

# 巴丹吉林沙漠湖泊及地下水化学特征

邵天杰<sup>1</sup>, 赵景波<sup>1,2</sup>, 董治宝<sup>1,3</sup>

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062;

2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075;

3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

**摘要:**通过对巴丹吉林沙漠丘间湖泊和古日乃、雅布赖、阿拉善右旗等地及其周围浅层地下水离子化学成分分析,探讨了沙漠地区湖水与地下水化学成分特点、水化学类型、空间变化和湖水补给来源。结果显示,巴丹吉林沙漠湖泊水的pH、盐度、TDS和电导率均远远大于地下水。湖水样品中 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 含量占绝对优势,大多数盐度较高的湖泊属于 $\text{Na}(\text{K})\text{-Cl}(\text{SO}_4)$ 型,个别盐度较低的微咸湖属于 $\text{Na}(\text{Mg})\text{-(Ca)-Cl}(\text{SO}_4)\text{-(HCO}_3\text{)}$ 型。地下水的化学类型多数为 $\text{Na}(\text{Ca})\text{-(Mg)-Cl}(\text{SO}_4)\text{-(HCO}_3\text{)}$ 型,属微咸水,个别为 $\text{Na-Cl-SO}_4$ 型的咸水。沙漠东南部湖群水的pH值、盐度、TDS和电导率比较低,呈微碱性,属微咸湖;而北部湖群水的pH、盐度、TDS和电导率远远大于东南部湖群,呈中等碱性,为盐水湖。湖水离子化学特征显示沙漠东南部湖群自南向北的演化趋势为:微咸湖→咸水湖→盐水湖。湖水离子化学成分短时间序列变化指示,近9年宝日陶勒盖、巴丹东湖、巴丹西湖、诺尔图、呼和吉林湖水中的大多数离子的含量有所降低,表明其近9年来淡水补给量增多。湖水化学成分与湖水高度显示,巴丹吉林沙漠湖群湖水流向是由东南流向西北。水化学成分和分布高度表明,该区沙漠湖水主要来自当地降水补给和来自沙漠东南缘雅布赖山和南缘的黑山头山地降水的补给,而来自祁连山区来水补给的可能性很小。

**关键词:**水化学成分;沙漠湖泊;湖泊水化学类型;湖水变化;地下水;补给来源;巴丹吉林沙漠

巴丹吉林沙漠以其独特的地理位置与地貌景观吸引了众多学者的关注,并从不同角度对巴丹吉林沙漠和湖泊的形成演化、水文气候变化等进行了卓有成效的研究<sup>[1-4]</sup>,其中董治宝等从风沙物理学的角度对巴丹吉林沙漠高大沙山和湖泊的形成进行了深入的研究<sup>[5-6]</sup>,杨小平着重对巴丹吉林沙漠的高大沙山<sup>[7]</sup>、永久性湖泊<sup>[8]</sup>、钙质胶结层<sup>[9]</sup>等独特景观及其古环境、古气候<sup>[10]</sup>进行了讨论,闫满存等研究认为巴丹吉林沙漠高大沙山的发育主要受西风和西北风两大盛行风系控制<sup>[11-13]</sup>。马金珠等利用包气带 $\text{Cl}^-$ 和稳定同位素的垂向分布特征,对近1000年以来巴丹吉林沙漠地区降雨量的变化过程及其所反映的气候特征进行了高分辨率的研究,认为我国干旱区降雨对地下水的补给非常微弱<sup>[14-15]</sup>,并认为该沙漠区干旱化加剧,正在经历地下水位下降、湖泊绿洲逐渐萎缩消亡的过程<sup>[16-17]</sup>。赵景波等对巴丹吉林沙漠高大沙山集中分布区的大沙山沙层含水状况<sup>[18]</sup>、粒度分布特征<sup>[19]</sup>、 $\text{CO}_2$ 浓度与昼夜变化规律<sup>[20]</sup>进行了深入研究,得到了许多重要认识。然而对地下水—湖泊相互关系、周边生态保护区地下水的补给关系及水化学成分演变等重大科学问题尚未有统一的观点。本文试图利用水化学方法判定湖泊—地下水的相互关系,确定湖泊水化学类型与空间变化,同时结合地貌和分布高度资料,探讨巴丹吉林沙漠湖泊和地下水的补给来源,以期能为该地区的水资源利用和生态环境建设提供科学参考和理论指导。

收稿日期: 2010-11-07; 修订日期: 2011-03-20

基金项目: 教育部“长江学者”特聘教授项目资助(801813) [Foundation: Yangtze River Scholar Bonus Schemes of China, No.801813]

作者简介: 邵天杰(1982-),男,安徽人,博士研究生,研究方向为区域环境学。E-mail: tjshao2010@126.com

通讯作者: 赵景波,教授。E-mail: zhaojb@snnu.edu.cn

1 研究区自然概况及研究方法

1.1 研究区自然概况

巴丹吉林沙漠 (39°20'~41°30'N, 99°48'~104°14'E) 位于弱水东岸的古日乃以东,宗乃山和雅布赖山以西,拐子湖以南,北大山以北(图1),海拔1400~1610 m,面积 $4.71\times 10^4\text{ km}^2$ ,是我国第三大沙漠,也是世界高差最大沙丘所在地<sup>[21]</sup>。巴丹吉林沙漠处于东南季风的西北缘,属于温带极干旱大陆性气候区,多年平均降水量仅40~80 mm,且多集中在6-8月份,而蒸发量却是降水量的40~80倍。多年平均温度约8℃,1月平均温度为-12℃,7月平均温度温度26℃。

与世界其他大沙漠明显不同的是,在巴丹吉林沙漠的东南部,200~300 m的高大沙丘广布,个别甚至超过400 m<sup>[7,21]</sup>;而在这些高大沙丘之间还分布着众多常年性湖泊。据统计,面积在1.5 km<sup>2</sup>以下的沙漠湖泊有140多个<sup>[21]</sup>,且多为咸水湖。巴丹吉林沙漠人烟稀少,因此沙漠区湖泊和地下水的化学特征基本不受人类活动的影响。

1.2 研究方法

2007年4月28日到5月20日对巴丹吉林沙漠及其周边地区的湖泊和地貌进行了考察和采样,沿途共采集湖水、井水、泉水和降水样品93个,其中湖水48个、井水29个、泉水13个、降水3个,采样点坐标及海拔由美国Garmin公司G307型手持GPS仪测定,同时结合国家1:50 000地形图和中科院沙漠研究所编制的1:100 000地形图校核并绘制出采样点分布图(图1)。所有样品瓶都预先用原水反复冲洗多次,再从不直接与大气接触的地方采集样品,并立即与大气隔绝密封。在野外实地观测中,运用德国WTW公司Multiline P3型水质检测仪测量水样的电导率、pH值。所采集水样均先经0.45 μm滤膜过滤,再用经1% HNO<sub>3</sub>酸化后的样品测试K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等4种阳离子,未经酸化的样品测试Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子,水样离子测量应用美国戴安DX-600型离子色谱仪进行检测<sup>[22]</sup>。水样的CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>以c = 0.1017 mol/L的盐酸(HCl)运用磁力搅拌器和1000 μL的自动滴定器进行酸碱滴定测试<sup>[22-23]</sup>。可溶性固体总量(TDS)用干燥-重量法测定。实验分析所用水均为去离子水。

2 实验结果

2.1 湖水主要离子的含量及特征

通过对巴丹吉林沙漠40个湖泊48个采样点的水样理化参数进行分析发现,沙漠湖泊的pH值普遍较大,变化范围介于7.21~10.13之间,平均值为9.19。所采湖泊水样的电导率平均值为213.83 s/cm,变化范围为1.55~641.5 s/cm;TDS的平均值为106.43 g/L,变化范围为1.02~311 g/L;盐度的平均值为115.86 g/L,变化范围为0.01~325 g/L。选取湖泊水样中K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>四种主要阳离子和Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>四种主要阴离子进行测定,结果显示:沙漠湖泊水样中的四种阳离子以Na<sup>+</sup>离子的含量为最大,其平均含量为43.2 g/L,变化范围介于0.2~102.39 g/L之间;其次是K<sup>+</sup>离子平均含量为3.56 g/L,变化范围介于0.01~21.8 g/L

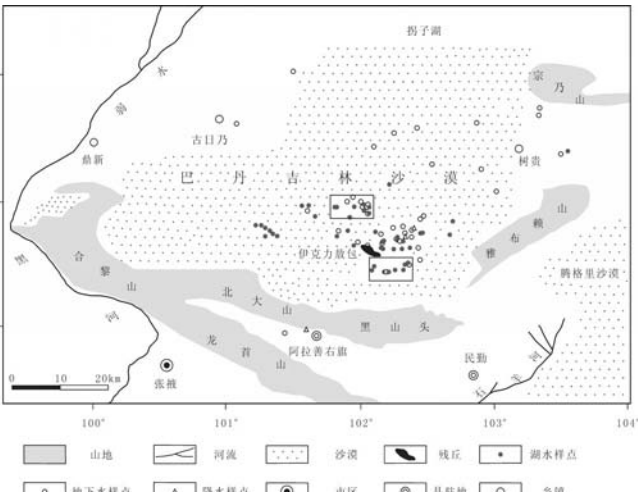


图1 巴丹吉林地区地貌类型和采样点分布图  
Fig. 1 Landforms of the Badain Jaran area and spatial distribution of sampling sites





中的Cl<sup>-</sup>离子含量在四种阴离子中也是最大的,其平均含量为244.29 mg/L,变化范围介于30.41~1491.04 mg/L之间;其次是HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>离子,其平均含量为217.75 mg/L,变化范围介于82.88~537.78 mg/L;CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>离子的平均含量最小,仅为6.28 mg/L,变化范围介于0~31.70mg/L;SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子的平均含量为197.15 mg/L,变化范围介于44.25~959.1 mg/L。除K<sup>+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>外,降水中的其它离子含量均明显低于井水和泉水,更低于湖泊水。

以采样点纬度由小到大的顺序作为横坐标,水样的理化参数和离子浓度为纵坐标进行分析发现,井水、泉水和降水的理化参数和离子浓度总体较小,变化波动也较湖水弱(图2、图3)。同样以伊克力敖包的褶皱隆起为界,以南井水和泉水的理化参数和离子浓度数值较小,波动也弱(图3);而伊克力敖包褶皱隆起以北井水和泉水的理化参数和离子浓度数值明显分为两部分(图3),一个是理化参数和离子浓度数值大、波动强的巴丹吉林沙漠北部的地下水,一个是北临伊克力敖包理化参数和离子浓度数值较小,波动相对较弱的中间地带的地下水。这一是与北部的井水和泉水采样点东西跨度大,而北临伊克力敖包的井水和泉水采

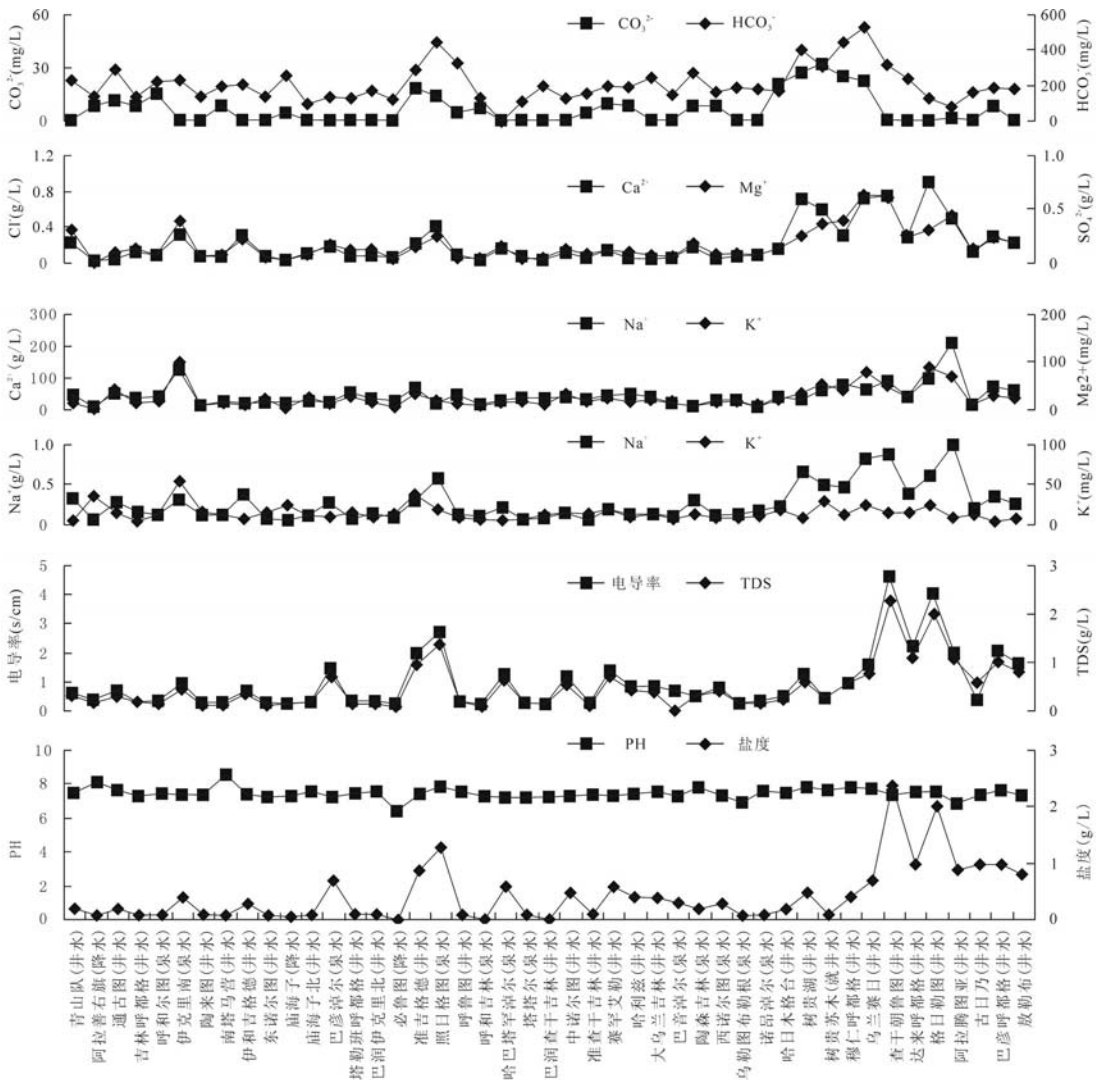


图3 巴丹吉林沙漠井水、泉水和降水的pH值、TDS、电导率和盐度分布趋势

Fig. 3 The changing trend of pH, TDS, conductivity and salinity of well water, spring water and precipitation in the Badain Jaran Desert

样点相对集中,经纬度跨度不大有关(图1),二是主要与北端地势低洼而地下水向北流动导致北端地下水盐类聚集有关。

3 讨论

3.1 水离子化学特征指示的湖水化学类型

按照湖水的矿化度分类标准<sup>[24]</sup>,巴丹吉林沙漠永久性湖泊大致可分为3种类型:微咸湖、咸水湖和盐水湖。微咸湖、咸水湖和盐水湖的pH值、TDS、盐度和电导率均表现为:微咸湖<咸水湖<盐水湖(表1)。

Piper 三线图是一种对水样进行分类的图示方法,广泛应用于水文地质研究中。在三角图中分别表示水样的主要阴、阳离子的相对含量,在菱形图中综合表示水样的离子相对含量,并且可看出水样的一般化学特征。由湖水的阴、阳离子三角图(图4a)中可知,湖水样品中Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>含量都占绝对优势;湖水的盐度较高,所以Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>等溶解度相对较低的离子在湖水中的含量较低。此外,湖水中虽然还有其他阴、阳离子(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、Br<sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>),但含量都较低,然而就其绝对含量而言,这些离子在高盐度的湖泊中含量较高。从图4a的菱形图中可以看出,多数盐度较高的湖泊属于Na(K)-Cl-(SO<sub>4</sub>)型,个别盐度低的微咸湖属于Na-(Mg)-(Ca)-Cl-(SO<sub>4</sub>)-(HCO<sub>3</sub>)型。从井水和泉水的离子含量三角图(图4b)可以看出,井水和泉水中的Mg<sup>2+</sup>和Ca<sup>2+</sup>比例相对湖水中的含量显著增高,而阴离子HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>比例相对湖水中的含量未有显著变化。从图4b的菱形图中可以看出,多数井水和泉水的化学类型属于Na-(Ca)-(Mg)-Cl-(SO<sub>4</sub>)-(HCO<sub>3</sub>)型,个别属于Na-Cl-SO<sub>4</sub>型。

3.2 湖水理化参数和离子浓度空间变化特点

巴丹吉林沙漠不同区域湖水离子化学特征存在明显差异(图2)。伊克力敖包的褶皱隆起将巴丹吉林沙漠湖泊分成南北两个湖群。在沙漠腹地湖泊水样点分布较为密集的区域选取一个矩形区域(39°56′~40°06′N,101°44′~102°14′E)代表北部湖群,同时,在巴丹吉林沙漠东南部湖泊水样点分布较为密集的区域选取一个同样大小的矩形区域(39°29′~39°39′N,102°08′E~102°38′E)代表东南部湖群(图1),对比研究发现东南部湖泊的湖面海拔明显高于北部湖泊(表2)。虽然南北两个湖群水都呈碱性,但东南部湖群水的pH值较低,呈微碱性,而北部湖群水的pH普遍较大,呈中等碱度。东南部湖群的盐度、TDS和电导率比较小,属微

表1 巴丹吉林沙漠不同类型湖泊的pH值、TDS、电导率和盐度状况

Tab. 1 The situation of pH, TDS, conductivity and salinity at different lakes in the Badain Jaran Desert

类型	pH 均值	TDS 范围 (g/L)	盐度范围 (g/L)	电导率范围 (s/cm)
微咸湖	8.18	1.02~14.6	1~15	1.55~29.4
咸水湖	8.41	21.5~43.2	25~35	43.3~73.5
盐水湖	9.13	43.2~311.0	35~325	105.5~686

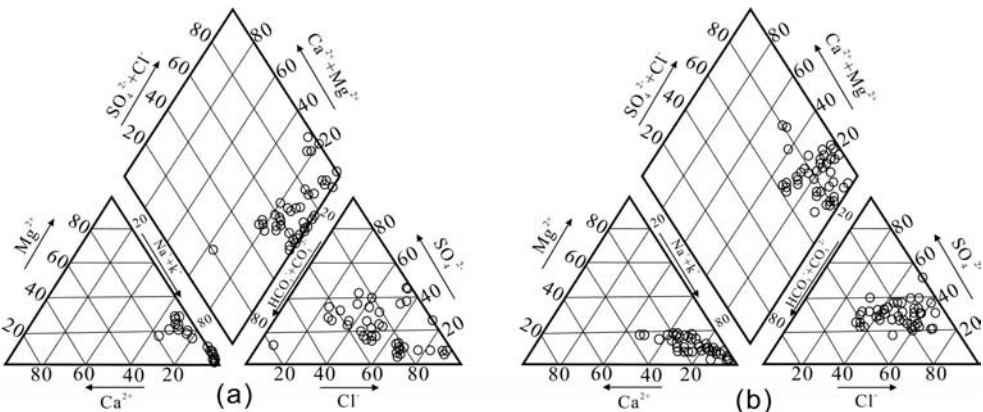


图4 巴丹吉林沙漠湖水(a)和地下水(b)的离子化学组成三角图

Fig. 4 Trilinear diagram of ion chemistries of lakes (a) and groundwater (b) in the Badain Jaran desert

表2 巴丹吉林沙漠不同地区湖泊水的理化参数差异

Tab. 2 The physical and chemical parameters difference of the lake water in different regions of the Badain Jaran Desert

地点	纬度	经度	湖面海拔 (m)	电导率 (s/cm)	盐度 (g/L)	TDS (g/L)	pH
巴丹东湖 (微咸)	39°33'19"	102°21'57"	1227	2.06	1.00	1.03	7.75
朔班吉林西(微咸)	39°34'01"	102°14'47"	1207	2.13	1.00	1.06	7.42
敦德吉林 (微咸)	39°35'40"	102°15'45"	1205	6.61	0.01	3.28	9.36
宝日陶勒盖西 (微咸)	39°36'26"	102°29'08"	1298	2.28	1.10	1.14	7.57
宝日陶勒盖东 (微咸)	39°36'24"	102°29'10"	1298	2.13	1.00	1.06	7.21
赛罕艾勒 (盐水)	39°58'21"	102°13'33"	1181	161.00	95.00	80.05	9.75
达布斯图 (盐水)	39°59'27"	101°46'52"	1143	311.00	190.00	154.00	9.19
大乌兰吉林 (盐水)	40°00'55"	101°59'22"	1156	346.50	180.00	172.00	9.07
巴音淖尔 (盐水)	40°00'58"	102°13'28"	1156	271.50	140.00	135.00	9.86
陶森吉林 (盐水)	40°01'11"	102°07'04"	1140	243.00	125.00	120.50	9.80
西诺尔图 (盐水)	40°01'34"	101°44'25"	1129	293.50	164.31	150.00	9.52
诺昂淖尔 (盐水)	40°03'22"	102°04'02"	1146	256.00	155.00	127.00	9.87

咸湖,而北部湖群水中的盐度、TDS 和电导率远远高于东南部湖群,一般是前者的 100~150 倍,均为盐水湖(表2)。

将选定的南北两个矩形区域内的湖泊水样的离子浓度对比分析发现(图5),东南部湖群的阴阳离子浓度均远小于北部湖群,这一总的变化趋势是很清楚和很明显的。当然,南北湖群内部湖水离子浓度也存在明显差异,这种差异现象主要是由于湖泊所处具体位置的地层的隔水、渗漏情况和降水的一定差异造成的。如东南部湖群中敦德吉林的离子浓度相对较高,而宝日陶勒盖东湖水中离子浓度较低,这主要是因为南部选定矩形区域内的敦德吉林偏靠西北,东南季风的对其影响相对弱于偏靠东南的宝日陶勒盖。图5还显示北部湖群湖水中的Mg<sup>2+</sup>和Ca<sup>2+</sup>浓度占离子总浓度的比例很低,这也是湖水盐度高的显示。进一步对南北两个矩形区域内的湖泊水样的阴阳离子浓度求均值,得出北部湖群中离子浓度百分比含量由大到小依次是Cl<sup>-</sup>(43.52%)、Na<sup>+</sup>(33.58%)、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(6.89%)、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>(6.77%)、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>(6.08%)、K<sup>+</sup>(3.01%)、Mg<sup>2+</sup>(0.10%)、Ca<sup>2+</sup>(0.05%),东南部湖群中离子浓度百分比含量由大到小依次是Na<sup>+</sup>(26.21%)、Cl<sup>-</sup>(22.29%)、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>(19.91%)、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(18.63%)、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>(5.62%)、Mg<sup>2+</sup>(4.02%)、Ca<sup>2+</sup>(1.84%)、K<sup>+</sup>(1.50%)。

为进一步分析巴丹吉林沙漠湖泊盐度空间分布规律,对所采集湖泊水样的盐度进行分析发现巴丹吉林沙漠东南部边缘(图6中I区)湖泊水的盐度多小于35 g/L,伊克力敖包附近(图6中II区)湖泊水的盐度介于35~180 g/L之间,而伊克力敖包以北地区(图6中III区)的湖泊水盐度大都在180 g/L以上,可见巴丹吉林沙漠湖泊的盐度呈明显的带状结构分布。

3.3 近9年来湖水离子浓度变化与湖水补给来源分析

由巴丹吉林沙漠湖水离子化学成分短时间序列变化来看,该沙漠湖泊的离子化学特征在1999-2007年存在明显变化(表3)。在这9年间,宝日陶勒盖、巴丹东湖、巴丹西湖、诺尔图、呼和吉林水中的pH、TDS和离子含量总体略有降低,但也有个别离子的浓度有小幅增加,这表明这些湖泊近些年来淡水补给量增加,补给量大于蒸发量。根据离巴丹吉林沙漠最近的拐子湖和阿拉善右旗的降水量观测数据可知,近年该地区降水量明显增加(图7),因此上述湖泊pH、TDS和离子含量总体略有降低应该是降水增加的结果,也表明降水是巴丹吉林沙漠湖水的重要补给来源。

3.4 湖水离子浓度的南北差异与湖水补给来源

很多学者对巴丹吉林沙漠地区丘间地湖泊的成因进行了深入的研究,得出了不同的结论,概括起来主要有远源补给、近源补给和降雨补给三类。远源补给的观点认为巴丹吉林沙漠湖泊主要通过断层、裂隙等地下渗漏通道补给<sup>[27-29]</sup>。近源补给的观点认为巴丹吉林沙漠湖



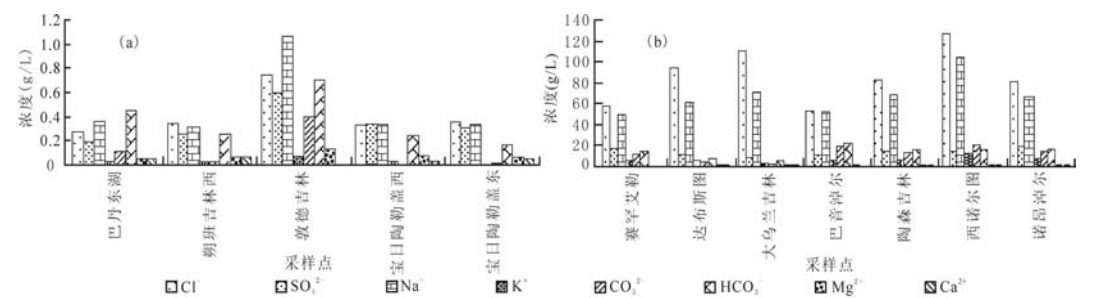


图5 巴丹吉林沙漠东南部(a)和北部(b)湖泊水的离子浓度差异

Fig. 5 The ion concentration difference of the lake water at the southeastern and northern parts of the Badain Jaran Desert

泊主要靠东南部雅布赖山区的降水下渗补给<sup>[30-33]</sup>。而降雨补给的主要观点是巴丹吉林沙漠湖水来自大气的降水入渗进入沙层,再由上向下运移,进而成为湖水的来源<sup>[34-35]</sup>。根据下述湖水离子浓度变化分析得知,巴丹吉林沙漠湖泊水来自祁连山的可能性较小,来自雅不赖山和当地降水的可能性更大。

在伊克力敖包褶皱带两侧,湖水化学成分差异明显,其北比其南离子浓度高,含盐量大,其原因有以下几个。一是离补给源的距离不同造成的。巴丹吉林沙漠湖泊除接受降水补给来源之外,来自雅不赖山区的降水补给源直接靠近湖群东南部,所以靠近补给源的东南部湖泊比北部湖泊首先得到雨水(淡水)补给或较多得到雅不赖山区雨水汇集的补给,造成湖水中的离子浓度较低。二是南部湖泊水面比北部湖泊水面高,南部湖水会向北部湖泊流动,并将可溶盐离子带到北部湖泊中,造成北部湖水盐度增高。一般说来,离子浓度低的方向是补给水的来源方向,离子浓度高的方向是水流前进、汇聚方向,表明

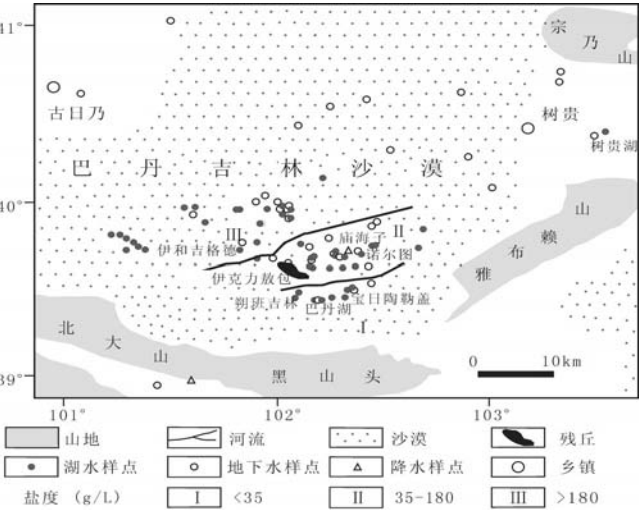


图6 巴丹吉林沙漠湖泊水的盐度分布特征

Fig. 6 The distribution of lake water salinity in the Badain Jaran Desert

靠近补给源的东南部湖泊比北部湖泊首先得到雨水(淡水)补给或较多得到雅不赖山区雨水汇集的补给,造成湖水中的离子浓度较低。二是南部湖泊水面比北部湖泊水面高,南部湖水会向北部湖泊流动,并将可溶盐离子带到北部湖泊中,造成北部湖水盐度增高。一般说来,离子浓度低的方向是补给水的来源方向,离子浓度高的方向是水流前进、汇聚方向,表明

表3 2006年、2007年和1999年巴丹等地湖水化学成分变化对比(g/L)

Tab. 3 The changes of chemical composition in Badain and other lakes between 2007 and 1999 (g/L)

时间	样点	pH	TDS	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <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>
1999	宝日陶勒盖	7.79	1.2	0.30	0.01	0.10	0.03	0.32	0.33	0.03	0.19
	巴丹东湖	8.68	1.8	0.59	0.03	0.01	0.08	0.46	0.28	0.11	0.63
	巴丹西湖	10.63	398.2	147	7.62	0.01	0.003	112	42.9	63.1	4.39
	诺尔图	10.33	89.8	42.6	2.86	< 0.1	0.347	33.6	13.9	6.6	29.80
	呼和吉林	10.46	109.0	40.8	3.38	0.008	0.109	28.1	11.6	20.3	6.29
2006	宝日陶勒盖	9.61	1.3	0.37	0.01	0.03	0.040	0.45	0.25	0	0.13
	巴丹东湖	8.65	1.7	0.55	0.03	0.02	0.070	0.48	0.17	0.01	0.83
	巴丹西湖	11.00	--	63.68	3.08	0	0.08	163.7	106.42	--	--
2007	宝日陶勒盖	7.21	1.1	0.32	0.01	0.04	0.057	0.35	0.30	0.01	0.17
	巴丹东湖	7.75	1.0	0.35	0.02	0.042	0.048	0.26	0.18	0.10	0.44
	巴丹西湖	9.47	182.5	60.29	5.58	0.066	0.557	57.88	17.43	1.92	3.34
	诺尔图	9.88	82.8	41.74	3.38	0.19	0.603	33.88	12.57	14.56	17.62
	呼和吉林	9.94	90.2	37.835	3.31	0.132	0.256	28.07	10.08	18.39	22.72

注:表中1999年和2006年数据分别参考文献[25]、[26]。

该区湖水由南向北流动。三是降水量的差异造成的。该区从南向北降水量略有减少,但差别不大,这也会引起南部湖水离子浓度低于北部。也许这三个因素都有作用,但离补给源的距离远近或得到的补给量的大小应该是主要影响因素。

另外,在伊克力敖包褶皱带以南的湖水化学成分从南向北离子浓度总体呈现增大趋势,自南到北呈现由微咸湖→咸水湖→盐水湖逐渐变化。如巴丹东湖湖水呈微咸性,并有生物生长,而相距不足百米的巴丹西湖则有大量白色结晶沉淀的盐水湖。沙漠北部的湖群几乎全部是TDS含量高的盐水湖。其原因应该与伊克力敖包褶皱带南北湖水离子浓度差异原因相同,即主要与补给源的距离不同决定的。

3.5 地下水化学类型、分布高度与湖水补给来源

水化学成分显示,巴丹吉林沙漠地区地下水一般具有微咸水的特点,特别是在东南部湖群的南部地区,地下水仍然具有微咸水特征,这是降水少、地下水得到了湖水补给的显示,具有当地降水入渗补给的特点。资料表明,在紧靠该区南部的河西走廊地区的地下水一般为淡水,化学类型为Ca-(Mg)-HCO<sub>3</sub>-(SO<sub>4</sub>)型或Mg-(Na)-HCO<sub>3</sub>-(SO<sub>4</sub>)型<sup>[36]</sup>。如果湖水补给来自祁连山区的淡水(来自降水和融雪产生的淡水),则在经过河西走廊到达湖区仍具有淡水特征。而南部湖群湖水都为微咸水,个别的为咸水,由此判断沙漠湖水来自祁连山区通过地下补给的可能性不大。

在巴丹吉林沙漠南边的河西走廊地下水分布的海拔高度为1200 m左右<sup>[37-38]</sup>,而在巴丹吉林沙漠地区,湖水位分布高度比河西走廊地下水位的海拔高度明显高(图8),不具有补给沙漠湖水的水动力条件。沙漠地区的湖泊水位季节变化很小,湖水位就是该区地下潜水位。如在雅不赖山东端北侧的树贵湖、哈日木格台湖、哈拉木格台等5个湖泊构成的湖群湖水位海拔高度为1420 m左右(图8),湖水位比河西走廊地下水位高200 m左右。在伊克力敖包褶皱带南部,湖水海拔高度为1300 m左右(图8),比河西走廊地下水高100 m。这充分表明沙漠湖泊的形成完全可以不需要祁连山水分的补给。在巴丹吉林沙漠北部湖群,湖水海拔高度一般为1170 m左右(图8),与河西走廊地下水分布高度接近。由此可见,该区的湖水几乎没来自祁连山地区地下水补给的可能性。

4 结论

综上所述,可得到以下结论:

(1) 巴丹吉林沙漠湖泊水的pH、盐度、TDS和电导率均远远大于地下水。沙漠东南部湖群水的pH值、盐度、TDS和电导率比较低,呈微碱,属微咸湖性,而北部湖群水的pH、盐度、

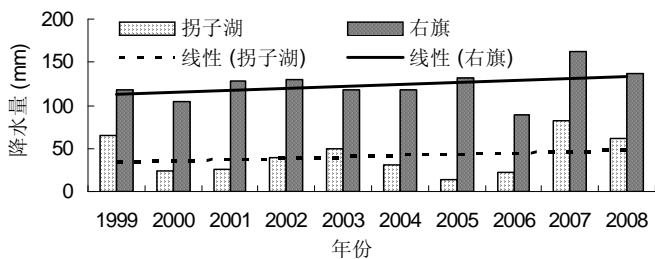


图7 近10年拐子湖和阿拉善右旗降水量变化  
Fig. 7 The change of precipitation at Guaizi lake and of Alashan Right Banner in recent years

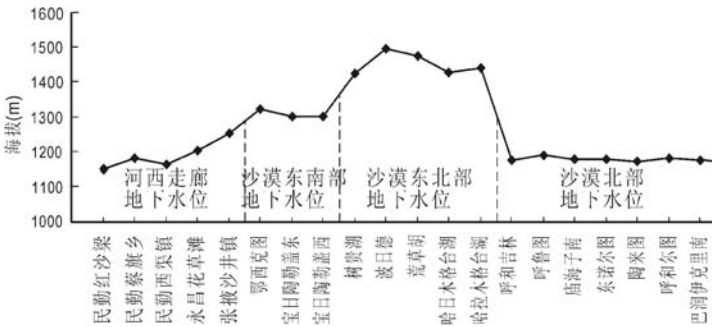


图8 巴丹吉林沙漠湖泊与河西走廊地下水位分布高度  
Fig. 8 The distribution situation of groundwater level in the Badain Jaran Desert and Hexi Corridor



TDS 和电导率远远大于东南部湖群,呈中等碱性,为盐水湖。

(2) 湖水样品中  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  含量占绝对优势,大多数盐度较高的湖泊属于  $\text{Na}(\text{K})\text{-Cl}(\text{SO}_4)$  型,个别盐度较低的微咸湖属于  $\text{Na}(\text{Mg})\text{-(Ca)-Cl}(\text{SO}_4)\text{-(HCO}_3)$  型。地下水的化学类型多数为  $\text{Na}(\text{Ca})\text{-(Mg)-Cl}(\text{SO}_4)\text{-(HCO}_3)$  型,属微咸水,个别为  $\text{Na-Cl-SO}_4$  型的咸水。

(3) 湖水离子化学特征显示巴丹吉林沙漠东南部湖群自南向北的演化趋势为:微咸湖→咸水湖→盐水湖。湖水化学成分与湖水水位高度显示,沙漠湖群湖水流向是由东南流向西北。

(4) 巴丹吉林沙漠湖水离子化学成分短时间序列变化指示,近 9 年宝日陶勒盖、巴丹东湖、巴丹西湖、诺尔图、呼和吉林湖水中的大多数离子的含量有所降低,表明其近 9 年来淡水补给量增多。

(5) 水化学成分和水位分布高度表明,该区沙漠湖水主要来自当地降水补给和来自沙漠东南缘雅布赖山和南缘的黑山头山地区的地下水补给,而来自祁连山补给的可能性很小。

## 参考文献 (References)

- [1] John B Gates, W Mike Edmunds, W George Darling et al. Conceptual model of recharge to southeastern Badain Jaran Desert groundwater and lakes from environmental tracers. *Applied Geochemistry*, 2008, 23: 3519-3534.
- [2] Gao Quanzhou, Tao Zhen, Dong Guangrong et al. The Characteristics of sediments geochemistry in Chagelebulu section in the Badain Jaran Desert. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(suppl.): 44-52. [高全洲, 陶贞, 董光荣 等. 巴丹吉林沙漠查格勒布剖面沉积地球化学特征. *地理学报*, 1998, 53(增刊): 44-52.]
- [3] Yang Yi, Li Baosheng, Li Yunzhuo et al. Palaeo-climate change indicated from fluctuations of trace elements since 150 ka BP in Chagelebu stratigraphical section, Badain Jaran Desert. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(1): 1-8. [杨艺, 李保生, 李云卓 等. 巴丹吉林沙漠查格勒布剖面微量元素反映的 150 ka BP 以来的气候变化. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 1-8.]
- [4] Hölz S, Polag D, Becken M et al. Electromagnetic and geoelectric investigation of the Gurinai Structure, Inner Mongolia, NW China. *Tectonophysics*, 2007, 445(1/2): 26-48.
- [5] Dong Zhibao, Wang Tao, Wang Xunming. Geomorphology of the megadunes in the Badain Jaran Desert. *Geomorphology*, 2004, 60(1/2): 191-203.
- [6] Dong Zhibao, Qian Guangqiang, Luo Wanyin et al. Eomorphological hierarchies for complex mega-dunes and their implications for mega-dune evolution in the Badain Jaran Desert. *Geomorphology*, 2009, 106(3/4): 180-185.
- [7] Yang Xiaoping. Landscape evolution and precipitation changes in the Badain Jaran Desert during the last 30,000 years. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45: 1042-1047. [杨小平. 近 3 万年来巴丹吉林沙漠的景观发育与雨量变化. *科学通报*, 2000, 45(4): 428-433.]
- [8] Yang Xiaoping, Martin A, Williams J. The ion chemistry of lakes and late Holocene desiccation in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China. *Catena*, 2003, 51: 45-60.
- [9] Yang Xiaoping. Discovery of calcareous cementation layers and their paleoclimatic implications in the Badain Jaran Desert. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(3): 295-297. [杨小平. 巴丹吉林沙漠地区钙质胶结层的发现及其古气候意义. *第四纪研究*, 2000, 20(3): 295-297.]
- [10] Yang Xiaoping, Louis A Scuderi. Hydrological and climatic changes in deserts of China since the late Pleistocene. *Quaternary Research*, 2010, 73: 1-9.
- [11] Yan Mancun, Wang Guangqian, Li Baosheng et al. Formation and growth of high megadunes in Badain Jaran Desert. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(1): 83-91. [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. *地理学报*, 2001, 56(1): 83-91.]
- [12] Yan Mancun, Wang Guangqian, Li Baosheng et al. Pleistocene paleowind direction change in the Badain Jaran desert and its environmental significance. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2001, 41(11): 118-122. [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. *清华大学学报: 自然科学版*, 2001, 41(11): 118-122.]
- [13] Yan Mancun, Wang Guangqian, Dong Guangrong et al. Study on mega-dunes development and environmental change in Badain Jaran Desert. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(4): 361-368. [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. *中国沙漠*, 2001, 21(4): 361-368.]
- [14] Ma Jinzhu, Chen Fahu, Zhao Hua. Change on climate change and groundwater recharge from the geochemical records of unsaturated zone in the Badan Jaran Desert in the recent 1000 years. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(1): 22-27. [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): 22-27.]

- [15] Ma Jinzhu, Li Ding, Li Xianghu et al. Chloride as a tracer and climatic change record from unsaturated zone of Badain Jaran Desert. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(6): 674-680. [马金珠, 李丁, 李相虎等. 巴丹吉林沙漠包气带Cl<sup>-</sup>示踪与气候记录研究. *中国沙漠*, 2004, 24(6): 674-680.]
- [16] Huang Tianming, Pang Zhonghe. Groundwater recharge in Badain Jaran Desert and Gurinai oasis based on environmental tracers. *Geosciences*, 2007, 21(4): 624-632. [黄天明, 庞忠和. 应用环境示踪剂探讨巴丹吉林沙漠及古日乃绿洲地下水补给. *现代地质*, 2007, 21(4): 624-632.]
- [17] Ma Jinzhu, Huang Tianming, Ding Zhenyu et al. Environmental isotopes as the indicators of the groundwater recharge in the south Badain Jaran Desert. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(9): 922-931. [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): 922-931.]
- [18] Zhao Jingbo, Shao Tianjie, Hou Yule et al. Study on moisture content of sand layer and its origin in a mega-dune area in the Badain Jaran Desert. *Journal of Natural Resources*, [http://www.cnki.net/kcms/detail/11-1912\\_n.20101021.1003.000.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11-1912_n.20101021.1003.000.html). [赵景波, 邵天杰, 侯雨乐等. 巴丹吉林沙漠高大沙山区沙层含水量与水分来源探讨. *自然资源学报*, 网络优先出版地址: [http://www.cnki.net/kcms/detail/11-1912\\_n.20101021.1003.000.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11-1912_n.20101021.1003.000.html).]
- [19] Shao Tianjie, Zhao Jingbo, Li Enju et al. Grain size composition of typical mega-dune in Badain Jaran Desert. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(5): 790-796. [邵天杰, 赵景波, 李恩菊等. 巴丹吉林典型高大沙山粒度分布规律研究. *地理科学*, 2010, 30(5): 790-796.]
- [20] Zhao Jingbo, Shao Tianjie, Lu Xiaohu et al. The study on CO<sub>2</sub> concentration and the diurnal variation laws of the highest mega dune in Badain Jaran Desert. *Geographical Research*, 2010, 29(11): 1994-2005. [赵景波, 邵天杰, 吕晓虎等. 巴丹吉林最高沙山区CO<sub>2</sub>浓度与昼夜变化规律. *地理研究*, 2010, 29(11): 1994-2005.]
- [21] Zhu Zhendai, Wu Zheng, Liu Shu et al. *An Outline of Chinese Deserts*. rev. ed. Beijing: Science Press, 1980: 1-3, 17-19. [朱震达, 吴正, 刘恕等. *中国沙漠概论*. 修订版. 北京: 科学出版社, 1980: 1-3, 17-19.]
- [22] Mou Shifen, Liu Kena. *Application of Ion Chromatography and Method*. Beijing: Chemical Industry Press, 2000: 64-128. [牟世芬, 刘克纳. *离子色谱方法及应用*. 北京: 化学工业出版社, 2000: 64-128.]
- [23] National Technology Agency of China. *Methods for Examination of Drinking Natural Mineral Water*. Beijing: Standards Press of China, 1996: 2-147. [国家技术监督局. *饮用天然矿泉水检验方法* (中华人民共和国国家标准). 北京: 中国标准出版社, 1996: 2-147.]
- [24] Huang Xiquan. *Hydrology*. Beijing: Higher Education Press, 2000: 150-151. [黄锡荃. *水文学*. 北京: 高等教育出版社, 2000: 150-151.]
- [25] Yang Xiaoping, Liu Tungsheng, Xiao Honglang. Evolution of megadunes and lakes in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China during the last 31000 years. *Quaternary International*, 2003, 104: 99-112.
- [26] Ma Nina, Yang Xiaoping. Environmental isotopes and water chemistry in the Badain Jaran Desert and in its southeastern adjacent areas, Inner Mongolia and their hydrological implications. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 702-712. [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): 702-712.]
- [27] Chen Jiansheng, Fan Zhechao, Wang Jiyang et al. Isotope methods for studying the replenishment of the lakes and downstream groundwater in the Badain Jaran Desert. *Acta Geoscientia Sinica*, 2003, 24(6): 497-504. [陈建生, 凡哲超, 汪集旻等. 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): 497-504.]
- [28] Chen Jiansheng, Liling, Wang Jiyang et al. Ground water maintains dune landscape. *Nature*, 2004, 432: 459-460.
- [29] Chen Jiansheng, Zhao Xia, Sheng Xuefen et al. Research on formation mechanism of megadunes and lakes in the Badain Jaran Desert. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(23): 2789-2796. [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.]
- [30] Ma Jinzhu, Li Ding, Zhang Jianming et al. Groundwater recharge and climatic change during the last 1000 years from unsaturated zone of SE Badain Jaran Desert. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(14): 1469-1474.
- [31] Ma Jinzhu, Wang Shuiian, Edmunds W M. The characteristics of groundwater resources and their changes under the impacts of human activity in the arid Northwest China: Case study of the Shiyang River Basin. *Journal of Arid Environment*, 2005, 61: 277-295.
- [32] Ma Jinzhu, Edmunds W M, He Jianhua et al. A 2000 year geochemical record of palaeoclimate and hydrology derived from dune sand moisture. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 276: 38-46.
- [33] Ma Jinzhu, Edmunds W M. Groundwater and lake evolution in the Badain Jaran Desert ecosystem, Inner Mongolia. *Hydrogeology Journal*, 2006, 14(7): 1231-1243.
- [34] Yang Xiaoping. Water chemistry of the lakes in the Badain Jaran Desert and their Holocene evolutions. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(2): 97-104. [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.]
- [35] Yang Xiaoping. 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.

- [36] Ding Hongwei, Zhang Ju. Geochemical properties and evolution of groundwater beneath the Hexi Corridor, Gansu Province. *Arid Zone Research*, 2005, 22(1): 24-29. [丁宏伟, 张举. 河西走廊地下水水化学特征及其演化规律. 干旱区研究, 2005, 22(1): 24-29.]
- [37] Wang Qiyou. The exploitation of groundwater in the plain of Hexi Corridor in Gansu Province. *Gansu Hydropower Technology*, 2004, 40(3): 202-204. [王启优. 甘肃省河西走廊平原区地下水可开采量探讨. 甘肃水利水电技术, 2004, 40(3): 202-204.]
- [38] Ding Hongwei, Zhang Ju. Occurrence and development of deep underground water in Hexi Corridor. *Northwestern Geology*, 2009, 42(3): 109-120. [丁宏伟, 张举. 河西走廊深层地下水的赋存和开发. 西北地质, 2009, 42(3): 109-120.]

## Water Chemistry of the Lakes and Groundwater in the Badain Jaran Desert

SHAO Tianjie<sup>1</sup>, ZHAO Jingbo<sup>1,2</sup>, DONG Zhibo<sup>1,3</sup>

(1. College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an 710075, China;

3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Based on the analysis of ion chemical composition of lake water and shallow groundwater in the Badan Jaran Desert, this paper discussed the characteristics of chemical composition, type of the lake water, spatial variation of lake water, and possible supply sources of lake water and groundwater in the desert areas. The results show that the pH, salinity, TDS and electrical conductivity of the lakes are greater than those of groundwater. The ion contents of the water samples are dominated by  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$ . Most of the higher salinity lakes are Na(K)-Cl-( $\text{SO}_4$ ) type, and a few low-salinity lakes are Na-(Mg)-(Ca)-Cl-( $\text{SO}_4$ )-(HCO<sub>3</sub>) type. Most of the groundwater bodies are Na-(Ca)-(Mg)-Cl-( $\text{SO}_4$ )-(HCO<sub>3</sub>) type, attribute brackish lake, and only a few present a Na-Cl- $\text{SO}_4$  type, flowing under salt water lake. The pH, salinity, TDS and electrical conductivity of the southeastern lakes are relatively low, and there are slightly alkaline lakes, while the pH value, salinity, TDS and electrical conductivity of water in the northern lakes are much greater than those of the southeastern lakes, so the northern lakes are moderately alkaline and salt water ones. In the southeastern part of the Badan Jaran Desert, the chemical characteristics of ions of the lakes water show a changing trend from south to north in the order of brackish lake→salt water lake→Salina. The changing trends of chemical compositions of ions in recent 9 years indicate that most of the ion contents have a shade of reduced in Boritaolegai, east Badain, west Badain, Nuoertu and Huhejilin Lake, which states clearly that the amount of fresh water is increasing in the 9-year period. The chemical compositions of the lake water reveal that the flow direction of lake water is from the southeast to northwest in the Badan Jaran Desert.

**Key words:** chemical composition of water; desert lakes; chemistry type of lake water; spatial variation of lake water; groundwater; supply sources; Badain Jaran Desert