

赵晖,杨宏宇,王兴繁,等.巴丹吉林沙漠典型沉积物年代学研究评述[J].中国沙漠,2022,42(1):57-65.

巴丹吉林沙漠典型沉积物年代学研究评述

赵晖¹,杨宏宇^{1,2},王兴繁³,汪克奇^{1,2}

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化重点实验室,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学 资源与环境学院,北京 100049; 3.甘肃农业大学 水利水电工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:巴丹吉林沙漠内几种典型近地表沉积物,如风成沙、湖相沉积、冲洪积物等构成了巴丹吉林沙漠复杂多变的地貌景观。这些典型沉积物的年龄是探讨巴丹吉林沙漠地貌过程及其机理的最直接证据和基础数据。前人发表的这几种典型沉积物年龄,主要涉及380余个¹⁴C年龄和释光年龄,这些数据涵盖了170 ka至今的大部分时段。其中12 ka以来年龄数据占55%,说明巴丹吉林沙漠目前的近地表沉积物主要发育于全新世以来。在12 ka以来的全新世,对风成沙沉积来说,近1 ka以来的近现代年龄数量占绝对优势,与沙漠内风成沙不断流动一致;而钙质根管与湖相沉积主要分布在距今6—9 ka;沙漠边缘的冲洪积物则主要出现在距今5—7 ka,这与季风边缘中全新世暖湿的气候条件一致。在170—12 ka这一时段,洪积物由于目前研究较少,年龄分布没有规律;钙质根管由于测年手段主要使用¹⁴C方法,年龄主要分布在35 ka左右的饱和年龄;湖相沉积物主要分布在90—120 ka和40—70 ka两个时段;而沙漠内的风成沙年代主要均匀分布在45—95 ka。本文讨论了这些年龄分布规律的意义以及今后巴丹吉林沙漠典型沉积物测年应注意的问题。

关键词:巴丹吉林沙漠;典型沉积物;年代学

文章编号: 1000-694X(2022)01-057-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00196

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

巴丹吉林沙漠位于中国内蒙古自治区西部,紧邻河西走廊,面积约55.23万km²,是中国第二大流动性沙漠(图1)^[1]。巴丹吉林沙漠东、南、西方向被山地包围,总体上来说,巴丹吉林沙漠属于阿拉善台地中的凹陷盆地。该沙漠以湖泊和高大沙山共存的地貌景观而闻名。数百座高度大于100 m的横向沙山或复合型沙山分布在沙漠东南部。在这些高大沙山的低地,分布着100多个不同面积(数百平方米至1 km²)和不同矿化度(0.01—345.0 g·L⁻¹)的湖泊^[2-3]。沙漠内降水稀少,多年平均降水量从沙漠东南部(118 mm)向西北(37 mm)递减,蒸发强烈,潜在蒸发量可达4 000 mm^[4-6]。沙漠内的降水不足以抵消巨大的蒸发而维持湖泊的存在,湖泊主要接受地下水的补给,很多沙漠湖泊中心和边缘可见泉水出露^[7]。沙漠内终年盛行西北风和西风,年平均风速3.0—4.5 m·s⁻¹。

这种奇特的沙山-湖泊地貌景观是干旱区沙漠地表过程长期演化的结果。巴丹吉林沙漠从周边山地到凹陷盆地中心形成剥蚀山地、洪积扇、高大沙山等各类型沙丘、平沙地、风蚀洼地、湖泊等多种地貌景观。巴丹吉林沙漠边缘分布有多处冲洪积物风蚀/水蚀残丘,形成典型的雅丹地貌。这些雅丹地貌是周边山区洪水进入沙漠后经过风蚀/水蚀的洪积物尾间沉积残余^[8]。沙漠内部的各类型沙丘是风沙相互作用的结果,大量的风沙沉积记录了沙漠与沙山的地貌过程^[9-10]。高大沙山底部、平沙地和风蚀洼地内灌丛植被发育良好的地方往往可以发现钙质根管,钙质根管是过去植物根部黏结的沙物质钙化后的残留;研究者认为高大沙山上的钙质根管代表了过去气候环境良好,植被发育,同时沙山固定的时期^[11-12]。现代湖泊周边往往发育古湖岸堤,现代湖泊的湖相沉积物和湖岸堤沉积记录指示了现代湖泊出现和湖泊水位演化的历史^[13-14]。沙漠

收稿日期:2021-07-02; 改回日期:2021-07-16

资助项目:国家自然科学基金项目(41771016)

作者简介:赵晖(1973—),男,山西忻州人,研究员,主要从事释光年代学和环境演化研究。E-mail: hzhao@lzb.ac.cn

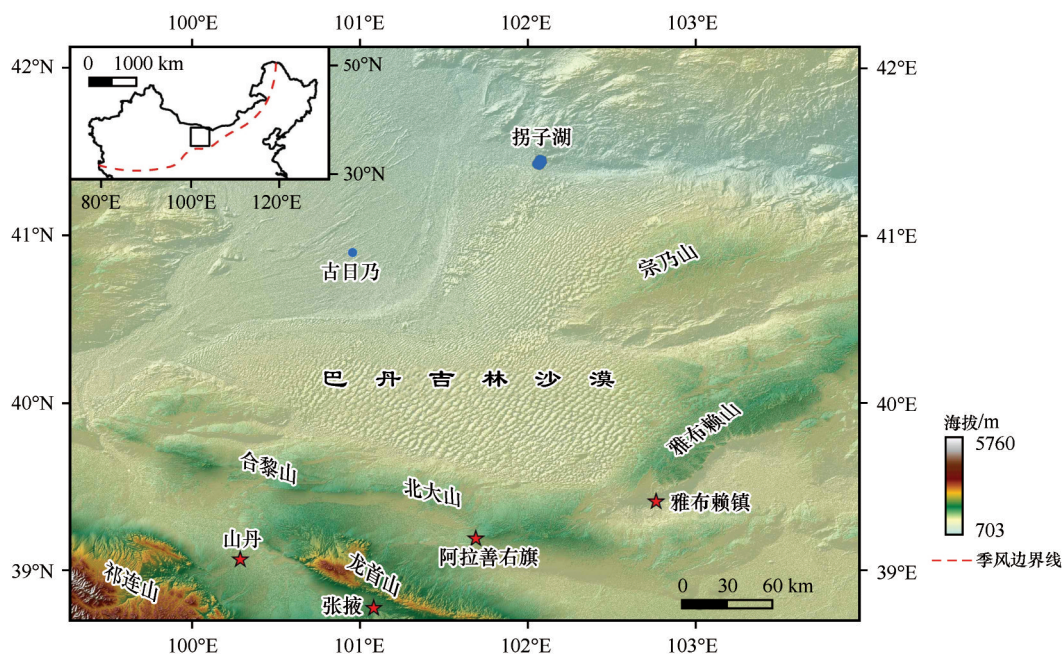


图1 巴丹吉林沙漠区域位置和地形

Fig.1 Location and topographic map of Badain Jaran Desert

内部高大沙山之间还可以发现过去古湖泊遗留的湖相沉积物^[15-16],暗示这些区域曾经发育过高湖面的古湖泊。巴丹吉林沙漠内的这些典型沉积物构成了沙漠内复杂多变的地貌景观,同时它们记录着这些沙漠地貌景观的地貌过程。而这些沉积物的年龄则是地貌过程直接的证据和探讨地貌过程机制的基础数据。

前人已经对巴丹吉林沙漠典型沉积记录的年龄开展了广泛研究,以期回答巴丹吉林沙漠地貌过程科学问题。目前测量较多的是沙漠内部最为常见的风成沙和湖泊沉积物。早期的研究通过测量古风成沙的年龄,认为巴丹吉林沙漠风沙地貌景观最早形成于中更新世晚期到晚更新世早期^[17-19]。最新的丘间地长钻孔资料底部的风成沙年龄表明巴丹吉林沙漠形成于约1100 ka之前,长钻中部的2个主要湖相沉积层则表明在距今500 ka和100 ka的两个主要泛湖期^[20]。孙培善等^[21]认为巴丹吉林沙漠高大沙山地貌的堆积应自晚更新世末期至全新世初期开始,盛行期是在全新世中期至现代。而闫满存等^[22]通过热释光(TL)对古风成沙沉积的测量推测古沙山形成于末次间冰期以前的早中更新世,而新沙山形成于末次冰期以来。最新的报道使用光释光(OSL)测年方法,测量采自沙漠东部某一约100 m高沙山迎风坡上湿沙层的年龄均为全新世时期,从而认为所研究的沙山形成于全新世^[23]。前人

基于巴丹吉林沙漠内的古湖岸堤沉积推断,认为现代湖水可能是过去湖泊的残留^[24-25],湖水的面积和水位随着气候的变化而波动^[26]。湖相沉积物年代学结果表明在晚更新世和全新世早期和中期,巴丹吉林沙漠地区气候温暖湿润,地下水和地表水充沛,普遍存在较高湖面^[19,27-28]。现代湖泊水位下降是因为晚全新世夏季风的衰退导致降水减少^[14,26,29]。此外,虽然巴丹吉林沙漠边缘分布有多处洪积物残余的雅丹地貌,可是对这些洪积物的研究才刚刚起步,仅有零星成果^[8,30]。对于钙质根管的研究已经开展得较为充分,前人通过钙质根管的年龄讨论巴丹吉林沙漠有效湿度和地下水补给的变化^[31-33]。

综上所述,目前对于巴丹吉林沙漠地貌过程和形成机制存在一定争论,这主要是由于各种典型沉积物年代学结果存在差异。对某些典型沉积物的研究也处于起步阶段。本文将梳理目前发表的巴丹吉林沙漠几种典型沉积物年代学结果,通过它们在时间序列上的分布规律和分布频率,讨论目前各典型沉积物年代学研究进展与存在问题。

1 数据与方法

本文共梳理目前发表的包含巴丹吉林沙漠主要沉积物年代学结果的文献共24篇(表1),这些文献中对沉积物种类以及沉积物年龄的表征意义都

有明确描述。包括早期热释光(TL)年龄数据 20 个,近期光释光(OSL)年龄 267 个和 ^{14}C 年龄 94 个。特别的,陈天源^[34]博士论文中应用光释光方法大规模地测量了沙漠中风成沙和湖相沉积物,包括年龄数据 195 个(表 1)。该论文中对这 195 个年龄数据分布规律进行了分析,但是由于论文主要期望论证沉积物年龄反映的地貌过程与冰期/间冰期气候变化之间的关系,忽略了不同沉积物地貌过程的不同,因此显得论证过程证据不足。本文将对所有文献梳理出的 381 个年龄数据的分布频率进行总结,将主要对湖相沉积物、风成沉积物、钙质根管和洪积物分类别进行总结。

这些沉积物年龄最老的大约 170 ka,最年轻的

是几百年以来的近现代沉积物。本文将几种典型沉积物的所有年龄按照 5 ka 间距,统计所有年龄的频率直方图(图 2)。由图 2 可以发现全新世(<10 ka)年龄 200 余个,占有所有年龄数据超过 50%,这样一方面老于 10 ka 的年龄数据的分布规律被掩盖;另一方面全新世以来年龄分布规律由于统计间距太大而没有显示。因此,将所有年龄按照小于 12 ka 的 214 个数据一组,1 ka 间距统计其频率直方图;大于 12 ka 的 167 个数据一组,5 ka 间距重新统计其频率直方图,以期发现不同沉积物年龄在不同时期的分布规律。

2 结果与分析

从几种典型沉积物所有年龄的频率分布可以看出,目前研究比较多的是风成沙沉积和湖相沉积,本文梳理的 381 个数据,总计有 321 个数据是来自风成沙和湖相沉积,钙质根管与洪积物年龄都分别不到 40 个,说明目前研究的重点集中在风成沙和湖相沉积这两种巴丹吉林沙漠中最典型最常见的沉积物(图 2)。风成沙与湖相沉积物的年龄也是破解巴丹吉林沙漠地貌过程的关键。然而,从图 2 也可以看出,超过 50% 的年龄数据都分布在小于 10 ka 的年龄范围内,其他年龄分布在 170—10 ka,由于 10 ka 以来分布频率过高,图 2 中很难看出 170—10 ka 年龄分布规律。阅读表 1 中文献可以发现,绝大部分的沉积物样品都采集自沙漠近地表,这一方面说明现在巴丹吉林沙漠近地表地貌绝大部分是发育于全新世以来;另一方面说明巴丹吉林沙漠近地表能发现的最老沉积物发育于 170 ka。我们将所有年龄分为 12 ka 以来和 170—12 ka 两组分别讨论。

2.1 12 ka 以来年龄分布规律

选择年龄小于 12 ka,按照 1 ka 间隔作全新世以来 4 种典型沉积物频率直方图(图 3)。可以看出 130 个湖相沉积物分布规律最为明显。湖相沉积物从距今 11 ka 左右开始逐步增加,7—9 ka 频率最高,然后逐步减少,特别是 4 ka 之后急剧减少,至距今 1 ka 区间又有所增加。这说明在距今 4—11 ka 的早中全新世,湖相沉积物数量最多,在那一时期湖泊广泛分布在沙漠中,这与 Wang 等^[13]的研究相吻合,在早中全新世,位于季风边缘区的巴丹吉林沙漠气候暖湿,湖泊广泛发育;而在距今 4 ka 之后,亚洲季风减弱,沙漠气候转为冷干,沙漠湖泊水位降低,湖

表 1 本文所用文献与数据				
Table 1 Literature and data used in this paper				
文献	沉积物类型	OSL 年龄 /个	^{14}C 年龄 /个	TL 年龄 /个
Liu 等 ^[23]	风成沙	4	0	0
Yang 等 ^[29]	风成沙	0	2	4
Wang 等 ^[20]	风成沙,湖相	5	0	0
闫满存等 ^[35]	风成沙,钙质根管	0	5	5
Wang 等 ^[36]	风成沙	21	0	0
陈天源 ^[34]	风成沙,湖相,洪积物	195	0	0
Yang ^[37]	风成沙	0	0	7
杨小平 ^[38]	钙质根管 s	0	4	0
Li 等 ^[31]	钙质根管	0	15	0
Li 等 ^[32]	钙质根管	0	1	0
陈建生等 ^[33]	钙质根管	0	6	0
Sun 等 ^[11]	钙质根管	0	6	0
闫满存等 ^[22]	湖相	0	0	1
Wang 等 ^[13]	湖相	8	16	0
白旻等 ^[39]	湖相	4	0	0
Yang 等 ^[14]	湖相	0	9	0
Yang 等 ^[27]	湖相	0	3	2
Gao 等 ^[40]	湖相	0	13	1
Hartmann 等 ^[41]	湖相	0	10	0
李保生等 ^[42]	湖相	0	4	0
Zhao 等 ^[15]	湖相	7	0	0
范小露等 ^[43]	湖相	3	0	0
姜高磊等 ^[8]	冲洪积	5	0	0
Yang 等 ^[30]	冲洪积	15	0	0

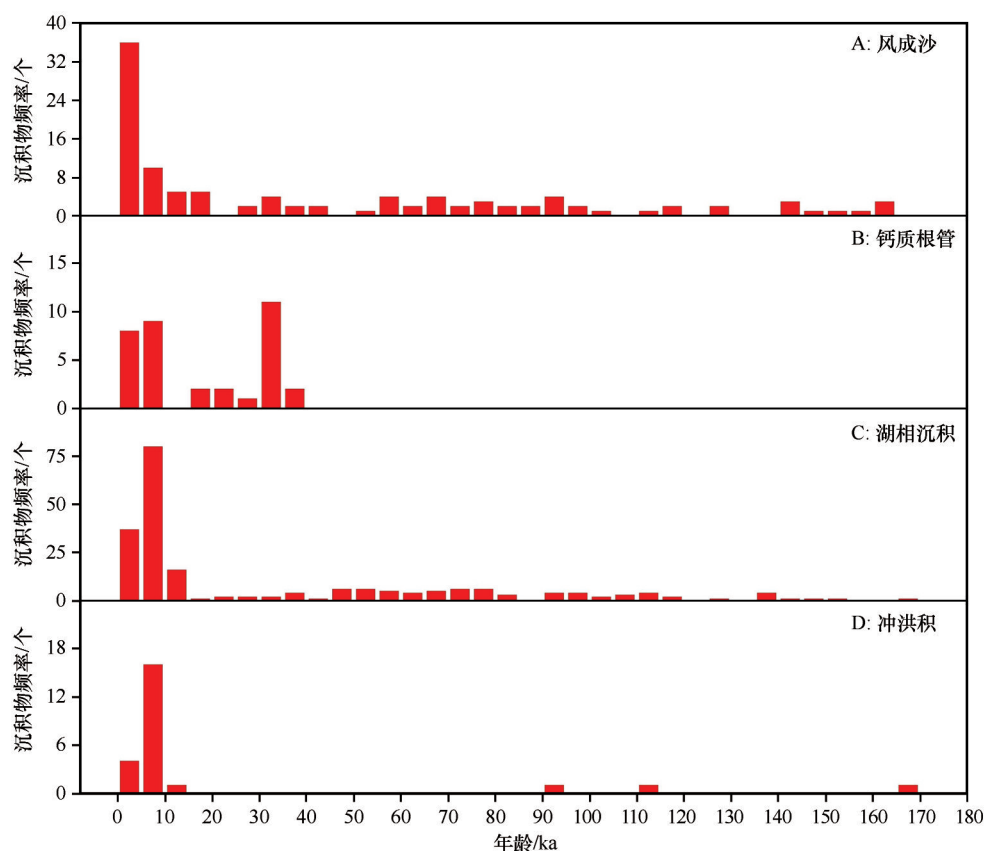


图2 4种典型沉积物所有年龄的频率分布

Fig.2 The frequency counts of four typical kinds of sediments including all data

相沉积物数量也相应减少。距今1 ka以来的近现代湖相沉积增加与研究剖面普遍采集湖泊沉积表层样品相关。

而47个风成沙沉积物,有27个沉积物年龄分布在小于1 ka区间(图3A),说明现代沙漠近地表风成沙主要是距今数百年的近现代沉积物,这与巴丹吉林沙漠持续不断的风沙相互作用相一致。在3—12 ka,风成沙主要沉积于4—7 ka,在湖泊最为发育的7—9 ka,很可能沙漠风沙活动受到抑制,导致风沙沉积数量较少。湖泊沉积物数量开始逐步减少的7—4 ka,风沙活动开始逐步增强,沙漠内风成沙地层开始更多地发育形成。

而17个钙质根管年龄,在近1 ka以来没有出现(图3B),说明钙质根管的发育可能需要一定时间,钙质根管主要出现在4—5 ka和7—8 ka,由于钙质根管主要采集自高大沙山底部和平沙地植被发育较好的区域,其较多发育在沙丘固定和降雨量较为丰沛时期^[11],因此钙质根管出现的时期与湖泊较为发育和高大沙山风成沙沉积年龄频率较高时期较为一致。当然钙质根管在全新世只有17个年龄,说

明对其研究还较为缺乏,只有获取更多的年龄结果才能更好地讨论其年龄的分布规律。

沙漠边缘的洪积物年龄主要来自3篇文献研究的3个剖面共约20个年龄数据,这些年龄数据分布较为规律,大部分出现在5—7 ka。这说明沙漠周边山地全新世洪水主要发生在距今5—7 ka,而山地洪水由山地降水引起,说明季风边缘区西北部沙漠的全新世降水量最高时期在距今5—7 ka。这与毛乌素沙地古土壤集中发育时期^[44-45]与腾格里沙漠^[46-47]研究揭示的季风边缘区降水量最高时期相一致。沙漠内湖相沉积物(7—9 ka)和冲洪积物(5—7 ka)在全新世期间出现的年龄频率的最高峰不一致(图3C, D),似乎暗示巴丹吉林沙漠湖水有区域降水之外的其他补给源。

2.2 170—12 ka 年龄分布规律

将所有大于12 ka的几种典型沉积物年龄按照5 ka间隔做频率直方图(图4)。从图4D可以看出,对于冲洪积物来说没有展示出分布规律,目前仅有2篇文献涉及到大于12 ka的5个年龄,这说明由于

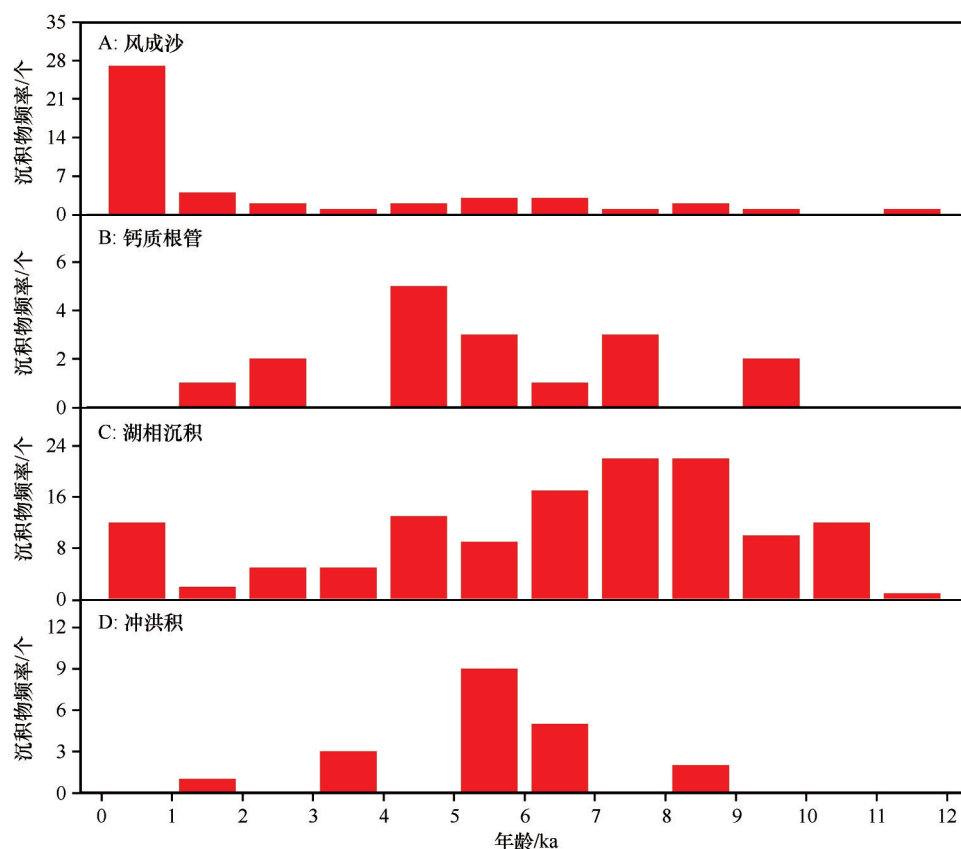


图3 4种典型沉积物0—12 ka年龄段内的频率分布

Fig.3 The frequency counts of four typical kinds of sediments during 0–12 ka

目前对沙漠边缘区的洪积物研究过少,还无法通过其年龄分布频率总结规律。对于>12 ka的钙质根管年龄(图4B),虽然整理到18个年龄数据,但是由于测年方法均为 ^{14}C 测年,这种方法的测年上限为40 ka^[48],因此可以看到钙质根管所有年龄都小于40 ka,特别是最高年龄频率出现在30—35 ka。从风成沙普遍出现50—170 ka的年龄结果,钙质根管有发育在这些风成沙中的潜力,但是钙质根管 ^{14}C 年龄的频率峰出现在35ka左右,说明很可能有些钙质根管的真实年龄老于35 ka,而测年方法制约了获取这些钙质根管的真实年龄。可以尝试使用OSL测年方法直接测量这些年龄老于35 ka的钙质根管上黏合的石英或钾长石矿物颗粒,或许可以得到钙质根管的真实年龄。

湖相沉积物大于12 ka的年龄有84个,这些年龄在45—80 ka和90—110 ka分布较多。最近的研究表明中国西北部沙漠晚更新世MIS5时期曾经发育高湖面^[49],本文梳理的沙漠湖泊年龄中有较多年龄分布在90—110 ka的MIS5时期,这与之前的研究相吻合。然而分布频率最高的年龄区间是

45—85 ka,这一区间属于MIS3–MIS4,湖相沉积地层发育的最高峰出现在气候干冷的冰期,这与普遍的认识不符。由于整理的这些湖相沉积年龄中仅有7个是 ^{14}C 年龄,其他均为OSL和TL年龄,因此由于 ^{14}C 年龄上限造成的年龄在较低区间的分布不是主要原因。这里有两种可能,一是确证这些年龄是可信的,那么就需要对湖泊在MIS 3–MIS 4阶段大规模存在于巴丹吉林沙漠中的机制重新思考,什么原因造成在气候干冷时期,沙漠中有大规模湖泊存在。第二种可能是这些早期使用石英OSL测年的结果可能存在年龄低估。对巴丹吉林沙漠一处湖相沉积序列分别使用石英OSL测年和高温钾长石pIRIR测年发现,由于石英热不稳定性^[50]导致石英OSL测年获取的70 ka左右的年龄低估,使用pIRIR测年得到年龄为90—110 ka^[15–16]。那么就需要对所有老于45 ka的年龄重新评估,可能湖相沉积年龄真实的频率峰应该出现在MIS5阶段。

60个风成沙年龄在170—12 ka区间的分布较为平均,除了在50—60 ka仅有1个年龄,在100—140 ka仅有6个数据,在其他年龄区间都有较均匀

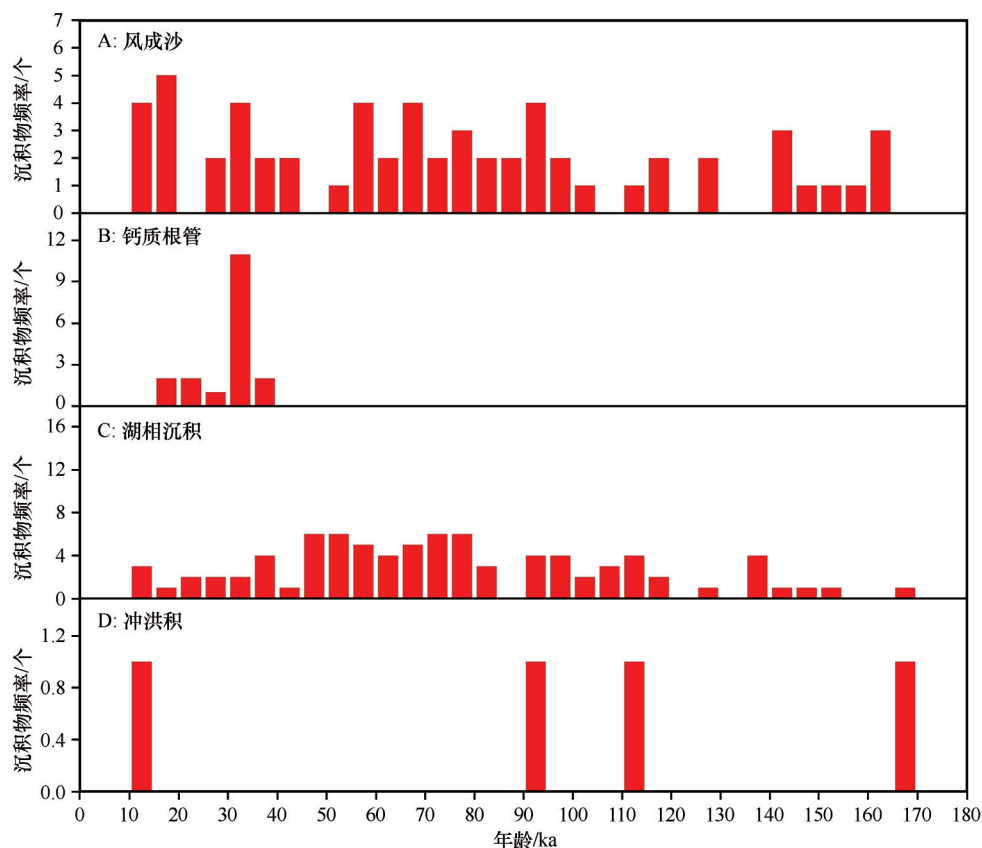


图4 4种典型沉积物12—170 ka年龄段内的频率分布

Fig.4 The frequency counts of four typical kinds of sediments during 12–170 ka

的分布,其中超过27个年龄分布在50—100 ka。从年龄数据分布来看,沙漠内部老于12 ka的风成沙在各时期都有发育,由于巴丹吉林沙漠典型的高大沙山地貌,这些风成沙大部分来自高大沙山,因此巴丹吉林沙漠高大沙山年龄分布在170 ka以来各时段,在50—100 ka广泛发育。从风成沙和湖相沉积年龄同时分布在170—12 ka可以看出,巴丹吉林沙漠高大沙山与沙漠湖泊伴生的景观很可能从170 ka以来就一直存在。但是仅从高大沙山近地表获取的大量风成沙沉积年龄还是无法重建高大沙山的地貌过程。

3 问题与展望

从本文梳理的巴丹吉林沙漠4种典型沉积物年龄在170 ka以来的分布规律可以看出,目前对于湖相沉积和风成沙沉积获取的年龄数据较多,其他沉积物年龄数据还较少。目前湖相沉积的研究已经较为充分,其分布规律已经较为明显,需要进一步开展的工作是将新的高温钾长石pIRIR测年方法应用到老于45 ka的样品中去,以获取更为可靠的年

龄。对于沙漠内风成沙年龄测试结果也已较多,但是由于所有的年龄结果都是沙漠和高大沙山上近地表获取,用这些年龄很难完全解释高大沙山的地貌过程,还需要获取高大沙山内部沉积记录年龄,才能完整解释高大沙山的形成过程。从影像上可以发现洪积物经过水蚀/风蚀形成的雅丹地貌在巴丹吉林沙漠西南缘广泛存在^[30],这些雅丹地貌是过去山地洪水沉积物尾间沉积物的残余,研究这些洪积物可以获得过去山地降水的历史,并且进一步为山地洪水补给沙漠地下水提供依据。然而目前对沙漠边缘的雅丹地貌研究较少,仅有3篇文献获取了30个年龄数据,特别是大于12 ka的年龄区间仅有4个年龄数据,对于了解山地洪水的全貌远远不够,还需加强对沙漠边缘洪积物残余的调查和研究。对于钙质根管目前已开展较多工作,对于全新世以来样品已有较好规律性,但是对于>12 ka的¹⁴C年龄在35 ka左右有一个频率峰值,暗示这些样品真实年龄可能超过¹⁴C测年方法的上限。今后可能需探索使用OSL方法测试钙质根管黏附的石英或钾长石矿物颗粒获取其更为可靠的年龄。

此外,巴丹吉林沙漠中还有一些典型的近地表沉积物几乎没有测年研究数据。例如对于沙漠湖泊泉水附近形成的泉华,还没有展开研究和年代测试的成果。这些泉华是地下承压水上升到地表后,由于温度或压力减小,地下水溶解的碳酸钙结晶的产物^[51-52]。这些泉华的年龄记录了沙漠地下承压水上升到地表的时间,将为理解沙漠地下水来源提供基础数据。由于沙漠中泉华结晶时可能有风成沙落入结晶体,因此使用OSL测年方法测量这些落入泉华的石英或者钾长石颗粒有可能获取沙漠泉华年龄。最近,应用TL信号测量方解石等碳酸钙晶体的研究取得进展^[53],将这一方法应用于泉华和钙质胶结层年龄测定可能是新的研究方向。

4 结论

本文梳理了巴丹吉林沙漠目前发表的4种典型沉积物——湖相沉积物、风成沙、钙质根管和洪积物的年龄数据。380余个年龄数据显示目前巴丹吉林沙漠内近地表沉积物主要是170 ka以来发育,其中超过50%的年龄数据分布在12 ka以来。湖相沉积研究的较为充分,其在12 ka以来的分布规律已经较为明显,而老于12 ka的年龄,尤其是早期获取的45 ka左右年龄需要进一步确证。风成沙年龄暗示目前高大沙山上除了大量现代风成沙沉积,在其他各年龄阶段分布较均匀,尤其50—100 ka较多,但是要阐明高大沙山地貌过程还需获取沙山内部沉积物年龄。广泛分布于沙漠边缘的冲洪积物目前研究较为不充分,仅有几个剖面年龄数据,尤其老于12 ka的年龄数据仅有4个,后续应加强对这类沉积物的研究。钙质根管的¹⁴C测年方法制约了获取老于40 ka样品的真实年龄;后续可以尝试使用OSL测年方法获取钙质根管与泉华年龄。目前还需被关注的泉华等碳酸钙结晶可能是沙漠中值得被进一步研究的地表沉积物。

参考文献:

- [1] 朱金峰,王乃昂,陈红宝,等.基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析[J].地理科学进展,2010,29(9):1087-1094.
- [2] 朱震达,吴征,刘恕.中国沙漠概论[M].北京:科学出版社,1980.
- [3] Dong Z, Qian G, Lv P, et al. Investigation of the sand sea with the tallest dunes on Earth: China's Badain Jaran Sand Sea[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 120: 20-39.
- [4] Chen J S, Li L, Wang Y J, et al. Groundwater maintains dune landscape[J]. Nature, 2004, 432(7016): 459-460.
- [5] Yang X, Scuderi L, Liu T, et al. Formation of the highest sand dunes on Earth[J]. Geomorphology, 2011, 135(1/2): 108-116.
- [6] Gates J B, Edmunds W M, Ma J, et al. Estimating groundwater recharge in a cold desert environment in northern China using chloride[J]. Hydrogeology Journal, 2008, 16(5): 893-910.
- [7] Chen J, Zhao X, Wang J, et al. Meaning of the discovery of lacustrine tufa and root-shaped nodule in Badain Fijaran Desert for the study on lake recharge[J]. Carsologica Sinica, 2004, 432: 459-460.
- [8] 姜高磊, 聂振龙, 刘哲, 等. 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[J]. 地球科学, 2021, 46(5): 1829-1839.
- [9] Dong Z, Qian G, Luo W, et al. Geomorphological hierarchies for complex mega-dunes and their implications for mega-dune evolution in the Badain Jaran Desert[J]. Geomorphology, 2009, 106(3/4): 180-185.
- [10] Qu J, Chang X, Dong G, et al. Fractal behavior of aeolian sand landform in typical megadune area of Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(4): 361-365.
- [11] Sun Q, Wang H, Zamanian K. Radiocarbon age discrepancies between the carbonate cement and the root relics of rhizoliths from the Badain Jaran and the Tengri deserts, Northwest China[J]. Catena, 2019, 180: 263-270.
- [12] Sun Q, Huguet A, Zamanian K. Outcrop distribution and formation of carbonate rhizoliths in Badain Jaran Desert, NW China[J]. Catena, 2021, 197: 104975.
- [13] Wang N A, Ning K, Li Z L, et al. Holocene high lake-levels and pan-lake period on Badain Jaran Desert[J]. Science China Earth Sciences, 2016, 59(8): 1633-1641.
- [14] Yang X, Ma N, Dong J, et al. Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, western China[J]. Quaternary Research, 2010, 73(1): 10-19.
- [15] Zhao H, Wang X, Yang H, et al. Luminescence dating of late Pleistocene lacustrine deposits in Badain Jaran Desert, North China[J]. Geochronometria, 2021, 48.
- [16] Chen T, Lai Z, Liu S, et al. Luminescence chronology and palaeoenvironmental significance of limnic relics from the Badain Jaran Desert, northern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 177: 240-249.
- [17] 王涛. 巴丹吉林沙漠形成演变的若干问题[J]. 中国沙漠, 1990, 10(1): 32-43.
- [18] 高全洲, 董光荣, 李保生, 等. 晚更新世以来巴丹吉林南缘地区沙漠演化[J]. 中国沙漠, 1995, 15(4): 345-352.
- [19] Mischke S. New evidence for origin of Badain Jaran Desert of Inner Mongolia from granulometry and thermoluminescence dating[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 79-97.
- [20] Wang F, Sun D, Chen F, et al. Formation and evolution of the Badain Jaran Desert, North China, as revealed by a drill core from the desert centre and by geological survey[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 426: 139-158.
- [21] 孙培善, 孙德钦. 内蒙古高原西部水文地质初步研究[J]. 治沙研

- 究, 1964(6):295-301.
- [22] 闫满存, 王光谦, 董光荣, 等. 巴丹吉林沙漠沙山发育与环境演变研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4):361-366.
- [23] Liu S W, Lai Z P, Wang Y X, et al. Growing pattern of megadunes in the Badain Jaran Desert in China revealed by luminescence ages[J]. *Quaternary International*, 2016, 410: 111-118.
- [24] 闫满存, 王光谦, 李保生, 等. 巴丹吉林沙漠更新世古风向变化及环境意义[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(11):118-122.
- [25] Ma J, Edmunds W M. Groundwater and lake evolution in the Badain Jaran Desert ecosystem, Inner Mongolia[J]. *Hydrogeology Journal*, 2006, 14(7):1231-1243.
- [26] Gates J B, Edmunds W M, Darling W G, et al. Conceptual model of recharge to southeastern Badain Jaran Desert groundwater and lakes from environmental tracers[J]. *Applied Geochemistry*, 2008, 23(12):3519-3534.
- [27] Yang X, Williams M A J. The ion chemistry of lakes and late Holocene desiccation in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China[J]. *Catena*, 2003, 51(1):45-60.
- [28] Ma J, Li D, Zhang J, et al. Groundwater recharge and climatic change during the last 1000 years from unsaturated zone of SE Badain Jaran Desert [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(14):1469-1474.
- [29] Yang X, Liu T, Xiao H. Evolution of megadunes and lakes in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China during the last 31, 000 years [J]. *Quaternary International*, 2003, 104(1):99-112.
- [30] Yang H, Zhao H, Wang X, et al. Optical dating of Yardang sediments and its implications for past flood events on the border of the Badain Jaran Desert, Northern China[J]. *Catena*, 2021, 207:105614.
- [31] Li Z, Wang N, Cheng H, et al. Formation and environmental significance of late Quaternary calcareous root tubes in the deserts of the Alashan Plateau, northwest China[J]. *Quaternary International*, 2015, 372:167-174.
- [32] Li Z, Wang N, Li R, et al. Indication of millennial-scale moisture changes by the temporal distribution of Holocene calcareous root tubes in the deserts of the Alashan Plateau, Northwest China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 440:496-505.
- [33] 陈建生, 赵霞, 汪集旸, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊钙华与根状结核的发现对研究湖泊水补给的意义[J]. 中国岩溶, 2004, 23(4):277-282.
- [34] 陈天源. 基于光释光年代学的巴丹吉林沙漠高大沙山-湖泊环境形成及演化研究[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 2019.
- [35] 闫满存, 王光谦, 李保生, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山的形成发育研究[J]. 地理学报, 2001, 56(1):83-91.
- [36] Wang X, Zhao H, Yang H, et al. Optical dating reveals that the height of Earth's tallest megadunes in the Badain Jaran Desert of NW China is increasing[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 185:104025.
- [37] Yang X. Landscape evolution and palaeoclimate in the deserts of northwestern China, with a special reference to Badain Jaran and Taklamakan [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(1):6-10.
- [38] 杨小平. 近3万年来巴丹吉林沙漠的景观发育与雨量变化[J]. 科学通报, 2000, 45(4):428-434.
- [39] 白旸, 王乃昂, 何瑞霞, 等. 巴丹吉林沙漠湖相沉积的探地雷达图像及光释光年代学证据[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4):842-847.
- [40] Gao Q, Tao Z, Li B, et al. Palaeomonsoon variability in the southern fringe of the Badain Jaran Desert, China, since 130 ka BP[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(3):265-283.
- [41] Hartmann K, Wünnemann B. Hydrological changes and Holocene climate variations in NW China, inferred from lake sediments of Juyanze palaeolake by factor analyses[J]. *Quaternary International*, 2009, 194(1/2):28-44.
- [42] 李保生, Hofmann J, 陈德牛, 等. 全新世大暖期时中国夏季风向西北大幅度漂移的一个古生物地层学证据[J]. 地球环境学报, 2010, 1(2):133-138.
- [43] 范白露, 田明中, 刘斯文. 巴丹吉林沙漠东南部末次间冰期环境演变: 来自粒度、光释光(OSL)及¹⁴C测年的证据[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5):892-900.
- [44] 马晓慧, 庞奖励, 刘小楦, 等. 瓦窑沟剖面记录的早中全新世毛乌素沙地东南缘气候变化[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5):80-89.
- [45] 曹红霞, 张云翔, 岳乐平, 等. 毛乌素沙地全新世地层粒度组成特征及古气候意义[J]. 沉积学报, 2003, 21(3):482-486.
- [46] 张虎才, 马玉贞, 李吉均, 等. 腾格里沙漠南缘全新世古气候变化初步研究[J]. 科学通报, 1998, 43(12):1252-1258.
- [47] 隆浩, 马海州, 王乃昂, 等. 腾格里沙漠西北缘湖泊沉积记录的全新世中期气候环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(3):105-111.
- [48] Reimer P J, Austin W E N, Bard E, et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (-55 kcal BP) [J]. *Radiocarbon*, 2020, 62(4):725-757.
- [49] Long H, Shen J, Wang Y, et al. High-resolution OSL dating of a late Quaternary sequence from Xingkai Lake (NE Asia): chronological challenge of the 《MIS 3a Mega-paleolake》 hypothesis in China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 428:281-292.
- [50] Fan A, Li S H, Li B. Observation of unstable fast component in OSL of quartz [J]. *Radiation Measurements*, 2011, 46(1):21-28.
- [51] 陆艺, 苏金宝, 谭红兵, 等. 西藏东南缘地热泉华的地球化学特征和成因[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(6):1207-1223.
- [52] 李铁松. 白水台钙华区水化学特征及泉华沉积过程研究[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2005, 26(4):350-353.
- [53] Zhang J, Wang L. Thermoluminescence dating of calcite-Alpha effectiveness and measurement protocols [J]. *Journal of Luminescence*, 2020, 223(117205).

Geochronology of the typical sediments in the Badain Jaran Desert: the progress and issues

Zhao Hui¹, Yang Hongyu^{1,2}, Wang Xingfan³, Wang Keqi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Several typical kinds of sediments in the Badain Jaran Desert, such as aeolian sand, lacustrine and alluvial sediments, compose the complex geomorphological landscapes in the desert. The ages of these sediments are the most direct evidences and basic data to explore the geomorphologic process and the mechanism in the Badain Jaran Desert. In this study, ages of several typical kinds of sediments published by previous studies are reviewed, mainly involving more than 380 ¹⁴C and luminescence dating ages, which covered most of the periods from 170 ka to the present. The age data since 12 ka ago accounts for 55% of the whole data set, indicating that the current near-surface sediments in the Badain Jaran Desert were mainly deposited since the Holocene. In the Holocene since 12 ka, the age amount of aeolian sediment from 1 ka ago is absolutely dominant, which is consistent with the continuously flow of aeolian sand in the desert. The ages of calcareous roots and lacustrine sediments were mainly distributed during 6–9 ka B.P.. The alluvial sediments at the edge of the desert mainly occurred at 5–7 ka B.P., which is consistent with the warm and humid climate conditions in the middle Holocene at the boundary of the Asian Summer monsoon. During the period of 170–12 ka, the age distribution of the alluvial sediments was not regular due to the few studies. The ages of calcareous root were mainly at of 35 ka due to ¹⁴C dating saturation age. The lacustrine sediments were mainly distributed in two periods, 90–120 ka and 40–70 ka. The aeolian sand age in the desert is mainly distributed evenly between 45–95 ka. In this paper, the significance of these age distributions are discussed; and the issues that should be paid attention to in the future studies for the dating of the typical sediments in the Badain Jaran Desert are also mentioned.

Key words: Badain Jaran Desert; typical sediments; geochronology