2007

西藏高原盐湖的构造地球化学和生物学研究

郑绵平1,2,3),刘喜方1,2,3),赵文1)

1) 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室,北京,100037

2) 中国地质科学院矿产资源研究所,北京,100037

3) 中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心,北京,100037

内容提要:按盐湖的盐类组分和地质构造背景差别,将其概分为普通盐湖和特种盐湖。前者产于克拉通、地台 等稳定构造区;后者分布于活动构造区,包括大陆边缘火山弧后盆地或陆一陆碰撞带,板块转换带后盆地。西藏高 原盐湖产于陆一陆碰撞带;盐湖硼和稀碱元素主要来自高原深部壳层重熔岩浆,热水成为输入盐湖中的重要载体; 盐湖水化学类型和组分特征控制了不同的成矿专属性。笔者等对藏北高原作了大范围盐湖生物概查,在调查的 125个湖泊中,确定 30个盐湖有卤虫繁衍。在羌塘北部 21个湖泊中,已鉴定出浮游植物 95种,主要种类有 Gloeothece linearis, Doctylococcopsis rhaphichoides Hansg, Chroococcus minor, Navicula sp., Cymbella pusilla, Dunaliella salina, Chlorella rulgaris, Diatoma elongatum。浮游动物共鉴定出原生动物 16 种,主要种类有 Voriticella spp., Epistylis spp., Keratella quadrata, Daphniopsis tibetana, Artemia sp.等。

关键词:盐湖构造地球化学;西藏高原;特种盐湖;盐湖生物

西藏高原平均海拔在 4500 m 以上,在广阔的 高原面上,大小湖泊星罗棋布,据统计全区1km²以 上不同盐度湖泊达 1173 个,其中盐湖有 312 个。虽 然经过多年调查研究工作,对于该区盐湖物质成分 和地质成矿条件已有相当的了解,但由于该区高寒 缺氧、交通不便,盐湖的调查研究程度比较国内外一 些盐湖区研究程度还较低,尤其对该区盐湖生物和 生态调查程度相当低,对大多数盐湖的盐生物的种 类及其分布缺乏了解:而对于该区盐湖中的锂、硼、 铯等特殊组分的来源也有待进一步查明。为此,从 1996年始,中国地质科学院盐湖与热水研究发展中 心在前人工作基础上,点面结合,以藏北"无人区"为 主,相继调查了该区125个湖泊,其中对扎布耶湖、 扎仓茶卡、洞错、拉果错进行了重点调查(图1)。

1 盐湖成矿构造地球化学特点

按盐湖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、石膏和天然碱、硫酸镁盐等普通 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,还产富Li、B、K、 Cs、Rb、W、I、Br 或 F、Si、Br、CaCl2 卤水及硼酸盐、 硝酸盐和碳酸盐(郑绵平,1989)。

普通盐湖广泛产于克拉通、地台等稳定构造区, 如西伯利亚、澳洲、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(如澳大利亚西海岸)(Bowlar, 1981) 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 干活动构造区,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)(Eugster et al., 1978)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 物质来源可能来自洋壳和上地幔;②锂、硼、钾、铯、 铷或硼钾(锂、钨)特种盐湖:前者产于陆一陆碰撞带 微裂谷和山间盆地(如青藏高原扎布耶盐湖)或产于 板块大陆边缘前科迪勒拉(Precordillera)火山弧后 盆地(如智利 Atacama 湖、阿根廷 Hombre Muerto 盐湖和 Wyuni 盐湖) (Reutter et al., 1996; Guillermo, 1998; Cordani et al., 2000);后者产于

注:本文为国家大地调项目(编号 DKD9902004、DKD2002001)资助成果。

收稿日期:2007-09-07;改回日期:2007-10-11;责任编辑:周健。

作者简介:郑绵平,男,1934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。通讯地址:100037,北京百万庄大街 26号; 电话:010-68327637;Email:zmp@public.bta.net.cn。



图 1 青藏高原盐湖调查路线图

Fig. 1 Routes of geological investigations on the Qiangtang Plateau in 1997~1999, 2000, 2001 and 2002

1一湖泊及干湖;2一调查点;3一采样点;4一地化采样点;5一1980~1984年调查路线;6一1985~1996年调查路线;

7-1997~1999年调查路线;8-2000年考察路线;9-2001年考察路线;10-2002年考察路线

1-Lake and dry lake; 2-Investigation site; 3-sampling site; 4-geochemical sampling site; 5-investigation route from 1980~1984; 6-investigation routes from 1985~1996;

7—investigation route from 1997~1999; 8—investigation route in 2000; 9—investigation route in 2001; 10—investigation route in 2002

板块转换断裂带后盆地[如美国 Searles 湖、银峰湖 (Smith, 1979)]。

西藏高原特种盐湖地质构造和地球化学特点:

(1)首先是盐湖盆地形成于陆一陆碰撞带的地 质构造背景。实地调查和遥感解译表明,西藏盐湖 盆地主要是构造成因(郑绵平等,1983),古新世以 来,在印度板块和亚洲板块碰撞阶段,由于来自印度 板块的向北巨大推动力,产生了强烈的挤压和剪切 作用。这种作用引起西藏高原南北向缩短和东西向 扩张,在碰撞初期(古近纪—新近纪)形成东西向的 张(扭)性坳陷(断陷),到新近纪后期—第四纪,与西 藏高原大幅度上升相呼应,西藏新生代湖盆发展进 入新阶段,除发育近东西向压性坳陷洼地外,还出现 了一系列南北向张(扭)性断陷洼地和北西向、北东 向扭性断裂控制的断陷盆地等。

(2)其次是沿西藏高原盐湖盆地断裂系常发现 有强烈水热活动,在盐湖中及其边缘常见及大量钙 华或硅华热水堆积。研究表明,这些热水沉积至晚 在 480 ka BP 以来,即在西藏、特别羌南一喜马拉雅 地区有大量沉积,并大致可粗分为 3 期,迄今在雅鲁 藏布南北两侧有强烈的水热活动及相应热水沉积 (郑绵平,1989,1995)。这些古今热水活动均以富 含 B 和稀碱元素为特征,不仅在现代高原热水的 Cs 和 Li、B 高含量集中在羌南一喜马拉雅地区以雅江 段(色米)为中心(图 2),而且古热水沉积物钙华和 硅华也有高丰度 B 和稀碱元素富集,以扎布耶盐湖 周边钙华剖面为例,从 11190±150~8824±100 a BP,其 B 含量 $80 \times 10^{-6} \sim 380 \times 10^{-6}$, Li 90×10^{-6} ~ 133×10^{-6} , Cs 0. $7 \times 10^{-6} \sim 3.3 \times 10^{-6}$ (图 3), 而 硅华中 Cs 即由于胶体凝结能力最大而具有更高含 量(表 1)。上述古今地热水往往沿 EW 向与 NE、 NW 向或 SN 向断裂交叉处出露,长期以来大量补 给高原盐湖, 而成为西藏高原盐湖 B 和稀碱元素的 主要成矿物质来源。但在本区未见有现代火山活动 的含矿物质补给高原盐湖,虽然已发现有第四纪火 山活动,但其规模不大,如西藏羌塘以北昆仑山北麓 所见的 1.1~0.067 Ma BP 新火山(Liu et al., 1989;邓万明,1989,1993),其对西藏盐湖 B 和稀碱 元素的贡献还有待进一步查明。因此,同南美大陆 边缘火山弧为特种盐湖补给形式有所不同,后者不 同年龄组的新生代火山岩流在地表大面积分布 (Kunasz, 1980; Guillermo, 1988; Reutter et al., 1996), 深部 B、Li、Cs、K 等物质以火山喷气和热水 形式补给盐湖,不仅已形成新生代火山-沉积硼矿 床(Alonso, 1999),而且有现代活火山物质直接补 给盐湖(如智利 Salar de Atacama 东北部活火山)。 如上所述,笔者对西藏现代热泉调查和不完全统计 表明,羌南一喜马拉雅区热泉每年还向地表和湖泊 输出 Li 595 t、B 5370 t、Cs 365 t、Rb 105 t。西藏地 热带至少发育有3期:第一、二期即已大量发育大面

表 1 搭格架不同年龄段硅华稀碱元素含量(×10⁻⁶)

Table 1Rare alkali element contents ($\times 10^{-6}$) of siliceoussinter in different age intervals at Tagejie

地点	期次	Li	Rb	Cs	
	现代硅华	59.0	311.0	9542.6	
搭格架	第二期	69.43	160.4	2556.6	
(図底版卤塘)	(约 300~15 ka BP)				
(內瓜別南极)	第一期	118 60	397 4	1922 0	
	(480∼≥300 ka BP)	110.00	007.1	1322.0	



图 2 羌塘高原地热水 Cs 趋势面分析

- Fig. 2 Trend surface analysis of Cs in geothermal water on the Qiangtang Plateau (modified from Zheng et al., 1998) 1—具新老硅华沉积的温泉及编号;2—具老硅华沉积的温泉及编号;3—Cs 等值线(×10⁻⁶);4—区域分界线
 - 1—Hot spring with older and younger geyserite and its No. ; 2—hot spring with older geyserite and its No. ;

3—Cs contour ($\times 10^{-6}$); 4—boundary of regions



图 3 扎布耶盐湖西北钙华冢剖面沉积地球化学

Fig. 3 Sedimentary chemistry of the travertine mound section to the northwest of Zabuye Salt Lake

表 2 西藏高原热水 19 ka BP 以来特征元素输出量估算

Table 2	Estimates of inputs of	characteristic elements	from thermal water	of the	Tibetan	Plateau	since	19 ka	BP
---------	------------------------	-------------------------	--------------------	--------	---------	---------	-------	-------	----

							丧	#牛组分箱	前出量(t)	19 ka B.	P以米组分	 分输出	童(kt)	
Ι	.i	В		Cs		RI	с	т;	p	C.	Ph	т:	p	C.	Dh
范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均		D	Cs	Kb	LI	Б	CS	KD
0 1 - 50	2 16	0 82	25 52	0 72 ~ 51 5	0.08	0.05~11	1 20	594.99	5369.96	365	104.89	11204 9	106995 2	6025	1002 0
0.1 \sim 50	5.10	9.03~473.0	23.32	0.75~51.5	0.98	$0.05 \sim 11$	1.30	(224)	(250)	(224)	(224)	11304.0	100000.5	0930	1992.9

注:括号()为统计的地热区数量

积高温的钙硅华沉积(郑绵平等,1995),其高温热 泉堆积硅钙华范围远较第三期热泉沉积为广。因 此,若按第三期 19 ka BP 以来输出时间计(流入班 戈湖温泉的古钙华¹⁴C 年龄 19430±178 a BP),Li、 B、Cs、Rb 输出量和组分含量按现代计,则足够形成 超过目前已知的西藏高原现代盐湖的 Li、B、Cs 等 矿床资源量(表 2)。

(3)西藏高原特种盐湖的 B、Li、Cs(K、Rb)来自高原重熔岩浆,热泉是其输入盐湖中的主要载体:根据青藏高原近期大量地球物理和火山岩研究成果 (孔祥儒等,1996; Owens et al., 1997; Alsforf et al., 1998;丁林等,1999; Kosarev et al., 1999; 苏 伟等,2002;赵文津等,2002,2004; Tilmann et al.,2003)表明:喜马拉雅一羌南和羌北一昆仑两 区的深部壳幔结构有明显差异(图4),在喜马拉 雅一羌南由于陆一陆碰撞导致铲状逆冲断裂十分发 育,而导致印度地壳和亚洲地壳叠加,不仅使该区具 有75~80 km 超常地壳厚度,而且由于强烈构造运 动(剪切摩擦和深度流体上涌),而导致亚洲下地壳 和印度下地壳上部主碰撞带形成新生代晚期大规模 的融熔体和再熔岩浆囊,该区大范围的高温地热活 动高热流值和浅色花岗岩以及局部第四纪火山岩恰 是其表层的明显反映。大量地热地球化学和地球物 理研究表明(佟伟等,1981;沈显杰,1985;黄尚瑶 等,1986;李洪清,1987; Sun et al.,1998),上述南 差塘一喜马拉雅即是青藏高原实测的高热流值区,



图 4 青藏高原盐湖水和热泉 $\frac{B_2O_3 \times 10^3}{\Sigma \pm}$ 与壳幔结构示意图(示意性壳幔结构据孔祥儒等, 1996; Kind et al., 1996; Owens et al., 1997; Alsforf et al., 1998;丁林等, 1999; Kosarev et al., 1999; 苏伟等, 2002;赵文津等, 2002, 2004;莫 宣学等, 2003 等文献综合)

Fig. 4 Diagram showing the B₂O₃×10³/Σ salt of salt lake water, hot springs and crust—mantle structure of the Qinghai
Tibet Plateau (crust—mantle structure derived from a synthesis of Kong et al., 1996; Kind et al., 1996; Owens et al., 1997; Alsforf et al., 1998; Ding et al., 1999; Kosarev et al., 1999; Su et al., 2002; Zhao et al., 2002, 2004; Mo et al., 2003)

1一公珠热泉;2一色米热泉;3.曲多瓦热泉;4.朗久热泉;5.帕野热泉;6一秋嘎江热泉;7一曲真热贡热泉;MCT一主中央逆冲断裂;STD— 藏南拆离系;YZS-雅鲁藏布缝合线;TT-搭格架逆冲断裂;CST-措勤-申扎逆冲断裂;BNS-班公错-怒江缝合线;JRS-金沙江缝合 线;KF-昆仑山断裂

Hot springs: 1—Kunggyü; 2—Semi; 3—Quduowa; 4—Langju; 5—Paiye; 6—Qiugajiang; 7—Quzhengregong. MCT—main central thrust; STD—south Tibetan detachment system; YZS—Yarlung Zangbo suture; TT—Targejia thrust; CST—Coqên-Xainza thrust; BNS—Bangong Co—Nujiang suture; JRS—Jinsha River suture; KF—Kunlun fault

其高热流值以雅鲁藏布缝合线为中心向北逐渐降 低,在中心部分其平均热值在 91 mW/m²(普莫雍 错)~364 mW/m²(羊应乡)之间(沈显杰等, 1990),也是青藏高原高温地热区,目前西藏高原已 知的 670 余处地热显示区绝大部分也分布在该区, 该区的热异常还可以从其他地球物理特征得到旁 证:该区地震Q值极低(张立敏等,1979),说明地震 能量的被强烈吸收和衰减;航磁和地区重力测资料 圈定表明,雅鲁藏布的低磁区与大规模的区域重力 负异常。反映在该区深部很可能存在不同程度的熔 融层。1994年,西藏地热地质大队在拉萨北偏西90 km 羊八井 1800 m 深的钻孔中获得 329.8℃高温流 体,若非有深部岩浆房提供热源,无论是热传导还是 热对流均难于达到这样的高温。因此,推测在印度 板块向北挤入过程中,摩擦升温使岩层部分熔融或 者幔源物质上涌侵入壳内而形成熔融层(岩浆房)。 这些熔融层在上述东西向、南北向或北西向和北东 向的某些断裂交叉部位通过地下水深循环作用,向 地表泄出大量含矿热水(如公珠热泉汇入公珠湖 等),为西藏高原广布的地热带提供强大热源、为第 四纪湖泊输送巨量高含量 B、Li、Cs、Rb 等稀碱元素 和分散元素成矿物质,成为本区盐湖特殊元素 Li、 B、Cs、Rb 等组分的重要来源。青藏高原盐湖 B、Li、 Cs 等特殊组分的丰度变化同上述高热流值和高温 地热带并行不悖(Zheng, 1997);高原盐湖 B、Li、Cs (K、Rb)主要的正异常中心也分布在羌南一喜马拉 雅地区低速高导融熔的层区段,特别在该区现代水 往北,湖水内 B 和稀碱元素丰度即明显下降。以 $B_2 O_3 \times 10^3$ -为例,该比值由中南部 150 左右到羌北 ∑<u>盐</u> 下降到 10~20 之间(图 4),其余湖水中 Cs、Li、Rb 均有此变化趋势(图 2)。

(4)西藏盐湖水化学类型与成矿专属性:根据近期在本区调查和收集的300余个湖泊水化学分析数据,对其水化学类型进行了详细划分。湖水的水化

学分类可说明湖中物理化学的特点和平衡体系,据 该平衡体系可了解和预测盐湖中盐类物质的演化和 矿物组合特点,对于找矿和评价盐湖固液相资源及 加工提取方案均十分重要。盐湖卤水一般以 Na、 K、Ca、Mg、SO4、Cl、CO3、HCO3为主,由于这些离子 的相互组合决定其形成的化合物的溶解体系。因 此,按照天然水中主要离子含量的多寡进行分类是 合理的。本文采用在中国和俄罗斯等国常用的 Kurnakov-Valyshko 盐湖水化学分类(表 3),按该 分类将盐湖水分为碳酸盐型、硫酸盐型和氯化物型, 硫酸盐类型卤水再划分为硫酸钠亚型和硫酸镁亚 型。笔者据 Kc 值[$Kc = (Na_2 CO_3 + NaHCO_3)/$ total salt×100%],再将碳酸盐型盐湖分为 3 种亚 型(Zheng et al., 1993)(表 3)^{**0**}。

表 3 盐湖水化学类型分类

	特征系数 月		Kc(%)	Kn_1	Kn_2	Kn_3	Kn_4	$K \downarrow$	$K \coprod 1$	$K \parallel 2$	$K \blacksquare$
根据湖水化学成分	碳酸盐型	强	>29	$\gg 1$	≫1	≫1	$\gg 1$	≥1	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	—	-
		中	$8 \sim 29$	$\gg 1$	≫1	$\gg 1$	$\gg 1$	$\geqslant 1$	\sim	_	—
		弱	0.1~8	$\gg 1$	≫1	$\gg 1$	$\gg 1$	≪1	\sim	_	—
	硫酸盐型	硫酸钠	0~0.1	≥1	≥1	≫1	>/<1	0	n	∞	_
		硫酸镁	—	$\leqslant 1$	≤1	$\gg 1$	> / < 1	_	0	n	0
	氯化		—	$\ll 1$	≪1	≤1	<1	—	—	0	n

Table 3 Chemical types of classification of saline lakes

 $\nexists: Kc = \frac{NaHCOO_3 + Na_2CO_3}{total \ salts} \times 100\% \ (\Downarrow \% \ mg/L \ \ddagger); \ Kn_1 = \frac{CO_3 + HCO_3}{Ca + Mg}; \ Kn_2 = \frac{CO_3 + HCO_3 + SO_4}{Ca + Mg}; \ Kn_3 = \frac{SO_4}{Ca}; \ Kn_4 = \frac{CO_3 + HCO_3}{Ca}; \ Kn_4 = \frac{CO_3 + HCO_4}{Ca}; \ Kn_4 = \frac{CO_3 + HCO_4}{Ca}; \ Kn_4 = \frac{CO_3 + HCO_4}{Ca}; \ Kn_4 = \frac{CO_4 + HCO_4}{Ca}; \ Kn_4 = \frac$

(以离子当量计); $K = \frac{Na_2CO_3 \cdot NaHCO_3}{Na_2SO_4}$; $K = \frac{Na_2SO_4}{MgSO_4}$; $K = \frac{MgSO_4}{MgCl_2}$; $K = \frac{MgCl_2}{CaCl_2}$ (以%或 mg/L 计)。

通过本区湖泊水化学图编制(郑绵平等,1989), 可见西藏高原不同类型湖泊水化学类型在空间上作 规律性展布,由南往北分别:低矿化度碳酸盐亚型带 (Ⅰ₁)一高矿化度碳酸盐亚型带(Ⅰ₂)一硫酸钠亚型 带(Ⅱ)一硫酸镁亚型带(Ⅲ)。此外在高原东部属外 流型,仅局部有小型湖泊。

I带:以碳酸盐型为主,以岗底斯山一念青唐古拉 山为界,再分两个亚带(I_1 和 I_2),北亚带以广义盐湖 [ω (NaCl_{eq}) \geq 0.30%]和狭义盐湖[ω (NaCl_{eq})>3.5%] 为主,其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;南亚带(I_2)的广义盐湖和淡水湖为准。

Ⅱ带:为硫酸钠亚型带,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。其 相应的代表性成矿组合为镁硼酸盐(库水硼镁石、柱 硼镁石等)-芒硝组合为主,有大量钠硼解石产出。

Ⅲ带:硫酸镁亚型带,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。本带相 应的代表性成矿组合为硫酸镁(泻利盐、白钠镁矾)-石盐组合。有大量石膏产出。

本区盐湖水化学类型分带性主要与区域构造地 球化学背景及水系演变有关(Zheng Mianping, 1997)。

2 盐湖生物调查

青藏高原的盐湖海拔高,而且具有各种水化学 性质和不同的湖泊生物群落。 自 1999 年以来,我们对藏北高原作了大范围的 盐湖生物概查,共调查各类湖泊 125 个,其中 22 个 湖泊作了浮游生物定量测定,51 个湖泊作了浮游生 物定性测定。

采样方法:大型浮游动物系采水 20 L,用 25[#] 浮 游生物网(网目孔径为64 μm)过滤,浓缩液用5%甲 醛固定,测定时在显微镜下全部计数。对本试验采 得的浮游藻类和浮游动物一般随机选取 50~100 个 细胞或个体,用目微尺测量其大小,浮游植物、原生 动物和轮虫按其相近的几何图形计算体积,枝角类 和桡足类量其体长后按文献中相近的体长一体重回 归方程推算体积。取其平均体积按比重为1换算成 湿重。将计数结果换算成数量(Density, ind./L), 然后按上述湿重计算生物量(Biomass, mg WW/ L)。pH 值用 PHS-2c 型酸度计测定。盐度用光学 折射盐度计测定。总氮依据凯氏定氮法测定,总磷 依据磷钼酸铵比色法测定,硫酸盐用 EDTA-Na2 滴 定法测定,总碱度用盐酸滴定法测定(碳酸根和碳酸 氢根依此法),总硬度用 EDTA-Na2 滴定法测定,钙 离子用 EDTA-Na2 滴定法测定,镁离子用差减法获 得,钾和钠离子用差减法获得。浮游植物和浮游动 物的多样性指数按 Shannon-Wiener 指数(H')计 算。用 Excel 97 软件对观测数据进行统计分析。

在已调查的 125 个湖泊中,有 30 个湖发现有卤 虫繁衍(表 4)(郑绵平等,1989;任慕莲等,1996; Zheng,1997;刘俊英等,1998,1999),其产出海拔自

表 4 西藏产卤虫盐湖 Table 4 Artemia lakes in Tibet

	Ma ta	湖水面积	盐度	TT /dz		水 / · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	海拔	估算可采量
编亏) 湖名	(km ²)	(%)	pH 但		水化字尖型	(m)	(t/a)
13	其香错	142	6.3	10.2	С	碳酸盐型	4610±	80-100
$2^{(2)}$	拉果错	92	5.26	9.2~9.4	WC	弱度碳酸盐亚型	4470	$50 \sim 60$
33	麻米错	87	153.7	9.0	NS	硫酸钠亚型	4342	$50 \sim 60$
43	果根错	24	77.6	7.4	WC	弱度碳酸盐亚型	4659	$3 \sim 5$
53	洋纳朋错	12	62.98	/	SC	强度碳酸盐亚型	$4630\pm$	2~3
63	瀑赛尔错	19	112	/	WC	弱度碳酸盐亚型	4586	$2 \sim 3$
73	座倾错	9	6.6	10	WC	弱度碳酸盐亚型	4746	$2 \sim 3$
83	古瓶错	1.2	5.5	10	NS	硫酸钠亚型	5024	1
93	达闭错	4.5	6.0	9.7	WC	弱度碳酸盐亚型	4610	1
$10^{(3)}$	达多错	5	14.5	9.4	NS	硫酸钠亚型	4610	$2 \sim 3$
11 ³	多穹错	6.7	8.6	9.4	NS	硫酸钠亚型	4610	<1
$12^{(3)}$	基布茶卡	8.2	9.0	9.0	NS	硫酸钠亚型	4440	5
$13^{(3)}$	洞错	88	12.8	8.9~9.2	NS	硫酸钠亚型	4416	$40 \sim 50$
$14^{(3)}$	布拉错	$2\pm$	5.3	9.4	SC	强度碳酸盐亚型	4561	少
$15^{(3)}$	走构油茶错	15	4.6	9.7	SC	强度碳酸盐亚型	4755	极少
$16^{(3)}$	扎杰意错	9	5.5	8.8	MS	硫酸镁亚型	$4670\pm$	极少
$17^{(3)}$	多玛错	18	19.7	8.0	MS	硫酸镁亚型	4690	少
$18^{}$	班戈湖Ⅲ湖	80	13.2	9.6	MC	中度碳酸盐亚型	4701	少
$19^{\textcircled{2}}$	蒂让碧错	20	7.0	8.9	NS	硫酸钠亚型	4841	少
20 ^①	扎仓茶卡Ⅱ湖	$3 \sim 4$	244	8.0	MS	硫酸镁亚型	4326	极少
$21^{(3)}$	聂尔错	24	$16 \sim 20$	7.6	NS	硫酸钠亚型	4399	少
$22^{(3)}$	兹格塘错	18.8	$3 \sim 5$	9.8	SC	强度碳酸盐亚型	4560	少
$23^{(4)}$	巴拉错	1.59	3.6	9.6	WC	弱度碳酸盐亚型	4760	少
$24^{(4)}$	热邦错	32.65	7.3~7.5	9.6	NS	硫酸钠亚型	4324	30~40
$25^{(4)}$	卡易错	2.46	13	8.26	MS	硫酸镁亚型	4280	少
26 ⁽⁴⁾	喀湖错	24.13	30	8.49	NS	硫酸钠亚型	4763	少
27 ^④	泥潭湖	0.05	7.9	8.32	MS	硫酸镁亚型	4280	少
28 ⁵	错尼	60	5.3~14.6	7.3	MS	硫酸镁亚型	4902	50~60
29 ⁵	若拉错	56	11.9~12.1	7.9~8.6	MS	硫酸镁亚型	$4805\pm$	40~50
305	当诺错	40	9.9	8.1	MS	硫酸镁亚型	4970	3~5

注:①-1980~1982年调查;②-1993~1996年调查;③-1997~1999年调查;④-2001年调查;⑤-2002年调查。

4280 m(泥潭错)至 5024 m(古瓶错),后者是已知产 出卤虫海拔最高的盐湖;产卤虫的湖水水化学类型 有碳酸盐型、硫酸钠亚型和硫酸镁型(盐湖水化学分 类如表 3)。笔者等对拉果错作了详细研究,该湖位 于阿里高原南部(E80°02′—89°12′,N32°04′),位于 青藏高原亚寒带亚干旱气候区(《中华人民共和国气 候图集》编委会,2002),据附近气象站 1990~1999 年资料(据中国地质科学院盐湖与热水资源研究发 展中心扎布耶科学观察站),年降水量 130 mm,年 均蒸发量 2503 mm,平均气温约 1℃,6~8 月份气 温最高,其月均气温 4.3~16℃;12 月至翌年 2 月气 温最低,其月均气温-12.8~-6.7℃,该湖在 12 月 至翌年 3 月当湖水冰冻期,4 月份化冻。

5月至10月,有大量的虫卵产出,形成宽数米 至10余米、长数十米至数百米红色卵带,该带多分 布于盐湖较高的湖东北和西北部。 拉果错卤虫干卵径平均 264.5 μm,水合 4 h 卵 径 302 μm,脱壳后的卵径 264.5 μm(刘俊英等, 1998)。卤虫卵和卤虫均呈紫红色,其保护色能有效 地防止紫外线(在高海拔区紫外线尤其强)对胚胎发 育的损害。

拉果错卤虫无节幼体(干体)粗蛋白 54.7%,粗 脂肪 15.3%。脱壳卵的不饱和脂肪能和必须脂肪酸 的含量较高:在脂肪酸中的高级不饱和脂肪酸 (HUFA)含量无节幼体 20%,脱壳卵为 18%,位于中 国内陆盐湖和沿海盐田卤虫无节幼体和脱壳卵含 HUFA 排行之首(张任生等,1991;刘俊英等,1999)。

2001 年笔者等在羌塘北部 21 个湖泊作了定量 取样调查,其盐度自 0.59~300 g/L,pH 值 7.90~ 9.18。已鉴定出浮游植物 95 种,其中蓝藻 17 种、甲 藻 3 种、硅藻 35 种、隐藻 2 种、裸藻 4 种、绿藻 33 种、金藻 1 种,主要种类有 Gloeothece linearis, Doctylococcopsis rhaphichoides Hansg, Chroococcus minor, Navicula sp., Cymbella pusilla, Dunaliella salina, chlorella rulgaris, Diatoma elongatum,浮游植物密度范围为 0.17× 10⁶~102×10⁶ g/L,生物量范围为 0~28 mg/L,随 着盐度的增高,略有下降(图 5)。

浮游动物共鉴定出原生动物 16 种,轮虫 12 种, 鳃足类 6 种,挠足类 8 种,主要种类有 Voriticella spp., Epistylis spp., Keratella quadrata, Daphniopsis tibetana, Artemia sp.等。此外还发 现有其他水生无脊椎动物 7 种,如 Nemotota (线 虫)、Ostracoda(介形虫)、salt fly(卤蝇)等,其生物 总量是随着盐度变化较大,而在湖水盐度 0.58~5 g/L之间,其生物总量最大,湖水盐度在 10~300 g/L之间,其生物量骤降(图 5)。

Daphniopsis tibetana(西藏拟溞)集中于湖水 盐度 5 g/L(台错)至 21 g/L(色林错;郑绵平等, 1989)的盐湖中。

上述 Gloeothece linearis (线形粘干藻)在湖水

盐度 0.19~304 g/L 均有较大量产出,在盐度 0.5 g/L(阿永布错)至122 g/L(卡易错),其生物量较 大; (针晶兰纤维藻) Doctylococcopsis rhaphichiodes 在湖水盐度 0.98~302 g/L 均有较 多量产出,在盐度2.88 g/L(昆仲错)至122 g/L(卡 易错)范围内,其生物量较大; Chroococcus minor (小色藻),在湖水盐度 0.58~84.6 g/L 均大量发 现; Navicula spp. (舟形藻)在湖水盐度 0.19~ 302 g/L 均有发现, 而以 0.19 g/L(卡易错) 生物量 较大; Cymbella pusilla (细小桥弯藻)在湖水盐度 5 ~122 g/L 时有较大量产出;(杜氏盐藻)Dunaliella salina Teodor 在卤水盐度为 40~350 g/L 有相当 数量产出, 尤以 122 g/L(卡易错) 至 350 g/L(扎布 耶湖北湖)生物量最大; Chlorella rulgaris(普通小 球藻)在湖水盐度 2.88~302 g/L 均有相当数量发 育,但似乎以低盐度生物量较大。

3 讨论

所调查湖泊中的生物主要种类都是淡水起源





Fig. 5 Correlation curves of planktonic animals and plants vs. salinity of lake water. N-生物量(个数/L); S-湖水盐度(g/L); 1-左用错; 2-阿永布错; 3-班公错; 4-昂拉错; 5-芦布错; 6-昆仲错; 7-鲁拉错; 8-阿鲁 错; 9-台错; 10-高洪湖; 11-巴拉错; 12-鲁玛江冬错; 13-泥潭错; 14-热帮错; 15-卡易错; 16-结则茶卡; 17-聂尔错; 18-喀湖 N-biomass (individuals/L); S-lake water salinity (g/L). 1-Zuoyong Co; 2-Ayongbu Co; 3-Bangong Co; 4-Ngangla Co; 5-Lubu Co; 6-Central Kunlun Co; 7-Lula Co; 8-Aru Co; 9-Tai Co; 10-Gaohong Lake; 11-Bala Co; 12-Lumajiangdong Co; 13-Nitan Co; 14-Rebang Co; 15-Kayi Co; 16-Gyêzê Caka; 17-Nyêr Co; 18-Kahu Co 的,浮游生物种数与盐度显著负相关,这与很多文献 (何志辉等,1981; Williams,1981,1991;赵文等, 1995,1996; Abatzopoulos et al.,1998)结果是一致 的。对于这些湖泊浮游生物的群落结构和季节演替 及资源量有待深入研究。

所调查湖泊中 21 个湖泊有卤虫分布,15 个湖 泊有西藏拟溞分布。这些湖泊的卤虫可开发利用。 特别是西藏拟溞,它是高原特有的枝角类,个体大, 耐低温低氧,适盐范围 10‰~30‰左右,有望将其 驯化到海水中大量培养,作为海水名贵动物幼体的 活饵料,将具有重大的理论和实践意义,一方面可弥 补卤虫的紧缺,也可克服另一种盐水枝角类——蒙 古裸腹溞不耐低温的特点。

此外,通过对差北各种盐度和气候条件下盐湖 水生生物种类组成、种群变动、生物量、资源量以及 基因特点等的深入研究,对了解盐湖水质、周围环境 及其历史变迁能提供一些科学证据。同时无人区生 物耐低温低氧等特点,也启示人们提取其目的基因, 进行鱼类等水生动物的转基因育种、抗性育种等,潜 力巨大。

致谢:研究过程中先后参加室内、外工作的有: 罗健、计文化、魏乐军、郭珍旭、高洪学、陈宏武、王岳 杰、蒙义峰、关连山;参加室内工作的有刘俊英、刘丹 阳等人。

注 释

❶ 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-} , $Cl-H_2$ O, 其代表性判别系数是 $K_1 =$ $\frac{Na_2CO_3 + NaHCO_3}{Na_2CO_3}$,式中 Na_2CO_3 等均表示湖水中每一种盐的百 Na₂SO₄ 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 Kc[Kc=(Na₂CO₃+NaHCO₃]/total salt×100%式中 化合物和 tolal salt 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,有相当数量石 盐稳定沉积;弱度碳酸盐,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 $K_2' = \frac{Na_2SO_4}{MgSO_4}$,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钠可夫系数: K_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。氯化物型代表性判別系数是: $K_3 = \frac{MgCl_2}{CaCl_2}$,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:Kn1'= $\frac{ECO_3^{\circ-}+EHCO_3^{-}}{ECa^{2+}+EMg^{2+}},$ 式中 ECO_3^{2-} 等均为该离子的当量含量。

参考文献

- 邓万明. 1989. 西藏阿里地区北部新生代火山岩——兼论陆内俯冲 作用. 岩石学报,(3):1~12.
- 邓万明. 1993. 青藏北部新生代钾质火山岩微量元素和 Sr、Nd 同位 素地球化学研究. 岩石学报,9(4):381~387.
- 丁林,张进江,周勇,邓万明,许荣华,钟大赉. 1999. 青藏高原岩石 圈演化的记录:藏北超钾质及钠质火山岩的岩石学与地球化学 特征.岩石学报,15(3):408~421.

黄尚瑶,胡素敏,马兰.1986.火山温泉地热能.北京:地质出版社.

- 何志辉,谢祚浑,雷衍之.1981.达理湖水化学和水生物学研究.中国 水生物集刊,7(3):341~357.
- 孔祥儒,王谦身,熊绍柏.1996.西藏高原西部综合地球物理与岩石圈 结构研究.中国科学(D辑),39(4):348~358.
- 李洪清,1987. 喜马拉雅地区地壳热液系统的初步估计. 地球物理学报,26(3): 241~255.
- 刘俊英,郑绵平,罗健. 1998. 西藏拉果错卤虫-I.生物学特征. 湖 泊科学,10(2): 92~96.
- 刘俊英,罗健,郑绵平. 1999. 西藏拉果错卤虫一Ⅱ. 营养成份. 湖泊 科学,11(3):283~288.
- 莫宣学,赵志丹,邓晋福,董国臣,周肃,郭铁鹰,张双全,王亮亮. 2003.印度一亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应.地学前缘, 10(3):135~148.
- 任嘉莲,郭焱,王基琳,苏荣,李红,任波.1996.中国西北部盐湖卤虫 生态及资源.哈尔滨:黑龙江科技出版社,84~85,103,118, 172~173
- 沈显杰. 1985. 从藏南高热流的形成机理推论西藏地壳和上地幔结构. 地球物理学报,28(增刊)(1):93~107.
- 沈显杰,张文仁,杨淑贞,管烨,金旭. 1990. 青藏高原南北地体壳幔 热结构差异的大地热流证据. 地球学报,(21): 203~214.
- 苏伟,彭艳菊,郑月军,黄忠贤. 2002. 青藏高原及其邻区地壳上地 幔 S 波速度结构. 地球学报,23 (3): 1~20.
- 孙鸿烈,郑度.1998. 青藏高原的形成、演化与进展. 广州:广东科技 出版社,7~19.
- 佟伟,章铭陶,张知非,廖志杰,由懋正,朱梅湘,过帼颖,刘时彬. 1981. 西藏地热.北京:科学出版社,107~118.
- 张立敏,姚振兴. 1979. 西藏高原拉萨附近介质的品质因子. 地球 物理学报,22 (3): 299~303.
- 赵文,何志辉. 1995. 三北地区内陆盐水的原生动物.水生生物学报, 19(3): 193~202.
- 赵文,姜宏,何志辉. 1996. 三北地区陆盐水的浮游甲壳类. 大连水 产学院学报,11(1):1~13.
- 赵文津, INDEPTH 研究队. 2002. 雅鲁藏布江缝合带的深部结构. 北京:地质出版社.
- 赵文津,薛光琦,赵逊,吴珍汉,史大年,刘葵,江万,熊嘉育, INDEPTH研究队. 2004. INDEPTH-Ⅲ地震层析成像——藏 北印度岩石圈俯冲断落的证据. 地球学报,25 (1): 1~10.
- 郑绵平,王秋霞,多吉等. 1995. 水热成矿新类型-西藏铯硅华矿床. 北京:地质出版社,1~114.

郑绵平,向军,魏新俊,郑元. 1989. 青藏高原盐湖. 北京:北京科学

技术出版社,60~84.

- 郑绵平、刘文高、向军,蒋忠惕. 1983. 论西藏的盐湖. 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),(3~4):1~34.
- 郑绵平. 1995. 论"盐湖农业". 地球学报,(4):404~418.
- 《中华人民共和国气候图集》编委会.2002.《中华人民共和国气候 图集》.北京:气象出版社,278.
- Abatzopoulos T J, Zhang Bo, Sorgeloos P. 1998. Artemia tibetiana: preliminary characterization of a new Artemia species found in Tibet (People's Republic of China). International Journal of Salt Lake Research, 7 (1): 41~44.
- Alonso R N. 1999. On the Origin of La Pupa borates. Acta Geologica Mispanica, 34(2-3): 141~166.
- Alsforf D, Brown L, Nelson K D, Makovsky Y, Klemperer S, Zhao
 W J. 1998. Crustal deformation of the Lhasa terrane, Tibet
 Plateau from INDEPTH deep seismic reflection profiles.
 Tectonics, 17 (4): 501~519.
- Bowler J M. 1981. Australian salt lakes. Hydrobiologia, 82:431~ 444.
- Brown L D, Wenjin Zhao, Nelson K D, Hauck M, Alsdorf D, Ross A, Cogern M, Clark M, Liu X W, Che J K. 1996. Bright spots, structure, and magmatism in southern Tibet from INDEPTH seismic reflection profiling. Science, 274: 1688 ~ 1690.
- Cordani U G, Milani E J, Filho A T, Campos D A. 2000. Tectonic evolution of South America. In: Gordani, < ilani, Filho, Campos eds. Proceedings of 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro: Gr fica e Programa o Visual, 646~ 675.
- Eugster P, Hardie A. 1978. Saline Lakes (Lakes: Chemistry, Geology, Physics (Chapter 8). New York: Spring Verlag, 237 ~283.
- Guillermo C D. 1988. The Cenozoic saline deposits of the Chilean Andes between 18°00' and 27°00' South latitude. Lecture Notes in Earth Sciences, 17. Berlin: Springer-Verlag.
- Kind R, Ni J, Zhao Wenjin, Wu Jianxin, Yuan Xiaohui, Zhao Lianshe, Sandvol E, Reese Ch, Nabelek J, Hearn T. 1996.

Evidence from earthquake data for a partially molten crustal layer in southern Tibet. *Science*, 274: 1692~1699.

- Kosarev G, Kind R, Sobolev S V, Yuan X, Hanka W, Oreshin S. 1999. Seismic evidence for a detached Indian lithospheric mantle beneath Tibet. Science, 283:1306~1309.
- Kunasz I A. 1980. Lithium in Brines. In: Fifth International Symposium on Salt (Northern Ohio Geological Society, 115~ 117.
- Liu J, Maimaiti Y. 1989. Distribution and ages of Ashikule volcanoes on the west Kunlun Mountains, west China. Bulletin of Glacial Research, (7): 187~190.
- Owens T J, Zandt G. 1997. Implications of crustal property variation for models of Tibetan plateau evolution. Nature, 387: $37{\sim}43.$
- Reutter K J, Scheuber E, Chong G. 1996. The Precordilleran fault system of Chuquicamata, Northern Chile: evidence for reversals along arc-parallel strike-slip faults. Tetonophysics, 259: 213~ 228.
- Smith G I. 1979. Subsurface stratigraphy and geochemistry of Quaternary lake evaporite, Searles Lake, California. U. S. Geol. Survey Professional Papers, 1043: 98~100.
- Tilmann, Frederik, James Ni, INDEPTH III Seismic Team. 2003. Seismic imaging of the downwelling Indian Lithosphere beneath central Tibet. Science, 300: 1424~1427.
- Williams W D. 1981. The limnology of saline lakes in Western Victoria. Hydrobiologia, 82: 233~359.
- Williams W D. 1991. Chinese and Mongolian saline lakes: a limnological overview. Hydrobiologia, 210: 39~66.
- Zhang Rensheng, Liu Fengqi, Bao Jianguo. 1991. General account of the research on Artemia biology in Tanggu. In: Proceedings of the International Symposium of Saltfield Biological Technology, 237~242 (in Chinese).
- Zheng Mianping. 1997. An Introduction to Saline Lakes on the Qinghai-Tibet Plateau. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 104~122, 205~209.
- Zheng Mianping, Tang Jiayou, Liu Junying, Zhang Fasheng. 1993. Chinese saline lakes. Hydrobiologia, 267: 23~36.

Tectonogeochemical and Biological Aspects of Salt Lakes on the Tibetan Plateau

ZHENG Mianping^{1,2,3)}, LIU Xifang^{1,2,3)}, ZHAO Wen¹⁾

1) Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environment, Ministry of Land and Resources, Beijing, 100037

2) Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

3) R & D Center of Saline Lakes and Epithermal Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

Abstract

Based on saline minerals and geological settings, ordinary salt lakes and special salt lakes may be distinguished. The former occur in stable tectonic regions such as cratons and platforms; while the latter in tectonically active regions, including continental-margin back-arc basins or collision zones and basins at the rear of plate transform fault zones. Salt lakes of the Tibetan Plateau occur in a continent-continent collision zone. Boron and rare alkali elements mainly came from anatectic magma at the depth of the crust below the plateau, especially in the partial melting layer and recent anatectic magma in the Himalaya-south Qiangtang area, and hydrothermal water was the major carrier for transporting B and rare alkali elements from the depth to the salt lakes. Hydrochemical types and composition of the salt lakes constrain different minerogenetic specializations. An extensive investigation of 125 salt lakes in the northern Tibetan Plateau detected *Artemia* spp. in 30 lakes. In 21 lakes in the northern part of Qiangtang, 95 species of planktonic algae including *Gloeothece linearis*, *Doctylococcopsis rhaphichoides* Hansg, *Chroococcus var. minor*, *Navicula* sp. , *Cymbella pusilla*, *Dunaliella salina*, *Chlorella rulgaris* and *Diatoma elongagtum*, and 16 species of planktonic animals, such as *Voriticella* spp. , *Epistylis* spp. , *Keratella quadrata*, *Daphnkiopsis tibetana* and *Artemia* sp. were found.

Key words: salt lake; tectonogeochemistry; Tibetan Plateau; salt lake biota