

青藏高原盐湖水化学及其矿物组合特征

郑绵平, 刘喜方

中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心, 国土资源部盐湖资源与
环境研究重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037

内容提要: 青藏高原湖泊的矿化度与其湖泊演化所处的自然环境, 特别是与气候条件关系密切, 根据取得盐湖数量和卫片解译, 本区湖泊矿化度在空间上变化的总趋势是由北、西北向南、东南趋向下降, 大体上与现代高原年干燥度(年蒸发量/年降水量)呈同步变化。高原盐湖的 pH 值既与水化学类型有关, 又与湖水矿化度有关, 即由碳酸盐型→硫酸钠亚型→硫酸镁亚型→氧化物型, 其 pH 值趋于下降, 而湖泊的 pH 值与矿化度大体呈反相关。根据库尔纳可夫—瓦良什科分类法及作者对碳酸盐型的细分, 对青藏高原盐湖水化学进行了全面细致划分, 从而取得了清晰的规律性认识: 本区盐湖水化学具有南北分带, 东西分区的特点。不同的盐湖水化学类型, 具有不同的专属性, 碳酸盐型代表性成矿组合为硼砂(三方硼砂)或硼砂—扎布耶石, 以及碱—芒硝组合; 硫酸钠亚型代表性成矿组合为芒硝(无水芒硝)—石盐以及镁硼酸盐(库水硼镁石、柱硼镁石等)—钠硼解石—芒硝; 硫酸镁亚型代表性成矿组合为硫酸镁盐(泻利盐、白钠镁矾)—石盐、镁硼酸盐—芒硝、芒硝—软钾镁矾—石盐以及大量石膏; 氯化物型代表性成矿组合则为光卤石—水氯镁石—石盐、光卤石—石盐, 个别盐湖共生南极石。由此可见, 青藏高原各类型盐湖矿物组合基本上具有冷相组合特征, 芒硝及与其共生的冷相盐类矿物, 可成为研究古气候变化的重要标志物。目前已检出青藏高原盐湖水含有 59 种元素, 其中 B 与 Li、Cs、K、Rb 有密切共生关系, 其含量随湖水矿化度增长大致呈正相关; B、Li、Cs、K、Rb 最高正异常落在羌南碳酸盐型带(I₂)西段—昂拉陵湖区为中心地区; 并与本区中新世火山沉积岩系和地热水 B、Li、Cs、Rb 等高温值区并行不悖。以上有力证明 B、Li、Cs 等特殊元素物质与深部来源有关。据近期大量地球物理和火山岩岩石地球化学研究, 其成因与印度—欧亚陆陆碰撞引起的重熔岩浆作用有密切成因联系。南美科迪勒拉高原原锂(铯)盐湖即生成于活动大陆边缘, 两者均说明全球特定的活动构造带是造成天然水 B、Li、Cs(K、Rb)高丰度及其成矿作用的主因。

关键词: 青藏高原; 盐湖; 水化学类型分带; 盐湖矿物组合; 硼、锂、钾、铯、铷; 物质来源

本文作者自 1956 年开始从事该区盐湖调查研究迄今, 到目前已收集各类盐湖 550 个水化学分析结果, 结合高原地质构造特征, 对本区盐湖水化学及矿物组合特征进行^①。

青藏高原盐湖位于全球北半球盐湖带东端, 是全球海拔最高的盐湖区, 如位于西藏高原中、西部的盐湖一般湖面海拔在 4600~5100m, 其中窝尔巴错盐湖海拔达 5194m。而且青藏高原盐湖以其盐湖组分独特, 规模大而为世界所瞩目。本文作者自 1956 年开始从事该区盐湖调查研究迄今, 到目前已收集各类盐湖 550 个水化学分析结果, 结合高原地质构造特征, 对本区盐湖水化学特征进行 (Zheng Mianping, 1997)。

1 盐湖卤水的矿化度和 pH 值

青藏高原湖泊的矿化度与其湖泊演化所处的自然环境, 特别是晚第四纪以来的气候条件关系密切, 根据取得盐湖数据和卫片解译, 本区湖泊矿化度在空间上变化的总趋势是由北、西北向南、东南趋向下降, 大体上与现代高原年降水量和年干燥度(年蒸发量/年降水量)呈同步变化(图 1、图 2)。

表 1 所示: 如位于高原北部的柴达木盆地(包括 IV3 和 IV4 水化学亚带), 年降水量 25~75mm、年干燥度可达 25~150, 该盆地计有 28 个盐湖, 其 IV3 和 IV4 水化学亚带平均矿化度分别为 287.14g/L 和 352.58g/L; 而高原南部 I₂ 水化学亚带年降水量 100

注: 本文为国家大地调项目(编号 1212010818056、1212010630109、1212010818057)和国家自然科学基金重点项目(编号 40531002)资助的成果。

收稿日期: 2010-08-28; 改回日期: 2010-09-29; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 郑绵平, 男, 1934 年生。研究员, 中国工程院院士。从事盐湖学与盐类地质矿床研究。Email: zhengmp2010@126.com。

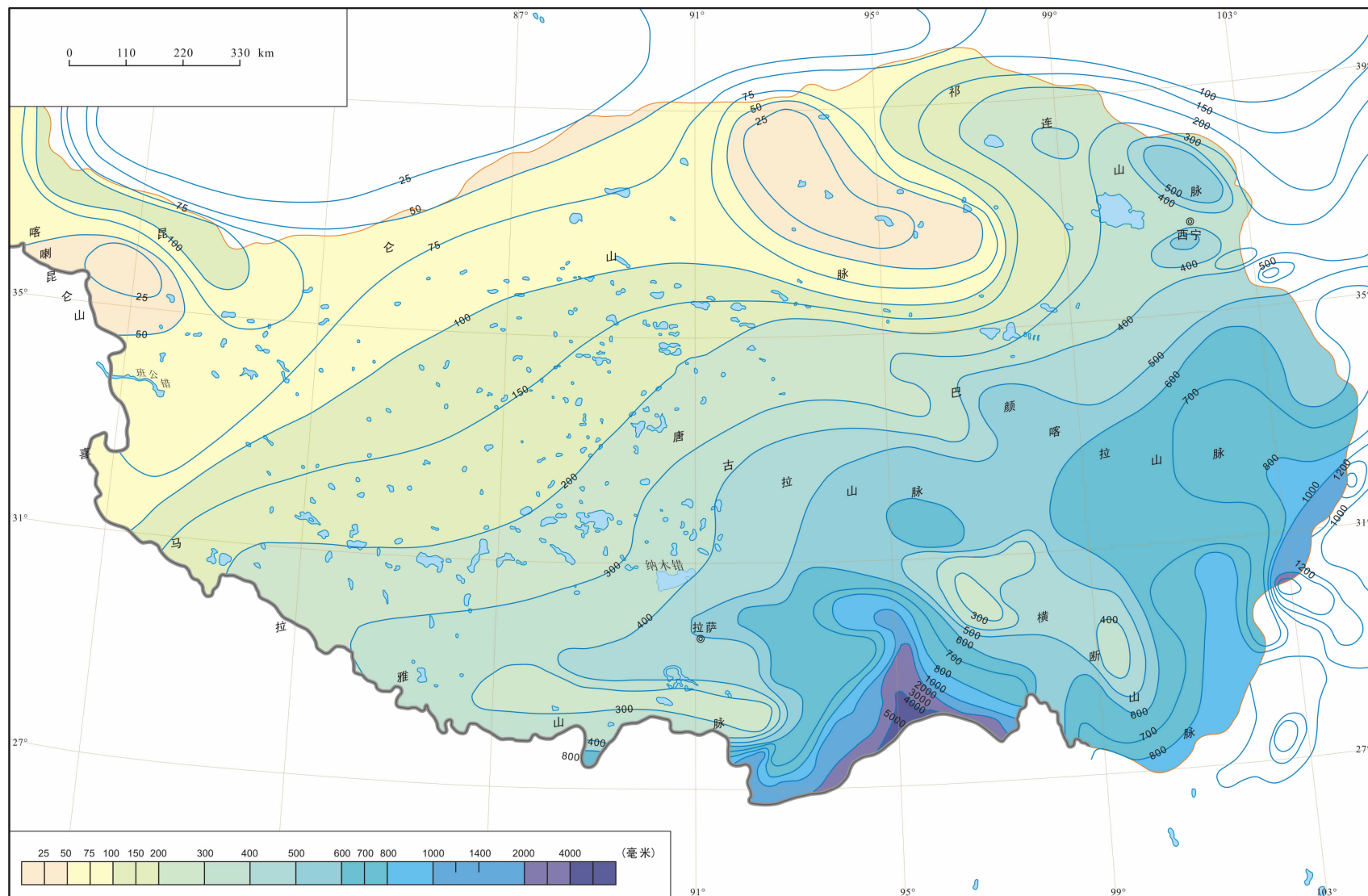


图 1 青藏高原全年降水量图(孙鸿烈等,1990)

Fig.1 Annual precipitation of the Qinghai-Tibet Plateau (Sun Honglie et al. , 1990)

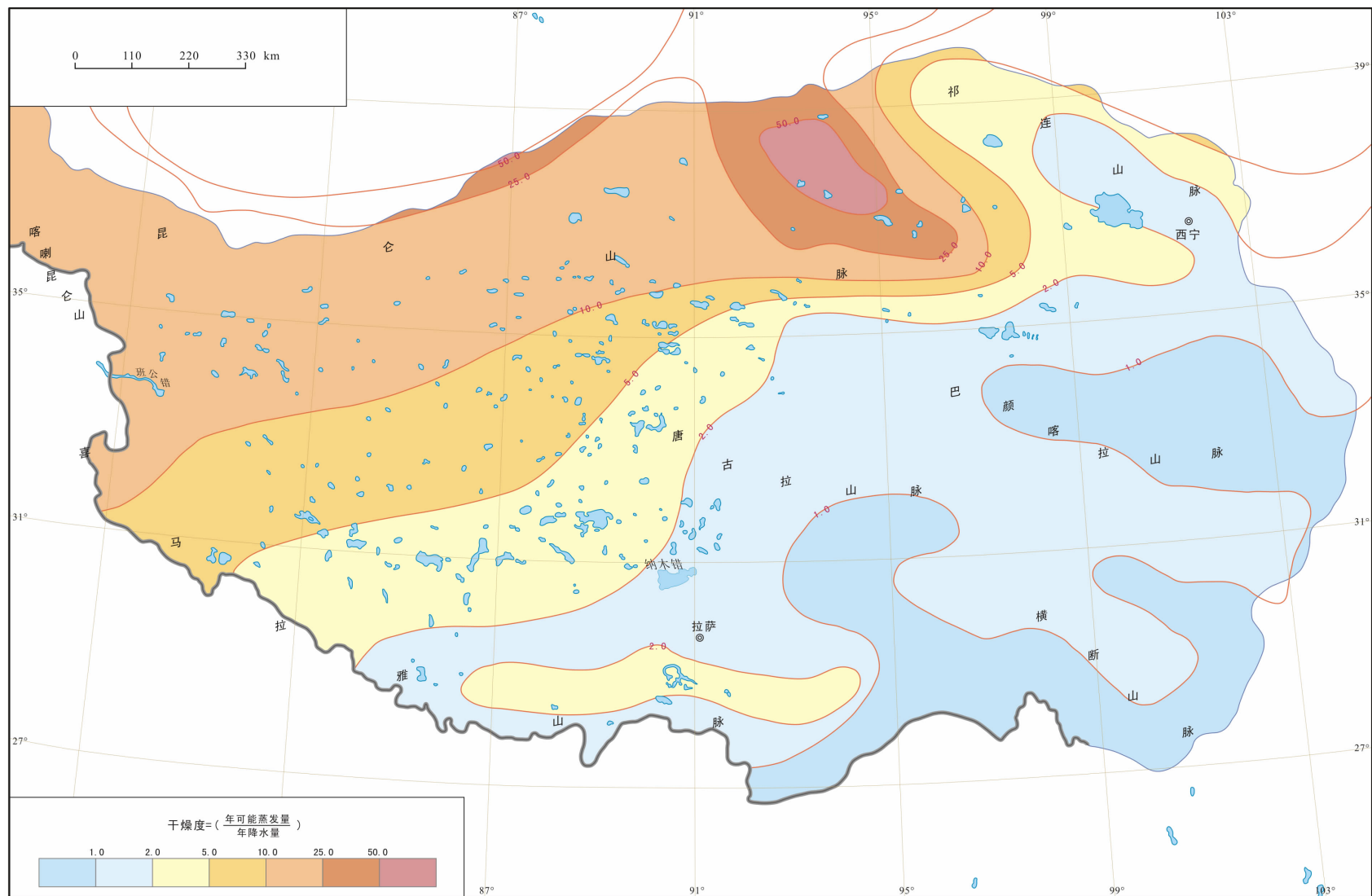


图 2 青藏高原年干燥度(孙鸿烈等,1990)

Fig.2 Annual aridity of the Qinghai-Tibet Plateau (Sun Honglie et al. , 1990)

表 1 青藏高原 I - V 湖泊水化学带湖水 pH 值与矿化度平均值(g/L)^①

Table 1 Averages of pH values and salinities of lake water in the I - V hydrochemical zones of lakes on the Qinghai-Tibet Plateau *

分带 水类型		I		II	III	IV				V
		I ₁	I ₂			IV ₁	IV ₂	IV ₃	IV ₄	
盐湖	pH	/	9.07(22)	8.21(26)	7.78(12)		7.62(1)	7.35(16)	6.64(10)	7.90(1)
	盐度	135(2)	155(34)	192.14(33)	145.85(13)	125.98(4)	261.32(1)	287.14(18)	352.68(10)	240.14(2)
咸水湖	pH	9.13(13)	9.405(26)	9.020(17)	8.35(7)		8.10(3)	8.95(1)		8.25(4)
	盐度	3.6(13)	13.52(42)	13.76(23)	9.56(10)	2.68(1)	18.36(3)	18.28(3)		5.04(4)
淡水湖	pH	7.6(5)	8.6(5)	8.61(2)			7.95(1)			7.46(8)
	盐度	0.26(6)	0.58(11)	0.70(4)		0.73(1)	0.89(1)			0.27(12)
各种湖泊	pH	8.7(18)	9.21	8.61	8.07		7.89	8.15	6.64	7.87
	盐度	15.20(21)	12.65	68.87	77.71	43.13	93.52	152.71	352.68	27.88(18)

① 据 Zheng Mianping(1997)作了补充。

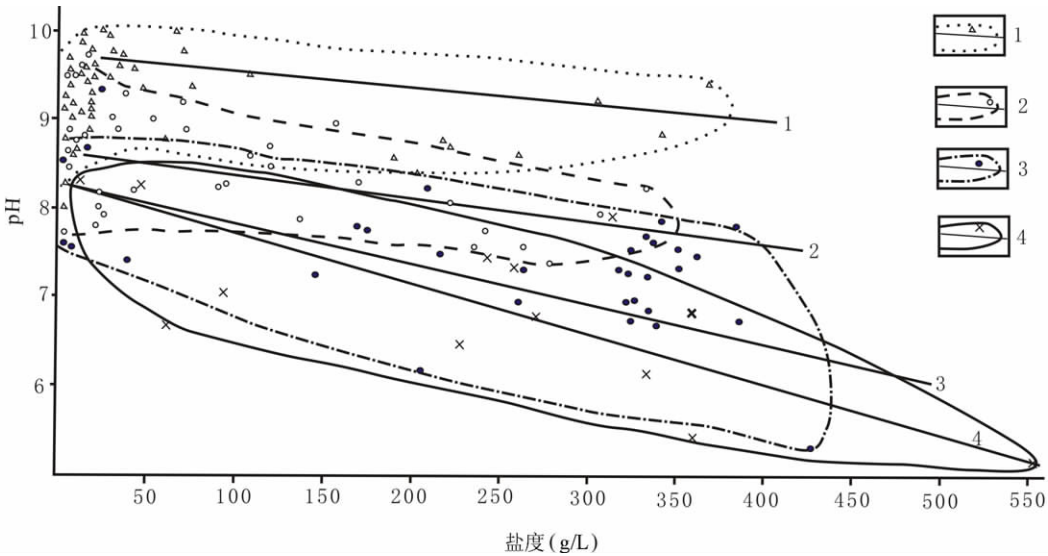


图 3 青藏高原湖泊盐度和水化学类型与 pH 相关图

Fig. 3 Relation of pH to salinity and hydrochemical type of lakes on the Qinghai-Tibet Plateau

1—碳酸盐型;2—硫酸钠亚型;3—硫酸镁亚型;4—氯化物型

1—Carbonate type;2—sodium sulfate subtype;3—magnesium sulfate subtype;4—chloride type

~400mm、年干燥度 2~10,该区 34 个盐湖平均矿化度为 155g/L。

青藏高原盐湖卤水的 pH 值,一般 7~9,呈中、碱性,由柴达木盆地至藏南 pH 值递增(表 1);高原湖泊的 pH 值既与水化学类型有关,又与湖水盐度有关,即由碳酸盐型→硫酸钠亚型→硫酸镁亚型→氯化物型,其 pH 值趋于下降,而湖泊的 pH 值与盐度大体呈反相关(图 3、表 1)。

2 卤水水化学类型

地学和生物学一般均以盐湖中主要离子作为盐湖化学类型划分的依据,通常盐湖中常见的离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 和

HCO_3^{-} 。本文采用库尔纳可夫—瓦良什科分类(表 2),划分为氯化物型、硫酸镁亚型、硫酸钠亚型、碳酸盐型。

对一般碳酸盐类型,决定性的平衡体系是: Na^{+} (K^{+} 、 Li^{+})/ CO_3^{2-} , HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , $\text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$, 其代表性判别系数是 $K_1 = \frac{\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaHCO}_3}{\text{Na}_2\text{SO}_4}$, 式中 Na_2CO_3 等均表示湖水中每一种盐的百分含量或 mg/L;由于其总碱度(Kc)的差别划分为强度亚型,该亚型由于 $\text{Kc}(\text{Kc} = (\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaHCO}_3)/\text{总盐量} \times 100\%)$ 式中化合物和总盐量含量为重量百分数或 mg/L)高,而有大量碱金属硫酸盐析出,石盐分散沉积或相对比例较小,中度亚型,除碱金属碳酸盐外有部分碱金属和碱土金属碳酸盐类型,有相

表 2 盐湖水化学类型分类

Table 2 Chemical types of classification of saline lakes

基于 湖水 化学 组分	特征系数 *		K _c (%)	K _{n₁}	K _{n₂}	K _{n₃}	K _{n₄}	K _I	K _{II} ¹	K _{II} ²	K _{III}
	碳酸盐型	强	>29	>>1	>>1	>>1	>>1	≥1	∞	—	—
		中	8~29	>>1	>>1	>>1	>>1	≥1	∞	—	—
		弱	0.1~8	>>1	>>1	>>1	>>1	≤1	∞	—	—
	硫酸盐型	硫酸钠	0~0.1	≥1	≥1	>>1	>/<1	0	n	∞	—
		硫酸镁	—	≤1	≤1	>>1	>/<1	—	0	n	0
氯化物型		—	<<1	<<1	≤1	<1	—	—	0	n	

注: * $K_c = \frac{NaHCO_3 + Na_2CO_3}{\text{总盐量}} \times 100\%$ (calculated with wt. % or mg/1 of salt); $K_{n1} = \frac{CO_3 + HCO_3}{Ca + Mg}$;
 $K_{n2} = \frac{CO_3 + HCO_3 + SO_4}{Ca + Mg}$; $K_{n3} = \frac{SO_4}{Ca}$ and $K_{n4} = \frac{CO_3 + HCO_3}{Ca}$; (calculated with ion equivalents);
 $K_I = \frac{Na_2CO_3 + NaHCO_3}{Na_2SO_4}$; $K_{II}^1 = \frac{Na_2SO_4}{MgSO_4}$; $K_{II}^2 = \frac{MgSO_4}{MgCl_2}$; and $K_{III} = \frac{MgCl_2}{CaCl_2}$ (calculated with % or mg/L of salt)。

当数量石盐稳定沉积;弱度亚型,罕有单独碱金属碳酸盐沉积,有大量石盐稳定沉积。对硫酸盐型而言,决定性的平衡体系是:Na⁺(K⁺、Li⁺)/Mg²⁺(Ca²⁺)/Cl⁻,SO₄²⁻,—H₂O,该类型划分为硫酸钠亚型和硫酸镁亚型,前者代表性判别系数是K_{II}¹= $\frac{Na_2SO_4}{MgSO_4}$,式中Na₂SO₄和MgSO₄表示湖水中这些盐的百分含量或mg/L;后者具有代表性判别系数是库尔纳可夫系数:K_{II}²= $\frac{MgSO_4}{MgCl_2}$,式中MgSO₄和MgCl₂同样表示湖水中这些盐的重量百分含量或mg/L。氯化物型有代表性判别系数是:K_{III}= $\frac{MgCl_2}{CaCl_2}$,式中MgCl₂和CaCl₂亦为湖水中这些盐的重量百分数或mg/L。

除了可用上述盐类化合物形式表示外,也可用当量离子形式表示:K_{n1}= $\frac{ECO_3^{2-} + EHCO_3^-}{ECa^{2+} + EMg^{2+}}$,式中ECO₃²⁻等均为该离子的当量含量。

并按本文笔者研究(Zheng Mianping et al., 1997),将碳酸盐型按其总碱度比值([K_c= $\frac{Na_2CO_3 + NaHCO_3}{\text{总盐量}} \times 100\%$],以mg/L计算)和盐矿物组合不同,再分为三种亚型(重度碳酸盐亚型,中度碳酸盐亚型,弱度碳酸盐亚型)。

3 青藏高原盐湖水化学分带性与矿物组合

据上述分类法,重新修编青藏高原盐湖水化学图(图4)(郑绵平,2001a)[●],从而取得了清晰的规律性认识:本区盐湖水化学类型分布可分东西两部分,划分四带一区:东部呈一区块,西部具有南北分带;由南往北,为低矿化度碳酸盐型亚带(I₁)、高矿化

度碳酸盐型亚带(I₂)、硫酸钠亚型亚带(II₁)、碳酸盐—硫酸钠亚型亚带(II₂)、含氯化物型硫酸镁亚型带(III)和库木库里硫酸钙亚型亚带(IV₁)、柴达木周缘硫酸钠亚型亚带(IV₂)、柴达木盆地硫酸镁亚型亚带(IV₃)、氯化物型亚带以及硫酸钠亚型外泄亚区(V)。

I带:以碳酸盐型为主,以冈底斯山—念青唐古拉山为界,再分两个亚带,南亚带以广义盐湖(ω(NaCl_{eq})≥0.30%)、淡水湖为主,个别小型湖泊为盐湖(ω(NaCl_{eq})>3.5%),北亚带以广义盐湖和狭义盐湖为主(Zheng Mianping, 2001b),

南亚带以相对高含硼为特征,可以公珠错为例,其水化学类型属弱度碳酸盐型,矿化度5.4g/L,但B₂O₃达1010.3mg/L(表3),其 $\frac{B_2O_3 \times 10^3}{\Sigma \text{盐}}$ 达187(表4),北亚带盐湖盐度较南亚带高,在青藏高原诸水化学中,以锂、硼、铯、铷含量高为特征,兹列举扎布耶盐湖和班戈湖卤水成分为代表,列如表4;不但锂、硼、钾、铯、铷特征系数高,而且Mg/Li比也很低,加工提取时,基本上可不必考虑除镁流程。

上述盐湖相应的代表性成矿组合为硼砂(三方硼砂)以及硼砂—扎布耶石(Li₂CO₃)组合以及碱金属碳酸盐—芒硝组合(表5)。关于青藏高原盐类矿物研究,中国矿床矿物学家作过大量工作,首先进行了严谨的光性矿物学研究,然后挑选单矿物进行化学分析、XRD、差热分析,以至红外和SEM分析,一些新矿物还进行化学全分析、晶体结构分析,如作者等发现的扎布耶石(天然碳酸锂)还作了结构分析(郑绵平等, 1987; Lin Yueying et al., 1990)。作者等还鉴定出西藏盐湖25个盐类矿物(郑绵平等, 1981)。限于本文篇幅,读者请参阅有关文献(专著:谢先德、郑绵平、刘来保, 1965; 谢先德、查福标,

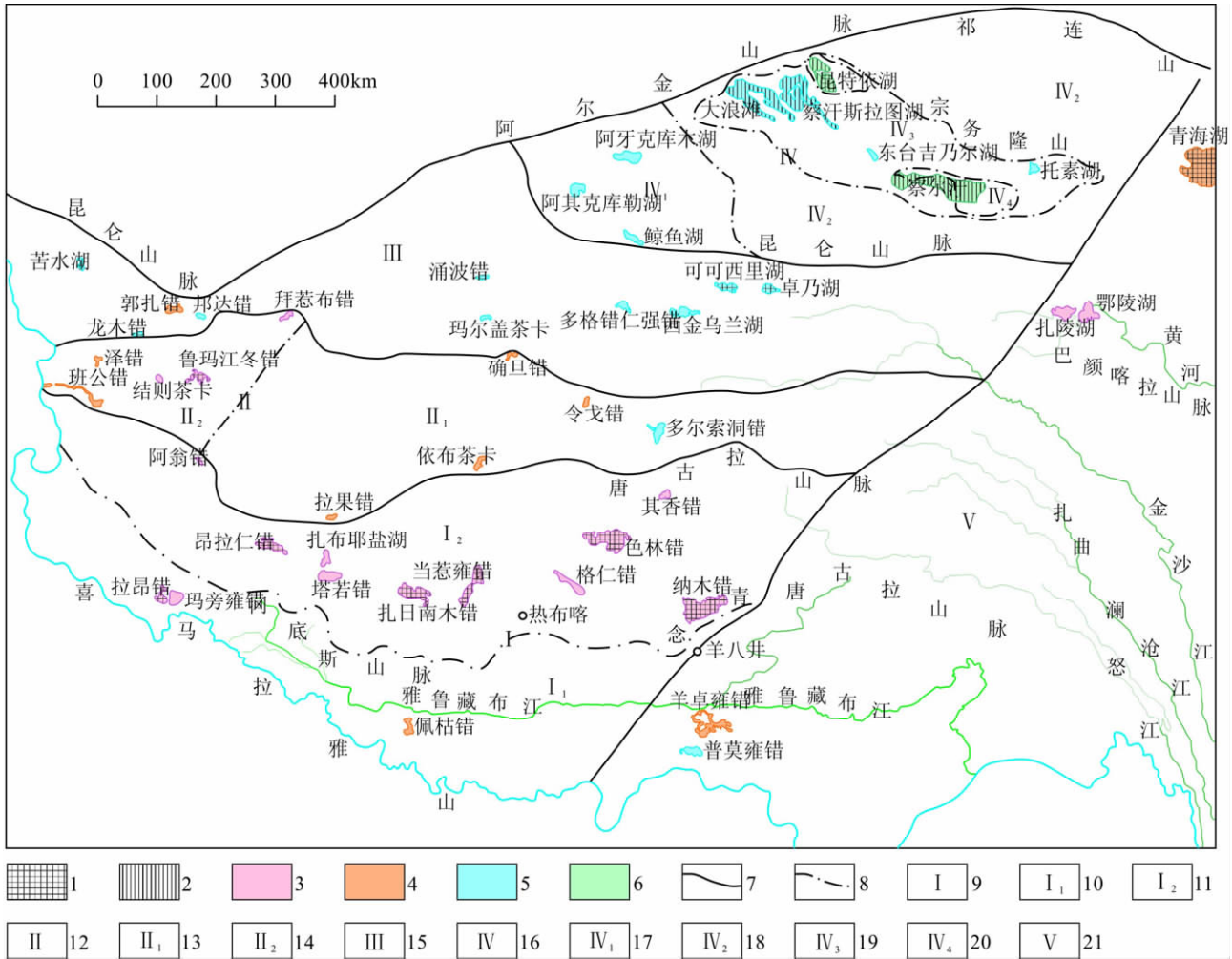


图 4 青藏高原盐湖化学分带图

Fig. 4 Map of hydrochemical zones of salt lakes on the Qinghai-Tibet Plateau

1—咸水湖;2—干盐湖;3—碳酸盐型;4—硫酸钠亚型;5—硫酸镁亚型;6—氯化物型;7—水化学类型分界线;8—亚带分界线;9—碳酸盐型带;10—低矿化度亚带;11—高矿化度亚带;12—硫酸钠亚型带;13—硫酸钠亚型亚带;14—硫酸钠-碳酸盐亚型亚带;15—硫酸镁亚型带;16—氯化物-硫酸盐型带;17—库木库里硫酸镁亚型亚带;18—硫酸钠亚型亚带;19—硫酸镁亚型亚带;20—氯化物型亚带;21—硫酸钠亚型外泄区

1—Brackish lake;2—Playa;3—Carbonate type;4—Sodium sulfate type;5—Magnesium sulfate type;6—Chloride type;7—Line of zoning of hydrogeochemical type;8—Line of subzoning of hydrogeochemical type;9—Carbonate type zone;10—Lower salinity subzone;11—High salinity subzone;12—Sodium sulfate subtype zone;13—Sodium sulfate subtype subzone;14—Sodium sulfate-carbonate subtype subzone;15—Magnesium sulfate subtype zone;16—Chloride-sulfate type zone;17—Kumkol magnesium sulfate subtype subzone;18—Sodium sulfate subtype subzone;19—Magnesium sulfate subtype subzone;20—Chloride subzone;21—Sodium sulfate subtype discharge area

1993; 论文: 郑绵平等, 1964; 谢先德, 郑绵平, 1963a, b; 谢先德等, 1964a, b; 曲一华等, 1964、1965; 郑绵平等, 1989)。

Ⅱ带: 为硫酸钠亚型带, 分布在碳酸盐带(Ⅰ带)之北, 呈东西向延伸(见图 4); 以硫酸钠亚型盐湖为主, 有小部分硫酸镁亚型和碳酸盐型盐湖分布。

本亚型带多为狭义盐湖和部分广义盐湖、个别紧邻现代冰川为淡水湖(郑绵平等, 1989); 由南往

北, 可以仓木错、聂尔错、扎仓茶卡(Ⅱ湖)、查波错、依布茶卡、戈木茶卡为例(表 6)。

由南部仓木错湖水锂、硼、钾、铯、铷绝对量和相对量 ($\frac{\text{Li} \times 10^3}{\Sigma \text{盐}}$ 、 $\frac{\text{B}_2\text{O}_3 \times 10^3}{\Sigma \text{盐}}$ 、 $\frac{\text{K} \times 10^2}{\Sigma \text{盐}}$ 、 $\frac{\text{Cs} \times 10^5}{\Sigma \text{盐}}$ 、 $\frac{\text{Rb} \times 10^5}{\Sigma \text{盐}}$) 均较突出的高值(表 7), 至北部湖水(查波错、戈木茶卡)则逐渐较低。

表 3 青藏高原盐湖碳酸盐带(I)代表性湖泊水化学成分

湖名	水化学类型	矿化度(g/L)	pH	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	B ₂ O ₃	Li	Cs	Rb
荫湖Ⅲ湖	Mc	6.92	9.2	2096	237	12	39	2443	413	50	627	902.2	/	/	/
扎布耶盐湖北湖表卤	Mc	396	9.1	124630	26085	0	24	149648	59254	25058	206	8136	1848	12.15	32.82
扎布耶南湖表卤	Mc	243	9.0	118593	25376	0.32	20.5	138330	47238	26829	1017	8439	1085	15.26	34.3
扎布耶南湖晶间卤水	Mc	282	9.5	135418	36559	0.025	5.28	166043	44776	39829	399	11569	1724	21.24	50.9
班戈湖Ⅱ湖北 Ck ₂ 混合卤水	Sc	149.88	9	48775	10360	0	11	59510	15920	9634	2541	2608	177	<0.1	8.8
班戈湖Ⅲ湖西部 73/809 湖水	Sc	46.72	10.2	14620	2045	8.3	23.2	10728	16417	1981	840	447.6	24.89	/	/

注:Mc—中度碳酸盐亚型;Sc—重度碳酸盐亚型。

表 4 碳酸盐带(I)代表性湖泊水化学系数

湖名	Mg/Li	$\frac{Li \times 10^3}{\sum \text{盐}}$	$\frac{B_2O_3 \times 10^3}{\sum \text{盐}}$	$\frac{K \times 10^2}{\sum \text{盐}}$	$\frac{Cs \times 10^5}{\sum \text{盐}}$	$\frac{Rb \times 10^5}{\sum \text{盐}}$
公珠错	2.187	6.945	187.093	1.148	/	/
拉昂错	/	/	43.137	1.568	/	/
荫湖Ⅲ湖	/	/	130.376	3.425	/	/
扎布耶盐湖北湖表卤	0.013	4.667	20.545	6.587	3.1	8.3
扎布耶盐湖南湖表卤	0.019	4.465	34.728	10.443	6.3	14.1
扎布耶盐湖南湖晶间卤水	0.003	6.113	41.025	12.964	7.5	18.0
班戈湖Ⅱ湖北 Ck ₂ 混合卤水	0.062	1.181	17.401	6.912	<0.06	5.9
班戈湖Ⅲ湖西部 73/809 湖水	0.93	0.533	9.580	4.377	/	/

表 5 碳酸盐型盐湖的矿物组合

矿物成分		碳酸盐型		
		强度碳酸盐	中度碳酸盐	弱度碳酸盐
石盐	NaCl	×	▲	●
钾石盐	KCl		▲	
石膏	CaSO ₄ · 2H ₂ O			×
芒硝	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	●	●	●
无水芒硝	Na ₂ SO ₄	▲	▲	▲
钾芒硝	K ₃ Na(SO ₄) ₂	▲	▲	
硫酸镁钠石	2MgCO ₃ · 2Na ₂ CO ₃ · Na ₂ SO ₄	×	×	
扎布耶石	Li ₂ CO ₃		▲	
针碳钠钙石	CaCO ₃ · Na ₂ CO ₃ · 5H ₂ O		●	●
五水碳镁石	MgCO ₃ · 3H ₂ O		▲	
氯碳钠镁石	MgCO ₃ · Na ₂ CO ₃ · NaCl	●	●	▲
菱镁矿	MgCO ₃	▲	●	▲
白云石	MgCO ₃ · CaCO ₃	●	●	▲
水碳镁石	4MgCO ₃ · Mg(OH) ₂ · 4H ₂ O	●	●	×
天然碱	Na ₂ CO ₃ · NaHCO ₃ · 2H ₂ O	▲	●	
泡碱	Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O	▲	●	
水碱	Na ₂ CO ₃ · H ₂ O	▲	▲	
苏打石	NaHCO ₃	●	▲	
钠硼解石	NaCaB ₅ O ₉ · 8H ₂ O		×	▲
硼砂	Na ₂ B ₄ O ₇ · 10H ₂ O	●	●	●
三方硼砂	Na ₂ B ₄ O ₇ · 5H ₂ O	▲	▲	▲

注:● 主要矿物 ▲ 次要矿物 × 边缘相痕量矿物。

其相应的代表性成矿组合为芒硝(无水芒硝)—石盐以及镁硼酸盐(库水硼镁石、柱硼镁石等)—芒硝(无水芒硝)组合为主,有大量钠硼解石产出(表 8)。

Ⅲ带:硫酸镁亚型带,展布于上述Ⅱ带之北,亦呈东西向分布(见图 4),以硫酸镁亚型盐湖为主,有小部分硫酸钠亚型和氯化钠型盐湖产出。

本亚型带亦多为狭义盐湖和部分广义盐湖,个别紧邻现代冰川为淡水湖。该带湖水以高镁和高 Mg/Li 为特征(表 9、表 10),稀碱元素含量及其特征系数均较 I₂和Ⅱ带低,含硼、钾量一般也较低,仅个别湖泊较高,如永波错含 B₂O₃达 17000mg/L,含 K⁺也达到 5380mg/L(见表 9)。

本亚型带相应的代表性成矿组合为硫酸镁盐(泻利盐、白钠镁矾)—石盐、镁硼酸盐—芒硝、芒硝—软钾镁矾—石盐组合。盐湖沉积早期有大量石膏产出(见表 8)。

Ⅳ氯化物—硫酸盐型带:展布于Ⅲ带之东北,呈长菱形东西延伸。包括库木库里硫酸镁亚型亚带(Ⅳ₁)、柴达木周缘硫酸钠亚型亚带(Ⅳ₂)、柴达木硫酸镁亚型亚带(Ⅳ₃)和柴达木干旱中心的两个氯化物亚带(Ⅳ₄)。兹将各亚带水化学特征分述如下:

表 6 青藏高原盐湖硫酸钠亚型带(Ⅱ)若干代表性湖水化学成分

Table 6 Hydrochemical compositions of several representative lakes of the sodium sulfate subtype zone (II)															
湖泊名称	矿化度 (g/L)	pH	水化学 类型	化 学 组 分 (mg/L)											
				Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	B ₂ O ₃	Li	Cs	Rb
仓木错	153.7	9	NS	43967	7812	340	3627	77090	16130	326	1324	1795	607.9	34.5	26.5
聂尔错	199.4	8	NS	49717	7825	451.2	9325	51533	73433	58.5	451.7	6018.3	223.7	9.1	10.37
扎仓茶卡 Ⅱ湖	384.78	8	NS	86507	13830	308	10800	143180	45610	0	2286	2088	277.5	2.2	8.69
依布茶卡	96.82	8.2	NS	33862	1164	156.3	9002	43408	17123	85	74.2	219	43	/	/
查波错	251.7	8.2	NS	72350	16100	33.2	4845	131350	24856	100.5	492	1355	243.4	0.38	7.93
戈木茶卡	192.10	/	NS	71600	2830	23.6	343.3	109700	6390	245	/	651	56	0.1	1.78

注: NS—硫酸钠亚型。

表 7 硫酸钠亚型带(Ⅱ)若干代表性湖水特征系数

湖名	Mg/Li	$\frac{Li \times 10^3}{\Sigma \text{盐}}$	$\frac{B_2O_3 \times 10^3}{\Sigma \text{盐}}$	$\frac{K \times 10^2}{\Sigma \text{盐}}$	$\frac{Cs \times 10^5}{\Sigma \text{盐}}$	$\frac{Rb \times 10^5}{\Sigma \text{盐}}$
仓木错	5.97	39.55	11.68	5.08	22.45	17.24
聂尔错	41.69	1.12	30.18	3.92	4.56	5.2
扎仓茶卡Ⅱ湖	38.9	7.21	5.43	3.59	0.57	2.26
查波错	19.97	0.97	5.38	6.4	0.15	3.15
依布茶卡	21.0	0.57	2.4	1.2	/	/
戈木茶卡	6.13	0.29	3.39	1.47	0.05	0.93

表 8 硫酸盐型盐湖矿物组合

矿物 成分		硫酸盐型	
		硫酸钠 亚型	硫酸镁 亚型
光卤石	KCl · MgCl ₂ · 6H ₂ O		●
水氯镁石	MgCl ₂ · 6H ₂ O		●
钾石盐	KCl	▲	●
石盐	NaCl	●	●
钾盐镁矾	KCl · MgSO ₄ · 2.7H ₂ O		▲
软钾镁矾	K ₂ SO ₄ · MgSO ₄ · 6H ₂ O		▲
杂卤石	K ₂ SO ₄ · MgSO ₄ · 2CaSO ₄ · 2H ₂ O	▲	▲
钾石膏	K ₂ SO ₄ · CaSO ₄ · H ₂ O		▲
白钠镁矾	Na ₂ SO ₄ · MgSO ₄ · 4H ₂ O	●	▲
钙芒硝	Na ₂ SO ₄ · CaSO ₄	●	▲
水钙芒硝	5Na ₂ SO ₄ · 3CaSO ₄ · 6H ₂ O	▲	×
泻利盐	MgSO ₄ · 7H ₂ O	×	▲
六水泻盐	MgSO ₄ · 6H ₂ O	×	▲
四水泻盐	MgSO ₄ · 4H ₂ O	×	×
石膏	CaSO ₄ · 2H ₂ O	▲	●
芒硝	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	●	●
无水芒硝	Na ₂ SO ₄	▲	▲
菱镁矿	MgCO ₃	▲	●
白云石	MgCO ₃ · CaCO ₃	●	●
三方水硼镁石	MgB ₆ O ₁₀ · 7.5H ₂ O		×
库水硼镁石	Mg ₂ B ₆ O ₁₁ · 15H ₂ O	●	▲
多水硼镁石	Mg ₂ B ₆ O ₁₁ · 15H ₂ O	▲	▲
柱硼镁石	MgB ₂ O ₄ · 3H ₂ O	●	●
水方硼石	CaMgB ₆ O ₁₁ · 6H ₂ O		●
板棚钙石	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ · 13H ₂ O	▲	
钠硼解石	NaCaB ₅ O ₉ · 8H ₂ O	●	▲

库木库里硫酸镁亚型亚带(Ⅳ₁):该亚带湖泊均分布于库木库里盆地,湖泊均属于硫酸镁亚型,其湖水特点是 Mg/Li 极高(470~2780),稀碱元素、钾含量均较低,但硼含量相对稍高,湖水 B₂O₃ 含量 676~1723mg/L(表 11、表 12)。

柴达木周缘硫酸钠亚型亚带(Ⅳ₂):该带分布于柴达木南北周缘广大地区,分散于东昆仑山北麓和南祁连山南麓及祁连山区,包括盐湖和淡水湖,盐湖的水化学类型均属硫酸钠型;受冰川融水补给的淡水湖为碳酸盐型,如可鲁克湖(表 13)。此亚型带(Ⅳ₂)硼、锂、铷、铯均很低,0.01~0.24,0.3~0.8(表 14)。

柴达木硫酸镁亚型亚带(Ⅳ₃):该亚带分布于柴达木盆地大部地区,绝大部分湖泊盐度高,均属狭义盐湖,其水化学类型亦属硫酸镁亚型(表 15),但其 Mg/Li 多较库木库里硫酸镁亚型亚带(Ⅳ₁)低(Mg/Li 为 40~114),只有与Ⅳ₁亚带相邻的尕斯库勒湖(Ⅳ₃)Mg/Li 达 1190.82(表 16),而Ⅳ₃亚带的锂的含量较Ⅳ₁亚带为高,尤以东、西台吉乃尔至一里坪一带盐湖锂钾含量较高,但 Cs、Rb 也较低(表 15、表 16)。

氯化物亚带(Ⅳ₄):此亚带是柴达木盆地晚新生代盐湖演化后期的浓缩中心,分别位于察尔汗光卤石集中区和昆特依湖—钾湖区。其水化学类型均为氯化物型,其硼、锂、铯组分均不高,但镁、钾的含量较高,尤其以 Mg/Li 高为其特色,可达 4200~1550(表 17、表 18)。

本表图例说明见表 5 下注。

表 9 青藏高原盐湖硫酸镁亚型带(Ⅲ)若干代表性湖水化学组分

Table 9 Hydrochemical compositions of several representative lakes of the magnesium sulfate subtype zone (III)															
湖名	水化学类型	矿化度(g/L)	pH	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	B ₂ O ₃	Li	Cs	Rb
双咀湖	MS	230.4	/	92600	6520	496	17800	188000	5690	783	590	4590	271	0.066	3.74
玛尔盖茶卡	MS	78.6	/	28346	606	18.6	767	44678	2536	290	0	1309.1	30.5	/	/
永波湖	MS	331.1	9.0	107000	5380	658.4	4965.3	187319	7908.5	0	664.16	17020	166.4	/	/
玉盘湖	MS	324.8	7.3	113500	1580	433	5440	187500	15400	174	110.5	531	74.4	0.013	0.4
龙木错	MS	168.2	7.8	36900	4032	1104.2	14419	103017	7134.3	0	802.6	602	170	0.88	7.7
若拉错	MS	103.9	7.5	34200	1140	670.5	4140	60900	2425	0	133.5	244.5	24.05	0.02	0.78
勒斜武担湖	U	139.3	7.0	47755	2320	2848	2197	81086	2112	9.1	166.3	566.6	171	/	/
西金乌兰湖	MS	256.2	7.0	92979	3128	284	2479	152373	4107	10.8	369.8	289.37	100.6	/	/

注:MS—硫酸镁亚型;U—氯化物型。

表 10 硫酸镁亚型带(Ⅲ)若干代表性湖水特征系数

Table 10 Hydrochemical coefficients of several representative lakes of the magnesium sulfate subtype zone (III)						
湖名	Mg/Li	$\frac{Li \times 10^3}{\sum \text{盐}}$	$\frac{B_2O_3 \times 10^3}{\sum \text{盐}}$	$\frac{K \times 10^2}{\sum \text{盐}}$	$\frac{Cs \times 10^5}{\sum \text{盐}}$	$\frac{Rb \times 10^5}{\sum \text{盐}}$
双咀湖	56.09	0.85	14.46	2.06	0.02	1.2
玛尔盖茶卡	25.40	0.39	16.66	7.71	/	/
永波湖	29.84	0.503	54.404	1.625	/	/
玉盘湖	73.12	0.229	1.635	0.487	0.004	0.123
龙木错	84.82	1.011	3.579	2.397	0.523	4.58
若拉错	172.14	0.231	2.353	1.097	0.019	0.75
勒斜武担湖	12.85	0.245	4.127	1.689	/	/
西乌兰湖	24.64	0.393	1.129	1.213	/	/

表 12 硫酸镁亚型带(Ⅳ₁)湖水水化学特征系数

Table 12 Hydrochemical characteristic coefficients of several representative lakes in the magnesium sulfate subtype zone (IV1)						
湖名	Mg/Li	$\frac{Li \times 10^3}{\sum \text{盐}}$	$\frac{B_2O_3 \times 10^3}{\sum \text{盐}}$	$\frac{K \times 10^2}{\sum \text{盐}}$	$\frac{Cs \times 10^5}{\sum \text{盐}}$	$\frac{Rb \times 10^5}{\sum \text{盐}}$
阿其克库勒湖	473	0.08	8.18	2.09	0.22	0.47
阿牙克库木湖	2781	0.019	4.91	0.457	0.097	0.091
大九坝湖	/	/	4.18	0.319	/	/

表 14 硫酸钠亚型带(Ⅳ₂)若干代表性湖水特征系数

Table 14 Hydrochemical coefficients of several representative lakes in the sodium sulfate subtype zone(IV2)					
湖名	Mg/Li	$\frac{Li \times 10^3}{\sum \text{盐}}$	$\frac{B_2O_3 \times 10^3}{\sum \text{盐}}$	$\frac{K \times 10^2}{\sum \text{盐}}$	$\frac{Rb \times 10^5}{\sum \text{盐}}$
芒崖湖	105.2	0.24	0.35	0.36	/
希里沟湖	3968.6	0.011	0.82	0.623	0.04
大苏干湖	/	/	2.91	1.304	/

表 11 青藏高原盐湖硫酸镁亚型带(Ⅳ₁)湖水化学组分(mg/L)

Table 11 Hydrochemical compositions of several representative lakes in the magnesium sulfate subtype zone (IV ₁)															
湖泊名称	矿化度(g/L)	pH	水化学类型	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	B ₂ O ₃	Li	Cs	Rb
阿其克库勒湖	82.7	8.55	MS	24824	1735	65.4	3214.2	39329	8775.3	1998	1999.6	676.2	6.79	0.184	0.39
阿牙克库木湖	157.4	7.93	MS	47157	720.1	396.38	8261.7	93211	5511.3	684.1	666.54	772.8	2.97	0.154	0.144
大九坝湖	316.7	/	MS	86400	1009	360.7	21905	189921	15157	0	594.9	1323	/	/	/

表 13 青藏高原盐湖硫酸钠亚型带(Ⅳ₂)若干代表性湖水化学组分

Table 13 Hydrochemical compositions of several representative lakes in the sodium sulfate subtype zone (IV ₂)															
湖名	水化学类型	矿化度(g/L)	pH	化学组分(mg/L)											
				Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	B ₂ O ₃	Li	Cs	Rb
芒崖湖	NS	41.4	8.68	12755	150	964.8	1052	19460	6832	7.33	129.5	14.59	10.0	/	/
希里沟湖	NS	261.6	7.62	78982	1636	480.1	11112	121131	47251	250.5	475.9	214.9	2.8	/	0.11
可鲁克湖	MC	9.3	/	7883.04		27.96	360	776.72	124.88	12.84	156.7	/	/	/	/
大苏干湖	NS	32.2	8.9	8060	420	72	1910	9790	10730	200	940	93.8	/	/	/

表 15 青藏高原盐湖化学硫酸镁亚型带(Ⅳ₃)湖水化学组分(mg/L)

Table 15 Chemical compositions (mg/L) of lake waters in the magnesium sulfate subtype zone (IV2)

湖名	矿化度 (g/L)	pH	水化学 类型	化学组分(mg/L)											
				Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	B ₂ O ₃	Li	Cs	Rb
尕斯库勒湖	333.5	7.56	MS	76948	4511	398.6	29592	175757	45235	475.9	190.2	346.38	24.85	/	0.28
大浪滩	382.3	/	MS	11500	4600	0	84227	251192	30425	92	0	254.3	/	/	/
察汗斯拉图湖	351.3	/	MS	115600	6380	270	9820	183460	35400	48	95	117.6	/	/	/
一里坪	328.0	7.32	MS	81351	11019	374	24181	196464	13829	0	25.93	381	262	/	5.25
西台吉乃尔湖	338.0	7.9	MS	103268	6895	294.5	13650	188047	23996	34.51	134.43	998.1	201.5	0.08	5.08
东台吉乃尔湖	332.0	7.9	MS	116452	3786	433.7	5686	187037	18028	0	111.8	690.6	141.0	0.04	3.25
涩聂湖	327.4	7.10	MS	94495	7266	274.2	12213	189136	22569	0	293.5	854.8	191.0	0.08	6.75
大柴旦	276.0	7.95	MS	88386	3222	453.5	9697	155982	16567	105.1	181.1	798.7	84.9	/	0.26

表 16 硫酸镁亚型带(Ⅳ₃)湖水水化学特征系数

Table 16 Hydrochemical characteristic coefficients of lake waters in the magnesium sulfate subtype zone(IV2)

湖名	Mg/Li	$\frac{Li \times 10^3}{\sum \text{盐}}$	$\frac{B_2O_3 \times 10^3}{\sum \text{盐}}$	$\frac{K \times 10^2}{\sum \text{盐}}$	$\frac{Cs \times 10^5}{\sum \text{盐}}$	$\frac{Rb \times 10^5}{\sum \text{盐}}$
尕斯库勒湖	1190.82	0.0745	1.0386	1.35262	/	0.08
大浪滩	/	/	0.6652	1.20324	/	/
察汗斯拉图湖	/	/	0.3348	1.81611	/	/
一里坪	92.29	0.7988	1.1616	3.35945	/	1.60
西台吉乃尔湖	67.74	0.5962	2.9529	2.03994	0.024	1.50
东台吉乃尔湖	40.33	0.4247	2.0801	1.14036	0.012	0.98
涩聂湖	63.94	0.5834	2.6109	2.21930	0.024	2.06
大柴旦	114.22	0.3076	2.8938	1.16739	/	0.94

表 17 青藏高原盐湖化学氯化物型带(Ⅳ₄)湖水化学组分(mg/L)

Table 17 Chemical compositions (mg/L) of lake waters in the chloride type zone (IV3)

湖名	矿化度 (g/L)	pH	水化学 类型	化学组分(mg/L)											
				Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	B ₂ O ₃	Li	Cs	Rb
昆特依湖	329.4	6.2	氯化物型	53765	12219	7283	37917	216859	843.8	6.5	68.01	391.9	26.8	/	1.03
钾湖	404.4	5.35	氯化物型	4096	5368	10820	90213	293406	42	27.1	136.6	213.5	21.4	/	0.26
牛郎织女湖	556.0	4.6	氯化物型	/	6801	99470	72356	382412	/	76.41	0	862.6	46.7	/	0.1
察尔汗	413.8	6.7	氯化物型	4700	3160	12891	93308	299389	82	/	/	223.5	/	/	/

表 18 氯化物型带(Ⅳ₄)湖水水化学特征系数

Table 18 Hydrochemical characteristic coefficients of lake waters in the chloride type zone(IV3)

湖名	Mg/Li	$\frac{Li \times 10^3}{\sum \text{盐}}$	$\frac{B_2O_3 \times 10^3}{\sum \text{盐}}$	$\frac{K \times 10^2}{\sum \text{盐}}$	$\frac{Cs \times 10^5}{\sum \text{盐}}$	$\frac{Rb \times 10^5}{\sum \text{盐}}$
昆特依湖	1414.81	0.0814	1.1897	3.71	/	0.003
钾湖	4215.56	0.0529	0.5279	1.33	/	0.006
牛郎织女湖	1549.38	0.084	1.5514	1.22	/	0.0001
察尔汗	/	/	0.5401	0.76	/	/

Ⅳ₁、Ⅳ₂、Ⅳ₃亚带的硫酸镁亚型和硫酸钠亚型盐湖的矿物组合同上述Ⅱ、Ⅲ水化学带相似(见表11),氯化物型代表性矿物组合则为光卤石—水氯镁石—石盐及光卤石—石盐,在钾湖还发现少量的南极石,详见表19。

盐类矿物可划分为冷相、暖相和广温相,而可作为古气候、古环境的转换指标(郑绵平等,1998)。上

述青藏高原各类型盐湖矿物组合,还具有冷相组合特征,一般在0℃以下稳定沉积的芒硝(郑绵平等,1998),除氯化物型外,在其它类型中多有大量沉淀,在高原分布十分广泛。特别在Ⅱ和Ⅲ水化学带的4800~5100m现代盐湖区有大量产出;而在高原早期几个冷相阶段,如在24~23 Cal ka、18~16 Cal ka、13~12 Cal ka以及8.2ka前后等(Zheng

Mianping et al., 2007)都见有芒硝和与其共生的冷相盐类矿物,成为研究青藏高原古气候变化的重要标志物。其他属于低温盐沉积的盐类还有:碳酸盐型的泡碱、硼砂等(扎布耶盐湖)、水菱镁矿(班戈湖);硫酸盐的七水泻利盐、软钾镁矾、水钙芒硝等(如大浪滩、扎仓茶卡)、库水硼镁石、多水硼镁石(扎仓茶卡等);氯化物型的水石盐、水氯镁石、南极石(昆特依湖)(表 20)。

表 19 氯化物型盐湖矿物组合
Table 19 Mineral assemblages of chloride type

矿物	成分	氯化物型
南极石	CaCl ₂ · 6H ₂ O	×
光卤石	KCl · MgCl ₂ · 6H ₂ O	●
水氯镁石	MgCl ₂ · 6H ₂ O	▲
水石盐	NaCl · 2H ₂ O	×
钾石盐	KCl	●
石盐	NaCl	●
石膏	CaSO ₄ · 2H ₂ O	●
菱镁矿	MgCO ₃	●
菱锆矿	SrCO ₃	×
白云石	MgCO ₃ · CaCO ₃	●

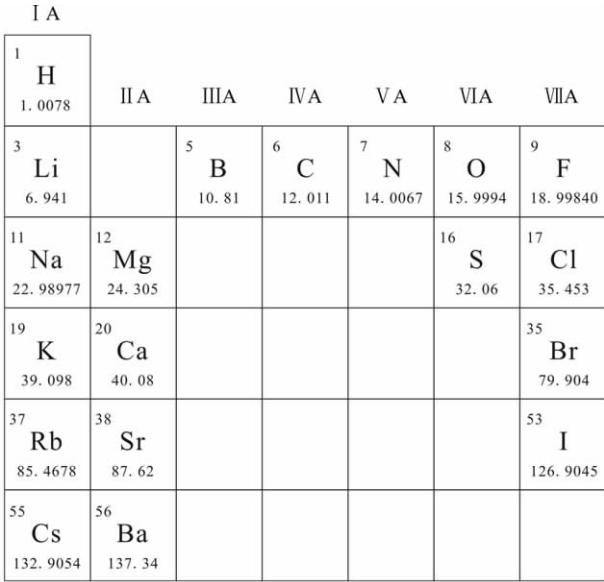
注:本表图例说明见表 5 下注。

4 卤水化学组分与硼和稀碱元素成因

如上所述,目前已检出青藏高原盐湖 waters 含有 59 种元素,其中以 Na、K、Mg、Ca、Cl 和 SO₄²⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻ 离子含量最高,均占湖水离子当量 97%~98%,但与其他盐湖区水化学组分相比,又以含锂、硼、钾、铯、铷较高为其特色,且以羌南碳酸盐型带(I₂)丰度最高,有些湖泊还含 As、U、Th、Br、Sr、Nd 正异常。

除了 19 个成盐元素(图 5)呈“门”形外,还检出 40 种元素呈微量或痕量元素(表 21)。

青藏高原湖水中 B 与 Li、Cs、K、Rb 有密切共生关系,其含量随湖水矿化度增长大致呈正相关;且 B、Li、Cs、K 最高正异常落在羌南碳酸盐型带(I₂)



注: I —— 原子序数
H —— 元素符号
1. 0078 —— 原子量

图 5 19 个成盐元素
Fig. 5 19 Salt-forming elements

西段—昂拉陵湖区。该昂拉陵“正异常中心”与本区地热泉 B、Li、Cs 等高值区并行不悖。作者还通过实地调查和框算:西藏玛旁雍错和班戈湖周边热泉输入湖中硼锂钾数量,已分别接近该两湖赋存的相关元素资源量(Zheng Mianping, 1997) 136~139。扎布耶周边和湖中大量分布的地热成因钙华群, Li (61×10⁻⁶—135×10⁶)、B(90×10⁻⁶~380×10⁻⁶)、Cs(0.7×1.5×10⁻⁶)(郑绵平, 2001)。此钙华群自 30ka BP 以来,地热系统曾有大量锂硼钾铯补给该湖。以上均证明,青藏高原新生代富硼、锂以至铯的地热系统是青藏高原锂、硼、钾(铯、铷)等稀碱和硼的主要来源。

关于一些地热水补给是富硼锂(铯、钾)盐湖主要来源之一,不仅限于青藏高原盐湖,世界上主要富硼、锂盐湖区南美智利、玻利维亚、阿根廷(Fernando Ide Y et al., 1989; R N Alonso, 1999, Ricardo N,

表 20 冷相盐类矿物
Table 20 Cold Saline minerals

碳酸盐型		硫酸盐型		氯化物型	
芒硝	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	芒硝	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	水氯镁石 南极石 水石盐	
水菱镁矿	4MgCO ₃ · Mg(OH) ₂ · 4H ₂ O	泻利盐	MgSO ₄ · 7H ₂ O		MgCl ₂ · 6H ₂ O
泡碱	Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O	水钙芒硝	5Na ₂ SO ₄ · 3CaSO ₄ · 6H ₂ O		CaCl ₂ · 6H ₂ O
硼砂	Na ₂ B ₄ O ₇ · 10H ₂ O	库水硼镁石	Mg ₂ B ₆ O ₁₁ · 15H ₂ O		NaCl · 2H ₂ O
多水硼镁石		多水硼镁石	Mg ₂ B ₆ O ₁₁ · 15H ₂ O		
水石盐	NaCl · 2H ₂ O	水石盐	NaCl · 2H ₂ O		

表 21 青藏高原盐湖卤水已检出的元素

Table 21 Detected elements in salt lake brines of Qinghai-Tibet Plateau

周期	电子层	元 素 的 分 类 (门捷列夫元素周期表)									镧系 58-71	
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
1	K	H *										Ce
2	L K	Li◊	Be	B *	C *	N◊	O *	F◊				Nb
3	M L K	Na *	Mg *	Al	Si◊	P◊	S *	Cl *				Sm
4	N M L K	K *	Ca *	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Gd
	N M L K	Cu	Zn	Ga	Ge	As◊	Se	Br◊				Dy
5	O N M L K	Rb◊	Sr◊	Y	Zr	Nb	Mo					Yb
	O N M L K	Ag	Cd		Sn	Sb	Te	I				
6	P O N M L K	Cs◊	Ba	La		Ta	W					
	P O N M L K		Hg		Pb	Bi						
7	Q P O N M L K				(Th)		(U)					

注： *：常量（>1000ug/g）；◊：微量（1 1000ug/g ±）；其它：痕量（≤1 0.001ug/g）

et al. , 1985),甚至美国西部 Searles 湖区均有所报导(Smith, 1966, 1976),如智利最著名的 Salar de Alacama,在该湖作过大量地质勘查研究的 I. A. Kunasz 就曾明确指出:由巨量灰岩凝灰岩风化产生的锂释出过程应予注意,但应从广泛的思维角度出发,火山过程不仅产生固态物质,它同时伴随有大气降水和岩浆来源的巨量地热流体。它们能够、并确实含有巨量的锂。美国地热水储中所含锂资源曾被估计有 4.5 百万吨锂,显然热泉水是锂的主要来源。阿塔卡玛干盐湖北部至今仍活动的 Tatio 地热田显示的热泉水浓度达 28~40ppm。Tatio 地热系统和阿塔卡玛干盐湖的其它目前已停歇的老的地热系统,给阿塔卡玛干盐湖提供了大量的富锂水;沿该盐湖东边已发现了这些老地热系统的证据。在那里早期热泉沉积了大量的富锂碳酸钙沉积(含 Li 高达 322ppm)(Fernando and Kunasz, 1989)。阿根廷的主要第三纪硼酸盐和现代硼酸盐盐湖的成因同该区火山活动史,尤其是强烈的

热泉活动密切相关(Alonso et al. , 1985a,1985b),大量的含硼间歇泉(Geyzers)和热泉使巨量的硼酸盐沉积在钙华形成物的周围,而形成“硼酸盐裙”,“盐湖的硼酸盐层都与盆地边缘的泉水有关”(Alonso,1999)。

美国著名的 Searles 盐湖特殊组分(硼锂)来源,也同 Searles Valley 富含硼(锂)的地热泉有密切关系,研究者认为该盐湖的大部分特殊组分(Unusual compoments)很可能来自热水。现在这些热泉的汇入盐湖的数量,加上欧文思河的其他来源,足以解释在西尔兹湖现有组分的数量(Smith,1966)。

最近,还在昂拉陵西北部发现中新世富硼锂铍钼火山沉积岩系,分布面积约 5000km²,成为该区盐湖 B、Li、Cs 另一个主要来源。该中新世火山沉积岩系由上而下由黑云母安山岩和湖相沉积凝灰质粉砂、沉凝灰岩、凝灰质粘土夹硅藻土以及古钙华(淡水灰岩)构成 2 元结构。厚度大于 200m,黑云母安山岩,厚 20~60m,其 B、Li、Cs、Rb 含量为青藏高原

表 22 昂拉陵西北中新世中性火山沉积岩与中性岩克拉克值比较 单位:μg/g

Table 22 Comparison of Clarke values (μg/g) between Miocene intermediate volcanic-sedimentary rocks and intermediate rocks in northwestern Nganglaling

名 称		本 文					Turekian et al. , 1961 (1)				Виноградов. А. П., 1992 (2)			
		时代	B 平均值	Cs 平均值	Li 平均值	Rb 平均值	B	Cs	Li	Rb	B	Cs	Li	Rb
中性岩	安山岩与凝灰岩	中新世	1150(43)	38(25)	46(43)	284(23)	9	0.6	2.8	110	15	—	20	100

据零星样品平均数量。(1) Turekian, K. K. and Wedepohl, K. H. 1961, Distribution of the elements in some major units of earth's crust, Geol. Soc. Hmer. Bull, 72.(2) Виноградов. А. П.,1992,全球各种岩石的元素平均值。地球化学, No 7, 1001~1027。

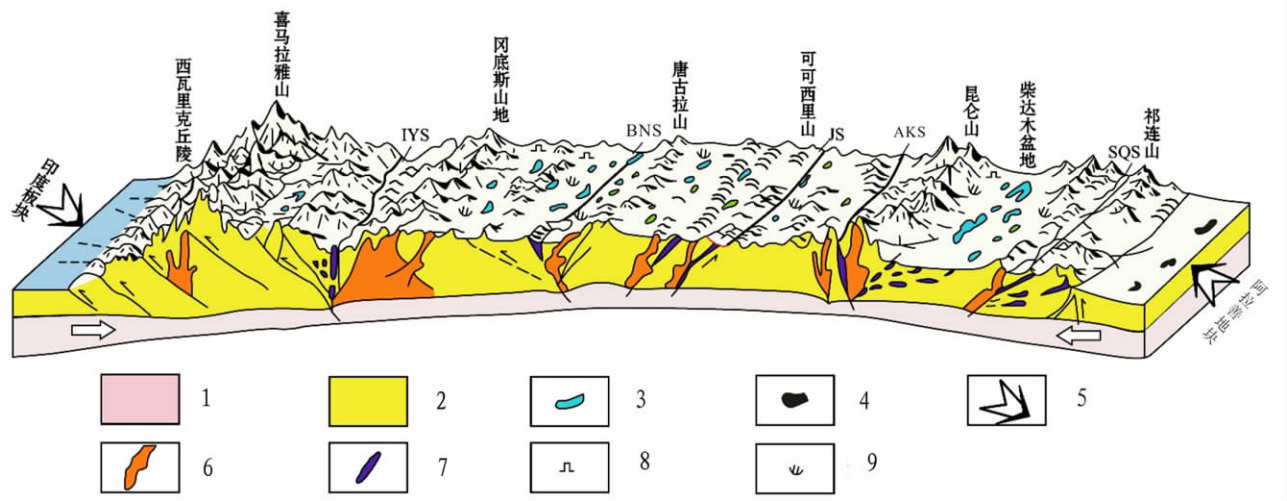


图 6 青藏高原盐湖形成的地质地貌背景示意图

Fig. 6 Schematic map showing the geological-geomorphologic setting for the formation of salt lakes of theQinghai-Tibet Plateau

IYS—印度河-雅鲁藏布缝合线;ONS—班公-怒江缝合线;JS—金沙江缝合线;AKS—阿尼玛卿-昆仑缝合线;SQS—南祁连缝合线;
1—地幔;2—地壳;3—B、Li、Cs、K 特种盐湖;4—普通盐湖;5—主应力;6—中酸性岩浆;7—蛇绿岩套;8—富 B、Li、Cs 火山;9—热泉
IYS—Indus-Yarlung Zangbo suture; BNS—Bangong Co-Nujiang suture; JS—Jinsha River suture; AKS—A' nyemaqen-Kunlun suture; SQS—South Qilian suture; 1—Mantle; 2—Crust; 3—B、Li、Cs、K special salt lakes; 4—Ordinary salt lakes; 5—Principal stress; 6—Intermediate-acid magmatic rocks; 7—Ophiolite; 8—B-, Li-, and Cs-rich volcanic deposits; 9—Hot spring

火山岩之冠(表 22):含 B 350~600μg/g, Li 30~40μg/g, Cs 10~11μg/g, Rb 500~550μg/g;湖相沉积厚度大于 150m,其沉凝灰岩—凝灰质粘土:含 B 400~9780μg/g, Li 20~111μg/g, Cs 18~75.3μg/g, Rb 90~350μg/g,并已发现少量硼砂和钠硼解石沉积。应着重指出在昂拉陵地区,是青藏高原盐湖特殊组分锂硼钾铯铷含量最高地区,以上说明西藏高原一些晚新生代火山岩及其伴生古热液活动(钙华)是青藏高原盐湖特殊组分的主要来源。但应着重指出,青藏高原同南美地质背景有差异,南美新生代富含特殊元素火成岩广泛分布,面积达 150000km²,而青藏高原新生代富含特殊元素的火山岩比较局限(分布范围最广的昂拉陵地区也仅有 5000km²),多数地区盐湖以地热水形式补给出现。

表 23 不同构造区盐湖卤水 B、Li、Rb、Cs 平均含量对比 (mg/L)

Table 23 Average contents (mg/L) of B, Li, Rb and Cs in salt lake brines in different tectonic regions

地点	地质构造	B	Li	Rb	Cs
柴达木	陆陆碰撞活动区	301	103	08	0.034
藏北	陆陆碰撞活动区	542	320	5.42	1938
内蒙	地台	107	2.7	0.145	0.10
新疆	地台(南部为过渡区)	368	0.64	0.213	0.80

本区地热水和晚新生代火山与印度—欧亚陆陆碰撞作用引起的重熔岩浆作用有密切成因联系。如上所述,在本区强烈地热活动区也是硼锂铯铷(钾)盐湖卤水聚集区。而在稳定克拉通、地台区则产出盐、碱、硝(芒硝)普通盐湖卤水,其 B、Li、Rb、Cs 较低(图 6、图 7、表 23)。

表 24 世界若干特种盐湖卤水组分 (mg/L)

Table 24 Components (mg/L) of brine of several special salt lakes in the world

项目	扎布耶湖①		东台吉乃尔湖②		智利③	玻利维亚	美国④	美国⑤	Dead Sea⑥
	南湖 晶间卤水	北湖 地表卤水	晶间卤水	地表卤水	Atacama 晶间卤水	Uyunil	Silver Peak 地下卤水	Silver Peak(上盐 组)间卤	
Li	1413	1527	638	117	1600	550	400	58	2.15
K	31606	21558	13792	3786	18000	10710	8000	19800	7560
Na	110999	103000	68648	116452	76000	75300	60000	109000	34940
Mg	4.3	19.65	22199	5686	9600	520	400	—	41960
Ca	0.02	0	—	434	300	—	500	—	15800
Cl	136101	123677	142329	187037	160000	152000	100000	123000	208020
SO ₄	36702	48709	—	18028	17860	10480	7000	52000	540
CO ₃	32647	20709	—	—	—	47	—	23300	—
HCO ₃	327	171	—	119	—	—	—	—	240
B	2945	2089	838	11.0	600	280	—	2619	—
—Br	513	247	—	11.0	—	—	—	—	5920
Rb	51	33	—	3.3	—	—	—	—	60
Cs	21	12	—	0.04	—	—	—	—	—

注：①为 25 个样品平均值；②据张彭熹等(1987)；③Fernando Ide et al (1983)；④G. I. Smith et al (1973)；⑤Martin Sherwood (1970)；⑥Abraham Lerman, 1967.

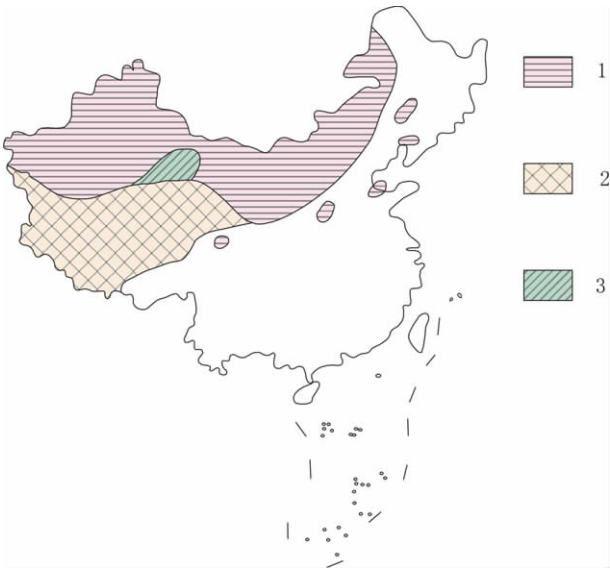


图 7 不同构造区产出不同盐湖矿产类型盐湖示意图

Fig. 7 Schematic map showing the occurrence of different types of salt lake in different tectonic regions
1—构造稳定区-普通盐湖；2—构造活动区-特种盐湖和钾镁盐湖；3—构造过渡区-钾镁盐湖
1—Tectonically stable region-ordinary salt lakes; 2—Tectonically active region-special salt lakes and K-Mg salt lakes; 3—Tectonic transition region-K-Mg salt lakes

按产出盐类矿产组分差别，划分：

普通盐湖：产石盐、芒硝、碱类、石膏等普通性一般盐类矿产。

特种盐湖：除普通性盐类矿产外，还产锂、硼、钾、铯、铷(钨、溴)或氟、硅、溴、氯化钙等矿产。如智利 Salar de Atacama、美国 Searles Lake、玻利维亚 Uyuni L、中国扎布耶盐湖和东台吉乃尔湖以及死海等地(表 24)。

南美科迪勒拉高原硼锂(铯、铷)盐湖卤水生成于主动大陆边缘，地表晚新生代火山活动十分强烈，而地热活动范围则较青藏高原为小(郑绵平, 2001a、2001b; 佟伟等, 1981)，但两者均为海拔在 3000～4000m 以上的全球最突出的高原和活动构造带，而成为两区盐湖卤水富集 B、Li、Cs、Rb 的构造地貌条件(参看图 7)。

5 结论

(1) 青藏高原湖泊盐度为西北往东南递降，其成因与其所处自然环境，特别是古今气候条件有密切关系；高原湖泊的 pH 值与其盐度呈反相关，并随着湖泊水化学类型由碳酸盐型→硫酸钠亚型→硫酸镁亚型→氯化物型变化，pH 值趋于下降。

(2) 高原盐湖化学类型的分布可分为四带(I-IV)，不同的水化学类型区生成不同的代表性盐类矿物组合，并具有冷相矿物组合特征，成为研究青藏高原古气候、古环境变化的重要标志物。

(3) 青藏高原盐湖卤水以富含锂、硼、铯、铷为其重要特色，尤其羌南碳酸盐型带(I₂)的丰度最

高,其元素主要物质来源于地热水和新近纪火山—湖相沉积岩系。

(4) 不同的构造区产生不同盐湖矿产类型。例如:青藏高原属于构造活动区,主要形成特种盐湖(包括钾镁盐湖);属于构造稳定区的阿拉善克拉通则形成普通盐湖。

致谢:本文化学分析由地矿部测试研究所、水文地质工程地质研究所、中国科学院青海盐湖所以及本单位司东兴、刘建华等完成。协助室内整理还有费正璧、王梅、刘玉霞等,在此一并表示衷心的感谢!

注 释

- ❶ 作者在“Hydrochemistry of salt lakes of the Qinghai-Tibet plateau, China”(Aquat Geochem, 2009,15: 293~320) 中作过有关论述,本文增加了一些新内容,同时对其中一些错漏作了修正。
- ❷ 郑绵平,刘喜方,刘俊英,魏乐军. 2003. 西藏羌塘盐湖资源调查评价成果报告。中国地质科学院矿产资源研究所。

参 考 文 献

曲一华,韩蔚田,钱自强,闵霖生. 1965. 新矿物——三方硼镁石. 地质学报,45(3):298~305.

曲一华,谢先德,钱自强,刘来保. 1964. 章氏硼镁石——一种新的含水镁硼酸盐矿物. 地质学报,44(3):351~356.

孙鸿烈,廖克,潘裕生,王金亨. 1990. 青藏高原地图集. 北京:科学出版社,17, 67, 69.

佟伟,章锰陶,张知非. 1981. 西藏地热. 北京:科学出版社.

谢先德,查福标. 1993. 硼酸盐矿物物理学. 北京:地震出版社.

谢先德,钱自强,刘来保. 1964b. 水碳硼石——一种新硼碳酸盐矿物. 地质科学,(1),91~99.

谢先德,郑绵平. 1963a. 我国发现的多水硼镁石初步研究. 中国科学,12,1246~1248.

谢先德,郑绵平. 1963b. 库水硼镁石晶体的研究. 地质学报,43(2): 184~192.

谢先德,郑绵平. 1964a. 库水硼镁石晶体再研究. 地质论评,22(1): 35~37.

谢先德,郑绵平,刘来保. 1965. 硼酸盐矿物. 北京:科学出版社.

张彭熹. 1987. 柴达木盆地盐湖. 北京:科学出版社.

郑绵平主编. 1989. 全球盐湖地质研究与展望. 国外矿床地质(国外盐湖地质专辑),(3-4):1~34.

郑绵平. 2001a. 青藏高原盐湖资源研究的新进展. 地球学报,22(2), 97~102.

郑绵平. 2001b. 论中国盐湖. 矿床地质,20(2):181~189,128.

郑绵平,金文山. 1964. 我国某地一个新类型镁硼酸盐矿床的初步研究. 中国地质,(2):24~30.

郑绵平,刘文高. 1987. 新的锂矿物——扎布耶石. 矿物学报,7(3): 221~227.

郑绵平,刘文高,金文山. 1981, 西藏盐湖盐类矿物的研究. 中国地质科学院院报, 2(1): 75~101.

郑绵平,赵元艺,刘俊英. 1998. 第四纪盐湖沉积与古气候. 第四纪研究,(4):297~307.

Abraham Lerman. 1967. Model of Chemical evolution of a chloride lake. The Dead Sea. Geochim. Cosmochim. Acta. 31(12):2307~2330.

Alonso R N, Viramonte J G. 1985a. Geyseres boratíferos de la puna Argentina. IV Congreso Geológico Chileno, Agosto, 3~23.

Alonso R N., Viramonte J G. 1985b. Provincia boratífera centroandina. IV Congreso Geológico Chileno, Agosto, 3~45.

Alonso R N. 1999. On the Origin of La Puna Borates. Acta Geologica Hispanica, 34: 141~166.

Fernando Ide, Luis Vergara-Eduards and Pedro Pavloviic-Zuvic. 1983. Solar Pond Design for the Production of Potassium salts from the Salar de Atacama Brines. Sixth International Symposium on salt. 11: 367~394.

Fernando I Y, Kunasz I A. 1989. Origin of lithium in Salar de Atacama, Northern Chile. In; Ericksen G E, Cānas Pinochet M T, Reinemund J A (eds), Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources, vol 11. Circum Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series, Houston, Texas, 165~172.

Lin Yue-ying, Zhang Han-Qing and Zheng Mianping. 1990. The crystal structure of Zabuyelite. Chinese Science Bulletin, 35(6): 489~492.

Martin Sherwood. 1970. Sea of Chemicals. Chemistry. 43(7): 34~36.

Smith G I. 1966. Geology of Searles Lake-A guide to prospecting for buried continental salines. In; Rau(ed) 2nd Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, 167~180.

Smith G I, Jones C L, Culberlson W C, Enicksen G E and Dyni J R. 1973. Evaporites and Brine. United States Mineral Resources. D. A. Brobst and W. P. Pratt, Editors. Geological Survey Professional Paper 820, 197~215., U S G Printing office, WashingTion.

Smith G I. 1976. Origin of lithium and other components in the Searles Lake evaporites, California. In; Vine J D (ed) Lithium resources and requirements by the year 2000. Geological Survey Professional Paper 1005, 92~103.

Zheng Mianping. 1997. An Introduction to Saline Lakes On the Qinghai-Tibet Plateau. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 163~169.

Zheng Mianping, Yuan Heran., Liu Junying, Li Yanhe, Ma Zhibang, Sun Qing. 2007. Sedimentary characteristics and Paleoeenvironmental Records of Zabuye salt lake, Tibet Plateau, Since 128 ka B P. Acta Geologica Sinica. 81(5): 861~874.

Hydrochemistry and Minerals Assemblages of Salt Lakes in the Qinghai-Tibet Plateau, China

ZHENG Mianping, LIU Xifang

R & D Center for Saline Lake and Epithermal Deposit, Chinese Academy of Geological Sciences, Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environment, Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing, 100037

Abstract

The salinity of the lakes of the plateau is closely related to the natural environment of lake evolution, especially the climatic conditions. According to the available data and interpretation of satellite images, the salinity of the lakes of the plateau has a general trend of decreasing from north and northwest to south and southeast, broadly showing synchronous variations with the annual precipitation and aridity (annual evaporation/annual precipitation) of the modern plateau. The pH values of the plateau salt lakes are related to both hydrochemical types and salinities of the lake waters, i. e. , the pH values tend to decrease from the carbonate type $\rightarrow$ sodium sulfate subtype $\rightarrow$ magnesium sulfate subtype $\rightarrow$ chloride type; meanwhile, a negative correlation is observed between the pH and salinities of the lakes. According to Kurnakov-Valyashko classification and author's subclassifying for carbonate type, a complete and meticulous hydrochemical classification of the salt lakes of the plateau has been made and then a clear understanding of the N-S hydrochemical zoning and E-W hydrochemical differentiation has been obtained. There is a genetic association between certain saline minerals and specific salt lake hydrochemical types: the representative mineral assemblages of the carbonate type of salt lake is borax (tincalconite) and borax-zabuyelite (Li_2CO_3) and alkali carbonate-mirabilite; the representative mineral assemblages of the sodium sulfate subtype are mirabilite (thenardite)-halite and magnesium borate (kurnakovite, inderite etc.)-ulexite-mirabilite; the representative mineral assemblages of the magnesium sulfate subtype are magnesium sulfate (epsomite, bloedite)-halite, magnesium borate-mirabilite, and mirabilite-schoenitehalite, as well as large amount of gypsum; The representative mineral assemblages of the chloride type are carnallite-bischofite-halite and carnallite-halite, with antarcticite in a few individual salt lakes. The above-mentioned salt lake mineral assemblages of various types on the plateau have features of cold-phase assemblages. Mirabilite and its associated coldphase saline minerals are important indicators for the study of paleoclimate changes of the plateau. A total of 59 elements have been detected in lake waters of the plateau currently, of which the B is intimately associated with Li, Cs, K and Rb and its concentration shows a general positive correlation with increasing salinity of the lake waters. The highest positive anomalies of B, Li, Cs, and K center on the Ngangla Ringco Lake area in the western segment of the southern Qiangtang carbonate type subzone (I_2) and coincide with Miocene volcanic-sedimentary rocks and high-value areas of B, Li, and Cs of the plateau. This strongly demonstrates that special elements such as B, Li, and Cs on the plateau were related to deep sources. Based on recent voluminous geophysical study and geochemical study of volcanic rocks, their origin had close genetic relation to anatectic magmatism resulting from India-Eurasia continent-continent collision, and B-Li (Cs) salt lakes in the Cordillera Plateau of South America just originated on active continental margins, both of which indicate that global specific tectonically active belts are the main cause for the high abundances of B, Li, and Cs (K and Rb) in natural water and mineralization of these elements.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; Salt lake; Zoning of hydrochemical types; Salt lake mineral assemblage; Boron, lithium, potassium, cesium, rubidium Material source