文章编号:1673-9469(2021)03-0081-09 DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.03.012

基于聚类分析与因子分析的西藏高原南部湖水水化学特征研究

郭 艺,甘甫平,闫柏琨,白 娟
(中国自然资源航空物探遥感中心,北京 100083)

摘要:基于聚类分析和因子分析研究了西藏高原南部27个湖泊水样的水化学特征及影响因素。聚类分析结果表明受气候条件地带性和湖泊补给来源多样性影响,青藏高原湖水水化学参数具有空间差异,27个水样可分为2个大类和5个亚类,其水化学类型符合湖泊演化过程。因子分析结果表明不同类型的湖泊水化学特征和影响因素不同,淡水湖水化学类型主要为Na-HCO_3,提取出2个主因子,分别揭示了碳酸盐和硅酸盐矿物溶解、硫酸盐矿物和岩盐溶解对其水化学特征的影响。咸水湖水化学类型主要为Na-SO_4,提取出3个主因子,分别揭示了碳酸岩矿物溶解、硫酸盐矿物和岩盐的溶解以及人类活动对其水化学特征的影响。盐湖水化学类型主要为Na-Cl,提取出2个主因子,分别揭示了岩盐矿物及硅酸盐矿物溶解、硫酸盐矿物和碳酸盐矿物溶解对其水化学的影响。

关键词:湖泊;水化学;聚类分析;因子分析;西藏高原
中图分类号:P342 **文献标识码**:A

Study on the Hydrochemical Characteristics of Lake Water in Southern Tibet Plateau Based on Cluster Analysis and Factor Analysis

GUO Yi, GAN Fuping, YAN Baikun, BAI Juan
(China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on cluster analysis and factor analysis, the hydrochemical characteristics and influencing factors of water samples from 27 lakes in southern Tibet Plateau were studied. The results of cluster analysis showed that the lake hydrochemical parameters were spatially different due to the zonality of climatic conditions and the diversity of lake supply sources. The 27 water samples could be divided into 2 clusters and 5 sub-clusters, and their hydrochemical types were consistent with the evolution process of the lake. The results of factor analysis showed that the hydrochemical characteristics and influencing factors of different types of lakes were different. The main chemical type of fresh water lake was Na-HCO_3. Two factors were extracted to reveal the influence of the dissolution of carbonate and silicate minerals, and the dissolution of sulfate minerals and salt. The main hydrochemical type of saltwater lake is Na-SO_4. Three factors were extracted, which revealed the dissolution of carbonate minerals, the dissolution of sulfate minerals and salt, and the influence of human activities on the hydrochemical characteristics of salt lake. The main hydrochemical type of saline is Na-Cl, and two factors were extracted, which revealed the influence of the dissolution of rock salt minerals and silicate minerals, and the dissolution of sulfate minerals and carbonate minerals on the hydrochemistry of saline.

Key words: lake; hydrochemistry; cluster analysis; factor analysis; Tibetan Plateau

收稿日期:2021-03-31
基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD2190515);中国自然资源航空物探遥感中心青年创新基金(2020YFL18)
作者简介:郭艺(1992-),女,河北邢台人,博士,工程师,从事水文地质、环境地质,水文遥感方面的研究。

湖泊作为水循环过程中重要组成部分,具有调节河川径流和提供工农业用水的功能,还为揭示环境演变提供了一种重要的手段[1-2]。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,其时空分布规律可揭示湖泊的演化过程,是水文水资源研究的重要内容[3-4]。水化学特征研究主要通过水化学统计、图解法、离子比例系数等传统方法[5-7]开展。近几十年来,多元统计方法广泛应用于水文地球化学研究,在水化学特征时空分布规律、水质评价、污染源识别、影响因素识别等方面取得了较好的成果[8-10]。

青藏高原上分布着世界上海拔最高、数量最多、面积最大的湖泊群,主要以咸水湖和盐湖为主。受环境恶劣、地形复杂和交通不便等因素限制,目前对青藏高原湖泊的研究大多数是利用遥感技术监测湖面及水位的变化[11-13]。针对青藏高原湖泊的水化学特征的研究主要围绕在单个湖泊,如青海湖[14-15]、羊卓雍错[16]、纳木错[17]等,几乎没有基于多元统计方法的高原湖泊水化学特征研究。因此,本研究在前人的研究基础上,采集西藏高原27个湖泊水样品,分析这些样品的水化学特征及其水化学类型,并基于聚类分析和因子分析探讨这些湖泊主要离子来源及其影响因素,为高原湖泊水文地球化学研究及其保护提供依据。

1 研究区概况

青藏高原是世界面积最大的高原,该地区地理环境复杂,水系发育,是我国乃至整个亚洲众多大河(长江、黄河、雅鲁藏布江及湄公河等)的发源地。西藏高原为青藏高原的主体,指昆仑山脉以南、喜马拉雅山脉以北、西部为喀喇昆仑山脉、东部为横断山脉之间的区域,面积超过120×10^4 km^2,平均海拔高程4 000 m以上,是世界上海拔最高、分布范围最大、隆起时间最晚的巨大高原,素有"世界屋脊"的美称,号称"世界第三极"。西藏高原地势高,纬度偏低,由一系列巨大的山系、高原面、宽谷和湖盆组成,自然环境复杂,地形地貌多样,基本上可分为极高山、高山、中山、低山、丘陵和平原等六种类型。

西藏高原气候多变,具有显著的高原气候特征。受高原地形的影响,西藏高原气候寒冷干燥,一年中有7个月平均气温在0 ℃以下,其中1月平均气温在-10 ℃以下,极端气温达-35 ℃,6~9月各地气温较高,最暖月温度达12.1 ℃。降水量东西差别较大,从东南向西北逐渐减少,东部安多县和那曲县多年平均降水量达360 mm,中部改则县年均降水量达180 mm,西部的狮泉河年均降水量只有75 mm。年蒸发量大于降水量。根据西藏地形地貌、水热状况和植被分布等自然环境的特征,西藏划为三个主要气候区:藏北寒冷的干旱-半干旱高原季风气候区、藏南寒冷-温暖的半干旱高山峡谷季风气候区和藏东温暖半湿润的高山季风气候区。

西藏高原地表水系纵横交错,十分发育。根据地表水系的流向和最终归宿,可分为藏北高原内流地表水系分布区、藏南河谷山地内外流地表水系分布区和藏东高山峡谷外流地表水系分布区。西藏高原是我国湖泊最多的地区,湖泊总面积达23 800 km^2,约占我国湖泊总面积的30%。按照水系和湖泊的分布特征,西藏湖泊可划分为藏东南外流湖区、藏南外流-内陆湖区、羌塘内陆湖区[18]。

2 研究方法

本文水化学分析数据源于2021年8月采集的27组湖水样品,采样位置见图1。取样时,先用湖水冲洗300 mL的聚乙烯塑料样品瓶3次,然后装样,之后密封低温冷藏。所采集的样品均在核工业分析中心分析测定。碳酸根(CO_3^{2-})和重碳酸根(HCO_3^-)采用酸碱指示剂滴定法测定(AT-510全自动滴定分析仪)(DZ/T006449—1993),F^-、Cl^-、SO_4^{2-}、NO_3^-、使用ICS-1100离子色谱仪测定(DZ/T006451—1993),Ca^{2+}、K^+、Mg^{2+}、Na^+使用883 Basic IC plus离子色谱仪测定(GB/T5750.6—2006)。所有水样阴阳离子平衡相对误差小于3%,总溶解性固体(TDS)含量利用各离子含量总和减去1/2的HCO_3^-含量计算。

利用AqQA软件绘制水化学Piper图和Stiff图;利用SPSS19.0统计分析软件,选用离差平方和(ward)算法和欧式距离,对水样的pH、CO_3^{2-}、HCO_3^-、F^-、Cl^-、SO_4^{2-}、NO_3^-、Ca^{2+}、K^+、Mg^{2+}、Na^+、总碱度和TDS共13项化学组分进行Q型聚类分组;利用SPSS软件的因子分析法提取特征值大于1的主成份,为使各主因子的典型代表变量更加突出,便于解释其实际意义,采用方差最大正交旋转法对成分矩阵进行旋转。

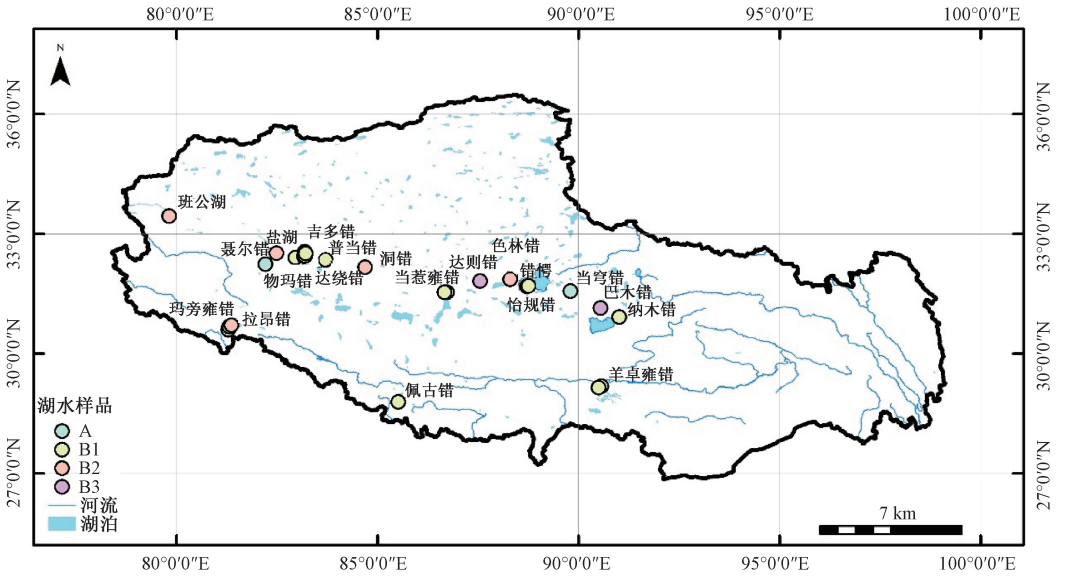

图 1　西藏高原湖泊分布图与湖泊采样点位置图

Fig. 1　Map of lake distribution and location of lake sampling points in Tibet Plateau

3　结果与讨论

3.1　湖水水化学特征

湖水水化学组成主要特征值如表 1 所示。湖水的 pH 值介于 8.30～9.95,平均值为 9.0,呈碱性,这可能与流域表层土壤都是碱性有关。受蒸发作用的影响,湖水的溶解性总固体(TDS)较高,介于 238.50～122 605.90 mg/L,平均值为 19 968.90 mg/L。从表 1 的变异系数看,西藏高原湖泊主要离子浓度具有较大的变异系数,反映湖泊水化学参数具有明显的空间差异性。

各湖泊水化学类型差异显著,按照舒卡列夫分类,由图 2 可知,8 个湖水样品的水化学类型为 Na-SO_4,6 个湖水样品的水化学类型为 Mg-HCO_3,5 个湖水样品的水化学类型为 Na-HCO_3,4 个湖水样品的水化学类型为 Mg-SO_4,3 个湖水样品的水化学类型为 Na-Cl,还有 1 个湖水样品的水化学类型为 Na-CO_3。

3.2　聚类分析

为进一步分析湖水水化学参数的空间分布特征,结合湖水水化学基本特征,采用 Q 型聚类分析,根据欧式距离 15 将研究区 27 组样品分为 2 大类,第一类(A 组)包括当穹错和聂耳错的 3 个湖水样品,其湖水样品的 TDS 含量非常高,平均值为 118 494.94 mg/L,由表 2 可知,除 HCO_3^-外,该组样品中所有离子的浓度均高于其他组;第二组(B

表 1　西藏高原湖水水化学参数统计结果

Tab. 1　Statistical results of chemical parameters of lake water in Tibet Plateau

	最小值/(mg·L^{-1})	最大值/(mg·L^{-1})	均值/(mg·L^{-1})	标注差	变异系数
pH	8.30	9.95	9.00	0.44	4.86
F^-	0.02	5.40	1.12	1.51	134.33
Cl^-	6.24	57 602.00	7 046.82	16 018.89	227.32
NO_3^-	0.08	112.00	10.06	29.68	294.94
SO_4^{2-}	24.50	45 792.00	3 925.06	9 078.15	231.29
Na^+	26.00	43 080.00	6 228.00	12 289.65	197.33
K^+	4.11	8 666.00	812.46	1 999.59	246.11
Mg^{2+}	21.60	6 432.00	510.94	1 217.60	238.30
Ca^{2+}	1.24	457.00	40.02	86.80	216.91
HCO_3^-	35.40	2 189.00	635.50	458.39	72.13
CO_3^{2-}	9.24	9 105.00	1 076.67	2 358.80	219.08
总碱度	162.00	15 288.00	2 317.19	3 956.88	170.76
TDS	238.50	122 605.90	19 968.90	37 371.52	187.15

表 2 聚类分析结果水化学参数统计值 (单位:mg/L)

Tab. 2 Statistical values of hydrochemical parameters of cluster analysis results

		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	总碱度	TDS	水化学类型
A		38 190.33	5 234.00	2 259.67	189.30	3.24	48 017.33	82.67	18 183.00	218.13	6 226.33	10 565.00	118 494.94	Na-Cl
	B1	1 103.56	111.88	266.01	11.43	1.20	712.66	0.67	1 407.75	688.31	294.73	1 056.19	4 254.05	$Na\text{-}SO_4$
	B2	4 556.33	614.24	394.22	37.58	0.24	5 442.26	2.14	3 675.25	278.50	151.55	481.17	15 013.06	Na-Cl
B	B2-1	58.00	6.36	35.58	20.80	0.35	36.14	0.44	46.63	233.00	17.38	220.00	338.16	$Mg\text{-}CO_3$
	B2-2	13 553.00	1 830.00	1 111.50	71.15	0.02	16 254.50	5.54	10 932.50	369.50	419.90	1 003.50	44 362.86	Na-Cl
	B3	4 295.00	379.50	197.50	52.05	0.02	1 078.00	0.08	3 426.00	1 910.00	2 383.00	5 541.50	12 766.15	$Na\text{-}CO_3$

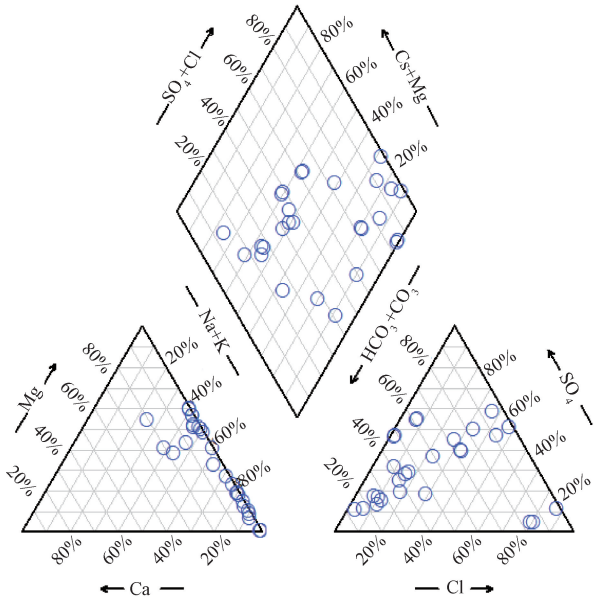

图 2 湖水样品 Piper 图

Fig. 2 Piper diagram of lake samples

组)由剩下的 24 个湖水样品组成,其 TDS 变化较大,介于 238.50 ~ 47 498.20 mg/L,平均值为 7 653.15 mg/L。该组样品根据欧式距离 7 可进一步分为 3 个亚类,其中 B1 组由 16 个湖水样品组成,该组样品的 TDS 的平均值最小,为 4 254.05 mg/L,该组样品的 Na^+、K^+、Ca^{2+}、Cl^-、NO_3^-、SO_4^{2-}浓度的平均值均最小;B2 组由 6 个湖水样品组成,虽然该组样品的平均 TDS 含量最高,但该组主要由 4 个 TDS 含量较低的湖水样品和 2 个 TDS 含量较高的湖水样品组成,因此该组进一步分为 B2-1(错愕、班公湖、恰规错、玛旁雍错)和 B2-2(洞错和盐湖),其中 B2-1 组除 Ca^{2+}和 NO_3^-外,其他离子浓度显著低于其他组,B2-2 组离子浓度与 A 组相似,不同之处在于 B2-2 组的样品 CO_3^{2-}浓度显著低于 A 组;B3 组由巴木错和达则错 2 个湖水样品组成。

为进一步确定水化学组成特征,结合聚类分析分组结果,将各个分组样品水化学组分做 Stiff 图。由图 3 可知,A 组样品中,Cl^-为主要的阴离子,Na^++K^+为主要的阳离子,水化学类型为 Na-Cl;B1 组样品中,SO_4^{2-}为主要的阴离子,Na^++K^+为主要阳离子,水化学类型为 $Na\text{-}SO_4$;B2-1 组样品中,HCO_3^-+CO_3^{2-}为主要的阴离子,Ca^{2+}和 Mg^{2+}为主要阳离子,水化学类型为 $Mg\text{-}CO_3$;B2-2 组样品中,Cl^-为主要的阴离子,Na^+为主要阳离子,水化学类型为 Na-Cl;B3 组样品中,HCO_3^-+CO_3^{2-}为主要的阴离子,Na^+为主要阳离子,水化学类型为 $Na\text{-}CO_3$。湖泊一般经历从淡水湖到咸水湖再到盐湖直至盐湖结束的演化过程,其水化学类型也遵循一定的演化规律:碳酸盐型-硫酸钠型-硫酸镁型-氯化物型。聚类分析的结果证明了青藏高原湖泊演化遵循从碳酸盐型到硫酸盐型再到氯化物型的正演化序列。

由图 1 可知,湖泊水化学特征具有显著的空间差异性。这种空间差异性主要受气候条件的地带性和湖泊补给来源的多样性影响,一般来说,氯化物型湖泊多分布在长期干旱区,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介于上述两类之间[19]。有研究表明错鄂、色林错、恰规错、达则错、洞错属青藏高原内流区,湖水主要依靠地表径流补给,而昂仁错属雅鲁藏布流域,受升温的影响,补给湖泊的冰川融水量增加[20]。B1 组的样品的 HCO_3^-所占比重大的原因则是湖泊受地下水补给时,地下水与空气中的 CO_2 反应生成 HCO_3^-。

3.3 淡水湖因子分析

5 个淡水湖分别为恰规错(Z-39)、错愕(Z-42)、玛旁雍错(Z-14)、班公湖(Z-16)和拉昂错(Z-12),除拉昂错外,其他均属于聚类分析结果的 B2-1 组。淡水湖阳离子质量浓度由大到小依次为:Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、K^+,阴离子的质量浓度由大到小依次为:HCO_3^-、Cl^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-}。在淡水湖中,HCO_3^-为主要阴离子,占阴离子总量的 63.42%,Na^+为主要的阳离子,占阳离子总量的 55.97%。

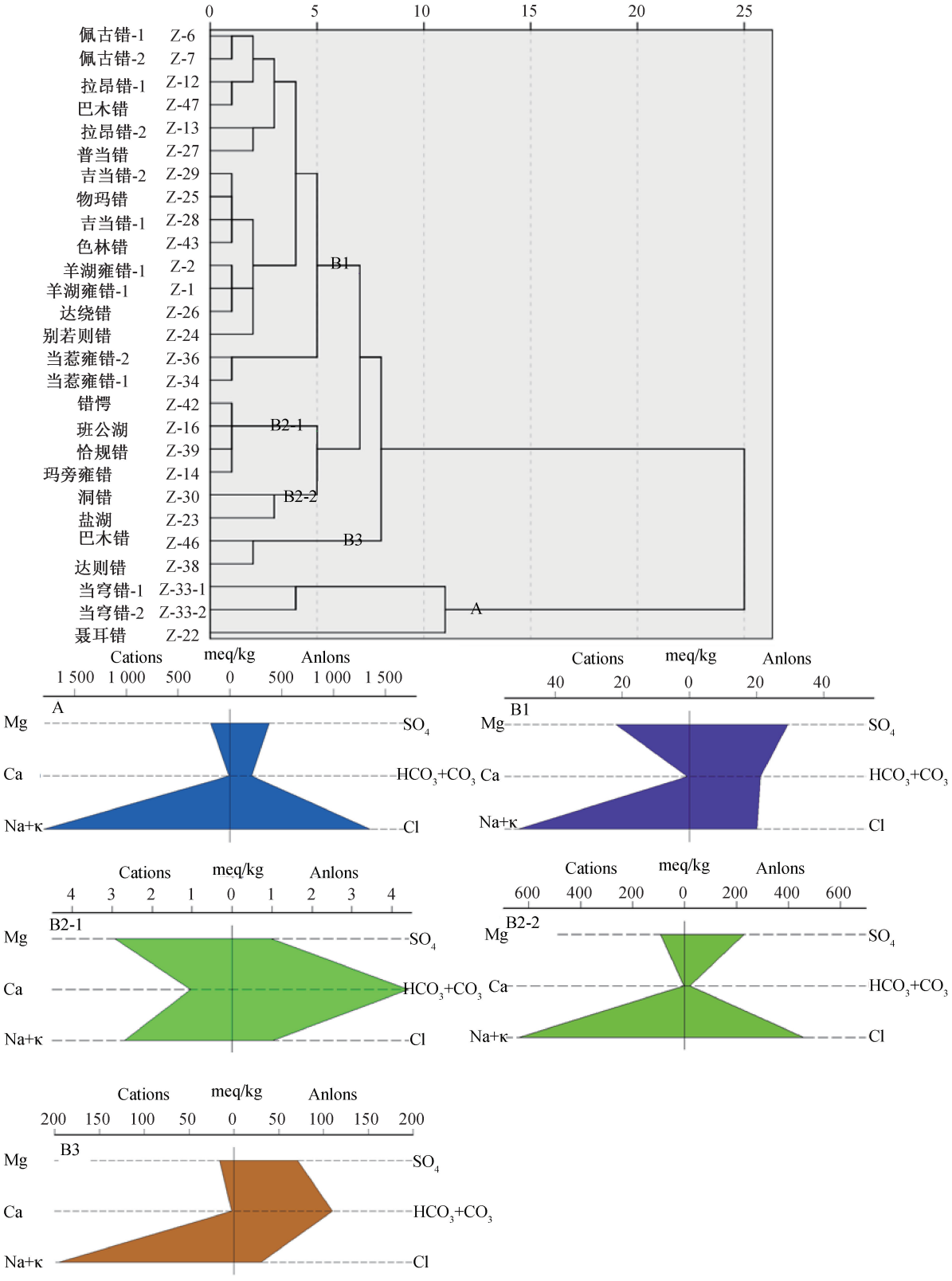

图 3　聚类分析树状图以及 Stiff 图

Fig. 3　Cluster analysis tree diagram and Stiff diagram

表3 淡水湖湖水各水化学组分的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient of hydrochemical composition in fresh lake water

	pH	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	总碱度	TDS
pH	1.00	0.99	0.25	−0.13	0.64	0.80	0.93	0.83	−0.78	0.88	0.95	0.92	0.80
F^-		1.00	0.23	−0.09	0.62	0.79	0.91	0.83	−0.68	0.90	0.95	0.93	0.80
Cl^-			1.00	−0.52	0.89	0.77	0.57	0.65	−0.21	0.54	0.45	0.50	0.75
NO_3^-				1.00	−0.55	−0.47	−0.41	−0.57	0.47	−0.48	−0.39	−0.44	−0.52
SO_4^{2-}					1.00	0.97	0.88	0.91	−0.56	0.84	0.80	0.82	0.96
Na^+						1.00	0.96	0.97	−0.65	0.93	0.91	0.93	1.00
K^+							1.00	0.97	−0.78	0.97	0.99	0.98	0.97
Mg^{2+}								1.00	−0.71	0.99	0.96	0.98	0.98
Ca^{2+}									1.00	−0.69	−0.78	−0.74	−0.65
HCO_3^-										1.00	0.98	1.00	0.96
CO_3^{2-}											1.00	1.00	0.93
总碱度												1.00	0.95
TDS													1.00

淡水湖湖水样品13项水化学指标间的Pearson相关系数矩阵如表3所示。除NO_3^-和Ca^{2+}外,所有水化学指标均与TDS具有强相关性,HCO_3^-和CO_3^{2-}与Na^+、K^+、Mg^{2+}具有强相关性,表明硅酸盐和碳酸盐矿物的溶解对淡水湖水化学特征具有显著的影响;Na^+与SO_4^{2-}具有强相关性,表明芒硝等硫酸盐矿物的溶解对淡水湖也具有影响;Ca^{2+}与其他阳离子、NO_3^-与其他阴离子之间具有显著的负相关性。上述离子间的相关性说明对于淡水湖来说,矿物溶解对湖水水化学影响显著,而人类活动影响较小。

对研究区5组水样的物理化学指标经过KMO度量及Bartlett球型度检验,进行3次迭代后获取了2个主因子,累积贡献率达91.778%,能很好地反映原始数据的基本信息。旋转因子荷载矩阵及主因子的方差贡献率见表4。第一主因子的方差贡献率为60.421%,其中pH、F^-、Na^+、K^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、HCO_3^-、CO_3^{2-}、总碱度的因子荷载较大,反映了碳酸盐和硅酸盐矿物溶解对湖水水化学特征的影响;第二主因子的方差贡献率为31.357%,其中Cl^-、SO_4^{2-}的因子荷载较大,反映了硫酸盐矿物和岩盐溶解对湖水水化学的影响。

计算淡水湖样品的因子得分可知,拉昂错的第一主因子得分较高,反映了其水化学特征主要受碳酸盐矿物和硅酸盐矿物溶解的影响,而班公湖第二主因子得分较高,反映了其水化学特征主要受硫酸盐矿物和岩盐溶解的影响,而其他三个湖泊则受两个主因子的共同影响。

表4 湖水样品化学成分的旋转因子荷载矩阵

Tab. 4 Matrix of rotated factor loadings of chemical parameters in lake water

	淡水湖组分		咸水湖组分			盐湖组分		
	1	2	1	2	3	1	2	3
pH	0.993	0.084	0.771	0.250	−0.062	0.919	−0.362	0.158
F^-	0.987	0.066	−0.098	−0.042	0.839	0.943	−0.053	0.151
Cl^-	0.149	0.928	0.034	0.979	0.040	0.978	−0.198	0.049
NO_3^-	−0.096	−0.770	−0.043	−0.034	0.858	−0.256	0.927	0.141
SO_4^{2-}	0.565	0.799	0.366	0.922	−0.078	0.981	0.079	0.108
Na^+	0.743	0.648	0.641	0.755	−0.014	0.329	0.245	0.899
K^+	0.889	0.456	0.602	0.777	−0.001	−0.263	0.950	0.167
Mg^{2+}	0.795	0.595	−0.197	0.858	−0.103	−0.132	0.973	0.176
Ca^{2+}	−0.761	−0.212	0.736	0.533	−0.143	−0.155	−0.821	0.522
HCO_3^-	0.861	0.474	0.939	−0.150	−0.087	0.958	−0.285	−0.011
CO_3^{2-}	0.935	0.348	0.951	0.223	−0.037	0.953	−0.302	0.000
总碱度	0.901	0.416	0.976	0.150	−0.049	0.843	0.462	0.265
TDS	0.749	0.653	0.544	0.835	−0.035	0.705	−0.531	0.023
特征值	7.855	4.076	5.128	4.859	1.495	6.968	4.289	1.292
贡献率/%	60.421	31.357	39.447	37.374	11.499	53.600	32.992	9.938
累计贡献率/%	60.421	91.778	39.447	76.821	88.320	53.600	86.592	96.531

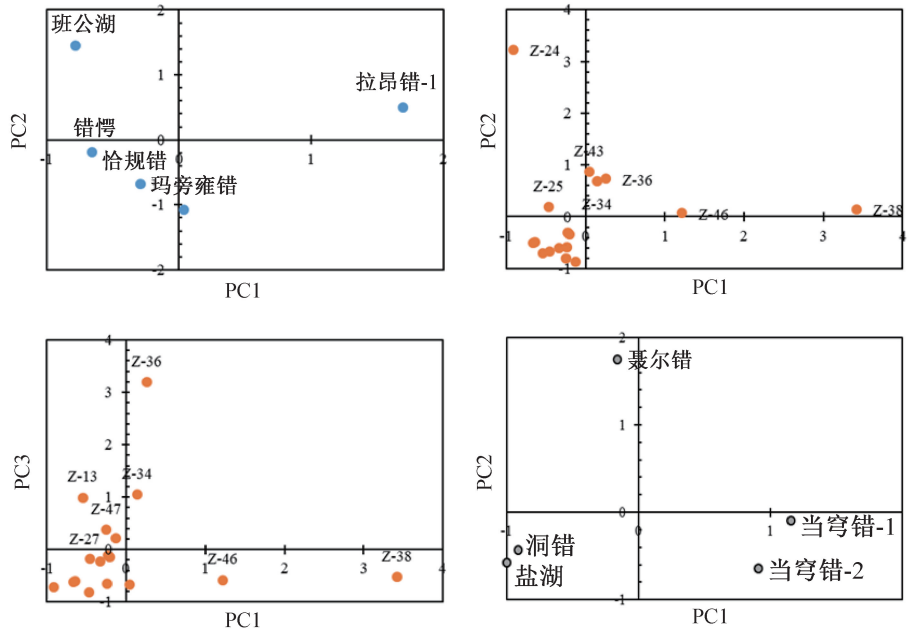

图 4　淡水湖、咸水湖和盐湖样品主因子得分图

Fig. 4　Factor scores of principal component analysis of lake water samples

3.4　咸水湖因子分析

17 个咸水湖样品的阳离子质量浓度由大到小依次为:Na^+、Mg^{2+}、K^+、Ca^{2+},阴离子的质量浓度由大到小依次为:Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、CO_3^{2-}。在咸水湖中,Cl^-和 SO_4^{2-}为主要阴离子,占阴离子总量的 29.78%和 21.97%,Na 占阳离子的绝对优势,占阳离子总量的 81.56%。

咸水湖湖水样品 13 项水化学指标间的 Pearson 相关系数矩阵如表 5 所示,Na^+、K^+、Ca^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、CO_3^{2-}与 TDS 具有强相关;Na^+、K^+、Ca^{2+}与 CO_3^{2-}和总碱度具有强相关,而与 HCO_3^-的相关性不明显,反映了碳酸盐矿物的影响;所有阳离子(Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+、K^+)与 SO_4^{2-}的相关性均较强,反映了硫酸盐矿物的影响;Mg^{2+}、Na^+、K^+与 Cl^-的相关性较强,反映了岩盐矿物的影响;NO_3^-与所有离子的相关性均较低。上述离子间的相关性说明对于咸水湖来说,硫酸盐矿物溶解以及蒸发盐的溶解对咸水湖水化学影响显著,而人类活动影响较小。

对研究区 17 组水样的物理化学指标经过 KMO 度量及 Bartlett 球型度检验,在进行 4 次迭代后获取了 3 个主因子,累积贡献率达 88.32%,

表 5　咸水湖湖水各水化学组分的相关系数

Tab. 5　Correlation coefficient of hydrochemical composition in salt lake water

	pH	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	总碱度	TDS
pH	1.00	−0.04	0.23	−0.19	0.52	0.64	0.70	0.15	0.54	0.66	0.76	0.76	0.61
F^-		1.00	−0.04	0.46	−0.15	−0.13	−0.09	−0.05	−0.23	−0.18	−0.12	−0.14	−0.13
Cl^-			1.00	0.02	0.91	0.78	0.79	0.76	0.55	−0.10	0.23	0.16	0.85
NO_3^-				1.00	−0.11	−0.05	−0.07	−0.13	−0.16	−0.09	−0.08	−0.08	−0.07
SO_4^{2-}					1.00	0.94	0.95	0.70	0.77	0.21	0.55	0.49	0.98
Na^+						1.00	0.98	0.46	0.90	0.49	0.77	0.73	0.99
K^+							1.00	0.51	0.82	0.46	0.72	0.68	0.98
Mg^{2+}								1.00	0.26	−0.28	0.06	−0.01	0.59
Ca^{2+}									1.00	0.59	0.86	0.82	0.86
HCO_3^-										1.00	0.83	0.89	0.39
CO_3^{2-}											1.00	0.99	0.70
总碱度												1.00	0.65
TDS													1.00

能很好地反映原始数据的基本信息。旋转因子荷载矩阵及主因子的方差贡献率见表4。第一主因子的方差贡献率为39.447%,其中pH、Ca^{2+}、HCO_3^-、CO_3^{2-}、总碱度的因子荷载较大,反映了碳酸岩矿物溶解对湖水水化学的影响;第二主因子的方差贡献率为37.374%,其中Cl^-、SO_4^{2-}、Na^+、K^+、Mg^{2+}的因子荷载较大,反映了硫酸盐矿物和岩盐的溶解对湖水水化学的影响。第三主因子的方差贡献率为11.499%,其中F^-、NO_3^-的因子荷载较大,反映了人类活动对湖水水化学的影响。

计算咸水湖17个水样的3个主因子的因子得分,由图4可知,巴木错(Z-46)和达则错(Z-38)的第一主因子得分较高,表明其水化学特征主要受碳酸岩矿物溶解的影响;别若则错(Z-24)、色林错(Z-43)和当惹雍措(Z-36、Z-34)的第二主因子得分较高,表明其水化学特征主要受硫酸盐矿物和岩盐溶解的影响;当惹雍措(Z-36、Z-34)、拉昂错(Z-13)的第三主因子得分较高,表明其受人类活动影响较强;其他咸水湖则受三个主因子的综合影响。

3.5 盐湖主成分分析

5个盐湖分别为洞错(Z-30)、盐湖(Z-23)、当穹错(Z-33-1/2)和聂耳错(Z-22),其水样的阳离子质量浓度由大到小依次为:Na^+、K^+、Mg^{2+}、Ca^{2+},阴离子的质量浓度由大到小依次为:Cl^-、SO_4^{2-}、CO_3^{2-}、HCO_3^-、NO_3^-。Cl^-和Na^+占阴、阳离子的绝对优势,分别占阴阳离子总量的78.82%和85.70%。

盐湖湖水样品13项水化学指标间的Pearson相关系数矩阵如表6所示。Cl^-、HCO_3^-、CO_3^{2-}与TDS具有强相关性,HCO_3^-、CO_3^{2-}和总碱度与SO_4^{2-}具有强相关性,K^+与Mg^{2+}具有强相关性,且两者与NO_3^-具有强相关性,SO_4^{2-}与F^-和Cl^-具有强相关性。与淡水湖和咸水湖显著区别的是,盐湖的水化学指标的相关性表现为阴离子与阴离子具有强关系,阳离子与阳离子之间具有相关性,而阴阳离子之间的相关性不明显。

对研究区5组水样的物理化学指标经过KMO度量及Bartlett球型度检验,进行6次迭代后获取3个主成分,累积贡献率达96.531%,能很好地反映原始数据的基本信息。旋转因子荷载矩阵及主因子的方差贡献率见表4。第一主因子的方差贡献率为53.6%,其中pH、F^-、Cl^-、NO_3^-、Na^+、CO_3^{2-}、总碱度的因子荷载较大,反映了岩盐矿物及硅酸盐矿物溶解对湖水水化学的影响。第二主因子的方差贡献率为32.992%,其中SO_4^{2-}、Mg^{2+}、Ca^{2+}、HCO_3^-的因子荷载较大,反映了硫酸盐矿物和碳酸盐矿物溶解对湖水水化学的影响。第三主因子的方差贡献率为9.938%,仅K^+的因子荷载较大,无较大意义。

计算盐湖水样对3个主因子的因子得分,由于第三个主因子的方差贡献率相对于前两个主因子较小,且仅对K^+具有高荷载,因此本文不分析第三主因子的因子得分。由图4可知,当穹错的第一主因子得分较高,表明其主要受岩盐矿物溶解的影响;聂耳错的第二主因子得分较高,表明其受硫酸盐矿物和碳酸盐矿物溶解的影响较为显著;洞错和盐湖则受两个主因子的综合影响。

表6 盐湖湖水各水化学组分的相关系数

Tab. 6 Correlation coefficient of hydrochemical composition in saline water

	pH	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	总碱度	TDS
pH	1.00	0.91	0.98	-0.55	0.89	0.36	-0.56	-0.45	0.24	0.98	0.99	0.65	0.85
F^-		1.00	0.92	-0.34	0.98	0.39	-0.27	-0.13	0.03	0.91	0.91	0.83	0.56
Cl^-			1.00	-0.41	0.94	0.33	-0.44	-0.32	0.03	0.99	0.99	0.74	0.82
NO_3^-				1.00	-0.20	0.31	0.97	0.94	-0.69	-0.50	-0.52	0.23	-0.56
SO_4^{2-}					1.00	0.42	-0.16	-0.02	-0.14	0.91	0.91	0.90	0.59
Na^+						1.00	0.30	0.34	0.19	0.24	0.24	0.62	0.20
K^+							1.00	0.99	-0.65	-0.53	-0.54	0.26	-0.69
Mg^{2+}								1.00	-0.67	-0.41	-0.42	0.39	-0.64
Ca^{2+}									1.00	0.07	0.10	-0.36	0.26
HCO_3^-										1.00	1.00	0.67	0.84
CO_3^{2-}											1.00	0.66	0.85
总碱度												1.00	0.32
TDS													1.00

4　结论

本文以青藏高原南部湖水为研究对象,分析了淡水湖、咸水湖和盐湖三种类型湖水的主要化学组分特征,研究区湖水均呈碱性,湖水的溶解性总固体整体含量较高,水化学组分浓度变化范围较大。无论哪种湖泊,湖水阳离子中 Na^+都占绝对优势,淡水湖中 Mg^{2+}也具有优势,而咸水湖和盐湖相较于淡水湖而言,Ca^{2+}含量下降,K^+含量上升;阴离子中,HCO_3^-在淡水湖中占主导地位,而 Cl^-在盐湖中占主导地位。

因子分析提取了影响淡水湖水化学特征的 2 个主因子,分别揭示了碳酸盐和硅酸盐矿物溶解、硫酸盐矿物和岩盐溶解对淡水湖湖水水化学特征的影响;提取了影响咸水湖水化学特征的 3 个主因子,分别揭示了碳酸岩矿物溶解、硫酸盐矿物和岩盐的溶解以及人类活动对咸水湖湖水水化学特征的影响;提取了影响盐湖水化学特征的 2 个主因子,分别揭示了岩盐矿物及硅酸盐矿物溶解、硫酸盐矿物和碳酸盐矿物溶解对盐湖湖水水化学的影响。

基于聚类分析探讨了湖泊水化学特征的空间分布,结果显示受气候条件和补给条件的影响,青藏高原湖水水化学特征具有显著的空间差异性,聚类分组的结果反映了湖泊演化过程。

参考文献:

[1]韩 美,李艳红,张维英,等. 中国湖泊与环境演变研究的回顾与展望[J]. 地理科学进展, 2003, 22(2): 125-132.

[2]胡汝骥,姜逢清,王亚俊,等. 亚洲中部干旱区的湖泊[J]. 干旱区研究,2005,22(4):424-430.

[3]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[J]. 第四纪研究, 2002, 22(2): 97-104.

[4]严谷芬,路 萍,李 俊,等. 程海水化学基本特征研究[J]. 环境科学导刊,2015,34(4):1-8.

[5]PU T, HE Y, ZHU G, et al. Hydrochemical Characteristics of Typical Rivers in a Temperate Glacier Basin, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 68(3): 615-621.

[6]GAO Z, LIN Z, NIU F, et al. Hydrochemistry and Controlling Mechanism of Lakes in Permafrost Regions along the Qinghai-Tibet Engineering Corridor, China[J]. Geomorphology, 2017, 297:159-169.

[7]WANG L H, DONG Y H, XU Z F. A Synthesis of Hydrochemistry with an Integrated Conceptual Model for Groundwater in the Hexi Corridor, Northwestern China[J]. J Asian Earth Sci, 2017, 146:20-29.

[8]KUMAR M, RAMANATHAN A, KESHARI A K. Understanding the Extent of Interactions between Groundwater and Surface Water Through Major Ion Chemistry and Multivariate Statistical Techniques[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(2): 297-310.

[9]GUGGENMOS M R, DAUGHNEY C J, JACKSON B M, et al. Regional-scale Identification of Groundwater-surface Water Interaction Using Hydrochemistry and Multivariate Statistical Methods, Wairarapa Valley, New Zealand[J]. Hydrol Earth Syst Sc, 2011, 15(11): 3383-3398.

[10]MACHIWAL D, JHA M K. Identifying Sources of Groundwater Contamination in a Hard-rock Aquifer System Using Multivariate Statistical Analyses and GIS-based Geostatistical Modeling Techniques[J]. J Hydrol, 2015, 4:80-110.

[11]WAN W, LONG D, HONG Y, et al. A Lake Data Set for the Tibetan Plateau from the 1960s, 2005, and 2014 [J]. Nature, 2016, 3:160039.

[12]戴玉凤,高 杨,张国庆,等. 2003—2011 年青藏高原佩枯错相对水量变化及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土,2013,35(3):723-732.

[13]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[J]. 冰川冻土,2005,27(6):783-792.

[14]孙大鹏,唐 渊,许志强,等. 青海湖湖水化学演化的初步研究[J]. 科学通报,1991,36(15):1172-1174.

[15]张 琨,蓝江湖,沈振兴,等. 青海湖流域水化学分析及水质初步评价[J]. 地球环境学报,2010,1(3):162-168.

[16]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[J]. 冰川冻土,2012,34(4):950-958.

[17]王君波,朱立平,鞠建廷,等. 西藏纳木错东部湖水及入湖河流水化学特征初步研究[J]. 地理科学,2009, 29(2):288-293.

[18]王佳音,祁昌炜,朱进守,等. 西藏高原湖泊的基本特征及水化学特征分析[J]. 绿色科技,2017,20:153-154.

[19]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[J]. 湖泊科学,2010,22(5):774-782.

[20]闫露霞,孙美平,姚晓军,等. 青藏高原湖泊水质变化及现状评价[J]. 环境科学学报,2018,38(3):900-910.

(责任编辑　王利君)