

# 巴丹吉林沙漠湖泊水化学空间分带性与湖泊面积的等级关系

陆 莹, 王乃昂\*, 李卓仑, 董春雨, 朱金峰

(兰州大学资源环境学院, 兰州大学干旱区水循环与水资源研究中心, 兰州 730000)

**摘要:** 依据 Q-型系统聚类分析方法, 选取巴丹吉林沙漠湖泊水化学离子为变量, 将研究区划分为 A、B、C 三个分带(区)。同时, 利用遥感影像资料提取相应湖泊的面积信息, 并进行等级划分, 与湖泊水化学特性作对比分析, 以探究二者的关系。结果表明: 位于沙漠东南边缘的 A 类湖泊沿东北—西南向呈带状分布, 以淡水湖和微咸水湖为主, 湖泊面积极小; B 类湖泊占据了腹地湖区的绝大部分区域, 沿西北—东南呈带状分布, 以面积大, 盐分高为主要特点, 且与 A 湖泊带无交叉区域。C 类湖泊数量少, 分散在 A、B 湖泊带的边缘地带, 但理化特征却不同于周边湖泊, 极有可能是由局部地理环境造成的主要湖泊带周边的特例。聚类结果与面积分级的综合分析表明, 沙漠南北湖区水化学与面积不完全相关。

**关键词:** 巴丹吉林沙漠; 湖泊; 水化学; 聚类分析

**文章编号:** 1000-0585(2011)11-2083-09

## 1 引言

位于我国阿拉善荒漠中心的巴丹吉林沙漠, 以少雨干旱, 环境恶劣, 人迹罕至而著称<sup>[1~3]</sup>。而沙漠腹地因存在众多永久性湖泊, 成为第四纪地质学<sup>[4~6]</sup>、湖泊水文学<sup>[7~10]</sup>研究的重点区域。沙漠湖泊水化学特性的空间分布是对湖泊演变状态最直观的表达, 考虑到湖泊、地下水等水体的化学组成在运移、形成过程中与区域气候和地质环境有着密切联系<sup>[11]</sup>, 流域内阴阳离子组成等水文地球化学手段可以为水体的形成、演变以及径流形式提供定性和定量的研究方法<sup>[12]</sup>。众多学者以巴丹吉林沙漠特有的自然地理环境为平台, 分析湖泊与地下水水化学特性<sup>[13~15]</sup>, 探讨沙漠湖泊补给源、补给路径等问题, 并取得了一定的成果<sup>[16~21]</sup>。但是, 由于该区域湖泊水化学特征的影响因素较多, 其环境意义往往存在一定的多解性, 导致目前虽然对巴丹吉林沙漠湖泊水化学的相关内容进行了大量研究, 但对其影响因素的探讨仍存在一些不足, 尤其是湖泊水量多寡对湖泊水化学的空间分布是否存在一定的影响, 至今尚少有涉及。这些问题的研究, 不仅可以明晰其水化学的环境意义, 还可为进一步深入研究该区域湖泊水化学的空间分布规律提供很好的参考。

鉴于上述原因, 本文在明确巴丹吉林沙漠湖泊水化学特征空间分带性的基础上, 提取

**收稿日期:** 2011-02-15; **修订日期:** 2011-07-12

**基金项目:** 国家基础科学人才培养基金 (J1030519); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20090211110025); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金 (lzujbky-2010-221, lzujbky-2009-66)

**作者简介:** 陆 莹 (1986-), 女, 研究生, 主要从事气候变化与水循环研究。E-mail: luy2009@lzu.cn

\* **通讯作者:** 王乃昂 (1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为气候变化与水循环、环境变迁与沙漠历史地理。E-mail: wangna@lzu.edu.cn

湖泊面积数据,在一定程度上用以表征湖泊水量信息,通过讨论沙漠湖泊水化学和面积间的相互关系,探究湖泊面积变化对水化学特征空间分带性是否存在影响,从而进一步明确其水化学的环境意义。

## 2 数据来源与研究方法

巴丹吉林沙漠位于雅布赖盐湖与雅布赖山之西北,宗乃山、省道 S218 公路之西,黑河正义峡出山口、弱水东岸至古日乃湖之东;合黎山、北大山之北,拐子湖、古居延泽之南,面积为 5.2162 万  $\text{km}^2$ ,实系我国仅次于塔克拉玛干沙漠的第二大沙漠<sup>[22]</sup>(图 1)。从地质构造上看,巴丹吉林沙漠总体呈南高北低、东高西低的地势,属阿拉善台块的凹陷盆地,被宗乃山西侧断裂与阿拉善隆起分开<sup>[5]</sup>,盆地边缘有侏罗纪、白垩纪以及第三纪地层出露,盆地中部风成沙下伏主要为下更新统冲积—湖积层或第三纪底层。从气候条件来看,沙区处于全球西风环流中部,东南季风北缘,全年主要受 W-NW 大陆风系控制<sup>[23]</sup>。区内多年平均蒸发量由东南向西北增加,降水量由东南向西北逐渐减少,东南部降水约为 120mm,西北部降水不足 40mm,1961~2001 年年均蒸发量达 1040mm<sup>[6, 7]</sup>。沙漠无地表水流分布,属极度干旱的大陆性气候<sup>[24]</sup>。

本文所用湖泊水化学数据均来自 2009 年 9 月巴丹吉林沙漠考察队由北向南穿越沙漠时所采集水样的实验结果,采样过程及实验数据参见文献 [9],提取 35 个湖泊作为独立样本,对湖泊水化学特征采用系统聚类法进行分析讨论。所选样品采样地点及编号见上图。

另外,统计对应湖泊的面积,以便与其水化学特征作对比。湖泊面积信息来自全球陆地覆盖设施中心——地球科学数据交换站点 (GLCF-ESDI) 最新提供的摄于 2002 年 9 月 26 日的 Landsat7-ETM+ L2G 级遥感影像资料,其轨道号 (Path/Row) 为 132/32,影像质量良好,平均云量均小于 1%,且已经过几何校正。为真实反映湖泊面积大小,在提取

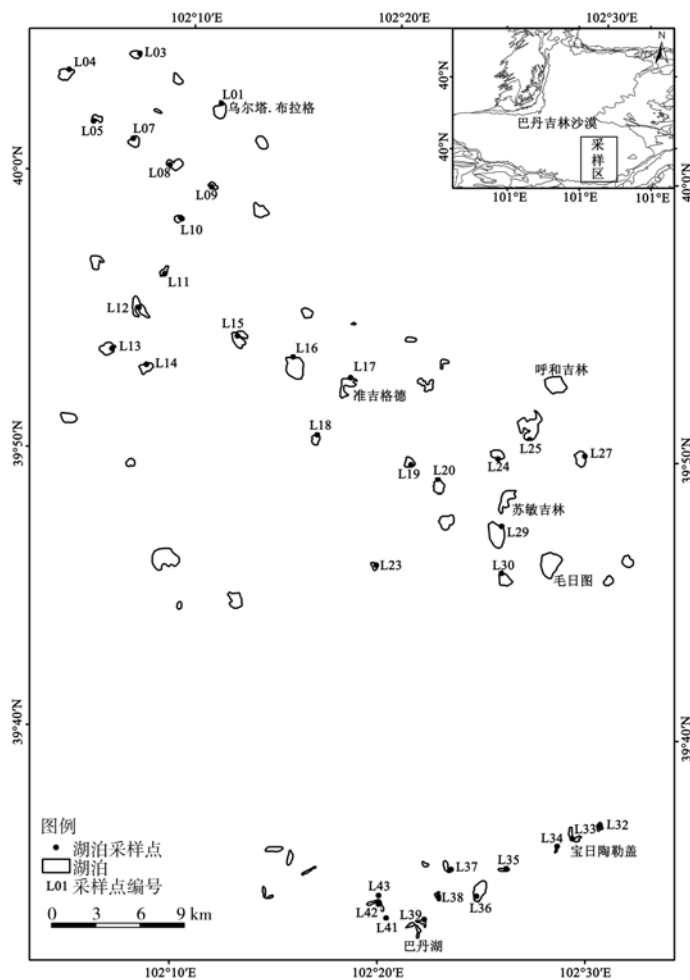


图 1 巴丹吉林沙漠湖泊采样点示意图

Fig. 1 The distribution of lake samples in Badain Jaran Desert

湖泊面积信息之前约定：（1）湖泊指水域覆盖地区，不包括湖泊内的岛屿、湖泊周围沼泽化草甸、盐生草甸等植被、现代干涸盐碱湖盆等地区；（2）由于湖泊萎缩，部分湖泊分裂形成若干小湖，计算面积时，若他们的水化学参数相对一致，则按一个湖泊计，若其水化学参数差异较大，则按不同湖泊计算。

3 结果分析

3.1 湖泊水化学空间分布特征

聚类法可以有效地对各类地理事物进行分类或聚集区分析<sup>[25~28]</sup>。为判定对研究区湖泊水化学是否有聚类的必要，采用方差表征样本的离散度（表 1）。结果显示，各离子离散性都较大，其中 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 的方差数量级可达 10<sup>6</sup>，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的方差数量级可达 10<sup>5</sup>。说明湖泊水化学差别较大，甚至具有分带性，通过聚类可以表明其关系<sup>[25]</sup>。

表 1 样品水化学离子方差值  
Tab. 1 The variance of lake ions

离子	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
方差	4.9×10 <sup>6</sup>	17298.0	689.7	235.0	3.5×10 <sup>6</sup>	195260.3	1.0×10 <sup>6</sup>	2751.8

在进行 Q 型系统聚类分析时，为提高聚类效果，首先对 35 个湖泊样品做主成分分析，根据水化学离子之间的相关系数（表 2）和特征根、方差贡献率（表 3）计算主成份载荷矩阵（表 4），为聚类分析提取主要变量<sup>[29,30]</sup>。

表 2 巴丹吉林沙漠地区湖泊水化学离子的相关系数矩阵  
Tab. 2 Correlation matrix of lake ions in the Badain Jaran Desert

	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Na <sup>+</sup>	1							
K <sup>+</sup>	0.878	1						
Mg <sup>2+</sup>	0.215	0.114	1					
Ca <sup>2+</sup>	0.765	0.572	0.280	1				
Cl <sup>-</sup>	0.908	0.802	0.297	0.697	1			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.708	0.597	0.612	0.590	0.645	1		
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.578	0.543	-0.379	0.381	0.252	0.122	1	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.383	0.327	-0.358	0.236	0.055	0.023	0.863	1

表 3 主成分特征值及贡献率  
Tab. 3 Eigenvalue and variance of principal component

主成分	特征值	贡献率（%）	累计贡献率（%）
1	4.326	54.080	54.080
2	2.170	27.123	81.203
3	0.629	7.868	89.071
4	0.428	5.350	94.421
5	0.212	2.647	97.068
6	0.139	1.741	98.809
7	0.088	1.105	99.914
8	0.007	0.086	100.000

表 4 主成分载荷矩阵  
Tab. 4 Component matrix

	F1	F2	F3
X1	0.985	0.025	-0.090
X2	0.889	0.076	-0.239
X3	0.272	-0.806	0.446
X4	0.814	-0.100	0.058
X5	0.875	-0.241	-0.352
X6	0.757	-0.455	0.266
X7	0.576	0.770	0.151
X8	0.398	0.804	0.381

注：表 4 中 X1~X8 分别代表 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>八大水化学离子。

由于水溶液中各离子含量要维持阴阳离子电荷平衡、溶解和沉淀平衡、酸碱平衡,是各自物理性质、化学性质及相互作用的结果,因此离子浓度之间存在相关性是必然的。表 2 显示,  $\text{Na}^+$  与  $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  与  $\text{CO}_3^{2-}$  具有显著的线性相关性 (相关系数  $|r| > 0.75$ )。

根据累积贡献率  $\geq 80\%$  (表 3), 选取前三个主成分<sup>[31]</sup>, 分别记作 F1、F2、F3。根据主成分载荷矩阵 (表 4), 8 个水化学成分经主成分分析后的数学模型如下:

$$F_1 = 0.985X_1 + 0.889X_2 + 0.272X_3 + 0.814X_4 + 0.875X_5 + 0.757X_6 + 0.576X_7 + 0.398X_8$$

$$F_2 = 0.025X_1 + 0.076X_2 - 0.806X_3 - 0.100X_4 - 0.241X_5 - 0.455X_6 + 0.770X_7 + 0.804X_8$$

$$F_3 = -0.090X_1 - 0.239X_2 + 0.446X_3 + 0.058X_4 - 0.352X_5 + 0.266X_6 + 0.151X_7 + 0.381X_8$$

第一主成分以变量  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_5$  的正载荷系数最大, 表明第一主成分是反映以钠、钾、氯等离子为主的具有高矿化度的卤水湖的综合信息<sup>[32]</sup>。这是由于巴丹吉林沙漠地区常年干旱, 湖水主要以蒸发消耗, 湖面不断萎缩, 盐分不断累计过程中,  $\text{Ca}^{2+}$  与碳酸(氢)根、硫酸根易形成难溶盐而沉淀,  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  等可溶性离子得以大量积累<sup>[33]</sup>。

第二主成分在变量  $X_3$  的负载荷系数较大, 在  $X_7$ 、 $X_8$  的正载荷系数较大, 表明第二主成分所代表的湖泊镁离子含量变化较大, 且碳酸(氢)盐含量增多<sup>[34]</sup>。这一结果应是对巴丹吉林沙漠东南边缘低矿化度湖泊水化学离子的综评<sup>[9]</sup>。

第三主成分在各变量的系数都偏小, 说明该主成分所代表的湖泊没有统一的主化学离子。其贡献率不足 8%, 说明它所代表的一类湖泊占有所有采样点的极小一部分。

对上述三个主成分在各湖泊样本的主成分得分进行聚类分析。鉴于三个主成分之间是相互独立的, 采用欧氏距离测度 35 个湖泊样本间的距离<sup>[27,29]</sup>, 类与类之间的距离采用离差平方和法计算, 对样本进行归类。聚类结果如图 2 所示。

根据聚类谱系图将 35 个湖泊划分为 A、B、C 三大不同类型的湖泊区(带) (图 3)。

(1) A 湖泊带。包括 L42、L41、L37、L35、L33、L34、L32, 涵盖了

沙漠东南边缘绝大部分采样点, 沿东北—西南方向呈带状分布。结合聚类图, 一级短距离聚合的样本都是在空间上临近分布的湖泊, 说明这些湖泊相互间水力联系很强, 且具有较好的连续性。水离子分析结果显示它们的矿化度普遍较低, 水化学特性相似程度高。其中 L41 与 L42 聚为一个亚类, 属于咸水湖; 其余自成为一个亚类, 大多数为淡水湖, 仅 L37 为微咸水湖。

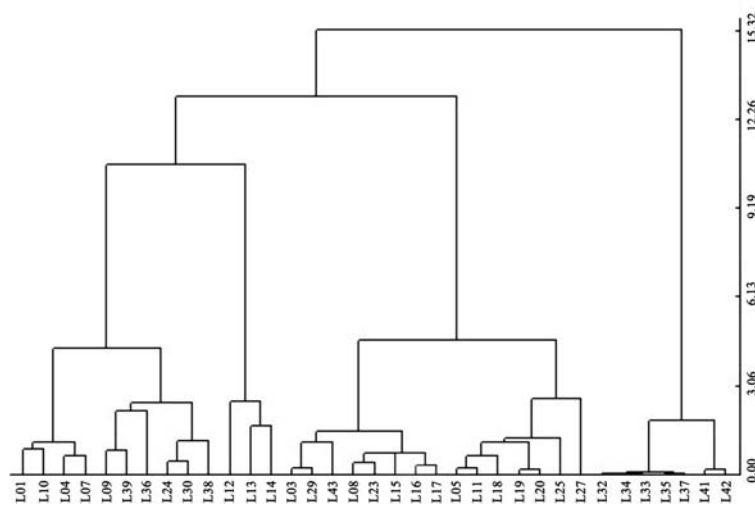


图 2 巴丹吉林沙漠湖泊水样聚类谱系图

Fig. 2 Cluster dendrogram of lakes in the Badain Jaran Desert

(2) B 湖泊带。包括图 2 中 L03~L27, 除 L43 外, 其余沿西北—东南方向呈连续带状分布, 其水离子均以  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  为主, TDS 值在 150~300g/l 之间不等。只因  $\text{Cl}^-$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  百分比含量略有差别, 构成 Na-Cl- $\text{CO}_3$  和 Na- $\text{CO}_3$ -Cl 两种水化学类型<sup>[9]</sup>。谱系图上显示, 此类湖泊在一级短聚合中, 两个湖泊之间的空间距离有远有近, 这与 A 类湖泊就近聚合不同。聚合方式概括来说有以下四种: 水化学类型不同的临近湖泊聚合 (异型临近聚合); 水化学类型相同而空间距离远的两个湖泊聚合 (同型长远聚合); 反之, 亦有同型临近聚合和异型长远聚合的现象。一级聚合类型的多样性和交叉性说明沙漠腹地湖泊具有较强的水力联系。

(3) C 类湖泊区, 即图 2 中 L01~L38 所辖湖泊, 主要分布在 A、B 湖泊带的边缘地带, 根据聚类结果, 可分为 C1 (L12、L13、L14)、C2 (L09、L39、L36、L24、L30、L38) 和 C3 (L01、L10、L04、L07) 三个分区 (图 3)。其中 C1 区的湖泊分布集中, 是沙漠腹地湖泊水化学类型相对特殊的一类卤水湖, 其水离子以  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  为主,  $\text{CO}_3^{2-}$  含量极少。C2 区的湖泊  $\text{SO}_4^{2-}$  的百分含量相对 C1 区的减少,  $\text{CO}_3^{2-}$  的百分含量有所增加, 是以  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  为主要离子的卤水湖。C3 区

湖泊主要分布在采样区的西北角,  $\text{SO}_4^{2-}$  的百分含量已减少至 10% 左右, 而  $\text{CO}_3^{2-}$  的百分含量则增至 40~60% 左右, 主要离子以  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  为主。但与周围 B 类湖泊相比, 其水离子的绝对含量要高出些许, TDS 值高出 100g/l 之多。由此看来, C1、C2 和 C3 三个分类逐步聚为一个大类是其主离子中  $\text{SO}_4^{2-}$  的百分含量逐渐减少,  $\text{CO}_3^{2-}$  的百分含量逐渐增加的表现。

结合主成份分析结果得知, F1 所含信息是对 B 类湖泊的概括, F2 则体现了 A 类湖泊特有的属性, F3 中各离子的系数偏小实隐含了 C 类湖泊主要离子不断变化这一特点。可见, 本文在主成分分析的基础上进行聚类分析是可行的, 二者互相验证, 互相补充, 是解释巴丹吉林沙漠湖泊水化学特征分带性等问题的有效方法之一。

### 3.2 沙漠湖泊面积分级分析

为了整体把握湖泊面积的空间分布格局, 将所测面积进行等级划分, 分级时遵循同一等级的湖泊面积变化尺度小, 而与其他等级间具有明显差异这一原则采取自定义划分方式

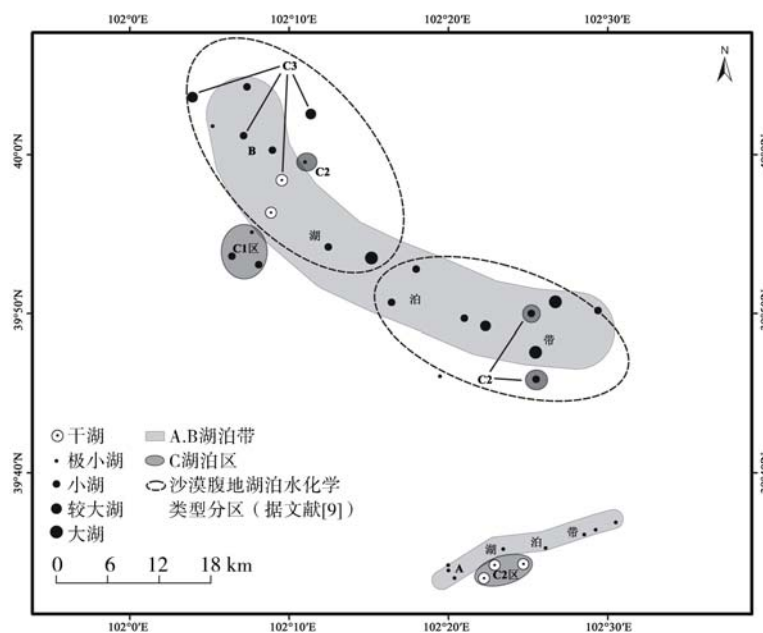


图 3 采样点湖泊水化学聚类分类和面积等级示意图

Fig. 3 The sketch map of hydro-chemistry cluster analysis and area classification of the desert lakes

进行 (表 5)。不同等级湖泊的空间地理位置见图 3。

表 5 巴丹吉林沙漠湖泊面积等级分类

Tab. 5 The classification of lake area in the Badain Jaran Desert

等级划分	湖泊面积 (km <sup>2</sup> )	湖泊编号
干 湖	0	L10、L11、L36、L38、L39
极小湖	0.002~0.12	L05、L09、L12、L23、L32、L33、L34、L35、L37、L41、L42、L43
小 湖	0.16~0.30	L03、L07、L08、L13、L14、L15、L17、L18、L19、L24、L27、L30
较大湖	0.35~0.50	L01、L04、L20
大 湖	0.90~1.50	L16、L25、L29

结合图 3 可以看出, 极小湖主要集中分布在沙漠东南边缘, 采样区的西北角亦有零星分布, 极小湖区内部存在个别干湖; 小湖主要分布在西北—东南一线; 小湖两端的湖泊面积略大, 以大湖和较大湖为主。

### 3.3 沙漠湖泊水化学与面积关系及其影响因素

综合聚类分析与面积分级结果, A 带所有湖泊面积小, 以低矿化度的淡水湖和微咸水湖为主; 而沙漠腹地高盐度卤水湖的面积普遍要大于东南边缘的。由此看来, 沙漠湖泊面积有随矿化度升高而增大的趋势。但是南北两大湖群内部却并非如此, A 带边缘亦出现高矿化度却几近干涸的卤水湖; 腹地湖泊则表现出干湖—极小湖—小湖—较大湖—大湖混杂分布的态势。因此, 巴丹吉林沙漠南北湖群水化学与面积之间不能用简单的比例函数表明他们的关系, 二者不存在必然的对应关系。

首先从地质结构看, 巴丹吉林沙漠湖泊群内存在一条 10km 宽的无湖风蚀带, 将湖泊分为南北 2 个区域<sup>[7]</sup>。沙漠腹地湖泊群地下水主要储存在更新统湖积砂层中, 第三系泥质碎屑岩构成隔水底板, 湖积亚砂土、亚粘土组成隔水顶板, 形成多层结构的自流水盆地, 顶板埋深与含水层厚度目前没有资料, 但据区域水文地质普查报告推断, 顶板埋深可能 5~20m, 含水层厚度 30m 以上; 南部湖泊区巴丹海子一带由凹凸不平的白垩系碎屑岩为隔水底板, 由全新统湖积沙层、亚砂土与风积沙层构成含水层, 水位埋深 1~2m<sup>[7, 20]</sup>。另有研究表明, 潜水蒸发只发生于地下水位埋深小于 10m 的地段, 即湖泊周围的丘间洼地; 水位埋深大于 10m 的地下水则没有蒸发<sup>[24]</sup>。这些水文地质资料表明南北湖区补给—排泄形式、地下水补给量等应有所不同。

A 带湖泊面积不足 0.15km<sup>2</sup> (表 5), 含盐量低, 且都是深度不到 2m 的浅湖<sup>[35]</sup>。野外考察中发现, 东南边缘湖泊水位随季节变动较大, 有些湖泊在冬半年水位大涨, 而夏半年却变为干湖。巴丹东湖和巴丹西湖之间相隔一条大致南北走向的沙脊, 入冬前后, 两湖水位上涨, 连成一片, 且东湖的水往西湖流泻, 这是西湖海拔较低的表现, 成为水流和盐分汇集的区域, 导致西湖矿化度高出东湖两百多倍。而巴丹东湖等一类淡水湖的形成是地下水在补给湖泊过程中, 湖水同时不停地向外流出所导致<sup>[19, 36]</sup>。另外, 根据以往对当地地下水水化学及降水等资料分析表明, 这里不仅存在地下水补给<sup>[9, 20, 35]</sup>, 降水的直接补给也要比腹地丰沛的多<sup>[6, 7]</sup>。说明东南边缘形成低矿化度小湖是湖水外流更新和及时且充足的淡水补给等因素综合作用的结果; 季节更替是湖泊面积变化的因素之一。

A、B 湖泊带在空间分布上无交叉区域, 理化特性截然不同, 地处沙漠腹地的 B 湖泊

带多面积大于  $0.15\text{km}^2$  (表 5) 且矿化度极高的卤水湖。其东南和西北两端甚至有较大湖与大湖零星分布, 全新世早期, 苏敏吉林和呼和吉林地区都有较大、较深的湖泊<sup>[4]</sup>。丁宏伟等绘制的巴丹吉林沙漠内陆湖泊区水文地质剖面图显示沿北偏东  $40^\circ$  方向上, 音德尔图、呼和吉林、苏敏吉林这些大湖两侧被 200m 左右的高大沙山所夹持<sup>[24]</sup>,  $39^\circ55'N$  以北高大沙山寥寥无几<sup>[37]</sup>, 较大湖和大湖亦是罕见 (图 3)。另外, 沙山的蓄水机制是存在的<sup>[10,16,38]</sup>, 不管沙山蓄集当地降水还是地下水, 沙山越高大, 其蓄水量越大, 对湖泊的补给量也相应增加, 因此, 腹地湖泊面积似与补给量有关。第二, 从区域气候条件来看, 沙漠腹地与东南边缘相比, 降水量减少, 蒸发量增加<sup>[7]</sup>, 湖泊在长期蒸发浓缩的状态下, 盐分不断积累, 面积萎缩, 然而, 腹地湖泊面积仍然大于东南边缘的, 若要维持湖泊水量平衡, 只能表明腹地湖泊接受的地下水补给量要远多于东南边缘的。综上所述, 地处沙漠北部的腹地湖泊高含盐量特性是长期蒸发浓缩的结果, 而面积大小主要与补给量有关。

C 类湖泊纵贯研究区南北分布, 分散在这两大湖泊带的边缘地带, C1-C2-C3 在聚类过程中逐步聚为一类, 其水离子含量表现出有规律的递变, 尤其是沙漠腹地由南向北, 湖水  $\text{SO}_4^{2-}$  含量逐渐减少,  $\text{CO}_3^{2-}$  含量逐渐增加, 这一变化趋势正是对区域气候愈向北愈干旱的响应<sup>[39]</sup>, 而此次所有采样点湖泊由南至北水化学类型与气候地带性也有相似的对应关系<sup>[9]</sup>, 只是 C 类湖泊与南北湖泊群整体的水离子含量增减幅度略显不同。因此可认为 C 类湖泊极有可能是主要湖泊带周边的特例, 其形成原因或与地貌形态有关, 或与地质构造有关, 仍需进一步考察和讨论。

综上所述, 研究区湖泊水化学与面积大小固然都受到蒸发—补给环境的综合影响, 但是基于沙区复杂的地理环境和补给关系, 湖群即使受到同一主导因素的影响, 对每个湖泊的作用程度亦未必相同, 因此湖泊在经过长期的演变后, 二者不再具有必然联系, 且南北两大湖区水化学和面积特征截然相反, 极有可能是其主控因素不同所导致。

## 4 结论

(1) 对比湖泊水化学 A、B、C 三个分带 (区) 与面积分级结果, 发现沙漠东南边缘 A 类湖泊沿东北—西南向呈连续带状分布, 多是面积极小的淡水湖或微咸水湖; 沙漠腹地 B 类湖泊多沿西北—东南一带分布, 是面积相比边缘湖泊要大许多的卤水湖; 另有若干 C 类湖泊水化学、面积等特征不同于周边湖泊, 且散居南北湖区, 疑是南北 A、B 两大主要湖泊类型中的特例。

(2) 巴丹吉林沙漠湖泊矿化度与面积虽都是蒸发—补给环境综合作用的结果, 但沙漠南北两大湖区内部水化学与面积的关系极具复杂性和不确定性, 二者不存在必然的联系, 不能用简单的比例函数表明他们的关系, 这是沙区复杂的地理环境和补给关系决定的。

(3) 沙漠南北湖区表现出截然相反的水化学和面积特征, 是因为他们各自的主控因素极有可能不同。腹地高矿化度湖泊主要受控于强蒸发环境, 而湖泊面积可能与地下水补给量有关。东南边缘低矿化度小湖的形成与湖水外流更新以及相对及时且充足的补给量和方式有关, 湖泊面积变化受季节更替影响甚大。

## 参考文献:

- [1] 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. 中国沙漠,1995,15(4):345~352.
- [2] 董光荣,高全洲,邹学勇,等. 晚更新世以来巴丹吉林沙漠南缘气候变化. 科学通报,1995, 40(13):1214~1218.
- [3] 李云卓,李保生,高全洲,等. 巴丹吉林查格勒布剖面记录的 150 ka BP 以来的常量化学元素波动. 中国沙漠, 2005,25(1):8~14.
- [4] 杨小平. 巴丹吉林沙漠腹地湖泊的水化学特征及其全新世以来的演变. 第四纪研究,2002,22(2):97~104.
- [5] 马金珠,陈发虎,赵华. 1000 年以来巴丹吉林沙漠地下水补给与气候变化的包气带地球化学记录. 科学通报, 2004,49(1):22~26.
- [6] Yang X P, Ma N N, Dong J F, *et al.* Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, Western China. *Quaternary Research*, 2010, 73:10~19.
- [7] 马妮娜,杨小平. 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, 2008,28(4):702~711.
- [8] 陈建生,凡哲超,汪集旸,等. 巴丹吉林沙漠湖泊及其下游地下水同位素分析. 地球学报,2003,24(6):297~504.
- [9] 陆莹,王乃昂,李贵鹏,等. 巴丹吉林沙漠湖泊水化学空间分布特征. 湖泊科学,2010,22(5):774~782.
- [10] Chen J S, Li L, Wang J Y, *et al.* Groundwater maintains dune landscape: A remote water source helps giant sand dunes to stand their ground in a windy desert. *Nature*, 2004, 432:459~460.
- [11] K·E·比契叶娃. 水文地球化学——地下水化学成分的形成. 北京:地质出版社,1981. 243~252.
- [12] 刘相超,祖波,宋献方,等. 三峡库区梁滩河流域水化学与硝酸盐污染. 地理研究,2010,29 (4):629~639.
- [13] Yang X P, Williams M A J. The ion chemistry of lakes and late Holocene desiccation in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China. *Catena*, 2003, 51(1):45~60.
- [14] Yang X P. Chemistry and late Quaternary evolution of ground and surface waters in the area of Yabulai Mountains, western Inner Mongolia, China. *Catena*, 2006, 66:135~144.
- [15] Ma J Z, Edmunds W M, He J H, *et al.* A 2000 year geochemical record of palaeoclimate and hydrology derived from dune sand moisture. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 276:38~46.
- [16] 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. *Applied Geochemistry*, 2008, 23: 3519~3534.
- [17] Yang X P, Liu T S, Xiao H L. Evolution of megadunes and lakes in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China, during the last 31,000 years. *Quaternary International*, 2003, 104:99~112.
- [18] 张虎才,明庆忠. 中国西北极端干旱区水文与湖泊演化及其巴丹吉林沙漠大型沙丘的形成. 地球科学进展, 2006,21(5):532~538.
- [19] Ma J Z, Edmunds W M. Groundwater and lake evolution in the Badain Jaran desert ecosystem, Inner Mongolia. *Hydrogeology*, 2006, 14:1231~1243.
- [20] 马金珠,黄天明,丁贞玉,等. 同位素指示的巴丹吉林沙漠南缘地下水补给来源. 地球科学进展,2007,22(9):922~930.
- [21] 赵霞,陈建生,相似优先比法研究巴丹吉林沙漠及周边地区地下水补给. 湖泊科学,2006,18(4):407~413.
- [22] 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. 地理科学进展,2010,29(9):1087~1094.
- [23] 李保生,高全洲,阎满存,等. 150 ka BP 以来巴丹吉林沙漠东南区域地层序列的新研究. 中国沙漠,2005,25(4): 457~465.
- [24] 丁宏伟,王贵玲. 巴丹吉林沙漠湖泊形成的机理分析. 干旱区研究,2009,24(1):1~7.
- [25] 王新建,陈建生. 水化学成分聚类法分析干旱区地下水补给. 水资源保护,2005,21(5):11~15.
- [26] 柴慧霞,周成虎,陈曦,等. 基于地理格网的新疆地貌区划方法与实现. 地理研究,2008,27(3):481~492.
- [27] 杨永兴. 三江平原沼泽的生态分类. 地理研究,1988,7(1):27~35.
- [28] 苏勤,林炳耀. 基于态度与行为的我国旅游地居民的类型划分——以西递、周庄、九华山为例. 地理研究,2004, 23(1):104~114.
- [29] 傅德印. Q 型系统聚类分析中的统计检验问题. 统计与信息论坛,2007,22(3):10~14.
- [30] 王新建,陈建生,许宝田. 水化学成分聚类法分析巴丹吉林沙漠及邻区地下水补给源. 工程勘察,2005,(5):25~29.



- [31] 丛明珠, 欧向军, 赵清, 等. 基于主成分分析法的江苏省土地利用综合分区研究. 地理研究, 2008, 27(3): 574~582.
- [32] 庞西磊, 尹辉. 阿拉善高原盐湖化学特征的主成分分析研究. 地质学报, 2009, 29(2): 199~203.
- [33] 高照山. 赤峰达来诺尔水化学主要特征及其形成. 地理研究, 1989, 9(2): 163~196.
- [34] 冀兰. 盐湖水化学特征的主成分分析研究. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2006, 32(2): 244~246.
- [35] 刘建刚. 巴丹吉林沙漠湖泊和地下水补给机制. 水资源保护, 2010, 26(2): 18~23.
- [36] 黄天明. 应用环境同位素研究巴丹吉林沙漠地下水补给来源. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2007.
- [37] 陈建生, 赵霞, 盛雪芬, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊群与沙山形成机理研究. 科学通报, 2006, 51(23): 2789~2796.
- [38] 顾慰祖, 陈建生, 汪集旻, 等. 巴丹吉林高大沙山表层孔隙水现象的疑义. 水科学进展, 2001(11): 695~699.
- [39] 郑绵平, 赵元艺, 刘俊英. 第四纪盐湖沉积与古气候. 第四纪研究, 1998, 4: 297~307.

## Research on the relationship between lake hydro-chemical characteristics and its area in the Badain Jaran Desert

LU Ying, WANG Nai-ang, LI Zhuo-lun, DONG Chun-yu, ZHU Jin-feng

(College of Earth and Environmental Science, Center for Hydrologic Cycle and Water

Resources in Arid Region, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Based on the data of hydro-chemical ions of the lakes in the Badain Jaran Desert, we divided the study area into A, B and C subareas with Q-mode hierarchical cluster method. Besides, lake area information was extracted from the latest RS images to make a further study on the relationship with lake hydro-chemistry data. The results showed that the lakes of type A were all located in the southeast of the desert with a form of northeast-southwest belt, which included most of the lakes on the margin of the desert with lower total dissolved solids and least lake area. The type B lakes occupied most parts of the inland desert with a form of northwest-southeast belt. Remarkable differences in the physico-chemical characteristics were noticed in comparison of the two belts of A and B. A few lakes decentralized outside the A and B belts were classified into type C, for their physico-chemical property was different from that in the vicinity as special cases of A and B belts, which may be related to the local geographic environment. We found that the effect factors are vitally different between southeast lakes and inland lakes based on the comprehensive analysis in quality and quantity of the lake water.

**Key words:** Badain Jaran Desert; lake; hydro-chemistry; Q-mode hierarchical cluster analysis