

滇池的热学状况*

袁静秀 张文华 王银珠

(中国科学院南京地理研究所)

提要 本文分析研究了浅水湖泊滇池的热学状况:(1)表层水温年、日变化,历年最高水温 30.6°C ,最低 2.2°C ,平均 16.3°C 。水温年变幅较小,历年平均 22.7°C 。表层水温日变幅平均 1.0°C 左右,随深度增加而减小;(2)水温垂直分布有正、同和逆温成层,但很不稳定。水温垂线温差和湖水垂直稳定度均夏季大于冬季;(3)在正温情况下,迎风岸的水温及其水平温度梯度均大于背风岸;(4)湖水储热量的最大值出现在8月份,最小值出现在2月份。

滇池位于昆明南郊,属金沙江水系,流域面积 2920km^2 ,历年平均水位 1886.36m (黄海基面)时,湖面积 300km^2 ,蓄水量 $12.5 \times 10^8\text{m}^3$,平均水深 4.17m ,最大水深 10.16m ¹⁾。为云贵高原上面积最大的淡水湖泊。

湖区气候温和,据昆明站1951—1982年资料,历年平均气温 14.7°C ,月平均气温最低值出现在1月份(7.7°C),最高值出现在7月份(19.8°C),极端最高气温 31.5°C (1958年5月31日),最低气温 -6.8°C (1982年12月27日)。气温年较差较小,一般在 $10.5-15.4^{\circ}\text{C}$ 之间,历年平均 12.8°C 。湖区雨量充沛,平均年雨量 995mm ,其中88%的雨量集中在5—10月的雨季。

为了探讨滇池的热学状况,我们于1980年5月、1981年11月—1983年2月在滇池进行了5, 1, 4, 7, 10月的温度场观测。每次布设30多个测点,以两、三条测船同时进行断面观测,观测时间1—2天。在大面观测的同时,还在开敞湖区A点和紧靠岸边B点进行48小时的连续观测(测点分布见图11)。除观测水温外,还观测了温、湿、风、水色、透明度、含沙量、湖流、水化学等要素。其中1、4、7、10月代表冬、春、夏、秋四个季度。此外,3, 5, 11, 12月在A点和B点同时进行了48小时的连续观测。2, 6, 8, 9月还在A点进行了瞬时观测。测试仪器主要有颠倒温度计、半导体温度计、SWM1-1型水温表、通风干湿表、手持风向风速仪、HLM1型海流计、HLJ1-1型印刷海流计等。本文分析依据主要是上述的现场观测资料以及湖区及湖周各站点的水文气象历史资料。

一、水文年变化

1. 表层水温年变化

海埂(滇池)站1957—1982年资料表明,历年月平均水温最高值出现在8月份

* 参加工作的还有殷金男、季江、徐爱珍、张晓岚、姜加虎、黄庆红等同志。张辉玉同志清绘插图,均此致谢。

收稿日期:1984年10月9日。

1) 根据昆明市测绘队1983年测量,1984年编绘的滇池水位容积、水位面积曲线。

(22.4℃), 最低值出现在 1 月份 (9.4℃)。历年最高水温 30.6℃ (1972 年 7 月 22 日), 最低为 2.2℃ (1963 年 1 月 13 日), 平均水温 16.3℃。历年最大变幅 27.3℃ (1963 年), 最小变幅 19.5℃ (1980 年), 平均变幅 22.7℃。这就远小于我国东部平原地区湖泊的水温年变幅, 例如鄱阳湖、洪泽湖、太湖的水温历年平均变幅均在 30℃ 以上, 太湖高达 35℃ 左右。这显然与滇池湖区气候温和、四季如春的气候特点有关。

表层水温年过程与气温相应 (图 1), 2—8 月为增温期, 9—1 月为降温期, 月平均最高水温出现时间滞后于气温一个月, 最低水温出现时间与气温一致。从图 1 还可看出, 在太阳辐射特别强烈的 3—5 月, 因空气的热容量较小, 增温迅速, 因而 4—5 月气温略高于水温, 其余月份都是水温高于气温, 历年平均水温较气温高 1.6℃。因此, 滇池水体对周围大气来说是一个热源。

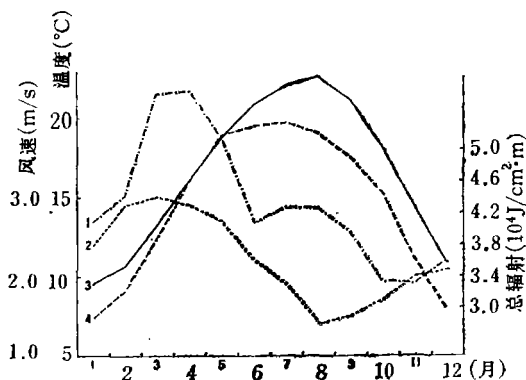


图 1 1960—1982 年海埂(滇池)站月平均水温与昆明站月平均气温、风速、总辐射年过程
1. 辐射; 2. 风速; 3. 水温; 4. 气温。

2. 表层水温与气温关系

据分析, 在滇池, 对应月份的月平均水温与气温关系较好, 在单对数纸上 1—7 月和 8—12 月近于两条直线 (图 2)。其数学形式为

$$L_n T_{*i} = a T_{\kappa i} + b^{[3]} \quad (1)$$

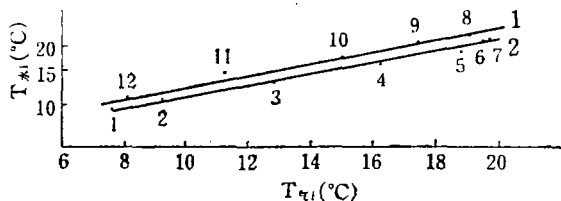


图 2 1957—1981 年海埂(滇池)站月平均水温 T_{*i} 与昆明站月平均气温 $T_{\kappa i}$ 关系
1. 8—12 月; 2. 1—7 月。

由 1957—1981 年海埂(滇池)站月平均水温、昆明站月平均气温计算结果, 1—7 月, 相关系数 $r = 0.995$, 回归系数 $a = 0.066$, 常数项 $b = 1.724$; 8—12 月, $r = 0.995$, $a = 0.067$, $b = 1.861$, 以 a, b 值代入 (1) 式分别求得表层月平均水温与月平均气温关系式为

1—7 月 $T_{wi} = 5.607e^{0.066T_{wi}}$ (2)

8—12 月 $T_{wi} = 6.430e^{0.067T_{wi}}$ (3)

3. 不同深度水温年变化

图 3 为在观音山东距岸 2km (A 点)、水深 5.5m 左右处,每月一次瞬时观测值,近似地代表月平均水温所绘出的水温等值线图。

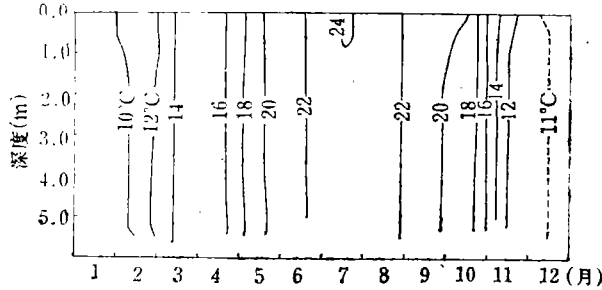


图 3 滇池 A 点水温年变化

表 1 滇池水温年变幅随深度变化

深度 (m)	0.1	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	5.5
年变幅(°C)	14.6	14.6	14.1	13.8	13.5	13.4	13.4	13.2

从图上可以看出,不同深度的水温随时间的变化,以及各个月份的水温随深度的变化。可见,滇池各月等温线几乎互相平行,说明滇池不同深度水温年变化差异不大,即水温垂直分布在年内都比较均匀。水平方向等温线出现二疏二密的现象,即 4,5 月份和 10、11 月份等温线密集;6—8 月和 12—2 月等温线稀疏。这是由于春、秋季水温增高、降低变化剧烈,而夏、冬季持续高温或低温所致。

水温年变幅随深度增加而逐渐减小。从表 1 知,水温年变幅由表层的 14.6°C 减少到底层 13.2°C。表、底层水温年变幅仅差 1.5°C 左右,说明水温垂直分布比较均匀。

二、水温日变化

1. 表层水温日变化^[1]

由于太阳辐射的日变化,表层水温具有相应的日变化,由开敞湖区 A 点不同月份的连续观测资料表明,表层最高水温大多出现在 14—18 时之间,最低水温一般出现在 4—8 时之间(图 4)。表层水温日变幅变化在 0.2—4.3°C,平均 1.0°C 左右(表 2)。

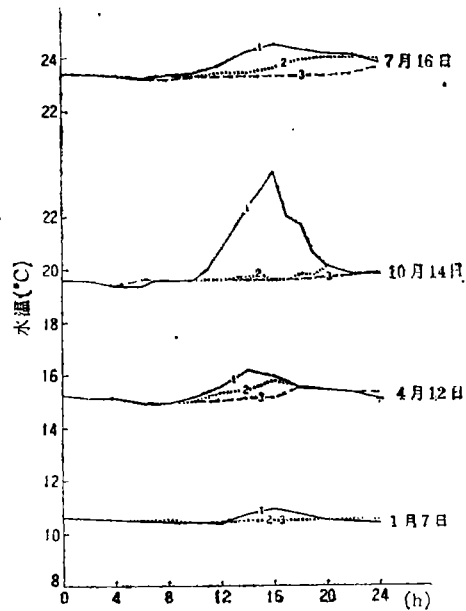


图 4 滇池 A 点 1982 年不同季节水温日变化
1. 0.1m; 2. 3m; 3. 5m。

表 2 1980—1983 年滇池开敞湖区 A 点水温日变幅 (°C)

日变幅 项目	日期	1980.	1981.11.	1981.	1982.	1982.	1982.	1982.	1982.	1982.	1983.	平均	备 注
		5.29.	17—18.	12.15.	1.7.	3.14.	4.12.	4.13.	7.16.	10.14.	1.16.		
深度 (m)	0.1	0.5	1.1	0.5	0.5	0.2	1.2	0.6	1.3	4.3	0.6	1.1	
	0.5	0.5	1.1	0.6	0.4	0.1	1.2	0.6	1.3	2.9	0.6	0.9	
	1.0	0.5	0.9	0.6	0.3	0.1	1.2	0.6	1.1	1.2	0.6	0.7	
	2.0	0.5	0.7	0.6	0.2	0.1	1.0	0.6	1.0	0.7	0.6	0.6	
	3.0	0.5	0.4	0.6	0.2	0.1	0.9	0.6	0.8	0.7	0.6	0.5	
	4.0	0.5	0.3	0.6	0.2	0.1	0.6	0.6	0.7	0.4	0.7	0.5	
	5.0	0.5	0.3	0.6	0.2	0.1	0.6	0.5	0.5	0.4	0.7	0.4	
	底	0.5	0.3	0.6	0.2	0.1	0.6	0.5		0.4	0.7	0.4	
天 气		晴—多云	晴—多云	多云	阴	阴雨	晴	晴—多云	晴—多云	晴—多云	晴		
日照时数		9.5	6.7	2.3	1.2	2.3	10.5	6.1	9.4	5.5	8.6		
日平均风速 (m/s)		5.0	4.0	4.9	3.0	4.7	3.7	3.8	3.6	2.6	4.5		湖面以上 1.5m 处
		3.4	2.3	2.1	1.9	3.1	3.2	2.8	1.9	1.0	3.0		昆明站

水温日变化与天气状况关系密切,阴雨或大风天气,水温日变幅小;晴朗风小之日,水温日变幅就大(如表 2 所示)。

在同样的天气条件下,紧靠岸边(B点)的表层水温日变幅远较开敞湖区(A点)的大,前者为后者的 7 倍左右(图 5)。这是因为在岸边浅水区,受陆地和湖床的影响较大,易于增温和冷却所致。

如果以全年各月中的定点连续观测资料逐时对应平均后的日过程,近似地代表年平均水温日变化曲线(图 6),则最高水温出现在 16 时,最低出现在 6 时。其值分别为 16.4°C 和 15.0°C,水温日变幅 1.4°C。由图 6 可见,12 时和 23 时附近的水温值接近于日平均值,表层水温低于日平均值的时间略大于高于日平均值的时间,说明白天增温强度略大于夜晚降温强度。

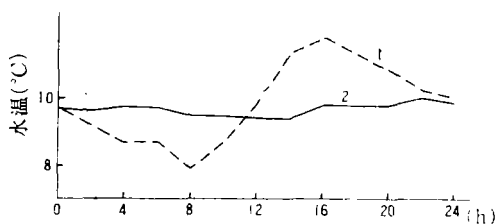


图 5 1983 年 1 月 16 日滇池表层 (0.1m 处) 水温日变化
1. B 点; 2. A 点。

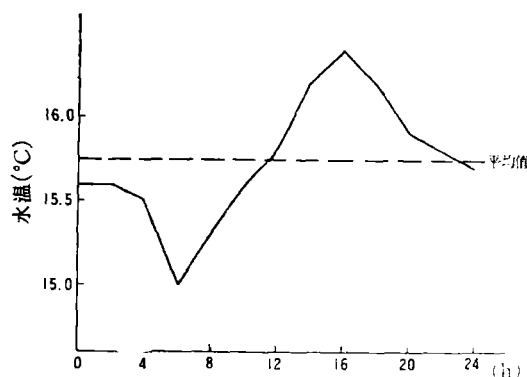


图6 滇池A点年平均表层(0.1m处)水温日变化
-----年平均表层水温的日平均值

2. 水温日变化随深度和季节的变化

图4为不同季节水温日变化,这里以4,7,10,1月分别作为季节的代表曲线。由于湖水热量收支主要是通过湖面进行的,故表层0.1m处水温日变化最大,随深度增加,水温日变化逐渐减小。最高水温出现时间随深度增加而向后位移。例如7月16日0.1m处最高水温出现在16时,3m处出现在20—22时,5m处则出现在24时。

水温日变化具有明显的季节差异,水温分层现象以夏季最为明显,分层时数长达18小时,秋、春季次之,冬季最小。这是因为观测期间的水温高于4°C,湖水密度随水温增高而减小。因此,夏季密度较小的表层暖水不易下沉,此时湖区风速较小(图1),风力混合较弱,故湖水分层最为明显。冬季则相反,湖水表层存在着逆温现象,密度较大的冷水易于下沉,同时风速较大,风力混合强烈,因而上下水温比较均匀,水温日变化随深度变化很小。秋、春季则介于冬、夏季之间。

三、水温垂直分布

从图7—8和表3—4可看出,滇池水温垂直分布有正、逆和同温层三种形式,其瞬时

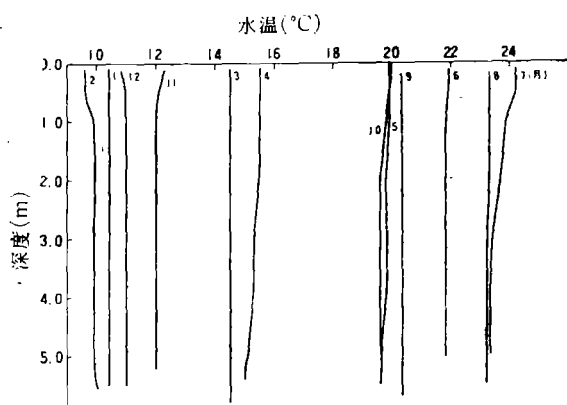


图7 滇池A点瞬时水温垂直分布曲线
1, 2, 3……为月份

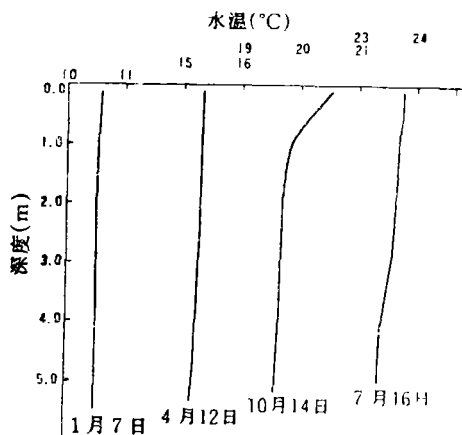


图8 滇池A点日平均水温垂直分布曲线(1982年)

的或日平均水温垂直分布都比较均匀。冬季, 仅在表层 1m 之内有微弱的逆温现象, 即使在夏季, 表、底层温差也不过 1℃ 左右。从 1980 年 5 月—1983 年 2 月间所有定点观测 (共 234 条测次) 的垂线资料中看出, 垂线温差最大的可达 4.1℃ (1982 年 10 月 14 日 16

表3 滇池开敞湖区 A 点瞬时水温垂线温差(℃)

日 期	1982.1.7.	1983.2.12.	1982.3.14.	1982.4.12.	1980.5.29.	1982.6.26.	1982.7.16.	1982.8.20.	1982.9.17.	1982.10.14.	1982.11.25.	1982.12.22.
垂线温差	0.0	-0.4	0.0	0.5	0.3	0.1	0.9	0.1	0.0	0.4	0.3	-0.2

时)。1m 厚度的水表层温度梯度 3.1℃/m, 形成短暂的紧贴表层的温跃层。但风速稍一加大, 跃层很快消失呈同温层分布。说明在浅水湖泊风力混合对水温垂直分布的影响远

表4 滇池观音山东距岸 2km 水温垂线温差日变化

垂线温差 (℃)	时	日期											
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
1982.1.7.	0		0		-0.1	0	0	0.2	0.4	0.2	0		-0.1
1983.1.16.	0	-0.1	0	-0.1	0	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0
1982.3.14.	0		-0.1		-0.1	0	-0.1	0	-0.1	0	-0.1		-0.1
1982.4.12.	0	0	0	0	0	0.1	0.5	1.0	0.8	0	0	0	-0.2
1982.4.13.	-0.2	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0	0.1	0	-0.1	0
1980.5.29.	0	0	0	0	0	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0	0	0
1982.7.16.	0	0	0	0	0.1	0.1	0.4	0.9	1.2	1.0	0.8	0.7	0.2
1982.10.14.	0	0	0	-0.2	0	0	1.2	2.7	4.1	2.1	0.4	0	0
1981.11.17—18.	0		0		-0.1	0.1	1.0	0.8	1.0	0.5	0.1		0
1982.12.15.	-0.2		-0.1		0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0	-0.1		0
合 计	-0.4	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1	0.6	3.8	6.4	8	4.1	1.1	0.6	-0.2
平 均	-0.04	-0.02	-0.02	-0.05	-0.01	0.06	0.38	0.64	0.8	0.41	0.11	0.1	-0.02

较深水湖泊大。这进一步说明浅水湖泊的水温垂直分布与天气条件关系密切。这也是浅水湖泊的热学特征之一。

另外,不同月份的 10 个昼夜定点连续观测资料表明(表 4),水温垂直分布具有明显的日变化,10—18 时以正温分布为主,夜间至清晨以同温和逆温层分布为主,且垂线最大和最小温差出现的时间与表层水温最高和最低值出现的时间相一致,分别为 16 时和 6 时左右(表 4,图 6)。这是由于白天太阳辐射作用,水表层以增温为主,而夜晚和清晨水表层以冷却为主的结果。

四、水温水平分布

在滇池,影响水温水平分布的因素主要是风生水流、距岸远近以及化学污染等。为获得真实的水温水平分布,必须在全湖各测点进行同步观测,或应用航空遥感资料取得水温水平分布,但由于条件有限,我们采用定点连续观测的水温日变化过程,作为全湖各测点的水温日变化的标准曲线,来订正湖面观测资料。其方法是以大面观测期间的开敞湖区 48 小时定点连续观测资料逐时对应平均得水温日过程,再求其平均值(图 9)。然后把对应月份不同时刻的大面观测订正到日平均值。以这样的方法分别求得 7 月和 1 月份的水温水平分布(图 10,图 11)。由此可见,夏季 7 月和冬季 1 月水温水平分布的趋势基本一致,湖的东岸、北岸高于西岸,两岸高于湖心,尤其在北部开敞湖区更为显著。这是因为在

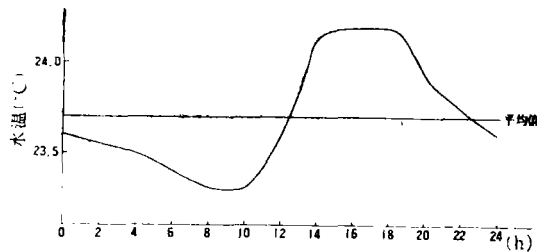


图 9 滇池 A 点逐时平均表层 (0.1m 处)
水温日变化 (1982 年 7 月 15—17 日)

观测期间正值湖区盛行西南风,7 月 15—17 日和 1 月 15—17 日湖面以上 1.5m 高处的日平均风速分别为 3.4 和 4.6m/s。其白天的水温垂直分布是正温和同温层,故风生水流将表层较暖的水吹向迎风岸,使东岸、北岸水温高于西岸。同时风生水流在北部开旷湖区形成气旋式环流。在离心力和科氏力作用下,表层暖水向四周扩散,中间冷水向上,形成低温区。此外,在近岸带易受湖底和陆地的影响,白天增温迅速,这些就是表层水温东岸高于西岸、两岸高于湖心的原因。从图 12 也可看出,表层 0—0.5m 层的水温东岸较西岸高 0.7°C;等温线形状两岸下沉,中间隆起,说明暖水层厚度两岸大于湖心;等温线密集度东岸大于西岸,湖心最疏,说明迎风的东岸水温最高、水平温度梯度最大,而湖心水温最低。

从图 10 和图 11 还可看出,滇池南部湖区水温全湖最高,这是由于昆阳磷肥厂的污水所致,在管道出口处污水的 pH 值为 3—4,而湖水的 pH 值一般在 7—8 之间,酸性污水与

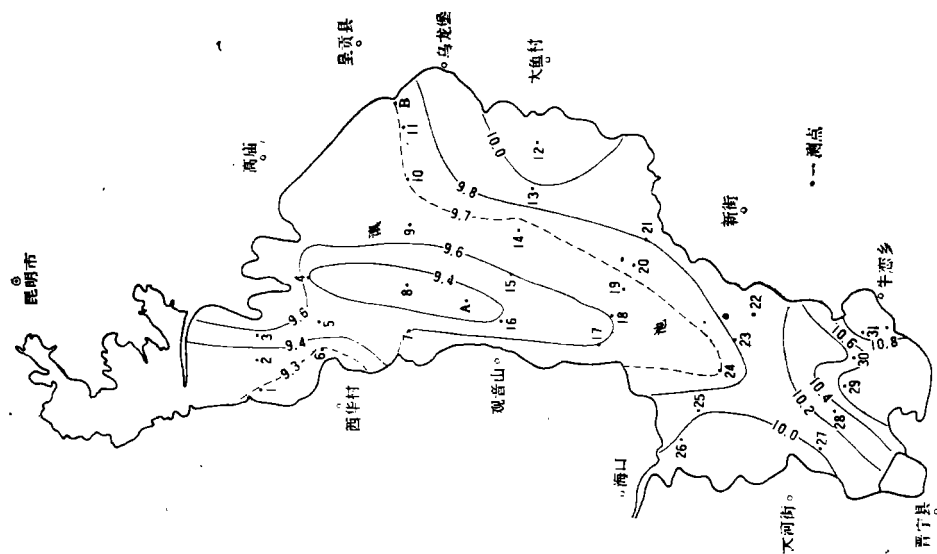


图 11 滇池 1983 年 1 月 15—16 日表层 (0.1m 处) 水温水平分布

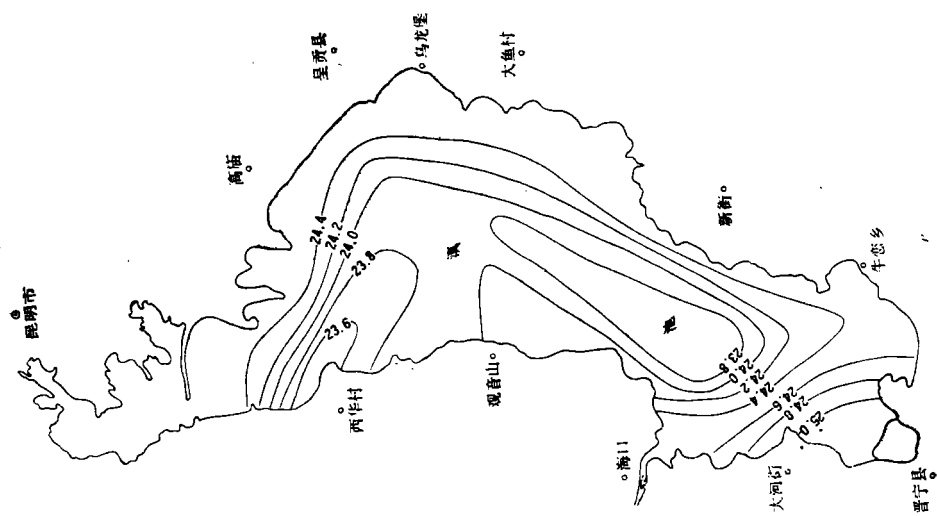


图 10 滇池 1982 年 7 月 15—16 日表层 (0.1m 处) 水温水平分布

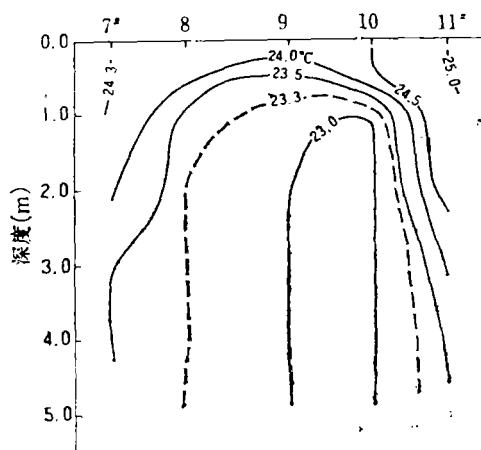


图 12 1982 年 7 月 15 日滇池 7#—11# 东西向热学断面

湖水作用产生微量的化学热能,使水温增高。以致背风岸的水温反而较迎风岸高 0.5—1.2°C。

五、湖水垂直稳定度

1. 计算方法

湖水垂直稳定度是表示湖水保持原来状态的能力。这里用湖水密度梯度来表示^[3]即

$$E = \frac{d\rho}{dz} \quad (4)$$

$$\bar{E} = \frac{1}{H} \int_{H_0}^{H_D} E(z) dz \quad (5)$$

式中 E ——各水层湖水垂直稳定度; ρ ——湖水密度; $\bar{E}$ ——整层水体湖水垂直稳定度; H_0 ——湖面高程即水位; H_D ——湖面积为 0 时的湖底高程; H —— $H_0 - H_D$ 即在 H_0 水位下的最大水深。当 $E > 0$ 时,表示水层密度随深度增加,湖水处于稳定状态;当 $E < 0$ 时,湖水密度随深度减小,湖水处于不稳定状态, $E = 0$ 时,各层密度均匀,湖水处于中性平衡状态。在这里,因为水的压缩系数极小,水深又很小,因而忽略了由于水深加大所产生的压力对密度的影响,仅考虑温度对密度的影响。据实测水温垂直分布曲线 $T(z)$, 即可求得相应的密度垂直分布曲线 $\rho(z)$, 据式 (5) 从湖面向湖底积分,即可求得湖水垂直稳定度 $\bar{E}$ 。

2. 湖水垂直稳定度 $\bar{E}$ 年变化

如表 5 所示, $\bar{E}$ 的最高值出现在夏季 7 月份,最低值出现在冬季的 2 月和 12 月份,

表 5 滇池稳定度 $\bar{E}$ 年变化 (10^{-4}g/cm^4)

月 份	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
$\bar{E}$	0	12.41	10.52	4.11	39.29	4.13	0	13.67	5.81	-3.33	0	-5.30
平 均	7.64			15.84			6.49			-2.88		

为负值。1, 3, 9 月份等于零, 10 月和 4 月分别出现两个小高峰。由于水温垂直分布曲线是每月一次的瞬时观测值, 其偶然性较大。如果以每三个月平均代表一个季度, 则季节变化明显, 夏季最大 (15.84), 春季次之 (7.64), 再次秋季 (6.49), 冬季最小 (-2.88)。

六、湖水储热量

1. 计算方法

湖水储热量是指湖泊水体中所含的总热量。在 t 时刻的湖水储热量可用下式表示^[2]

$$Q_t = C \int_{H_0}^{H_D} T(z, t) \rho(z, t) A(z) dz \quad (6)$$

式中 Q_t —— t 时刻湖水储热量; C ——湖水热容量, 对于淡水湖泊可近于 1; H_0 ——湖面高程即水位; H_D ——湖面积为零时的湖底高程; $T(z, t)$ ——在 t 时刻的水温垂直分布曲线; $\rho(z, t)$ ——对应于 $T(z, t)$ 的湖水密度分布; $A(z)$ ——湖泊水位面积曲线。据滇池水位面积曲线 $A(z)$ 、1982 年中滩站月平均水位和每月一次水温垂直分布曲线 $T(z, t)$, 从湖面向湖底积分, 即可算得各水层和全湖的储热量。

2. 湖水储热量年变化

各水层湖水储热量年变化(图 13), 从湖面到 2.4m 各层内, 湖水储热量的最高值都出现在 7 月份; 2.4—4.0m 各层出现在 8 月份; 4.0—4.8m 层出现在 10 月份; 4.8—5.6m 层则出现在 3 月份。这说明湖水储热量的最高值出现时间随深度增加而向后位移。最低值大多出现在水温最低的 2 月份, 只有最下层出现在 6 月份。由图 13 还可看出, 各水层储热量的年变化, 湖表层最大, 随深度增加不断减小。

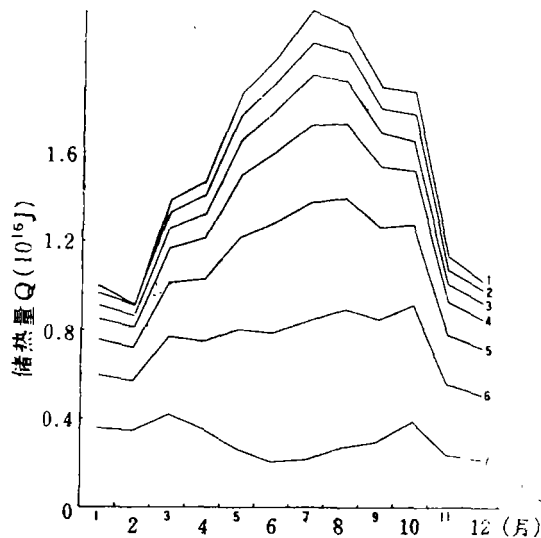


图 13 滇池各水层储热量年变化

1. 0—0.8m; 2. 0.8—1.6m; 3. 1.6—2.4m; 4. 2.4—3.2m;
5. 3.2—4.0m; 6. 4.0—4.8m; 7. 4.8—5.6m。

全湖储热量年变化(图 14), 基本上与全湖平均水温年变化相应, 即水温高, 储热量大, 水温低, 储热量小。只有在 8 月, 10 月份水温虽在下降, 而储热量却有所增加。这是因

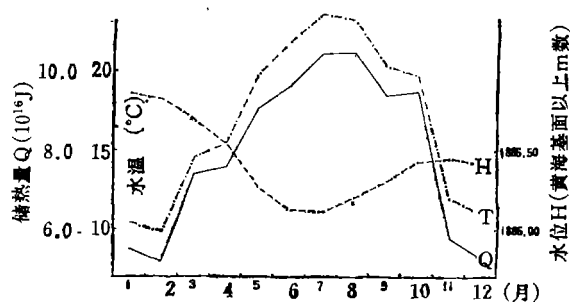


图 14 1982 年滇池全湖储热量 (Q)、平均水温 (T) 以及月平均水位 (H) 年过程

为储热量不仅是水温的函数,而且也是容积即水位的函数(式 6)。8 月,10 月水位上升容积增大的速率超过水温下降的速率,因而这两个月的储热量与水温变化不相一致。

全湖储热量最大值出现在 8 月份 (10.92×10^{16} J), 最小值出现在 2 月份 (5.42×10^{16} J), 年变幅 5.50×10^{16} J, 年平均储热量 8.28×10^{16} J。

参 考 文 献

- [1] 孙湘平、李茂和、肖琢静等, 1979 年。海洋水文气象。商务印书馆。37—46 页。
- [2] 施成熙、梁瑞驹, 1964 年。陆地水文学原理。中国工业出版社。179—186 页。
- [3] B. Д. 扎依科夫, 1955 年。湖泊学概论(秦忠夏译, 1963 年)。商务印书馆。145—148 页, 206—247 页。

THERMAL REGIME OF DIANCHI LAKE

Yuan Jingxiu, Zhang Wenhua and Wang Yinzhu

(*Nanjing Institute of Geography, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Dianchi is a shallow water lake. Its catchment area is 2,920 km², and lake area is 300 km². Its mean and maximum depths are 4.17 m and 10.16 m, respectively.

This paper is based on the observed data (from the lake from May, 1980, November, 1981, and February, 1983) and older hydrometeorological data around the lake.

Some of the results are as follows:

1. The annual and daily variation of water surface temperature

The annual water surface temperature amplitude is rather small. The yearly maximum (in July, 1972), minimum (in January, 1963), and average surface temperatures are 30.6°C, 2.2°C, 16.3°C, respectively. The annual and daily temperature amplitudes average 22.7°C and about 1.0°C, respectively.

2. The diurnal variation of water temperature

The diurnal maximum and minimum surface layer temperatures occur commonly at 14—18 h and 4—8 h, respectively. The daily amplitude of water temperature averages 1°C and decreases with depth.

3. The vertical distribution of water temperature

The vertical distribution of water temperature in Dianchi Lake is very unstable, and may be normal, inverse, or isothermal.

The vertical temperature differences are small. The vertical stability of lake water is maximum in summer and minimum in winter. The vertical temperature gradient in summer is higher than in winter.

4. The drift current push the warmer surface layer water to the windward side of the bank.

5. Heat stored in the lake is maximum (10.92×10^{16} J) in August, and minimum (5.42×10^{16} J) in February.