

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.148>



巴丹吉林沙漠南缘冲洪积物的光释光年代及其水文学意义

姜高磊^{1,2}, 聂振龙¹, 刘哲^{1,2}, 王哲¹, 赵华^{1,2}, 杨劲松^{1,2}, 申建梅^{1*}

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061

2. 中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室, 河北石家庄 050061

摘要: 冲洪积物是古气候和古水文信息的重要记录, 为了探讨巴丹吉林沙漠南缘地区全新世气候环境及其对区域地下水的影 响, 对沙漠南缘的水成沉积物进行了沉积学分析和光释光年代学测试, 结果表明本文研究的两个沙漠南缘沉积剖面分别为全新世中期(6.6~5.2 ka)的间歇性河流沉积和暂时性流水形成的洪泛沉积。基于前人全新世中期沙漠中湖泊水位、气候环境重建, 以及本文研究的冲洪积物的沉积特征与年代, 表明在气候湿润的地质时期巴丹吉林沙漠南缘及山区的区域降水形成暂时性洪流和/或间歇性河流会对沙漠地区地下水进行补给。

关键词: 巴丹吉林沙漠; 冲洪积; 光释光年代; 全新世中期; 地下水补给; 水文地质。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2021)05-1829-11

收稿日期: 2020-06-08

OSL Ages and Its Hydrological Implications of Alluvial-Diluvial Deposits from the Southern Margin of Badain Jaran Desert

Jiang Gaolei^{1,2}, Nie Zhenlong¹, Liu Zhe^{1,2}, Wang Zhe¹, Zhao Hua^{1,2}, Yang Jinsong^{1,2}, Shen Jianmei^{1*}

1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China

2. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydro-Environment Evolution, China Geological Survey, Shijiazhuang 050061, China

Abstract: Alluvial-diluvial deposits can record climatic and hydrologic information in geological history and play an important role in the reconstruction of paleoenvironment. Aqueous deposits were discovered at the south margin of Badain Jaran desert, Northwest China. Based on sedimentological analyses, two sections of the deposits as palaeoflood deposit and paleofluvial deposit were identified. OSL dating suggests that the deposits formed in the Middle Holocene. The alluvial-diluvial deposits in the southern margin of Badain Jaran Desert were mainly formed under a humid climate during the Middle Holocene. Based on the previous paleoclimate study, comprehensive analysis of the location and sedimentary features and the previous research of paleoclimate in this region, a conceptual model of recharge to the Badain Jaran is proposed. During humid climatic phases, such as the Middle Holocene, the precipitation in this region and adjacent mountain areas recharged the groundwater of the desert area by temporary flood or/and intermittent stream.

Key words: Badain Jaran desert; alluvial-diluvial deposit; OSL dating ages; Middle Holocene; groundwater recharge; hydrogeology.

基金项目: 中国地质调查局项目(No.121201106000150093); 国家自然科学基金项目(Nos.41807420, 41807428); 中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费项目(Nos.SK202007, SK201705)。

作者简介: 姜高磊(1988—), 男, 助理研究员, 从事干旱区第四纪环境演变研究。ORCID: 0000-0002-4965-4318. E-mail: jianggl198899@163.com

* 通讯作者: 申建梅, ORCID: 0000-0001-8498-8025. E-mail: sjmiheg@163.com

引用格式: 姜高磊, 聂振龙, 刘哲, 等, 2021. 巴丹吉林沙漠南缘冲洪积物的光释光年代及其水文学意义. 地球科学, 46(5):1829-1839.

巴丹吉林沙漠位于阿拉善高原的西部,是我国第二大流动沙漠,因其南部高大的沙山和沙山间星罗棋布的上百个湖泊而闻名于世界(Chen *et al.*, 2004; Dong *et al.*, 2013),该区处在东亚夏季风的西北缘,是典型的季风—西风过渡带的干旱区,该区对气候变化响应敏感且复杂(Chen *et al.*, 2008).近年来,巴丹吉林沙漠地区第四纪气候环境重建和水循环演变研究一直是水文地质学和第四纪地质学界研究和关注的热点问题(Yang *et al.*, 2003, 2010; Chen *et al.*, 2004; 周燕怡和王旭升, 2018),但就沙漠南部湖泊区的地下水补给来源仍然存在很大的争议,目前主要有以下几种观点:(1)远源补给,来自祁连山或青藏高原的现代降水或冰雪融水通过深大断裂补给沙漠区地下水(Chen *et al.*, 2004)或是沙漠西部的黑河在金塔—鼎新盆地强烈渗漏产生的地下水通过阿尔金断裂补给沙漠区地下水(丁宏伟和王贵玲, 2007);(2)现代大气降水补给,沙漠区湖泊主要接受当地或周缘山区的大气降水形成的地表径流及降水入渗形成的地下水补给(Liu *et al.*, 2016a);(3)近源古水补给,沙漠东南缘的山区在第四纪晚更新世较冷(冰期)环境下形成的降水是湖泊区地下水的主要补给来源(Gates *et al.*, 2008a, 2008b).以往关于地下水补给来源的研究多集中在沙山剖面中Cl元素分析、湖水和大气降水的同位素分析等化学手段以及现代仪器的监测方面,部分研究结论存在较大分歧,如Liu *et al.* (2016b)通过对巴丹东西湖的现代监测认为沙漠区的降水通过高大沙山的存储和入渗能够补给沙漠区湖泊,在补给来源

中占有一定的比例.而马宁等(2014)通过沙漠腹地的降水事件后的蒸发观测,认为高大沙山区的大气降水对地下水几乎没有补给作用.

水成沉积物是古水文事件或水文活动的重要记录,对研究区域水文具有重要意义,然而在巴丹吉林沙漠地区地下水补给来源的研究中对于水文事件的地学记录研究较为缺乏.团队在进行“巴丹吉林沙漠及周边地区1:25万水文地质调查”项目过程中,在沙漠南缘发现了一系列的冲洪积物沉积.冲洪积物属于水成沉积物,记录了地质时期的古水文事件,本文选取两处典型的沉积剖面进行沉积学分析和光释光(OSL)定年,为研究巴丹吉林沙漠地区地下水的补给来源提供重要的沉积学证据.

1 区域概况

巴丹吉林沙漠处于阿拉善高原的西部,位于雅布赖山、北大山以北,宗乃山以西,黑河、马鬃山以东,拐子湖以南(图1).沙漠区整体地势东南高、西北低,海拔为900~1 600 m,分布有众多沙山、沙丘,地形起伏较大,尤以东南部高大沙山居多,相对高差一般达200~300 m,东南部高大沙山、沙丘之间分布有100多个湖泊,串珠状排列,多为咸水湖,面积一般小于1 km²(Dong *et al.*, 2013).巴丹吉林沙漠属温带极端干旱气候,降水稀少,多年平均降雨量为30~120 mm,并由东南向西北逐渐减少(王乃昂等, 2013);湖泊蒸发量大,湖面年平均蒸发量约为1 450 mm(胡文峰等, 2015).

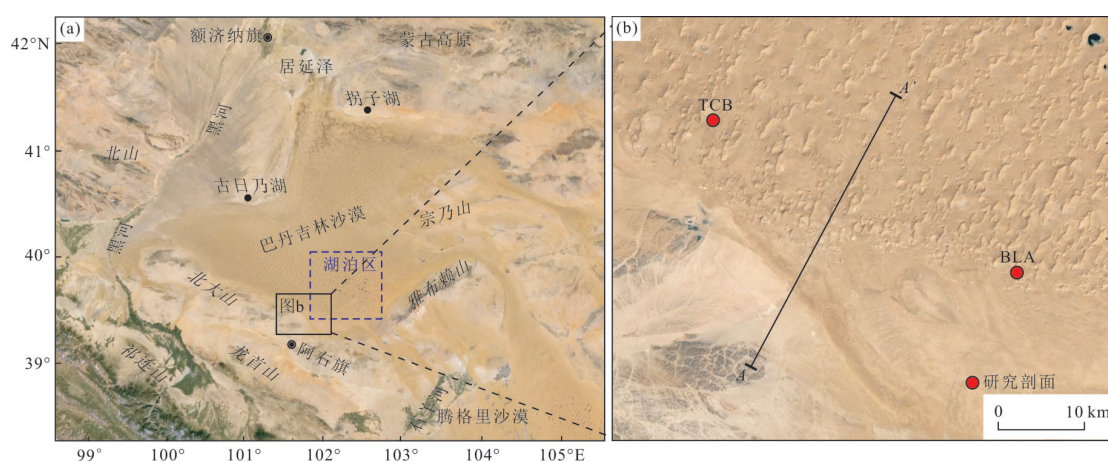


图1 巴丹吉林沙漠(a)和研究剖面位置(b)简图

Fig.1 Sketch map of the location of Badain Jaran desert (a) and study section (b)

图像底图来源于Google卫星;A-A'为图9剖面位置

地质构造上,巴丹吉林沙漠属于阿拉善地块的西部边缘,区内断裂构造主要呈北东向延伸,自北向南发育有雅干断裂、恩格尔乌苏断裂和巴丹吉林断裂等深大断裂,由中太古代、新太古代—元古代的深变质岩构成结晶基底(邹雷等,2019).自古生代以来不连续的发育了不同时期的沉积地层,沙漠区第四纪沉积主要为风积砂,厚度一般超过300 m,在东南部湖泊区夹有数层十几至几十米厚的湖相沉积(Wang *et al.*, 2015; 中国地质调查局项目“巴丹吉林沙漠及周边地区1:25万水文地质调查(No.121201106000150093)项目组钻孔数据).南部的湖泊集中分布区在现代湖泊周围分布有不同高程的湖相沉积露头、钙质根管和钙质胶结砂层(姜高磊等,2017),沙漠南缘发育有临时积水环境的洪泛沉积(高全洲等,1995).

2 材料与方法

本文选取巴丹吉林沙漠南缘的包勒昂蒙和铁厂北剖面进行详细的沉积学与年代学研究.

2.1 剖面描述

包勒昂蒙(BLA)剖面($39^{\circ}32'13.35''\text{N}$; $102^{\circ}01'19.67''\text{E}$):(1)0~10 cm,灰黄色泥质粉砂与细砂互层,组成2个旋回;(2)10~28 cm,灰黄色细砂;(3)28~48 cm,灰黄色粉砂质泥与中细砂互层,组成6个旋回;(4)48~77 cm,灰黄色含砾细砂,细

砾含量由上向下逐渐增加,细砂中见有薄层泥质碎片;(5)77~106 cm,灰黄色含粗砂粒中砂,含薄层泥质碎片,泥质团粒,直径为3~8 mm,发育弱的平行层理;(6)106~136 cm,灰黄色细砂;(7)136~145 cm,灰白色粉砂质泥;(8)145~180 cm,灰黄色粗砂与细砂互层,形成平行层理;(9)180~242 cm,灰黄色细砂,含少量薄层泥质碎片,平行层理发育,上部夹有棕红色薄层粉砂质泥;(10)242~266 cm,上部为灰白色粉砂质泥,下部为灰黄色粉细砂,二者渐变接触;(11)266~306 cm,灰白色粉砂质泥,底部8 cm为细砂,可见冲刷面;(12)306~381 cm,灰白色粉砂质泥,底部8 cm为细砂,细砂发育波状层理,夹有粗砂透镜体;(13)381~500 cm,灰黄色中细砂,由上向下粗颗粒逐渐增多(图2).

铁厂北(TCB)剖面($101^{\circ}32'24.75''\text{E}$; $39^{\circ}39'31.95''\text{N}$):(1)0~130 cm,灰白色泥质粉砂夹多层薄层细粉砂,细粉砂厚约2~5 cm;(2)130~300 cm,灰黄色中细砂,上部含有少量粗砂粒,松散,块状构造;(3)300~330 cm,灰白色泥质粉砂夹2~3层薄层泥;(4)330~430 cm,灰黄色中细砂,松散,块状构造(图3).

2.2 年代学样品采集与测试

在两个剖面上共采集5个光释光测年样品,在采集过程中尽量采集沉积均匀的中细沙层和细沙层,且避开沉积界线,一般距沉积界线超过30 cm.样品的前处理与测试在中国地质调查局第四纪年

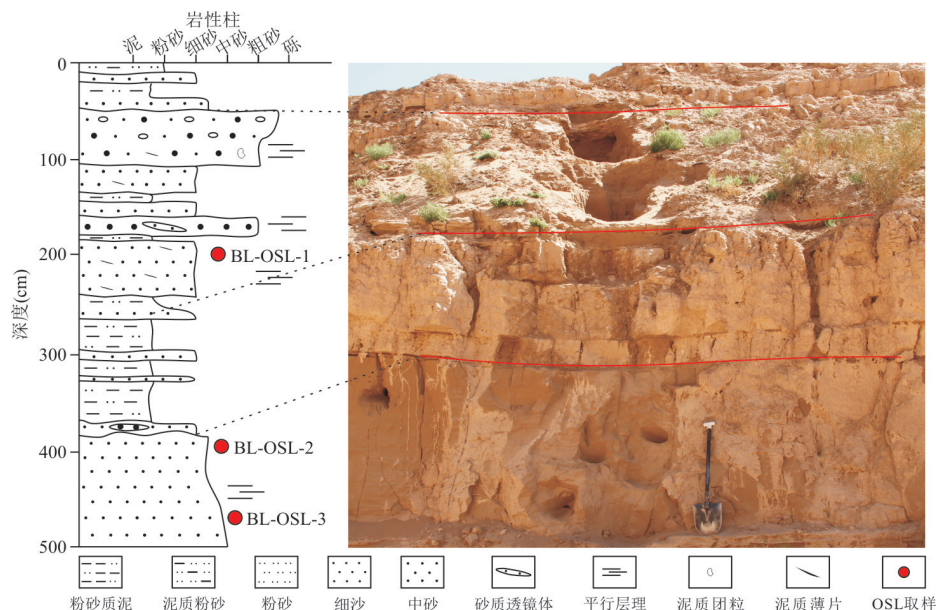


图2 巴丹吉林沙漠南部包勒昂蒙剖面柱状图

Fig.2 Comprehensive column of the Baoleangmeng section from the southern margin of Badain Jaran desert

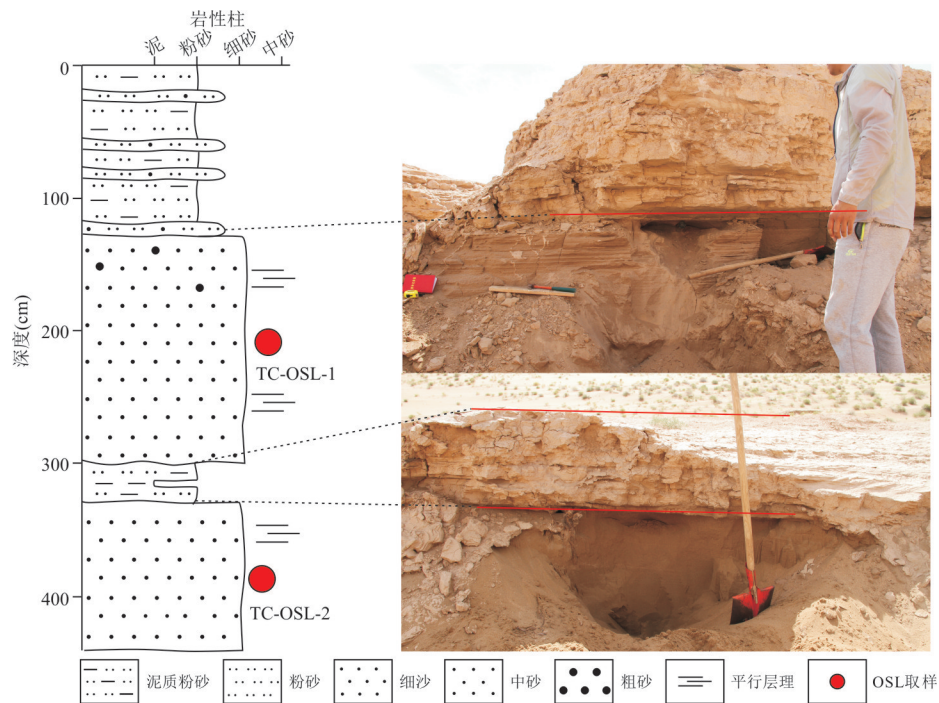


图 3 巴丹吉林沙漠南缘铁厂北剖面综合柱状图

Fig.3 Comprehensive column of the Tiechangbei section from the southern margin of Badain Jaran desert

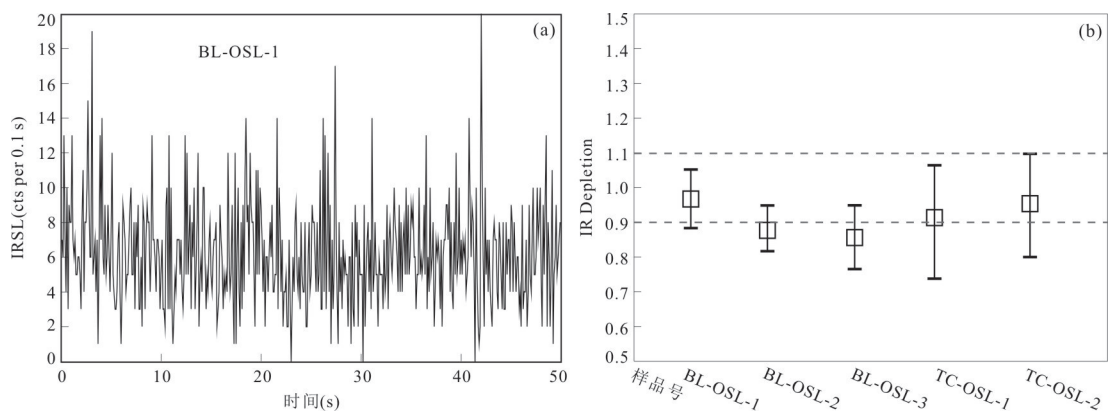


图 4 OSL 测年样品的红外信号(a)和 IR depletion(b)

Fig.4 Infrared signal (a) and IR depletion (b) of OSL dating samples

代学与水文环境演变重点实验室完成,过程如下:在暗室内打开样品,去掉不锈钢管两端深约 3 cm 可能曝光的部分用于测量 U、Th、K 含量及含水量,取钢管中心部分样品约 300 g 放入烧杯中用于测定等效剂量.加入浓度为 10% 的盐酸和 30% 的 H_2O_2 去除碳酸盐类和有机质,清洗烘干后筛出 90~125 μm 颗粒,用浓度 40% 的 HF 腐蚀 60 min,加入 10% 的盐酸去除氟化物,并用蒸馏水清洗,低温烘干后去除磁性矿物,剩下的样品即为石英粗颗粒样品.取少量样品检测红外信号和 IR depletion 值(Duller, 2003),若存在红外信号或 IR depletion

超过 0.9~1.1 的范围,则加入 HF 继续腐蚀,直到将长石去除.各样品红外信号均与本底值一致(图 4a 为 BL-OSL-1 样品的红外信号衰减曲线,其余样品红外信号均与该样品类似,接近本底),各样品 IR depletion 结果基本在 0.9~1.1(图 4b),认为各样品无长石残留,为较为纯净的石英颗粒.

各样品均使用德国 Freiberg 公司生产的 Lexsys Samrt 释光测量仪测定等效剂量.蓝光激光光源的波长为 458 nm,功率为 100 mW/cm²,红外激光波长为 850 nm,功率为 300 mW/cm².采用单片再生法(Murray and Wintle, 2000; Wintle

and Murray, 2006)测量样品的等效剂量. 预热温度为 220 °C 10 s, 试验剂量预热温度 160 °C. OSL 激发温度为 125 °C. OSL 信号采用前 1 s 光子计数积分值减去最后 10 s 的背景值.

样品所吸收的辐射剂量是由其本身及周围沉积物中放射性核素(^{238}U 、 ^{232}Th 和 ^{40}K)的 α 、 β 和 γ 衰变产生的电离辐射所提供的, 同时也有宇宙射线的少量贡献. 样品的铀、钍和钾含量采用中子活化法测得, 根据 Adamiec and Aitken (1998)提出的转换函数及 Prescott and Hutton (1994)推荐的宇宙射线贡献计算出样品的年剂量. 样品埋藏时期的含水量对样品所接收的剂量率有不可忽视的影响. 水对 α 、 β 和 γ 辐射具有一定的吸收作用, 因此, 含水量在埋藏期间的变化状况对样品年龄结果有直接的影响. 本批样品的实际含水量整体上不足 1%, 考虑到所采集样品在历史时期可能曾受洪水影响, 但巴丹吉林沙漠属于我国典型的干旱区, 降水量少, 蒸发量大, 在计算年代结果时采用 $10\pm 5\%$ 进行估算, 并用 Aitken and Xie (1990)提出的校正方法, 对年剂量进行了修正. 各样品的年剂量均采用 DRAC (Dose Rate and Age Calculator) 计算得出 (Durcan *et al.*, 2015).

3 结果与讨论

3.1 冲洪积物沉积特征与年代

本文研究的 2 个剖面均位于巴丹吉林沙漠的南缘, 根据野外调查和卫星图片观察认为 BLA 剖面为古河道的末端沉积, 证据如下: (1) 地理位置上, BLA 剖面位于狭长的沉积条带与高大沙山交接处 (图 5a), 卫星图片显示为狭长弯曲的条带状沉积, 分布在地形较低处, 经野外验证为古河道沉积 (图 5b); (2) 剖面沉积特征显示具有水成沉积特征, 如

含细砾中细砂、平行层理、中粗砂中的粉细砂透镜体、粉砂质泥中的粗砂透镜体等沉积特征 (图 6a~6d) 都说明该沉积为水成沉积物; (3) 灰黄色中细砂与泥质粉砂夹层沉积界线截然, 接触界面上有明显的冲刷痕迹 (图 6d), 说明有多次沉积间断. 结合地形、地理位置和沉积特征, 认为 BLA 剖面为间歇性河流沉积. TCB 剖面为沙山间洼地内的洪泛沉积, 证据如下: (1) 剖面位于沙山间洼地内, 洼地呈近圆形, 直径数百米, 周围沙山高约十几米至几十米 (图 5c), 南偏西方向沙山较矮; (2) 上部厚约 1 m 的泥质粉砂中夹多层薄层细粉砂, 具有明显的沉积间断 (图 6e), 泥质粉砂与中细砂沉积界限截然 (图 6e, 6f), 该剖面中的泥质粉砂与古洪水沉积中的滞流沉积有相似之处 (黄春长等, 2011). 综合上述认为 TCB 剖面为沙漠区暂时性流水形成的洪泛沉积.

研究剖面的 5 个样品光释光测年结果见表 1, 典型样品的生长曲线与衰减曲线见图 7. 从衰减曲线可以看到, 样品前 1 s 信号为快组分, 适合采用单片再生法获得等效剂量 (De). 生长曲线采用饱和指数拟合, 拟合结果较好. 各样品的 De 分布情况见图 8, 其中, BL-OSL-3 和 TC-OSL-2 样品的 De 分布较为集中, OD (Overdispersion) 值小于 20%, 认为这两个样品在埋藏前晒退较好, 采用中央年龄模型 (CAM, central age model, Galbraith and Roberts, 2012) 计算等效剂量结果, 而其余 3 个样品 De 分布较分散, OD 值大于 20%, 可能存在晒退不完全的现象 (Smedley and Skirrow, 2020), 采用最小年龄模型 (MAM, minimum age model, Galbraith *et al.*, 1999) 获得等效剂量结果. BLA 剖面样品 OSL 年龄结果在误差范围内基本一致, 其中, BL-OSL-2 样品比 BL-OSL-3 样品的年龄略高, 其误差也较大, 一方面可能是由于该样品存在晒退不充分的颗粒, 虽然采用 MAM 统计方法, 但仍有轻微高估, 另一方面, 可能是由于

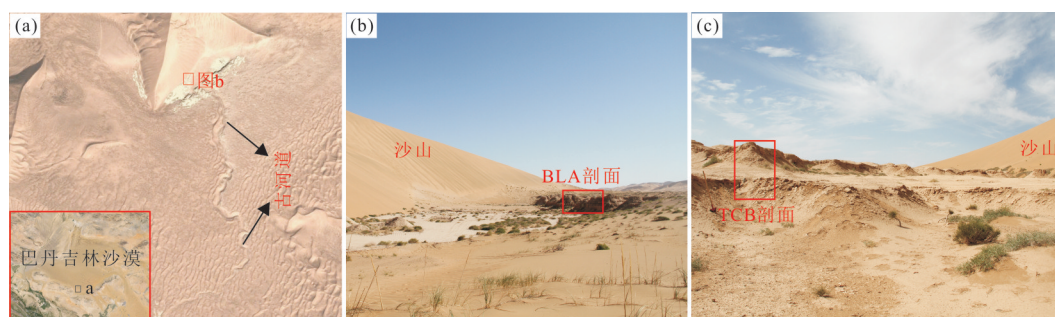


图5 巴丹吉林沙漠南缘冲洪积物位置图

Fig. 5 Locations of alluvial-diluvial deposits from the southern margin of Badain Jaran desert

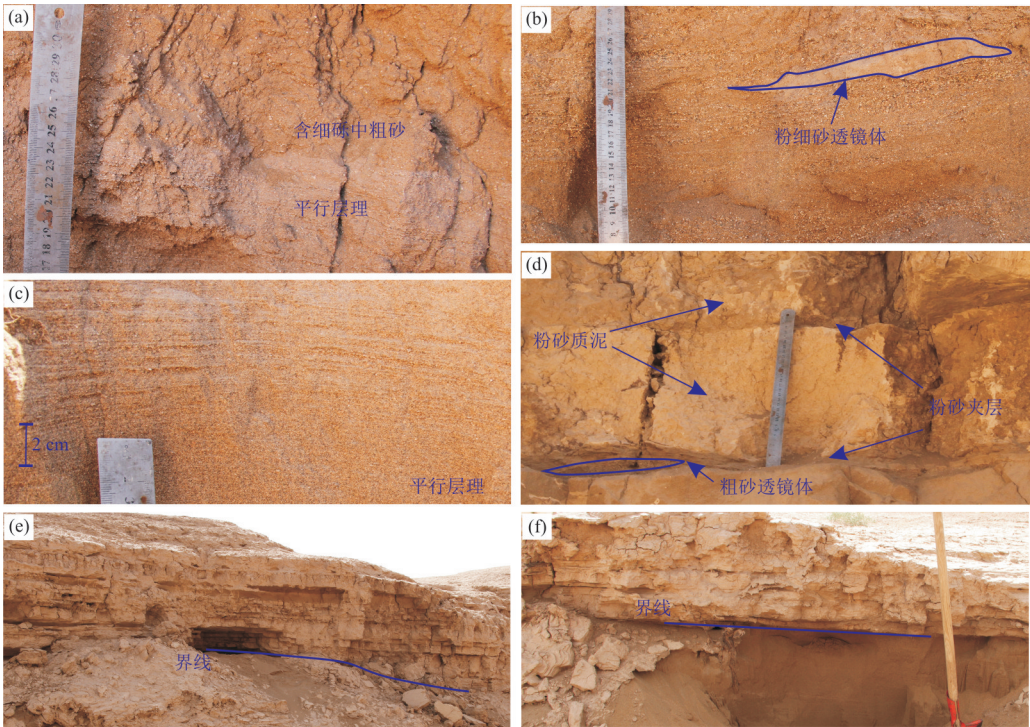


图 6 巴丹吉林沙漠南缘冲洪积物野外沉积特征照片

Fig.6 Field characteristic photos of alluvial-diluvial deposits from the southern margin of Badain Jaran desert

表 1 巴丹吉林沙漠南缘冲洪积物光释光(OSL)测年结果

Table 1 Results of OSL dating for alluvial-diluvial deposits from southern margin of Badain Jaran desert

样品号	深度 (m)	U (10 ⁻⁶)	Th (10 ⁻⁶)	K (%)	含水量 (%)	De (Gy)	OD (%)	De 统计 模型	Dose rate (Gy/ka)	年代 (ka)
BL-OSL-1	2.2	1.24±0.04	5.06±0.15	1.62±0.08	10±5	11.51±2.43	26.3	MAM	2.20±0.10	5.2±1.1
BL-OSL-2	3.93	1.34±0.04	6.10±0.18	1.49±0.07	10±5	12.77±2.13	24.8	MAM	2.13±0.10	6.0±1.0
BL-OSL-3	4.72	1.19±0.04	6.23±0.19	1.80±0.09	10±5	12.56±0.42	8.3	CAM	2.37±0.11	5.3±0.3
TC-OSL-1	3.60	1.24±0.04	5.10±0.15	1.54±0.08	10±5	13.83±1.99	23.8	MAM	2.10±0.10	6.6±1.0
TC-OSL-2	2.10	1.23±0.04	5.31±0.16	1.43±0.07	10±5	13.52±0.58	12.4	CAM	2.05±0.09	6.6±0.4

BL-OSL-3 样品所处位置的钍和钾富集而导致年龄低估,若采用 BL-OSL-2 样品的年剂量, BL-OSL-3 样品的年龄结果为 5.9 ± 0.3 ka, 与 BL-OSL-2 样品基本一致. 考虑到该剖面为洪水沉积, 认为晒退不完全导致的高估可能是更为主要的, 因此认为该剖面洪水沉积层形成年代约为 $5.3\sim5.2$ ka. TCB 剖面的两个年代结果均为 6.6 ka, 表明该剖面洪水沉积的形成年代约为 ~ 6.6 ka. 根据综合分析, 两个剖面反映出巴丹吉林沙漠南缘的冲洪积物沉积时间发生在中全新世 ($6.6\sim5.2$ ka), 且在洪水期沉积速率较快.

3.2 冲洪积沉积形成的气候背景

本文研究的 2 个剖面的沉积年代均为中全新世, 巴丹吉林沙漠及周边地区有关全新世气候、湖

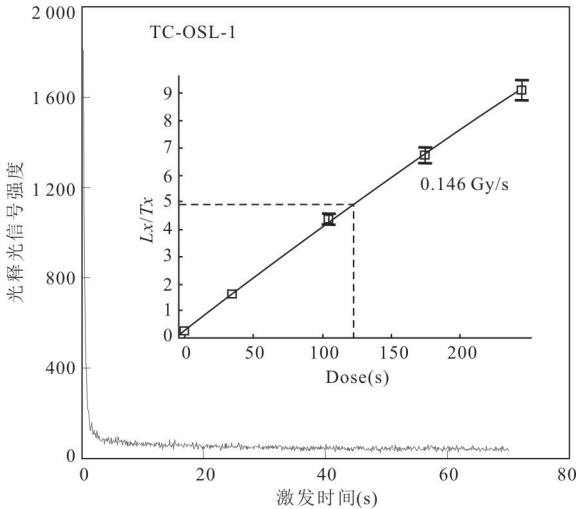


图 7 样品 TC-OSL-1 的生长曲线和衰减曲线

Fig.7 Growth curve and decay curve of sample TC-OSL-1

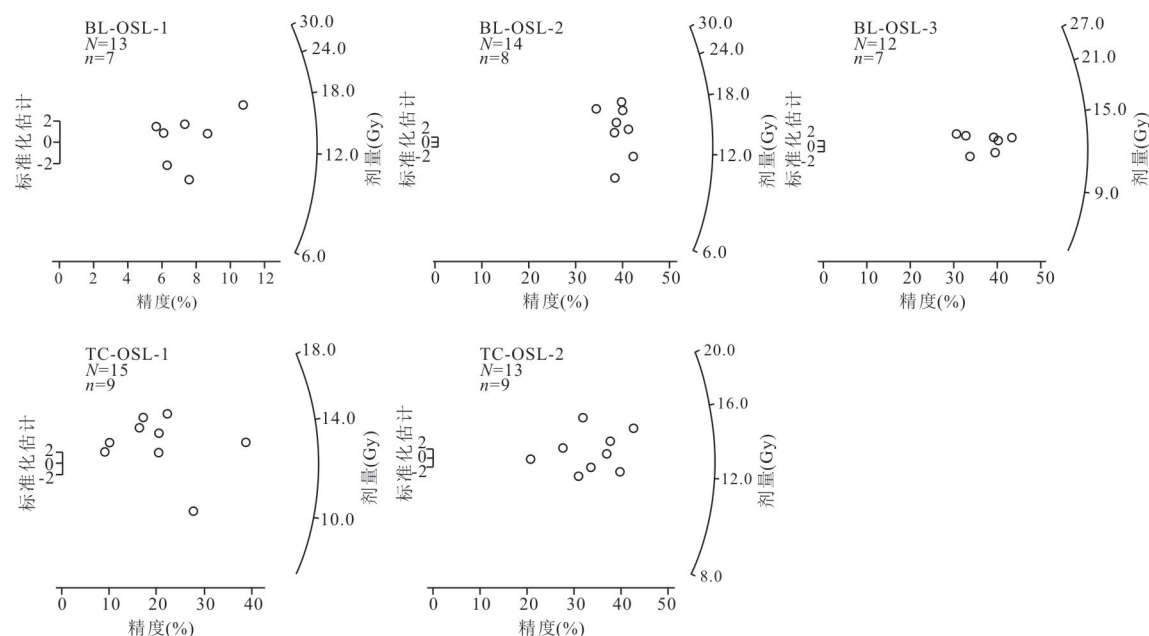


图8 OSL测年样品的等效剂量分布放射状图

Fig.8 Radio plot distribution of equivalent dose of OSL dating samples

N 为实测测片数; n 为获得有效De值的测片数(有效测片选取标准:循环比为0.9~1.1,回授率<5%)

泊演化的研究已经较为详细.沙漠内部现代湖泊岸边的古湖岸沉积能够重建地质时期湖泊水位变化,如杨小平等人根据沙漠南部的湖泊区的古湖岸沉积测年认为沙漠区在全新世开始时期较为湿润,全新世中期湖泊水位达到最大,一直持续到中全新世末期(Yang *et al.*, 2003, 2010).王乃昂等(2016)通过对沙漠南部的湖泊区进行地貌学、沉积学和生物遗迹的研究和 ^{14}C 测年,认为巴丹吉林沙漠全新世早期(11~10 ka)湖沼开始发育,在8.6~6.6 ka湖泊群达到了全新世最大高湖面,并于晚全新世(约3.5 ka至今)湖泊开始萎缩乃至干涸.高于现代湖泊水位的湖相沉积物的OSL年代也显示在早中全新世气候湿润,湖泊处于较高水位(Chen *et al.*, 2019).湖泊演化重建结果显示,全新世中期沙漠中湖泊处于较高水位,沙漠中的湖泊没有地表径流汇入,区域年降水较少,蒸发量很大,湖泊补给来源90%依靠地下水,说明在该时期湖泊的地下水补给量较高(王乃昂等, 2016).

钙质根管常被用作沙漠区气候环境重建, Liu(2012)对巴丹吉林沙漠南缘的钙质根管形态、结构和无机碳(TIC)测试,认为其主要形成于气候相对湿润的时期.巴丹吉林沙漠地区钙质根管的 ^{14}C 测年显示,在全新世中期(7~5 ka)是其形成的高峰时期(Li *et al.*, 2015a, 2015b).姜高磊等(2017)将前人研究中代表湿润气候条件下形成的植物钙质根

管、钙质胶结砂和高于现代湖水位的年代学结果进行了整理分析,将全新世气候分为3个阶段:早全新世相对湿润阶段、中全新世湿润鼎盛阶段和中晚全新世逐渐干旱阶段.最近, Ning *et al.* (2019)依据沙漠腹地干湖开挖剖面对全新世以来的气候环境演变进行了研究,认为7.2~5.6 ka达到了全新世以来气候最为湿润时期.巴丹吉林沙漠东南缘的查格勒布鲁剖面记录的气候信息显示在8~2.5 ka是全区全新世最为温暖湿润时期(董光荣等, 1995).腾格里沙漠边缘猪野泽古湖岸记录(Long *et al.*, 2012)和青土湖沉积记录(Zhao *et al.*, 2008)也显示全新世中期湿润的气候环境.根据水量平衡计算,巴丹吉林沙漠腹地湖泊接受地下水补给和大气降水补给的比例约为8:1,湖泊在全新世中期处于较高水位所反映的大气降水、地下水补给量增多,是区域气候变化导致的有效湿度增加的结果(王乃昂等, 2016),这与上文所述的全新世中期沙漠地区及周边地区的环境记录结果也较为一致.对沙漠高大沙山剖面进行了光释光测年显示沙山增长也主要发生在早中全新世气候湿润时期(Liu *et al.*, 2016b),沙山的生长可能阻挡了地表径流向沙漠前进,导致冲洪积物主要在沙漠的边缘出现,前人(高全洲等, 1995)也指出在相对暖湿的气候条件下,沙漠边缘向冲洪积平原的过渡地带地貌发育以冲积和洪积过程为主,山区沟谷流水在沙漠边缘地带积存、

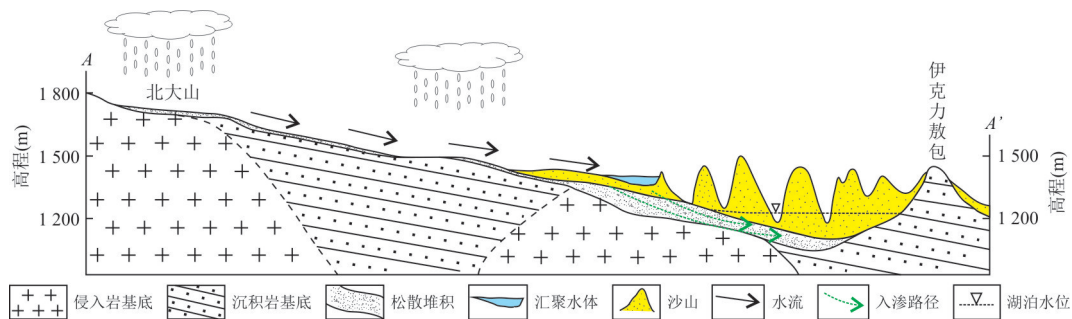


图9 巴丹吉林沙漠南缘区域降水间歇性补给沙漠区地下水示意图

Fig.9 Conceptual diagram of recharge to groundwater of desert area with region precipitation in southern margin of Badain Jaran desert

分散,流水携带的细粒物质在这里沉积.综上,沙漠南缘的水成沉积物主要形成于全新世中期气候湿润阶段.

3.3 巴丹吉林沙漠地下水的补给方式

巴丹吉林沙漠地下水来源争议较大,之前研究主要依靠同位素水文地质学、水化学等方法,如早期Chen *et al.* (2004)利用地下水的同位素数据提出巴丹吉林沙漠地区地下水依靠远源的祁连山地区的雪山融水通过深大断裂补给.近源补给学说主要根据沙漠南部剖面中的Cl元素质量平衡计算、浅层地下水的同位素和水化学数据,认为南部的雅布赖山和黑山头山第四纪晚更新世较冷(冰期)环境下形成的降水是沙漠区地下水的主要补给来源,最终排泄形成沙漠湖泊,部分浅层地下水还接受了现代降水和河流的入渗补给(Gates *et al.*, 2008a, 2008b).巴丹吉林沙漠地区现代降水观察表明降水的季节变率很大,年降水量往往由某些集中降水决定,具有高度的集中性(王乃昂等,2013),这种类型降水极易引发暂时性流水和局部洪流.根据植物钙质根管形成的时代及其所揭示的降水量阈值估算,巴丹吉林沙漠东南部在全新世中期(7.7~5.3 ka)古降水量可能达到了200 mm/a(王乃昂等,2016),在极为干旱的沙漠周缘地区全新世中期应该是间歇性河流和暂时性洪流高发的时期,补给量的增加也造成了沙漠南部中全新世大湖期的出现(王乃昂等,2016).巴丹吉林沙漠南缘的冲积和洪积沉积物,代表地质时期水文事件,说明在全新世中期沙漠的南缘地区存在有河流从南缘的山区(北大山)或区域性降水形成的间歇性河流汇入沙漠边缘地区.

基于上述分析,本文提出区域大气降水对巴丹吉林沙漠地下水的补给形式(图9):当气候湿润时期或降雨集中季节,沙漠边缘或邻近山区降雨形成

间歇性的河流,沿地势下降方向汇聚在沙山边缘,由于沙山的阻挡形成泥质粉砂、粘土等静水沉积;在沙漠边缘的低洼处,短暂的强降水形成局部洪流,汇入低洼处后形成泥质粉砂等沉积.汇聚产生的降水经地表的碎屑沉积或风积砂沉积入渗到沙漠腹地的湖泊区域进行地下水的补给.这种由区域降水形成的洪流或间歇性河流形成的“间歇性补给”在极为干旱的沙漠边缘地区较为常见,如非洲中南部的纳米比亚沙漠每年依靠几次上游山区降水形成暂时性的河流或洪流补给是该区沙漠区地下水补给的重要来源(Dahan *et al.*, 2008; Morin *et al.*, 2009; Greenbaum *et al.*, 2014).关于巴丹吉林沙漠地区,在地质历史时期这种区域降水的间歇性补给对沙漠区地下水补给的占有多大的贡献比例,现代的情况如何,这些问题还需要更多、更深入的研究工作.而且,考虑到在干旱区河流体系经常摆动,冲洪积物沉积在空间上具有很大的不一致性,今后还需对更多的剖面以及冲洪积物的整体空间分布特征进行研究.

4 结论

本文对巴丹吉林沙漠南缘两个典型的冲洪积物沉积剖面进行了沉积学特征分析和光释光年代学测试,结果显示两剖面分别为全新世中期(6.6~5.2 ka)的间歇性河流沉积和暂时性流水形成的洪泛沉积.在全新世的中期,巴丹吉林沙漠中湖泊处于较高水位,气候环境处于相对湿润阶段,该时期沙漠区大气降水和地下水补给量增加.结合本文研究的冲洪积物的沉积特征和地理位置分析,表明在气候湿润的地质时期沙漠南缘及山区的区域降水以暂时性洪流或间歇性河流的形式对巴丹吉林沙

漠地区地下水进行补给.这种形式的补给对沙漠区地下水的贡献比例在地质时期占到多少,现代情况如何,还需要更加深入的研究.

致谢:孟令群、曹乐、朱普诚、刘学全等参与野外调查与样品采集,王成敏帮助完成年代测试,毛欣对论文进行了有益的讨论,三位审稿专家对论文提出了有益的修改意见,在此一并表示感谢!

References

- Adamiec, G., Aitken, M., 1998. Dose-Rate Conversion Factors: Update. *Ancient TL*, 16(2): 37—50.
- Aitken, M.J., Xie, J., 1990. Moisture Correction for Annual Gamma Dose. *Ancient TL*, 8(2): 6—9.
- Chen, F. H., Yu, Z. C., Yang, M. L., et al., 2008. Holocene Moisture Evolution in Arid Central Asia and Its Out-of-Phase Relationship with Asian Monsoon History. *Quaternary Science Reviews*, 27(3/4): 351—364.
- Chen, J.S., Li, L., Wang, J.Y., et al., 2004. Groundwater Maintains Dune Landscape. *Nature*, 432(7016): 459—460. <https://doi.org/10.1038/432459a>
- Chen, T.Y., Lai, Z.P., Liu, S.W., et al., 2019. Luminescence Chronology and Palaeoenvironmental Significance of Limnic Relics from the Badain Jaran Desert, Northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 177: 240—249. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.03.024>
- Dahan, O., Tatarksky, B., Enzel, Y., et al., 2008. Dynamics of Flood Water Infiltration and Ground Water Recharge in Hyperarid Desert. *Ground Water*, 46(3): 450—461. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00414.x>
- Ding, H.W., Wang, G. L., 2007. Study on the Formation Mechanism of the Lakes in the Badain Jaran Desert. *Arid Zone Research*, 24(1): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Dong, G.R., Gao, Q.Z., Zou, X.Y., et al., 1995. Climate Changes at Southern Fringe of the Badain Jaran Desert since Pleistocene. *Chinese Science Bulletin*, 40(13): 1214—1218 (in Chinese).
- Dong, Z., Qian, G., Lü, P., et al., 2013. Investigation of the Sand Sea with the Tallest Dunes on Earth: China's Badain Jaran Sand Sea. *Earth-Science Reviews*, 120: 20—39. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.003>
- Duller, G.A.T., 2003. Distinguishing Quartz and Feldspar in Single Grain Luminescence Measurements. *Radiation Measurements*, 37(2): 161—165. [https://doi.org/10.1016/s1350-4487\(02\)00170-1](https://doi.org/10.1016/s1350-4487(02)00170-1)
- Durcan, J.A., King, G.E., Duller, G.A.T., 2015. DRAC: Dose Rate and Age Calculator for Trapped Charge Dating. *Quaternary Geochronology*, 28: 54—61. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2015.03.012>
- Galbraith, R.F., Roberts, R.G., 2012. Statistical Aspects of Equivalent Dose and Error Calculation and Display in OSL Dating: An Overview and Some Recommendations. *Quaternary Geochronology*, 11: 1—27. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2012.04.020>
- Galbraith, R. F., Roberts, R. G., Laslett, G. M., et al., 1999. Optical Dating of Single and Multiple Grains of Quartz from Jinnium Rock Shelter, Northern Australia: Part I, Experimental Design and Statistical Models. *Archaeometry*, 41(2): 339—364.
- Gao, Q.Z., Dong, G.R., Li, B.S., et al., 1995. Evolution of Southern Fringe of Badain Jaran Desert since Late Pleistocene. *Journal of Desert Research*, 15(4): 345—352 (in Chinese with English abstract).
- Gates, J.B., Edmunds, W.M., Darling, W.G., et al., 2008a. Conceptual Model of Recharge to Southeastern Badain Jaran Desert Groundwater and Lakes from Environmental Tracers. *Applied Geochemistry*, 23(12): 3519—3534. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.07.019>
- Gates, J. B., Edmunds, W. M., Ma, J. Z., et al., 2008b. Estimating Groundwater Recharge in a Cold Desert Environment in Northern China Using Chloride. *Hydrogeology Journal*, 16(5): 893—910. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0264-z>
- Greenbaum, N., Schwartz, U., Benito, G., et al., 2014. Paleohydrology of Extraordinary Floods along the Swakop River at the Margin of the Namib Desert and Their Paleoclimate Implications. *Quaternary Science Reviews*, 103: 153—169. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.08.021>
- Hu, W.F., Wang, N.A., Zhao, L.Q., et al., 2015. Water-Heat Exchange over a Typical Lake in Badain Jaran Desert, China. *Progress in Geography*, 34(8): 1061—1071 (in Chinese with English abstract).
- Huang, C.C., Pang, J.L., Zha, X.C., et al., 2011. Prehistorical Floods in the Guanzhong Basin in the Yellow River Drainage Area: A Case Study along the Qishuihe River Valley over the Zhouyuan Loess Tableland. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 41(11): 1658—1669 (in Chinese).
- Jiang, G.L., Nie, Z.L., Shen, J.M., et al., 2017. Research Progress of Quaternary Environment of Badain Jaran Desert. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 37(1): 141—149 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.L., Wang, N.A., Cheng, H.Y., et al., 2015a. Formation and Environmental Significance of Late Quaternary

- Calcareous Root Tubes in the Deserts of the Alashan Plateau, Northwest China. *Quaternary International*, 372: 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.11.021>
- Li, Z.L., Wang, N.A., Li, R.L., et al., 2015b. Indication of Millennial-Scale Moisture Changes by the Temporal Distribution of Holocene Calcareous Root Tubes in the Deserts of the Alashan Plateau, Northwest China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 440: 496–505.
- Liu, C., Liu, J., Wang, X., et al., 2016a. Analysis of Groundwater-Lake Interaction by Distributed Temperature Sensing in Badain Jaran Desert, Northwest China. *Hydrological Processes*, 30(9): 1330–1341.
- Liu, S.W., Lai, Z.P., Wang, Y.X., et al., 2016b. Growing Pattern of Mega-Dunes in the Badain Jaran Desert in China Revealed by Luminescence Ages. *Quaternary International*, 410: 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.048>
- Liu, Z., 2012. Plant Root Tube Fossils in the South Region of the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China, and Their Paleoenvironmental Interpretations. *Quaternary International*, 347: 284–285. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.08.749>
- Long, H., Lai, Z., Fuchs, M., et al., 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. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.05.014>
- Ma, N., Wang, N.A., Zhao, L.Q., et al., 2014. Observation of Mega-Dune Evaporation after Various Events in the Hinterland of Badain Jaran Desert. *Chinese Science Bulletin*, 59(7): 615–622 (in Chinese).
- Morin, E., Grodek, T., Dahan, O., et al., 2009. Flood Routing and Alluvial Aquifer Recharge along the Ephemeral Arid Kuiseb River, Namibia. *Journal of Hydrology*, 368(1–4): 262–275. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.015>
- Murray, A.S., Wintle, A.G., 2000. Luminescence Dating of Quartz Using an Improved Single-Aliquot Regenerative-Dose Protocol. *Radiation Measurements*, 32(1): 57–73. [https://doi.org/10.1016/s1350-4487\(99\)00253-x](https://doi.org/10.1016/s1350-4487(99)00253-x)
- Ning, K., Wang, N.A., Lv, X.Y., et al., 2019. A Grain Size and *n*-Alkanes Record of Holocene Environmental Evolution from a Groundwater Recharge Lake in Badain Jaran Desert, Northwestern China. *The Holocene*, 29(6): 1045–1058. <https://doi.org/10.1177/0959683619831430>
- Prescott, J.R., Hutton, J.T., 1994. Cosmic Ray Contributions to Dose Rates for Luminescence and ESR Dating: Largedepths and Long-Term Time Variations. *Radiation Measurements*, 23(2/3): 497–500.
- Smedley, R.K., Skirrow, G.K.A., 2020. Luminescence Dating in Fluvial Settings: Overcoming the Challenge of Partial Bleaching. In: Herget, J., Fontana, A., eds., *Palaeohydrology. Geography of the Physical Environment*. Springer, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23315-0_8
- Wang, F., Sun, D., Chen, F., et al., 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. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.03.011>
- Wang, N.A., Ma, N., Chen, H.B., et al., 2013. A Preliminary Study of Precipitation Characteristics in the Hinterland of Badain Jaran Desert. *Advances in Water Science*, 24(2): 153–160 (in Chinese with English abstract).
- Wang, N.A., Ning, K., Li, Z.L., et al., 2016. Holocene High Lake Levels and Pan-Lake Period on Badain Jaran Desert. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 46(8): 1106–1115 (in Chinese).
- Wintle, A.G., Murray, A.S., 2006. A Review of Quartz Optically Stimulated Luminescence Characteristics and Their Relevance in Single-Aliquot Regeneration Dating Protocols. *Radiation Measurements*, 41(4): 369–391. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2005.11.001>
- Yang, X., Liu, T., Xiao, H., 2003. Evolution of Megadunes and Lakes in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China during the Last 31,000 Years. *Quaternary International*, 104(1): 99–112. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00138-6](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00138-6)
- Yang, X., Ma, N., Dong, J., et al., 2010. Recharge to the Inter-Dune Lakes and Holocene Climatic Changes in the Badain Jaran Desert, Western China. *Quaternary Research*, 73(1): 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.10.009>
- Zhao, Y., Yu, Z., Chen, F., et al., 2008. Holocene Vegetation and Climate Change from a Lake Sediment Record in the Tengger Sandy Desert, Northwest China. *Journal of Arid Environments*, 72(11): 2054–2064. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.06.016>
- Zhou, Y.Y., Wang, X.S., 2018. A Monte-Carlo Simulation Based Assessment of the Vertical Soil Moisture Distribution and Infiltration Rate in the Vadose Zone of the Badain Jaran Desert, China. *Earth Science*, 43(Suppl. 1): 326–338 (in Chinese with English abstract).
- Zou, L., Liu, P.H., Tian, Z.H., et al., 2019. Late Paleozo-

ic Metamorphic Complex of Precambrian Metamorphic Basement from Eastern Alxa Block: New Evidence from Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of Boluositanmiao Complex. *Earth Science*, 44(4): 1406–1423 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 丁宏伟,王贵玲,2007. 巴丹吉林沙漠湖泊形成的机理分析. 干旱区研究,24(1): 1–7.
- 董光荣,高全洲,邹学勇,等,1995. 晚更新世以来巴丹吉林沙漠南缘气候变化. 科学通报,40(13):1214–1218.
- 高全洲,董光荣,李保生,等,1995. 晚更新世以来巴丹吉林南缘地区沙漠演化. 中国沙漠,15(4):345–352.
- 胡文峰,王乃昂,赵力强,等,2015. 巴丹吉林沙漠典型湖泊湖气界面水—热交换特征. 地理科学进展,34(8): 1061–1071.
- 黄春长,庞奖励,查小春,等,2011. 黄河流域关中盆地史前大洪水研究——以周原漆水河谷地为例. 中国科学(D辑:

地球科学),41(11): 1658–1669.

- 姜高磊,聂振龙,申建梅,等,2017. 巴丹吉林沙漠第四纪环境研究现状. 海洋地质与第四纪地质,37(1): 141–149.
- 马宁,王乃昂,赵力强,等,2014. 巴丹吉林沙漠腹地降水事件后的沙山蒸发观测. 科学通报,59(7): 615–622.
- 王乃昂,马宁,陈红宝,等,2013. 巴丹吉林沙漠腹地降水特征的初步分析. 水科学进展,24(2):153–160.
- 王乃昂,宁凯,李卓仑,等,2016. 巴丹吉林沙漠全新世的高湖面与泛湖期. 中国科学(D辑:地球科学), 46(8): 1106–1115.
- 周燕怡,王旭升,2018. 巴丹吉林沙漠包气带水垂向分布和下渗的 Monte-Carlo 模拟评估. 地球科学,43(增刊1): 326–338.
- 邹雷,刘平华,田忠华,等,2019. 东阿拉善地块前寒武纪变质基底中晚古生代变质杂岩:来自波罗斯坦庙杂岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的新证据. 地球科学,44(4): 1406–1423.