

西藏羊卓雍湖水环境变化探索研究*

陈西平

(四川省环境保护科研监测所, 成都)

提要 本文对西藏羊卓雍湖水环境现状和变化趋势进行了研究。用水量平衡方程和零维水质模型定量计算了该湖水利资源开发后水量和矿化度的变化, 结果表明, 湖水矿化度在水平和垂直方向的变化不大; 67年后, 湖水面积减少121.4km², 年入湖水量比蒸发量大1.81亿m³, 可供继续发电, 水量达到新的平衡; 湖泊水质逐渐淡化, 700年后湖水矿化度将达平衡浓度。保持现状不开发羊湖水资源, 湖泊水质将继续咸化。

羊卓雍湖(以下简称羊湖)水环境变化的探讨, 对保护羊湖良好的水域环境和合理规划利用羊湖的水利资源有一定的意义。以往, 水利部门及有关科研机构对羊湖开发利用的可能性曾进行了长期考察和研究, 提出利用羊湖和雅鲁藏布江之间的水位能差, 引羊湖水发电的建议。目前水利学界和环境科学界对羊湖的开发利用有着不同的看法: 一种意见认为, 羊湖与雅鲁藏布江最短距离为10km, 湖面高于江面830m, 如果利用羊湖丰富的水资源和两者间巨大落差建水电站, 对于发展西藏经济, 提高人民生活水平将起到积极的作用; 另一种看法则认为, 开发羊湖会使羊湖水环境恶化, 甚至导致湖水枯竭。鉴于类似羊湖这样的高源湖泊的开发利用, 国内尚无先例, 故需要探讨的问题很多。本文主要针对上述不同看法, 重点讨论开发羊湖后, 湖泊水质和水量变化趋势, 对羊湖未来的水环境状况进行定量的预测。

一、羊湖地理环境概况

羊湖是藏南较大的内陆封闭型湖泊, 地理位置为28°46′—29°14′N, 90°22′—91°06′E。流域集水面积6100km², 湖水面积638km²。湖面海拔高程4441.2m^[1]。流域东西长约144km, 南北宽100km左右。湖水容量约143亿m³, 湖泊水深一般在30—40m, 最深59m。流域内有冰川面积111.6km²。广义的羊湖流域习惯上还包括空姆错、沉错、巴纠错和普莫雍错4个湖泊, 巴纠错、沉错、普莫雍错与羊湖无直接水源联系; 空姆错是内陆吞吐湖, 水位仅高出羊湖0.5m, 湖水汇入羊湖, 通常认为是羊湖的组成部分。因此, 广义的羊湖总集水面积为8629km²。其中冰川面积131.6km², 沼泽面积32km², 各湖水面积总和为1045km², 羊湖地区各个湖泊情况见表1。

羊湖的水量主要靠径流、冰雪融水和直接降雨量补给。丰水年普莫雍错偶有向羊湖溢水的现象。卡鲁雄曲, 卡洞加曲, 浦宗曲、嘎马林河是羊湖的4大主要支流, 其中卡鲁雄

* 施为光参与制订野外工作方案, 并对野外工作进行指导; 本文在修改过程中曾得到清华大学李玉梁副教授的帮助, 谨致谢意。

收稿日期: 1987年10月17日。

表 1 羊卓雍湖地区湖泊情况概表

Tab. 1 Lakes in Yangzhuoyong Lake region

湖泊名称	湖面高程 (m)	湖面面积 (km ²)	流域面积 (km ²)	备 注
羊卓雍湖	4441.2	678 ^①	6100	包括空姆错
巴纠错	4502.2	45	858	
普莫雍错	5009.8	284	1523	
沉错	4427.6	38	148	
小计		1045	8629	

① 包括空姆错湖面积 40km²。

曲流入空姆错(见图 1),在夏季补给羊湖。流域内多年平均降水量为 416.8mm(据流域内浪卡子气象站多年资料计算),相应矿化度 40.0mg/L。

羊湖地区现有耕地 5.7 万亩,草场面积 90 000—100 000 亩,是个农牧相结合的地区,青稞是主要的农作物。羊湖鱼类较单纯,高源裸鲤是湖内唯一具有经济价值的鱼类,其次是条鳅等。60 年代年捕捞量 250 000—600 000kg,近几年年捕捞量在 200 000kg,鱼类一般有寄生虫。

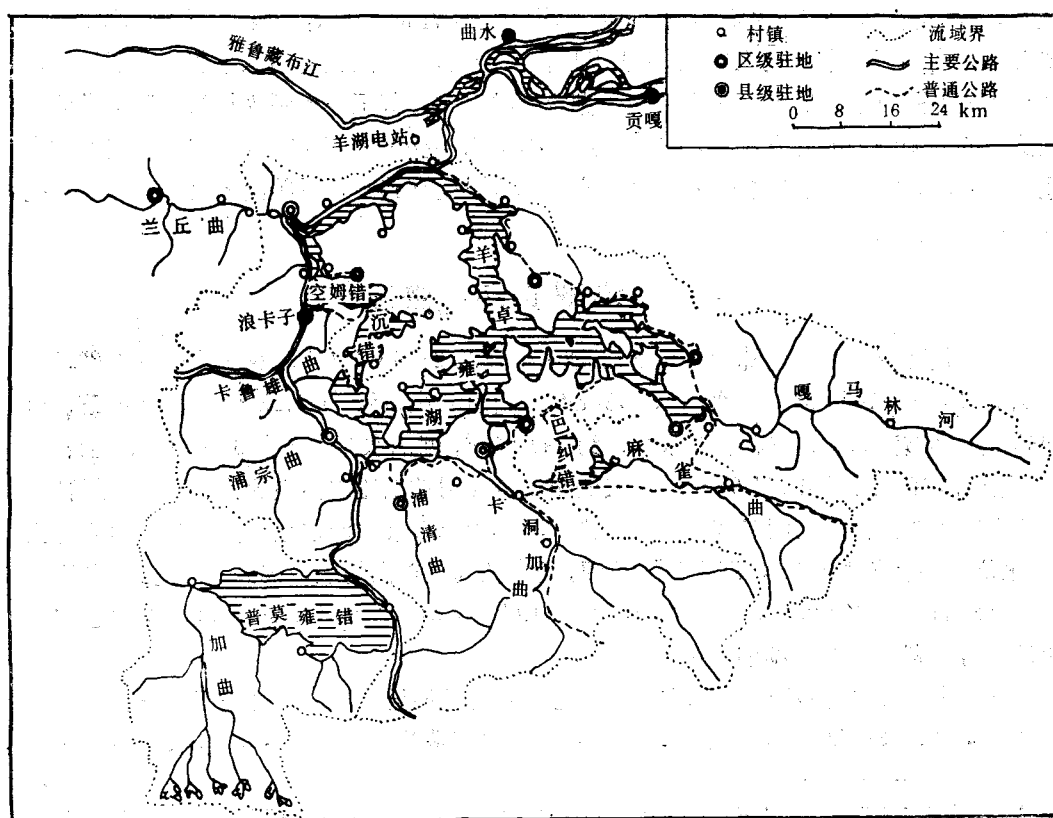


图 1 羊卓雍湖流域概图

Fig. 1 Sketch of Yangzhuoyong Lake catchment

二、羊湖开发后的水量运行计算

羊湖水电站是西藏中部地区电力规划的一个骨干电站。设计引水流量为 $1.80\text{m}^3/\text{s}$, 装机 $120\,000\text{kW}$, 年发电量 2 亿度。主要供电范围是拉萨, 山南及日喀则所辖的一江两河地区(雅鲁藏布江, 拉萨河, 年楚河), 可大大促进该地区国民经济发展。羊湖开发利用以后, 湖泊由封闭型变为吞吐型, 水量逐年减少, 水位逐年下降, 湖泊水面积缩小。为了计算羊湖水质的变化, 必须先对羊湖进行水量平衡计算。水量计算采用水量平衡方程式^[2], 即流进和流出系统的水的增量等于系统中蓄水量的变化。于是, 羊湖水量平衡方程式为:

$$Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} + P - E \pm G = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1)$$

式中 ΔV 为羊湖蓄水体积的变化量; Δt 为时间间隔; Q_{in} 为地表水进湖流量; Q_{out} 为地表水出湖流量; P 为湖面降水量; E 为湖面蒸发量; G 为地下水净流量。

表 2 开发羊湖后的水量平衡计算①

Tab. 2 Calculation for water quantity balance after the exploitation of Yangzhuoyong Lake

运行时间 (a)	下降水位 (m)	累计耗 水量② (亿 m^3)	占现在 总水量 (%)	减少湖面 积 (km^2)	相应蒸发 水量 (亿 m^3)	相应直接 降水量 (亿 m^3)	相应总进 湖水量③ (亿 m^3)	相应湖水量 (亿 m^3)
0	0	0	0	0	9.55	2.74	9.54	143.00
5	0.7	3.75	2.60	12.5	9.34	2.71	9.51	139.25
10	1.4	7.51	5.25	25.0	9.14	2.69	9.49	135.49
15	2.2	13.00	9.10	39.5	8.90	2.65	9.45	130.00
20	3.1	18.44	12.90	54.0	8.66	2.62	9.42	124.56
25	4.0	23.11	16.20	64.7	8.48	2.60	9.40	119.89
30	4.9	27.78	19.40	75.4	8.29	2.57	9.37	115.22
35	5.7	32.16	22.50	82.4	8.17	2.56	9.36	110.84
40	6.6	36.53	25.50	89.4	8.04	2.54	9.34	106.47
45	7.4	40.50	28.30	96.4	7.91	2.53	9.33	102.50
50	8.3	44.47	31.10	103.4	7.79	2.51	9.31	98.53
52	8.5	45.75	32.00	105.5	7.75	2.51	9.31	97.25
55	8.9	47.67	33.30	108.7	7.71	2.50	9.30	95.33
58	9.3	49.60	34.70	111.9	7.63	2.49	9.29	93.40
60	9.6	50.88	35.60	114.0	7.59	2.49	9.29	92.12
62	9.9	52.16	36.50	116.0	7.56	2.49	9.29	90.84
63	10.0	52.80	36.90	117.2	7.54	2.48	9.28	90.20
64	10.1	53.44	37.40	118.3	7.52	2.48	9.28	89.56
65	10.2	54.08	37.80	119.4	7.50	2.48	9.28	88.92
67	10.5	55.38	37.80	121.4	7.46	2.47	9.27	87.62

① 表中多项数据均在水量变化的基础上, 根据湖底构形等因素, 计算出湖泊面积的变化, 再由湖面变化计算出相应直接降雨量等。

② 是水位下降等所得水量, 即耗湖水量。

③ 包括各年的相应直接进湖降水量和地表径流量(多年平均 6.8亿 m^3)。

表 2 是羊湖开发利用后, 水量、水位和湖泊面积等变化的情况。水电站运行 67 年后水位下降 10.5m , 耗湖水量 55.38亿 m^3 。开发羊湖后, 依据热平衡分析(用热平衡分析羊

湖的水面蒸发时,发现水位下降,湖水量减少,湖体的热惯性变小,单位面积的水面蒸发反而会有所减少),湖面蒸发随湖面积减小而减少,到 67 年后湖面积为 516.6km²,年蒸发量比现在减少 2.09 亿 m³。由于相应的直接入湖降水量也减少。故到那时,年总入湖水量(包括径流量)比蒸发量大 1.81 亿 m³,和羊湖电站设计年取水 1.80 亿 m³ 相等,水量达到新的平衡,仍可继续发电。

三、湖内水质现状及变化探讨

羊湖是高原微咸水湖泊,湖水矿化度较高,不能饮用,用于农灌也不理想。开发羊湖后,因为出湖水的矿化度远高于入湖河流和湖面降水矿化度,故对湖体来说,是逐渐稀释的过程,呈淡化的趋势。这样过若干年后,对农灌、人民生活、渔业发展等都有一定的好处。所以探讨羊湖水质变化有一定的经济价值和科学意义。

1. 水质现状

由于羊湖是封闭型湖泊,年入湖水量与蒸发量基本平衡,水位相对稳定。目前湖水矿化度为 1900mg/L 左右。1984 年 7 月,我们在羊湖布设了 21 个采样点取样分析测定,其中 8 个点有垂直资料,结果矿化度在垂直方向的分布仅存较小差异,见表 3。

表 3 羊湖不同水深矿化度测定结果

Tab. 3 The vertical distribution of mineralization in Yangzhuoyong Lake (mg/L)

采样地点	采样时间	采样点号	水 深 (m)						
			0.5	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
叶色附近	84.7.10	1	1847.17	1874.30	1875.58	1893.62	1861.98	/	/
白地	84.7.10	2	1863.16	1889.69	1892.42	1902.30	1924.85	/	/
扎马龙	84.7.10	5	1921.72	1919.57	1932.55	1918.34	1942.40	/	1939.24
知龙	84.7.17	7	1957.39	1945.86	1942.82	1953.37	1957.67	/	1973.84
阿扎附近	84.7.17	9	1972.92	1957.07	1963.06	1959.41	1961.62	1965.32	1962.99
张达	84.7.18	13	1952.96	1960.07	1961.37	1971.45	1979.14	/	1966.95
鸡骨渣	84.7.19	17	1935.64	1939.44	1920.97	1911.93	1925.62	/	/
打隆	84.7.19	20	1950.62	1952.16	1961.02	1974.09	1958.58	/	/

湖水中主要的离子和矿化度在水平方向的分布特点是: SO₄²⁻ 是湖中部略高,东西较低;矿化度和 HCO₃⁻ 从叶色到打隆均为增加趋势,但差异较小; CO₃²⁻ 从叶色到张达和打隆均呈减少趋势; Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Cl⁻ 等在湖内水平方向的变化较小,见表 4。由于羊湖矿化度在水平和垂直方向差异均不大,可认为是完全混合体系。

2. 湖内矿化物浓度变化计算

根据输入和输出的浓度,可写出矿化度的平衡模型^[3]。

$$Q_{in} \cdot C_{in} - Q_{out} \cdot C + P \cdot C_p - E \cdot 0 + G_{in} \cdot C_g - G_{out} \cdot C = \frac{d[VC]}{dt} \quad (2)$$

$\frac{d(VC)}{dt}$ 是储存质量变化率。

表 4 羊湖矿化度及主要离子水平分布测定结果 (mg/L)

Tab. 4 The level distribution of mineralization and main ions in Yangzhuoyong Lake (mg/L)

采样点 号①	采样时间	一般性质		主要阳离子			主要阴离子			
		pH 值	矿化度	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ + Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻
1	84年7月10日	9.0	1847.17	13.18	190.44	285.66	80.00	671.83	458.26	147.80
2	84.7.10	9.1	1863.16	10.90	197.10	272.32	79.36	670.25	516.96	116.25
3	84.7.10	9.1	1926.16	8.91	195.91	288.42	82.82	681.40	573.79	94.91
4	84.7.10	9.1	1918.06	8.99	203.71	273.93	87.96	676.62	571.33	95.52
5	84.7.10	9.0	1921.72	8.56	195.18	284.50	80.19	678.64	569.06	93.99
7	84.7.14	9.1	1957.39	9.04	189.70	306.36	81.11	691.67	588.22	91.22
8	84.7.14	9.0	1965.96	8.81	191.95	303.14	82.62	688.66	606.90	83.88
9	84.7.17	9.0	1972.92	8.96	191.62	303.37	82.72	692.67	617.75	75.88
10	84.7.17	8.9	1975.94	8.88	191.90	301.07	79.84	689.11	637.03	68.47
21	84.7.17	9.0	1969.64	8.73	191.76	300.61	81.11	684.10	631.01	72.32
14	84.7.18	9.0	1982.63	8.77	193.15	300.84	80.53	688.11	643.06	68.17
13	84.7.18	9.0	1952.96	9.15	192.91	296.01	79.48	686.10	608.10	81.21
11	84.7.18	9.0	1976.38	8.88	194.48	298.54	83.43	691.11	628.60	71.43
12	84.7.19	9.0	1963.74	8.88	193.55	295.32	79.95	685.10	630.40	70.54
20	84.7.19	8.9	1950.62	8.65	193.45	296.01	84.80	676.61	608.67	82.43

① 采样点编号按由西往东南顺序排列。

因为蒸发只与水量有关,故式(2)可修改为:

$$Q_{in} \cdot C_{in} - Q_{out} \cdot C + P \cdot C_p + G_{in} \cdot C_g - G_{out} \cdot C = \frac{d(VC)}{dt}$$

 $Q_{in} \cdot C_{in} - Q_{out} \cdot C + P \cdot C_p + G_{in} \cdot C_g - G_{out} \cdot C$ 是移流输入及输出率。

式中 C 是系统及其出流中物质浓度 (mg/m^3); C_{in} 是入流的物质浓度 (mg/m^3); C_p 是降水中的物质浓度 (mg/m^3); C_g 是地下水中的矿化度浓度 (mg/m^3); V 是水体体积 (m^3); G_{in} 是流入地下水量; G_{out} 是流出地下水量。

$$\text{储存质量变化率} \quad \frac{d(VC)}{dt} = V \frac{dc}{dt} + C \frac{dV}{dt}$$

从羊湖的情况看: $C \frac{dV}{dt} \ll V \frac{dc}{dt}$, 因此:

$$\frac{d(VC)}{dt} = V \frac{dc}{dt}$$

当地下水为流入时,式(2)可表示为:

$$\frac{C_{in}Q_{in} + C_p \cdot P + G_{in}C_g}{V} + \frac{Q_{out}}{V}C = \frac{dc}{dt} \quad (3)$$

当地下水为流出时,式(2)可表示为:

$$\underbrace{\frac{C_{in} \cdot Q_{in} + C_P \cdot P}{V}}_I - \underbrace{\frac{Q_{out} + G}{V}}_{1/Q} C = \frac{dC}{dt} \quad (4)$$

式中, I 是荷载函数 ($\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{年}$); Q 是水力停留时间 (a)。比率 $1/Q$ (即 $\frac{Q_{out}}{V}$ 或 $\frac{Q_{out} + G}{V}$) 是各种连续系统的一个重要的特征值, 其量纲为时间的倒数, 称为系统的稀释率, 它表示单位时间内系统体积变化。比率的倒数称为停留时间, 它说明系统中流体理论上的保持时间。

$$\text{式(3)及式(4)可改写为: } I - \frac{C}{Q} = \frac{dC}{dt} \quad (5)$$

式(5)是一阶微分方程。

稳态情况下, $\frac{dC}{dt} = 0$, $C = C_E$, C_E 是平衡浓度, 是稳态条件下物质的浓度。

$$C_E = IQ$$

对开发的羊湖, 计算矿化度变化, 由式(5)求解。

$$IQ - C = Q \cdot \frac{dC}{dt}$$

$$\text{上式整理后, } \frac{dC}{IQ - C} = \frac{dt}{Q}$$

$$\text{积分得: } -\ln(IQ - C) = \frac{1}{Q} t + \text{Const}$$

$$\text{起始条件为: } t = 0 \text{ 时, } C = C_0$$

$$\text{则 } \text{Const} = -\ln(IQ - C_0)$$

$$\text{因此: } \ln \frac{C - C_E}{C_0 - C_E} = -\frac{t}{Q}$$

$$\text{或, } \frac{C - C_E}{C_0 - C_E} = e^{-\frac{t}{Q}} \quad (6)$$

式中, C_0 是矿化度的起始浓度, 本文取 1900 mg/L 。当时间 t 趋于无穷大时, 浓度 C 趋于 IQ , 即:

$$C = IQ \equiv C_E$$

用式(6)计算羊湖开发后的矿化度变化, 必须确定荷载函数 I 和水力停留时间 Q 。

$$I = I_1 + I_2 \quad (7)$$

式(7)中 I_1 和 I_2 分别为径流和降雨荷载函数。 I 值与入湖水体矿化度浓度, 径流量、降雨量和湖水体积有关。表 5 是各支流和降水中矿化度测定结果。计算 I_1 和 I_2 时取河流和降水中矿化度的平均浓度及各运行期间降雨量、湖泊水体体积(见表 2)及径流量(多年平均值为 6.8 亿 m^3)计算。水力停留时间 Q 的确定以羊湖设计年取水量 1.8 亿 m^3 和各运行期间水体体积计算, 即: $Q = \frac{V}{Q_{out}}$ 。当参数 I 和 Q 确定后 (I 和 Q 的计算结果见表 6), 以式(6)计算羊湖开发利用后各期间湖水矿化度浓度, 计算结果见表 6。

若不开发羊湖水能资源, 它仍是一个封闭型湖泊, 年入湖水量和年蒸发水量基本相等。河流水和降水中矿化度平均浓度分别为 221.28 和 40mg/L。年入湖矿化度约

表 5 河流水体与降水中矿化度测定结果 (mg/L)

Tab. 5 The mineralizations of river water and rain (mg/L)

河 流					降 雨	
取样时间	嘎马林河	卡洞加曲	浦宗曲	卡鲁雄曲	取样时间	降水
1983 年 6 月	255.90	157.00	212.90	175.30	1984 年 7 月	41.72
1983 年 9 月	241.37	207.48	316.90	278.66	1984 年 8 月	38.23
1984 年 9 月		163.50		203.79	1984 年 9 月	40.05
平均值	221.28				平均值	40.00

表 6 羊湖矿化度变化预测结果

Tab. 6 The prediction of the change of mineralization in Yangzhuoyong Lake

时 间 (a)	开 发 羊 湖 水 资 源					不开发羊湖矿 化度预测浓度 (mg/L)
	I (mg/m ² ·a)	Q (a)	$\frac{1}{Q}$	C_E (mg/L)	矿化度预测浓度 (mg/L)	
0	11288.81	79.44	0.01259	896.78	1900.00	1900.00
5	11584.20	77.36	0.01293	896.15	1838.80	1933.87
10	11899.77	75.26	0.01329	895.70	1779.80	1967.73
15	12390.00	72.22	0.01385	894.81	1722.97	2001.60
20	12921.48	69.20	0.01445	894.17	1667.57	2035.47
25	13418.13	66.61	0.01501	893.78	1613.66	2069.33
30	13951.57	64.01	0.01562	893.04	1561.60	2103.22
35	14499.28	61.58	0.01624	892.82	1511.37	2137.07
40	15086.88	59.15	0.01691	892.39	1463.13	2170.93
45	15667.32	56.94	0.01756	892.10	1416.87	2204.80
50	16290.47	54.74	0.01827	891.74	1372.75	2238.66
55	16833.11	52.96	0.01888	891.48	1330.45	2272.53
58	17176.66	51.89	0.01927	891.30	1306.27	2292.85
60	17415.33	51.18	0.01954	891.32	1290.58	2306.40
63	17781.60	50.11	0.01996	891.04	1267.85	2326.72
65	18037.56	49.40	0.02024	891.06	1253.11	2340.26
67	18300.62	48.68	0.02054	890.87	1238.74	2353.81
80	18300.62	48.68	0.02054	890.87	1217.95	2441.86
100	18300.62	48.68	0.02054	890.87	1107.75	2577.33
200	18300.62	48.68	0.02054	890.87	918.67	3254.66
300	18300.62	48.68	0.02054	890.87	894.43	3931.99
400	18300.62	48.68	0.02054	890.87	891.33	4609.31
500	18300.62	48.68	0.02054	890.87	890.93	5286.64
600	18300.62	48.68	0.02054	890.87	890.88	5963.97
700	18300.62	48.68	0.02054	890.87	890.87	6641.30
1000	18300.62	48.68	0.02054	890.87	890.87	

$1.61 \times 10^{14} \text{mg}$, $I = 11\,288.81 \text{mg/m}^3 \cdot a$, 羊湖矿化度年增加 6.77mg/L (I 以 60% 计算, 将继续咸化, 结果见表 6)。

四、结 语

本文对羊湖水环境问题的探讨, 重点放在水量变化和湖中矿化度的变化。矿化度浓度系指 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- 等 8 种离子的平均浓度, 未对各单个离子浓度进行计算。经研究分析为:

1. 开发利用羊湖水资源, 当引用流量为 $1.8 \text{m}^3/\text{s}$ 时, 湖中水位和蓄水量将下降, 随着水面积的减少水量蒸发也相应地减少, 经 67 年以后, 湖水出现新的平衡, 蓄水量仍有 87.6 亿 m^3 , 比现状 143 亿 m^3 减少 55.4 亿 m^3 。

2. 由于引水的同时也引走了湖中的矿物质, 改变了原来矿物质只进不出的状况, 羊湖的咸化将由现状的不断增长变为在相当长时期内的不断下降, 预计经 1000 年左右达到平衡状况, 矿化浓度由现状的 1900mg/L 变为 891mg/L 。

参 考 文 献

- [1] 范云崎, 1983. 西藏内陆湖泊补给系数的初步探讨. 海洋与湖沼 14(2): 120—124.
- [2] 余常昭, M. 马尔柯夫斯基、李玉梁, 1989. 水环境中污染物扩散输移原理与水质模型. 中国环境科学出版社, 131—141 页.
- [3] Lorenzen, W. M., 1971. predicting the Effects of nutrient Diversions on Lake Recovery in modeling the Entrophication process. Ann Arbor Science.

ON THE CHANGE OF WATER ENVIRONMENT IN YANGZHUOYONG LAKE, TIBET

Chen Xiping

(Sichuan Research and Monitoring Institute of Environmental Protection, Chengdu)

ABSTRACT

The Yangzhuoyong Lake, a big enclosed type lake in Tibet, has a water capacity of 14 300 million m^3 . The amount of water entered the lake equals basically to that evaporated and the water level is relatively stable. The mineralization of the lake water is about $1\,900 \text{mg/L}$ now. The lake water can be exploited for generating electricity by using the potential energy of water level between Yangzhuoyong Lake and Yarlungzangbu River. In this paper, the changes of the water capacity and mineralization after exploiting the lake water resource are calculated quantitatively with the balance equation of water capacity and zero-dimensional model of water quality. The result shows that the change of mineralization is not remarkable, but the lake area will decrease 121.4km^2 after 67 years. So the water entered the lake is 181 million m^3 more than the water evaporated each year. These surplus water can be used for generating electricity. The water will gradually desalinate and the mineralization will tend to equilibrium concentration after 700 years. If the lake is not exploited, the water quality will be continually saltified.