第 22 卷 第 2 期
2 0 0 1 年 3 月

地 球 学 报
ACTA GEOSCIENTIA SINICA

Vol. 22 No. 2
Mar. 2001

青藏高原盐湖资源研究的新进展

郑绵平

(中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心,北京;
国土资源部矿产资源研究所,北京;国土资源部盐湖资源与环境开放研究实验室,北京)

摘 要 本文着重就盐湖中心"九五"研究工作进展作一简要报道。该研究以"盐湖学"(Salinology)为指导,开展基础理论研究与开发实验相结合的探索,将盐湖资源综合性调查与典型盐湖开发研究密切结合。首次揭示了环昂拉陵区为锂硼铯(钾铷)盐湖巨大成矿域;指出扎布耶超大型锂硼盐湖矿床为一陆-陆碰撞区多级浅盆成矿模式,不同于南美弧后裂谷的高深盆锂硼成矿模式;首次通过大范围盐湖综合调查,从而确认青藏高原是我国重要产卤虫盐湖远景区;以"因地制宜、就地取材、扬长避短"的原则,通过实验盐湖学研究,找到了一条适合高原特殊环境的锂盐湖开发路线。

关键词 盐湖资源 青藏高原 实验盐湖学

1996~2000 年,中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心除每年全天候以扎布耶湖为提取 Li、B、K 的试验研究基地外,历年共计调查青藏高原各类湖泊 94 个,调查行程 39 000 km 以上(图 1),其中对扎布耶湖、扎仓茶卡、洞错、拉果错进行了重点调查。

1 盐湖成矿构造与地球化学特点

1.1 全球特种盐湖形成的地质构造背景

(1)按产出盐类矿产组分和地质构造背景差别,将其概分为 2 类:①普通盐湖,多分布于稳定构造区,产石盐、芒硝、碱类、石膏和硫酸镁盐等普遍性一般盐类矿产;②特种盐湖,绝大多数分布于活动构造区,除有普遍性盐类矿产外,还产 Li、B、K、Cs、Rb(W、I、Br)或 F、Si、Br、CaCl 等矿产(郑绵平,1989)。

(2)普通盐湖广泛产于克拉通、地台等稳定构造区,如西伯利亚、澳州、蒙古、鄂尔多斯等地台或克拉通地区。由于此类盐湖多地处闭塞的内陆环境,除局部与海有联系部分(如澳大利亚西海岸)外,一般与海水补给无关,盐类物质来源主要与盐湖盆地周围的岩性物质表生风化有关。特种盐湖分布于活动构造区,按其产出地质构造背景和物质组分又可划分为 2 亚类,即①氯、碱、硅酸钠盐(东非裂谷马加迪湖)或氯化钙、钾、溴(死海地堑)特种盐湖:产于板块张裂带裂谷区,其物质来源可能来自与洋壳和上地幔;②锂、硼、钾(铯、铷)或硼锂、钾(钨)特种盐湖:前者产于碰撞带微裂谷和山间盆地(如青藏高原扎布耶盐湖)或产于板块大陆边缘火山弧后盆地(如智利 Atacama 湖、阿根廷 Hombre Muerto 盐湖)或者产于板块转换断裂带后盆地(如美国西尔兹湖、银峰湖),本亚型虽然产于活动构造区,且物质来源也来自深部,但其深度可能不及①亚型,其以亲石元素为特征,主要成矿物质可能来自岩石圈。

1.2 青藏高原特种盐湖的特点

青藏高原特种盐湖的地质和物质成分特点:

(1)首先是盐盆地形成于陆-陆碰撞带的地质构造背景。特别是在第三纪末至第四纪初,与青藏高原大幅度上升相应,在青藏高原,尤其是在其中南部出现了一系列 SN 向张(扭)性微裂谷或断陷洼地和 NW 向、NE 向扭性断裂控制的断坳洼盆地等(郑绵平等,1983)。

(2)其次是沿湖盆断裂带常有水热活动,并有由北至南逐渐变新、水热活动强度增强的趋势;深部 Li、B、K(Cs、Rb)等矿物质则以热泉形式大量补给盐湖。根据多年的研究(郑绵平等,1989;黄尚瑶,1986;孙克忠等,1985;李鸿青,1987),该特种盐湖的物质来源虽然是多源,但就 Li、B、K(Cs、Rb)等特殊组分而言,则主要与中晚新生代以来陆-陆碰撞导致深部再熔岩浆形成及热水二次淋滤富集与补给有关。因之,在青藏高原特种盐湖区热水活动产物古

本文由国家科技部攻关项目(97-924-01-03)、国家自然科学基金项目(49672115、49833010)、国家大地调项目(DKD9902004、DKD2002001)以及国家计委重点攻关项目(96-110-64)资助。
改回日期:2001-3-19;责任编辑:宫月萱。
作者:郑绵平,男,1937 年生,研究员,中国工程院院士,主要从事盐湖学与矿床学研究,邮编:100037。
万方数据

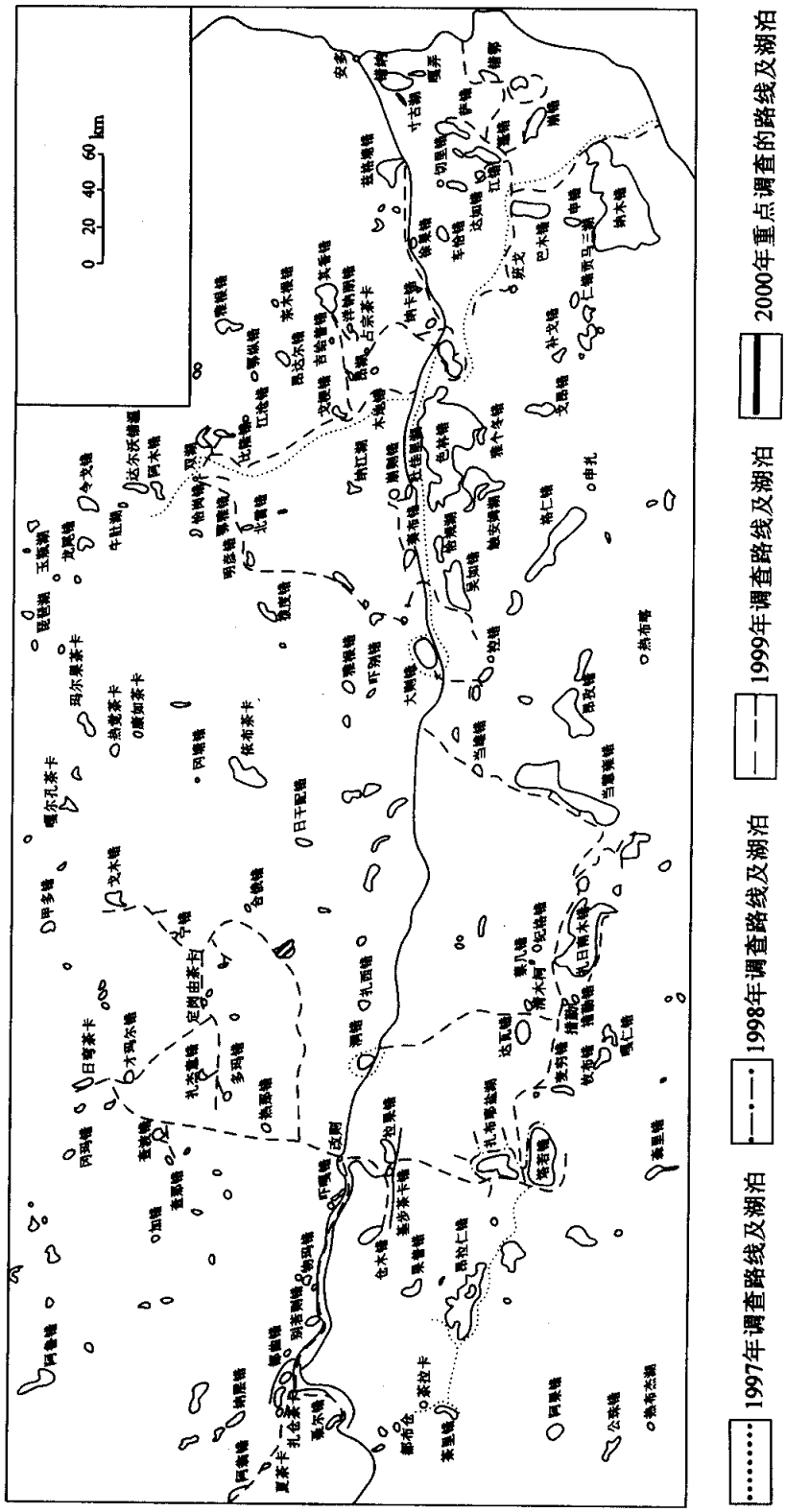

图 1 1997～2000 年青藏高原盐湖调查路线图

Fig. 1 The map showing investigators ilinerar on saline lakes on the Qinghai-Tibet Plateau in 1997～2000

万方数据

钙华和古硅华分布广泛,而罕见近代含矿质火山补给。同样,与上述南美火山弧后特种盐湖不同的是,后者是深部锂硼钾等矿质以火山喷气热水形式补给盐湖,不同年龄组的新生代火山岩流在地表异常发育。

(3)青藏高原若干特种盐湖在物质成分上除富 Li、B、K 外,特别是以富 Cs 为其特征。

2　昂拉陵特种盐湖成矿域的构造地球化学与成矿时代

(1)青藏高原特种盐湖的正异常中心:该种盐湖的最大正异常区恰位于以青藏高原西南部昂拉陵湖为中心的环状构造区。盐湖 Li、B、Cs、K 高值区与热水高值区相一致(郑绵平等,1989)。

(2)环状构造成矿地球化学:昂拉陵环状构造隶属岗底斯地体,主要发育一套中新生代岩系。主要有 3 个地质体含 Li、B、Cs 异常,即晚白垩世末期斜长角闪岩(68.2±3.2 Ma)、喜马拉雅山期电气石花岗岩或浅色花岗岩(20～10 Ma)和晚更新世末期—全新世钙华(0.03 Ma 至现代),在盐湖周边则以钙华分布为广(表 1)。钙华,沿盐湖周缘、甚至盐湖中均有大量地热成因的钙华丘出露,钙华形成于晚更新世晚期迄今,其含 Li、B、Cs 均显示有较大正异常,以西扎错西侧钙华相剖面为例,钙华含 Li(61～135)×10^{-6},B(90～380)×10^{-6},Cs(0.7～1.5)×10^{-6}。该钙华富含 As、F 等说明其属于地热成因。

表 1　扎布耶地区 Li、B、Cs 具正异常的岩石

Table 1　Rocks with Li, B and Cs anomalous content in Zabuyl S.L.　　×10^{-6}

岩性	本文☆			A.П.Виноградов,1961			
	Li	B	Cs	岩性	Li	B	Cs
晚白垩世末期斜长角闪岩	78(7)	75.2(5)	31.7(6)	闪长岩	20	15	0.6*
喜马拉雅山期电气石花岗岩	98(7)	274(9)	21(7)	花岗岩	15	40	5
晚更新世末—全新世钙华	86.4(18)	159(58)	43.1(18)	碳酸岩	5	20	0.4●

* 据 R. K. Turekian 等,1961,正长岩数据;● 据 Turekian and Wedepohl,1961;☆据郑绵平、刘喜方(1999)

(3)古泛湖与矿物质的分异汇聚:40～28 ka B. P. 为藏北一次囊括范围广大的泛湖期,以昂拉陵-扎布耶盐湖为中心,河湖串连,面积达 20 000 余平方公里,大量分异汇聚了盐湖成矿物质。

(4)晚第四纪古气候演化与成矿时代详分:28 ka B. P. 后泛湖解体,随气候 3 次干冷及 2 次干暖变化,形成相应的 3 个冷组合和 2 个暖组合成矿段。特别是发现新类型镁硼酸盐矿床,主矿石为库水硼镁石与冷相芒硝密切共生。其形成年均温在 -3℃以下的硫酸钠亚型水化学环境。分别产于 3 个偏干冷阶段:17.56±15～14.59±14 ka B. P.,9.1±17～±8.0 ka B. P. 和 6.99±15～2.09±75a B. P.。

(5)特种盐湖的成矿专属性经研究表明:不同的卤水化学类型和组分,控制盐湖不同的成矿专属性。

Ⅰ型(氯化物型)——氯化钙-钾盐湖、钾镁盐湖、含锂硼盐湖(液态矿,即无固态硼矿),共生大量石膏,缺少碱类。

Ⅱ型(硫酸盐型)——钾镁型盐湖、含锂硼盐湖(液态矿)、镁硼酸盐矿床(固态矿),共生大量石膏,缺少碱类。

Ⅲ型(碳酸盐型)——锂硼铯铷盐湖(液态)、硼砂矿床(固态)、固态锂矿,共生碱类矿物,罕见石膏。

就青藏高原盐湖时空分布特点而言,其北部为Ⅰ、Ⅱ型盐湖;南部为Ⅲ型盐湖(郑绵平等,1989)。

3　扎布耶超大型锂硼矿床成矿模式

扎布耶超大型锂硼盐湖矿床是青藏高原碰撞带地球化学动力学效应的最年青成矿作用产物,其形成是内外条件耦合的结果(图 2):

40～28 ka B. P. 为夏季风强盛期(末次冰期大间冰期),其时泛湖汇聚深部成矿热水;30～20 ka B. P. 和 15～5 ka B. P. 是扎布耶湖区 2 次热水强烈活动期。

28 ka B. P. 主玉木冰期以来,气候干冷-干暖交替,受新构造(水动力)驱动,形成多级次湖盆系。

在重力场和化学分异条件下,大量易溶盐 Li、B、K、Cs 向最低阶湖浓缩成矿(郑绵平等,1989)。

扎布耶超大型锂硼矿床是一种多级浅盆成矿模式与南美弧后裂谷高山深盆成锂成矿模式不同。

4　盐湖资源预测与资源远景

(1)盐湖资源的预测:按不同水化学类型成矿专属性寻找不同类型特种盐湖矿产。特种盐湖的找矿前提为:活动性构造地质背景、有 Li、B(Cs、K)正异常水热活动和湖水的地球化学显示。

(2)盐湖的地质调查与预测验证:"九五"期间新发现或进一步证实了含 Li、B、K、Cs、Rb 和 Br(含其中一项或多项)达到工业品位的盐湖 32 个。其中达到超大型Li、Cs和大型B、Rb规模的盐湖1个;超大型硼矿1个、大型锂液体矿4个,首次揭示了以昂拉陵环状构造为中心的Li、B、Cs(K、Rb、Br)巨大成矿域。

万方数据

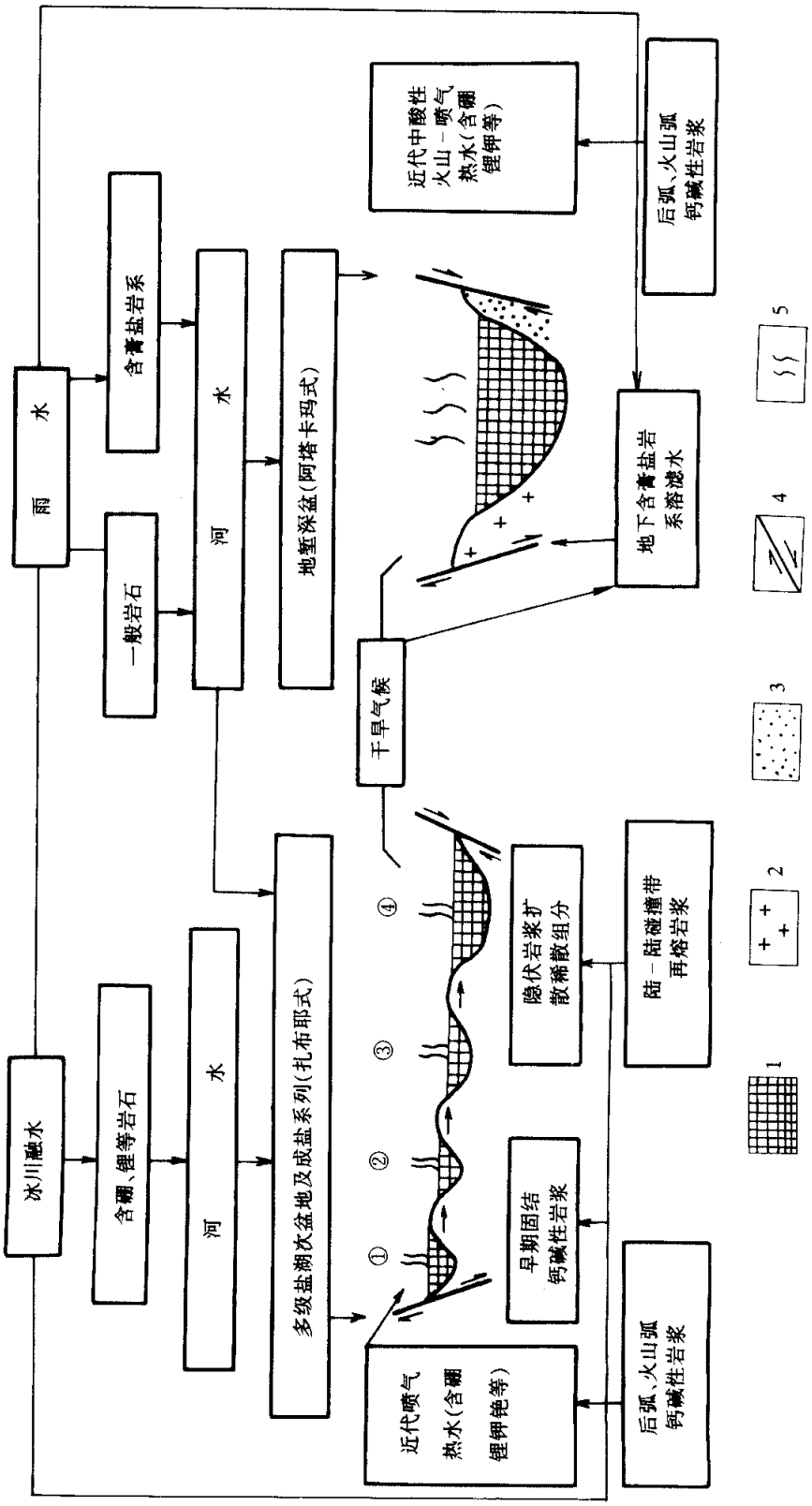

图 2 扎布耶特大型矿床成矿模式图

Fig. 2 The metallogenic model of Chabyêr giant deposit

1-含钾硼卤水盐层;2-酸性火成岩;3-砂泥岩;4-断裂;5-蒸发;数字①~④表示盐湖形成的 4 个阶段

万方数据

(3)盐湖生物的调查和新认识:盐湖不仅是无机盐产地,也是盐生生物的宝库,是极端环境生物的繁衍区。因此,盐湖区既是无机盐生产基地,也是一种盐水域发展水产养殖业周缘盐沼泽和沙地发展农牧业及沙产业的研究开发新领域——"盐湖农业"(郑绵平,1995)。正如钱学森先生所指出的"盐湖农业不同于一般意义的农业,是利用盐湖生态环境及日光,通过生物生产商品,是农、工、贸与现代科技相结合的知识密集产业"❶。

在新的一轮调查中,我们首次在青藏高原进行了大范围的盐湖生物调查,1997 年和 1998 年作了藏北东部卤虫调查;1999 年又集中对阿里地区盐湖作了综合性盐湖生物调查。盐湖生物资源研究不仅具有重要的科学意义,而且具有重大的经济意义。青藏高原具有世界海拔最高的盐湖,而且具有水化学类型多样性的特点,而拥有不同生物和非生物抗逆性基因,是一种潜在的巨大基因资源。一些盐湖生物目前即具有重要经济效益。如:卤虫(*Artemia* sp.)可作为虾蟹幼体的优良活饵料,是发展水产业不可或缺的优质饵料源,因为卤虫在 5%～22% 盐度的各种水型盐湖中均可成活。世界上除南、北极外,卤虫在适宜其盐度的盐湖均可成活。因此可确认,青藏高原是卤虫生存的重要远景区。在调查的 94 个湖泊中,发现有卤虫存在的盐湖 21 个,其中 11 个为本阶段研究过程中的新发现。在这个阶段,我们还发现拉果错卤虫含有的不饱和脂肪酸为世界上已知卤虫的最高值(刘俊英等,1998,1999)。经生物统计学分析,并为国内外有关研究者用细胞遗传学、同种异型酶和脱氧核糖分析等所证实,从而命名为 *Tibetan artemia* 为一新种(刘俊英等,1998,1999),又如盐藻、螺旋藻、轮虫和盐蝇等均具有重要的经济价值。在这一阶段已查明的盐湖中,除扎布耶湖过去作了工作外,发现产盐藻盐湖 9 个,产螺旋藻盐湖 9 个,产各类轮虫盐湖 17 个,产卤蝇盐湖 7 个以上。而不少盐湖中青藏拟　和链轮藻特别繁衍,成为奇特的生态景观,该类生物除可作为鱼类优良饵料外,其科学和经济意义则有待进一步研究。

5　扎布耶盐湖提锂为主的扩大试验

5.1　概况

从 1982 年始,中国地质科学院盐湖中心在扎布耶盐湖进行了持续 18 a 的研究。1990 年至今,建立了盐湖科学观察站,并持续地进行气象、水文、沉积蒸发作用的定点观测;1995 年至今,建立扩试基地、进行盐田工程、锂硼钾盐田工艺、选矿、加工扩大试验——工业性试验。经过长期观测,基本摸清了扎布耶盐湖全年气象和水盐动态变化规律,为开发利用盐湖提供了基础数据。

(1)年均蒸发量 2 425 mm,年降水量 112 mm,年均温 1 ℃,年均日照数 280 d,日照强度大,气压低(597 Pa/h),风期长,有利于用太阳能盐田法开发。

(2)南、北湖水位变化,年变幅 14～20 cm,18 a 间水位趋向下降。

(3)湖水化学变化规律为冬季锂高、硫酸根和碳酸根低。

5.2　小试扩试——工业性试验

从 1995 年始,依"因地制宜,就地取材,扬长避短"的原则,以盐湖学理论方法为指导,通过实验找到了一条适合高原环境的锂盐湖开发路线。

(1)盐田工程地质:发现南湖大面积优质隔水粘土层,为利用太阳能进行廉价盐田生产提供了工程地质依据,如建造 5 km^2 盐田较建造异地盐田粘土可节约数千万元人民币投资。

(2)逐级放大实验:①日晒盐田由 200 m^2 发展为日晒 6 000 m^2 和 14×10^4 m^2,目前建造并已发展为 100×10^4 m^2,证实了用"冬储卤、多级冷冻日晒——积温沉锂盐田工艺法"富集 Li_2CO_3 的可行性;②提 Li 原料的品位不断提高:由初期晒出的混盐含 Li_2CO_3 为 1.5% 发展到 3%～5%,目前已达到 30%。

(3)选矿法的创新:基于对扎布耶石基础的研究,用最廉价淡水擦洗法替代传统浮选剂选矿,用擦洗法将含 5% Li_2CO_3 混盐原料通过现场和室内浮选法取得吨级精矿,达 78%,回收率为 76%;至 2000 年用含 30% Li_2CO_3 可现场取得吨级精矿,达 80%。

(4)加工提纯:经硫酸法、石灰转化法、碳化法试验,选择以碳化-热解工艺作为提取商业级产品的扩试试验方案,处理 Li 精矿 1 472 kg,生产国标Ⅰ级品 $Li_2CO_3$934 kg,Li 的总收率达到 98%,该法取得优良的技术经济指标,达到中试水平。为工业性试验和化工生产奠定了基础。

(5)卤水体系基础研究取得很大成果:①首次进行 25℃和 15℃扎布耶湖水等温卤水蒸发研究,查明 Li、B、K、Cs、Rb 的析出行为;②首次取得 Li^+、Na^+、

❶ 钱学森先生于 1994 年 4 月 24 日给笔者来函。

万方数据

K/Cl^-、SO_4^{2-}、CO_3 相关的 5 个三元、4 个四元、1 个五元在 25℃ 条件下的相图，以及 Li、Na、K/Cl^-、CO_3、B_4O_7-H_2O 和 Li、Na/Cl^-、SO_4、CO_3、B_4O_7-H_2O 六元(赝)体系溶解度相图等。

天然碳酸锂的发现和上述卤水体系研究进展，为冲击世界"八元卤水体系"的科学前沿前进了一步，但要指导低温条件的扎布耶湖开发还要从低温相图最基础做起。

5.3 盐湖提锂技术突破的意义

由于近期国外盐湖提 Li 技术取得空前进展，大批量廉价 Li_2CO_3 产品进入国际市场，国内锂行业频临停产(表 2)；我国业从过去的出口型改为进口锂盐商品。经过对扎布耶盐湖直接沉 Li 的多年实验，含 Li_2CO_3 可由 5% 提高到 30%。提 Li 成本可望不高于国外提 Li 成本最低的 Atacama 盐湖，而具有较强的市场竞争力。

表 2 硬岩型与盐湖型锂产品成本、售价对比

Table 2 Comparison of Cost and selling price of the productions between hard rocks and salt lake 元(人民币)

类 别	提 Li 成本		Li_2CO_3 售价	
	1996 年	1998 年	1996 年	1998 年
国内硬岩碳酸锂产品	21 000～22 000	20 000～21 000	33 000～35 000	21 000
Atacama 盐湖酸锂产品	15 000	8 500	33 000	15 500(到岸价)

1999 年 6 月，西藏正式成立"青藏扎布耶锂业高科技有限责任公司"，设计部门认为："该盐湖的开发，除在经济上可满足我国对锂产品的市场需求，实现以产顶进、提高西藏地方工业水平、带动有关产业的发展外，在政治上也非常有利于西藏民族地区的发展和稳定。"

在本项研究过程中先后参加室内、外工作的有：齐文、王高尚、张发胜、邓月金、杨卉 、张永生、赵元艺、卜令忠、陶有胜、罗健、计文化、刘喜方、魏乐军、乜贞、郭珍旭、高洪学、陈宏武、王岳杰、蒙义峰、关连山；参加室内工作有刘俊英、李琦、刘丹阳、王梅以及殷辉安、唐明林、邓天龙、曾英、韩蔚田等同志。

参 考 文 献

黄尚瑶. 1986. 火山、温泉、地热能. 北京：地质出版社，102～103.

李鸿青. 1987. 对喜马拉雅地区地壳热水系的初步估算. 地球物理学报，26(3)：241～255.

刘俊英，郑绵平，罗 健. 1998. 青藏拉果错卤虫(1). 生物学特征. 湖泊科学，10(2)：92～96.

刘俊英，罗 健，郑绵平. 1999. 青藏拉果错卤虫(2). 营养成分. 湖泊科学，11(3)：283～288.

孙克忠，滕吉文. 1985. 由长周期地震面波研究青藏高原地区的地壳和上地幔的速度分布. 地球物理学报，28(1)：43.

佟 伟，章铭陶，张知非等. 1981. 青藏地热. 北京：科学出版社.

郑绵平，刘文高，向 军等. 1983. 论青藏盐湖. 地质学报，57(2)：184～194.

郑绵平. 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)，主编郑绵平，(3～4)：1～34.

郑绵平，向 军，魏新俊等. 1989. 青藏高原盐湖. 北京：科学出版社，1～431.

郑绵平. 1995. 论"盐湖农业". 地球学报，16(4)：404～418.

Study Advances in Saline Lake Resources on the Qinghai-Tibet Pleteau

Zheng Mianping

(*R & D Center of Saline Lale and Epithermal Dposits, CAGS, Beijing; Mineral Deposits Resources Institinte, CAGS, Beijing; Open Laboratory of Saline Lake Resources and Environment, CAGS, Beijing*)

Abstract This paper presents a summary report on the progress in the evaluation of the saline lake resources of the Tibetan Plateau over the past ten－old years made by the R & D Center of Saline Lake and Epithermal Deposits. The research has been carried out by integrating closely the comprehensive saline lake resource investigation with the typical saline lake research and development under the guidance of "salinology". It has for the first time revealed that the Laling area of Huan'ang is a gigantic lithium－boron－cesium－(potassium－rubidium) metallogenic province and points out that the superlarge Zabuye lithium－boron salt lake deposit presents a multistage, shallow－basin metallogenic model in a continent－continent collision area, which is different from the high range－deep basin lithium－boron saline lake metallogenic model in back－arc rifts of South America. Through an extensive comprehensive investigation of saline lakes it is for the first time ascertained that the Tibetan Plateau is an important Artemia prospect area. In the light of the principle of taking such measures as are suitable to local conditions, obtaining raw materials locally and developing advantages and avoiding shortcomings and through a study of experimental salinology, we have found a way of lithium saline lake development that is suited to the special environment of the plateau.

Key words saline lale resources the Qinghai-Tibet Plateau experimental salinology

万方数据