J. Lake Sci.(湖泊科学),2010,**22**(5):774-782
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn
© 2010 by *Journal of Lake Sciences*

巴丹吉林沙漠湖泊水化学空间分布特征*

陆　莹,王乃昂**,李贵鹏,李卓仑,董春雨,路俊伟
(兰州大学资源环境学院,干旱区水循环与水资源研究中心,兰州 730000)

摘　要:通过对巴丹吉林沙漠腹地拐子湖-地质公园一线51个湖泊水,8个泉水,12个井水及1个雨水水样的水化学成分分析,初步探讨了沙漠湖泊水化学分布特征及其影响因素.结果表明由东南边缘至腹地湖泊总体上依次呈硫酸盐型-碳酸盐型-氯化物型分布.东南边缘以 Na^+、Cl^-、SO_4^{2-} 为主的湖泊因矿化度分异,形成 Ca^{2+}、Mg^{2+} 含量不同的三种亚型,其中高矿化度的 Na-Cl-(SO_4)型湖泊在腹地湖泊群中也有出现,表现出地理上的不连续分布;边缘若干湖泊受局部地理环境的影响水离子多含 Na^+、Cl^-、CO_3^{2-} + HCO_3^-.综合分析表明湖泊水化学型的空间分异与区域气候差异和气候变化有关,湖水直接或间接地接受当地降水补给,但不排除外源地下水补给对其有一定贡献.通过对比不同时段部分沙漠湖泊水化学特征发现近十年以来腹地湖泊补给源或受气候干暖化影响使其水化学特性较边缘湖泊的变化大.
关键词:巴丹吉林沙漠;湖泊;水化学

Spatial distribution of lakes hydro-chemical types in Badain Jaran Desert

LU Ying, WANG Nai'ang, LI Guipeng, LI Zhuolun, DONG Chunyu & LU Junwei
(*College of Earth and Environmental Science, Center for Hydrologic Cycle and Water Resources in Arid Region, Lanzhou University, Lanzhou* 730000, *P. R. China*)

Abstract: In September, 2009, 51 samples of lakes as well as 8 of springs and 12 of wells were studies from Lake Guaizi Geological Park in Badain Jaran Desert. The result demonstrated that almost all lakes from southeast edge to hinterland area showed Sulfate – Carbonate – Chloride type. The southeast edge has the most complex type, mainly contained Na^+, Cl^-, SO_4^{2-}. It formed into three sub-types for different contents of Ca^{2+} and Mg^{2+}, which attributed to different total dissolved solids. One of the sub-type, had high TDS and without Ca^{2+}, Mg^{2+} also appeared in north, which seemed to be one type just non-sequential distribution, however, they had huge differences. After a comprehensive analysis, it showed that spatial variation of desert lakes mainly formed by climate, and partly by local precipitation directly or indirectly, and groundwater recharge may be other factor. Compared characteristics of water chemistry among the different part of south and north lake, it showed that the supply source of the hinterland was more unstable than that of southeast, which might be drived by climate drying and warming.
Keywords: Badain Jaran Desert; lake; hydro-chemistry

20世纪90年代以来,有关巴丹吉林沙漠湖泊成因,湖泊水量在极度干旱的气候环境下为何长久不衰,以及湖水的补给途径和补给来源等问题的研究尽管取得了较大的进展,但研究成果中仍存在很大分歧[1-16].前人的学术观点大致可分为以下三类:(1)沙漠地区湖泊主要受当地降雨所形成的地下水补给[4-7];(2)临近地区补给,即东南部雅布赖山区的降雨是沙漠地区地下水的主要来源[7-10];(3)远源补给,但水源输送方式各持己见.陈建生等认为是深部断裂导水,祁连山的雪水或者青藏高原黄河源头的水经深部断裂带补给到巴丹吉林沙漠的湖泊里[11-14];丁宏伟等认为黑河在金塔-鼎新盆地渗漏所产生的地下水顺着阿尔金断裂自西向东补给到巴丹吉林沙漠湖泊群,即地表-地下联合输送[15];张虎才等认为河西走廊祁连山前缘洪积扇地

* 国家基础科学人才培养基金项目(J0730536)和高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090211110025)联合资助.2009-12-21收稿;2010-03-22收修改稿.陆莹,女,1986年生,硕士研究生;E-mail:luying1105@yeah.net.
** 通讯作者;E-mail:wangna@lzu.edu.cn.

下水的补给，维持了巴丹吉林沙漠东南部湖泊水平衡，而构造抬升使得地下古水由西北向东南集中，保持了沙漠地下深层水位的稳定[16].

以上研究主要涉及的方法有水量平衡法及与水化学有关的同位素、水化学成分分析法等. 湖泊水化学特征在一定程度上反映了湖泊所处的自然地理环境，其化学成分分析有助于揭示湖泊水循环过程，以及与周围环境的相互作用. 近年来，国内外已有很多学者通过研究巴丹吉林沙漠的湖泊水化学特征，以期解决湖泊补给来源及补给途径等问题[4-7,9-10,12]，但是由于各方面条件所限，这些研究仅在沙漠南部少数湖泊及周边有限区域内开展. 本文在前人的研究基础上，借兰州大学资源环境学院首次由北而南徒步穿越巴丹吉林沙漠之际，采集沙漠南北纵向若干地表水和地下水水样，分析了这些样品的水化学特征，初步探讨了湖泊水化学型的空间分布特征及其影响因素，为进一步研究湖泊补给来源提供依据.

1 研究区概况

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，横跨 5 个经度，东西长约 442km；合黎山、北大山之北，拐子湖、古居延泽之南，面积为 $5.2162\times10^4 km^2$，是系我国仅次于塔克拉玛干沙漠的第二大沙漠①. 区内地势总体呈南高北低、东高西低的趋势，全年主要受 W-NW 大陆风系控制[2]，气候干旱，多年平均降水量由东南向西北逐渐减少，东南部约为 120mm，西北部不足 40mm[7]. 与世界上其他沙漠明显不同的是，东南部的高大复合型沙山，相对高度一般达 200－300m，最高的超过 430m；沙山之间的洼地分布着许多大小不等的永久性湖泊，最大达 $1.5km^2$（诺尔图），绝大多数属矿化度很高的盐碱湖，还有一定数量的淡水湖，这一奇特景观类型为世界罕见.

从地质构造来说，巴丹吉林沙漠属阿拉善台块的拗陷盆地，被宗乃山西侧断裂与阿拉善隆起相分开[8]. 自早更新世以来，总的趋势表现为地壳大幅度下沉，第四纪沉积物分布广泛，类型复杂[17-18]；而盆地边缘的山区则长期处于强烈的剥蚀阶段，以致形成今天的准平原地貌. 沙漠腹部湖泊区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，顶板埋深可能为 5－20m，含水层厚度 30m 以上；南部湖泊区巴丹一带由凹凸不平的白垩系碎屑岩为隔水底板，由全新统湖积砂层、亚砂土与风积砂层构成含水层，地下水位较浅[7].

2 研究方法

巴丹吉林沙漠科学考察队于 2009 年 9 月沿拐子湖-乌兰色日-乌尔塔·布拉格-巴丹吉林庙-地质公园一线由北向南穿越沙漠，共采集 51 个湖泊水、1 个雨水、20 个地下水样品，湖水及雨水采样点编号及地点见图 1. 地下水样均是在湖泊周边采集的，故未在图中一一标识，只采用不同编号方法以示区别（表 3）. 所有样品采集时，聚乙烯样品瓶都用原水冲洗 2－3 次，然后从水下采集样品，密封后取出.

水样阳离子和阴离子含量用美国戴安公司生产的 ICS-2500 型离子色谱仪进行检测. 测量之前，根据电导水参仪测得的可溶性固体总量（Total Dissolved Solids，TDS）大小将各水样按比例用超纯水稀释成不同的倍数，经 0.45μm 的滤膜过滤后进样. 阳离子测量了 Na^+、K^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}，阴离子测量了 Cl^-、SO_4^{2-}. 用酸式滴定法测定 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的质量浓度[19]. 实验操作在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成. 最后通过离子平衡检查公式计算得出实验水样中总阴阳离子的相对误差均小于 ±10%，此次水分析结果是可靠的. 实验结果见表 1 和表 2.

3 结果与讨论

3.1 湖泊水化学分布特征及成因探讨

沙漠湖泊水化学特征采用 Piper 三线图表示，由于南北湖泊地理上不相连接，故采用不同符号以示区别

① 朱金峰，王乃昂，陈红宝等. 基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析. 地理科学进展，2010，**29**（待刊）.

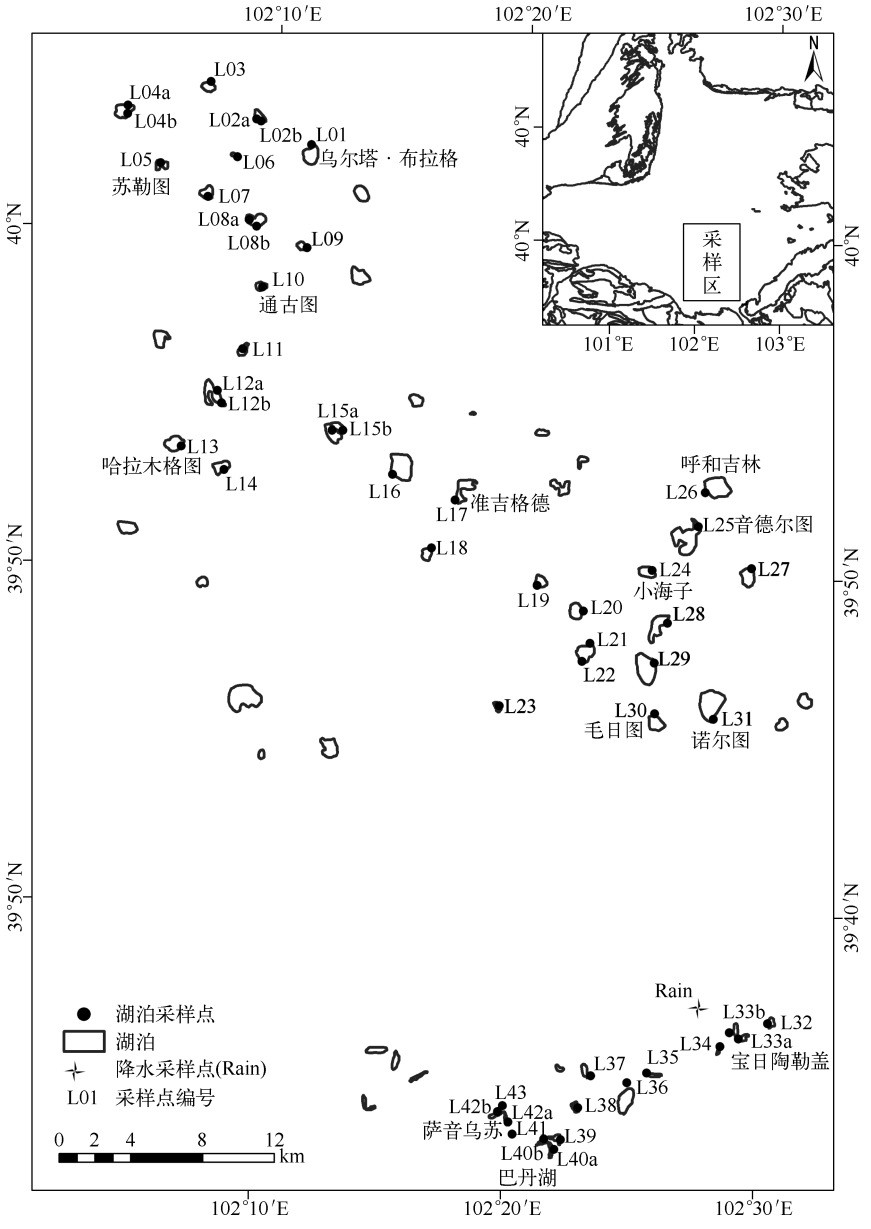


图 1 巴丹吉林沙漠湖泊采样点分布

Fig. 1 The distribution of lakes' samples in Badain Jaran Desert

(图 2). 从阳离子三角图中可以看出,所有湖水样品中都以 Na^+ 占绝对优势;东南边缘湖泊中有少量的 Ca^{2+}、Mg^{2+}. 阴离子三角图显示东南边缘湖泊主要以 Cl^- 居多,其次部分湖泊 SO_4^{2-} 含量较多,部分湖泊则含较多$CO_3^{2-}+HCO_3^-$;沙漠腹地绝大部分湖泊中明显以 Cl^- 和$CO_3^{2-}+HCO_3^-$ 为主,但是出现若干以 Cl^- 和 SO_4^{2-} 为主的湖泊.

结合湖泊采样点及其相应水化学型描述湖泊水化学型的空间分布(图3). 在化学分类中按毫克当量计,主要离子含量不到总阴离子或阳离子 5% 的,不予采用;离子 > 5%,但 < 25% 者,则表示在括号中;离子 > 25%,按其丰度来表示[20]. 首先选取毫克当量百分比最大的若干离子,加以标识,发现绝大部分湖泊的水

表 1 巴丹吉林沙漠湖泊、降水水化学成分(g/L)

Tab. 1 The content of main ions in the Badain Jaran Desert lakes and precipitation

采样点	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-	采样点	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-
L01	132.16	13.60	0.02	0.56	138.14	29.64	78.76	4.29	L22	45.69	3.50	0.07	0.41	29.75	9.17	41.85	7.30
L02a	140.47	7.42	0.04	0.00	246.57	7.05	15.90	0.38	L23	89.64	6.85	0.13	0.70	75.83	24.96	41.01	4.85
L02b	26.78	3.31	0.10	0.48	27.21	4.46	17.03	4.10	L24	97.89	14.50	0.05	0.29	120.31	26.60	37.58	3.81
L03	60.05	4.45	0.05	0.18	49.97	14.32	44.49	3.57	L25	106.05	9.64	0.08	0.97	81.39	25.80	72.14	8.46
L04a	125.07	11.50	0.06	1.19	126.89	39.39	61.31	5.55	L26	54.69	4.74	0.09	2.38	29.37	10.09	41.72	7.40
L04b	123.04	11.91	0.11	2.56	10.47	3.70	67.12	3.38	L27	147.15	13.98	0.09	0.63	102.70	49.33	102.24	12.69
L05	63.79	5.31	0.04	0.21	56.96	20.02	42.80	7.76	L28	78.93	5.23	0.11	4.10	49.54	26.75	63.95	8.09
L06	107.75	7.74	0.16	1.92	94.51	39.33	78.06	10.00	L29	58.97	5.23	0.06	0.30	44.84	10.77	45.86	4.30
L07	130.51	9.51	0.06	0.41	131.55	33.22	68.34	6.13	L30	86.72	10.57	0.07	0.62	113.53	23.18	20.85	2.93
L08a	105.36	8.08	0.04	0.37	109.94	32.57	43.57	7.02	L31	50.64	4.04	0.12	2.37	33.08	11.66	33.30	6.09
L08b	1.07	0.07	0.01	0.10	0.79	0.45	0.45	0.59	L32	0.33	0.01	0.01	0.08	0.27	0.29	0.00	0.36
L09	162.98	19.24	0.06	0.61	190.40	55.31	37.95	3.17	L33a	0.49	0.02	0.02	0.07	0.48	0.37	0.00	0.31
L10	176.20	14.23	0.04	0.80	183.45	53.32	93.06	4.68	L33b	0.57	0.05	0.03	0.04	0.50	0.50	0.00	0.36
L11	68.44	3.89	0.04	0.34	52.61	18.01	50.18	7.67	L34	0.31	0.02	0.01	0.08	0.29	0.26	0.00	0.32
L12a	76.44	4.34	1.27	1.04	66.47	67.18	0.49	0.44	L35	0.54	0.02	0.01	0.04	0.36	0.33	0.03	0.40
L12b	71.88	2.81	1.26	0.57	46.46	83.23	0.77	0.73	L36	138.05	15.07	0.90	0.55	232.53	47.25	1.74	0.46
L13	147.59	10.49	1.26	0.77	193.22	66.23	0.47	0.62	L37	0.88	0.05	0.02	0.01	0.73	0.52	0.36	0.34
L14	79.01	4.03	0.45	0.39	70.94	77.61	0.61	0.76	L38	105.02	8.29	0.19	0.54	129.14	45.82	15.68	0.99
L15a	88.91	5.59	0.11	0.23	98.71	26.70	29.53	3.90	L39	145.68	4.73	0.10	1.06	241.82	28.23	11.72	1.64
L15b	77.49	4.35	0.07	0.47	79.07	27.26	27.86	4.36	L40a	0.60	0.02	0.02	0.05	0.47	0.25	0.10	0.74
L16	77.49	3.67	0.14	0.66	63.92	12.67	38.88	4.54	L40b	219.57	8.01	0.17	0.31	91.17	67.43	89.67	13.64
L17	91.56	6.96	0.33	0.27	64.27	11.78	51.73	5.37	L41	6.15	0.33	0.19	0.12	5.06	4.02	1.13	1.30
L18	90.00	5.79	0.11	0.73	66.94	13.80	57.15	6.73	L42a	9.03	0.47	0.24	0.19	7.13	5.87	0.90	1.03
L19	92.01	5.22	0.05	0.34	63.24	19.20	64.40	9.15	L42b	5.74	0.31	0.23	0.10	5.70	3.92	0.92	0.79
L20	77.60	5.61	0.06	0.37	49.80	19.16	68.26	8.83	L43	35.89	2.40	0.07	0.16	18.57	23.11	19.70	5.39
L21	8.44	0.63	0.03	0.34	4.83	1.82	6.11	1.95	Rain	0.37	0.009	0.002	0.15	0.014	0.14	0.00	0.09

表 2 巴丹吉林沙漠地下水化学成分(mg/L)

Tab. 2 The content of main ions in the Badain Jaran Desert groundwater

采样点	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-	采样点	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-
L12j[1)]	101.6	12.9	7.3	39.3	70.3	81.9	0.0	255.6	L36j	384.7	15.3	11.9	78.4	316.8	305.3	0.0	336.6
L15j	221.8	18.3	5.6	42.8	99.5	146.7	0.0	210.4	L39j	157.5	8.1	5.0	43.4	127.2	105.1	0.0	165.9
L17j	158.0	41.9	7.0	64.3	129.2	90.4	0.0	319.3	L04q[2)]	161.3	7.2	3.3	29.2	78.3	78.4	0.0	229.3
L18j	226.4	29.2	4.3	43.5	124.4	157.2	0.0	283.1	L07q	167.5	7.3	1.8	12.8	88.2	95.7	0.0	234.1
L20j	258.7	35.0	8.5	45.9	18.8	16.8	0.0	460.8	L16q	245.6	13.1	8.0	51.9	226.2	255.2	0.0	151.8
L23j	129.0	12.6	14.3	69.4	73.8	71.4	0.0	242.4	L21q	74.8	12.7	9.2	45.2	51.4	74.9	0.0	267.7
L24j	92.7	8.3	5.6	19.8	53.4	70.3	0.0	150.5	L22q	154.0	4.8	0.7	16.3	52.5	60.8	0.0	240.2
L26j	202.8	17.3	9.0	56.7	126.0	198.9	0.0	297.8	L23q	190.2	5.9	1.8	33.1	95.6	81.9	0.0	254.9
L28j	92.4	8.5	4.9	28.4	55.9	66.7	0.0	148.6	L25q	239.7	6.8	4.0	31.1	106.6	178.9	0.0	277.0
L31j	84.3	13.8	5.9	31.3	75.8	67.3	0.0	130.3	L28q	88.8	8.2	3.5	23.0	41.0	51.2	0.0	154.0

注:1) L12j 表示 L12 湖泊周边的井水,2) L04q 表示 L04 湖泊周边的泉水.

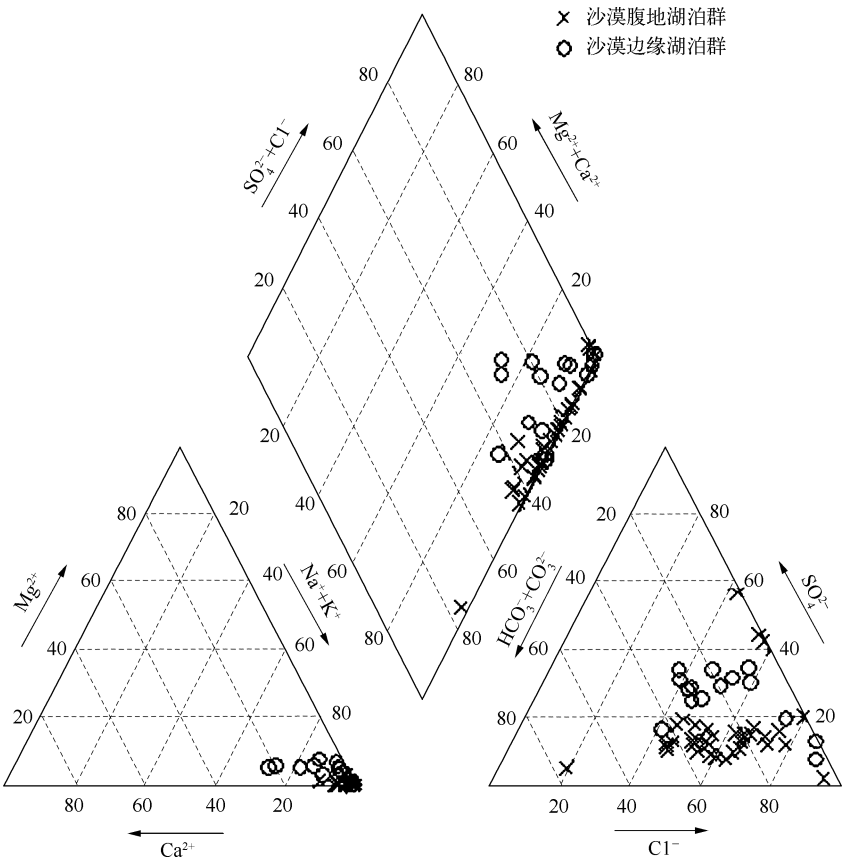


图 2 巴丹吉林沙漠湖泊水样 Piper 三线图

Fig. 2 Piper diagram of the Badain Jaran Desert lakes

化学类型分布比较集中,由东南边缘至腹地依次为 Na-Cl-SO_4 或 Na-Cl-(SO_4)、Na-CO_3-Cl-(SO_4)、Na-Cl-CO_3-(SO_4)(图 3). 这种分布情况可能与气候条件的地带性变化以及湖水的补给来源和途径有很大的关系.

第一,气候条件. 盐湖沉积是特定自然地理和地质环境的产物,记录着湖泊环境变化的全部信息. 盐湖水化学类型的分布对气候的响应表现在:氯化物型盐湖多分布在长期干旱或极干旱地区;硫酸盐型湖泊分布在不同气候带的干旱区;碳酸盐型湖泊分布范围界于上述两类之间[21]. 巴丹吉林沙漠湖泊由东南边缘向腹地呈硫酸盐型-碳酸盐型-氯化物型依次分布,可能是区域气候差异与气候变化的产物.

第二,湖泊补给来源和补给途径. 地下水与湖水相比,所有采样点中主要阴阳离子具有很大的相似性(表 3). 沙漠腹地水样均以 Na^+、Cl^-、$CO_3^{2-}+HCO_3^-$ 或 HCO_3^- 为主,这说明地下水是湖泊的重要补给源之一. 另外,在实地考察中发现该沙漠并无地表径流,且腹地湖泊群中面积较大的湖泊通常分布在较高大沙山之间. 已有研究发现高大沙丘内部包含一个浅层地下蓄水层[10],且内部含水量要比表层多[14],我们认为这些水分不仅来自深层地下水,当地降水直接或间接地也有一定贡献. 沙丘自底部到表层,深层地下水垂向补给减少,但汇流当地降水后储存了相对较多的浅层地下水,形成自流泉[10]补给湖泊. 以此也可以解释腹地湖泊中 $CO_3^{2-}+HCO_3^-$ 所占比重大的原因:(1)地下水位高出湖面,潜水补给湖泊,HCO_3^- 直接进入地表水;(2)地下水出露时与外界空气中的 CO_2 反应生成 CO_3^{2-}、HCO_3^-,即 $5OH^-+4CO_2 \rightleftharpoons CO_3^{2-}+3HCO_3^-+H_2O$. 沙漠边缘水样中水离子多以 Na^+、Cl^-、SO_4^{2-} 为主,但是湖泊水却没有因地下水富含 HCO_3^- 而多 CO_3^{2-} 和 HCO_3^-,说明这里的湖泊补给源不唯一. 雨水样品(图 1)的水离子分析结果显示降雨中含有一定量的 SO_4^{2-}(表 1). 因此东南部边缘湖泊群除接受地下水补给之外,相对丰富的当地降水的直接补给

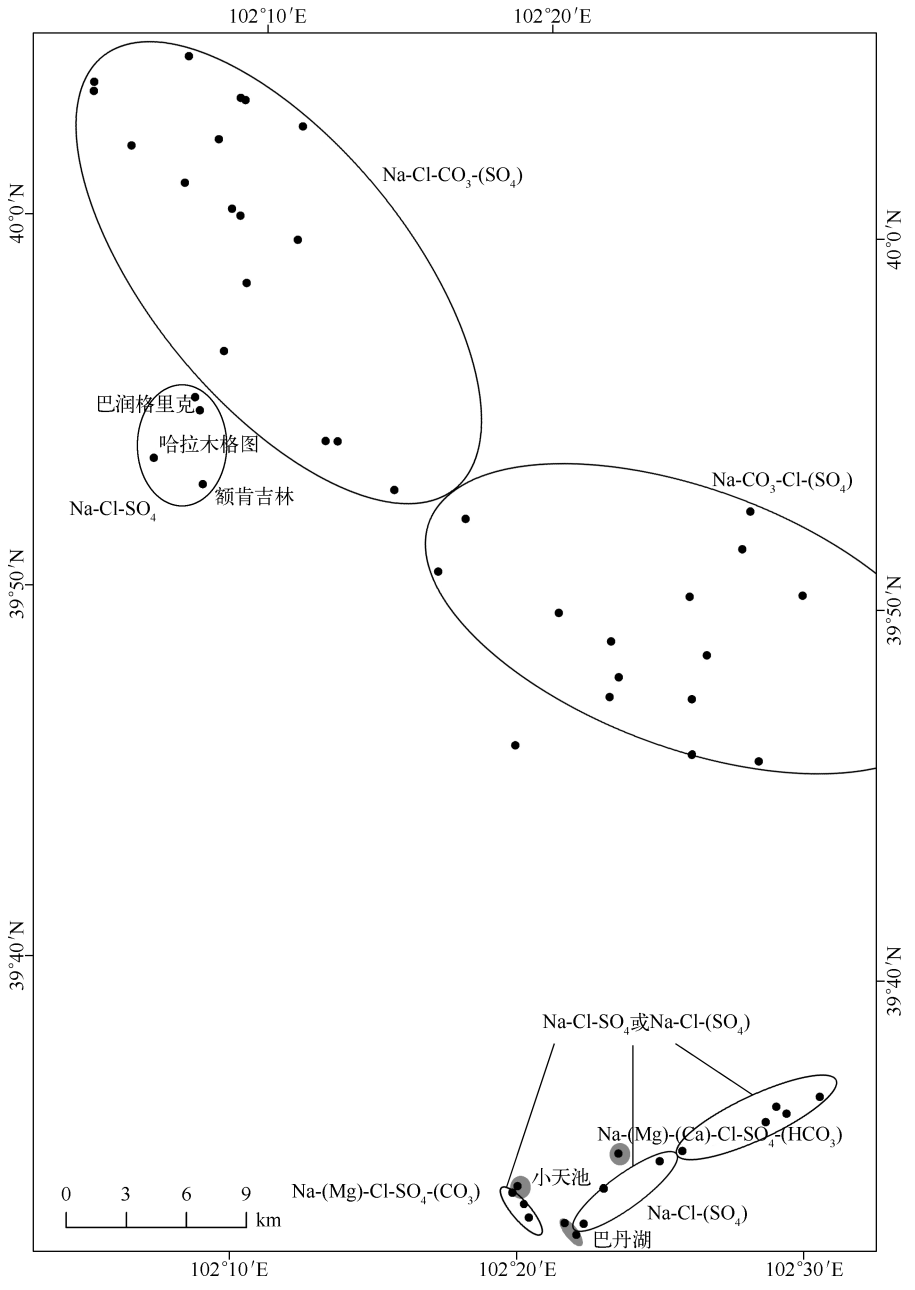


图 3 湖泊水化学型空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of lake hydro-chemical type

也不容忽视.

综上所述,巴丹吉林沙漠湖泊水化学型的空间分布规律符合气候条件的地带性变化,很可能是区域气候差异与气候变化的产物. 以上分析表明当地降水直接或间接通过地下水补给湖泊,但因为目前尚无法精确计算水量平衡,故不排除有外源地下水通过古河道或断裂带补给这些湖泊. 腹地与边缘湖泊群的地理分布不相连接,水分条件有差异,水化学特征差异显著,可能存在不同的补给机制.

表 3 巴丹吉林沙漠湖水与地下水水化学型比较

Tab. 3 The comparison of water chemical type between surface water and groundwater in Badain Jaran Desert

采样点(湖水/井水/泉水)		水化学型	
		地下水	湖泊水
沙漠腹地	L12/j[1)]、L15/j、L17/j、L18/j、L20/j、L04/q[2)]、L07/q、L16/q	Na-(Ca)-HCO_3-Cl-(SO_4)为主	Na-Cl-CO_3-(SO_4)为主
	L23/j、L24/j、L26/j、L28/j、L31/j、L21/q、L22/q、L23/q、L25q、L28/q	Na-(Ca)-(Mg)-HCO_3-Cl-SO_4为主	Na-CO_3-Cl-(SO_4)为主
沙漠边缘	L36/j、L39/j	Na-(Ca)-Cl-SO_4-HCO_3 Na-(Ca)-Cl-HCO_3-SO_4	Na-Cl-(SO_4)

1) L12/j 表示 L12 湖泊和 L12j 两个采样点,2) L04/q 表示 L04 湖泊和 L04q 两个采样点.

3.2 东南边缘湖泊水化学类型及分布特征

巴丹吉林沙漠东南部边缘湖泊群大致沿雅布赖山山体走向呈带状分布,与腹地湖泊群相比,TDS 值波动幅度大,水化学类型相对较复杂多变,但大致可归为两大类.

第一类是沿东北-西南一线分布的湖泊以 Na^+、Cl^-、SO_4^{2-} 为主,这类湖泊矿化度差异性很大且有一定分带性,其 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量也表现出相应的分带性. 东-西-中的湖泊水化学类型分别为:Na-(Ca)-(Mg)-Cl-SO_4-(HCO_3)、Na-(Mg)-Cl-SO_4-(CO_3)、Na-Cl-(SO_4)(图 3). 究其矿化度,依次为:TDS < 3g/L、TDS < 30g/L、TDS > 300g/L. 矿化度越高,Mg^{2+}、Ca^{2+} 生成碳酸盐产生沉淀,在湖水中的浓度减少;而且随着矿化度的升高一般是 Ca^{2+} 先沉淀,Mg^{2+} 后沉淀. 若不考虑中部少数几个高矿化度的 Na-Cl-(SO_4)型湖泊,其余大多接近淡水湖,TDS 值自东北向西南递增,Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 百分含量递减. 结合湖泊离子浓度的变化趋势和分布特征,认为临近山区的降水可能沿古河道或断裂带向低处输送,进而补给湖泊,导致该区域多数湖泊接近淡水湖;另外由于沿途补给水量逐渐减小,湖泊蒸发量与补给量比值增大,湖泊矿化度逐渐升高,Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量逐渐减少. 但是,这种补给方式及湖泊水离子响应机制需要在后续工作中进一步考证完善.

中部若干高矿化度的 Na-Cl-(SO_4)型湖泊在腹地湖区的西南侧以 Na-Cl-SO_4 形式集中出现(图 3). 前者湖泊几乎都已干涸,各离子含量较高,湖周及湖底都有大量盐晶析出,只有降雨后湖泊内才有积水. 后者不同湖泊理化参数有所不同,巴润格力克东湖水域面积较大,TDS 为 217.45g/L;哈拉木格图的矿化度将近巴润格力克的两倍,湖面只剩十几平方米的洼地,水离子中 $CO_3^{2-}+HCO_3^-$ 含量极少,有 SO_4^{2-} 出现. 两者相比它们都属盐水湖,湖泊来水量明显较以往减少了,SO_4^{2-} 浓度百分比略有不同,然而南北湖泊群表现出不同的理化性质,应是不同的地理环境及补给机制所致.

可见,第一类湖泊中的淡水湖,除了接受当地降水补给之外,临近山区降水也可能顺古河道或断裂带走向进行补给. 而个别高矿化度湖泊的出现,应是气候大环境与湖周小环境差异综合作用的结果,不宜作为沙漠边缘湖泊水化学型的总体分布特征加以探讨,宜单独考虑.

第二类是位于湖泊群的南北外围地带(图 3 阴影部分),以小天池、巴丹东、西湖等为代表的若干湖泊,其水离子以 Na^+、Cl^-、$CO_3^{2-}+HCO_3^-$ 为主.

小天池属 Na-CO_3-Cl-SO_4 型湖水,矿化度为 102.6g/L,而它周边是矿化度均不超过 30g/L 的 Na-(Mg)-Cl-SO_4 型湖泊. 野外实地考察中发现小天池海拔要比周围其他湖泊高,导致地下水不易补给,且汇水面积又小,使有限的补给与强烈的蒸发排泄无法达到平衡,造成湖水中各离子浓度比周围湖泊的要大很多,矿化度出现异常高值.

巴丹东湖和巴丹西湖之间相隔一条大致南北走向的沙脊,水化学类型随其矿化度不同而不同. 巴丹东湖属 Na-(Mg)-(Ca)-CO_3-Cl-(SO_4)型,矿化度为 1.9g/L;巴丹西湖属 Na-CO_3-Cl-(SO_4)型,矿化度高达 483.2g/L. 野外调查中发现入冬前后两湖水位上涨,连成了一片,并且东湖的水往西湖流,是西湖海拔较低的表现. 所以西湖的矿化度高可能是因为西湖是水流和盐分汇集的区域. 即使两湖分开时,地下水也可能有类似的流向,对东、西湖的补给量不一造成差异.

以上分析表明局部地形等因素会影响湖泊水量补给,进而导致湖泊的水化学型空间分布复杂化.

3.3 沙漠湖泊水化学演化

已有学者对沙漠边缘及腹地部分湖泊做了相关的水化学分析，故选取沙漠边缘和腹地的部分湖泊，分析它们在1999年和2009年的水化学特性（表4）的变化.

表4 1999年和2009年巴丹吉林沙漠湖泊湖水化学成分对比（g/L）

Tab. 4 The changes of chemical composition in the edge of desert lakes in 1999 and 2009

湖泊	时间（年-月）	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-
宝日陶勒盖	1999－09[4]	0.30	0.01	0.03	0.10	0.32	0.33	0.03	0.19
	2009－09（东湖）	0.49	0.02	0.02	0.07	0.48	0.37	0	0.31
	2009－09（西湖）	0.57	0.05	0.03	0.04	0.50	0.50	0	0.36
巴丹东湖	1999－09[4]	0.59	0.03	0.08	0.01	0.46	0.28	0.11	0.63
	2009－09	0.60	0.02	0.02	0.05	0.47	0.25	0.10	0.74
巴丹西湖	1999－09[4]	147.00	7.62	0.003	0.01	112.00	42.90	63.10	4.39
	2009－09	219.57	8.01	0.17	0.31	91.17	67.43	89.67	13.64
毛日图	1999－09[4]	136.00	13.90	0.004	0.06	169.00	4.90	15.90	6.22
	2009－09	86.72	10.57	0.07	0.62	113.53	23.18	20.85	2.93
诺尔图	1999－09[4]	42.60	2.86	<0.1	0.35	33.60	13.90	29.80	6.60
	2000－09	50.64	4.04	0.12	2.37	33.08	11.66	33.30	6.09
音德尔图	1999－09[4]	90.60	－	<0.1	0.15	－	24.3	36.2	7.02
	2009－09	106.05	9.64	0.08	0.97	81.39	25.80	72.14	8.46
呼和吉林	1999－09[4]	40.80	3.38	0.01	0.11	28.10	11.60	20.30	6.29
	2009－09	54.69	4.74	0.09	2.38	29.37	10.09	41.72	7.40

宝日陶勒盖和巴丹西湖的多数离子浓度有增加的趋势，表明湖泊处于蒸发排泄大于补给的状态（表4）. 巴丹东湖则变化不大，有些离子甚至还有减少的趋势，表明该湖泊目前仍有相当量的淡水补给. 这与马妮娜等[7]对比2006年和1999年上述湖泊水化学成分变化的趋势基本一致，说明近几年来，沙漠边缘不同类型湖泊演化方式不尽相同，但他们各自的演化方向基本没变，意味着东南部湖区的补给源水化学特性较稳定. 其余湖泊位于沙漠腹地，近十年来水体中绝大多数离子浓度增加，但是据调查，北部盐湖水位普遍有上升趋势，这是否说明气候条件发生干暖变化以致腹地湖泊补给源的水化学特性发生变化仍需要进一步考证.

4 结论

（1）巴丹吉林沙漠湖泊水化学类型由东南边缘至腹地依次为 Na-Cl-SO_4 或 Na-Cl-(SO_4)、Na-CO_3-Cl-(SO_4)、Na-Cl-CO_3-(SO_4)，形成三个湖泊分区，符合气候的地带性变化，当地降水直接或间接通过地下水补给湖泊，是一个重要的补给源. 但是由于目前缺少精确的水量平衡计算，不排除有外源地下水通过古河道或断裂带补给这些湖泊，即可能存在不同的补给机制.

（2）东南部边缘湖泊群水化学型复杂，与多种补给方式及局部地理环境有关. 相对丰富的当地降水直接或间接补给湖泊，湖水多以 Na^+、Cl^-、SO_4^{2-} 为主；同时可能接受临近山区降水沿山前古河道或断裂带补给，使 Ca^{2+}、Mg^{2+} 含量不同且具有一定分带性，并出现淡水湖. 受气候大环境与湖周小环境差异的影响出现若干矿化度或水化学型异常的湖泊，造就了东南边缘湖泊群水化学型的复杂性.

（3）近十年来沙漠不同类型湖泊演化结果表明，腹地湖泊补给源的水化学特性较边缘湖泊的似有较大变化，亦或气候干暖化使然.

致谢：感谢2009年巴丹吉林沙漠科学考察队所有队员在这次科考中的不懈努力和卓越贡献，感谢导师王乃昂教授对论文撰写的悉心指导.

5 参考文献

[1] 孙庆峰，陈发虎，李孝泽. 巴丹吉林沙漠第四纪研究评述与讨论. 干旱区研究，2008，**25**（2）：304-310.

[2] 李保生，高全洲，阎满存等. 150kaBP 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.
[3] 李云卓,李保生,高全洲等. 巴丹吉林查格勒布剖面记录的 150ka BP 以来的常量化学元素波动. 中国沙漠,2005,**25**(1):8-14.
[4] Yang XP, Martin AJ Williams. The ion chemistry of lakes and late Holocene desiccation in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China. *Catena*,2003,**51**(1):45-60.
[5] Yang XP. 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.
[6] 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.
[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] 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.
[9] 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.
[10] 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.
[11] 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.
[12] 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):497-504.
[13] 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.
[14] Chen JS, Li L, Wang JY *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.
[15] 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.
[16] 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.
[17] 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.
[18] 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.
[19] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京:中国标准出版社,1999:33-36.
[20] 莱尔曼 A(美). 湖泊的化学地质学和物理学. 北京:地质出版社,1978:243-256.
[21] 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.