

60-66

程海的水质状况及咸化趋势<sup>①</sup>胡文英 季江<sup>√</sup> 潘红玺 P 343.3

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**摘要** 程海又名黑坞海, 位于东经 100°38—41', 北纬 26°27—38' 之间, 即今云南省永胜县城西南 20km 处, 是横断山区最大的一个内流高山湖泊。长期以来, 程海的水量出湖略大于入湖, 湖水量逐年减少, 水质向咸化方向发展。本文根据 1981 年 5 月 27 日—6 月 5 日对程海的综合调查资料, 重点分析了 1972 年至 1981 年水质演变情况, 对水质状况及咸化趋势进行了初步研究。

**关键词** 咸化趋势 程海水质 冰况

程海位于通向红河的断裂带上, 为一地堑式断陷湖盆, 受地质构造影响, 湖周均为断层崖或断块山地。区内出露的岩石主要为砂页岩、石灰岩、玄武岩等。由于湖泊水位急剧下降, 入湖河流强烈下切, 湖周形成了一系列的“V”谷地貌。

程海湖面海拔 1520m, 南北长 19.35km, 东西最宽为 5.3km, 平均宽为 4.07km, 湖泊面积为 77.22km<sup>2</sup>。实测最大水深为 35.1m, 平均水深为 25.74m, 蓄水量为 19.87×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>。集水面积约 228.9km<sup>2</sup>, 与湖泊面积的比值(即湖泊补给系数)仅为 2.96。入湖河流十分短小, 较大的有季官河、团山河, 多数河流只是降水时有流, 河水暴涨暴落。因此, 程海湖水的补给形式主要是湖面降水、临时性沟溪汇水和区间坡面漫流。

程海处于云南高原亚热带西南季风气候区, 多年平均气温约为 13.5℃, 年降雨量为 738.6mm, 其中 90% 集中在雨季(6—10 月份), 旱季降水极为稀少, 年蒸发量为 2040.3mm, 干燥度约为 2.4, 属季节性干旱气候。

程海为不冻湖, 多年平均水温为 15.9℃, 湖水清澈透明, 透明度为 3.0—3.5m。湖水呈黄绿色, 水色标号为贺里尔-乌里氏 11 号。

## 一、水质状况

## (一) 矿化度

程海湖水矿化度表层变动在 981—1021 mg/L 之间, 均值为 1004 mg/L; 底层变动在 987—1031 mg/L 之间, 均值为 1016 mg/L。底层略高于表层。矿化度在平面分布上有一定的差异, 沿岸带浅水区高于湖心, 尤其以东南部一带水域矿化度最高(图 1)。

据河口街水文站 1972—1979 年水质资料分析, 全年内矿化度具有明显的变化, 雨季

① 胡洪云参加室内分析工作, 文中插图由吕红妹清绘, 在此一并致谢。

低旱季高,变幅在 100—200 mg/L 之间。矿化度多年变化呈上升趋势,年平均矿化度 1972—1974 年低于 900 mg/L,1975—1979 年低于 1000 mg/L,1981 年实测全湖均值为 1004 mg/L。十年来,矿化度增加了 100 mg/L 之多,湖水矿化度已超过 1 g/L。按其分类<sup>①</sup>,程海已由淡水湖演变为咸水湖,成为横断山区目前已知的唯一咸水湖,也是云贵高原湖泊中唯一的咸水湖。

湖水主要离子的关系(当量数比)为: $\text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-} \gg \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ ;  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} \gg \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+}$ 。 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  为主要阴阳离子,分别占阴阳离子毫克当量总数的 35—38%、10—13%、25—28%、20—23%。属重碳酸类钠组 I 型,即  $\text{C}^{\text{II}}$  型。成因主要与湖水咸化有关,咸化过程中,因碳酸钙的溶度积很低(水温 18—25℃ 时,  $K_{sp} = 4.5 \times 10^{-9}$ ),当湖水中含有一定数量的碳酸根、钙离子时,易结合生成难溶的碳酸钙沉淀,进入沉积物中。实测湖水中钙离子逐年减少,现仅占正负离子厘摩尔总数的 1% 左右。调查期间,在沿岸带见有鲕、豆石、薄灰结核和迭层石等碳酸盐沉积。

### (二) 湖泊营养类型

程海湖水不仅矿物质含量极为丰富,营养物质含量也比云南其它深水湖高(表 1)。据实测资料分析,诸营养物质中,以有机物耗氧量( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )较高,多数测点为 3—4 mg/L,最高值可达 7.16 mg/L,接近于受人类活动影响较大的滇池湖水的有机物耗氧量。湖水中可溶性二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )含量也较高,一般 1—2 mg/L,最高可达 5.92 mg/L,比滇池略低。无机磷( $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ )也较丰富,均值为 0.04 mg/L,无机氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NH}_3-\text{N}$ )总和为 0.04 mg N/L,铁含量较低,仅有痕迹。浮游植物初级生产力(测氧法)为 0.09 mg  $\text{O}_2$ /L。与云南其它湖泊的营养状况相比,程海略高于抚仙湖,与洱海比较接近,应属于中等营养类型湖泊。

### (三) pH 值、总硬度、总碱度

程海湖水 pH 值较高,一般为 9.0,最低为 8.95,最高也仅 9.10。pH 值的日变化、年变化及多年变化不太明显,均在 9.0 左右,终年呈碱性。说明湖泊中生物的光合作用对 pH 值影响不太明显,主要与程海水生植物数量较少有关。

湖水总硬度、总碱度较高,实测平均值总硬度为 5.86 mmol/L,总碱度可达 13.5 mmol/L。

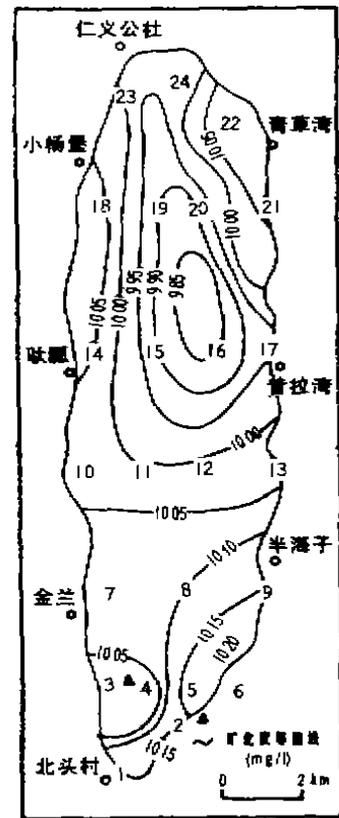


图 1 程海湖水矿化度平面分布  
Fig. 1 Plane distribution of minerality

① 淡水湖矿化度小于 1 g/L;咸水湖 1—35 g/L;盐湖大于 35 g/L。

表 1 程海、抚仙湖、洱海、滇池湖泊营养类型

Tab. 1 Nutrient types for Chenghai, Fuxianhu, Erhai and Dianchi Lakes

湖 名	无机氮 (mg N/L)	无机磷 (mg P/L)	铁 (mg Fe/L)	硅 (mg SiO <sub>2</sub> /L)	CoD <sub>501</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	总硬度 (m <sup>+</sup> mol/L)	初级生产力 (mg O <sub>2</sub> /L)	营养类型
程海(表)	0.04	0.04	痕迹	1.59	3.42	5.859	0.09	中
程海(底)	0.04	0.04	痕迹	1.52	3.45			
抚仙湖	0.06	0.01	0.01	0.26	0.60	2.915	0.07	贫
洱 海	0.04	0.03	0.03	0.59	1.71	1.867	0.18	中
滇 池	0.26	0.02	0.02	1.73	3.88	2.881	2.08	富

#### (四)水质评价

1. 渔业用水 程海湖水目前尚具有溶解氧充沛,多数为 7.0—7.5 mg/L,饱和度在 100%左右;湖水中营养物质较丰富,无机盐类及湖水总硬度均适宜鱼类的生长和发育; pH 值稍高,已超过渔业用水标准,考虑到湖水是由 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 构成的缓冲体系,外界条件的变化,不会引起湖水 pH 值的较大变动,因此,程海发展渔业生产的潜力还是很大的。

2. 灌溉用水 程海湖水主要离子关系是钠离子大于强酸离子的含量,即 Na<sup>+</sup> > Cl<sup>-</sup> + SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,因此灌溉系数应按下列式计算:

$$Ka = 288 / (10Na^+ - 5Cl^- - 9SO_4^{2-})$$

式中 Ka 为灌溉系数;Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的单位均为 mmol/L。湖水中假定盐为碳酸钠、氯化钠、硫酸钠存在,经计算灌溉系数为 4.07,界于 1.2—5.9 之间,属不太适合的灌溉用水。由于湖水含有对农作物有害的碳酸钠盐类,长期使用该水灌溉农田,会使土壤变质,农作物受害,调查期间已发现滨湖地区一些农田出现花碱土。

3. 工业用水 湖水清彻透明,悬移质较少,对一般工业用水尚属适宜。但湖水硬度高,一些锅炉用水尤其是高压锅炉用水,使用前必须进行软化处理。

## 二、水质发展趋势分析

程海水资源较为丰富,蓄水量达 19.87 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>,是云贵高原除抚仙湖、洱海外蓄水量最大的湖泊,这一天然的水资源对于缺水滇西北地区是一宝贵的财富,有利于当地工农业、渔业生产的发展。但是,程海现已成为横断山区目前已知的唯一咸水湖,其水质对工农业生产已产生一定影响。因此,预测程海盐化发展速度,探讨控制湖水盐化的途径是值得深入研究的课题。

### (一)程海矿化度预报方程

前已述及,矿化度有逐年增加的趋势,从 1972 年—1981 年增加了 100 mg/L 之多,平均每年递增 10 mg/L 左右。程海矿化度的这一变化特点,与水文气象诸要素的关系极为密切。表 2 列出了程海湖边河口街水文站实测的 1972—1979 年程海矿化度、水位、蒸发量、降水量年均值资料。不难看出矿化度与水位、降水量呈负相关,而与蒸发量成正相关。

表2 1972—1979年程海矿化度、水位、降水量、蒸发量  
Tab. 2 Minerality, water level, annual precipitation  
and evaporation of Chenghai Lake in 1972-1979

年份	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
矿化度(mg/L)	899.91	883.88	833.30	978.20	956.80	991.65	995.71	958.90
水位(m)	19.57	19.18	19.29	19.23	18.94	18.50	18.47	18.53
降水量(mm)	732.8	764.8	879.1	649.5	665.4	629.0	898.1	769.0
蒸发量** (mm)	2165.72	2330.44	2249.63	2509.12	2316.01	2319.01	2087.61	2194.01

\* 河口街水文站资料

\*\* 蒸发资料×0.969

为了求得程海矿化度的预报方程,我们将矿化度看成因变量,其它水文要素作为自变量,用回归分析的方法探求矿化度与水文气象要素之间的相关性。为了从大量的可能因子中,选择出主要的有效因子,舍弃次要的效果不显著的因子,计算中采用了阶段回归分析计算方法<sup>①</sup>。求得矿化度的最优预报方程为:

$$\hat{z}^{(3)} = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i \quad (1)$$

经复原后,程海历年1—12月实际矿化度预报方程为:

$$y = 2903.96 - 98.94x_1 - 0.234x_2 + 0.069x_3 \quad (2)$$

式中:y为程海矿化度年平均值(mg/L), $x_1$ 为河口街水文站年平均水位(m), $x_2$ 为河口街水文站前一年10月至当年10月年降水量(mm), $x_3$ 为地下入湖径流深(mm)。

地下入湖径流深是在湖区没有降水的旱季,根据水量平衡计算而得。经统计分析发现该量与9个月前的流域降水量有较好的相关关系。在此基础上依据湖水位、湖面蒸发量、湖面降水、地表径流量、工农业用水量及9个月前的流域降水量依次推得历年逐月和年地下入湖径流深。

从程海矿化度预报方程可以看出,矿化度与水位、降水量的回归系数小于零,矿化度与地下水入流量的回归系数大于零,说明水位高、降水量大时矿化度低,地下水入流量大时矿化度高。由于蒸发因子与矿化度的单相关系数极差,故蒸发因子未能选入。

根据程海矿化度预报方程,反推计算得出的1972—1979年矿化度资料,与河口街水文站矿化度的实测资料相比较(表3),相对误差小于±5%。这一结果表明,可以根据河口街水文站及程海流域内的雨量站的水位、降雨量资料,对程海湖水矿化度进行预报,以满足工农业生产的需要。

表3 程海矿化度计算值与实测值 (单位:mg/L)

Tab. 3 Measured and calculated values of minerality in Chenghai Lake

年份	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
项目								
实测值	899.91	883.88	833.3	978.2	956.8	991.6	995.7	958.9
计算值	873.98	918.61	869.1	947.3	952.9	984.1	983.1	966.3
绝对误差		34.73	35.8	-30.9	-3.9	-7.5	-12.6	7.4
相对误差(%)	-2.9	3.9	4.3	-3.2	-0.4	-0.8	-1.3	0.8

① 山东海洋学院海洋系,海况分析及其预报(下册),1977年5月。

## (二)程海的盐化速度

为了预测程海的盐化速度,应先进行盐量平衡的计算。应用水量平衡的计算结果(表4)<sup>[2]</sup>,并根据1981年5月27日—6月5日期间综合调查的湖水、河水和泉水矿化度资料,对程海的盐量平衡进行了下列计算(降水矿化度是根据大理市旱季降水矿化度资料估算的)。考虑到程海是一封闭型湖泊,故平衡方程式列为:

$$S_x + S_y + S_z + S_4 = S_5 + S_6 + S_7 \pm S_w \quad (1)$$

式中: $S_x$ 为湖水面降水的盐量, $S_y$ 为地表径流入湖的盐量, $S_z$ 为地下径流入湖的盐量, $S_4$ 为湖面水汽凝结的盐量, $S_5$ 为湖面蒸发携带出湖的盐量, $S_6$ 为地下径流携带出湖的盐量, $S_7$ 为工农业用水携带出湖的盐量, $\pm S_w$ 为计算时段里湖水中盐分的增减量。

湖面水汽凝结的盐量和地下径流携带出湖的盐量,因水量平衡计算时均未列入,故不予计算;湖面蒸发带走的盐量较其它盐量为小,也忽略不计。程海的盐量平衡方程式可简写为:

$$S_x + S_y + S_z = S_6 \pm S_w \quad (2)$$

计算过程如下:

$$S_x = Q_x C_x = 0.5703 \times 10^6 \times 21 \times 10^{-3} = 0.1198 \times 10^7 \text{kg/a}$$

$$S_y = Q_y C_y = 0.2754 \times 10^6 \times 230 \times 10^{-3} = 0.6334 \times 10^7 \text{kg/a}$$

$$S_z = Q_z C_z = 0.6314 \times 10^6 \times 261 \times 10^{-3} = 1.6480 \times 10^7 \text{kg/a}$$

$$S_6 = Q_6 C_6 = 0.0121 \times 10^6 \times 1004 \times 10^{-3} = 0.1215 \times 10^7 \text{kg/a}$$

$$S_w = S_x + S_y + S_z - S_6 = +2.2797 \times 10^7 \text{kg/a}$$

表4 程海流域多年水量平衡

Tab. 4 Multi-year water balance of Chenghai Lake Basin

入 湖 水 量				出 湖 水 量			
项 目	特征值	水 量		项 目	特征值	水 量	
		面积 (km <sup>2</sup> )	mm 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>			面积 (km <sup>2</sup> )	mm 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
湖面降水量	77.22	738.6	0.5703	湖面蒸发量	77.22	2040.3	1.5755
地表入湖水量	228.9	356.7	0.2754	工农业用水量	/	16.0	0.0121
地下入湖水量	/	617.7	0.6314				
合 计		1913.0	1.4771				

入湖水量—出湖水量=-143.3mm或0.1105×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>

据此计算可知,1981年程海由于水量的耗逝,引起湖水总盐分的增加,年增加量约为 $2.2797 \times 10^7 \text{kg}$ 。由于所用调查资料均取于枯水期,其值略偏大。

按上述每年入湖盐量(忽略历年出湖盐量应随湖水矿化度增加而增加以及随着水位下降全湖总蒸发量应有所下降等因素),通过水盐平衡计算,程海10年以后(1991年)湖水矿化度为1185mg/L,年增加量约18.1mg/L;20年以后(2001年)湖水矿化度为1388mg/L,年增加量约20.3mg/L;50年后,湖水矿化度将超过2000mg/L,年增加量为26.6mg/L(表5)

表5 程海湖水不同年份矿化度计算值

Tab. 5 The minerality in different years in Chenghai Lake

年份	湖水总量 ( $10^4\text{m}^3$ )	湖水总盐量 ( $10^4\text{t}$ )	计算值 ( $\text{mg/L}$ )	实测值 ( $\text{mg/L}$ )	年增加量 ( $\text{mg/L}$ )
1981	19.87	199.49	1004	1004	16.4
1991	18.76	222.29	1185		18.1
2001	17.66	245.09	1388		20.3
2031	14.34	313.48	2186		26.6

预测程海的盐化速度也可用回归分析法求得。根据程海湖水矿化度逐年递增的特点,对1972—1979年河口街水文站实测的湖水矿化度与年份进行的相关分析,建立的矿化度预报方程,即: $y=17.01x+860.82$ ,式中 $y$ 为矿化度( $\text{mg/L}$ )、 $x$ 为与1971年间隔的年份(年)( $n-2=7, r=0.71$ )。据此式计算,程海矿化度1991年为1201 $\text{mg/L}$ ,年增加量约19.7 $\text{mg/L}$ ;2001年为1371 $\text{mg/L}$ ,年增加量为17.0 $\text{mg/L}$ ;2031年为1882 $\text{mg/L}$ ,年增加量亦为17.0 $\text{mg/L}$ 。

上述二种预测结果,1991、2001年比较接近,误差在1%左右;2031年误差较大,为15%。但不论用哪种方法,结果均较吻合,因此程海湖水有进一步咸化的趋势,且从微咸水湖向咸水湖过渡。

### 三、湖水咸化原因及其控制途径

程海咸化原因主要有以下几个方面:

1. 程海原属金沙江水系,湖水经过程海南侧的海口河汇入金沙江。据县志记载,程海从1690年起,水位逐年下降,湖水入不敷出,逐渐演变为一个封闭湖泊。此后由降水、地表地下径流携带入湖的盐量,不能携带出湖,使盐分不断在湖水积累。

2. 巨大的蒸发量促使湖水浓缩是其增高的又一原因。程海地区属季节性干旱气候,年蒸发量约为年降水量的三倍,因蒸发所耗逝的水量可达 $1.5755 \times 10^6 \text{m}^3/\text{a}$ ,占出湖总水量的99%以上,而由蒸发所携出的盐分极少,致使单位体积内含盐量增加,矿化度升高。

3. 大量地下水的补给对程海湖水的盐化也起一定的作用。由于湖周陆面的截流灌溉,使径流系数显著减小,导致陆面入湖水量偏少,仅占入湖总水量的18.6%(矿化度均值为230 $\text{mg/L}$ )。地下径流量约为地表径流量的二倍多,占入湖总水量的42.7%(矿化度均值为261 $\text{mg/L}$ )。由于地下径流补给量大于地表径流,致使每年由地下径流携带入湖的盐量相当于地表径流携带入湖盐量的2.6倍。

综上所述,程海水质目前除尚适宜于渔业用水外,对工农业用水已不太适合。今后还会以更快的速度继续咸化,2031年以后矿化度将接近或超过2 $\text{g/L}$ 。湖水总硬度将会因钙镁离子的减少而降低,总碱度将增加。据大连水产专科学校试验发现,水型属C<sub>2</sub>型的苏打水,由于碱性强,pH值高,对鲤、鲢等一些鱼类可能有害。因此,应采取积极措施,减缓程海盐、碱化的进程,保护水资源,使其在工、农业和渔业生产中发挥更大的作用。为此,首先要尽量设法扩大程海的径流面积,增加弱矿化的地表径流入湖水量,改变目前地表、地

下径流入湖水量的比例状况。其次,对凡能直接引用河水、泉水灌溉的农田,应尽量使用上述水源,在不足的情况下,应与湖水混和灌溉或轮换灌溉,尽量避免直接提取湖水灌溉,既可防止滨湖农田盐碱化的发生,又可防止农田盐碱化后含盐量高的农田回归水入湖加速其咸化过程。最后是如何开展有效抑制湖面蒸发的实验研究,据水量平衡计算,出湖总水量中,有99%以上的水量为蒸发所耗损,如果能使蒸发量减少,程海的咸化进程必将减缓。此项措施有待今后进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] O. A. 阿列金. 水文化学原理. 北京,地质出版社,1960.  
 [2] 季江、范云琦. 程海的水文状况及水量平衡. 横断山综合考察论文集(二),北京,北京科学技术出版社,1986.  
 [3] 新疆荒地资源综合考察队. 博斯腾湖的盐化原因及其控制途径. 地理学报,1982,37(2).  
 [4] 中国科学院南京地理研究所著. 中国湖泊概论. 北京,科学出版社,1989.

## A PRELIMINARY STUDY OF WATER QUALITY AND SALINIZATION IN CHENGHAI LAKE

Hu Wenying Ji Jiang Pan Hongxi

(Nanjing Institute of Geography, Academia Sinica, Nanjing 210008)

### Abstract

Chenghai Lake is situated at some 20km southwest of Yongsheng Town on Yunnan Plateau. The lake area is 77.22km<sup>2</sup>, its average water depth 25.7m and water volume about 19.87×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>.

Chenghai Lake, a first known slight salty water lake in Hengduanshan Mountains. According to the chemical analysis, the mineralization of the lake water has been gradually increasing, from less than 900 mg/L in the year 1972-1974, to 956-991 mg/L in 1975-1979, and to 1004 mg/L in 1981. The mineralization has an increase of about 10.4 mg/L averagely. The lake water changed from fresh to brackish.

The content of main ions in the lake water is HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> >> Cl<sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and Na<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> >> K<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup>, belonging to the type of C<sub>3</sub><sup>h</sup>. With abundant dissolved oxygen and sufficient nutrient elements in the water, this lake has favourable conditions for fishery. As the lake is getting salified successively, Chenghai Lake area is unsuitable for the development of industry and agriculture.

Being a closed lake of high mountains, according to the proximate analysis and calculation, Chenghai Lake has a total inflow of 1913.0×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> and a total outflow of 2056.3×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>, correspondingly the salty composition carried into the lake is more than that of the outflow from the lake, hence resulting in salty composition accumulation and an increase in water mineralization.

In order to prevent the lake water from the continueous increase in mineralization, it's necessary to increase the surface runoff volume flowing into the lake, to control and reduce the water quantity for industry and agriculture, and to study the problem of restraining the evaporation from water surface.

**Key words** water quality salinization, Chenghai Lake