https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.172



# 巴丹吉林沙漠湖泊水化学类型与钙华沉积关系

曹乐<sup>1,2,3</sup>,聂振龙<sup>1</sup>,申建梅<sup>1</sup>,王 哲<sup>1</sup>,刘学全<sup>1</sup>

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. 中国地质大学,北京 100083

3. 自然资源部地下水科学与工程重点实验室,河北石家庄 050061

摘 要:为查明巴丹吉林沙漠湖泊类型与钙华沉积关系,探索钙华沉积与水循环过程.通过分析钙华分布、湖泊与地下水离子 组成、水化学类型、矿物饱和指数(SI)开展研究.结果显示:钙华湖泊约占湖泊总数的1/5,这些湖泊在空间分布上未表现出明 显规律性;湖泊水化学类型共18种,主要包括Cl-Na型(43%)、Cl-CO<sub>3</sub>-Na型(14%)、Cl-SO<sub>4</sub>-Na型(14%),钙华湖泊未表现出 类型的特殊性.结合钙华测年及古气候成果分析,钙华是在晚全新世干旱气候背景下,蒸发浓缩导致湖水体积减小,同时持续 接受地下水补给,湖水与地下水发生混合作用下产生的化学沉积;地下水化学成分的差异导致不同湖泊钙华沉积规模、位置的 差异;具有较低方解石、白云石 SI的地下水更有利于与湖水混合沉积钙华,该类地下水主要源于蒸发岩的风化溶解.

关键词:盐湖;湖泊类型;地下水;钙华;巴丹吉林沙漠;水文地质学.

**中图分类号:** P641.3 文章编号: 1000-2383(2023)10-3844-12

# Relationship between Lakes' Hydrochemical Types and Tufa Deposition in Badain Jaran Desert

收稿日期:2021-07-08

Cao Le<sup>1,2,3</sup>, Nie Zhenlong<sup>1</sup>, Shen Jianmei<sup>1</sup>, Wang Zhe<sup>1</sup>, Liu Xuequan<sup>1</sup>

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

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, China

**Abstract:** In order to find out the relationship between lake types and tufa deposition in Badain Jaran desert and explore the tufa deposition and water cycle process, in this paper it studies the relationship between ion composition, hydrochemical types and mineral saturation index (SI) of lake water and groundwater. The results show that the distribution of tufa lake accounts for about 1/5 of the total number of lakes, and these lakes have no obvious regularity in spatial distribution. There are 18 types of lake water chemistry, including Cl-Na type, Cl-CO<sub>3</sub>-Na type and Cl-SO<sub>4</sub>-Na type, and the distribution of lakes with tufa does not show the particularity of the type. The analysis of the tufa dating and paleoclimate records proves that tufa was a kind of chemical deposition under the Late Holocene arid climate background, which was caused by the evaporation and concentration of the lake water, and at the same time continuously receiving groundwater recharge and mixing with the lake water. The difference of chemical composition of groundwater leads to the difference of scale and location of tufa deposition in different lakes. The groundwater with lower SI of calcite and dolomite is more favorable to the mixed deposition of tufa with lake water, which type of groundwater is mainly derived

**Citation**: Cao Le, Nie Zhenlong, Shen Jianmei, Wang Zhe, Liu Xuequan, 2023. Relationship between Lakes' Hydrochemical Types and Tufa Deposition in Badain Jaran Desert. *Earth Science*, 48(10): 3844–3855.

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 41807214);中国地质科学院基本科研业务费(No. SK202011);中国地质调查局地质调查项目(Nos. DD20160295, DD20190349).

作者简介:曹乐(1990-),男,助理研究员,博士,研究方向为水文地质与水循环.ORCID:0000-0002-4062-2985. E-mail:lecao863@163.com

引用格式:曹乐,聂振龙,申建梅,王哲,刘学全,2023.巴丹吉林沙漠湖泊水化学类型与钙华沉积关系.地球科学,48(10):3844-3855.

from the weathering and dissolution of evaporite.

Key words: salt lake; hydrochemical type of lake; groundwater; tufa; Badain Jaran Desert; hydrogeology.

钙华,一种碳酸钙沉积物,是在水循环过程中 形成的,在岩溶区较为常见(雷国良等,2013; Sun et al., 2014; Hamdan and Brook, 2015; Nicoll and Salam, 2017; Quade et al., 2017),因其对气候变化 反应敏感,是良好的"气候变化记录器"(Garnett et al., 2004; Andrews, 2006; 刘再华, 2014), 研究钙华的沉积过程,有利于反演水循环过程,以 及重建古气候、古环境信息(Liu et al., 2003; Dabkowski et al., 2012).

在中国西北部巴丹吉林沙漠腹地内多个湖泊 发现钙华,并主要分布于湖岸、泉口附近,部分湖泊 湖底也有分布(Dong et al., 2016; 曹乐等, 2017). 关于钙华的成因主要存在两种观点,一是深部地下 水上涌补给湖泊,在补给过程中CO2溢出,导致碳酸 钙沉淀(Chen et al., 2004; Dong et al., 2016);二是 浅层地下水溢流补给湖泊时,湖水与盐湖水发生混 合作用,导致碳酸钙矿物饱和指数增高,产生沉淀 (曹乐等, 2017), Yang et al. (2010) 根据钙华样品较 低的<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U比值,认为钙华由浅层水沉积形成.关 于钙华成因的不同观点,差异本质实为对地下水来 源的争议,以往的研究虽然对钙华形成过程进行了 理论分析,但是在巴丹吉林沙漠腹地内100多个湖 泊中,仅有部分湖泊发现大规模钙华沉积,这种钙 华分布的差异性并未有解释与研究,其对地下水的 指示意义也缺少分析;沙漠湖泊水化学类型多样 (马妮娜和杨小平, 2008;陆莹等, 2010;邵天杰 等,2011),湖泊分类能否指示钙华沉积也有待研 究.此外,沙漠湖泊钙华沉积于全新世,是气候变化 的重要沉积档案(Hofmann and Geyh, 1998; 陈建 生等,2004;曹乐,2017),研究钙华的沉积过程,对 反演千年尺度气候环境变化具有一定科学意义.

本研究总结巴丹吉林沙漠湖泊区钙华分布特征,对湖泊进行水化学分类,对比湖水与地下水组 分、碳酸钙等矿物饱和指数(SI),总结了钙华沉积 的差异性、关键因素;同时,结合钙华测年结果,对 比沙漠全新世气候变化、湖泊咸化过程,分析钙华 成因,总结钙华沉淀过程.研究结果有利于揭示沙 漠水循环的更多细节,为沙漠地下水来源提供更多 依据,为干旱区钙华成因基础理论研究提供支撑.

## 1 研究区概况

巴丹吉林沙漠(39°04′15″~42°12′23″N,99° 23′18″~104°34′02″E)位于中国内蒙古自治区西部 阿拉善盟(图1),面积约5.21万km²,是中国第二大 沙漠(朱金峰等,2010;曹乐等,2017).沙漠南部以 合黎山、北大山为界,东南部与腾格里沙漠以雅布 赖山为界,东部为宗乃山,西部为古日乃草地、北部 为拐子湖湿地.沙漠属典型的大陆性干旱气候,年 降水量在50~150 mm,年蒸发量约1000 mm(曹乐 等,2021).

沙漠区东南部分布有高大沙山,相对高差可达 450 m,沙丘间分布有100多个湖泊(图1),湖泊总面 积约20 km²,根据湖泊面积与水化学特征基本可以 分为两个区域,即南部的巴丹湖区与北部的大湖区 (图1)(陆莹等,2010).两个湖区以伊克力敖包为界 (图1),巴丹湖区湖泊面积较小,均小于1 km²,湖水 TDS多小于3g/L,属于微咸水湖;大湖区湖泊面积 较大,大于1 km²的湖泊集中于该区东部,该区湖水 TDS多大于100g/L,其中,最大的湖泊为东诺尔 图,面积1.65 km²,最大水深15.9 m (Wu et al., 2014),面积大于1 km²的湖泊还有车日格勒、伊和 吉格德、巴润苏木吉林等.

# 2 采样与测试

2014年7~8月,对研究区进行水文地质调查, 系统采集87个湖水样品,包括巴丹湖区24个、大湖 区63个,其中大湖区有钙华分布的湖泊16个;57个 地下水样品,水样使用聚乙烯瓶储存,采样前用原 水润洗3次,取样时使用滤膜过滤.野外取样过程 中,使用美国维赛YSI便携式多参数水质分析仪测 试水体温度、pH值、电导率等物化参数,使用标准酸 滴定法现场测定CO<sup>32+</sup>、HCO<sup>3+</sup>浓度(史维浚和孙占 学,2005).取回水样应用离子色谱仪、原子吸收光 谱仪等仪器按操作规范分析测定其他阴阳离子组 分、可溶性总固体(TDS),测试于甘肃地质工程实 验室完成,各离子浓度测试误差小于3%,所有水样 阴阳离子平衡误差均在±5%范围内.水化学数据 分析过程中,使用PHREEQC程序、选择phreeqc. dat默认数据库判断水样水化学类型、计算水样的 矿物饱和指数(Parkhurst and Appelo, 2013).

# 3 结果

#### 3.1 钙华分布特征

沙漠区有钙华分布的湖泊23个(图1,表1),巴 丹湖区仅敦德吉林(Yang et al., 2010),其他均分布 在北部大湖区,其中包括西部3个近干涸的湖泊:梧 桐海子、芨芨草海子、大古海子.有钙华分布的湖泊 约占所有沙漠湖泊的1/5,这些湖泊从空间分布上 并未表现出明显规律性.钙华呈规模沉积的湖泊 中,钙华主要分布在湖岸及泉口附近(曹乐等, 2017).例如,在车日格勒湖,钙华主要分布在湖泊北 岸、西岸,沉积厚度可达3.8 m;在东诺尔图主要分 布在南岸;音德日图与扎拉特湖心形成钙华岛;其 他湖泊湖岸地表、湖底可见连续散布的块状钙华 板,直径多为5~50 cm,厚3~30 cm不等.

#### 3.2 湖泊水化学类型

由图2可以看出,沙漠湖泊的水化学类型共18 种,主要湖泊类型有5种,即Cl-Na型(37个,占比 43%)、Cl-CO<sub>3</sub>-Na型(12个,占比14%)、Cl-SO<sub>4</sub>-Na型(12个,占比14%)、SO<sub>4</sub>-Cl-Na型(5个)、SO<sub>4</sub>-Na型(4个).巴丹湖区的湖泊类型较多,包含10种, 以Cl-SO<sub>4</sub>-Na型(9个)为主;大湖区有11种类型,以 Cl-Na型(37个)与Cl-CO<sub>3</sub>-Na型(12个)为主,大湖 区钙华分布的湖泊类型也以Cl-Na型(12个)居多, 其次为Cl-CO<sub>3</sub>-Na型(2个).



图 1 巴丹吉林沙漠钙华分布湖泊位置 Fig.1 Locations of lakes with tufa in Badain Jaran desert

Table 1 Statistical lakes of tufa distribution from references

钙华分布湖泊	参考文献
东诺尔图、苏木巴润吉林、伊和吉格德	陈建生等(2004)
乌尔塔布拉格、巴彦淖尔、苏木巴润吉林、诺尔图	Dong <i>et al.</i> (2016)
东诺尔图	Wu et al.(2014)
东诺尔图、伊和吉格德、音德日图	Chen <i>et al</i> .(2006)
敦德吉林	Yang et al.(2010)
格日图、木日图、西诺尔图、道仑那马格、西巴彦淖尔、哈布特诺尔、梧桐图、大古海子、芨芨草海子	Wang <i>et al.</i> (2016)



图 2 巴丹吉林沙漠湖泊类型冲积 Fig. 2 Alluvial map of lakes' hydrochemical types in Badain Jaran Desert



图 3a 显示,巴丹湖区湖水 TDS 多小于 35 g/L, 巴丹西湖 TDS 最高,达 270.08 g/L;大湖区湖水 TDS 在 10~450 g/L 间分布,并集中在 100~300 g/ L,其中有钙华分布的湖泊 TDS集中在 160~290 g/ L.在主要的湖泊类型中,TDS 随硫酸型、碳酸型至 Cl-Na型演化趋势而逐渐增大(图 3b),各类型平均



TDS 为: SO<sub>4</sub>-Na 型(31.1 g/L)、SO<sub>4</sub>-Cl-Na 型(74.8 g/L)、Cl-SO<sub>4</sub>-Na 型(51.5 g/L)、Cl-CO<sub>3</sub>-Na 型(197.5 g/L)、Cl-Na 型(249.5 g/L).Piper 图(图 4) 显示钙华分布湖泊与未发现大规模钙华的湖泊相比,水化学类型、特征并无显著差异,但有钙华湖泊 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>平均值 4.29 mg/L、81.77 mg/L,均小于无钙华湖泊的 114.61 mg/L、671.16 mg/L (附表1),图4中沙漠地下水分布范围大,水化学特征体现出一定的差异性,水化学类型以 Cl-SO<sub>4</sub>-(HCO<sub>3</sub>)-Na-(Mg)为主;附表1中湖水各离子含量分布范围广,统计标准差较大,体现了湖泊水化学组分的差异性、离散性大.

4 讨论

#### 4.1 湖泊类型演化与钙华沉积关系

**4.1.1 湖泊水化学离子特征** 沙漠湖泊以 Cl-Na型 居多,湖泊离子相关性显示 TDS与 Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>相关性 最高(图 5),相关系数分别达到 0.95、0.99(P < 0.01),反映了强烈的蒸发环境;其次,TDS与 K<sup>+</sup>、 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>也表现出一定的正相关关系 (P < 0.01);各离子浓度与湖泊面积未有显著关系.

湖泊pH均表现为碱性,大湖区湖泊pH集中在 9.0~10.5(图 6a),钙华分布湖泊pH也在此范围内, 与未沉积钙华的湖泊无明显差异.湖泊Cl<sup>-</sup>与TDS 关系显著,随TDS增大而增高,当TDS大于100g/ L时,Cl<sup>-</sup>增高趋势更加明显,大于100g/L的盐湖即 为Cl-Na型湖泊(图 6b),两者关系式基本反映了湖 泊的水化学演化过程;对于大湖区钙华分布的湖泊 而言,Cl<sup>-</sup>与TDS也表现为显著线性关系.Ca<sup>2+</sup>与 Cl<sup>-</sup>相反,Ca<sup>2+</sup>随TDS增高逐渐降低,特别是TDS 大于100g/L时,水中Ca<sup>2+</sup>浓度已十分有限(图6c), 这是由于湖泊由碳酸型、硫酸型演化为Cl-Na型湖 泊时,碳酸盐、硫酸盐矿物会不断沉淀,导致Ca<sup>2+</sup>随 TDS增高而减少.Mg<sup>2+</sup>与TDS关系并不明显(图 6d),但钙华分布湖泊的Mg<sup>2+</sup>与TDS表现为反相关 关系(P<0.05).CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>整体表现为随TDS 增高而增高(图6e,6f).综合而言,离子浓度随TDS 的变化,总体反映出在强烈蒸发作用下,湖水水化 学特征的演化规律,当TDS大于100g/L时,碳酸 盐、硫酸盐矿物不断沉淀,Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>含量逐渐降 低,同时湖水pH趋于增高,碱性的湖水吸收空气中 的CO<sub>2</sub>,使得水中CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度也增高.

**4.1.2** 湖水矿物饱和指数(SI) Dong et al.(2016) 测试了沙漠钙华样品的矿物组成,结果显示钙华主 要由 CaCO<sub>3</sub> (>80%)与 SiO<sub>2</sub>组成,曹乐(2017)对车 日格勒钙华进行 SEM 扫描结果显示,钙华矿物形态 主要为菱形方解石、针状文石,此外,其他矿物有石 英、长石及极少量的伊利石(陈建生等, 2004; Chen et al., 2006).分析湖水中方解石等碳酸钙矿物的饱 和指数(SI)有利于分析盐湖水化学特征与钙华沉 积,由于Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>随TDS增高而减少的趋势相 比 Ca<sup>2+</sup> 或 Mg<sup>2+</sup> 更显著(图 7a),因此,选择方解石  $(CaCO_3)$ 、白云石 $(CaMg(CO_3)_2)$ 、石膏 $(CaSO_4)$ 为 代表性矿物分析湖水的SI.结果显示(图7b),方解 石、白云石随 TDS 增高而增大, 两者均大于0, 说明 湖泊中方解石、白云石均趋于沉淀析出,且TDS越 高,沉淀能力越强.石膏矿物SI小于0,与TDS关系 也不显著.钙华沉积湖泊在大湖区所有湖泊中均匀 分布,各矿物SI与未沉积钙华湖泊相比并无明显差 异,说明现有湖泊群水化学条件下,湖水并不是影 响钙华沉积的关键.

4.1.3 湖泊咸化与钙华沉积的气候背景 诸多学 者研究了沙漠全新世气候变化(Yang et al., 2010; Li et al., 2015; Wang et al., 2016):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(姜高磊等, 2021).Wang et al.(2016)认为在全新世早期(11~ 10 ka BP)湖泊开始发育,至中全新世沙漠存在大湖 期、高湖面,即中全新世气候湿润,8.6~6.6 ka BP湖 泊达到最高水位,3.5 ka BP后进入晚全新世干旱



Fig. 5 Correlation coefficient matrix of hydrochemical components of lakes

期,湖泊逐渐萎缩,湖水位下降至现今湖面.Yang and Williams(2003)根据湖水TDS估算了湖泊咸化时间约4000年,湖泊沉积物记录也证明了4ka BP 后湖泊水位迅速下降,甚至干涸(刘子亭等,2010; 张律吕,2019).

伊和吉格德地表钙华<sup>14</sup>C年龄为8543± 172 a BP(陈建生等,2004),西巴彦淖尔为7696± 69 a BP、哈布特诺尔为6065±70 a BP、西诺尔图为 5971±71 a BP、梧桐图为6636±65 a BP,这些结 果集中于中全新世,但是考虑到钙华主要由湖水无 机碳沉淀形成,盐湖"碳库效应"会导致测试结果偏 老(Garnett *et al.*,2004;刘子亭等,2010),东诺尔 图钙华<sup>14</sup>C年龄为6240±95 a BP,校正后为4020± 245 a BP(Hofmann and Geyh, 1998);车日格勒 3.8 m深连续的钙华沉积剖面U/Th年龄均在 4216±835 a BP年内(曹乐, 2017),这反映出钙华 主要沉积于晚全新世,沉积过程中正值干旱化气 候、湖泊开始蒸发萎缩、咸化(Yang and Williams, 2003; Li *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2016).综合而 言,湖泊水化学特征是在近4000年的蒸发作用下 演化形成的,强烈而持久的蒸发不仅导致湖水TDS 的增高,同时使得湖水中碳酸钙等矿物不断过饱和 沉淀,为钙华沉积提供了基础条件.

#### 4.2 钙华成因指示



a. TDS-pH; b. TDS-Cl<sup>-</sup>; c. TDS-Ca<sup>2+</sup>; d. TDS-Mg<sup>2+</sup>; e. TDS-CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>; f. TDS-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

虽然蒸发是湖泊咸化、演化的关键因素,但由 高湖面时期淡水湖泊演化为TDS达100~450g/L 的盐湖,地下水对湖泊不断地补给是另一重要原 因,只有地下水不断提供盐分,加之蒸发导致湖水体积的萎缩,才能共同形成现代不同 TDS 的盐湖群,因此,研究不同湖泊沉积钙华的差异,需要分析





不同湖泊周边地下水是否存在差异.图4中沙漠区 地下水表现出一定的离散性,大湖区地下水多为 TDS小于1g/L的淡水,而在巴丹湖区与大湖区间 存在大于1g/L的微咸水条带(王旭升等,2019),这 一咸水区成因尚无定论,不同来源、径流过程均为 可能的因素,考虑到这一条带与伊克力敖包基岩隆 起相对应,或许降水与地下水对基岩的溶滤作用是 导致地下水微咸的原因之一,此外,沙漠边缘地下 水也为微咸水,这综合反映了不同湖泊周边地下水 补给的差异性,而钙华沉积的盐分物源即为地下 水,因此,分析地下水与湖水的水化学差异是研究 钙华成因的关键.图8显示了湖水与其各自周边地 下水矿物 SI的差异,可以看出钙华沉积湖泊周边的 地下水方解石、白云石 SI均小于0,这些矿物趋于溶 解;而沉积钙华的地下水 SI在所有地下水样品中是 最低的,反映了地下水与湖水的组合是钙华沉积的 关键.曹乐等(2017)通过对7个湖泊进行咸淡水混 合的水化学模拟,证明了咸淡水混合作用是钙华沉 积的重要过程;Zhang et al.(2021)通过湖岸剖面同 位素取样、物探等方法研究了地下咸水体的存在与 分布,距离湖泊越近的地下水 TDS 越高,同时方解 石 SI 也逐渐增高,也说明了咸的湖水入侵淡的地下 水时,在咸淡水混合区利于方解石等矿物的沉淀 (Hudson et al., 2017).

在地下水、湖水满足一定组合条件时,钙华才 能成规模、较纯质的沉积,由于湖泊演化至Cl-Na型 阶段后,湖水水化学特征几乎一致,Ca、Mg含量很低,因此决定钙华沉积的关键是地下水的化学组



Fig. 9 Gibbs diagrams of groundwater around the lakes





成,而地下水在补给入湖前的水文地球化学过程是 决定水化学特征的关键,部分地下水TDS偏高, d-excess存在低异常特征(Wang and Zhou, 2018; 王旭升等, 2019),Wang and Zhou(2018)认为这是 由于地下水经历了蒸发过程,此外,地下水在径流 过程中,会与含水层发生溶滤作用,也会改变地下 水水质.因此,不同的地下水补给来源、径流过程造 成的水化学差异,导致地下水补给湖泊并与湖水发 生混合作用时,钙华沉积规模、位置也有差异,这解 释了为何部分湖泊未沉积钙华、以及同一湖泊钙华 主要分布于泉口与地下水溢出带.

图9为反映沙漠地下水水化学成分起源机制的

Gibbs 图,可以看出,地下水 Cl<sup>-</sup>/(Cl<sup>-</sup>+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)比 值介于0.2~0.8,有钙华分布湖泊该比值多为0.2~ 0.4,分布于蒸发浓缩与岩石风化端元之间;Na<sup>+</sup>/ (Na<sup>+</sup>+Ca<sup>2+</sup>)比值集中于0.6~1.0之间,分布于蒸发 浓缩端元,再次说明部分地下水经历了一定的蒸发 过程,与地下水高d-excess值相符.蒸发作用影响了 地下水的离子比值特征,而地下水中方解石等矿物 的饱和指数均小于0(图8a),说明地下水以溶滤作 用为主,图10分析了控制地下水岩石风化的类型, 可以看出,地下水样品多分布于硅酸盐岩与蒸发岩 控制端元中间,受碳酸盐岩风化的影响相对较小, 而钙华分布湖泊的样品更接近于蒸发岩的风化溶 解,体现出沉积钙华的地下水化学成分来源的特殊性.

### 5 结论

(1)现发现的钙华分布湖泊约占湖泊总数的 1/5,这些湖泊在空间分布上未表现出明显规律性; 湖泊水化学类型共18种,主要类型包括Cl-Na型、 Cl-CO<sub>3</sub>-Na型、Cl-SO<sub>4</sub>-Na型等,钙华分布湖泊未表 现出类型的特殊性.

(2) 湖泊、地下水离子组成及钙华测年结果显示:沙漠湖泊钙华是在晚全新世气候干旱化的背景下,湖泊在不断蒸发咸化过程中,方解石等矿物 SI 增高,形成碳酸钙沉淀;同时,由于地下水的不断补 给,在湖岸、泉口处湖水与地下水的混合作用导致 钙华大规模沉积.

(3)决定钙华沉积规模、沉积位置的主因是地 下水化学特征的差异,这些差异是由地下水来源、 径流过程、水文地球化学作用的不同造成的,具有 较低方解石、白云石 SI的地下水易于与湖水混合沉 积钙华,该类型地下水主要源于蒸发岩的风化溶解.

致谢:感谢孟令群等在野外调查、样品采集工 作中的辛勤付出!感谢审稿专家对论文提出的宝 贵意见!

附表见本刊官网(http://www.earth-science.net).

#### References

- Andrews, J. E., 2006. Palaeoclimatic Records from Stable Isotopes in Riverine Tufas: Synthesis and Review. *Earth-Science Reviews*, 75(1-4): 85-104. https://doi. org/10.1016/j.earscirev.2005.08.002
- Cao, L., 2017. Study of the Precipitation Mechanism of Tufa at Lake Shore in Badain Jaran Desert (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Cao, L., Nie, Z.L., Liu, X.Q., et al., 2017. Hydrochemical Cause of Lakes' Tufa in Badain Jaran Desert. *Journal of Desert Research*, 37(5): 1026-1034 (in Chinese with English abstract).
- Cao, L., Shen, J. M., Nie, Z. L., et al., 2021. Stable Isotopic Characteristics of Precipitation and Moisture Recycling in Badain Jaran Desert. *Earth Science*, 46(8): 2973-2983 (in Chinese with English abstract).
- 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, J. S., Zhao, X., Sheng, X. F., et al., 2006. Formation Mechanisms of Megadunes and Lakes in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 51(24): 3026-3034. https://doi.org/10.1007/s11434-006-2196-8
- Chen, J.S., Zhao, X., Wang, J.Y., et al., 2004. Meaning of the Discovery of Lacustrine Tufa and Root-Shaped Nodule in Badain Jaran Desert for the Study on Lake Recharge. *Carsologica Sinica*, 23(4): 277-282 (in Chinese with English abstract).
- Dabkowski, J., Limondin-Lozouet, N., Antoine, P., et al., 2012. Climatic Variations in MIS 11 Recorded by Stable Isotopes and Trace Elements in a French Tufa (La Celle, Seine Valley). *Journal of Quaternary Science*, 27 (8): 790-799.
- Dong, C., Wang, N., Chen, J., et al., 2016. New Observational and Experimental Evidence for the Recharge Mechanism of the Lake Group in the Alxa Desert, North-Central China. *Journal of Arid Environments*, 124: 48-61. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.07.008
- Garnett, E. R., Andrews, J. E., Preece, R. C., et al., 2004. Climatic Change Recorded by Stable Isotopes and Trace Elements in a British Holocene Tufa. *Journal of Quaternary Science*, 19(3): 251–262. https://doi. org/ 10.1002/jqs.842
- Hamdan, M. A., Brook, G. A., 2015. Timing and Characteristics of Late Pleistocene and Holocene Wetter Periods in the Eastern Desert and Sinai of Egypt, Based on <sup>14</sup>C Dating and Stable Isotope Analysis of Spring Tufa Deposits. *Quaternary Science Reviews*, 130: 168–188. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.09.011
- Hofmann, J., Geyh, M., 1998. Untersuchungen Zum <sup>14</sup>C-Reservoir Effektan Rezenten und Fossilen Lakustrinen Sediment enausdem Südosten der Badain Jaran Wüste (Innere Mongolei/VR China). Berliner Geographische Abhandlungen, 63: 83-98.
- Hudson, A., Quade, J., Ali, G., et al., 2017. Stable C, O and Clumped Isotope Systematics and <sup>14</sup>C Geochronology of Carbonates from the Quaternary Chewaucan Closed-Basin Lake System, Great Basin, USA: Implications for Paleoenvironmental Reconstructions Using Carbonates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 212: 274-302. https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.06.024
- Jiang, G. L., Nie, Z. L., Liu, Z., et al., 2021. OSL Ages and Its Hydrological Implications of Alluvial–Diluvial Deposits from the Southern Margin of Badain Jaran Desert. *Earth Science*, 46(5): 1829–1839 (in Chinese with

English abstract).

- Lei, G.L., Zhang, H.C., Li, Z.Z., et al., 2013. Geochemical Features and Significance of Shoreline Tufa from a Closed-Basin Lake Ngangla Ring Tso in the Western Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 33(5): 839-847 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Wang, N., Li, R., et al., 2015. Indication of Millennial-Scale Moisture Changes by the Temporal Distribution of Holocene Calcareous Root Tubes in the Deserts of the Alashan Plateau, Northwest China. *Pal-aeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 440: 496-505. https://doi. org/10.1016/j. palaeo.2015.09.023
- Liu, Z., Zhang, M., Li, Q., et al., 2003. Hydrochemical and Isotope Characteristics of Spring Water and Travertine in the Baishuitai Area (SW China) and Their Meaning for Paleoenvironmental Reconstruction. *Environmental Geology*, 44(6): 698-704. https://doi.org/10.1007/ s00254-003-0811-4
- Liu, Z.H., 2014. Research Progress on the Climatic and Environmental Referential Significance of Supergene and Endogenous Travertine. *Chinese Science Bulletin*, 59(23): 2229-2239 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. T., Yang, X. P., Zhu, B., 2010. Reinterpretation of the Chronological Data of Palaeo-Environmental Records in the Badain Jaran Desert and Reconstruction of the Holocene Climatic Changes. *Quaternary Sciences*, 30(5): 925-933 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y., Wang, N.A., Li, G.P., et al., 2010. Spatial Distribution of Lakes Hydro-Chemical Types in Badain Jaran Desert. *Journal of Lake Sciences*, 22(5): 774-782 (in Chinese with English abstract).
- Ma, N.N., Yang, X.P., 2008. Environmental Isotopes and Water Chemistry in the Badain Jaran Desert and in Its Southeastern Adjacent Areas, Inner Mongolia and Their Hydrological Implications. *Quaternary Sciences*, 28(4): 702-711 (in Chinese with English abstract).
- Nicoll, K., Salam, E. S., 2017. Paleospring Tufa Deposition in the Kurkur Oasis Region and Implications for Tributary Integration with the River Nile in Southern Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 136: 239-251. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.10.014
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 2013. Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3-A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. U.S. Geological Survey, Virginia. http://pubs. usgs.gov/tm/06/a43

- Quade, J., Rasbury, E. T., Huntington, K. W., et al., 2017. Isotopic Characterization of Late Neogene Travertine Deposits at Barrancas Blancas in the Eastern Atacama Desert, Chile. *Chemical Geology*, 466: 41-56. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.05.004
- Shao, T. J., Zhao, J. B., Dong, Z.B., 2011. Water Chemistry of the Lakes and Groundwater in the Badain Jaran Desert. Acta Geographica Sinica, 66(5): 662-672 (in Chinese with English abstract).
- Shi, W. J., Sun, Z. X., 2005. Applied Hydrogeochemistry. Atomic Energy Press, Beijing (in Chinese).
- Sun, H., Liu, Z., Yan, H., 2014. Oxygen Isotope Fractionation in Travertine-Depositing Pools at Baishuitai, Yunnan, SW China: Effects of Deposition Rates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 133: 340-350. https://doi. org/10.1016/j.gca.2014.03.006
- Wang, N. A., Ning, K., Li, Z. L., et al., 2016. Holocene High Lake-Levels and Pan-Lake Period on Badain Jaran Desert. Science China Earth Sciences, 59(8): 1633-1641. https://doi. org/10.1007/s11430-016-5307-7
- Wang, X. S., Hu, X. N., Jin, X. M., et al., 2019. Hydrogeological Conditions and Groundwater Circulation Model of the Badain Jaran Desert. Science Press, Beijing, 106-107 (in Chinese)
- Wang, X. S., Zhou, Y. Y., 2018. Investigating the Mysteries of Groundwater in the Badain Jaran Desert, China. *Hydrogeology Journal*, 26(5): 1639-1655. https://doi. org/10.1007/s10040-018-1750-1
- Wu, Y., Wang, N. A., Zhao, L. Q., et al., 2014. Hydrochemical Characteristics and Recharge Sources of Lake Nuoertu in the Badain Jaran Desert. *Chinese Science Bulletin*, 59(9): 886-895. https://doi. org/10.1007/ s11434-013-0102-8
- Yang, X. P., Ma, N. N., Dong, J. F., 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
- Yang, X., Williams, M. A. J., 2003. The Ion Chemistry of Lakes and Late Holocene Desiccation in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China. *Catena*, 51(1): 45-60. https://doi.org/10.1016/S0341-8162 (02)00088-7
- Zhang, L. L., 2019. Holocene Lacustrine Deposit Record and Lake Evolution Mechanism in Badain Jaran Dsesrt (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou(in Chinese with English abstract).

- Zhang, X. L., Luo, X., Jiao, J. J., et al., 2021. Hydrogeochemistry and Fractionation of Boron Isotopes in the Inter-Dune Aquifer System of Badain Jaran Desert, China. *Journal of Hydrology*, 595: 125984. https://doi. org/10.1016/j.jhydrol.2021.125984
- Zhu, J. F., Wang, N. A., Chen, H. B., et al., 2010. Study on the Boundary and the Area of Badain Jaran Desert Based on Remote Sensing Imagery. *Progress in Geography*, 29 (9): 1087-1094(in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 曹乐,2017.巴丹吉林沙漠湖岸钙华沉积机制研究(硕士学位 论文).北京:中国地质科学院.
- 曹乐, 聂振龙, 刘学全, 等, 2017. 巴丹吉林沙漠湖泊钙华的 水化学成因. 中国沙漠, 37(5): 1026-1034.
- 曹乐,申建梅,聂振龙,等,2021.巴丹吉林沙漠降水稳定同 位素特征与水汽再循环.地球科学,46(8):2973-2983.
- 陈建生,赵霞,汪集旸,等,2004.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.中国岩溶, 23(4):277-282.
- 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.

- 雷国良,张虎才,李志忠,等,2013. 青藏高原西部昂拉仁错 古湖岸钙华沉积的地球化学特征及环境意义.第四纪 研究,33(5):839-847.
- 刘再华,2014. 表生和内生钙华的气候环境指代意义研究进展. 科学通报,59(23):2229-2239.
- 刘子亭,杨小平,朱秉启,2010.巴丹吉林沙漠全新世环境 记录的年代校正与古气候重建.第四纪研究,30(5): 925-933.
- 陆莹, 王乃昂, 李贵鹏, 等, 2010. 巴丹吉林沙漠湖泊水化学 空间分布特征. 湖泊科学, 22(5): 774-782.
- 马妮娜,杨小平,2008.巴丹吉林沙漠及其东南边缘地区水 化学和环境同位素特征及其水文学意义.第四纪研究, 28(4):702-711.
- 邵天杰,赵景波,董治宝,2011.巴丹吉林沙漠湖泊及地下 水化学特征.地理学报,66(5):662-672.
- 史维浚,孙占学,2005.应用水文地球化学.北京:原子能出版社.
- 王旭升,胡晓农,金晓娟,等,2019.巴丹吉林沙漠的水文地 质条件及地下水循环模式.北京:科学出版社, 106-107.
- 张律吕,2019.巴丹吉林沙漠全新世湖泊沉积记录及其演变 机制探讨,兰州:兰州大学.
- 朱金峰,王乃昂,陈红宝,等,2010.基于遥感的巴丹吉林沙 漠范围与面积分析.地理科学进展,29(9):1087-1094.