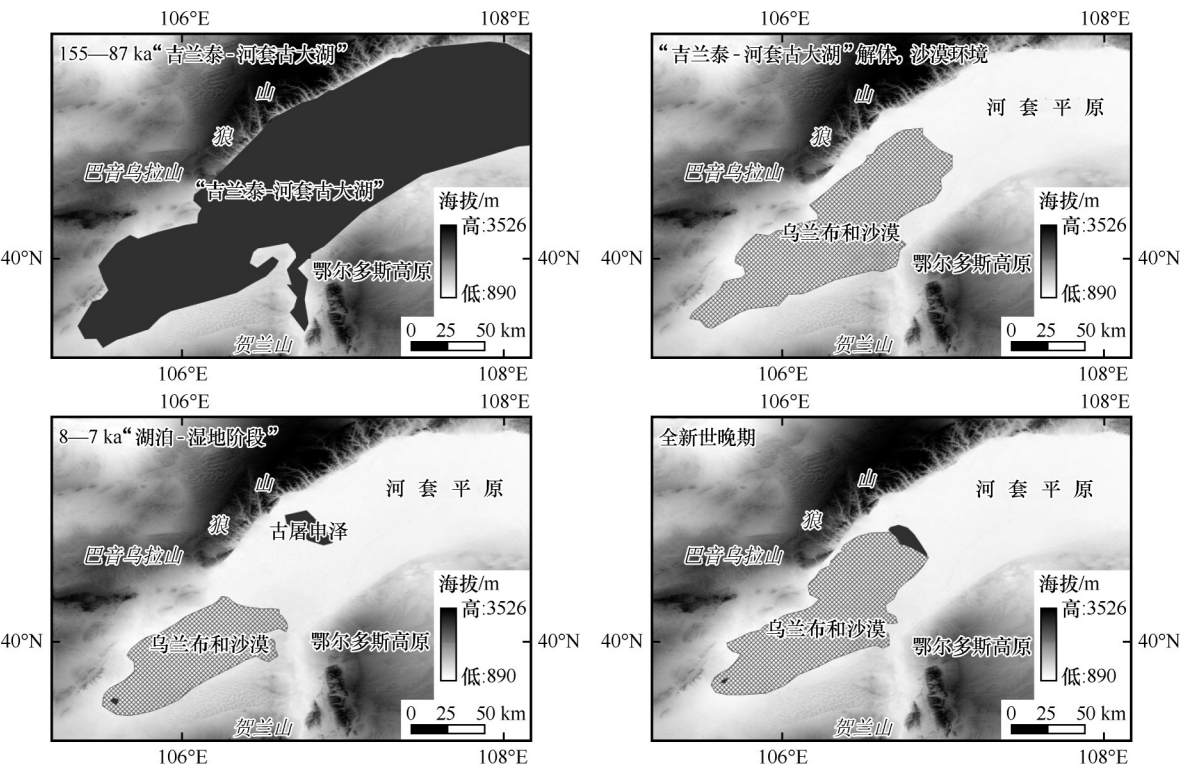


图4 乌兰布和沙漠演变过程(修改自文献[24])

Fig.4 The main stages of UBD evolution

冷^[22]。大型古湖泊干涸后,古湖泊的边缘提供了丰富的泥沙和沙源物质,湖盆本身和贺兰山丘陵为风成砂沉积提供了有利的地形条件,使得沙漠经历了移动沙丘的活化、沙漠地貌发育。

3.2 全新世时期

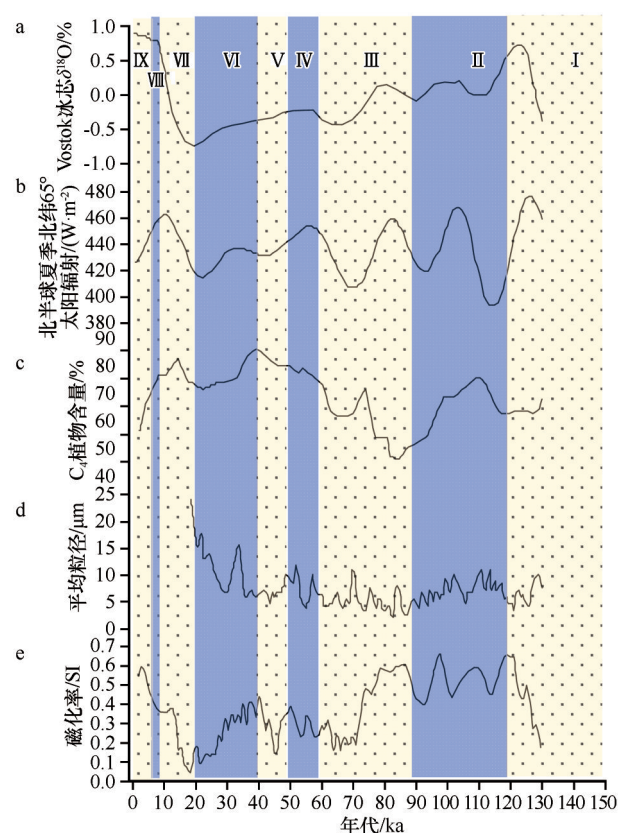
气候在全新世早期是干燥的,在全新世中期是潮湿的,在全新世晚期又是干燥的,表现出干湿交替的变化^[55]。全新世早期经向温度梯度增强中纬度西风气流,使西风急流向南移动,寒冷的内陆条件将导致中纬度地区弱气旋活动,导致降水减少^[56]和气候干燥^[29]。内蒙古南部沙漠的湿润期可能是由全新世中期强烈的夏季风、高降雨量和气候普遍湿润造成的^[57]。岱海 TOC 含量逐渐上升^[55]说明全新世中期出现短暂的湿润期^[58],强烈的夏季风导致中国北部整个沙漠地带的水分有效性相对较大的增加^[9],降水在 8—7.5 ka 整体处于高值。北半球冰盖减少或消失时,北大西洋海温和高空气温都升高,北大西洋地区的高海温将导致更多的来自大西洋的水汽,而大陆高温度将导致高湿度,可用于欧亚大陆的局部水分循环,导致干旱的地区更多的降水^[29]。三角城剖面记录孢粉浓度在距今 7—5 ka 年间出现最低值,表征阿拉善高原经历了强烈的干旱化^[59]。7.0—6.5 ka 时“乌兰布和古湖”收缩解体与亚洲夏季风强度从其最大值开始下降相关,夏季风强度随着太阳辐射最大值而降低,干燥的冬季风风力增加^[60],干旱气候盛行,蒸发作用和风的吹蚀作用日渐增长,湖面迅速收缩,大面积退出的湖积平原在风的吹扬作用下形成不同形态的风沙地貌^[61]。

沙漠形成原因的判断与形成时代紧密相连,此前阶段没有证据表明人类活动导致环境变化,第四纪地质时期内,沙漠化是一种“纯自然”过程,即气候-地貌过程^[62]。在人类历史时期,由于人为因素的直接或间接作用,原来的绿洲等非沙漠化土地变成了沙漠。中国科学院地理研究所乌兰布和沙漠工作队考察了汉代麻浑城、三封城、临戎城的遗址发现,在较大的湿地和浅水湖泊消失后汉王朝(2 ka)在该地区屯垦并大规模发展农业。移民屯垦弃荒和游牧民族开展大规模放牧的活动,破坏了表层土壤的稳定性,重新激活了旧的沙层^[63],导致东部原农田和西部原湿地或浅水湖低地发育成沙漠地貌。

3.3 近现代时期

20 世纪 50 年代后期,人类活动已成为沙漠化的主要驱动力,不合理的土地开垦、过度放牧以及滥伐滥樵等导致植被破坏^[64]、土壤风蚀加剧,造成土地沙化,植被易遭破坏,增加沙漠化发展的风险。

土壤和上覆地层受侵蚀后,极易出露到地表,形成“就地起沙”,中国北方土地利用的方式和程度是沙漠化发展或逆转的主导因素,植被恢复是逆沙漠化过程^[65]。1959 年中国科学院治沙队首次综合考察乌兰布和沙漠的自然资源、沙丘特征及风沙运动规律,建立了磴口试验研究站,开展防风治沙研究^[66],合理的土地利用方式或者是防沙治沙、调节型和复元型生态工程^[67]等措施起到不可忽视的作用。因此约束和规范人类的行为已成为防治荒漠化的关键^[68]，“趋绿洲化”、“避沙漠化”成为干旱地区沙漠化防治的要点^[69](图 5)。



IX^[43]、VII、V、III和I^[13]:沙漠环境;VIII:北部为古居申泽和“乌兰布和古湖”;VI和IV^[23]、II^[19]:“吉兰泰-河套古大湖”。a: Vostok 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$, 引自文献[70]; b: 北半球夏季 65°N 太阳辐射, 引自文献[71]; c: C_4 植物含量, 引自文献[72]; d: 河套古湖平均粒径, 引自文献[22]; e: 洛川黄土磁化率, 引自文献[73]

图5 更新世气候变化的记录

Fig.5 The record of climate change during the Pleistocene

4 存在问题与展望

乌兰布和沙漠环境演化过程存在主要争议为湖泊-沙漠转换起止点的年代确定,早期和晚期测年数据精度的差异。由于强烈的风沙作用导致湖相沉积被严重风化剥蚀或被现代沙丘覆盖,同时缺

乏有效的 ^{14}C 测年材料,所以无法找到可靠的湖相沉积记录。目前测年数据不够系统,缺乏足够的沉积记录和年代数据支持,常常以少量岩芯结果代表乌兰布和沙漠整体,导致认识差异。选择剖面的位置、采集样品的方式和测年方法不同也会产生影响,如湖岸阶地剖面与岩芯的选择、 ^{14}C 与OSL的测年方法的选择、测年的颗粒物(石英与钾长石)的筛选。虽然不少研究者证明了乌兰布和沙漠的形成时代,但不同剖面的年代结果往往不能进行统一对比,对其演化活动及其年代框架的认识存在差异性。

风沙环境变化规律以及未来演化趋向的预估等还存在不确定性,这需要更为深入探讨干旱区风沙环境变化的非线性过程及其动力学机制,有待于今后通过建立在空间上更加密集的典型剖面来克服空间异质性,揭示乌兰布和沙漠环境演变的过程和成因。千年尺度环境变化趋势和百年尺度的人类活动是导致乌兰布和沙漠不断恶化的两个最为主要的原因。如何明确不同自然要素(构造运动、气候变化和黄河变迁)对湖泊-沙漠环境的贡献率,还需要进一步加强环境变化的高分辨率重建。人类历史时期以来该地区出现的沙漠化现象,只是沙漠长期演变序列中最近的一个发展阶段,今后该区沙漠化的发展趋势,应该考虑规模效应,将两种因素耦合叠加,进行多尺度定量评估。沙漠演化对千年尺度上的环境变化响应比较敏感,对百年尺度上的周期性是如何响应的?如何量化环境变化和人类活动在土地沙漠化过程中的贡献?未来气候持续变暖会如何影响区域沙漠化?这些科学问题是今后研究的重点。

参考文献:

- [1] 赵松乔.西北干旱区主要自然灾害的形成、分布和减灾措施[J].中国沙漠,1991,11(4):7-14.
- [2] 杨立敏,朱秉启.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[J].地质学报,2018,92(12):2561-2581.
- [3] 李智佩,岳乐平,郭莉,等.全新世气候变化与中国北方沙漠化[J].西北地质,2007,162(3):1-29.
- [4] 郭峰,王亲.中国西部干旱区沙漠形成演化概述II[J].佛山科学技术学院学报(自然科学版),2013,31(2):24-29.
- [5] 徐志伟,鹿化煜.毛乌素沙地风沙环境变化研究的理论和新认识[J].地理学报,2021,76(9):2203-2223.
- [6] 韩光辉,赵桂芳,彭静杨,等.开拓者的足迹:侯仁之的沙漠历史地理考察与环境变迁研究[J].历史地理研究,2019,39(2):149-158,163.
- [7] 朱震达,王涛.中国沙漠化研究的理论与实践[J].第四纪研究,1992,12(2):97-106.
- [8] 吴正,钟德才.中国北方地区沙漠化的现状与趋势之窥见[J].中国沙漠,1993,13(1):24-30.
- [9] Yang X P, Scuderi L, Paillou P, et al. Quaternary environmental changes in the drylands of China: a critical review[J]. Quaternary Science Reviews, 2011, 30(23/24): 3219-3233.
- [10] 侯仁之,俞伟超.乌兰布和沙漠的考古发现和地理环境的变迁[J].考古,1973(2):92-107.
- [11] 贾铁飞,银山.乌兰布和沙漠北部全新世地貌演化[J].地理科学,2004,24(2):217-221.
- [12] 贾宝全,陈利军,杨维西,等.乌兰布和沙漠地区土地利用动态变化分析[J].干旱区研究,2007,24(5):610-617.
- [13] Li G Q, Jin M, Chen X M, et al. Environmental changes in the Ulan Buh Desert, southern Inner Mongolia, China since the middle Pleistocene based on sedimentology, chronology and proxy indexes [J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 128: 69-80.
- [14] 贾鹏,王乃昂,程弘毅,等.基于3S技术的乌兰布和沙漠范围和面积分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(12):131-138.
- [15] 春喜,陈发虎,范育新,等.乌兰布和沙漠的形成与环境变化[J].中国沙漠,2007,27(6):927-931.
- [16] 李锦荣,郭建英,赵纳祺,等.乌兰布和沙漠流动沙丘风蚀空间分布规律及其影响因素[J].中国沙漠,2018,38(5):928-935.
- [17] Xu Y T, Lai Z P, Chen T Y, et al. Late Quaternary optically stimulated luminescence (OSL) chronology and environmental changes in the Hobq Desert, northern China [J]. Quaternary International, 2018, 470: 18-25.
- [18] 陈雪梅,李国强,黄小忠,等.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[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(4):169-174.
- [19] 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[J].科学通报,2008(10):1207-1219.
- [20] Yang X C, Cai M T, Hu J M, et al. The paleolake hydrology and climate change since the ~40 ka in the Hetao Basin, Inner Mongolia, China [J]. Quaternary International, 2020, 553: 73-82.
- [21] 杨根生,刘连友,刘志民.磴口县土地沙漠化及其整治[J].干旱区资源与环境,1991,5(1):1-11.
- [22] 杨星辰,叶培盛,蔡茂堂,等.150 ka以来内蒙古河套古大湖沉积物粒度记录的湖泊水位变化[J].地质通报,2017,36(6):1043-1050.
- [23] 春喜.晚第四纪吉兰泰盐湖古湖面与环境变化研究[D].兰州:兰州大学,2006.
- [24] Chen F H, Li G Q, Zhao H, et al. Landscape evolution of the Ulan Buh Desert in northern China during the late Quaternary [J]. Quaternary Research, 2014, 81(3): 476-487.
- [25] Fan Y X, Chen F H, Fan T L, et al. Sedimentary documents and Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating for formation of the present landform of the northern Ulan Buh Desert, northern China [J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53(11):1675-1682.

- [26] Zhao H, Li G Q, Sheng Y W, et al. Early-middle Holocene lake-desert evolution in northern Ulan Buh Desert, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 331: 31–38.
- [27] 春喜, 陈发虎, 范育新, 等. 乌兰布和沙漠腹地古湖存在的沙嘴证据及环境意义[J]. *地理学报*, 2009, 64(3): 339–348.
- [28] 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[J]. *盐湖研究*, 2008(3): 11–18.
- [29] Chen F H, Yu Z C, Yang M L, et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(3/4): 351–364.
- [30] 闫德仁, 王迅华. 基于水经注探讨乌兰布和沙漠景观形成问题[J]. *内蒙古林业科技*, 2014, 40(3): 40–43.
- [31] 李炳元, 葛全胜, 郑景云. 近2000年来内蒙后套平原黄河河道演变[J]. *地理学报*, 2003(2): 239–246.
- [32] 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[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(2): 193–199.
- [33] 范育新, 陈发虎, 范天来, 等. 乌兰布和北部地区沙漠景观形成的沉积学和光释光年代学证据[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 2010, 40(7): 903–910.
- [34] 牛俊杰, 赵淑贞, 任世芳, 等. 历史时期乌兰布和沙漠北部的环境变迁[J]. *中国沙漠*, 1999(3): 26–30.
- [35] 任世芳. 历史时期乌兰布和沙漠环境变迁的再探讨[J]. *太原师范学院学报(自然科学版)*, 2003(3): 87–91.
- [36] 侯仁之. 历史地理学的理论与实践[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1979(1): 119–124.
- [37] 乌拉. 乌兰布和沙漠植被及其保护[J]. *陕西林业科技*, 2007, 168(4): 133–137.
- [38] 周建秀, 刘志宁, 谷雨, 等. 黄河西岸乌兰布和沙漠综合治理区生态环境状况及动态变化[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(4): 28–34.
- [39] Liu Q S, Liu G H, Huang C, et al. Remote sensing monitoring of surface characteristics in the Badain Jaran, Tengger, and Ulan Buh Deserts of China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(1): 151–165.
- [40] Li J Q, Li Z L, Dong S P, et al. Spatial and temporal changes in vegetation and desertification (1982–2018) and their responses to climate change in the Ulan Buh Desert, Northwest China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 143(3): 1643–1654.
- [41] 温璐, 宋洁, 张慧超, 等. 近30年乌兰布和沙漠生态系统服务价值评估[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(12): 57–64.
- [42] 范育新. “吉兰泰河套”古湖演化(侧重光释光测年)研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [43] 李国强. 乌兰布和沙漠钻孔岩芯记录的释光年代学和晚第四纪沙漠-湖泊演化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [44] 许端阳, 李春蕾, 庄大方, 等. 气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用评价综述[J]. *地理学报*, 2011, 66(1): 68–76.
- [45] 陈晓龙, 范天来, 张复, 等. 鄂尔多斯高原周缘黄河阶地的形成与青藏高原隆升[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(4): 595–605.
- [46] 何泽新, 张绪教, 贾丽云, 等. 内蒙古狼山山前台地成因及其新构造运动意义[J]. *现代地质*, 2014, 28(1): 98–108.
- [47] Li B F, Feng Q, Li Y F, et al. Stable oxygen and carbon isotope record from a drill core from the Hetao Basin in the upper reaches of the Yellow River in northern China and its implications for paleolake evolution[J]. *Chemical Geology*, 2020, 557: 119798.
- [48] 杨德相, 屈争辉, 陈树光, 等. 河套盆地吉兰泰凹陷中生代构造层划分及意义[J]. *高校地质学报*, 2020, 26(6): 691–703.
- [49] 陈发虎, 范育新, Madsen D D, 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[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(5): 866–873.
- [50] 林年丰, 汤洁. 中国干旱半干旱区的环境演变与荒漠化的成因[J]. *地理科学*, 2001(1): 24–29.
- [51] Li Z J, Sun D H, Chen F H, et al. Chronology and paleoenvironmental records of a drill core in the central Tengger Desert of China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 85: 85–98.
- [52] Amano K, Taira A. Two-phase uplift of Higher Himalayas since 17 Ma[J]. *Geology*, 1992, 20(5): 391–394.
- [53] Huang X Z, Chen F H, Fan Y X, et al. Dry late-glacial and early Holocene climate in arid central Asia indicated by lithological and palynological evidence from Bosten Lake, China[J]. *Quaternary International*, 2009, 194(1/2): 19–27.
- [54] 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[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(3): 602–609.
- [55] Zhang H W, Zhang X, Cai Y J, et al. A data-model comparison pinpoints Holocene spatiotemporal pattern of East Asian summer monsoon[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 261: 106911.
- [56] Jiang W Y, Guo Z T, Sun X J, et al. Reconstruction of climate and vegetation changes of Lake Bayanchagan (Inner Mongolia): Holocene variability of the East Asian monsoon[J]. *Quaternary Research*, 2006, 65(3): 411.
- [57] 吴雅玲, 王永波, 刘兴起, 等. 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[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(4): 1161–1176.
- [58] Zhao Y, Yu Z C, Chen F H, et al. Holocene vegetation and climate changes from fossil pollen records in arid and semi-arid China[J]. *Developments in Quaternary Sciences*, 2007, 9: 51–65.
- [59] 陈发虎, 吴薇, 朱艳, 等. 阿拉善高原上全新世干旱事件的湖泊记录研究[J]. *科学通报*, 2004(1): 1–9.
- [60] Herzschuh U. Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50, 000 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(1/2): 163–178.
- [61] 耿侃, 胡春元, 刘佳. 吉兰泰地区第四纪湖泊的演变[J]. *干旱区资源与环境*, 1989, 3(2): 26–33.
- [62] 王洪波. 半干旱地区历史时期沙漠化成因研究进展[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(5): 69–74.
- [63] 陈业新. 秦汉时期乌兰布和北部地区生态状况的再考察[Z]. 秦始皇帝陵博物院, 2012: 383–399.
- [64] 王涛, 朱震达. 我国沙漠化研究的若干问题: 1. 沙漠化的概念

- 及其内涵[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 3-8.
- [65] 王涛, 吴薇. 我国北方的土地利用与沙漠化[J]. 自然资源学报, 1999(4): 355-358.
- [66] 朱震达. 中国沙漠化研究的进展[J]. 中国沙漠, 1989, 9(1): 4-16.
- [67] 刘恕. 试论沙漠化过程及其防治措施的生态学基础[J]. 中国沙漠, 1986, 6(1): 10-17.
- [68] 董朝阳, 樊胜岳, 钟方雷, 等. 中国沙漠化过程中人文作用研究进展[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 657-663.
- [69] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 1-9.
- [70] Jouzel J, Lorius C, Petit J R, et al. Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years)[J]. Nature, 1987, 329(6138): 403-408.
- [71] 罗虎明, 林振山, 李玉霞. 轨道尺度东亚夏季风的动力反演[J]. 第四纪研究, 2013, 33(3): 603-609.
- [72] 陈新. 南极罗斯海湖泊和海洋沉积物中烷基脂类碳氢同位素组成及古气候意义[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [73] Sun Y B, Clemens S C, An Z S, et al. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25(1/2): 33-48.

Research progress on the quaternary environmental evolution in the Ulan Buh Desert

Wang Na^{abc}, Chun Xi^{ab}

(a. Inner Mongolia Restoration Engineering Laboratory of Wetland Eco-environment System / b. Key Laboratory of Mongolian Plateau's Climate System / c. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: The evolution of the Ulan Buh Desert presented a multi-stage and repeated pattern, which was characterized by the overlapping of lacustrine layer and aeolian sand layer. A paleolake developed at 120-90 ka, 60-50 ka, 40-20 ka, and 8-5.5 ka, while the deserts expanded at 150-130 ka, 90-60 ka, 50-40 ka, 20-10 ka, and 5.5 ka-modern period. Due to the different spatiotemporal scale, tectonic activity, climate change and Yellow River change were the main reasons for the environmental evolution of the Ulan Buh Desert since the late Pleistocene. The Ulan Buh Desert had become a key area in northern China due to its drastic environmental changes. The further expansion of the desert was exacerbated by human activity in the late Holocene. Future research needs to accurately refine scientific issues and enrich spatiotemporal scale and scientific methods. These provide an accurate understanding of the complex process of desertification. It will play a key role in addressing climate change, promoting ecological progress and promoting sustainable regional development.

Key words: drought region; environmental evolution; spatiotemporal scale; driver mechanism