

可可西里地区湖泊水体地球化学特征*

胡 东 生

(中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810008)

提要 根据于1989年5—6月和1990年5—8月对可可西里地区综合科学考察所得资料, 采用常规化学分析法、利用ICP-3520光谱测定仪分析研究该地区湖泊及其补给水系的化学成分和展布规律。结果表明, 其主要化学组分在水体演化中呈累积增长, 阴、阳离子的比值对水体属性有很大的影响, 补给水系的化学组分与流域内的地球表生作用存在密切关系; 揭示出研究区水体微量化学元素展布的基本态势和B-Li等具协同性元素对属性, 以及Sr-Ba, As-Hg等具对抗性元素对属性。境内主要湖区水体组分的动态变化与气候环境事件有一定的关系。

关键词 水体化学组分 元素对 动态变化 环境事件 可可西里地区

80年代末由国家科委、中国科学院、国家环境保护局和青海省联合支持组建的国家可可西里地区综合科学考察队, 于1989年5—6月和1990年5—8月分别对青藏高原腹地最后一块无人区和空白区——可可西里地区进行大规模的综合考察, 并对该地区湖泊及其补给水系的化学成分和展布规律进行分析研究, 为进一步研究湖水动态变化与区域环境演化提供可靠的依据。

1 区域概况

可可西里地区处于青藏高原的腹地, 面积约达 $8.2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 平均海拔为4 800—5 000m, 区内湖泊众多, 类型庞繁, 组分复杂。根据区域地质资料研究, 可可西里地区晚古生代以来地层发育, 多以碎屑岩沉积建造为主, 区域变质作用微弱; 区内新构造运动活跃, 晚新生代火山侵入活动比较普遍, 断裂破碎作用较强烈, 构造网络错综复杂。区内发育的北西西向断裂系、北北向断裂系和北东向断裂系的构造网络控制了湖泊盆地的菱形边界和带状展布(胡东生, 1994)。根据区域气象资料, 本区年干湿度约为3—6, 年蒸发力可达600mm以上, 区内实际年蒸发量约为1 500mm以上; 用于湿度与蒸发力换算的年降水量约为150mm以上, 这与邻近气象台站的观测相符。可可西里地区水系补给来源主要依靠冰雪消融水, 泉水补给为次, 大气降水也可造成季节性洪水泛滥。本区的南北边界均由高大的山系组成(海拔±6 000m), 区内以高原面(海拔4 800—5 000m)和低缓山丘(海拔5 500m以下)为主。这种地形结构对区内湖泊和水体以及气候环境的

* 国家科委、中国科学院、国家环保局、青海省可可西里地区综合科学考察基金资助项目, 0900124号。胡东生, 男, 出生于1951年11月, 副研究员。

参加本研究工作的还有李秉孝、蔡碧琴、邵明显、王华安、陈克造、山发寿等同志, 谨志谢忱。

收稿日期: 1994年5月25日, 接受日期: 1996年4月13日。

影响极大,受山体湿岛效应(马瑞俊,1990)的影响。本区降水分布不均匀,形成一些亚气候环境。边界山系昆仑山脉南坡与唐古拉山脉北坡表现为较湿润的亚气候环境,降水量增至 270mm(北部)—360mm(南部)。中央地区表现为较干燥的亚气候环境,降水量约为 100—150mm。区内干寒及多风、光照强等气候特点,对岩石的风化和剥蚀发生了剧烈的影响作用,导致易分解盐类矿物产生离解,明显影响了地表水系及湖泊的性质。

2 研究方法

采集水样不加化学稳定剂。水样主要化学组分采用常规化学分析法,其微量化学元素采用 ICP-3520 光谱仪测定。本区湖泊调查在 1989 年开始路线预查,于 1990 年完成区域详查。

3 研究结果

3.1 不同水体中的主要化学组分特征

根据综合考察资料和水化学测定结果可知(表 1),可可西里地区不同水体中主要组分含量及比率是不同的,从而构成了水体的不同水化特征,这是认识及掌握区域水循环及其变化的地球化学行为指标(莱尔曼,1978)。

3.1.1 湖泊

不同水质湖泊的主要组分含量及比率

盐湖(6 个湖区 21 组样品的平均值) $\text{Na}^+ = 68.89\text{g/L}$, $\text{K}^+ = 3.78\text{g/L}$, $\text{Mg}^{2+} = 9.98\text{g/L}$, $\text{Ca}^{2+} = 1.71\text{g/L}$, $\text{Cl}^- = 130.70\text{g/L}$, $\text{SO}_4^{2-} = 14.53\text{g/L}$, $\text{CO}_3^{2-} = 0.01\text{g/L}$, $\text{HCO}_3^- = 1.10\text{g/L}$ 。其阳离子的比值为 $\text{Na}^+ : \text{K}^+ : \text{Mg}^{2+} : \text{Ca}^{2+} = 40.23 : 2.21 : 5.83 : 1$; 其阴离子的比值为 $\text{Cl}^- : \text{SO}_4^{2-} : \text{CO}_3^{2-} : \text{HCO}_3^- = 118.35 : 13.15 : 0.01 : 1$ 。

咸水湖(4 个湖区 10 组样品的平均值) $\text{Na}^+ = 10.36\text{g/L}$, $\text{K}^+ = 0.26\text{g/L}$, $\text{Mg}^{2+} = 0.95\text{g/L}$, $\text{Ca}^{2+} = 0.18\text{g/L}$, $\text{Cl}^- = 17.16\text{g/L}$, $\text{SO}_4^{2-} = 1.30\text{g/L}$, $\text{CO}_3^{2-} = 0.30\text{g/L}$, $\text{HCO}_3^- = 0.67\text{g/L}$ 。其阳离子的比值为 $\text{Na}^+ : \text{K}^+ : \text{Mg}^{2+} : \text{Ca}^{2+} = 57.23 : 1.44 : 5.24 : 1$; 其阴离子的比值为 $\text{Cl}^- : \text{SO}_4^{2-} : \text{CO}_3^{2-} : \text{HCO}_3^- = 25.47 : 1.93 : 0.45 : 1$ 。

半咸水湖(13 个湖区 24 组样品的平均值) $\text{Na}^+ = 2.32\text{g/L}$, $\text{K}^+ = 0.05\text{g/L}$, $\text{Mg}^{2+} = 0.17\text{g/L}$, $\text{Ca}^{2+} = 0.08\text{g/L}$, $\text{Cl}^- = 3.25\text{g/L}$, $\text{SO}_4^{2-} = 0.51\text{g/L}$, $\text{CO}_3^{2-} = 0.11\text{g/L}$, $\text{HCO}_3^- = 0.40\text{g/L}$ 。其阳离子的比值为 $\text{Na}^+ : \text{K}^+ : \text{Mg}^{2+} : \text{Ca}^{2+} = 29.26 : 0.67 : 2.14 : 1$; 其阴离子的比值为 $\text{Cl}^- : \text{SO}_4^{2-} : \text{CO}_3^{2-} : \text{HCO}_3^- = 8.74 : 1.27 : 0.27 : 1$ 。

淡水湖(1 个湖区 4 组样品的平均值) $\text{Na}^+ = 0.12\text{g/L}$, $\text{K}^+ = 0.01\text{g/L}$, $\text{Mg}^{2+} = 0.03\text{g/L}$, $\text{Ca}^{2+} = 0.03\text{g/L}$, $\text{Cl}^- = 0.13\text{g/L}$, $\text{SO}_4^{2-} = 0.08\text{g/L}$, $\text{CO}_3^{2-} = 0.01\text{g/L}$, $\text{HCO}_3^- = 0.20\text{g/L}$ 。其阳离子的比值为 $\text{Na}^+ : \text{K}^+ : \text{Mg}^{2+} : \text{Ca}^{2+} = 3.86 : 0.26 : 1.13 : 1$; 其阴离子的比值为 $\text{Cl}^- : \text{SO}_4^{2-} : \text{CO}_3^{2-} : \text{HCO}_3^- = 0.66 : 0.41 : 0.05 : 1$ 。

由上述数据得知,湖泊的 Na^+ , K^+ 和 Mg^{2+} 分别是 Ca^{2+} 含量的数倍至数十倍; Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} 与 HCO_3^- 的含量变化的比率较大。淡水湖中的 Cl^- , SO_4^{2-} 和 CO_3^{2-} 的含量大约只有 HCO_3^- 的 5%—50%, 其它湖泊中 Cl^- 是 HCO_3^- 的数倍(半咸水湖)、数 10 倍(咸水湖)、数百倍(盐湖), SO_4^{2-} 是 HCO_3^- 的数倍至数十倍, CO_3^{2-} 的含量大约只有 HCO_3^- 的 1%—20%。这些变化表明,湖泊水体中阳离子含量比率较稳定,阴离子含量比率相差较大。另外统计资料也表明,其主要元素离子在淡水湖→半咸水湖→咸水

表 1 可可西里地区水体化学组分及水化学类型

Tab.1 Components of Water chemistry and their types in Kekexili region

编号	地点	物质空 间向量	样品 组数	比重	pH	矿化度 (g/L)	主要化学组分 (mg/L)							难溶盐系数		水化学 类型	
							Na	K	Mg	Ca	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	K _s		K ₆
1	明镜湖		1	1.077	7.80	105.365	34280.0	1079.0	3542.0	227.0	60114.0	5655.0	61.2	407.2	0.200	2.500	SM
2	康曲上游小湖		1	1.008	8.88	2.258	528.0	14.0	140.2	3.6	523.3	154.4	137.2	757.1	-5.320	-1.640	C
3	太阳湖(89)	二维	2	1.000	7.51	0.115	19.0	1.5	7.5	5.8	36.3			44.8	0.000	0.000	C
4	葫芦湖		1	1.003	7.18	3.328	248.0	21.0	214.3	449.2	366.0	1753.0		276.4	0.490	0.970	SN
5	可考湖(89)		1	1.002	8.70	1.895	568.0	9.0	73.0	15.7	898.3	18.5	51.4	261.5	-13.540	2.040	SM
6	乌兰乌拉湖(89)		1	1.006	9.16	7.734	2646.0	88.0	135.1	10.9	3645.0	724.4	186.2	298.8	-0.700	0.040	SN
7	卓乃湖(89)		1	1.001	7.55	1.499	450.0	8.0	41.1	30.3	722.0	45.3		201.7	-1.900	1.680	SM
8	苟弄措潜水		1	1.029	7.80	41.026	14699.9	140.5	591.5	203.1	23778.0	587.2	99.9	926.3	-0.690	3.290	SM
9	苟鲁措西台小湖		1	1.000	6.80	4.25	1253.7	130.5	30.2	205.7	2255.0	171.3		207.9	1.920	2.620	CL
10	苟鲁措	二维	4	1.017	8.40	33.718	11801.9	433.3	880.0	139.5	17737.3	2135.9	172.9	416.7	0.127	1.500	SM
11	改日娃措		1	1.000	7.10	11.221	2883.4	111.1	540.7	424.4	5852.0	1274.4		135.1	0.710	2.390	SM
12	链湖		1	1.026	6.60	35.861	9089.8	246.3	1995.0	1036.0	17433.0	5889.7		170.9	0.407	1.732	SM
13	乌兰乌拉湖	三维	9	1.006	7.98	10.916	3689.7	80.5	189.2	39.0	5265.9	967.6	155.3	473.0	-0.545	0.227	SN
14	西金乌兰湖	三维	13	1.164	7.13	256.733	92979.0	3128.2	2478.8	1284.2	152373.6	4106.9	10.8	369.8	0.674	3.056	SM
15	节约湖		1	1.000	8.10	2.86	835.2	26.8	91.4	51.1	1312.0	153.8	27.3	362.7	-1.344	1.003	SM
16	苟鲁山克措		1	1.020	8.40	39.914	11708.4	280.5	1067.0	47.2	20636.0	195.7	241.9	736.9	-4.364	17.160	SM
17	岗曲中段小湖		1	1.001	7.40	6.932	1608.5	30.2	357.8	183.4	1660.0	2682.0		400.8	0.046	0.573	SN
18	勒斜武担湖	二维	3	1.093	7.00	135.526	44755.4	2320.0	2191.7	2848.0	81086.3	2112.2	9.1	166.3	3.152	7.247	CL
19	五仙湖		1	1.000	8.50	5.921	1775.3	56.1	179.7	66.8	2576.0	276.6	122.6	867.4	-2.598	-0.034	C
20	班章错坎		1	1.001	7.70	6.947	2280.7	42.5	111.6	30.1	3027.0	787.9	21.6	445.8	-0.397	0.162	SN

续表1

编号	地点	物质空 间向量	样品 组数	比重	pH	矿化度 (g/L)	主要化学组分 (mg/L)							难溶盐系数		水化学 类型	
							Na	K	Mg	Ca	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	K _n		K _b
21	苟弄措南山湖	1		1.025	7.20	38.554	10 446.8	192.5	1 925.0	1 318.0	23 100.0	1 311.6		259.9	2.251	8.045	CL
22	链湖西湖	1		1.000	6.90	4.985	1 238.4	21.7	120.0	306.5	2 062.0	956.1	90.1	0.690	1.190	SM	
23	白云湖	1		1.000	8.20	1.553	413.6	10.5	42.9	51.1	528.5	102.5	39.8	-2.220	-0.570	C	
24	太阳湖	4	三维	1.000	8.13	0.61	115.1	7.7	33.7	29.9	131.6	82.5	9.6	-1.226	0.387	SN	
25	布南湖	1		1.000	7.60	3.504	1 114.7	134.0	24.3	91.1	1 948.0	40.6	9.1	2.260	4.620	CL	
26	钦马湖	1		1.000	8.70	2.548	731.2	18.9	85.9	62.9	1 161.0	175.9	55.6	-0.800	1.130	SM	
27	钦马湖潜水	1		1.000	7.70	0.866	193.3	6.0	23.1	62.9	306.8	69.7	8.0	-0.240	1.070	SM	
28	可考湖	1		1.002	9.00	10.340	3 283.1	91.7	326.0	108.7	5 407.0	104.4	353.2	-7.910	4.420	SM	
29	可可西里湖	2	二维	1.008	8.80	13.412	4 372.5	76.8	379.8	41.3	6 467.0	1 194.6	301.4	-0.602	1.940	SN	
30	卓乃湖	3	二维	1.006	8.67	12.815	4 351.7	82.2	269.8	87.3	6 834.2	299.2	225.1	-2.453	1.106	SN	
31	海丁诺尔	2	二维	1.019	8.60	27.569	8 978.2	142.5	883.3	182.1	15 277.0	986.4	340.7	-0.732	2.803	SN	
32	盐湖	2	多维	1.150	6.85	221.351	72 395.3	1 929.4	6 675.1	462.4	123 330.0	15 866.5		0.026	1.686	SM	
33	库赛湖	3	多维	1.017	8.33	28.538	8 935.4	185.8	961.1	355.0	14 989.7	1 890.8	458.1	-0.253	1.751	SM	
34	可可西里湖东端子湖	1		1.000	7.80	0.419	69.0	7.2	10.3	39.3	74.2	70.9	147.8	-0.310	0.260	SN	
35	苟弄措	1		1.009	8.10	15.51	5 564.0	7.0	260.2	12.3	8 713.0	400.1	47.6	-1.120	1.450	SM	
36	苟鲁措西端子湖	1		1.206	6.70	307.58	105 128.0	3 185.7	4 822.0	5 452.3	187 726.0	865.2	404.1	14.740	36.750	CL	
37	苍措	1		1.249	6.70	357.45	63 790.3	11 019.1	40 147.0		179 564.0	58 544.8	4386.9	-0.060	2.650	SM	
38	五雪峰冰蚀湖	1		1.002	8.60	2.20	500.0	1.5	126.4	81.7	714.2	597.1	179.4	0.090	0.930	SN	
39	楚玛尔河上游小湖	1		1.001	8.80	1.04	305.8	0.5	37.2	12.3	408.1	160.5	15.9	-0.450	0.460	SN	
40	雪	3	三维	1.000	8.20	0.032	0.5	0.5	0.2	1.5	3.7		5.3	0.000	0.000	C	
41	冰雹	2	三维	1.001	7.95	0.118	6.8	1.0	2.8	14.3	10.7	9.1	4.0	-2.878	-1.667	C	

续表 1

编 号	地 点	物质空 间向量	样品 组数	比重	pH	矿化度 (g/L)	主 要 化 学 组 分 (mg/L)							难溶盐系数		水化学 类型
							Na	K	Mg	Ca	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	K _s	
42	雨	1	1.000	9.00	0.040	1.0	0.5	0.9	0.6	5.1		7.9	24.2	0.000	0.000	C
43	冰川	三维	1.000	8.20	0.117	2.0	0.5	6.0	14.6	5.1		13.5	75.2	0.000	0.000	C
44	冰川水	二维	1.001	8.43	0.168	10.3	1.5	7.5	20.1	4.8	17.1	5.9	100.2	-2.357	-0.617	C
45	泉水	多维	1.001	7.36	2.765	370.0	23.7	110.3	52.4	1 414.9	201.2	3.2	591.8	-1.716	0.449	SN
46	楚玛尔河	多维	1.002	7.40	3.493	1 071.3	14.5	51.1	111.4	1 682.5	305.1	7.9	236.4	0.223	0.884	SN
47	陀沱河	二维	1.000	7.90	0.766	168.6	11.0	18.9	44.5	266.9	88.4	4.0	162.8	-0.315	0.531	SN
48	红水河	二维	1.005	8.10	0.567	35.8	10.8	19.7	54.4	174.5	103.7	28.6	152.8	-0.344	0.406	SN
49	青新峰汽泉(浅部水)	1	1.000	8.60	0.240	2.0	0.5	5.0	102.0	102.0	23.0	31.7	80.8	-4.985	-4.134	C
50	青新峰汽泉(深部水)	1	1.032	6.90	46.550	14 345.0	2 040.2	118.9	2 042.3	27 812.0	4.9		185.8	959.835	1054.767	CL
51	青新峰冰水	1	1.004	8.00	3.970	1 300.0	140.0	23.4	92.1	2 219.0	32.9		163.2	2.81	5.62	CL
52	苟鲁措水系	二维	1.001	7.60	2.187	417.6	15.8	74.4	305.4	592.7	623.0	5.4	269.4	0.820	1.292	SM
53	岗齐曲	二维	1.000	7.90	0.381	41.8	2.6	31.6	50.7	43.8	35.8	5.3	190.9	-1.043	2.444	SM
54	乌兰乌拉湖水系	多维	1.004	6.93	9.263	3 152.1	142.4	29.6	24.0	3 207.7	2 212.2		494.1	-0.150	-0.097	C
55	西金乌兰湖水系	二维	1.001	7.63	2.736	869.1	45.0	25.8	93.4	1 449.3	106.9	2.0	145.3	0.993	1.948	SM
56	勒斜武担湖水系	二维	1.001	7.25	0.328	59.4	4.0	3.8	35.4	78.2	29.7		117.2	-0.252	0.223	SN
57	钦马湖—可可西里湖 水系	二维	1.001	7.73	0.226	9.5	1.3	14.2	30.9	18.1	47.3	4.9	99.4	-0.256	0.932	SN
58	海丁诺尔水系	1	1.000	7.40	0.281	16.1	1.3	4.0	56.3	29.5	24.1	4.5	145.5	0.550	1.200	SM
59	可考湖水系	1	1.000	7.40	0.230	10.0	0.5	22.9	33.3	25.5	12.7	7.9	121.5	-2.240	4.910	SM
60	太阳湖水系	二维	1.000	7.45	0.242	24.4	1.7	8.8	41.3	34.5	26.0	3.4	108.0	0.323	1.662	SM

1) 括号数字表示 1989 年定点观测取样地。

湖→盐湖中的比率分别为: $\text{Na}^+ = 1: 20.13: 89.95: 598.02$, $\text{K}^+ = 1: 6.87: 33.90: 491.47$, $\text{Mg}^{2+} = 1: 5.82: 28.12: 259.94$, $\text{Ca}^{2+} = 1: 2.65: 6.06: 57.36$, $\text{Cl}^- = 1: 26.76: 130.42: 993.34$, $\text{SO}_4^{2-} = 1: 6.22: 15.79: 176.1$, $\text{CO}_3^{2-} = 1: 11.5: 31.64: 1.41$, $\text{HCO}_3^- = 1: 2.02: 3.37: 5.52$ 。这表明, 湖水在由淡水湖经半咸水湖、咸水湖往盐湖的水体变质过程中, 其主要组分的含量是累积增长的, 仅有 CO_3^{2-} 离子含量在盐湖中呈下降的态势。

3.1.2 大气降水及河流

其主要组分含量及比率变化

大气降水(包括雪、雨、雹、冰川等4类8组样品的平均值) $\text{Na}^+ = 2.56 \times 10^{-3} \text{g/L}$, $\text{K}^+ = 0.63 \times 10^{-3} \text{g/L}$, $\text{Mg}^{2+} = 2.47 \times 10^{-3} \text{g/L}$, $\text{Ca}^{2+} = 7.76 \times 10^{-3} \text{g/L}$, $\text{Cl}^- = 6.16 \times 10^{-3} \text{g/L}$, $\text{SO}_4^{2-} = 2.27 \times 10^{-3} \text{g/L}$, $\text{CO}_3^{2-} = 7.67 \times 10^{-3} \text{g/L}$, $\text{HCO}_3^- = 95.62 \times 10^{-3} \text{g/L}$ 。其阳离子的比值为 $\text{Na}^+ : \text{K}^+ : \text{Mg}^{2+} : \text{Ca}^{2+} = 0.33: 0.08: 0.32: 1$; 其阴离子比值为 $\text{Cl}^- : \text{SO}_4^{2-} : \text{CO}_3^{2-} : \text{HCO}_3^- = 0.06: 0.02: 0.08: 1$ 。

淡水河(9条河21组样品的平均值) $\text{Na}^+ = 0.04 \text{g/L}$, $\text{K}^+ = 0.01 \text{g/L}$, $\text{Mg}^{2+} = 0.02 \text{g/L}$, $\text{Ca}^{2+} = 0.04 \text{g/L}$, $\text{Cl}^- = 0.08 \text{g/L}$, $\text{SO}_4^{2-} = 0.04 \text{g/L}$, $\text{CO}_3^{2-} = 0.01 \text{g/L}$, $\text{HCO}_3^- = 0.13 \text{g/L}$ 。其阳离子的比值为 $\text{Na}^+ : \text{K}^+ : \text{Mg}^{2+} : \text{Ca}^{2+} = 1.02: 0.09: 0.36: 1$; 其阴离子的比值为 $\text{Cl}^- : \text{SO}_4^{2-} : \text{CO}_3^{2-} : \text{HCO}_3^- = 0.56: 0.33: 0.05: 1$ 。

半咸水河(4条河13组样品的平均值) $\text{Na}^+ = 1.38 \text{g/L}$, $\text{K}^+ = 0.05 \text{g/L}$, $\text{Mg}^{2+} = 0.04 \text{g/L}$, $\text{Ca}^{2+} = 0.13 \text{g/L}$, $\text{Cl}^- = 1.73 \text{g/L}$, $\text{SO}_4^{2-} = 0.81 \text{g/L}$, $\text{CO}_3^{2-} = 0.01 \text{g/L}$, $\text{HCO}_3^- = 0.29 \text{g/L}$ 。其阳离子的比值为 $\text{Na}^+ : \text{K}^+ : \text{Mg}^{2+} : \text{Ca}^{2+} = 10.31: 0.41: 0.34: 1$; 其阴离子的比值为 $\text{Cl}^- : \text{SO}_4^{2-} : \text{CO}_3^{2-} : \text{HCO}_3^- = 6.05: 2.84: 0.01: 1$ 。

由上述数据得知, 河水中的阳离子含量比率比较稳定, Na^+ 大于 Ca^{2+} 含量的数倍至数10倍, 而 K^+ , Mg^{2+} 则小于 Ca^{2+} 含量的数倍至数10倍。阴离子的比率变化相差很大, 在淡水河中 Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} 均小于 HCO_3^- 含量的数倍至数十倍; 在半咸水河中, Cl^- 和 SO_4^{2-} 大于 HCO_3^- 含量的数倍, CO_3^{2-} 则小于 HCO_3^- 的数百倍。在大气降水中, 阳离子 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} 均小于 Ca^{2+} 含量的数倍至数10倍, 阴离子的比值 Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} 均小于 HCO_3^- 含量的数10倍。

本区河水与主要来源于大气降水的主要组分的对比表明, 淡水河与大气降水的元素离子含量比率接近, 反映出它们之间的渊源关系; 而半咸水河与大气降水的元素离子含量比率相差很大, 其主要离子大部分呈累积增长趋势, 仅阴离子 CO_3^{2-} 含量比率有降低的趋势, 反映了水体在地壳氧化带捕获矿物元素的能力及其对物质交换的参与。

3.2 微量化学元素

根据野外取样的水化学分析数据可知(表2), 可可西里地区水体中已查明赋存有 B, Li, Sr, Ba, P, Sn, Zn, Pb, Cd, Co, Ni, Mn, Fe, Cr, Mo, Si, Al, V, Cu, Ti, As, Hg, Se, Sc 等30余种微量元素。内流湖泊是地表水的汇聚点, 也是流域内被水系侵蚀溶解的地表岩石矿物元素迁移转化的最后归宿。微量元素的含量随入水量的增减而变化; 在干旱气候环境制约下, 其组分含量发生累积性增长。当湖水主要组分如 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- 含量达到一定浓度时, 便会致某种盐类的结晶及析出; 而微量元素除部分受盐类矿物晶格置换作用和粘土矿物沉降吸附作用发生少量的带

表 2 可可西里地区水体微量元素含量(mg/L)¹⁾

Tab.2 Content of trace elements of water body in Kekexili region

编号	地点	B	Li	Sr	Ba	P	Sn	Zn	Pb	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr	Mo	Si	Al	V	Cu	Ti	As	Hg	Se	Sc
8	苟弄措潜水	2.000	9.000	8.000	0.100	0.200	0.400	0.400	0.100	0.001	0.010	0.020	0.100	0.020	0.100	2.000	3.000	0.060	0.010	0.060	0.010	0.400	0.080	0.006	0.006
9	苟鲁措西台小湖	4.000	2.000	3.000	0.200	0.040	0.040	0.040	0.010	0.010	0.002	0.002	0.001	0.020	0.020	0.300	0.100	0.200	0.007	0.006	0.006	0.050	0.010	0.040	0.001
10	苟鲁措	14.250	8.250	6.350	0.033	1.125	0.675	0.675	0.613	0.014	0.33	0.035	0.015	0.040	0.100	2.000	0.700	0.560	0.232	0.001	0.001	0.475	0.110	0.500	0.001
11	改日娃措	2.000	1.000	8.000	0.030	0.500	0.400	0.400	0.020	0.002	0.020	0.030	0.100	0.030	0.100	1.000	0.800	0.100	0.020	0.020	0.010	0.300	0.100	0.100	0.010
12	链湖	8.000	3.000	31.000	0.060	2.000	4.000	4.000	0.200	0.040	0.200	0.030	0.100	0.300	4.000	1.000	2.000	1.000	0.020	0.040	0.700	0.100	1.000	0.010	0.010
13	乌兰鸟拉湖	15.784	5.044	0.633	0.078	0.288	0.253	3.169	0.446	0.025	0.095	0.075	0.104	0.228	0.346	3.544	14.123	1.562	0.614	0.029	0.077	2.035	0.205	1.077	0.016
14	西金乌兰湖	89.846	100.615	26.746	0.224	1.946	3.169	3.169	0.446	0.025	0.095	0.075	0.104	0.228	0.346	3.544	14.123	1.562	0.614	0.029	0.077	2.035	0.205	1.077	0.016
15	节约湖	5.000	2.000	1.000	0.100	0.200	0.100	0.007	0.200	0.001	0.020	0.020	0.003	0.050	0.020	0.200	2.000	1.000	0.900	0.005	0.002	0.030	0.006	0.050	0.002
16	苟鲁山克措	12.000	7.000	0.090	0.060	0.900	2.000	2.000	0.020	0.020	0.100	0.010	0.040	0.100	0.100	2.000	0.600	2.000	1.000	0.003	0.003	0.900	0.200	0.200	0.003
17	岗曲中段小湖	3.000	0.400	5.000	0.300	0.700	0.005	0.005	0.040	0.010	0.060	0.010	0.005	0.060	0.030	0.700	0.200	1.000	0.900	0.009	0.005	0.070	0.010	0.080	0.005
18	勒斜武担湖	88.000	171.000	0.333	0.533	1.333	3.333	3.333	0.400	0.037	0.133	0.063	0.050	0.100	0.300	3.000	2.967	1.067	0.400	0.043	0.090	0.567	0.167	0.600	0.009
19	五仙湖	2.000	1.000	0.070	0.040	0.100	0.500	0.003	0.003	0.005	0.004	0.003	0.030	0.030	0.030	0.300	0.004	4.000	1.000	0.003	0.003	0.090	0.009	0.020	0.002
20	玛章措坎	6.000	2.000	0.800	0.070	0.080	0.070	0.003	0.020	0.001	0.005	0.002	0.030	0.020	0.200	0.200	3.000	4.000	1.000	0.005	0.003	0.100	0.010	0.060	0.006
21	苟弄措南山湖	12.000	12.000	5.000	0.090	0.900	2.000	2.000	0.010	0.030	0.010	0.030	0.010	0.050	0.100	2.000	0.600	4.000	1.000	0.003	0.003	0.400	0.100	0.100	0.004
22	链湖西湖	2.000	3.000	7.000	0.070	0.300	0.900	0.005	0.100	0.004	0.050	0.009	0.001	0.030	0.020	0.400	0.400	0.100	0.010	0.010	0.010	0.070	0.009	0.009	0.005
23	白云湖	6.000	0.200	1.000	0.070	0.300	0.800	0.020	0.100	0.004	0.008	0.009	0.002	0.050	0.010	1.000	3.000	0.300	0.003	0.003	0.003	0.080	0.005	0.005	0.005
24	太阳湖	1.750	0.300	0.475	0.045	0.045	0.235	0.005	0.015	0.015	0.001	0.001	0.029	0.003	0.003	0.053	0.550	0.033	0.033	0.033	0.033	0.040	0.004	0.008	0.008
25	布南湖	15.000	8.000	4.000	0.800	0.060	0.400	0.010	0.060	0.002	0.002	0.005	0.200	0.008	0.005	0.700	0.200	0.004	0.005	0.005	0.005	0.700	0.005	0.010	0.010
26	钦马湖	3.000	0.500	2.000	0.100	0.060	0.700	0.020	0.004	0.004	0.004	0.004	0.060	0.020	0.200	2.000	0.200	0.002	0.002	0.004	0.002	0.030	0.006	0.006	0.006
27	钦马湖潜水	0.600	0.100	0.500	0.002	0.500	0.700	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.100	0.010	0.010	0.070	2.000	0.200	0.001	0.002	0.010	0.020	0.002	0.002	0.002
28	可考湖	6.000	1.000	2.000	0.600	0.300	1.000	0.100	0.050	0.002	0.005	0.008	0.002	0.030	0.040	1.000	1.000	0.070	0.004	0.001	0.001	0.070	0.010	0.070	0.070

续表 2

编号	地点	B	Li	Sr	Ba	P	Sn	Zn	Pb	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr	Mo	Si	Al	V	Cu	Ti	As	Hg	Se	Sc
29	可可西里湖	18.000	3.500	0.035	0.003	0.300	1.150	0.004	0.115	0.003	0.006	0.009	0.005	0.060	0.049	1.100	1.600	0.050	0.004	0.003		0.150	0.014	0.085	
30	卓乃湖	15.667	2.000	3.000	0.167	0.433	1.033	0.006	0.040	0.003	0.018	0.006	0.003	0.005	0.043	0.700	3.000	0.047	0.003	0.003	0.003	0.133	0.017	0.047	
31	海丁诺尔	15.000	6.000	0.290	0.035	2.500	4.000		1.400	0.550	0.145	0.125	0.020	0.045	0.200	2.000	0.550	0.200	0.030			0.500	0.130	0.150	0.002
32	盐湖	40.000	62.000	5.000	0.050	7.500	10.000	0.075	3.000	0.150	0.350	0.550	0.450	0.600	0.750	13.000	22.000	0.950	0.150	0.050	0.130	4.350	0.450	3.000	0.020
33	库赛湖	24.333	5.000	2.687	0.018	3.000	4.667		1.167	0.060	0.133	0.117	0.020	0.060	0.200	2.222	1.700	0.300	0.043	0.006	0.002	0.153	0.027		
34	可可西里湖 东端子湖	0.900	0.060	0.500		1.000	0.900	0.006			0.003	0.002	0.002	0.040	0.100	0.040	3.000	0.060		0.003	0.001	0.010	0.002		
35	苟弄措	2.000	2.000	0.400	0.080	0.200	0.100	0.010	0.050	0.005	0.005	0.010	0.003	0.030	0.010	0.300	2.000	0.100	0.004	0.003	0.001	0.100	0.010	0.090	
36	荷鲁措西端子湖	238.000	111.000	263.000	2.000	4.000	5.000		0.600	0.040	0.200	0.400	1.000	0.800	1.000	11.000	40.000	1.000	0.200	0.100	0.500	7.000	0.600	3.000	0.060
37	苍措	608.000	389.000	14.000	0.200	22.000	23.000		6.000	0.300	0.800	2.000	0.400	2.000	3.000	50.000	59.000	4.000	0.500	0.200	0.200	12.000	1.000	10.000	0.050
38	五雪峰冰蚀湖	3.000	0.900	0.800	0.010	0.200	0.070		0.020		0.002	0.010	0.003	0.030	0.007	0.200	2.000	0.080	0.001	0.002	0.004	0.100	0.009	0.090	
39	楚玛尔河 上游小湖	2.000	0.200	0.700	0.020	0.080	0.030		0.020		0.006	0.003	0.003	0.100		0.050	2.000	0.100				0.100	0.006	0.030	
40	雪	0.047	0.001	0.009	0.006	0.011	0.006	0.006			0.001	0.006	0.020			0.267	0.003					0.053	0.003	0.013	
41	冰雹	0.075	0.007	0.080	0.040	0.050	0.015	1.001			0.001	0.012	0.040			0.003	0.750	0.340		0.005	0.001	0.055	0.003		
42	雨	0.040		0.007	0.004			0.005				0.002	0.005			0.200	0.007					0.050			
43	冰川	0.085	0.003	0.070	0.019			0.001				0.001	0.020	0.002	0.010	1.500	0.060					0.060	0.002	0.005	
44	冰川水	0.133	0.009	0.073	0.060	0.018	0.010	0.001	0.002		0.001	0.082	0.027	0.001	0.011	1.400	0.050				0.001	0.067	0.003	0.003	
45	泉水	1.900	0.406	0.680	0.032	0.140	0.220	0.006	0.038	0.001	0.006	0.010	0.418	0.034	0.021	2.230	4.200	0.064	0.009	0.006	0.004	0.078	0.009	0.042	0.001
46	楚玛尔河	0.600	0.225	2.000	0.060	0.060	0.320	0.002	0.020	0.002	0.004	0.007	0.003	0.025	0.015	0.200	1.950	0.070	0.006	0.006	0.006	0.040	0.005	0.030	
47	沱沱河	0.440	0.265	0.600	0.030	1.015	1.502	0.001	1.000	0.040	0.100	0.101	0.001	0.015	0.013	0.060	3.500	0.060				0.050	0.002	0.015	
48	红水河	4.367	2.222	1.467	0.067	0.180	0.417	0.002	0.010	0.001	0.002	0.006	0.002	0.016	0.006	0.077	1.400	0.057	0.003	0.004	0.004	0.333	0.001	0.013	

续表 2

编号	地点	B	Li	Sr	Ba	P	Sn	Zn	Pb	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr	Mo	Si	Al	V	Cu	Ti	As	Hg	Se	Sc	
49	青新峰汽泉 (浅部水)	0.500	0.010	0.070	0.040	0.040	0.030	0.010	0.010	0.001	0.002	0.001	0.010	9.000	0.030	0.001	0.100	0.002								
50	青新峰汽泉 (深部水)	180.000	96.000	56.000	16.000	5.000	2.000	0.200	0.060	0.060	0.200	5.000	0.500	80.000												
51	青新峰洋水	0.200	0.020	0.060	0.080	0.003	0.003	0.001	0.040	0.005	0.005	0.001	0.040	0.005	0.080	0.100	0.003									
52	荷鲁措水系	0.875	0.276	2.275	0.063	1.300	2.075	0.001	0.675	0.040	0.075	0.075	0.004	0.020	0.042	0.350	2.500	0.144	0.019	0.013	0.018	0.150	0.010	0.075	0.001	
53	岗齐曲	1.433	0.333	0.433	0.031	0.133	0.567	0.003	0.030	0.001	0.003	0.007	0.030	0.030	0.040	0.267	4.933	0.083	0.008	0.007	0.003	0.073	0.007	0.033		
54	乌兰乌拉湖水系	6.733	5.000	7.783	0.006	0.433	0.833	0.004	0.033	0.001	0.003	0.010	0.001	0.016	0.031	0.153	2.667	0.077	0.013	0.007	0.007	0.240	0.003			
55	西金乌兰湖水系	0.650	0.525	0.668	0.055	0.393	0.500	0.004	0.010	0.004	0.003	0.005	0.001	0.048	0.002	0.063	1.350	0.168	0.004	0.004	0.005	0.005				
56	勒斜武担湖水系	0.450	0.150	0.250	0.015		0.450	0.003	0.004	0.002	0.001	0.002	0.002	0.003	0.002	0.035	1.250	0.220								
57	钦马湖—可可 西里湖水系	0.133	0.003	0.400	0.007	0.017	0.170	0.003	0.010	0.001	0.004	0.005	0.001	0.016	0.017	0.113	1.200	0.070	0.007	0.007	0.007	0.026	0.003	0.017	0.001	
58	海丁诺尔水系	0.040		0.400		0.500	0.700	0.040		0.001	0.002	0.003	0.001	0.010	0.002	0.040	2.000	0.040			0.003	0.001				
59	可考湖水系	0.200	0.010	0.200	0.030								0.010	0.001	0.009	2.000	0.030				0.001	0.050	0.002			
60	太阳湖水系	0.125		0.250	0.025	0.600	0.800	0.003		0.001	0.005		0.007	0.002	0.055	1.400	0.035				0.003					

D) 样品 1—7 号于 1989 年采集, 由于条件限制, 未做微量元素含量分析。

出减少外,大部分微量元素的组分含量在湖水中以离子态的形式继续滞留下来(不同元素有不同的滞留时间),并且在湖水前进(或正向)变质过程(Borcher et al., 1964)中发生微量元素组分的浓集,甚至还可形成一些有利用价值的卤水资源。

可可西里地区湖泊类型繁杂,湖水中微量元素的含量及其组合各有差异,其它流域内微量元素的含量也不相同。水体微量元素分析表明,湖水的含量高于河水,河水的含量高于大气降水(雪、雨、雹、冰川);盐湖高于咸水、半咸水湖,咸水、半咸水湖高于淡水湖;泉水一般高于河水。经过 119 组水样的测定结果(表 2)表明,可可西里地区水体中 B, Li 等元素含量较高,在盐湖中有富集的趋势。

对本区微量元素的地球化学特征对比分析表明,水体中 B, Li, Sr, Ba, As, Hg 等元素的含量分布呈如下趋势:在主要湖区(尤其是盐湖区)各种微量元素的含量均高于其区域背景值,形成以盐湖区为中心的含量高值域。水体中赋含稀有分散元素化学组分,一方面与区域地球化学背景有关,另一方面与湖水演变效应有关。经过对微量元素分布状态及组合的综合分析,可可西里地区水体中微量元素表现出一些特征地球化学属性——元素对(涂光炽等, 1984)。有些元素对具有协同增长关系称为协同性元素对,有些元素对具有对抗消长关系,称为对抗性元素对。

3.2.1 协同性元素对 可可西里地区水体中 B, Li 分布趋势清晰地表明,二者含量变化在同一数量级范围以内,在盐湖卤水中 B, Li 含量均达到最大值 10^2mg/L ; 在咸水、半咸水湖中含量降至 10mg/L ; 在淡水湖及河水中其含量一般在 10^{-6}mg/L 以内。从区域含量变化趋势上看, B, Li 元素存在协调消长的特征,说明二者的物质来源、搬运条件及富集环境具有相似性。在地球表生作用下, B, Li 的物质来源主要是古盐类沉积的再溶解、再聚集,这对认识和研究本地区第四纪以前的古盐类矿产资源提供了依据。

3.2.2 对抗性元素对 其含量本底相差 10mg/L , 具有高含量的元素称为元素对的主元素,具有低含量的元素称为元素对的副元素,如 Sr—Ba 元素对中, Sr 为主元素, Ba 为副元素; As—Hg 元素对中, As 为主元素, Hg 为副元素。本区水体中, Sr, Ba, As, Hg 元素对分布趋势表明,其含量在河水、淡水湖以及半咸水、咸水湖中是逐渐增高的,在具有盐类沉积的盐湖卤水中呈富集状态;而在未饱和的盐湖卤水中,元素对的主、副元素存在反消长关系。这种变化状态表明, Sr—Ba, As—Hg 元素对的主、副元素的物质来源具有对抗性地球化学特征,从而决定了区内主、副元素本底值的反消长关系。

3.3 水化学组分的动态变化

可可西里地区湖泊水体的补给来源主要依靠冰川消融水以及大气降水,泉水补给为辅。本区湖泊补给水系的地表径流长度一般在 35—100 km 之间,也有少数湖泊盆地的局部补给水系靠近现代冰川前缘,流径很短。这些水系的水量随季节的不同变化很大,大气降水也受到季节变化的制约。丰水期(4—5 月、8—9 月各有一次)湖泊水质受到入湖水量的影响,其化学组分发生一定范围的波动变化,表现为后退(或逆向)变质(Borcher et al., 1964)。根据考察期间(1989 年 5 月和 1990 年 7 月),对主要湖泊进行定点监测取样及组分检测,其水化学动态变化如下。

3.3.1 太阳湖 据 1989 年 5 月太阳湖水样的分析,湖水属碳酸盐水化学类型; 1990 年 7 月同一取样点湖水水化学类型为硫酸钠亚型。对该湖周边水系调查表明,太阳湖是

可可西里地区最深(测点水深为 43m)的湖泊,在其东端有间歇性外泄河道,它意味着太阳湖不但具有很大的贮水能力,而且还具备水量的调节能力。1990年7月太阳湖水质三维向量(水平方向控制长度为 8.4km,垂直方向控制水深为 30m)的计算,该湖基本水型为硫酸钠亚型。1989年5月间水体为碳酸盐型,这是由于补给水系春汛和周边地带雪水大量涌入的结果,并且它只能影响到表层或浅层湖水的变化,它代表了一次丰水事件的影响。

3.3.2 乌兰乌拉湖 对1989年5月乌兰乌拉湖东北湾水样分析表明,水化学类型为硫酸钠亚型。1990年6月底三维向量(水平方向控制长度为 29km,垂直方向控制水深为 6.8m)计算表明,乌兰乌拉湖主要水型为硫酸钠亚型,但在局部水域(东南湖区的东北湾)近岸水体水化学类型为碳酸盐型,与1989年5月的定点观测相比发生了变化。这种变化反映了乌兰乌拉湖南部补给水系等马河水量对湖水(主要为浅层湖水)的更替能力。由于乌兰乌拉湖湖流运动较弱和河口射流能量也不大,其丰水期水量影响到湖湾的过程时间较长,产生了水型变化及分异的滞后效应。这次变化的原因就是乌兰乌拉湖受第一次丰水期(4—5月间的春汛)水量的影响,表现为2—3个月的湖水更替周期,导致湖湾地带5月间仍属硫酸钠亚型,6—7月间才出现碳酸盐型湖水。其它湖泊经过1989年5月与1990年7月的对比观察研究,一般湖水水化学类型变化不大,如可考湖、卓乃湖等。这些现象主要与湖泊盆地的水力结构有关。

4 结语

本地区湖泊水体中阳离子含量比率恒定,阴离子含量比率变化悬殊。这种变化说明阳离子含量对湖泊水体水化学性质影响不大,决定性因素是水体中阴离子含量;阴离子中 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的含量比率变化比较活跃,表明其对湖泊水化性质具有更加敏感的影响。湖泊水质演变过程表明,该地区湖泊水体的主要组分含量与其化学组分来源、湖泊沉积作用以及环境条件有关。

河水主要组分变化与大气降水的组分构成有密切关系,而且还与流域内的地球表生作用有关系。尤其值得注意的是,水体中 CO_3^{2-} 离子含量比率的削减受水系中物质交换及沉淀作用的控制,这对认识水系组分演化和大气—陆面—水分的耦合过程有借鉴意义。

水体中微量元素具有元素对性质,在物质迁移—聚集过程中,粘土矿物及局部化学沉淀也可影响元素对中某些组分的吸附聚合作用,导致湖泊卤水中微量元素组分的降低,在盐类矿物析出过程中由于卤水浓缩而回升增至最大值。本区水体微量元素赋存状态分析对认识区域地球化学背景条件和评价卤水资源以及研究湖泊演化过程均有积极意义。

湖泊水化学类型的波动变化主要呈现为季节性交替的特点,它受湖泊补给水系水量(主要是冰川消融水和大气降水)变化的制约,在本区湖水水化学构型上是一种间歇的后退变质,主要表现为湖水的淡化,从湖泊主体水型硫酸钠亚型逆变为碳酸盐型,是该地区环境动态变化的表征之一,这对深入研究湖水动态变化与区域环境演化关系有实际意义。

参 考 文 献

- 马瑞俊, 1990, 环境科学, 11(2): 76—80.
胡东生, 1994, 盐湖研究, 2(3): 17—21.
涂光炽等, 1984, 地球化学, 上海科技出版社(上海), 326—358.
莱尔曼, A. 主编, 1978 (王苏民等译, 1989), 湖泊的化学地质学和物理学, 地质出版社(北京), 243—248.
Borcher, H. et al., 1964, Salt Deposits, D. Van Nostrand Company, LTD (London), pp. 93—119.

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE WATER BODY IN THE KEKEXILI REGION LAKES

Hu Dongsheng

(*Qinghai institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008*)

Abstract Data obtained in May to June, 1989 and May to August, 1990, in a comprehensive scientific expedition were used to systematically analyse the chemical composition and the dispersal law of the lakes and the water supply system in the Kekexili region by using conventional chemical analysis and ICP—3 520 spectrum determination. The results were as follows: the accumulation and growth of the main chemical components of the water body during its evolution showed that the cation /anion ratio had great impact on the water body properties, and that there were close relations between the chemical composition of the water supply system and the geohypergenesis of the drainage area where the trace chemical elements are dispersed basinwide in the water body at a certain ratio for the coordinative element couple B—Li and another certain ratio for the antagonistic element couples Sr—Ba, As—Hg, etc.. The author analysed the main influencing factors for these, and the variation of the main lakes' water body composition with climatic environment events.

Key words Chemical composition of water body Element couple Development change Environment event Kekexili region