

藏南羊卓雍错流域水化学区域差异及其成因

孙 瑞^{1,2}, 张雪芹¹, 郑 度¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 特殊的地理环境造成青藏高原高寒区水化学性质及其动态的特殊性。本文通过对藏南羊卓雍错流域进行水样采集、分析与测定, 探讨了该流域水化学性质的区域差异及其成因。结果表明, 羊卓雍错流域水化学性质区域差异明显主要是自然因素综合作用的结果, 而人类活动对区域水化学性质亦有所贡献。首先, 在特殊的高寒气候条件下, 流域内各湖泊水化学性质差异的根本原因是其水文条件不同。其次, 羊卓雍错西南部湖水样品中硼和锂含量偏高说明该区域湖相沉积中可能存在硼酸盐矿物和含锂菱镁矿。第三, 流域东部和西部河水化学性质差异明显的主因是河流所经地区地质条件不同; 羊卓雍错南岸和北岸地下水化学性质差异的关键则是区域水系发育程度不同。此外, 巴纠错、嘎马林河和羊卓雍错南岸水井样品的总氮含量较高, 这反映了人类活动对区域水化学性质的影响。

关键词: 水化学性质; 地质; 水文条件; 羊卓雍错流域

青藏高原特殊的下垫面和大气过程使其成为全球环境变化的敏感区与脆弱区^[1-2]。其中, 内陆湖泊是青藏高原地表系统重要且独特的组成部分, 是气候变化的敏感指示器^[3-4]。湖泊及其流域是相对独立的自然综合体, 是大气圈、生物圈、岩石圈和陆地水圈相互作用的结合点, 它的形成、扩张与收缩乃至消失及其所引起的环境演化过程是全球的、区域的、局部的构造和气候事件共同作用的结果^[5]。相应地, 青藏高原内陆湖泊及其流域的水化学性质是各自然因素综合作用的产物。其中, 气候因素起着主导作用, 而地形、地质条件、湖泊形状、水文动态等因素能使许多处于同一气候背景下的区域水化学性质差异显著^[6-8]。

藏南羊卓雍错流域是喜马拉雅山与雅鲁藏布江之间面积较大的内陆湖区, 有5个主要湖泊: 羊卓雍错、空姆错、沉错、巴纠错和普莫雍错。地质时期, 羊卓雍错、空姆错、沉错和巴纠错是统一的湖体并与普莫雍错相连通, 湖水经亚色附近的曼曲流入雅鲁藏布江; 后因气候变干、湖面退缩、通道堵塞、湖岸堆积地形发育才演变成内陆湖, 并分离成现今的5个湖泊^[6]。与此同时, 流域水化学性质亦逐渐出现区域差异。考虑到羊卓雍错流域水环境直接影响当地农牧民的生产和生活, 且目前在该流域内开展的研究^[9-11]缺乏对流域尺度水化学性质的整体讨论, 本文通过对羊卓雍错流域内主要湖泊、河流和水井进行水样采集、分析与测定, 探讨该流域水化学性质的区域差异及其成因。

1 区域概况

羊卓雍错流域位于西藏浪卡子县和贡嘎县境内(图1), 属藏南山地灌丛草原半干旱气候。根据浪卡子气象站1961-2010年观测数据, 流域年均气温2.9℃; 年均降水363.4

收稿日期: 2012-05-10; 修订日期: 2012-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171062; 40871044) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41171062; No.40871044]

作者简介: 孙瑞(1985-), 女, 博士研究生, 中国地理学会会员(S110008825M), 主要从事青藏高原湖泊研究。

E-mail: feifeiry@tom.com

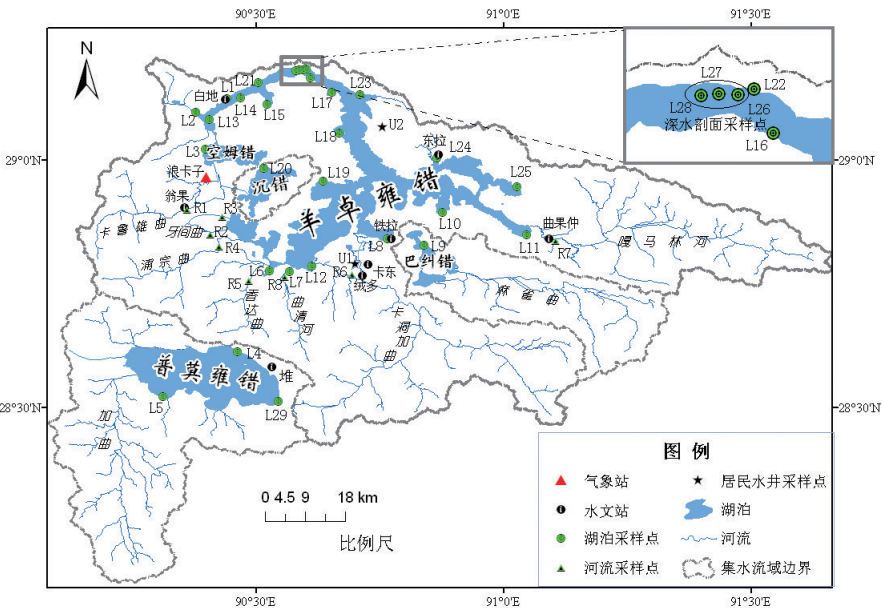


图1 羊卓雍错流域与水样采集点

Fig. 1 Drainage system of Yamzhog Yumco Basin and the sampling sites

表1 2010年羊卓雍错流域主要湖泊特征

Tab. 1 Characteristics of lakes in Yamzhog Yumco Basin

湖泊特征	羊卓雍错	空姆错	沉错	巴纠错	普莫雍错
地理位置 ¹⁾	28°46′-29°11′ N, 90°21′-91°03′ E	28°59′-29°02′ N, 90°23′-90°32′ E	28°53′-28°59′ N, 90°28′-90°35′ E	28°44′-28°52′ N, 90°48′-90°55′ E	28°30′-28°38′ N, 90°13′-90°33′ E
湖面海拔 ²⁾ (m)	4447	4453	4437	4513	5029
湖泊面积 ³⁾ (km ²)	544.34	36.86	40.28	31.16	288.65
集水面积 ⁴⁾ (km ²)		5974.19 ⁵⁾	145.36	811.07	1814.08
补给系数 ⁶⁾		10.28	3.61	26.03	6.28
主要补给河流 ⁷⁾	嘎马林河、卡洞加曲、曲清河、香达曲、 浦宗曲、牙间曲、卡鲁雄曲		卡鲁雄曲	麻雀曲	加曲
湖泊形状	枝杈状		岸线曲折多湾	上 字 形	较规则
年均气温 ⁸⁾ (°C)	4.4	- ⁹⁾	-	-	0.1
年降水量 (mm)	451.9	-	-	-	439.2
年蒸发量 (mm)	2224.3	-	-	-	1798.3
地质	湖泊周围全新世湖相沉积较发育,以粘土、粉砂为主 ¹⁶⁾ 。地层分区上属喜马拉雅区 第四系全新统沉组 (Q _{4ch}) ¹⁷⁾ 。				拉轨岗日分区

注: ¹⁾ 湖泊经纬度范围根据谷歌卫星地图 (Google Earth 5.0) 确定; ²⁾ 湖面海拔通过 2010 年 7 月野外考察利用全球定位系统 (GPS) 获得; ³⁾ 湖泊面积根据 2010 年 12 月 11 日 HJ 卫星 (环境与灾害监测预报小卫星) CCD 拍摄的影像提取; ⁴⁾ 集水面积基于分辨率为 30 m 的 ASTER GDEM 数据,应用 ArcGIS 提取获得; ⁵⁾ 空姆错经一狭长水道与羊卓雍错相连通,通常认为是羊卓雍错的组成部分; ⁶⁾ 补给系数 = 集水面积/湖泊面积,反映各湖泊之间径流补给条件的差异¹⁶⁾; ⁷⁾ 卡鲁雄曲以冰雪融水补给为主,绝大部分水量流入空姆错,小部分河水流入沉错; ⁸⁾ 羊卓雍错和普莫雍错 2010 年年均气温、降水量和蒸发量 (20cm 口径蒸发器) 分别为白地水文站和堆水文站观测值; ⁹⁾ -为缺测值。

mm, 全年总降水量的 95%左右集中于每年的 5-9 月。由于该地区日照时间长、相对湿度小、风速大,导致湖泊蒸发强度较大。根据白地水文站 1977-1995 年 20 m²蒸发池观测数据,流域年均水面蒸发为 1296.7 mm。

羊卓雍错流域主要植被为禾本科、菊科、毛茛科等组成的草甸,并稀疏地散生着一些小乔木圆柏^[12]。流域四周高山环绕,流域西部和南部分水岭分布有大片冰川,面积达 218 km²^[13]。沿山脊尚有大面积终年积雪,冰雪融水可以补给湖水(表 1)。其中,空姆错和普莫雍错湖水以冰雪融水补给为主,而羊卓雍错、沉错和巴纠错则以降水补给为主,冰雪融水

补给相对较少^[14-15]。

2 采样与分析方法

2.1 采样与保存

2010年7月,在藏南羊卓雍错流域共采集48个水样(图1),采样过程中用GPS(Global Positioning System,全球定位系统)(型号为Juno SB,美国Trimble公司生产)记录样点的地理坐标。其中,在羊卓雍错采集32个水样(湖周边采20个表层水样;湖中心3个深水剖面进行分层采样,分表层、10 m、20 m、30 m等4个层次,共采12个水样);在普莫雍错采3个水样,沉错、空姆错、及巴纠错各采1个水样,均采表层水样;在羊卓雍错8条入湖河流、附近2口居民饮用水井处各采1个水样。采集水样时,先用采样点处水体将预先清洗的水样瓶反复冲洗多次后装样,并立即密封遮光保存。

2.2 水化学参数测定

本研究水化学参数包括现场测定参数和实验室分析参数共计18个。现场测定参数包括利用多参数水质测定仪(型号为HI9828,意大利HANNA仪器公司生产)测定的pH值、电导率、溶解性总固体(TDS)等。实验室分析参数包括八大离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-})、二氧化硅(SiO_2)、硼(B)、锂(Li)、锶(Sr)、总氮(TN)、总硬度、矿化度等。测定工作均在中国科学院地理科学与资源研究所的实验室完成。其中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SiO_2 、B、Li、Sr采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定,测试精确度为 $\pm 5\%$; Cl^- 、 SO_4^{2-} 采用离子色谱仪(LC-10ADvp)测定, CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 采用双指示剂中和法测定,阴阳离子平均当量浓度平衡误差为0.04%; TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,氮的检出范围为0.05~4.00 mg/L。此外,矿化度为八大离子浓度之和;总硬度($mg\ CaCO_3/L$) = $2.497 \times Ca$ (以 $mg\ Ca/L$) + $4.118 \times Mg$ (以 $mg\ Mg/L$)^[18]。

3 结果与分析

3.1 流域水化学性质及其区域差异

2010年7月羊卓雍错流域水体整体呈弱碱性,pH值变化范围7.86~9.52(表2)。根据总硬度小于50 $mg\ CaCO_3/L$ 、51~120 $mg\ CaCO_3/L$ 、121~180 $mg\ CaCO_3/L$ 、大于180 $mg\ CaCO_3/L$ 的水体分别为软水、中等水、硬水、极硬水的分类标准^[18],流域内水体大多属于硬水和极硬水。

流域湖水化学性质区域差异显著。根据湖泊矿化度和八大离子含量,羊卓雍错、沉错和巴纠错属微咸水湖¹,湖水主要离子组成²分别为 SO_4^{2-} - HCO_3^- - Mg^{2+} - Na^+ , SO_4^{2-} - Na^+ - Mg^{2+} - Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} - Mg^{2+} - Na^+ ;空姆错和普莫雍错为淡水湖,主要离子组成则分别为 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca^{2+} 和 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Mg^{2+} - Ca^{2+} 。就各湖泊水化学指标值相比,羊卓雍错湖水中pH值、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 K^+ 、B、Li等浓度均最高,空姆错 SiO_2 最高,沉错 Ca^{2+} 最高,巴纠错电导率、TDS、矿化度、总硬度、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、Sr和TN等均最高,而普莫雍错的各化学指标值均较低。

作为流域内最大湖泊,羊卓雍错湖水化学性质亦存有空间差异。具体表现为:羊卓雍错表层湖水中 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 以及矿化度南高北低,而 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 南低北高^[19];湖泊南部个

1 按矿化度大小可将湖泊划分为淡水湖(小于1000 mg/L)、微咸水湖(1000~3500 mg/L)、咸水湖(3500~5000 mg/L)、盐湖(大于5000 mg/L)^[7]

2 阴阳离子均以当量浓度含量大于25%的离子计

表2 羊卓雍错流域湖水、河水和地下水化学成分

Tab. 2 The basic chemical parameters for water samples from the lakes, rivers and wells of Yamzhog Yumco Basin

测点	编号	pH 值	电导率	TDS	矿化度	总硬度	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
羊卓雍错	平均值	9.27	2174.97	1277.63	1867.57	793.52	132.23	461.68	695.66
	最大值	9.52	2673	1438	1983.51	825.82	198.81	551.90	738.37
	最小值	9.12	1931	1147	1747.12	744.96	97.29	356.94	607.07
空姆错	L3	8.81	336	208	360.99	228.03	11.28	149.08	103.42
沉错	L20	8.81	1425	779	1077.73	450.08	19.74	126.15	624.95
巴纠错	L9	8.94	3241	1675	2539.21	1296.17	56.40	226.49	1514.26
普莫雍错	平均值	9.02	338.33	224.00	382.58	218.18	22.09	201.64	67.38
	最大值	9.16	408	276	400.29	223.25	23.97	210.72	70.05
	最小值	8.90	204	127	370.48	211.47	15.51	196.39	65.57
河水	平均值	8.51	374.75	210.38	328.17	190.50	8.46	138.78	94.86
嘎马林河	R7	8.70	713	382	508.27	212.53	21.15	279.53	63.71
香达曲	R5	8.12	290	148	287.40	149.68	8.46	176.32	28.82
牙间曲	R2	8.72	164	107	167.37	99.52	-	75.98	50.61
无名小河	R3	8.46	168	101	238.09	130.85	5.64	129.02	44.55
卡洞加曲	R6	8.39	375	199	294.68	192.29	4.23	98.91	115.33
曲清河	R8	8.95	451	261	350.27	224.37	4.23	118.98	130.62
浦宗曲	R4	8.24	484	276	454.81	307.72	7.05	134.75	185.44
卡鲁雄曲	R1	8.48	353	209	324.46	207.05	-	96.76	139.76
地下水	平均值	8.08	297.50	177.50	266.35	150.08	11.99	164.14	19.72
水井 1	U1	7.86	263	139	237.17	143.27	7.05	157.69	4.69
水井 2	U2	8.30	332	216	295.52	156.88	16.92	170.59	34.74

续表 2

测点	编号	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SiO ₂	B	Li	Sr	TN
羊卓雍错	平均值	81.90	7.05	188.42	18.07	282.56	0.65	5.06	0.53	0.02	0.32
	最大值	131.72	16.55	196.60	19.30	294.30	1.98	10.35	1.84	0.08	0.69
	最小值	67.42	4.90	174.30	16.86	257.60	0.32	4.42	0.41	0.01	0.01
空姆错	L3	3.47	74.02	10.49	1.51	7.71	7.99	0.02	0.00	0.54	0.50
沉错	L20	5.94	87.91	55.99	11.26	145.80	0.30	0.73	0.09	1.92	0.04
巴纠错	L9	65.82	78.76	267.00	14.88	315.60	0.46	0.83	0.02	4.19	1.40
普莫雍错	平均值	2.32	27.49	36.31	3.55	21.79	0.90	0.07	0.01	0.33	0.11
	最大值	3.32	28.09	37.18	3.70	22.62	1.56	0.07	0.02	0.34	0.20
	最小值	1.65	26.78	34.61	3.42	20.64	0.37	0.06	0.01	0.32	0.07
河水	平均值	5.36	61.50	8.97	1.11	11.92	7.42	0.12	0.01	0.36	0.60
嘎马林河	R7	8.79	59.32	15.64	2.38	57.74	10.56	0.52	0.00	0.45	3.09
香达曲	R5	5.64	49.05	6.61	0.50	12.00	10.54	0.20	0.02	0.26	0.24
牙间曲	R2	-	38.06	1.09	0.82	0.82	5.62	0.01	0.00	0.17	0.10
无名小河	R3	3.43	48.84	2.16	1.12	3.34	8.53	0.01	0.00	0.21	0.40
卡洞加曲	R6	1.99	55.62	12.97	0.71	4.93	4.75	0.01	0.00	0.34	-
曲清河	R8	9.10	67.31	13.67	0.64	5.72	7.43	0.02	0.00	0.34	0.04
浦宗曲	R4	2.94	102.90	12.33	1.31	8.08	8.90	0.17	0.02	0.71	0.24
卡鲁雄曲	R1	5.64	70.91	7.28	1.36	2.76	3.05	0.01	0.00	0.43	0.11
地下水	平均值	6.79	49.75	6.28	0.47	10.62	13.19	0.06	0.00	0.24	1.53
水井 1	U1	6.79	52.16	3.16	0.52	5.12	8.91	0.02	0.00	0.22	3.00
水井 2	U2	-	47.34	9.39	0.42	16.12	17.46	0.09	0.00	0.25	0.05

注: pH 值为无量纲, 电导率单位为 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 总硬度单位为 $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$, 其余指标单位均为 mg/L ; - 为未检出数据值。

别采样点处 (如 L6) SiO₂、B 和 Li 等浓度偏大。与入湖河水和周围地下水相比, 羊卓雍错湖水中 Ca²⁺、SiO₂ 和 Sr 等浓度较小, pH 值、电导率、TDS、矿化度、总硬度、B、Li 和其余主要离子浓度则均较大。

流域内河水和地下水化学性质存在明显的区域差异。根据河水和地下水中八大离子含量,卡鲁雄曲、浦宗曲和曲清河主要离子组成均为 $\text{SO}_4^{2-}\text{-HCO}_3^{-}\text{-Ca}^{2+}$,卡洞加曲为 $\text{SO}_4^{2-}\text{-HCO}_3^{-}\text{-Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}$,牙间曲及无名小河为 $\text{HCO}_3^{-}\text{-SO}_4^{2-}\text{-Ca}^{2+}$,嘎马林河为 $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}^{2+}\text{-Na}^{+}$,香达曲和地下水则均为 $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}^{2+}$ 。就各河流的水化学指标值相比,流域东部的嘎马林河水体中电导率、TDS、矿化度、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^{-} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 SiO_2 、B和TN等浓度均最大;流域西部的浦宗曲中总硬度、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、Sr等浓度最大。地下水化学性质的区域差异则主要表现在:羊卓雍错北岸水井样品(U2)中Cl⁻、 Ca^{2+} 、 K^{+} 、TN等较南岸水井样品(U1)小,而其余水化学指标均较南岸水井样品中的大。

3.2 地质条件对区域水化学性质的影响

在地层分区上,羊卓雍错流域整体位于喜马拉雅区—拉轨岗日分区。其中,流域西部、西南大部、以及南面部分地区分布三叠系涅如群(T_3ny);西南以及南面部分地区分布侏罗系日当组(J_1r)和遮拉组(J_2);东南部地区分布白垩系加不拉组($(\text{J}_3\text{-K}_1)\text{j}$);而湖盆及其周围区域分布第四系全新统沉错组(Q_4ch)^[17]。

流域内各河流所经地区的地质条件不同,其河水化学性质受不同类型岩石的风化作用影响^[20],致使流域河水化学主要离子组成等差异较大。其中,嘎马林河位于羊卓雍错东南岸,河流所经地区在地层分区上属于喜马拉雅区—拉轨岗日分区—白垩系加不拉组($(\text{J}_3\text{-K}_1)\text{j}$),河水化学离子主要受碳酸盐岩和硅酸盐岩风化的影响,河水主要离子组成为 $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}^{2+}\text{-Na}^{+}$ 。而浦宗曲位于羊卓雍错西岸,河流所经地区在地层分区上属于喜马拉雅区—拉轨岗日分区—三叠系涅如群(T_3ny),河水化学离子则主要来源于蒸发岩的溶解和碳酸盐岩的风化,河水主要离子组成为 $\text{SO}_4^{2-}\text{-HCO}_3^{-}\text{-Ca}^{2+}$ 。

羊卓雍错湖水中B和Li含量整体高于入湖河水及湖周地下水,并远高于流域其它湖泊(图2),说明羊卓雍错湖水中B和Li主要来源于湖泊周围的湖相沉积。与此同时,羊卓雍错西南部湖水样品(L6)中B和Li含量(分别为10.35 mg/L和1.84 mg/L)明显高于其它样品,暗示L6采样点附近湖相沉积中存在硼酸盐矿物和含锂菱镁矿。据此推测,羊卓雍错湖盆地质条件是致使其湖水B和Li含量较高的重要原因。此外,空姆错湖水 SiO_2 含量(7.99 mg/L)高于入湖河水(卡鲁雄曲)并远高于其它湖泊(表2),巴纠错和沉错湖水中Sr含量(分别为4.19 mg/L和1.92 mg/L)远高于其它湖泊及流域内河水和地下水(图2),这均反映了湖盆地质条件对流域湖水化学性质的影响。

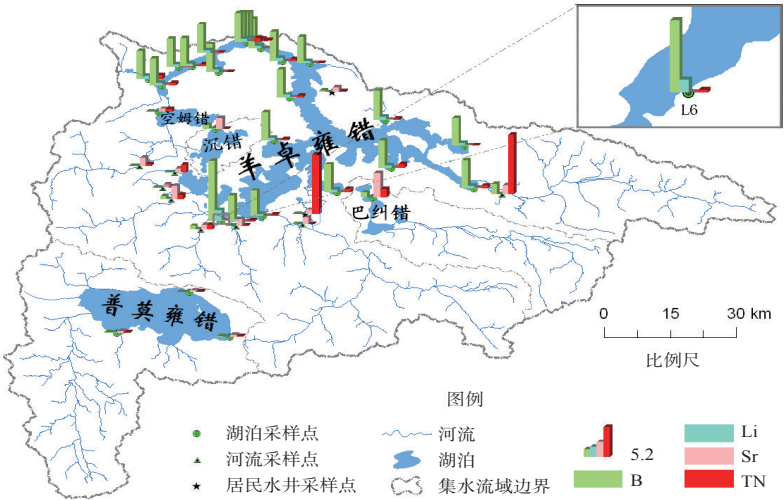


图2 2010年羊卓雍错流域水体中B、Li、Sr和TN含量空间分布

Tab. 2 Spatial distributions of B, Li, Sr and total nitrogen (TN) for water samples from the lakes, rivers and wells of Yamzhog Yumco Basin

3.3 水文条件和湖泊形状对区域水化学性质的影响

在相似地质条件和气候背景下(表1),2010年羊卓雍错流域各湖泊水化学性质差异显著的根本原因在于各湖泊水文条件不同。其中,羊卓雍错、巴纠错和沉错均为封闭型湖泊,湖水化学性质除受入湖河水的影响外,亦受自身蒸发—结晶作用的控制^[20],致使其湖水化学指标值整体偏高。而空姆错和普莫雍错湖水化学指标值较低的原因为:一方面,湖泊以冰雪融水补给为主,湖水化学性质主要受入湖河水的影响;另一方面,湖泊为过水湖,空姆错湖水经一狭长水道在夏季补给羊卓雍错,普莫雍错湖水则会在9月底高湖面时沿东南部一条经人工改造的出湖河流注入羊卓雍错。

因湖泊水文条件不同,湖水对气候变化的响应机制亦不同,这使得流域各湖泊水化学性质差异显著。1970年以来,随着流域气温显著上升(增长速率为0.4℃/10a)、降水长期变化趋势不明显(图3),各湖泊湖面蒸发增强,羊卓雍错、沉错和巴纠错自身蒸发—结晶作用加剧,湖水矿化度等水化学指标值增大。特别是自2005年以来,随着湖面蒸发加剧,羊卓雍错和巴纠错湖面萎缩剧烈^[21-22],湖水浓缩,致使2010年其湖水化学指标值远高于空姆错和普莫雍错(表2)。同时,流域冰川消融加速^[23-24],卡鲁雄曲和加曲等以冰雪融水补给为主的河流径流量增加,空姆错和普莫雍错湖水化学指标值则由于受入湖河水(卡鲁雄曲和加曲)的影响较大而整体降低。与1974-1979年相比^[6],1984年^[7,25]羊卓雍错和沉错湖水矿化度浓度增长明显,分别由1781.00 mg/L和1021.00 mg/L增长到1942.96 mg/L和1050.00 mg/L,分别增长了9.09%和2.84%;而普莫雍错湖水矿化度则由409.00 mg/L降到370.9 mg/L,降低了9.32%。

羊卓雍错湖岸水系发育程度不同和枝杈状的湖泊形状是其表层湖水化学性质空间差异明显的重要原因^[19]。一方面,羊卓雍错为封闭型湖泊,其主要入湖河流多分布于南岸,入湖河水从南岸进入湖泊,在湖水从南向北缓慢流动、交换过程中,湖面强烈蒸发,湖水浓缩,导致湖北部和南部水体化学指标值存有差异。另一方面,羊卓雍错沿岸多湖汊、岬湾,不利于湖水的充分混合,使得在湖泊的不同区域,湖水化学指标值变化仍相对较大。

流域地下水化学性质亦与该区域水系发育程度密切相关。羊卓雍错南岸水系发育远较北岸好(图2),而南岸地下水样品(U1)中pH值、电导率、TDS、矿化度、总硬度等化学指标值均较北岸水井样品(U2)小。这是由于流域属藏南山地灌丛草原半干旱气候,水系不发育区域较水系发育完好地区地下水的补给来源小而蒸发损耗大,从而使得水系不发育区域地下水中矿化度等浓度增大。

3.4 人类活动对区域水化学性质的影响

人类活动是湖泊水质恶化的驱动因素^[26],人类活动产生的工业废水、生活污水、农田以及畜牧养殖排水是湖泊水体污染的主要来源。尽管目前人类活动对青藏高原水化学性质的影响远低于东部发达地区^[27],但羊卓雍错水电站运行、农田和畜

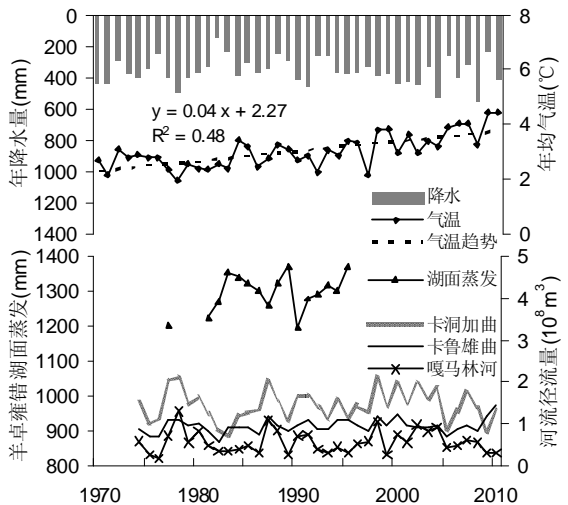


图3 羊卓雍错流域1970-2010年年均气温、降水、湖面蒸发、入湖河流径流量
(气温和降水数据为浪卡子气象站实测;羊卓雍错湖面蒸发(20 m²蒸发池)为白地水文站实测;河流径流量基于曲果仲、卡东、绒多、翁果水文站1983-1995年观测数据利用水文模型SWAT模拟估算)

Fig. 3 Annual mean temperature, precipitation, evaporation from lake surface, streamflow in Yamzhog Yumco Basin during 1970-2010

牧养殖排水等对羊卓雍错流域水化学性质的影响亦不容忽视。

羊卓雍错北岸分布有于1998年开始投入运行的世界海拔最高的抽水蓄能电站。由于用以发电的湖水矿化度远高于从雅鲁藏布江抽入的河水矿化度,致使羊卓雍错湖水逐渐被稀释,从而导致羊卓雍错湖水化学性质与流域内其它湖泊的差异更大。2010年羊卓雍错湖水矿化度为1867.57 mg/L,较1984年(1942.96 mg/L^[7, 25])降低了3.88%;而同样是以降水补给为主的沉错湖水矿化度(1077.73 mg/L)却比1984年(1050.00 mg/L^[7])增加了2.64%。

羊卓雍错流域居民点多分布在湖周以及河流所经地区等水草丰盛区域,因而当地农牧民生产和生活直接影响流域水环境。2010年嘎马林河(R7)和羊卓雍错南岸水井样品(U1)的TN含量明显高于其它河流以及北岸水井样品(U2);巴纠错湖水样品(L9)的TN含量亦高于其它湖泊(图2)。这均反映了人类活动对区域水化学性质的影响。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 羊卓雍错流域各湖泊水化学性质差异显著,这主要是流域特殊的高寒气候、湖泊水文动态和湖盆地质条件等自然因素综合作用的结果。其中,气候变干是流域各湖泊水化学性质差异明显的重要前提;湖泊水文条件不同是各湖泊水化学性质差异的关键;湖盆地质条件差异则可能是羊卓雍错B和Li、空姆错SiO₂、巴纠错和沉错Sr含量高于其它湖泊的重要原因。

(2) 羊卓雍错西南部湖水样品(L6)中B和Li含量(分别为10.35 mg/L和1.84 mg/L)偏高说明该区域湖相沉积中可能存在硼酸盐矿物和含锂菱镁矿。除湖盆地质条件外,枝杈状的湖泊形状和湖岸水系发育程度不同亦致使羊卓雍错湖水化学性质存在区域差异。

(3) 河流所经地区地质条件决定其河水化学性质,而区域地表水系发育程度直接影响其地下水化学性质。这使得流域东部(嘎马林河)和西部(浦宗曲)河水、羊卓雍错南岸和北岸地下水化学性质差异显著。

(4) 巴纠错、嘎马林河和羊卓雍错南岸水井样品的TN含量(分别为1.40 mg/L、3.09 mg/L和3.00 mg/L)较高、以及羊卓雍错水电站运行影响其湖水化学性质等均说明人类活动对区域水化学性质亦有所贡献。

4.2 讨论

(1) 2010年湖泊水样采集点位置与历史研究^[6-7, 25]存在一定的差异,这可能会影响湖水化学指标值变化的计算。为降低由采样点位置不同造成的不确定性,本文基于湖水矿化度平均值研究不同时期流域湖水化学性质变化,这是由于羊卓雍错流域湖水矿化度浓度整体较高,由采样点位置不同导致的湖水矿化度平均值差异相对较小。

(2) 流域地下水中B和Li含量甚低,且流域水体中Se、Cu、Fe、Ni、V、Al、Ba、Mn、Mo、Zn、Cd、Co、Cr等微量元素整体含量较微^[14]。鉴于人体中B和Li等人体必需元素含量过低或过高均会对人体健康造成不利影响^[28-29],羊卓雍错流域水化学性质对当地居民的健康效应研究有待于进一步深入。

(3) 受野外采样限制,本文尚未分析空姆错、沉错、巴纠错和普莫雍错等湖泊水化学性质的空间分异特征及其原因。因此,从时空尺度上加大该流域的采样密度,研究各湖泊水化学性质空间分布特征及其对气候变化的响应是未来工作的重点。

(4) 随着拉萨、山南、日喀则旅游环线的开通,到羊卓雍错观光旅游的国内外游客逐年增加,在带动地区经济社会发展的同时,也将给环境带来更大压力。为此,有必要尽快开展人类活动对该地区湖泊水环境的影响研究。

参考文献 (References)

- [1] An Z S, Kutzbach J E, Prell W L. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since late Miocene times. *Nature*, 2001, 411: 62-66.
- [2] Kutzbach J E, Prell W L, Ruddiman W F. Sensitivity of Eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau. *Journal of Geology*, 1993, 101(2): 177-190.
- [3] Shi Yafeng. Glacier recession and lake shrinkage indicating the climatic warming and drying trend in central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(1): 1-11. [施雅风. 山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候干暖化趋势与未来展望. *地理学报*, 1990, 45(1): 1-11.]
- [4] Shi Y F, Ren J W, Glacier recession and lake shrinkage indicating a climatic warming and drying trend in central Asia. *Annals of Glaciology*, 1990, 14: 261-265.
- [5] Lu Anxin, Yao Tandong, Wang Lihong et al. Study on the fluctuations of typical glaciers and lakes in the Tibetan Plateau using remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(6): 783-792. [鲁安新, 姚檀栋, 王丽红等. 青藏高原典型冰川和湖泊变化遥感研究. *冰川冻土*, 2005, 27(6): 783-792.]
- [6] Guan Zhihua, Chen Chuanyou, Ou Yuxiong et al. *Rivers and Lakes of Tibet*. Beijing: Science Press, 1984: 1-238. [关志华, 陈传友, 区裕雄等. 西藏河流与湖泊. 北京: 科学出版社, 1984: 1-238.]
- [7] Wang Sumin, Dou Hongshen. *Lakes in China*. Beijing: Science Press, 1998: 1-580. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 1-580.]
- [8] Fontes J C, Gasse F, Gibert E. Holocene environmental changes in Lake Bangong basin (Western Tibet). Part 1. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1996, 120: 25-47.
- [9] Gao Jing, Yao Tandong, Tian Lide et al. The spatial distribution of oxygen stable isotope in the Yamzho Lake Basin, Xizang (Tibet). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(2): 338-343. [高晶, 姚檀栋, 田立德等. 羊卓雍错流域湖水氧稳定同位素空间分布特征. *冰川冻土*, 2008, 30(2): 338-343.]
- [10] Shi Weiguang. Impact of Yangzhuoyong Lake hydropower on ecological environment in Tibet. *Journal of Lake Sciences*, 1995, 7(2): 178-184. [施为光. 开发羊卓雍错水电站对生态环境的影响. *湖泊科学*, 1995, 7(2): 178-184.]
- [11] Ju Jianting, Zhu Liping, Wang Yong et al. Composition, spatial distribution and environmental significance of water ions in Lake Pumayum Co and its catchment, Southern Tibet. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(5): 591-599. [鞠建廷, 朱立平, 汪勇等. 藏南普莫雍错流域水体离子组成与空间分布及其环境意义. *湖泊科学*, 2008, 20(5): 591-599.]
- [12] Liu Guangxiu, Shi Yafeng, Shen Yongping et al. Holocene megathermal environment in the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1997, 19(2): 114-123. [刘光秀, 施雅风, 沈永平等. 青藏高原全新世大暖期环境特征之初步研究. *冰川冻土*, 1997, 19(2): 114-123.]
- [13] Ye Q H, Zhu L P, Zheng H X et al. Glacier and lake variation in the Yamzhog Yumco Basin, southern Tibetan Plateau, from 1980 to 2000 using remote-sensing and GIS technologies. *Journal of Glaciology*, 2007, 53(183): 673-676.
- [14] Zhang Xueqin, Sun Rui, Zhu Liping. Chemical properties and quality evaluation of lake water in the Yamzhog Yumco Basin, South Tibet. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(4): 950-958. [张雪芹, 孙瑞, 朱立平. 藏南羊卓雍错流域主要湖泊水质状况及其评价. *冰川冻土*, 2012, 34(4): 950-958.]
- [15] Zhu Liping, Ju Jianting, Wang Junbo et al. Environmental changes recorded in core sediments from the pumoyum co lake of the Tibetan Plateau during the initial stage of the last deglacial period. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 772-780. [朱立平, 鞠建廷, 王君波等. 湖芯沉积物揭示的末次冰消开始时期普莫雍错湖区环境变化. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 772-780.]
- [16] Li Bingyuan, Wang Fubao, Zhang Qingsong et al. *Quaternary Geology in Xizang*. Beijing: Science Press, 1983: 1-192. [李炳元, 王富葆, 张青松等. 西藏第四纪地质. 北京: 科学出版社, 1983: 1-192.]
- [17] Bureau of Geology and Mineral Resources of Tibet Autonomous Region. *Regional Geology of Tibet Autonomous Region*. Beijing: Geology Publishing House, 1993: 1-707. [西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1993: 1-707.]
- [18] David R M. *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1992: 1-1424.
- [19] Sun Rui, Zhang Xueqin, Tian Yuan. Spatial differentiation of water chemical property in Yamzhog Yumco, South Tibet. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(11): 16-20. [孙瑞, 张雪芹, 田园. 藏南羊卓雍错湖水化学空间分异特征. *环境科学与技术*, 2012, 35(11): 16-20.]
- [20] Sun Rui, Zhang Xueqin, Wu Yanhong. Major ion chemistry of waters and its possible controlling factors in the Yamzhog Yumco Basin, South Tibet. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(4): 600-608. [孙瑞, 张雪芹, 吴艳红. 藏南羊卓雍错流域水化学主离子特征及其控制因素分析. *湖泊科学*, 2012, 24(4): 600-608.]
- [21] Tian Yuan, Zhang Xueqin, Sun Rui. Extracting alpine lake information based on multi-source and multi-temporal

- satellite images and its uncertainty analysis. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(3): 563-572. [田园, 张雪芹, 孙瑞. 基于多源、多时相遥感影像的高原湖泊提取方法与不确定性. *冰川冻土*, 2012, 34(3): 563-572.]
- [22] Chu Duo, Pu Qiong, Laba Zhuoma et al. Remote sensing analysis on lake area variations of Yamzho Yumco in Tibetan Plateau over the past 40 a. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(3): 494-502. [除多, 普穷, 拉巴卓玛 等. 近 40 年西藏羊卓雍错湖泊面积变化遥感分析. *湖泊科学*, 2012, 24(3): 494-502.]
- [23] Yao Tandong, Li Zhiguo, Yang Wei et al. Glacial distribution and mass balance in the Yarlung Zangbo River and its influence on lakes. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(20): 2072-2078.
- [24] Wang Xin, Liu Shiyin, Yao Xiaojun et al. Glacier lake investigation and inventory in the Chinese Himalayas based on the remote sensing data. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 29-36. [王欣, 刘时银, 姚晓军 等. 我国喜马拉雅山区冰湖遥感调查与编目. *地理学报*, 2010, 65(1): 29-36.]
- [25] Chen Xiping. On the change of water environment in Yangzhuoyong Lake, Tibet. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1990, 21(3): 285-293. [陈西平. 西藏羊卓雍湖水环境变化探索研究. *海洋与湖泊*, 1990, 21(3): 285-293.]
- [26] Sun Jinhua, Gao Xiaofeng, Huang Yi. Relationships between spatial-temporal trends of water quality and the human activities in Lake Dianchi. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(3): 347-354. [孙金华, 曹晓峰, 黄艺. 滇池水质时空特征及与流域人类活动的关系. *湖泊科学*, 2012, 24(3): 347-354.]
- [27] Qin Boqiang. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(3): 193-202. [秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. *湖泊科学*, 2002, 14(3): 193-202.]
- [28] Qin Junfa. Biological essentiality of boron and its health effects in humans. *Guangdong Trace Elements Science*, 1999, 6(9): 1-14. [秦俊法. 硼的生物必需性及人体健康效应. *广东微量元素科学*, 1999, 6(9): 1-14.]
- [29] Hu Wenliang. The health effects of lithium in humans. *Guangdong Trace Elements Science*, 2006, 13(6): 36. [呼文亮. 微量元素锂的健康效应(一). *广东微量元素科学*, 2006, 13(6): 36.]

Spatial variation and its causes of water chemical property in Yamzhog Yumco Basin, South Tibet

SUN Rui^{1,2}, ZHANG Xueqin¹, ZHENG Du¹

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: Due to the special geographical environment, the water chemical property and its spatial-temporal change over the Qinghai-Tibetan Plateau is significant to clarify the chemical characteristics of natural water. Hence, a large number of water samples were collected and their chemical parameters were measured from major lakes, rivers and wells in the Yamzhog Yumco Basin, South Tibet. And then the spatial variation of water chemical property and its possible causes were analyzed. The results revealed that the spatial variation of water chemical property was obvious, which might be attributed to the major influence of natural processes and minor impact of human activities. And the detailed results suggested that (1) owing to the outflows existing for Kongmu Co and Puma Yumco, the values of chemical parameters in the two lakes were much lower than those in the other three enclosed lakes (i. e., Yamzhog Yumco, Baji Co and Chen Co), (2) the high boron (B) and lithium (Li) concentrations indicated that there might be some boron minerals and magnesites in the southwestern part of the Yamzhog Yumco lake basin, (3) it is the disparate geologic conditions that cause the river water chemical property significantly different from the western and eastern parts which the river flows through, and (4) the drainage distribution could account for the significant differences of the well water chemical property between the southern and northern lake banks of the Yamzhog Yumco.

Key words: water chemical property; geology; hydrological condition; Yamzhog Yumco Basin