

# 多种水面类型蒸发的研究\*

毛 锐 高俊峰

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**提要** 分析有水草水面、污水面、受热水面、盐水(卤水)面等特定水面类型的蒸发量, 并与清水、淡水对照, 求出蒸发比; 还计算了太湖地区有水草水面和受热水面的蒸发模型, 为确定湖泊的蒸发量提供一新途径; 最后建议用水生植物的蒸腾规律来控制水面蒸发, 调节水面温度。

**关键词** 水面蒸发 蒸发比 水域环境

湖泊和河流水面类型具有多样性, 就是在同一湖泊中的各部分也是这样, 水面蒸发量是随着湖泊环境条件的不同而变化, 蒸发量是若干环境变量的函数。

在湖泊沿岸带和河滩地生长着较茂盛的水生植物, 形成有水生植物的水面; 此外随着工业发展, 许多河湖水面受到化学污染的影响, 导致水域环境的变化, 为了正确估算河湖水面蒸发量, 必须要研究不同水面类型的蒸发规律及计算方法。

## 1 观测仪器和方法

**1.1 水生植物腾发量的测定** 1980—1985 年选择东太湖水体农业试验站开展有水生植物水面腾发量的观测, 在油车港大堤堤坡上设置 6 只口径面积为  $0.3\text{m}^2$ 、深度为  $0.6\text{m}$  的标准蒸发器, 分别测定种植单一的水生植物的腾发量, 各蒸发器均用容积测量器和测针观测水位。水草蒸发器中水位的变化主要是由水生植物的蒸腾量及棵间水面蒸发量的变化所决定, 所以水草蒸发器实测的蒸发量可看作为水生植物的蒸腾量与棵间水面蒸发量之和, 简称水生植物腾发量。同时, 还对应观测湖中水生植物试验区及岸边观测场水文气象资料。

**1.2 污水面蒸发的测定** 1984—1985 年在苏州黄天荡污水资源化生态工程实验站开展污水面蒸发观测工作, 设置口径面积为  $0.3\text{m}^2$  的 E-601 型蒸发器, 分别测定具有代表性苏州城河污水的水面蒸发量, 并与清水面的测定对照, 还定时观测水质、水温等因素。

**1.3 受热水面蒸发的测定** 1978—1979 年曾参与电力工业部华东电力设计院在杭州艮山门电厂进行冷、热水蒸发散热实验。电厂采用循环冷却方法, 冷却水经排水渠道排入贴沙河, 利用河面冷却, 在河面上设置蒸发器, 加热元件用 2 千瓦电热丝, 并用恒温控制仪控制表面水温, 以保证水温稳定, 这样可比较不同冷、热水的蒸发差异。

**1.4 盐水(卤水)蒸发的测定** 1984—1986 年在山东中国科学院禹城综合站开展盐水(卤水)蒸发的观测(洪嘉琏等, 1988), 曾使用口径为  $0.3\text{m}^2$  的 E-601 型标准蒸发器, 以轻工业部制盐研究试验场  $24^\circ\text{Be}'$  为原料, 加淡水稀释配成 3.5, 6, 10, 15, 20,

\* 中国科学院南京地理与湖泊研究所宜兴湖泊研究所研究成果。毛锐, 男, 出生于 1937 年 3 月, 研究员。

收稿日期: 1994 年 9 月 19 日, 接受日期: 1995 年 3 月 10 日

24, Be' 六种浓度的盐水(卤水), 并与淡水的对照, 每日 8 时观测蒸发后, 用波美比重计测定容器卤水比重, 并加淡水调整至标定浓度。

## 2 观测实验结果分析

**2.1 有水生植物水面的腾发量** 太湖是我国湿润地区的大型浅水湖泊, 在该湖的沿岸带和浅水区都生长着各种水生植物, 尤其是位于太湖洞庭东山半岛东南面的东太湖, 它是太湖尾闾区一个狭形湖湾, 这里水浅, 湖底平坦、底质肥沃、水位平缓、是水生植物生长的理想水域环境, 据现状调查, 该区有水生植物 75 种, 分属 33 科 57 属, 因此, 选择具有代表性的东太湖油车港开展有水生物水面腾发量的观测。在东太湖油车港设置水草蒸发器, 分别测定种植单一的茭草(*Zizania catifolia*)、芦苇(*Phragmites communis*)、水花生(*Alternanthera philoxoroides*)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、浮萍(*Lemna minor*)等水生植物的腾发量( $E_c$ ), 并与实测的清水面蒸发量( $E_0$ )相比, 得出的蒸发比  $K_p = E_c / E_0$  值列入表 1。

表 1 东太湖水生植物  $K_p$  值  
Tab. 1 Evaporation ratios  $K_p$  in East Taihu Lake

月份	4	5	6	7	8	9	平均
芦苇	1.34	1.78	2.40	3.30	3.67	3.57	2.68
茭草	1.28	2.67	3.94	6.45	6.00	5.40	4.29
水花生	1.20	1.21	1.36	1.89	2.11	1.54	1.55
凤眼莲				1.54	1.65	1.51	1.57
浮萍		0.88	0.87	0.85	0.95	0.80	0.87

芦苇, 茭草等挺水植物个体高大, 由根茎叶表皮吸收的水份, 在茎叶的气孔和角度质层进行的水汽扩散速度较快, 其腾发量一般大于水面蒸发量, 尤其在生长茂盛期更为显著, 如茭草 7 月份的  $K_p$  值高达 6.45。而漂浮和浮叶植物如水花生、凤眼莲, 虽然其茎叶表面面积都小于挺水植物的茎叶表面积, 但其腾发量却大于水面蒸发量,  $K_p$  平均值为 1.6; 也有的腾发量却小于水面蒸发量, 如浮萍, 其根小、叶薄、色浅, 在水面上形成一层很薄的覆盖膜, 白天增温慢、水面温度低于清水面温度, 此外, 因其棵间水面面积小, 相应棵间水面蒸发量很小, 仅靠叶面气孔蒸腾, 所以白天腾发量并不大, 而夜间叶面气孔关闭, 腾发量明显小于水面蒸发量。

水生植物的腾发量与叶面积、空气饱和差的关系密切, 相关系数超过 0.95, 可建立如下经验关系:

$$E_c = 0.682D_{1.5}(1 + 0.261S) \quad (1)$$

$$E_c = 5.368(1 + 0.220S) \quad (2)$$

式中,  $E_c$  为东太湖芦苇、茭草蒸发器实测的腾发量(mm/d);  $D_{1.5}$  为 1.5m 高处空气饱和差(hPa);  $S$  为每平方米样方中叶总面积( $m^2$ ); (1), (2)式考虑到影响水生植物腾发量的植物体本身特征指标——叶部面积及外界蒸发因素——空气饱和差, 因此, 经实测资料检验精度较高。

我国还有些站点先后开展过水草腾发量的试验(王积强, 1990; 孙芹芳, 1988)他们

都采用器测法进行测定, 在表2中列出新疆阿克苏上游水库、湖北武昌东湖、山东微山湖及新疆博斯腾湖<sup>1)</sup>等站资料, 从表1、表2可见, 尽管各站相隔很远, 但其同种水生植物的蒸发比差异并不大, 芦苇在生长期平均蒸发比 $K_p$ 值为1.82—2.68; 蒲草生长期平均蒸发比为1.70—1.95; 水花生为1.23—1.55; 浮萍为0.75—0.87。

表2 我国主要湖泊水生植物的蒸发比

Tab. 2 Evaporation ratios  $K_p$  of main lakes in China

名称	芦苇		蒲 草			浮萍		水花生
	微山湖	博斯腾湖	微山湖	上游水库	博斯腾湖	微山湖	武昌东湖	武昌东湖
$K_p$	1.82	2.17	1.82	1.70	1.95	0.75	0.87	1.23
时段(月)	4—10		8—11	4—10	4—10	8—9	5—9	10—12

在长有水草的湖泊, 不能应用常规的水面蒸发公式来计算湖面蒸发量, 应根据湖泊植被分布图, 以各种植被面积为权数, 并考虑每种水生植物的蒸发比, 来计算有水草湖泊的蒸发量。

**2.2 污水面蒸发** 随着工农业生产迅速发展和人口的增长, 大量工业废水及生活污水通过河流直接排至湖口、汇集于入湖河口, 根据太湖地区被调查的48个小城镇统计, (董雅文等, 1991)污水排放量大约为37100万t/a。其中工业污水量, 约占总排放量的90%, 生活污水量占总排放量10%, 主要以化工、印染两大行业为主, 近年来, 河湖污染日愈严重, 据不完全统计, 太湖以东地区水面污染面积比重达16%—22%。

选择苏州市郊黄天荡养殖场进行污水面蒸发试验, 分别测定苏州葑门外城河污水面蒸发量, 并与清水面蒸发量对比。据1981—1984年苏州城河资料分析<sup>2)</sup>COD均值8.88mg/L, 超标0.48倍, 变化范围6.5—12.4mg/L,  $\text{NH}_3\text{-N}$ 均值为1.87mg/L, 变化范围在0.57—0.84mg/L, 最高为24.7mg/L, pH为6.5—8.5。表3列出1984年8—9月实测污水面蒸发量及水质分析结果。因污水中含有有机物和氨氮, 水色发黑, 夏季水温略高于清水, 实测结果是污水面蒸发量略大于清水面蒸发量。

表3 苏州市城河污水蒸发量和水质

Tab. 3 Evaporation from polluted water surface and water quality in Chenghe Riverin, Suzhou City

观测时间 (年、月)	蒸发量(mm/d)			水质分析(mg/L)			
	污水	清水	$E_{15}/E_{20}$	总矿化度	氨氮	COD	透明度(m)
1984.8	4.54	4.40	1.032	300	3—5	7.4—7.6	0.3
1984.9	1.87	1.74	1.075				

**2.3 受热水面蒸发** 火电厂和大工厂常常是沿河湖海边而设置的, 因其需要量的冷却水, 用来冷却设备和产品, 如太湖地区的望亭电厂冷却水取水流量为31—41(m<sup>3</sup>/s), 冷却水经凝气器后热水排至望虞河, 水温升高8—10℃, 必然产生大范围的热水区, 对工农业和人民生活带来不利影响, 目前位于无锡、苏州的望虞河上河道狭、流速低、

1) 钟新才, 1986年, 博斯腾湖芦苇区蒸发量初探。

2) 苏州市水污染治理总体规划资料, “六五”攻关项目, 1985。

热量沿程扩散慢, 平均 4km 降 1℃, 因而造成望虞河大面积污染。

据牛克源(1978)、王维新等(1982)<sup>1)</sup>有关试验证明热水面的蒸发量要大于自然水面(冷水面)的蒸发量, Браславский等(1966)认为, 当其它条件相同时, 热水面比自然条件下的水面蒸发量大 1.3—1.5 倍。究其原因, 主要是由于热水区水温升高, 就增大了水温、气温差值  $\Delta t$ , 因此在水面上产生温度不稳定层结, 加强了水汽在垂直方向的对流运动, 这是将水汽带走的一个动力因子。水面温度愈高、温度不稳定层结作用愈大, 蒸发量愈大, 因此热水面蒸发值是不稳定层结作用(即  $\Delta t$  值)的函数。在热水面蒸发公式(3)中引入水温和气温的差  $\Delta t$  值,  $W_{20}$  为 2m 高处风速。

$$E=0.14(e_0-e_{20})[1+0.8W_{20}+f(\Delta t)] \quad (3)$$

$$\Delta t \geq 0 \quad f(\Delta t) = 1.9[1 - \exp(-0.085\Delta t)] \quad (4)$$

$$\Delta t < 0 \quad f(\Delta t) = \exp(0.18\Delta t) - 1 \quad (5)$$

Тимофеев(1963)也曾提出用温差与蒸发量公式计算不同温度时湖泊蒸发量的增量; 其结果为在水温 15℃、水气压 15hPa 时, 水温增加 1℃, 湖面蒸发量增大 32%。

从我国杭州艮山门电厂的水面散热系数的试验, 也可明显看出热水面和自然水面(冷水面)蒸发规律的差异, 特别在小风速的情况下, 热水面上空温度梯度增大、空气紊动扩散加剧, 导致热水面的蒸发速率比自然水面大的多, 其冷、热水面蒸发公式见(6)、(7)式, 式中  $W_{150}$  为 1.5m 高处的风速。

$$\text{自然水面(冷水面): } f(W) = 0.164 + 0.156W_{150} \quad (6)$$

$$\text{热水面: } f(W) = 0.263 + 0.087W_{150} \quad (7)$$

据此分析不同温差的两个水体的水面蒸发量的比值(见表 4)。

表 4 杭州艮山门电厂冷、热水面蒸发比<sup>1)</sup>

Tab. 4 Evaporation ratios in Genshanmen Power Plant in Hangzhou City

$T_2 - T_1$	$E_2 / E_1$	观测条件
10.6	3.20	
9.7	3.03	气温 20—32℃
7.5	2.60	风速 < 2.5m/s
6.4	2.41	
5.4	2.30	

1) 王维新、陈谦, 1982, 艮山门电厂水面散热系数试验研究。

表中  $T_1$ ,  $E_1$  为自然水面(冷水面)水温和蒸发量;  $T_2$ ,  $E_2$  为热水面水温和蒸发量, 一般电厂排出的热水要高于河湖水温 8℃, 从表 4 中可看出其  $E_2 / E_1$  约为 2.68。

**2.4 盐水(卤水)蒸发** 我国沿海地区河湖, 常会遭受不同程度咸潮威胁, 如长江口河段自本世纪 70 年代以来, 每年都遭受不同程度盐水入侵危害, 若以氯度达到 100ml/L 作为水体受盐水入侵污染的标志, 紧靠吴淞口的吴淞水厂多年平均盐水影响天数为 100d, 最长 243d。特别是 1978 年冬至 1979 年春天的一次严重的盐水入侵, 长江干流盐水一直上溯到江苏常熟市的望虞河口, 整个崇明岛均被盐水包围, 此时太湖地区缺水、开闸引江水, 引进氯化物含量较高的江水, 使阳澄湖滨氯化物含量达 1200mg/L(1979 年 2 月 4

日), 常熟市达 400mg/L, 这样的高值延续好几个月。更严重的是盐水侵入黄浦江, 沿江的吴淞和闸北水厂的氯含量最高可达 4000 和 3800mg/L。

盐水和淡水蒸发是不同的, 表 5 引用中国科学院山东禹城综合试验站卤水蒸发试验结果(洪嘉琰, 1988), 系在同一气象条件下测得的卤水蒸发和淡水蒸发的比值。

表 5 不同浓度卤水蒸发比系数年变化

Tab. 5 The annual variation of the evaporation ratio coefficients

浓度(Be')	蒸发比(4—11月)	年变幅
3.8	0.92	0.09
6.4	0.91	0.11
10.5	0.86	0.14
15.3	0.76	0.12
20.3	0.66	0.17
24.2	0.54	0.12

注: Be' 为用“波美计”测量卤水的度量单位, 一般海水 3.5Be'。

由表 5 实测可见不同浓度盐水(卤水)蒸发量都低于淡水蒸发量, 随浓度的增高蒸发比逐渐减少, 如 3.8Be', 卤水蒸发比为 0.92, 24.2Be' 卤水蒸发比 0.54。

### 3 结语

3.1 在具有污水面、受热水面、有水草水面及盐水的水域, 其蒸发量的计算方法, 可应用下式:

$$E = \sum_{i=1}^n (K_i, F_i) E_0$$

式中,  $E_0$  为清水面蒸发量,  $K_i, F_i$  为不同水面类型(有水草水面、污水面、受热水面、盐水等)的蒸发比和其覆盖的面积。

3.2 从水资源合理利用出发, 茭草、芦苇等挺水植物蒸发耗水量很大, 这对缺水地区来讲是不利的, 应控制其生长面积, 以免消耗过多可利用的水资源。水花生、凤眼莲等漂浮植物, 蒸发耗水量不大, 可适当地进行计划的种植。浮萍的蒸发量往往小于水面蒸发量, 可进一步研究这类水生植物的蒸腾规律, 为控制水面蒸发、抑制植物蒸腾寻找途径。此外, 有些挺水植物的蒸腾量将大于清水面蒸发量 3—4 倍, 在强烈的蒸发过程中同时可降低水面温度, 可通过种植水生植物来调节水温。

3.3 本文只是分析了单一环境要素对水面蒸发所产生的影响, 并且都是应用相同测器的观测值进行对比, 以求得其相对值。因这方面的工作的资料较少, 许多问题还应深入研究, 实际上水体各环境要素之间都是互相关联、互相影响的, 应根据各水域所包含的水面类型进行综合研究, 以推算出准确的水域水面蒸发量, 只有考虑到水体理化性质、水生植物生理特性、微气象等资料, 才能制定出有实用价值的湖泊水面蒸发公式。

参 考 文 献

牛克源, 1978, 华东水利学院学报, 2: 113—123.  
 王积强, 1990, 中国北方地区若干蒸发实验研究, 科学出版社(北京), 48—53.  
 孙芹芳, 1988, 水文, 3: 26—28.  
 洪嘉琏, 卢瑞芝, 1988, 地理研究, 7(2): 12—27.  
 董雅文、赵荫薇、何国瑜, 1991, 小城镇水污染控制, 中国科技大学出版社(合肥), 4—13.  
 Браславский, А. П. и Нуркалийев, С. Е., 1966, Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, 4: 195—206.  
 Тимофеев, М. П., 1963, Метеорологический Режим Водоемов, Гидрометеоиздат (Ленинград) СТР, 165—169.

WATER EVAPORATION FROM VARIOUS WATER SURFACE

Mao Rui, Gao Junfeng

(Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

**Abstract** This paper reports results of study on the characteristics of evaporation from (water plant covered, polluted, hot salty, etc.) water surfaces and presents an equation on the amount of evaporation from various water surfaces including water surface with plants, intruded salt water surface, etc. New water surfaces such as polluted water surface and hot water surfaces appeared with economic development in recent years. These water surfaces have different regularities of evaporation. Evaporation ratios of different kinds of water environment are listed in the following

Table:

Water plants (mean)		Polluted water	Hot water surface	Intruding salt water
<i>Phragmites Zizania communis catifolia</i>		Measurement (Sept. 1984)	8 °C higher than free water surface	Be' = 3.8
$K_p$	2.68    4.29	1.08	2.68	0.09

Evaporation from the water environment can be estimated by the equation:

$$E = \sum_{i=1}^n (K_i \cdot F_i) E_0$$

where  $E$ ,  $E_0$  are evaporation from water environment and from free freshwater surface;  $K_i$  is evaporation ratio of different kinds of water environment and  $F_i$  is its area. The factors affecting evaporation are analyzed singly in this paper although the factors are interrelated and mutually affect one another. Study on the combined effect of factors should be on the physicochemical characters of water, evapotranspiration from water surface with plants. relation between water and vapor heat exchange in water, etc.

**Key words** Water evaporation    Evaporation ratios    Water environment