

西藏盐湖化学特征的初步研究*

唐 渊 于升松 刘 青

一、概 述

久负盛名的世界屋脊—青藏高原，星罗棋布的湖泊，构成了高原独特的自然景观。全面地考察和研究这些湖泊，特别是研究盐湖的分布特征、物质成分、形成和演化规律，不仅对研究青藏高原的隆起是必要的，而且对发展当地的工、农、牧业生产，也都具有重要的实际意义。

根据中国科学院一九七三—一九八〇年青藏高原综合考察规划，我所组织了盐湖科学考察分队，分别于一九七六年和一九七八年两次赴西藏进行盐湖科学考察。

两次盐湖科学考察，取得了许多可贵的第一手资料，采集了许多水样，获得了大量的水质分析数据。这就是撰写本文的基础。

我们以湖泊水体的总含盐量高低为主要标志，将湖泊划分为四种类型，即：

盐湖：总含盐量 >50 克/升；

咸水湖：总含盐量 $35\sim 50$ 克/升；

半咸水湖：总含盐量 $1\sim 35$ 克/升；

淡水湖：总含盐量 <1 克/升。

后面所提到的盐湖、咸水、半咸水湖和淡水湖其含意就是如上所述。

二、盐湖的分布

(一)湖泊的平面分布特征：

辽阔的青藏高原，数以千计的湖泊主要分布在喜马拉雅山脉以北的藏南地区和冈底斯山、念青唐古拉山以北的藏北高原。

西藏全区有大小湖泊约2000个，面积约

27000平方公里，占西藏总面积的2.25%。而面积在一平方公里以上的湖泊近1000个，其中包括盐湖170多个，面积6000平方公里，占湖泊总面积的22.2%；咸水和半咸水湖300多个，面积16000平方公里，占湖泊总面积的59.3%；淡水湖500多个，面积近4500平方公里，占湖泊总面积的16.7%。而面积在一平方公里以下的湖泊虽为数甚多，但其面积仅约500平方公里，占湖泊总面积的1.8%。这就表明，西藏高原的湖泊中，盐湖、咸水湖和半咸水湖的面积占了绝对优势，它们占了湖泊总面积的80%以上。这显示出，西藏高原的湖泊是以盐湖、咸水湖和半咸水湖为主的这样一个显著的特点。这些湖泊除东部和东南部有少数属外流湖泊外，绝大多数是属高原内流湖。当然盐湖更不能例外。

由于湖泊所处的地质条件和自然地理环境不同，湖泊的水体的发展演化阶段，也就显示出各自的差异。水系发育的藏南、藏东（昌都地区），许多湖泊都是淡水湖和半咸水湖，尽管有许多湖泊由于被洪积扇和沙堤所阻隔，使原来的外流湖逐渐变成内流湖，但仍然属湖泊发展的第一阶段，尚未演化成为盐湖，其湖水的总矿化度皆小于50克/升。而冈底斯山—念青唐古拉山以北的藏北高原，由于气候、地质构造、地貌和水文地球化学环境等多种因素的相互影响和制约，水系不发育，多呈闭流盆地，湖泊水体的盐分得到了充分的补充和聚集，并不断浓缩，因而多

* 这是西藏盐湖考察的研究成果，在编写报告时，室领导同志作了具体指导。一室分析组和三室许多同志参加了样品的分析工作，七室协助进行电算程序的编写和计算。

数湖水的总矿化度超过50克/升，而演化成盐湖。因此，藏北成为盐湖的集中分布区；而藏南和昌都地区无盐湖分布，这些地区的湖泊绝大多数是淡水湖，半咸水湖较少。

(二)盐湖的分布特征：

西藏高原的盐湖分布在东经 $78^{\circ}\sim 92^{\circ}$ ，北纬 $28^{\circ}\sim 37^{\circ}$ 之间，处于我国盐湖带的西端(图1)。170多个盐湖分布在大约60万平方公里的面积内，湖面海拔4500~5000米，山脊平均高度在海拔5500米左右。由于地势高亢，盐湖众多，因之这是世界上最高最大的盐湖区。西藏盐湖的盐矿资源也非常丰富，是世界闻名的硼产地。

西藏的盐湖就面积而言，超过100平方公里的盐湖约占盐湖总数的三分之一；而面积为数平方公里的盐湖约占半数以上。面积最大的盐湖昂拉仁错为560平方公里，海拔4696米。海拔最高的盐湖是清彻湖，湖面海拔5103米，面积为57平方公里。面积最大的咸水湖和半咸水湖是纳木错，1940平方公里，海拔4718米，总矿化度1.715克/升；色林错1865平方公里，海拔4530米，总矿化度20.854克/升；扎日南木错1000平方公里，海拔4613米，总矿化度11.638克/升。上述这些面积最大的盐湖，咸水湖和半咸水湖都分布在班公湖—尼玛—怒江大断裂以南的昂拉仁错—色林错复向斜构造带内。

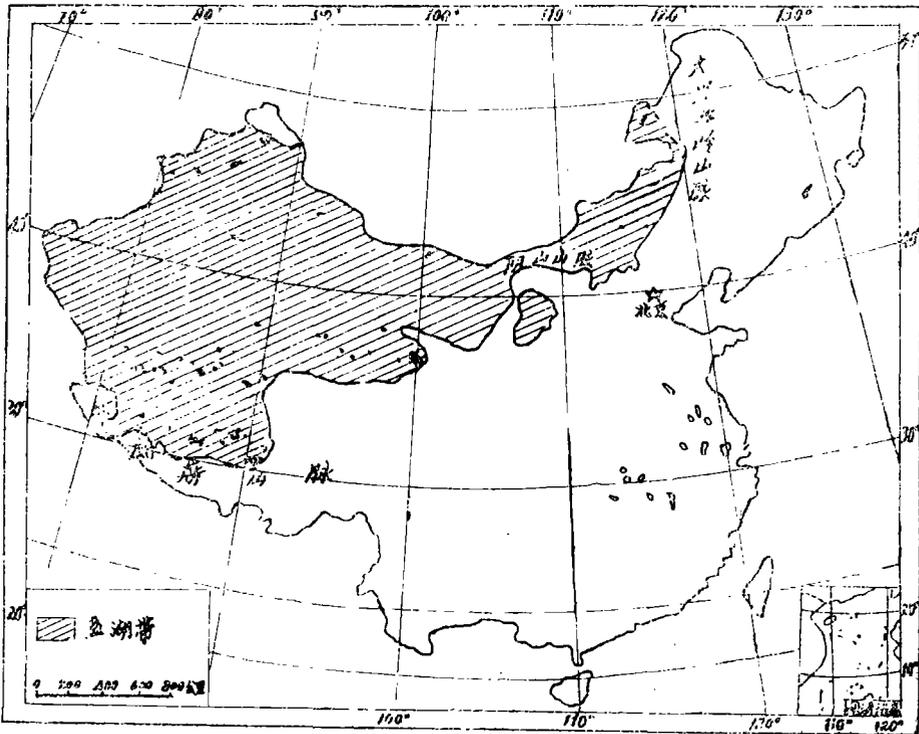


图1 中国盐湖带

三、盐湖水化学特征

西藏高原的盐湖卤水，主要是直接出露地表的湖表水，而赋存于盐类沉积物和含盐

粘土碎屑沉积物的颗粒孔隙之中的晶间卤水(包括孔隙水)。由于数量关系而居于次要地位，且资料有限，因而此处只论述湖表卤水的水化学特征。

(一)pH值

西藏盐湖卤水的 pH 值，最高为10.10 (当旁错)，最低为7.00(康如茶卡)，平均为8.11, 属弱碱性水。高原北部盐湖卤水的 pH

值较低，黑阿公路附近的盐湖 pH 值较高。而西藏的咸水湖和淡水湖的值 pH 均较盐湖为高，它的最高值达10.32, 最低值为7.40。表1是各种天然水体的 pH 值平均值。

西藏盐湖卤水的 pH 值，是随水体矿化度的增加而降低的(见图2)。

表1 西藏高原各种天然水体的pH值和总矿化度平均值

项 目 \ 类 别	盐 湖	咸水湖	淡水湖	河 水	温 泉	雨(雷)
pH值	8.11	9.14	8.36		8.27	
总矿化度(克/升)	203.076	14.240	0.368		1.977	

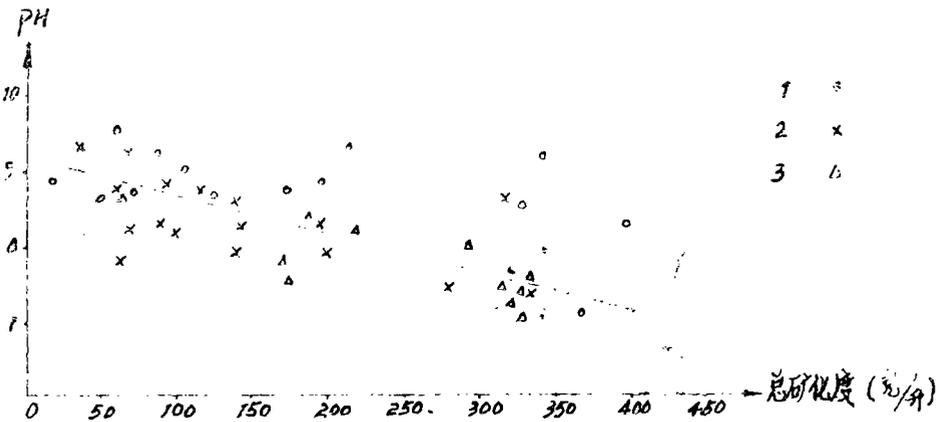


图2 西藏高原盐湖卤水的水型pH值和与矿化度的关系
1.碳酸盐型水 2.硫酸钠亚型水 3.硫酸镁亚型水

上图表明，湖表卤水矿化度在50~150克/升时，pH值多为8.00左右；而矿化度达到250~350克/升时，pH值则多为7.00左右。pH值随矿化度的增加而降低的总趋势如图中虚线所示。同时，我们从图2中还可以看出 pH 值与盐湖化学类型的某些关系。就是碳酸盐型盐湖卤水的 pH 值较硫酸湖型盐湖卤水的 pH 值为高，它的点多位于图中的上方。

分析数据来看，其总矿化度最高为365.013克/升(噶尔昆沙湖)，最低为49.143克/升(诺尔玛错)，平均为203.076克/升。这些湖表水属浓溶液，有些已进入盐类自析阶段，多有芒硝、石盐、硼砂等盐类矿物析出。

西藏高原盐湖卤水的总矿化度，在平面分布上的总趋势是：靠近高原的南部，也就是碳酸盐型盐湖分布区的矿化度较低；中部地带，硫酸钠亚型盐湖分布区的矿化度较高；北部地带，硫酸镁亚型盐湖分布区的矿化度一般是最高的。

藏南地区无盐湖分布，自然那里湖表水的矿化度皆小于50克/升。

(二)总矿化度

根据西藏高原现有六十多个盐湖的水质

表3

西藏盐湖化学类型表

湖名	特征系数				水化学类型	湖名	特征系数				水化学类型
	K _{π1}	K _{π2}	K _{π3}	K _{π4}			K _{π1}	K _{π2}	K _{π3}	K _{π4}	
扎东茶卡	2.08	5.69	1089	400	碳酸	依布茶卡	0.05	4.39	46.2	0.52	硫酸钠亚型
班戈湖(I)	28.2	61.9	∞	∞		布尔嘎错	0.07	1.30	116	6.12	
班戈湖(II)	61.3	375	11909	1948		扎木茶卡	0.07	1.11	178	11.2	
班戈湖(III)	368	2012	∞	∞		热邦错	0.83	15.02	961	53.03	
郭加林	363	2812	∞	∞		孔孔茶卡	0.05	2.41	351	7.35	
茶拉卡	48.8	302	2054	332		拉果错	0.17	2.03	121	10.32	
才马尔错	53.4	154	4637	1614		拉果尔错	0.86	5.79	602	106	
阿翁错	1.16	8.19	1491	212		嘎仁错	0.004	1.003	7.001	0.035	
玛尼错	1.24	2.74	93.3	42.5		查波错	0.02	1.14	76.0	1.17	
昂拉仁(I)	19.9	131	6017	471		戈木茶卡	0.47	3.25	248	42.6	
昂拉仁(II)	4.1	29.6	385	61.4	达瓦错	0.40	5.33	365	27.8		
小崩则错	3.3	5.7	331	192	鄂惹错	0.17	3.24	189	10.2		
当穷错	1.5	1.5	19.0	18.1	赞宗错	0.10	2.41	71030	31.7		
台错	3.4	4.9	1823	1294	蒂让碧错	0.04	2.39	52.7	0.88		
扎布耶茶卡	260	346	174	529	昂拉仁(III)	0.96	9.05	915	109		
冈塘错	12.5	18.5	1377	9036	玛尔盖茶卡	0.16	0.47	48.2	16.3		
朋彦错	8.6	230	18.6	9.2	错尼	0.05	0.90	5.34	0.28		
昂达尔错	70	124	1743	987	扎仓茶卡(II)	0.01	0.71	37.3	0.62		
其香错	31	35	865	756	扎西茶卡	0.01	0.86	51.8	1.03		
诺尔玛错	8.5	11.0	14.6	11.4	龙木错	0.003	0.13	2.85	0.07		
雅个冬错	61.3	187	∞	∞	肖茶卡	0.07	0.59	32.0	3.91		
仁错约玛	20.6	39.8	356	385	康如茶卡	0.01	0.78	19.8	0.14		
北雷错	13.7	54.7	148	37.3	玛尔果茶卡	0.002	0.25	11.12	0.09		
宁错	101	156	234	431	查那错	0.01	0.33	∞	∞		
普嘎错	83	102	308	1253	仓木错	0.08	0.26	5.78	1.78		
扎仓茶卡(I)	0.01	1.04	52.4	0.55	确旦错	0.81	0.87	1.02	0.95		
扎仓茶卡(II)	0.01	1.07	65.8	0.86	才多茶卡	0.03	0.97	18.19	0.50		
恰茶卡	0.53	12.9	112	4.6	鄂雅错	0.02	0.16	4.82	0.89		
洞错	0.09	5.35	439	7.17	毕洛错	0.02	0.37	14.3	0.78		
别若则错	0.07	3.34	324	6.72	阿木错	0.01	0.16	1.51	0.13		
噶尔昆沙湖	≪1	1.87	108	≪1	茶错	0.06	0.77	19.09	1.47		
聂尔错	0.003	7.27	807	2.22	雅根错	0.03	0.42	14.89	1.01		

显然,对整个西藏高原而言,湖水的矿化度是由南而北从低到高的变化。

同时,我们按盐湖化学类型分别对其卤水的总矿化度和所赋含的 K、B、Li、Rb、Cs 等元素进行统计,其结果表明,矿化度是按水型从碳酸盐型→硫酸钠亚型→硫酸镁亚

型的顺序。除 B 外上述几种元素的含量,由小而大的变化趋势非常明显(表 2)。

前面已谈到过矿化度与水型的关系,因此也就反映出 K、B、Li、Rb、Cs 等元素与总盐量的比值是基本接近的。

表 2 西藏盐湖的总矿化度及某些组分与水型的关系

项 目 水 型		总矿化度 (克/升)	组 分 含 量(毫克/升)				
			K	Li	B	Rb	Cs
碳酸盐型		129.84	5,878.57	95.55	713.15	2.29	0.32
硫酸 盐型	硫酸钠亚型	166.41	5,953.97	413.15	387.72	6.24	3.19
	硫酸亚型	316.47	6,627.63	240.98	345.73	11.24	0.56

还应当指出,盐湖湖表水的矿化度,直接受气候的影响而发生季节性的变化,对同一湖泊不同年份或不同季节的取样,矿化度的变化幅度往往很大。同时由于周边淡水的补给,特别是地表径流补给的方向关系,而造成水体矿化度的差异,就是同一时期,湖泊水体不同部位的矿化度也是不同的,在接近淡水补给的部位,湖水的浓度低于远离淡水补给的部位。因而,盐湖的盐类沉积物也就是分布在远离淡水补给的那些湖滨地段,一般盐湖均表现出这样的特点。

(三)盐湖化学类型

根据目前已经收集到的西藏高原有水质分析资料的 64 个盐湖的数据,照 M.Γ 瓦良什科的盐湖分类法进行计算,确定西藏高原盐湖的水化学类型是:硫酸盐型盐湖比碳酸盐型盐湖多,占半数以上。其中,碳酸盐型盐湖 25 个,占 39.06%;硫酸钠亚型盐湖 22 个,占 34.38%;硫酸镁亚型盐湖 17 个,占 26.5%。本区没有氯化物型盐湖。从水化学类型来看,这与柴达木盆地盐湖有显著的差别,柴达木盆地有不少氯化物型的盐湖,而

没有碳酸盐型盐湖。之所以如此,我们认为:柴达木盆地的盐湖成盐期较西藏为早,演化的历史亦长,卤水的变质程度深。也就是说,由它们所处的地质条件、地理环境和盐湖演化的阶段的差异等多方面的因素而导致的结果。

根据对西藏高原盐湖进行水化学类型划分的实际结果(表 3),我们作出了水化学类型分区图(图 3)。

由图 3 可以看出,西藏高原盐湖水化学类型在空间上的分布,严格地受到该区的地质构造特点,自然地理条件,盆地演化历史的控制。碳酸盐型盐湖主要分布在斑公湖—尼玛—怒江断裂带以南,水系比较发育的地区;而硫酸盐型盐湖主要分布在此构造断裂带以北,水系稀少的地区。尽管按盐湖水化学类型的分布作出的分区,看起来不十分规则,但仍然可以看出这样的趋势:藏北高原的南部是碳酸盐型分布区;往北是硫酸钠亚型盐湖分布区;再往北则是硫酸镁亚型盐湖分布区。西藏高原盐湖水化学类型的这种分布特点,是遵循着盐湖卤水正向演化的一般规律。

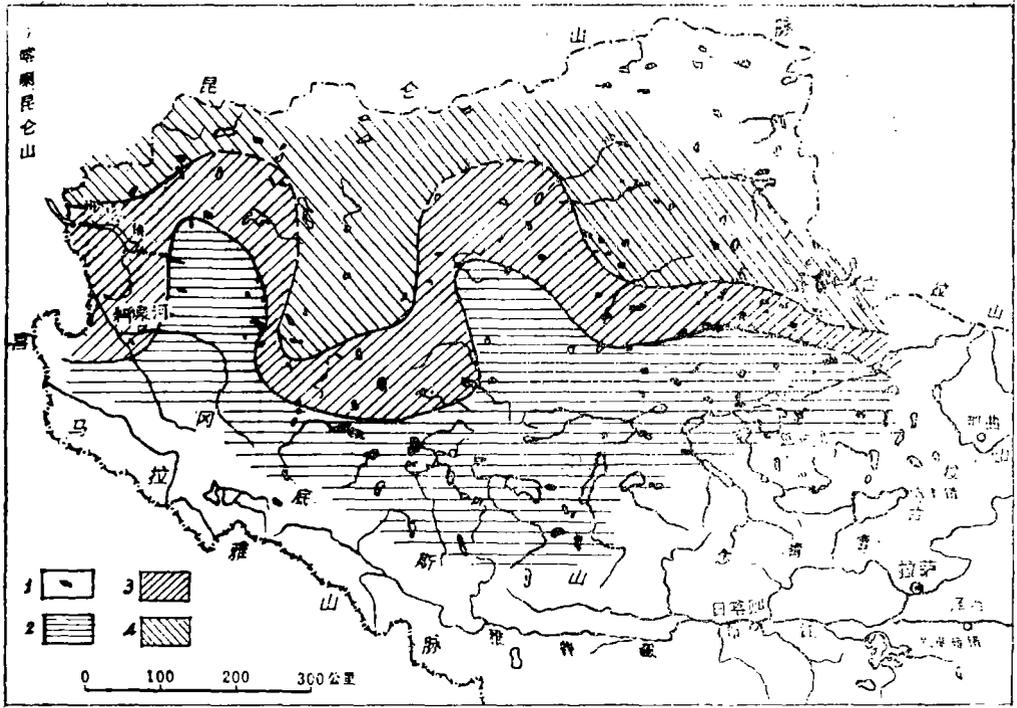


图3 西藏盐湖化学类型分区图

1 盐湖 2 碳酸盐型水化学区 3 硫酸钠亚型水化学区 4 硫酸镁亚型水化学区

(四) 化学组分:

据目前所知, 西藏高原盐湖卤水中, 含有近四十种化学组分, 它们的基本特征是:

1. 盐湖卤水中所含的绝大多数化学元素, 位于元素周期表的一~四周期, 其中主要元素都集中在 I_A、II_A、VII_A 族。例如 Na、K、Ca、Cl 就占 98% 以上(当量百分数), 其次是 III_A—IV_A 族。而且这些元素主要是呈低价离子存在于卤水中, 尤以正一价和负一价的离子最多, 如 Na⁺、K⁺、Li⁺、Cl⁻、Br⁻、I⁻ 等, 其次是正、负二价的, 如 Mg²⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻ 等。

2. 盐湖卤水中, 不计氢和氧, 大多数原子序数为奇数的元素的含量, 比相邻的偶数元素的含量高。最显著的是 Cl > S、Na > Mg、K > Ca 等。因而奇数元素含量的总合, 自然高于偶数元素含量的总合。例如 Na 和 Cl 的含量, 一般都占阴阳离子当量数的 70~90%。

3. 盐湖卤水的化学组分中, 阳离子 Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 和阴离子 Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 的含量最多, 它们往往占了离子当量百分数的 98% 以上, 构成了盐湖卤水的主要化学成分, 不仅是确定盐湖化学类型的基本因素, 而且直接影响着盐类化学沉积。这里必需强调指出, 西藏盐湖卤水中 B₂O₃ 的含量很高, 一般都达 2000 毫克/升, 扎布耶茶卡盐湖卤水中含 B₂O₃ 最高达 6369.71 毫克/升, 噶尔昆沙湖和聂尔错含 B₂O₃ 亦均达 4500 mg/l 以上。西藏盐湖卤水含 B₂O₃ 的平均数为 1744.60 毫克/升, 比海洋水的含硼量高 118 倍。由于有适宜的物理化学条件, 西藏有许多盐湖就自析硼砂 [Na₂O·2B₂O₃·10H₂O]。例如斑戈湖、郭加林、茶拉卡错、噶尔昆沙湖等。另外, 还有沉积了其他硼酸盐矿物的盐湖, 例如扎仓茶卡、扎布耶茶卡、恰茶卡、聂尔错、拉果错等。西藏盐湖自析硼砂早就闻名于世界。

在西藏的盐湖卤水中，锂也相当富集，与硼紧密共存。锂的最高含量达2900毫克/升（噶尔昆沙湖），平均320.4毫克/升，高出海洋水含锂量的1185倍。青海柴达木盆地盐湖卤水（包括晶间卤水）的硼，锂含量与海水相比，也分别高出65倍和605倍。青藏高原的盐湖如此富含硼，锂，正是本区盐湖的显著特色。

还要说明的是，除了上面谈到的卤水中那些主要化学成分（包括硼锂）外，尽管其余近30种化学组分的含量总和不到2%，但Rb、Cs、F、As、Si等组分的绝对值也是很高的，它们具有某些方面的特殊意义，对于热泉水和其他天然水来说，都是不可忽视的。

西藏高原盐湖水的主要化学组分的当量

比是：阳离子 $\text{Na}^+:\text{Mg}^{2+}:\text{K}^+:\text{B}^{3+}:\text{Li}^+:\text{Ca}^{2+} = 334.58:47.88:21.21:6.25:5.75:1$ 。其大小排列顺序为 $\text{Na} \gg \text{Mg} \gg \text{K} > \text{B} > \text{Li} > \text{Ca}$ 。阴离子 $\text{Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}:\text{CO}_3^{2-}:\text{HCO}_3^-:\text{Br}^- = 4015.5:898:615:24:1$ ，其大小排列顺序为 $\text{Cl} \gg \text{SO}_4 \gg \text{CO}_3 > \text{HCO}_3 \gg \text{Br}$ 。很显然，盐湖卤水中的 $\text{Na}^+、\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{Cl}^-、\text{SO}_4^{2-}$ 是占据绝对优势的。

4. 化学组分在湖泊水体中的平面变化情况，正象矿化度一样，直接受周边淡水补给的影响，高浓度的中心往往分布在远离主要淡水补给方向那个区域的中心。扎仓茶卡Ⅱ湖 B_2O_3 、Li（图4）和Rb、Cs（图5）的等值线既反应出上述的这种特点，又显示组分的绝对含量在平面上的分布状况。

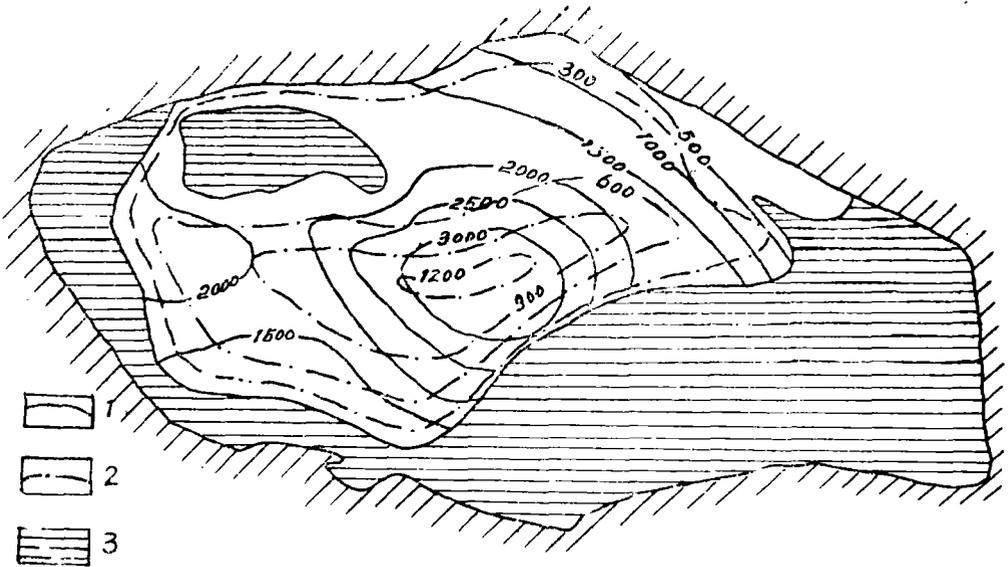


图4 扎仓茶卡Ⅱ湖 B_2O_3 、Li等值线图
1 B_2O_3 等值线 2 Li等值线 3 湖相沉积

我们把西藏盐湖卤水化学组分的含量与青藏高原另一盐湖集中分布的地区—青海柴达木盆地盐湖卤水和海洋水加以比较,列为表4。从表中可以看出柴达木盆地盐湖和西藏盐湖的卤水组成,都具有各自的显著特点。例如西藏盐湖的 B_2O_3 比海洋水高118倍, Li高1185倍, Cs高3876倍, Th高136倍, F高87倍, Pb高1033倍, Cr高332倍, Ag高212倍, 在高原盐湖卤水中, 硼、锂、铷、铯、铀, 钍等形成如此高度的地球化学集中, 也反应出高原独特的地质构造条件、地球化学环境、元素的迁移聚集条件等多方面的因素综合作用和相互影响的结果。

通过对西藏盐湖卤水某些化学组分相关性的计算(电算)和回归方程的计算, 其结果

列为表5和表6。西藏高原盐湖某些化学组分间的相关系数和回归方程式, 充分表明某些组分间相关性好呈直线相关, 在盐湖卤水中紧密共存的特点。

5. 盐湖卤水中某些化学组分的富集与其水化学类型有一定的关系(参见表2), 即硼主要富集在碳酸盐型和硫酸钠亚型卤水中; 锂主要富集在硫酸钠亚型, 其次是硫酸镁亚型卤水中, 钾在三种水型中均有富集; 铷铯主要富集在硫酸盐型卤水中。

在论述盐湖卤水中各种化学组分的富集情况时, 我们还应该注意到西藏盐湖卤水中的氟、磷、硅、砷的富集程度, 是在我国其他地区的盐湖中未曾见到的。

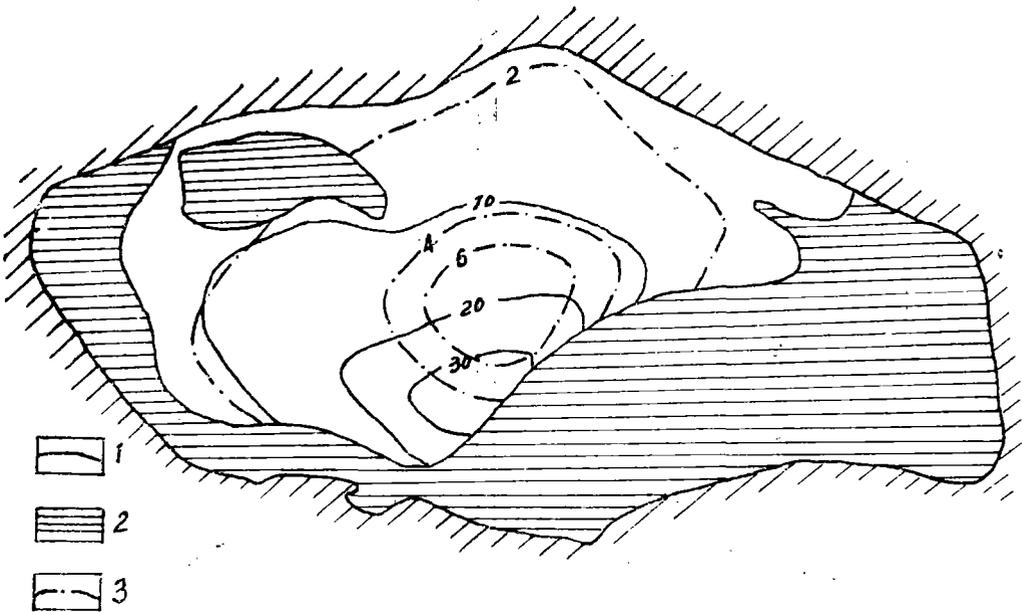


图5 扎仓茶卡湖Rb, Cs等值线图
1 Rb含量等值线 2 Cs含量等值线 3 湖相沉积

表 4 青藏高原盐湖卤水化学组分含量(毫克/升)比较表

地区	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	B	Li	Br	I	Rb	Cs	U	Th	F
海洋水	10506	380	409	1350	19000	2967	140	140	4.6	0.17	65	0.06	0.12	0.0005	0.003	0.00005	1.3
柴达木盆地	108200	14610	51860	94420	365080	37440	470	1480	1325.8	35	132.72	5.43	30	0.18	0.147	0.51	
盐湖卤水	270	29	140	2110	124360	20	120	130	6.2	2.2	0.25	0.18	0.57	0.0	0.005	0.0	
为海洋水的倍数	6.3	12.4	16.7	21	10.3	5.1	2.4	3.6	65.4	605	0.5	17.7	90	68	23	4500	
藏北高原	124337	21210	1156	20095	183887	90610	4267	6653	1439.2	2900	243	0.6	23.13	18.3	1.5	0.072	441.85
盐湖卤水	16985	768	0.0	5.1	3219	2332	0.0	0.0	31.7	0.0	0.30	0.0007	0.20	0.0	0.0	0.0	10.67
为海洋水的倍数	61607	6646	158.7	4658	92290	27950	943	1192	541.8	320.4	62.51	0.159	5.42	1.938	0.162	0.0068	112.9
地区	P	Si	As	Al	Pb	Fe	Sn	Cr	Mn	Ni	Mo	V	Ti	Cu	As	Zn	
海洋水	0.07	3.00	0.003	0.01	0.00003	0.010	0.0008	0.00005	0.002	0.002	0.01	0.002	0.001	0.003	0.00004	0.01	
柴达木盆地	0.15			0.40	0.009		0.016	0.048	>0.4		0.17			>0.05	>0.012	>24	
盐湖卤水	0.047			0.10	0.020		0.0084	0.014	0.02		0.004			>0.024	0.0048	<0.05	
为海洋水的倍数	0.025	11.03		0.24	0.04		0.013	0.027	0.26		0.039			0.008	0.027	0.009	4.66
藏北高原	0.35	3.7		24	1333		16	540	130		9		8	9	225	466	
盐湖卤水	12.90	11.6	13.2	0.12	0.22	0.85	0.016	0.034	0.153	0.07	0.16	0.018	0.02	0.13	0.067	0.15	
为海洋水的倍数	0.0	0.0	0.0	0.009	0.001	0.039	0.0	0.004	0.002	0.003	0.005	0.002	0.002	0.0008	0.0002	0.0003	
盐湖卤水	2.03	3.6	1.720	0.0549	0.031	0.1860	0.044	0.0166	0.0328	0.010	0.0389	0.006	0.006	0.0243	0.0085		
为海洋水的倍数	29	1.2	573	5.5	1033	19	5.5	332	16	5	4	3	6	8	212		

表 5

西藏盐湖某些化学组分间的相关系数

	Rb	Cs	P	As	I	U	F	Si	Br	Li	B ₂ O ₃	K	Mg	SO ₄	Σ盐
Rb	\	0.867	0.478	0.347	0.416	0.126	0.414	0.726	0.817	0.851	0.723	0.598	0.616	0.116	0.308
Cs		\	0.569	0.946	0.553	0.267	0.147	0.602	0.404	0.631	0.823	0.559	0.275	0.366	0.124
P			\	0.604	0.352	0.572	0.188	0.130	0.009	0.375	0.691	0.368	0.081	0.178	
As				\	0.605	0.328	0.160	0.559	0.644	0.753	0.913	0.664	0.495	0.418	0.022
I					\	0.423	0.098	0.284	0.351	0.358	0.588	0.425	0.735	0.257	0.124
U						\	0.296	0.045	0.018	0.187	0.533	0.636	0.112	0.316	0.051
F							\	0.214	0.402	0.416	0.238	0.329	0.708	0.179	0.341
Si								\	0.631	0.517	0.359	0.397	0.430	0.004	0.248
Br									\	0.881	0.591	0.572	0.688	0.177	0.231
Li										\	0.746	0.658	0.621	0.202	0.180
B ₂ O ₃											\	0.333	0.495	0.595	0.129
K												\	0.505	0.149	0.050
Mg													\	0.067	0.547
SO ₄														\	
Σ盐															\

注：——表示相关性好。

表 6

西藏盐湖某些化学组分间的回归方程式

化学组分	a	b	回 归 方 程 式
B ₂ O ₃ Li	1260.40	1.42	B ₂ O ₃ = 1260.40 + 1.42Li
B ₂ O ₃ Rb	573.47	128.215	B ₂ O ₃ = 573.47 + 128.215Rb
B ₂ O ₃ Cs	965.823	148.075	B ₂ O ₃ = 965.823 + 148.075Cs
B ₂ O ₃ P	890.194	247.442	B ₂ O ₃ = 890.194 + 247.442P
B ₂ O ₃ As	833.777	284.161	B ₂ O ₃ = 833.777 + 284.161As
Li Rb	102.116	26.240	Li = 102.116 + 26.240Rb
Li Cs	211.968	19.873	Li = 211.968 + 19.873Cs
Li As	183.627	41.031	Li = 183.627 + 41.031As
Rb Cs	2.543	0.849	Rb = 2.543 + 0.849Cs
K Rb	4346.413	463.048	K = 4346.413 + 463.048Rb

K	Cs	6026.731	441.825	$K = 6026.731 + 441.825Cs$
K	P	5173.856	1051.761	$K = 5173.856 + 1051.761P$
K	B ₂ O ₃	2264.589	3.619	$K = 2264.589 + 3.619B_2O_3$
K	Li	2845.214	16.525	$K = 2845.214 + 16.525Li$
K	As	5513.838	909.169	$K = 5513.818 + 909.169As$
Mg	Rb	2644.548	547.350	$Mg = 2644.548 + 547.350Rb$
Mg	B ₂ O ₃	2648.740	0.499	$Mg = 2648.740 + 0.499B_2O_3$
Mg	K	189.151	0.580	$Mg = 189.151 + 0.580K$
Mg	Li	1308.514	17.900	$Mg = 1308.514 + 17.900Li$
Mg	As	4601.914	777.157	$Mg = 4601.914 + 777.157As$
Mg	F	2205.730	33.250	$Mg = 2205.730 + 33.250F$
Mg	Si	2639.525	88.290	$Mg = 2639.525 + 88.290Si$
As	Rb	-1.093	0.479	$As = 0.479Rb - 1.093$
F	Rb	67.870	7.828	$F = 67.870 + 7.828Rb$
P	Rb	0.514	0.235	$P = 0.514 + 0.235Rb$
Si	Rb	2.494	0.403	$Si = 2.494 + 0.403Rb$
P	As	1.193	0.285	$P = 1.193 + 0.285Cs$
As	Cs	0.392	0.547	$As = 0.392 + 0.547Cs$
As	P	0.551	0.695	$As = 0.551 + 0.695P$
Si	As	3.978	0.548	$Si = 3.978 + 0.548$

四、盐湖的物质来源

无论是海相盐盆或是陆相盐湖，它们的物质来源总不是绝对单一的，因为它们不是一个封闭的体系，因而物质来源的多样性应该是所有盐盆的共同特点。但是，处于不同的地质体，不同水文地球化学环境中的盐湖，它们的物质来源也不尽然相同，各种不同来源的物质，大多数是以水溶液为介质而汇集于成盐盆地的。

一般地讲，成盐盆地周围岩石的风化淋滤，源源不断地为湖泊水体的化学组分提供着最基本的物质来源，而且贯穿着湖泊发展演化的整个阶段，特别是对成盐元素的迁移

和聚集，起着一定的作用。

由高原隆起而形成的区域性大断裂，以及次一级构造，控制着西藏盐湖的湖盆，而且为水热活动提供了良好的通道。

大量的事实和实际资料表明，处于青藏高原这个特殊地质体中的盐湖，其物质来源、特别是那些特征元素的来源，与该区的热活动关系极为密切。也就是说，在青藏高原广泛发育的温泉（热泉和沸泉），为西藏盐湖提供着最主要的物质来源，特别是B, Li, Rb, Cs, As, F, Si等特征组分的来源。因为这些组分，在西藏的盐湖卤水，咸水和淡水、温泉热水中都有相当高的含量，这是其它地区的天然水体所不能比拟的。还有西藏

某些地区的火山活动也为盐湖提供了 B, Li 等组分的来源。

我们把西藏湖泊水体和热泉水中某些组分和其总盐量的比值加以比较(表7), 看出很多比值是非常接近的或相差不大, 这就令人信服地表明, 西藏高原各种天然水体间存在着内在联系。某些数值虽相差较大, 这是由于元素本身的性质和在迁移聚集过程中的地球化学行为的差异而造成的必然结果。

值得注意的是, 某些成因系数对比的结

果, 揭示了物质来源的有力证据(表8)。

从表中看出, 西藏高原盐湖卤水的 rSO_4/rCl , rNa/rK , rNa/rCl 及硫同位素比值 (S^{32}/S^{34}) 与热泉水相应的比值是极其相似的, 而与 现代海洋水、海成盐湖(死海、卡腊—博加兹湾), 与火山作用有关的盐湖(西尔斯盐湖、卡特韦盐湖), 与再溶盐有关的盐湖(厄尔顿盐湖、英杰尔盐湖), 与风化淋滤作用有关的盐湖(青海柴达木盆地的盐湖)是不同的。

表7 西藏高原天然水体中某些化学组分与总盐量的比值:

系数值 水体	Na/Σ盐	K/Σ盐	Mg/Σ盐	Cl/Σ盐	B ₂ O ₃ / Σ盐	Li × 10 ³ / Σ盐	Rb × 10 ³ / Σ盐	Cs × 10 ³ / Σ盐	F × 10 ³ / Σ盐
盐湖卤水	0.3170	0.0348	0.0224	0.3906	0.01075	1.4273	0.0257	0.0088	0.58
咸水、淡水	0.2625	0.0268	0.0393	0.1863	0.0285	0.6804	0.1595	0.2879	220.4
热泉水	0.1874	0.0199	0.0212	0.0989	0.0547	1.2517	0.2374	0.7569	4.4

表8 西藏高原盐湖水与热泉水, 不同成因的盐湖水
海洋水的某些特征系数值的比较

系数值 水体	rSO_4/rCl	$r(Na+K)/r(Ca+Mg)$	rNa/rK	rNa/rCl	S^{32}/S^{34}
西藏盐湖	0.2236	7.2796	15.7760	0.9996	22.076~22.134
西藏热泉	0.2175	4.0322	20.5957	1.3885	22.076~22.22
柴达木盆地盐湖	0.0576	1.1551	23.7962	0.5338	
卡腊—博加兹湾	0.2	1.80	/	0.79	
死海	0.0019	0.40	7.86	0.26	
厄尔顿湖	0.16	0.79	/	0.59	
英杰尔湖	0.002	5.0	27	0.82	
西尔斯湖	0.058	∞	6.92	1.93	
卡特韦湖	0.21	∞	5.73	1.46	
海洋水	0.1	3.95	41.0	0.85	

大量事实表明, 西藏高原的水热活动极为强烈。目前, 尽管沿雅鲁藏布江缝合线一带的藏南地区, 现代水热活动强烈, 但在盐

湖集中分布的藏北地区, 古泉华极为发育, 完全可以推断, 在青藏高原隆起的初期, 藏北的水热活动亦具相当规模, 是不亚于藏南

的。例如，现在仍以 $1\text{米}^3/\text{秒}$ 流量直接补给依布茶卡的绒马温泉，碳酸盐古泉华柱高达数米，婷婷而立，极为壮观。在扎仓茶卡盐湖的南缘，残留古泉华柱断续分布数十公里，目前仍有泉水直接补给该湖。其他地方也还有许多温泉直接或间接地和盐湖及其他类别的湖泊有着某种联系。例如才多茶卡、斑戈湖等湖，都有温泉水直接补给。错尼湖和查玛错都有随湖水的深度增加，而水温显著增高的现象。如果不是湖底或湖侧有热泉的潜流补给，那就是湖底存在着某种热源而引起的放热现象，对深部的湖水进行加温，造成湖水温度的垂直变化。

总之，青藏高原盐湖的物质来源，除了成盐盆地周围岩石在外力地质作用下，为湖泊水体提供着最基本的成盐组分外，火山作用也提供了部分硼、锂，但起主要作用的，是该区的水热活动的产物。

主要参考文献

- [1] 于升松、唐渊，“青藏高原盐湖水化学特征”，1979年11月，青藏高原科学讨论会论文，摘要收集在《讨论会论文集》1980年5月25日。
- [2] 袁见齐，“柴达木盆地中盐湖的类

型”，《地质学报》39卷 第3期，（1959年）

- [3] 常承法等，“中国西藏南部珠穆朗玛地区地质构造特征以及青藏高原东西向诸山系形成的探讨”，《中国科学》，1973年No. 2。
- [4] M.Γ. 瓦良什科，“钾盐矿床形成的地球化学规律”，中国工业出版社，（1965年）。
- [5] 郑喜玉、杨绍修，“西藏盐湖物质成份的初步研究”（内部资料），1979年12月。
- [6] 中国科学院青藏高原综合考察队《西藏的地热》，科学出版社（送审稿），1979年。
- [7] 郑绵平等，《西藏盐湖硼矿研究报告》中国科学技术情报研究所，1974年10月
- [8] 中国科学院盐湖研究所，《柴达木盆盐湖》，1978年送审稿（初稿）
- [9] 中国科学院地球化学研究所，《简明地球化学手册》编译组。

“简明地球化学手册”，科学出版社，（1977年）