

# 云南腾冲青海——酸性湖泊的环境特征\*

王云飞 朱育新 潘红玺 尹宇

(中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 210008)

**提 要** 火山口湖成因和持续酸性地下水补给是腾冲青海呈现酸性湖泊环境的地质基础。通过对青海环境的实际调查和水、土、生物样品的分析、鉴定,结果表明:湖水具较低 pH 值、极低的阳离子组成和矿化度,沉积物中 Ca、Mg、Al、Fe 等元素有明显流失,湖泊生物种群少且生物量低,缺失蓝藻和腹足类、瓣鳃类、甲壳类动物等为其区别于一般中、碱性湖泊最显著的特点。酸性水介质湖泊系统元素地球化学行为的变化及其对生物的影响——生物贫化和耐酸种扩张,既是腾冲青海的基本特点,也是酸性湖泊环境形成的动力机制。

**关键词** 环境特点 酸性湖 腾冲青海

**分类号** P343.3

根据湖水 pH 值,湖泊可分为碱性、中性和酸性三大类。地表绝大多数湖泊由于阳离子的积累和生物作用,湖水 pH 值大于 6.5,属中性和碱性湖<sup>[1]</sup>。但国外有报道,在火山活动区或硫化物矿床附近时有湖水 pH 值小于 6 的酸性湖泊分布,其湖泊学性质与一般中、碱性湖泊有明显差异<sup>[2]</sup>。酸性湖泊作为湖泊分类的一种类型,至今在我国尚未见报道。近年来随着我国社会经济的快速发展,煤炭使用量和汽车的数量成倍增加,酸雨和 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 的干沉降在长江以南的红壤分布区不断扩展,地表水存在被酸化的危险性<sup>[3-8]</sup>。由于自然酸性湖泊和湖泊酸化在本质上同为高浓度 H<sup>+</sup> 对湖泊系统长期的物理、化学和生物作用的结果,故两者常表现出相似的环境特点和演化趋势。因此人们越来越重视自然酸性湖泊的理论研究,力图为大气污染诱发的湖沼酸化提供识别标志。腾冲青海是全国湖沼调查中被发现的一个自然酸性湖泊,也是我国迄今为止已作调查研究的唯一已知的自然酸性湖泊<sup>[1]</sup>。本文以腾冲青海 1992 年和 1999 年两次湖泊调查、取样和分析结果为依据,对其环境特征作初步分析,以补充我国湖泊学尚欠缺的酸性湖泊类型,并为酸沉降引起的湖泊酸化的预测提供对比依据。

## 1 湖区地质背景和自然地理概况

青海位于云南省西南边陲腾冲县打苴乡双海村(25°08′06″-25°07′44″N,98°34′11″-98°34′26″E),因“四周花木环绕,水清莹澄洁”而得名,又称澄镜池。据 1992 年资料(南部湖水 pH 平均值 5.8,矿化度 16.24mg/L)以及其它相关的湖泊学证据初步确认青海为一酸性湖泊<sup>[1]</sup>。

湖区在大地构造上位于欧亚板块和印度板块的镶接部位(图 1)。受两大板块的强烈碰撞和挤压,区内地震活动频繁,地热资源丰富,岩浆活动强烈,为湖盆形成和中、酸性水热活动提

\* 国家自然科学基金项目(49871075)和中国科学院湖沼专项(KZ951-B1-205)联合资助。

收稿日期 2001-08-25,收到修改稿日期 2001-10-16。王云飞,男,1940 年生,研究员, Wangyf@niglas.ac.cn。

供重要的地质背景. 青海湖盆位于更新世板壁坡安山岩流间, 前人根据湖四周被相对高度 50 - 150m 中、基性喷发岩低山丘陵包围以及外形呈南北向椭圆形盆地, 已确认为火山口湖类型<sup>[9,10]</sup>. 青海及其周围地区地下水热活动频繁, 1999 年的调查在青海西南部湖底发现含微量  $H_2S$  的酸性地下水涌泉. 由此判定青海是在火山口洼地的基础上, 接受足够酸性地下水补给而形成的酸性湖泊.

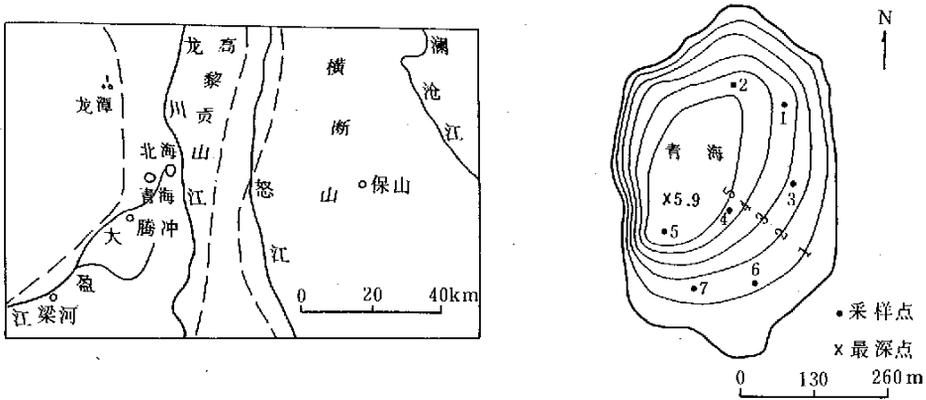


图 1 云南腾冲青海的位置及湖底地形和取样点分布

Fig. 1 Location and isobath of Qinghai Lake, Yunnan Province and sampling sites

据腾冲县水利志介绍<sup>①</sup>: 青海原湖泊面积  $0.4\text{km}^2$ , 最大水深 20m, 平时无地表出流, 当雨季降水集中时, 湖水从东北部哑口溢出, 经大苴乡附近汇入大盈江 - 瑞丽江 - 伊洛瓦底江, 最终在缅甸仰光附近注入印度洋安达曼海; 另因湖底有地下水补给故不论天气多雨或干旱, 湖泊水位基本稳定; 1958 年在湖东北筑渠建闸引水入双海村灌区后, 至 1990 年水位已下降 8m, 面积缩小至  $0.25\text{km}^2$ . 经本次野外调查、卫星照片判读和湖底地形实测, 当湖面高程 1885m 时, 面积  $0.21\text{km}^2$ , 最大水深 5.9m, 湖水容积  $5.4 \times 10^5\text{m}^3$ , 流域面积狭小仅  $1.5\text{km}^2$ . 青海因水位下降现全年已无自然出流, 湖水交换靠农田用水时由电灌站提水至灌区, 余水改从北海汇入大盈江. 湖底形态据三条测线和 40 余点的测深资料绘制的湖底地形图显示, 湖盆东南部较浅平西部较陡, 湖泊深水区偏湖西侧, 最深处位于距西岸约 80 - 100m 的湖中心处, 尚可辨识残存的古火山口形貌 (图 1).

湖区气候属亚热带高原湿润季风气候, 多年平均气温  $14.7^\circ\text{C}$ , 极端最高气温  $30.5^\circ\text{C}$ , 极端最低气温  $-4.2^\circ\text{C}$ . 多年平均降水量 1425mm, 其中 5 - 10 月雨季的降水量占全年总雨量的 84.3%. 年平均蒸发量约 1575mm.

## 2 湖水化学性质

青海湖水的化学性质受各取样点距酸性地下水出流点远近、出流量的多年和年变化以及地下水与地表水补给量的相对比例、物源区岩性和湖区生物活动性等因素影响, 其平面与垂向

① 腾冲县水利局 腾冲县水利志, 1979

分布呈现较为复杂的态势(表 1)。

表 1 青海湖水化学组成和比较

单位:mg/L

Tab.1 Chemical component and its comparison of Qinghai Lake

点位	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	矿化度
青海表层 1	1.1	0.35	0.78	1.61	2.62	12.25	0	24.1	42.81
2	1.1	0.35	0.78	1.42	2.62	15.37	0	27.15	48.79
3	1.0	0.4	0.78	2.27	2.8	20.46	0	37.71	65.52
4	1.0	0.35	0.78	1.33	2.62	15.85	0	27.15	49.08
5	1.1	0.35	0.78	0.95	2.62	13.78	0	22.64	42.12
6	1.1	0.3	0.78	1.33	2.62	17.05	0	28.68	51.68
7	1.07	0.35	0.78	1.61	2.62	14.65	0	27.15	48.26
青海表层平均	1.0	0.35	0.78	1.5	2.65	15.63	0	27.8	49.75
洱海*	4.89	11.38	27.65	14.19	5.36	27.5	9.45	135.82	236.2
滇池*	5.19	34.9	39.9	15.8	45.2	34.7	6.8	178.5	361.7
洞庭湖 <sup>[12]</sup>	1.6	11.9	26.1	5.2	5.6	11.43	2.9	112.2	176.7
太湖 <sup>[13]</sup>	2.67	17.7	26.7	7.1	19.9	33.8	0	90.9	198.7

\* 为 1992 年实测资料。

## 2.1 湖水 pH 值分布和变化

青海湖水 pH 值较低,但平面与垂向变化大。据 1999 年调查,青海西南岸浅水区有地下水涌泉,泉眼位于距湖岸 5-8m 的湖底,实测 pH 值 5.68,由该点向四周追踪,pH 值渐增大,证实该涌泉为青海的酸性地下水补给源。因此全湖 pH 值以湖泊西南部最低,表层平均为 6.62,与云南湖泊和我国东部其它淡水湖泊比较,其最低值和平均值均为我国自然湖泊 pH 实测值的最低记录<sup>[1]</sup>。又据 1999 年 8 月至 2000 年 1 月对湖泊西南岸同一点每隔 15 日作连续取样和分析,结果表明 pH 值变化于 6.47-6.92,平均值 6.75,以 10 月份 pH 值最低(6.47-6.52);12 月下旬以后增高至 6.92-6.95。青海湖水 pH 值的年变化与本区的地下水主要来源于大气降水,经火山活动区复杂的水热活动和循环后,于雨季后期普遍出现的最大地下水出流量有关<sup>[9]</sup>。湖中其它地区的表层水 pH 值,因距酸性地下水泉眼的距离不同以及 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的含量和浮游生物的活动性等差别,各不相同。七个采样点表层水 pH 的平均值为 7.91,其中以 4 点最低 7.5,5 点最高 8.94。另对 5 号点作垂直取样和分析,从表层至 1m、2m、3m、4m 和底层 5.6m,pH 值分别为 8.94、8.78、8.56、8.05、7.78 和 7.55,反映从表层向湖底 pH 值逐渐降低,其变化正好与一般中浅水湖泊的变化趋势相反<sup>[11]</sup>。揭示青海湖水原始的 pH 值较低,表层湖水的 pH 增大可能与湖泊浮游植物的生命活动和与水气间的 CO<sub>2</sub> 平衡有关。

## 2.2 湖水化学组成、矿化度及其变化

湖水化学组成表明(表 1),K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 四大阳离子含量低,全湖平均阳离子总含量仅 3.7mg/L。阳离子组成以 Mg<sup>2+</sup> 含量最高,占总量 40.5%,其次为 K<sup>+</sup>,一般湖泊中最丰富的 Ca<sup>2+</sup> 仅占总含量的 21.1%。阴离子以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 离子含量最高,约占阴离子总含量的 60.3%,但 SO<sub>4</sub><sup>-</sup> 含量同样很高,平均含量 15.63mg/L 占阴离子总量的 33.9%,从板壁坡安山岩<sup>[9]</sup>和青海盆地物源区缺失硫酸盐类岩石(表 2),证明湖水中 SO<sub>4</sub><sup>-</sup> 应来源于地下水 H<sub>2</sub>S 的氧化作用。由于青海湖水极低的阴、阳离子组成,故湖水矿化度也很低,本次实测全湖平均矿化度仅 49.

75mg/L,其中5点最低为42.12mg/L.另据1992年8月的湖水分析资料,由于当年酸性地下水出流量较大,实测湖水矿化度仅为16.24mg/L,反映腾冲青海不仅在云贵高原湖泊中,而且与长江中下游湖泊比较也是我国自然湖泊中湖水阴、阳离子含量和总矿化度最低的湖泊<sup>[1,12,13]</sup>.全湖表层湖水的化学组成和矿化度存有差异,但较pH值小.其中 $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Cl^-$ 因含量很低,变化也不显著,因此平面差异决定于 $HCO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 和 $Mg^{2+}$ 在各点的含量变化.全湖以3点阴、阳离子含量和矿化度最高,5点最低,湖东岸相对较多的阳离子输入可能是湖水化学组成的平面差异的主要原因.5点水质化学组成的垂向变化显示,矿化度表层最低,其它各深度差异不大,但从底层水阳离子含量的较高趋势,反映在酸性湖水的影响下底质缓慢向湖中释放阳离子.另据1999年8月至2000年1月的连续取样分析结果,湖水矿化度的年变化以雨季时最小,8-10月矿化度的平均值仅为31.76mg/L,进入旱季后,湖水矿化度有增大的趋势.

表2 云南腾冲青海表层沉积物的化学组成及其对比

Tab.2 Chemical component and its comparison of surface sediment in Qinghai Lake, Yunnan Province

元素	Al (mg/g)	K (mg/g)	Na (mg/g)	Ca (mg/g)	Mg (mg/g)	Fe (mg/g)	Mn (g/g)	Co (μg/g)	Ni (μg/g)	Ti (μg/g)	Ba (μg/g)	Sr (μg/g)	Cu (μg/g)	Zn (μg/g)
1	92.07	6.25	1.19	1.59	2.51	20.8	261	10	24	4142	434	37	18	87
2	91.32	6.39	1.21	1.43	2.52	20.92	297	10	21	4041	419	37	18	88
3	91.7	6.8	1.31	1.8	3.24	26.1	335	12.6	32.1	5375	477	36.8	13	98
4	90.59	6.26	1.22	1.38	2.05	19.86	260	10	23	4232	390	30	42	147
5	90.85	5.72	1.2	1.19	2.38	19.05	255	9	20.8	3660	449	35.6	41.2	89.5
6	62.8	5.8	1.16	2.43	2.5	19.5	423	9.9	30.1	3614	394	43.1	15	72
7	81.0	5.79	1.17	1.85	2.2	20.25	320	10	21	4280	414	40	37	89
平均	85.76	6.14	1.21	1.67	2.49	20.93	307	10.2	24.6	4192	425	37.1	26.3	95.8
东岸	138.0	4.46	0.72	1.47	2.65	43.38	198	16.4	29.3	6614	340	21	29.3	81.7
南岸	130.5	3.63	1.29	2.65	3.37	26.72	226	13.5	3.7	6102	847	32	30.4	117
西岸	129	4.9	1.23	2.88	3.57	31.03	251	12.6	21.2	5961	377	31	28.5	99.3
北岸	112.2	3.27	0.89	2.25	2.41	21.56	129	13.8	19.1	6528	507	22	55.5	183
平均	127.4	4.05	1.03	2.32	3.0	30.4	201	14.1	18.3	6301	518	26.5	35.9	120.3

### 3 沉积物化学组成及其对比

青海湖泊沉积物的化学组成显示(表2),各点化学元素的含量相对差异性较小,各种元素的含量与平均含量的差别多小于25%,其中常量元素Na和微量元素Co的含量在各点差异小于10%,5点铜含量与平均含量差别最大也仅57.6%.与其它湖泊不同,沉积物化学组成的相对均一性与湖泊面积小,物源区岩性差别不大和泥沙入湖后能获得更充分的混合有关.青海沉积物几乎全部来源于周围山丘的基岩物理、化学风化物,与碳酸盐类岩石和花岗岩等相比,中基性火山喷发岩的酸溶性阳离子含量相对较低<sup>[14]</sup>.但对比湖泊沉积物和四周基岩的化学组成,不难发现K、Na和部分微量元素如Mn、Co、Ni等可能由于生物地球化学作用的参与在湖泊沉积物中稍有积累,但基岩中含量较高的其它多数阳离子在入湖沉积后有明显减少,例如湖泊沉积物中的Ca、Mg、Al、Fe的平均含量和微量元素Ti、Ba、Cu、Zn平均含量分别为基岩平均含量的72%、83%、67%和67%、82%、73%、80%,显示盆地基岩风化物在入湖和沉积后,多数金属

阳离子有明显的流失,以铁元素为例,铁离子的流失还可从青海表层沉积物极低的磁参数得到验证。据分析,青海表层 10cm 沉积物的低频磁化率仅  $19 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ ,而同以基性喷发岩为主要物源的岱海沉积物,全湖平均低频磁化率高达  $96 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ ,比青海约高 5 倍。青海沉积物中极细小粘滞性铁磁颗粒在酸性水介质作用下的大量流失,应是青海沉积物低频磁化率极低的原因<sup>[15]</sup>。

## 4 湖泊生物特征

据全湖 7 个点湖泊生物样品采集和鉴定,浮游植物的平均生物数量:  $147 \times 10^4$  个/L,平均生物量 2.628mg/L,以 6 点最高,生物数量和生物量分别为  $184 \times 10^4$  个/L 和 5.464mg/L,3 点最低,分别为  $112 \times 10^4$  个/L 和 1.24mg/L。浮游生物组成,以绿藻门生物数量最丰富,全湖平均数为  $65.7 \times 10^4$  个/L,约占生物总数的 60%,其次分别为甲藻门、硅藻门、隐藻门和裸藻门,与大多数湖泊不同,鉴定中未发现蓝藻门浮游植物。生物量以甲藻门最高,其余依次为绿藻门、硅藻门等,全湖甲藻门+硅藻门的生物量之和为 1.68mg/L,约占浮游植物生物总量的 64%。生物类型以适应偏酸湖泊环境的藻群落如多甲藻、颗粒直链藻、小环藻以及广生型藻类如栅列藻、纤维藻、角星鼓藻、蓝隐藻、旋转壳虫藻等数量较多。

全湖浮游动物的平均数量为:原生动物 300 个/L;轮虫 2100 个/L;枝角类 3.4 个/L;桡足类 1.4 个/L。生物量依次为 0.009、0.63、0.032、0.024mg/L。反映轮虫不论数量和生物量均为浮游动物的主体,原生动物和枝角类、桡足类等较一般湖泊低很多。浮游动物各类群的优势种均以适应性强的广生型物种:原生动物(*Arcellidae*)为表壳虫(*Arcella* sp.);轮虫有长圆腔轮虫(*Lecane ploenensis*)、叉角拟聚花轮虫(*Conochiloides dossuarius*);枝角类以长额象鼻溞(*Bosmina longirostris*)密度最大,其次有尖额溞(*Alona* sp.)、长刺溞(*Daphnia longispina*)和近缘大尾溞(*Leydigia propingua*)。桡足类以如愿真剑水蚤(*Eucylops speratus*)最丰富,其次有镖水蚤(*Diaptomidae* sp.)等。枝角类和桡足类分布,中部和北部较多,平均数分别为 4.4 个/L 和 1.8 个/L;南部较少,平均数分别为 2.5 个/L 和 1 个/L。对青海最深处 5 点的垂向分布比较,枝角类和桡足类的密度,表层分别为 3 个/L 和 2 个/L;中层密度最大为 4 个/L 和 8 个/L;底层又减少为 0.3 个/L 和 1.5 个/L,反映枝角类和桡足类浮游动物的分布,平面上南部水域较少,垂向上更喜好中上水层活动。

对全湖底栖动物的调查和取样检测分析,腹足类、瓣鳃类等软体动物和虾、蟹等甲壳动物没有发现。介形类生物大部分采样点缺失,仅在东部两个点检测有活体白花介(*Leucocythere* sp.)一种,密度也仅 5g 沉积物中 1-4 个。底栖动物中以适应性强的水蚯蚓和摇蚊幼虫较普遍。水蚯蚓全湖平均密度 15 尾/ $\text{m}^2$ ,平面分布中、北部水下较多,平均密度为 18 尾/ $\text{m}^2$ ,南部水下较少为 11 尾/ $\text{m}^2$ 。湖中摇蚊幼虫在深水 5 点缺失,其它各点都有分布,密度为 2-4 尾/ $\text{m}^2$ 。

湖中自然鱼类,据 20 世纪 80 年代以前的资料,仅有杞麓鲤(*C. carpio chilia*)和鲫(*Carassius auratus*)两种。其后县乡两级水产部门先后多次从外地引入银鱼(*Salangidae*)和四大家鱼苗,1995 年在湖中发展网箱养殖建有 5m × 7.5m 网箱两个养殖鲤、鲫。鱼苗的直接投放和带入的杂鱼,使湖中的原始鱼类的组成和结构发生变化。经本次拉网捕捞调查,湖中仍以杞麓鲤和鲫为主,此外见黄鳊(*Monopterus albus*)、波氏鰕虎鱼(*Ctenogobius*)等小杂鱼,投放的银鱼和四大家鱼未有发现。又据水产部门资料:多次鱼苗投放未获成功,网箱养殖效益也不好,放入 5cm 长

的鲤鱼苗,一般经3年的养殖期才能长大至500-750g出售,表明青海的湖泊环境对银鱼和四大家鱼的生长与繁殖存有不利的因素,只有鲤、鲫等原生鱼类和波氏鲃虎鱼等适应性极强的小型杂食鱼类才有可能在湖中生存下来。

## 5 酸性湖泊环境的成因机制分析

根据地表水酸化理论,酸性湖泊形成有两个基本条件:一,湖泊持续的从内部产生或外部输入 $H^+$ ;二,水体和湖泊沉积物的盐基饱和度降低到无法消除 $H^+$ 对湖泊系统的影响,只有在这种苛刻的条件下湖沼系统才可能丧失对 $H^+$ 的中和能力,引起湖水pH下降和渐变为酸性湖泊<sup>[16]</sup>。事实上,由于自然界的湖沼系统一般具有丰富的物源补充和极高的盐基饱和度,而具备持续 $H^+$ 输入的湖沼环境在地表却十分罕见,因此地表自然酸性湖泊只可能在某些特殊的地质环境中形成。腾冲青海的火山湖成因、极小的流域面积和中、基性安山岩较低的盐基饱和度以及含 $H_2S$ 的酸性地下水持续补给,具备了酸性湖泊形成的基本条件。

通过青海的湖泊环境调查和分析,其环境最显著的特点表现为湖泊系统的元素地球化学性质与一般湖泊不同。自然界多数湖泊由于水生植物的新陈代谢和阳离子的积累,湖水呈中性至碱性,因此湖泊系统中多数金属阳离子处于相对稳定状态。但在酸性湖泊环境下,沉积物中大部分金属阳离子的地球化学行为发生变化,首先增强矿物中酸溶性碱金属和碱土金属阳离子的活动性,使它们更多更快地从沉积物转移至水中,并伴随湖泊的水体交换和循环不断流失。青海因长期的酸性地下水输入和碱金属、碱土金属阳离子不断溶出和流失而渐渐消耗殆尽,表现出湖水化学组成的极低的阳离子含量和极低的矿化度以及较低的pH值和极低的碱度,这在我国湖泊中很少见。与此同时沉积物中酸溶性Al和Fe、Co、Ni、Mn、Pb、Zn、Cu、Ba、Sr等重金属离子也增大其活动性,更多地被活化而溶出。Forstner和Angino认为,水体偏酸时,沉积物中Fe和其它重金属元素的氧化还原反应在沉积物与界面之间进行,结果使Fe和其它重金属离子被还原为低价态而易溶于水并增强其迁移能力<sup>[17,18]</sup>。Fe和其它金属阳离子的流失也合理解释了青海沉积物磁化率极低以及与物源区相比大部分金属阳离子的含量大幅减少的原因。在金属阳离子中铝元素在酸性水介质中被更多地溶出,形成 $Al(OH)^+$ 和 $Al(OH)_2^+$ 等羟基形式化合物,被认为对水生生物具有很强的毒性<sup>[6]</sup>,是导致酸性水体生物贫化及其特殊生物组合和形成特殊生态环境的重要原因之一。

青海湖泊环境的另一个显著特征,表现为湖泊生物的种类和种属少、生物量低。Cameron等人在分析酸性湖泊生物消亡的原因时指出:在高浓度 $H^+$ 离子、活性Al离子和丰富的 $CO_2$ 释放等共同毒害下,一般适应于中、碱性湖水的生物类群逐步消亡,少数耐酸、耐污的物种渐成为酸性湖泊的生物主体,是造成湖泊生物贫化的主要原因<sup>[5]</sup>。又据酸化水体的生物调查和实验室酸度控制生物研究,随水体pH降低,细菌总数减少,其中因硝化细菌的生存受 $H^+$ 抑制,湖泊中有机质的硝化作用减缓,氨的氧化作用逐渐停止,致使控制湖水营养水平的机制被破坏,加速湖沼的贫营养化过程。研究还发现,在酸化水域中蓝藻和大部分绿藻先后消失,耐酸的硅藻和甲藻往往成为优势种,枝角类和桡足类浮游动物对酸性水体的适应性较差,轮虫可能成为浮游动物中主要种群,腹足类、双壳类和介形类等水生动物因壳体的形成对碳酸钙有大量需求,随湖泊矿化度和碱度的下降有壳动物基本消失<sup>[4,6,19]</sup>。两栖类动物受酸化影响与鱼类相似,据Jenson的鱼类酸度控制实验和病理分析<sup>[8]</sup>,酸化水体中酸、碱平衡被破坏,影响鱼类正常的离

子交换,致使鱼鳃分泌过量粘液阻碍溶解氧的扩散而造成鱼类缺氧死亡。酸化水体鱼类死亡还与无机铝的溶出和铝毒性有关,当水中铝含量增高至浓度 $0.5\text{mg/L}$ 时足以使鱼类中毒而死。研究还证实受精卵和仔鱼对 pH 降低和铝毒性具有最大的敏感性和最大的毒性,据大西洋鲑鱼的研究,当水体 pH < 6 时,胚胎发育出现障碍,卵孵化时间延长,仔鱼死亡率增加;当 pH 降低至 4.5,12d 仔鱼死亡率达 50%,在 pH 降低至 4 胚胎完全不能孵化<sup>[6]</sup>。又据张甫英等对中国草、鲢、鳙、泥鳅的实验研究,在酸性水体中仔鱼比受精卵的耐受性大 13 - 14 倍;仔鱼与幼鱼相比其敏感性高 9 倍<sup>[20]</sup>。上述各项研究表明,腾冲青海的浮游植物数量少、生物量低、群落中缺失蓝藻,硅藻门、甲藻门有最高生物量,浮游动物种群中原生动物、枝角类、桡足类生物数量少生物量低,轮虫为其主体,缺失腹足类、瓣鳃类等软体动物和虾、蟹等甲壳动物,鱼类种属少以适应本地环境的杂食性鱼类为主,其它鱼类即使人工移入也难以存活等湖泊生物学特征,既反映了酸化水体生物演化的普遍规律,也是青海湖泊环境的另一个最显著的特点。

酸性地下水和 H 离子的持续补给,引起青海湖泊系统元素地球化学行为的变化及其对湖泊生物的影响 - 生物贫化和耐酸物种的扩张,是造成腾冲青海湖泊环境区别于一般中、碱性湖泊的基本特点,也是其环境演化的主要动因。基于同样原理,由大气污染和酸沉降诱发的地表水酸化,因其环境的变化与自然酸性湖泊有相似的趋势,因此腾冲青海的湖泊的环境特征及其敏感环境参数的变化,也可为人类影响的地表水酸化的识别,提供理论依据和具体湖泊参照。

致谢 野外工作得到云南省腾冲县科委张炎教、马兴万副主任,大苴乡蔺以佳乡长,双海村姜兆纯村长以及县有关部门的鼎力支持。在此一并表示感谢!

## 参 考 文 献

- 1 王苏民,窦鸿身主编.中国湖泊志.北京:科学出版社,1998
- 2 茂野 博.热水系の深部環境を地球化学データから予測する.地质二 - ス,1992,45716 - 33
- 3 丁国安,徐晓斌,房玉梅.中国酸雨现状及其发展趋势.科学通报,1997,42(2):169 - 173
- 4 Larssen T, Carmichael G R. Acid rain and acidification in China: the importance of base cation deposition. *Environmental Pollution*, 2000, 110(1):89 - 102
- 5 Cameron E M, Prevost C L, Curdy M M, et al. Recent (1930s) natural acidification and fish-kill that was an important food source for an Inuit community in northern Quebec, Canada. *J Geochemical Exploration*, 1998, 64(1 - 3):197 - 213
- 6 Driscoll C T, Baker J P, Briscognt J J, et al. Effects of aluminum speciation on fish in dilute acidified waters. *Nature*, 1980, 28:164 - 170
- 7 Anderson N J, Blomqvist P, Renberg I. An experimental and palaeoecological study algal responses to lake acidification and liming in their central Swedish lakes. *Eur J Phycol*, 1997, 32:35 - 48
- 8 Jensen K. Low pH levels wipe out salmon and trout population in southernmost Norway. *Ambio*, 1972, 1:223 - 225
- 9 佟 伟,章铭陶编.腾冲地热.北京:科学出版社,1989
- 10 大沢信二,由佐悠纪,王云飞.中国云南省腾冲火山区に於ける热水系の地球化学モデル.温泉科学,1995,45(1):13 - 25
- 11 中国科学院南京地理与湖泊研究所等著.云南断陷湖泊环境与沉积.北京:科学出版社,1989
- 12 窦鸿身,姜加虎.洞庭湖.合肥:中国科学技术大学出版社,2000
- 13 孙顺才,黄漪平.太湖.北京:海洋出版社,1993
- 14 冯宗炜主编.酸雨对生态系统的影响.北京:中国科学技术出版社,1993
- 15 吴瑞金.湖泊沉积物的磁化率、频率磁化率及其气候意义.湖泊科学,1993,5(2):128 - 135
- 16 王云飞,朱育新,潘红玺等.地表水酸化的研究进展及其湖泊酸化的环境信息研究.地球科学进展,2001,16(3):421 - 426

- 17 Forstner U , Wittman G T W. Metal Pollution in the Aquatic Environment. West Germany : Springer , 1988. 170 - 172
- 18 Angino E E , Magnuson L M , Waugh T C. Mineralogy of suspended sediment and concentration of Fe Mn Ni Zn Cu and Pb in water and Fe Mn and Pb in suspended load of selected kansas stream. *Water Res Res* , 1974 , **10** :1187 - 1191
- 19 李辛夫.酸沉降对水生态系统的影响.见:中国环境科学学会编.酸雨文集.北京:中国环境科学出版社,1989
- 20 张甫英,李辛夫.酸性水对几种主要淡水鱼类的影响.水生生物学报,1997,21(1):40-48

## Environmental Characteristics of An Acid Qinghai Lake in Tengchong , Yunnan Province

WANG Yunfei      ZHU Yuxin      PAN Hongxi      YIN Yu

( *Nanjing Institute of Geography and Limnology , Chinese Academy of Sciences , Nanjing 210008 , P. R. China* )

### Abstract

Qinghai Lake is an acid lake and located in Tengchong County , Yunnan province. Qinghai Lake is a crater lake with continuously acid groundwater supply , which is the geological foundation of the acid lake.

We analyzed water , soil , sediment and biological samples of Qinghai Lake. As result showing , the water has low pH value , very low cation concentration and mineralization degree , and obviously migration of element Ca , Mg , Al and Fe in sediment. Few species , low biomass and lack of blue-green algae , Gastropoda , Lamellibranchia and Crustacea are most notable characteristics distinguished from general neutral and alkaline lakes.

Change of element geochemistry behavior of acid aqueous medium in a lake , and its impact on organisms cause the decrease of acid sensitive species and the increase of acid tolerant species , these are the basic characteristics of Qinghai Lake and dynamic mechanism of forming acid lake environment.

**Key Words** Environment characteristics , acid lake , Qinghai Lake in Tengchong