

57. 12087

57

57. 12087

57. 12087

中国科学院

南京地理研究所集刊

MEMOIRS OF NANJING INSTITUTE
OF GEOGRAPHY, ACADEMIA SINICA

第 2 号

科学出版社

中国科学院 南京地理研究所集刊

MEMOIRS OF NANJING INSTITUTE
OF GEOGRAPHY, ACADEMIA SINICA

第 2 号

 出版社

1 9 8 4

内 容 简 介

本集共纳入论文13篇，内容包括湖泊学、自然地理学和经济地理学三个方面。分别对湖面蒸发影响因素及蒸发量折算、云南断陷湖盆扇三角洲沉积分析；江苏海涂资源的研究评价；太湖地区和苏北地区的经济开发，以及江陵、泰州城市地理问题等作了论述。

可供地学研究与教学工作者，及有关农业、水利、石油勘探等生产部门人员参考。

中国科学院南京地理研究所集刊

第 2 号

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

无锡日报印刷厂印刷

无锡岸桥弄10号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984年12月第 一 版 开本：787×1092 1/16

1984年12月第一次印刷 印张：9½ 插页：2

印数：0001—2500 字数：203,000

统一书号：13031·2564

本社书号：3525·13—13

定价：2.35元

科技新书目：91—33

目 录

影响水面蒸发诸因素的分析与蒸发量的折算·····	濮培民 (1)
洱海西岸扇三角洲沉积·····	冯峻等 (14)
昆明滇池表层沉积物中的介形类·····	黄宝仁等 (26)
云南洱海、茈碧湖淡水瓣鳃类·····	黄宝玉 张 立 (36)
江苏省海岸带地域分异规律及土地类型特征·····	朱季文等 (47)
江苏沿海滩涂围海造田条件评价方法的探讨·····	梁海棠等 (65)
太湖地区的农业发展与区域整治问题·····	余之祥 (74)
充分发挥水土资源优势加快苏北经济发展的步伐·····	屠清瑛等 (85)
略论泰州城市发展战略与城市性质·····	丁景熹 (92)
江陵县城实例调查·····	沈道齐 (97)
试论湖泊地图集的内容选题和编制特点·····	苏守德 周维功 (116)
增压溶样法在湖泊沉积物全量分析中的应用·····	余源盛等 (124)
入太湖污水中 NH_4^+-N 稀释自净规律的实验·····	舒金华 (130)

CONTENTS

An Analysis of Factors Influencing on Water Surface Evaporation and Reduction of Evaporation.....	Pu Peimin (13)
The Deposits of Fan Delta in the West Shore of Erhai Lake	Feng Min et al. (25)
Ostracodes from Surface Sediments of Dianchi Lake Outskirts of Kunming Yunnan Province.....	Huang Baoren et al. (34)
Freshwater Lamellibranches from Erhai and Cibihi Lakes of Yunnan Province China.....	Huang Baoyu et al. (46)
The Territorial Differentiation and Land Types of The Coastal Zone in Jiangsu Province.....	Zhu Jiwen et al. (64)
The Method of Evaluation for Tideland-enclosing Condition, A Case Study in the Coast of Jiangsu Province.....	Liang Haitang et al. (73)
A Discussion on the Development of Agricultural and Its Regional Management in the Taihu Lake Area.....	She Zhixiang (84)
Measures Aiming at Giving Fuller Play to the Superiority of Water-Soil Resources and Hastening the Economic Development in Northern Jiangsu.....	Tu Qingying et al. (91)
On the Strategy of Urban Growth and Urban Character of Taizhou City	Ding Jingxi (96)
A Case Study of Jiangling County Town, Hubei, China.....	Shen Daoqi (114)
Selection of Map Subjects and Compiling Features on Lake Atlas	Su Shoude et al. (123)
Determination of Total Elements in Lacustrine Sediments by Pressure Decomposition with Hydrofluoric Acid——Determination of Aluminium, Potassium, Sodium and Magnesium in Solution of Fluorosilicic Acid	Yu Yuansheng et al. (129)
An Experiment on the Dilution and Self-Purification of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in the Wastewater Draining into Taihu Lake.....	Shu Jinhua (144)

影响水面蒸发诸因素的分析 与蒸发量的折算*

濮培民

本文从热力、动力和水平非均匀性三个方面分析了影响水面蒸发的因素,并由此讨论了器测蒸发量误差的成因和蒸发器结构、大小、水深,安装方式等对其蒸发量的影响。讨论了各种蒸发器的折算问题。指出岸边大型蒸发池的局限性。对漂浮蒸发量作动力因素订正可很好地逼近实际湖面蒸发量。给出了计算这个订正系数的公式并确定了其中的参数。 E_{801} 的动力折算系数为0.89。

水面蒸发量在湖泊、水库的水量平衡和热量平衡中都是很重要的一项。水体的水面蒸发造成的水量损失,对于灌溉、水电、生活和工业用水有很大影响。在水资源管理,特别在干旱、半干旱和高山地区水资源的开发利用中,正确估算水面蒸发量是极为重要的。然而自然水体水面蒸发量的测量和计算方法至今尚未很好解决。

用蒸发器测定水面蒸发已有近300年历史,蒸发器的形状(常用的有圆形和方形),结构(铁质涂白漆,白铁,铜质,钢筋混凝土,塑料,导热和绝热壁等),大小(有 $\phi 20$, $\phi 80$, $\phi 180$ 厘米,0.3, 1, 3, 10, 20, 100米²等),水深(从几厘米到2米)和安装方式(陆上置于地上或埋入地下,水面置于漂浮筏上或悬浮于水面等)有很大差异,但基本性能无重大改进。近20年来,发展了脉动相关法测定蒸发量的技术。把惯性小、灵敏度高的风速分量(u , v , w),温度(T)和比湿(q)或水汽压(e)传感器与计算机技术结合起来,观测这些量的瞬时、平均、脉动及脉动相关值。从而得到水面蒸发量 $E = \rho \overline{w'q'}$, 动量通量 $Q_u = \rho \overline{w'u'}$, $Q_v = \rho \overline{w'v'}$ 和感热通量 $Q_T = \rho c_p \overline{w'T'}$ (其中 ρ 为空气密度)。由于这个方法要求的技术条件很高,仅在某些科研单位使用。目前广大水文气象台站上使用的仍然是各种形式的蒸发器。因此,如何根据这些蒸发器的资料折算出湖泊(水库)水面的实际蒸发量是人们着重研究的课题。

有些作者建议把各地20米²蒸发池的资料看作该地区的实际湖面蒸发量。实际上,对于干旱、半干旱和高山地区的湖泊,特别是深水湖泊来说,岸边大型蒸发池的水文气象条件与实际水体的条件相差甚大,其年平均蒸发量,特别是月蒸发量的差异常常是相当可观的。例如官厅水库(面积100平方公里,最大水深23米)四、五月分库水温度比蒸发池温度低3—4℃。苏联大型高山湖泊谢凡(Севан)湖(面积1420平方公里,最大水深100米)湖面

* 本文采用了全国水面散热系数公式协作组的若干资料,是该协作组的研究成果之一。

蒸发量与岸边蒸发池蒸发量的年内月分配差异可大于±50%^[6]。对于水深为2米左右,与蒸发池水深接近的大湖泊,由于风浪的混合搅拌作用常使湖水混浊,因此湖泊反射率常明显地大于蒸发池反射率。这必然会导致两者蒸发量的差异。在研究工业余热水的蒸发散热时,由于自然水体中有附加的热量输入,其蒸发特点与水文站网蒸发池的蒸发特点更是显然不同的。

本文从分析影响水面蒸发量的诸因素着手,讨论蒸发器结构对其蒸发量的影响及造成各种蒸发器折算系数差异的原因。在此基础上,建议对器内外水温接近的漂浮蒸发器进行动力因素订正并由此确定实际湖面蒸发量。

一、器测蒸发误差的成因分析

引起蒸发器蒸发量与实际湖面蒸发量差异的主要因素有三个:第一是提供蒸发耗热量来源的热量因素;第二是蒸发器边缘增加气流扰动的动力因素;第三是水-陆条件的差异,即水平非均匀性差异,包括下垫面粗糙度、热容量、导热系数和空气温、湿条件等。

水面蒸发是一个相当复杂的过程。它本身是发生在紧挨水面的水-气界面上的一种微观现象,但又强烈地受到大气中的宏观湍流运动的影响;它既是水分子质量的转移,又涉及潜热转换;它既受垂直扩散影响,又受水平平流和扩散的影响。

当水分子向上运动的速度超过逃逸速度时就可逸出水面。由于分子运动的平均动能与其绝对温度成正比,而单位质量内瞬时动能超过逃逸动能的分子数随绝对温度增加而增加。因此,蒸发首先与分子尺度薄层表面水的温度有关。同样,紧挨水面空气中的水汽分子也会以一定频率与水面碰撞而返回水体。在密闭容器内,当空气中的水汽分压达到水面温度所对应的饱和水汽压时,水分子出入水面的频率相等,水面蒸发过程停止。假若水面上不断迅速地把水汽抽走,那么单位时间单位面积上蒸发掉的容积水量(可称为极限蒸发率)^[7]

$$E' = \eta \sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu}} e^{-\frac{\rho\mu}{RT}} \quad (1.1)$$

其中, η 为考虑水汽分子接触水面时的凝结概率的修正系数; T 为绝对温度; R 为通用气体常数; μ 为水汽的克分子量; $\rho\mu$ 为克分子水的汽化潜热。 η 尚未精确测定,在第一近似中取为1。这时相应的水汽分子的方均根速度为

$$V_s = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \quad (1.2)$$

温度为0—40℃时, V_s 变化于615—658厘米/秒, $E' \approx 10-173$ 厘米/日。

由此可知, E' 远大于实际蒸发率。即水面附近不断进行的上下交换水汽通量远大于实际蒸发率。实际蒸发率主要是受二个因素制约的:一个是水汽被周围空气携走的速率(称为动力因素),一个是可能供给蒸发耗热的能量来源(称为热力因素)。在动力因素中,对于无限大的水面主要是垂直湍流扩散,对于有限水体,特别是蒸发器(池),水平非均匀性对水面蒸发也有很大影响。下面分别讨论热力、动力和水平非均匀性对水面蒸发的影响和蒸发量的折算问题。

二、热 力 影 响

热量收支差异是影响蒸发器折算系数的重要原因。下面分别讨论蒸发池的热量平衡、辐射平衡和边壁热传导对蒸发的影响。

1. 蒸发池的热量平衡方程

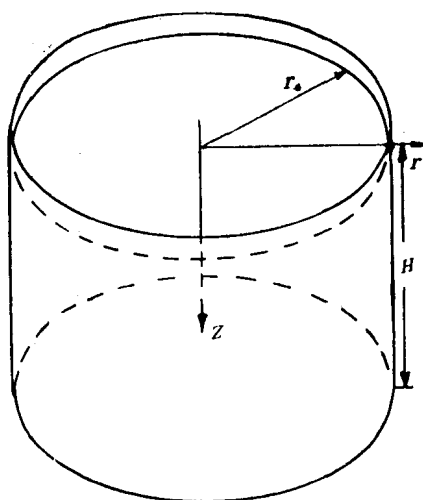


图1 蒸发池示意图

根据热量守恒原则，某一半径为 r_0 ，水深为 H 的蒸发池的热量平衡方程为

$$\left[H\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - Re + (LE + P) \right]_{Z=0} - \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{Z=H} \Big] \pi r_0^2 = 2\pi r_0 H \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0} \quad (2.1)$$

$$R_0 = S(1 - A) - \varepsilon(\sigma T_0^4 - E_*) \quad (2.2)$$

式中 S 、 E_* 为到达水面的太阳短波辐射和大气长波逆辐射； A 为蒸发池的反射率； ε 为水面长波发射率（等于吸收率）； σ 为斯蒂芬-波耳茨曼常数； T 、 T_0 、 ρ 、 C 分别为平均水温、表面水温、水的密度和热容量； L 为水汽蒸发潜热， E 、 P 为蒸发和感热通量； λ 为器壁的导热系数； t 为时间； z 为由水面向下为正的铅直坐标； r 为以蒸发池水面中心为圆心的极坐标距离（图1）。式（2.1）左边第一、二项为蒸发池的储热量变率和辐射平衡，左边第四项和右边分别为池底和池边与土壤的热交换量；式（2.2）右边第一、二项分别为蒸发池吸收的太阳辐射和有效辐射通量。

引入鲍恩比

$$P/LE \equiv B = b \frac{\Delta T}{\Delta e}, \quad b = \frac{C_p}{L} \frac{p}{0.623} \quad (2.3)$$

其中 b 为鲍恩比系数； p 为大气压； C_p 为空气的定压比热； ΔT 、 Δe 为水-气温差和水汽压差。

式（2.1）中的 $\frac{\partial T}{\partial r}$ 、 $\frac{\partial T}{\partial z}$ 为器壁上的温度梯度，它与器壁内外温差成正比，与壁厚成反

比, 可表示为

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \frac{T_{\pm} - T_{\text{水}}}{d} \Big|_{r=r_0}, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial Z} \right|_{Z=H} = \frac{T_{\pm} - T_{\text{水}}}{d} \Big|_{Z=H} \quad (2.4)$$

若对 (2.1) 式取 τ 时段内的平均, 则储热量变化项变为 τ 时段内的平均温度变化

$$\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{\partial T}{\partial t} dt = \frac{T_{\tau} - T_0}{\tau} \quad (2.5)$$

其余各项均可以该量在 τ 时段内的平均值代替。

考虑式 (2.2) — (2.5) 后式 (2.1) 改写为

$$H\rho C \frac{T_{\tau} - T_0}{\tau} - S(1-A) + \varepsilon(\sigma T_0^4 - E_a) + LE(1+B) \Big|_{Z=0} - \frac{\lambda}{d}(T_{\pm} - T_{\text{水}}) \Big|_{Z=H} = \frac{2H\lambda}{r_0 d}(T_{\pm} - T_{\text{水}}) \Big|_{r=r_0} \quad (2.6)$$

由式 (2.5) 可知, 对于年平均来说, 此项接近于零; 对于月平均来说, 需考虑月末、月初水温之差 $T_{\tau} - T_0$ 。用实际月末、月初的平均温度容易受观测误差等因素的干扰, 为此, 建议由月平均温度过程线上的月末、月初温度之差来代表。

根据相邻三月份 (分别以 $i-1, i, i+1$ 表示) 的月平均温度 $\bar{T}_{i-1}, \bar{T}_i, \bar{T}_{i+1}$ 可得到温度变化的二次拟合曲线 (图 2):

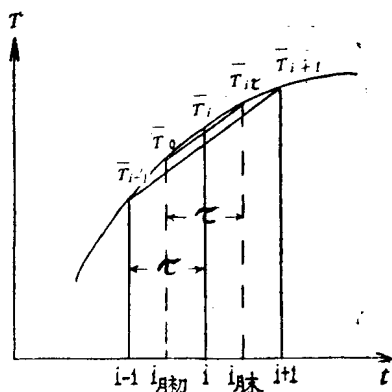


图 2 确定月末、月初温度方法示意图

$$T(t) = \bar{T}_{i-1} \frac{(t-\tau)(t-2\tau)}{\tau(2\tau)} + \bar{T}_i \frac{t(t-2\tau)}{\tau(-\tau)} + \bar{T}_{i+1} \frac{t(t-\tau)}{2\tau \cdot \tau} = \frac{1}{2\tau^2} \left[\bar{T}_{i-1}(t-\tau)(t-2\tau) - \bar{T}_i 2t(t-2\tau) + \bar{T}_{i+1} t(t-\tau) \right] \quad (2.7)$$

其中 τ 为月时段。由此可求得 i 月的月末、月初温度之差为

$$T_{i+\frac{1}{2}} - T_{i-\frac{1}{2}} \equiv T_{i\tau} - T_{i_0} = \frac{1}{2} \left[\bar{T}_{i+1} - \bar{T}_{i-1} \right] \quad (2.8)$$

略去月份代号 i 和平均值号后式 (2.6) 可改写为:

$$\frac{H\rho C}{2\tau}(T_{+1} - T_{-1}) - S(1-A) + \varepsilon(\sigma T_0^4 - E_a) + LE(1+B) \Big|_{Z=0} -$$

$$\frac{\lambda}{d}(T_{\pm} - T_{\text{水}}) \Big|_{Z=H} = \frac{2H\lambda}{r_0 d}(T_{\pm} - T_{\text{水}}) \Big|_{r=r_0} \quad (2.9)$$

2. 辐射吸收与水深影响

即使蒸发器的结构和水质都相同，由于水深和器壁反射率不同，测器总反射率会有差异，这可导致蒸发器能量收支和蒸发量的差异。

讨论一种最简模式。太阳辐射在水中的衰减可用指数函数逼近

$$S_z = S_0 e^{-z/z_0} \quad (2.10)$$

其中 S_z 为 Z 深处的光照强度； S_0 为紧挨水面下的光照强度； Z_0 为透过系数（其倒数为衰减系数），与入射光的波长、水色、悬移质特性和含量等参数有关。在粗略估算中可取积分透过系数。

入射光 S_i 中有小部分被水面（其反射系数 a_s 与入射角和光谱组成有关）反射回大气 S_r （图3），大部分透射入水中 S_{i0} 。 S_{i0} 中有一小部分被向后散射返回水面 S_{r1} （对于较清的水，向上、向下辐射之比与深度关系不大，其数量级为 $S_{r1}/S_{i0} = a_{sc} \approx 0.01 - 0.02$ ）^[4]，其中大部分透射出水面 S_{e1} ，少量又反射回水中 S_{i1} 。向下的光辐射在水中被吸收和散射，逐渐衰减，到达蒸发器底部后又被部分吸收和反射向上 S_{rb} 。 S_{rb} 在水中衰减后到达水面，其中又大部分透射出水面 S_{e2} ，小部分反射回水体 S_{i2} 。如此往返，加上器壁的反射，光线在蒸发器内可经历多次反射。总的效果是水深愈大，蒸发器的反射率愈小，吸收的太阳辐射愈多。在同样情况下会增加蒸发量。

考虑到蒸发器内的水质较清，水中向上的光辐射主要由测器底部的反射（其反射率为 a_b ）引起，则可得到蒸发器吸收的太阳辐射能为

$$S_{ab} = S_i \frac{(1 - a_s)(1 - a_b e^{-2H/Z_0})}{1 - a_s a_b e^{-2H/Z_0}} \quad (2.11)$$

其中分母为考虑水面多次反射后的项，由于通常 $a_s a_b < 0.02$ ，故（2.11）式的分母可近似取为1。

设二个测器的代号为下标1、2；其水深为 H_1 、 H_2 ，则二者吸收的太阳辐射能之比为

$$\beta = \frac{S_{ab1}}{S_{ab2}} = \frac{1 - a_{b1} e^{-2H_1/Z_0}}{1 - a_{b2} e^{-2H_2/Z_0}} \quad (2.12)$$

由表1可知，对于气象台站用的 $\phi 20$ 厘米蒸发器，水深为1或2厘米时二者吸收的太阳辐射能的差别为6—7%。对于水深为几十厘米的测器，则水深变化15厘米可引起10%的差异。当水深为2米左右时则水深的变化实际上已不影响太阳辐射能的吸收。

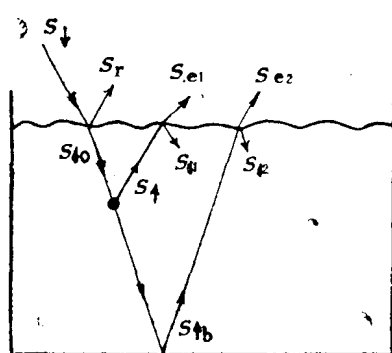


图3 光辐射在蒸发池中的变化过程示意图

表1 蒸发器水深和边壁反射率对吸收太阳辐射能的影响

H_1 (厘米)	2	2	35	35	200	250
H_2 (厘米)	1	1	20	20	150	200
Z_0 (厘米)*	9.49	4.48	44.8	72.1	125.2	152.2
a_0	0.30	0.25	0.40	0.40	0.40	0.40
β (%)	6	7	10	10	2.1	0.9

* 由于水对辐射的选择性吸收, 光辐射中易被吸收的波能在整个透射光中所占的比例随水深增加而迅速减少, 故透过系数 Z_0 随水深增加而迅速增加。

根据广州蒸发站 1960—1969 年对比观测资料^[1], 水深 20 厘米比水深 35 厘米测器的年蒸发量偏小 6.7—12.9%, 多年平均偏小 10.3%。据该站 1960—1965 年对 20 厘米口径蒸发皿 2

厘米和 1 厘米二种水深对比观测资料, 前者年蒸发量约比后者平均偏大 7%。铜质蒸发皿呈黄色, 与铁质涂白漆蒸发皿相比, 反射率要小, 相应的蒸发量要大。据广州站资料, 铜皿年蒸发量比铁皿偏大 8%。

据重庆蒸发实验站资料^[1], 各类蒸发器蒸发量也随水深增加而增加 (图 4)。由于边壁热传导的影响, 水深大的蒸发器在冬季可得到土壤附加的热量输入而使蒸发量更比同一口径浅水蒸发器的大; 夏季则因深层土壤温度低, 土壤从蒸发器下部吸收热量而使深水蒸发器的蒸发量减少, 加之水层深浅热容量有差异, 使月蒸发量对比出现较复杂的特点。

20 厘米口径蒸发皿的水深仅 1—2 厘米, 蒸发使水深减小本身可对日蒸发量产生影响。例如, 早晨加水与傍晚加水相比, 白天的水深偏大可使蒸发量偏大。蒸发量较大的干旱、高山地区, 由于蒸发本身将使水深减小, 故其蒸发量实际上较维持等水深的蒸发皿为小。

据实测资料, 大型蒸发池的水面反射率为 0.08—0.10, 太湖为 0.09—0.15, 洱海为 0.07—0.09, 抚仙湖为 0.06—0.08。因此, 由于辐射平衡的差异, 岸边大型蒸发池的蒸发量与实际湖面蒸发量仍会有较大差异。

如果选用合适的涂料颜色, 设法使漂浮蒸发器和岸边大型蒸发池的反射率接近于自然水体的反射率, 那么他们的热量平衡就比较接近, 从而减少湖-池 (器) 蒸发量的差异。

3. 边壁热传导与测器大小的影响

边壁热传导在讨论蒸发量的月分配时是必需考虑的。对于浅水湖泊需要考虑湖底热传

1) 长江流域规划办公室重庆蒸发实验站, 蒸发实验报告, 1958 年。

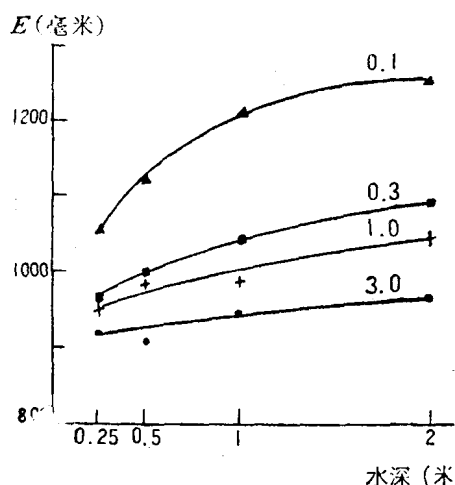


图4 各类蒸发器蒸发量与水深的关系

重庆蒸发实验站, 1958 年 1—10 月。曲线上数字为蒸发器面积 (米²)

导。对于蒸发池则还需考虑旁向热传导。

下面以100米²和20米²蒸发池的差异为例来讨论边壁热传导对蒸发池热状况和蒸发量的影响。把100²和20米²蒸发池（分别以左下标1和2表示）的条件代入式（2.9）并相减，在反射率和空气中的温、湿条件相同时，可得

$$\begin{aligned} & \frac{H\rho C}{2\tau}(\delta T_{+1} - \delta T_{-1}) + [4\varepsilon\sigma T_0^3\delta T + LE\delta B + \frac{LE}{\Delta e}k\delta T(1+B)]\Big|_{Z=0} + \frac{\lambda}{d}\delta T\Big|_{E=H} \\ & = \frac{2H\lambda}{d}\left[\frac{1}{2r_0}(T_{\pm} - {}_2T) - \frac{1}{1r}(T_{\pm} - {}_1T)\right]\Big|_{r=r_0} \end{aligned} \quad (2.13)$$

其中 $\delta T = {}_2T - {}_1T$, $\delta B = {}_2B - {}_1B$, $\delta T_{+1} = {}_2T_{+1} - {}_1T_{+1}$, $\delta T_{-1} = {}_2T_{-1} - {}_1T_{-1}$,

$E = \alpha\Delta e$, $k = \frac{\partial e_0}{\partial T_0}$ 为饱和水汽压随温度的变率, $T_{\pm}$ 为土壤温度, α 为蒸发风速函数。

由式（2.3）， $\frac{\delta B}{B} = \frac{\delta T}{\Delta T} - k\frac{\delta T}{\Delta e}$ 或

$$\delta B = B\frac{\delta T}{\Delta T}\left[1 - \frac{k}{b}B\right] \quad (2.14)$$

式（2.13）可化成

$$\delta T = \frac{-D + F(T_{\pm} - {}_2T)}{G} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad D &= \frac{H\rho C}{2\tau}(\delta T_{+1} - \delta T_{-1}), \quad F = \frac{2H\lambda}{2rd}\left(1 - \frac{2r_0}{1r_0}\right), \\ G &= 4\varepsilon\sigma T_0^3 + \frac{LE}{\Delta e}(b+k)\Big|_{Z=0} + \frac{\lambda}{d}\left(1 + \frac{2H}{1r_0}\right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

由式（2.15）可见，20米²和100米²蒸发池的水温差 $\delta T = {}_2T - {}_1T$ 与蒸发池深度内平均的土壤温度和水温之差 $T_{\pm} - {}_2T$ 成正比。由于池水整层吸收太阳辐射而土壤则只是表层吸收太阳辐射，故夏季

$T_{\pm} - {}_2T > 0$ ，冬季则 $T_{\pm} - {}_2T < 0$ ，因而 δT 也会有明显的年变化（图5）。宜兴湖泊实验站的资料表明 δT 的年变化范围为0.8℃（图5）。图6是该站 $\delta E(a)$, $\delta T(b)$ 与 $T_{\pm} - {}_2T$ 的相关图。他们反映了式（2.15）的特点。

浅水湖泊可忽略旁向热传导的影响。

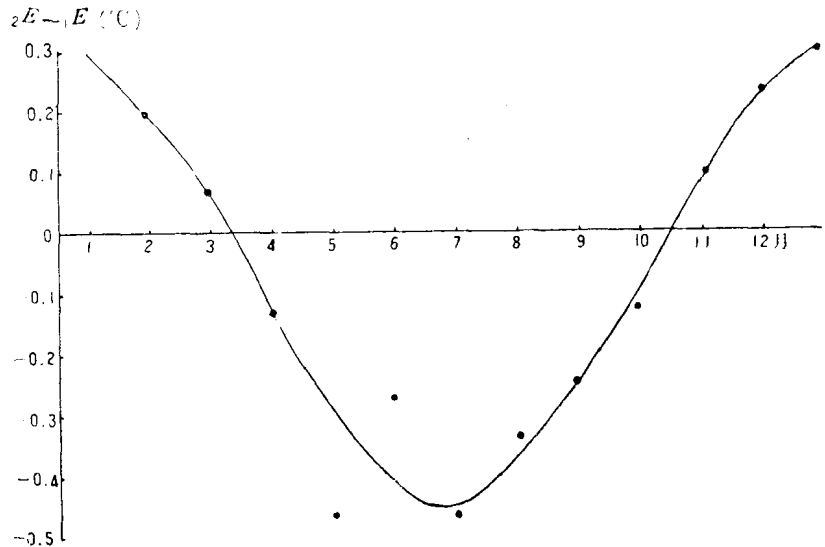


图5 20、100米²蒸发池水温差 δT 的年变化
（宜兴湖泊实验站，1965—1968）

若在蒸发池边壁加上绝热层,就可得到同样效果。

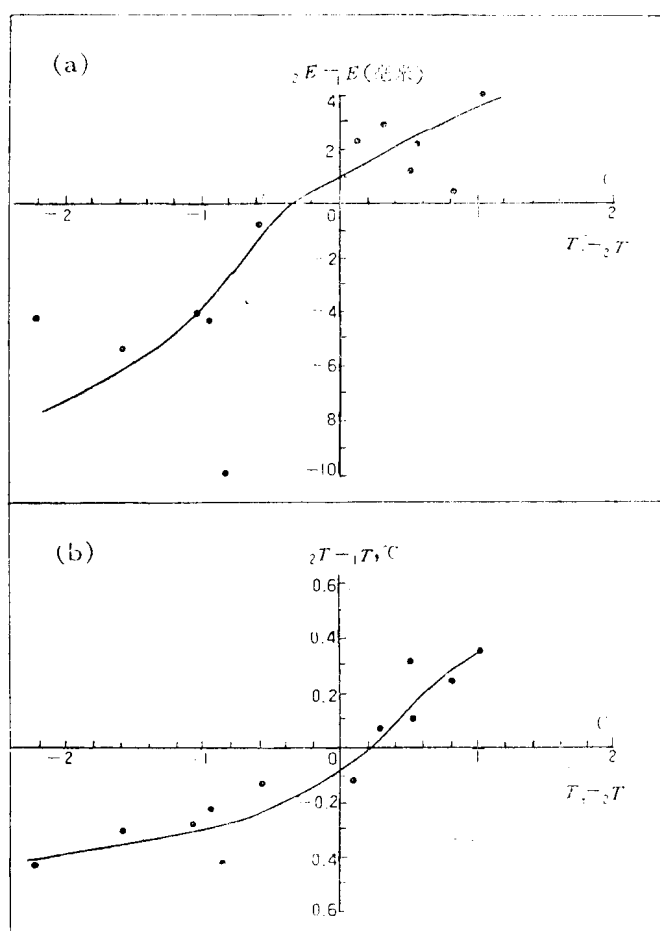


图6 20、100米²蒸发池月平均蒸发量差 $2E - 1E$ (a)和水温差 δT (b)与土-水月平均温差的相关

(宜兴湖泊实验站, 1965—1968)

三、动力影响

同一观测场上相同水温各蒸发器的蒸发量差异主要是由动力因素决定的。而相同辐射平衡及边壁热传导条件下,动力因素差异影响蒸发后可造成蒸发器内水温的差异。蒸发量大,损失的内能大,水温偏低。例如,小蒸发器的蒸发量大于大蒸发器而水温则偏低。另一方面,在相同的动力和空气温、湿条件下,水温低则蒸发量小。因此,以漂浮蒸发器为例,器内外水温的差异是动力和热力因素共同作用的结果(资料表明,这个差异比岸边蒸发池水温与自然水温之差要小得多)。根据器内外水温的小差异作热力因素订正甚至符号也难以确定。

动力影响则是显著的,它表现在空气流经高出水面(地面)的蒸发器壁时,使边壁附近的涡动混合增加,近水面水汽分子更迅速向上扩散,使蒸发量增加(图7)。

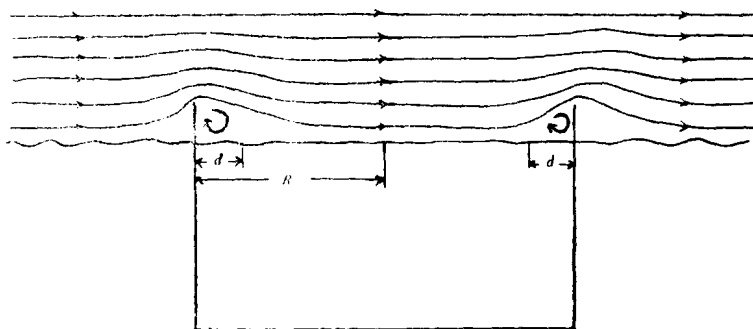


图7 蒸发器边壁使气流增加涡动混合示意图

设蒸发器的半径为 R ，在以宽度为 d 的带内的蒸发率为未扰水面的 n 倍（ $n > 1$ ），则蒸发器的蒸发率为未扰自由水面的 N 倍。显然

$$N = \frac{\pi(R-d)^2 + n\pi[R^2 - (R-d)^2]}{\pi R^2} = 1 + 2(n-1)d/R - (n-1)(d/R)^2 \quad (3.1)$$

忽略二阶小量 $(d/R)^2 \ll 1$ 后可得

$$N = 1 + d_1/R \quad (3.2)$$

其中有未知量

$$d_1 = 2(n-1)d \quad (3.3)$$

由式(3.2)可得到半径为 R_1 蒸发器的蒸发量相对自由水面蒸发量的动力折算系数 $\alpha_{1,\infty}$ 为

$$\alpha_{1,\infty} = \frac{1}{N_1} = \frac{1}{1 + d_1/R_1} \quad (3.4)$$

两种蒸发器之间的动力折算系数

$$\alpha_{1,2} = \frac{E_1/E_\infty}{E_2/E_\infty} = \frac{1 + d_1/R_1}{1 + d_1/R_2} \quad (3.5)$$

根据水温相近的两种尺度蒸发器的同步对比观测资料可确定 d_1 。据官厅、汗嘎利、猛进等水库漂浮筏对比资料得平均值 $d_1 = 0.037$ 米(表2)。

表2 水温相近漂浮蒸发器蒸发量对比资料

水库名称	蒸发器半径(米)		α (E_1/E_2)	d_1 (米)	资料年代
	R_1	R_2			
官厅(华北)	0.977	0.309	0.925	0.038	1961—1962
汗嘎利(东北)	0.900	0.309	0.934	0.035	1978—1979
猛进(新疆)	0.900	0.309	0.925	0.039	1981
平均				0.037	

由表3可知，从动力因素来看，20米²和100米²蒸发池已基本一致。

表3 不同面积蒸发器的动力折算系数

半径(米)	0.309	0.900	0.977	1.784	2.523	5.642
面积(米 ²)	0.3	2.54	3	10	20	100
$\alpha_{r, \infty}$	0.89	0.96	0.96	0.98	0.99	0.99

库兹涅佐夫^[5]根据苏联水面漂浮筏资料得到ГГИ-3000的折算系数为0.88,与本文结果很接近。官厅水库1961—1962年漂浮筏资料表明,由于E_{0.1}的半径较3米²口径蒸发器小,边壁热传导作用使其水温更接近于自然水温^[1](前者水温与自然水温的绝对偏差平均为0.33℃,后者为0.49℃)。说明漂浮于水上的蒸发器面积不是愈大愈好。考虑到蒸发器缘口高出水面会使蒸发量增加,而测器的反射率又较自然水面大(这可导致蒸发量减小),以及蒸发器内外水温差异不大,且它对蒸发量的订正符号难以确定等因素,故对于一般自然水面的E_{0.1}蒸发资料除作上述动力因素订正外,不必再作其他订正。

根据上述讨论,不难发现,增加蒸发器口缘离地面高度将导致动力因素订正值的增加。这种措施是值得商榷的。

四、水平非均匀性影响

实际水面蒸发是通过水面与流来的近水面空气间的质量和能量交换进行的。流到蒸发器水面上的气流特征与蒸发器水面上原有已适应层的特征是否相同,对蒸发器蒸发量有很大影响。因此,由于水面和陆面的物理、几何特性的差异,陆面观测场上的水面蒸发器的蒸发量与实际自然水面蒸发量之间有一定差异。这种差异有很强的地区性特征。在开敞水面,流到蒸发器水面上的是温湿特征已适应于水面的气流。但在陆上观测场上,流到蒸发器水面上的则是适应于邻近陆面的气流。在湿润季节(地区)或广种水稻的季节(地区)里,陆上贴地层的水汽压甚至可大于蒸发器水上。相反,在干旱季节(地区)陆上贴地层的湿度常小于蒸发器水面。这可导致抑制或增加蒸发器内的蒸发量。

温、湿适应层(内边界层)高度 h 与地面粗糙度 z_0 、温度层结参数 ϵ 有关^[3]:

$$h = z_1 \left[\frac{\epsilon_1^2}{10b_1^2} \frac{x}{z_1^2} \left(\frac{kz_0^{\epsilon_1}}{1 - \epsilon_1} \right)^2 \epsilon_1 \frac{z_1^{1-\epsilon_1}}{z_1^{\epsilon_1} - z_0^{\epsilon_1}} \right]^{p_1/\epsilon_1}, \quad p_1 = \frac{\epsilon_1}{1 + m + \epsilon_1} \quad (4.1)$$

其中, x 为离下垫面性质突变交界点的距离, $z_1 = 1$ 米, $k = 0.40$ 为卡曼常数, m 为风速廓线指数。由此可算得 $z_0 = 1$ 厘米时不同条件下的 h 值(表4)。

表4 温、湿适应层高度 h 计算值($Z_0 = 1$ 厘米, $m = 1/8$)

h (厘米) \ x (米)		0.62	1	5.05	11.28	100	200	300	500	1,000	10,000
稳定度(ϵ)											
稳 定	0.1	0.62	0.92	3.5	6.6	39	69	97	147	258	1690
不 稳 定	-0.1	0.42	0.68	3.3	7.2	60	119	176	290	571	5400

1) 蒸发器传热性能的改进,使其能适用于热水水面的问题可参见[2]。

由表4可知,蒸发器(池)上的 $h \approx 1-7$ 厘米。为使 $h = 1.5$ 米,必须有 $x = 300-500$ 米。就是说,蒸发器内水温的差异引起的空气中温、湿特征变化高度仅 $1-7$ 厘米。在通常观测的 1.5 米高处是无法觉察这种差异的。为在 1.5 米高处观测到与自然水面相适应的温湿特征,测点应设在离岸边 $300-500$ 米处。

新疆猛进水库 1981 年 8—9 月水面蒸发实验资料表明(表 5),即使在干旱地区, 1.5 米高处温、湿的水陆差异并不大。但水陆风速比值则达 2 倍以上。蒸发量的比值为 0.92 。由此可见,水上和陆上的蒸发公式是不同的,把水上的水文气象资料代入陆上蒸发公式计算蒸发量可造成较大的误差。

水上和陆上同一类型蒸发器蒸发量的差异与自然水温和地温的差异有关。江苏团沱¹⁾和新疆猛进水库的资料表明,在水温低于地温的时段内,器测蒸发量水面小于陆面 $2-8\%$ (江苏的冬季和新疆的夏季);相反,当自然水温高于地温时(江苏夏季)器测蒸发量水面大于陆面 6% (表 6)。这是边壁热传导(通过蒸发器热量平衡)和水平非均匀性影响蒸发量的明显例证。

分析表明,用空气相对湿度和土壤内某层(例如 20 厘米)处的温度与邻近湖面水温之差可在一定程度上表明水平非均匀性影响和气候区差异。

根据团沱和猛进水库的水陆对比资料点绘了图 8。从图上可看到总的趋势是随空气相对湿度的降低和 $T_{\infty} - T_{\pm 20}$ 的减少 $E_{\text{水}}/E_{\text{陆}}$ 增大。

五、结 语

水面蒸发量在湖泊、水库的水量平衡和热量平衡中是很重要的一项。设法求得接近于实际情况的湖面蒸发量具有重要的理论和实际意义。本文从热力、动力和水平非均匀性三个方面分析了影响水面蒸发的因素,并由此讨论了器测蒸发量误差的成因和蒸发器结构、大小,水深,安装方式等对其蒸发量的影响。指出岸边大型蒸发池的局限性及造成其蒸发量与实际湖面蒸发量差异的原因。由于漂浮蒸发器上空的温、湿、风和水温条件与实际湖面的条件接近,基本消除了陆上蒸发池所无法解决的水平非均匀性影响,故作动力因素订正后就可较好逼近实际湖面蒸发量。文中给出了计算这个订正系数的公式并根据实测资料确定了其中的参数。对于水面 $E_{\text{水}}$ 蒸发器,其(动力)折算系数为 0.89 。

1) 取自本所宜兴湖泊综合实验站的观测资料。

表 5 新疆猛进水库水陆对比资料
(1981年8—9月)

要素	水面	陆面	水/陆
$T_a(^{\circ}\text{C})$	19.93	19.58	1.02
$e_a(\text{毫巴})$	11.36	11.24	1.01
$f(\%)$	51.3	52.1	0.99
$T_o(^{\circ}\text{C})$	20.00	20.33	0.98
$u(\text{米/秒})$	2.30	1.14	2.02
$\Delta e(\text{毫巴})$	12.29	12.93	0.95
$E(\text{毫米/日})$	4.75	5.20	0.92

表 6 $E_{\text{水}}$ 蒸发量水陆差异与水-土温差的关系

要素	站址 新疆猛进水库 (1981年 8—9月)	江 苏 团 沱	
		1964—1969年 5—9月	1964—1968年 11—12月
$T_{\infty} - T_{\pm 20}$	-2.62	0.39	-0.46
$E_{\text{水}}/E_{\text{陆}}$	0.92	1.06	0.98

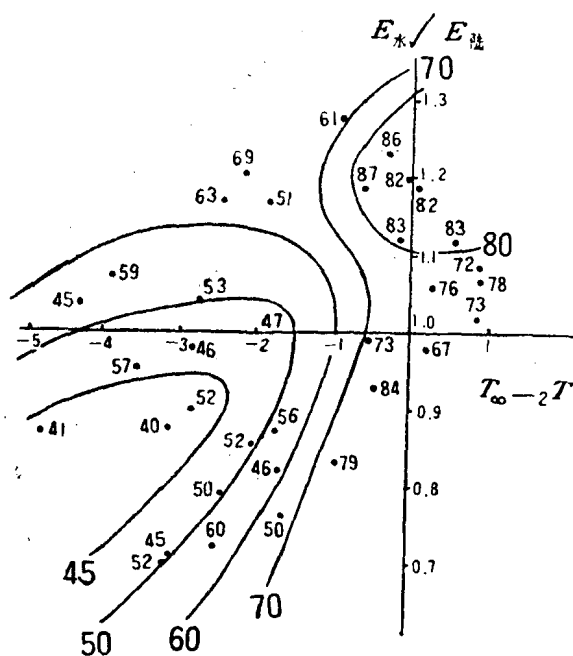


图8 $E_{水}/E_{陆}$ 蒸发量水/陆差异与水-土温差及空气相对湿度的关系

(点旁和等值线上数字为相对湿度。据团九和猛进水库资料)

鉴于陆面观测场资料的地区性、季节性差异较大以及深水上用脉动相关法测量蒸发量的技术难度很大,广泛开展并改进漂浮筏蒸发测量是值得重视的工作。设计防浪措施,改进筏体和蒸发器的结构,研究高精度遥测自记蒸发仪,使能取得长时间的水上蒸发资料实为迫切需要。

由蒸发池热量平衡方程分析可得到:蒸发池水深愈深,池壁反射率愈小则蒸发量愈大。蒸发池半径愈小则边壁热传导对月蒸发量的影响愈大。观测事实与文中结论基本一致。

在使用台站蒸发资料时宜对不同测器就热力、动力和水平非均匀性三个因素作不同订正。文中提出的方法可供参考使用。这比纯粹套用其他地区经验公式能更好逼近实际。

根据本文分析,对陆上蒸发器(池)作若干改进,使能更好逼近实际湖面蒸发量是值得进一步做实验研究的。

参 考 文 献

- [1] 广东省水文总站, 广东省各类型蒸发器对改进后 $E_{水}$ 蒸发器折算系数的分析, 水文, 水资源专辑, 第69—72页, 水利电力出版社, 1982年。
- [2] 濮培民等, 晋阳湖水面散热系数公式的初步探讨, 第二次中国海洋湖沼科学会议论文集, 第84—93页, 科学出版社, 1983年。
- [3] 莱赫特曼Д.Л. (濮培民译), 大气边界层物理学, 第237—244页, 科学出版社, 1982年。
- [4] Stefan, H.G. et al., Model of Light Penetration in a Turbid Lake, Water Resources Research, Vol.19, N.1, 109—120, 1983.
- [5] Кузнецов, В.И., Оценка зарубежных методов расчёта испарения с водной поверхности, Тр.ГГИ.Вып. 198, 1971.
- [6] Тимофеев, М.П., Метеорологический режим водоемов. Гидрометеиздат. Л. 215—228, 1963.
- [7] Шулейкин, В.В., Краткий курс физики моря, Гидрометеиздат. Л. 427—428, 1959.