

doi: 10.12029/gc20220304004

姜高磊, 王乃昂, 李卓仑, 李孟, 苏贤保, 宁凯. 2024. 巴丹吉林沙漠湖泊表层沉积物盐类矿物分布及对气候环境的指示[J]. 中国地质, 51(6): 2077–2089.

Jiang Gaolei, Wang Nai'ang, Li Zhuolun, Li Meng, Su Xianbao, Ning Kai. 2024. Distribution pattern of saline minerals in surface sediments of lakes in the Badain Jaran Desert and its implications for climate–environmental reconstruction[J]. Geology in China, 51(6): 2077–2089(in Chinese with English abstract).

巴丹吉林沙漠湖泊表层沉积物盐类矿物分布 及对气候环境的指示

姜高磊^{1,2,3}, 王乃昂¹, 李卓仑¹, 李孟¹, 苏贤保¹, 宁凯^{1,2,3}

(1. 兰州大学资源环境学院, 冰川与沙漠研究中心, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 3. 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:【研究目的】地下水补给是中国西北干旱地区湖泊的常见补给方式, 尤其是在沙漠地区。了解该类型湖泊盐类矿物的沉积规律对于重建沙漠地区环境演化过程, 探讨其对气候变化的响应具有重要指示作用。【研究方法】本文以巴丹吉林沙漠南部地下水补给型湖泊为研究对象, 分析了 8 个不同盐度的湖泊表层沉积物的矿物组合和分布特征。【研究结果】(1) 对于单个湖泊来说, 多数湖泊盐类矿物沉积与具有径流补给的湖泊类似, 即湖泊边缘碎屑矿物沉积较多, 向湖泊内部盐类矿物沉积逐渐增多, 且矿物类型由碳酸盐逐渐转为硫酸盐类和氯化物; (2) 湖泊边缘沉积物的矿物组成更易受到湖泊水位、面积变化的影响, 而靠近湖泊中心的沉积物可能受到水深和地下水补给的影响; (3) 巴丹吉林沙漠地区浅水湖泊混合充分, 不易受到湖水盐度、温度分层和底部淡水补给的影响, 且盐类矿物总含量与湖水盐度具有线性关系。【结论】沙漠地区地下水补给型湖泊沉积物中盐类矿物组合和含量的变化能够很好地反映湖水盐度的变化。沙漠中湖泊对气候变化具有高度的敏感性, 盐类矿物组合及含量的变化可以作为讨论全球变暖、沙漠化等环境问题的重要依据。

关键词: 地下水补给型湖泊; 盐类沉积; 气候环境; 环境地质调查工程; 巴丹吉林沙漠

创新点: 地下水补给型湖泊表层沉积物的盐类矿物分布特征与径流补给湖泊类似; 巴丹吉林沙漠地区湖泊沉积物中盐类矿物总含量与湖水盐度具有较好的线性关系。

中图分类号: P512.2; P467 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2024)06–2077–13

Distribution pattern of saline minerals in surface sediments of lakes in the Badain Jaran Desert and its implications for climate–environmental reconstruction

JIANG Gaolei^{1,2,3}, WANG Nai'ang¹, LI Zhuolun¹, LI Meng¹, SU Xianbao¹, NING Kai^{1,2,3}

(1. Center for Glacier and Desert Research, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 3. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydrological Environment Evolution, China Geological

收稿日期: 2022–03–04; 改回日期: 2022–04–27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807420, 41871021)、中国地质科学院基本科研业务费(YK202302, SK202304)、河北省自然科学基金项目(D2024504011)和中国地质调查局项目(DD20221929)联合资助。

作者简介: 姜高磊, 男, 1988 年生, 副研究员, 主要从事干旱区环境演化研究; E-mail: jianggl198899@163.com。

通讯作者: 王乃昂, 男, 1962 年生, 教授, 主要从事气候环境变化研究; E-mail: Wangna@lzu.edu.cn。

Survey, Shijiazhuang 050061, Hebei, China)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] It is of great significance to understand the distribution pattern of saline mineral deposits in lake basin for the reconstruction of palaeoenvironment and palaeohydrology. However, the studies on mineral distribution for groundwater recharged lake sediments are few, which hinders the climate–environmental reconstruction in arid area. **[Methods]** The Badain Jaran Desert, located in western Inner Mongolia in a hyper–arid area of China, is characterized by the coexistence of more than 110 perennial lakes and thousands of mega–dunes. More than 90% of the recharge of lakes between mega–dunes is groundwater. In this study, we analyzed the mineral assemblage and distribution characteristics of the surface sediments of eight lakes with different salinity in the Badain Jaran Desert. **[Results]** (1) For individual lakes, the distribution pattern of saline mineral deposits is similar to those of lakes with runoff recharge, that is, there are more detrital mineral deposits at the edge of the lake, and the saline mineral deposits gradually increase towards the lake interior, and the mineral types gradually change from carbonate to sulfate and chloride. (2) The mineral composition of the sediments near the lake edge is more easily affected by the variation of lake water level and area, while the sediments near the lake center may be affected by the water depth and the groundwater recharge. (3) The shallow lakes are well mixed and are not easily affected by the stratification of lake salinity and water temperature, and the replenishment of fresh water at the bottom. Moreover, the total content of salt minerals has a good linear relationship with the salinity of lake water. **[Conclusions]** The changes of saline mineral assemblage and its content in the lakes recharged by groundwater can well reflect the changes of lake salinity and can be used as a proxy of climate–environmental reconstruction in desert areas. The lakes in desert are highly sensitive to climate change. The changes of salt mineral assemblage and content in desert lakes can be used as an important basis for discussing environmental problems such as global warming and desertification.

Key words: groundwater recharged lake; saline minerals; climate–environment; environmental geological survey engineering; Badain Jaran Desert

Highlights: The distribution pattern of saline minerals in surface sediments of groundwater recharge lakes is similar to that of runoff recharge lakes; There is a good linear relationship between the total content of saline minerals in lake sediments and the salinities of lake water in the Badain Jaran Desert.

About the first author: JIANG Gaolei, male, born in 1988, associate researcher, engaged in environmental evolution in arid area; E–mail: jianggl198899@163.com.

About the corresponding author: WANG Nai’ang, male, born in 1962, professor, engaged in climate change and environmental evolution in arid area; E–mail: Wangna@lzu.edu.cn.

Fund support: Supported by the Natural Science Foundation of China (No.41807420, No.41871021), Basic Research Fees of Chinese Academy of Geological Sciences (No.YK202302, No.SK202304), Natural Science Foundation of Hebei Province (No.D202450411) and the project of China Geological Survey (No.DD20221929).

1 引 言

中国北方分布有大面积的戈壁、沙漠及半干旱地区的沙地,总面积达 $130.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占全国土地总面积的 13.6%(朱震达, 1980; 王涛和陈广庭, 2008)。这些地区生态环境脆弱、风沙灾害频发、土地荒漠化问题严重,重建地质历史时期荒漠地区的环境演化历史对于了解这些地区的环境演变过程,分析环境恶化、沙漠化等问题的控制因素具有重要指示作用。然而在极端干旱的沙漠地区,重建古气候、古环境的材料十分有限(姜高磊等, 2017)。早

在 20 世纪 50 年代,国外学者在对非洲撒哈拉沙漠周边地区的自然资源进行考察研究中,发现沙漠的扩张、收缩与封闭湖泊的波动具有很好的相关性。国内学者认为这种良好的相关性是全球气候格局调整的结果,沙漠的扩张与萎缩与沙漠中或周缘湖泊的萎缩与扩张都是对区域或者全球气候的响应(Lu et al., 2013; Wang et al., 2016; Chen et al., 2019; 尹立河等, 2024),所以沙漠中或周缘的湖泊可作为重建沙漠区气候环境变化的良好载体。

湖泊对气候变化的响应具有高度敏感性,尤其是湖水盐度的变化,干旱地区的湖泊对气候环境的

变化更加敏感(Liu et al., 2008; Huang et al., 2016; Zhang and Liu, 2020; Jiang et al., 2021; Zhang et al., 2022)。在干旱或极度干旱的荒漠地区, 湖泊沉积物中的盐类矿物组合及其含量的变化是反映湖水盐度、区域气候环境变化的重要指标, 如在季风边缘地区的浑善达克沙地湖泊自生碳酸盐的含量和组合变化能够反映湖泊蒸发和区域温度、降水等环境变化(Li et al., 2018; Fan et al., 2019), 在干旱区的盐湖中自生盐类矿物的组合和含量变化能够反映湖泊演化及区域气候环境变化过程(Shen et al., 2005; Liu et al., 2008; 金章东, 2011; Zhang and Liu, 2020; Zhang et al., 2022; 张新毅等, 2022)。然而, 在中国气候干旱的西北地区, 地下水是湖泊水源补给的重要来源, 在新疆和河西走廊地区的内陆河流域, 地下水的天然量等于或者大于地表水资源量(张宗祜和李烈荣, 2005a, b)。在极度干旱的沙漠地区, 存在着数量较多的地下水补给型湖泊(来婷婷等, 2012; Dong et al., 2016; Wang et al., 2016; 颜长珍等, 2020)。对于这类湖泊沉积物中的盐类矿物分布是否和径流补给的湖泊相似, 对气候环境变化的响应是否相同, 这些问题阻碍了在中国西北荒漠地区利用湖泊沉积物中盐类矿物指标进行沙漠区气候环境的重建工作。

分析地下水补给型湖泊表层沉积物的盐类矿物分布特征, 可以明确该类型湖泊沉积物中矿物组成的环境指示意义, 为利用地下水补给型湖泊沉积物进行沙漠地区古环境重建, 探讨沙漠地区环境变化对气候变化的响应过程提供重要的依据。巴丹吉林沙漠位于阿拉善高原西部, 由其南部高大的沙山和沙山间上百个湖泊闻名世界, 沙山中湖泊的水源补给 90% 来源于地下水(Dong et al., 2016; Wang et al., 2016), 分布较为集中, 且水化学空间差异大, 是研究地下水补给型湖泊盐类矿物沉积规律的理想区域。李卓仑等(2015)和马素辉等(2015)先前对沙漠湖泊中靠近边缘的表层沉积物中的盐类矿物对湖水 TDS 和湖泊面积季节变化进行了研究, 之后 Li et al.(2019)对典型湖泊中盐类矿物在湖泊内部的分布进行了研究, 本文根据前期的调查和研究成果, 按照湖水盐度梯度选取了 8 个湖泊进行表层沉积物的矿物组成分布特征和不同盐度的湖泊之

间盐类矿物的含量变化规律分析, 为重建沙漠地区环境演化历史, 探讨沙漠地区环境变化提供重要的依据。

2 研究区概况

巴丹吉林沙漠(39°04'15"N~42°12'23"N; 99°23'18"E~104°34'02"E), 面积 5.2×10^4 km², 是中国仅次于塔克拉玛干的第二大沙漠(朱金峰等, 2010), 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), 整体地势东南高、西北低, 海拔 900~1600 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(Dong et al., 2013; Zhao et al., 2023)。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), 南部的湖泊集中分布区域在现代湖泊周围分布有不同高程的湖相沉积残余、钙质根管和钙质胶结砂层(姜高磊等, 2017)。巴丹吉林沙漠属极端干旱气候, 降水稀少, 多年平均降雨量 30~120 mm, 并由东南向西北逐渐减少(王乃昂等, 2013; 王丽娟等, 2023), 湖泊蒸发量大, 湖面年平均蒸发量约 1450 mm(胡文峰等, 2015)。年平均气温为 9.5~10.3℃, 最低月为 1 月, 平均气温为 8.3℃, 最高月为 7 月, 平均气温为 24.1℃(Jiang et al., 2021)。年平均风速为 2.8~4.6 m/s, 风向以西北为主(Hu and Yang, 2016)。

巴丹吉林沙漠腹地和南部高大沙山之间分布有 105 个左右常年积水的湖泊, 呈串珠状排列, 多为咸水湖。大多数湖泊的面积小于 1 km², 面积最大的湖泊布尔德为 2.32 km²。湖泊水深多数小于 10 m, 最深的诺尔图为 15.9 m(Wang et al., 2016)。湖泊水化学空间差异较大, 由东南边缘至腹地湖泊总体上呈硫酸盐型-碳酸盐型-氯化物型分布(Yang et al., 2003; 陆莹等, 2010)。沙漠中没有地表径流, 湖泊主要依靠地下水进行补给(Dong et al., 2016; Wang et al., 2016)。目前关于沙漠地区地下水补给来源主要有青藏高原或祁连山的冰雪融水进行远源补给(Chen et al., 2004; 陈建生等, 2006)、南部山区古降水补给(Gate et al., 2008a, b; 姜高磊等, 2021)、深层地下水补给(Dong et al., 2016)等观点。虽然湖水补给来源争议较大, 但多数学者都认

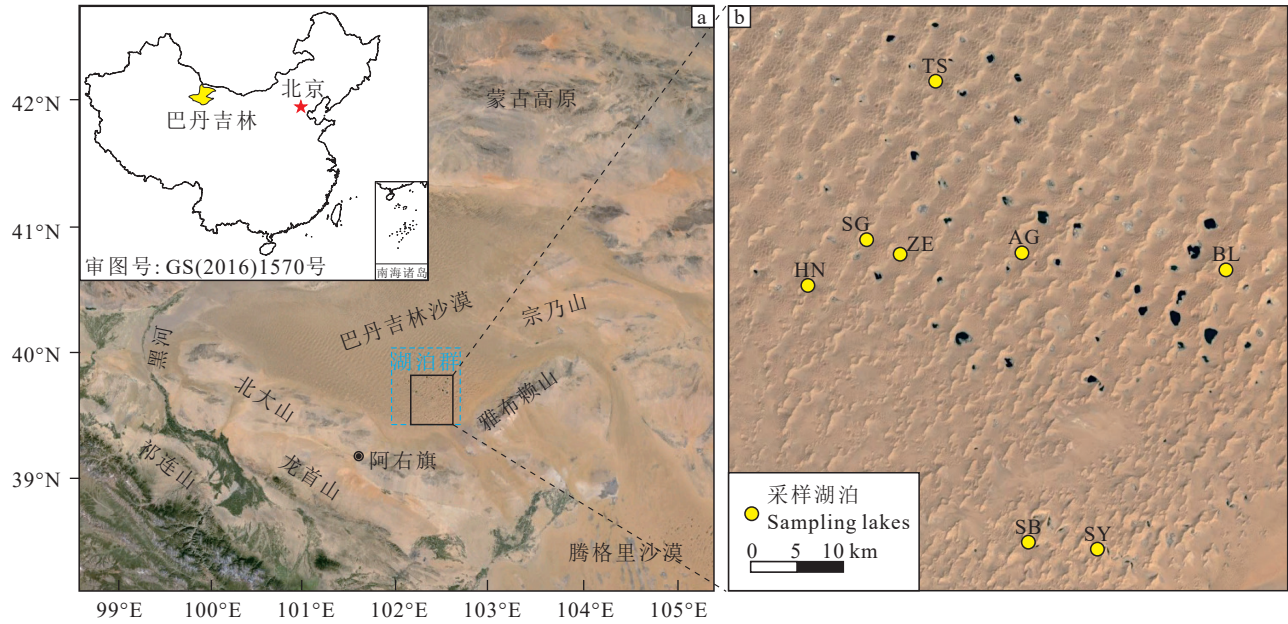


图1 巴丹吉林沙漠地理位置及湖泊采样点分布(中国地图来源于 <http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)

AG—艾根诺尔湖; BL—必鲁图湖; HN—海尼格特湖; SB—邵白吉浪湖; SG—准散根吉林湖; SY—萨音乌苏湖; TS—陶森吉林湖; ZE—昭尔格图湖

Fig.1 Geographical location of the Badain Jaran Desert and sampling site distribution of lake surface sediments (Map of China from <http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)

AG—Aigennuoer Lake; BL—Bilutu Lake; HN—Hainigete Lake; SB—Shaobaijilang Lake; SG—Zhunsangenjilin Lake; SY—Sayinwusu Lake; TS—Taosenjilin Lake; ZE—Zhaoergetu Lake

为地下水是由东南向西北方向对沙漠区进行补给 (Gate et al., 2008a; Dong et al., 2016; Wang et al., 2016, 2021), 湖泊水化学类型特征(陆莹等, 2010)和地下水流场(张竞等, 2015)的调查研究认为沙漠区地下水由东南向西北流动。

3 材料与方 法

根据团队前期的调查, 本次研究湖泊盐度范围 1.86~435.79 g/L(陆莹, 2012), 盐度较低的为邵白吉林(1.86 g/L)和萨音乌苏(15.56 g/L), 其余 6 个湖泊盐度均大于 200 g/L, 选取湖泊的信息见表 1。2021 年 8 月, 利用 VG 底泥采样器(中国上海精导科学仪器生产)在选定的 8 个湖泊中共采集了 37 个湖泊底泥表层样品(图 1, 图 2), 单个采样点位置使用 GPS 进行记录, 具体见表 2。采样过程中使用 SM-5 便携式测深仪(Speedtech, USA)在采集时测量采样点的水深, 测量范围 0.6~79 m, 测量精度 0.1 m, 在水深小于 0.6 m 的采样点使用直尺测量水深。湖泊底泥样品采集后放入自封袋中, 运往实验室低温冷藏 2~3 天, 排出自封袋中上部沉积物析出

的水分后, 利用冷冻干燥机进行冷冻干燥。将冷冻干燥的样品经玛瑙研钵研磨至平均粒径 200 目左右, 加入到带有凹槽的载玻片中, 保证样品表面与载玻片平齐。矿物组成分析在兰州大学教育部西部环境重点实验室进行, 使用荷兰帕纳科公司的 X'Pert Pro 型粉晶 X 射线衍射仪进行检测。样品以 0.017° 的步长在 5°~75° 2θ 的范围内连续扫描, 测定误差 ±5%。之后使用 X'Pert High Score Plus 软件对获得的图谱进行分析, 并结合团队前期在巴丹吉林沙漠湖泊表层沉积物矿物组成的研究成果(李卓仑等, 2015; 马素辉等, 2015; Li et al., 2019)分析得出矿物种类及百分含量。

4 结 果

37 个湖泊表层样品的矿物分析结果见表 2 和图 3。矿物组成主要为碎屑矿物, 含量变化范围 60%~97%, 主要为石英、长石和少量的黏土矿物; 其次为碳酸盐类矿物, 分为碳酸盐阶段的早期矿物方解石、白云石, 少量文石, 这三种矿物在每一个湖泊中均有出现, 含量变化范围为 1%~20%, 之后沉积的

表 1 研究区湖泊基本信息

Table 1 Basic information of the studied lakes

湖泊	经纬度	面积/ km ²	海拔/ m	盐度/ (g/L)
绍白吉浪 (SB)	39.567°N~39.574°N 102.240°E~102.243°E	0.07	1205	1.86
萨音乌苏 (SY)	39.561°N~39.567°N 102.335°E~102.337°E	0.07	1205	15.56
准散根吉林 (SG)	39.860°N~39.868°N 102.027°E~102.035°E	0.36	1142	212.86
昭尔格图 (ZE)	39.848°N~39.854°N 102.067°E~102.078°E	0.47	1144	262.97
艾根诺尔 (AG)	39.848°N~39.853°N 102.225°E~102.232°E	0.28	1151	308.91
海泥格特 (HN)	39.817°N~39.822°N 101.956°E~101.963°E	0.23	1144	308.97
陶森吉林 (TS)	40.020°N~40.015°N 102.115°E~102.122°E	0.28	1147	348.31
必鲁图 (BL)	39.832°N~39.839°N 102.483°E~102.490°E	0.33	1177	435.79

矿物天然碱、钙水碱和斜碳钠钙石(表 3), 这三种矿物在盐度较高的 BL、TS、HN、AG 和 ZE 湖泊中出现, 含量的变化范围为 6%~45%, 含量最高的样品来自于 BL 湖靠近湖泊中心的样品, 其中天然碱含量 27%, 斜碳钠钙石含量 18%。在 SY 湖泊中靠近湖泊边缘的样品 SY-2 中出现了单水方解石, 其含量为 11%。本次研究的硫酸盐类矿物只有无水芒硝, 含量变化范围 6%~23%, 氯化物石盐含量变化范围 1%~8%。

5 讨论

5.1 盐类矿物的来源

巴丹吉林沙漠中的湖泊主要依靠地下水补给 (Dong et al., 2016; Wang et al., 2016), 沙漠中没有地表径流, 所以湖泊中的外源矿物只能通过风力作用携带进入湖泊中。巴丹吉林沙漠地表风积砂的粒度空间分布特征表明该地区的地表风积砂的中值粒径相对稳定, 平均值为 270 μm , 当风速大于 4 m/s 的时候地表风积砂可以通过跃移的方式移动 (宁凯等, 2013; Wang et al., 2018)。仪器监测结果显示巴丹吉林沙漠腹地日间和夜间最强风速分别为 9.53 m/s 和 8.78 m/s, 存在风输沙的可能性 (Hu et al., 2015)。此外, 湖泊表层沉积物的粒度频率特征曲线分析表明湖泊表层沉积物主要来自于沙漠周缘风积砂, 在湖泊中沉积之后受到湖浪作用的搬运和扰动 (Li et al., 2018)。湖泊表层沉积物的矿物组成特征显示矿物主要由碎屑矿物组成, 而且碎屑矿物的含量由湖岸向湖心逐渐减少 (Li et al., 2019), 这也说明湖泊中的碎屑矿物主要来自于周缘的风积砂。

由于湖泊主要依靠地下水补给, 陈立等 (2012) 对沙漠腹地的地下水研究表明, 泉水和井水的 TDS 均为 0.5 g/L 左右, 且水化学类型在空间上没有明显的规律性, 主要以 Na-(Ca)-HCO₃-Cl-(SO₄) 为

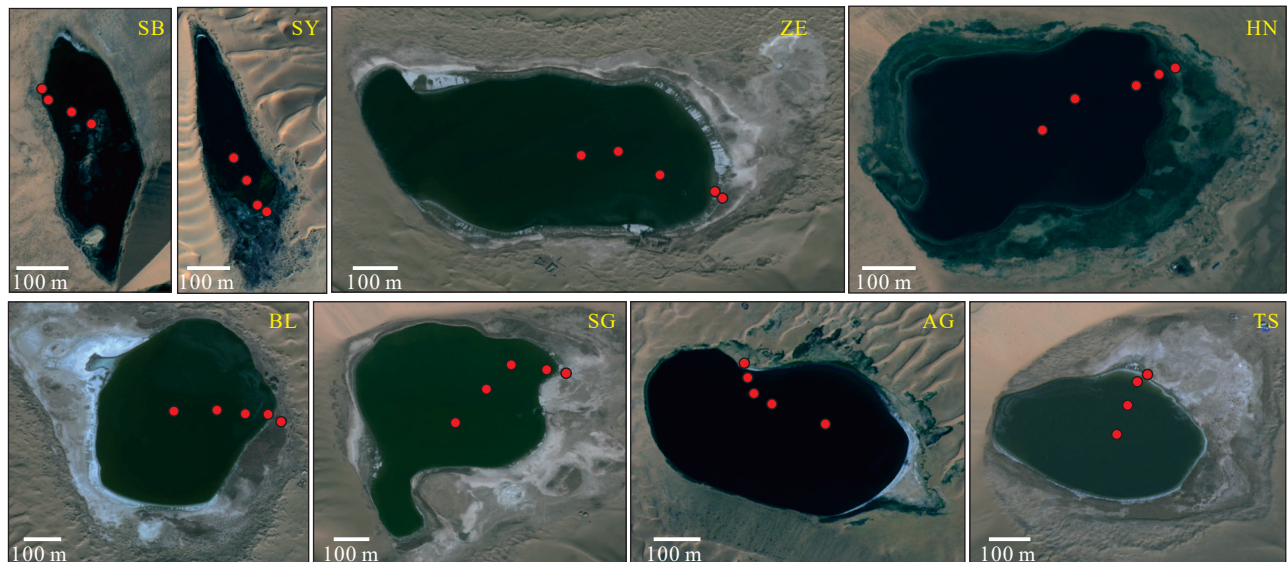


图 2 巴丹吉林沙漠湖泊表层沉积物采样位置

Fig.2 Sampling location of surface sediments of lakes in the Badain Jaran Desert

表 2 巴丹吉林沙漠湖泊表层沉积物矿物组成

Table 2 Mineral composition of surface sediments of lakes in the Badain Jaran Desert

湖泊名称	盐度/(g/L)	样品号	距岸/m	水深/m	碎屑矿物/%	碳酸盐-1/%	碳酸盐-2/%	硫酸盐 (无水芒硝)/%	氯化物 (石盐)/%
邵白吉浪 (SB)	1.86	SB-1	-1		99	1			
		SB-2	3	0.5	98	2			
		SB-3	15	0.7	96	4			
		SB-4	湖心	1.1	98	2			
萨音乌苏 (SY)	15.56	SY-1	-2		96	4			
		SY-2	2	0.5	84	5			
		SY-3	50	0.9	96	4			
		SY-4	50	1.3	99	1			
准散根吉林 (SG)	212.86	SG-1	-20		96	4			
		SG-2	10	0.4	97	3			
		SG-3	50	1.6	96	4			
		SG-4	100	4.9	88	3		6	3
		SG-5	150	4.9	87	4		6	3
昭尔格图 (ZE)	262.97	ZE-1	湖心	4.9	96	4			
		ZE-2	-5		77	4	14		5
		ZE-3	10	0.5	74	5	12	3	6
		ZE-4	50	5.3	70	4		20	5
		ZE-5	100	5.5	67	2		23	8
艾根诺尔 (AG)	308.91	AG-1	-3		97	3			
		AG-2	5	0.4	97	3			
		AG-3	50	1.2	92	8			
		AG-4	100	4.9	83	2	15		
		AG-5	湖心	8.3	87	3	10		
海尼格特 (HN)	308.97	HN-1	-1		90	9			
		HN-2	3	0.4	81	3	14		2
		HN-3	10	2.1	90	2	6		2
		HN-4	20	4	84	3	11		2
		HN-5	40	4.2	81	1	17		1
陶森吉林 (TS)	348.31	TS-1	-10		97	3			
		TS-2	5	0.3	88	4	8		
		TS-3	40	5.3	76	0	22		2
		TS-4	60	4.6	60	2	15	19	4
必鲁图 (BL)	435.79	BL-1	-2		78	20			
		BL-2	5	0.5	82	2	12		4
		BL-3	20	3.4	74	0	20		6
		BL-4	50	3.7	60	0	24	10	5
		BL-5	50	3.7	55	0	45		1

注: SY-2样品中含有11%单水方解石。

主。所以湖泊表层沉积物中的盐类矿物有两种可能的来源,一个是来自周缘风积砂,另一个是由于湖泊蒸发,湖水咸化,形成盐类矿物沉积。巴丹吉林沙漠风积砂的矿物组成显示几乎全为碎屑类矿物,未见盐类矿物(马素辉等, 2015)。沙漠地区气候极端干旱,年蒸发量可达 1450 mm,湖泊中的盐类矿物主要由蒸发引起的矿物沉淀(胡文峰等, 2015; Jia et al., 2021)。综上分析,巴丹吉林沙漠中湖泊的盐类矿物应主要为湖泊自生矿物。

5.2 盐类矿物在湖泊中的分布特征

随着蒸发作用的增强,湖泊中自生盐类沉积顺序为:碳酸盐、硫酸盐和氯化物,其中在碳酸盐阶

段,溶解度较小的方解石、文石和白云石首先沉积,随着湖水中钙、镁的不断消耗,含钠的碳酸盐,如天然碱、钙水碱和斜碳钠钙石等开始沉积(表 3),而且天然碱、钙水碱和斜碳钠钙石在以往的研究中常被称为是蒸发盐类(Anoop et al., 2013; Garcia-Veigas et al., 2013)。所以本文在研究中将这两类碳酸盐类矿物的含量做了分类统计,下文叙述中将方解石、文石和白云石称为碳酸盐-1类,将天然碱、钙水碱和斜碳钠钙石称为碳酸盐-2类(图 4)。

在盐度较低的 SB 和 SY 湖泊中只有方解石和白云石这类碳酸盐阶段早期沉积矿物,其中 SB 湖泊中碳酸盐类含量随着湖水深度的增加呈较弱的

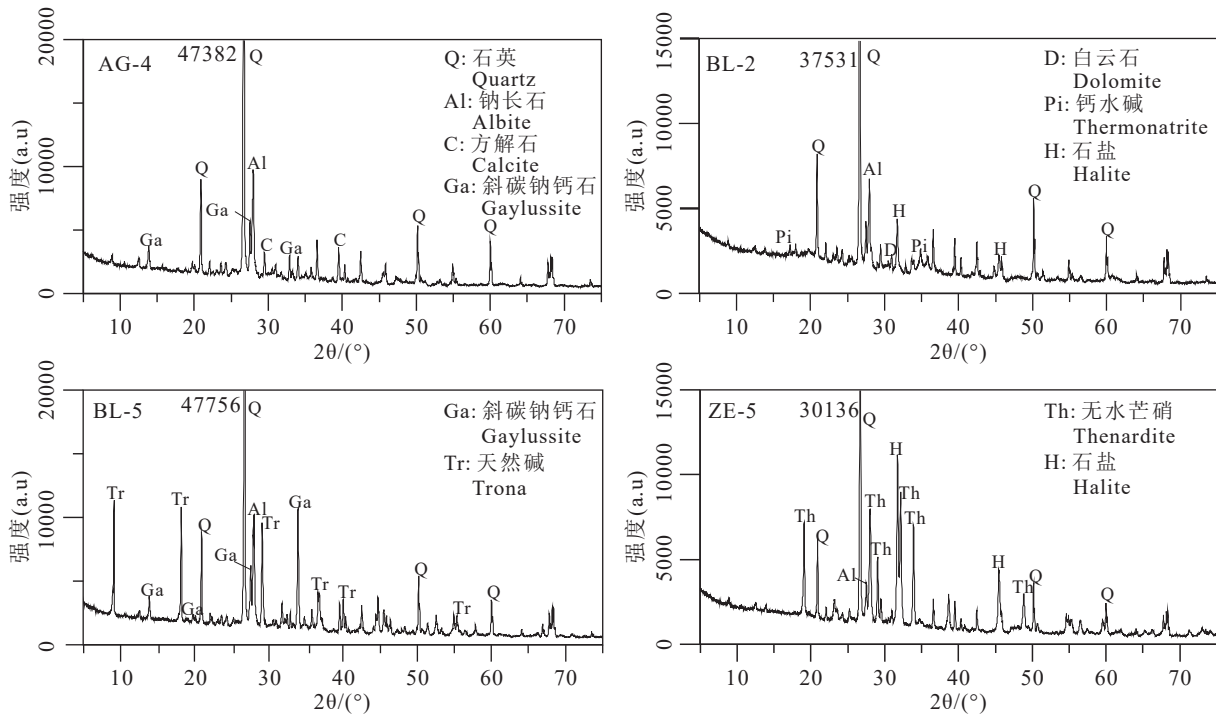


图 3 巴丹吉林沙漠湖泊表层沉积物代表样品 XRD 矿物衍射图
Fig.3 XRD diffractograms of the major minerals in the surface sediments of lakes in the Badain Jaran Desert

表 3 巴丹吉林沙漠湖泊表层沉积物中盐类矿物
Table 3 Saline minerals of surface sediments of lakes in the Badain Jaran Desert

类型	盐类矿物名称	化学组成
碳酸盐	单水方解石 (Monohydrocalcite)	CaCO ₃ ·H ₂ O
	方解石 (Calcite)	CaCO ₃
碳酸盐-1	文石 (Aragonite)	CaCO ₃
	白云石 (Dolomite)	CaCO ₃ ·MgCO ₃
	天然碱 (Trona)	Na ₂ CO ₃ ·NaHCO ₃ ·2H ₂ O
碳酸盐-2	钙水碱 (Thermonatrite)	Na ₂ CO ₃ ·H ₂ O
	斜碳钠钙石 (Gaylussite)	Na ₂ CO ₃ ·CaCO ₃ ·5H ₂ O
硫酸盐	无水芒硝 (Thenardite)	Na ₂ SO ₄
氯化物	石盐 (Halite)	NaCl

增长趋势,这可能是由于湖泊水位较浅,湖水发生了较为充分的混合,在深度上并未发生明显的温度和盐度变化(陈添斐等, 2015; 李克祖等, 2018)。在萨音乌苏西湖中 SY-2 样品中存在 11% 的单水方解石,前人指出该种矿物容易在低温、高 Mg/Ca 比值的水体中形成 (Herrero et al., 2015; Han et al., 2020)。该采样点距湖岸 2 m,水深为 0.5 m,而且沙漠中的温度较高,湖水温度在 4~6 m 以上几乎与湖面温度相同(Wu et al., 2014; 陈添斐等, 2015),该点单水方解石的形成可能是由于蒸发强烈导致的湖

泊边缘局部湖水咸化所致。相邻萨音乌苏西湖短岩心矿物组成也表明湖水咸化是促使单水方解石矿物沉淀的主要原因(Jiang et al., 2021)。在盐度为 212.86 g/L 的 SG 湖泊中,方解石和白云石含量随着水深增加并没有发生明显的变化,说明碳酸盐类沉积在该湖泊中较为均一,在远离湖岸水深为 4.9 m 的两个样品中出现硫酸盐和石盐,且两个样品的含量相同(图 3)。其余盐度大于 200 g/L 的湖泊中均出现了碳酸盐-2 类矿物,在没有硫酸盐类和石盐的湖泊(AG)或者含量较低的湖泊(HN、BL)中,碳酸盐类矿物总含量由湖岸向湖心含量呈逐渐增加的趋势。而在湖泊 ZE 和 TS 中碳酸盐总含量随着硫酸盐类矿物的出现呈下降趋势(图 3),这与 Li et al. (2019)之前研究结果相似。

在本次研究的湖泊表层沉积物中硫酸盐类矿物只有无水芒硝,出现在 SG、ZE、TS 和 BL 中。该矿物是典型的暖相矿物,主要形成于干旱区或者干热区(郑绵平等, 1998),这与巴丹吉林沙漠地区的气候条件相符,而且本次研究出现无水芒硝矿物的采样点深度均小于 6 m(图 4),在这个深度一般湖泊的温度和盐度与湖泊表层相似(Wu et al., 2014; 陈

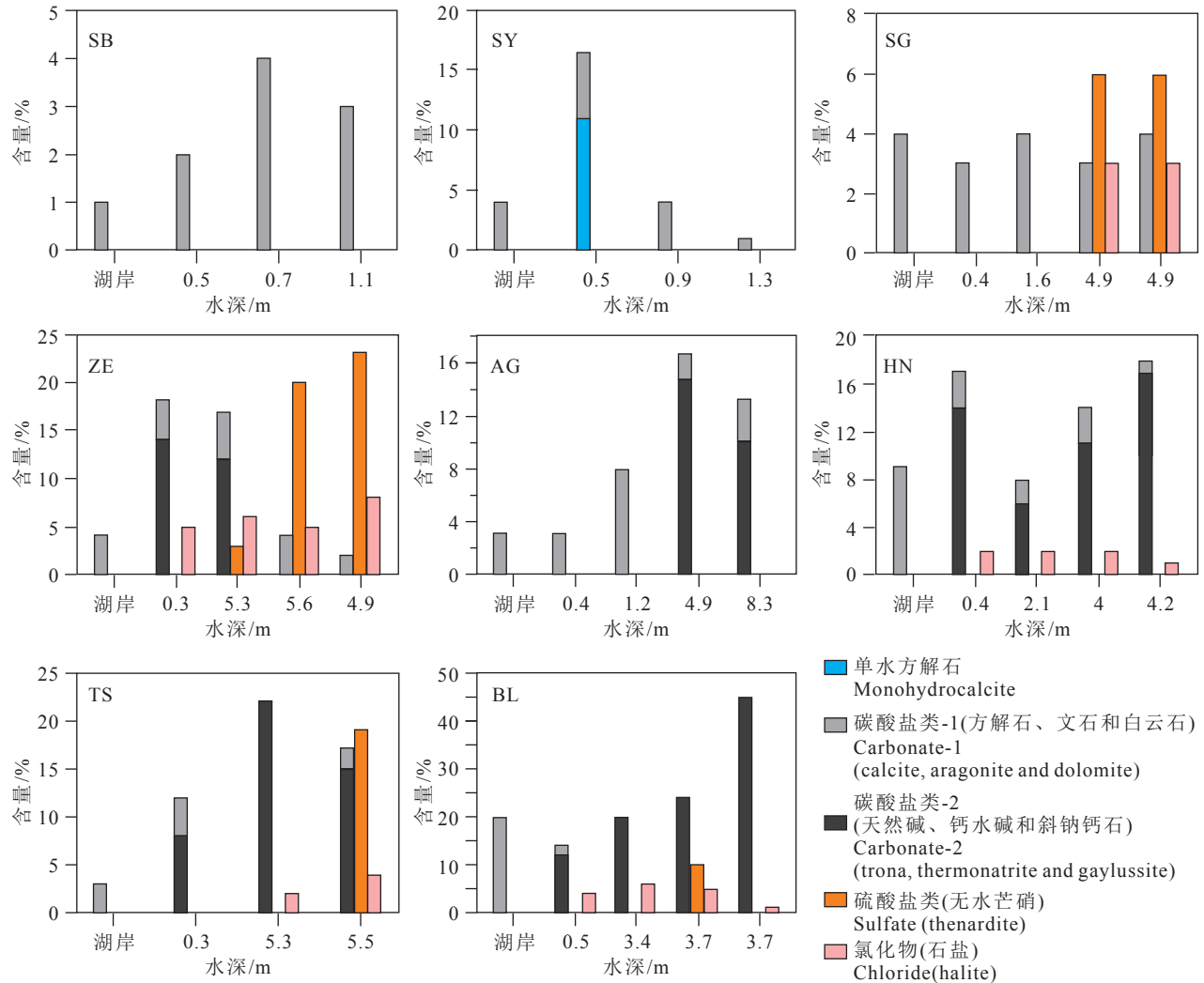


图4 巴丹吉林沙漠湖泊表层沉积物盐类矿物组成分布特征
Fig.4 Distribution pattern of saline minerals of surface sediments of lakes in the Badain Jaran Desert

添斐等, 2015)。石盐是本次研究的湖泊沉积物中主要的氯化物矿物, 在盐度较高的几个湖泊中均有出现, 含量较低, 均在 10% 以下。在湖泊 SG 和 TS 中石盐只在湖水较深的采样点出现, 而在另外三个湖泊中由湖边到湖心的采样点均有石盐沉积, 而含量变化不大。马素辉等(2015)在湖边浅水区采集的样品中也有多个采样点含有石盐沉积, 可能该种矿物受湖泊水深的影响较小。

综合上述分析, 巴丹吉林沙漠湖泊中盐类矿物分布特征与径流补给湖泊的沉积模式类似, 在湖泊边缘碎屑矿物沉积较多, 向湖泊内部盐类矿物沉积逐渐增多, 且矿物类型由碳酸盐类逐渐转为硫酸盐类和氯化物。

5.3 盐类矿物组成随盐度变化及对沙漠区气候环境变化的指示

本次研究采集了多个湖泊不同位置的沉积物进行矿物组成比较, 结果显示(图 5)靠近湖泊边缘的沉积物的盐类矿物含量相对较低, 且明显分为两组湖泊, 盐度较低的湖泊 SB、SY、SG 和 AG 只有碳酸盐-1 类沉积物, 而其余四个盐度较高的湖泊均含有碳酸盐 1 和 2 类沉积物, 且多数含有硫酸盐类沉积。虽然盐度较高的湖泊中靠近边缘的沉积物矿物组成和含量整体上比盐度较低的湖泊含量较高且出现了碳酸盐-2 类和硫酸盐类矿物, 但湖泊内部矿物组成和含量随着盐度升高的变化并没有呈现明显的变化规律(图 6)。风力搬运是沙漠中湖泊

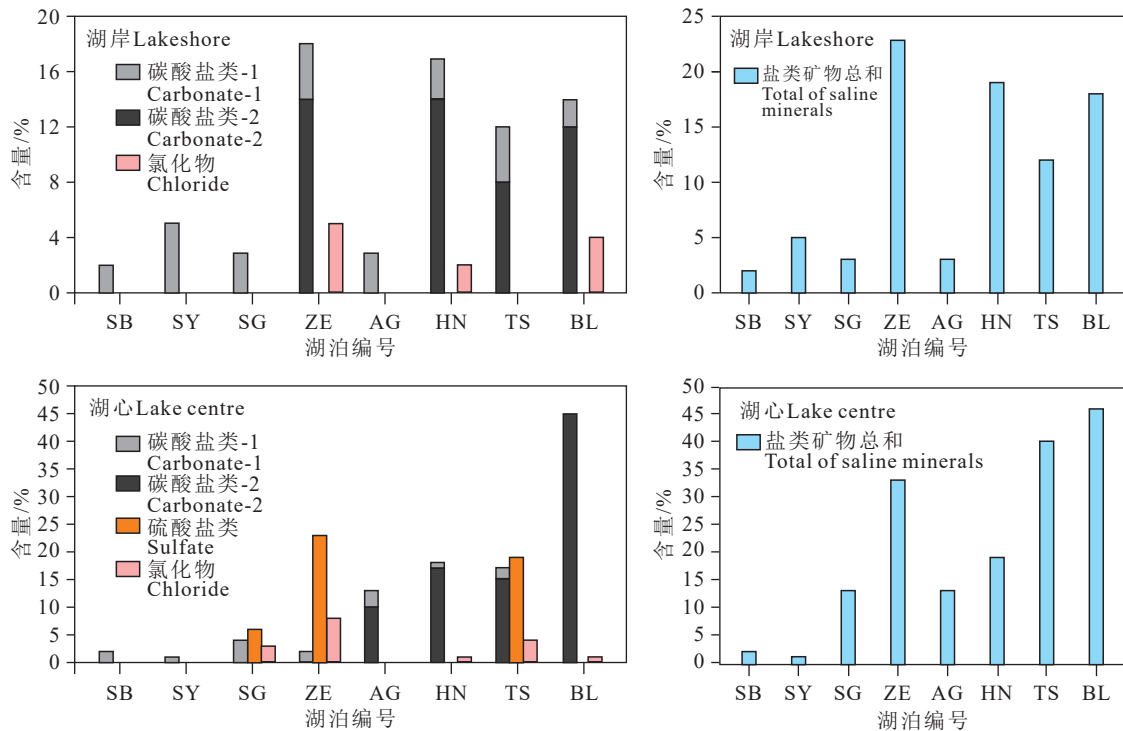


图 5 巴丹吉林沙漠不同湖泊表层沉积物盐类矿物含量变化

Fig.5 Changes in contents of saline minerals in surface sediments of different lakes in the Badain Jaran Desert

沉积物中碎屑矿物的主要来源方式(Li et al., 2018; Wang et al., 2018), 所以湖泊与周缘沙山的距离对湖泊边缘的碎屑矿物含量的影响不容忽视。李卓仑等(2015)分析了不同季节湖泊面积变化与矿物沉积物的关系, 发现盐类矿物百分含量对湖泊萎缩的指示意义要高于湖泊扩张时期, 面积减少超过 10% 的湖泊, 氯化物矿物或硫酸型矿物的百分含量明显增加, 而对于面积增大的湖泊中沉积物的总盐类矿物百分含量和各盐类矿物的百分含量并未呈现明显的相关性。这可能是由于湖泊水位上升会导致湖面与周缘沙山距离变小, 更多的风成物质进入湖泊中的缘故(Ning et al., 2019)。

靠近湖泊中心的沉积物盐类矿物含量较高, 盐度最高的 BL 湖泊的盐类矿物总含量达到了 46%, 但主要为碳酸盐-2 类矿物沉积, 石盐仅有 1%, 无硫酸盐类矿物, 而盐度较低的 SG 和 ZE 湖泊中均是硫酸盐含量最高, 且含有石盐, 这与利用热力学方程推断和实验获得的矿物组合不相符(Pitzer, 1972; Liu et al., 2008)。这可能是由于巴丹吉林沙漠地区湖泊水化学类型空间分异较大, 不同的水化学类型生成了不同的盐类矿物组合(陆莹等, 2010; 郑绵平

和刘喜方, 2010)。但总体来说, 巴丹吉林沙漠中的湖泊靠近湖心沉积物矿物组合相较于湖泊边缘沉积物更能反映湖水盐度的变化(图 5)。而且, 其盐类矿物总含量随盐度的变化相关性较高, 线性拟合曲线的 R^2 达到了 0.73, 样品 AG-5 数据远离拟合曲线(图 6)。本次研究的湖泊表层沉积物样品深度多小于 6 m, 仅有艾根诺尔湖(AG)靠近湖心的样品深度为 8.3 m, 而且该样品(AG-5)中的碳酸盐-2 类含量和总含量较该湖 4.9 m 深的样品(AG-4)低, 这可能是由于湖泊盐度分层或者底部有淡水补给造成湖泊下部盐度偏低的原因(Wu et al., 2014; 陈添斐等, 2015)。综合上述分析, 沙漠湖泊中的盐类矿物沉积与湖水盐度具有很好的对应关系, 而且巴丹吉林沙漠地区湖泊深度多数较小, 多为浅水湖泊, 混合较为充分, 不易受到湖水盐度分层和底部淡水补给的影响, 选取湖水较浅的湖泊更易得到可靠的信息, 而且有望通过盐类矿物的总含量定量重建湖水古盐度信息。

湖泊对气候变化的响应具有高度敏感性, 尤其是湖水盐度的变化(Liu et al., 2008; Zhang et al., 2020, 2022)。干旱地区的湖泊对气候环境的变化

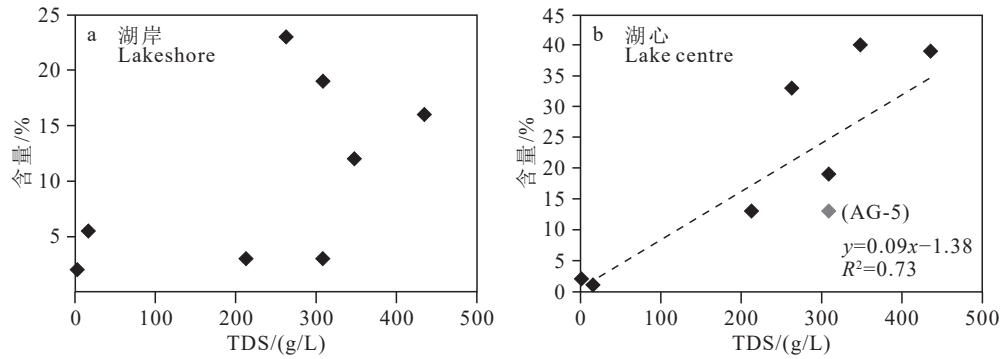


图 6 巴丹吉林沙漠湖泊沉积物盐类矿物含量与盐度关系

Fig. 6 Relationship between the content of saline minerals in surface sediments and salinity of lakes in the Badain Jaran Desert

更加的敏感 (Huang et al., 2016; Jiang et al., 2021)。沙漠中没有地表径流, 沙漠中湖泊中的水 90% 依靠地下水补给 (Dong et al., 2016; Wang et al., 2016)。沙漠中的地下水主要为盐度小于 1 g/L 的淡水 (陈立等, 2012)。巴丹吉林沙漠地区现代湖泊水化学特征显示湖泊中的盐类沉积主要是由于蒸发作用导致的 (Jia et al., 2021)。笔者团队关于沙漠湖泊短岩心研究结果显示, 沙漠中湖泊对于温度的变化更加敏感, 温度升高导致的蒸发作用加强是湖水咸化, 盐类矿物沉淀的主要因素 (Jiang et al., 2021)。巴丹吉林沙漠地处阿拉善高原, 属内陆荒漠气候 (Dong et al., 2013), 且沙漠中的湖泊多为浅水湖泊, 水深一般小于 10 m, 能够快速反映气候环境变化。而且沙漠中湖泊存在“暖岛效应”, 湖区温度比沙漠地区的年平均温度要高约 1.6°C (Liang et al., 2020)。所以, 沙漠中湖泊的盐类矿物沉积可以作为区域气候变化的良好指示器, 石盐和无水芒硝等盐类沉积的出现指示了湖水的咸化, 进而可以反映区域的温度变化 (Jiang et al., 2021)。湖泊的演化与沙漠的扩张与萎缩具有良好的相关性, 温度的升高导致蒸发作用增强, 湖泊咸化或消失, 同时沙漠扩张或沙漠化更加严重 (Lu et al., 2013; Huang et al., 2016; Chen et al., 2019; Woolway et al., 2020; Wu et al., 2020)。沙漠及周缘地区湖泊中的盐类矿物组合及含量的变化可以作为讨论干旱地区气候、环境变化问题的重要指标。

6 结 论

本文分析了巴丹吉林沙漠中 8 个湖泊中不同位置的 37 个表层沉积物矿物组成, 结果显示湖泊沉积物主要由碎屑岩矿物 (石英、长石和少量黏土

矿物)、碳酸盐阶段早期沉积矿物 (方解石、文石和白云石) 和后期沉积矿物 (天然碱、钙水碱和斜碳钠钙石) 以及硫酸盐类 (无水芒硝) 和氯化物 (石盐) 组成。在盐度较低水位较浅的萨音乌苏湖 (SY) 和邵白吉浪湖 (SB) 湖泊中, 盐类沉积仅有碳酸盐类矿物, 且随着远离湖岸盐类沉积没有表现出明显的规律, 可能是由于湖水混合较为均匀。其余湖泊中碎屑矿物含量在湖泊边缘最高, 向湖泊内部盐类矿物沉积逐渐增多, 且矿物类型由碳酸盐逐渐转为硫酸盐类和氯化物, 这与具有径流补给的湖泊沉积规律相似。

湖泊边缘沉积物的矿物组成更易受到湖泊水位、面积变化的影响, 而靠近湖泊中心的沉积物可能受到水深、水化学类型的影响。浅水湖泊不易受到湖水盐度分层和底部淡水补给的影响, 盐类矿物总含量与湖水盐度具有较好的线性关系。巴丹吉林沙漠中地下水补给型湖泊中盐类矿物组合及其含量能够很好地响应湖水盐度的变化, 靠近湖泊中心的沉积物适合通过盐类矿物组合及其含量重建沙漠地区气候环境变化过程。

沙漠湖泊对气候变化的响应具有高度敏感性, 尤其是湖水盐度的变化。巴丹沙漠中没有地表径流, 湖泊盐类矿物沉积主要是由于蒸发作用导致的, 温度升高导致的蒸发作用加强是湖水咸化, 盐类矿物沉淀的主要因素。沙漠湖泊的盐类矿物沉积可以作为区域气候变化的良好指示器, 石盐和无水芒硝等盐类沉积的出现指示了湖水的咸化, 进而可以反映区域温度变化, 讨论全球变暖、沙漠化等环境问题。

致谢: 教育部西部环境重点实验室李琼老师帮

助了 XRD 实验测试, 刘江、孙德浩、刘啸和陆晨遨帮助处理了样品, 在此一并表示感谢。

References

- Anoop A, Prasad S, Plessen B, Basavaiah N, Gaye B, Naumann R, Menzel P, Weise S, Brauer A. 2013. Palaeoenvironmental implications of evaporative gypsum crystals from Lonar Lake, central India[J]. *Journal of Quaternary Science*, 28(4): 349–359.
- Chen J S, Li L, Wang J Y, Barry D A, Sheng X F, Gu W Z, Zhao X, Chen L. 2004. Groundwater maintains dunes landscape[J]. *Nature*, 432: 459–460.
- Chen Jiansheng, Zhao Xia, Sheng Xuefen, Dong Haizhou, Rao Wenbo, Su Zhiguo. 2006. Formation mechanism of lakes and sand mountains in Badain Jaran desert[J]. *Science Bulletin*, 51(23): 2789–2796 (in Chinese).
- Chen Li, Wang Nai'ang, Wang Hao, Dong Chunyu, Lu Ying, Lu Junwei. 2012. Spatial patterns of chemical parameters of lakes and groundwater in Badain Jaran Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 32(2): 531–538 (in Chinese with English abstract).
- Chen Tianfei, Wang Xusheng, Hu Xiaonong, Lu Huiting, Gong Yanping. 2015. Clines in salt lakes in the Badain Jaran Desert and their significances in indicating fresh groundwater discharge[J]. *Journal of Lake Sciences*, 27(1): 183–189 (in Chinese with English abstract).
- Chen T Y, Lai Z P, Liu S W, Wang Y X, Wang Z T, Miao X D, An F Y, Yu L P, Han F Q. 2019. Luminescence chronology and palaeoenvironmental significance of limnic relics from the Badain Jaran Desert, northern China[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 177: 240–249.
- Dong C Y, Wang N A, Chen J S, Li Z L, Chen H B, Chen L, Ma N. 2016. New observational and experimental evidence for the recharge mechanism of the lake group in the Alxa Desert, north-central China[J]. *Journal of Arid Environments*, 124: 48–61.
- Dong Z B, Qian G Q, Lv P, Hu G Y. 2013. Investigation of the sand sea with the tallest dunes on Earth: China's Badain Jaran Sand Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 120: 20–39.
- Fan J W, Xiao J L, Wen R L, Zhang S R, Huang Y, Yue J J, Wang X, Cui L L, Li H, Xue D S, Liu Y H. 2019. Mineralogy and carbonate geochemistry of the Dali Lake sediments: Implications for paleohydrological changes in the East Asian summer monsoon margin during the Holocene[J]. *Quaternary International*, 523: 103–112.
- García-Veigas J, Gündoğan I, Helvacı C, Prats E. 2013. A genetic model for Na-carbonate mineral precipitation in the Miocene Bepazari trona deposit, Ankara province, Turkey[J]. *Sedimentary Geology*, 294: 315–327.
- Gates J B, Edmunds W M, Darling W G, Ma J Z, Pang Z, Young A A. 2008a. Conceptual model of recharge to southeastern Badain Jaran Desert groundwater and lakes from environmental tracers[J]. *Applied Geochemistry*, 23(12): 3519–3534.
- Gates J B, Edmunds W M, Ma J Z, Sheppard P R. 2008b. A 700-year history of groundwater recharge in the drylands of NW China[J]. *Holocene*, 18: 1045–1054.
- Han L, Li Y, Liu X Q, Yang H. 2020. Paleoclimatic reconstruction and the response of carbonate minerals during the past 8000 years over the northeast Tibetan Plateau[J]. *Quaternary International*, 553: 94–103.
- Herrero M J, Escavy J I, Schreiber B C. 2015. Thenardite after mirabilite deposits as a cool climate indicator in the geological record: Lower Miocene of central Spain[J]. *Climate of the Past*, 11(1): 1–13.
- Hu F G, Yang X P. 2016. Geochemical and geomorphological evidence for the provenance of aeolian deposits in the Badain Jaran Desert, northwestern China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 131: 179–192.
- Hu W F, Wang N A, Zhao L Q, Ning K, Zhang X H, Sun J. 2015. Surface energy and water vapor fluxes observed on a megadune in the Badain Jaran Desert, China[J]. *Journal of Arid Land*, 7(5): 579–589.
- Hu Wenfeng, Wang Nai'ang, Zhao Liqiang, Ning Kai, Zhang Hexun, Sun Jie. 2015. Water-heat exchange over a typical lake in Badain Jaran Desert, China[J]. *Progress in Geography*, 34(8): 1061–1071 (in Chinese with English abstract).
- Huang J P, Yu H P, Guan X D, Wang G Y, Guo R X. 2016. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 6: 166–171.
- Jia B, Si J H, Xi H Y, Qin J. 2021. A characterization of the hydrochemistry and main controlling factors of lakes in the Badain Jaran Desert, China[J]. *Water*, 13: 2931.
- Jiang Gaolei, Nie Zhenlong, Liu Zhe, Wang Zhe, Zhao Hua, Yang Jinsong, Shen Jianmei. 2021. OSL ages and its hydrological implications of alluvial-diluvial deposits from the southern margin of Badain Jaran Desert[J]. *Earth Science*, 46(5): 1829–1839 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Gaolei, Nie Zhenlong, Shen Jianmei, Wang Zhe, Zhao Hua, Liu Linjing, Yang Jinsong. 2017. Research progress of Quaternary environment of Badain Jaran Desert[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 37(1): 141–149 (in Chinese with English abstract).
- Jiang G L, Wang N A, Mao X, Zhao H, Liu L J, Shen J M, Nie Z L, Wang Z. 2021. Hydrological evolution of a lake recharged by groundwater in the Badain Jaran Desert over the past 140 years[J]. *Frontiers in Earth Science*, 9: 721724.
- Jin Zhangdong. 2011. Composition, origin and environmental interpretation of minerals in lake sediments and recent progress[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 23(1): 34–45 (in Chinese with English abstract).
- Lai Tingting, Wang Nai'ang, Huang Yinzhou, Zhang Jianming, Zhao Liqiang, Xu Mingshan. 2012. Seasonal changes of lake in Tengery Desert of 2002[J]. *Journal of Lake Science*, 24(6): 957–964 (in Chinese with English abstract).
- Li J F, Liu X Q. 2018. Orbital- and suborbital-scale changes in the East Asian summer monsoon since the last deglaciation[J]. *The Holocene*, 28(8): 1216–1224.
- Li Kezu, Cao Le, Meng Lingqun, Liu Xuequan, Yan Dongming. 2018.

- Bathymetric survey and thermal stratification of Lake Chergele in the Badain Jaran Desert[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 32(12): 137–144 (in Chinese with English abstract).
- Li Z L, Chen Q J, Zhang C, Yu Q J, Dong S P, Zhao L Q, Wang N A. 2019. Environmental significance of the chemical composition of sediments in groundwater-recharged lakes of the Badain Jaran Desert, NW China[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20: 1026–1040.
- Li Zhuolun, Ma Suhui, Wang Nai'ang, Li Meng, Sun Jiaqi, Wei Fangli. 2015. Impacts of salt lakes area changes in Badian Jaran Desert on saline minerals assemblages[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 23(4): 8–14 (in Chinese with English abstract).
- Li Z L, Wei Z Q, Dong S P, Chen Q J. 2018. The paleoenvironmental significance of spatial distributions of grain size in groundwater-recharged lakes: A case study in the hinterland of the Badain Jaran Desert, northwest China[J]. *Earth Surface Processes Landforms*, 43: 363–372.
- Liang X Y, Zhao L Q, Xu X B, Niu Z M, Zhang W J, Wang N A. 2020. Plant phenological responses to the warm island effect in the lake group region of the Badain Jaran Desert, northwestern China[J]. *Ecological Informatics*, 57: 101066.
- Liu X Q, Dong H L, Rech J A, Matsumoto R, Yang B, Wang Y B. 2008. Evolution of Chaka Salt Lake in NW China in response to climatic change during the Latest Pleistocene–Holocene[J]. *Quaternary Science Reviews*, 27(7/8): 867–879.
- Lu H Y, Yi S W, Xu Z W, Zhou Y L, Zeng L, Zhu F Y, Feng H, Dong L N, Zhuo H X, Yu K F, Mason J, Wang X Y, Chen YY, Lu Q, Wu B, Dong Z B, Qu J J, Wang X M, Guo Z T. 2013. Chinese deserts and sand fields in Last Glacial Maximum and Holocene optimum[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58: 1–9.
- Lu Ying, Wang Nai'ang, Li Guipeng, Li Zhuolun, Dong Chunyum, Lu Junwei. 2010. Spatial distribution of lakes hydro-chemical types in Badain Jaran Desert[J]. *Journal of Lake Sciences*, 22(5): 774–782 (in Chinese with English abstract).
- Lu Ying. 2012. Analysis of Spatiotemporal Variations Characters and the Cause of its Formation of the Badain Jaran Desert Lake[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 1–64 (in Chinese with English abstract).
- Ma Suhui, Li Zhuolun, Wang Nai'ang, Ning Kai, Li Meng. 2015. Mineralogical assemblages in surface sediments and its formation mechanism in the groundwater recharged lakes: A case study of lakes in the Badain Jaran Desert[J]. *Journal of Lake Sciences*, 27(4): 727–734 (in Chinese with English abstract).
- Ning Kai, Li Zhuolun, Wang Nai'ang, Sun Jianwei, Shao Wanwan. 2013. Spatial characteristics of grain size and its environmental implication in the Badain Jaran Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 33(3): 642–648 (in Chinese with English abstract).
- Ning K, Wang N A, Lv X N, Li Z L, An R, Zhang LL. 2019. A grain size and n-alkanes record of Holocene environmental evolution from a groundwater recharge lake in Badain Jaran Desert, Northwestern China[J]. *The Holocene*, 29(6): 1045–1058.
- Pitzer K S. 1972. Thermodynamics of electrolytes. I. Theoretical basis and general equations[J]. *Journal of Physical Chemistry*, 77(2): 268–277.
- Shen J, Liu X Q, Wang S M, Matsumoto R. 2005. Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18, 000 years[J]. *Quaternary International*, 136(1): 131–140.
- Wang F, Li Z J, Wang X, Li B F, Chen F H. 2018. Variation and interplay of the Siberian High and westerlies in central-east Asia during the past 1200 kyr[J]. *Aeolian Research*, 33: 62–81.
- Wang F, Sun D H, Chen F H, Bloemendal J, Guo F, Li Z J, Zhang Y B, Li B F, Wang X. 2015. Formation and evolution of the Badain Jaran Desert, North China, as revealed by a drill core from the desert center and by geological survey[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 426: 139–158.
- Wang Lijuan, Wang Zhe, Liu Min, Shen Jianmei, Nie Zhenlong. 2023. The temperature and precipitation change and its impact on lakes in Badain Jaran Desert over the last 60 years[J]. *Geological Bulletin of China*, 42(7): 1218–12227 (in Chinese with English abstract).
- Wang Nai'ang, Ma Ning, Chen Hongbao, Chen Xiulian, Dong Chunyu, Zhang Zhenyu. 2013. A preliminary study of precipitation characteristics in the hinterland of Badain Jaran desert[J]. *Advances in Water Science*, 24(2): 153–160 (in Chinese with English abstract).
- Wang N A, Ning K, Li Z L, Wang Y X, Jia P, M L. 2016. Holocene high lake-levels and pan-period on Badain Jaran Desert[J]. *Science China Earth Sciences*, 59: 1–10.
- Wang Tao, Chen Guangting. 2008. Landscape in the West: Desert and Gobi in China[M]. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press (in Chinese).
- Wang Z, Wang L J, Shen J M, Nie Z L, Meng L Q, Cao L, Wei S B, Zeng X F. 2021. Groundwater characteristics and climate and ecological evolution in the Badain Jaran Desert in the southwest Mongolian Plateau[J]. *China Geology*, 4: 421–432.
- Woolway R I, Kraemer B M, Lenters J D, Merchant C J, O'Reilly C M, Sharma S. 2020. Global lake responses to climate change[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(8): 388–403.
- Wu D, Zhou A F, Zhang J W, Chen J H, Li G Q, Wang Q, Chen L, Madsen D, Abbott M, Cheng B, Chen F H. 2020. Temperature-induced dry climate in basins in the northeastern Tibetan Plateau during the early to middle Holocene[J]. *Quaternary Science Reviews*, 237: 106311.
- Wu Y, Wang N A, Zhao L Q, Zhang Z Y, Chen L, Lu Y, LvX N, Chang J L. 2014. Hydrochemical characteristics and recharge sources of Lake Nuertu in the Badain Jaran Desert[J]. *Chinese Science Bulletin*, 59: 886–895.
- Yan Changzhen, Li Sen, Lu Junfeng, Liu Lichao. 2020. Lake number and area in the Tengger Desert during 1975–2015[J]. *Journal of Desert Research*, 40(4): 183–189 (in Chinese with English abstract).
- Yang X P, Williams M A J. 2003. The ion chemistry of lakes and late Holocene desiccation in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China[J]. *Catena*, 51(1): 45–60.
- Yin Lihe, Zhang Jun, Zhang Pengwei, Gu Xiaofan, Li Xiaodeng. 2024. Ten questions and visions of groundwater in the Taklimakan Desert: Based on 60-year hydrogeological investigation and research[J]. *Geology in China*, 51(3): 865–880 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Zhang Jing, Wang Xusheng, Hu Xiaonong, Lu Huiting, Gong Yanping. 2015. The Macro-characteristics of groundwater flow in the Badain Jaran Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 35(3): 774–782 (in Chinese with English abstract).
- Zhang M W, Liu X Q, Yu Z T, Wang Y. 2022. Paleolake evolution in response to climate change since middle MIS 3 inferred from Jilantai Salt Lake in the marginal regions of the ASM domain[J]. *Quaternary International*, 607: 48–57.
- Zhang M W, Liu X Q. 2020. Climate changes in the Qaidam Basin in NW China over the past 40 kyr[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 551: 109679.
- Zhang Xinyi, Fan Xiaolu, Tian Mingzhong. 2022. Mineralogical characteristics and its significance of late Pleistocene sediments in the Badain Jaran Desert[J]. *Arid Land Geography*, 45(6): 1773–1783 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhonghu, Li Lierong. 2005a. Groundwater Resource of China (Gansu Vol)[M]. Beijing: SinoMaps Press (in Chinese).
- Zhang Zhonghu, Li Lierong. 2005b. Groundwater Resource of China (Xinjiang Vol)[M]. Beijing: SinoMaps Press (in Chinese).
- Zhao H, Li B, Wang X F, Cohen T J, Fan Y X, Yang H Y, Wang K Q, Sheng Y W, Zhan S A, Li S H, Wang T, Wang X L, Chen F H. 2023. Evolution and migration of the highest megadunes on Earth[J]. *Global and Planetary Change*, 225: 104133.
- Zheng Mianping, Liu Xifang. 2010. Hydrochemistry and minerals assemblages of salt lakes in the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(11): 1585–1600 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping, Zhao Yuanyi, Liu Junying. 1998. Quaternary saline lake deposition and paleoclimate[J]. *Quaternary Sciences*, 4: 298–307 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jinfeng, Wang Nai'ang, Chen Hongbao, Dong Chunyu, Zhang Hua'an. 2010. Study on the boundary and the area of Badain Jaran Desert based on remote sensing imagery[J]. *Progress in Geography*, 29(9): 1087–1098 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhenda. 1980. An Introduction to the Desert in China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- 46(5): 1829–1839.
- 姜高磊, 聂振龙, 申建梅, 王哲, 赵华, 刘林敬, 杨劲松. 2017. 巴丹吉林沙漠第四纪环境研究现状. [J] *海洋地质与第四纪地质*, 37(1): 141–149.
- 金章东. 2011. 湖泊沉积物的矿物组成、成因、环境指示及研究进展 [J]. *地球科学与环境学报*, 23(1): 34–45.
- 来婷婷, 王乃昂, 黄银洲, 张建明, 赵力强, 许治山. 2012. 2002 年腾格里沙漠湖泊季节变化研究[J]. *湖泊科学*, 24(6): 957–964.
- 李克祖, 曹乐, 孟令群, 刘学全, 闫冬鸣. 2018. 巴丹吉林沙漠车日格勒湖水深分布与水温分层特征[J]. *干旱区资源与环境*, 32(12): 137–144.
- 李卓仑, 马素辉, 王乃昂, 李孟, 孙佳琦, 魏芳莉. 2015. 巴丹吉林沙漠盐湖面积变化对湖泊边缘表层沉积物盐类矿物组合影响. *盐湖研究*, 23(4): 8–14.
- 陆莹, 王乃昂, 李贵鹏, 李卓仑, 董春雨, 路俊伟. 2010. 巴丹吉林沙漠湖泊水化学空间分布特征[J]. *湖泊科学*, 22(5): 774–782.
- 陆莹. 2012. 巴丹吉林沙漠湖泊水化学时空分布特征及其成因初探 [D]. 兰州: 兰州大学, 1–64.
- 马素辉, 李卓仑, 王乃昂, 宁凯, 李孟. 2015. 地下水补给型湖泊表层沉积物矿物组成及其形成机制——以巴丹吉林沙漠湖泊群为例 [J]. *湖泊科学*, 27(4): 727–734.
- 宁凯, 李卓仑, 王乃昂, 孙建伟, 邵婉婉. 2013. 巴丹吉林沙漠地表风积砂粒度空间分布及其环境意义[J]. *中国沙漠*, 33(3): 642–648.
- 王丽娟, 王哲, 刘敏, 申建梅, 聂振龙. 2023. 近 60 年间巴丹吉林沙漠气温和降水变化及其对湖泊的影响. *地质通报*, 42(7): 1218–1227.
- 王乃昂, 马宁, 陈红宝, 陈秀莲, 董春雨, 张振瑜. 2013. 巴丹吉林沙漠腹地降水特征的初步分析[J]. *水科学进展*, 24(2): 153–160.
- 王涛, 陈广庭. 2008. 西部地表: 中国的沙漠·戈壁[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社.
- 颜长珍, 李森, 逯军峰, 刘立超. 2020. 1975–2015 年腾格里沙漠湖泊面积与数量[J]. *中国沙漠*, 40(4): 183–189.
- 尹立河, 张俊, 张鹏伟, 顾小凡, 李小等. 2024. 塔克拉玛干沙漠地下水十大问题与展望: 基于 60 年来的水文地质调查研究成果[J]. *中国地质*, 51(3): 865–880.
- 张竞, 王旭升, 胡晓农, 卢会婷, 巩艳萍, 万力. 2015. 巴丹吉林沙漠地下水流场的宏观特征[J]. *中国沙漠*, 35(3): 774–782.
- 张新毅, 范小露, 田明中. 2022. 巴丹吉林沙漠晚更新世沉积物矿物学特征及其指示意义. *干旱区地理*, 45(6): 1773–1783.
- 张宗祜, 李烈荣. 2005a. 中国地下水资源 (甘肃卷)[M]. 北京: 中国地图出版社.
- 张宗祜, 李烈荣. 2005b. 中国地下水资源 (新疆卷)[M]. 北京: 中国地图出版社.
- 郑绵平, 刘喜方. 2010. 青藏高原盐湖湖水化学及其矿物组合特征[J]. *地质学报*, 84(11): 1585–1600.
- 郑绵平, 赵元艺, 刘俊英. 1998. 第四纪盐湖沉积与古气候[J]. *第四纪研究*, (4): 298–307.
- 朱金峰, 王乃昂, 陈红宝, 董春雨, 张华安. 2010. 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*, 29(9): 1087–1094.
- 朱震达. 1980. 中国沙漠概论[M]. 北京: 科学出版社.

附中文参考文献

- 陈建生, 赵霞, 盛雪芬, 董海洲, 饶文波, 苏治国. 2006. 巴丹吉林沙漠湖泊群与沙山形成机理研究[J]. *科学通报*, 51(23): 2789–2796.
- 陈立, 王乃昂, 王浩, 董春雨, 陆莹, 路俊伟. 2012. 巴丹吉林沙漠湖泊与地下水化学参数初步研究[J]. *中国沙漠*, 32(2): 531–538.
- 陈添斐, 王旭升, 胡晓农, 卢会婷, 巩艳萍. 2015. 巴丹吉林沙漠盐湖跃层对地下水排泄的指示作用[J]. *湖泊科学*, 27(1): 183–189.
- 胡文峰, 王乃昂, 赵力强, 宁凯, 张洵赫, 孙杰. 2015. 巴丹吉林沙漠典型湖泊湖气界面水-热交换特征[J]. *地理科学进展*, 34(8): 1061–1071.
- 姜高磊, 聂振龙, 刘哲, 王哲, 赵华, 杨劲松, 申建梅. 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[J]. *地球科学*,