第36卷 第1期 地 理 学 报 Vol. 36, No. 1
1981 年 3 月 ACTA GEOGRAPHICA SINICA March, 1981

青 藏 高 原 的 盐 湖*

陈克造 杨绍修 郑喜玉
(中国科学院青海盐湖研究所)

前 言

青藏高原棋布着世界最高海拔的盐湖，构成高原自然景观的重要特色之一。就其分布之广、数量之多、发育之好，皆占我国首位，成为我国盐湖资源的重要宝库。目前，在青藏高原123个[1]盐湖中(图2)，已见到40多种盐类矿物，其中天青石 ($SrSO_4$)、芒硝、硼酸盐、钾盐等，具有工业价值。在盐湖卤水，尤其是晶间卤水中，富含钾、镁、锂、硼、铷、铯、铀、钍等，有的元素含量之高，储量之大，也是举世罕见的。因此，开展盐湖研究，在理论和实用价值上，都有重要意义。下面将就青藏高原上新世以来两次主要成盐期、盐湖分带、盐湖演化和盐类物质来源问题，作一初步探讨，也许能够反映高原盐湖的基本面貌。

一、成 盐 期

在介绍现代盐湖之前，追溯一下高原的成盐历史是必要的。上新世以来，青藏高原经历了两次重要的成盐作用，即上新世成盐期与晚更新世——现代成盐期。上新世后期，青藏高原已具备蒸发岩形成的良好条件，大致在北纬34—38度，或者说在阿尔金山与唐古拉山之间广大地区，几乎都有蒸发岩的分布。如图1所示，柴达木盆地西部发育最好，在蒸发岩大量出现之前，曾有泥灰岩、菱锶矿等碳酸盐沉积；随后，天青石、石膏、石盐、芒硝

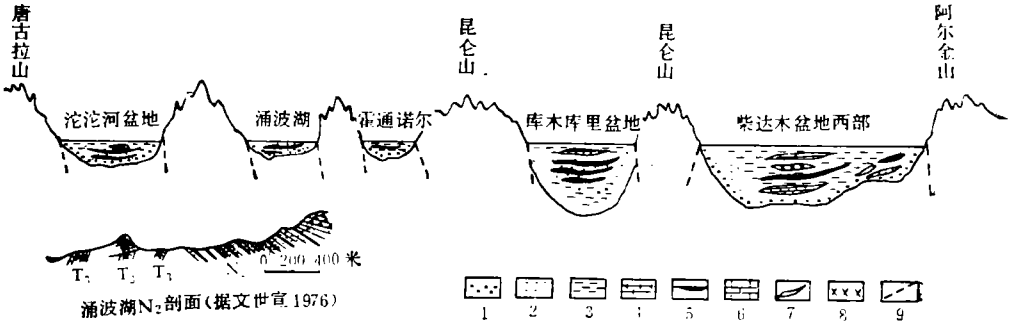


图1 青藏高原上新统蒸发岩分布剖面图

图例说明 1.砾岩 2.砂岩 3.泥岩 4.石盐 5.石膏 6.泥灰岩 7.天青岩 8.芒硝 9.断裂

* 本文承蒙盐湖所张彭熹、张长美、曹兆汉、孙大鹏等同志、袁见齐、施雅风教授和周动吾同志审阅，并提出宝贵的意见；胡金泉同志协助清绘图件。在此表示感谢。

1) 据中国科学院青藏高原综合科学考察队、青海地质局、西藏地质局等单位初步调查结果。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和白钠镁矾（$Na_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 4H_2O$）等相继而出。在芒崖的北部，1,000 米的沉积地层中，石盐累厚可达 200 米。向南在昆仑山的库木库里山间盆地，上新统上部为一套 2,000 米的灰绿色砂砾岩，土红色砂质泥岩及石膏、石盐互层[1]。昆仑山、唐古拉山之间与藏北北部广大地区，很多上新世断陷盆地里，巨厚的粗碎屑岩普遍有薄层石膏，夹层数以百计，沉积韵律清晰；在局部地区，例如治多县查勇滩见有长 700 米，厚 100 米的芒硝、石膏及薄层石盐[2]。邻近唐古拉山北坡，蒸发岩很少见及，主要为砂砾岩、泥岩，而具有向蒸发岩过渡性质的泥灰岩，也相当发育。再向南至喜马拉雅山，没有蒸发岩，而且资料证明[1][2]，上新世时的唐古拉山至喜马拉雅山一带，具有亚热带气候特征，尽管在其晚期有转向干旱的迹象。从上述资料可以看出，蒸发岩发育强度有自北向南逐渐减弱的这种变化趋势，显示了青藏高原自柴达木向喜马拉雅山，具有干旱-潮湿气候的分带性。

随着时间的推移，在第四纪的早期，由于大冰期的来临，区内没有出现重要的成盐作用。从晚更新世末期开始，才再一次出现大量蒸发岩，分布范围较前次显著扩大，几乎展布于整个柴达木和藏北高原，直临冈底斯山、念青唐古拉山北麓。这次成盐期，也是一次稀散元素和钾的重要成矿期。柴达木仍是个典型地区，蒸发岩厚数十米，经 C^{14} 年龄测定蒸发岩开始于距今约 33,800 年（见图 6）；藏北略迟，约为 9,000 年，蒸发岩厚度一般几米至十几米。这次成盐作用的基本特征为石膏、芒硝、柱硼镁石（$MgB_2O_4 \cdot 3H_2O$）、硼砂（$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$）、石盐，其中芒硝较前次显著增多，在柴达木还出现盐湖的最终产物——光卤石（$KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$，照片 1）和水氯镁石（$MgCl_2 \cdot 6H_2O$）。

应该指出，青藏高原这两次盐类沉积特征再一次证明它们是发育在巨厚的碎屑岩系中[3]，甚至是在粗碎屑岩系中，而不象西欧、北美那样，形成于海相的巨大碳酸盐岩系中。

二、盐湖分带

青藏高原的盐湖类型（据 M. Г. 瓦里亚什科分类法），在空间分布上有明显的分带性。如图 2 所示，即柴达木硫酸盐-氯化物型盐湖带；藏北碳酸盐-硫酸盐型盐湖带。它们还可以分为不同的亚带。柴达木盆地无碳酸盐型，硫酸钠亚型也只有小柴旦湖；硫酸镁亚型数量最多，分布在盆地中央的外围；氯化物型盐湖，发育在盆地中央，从昆特依到察尔汉，呈一舌状自西北向东南展布，特别在察尔汉附近，既是沉降中心，也是浓缩中心。可以清楚的看到，从外围到中央，由硫酸盐型逐渐过渡到氯化物型。相应地外围以锂、硼矿床为主，不仅沉积有湖底硼矿，而且有的湖水和晶间卤水富含锂 300—1,300 毫克/升，硼 600—1,500 毫克/升；中部则形成巨大的钾、镁矿床。在藏南，可能由于多属外流盆地或因气候的缘故，没有能够形成盐湖带。藏北则盐湖众多，以碳酸盐型和硫酸钠亚型为主，硫酸镁亚型次之，至今尚未发现氯化物型的盐湖。基本上可以把藏北的盐湖分为三个亚带。北带为硫酸镁亚型，在昆仑山山麓掺杂个别的硫酸钠亚型；中带以硫酸钠亚型为主，有少量碳酸盐型；南带为碳酸盐型，掺杂很少的硫酸钠亚型，硼矿主要产于这个亚带。藏北特别是它的中部和北部，与柴达木不大相同，它不是统一的盆地，更缺乏全区性的沉降中心，

1）青海地质局等，西北地区区域地层表青海分册，1977（送审稿）。
2）青海地质局第一区测队。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

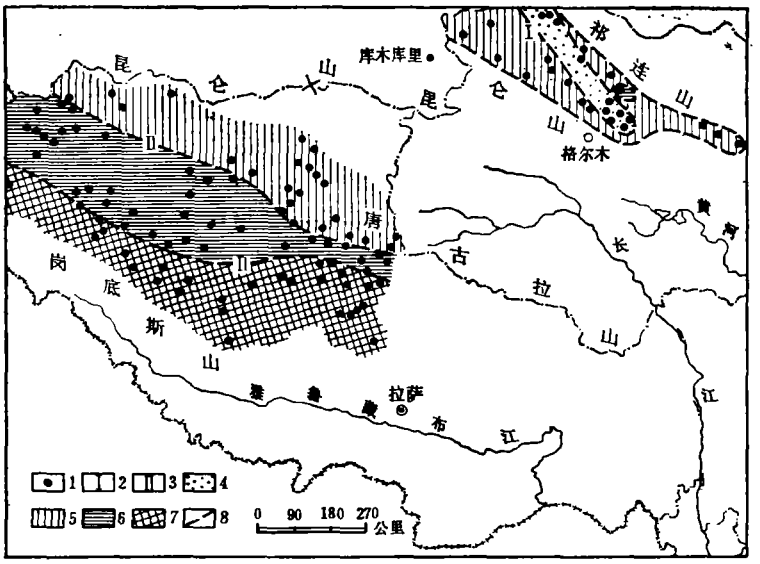


图 2　青藏高原盐湖分带图

图例说明：1.盐湖 2.柴达木硫酸盐-氯化物型盐湖带 3.藏北碳酸盐-硫酸盐型盐湖带 4.氯化物型盐湖带 5.硫酸镁亚型盐湖带 6.硫酸钠亚型盐湖带 7.碳酸盐型盐湖带 8.分带界线

而是在广阔无际的高原面上分隔的洼地里，汇水成湖的，各自形成小的浓缩中心。因此随着纬距增高而干旱程度递增，很可能导致藏北盐湖分带特征的主要影响因素。

关于两个盐湖带的一般特征，参看表 1，不另叙述。

表 1　青藏高原盐湖分带特征

特征 / 分带	湖面海拔（米）	降水量（毫米/年）	蒸发量*（毫米/年）	年平均气温（℃）	矿化度（克/升）	盐湖类型	湖底表层主要沉积物	主要物质来源	主要成盐期（C^{14}年龄）
柴达木硫酸盐-氯化物型盐湖带	2,700—3,200	28—40	2,800—3,400	0.1	最高 526 最低 205 平均 324	硫酸镁亚型＞氯化物型＞硫酸钠亚型	石盐、石膏、光卤石及少量水氯镁石	岩石风化、第三纪含盐岩系，温泉	33,800—现代
藏北碳酸盐-硫酸盐型盐湖带	4,400—5,000	狮泉河（1966—1977） 67.9. | 2,343 改则（1973—1977） 240 | 2,239		−2.1	最高 355 最低 63 平均 202	碳酸盐型≈硫酸钠亚型＞硫酸镁亚型	石盐、芒硝、石膏及硼酸盐	岩石风化温泉	9,000—现代

* 据青海省和西藏自治区气象局

三、盐湖演化

青藏高原的盐湖，大致可分为两类。一种是从新第三纪古湖基础上演化而来的，它们

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

多属比较大的断陷盆地或洼地，湖泊水域比较宽阔，形成时间也较久。例如察尔汉、库木库里、班公湖——怒江断陷谷等处的湖泊。另一种是发育在局部小洼地或小型断陷盆地内，多属第四纪新生的湖泊，这类湖泊一般面积较小，但数量较多。如柴达木边缘的湖泊和藏北的中部、北部的一些湖泊，多属于这一类型。第四纪早期，虽然区内气候有干湿波动，但总的看来还是比较潮湿的，湖域浩瀚。如图 3 所示，柴达木老第四纪地层占据了盆地的大部分地区，基本是一套淡水环境下碎屑沉积物，(照片 2、3) 察尔汉附近是其沉积中心，第四系最大厚度可达 2,000 米左右。中更新世末，由于新构造运动和气候日趋干旱的影响，湖泊分割性加剧。在此基础上，从晚更新世晚期开始，湖泊演化发生了重大变化，湖水急剧浓缩，逐渐演变成众多的盐湖 (图 4)。这种由大到小、进而肢解并出现盐类沉积的

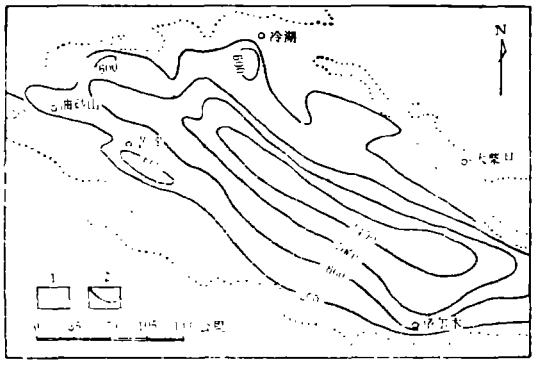


图 3 柴达木老第四系等厚图

图例说明：1.盆地边界线 2.等厚线

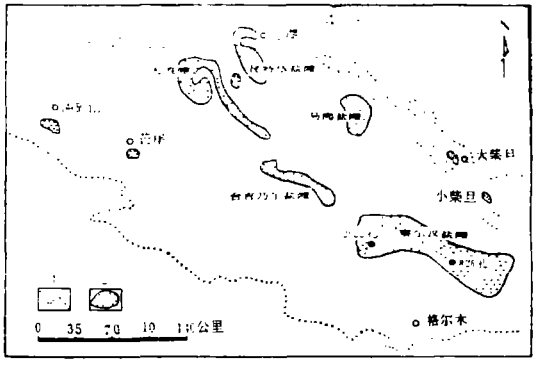


图 4 柴达木全新世蒸发岩分布图

图例说明：1.盆地边界线 2.蒸发岩(石盐为主)

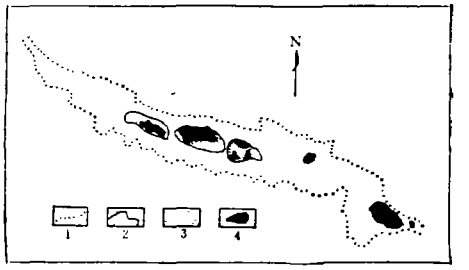


图 5 藏北扎仓茶卡湖盆变迁图

图例说明：1.第四纪早期湖盆界线 2.现代湖盆界线 3.盐类沉积 4.湖水

现象，在藏北也不乏其例(图 5)。上面的例子，基本反映了区内湖泊演化的总趋势。

然而，高原内的湖泊发展到盐湖阶段却有先后之别，盐类出现的时间也不尽相同。如图 6 所示，察尔汉中部(826 孔)出现盐类的时间距今约 C^{14} 33，800 年，其次为察尔汉西部(2022 孔)，距今约 C^{14} 24,000 年，大柴旦盐湖也近似这个年代；藏北最晚，距今约 C^{14} 9,000 年。从图中还可以看到，碎屑岩与盐类沉积间互出现，形成沉积韵律，表明即使在干旱的

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

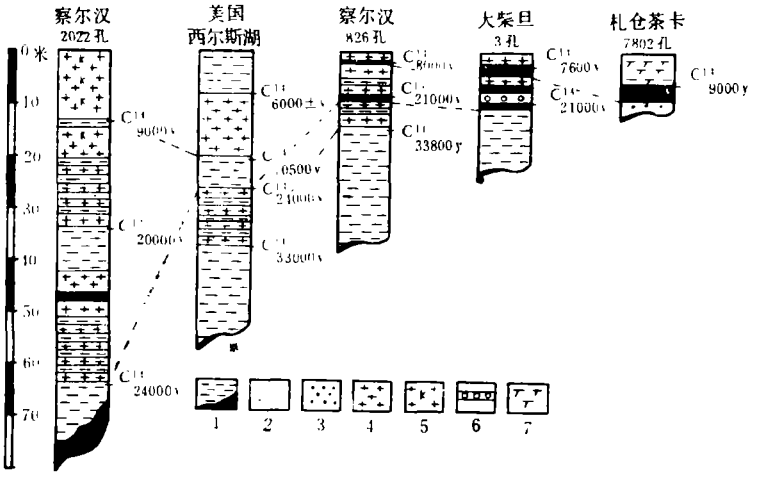


图 6　青藏高原晚更新世——现代盐类沉积演化图

图例说明：1.淤泥粘土 2.砂 3.砾 4.石盐 5.含钾盐石盐 6.硼酸盐 7.芒硝

* 据 Smith, G. L., 1976.

成盐过程中，也还存在气候的干湿交替。此外，在不同地区盐湖演化过程中有一个共同特点，即随时代变新，碎屑岩夹层减少，而蒸发岩的发育强度增高，盐层单层厚度增大，质地变纯，显示了盐湖演化向高阶段发展的趋势。

应当指出，全新世后期，柴达木的不少盐湖如大浪滩、昆特依、察尔汉等，已演化到干湖阶段，大片石盐裸露地表（照片 4、5）。其中察尔汉盐滩最大，面积有 5,000 平方公里，在其盐层上部有 7 个钾石盐、光卤石夹层[1]。盐湖沉积的这些最终产物，可以看作干湖的一种标志。此外，还有一种现象值得说明，在察尔汉，仅仅在其盐滩的周边才分布有几个现代盐湖（图 7），显然它们是借助几条小河或溢出的潜水，维持其生命的。经青海省地质局钻井证实，在湖底盐层之下普遍存在数十厘米至数米厚的泥砂或淤泥沉积，与下伏较老盐层之间，形成波浪起伏的溶蚀面（图 8），说明盐湖干涸之后，由于气候暂短变化，水源一度增加，浸没于盐滩边缘一些地区，而在河口附近产生了上述几个盐湖。这样看来，察尔汉现代的几个盐湖，并不是古湖残留体，而是新产生的盐湖。它为了解区内某些盐湖演化特

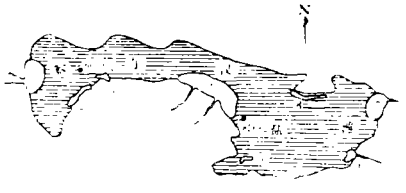


图 7　察尔汉盐滩边缘盐湖分布图

图例说明：1.涩聂湖 2.大别勒滩 3.小别勒滩 4.达布逊滩 5.团结湖 6.南霍布逊湖 7.北霍布逊湖 8 协作湖

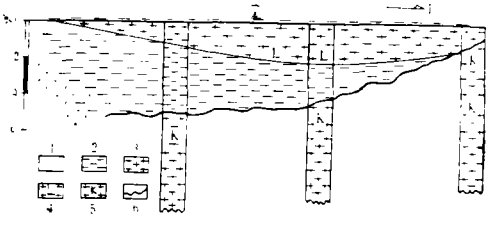


图 8　察尔汉盐滩西缘溶蚀面上的新盐湖（涩聂湖）

图例说明：1.砂 2.淤泥 3.石盐 4.含膏石盐 5 含钾盐石盐 6.溶蚀面

（据青海省地质局第一地质队钻井资料编绘）

1）据青海省地质局第一地质队，1957。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

征，提供了一个新线索。

四、盐类物质来源

既然盐湖蕴藏着富饶的硼、锂、钾等资源，那么它来自何处呢？目前，还没发现青藏高原的盐湖与海水有直接关系。也就是说，盐类物质来源不是直接来自海水。前已述及，青藏高原上新世以来的两次盐类沉积，都是发育在陆相碎屑岩系中，不言而喻，蚀源区岩石风化产物实际上是它们的最普遍的盐类物质来源[3]。对西藏，区域地球化学工作还很少；然而在柴达木我们开展了一些这方面的工作。根据对柴达木盆地流域范围内不同时代的大约500个各类岩石数据，获得锂、硼、钾的区域平均含量分别为：67ppm，80 ppm、2.02%。钾低于克拉克值，锂略高于克拉克值，硼则高于克拉克值约27倍。有这样良好的地球化学背景，源岩经过漫长的风化作用，可以把成盐元素迁移到水流的终点，富集在盆地之中。从表2看出，锂和硼在第三纪沉积物中，已经比区域平均含量有了显著地增高。这显然与盆地四周岩石风化物质向盆地迁移富集有直接关系。

表2 柴达木新第三纪沉积岩中 B. Li. K 的含量

地区	时代	岩性	样品数量	平均含量		
				Li(ppm)	B(ppm)	K(%)
碱山	N_1^3	泥岩	5	264	208	1.8
南翼山	N_2^2	泥岩	20	170	123	2.1
大风山	N_2^1	砂质泥岩及泥岩	9	116	127	2.8
	N_1	砂质泥岩及泥岩	7	114	79	2.5
区域平均含量				67	80	2.02

为了解柴达木盆地上新世含盐岩系与盐湖在物源上的关系，我们按照各种岩石所占的不同比例，制备成混合样，在常温常压和中性介质条件下，进行淋滤风化实验。如图9、10所示，这种尝试获得比较满意的结果。阴离子迁出顺序为 Cl^--$SO_4^=$-HCO_3^-，阳离子的迁出顺序为 Ca^{++}-Na^+-Mg^{++}(Li^+)-K^+。如果按其最大迁移率的顺序排列，阳离子为

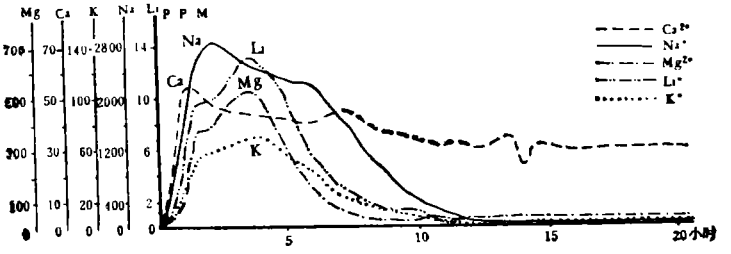


图9 淋滤实验阳离子迁出曲线图

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

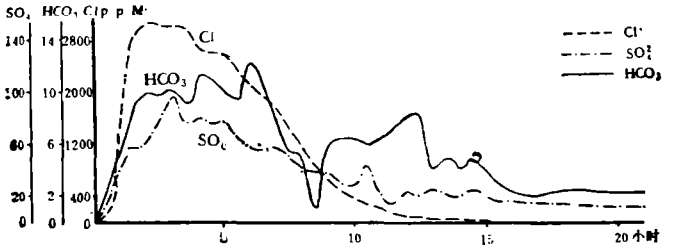


图 10　淋滤实验阴离子迁出曲线图

Na^+-Li^+-Mg^{++}-K^+-Ca^{++}，阴离子为 Cl^--$SO_4^=$-HCO_3^-。实验表明，上述这些元素与盆地外围的花岗岩、变质岩中的同类元素比较，可以更容易的在很短时间内从含盐岩系中淋滤迁出（表 3）。虽然供给的具体数量没有进行研究，但盆地西部广泛出露的新第三纪含盐岩系的再溶解，为其以后的盐湖提供了很重要的盐类物质是勿庸置疑的。我们认为，它是柴达木盐湖物质来源的主要方面。

表 3　柴达木盆地不同岩石淋滤实验钾的迁出数量（%）

实验条件		花岗岩	变质岩	含盐岩系
常　温	pH = 5	0.20	0.20	2—3
常　压	pH = 7	微	微	1

鉴于青藏高原本身所具有的地质特征，尤其是新构造运动强烈以及深断裂发育和火山活动等特征，导致温泉、热泉、沸泉活动相当普遍而强烈。可以观察到，不少盐湖直接接受这些泉水补给，而泉水含硼、锂等均较高（表 4）。泉水流经之处，往往形成泉华阶地（如

表 4　青藏高原温泉水化学组分

离子含量 (MG/L) / 地区		Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	B^{3+}	Li^+	Rb^+	Cs^+	CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	As^{3+}	F^-
柴达木盆地大柴旦热泉		120	15	280	23.9	39.3	3.4			12	180	190	340		
藏北	札仓茶卡温泉	100	2.5	34	29	1.55	1.5	0.08	0.15	0	229	143	82	<0.01	143
	绒马温泉	372	64	14	17	15.53	2	0.7	70.4	249	375	71	143	1.17	
美国 Casa Drablo 热泉*		390	45			15	2.8					130	280	2.2	12

* 据 Mariner 和 Willey 1976

大柴旦温泉）或林立的泉华柱，有的泉华断续延伸数十公里（如札仓茶卡温泉），有的泉华高达 20 米左右（照片 6）。这从直观上表明，泉水补给湖水已经有较长的时间了，而且可以想象补给量也是相当可观的。泉水与湖水中硫同位素含量及^{32}硫、^{34}硫比率十分相近（表

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

5)，则进一步证明盐湖中的硼、锂等元素，同泉水有着极为密切的关系。特别在西藏，泉水为很多盐湖提供了重要的物质成分。

表5 藏北西部盐湖、温泉硫同位素含量

名称 \ 含量	$\delta^{34}S‰$	$^{32}S/^{34}S$
盐湖	3.9—6.9	22.076—22.134
温泉*	0—6.5	22.076—22.22

* 据佟伟、张知非、章铭陶

五、结 语

1. 欧亚大陆上新世蒸发岩带[4]，从地中海沿岸能否向东与中国相连，延伸到哪一地区？青藏高原上新世蒸发岩的存在及分布范围，回答了这一疑题，而且，青藏高原蒸发岩的存在，还表明上新世后期，中亚荒漠性气候的影响已经越过了昆仑山，而波及到藏北和唐古拉山以北的地区。

晚更新世末——现代成盐期是硼、锂、钾的重要成矿期。它与美国西尔斯湖（Searles Lake）下盐层的成盐时代基本相同[6]。这对了解晚更新世末期以来的气候变化特征，是有意义的。

2. 青藏高原的盐湖分布，严格受区域构造线控制而平行于山脉走向。很多盐湖为构造断陷湖。由于横贯本区的重山叠嶂，阻隔着印度洋气流向北侵入，因此，随着纬距的增高而深入大陆内腹，形成了盐湖浓缩程度自南向北逐渐增高的分带特征。事实证明，在地势过高，温度偏低的环境下，仍然能形成大量蒸发岩。

3. 青藏高原盐湖演化具有北早南晚、北强南弱，并随时间的推移蒸发岩发育强度不断增高，盐类分布范围不断扩大的特征。所以，湖泊水域萎缩是普遍存在的现象。

由于在成盐期间仍然存在气候的干湿交替，从而形成碎屑岩与盐类的沉积韵律。有的盐湖已演化到干湖阶段，在它的上面又发育了新盐湖。

4. 青藏高原盐湖的盐类物质来源是多样的。岩石风化产物是最普遍的盐类来源。然而，从现有的一些资料至少证明，含盐岩系和来自深部的泉水，是区内盐类物质来源的主要方面。当然，今后对大气降水、油田水（柴达木盆地）等供给盐类物质的情况，是应该加以注意的。

参 考 文 献

[1] 崔之久、郑本兴，珠穆朗玛峰地区科学考察报告（1966—1968），科学出版社，1976。
[2] 陈万勇、范贵忠、于浅黎，古脊椎与古人类，15(4)，1977。
[3] 袁见齐、翟承禹：地质科技资料（钾盐专辑），第3期，p. 1—6，1979。
[4] Borchert, H., Muir, R. O.: Salt Deposits, D. Van Nostrand Company, LTD. p. 24—30, 1964.
[5] Mariner, R. H., Willey, L. M.: Jour. Geophys. Research, V. 81, No. 5, p. 792—800, 1976.
[6] Smith, G. I.: Geology of Searles Lake——a guide to prospecting for Buried Continental Saline, in Second Symposium on Salts, Northern Ohio Geol. Soc., Cleveland, p. 167—187, 1966.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

THE SALT LAKES ON THE QINGHAI-XIZANG PLATEAU

Cheng Kezhao Yang Zhaoxiu Zheng Xiui
(Qinghai Institute of Salt Lake, Academia Sinica)

Abstract

The eolian lakes are well developed on the Qinghai-Xizang plateau. From the Pliocene period up to the present, there have been two periods of mineralization. The first one took place in the Pliocene period, in which the minerals, such as gypsum, glauber salt and halite were major products. The second period took place from the late Pleistocene up to the present, during which boron, lithiem, potasium were highly concentrated —— one of the most significant characteristics of this period. The saline lakes on the Qinghai-Xizang Plateau can be classfied into two zones: the sulfate-chloride type in northern Xizang. Some of the saline lakes in this district developed on the basis of the Neogene fossil lakes, while others are newly grown in the Quaternary. Most of them are tectonic lakes. Rocks and hot springs are the main sources of the saline lake mineral.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net