

水面蒸发与散热系数公式研究(一)

濮 培 民

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

提要 根据自1976年以来全国水面蒸发与散热研究协作组在我国各典型地区的原体与室内实验资料 and 大量水文站历史资料, 通过理论分析和统计检验, 确定了影响水面蒸发的诸因子及其非线性相互作用, 引入了新的无量纲参数(W_s 、 P_v 、 P_e)和公式结构, 用实测资料统计确定了公式中的常系数, 得到了用开敞湖面一般水文气象资料计算逐日蒸发和散热系数的公式。经全国各典型气候带内各季节湖泊(水库)和受热污染水体上原体观测和室内专题实验共1860组日平均资料检验, 公式的精度高于现有其他公式。全文分两部分, 这是第一部分, 内容包括: 影响水面蒸发的主要无量纲参数, 感热输送和大气饱和度对蒸发影响的修正; 水面蒸发计算公式的结构及其经验系数。

关键词 水面蒸发 蒸发公式 水面散热系数

水面蒸发量是湖泊、水库的水量平衡和热量平衡中的一项重要因子。在水利工程设计、水资源管理及冷却池的蒸发散热系数计算中都需要正确估算水面蒸发量。水、热平衡对全球气候研究也是一个重要环节。鉴于其重大的理论和实际意义, 水面蒸发研究长期来成为国际上水文气象学界的重要研究课题之一。

自1687年天文学家 Halley 采用蒸发器确定水面蒸发量以来, 人们对蒸发器的形状、结构、大小、水深和安装方式等做了许多对比实验。我国近千个水文站采用 E₆₀₁型蒸发器。自50年代以来, 在重庆、宜兴、官厅等地建设了包括有100和20 m²的大型蒸发池的蒸发实验站, 开展了基础资料积累和基本理论的研究。国外在60年代末, 我国在70年代初, 为解决热电厂等工业冷却水设计的需要而发展的水面散热系数与水热平衡的研究, 促进了蒸发研究。我国曾在江西景德镇, 安徽淮南, 太原晋阳湖, 杭州艮山门, 新疆红雁池、猛进水库, 山东微山湖, 东北汗嘎利水库, 华北陡河水库, 广州和北京等地开展了水面蒸发和散热系数的专题实验研究^①, 在野外和室内, 采用包括绝热壁蒸发池在内的多种蒸发器做冷热水实验, 用梯度法、蒸发法、蒸发差值法、恒温法、温降法等做水面蒸发和散热实验。在北京还用水槽、风洞, 在不同水温、气温、湿度等条件下做了蒸发实验。通过对全国资料的对比分析, 增进了我们对

* 原水电部“1978—1985年”水利水电科学发展规划中第十二(一)重点研究项目研究成果之一, 由濮培民执笔。参加单位(人员)有: 水利部、能源部、中国科学院水利水电科学研究院冷却水所(陈惠泉、何树椿¹⁾、刘长贵、张思群), 中国科学院南京地理与湖泊研究所(濮培民、徐爱珍、殷金男), 水利部淮河水利委员会、安徽省水利科学研究所(毛世民、陈立业、王学工)、能源部华东(王维新、陈谦)、山东(王炜、毛凯、程慰曾)、山西(严宣伟²⁾、胡郁南³⁾)、新疆(白振营、马兰荻)、东北(邓枫、赵瑞吉)、华北(李粤东、赵国)等电力设计院和广东省水利水电科学研究院(伍楚才、陆耀耀)。

现在工作单位:¹⁾中国能源公司,²⁾华北电力设计院,³⁾江苏省电力设计院。

① 参见各地试验总结报告。

收稿日期:1991年11月19日;接受日期:1993年3月9日。

水面蒸发的机理和影响因素的认识。

在估算水面蒸发的诸方法中,水文气象方法较为简便,可利用水文气象站网的长期资料做逐日计算。它追随 Dalton 的思想,把蒸发率 E 表示为蒸发风速函数(或简称蒸发系数) α 与水面和近水面大气中水汽压之差 $\Delta e = e_s - e_a$ 之乘积

$$E = \alpha \Delta e \quad (1)$$

这里和以下的符号说明见附表 I。问题归结为寻求 α 与诸水文气象要素的关系,在这方面各国都做了大量研究。

关于 α 的经验公式数以百计,较常用的公式见表 1。尽管同一地区的冷、热水水面或不同地区的水面在本质上都是自然界某种条件下的水面,应服从统一的蒸发现律,但这些公式中的经验系数常有明显的地区性、季节性和冷、热水的差异。为寻求全国通用公式,首先要较正确地确定远离水-陆界面,接近水平均匀条件^①的实际湖面的蒸发量,其次是揭示除风速

表 1 几种常用的蒸发系数(α)公式

Tab. 1 Several common formulae for calculating evaporation coefficient (α)

序号	公 式	名称(年代)
1	$3.8 W_2$	Hefner 湖(1954)
2	$8.40 + 1.2 W_2$	苏火电院(1959)
3	$6.9 + 0.49 W_2^2$	Brady(1969)
4	$2.7 \sqrt{T_e}^{1/3} + 3.1 W_2$	Ryan-Harleman(1974)
5	$5.51 + 1.52 W_{1.5} + 0.22 W_{1.5}^2$	太湖地区(1979)
6	$[1.32 + (2.56 + 5.92 \sqrt{T_e}/W_{10}^2)^{1/2}]W_{10}$	晋阳湖(1980)
7	$\{1.34 + 42.2 [10^{-3} + \sqrt{T_e}/(T_{10}W_{10}^2)]^{1/2}\}W_{10}$	晋阳湖(1981)
8	$(38.7 + 12 W_{1.5}^2)^{1/2}$	施成熙(1984)
9	$(19.6 + 1.6 \sqrt{T_e} + 12.5 W_{1.5}^2)^{1/2}$	北京实验室(1988)
10	$(22.0 + 2.0 \sqrt{T_e} + 12.5 W_{1.5}^2)^{1/2}$	北京实验室(1988)
11	$[(2.7 \sqrt{T_e}^{1/3})^2 + (5.1 A_e - 0.05 W_2^2)^2]^{1/2}$	Adams(1990)
12	$4.0 + 2.88 W_2$	苏联,自然水面
13	$3.5(W_2 + \frac{A' \sqrt{T_e}}{W_2})$, 其中 $A' = \begin{cases} 0.74 & \sqrt{T_e} \geq 0 \\ 1.48 & \sqrt{T_e} < 0 \end{cases}$	苏联,自然水面
14	$2.9[W_2 + K(\sqrt{T_e})]$, 其中 $K(\sqrt{T_e}) = 1.38 + 0.236 \sqrt{T_e} - 7.25 \times 10^{-3}(\sqrt{T_e})^2 + 9.75 \times 10^{-5}(\sqrt{T_e})^3$	苏联,自然水面
15	$(7.17 + 6.78 \times 10^{-3} T_e) W_2^{0.136}$, 当 $W_2 \leq 1.7$ m/s 时; $(5.17 - 0.020 T_e) W_2^{0.881}$, 当 $W_2 > 1.7$ m/s 时	苏利奇(1979)

* $[\alpha] = W/m^2/hPa$, $[W_2] = m/s$, $[z] = m$, 符号说明见附表 I。

① 自然界通常不具备严格的水平均匀条件,但在近水面内部平衡副层中,气象要素分布已适应于均匀水面条件。这个副层的高度约为离上风方向水-陆界面距离的 1/100 ~ 1/300,风剪应力的适应则更快^[13]。

以外还有哪些因素如何及在多大程度上影响水面蒸发系数,确定主要无量纲参数和公式的结构形式;并根据尽可能多的各地实测资料确定其中的经验系数,以便可以用常规的水文气象资料更通用、精确地计算水面蒸发量。

作者曾提出用各地湖泊(水库)敞水面漂浮蒸发器的观测值可基本排除平流的影响,经过动力因素订正后就可较好地逼近实际湖面蒸发量^[1]。水面 E_{601} 型蒸发器的(动力)折算系数为 0.89。应该指出,由于水面、陆面热力动力特性的差异和陆上蒸发器受到水平平流的影响,所以陆上蒸发器资料难以代表大水面资料。小水域、河道、池塘或离岸近的水面资料受陆地影响大,对于这些资料,以及用不同型号蒸发器测得的资料,都需要作附加订正。

除风速外,还需考虑温度层结对 α 的影响,这对于热水蒸发来说尤为重要。为此,引入类似于平均 Ri 数的 Pv ([2]中写为 Πv) 数。作者曾发现在极端不稳定状态下, α 与 ΔT^* ($n=1/2$) 成正比^①、^[3,4]。[12]中 $R-H$ 公式的 $n=1/3$ 是中性($n=0$)到极端不稳定($n=1/2$)时的过渡状态。这个结论也被随后的北京室内实验所证实^②。作者还讨论了强迫对流到自由对流过渡的形式^③、^[4]。本文试图在此基础上,进一步总结各地实验资料,分析确定影响水面蒸发的主要无量纲参数,并确定公式中的各经验系数,使其适用于全国,计算精度高于现有公式。

1 影响水面蒸发的主要无量纲参数

由空气动力学基本讨论可知,定常均匀水面的蒸发量即为近水面水汽铅直通量,它与平均场的关系可表示为

$$E = \overline{\rho v' q'} = - \rho k \left. \frac{dq}{dz} \right|_{z=z_0} = - 0.623 \rho \frac{k}{P} \left. \frac{de}{dz} \right|_{z=z_0} = - 0.623 \frac{k}{RT} \left. \frac{de}{dz} \right|_{z=z_0} \quad (1.1)$$

在 z 为 z_0 到 z_1 区间内对(1.1)式积分可得

$$E = \alpha \Delta e, \quad \alpha = \frac{0.623}{RT_{rs} \int_{z_0}^{z_1} \frac{dz}{k}} \quad (1.2)$$

问题归结为比较正确和全面地确定 α 与水面上水文气象要素的非线性复杂关系。

作者曾得到^[5]

$$k = \kappa v^* K(R_1) \quad (1.3)$$

把(1.3)式代入(1.2)式后不难看到, α 或一般湍流交换强度,与 v^* 成正比,与 T_{rs} 成反比,并与 Ri 数和下垫面粗糙度 z_0 有关。

大量实验表明, v^* 与 W_1 成正比,且对中性层结时有

$$v^* = \frac{\kappa W_1}{\ln(z_1/z_0)} \quad (1.4)$$

故通常取

$$\alpha \sim W_1 \quad (1.5)$$

① 晋阳湖水面散热试验协作组、濮培民等。不稳定温度层结下的水面蒸发和散热。地理文集,1981,(5):58-79。

② 陈惠泉、毛世民等。超温水体水面蒸发与散热的试验研究。水利部水利水电科学研究院、淮河水利委员会、安徽省水利科学研究所,1989。

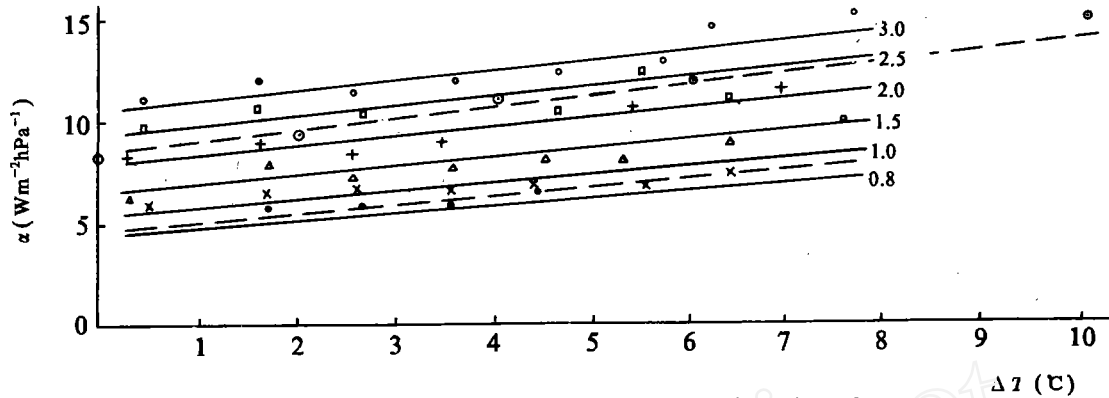


图1 蒸发风速函数 α 与水气温差 ΔT 及风速 W_1 的关系

实线为广州站 1960—1966 年共 1058 组资料, 虚线为 1977—1978 年(风速小于 3 m/s)共 182 组资料

Fig. 1 Evaporation coefficient α versus air-water temperature difference ΔT and wind speed W_1

这可看作是确定 α 的零级近似。

为考虑大气层结稳定度的影响, 取与 Ri 数类似的无量纲数

$$Pv = \frac{gH \Delta T_r}{T_{rs} W_1^2} \quad (1.6)$$

得到了很好结果^[4]。它表现为在同样风速档次内 α 随 ΔT 增大而增大。从广州蒸发实验站对小风速资料统计结果看, α 与 ΔT 之间也有明显正相关(图 1)。公式中引入 Pv 可视为确定 α 的一级修正。

此外, 还需考虑其他影响因素, 例如(1.2)式中的 T_{rs} ; 在贴水面粘性副层中应考虑空气粘滞性(运动粘滞系数 ν)、质量传输(分子扩散系数 D)与动量传输(D/ν)的差异^[10,13-15]。由于 T_{rs} 、 ν 、 D 均与温度有关, 故宜对风速作温度修正, 引入经温度影响修订后的“有效风速” W_e 。概念是可取的; 即

$$W_e = \frac{W_{1n}}{\nu_n^{n_1} \cdot T_{rn}^{n_2} \cdot (D_n/\nu_n)^{n_3}} \quad (1.7)$$

其中取

$$W_{1n} = W_1/W_{100}, \quad W_{100} = 1 \text{ m/s} \quad (1.8)$$

$$\nu_n = \nu_s/\nu_{00}, \quad D_n = D_s/D_{00}, \quad T_{rn} = T_{rs}/T_{r00} \quad (1.9)$$

W_e 和带 n 下标的量均为无量纲量; 并取

$$T_{00} = 20 \text{ }^\circ\text{C}, \quad T_{r00} = 295.6 \text{ K} \quad (1.10)$$

及相应的 ν_{00} 、 D_{00} 为相应量的参照量。对于空气有

$$D = E_1(E_2 + T), \quad E_1 = 1.2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s/K}, \quad E_2 = 183.3 \text{ K} \quad (1.11)$$

$$\nu = E_3(E_4 + T), \quad E_3 = 9 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s/K}, \quad E_4 = 147.6 \text{ K} \quad (1.12)$$

可以根据 α 与相应量有正或负或无相关来定性确定(1.7)式中 n_1 、 n_2 、 n_3 的值。

当我们讨论各地全年资料和对全国各地地区资料进行比较时, 可以发现 α 与 T_{rs} 有负相关(表 2、表 3)。因此, 在蒸发公式中适当考虑 $n_1 = n_2 = 1, n_3 = 0$ 是可取的。这相当于在(1.5)式中考虑 $v^* \sim Re$ 及 $\alpha \sim 1/T_{rs}$ 。即

$$W_e = W_{1a}/(v_s T_{sa}) \quad (1.13)$$

在接近自由对流的小风速区,则取 $n_1 = n_2 = 0$, $n_3 = -1$ 为宜;在湍流动量通量 v^* 中,给以分子动量传输 D/ν 的修正,即

$$v^* \sim W_1(D/\nu) \quad , \quad W_{e2} = W_{1a}(D_s/\nu_s) \quad (1.14)$$

另外,还应考虑,蒸发过程不仅是水汽质量的上下交换,它还伴随着潜热转换和能量输送。水面上蒸发潜热和长波辐射平衡能量损失主要是通过水体(表层约 1 m 以上)对太阳短波辐射能的吸收,从下层向水面的热传导来补偿的。这导致水面形成一冷水膜。这样,通常测得的表层水温高于水表面温度(Δe 偏大),且其差值不是常数,而与蒸发率本身及与蒸发相伴随的感热输送的反馈影响等过程有关。例如,当感热通量(与 ΔT 成正比)为负(向下)

表 2 α 与 $T_{1s} = T_{1s}/T_{10}$ 的相关

乌兰章占漂浮筏(1960, 1961, 1963—1965 年 4—10 月)

Tab. 2 α versus $T_{1s} = T_{1s}/T_{10}$

Floating evaporator data over Ulanzhanga Reservoir
in Apr. — Oct. of 1960, 1961, 1963—1965

$W_{1.5}(\text{m/s})$	r	n	N	T_{1s}^{-1}
1—1.9	-0.8666	12	104	0.99—1.10
2—2.9	-0.8182	11	202	0.99—1.09
3—3.9	-0.8140	12	202	0.99—1.10
4—4.9	-0.8969	9	181	0.99—1.07
5—5.9	-0.7562	11	143	0.99—1.09
6—6.9	-0.6091	10	93	0.99—1.09
7—7.9	-0.3400	8	53	0.99—1.07
8—8.9	-0.5076	5	28	0.99—1.08
9—9.9	-0.8010	3	3	0.99—1.03

* r 为相关系数, n 为资料分组统计数, N 为资料总数,其他说明见附表 1。

表 3 α 与 v 的相关

西辽河工程湖漂浮筏, 1956—1965 年旬平均

Tab. 3 α versus v

Same as Tab. 2 but in West Liaohe Reservoir,
decade mean during 1956—1965

$W_{1.5}(\text{m/s})$	r	n
2.0—2.4	-0.6514	6
2.5—2.9	-0.5747	11
3.0—3.4	-0.4120	24
3.5—3.9	-0.1753	31
4.0—4.4	-0.5986	37
4.5—4.9	-0.7575	18
5.0—5.4	-0.2016	13
5.5—5.9	-0.5691	6
6.0—7.3	-1.0	2

* 符号说明同表 2。

时大气供给水面热量,将减弱水面冷水膜,有利于蒸发,否则不利于蒸发。因此,反映感热、潜热通量之比的无量纲量鲍恩比^[9]

$$B_0 = b \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad , \quad b = \frac{P}{0.623} \frac{C_p}{L} \quad (1.15)$$

也需取用为对 α 修正的参数。

还有,由于类似于热力的原因,贴地层空气的饱和差(或相对湿度 f),即使在水平均匀下也对 α 有影响。因为饱和差愈大(f 愈小)的空气在接触水面时更可能容纳从水面蒸发出的水汽。例如,当 $\Delta T < 0$, $\Delta e = 0$ (这时 $T_s < T_a$, $f < 100\%$),按(1.1)式 $E = 0$,但实际上,由于气温比水温高,未饱和气块向下运动接触水面时可给水面以热量供蒸发潜热需要并容纳逸出水面的水汽, $E > 0$ 。又如当 $\Delta e > 0$,但空气中水汽已饱和($f = 100\%$),则只有当气块接触水面吸收感热,增加温度后(使 $f < 100\%$)才能容纳水面蒸发出的水分子(这时冷水膜现象要加强),而如果这时气块未饱和,则即使气块得不到水面供热和增温也可容纳水面蒸

发出的水分子。这说明相对湿度与感热输送互相联系着给 α 以影响,公式中应考虑无量纲量相对湿度参数

$$f = e_a/e_{ms} \quad (1.16)$$

新疆红雁池资料表明^①, α 随 f 减小而增加,并提出用 $(1-f)^{1/4}$ 对 α 作湿度修正。统计表明,经修订后的计算值与实测值之间的相关系数较未作修正的结果要提高约 0.08。团沱湖漂浮筏 1964—1968 年 6—9 月资料表明,在风速为 3—6 m/s 范围内按风速分档统计中可看到 α 与 f 有负相关(表 4)。由此可见,取相对湿度作无量纲参数对 α 作订正是可取的。

由上述分析可知,除了 W_1, Pv 外, T_{rs}, v, D, B_0, f 等参数对水面蒸发函数 α 有更高层次的细微影响。正确考虑这些参数犹如二级近似,将有助于克服只考虑风速的公式中,经验系数对不同的地区、季节和冷热水有差异的问题,从而提高计算的精度和公式的通用性。

表 4 α 与 f 的相关(团沱湖漂浮筏)
Tab. 4 α versus f . Same as Tab. 2 but in Tuangjiu Lake

W _{1,s} (m/s)	3—3.9		4—4.9		4—4.9		5—4.9		5—5.9		5—5.9		>6	
	r	n	r	n	r	n	r	n	r	n	r	n	r	n
1964 年 6 月	-0.1583	23	-0.7536	4			-0.1595	7						
1965 6	-0.1919	30	-0.2276	5	-1	2	0.1149	16	0.9030	3	-0.2560	5		
1967 6	-0.4514	9			-0.3967	5	0.1776	22			-0.6470	7		
1968 6	-0.6417	14	-0.4220	6	-0.0929	7	0.1561	30	-0.7600	7	-0.4372	12		
1964 7	-0.2772	37	-0.4154	8			0.0096	40	-0.7652	8	-0.2499	14		
1965 7	-0.2216	44	-0.3878	9			-0.0144	42	-0.7422	9	-0.2886	15		
1967 7	-0.1933	47	-0.2906	11			-0.0417	47	-0.6957	12	-0.2947	16		
1964 8	-0.1797	56					-0.0879	53			-0.2486	17		
1968 8	-0.1121	61					-0.0476	54			-0.2047	18		
1967 8							-0.0291	59	-0.6693	15	-0.2108	19		
1964 9							-0.0294	64						
1965 9							-0.0255	67	-0.6888	16	-0.1922	20		
1967 9							-0.0202	72						
1964 年—1968 年 6—9 月					-0.4672	15							-0.4942	4
备 注			$\Delta T_1 < 1 \text{ } ^\circ\text{C}$		$\Delta T_1 = 2-2.9 \text{ } ^\circ\text{C}$				$\Delta T_1 \approx 0 \text{ } ^\circ\text{C}$		$\Delta T_1 = 1-3 \text{ } ^\circ\text{C}$			

* 符号说明同表 2。

2 感热输送和大气饱和度对蒸发影响的修正

实际大气中鲍恩比变化于 $\pm\infty$ 之间,其修正影响 α_0 应是在 1 附近作小量变化。当 $B_0 > 0$

① 白振营、马兰获。红雁池水面散热系数试验成果报告。水电部新疆电力设计院, 1980。

时, $a_b < 1$, 当 $B_0 < 0$ 时, $a_b > 1$, 为此取

$$a_b = 1 - S_b \cdot BB \cdot [1 - \exp(-|B_0|)] \quad (2.1)$$

其中 S_b 为鲍恩比 B_0 的符号; BB 为经验系数, 经统计分析得

$$BB = 0.25 \quad (2.2)$$

与此类似, 相对湿度修正系数可取为在某一参量附近的小量变化

$$a_f = 1 - S_f \cdot ff \cdot [1 - \exp(-|f_1|)] \quad (2.3)$$

$$f_1 = f - f_0, f_0 = 0.75 \quad (2.4)$$

其中 S_f 为 f_1 的符号, ff 为经验系数, 经统计分析确定得

$$ff = 0.50 \quad (2.5)$$

a_f , a_b 的数值分别列于表 5、表 6。

应该指出, B_0 、 f 对 α 的影响是非线性的, 极为复杂。为确定其表达形式, 我们先试用在晋阳湖公式^① [2.5] 中改变原常数系数的办法, 即在

$$\alpha = [\alpha_w + \alpha_r (\alpha_s + Pv)^{1/2}] W_{z_1} \quad (2.6)$$

式中, 将 $\alpha_w W_{z_1}$ 和 $\alpha_r W_{z_1}$ 分别表示为

$$\alpha_w W_{z_1} = \alpha_f^{a_f} \cdot \alpha_b^{a_b} \cdot W_e^{a_w}, \quad \alpha_r W_{z_1} = \alpha_f^{a_r} \cdot \alpha_b^{a_r} \cdot W_e^{a_r}$$

然后用实际资料进行统计分析, 以增加 α 的计算值 α_{ca} 与实测值 α_{mea} 之间的相关和减少他们之间的均方误差为原则, 选取合适的公式结构和综合参数的形式。在采用不同可能形式, 经大量资料统计分析后得到:

$$Pe = (\alpha_f \alpha_b^2)^{1/4} \cdot \alpha_b^{a_r} \quad (2.7)$$

$$\alpha_w = \alpha_1 Pe \quad (2.8)$$

对于 α_r 则不作 B_0 、 f 修正。当 $f \sim 0.75$ 时, Pe 取决于鲍恩比。对于通常的 $\Delta T > 0$ 情形, $Pe < 1$; 对于逆温情形, $Pe > 1$ (感热由大气输向水面, 使 α 偏大)。对于中性层结 $a_b = 1$, $Pe \sim \alpha_f^{1/4}$, 随 f 减小而增大。当有强逆温 $B_0 \ll 0$, $a_b > 1$, 相对湿度低于 $f < 0.75$, $\alpha_f > 1$ 时, $Pe > 1.45$, $f > 0.75$, 或接近于 1, $Pe \ll 1$, α 明显偏小, 我国广州等地湿润地区属于这种情况。

表 5 (Tab. 5) $a_b(B_0) = 1 - \frac{B_0}{|B_0|} \cdot BB \cdot [1 - \exp(-|B_0|)]$

$ B_0 $	0	0.25	0.5	0.75	1	2	3	4	5	6	7	8
$a_b(B_0 \geq 0)$	1	0.945	0.902	0.868	0.842	0.784	0.762	0.755	0.752	0.751	0.750	0.750
$a_b(B_0 \leq 0)$	1	1.055	1.098	1.132	1.158	1.216	1.238	1.245	1.248	1.249	1.250	1.250

表 6 (Tab. 6) $a_f(f_1) = 1 - \frac{f_1}{|f_1|} \cdot ff \cdot [1 - \exp(-|f_1|)]$

f	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9	1.0
f_1	-0.75	-0.65	-0.55	-0.45	-0.35	-0.25	-0.15	-0.05	0	0.05	0.15	0.25
a_f	1.264	1.239	1.212	1.181	1.148	1.111	1.070	1.024	1	0.976	0.930	0.889

① 晋阳湖水面散热试验协作组, 濮培民等. 不稳定温度层结下的水面蒸发和散热. 地理文集, 1981, (5): 58-79.

3 水面蒸发计算公式的结构及其经验系数

3.1 水面蒸发计算公式的扩展和修正

在(2.6)式基础上作如下扩展和修正:

(1) 根据前面的讨论,以 W_e 代替 W_1 ,以 $\alpha_1 Pe$ 代替 α_e .

(2) 常数项修正

考虑到实际大气中,当平均风速为零, $\Delta T_r = 0$ 时由于脉动风速的存在, $\alpha \neq 0$. 故取:

$$\alpha_0 = \alpha_{00} + \alpha_{01} \frac{(g \bar{z}_1 \Delta T_r / T_{r,s})^{1/2}}{1 + \alpha_{02} W_e + \alpha_{03} W_e^2}, \Delta T_r \geq 0 \quad (3.1)$$

(3) 对稳定层结的扩展

在稳定层结下,浮力作用要抑制湍流交换,但另一方面,大气给水面以感热补充,有利于水面蒸发.实际资料表明:在有强迫对流情况下, $\Delta T_r < 0$ 时 α 并不是比 $\Delta T_r = 0$ 时下降,而是有所增加(图2).

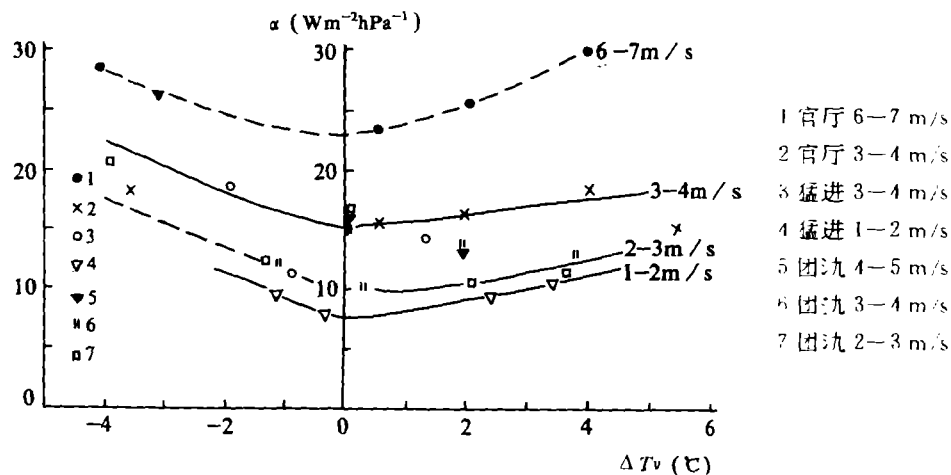


图2 α 在 $\Delta T_r \leq 0$ 时的特点

Tab. 2 Characteristics of α near $\Delta T_r \leq 0$

为反映这种特点,除通过引入 B_0 和 Pe 外,还在 Pe 中把 ΔT_r 项表示为

$$\Delta T_r = \frac{|\Delta T_{r,s}|}{1 + \alpha_{04} \Delta T_{r,s}^2}, \quad \alpha_{04} = \begin{cases} 0 & \Delta T_{r,s} \geq 0 \\ 0.01 & \Delta T_{r,s} < 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

其中 $\Delta T_{r,s} = \Delta T_r / \Delta T_{r,m}$, $\Delta T_{r,m} = 1$ C, 在数值上 $\Delta T_{r,s}$ 与 ΔT_r 一样。

(1) 强迫对流与自由对流的非线性相互作用

在(2.6)式中,只与 W_e 有关的强迫对流项与含有 ΔT_r 的自由对流项之间基本上是线性叠加的.为考虑 a, b 间非线性相互作用的最简单模式是

$$I = (a^2 + b^2)^2 = a + b + 2(ab)^{1/2} \quad (3.3)$$

$$II = (a^2 - b^2)^2 \quad (3.4)$$

显然有 $\partial^2(a+b)/\partial a^2 = 0$, $\partial^2 I/\partial a^2 < 0$, $\partial^2 \text{II}/\partial a^2 > 0$ 。

在从与风速无关的自由对流 ($\partial a/\partial W = 0$) 到强迫对流 ($\partial a/\partial W > 0$) 的过渡区(小风速区), 必然有 $\partial^2 a/\partial W^2 > 0$, 故采用(3.4)式为宜。在大风速区, 由于强迫对流使水面蒸发加剧后, 损失大量蒸发潜热, 加强水面冷水膜, 蒸发过程受到一定抑制, 故 $\partial^2 a/\partial W^2 < 0$ 。在这个区域宜采用(3.3)式。

为使模式在 W_1 宽广范围内更符合实际, 采用 I、II 公式加权相加的办法, 取

$$a = \alpha_1 (1 - \exp(-m_4 W_{1a})) + \alpha_2 \exp(-m_4 W_{1a}) \quad (3.5)$$

资料表明, 取 $W_1 = 1.5 \text{ m/s}$ 时二个方案各占一半比重, 即

$$\exp(-m_4 W_{1a}) \Big|_{W_1=1.5} = 0.5 \quad (3.6)$$

较合适。由此

$$m_4 = 0.46 \quad (3.7)$$

3.2 水面蒸发风速函数的计算公式

综上所述, 把水面蒸发风速函数表示为

$$a = \alpha_1 (1 - \exp(-m_4 W_{1a})) + \alpha_2 \exp(-m_4 W_{1a}) \quad (3.8)$$

$$\alpha_1 = \alpha_0 + A + B + 2(AB)^{1/2} \quad (3.9)$$

$$A = \alpha_1 Pe W_e \quad (3.10)$$

$$W_e = W_{1a}/(v_s T_{1a}) \quad (3.11)$$

$$Pe = (\alpha_f \alpha_b^2)^{1/4} \cdot \alpha_b^{\alpha_f} \quad (3.12)$$

$$\alpha_b = 1 - S_b \cdot BB \cdot [1 - \exp(-|B_0|)] \quad (3.13)$$

$$\alpha_f = 1 - S_f \cdot ff \cdot [1 - \exp(-|f_1|)] \quad (3.14)$$

$$B = \alpha_2 (\alpha_2 W_e^2 + Pr W_e^2)^{1/2} \quad (3.15)$$

$$Pr W_e^2 = P_{vr}/(v_s T_{1a})^2 \quad (3.16)$$

$$P_{vr} = gH \Delta T_{1a} / [(1 + \alpha_{04} \Delta T_{1a}^2) W_{100}^2] \quad (3.17)$$

$$\Delta T_{1a} = \Delta T_v / [(T_{vr} + T_{1a}) / 2] \quad (3.18)$$

$$\alpha_0 = \alpha_{00} + \alpha_{01} (P_{vr})^{1/2} / (1 + \alpha_{02} W_e + \alpha_{03} W_e^2) \quad (3.19)$$

$$\alpha_2 = [\alpha_{02} + \alpha_{03} Pe W_e^2 + \alpha_{04} \Delta T_{1a}^2 / (1 + \alpha_{04} \Delta T_{1a}^2)]^{1/2} \quad (3.20)$$

有关符号说明见附表 1。

顺便指出, 在 α_1 (大风区) 中, “有效风速” $W_e = W_{1a}/(v_s T_{1a})$ 与温度成反比, 而在 α_2 (小风区) 中取 $W_e = W_{1a}(D_s/v_s)$, 说明在自由对流时, 近水面的分子扩散过程对水面蒸发有更明显的作用, 而在大风速时则空气分子的粘滞性和热传导对蒸发的抑制作用更明显。

公式中的各参数是根据计算值与实测值有最小均方差和有较好的相关性等原则试算选定的。公式经分布于全国各主要气候区 12 个站, 包括野外和实验室共 1860 组资料检验, 精度高于现有其他公式。其简化公式为(详见本文之(二)):

$$\alpha_1 = [0.027 + 0.0156 W_e^2 + 0.0025 \Delta T / (1 + \alpha_{04} \Delta T^2)]^{1/2} \quad \text{mm/d/hPa} \quad (4.1)$$

$$\text{或 } \alpha_1 = [22.0 + 12.5 W_e^2 + 2.0 \Delta T / (1 + \alpha_{04} \Delta T^2)]^{1/2} \quad \text{W/m}^2/\text{hPa} \quad (4.2)$$

参 考 文 献

- 1 濮培民. 影响水面蒸发诸因素的分析与蒸发量的折算. 中国科学院南京地理研究所集刊. 北京: 科学出版社, 1984, 2: 1—13.
- 2 濮培民等. 晋阳湖水面散热系数公式初步探讨. 见: 第二次中国海洋湖沼科学会议文集. 北京: 科学出版社, 1983: 84—93.
- 3 濮培民等. 极端不稳定温度层结下的水面蒸发. 见: 中国海洋湖沼学会水文气象学会学术会议(1980)论文集. 北京: 科学出版社, 1982: 49—60.
- 4 濮培民. 热水水面的蒸发和散热. 见: 海洋湖沼研究文集. 南京: 江苏科技出版社, 1986: 54—60.
- 5 濮培民. 大气近地面层中不同温度层结下的湍流运动. 气象学报, 1964, 34(2): 211—224.
- 6 濮培民. 水面散热系数的测定和计算问题. 见: 第二次中国海洋湖沼科学会议论文集. 北京: 科学出版社, 1983: 127—128.
- 7 施成熙等. 确定水面蒸发模型. 地理科学, 1984, 4(1).
- 8 Adams, E. E., Cosler, D. J., Hetch, K. R., Evaporation from heated water bodies; predicting combined forced pulse free convection. *Water Resources Research*, 1990, 26(3), 425—435.
- 9 Bowen, I. S., The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from air water surface. *Phys. Rev.*, 1926, 27: 779.
- 10 Kondo, J., Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions. *Boundary-layer Meteorology*, 1975, 9: 91—112.
- 11 Pu, P., Yan, X., Xu, A., Evaporation and heat loss from warm water surface. In: *Resources Management in the Developing Countries of Asia and Pacific*, 1982: 71.
- 12 Ryan, P. J., Harleman, D. R. F., et al., Surface heat loss from cooling ponds. *Water Resources Research*, 1974, 10(5): 930—938.
- 13 Brutsaert, W., *Evaporation into the atmosphere; theory, history and applications*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Boston, London, 1980.
- 14 Пета, Р. П., Применени теория подбоя к расчету испарения с водной поверхности. М. и П., 1979, 2: 88—95.
- 15 Браславский, А. П., Пуркальев С. П., Новая формула расчета испарения с учетом разности между водой и воздухом. Проблемы гидрочерезмерки и водного хозяйства, 1966, вып. 4: 195—206.

附表 I 符号说明
Attached Tab. I List of symbols

$a_1 = 0.0147$	$m = 0.46$	$\alpha_{01} = 1.7$
A_w 水域面积(km ²)	P 大气压(hPa)	$\alpha_{01} = \begin{cases} 0 & \Delta T_s \geq 0 \\ 0.01 & \Delta T_s < 0 \end{cases}$
$b = \frac{P}{0.623 L} C_p$ 鲍恩比系数	q 比湿	$\alpha_{002} = 0.0277 \text{ (mm/d/hPa)}^2$
$B_0 = b(\Delta T / \Delta e)$ 鲍恩比	q' 比湿的脉动值	$= 22.09 \text{ (W/m}^2/\text{hPa)}^2$
$BB = 0.25$	R 通用气体常数	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.05 \text{ mm/d/hPa}$
$C_p = 1.005 \text{ J/g/K}$	Re 雷诺数	$= 1.412 \text{ W/m}^2/\text{hPa}$
空气定压比热	Ri 理查逊数	$\alpha_{12} = 0.0165 \text{ (mm/d/hPa)}^2$
$D = E_1(E_2 + T)$	$S_n = B_0 / B_0 $ B_0 的符号	$= 13.16 \text{ (W/m}^2/\text{hPa)}^2$
空气分子扩散系数	$S_f = f_1 / f_1 $ f_1 的符号	$\alpha_{22} = 0.0265 \text{ (mm/d/hPa)}^2$
$D_{00} = D _{r=r_{00}}$	T 温度(°C)	$= 21.13 \text{ (W/m}^2/\text{hPa)}^2$
$D_s = D _{r=r_s}$	$T_{00} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 参照温度	α_{cal} a 的计算值
$D_w = D_w / D_{00}$	T_s H 高处气温	α_{mea} a 的实测值
e 水汽压(hPa)	T_w 水面温度	$\gamma_T = 4e\sigma T_s^2$
e_s H 高处水汽压	T_∞ 自然水面温度	$\Delta e = e_s - e_w$
e_m 饱和水汽压	T_s 绝对温度(K)	$\Delta K = (\Delta e + b\Delta T)(\partial a / \partial T_s)$
$e_{ms} = e_m _{r=r_s}$	T_w 绝对水面温度	$\Delta T = T_s - T_w$
$e_s = e_m _{r=r_s}$	$T_v = \frac{T + 273}{1 - 0.378 e/P}$ 虚温(K)	$\Delta T_{00} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$
E 蒸发率(mm/d) 或蒸发潜热能量(W/m ²)	$T_{w00} = T_w _{r=r_{00}}$	$\Delta T_s = (T_s - T_w) / \Delta T_{00}$
$E_1 = 1.2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s/K}$	$T_{ws} = T_w _{r=r_s}$	$\Delta T_{s2} = \Delta T_s / T_{ws}$
$E_2 = 183.3 \text{ K}$	$T_{ws} = T_{ws} / T_{w00}$ 无量纲虚温	$\Delta T_s = T_{ws} - T_{w00}$
$E_3 = 9 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s/K}$	v^* 动力速度(m/s)	$\epsilon = 0.79$ 水面长波灰体辐射系数
$E_4 = 147.6 \text{ K}$	W_1 H 高处风速(m/s)	$\kappa = 0.4$ 卡曼常数
$f = e/e_m$ 相对湿度	$W_{100} = 1 \text{ m/s}$	$\nu = E_3(E_4 + T)$ 运动粘滞系数
$f_0 = 0.75$	$W_{1s} = W_1 / W_{100}$	$\nu_{00} = \nu _{r=r_{00}}$
$f_1 = f - f_0$	W' H 高处风速脉动值	$\nu_s = \nu _{r=r_s}$
$ff = 0.5$	$W_e = W_{1s} / (\nu_s T_{ws})$ 蒸发有效风速	$\nu_w = \nu_w / \nu_{00}$
$g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 重力加速度	$W_{e2} = W_{1s} (D_s / \nu_s)$	ρ 空气密度
$H = 1.5$ (或 2) m 温湿风观测高度	W_z z (m) 高处风速(m/s)	$\sigma = 5.67051 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$
k 湍流系数	z 垂直座标	斯蒂芬-波尔茨曼常数
$k_T = \partial e_m / \partial T_s$	z_0 下垫面粗糙度	ϕ 直径(cm)
$K = \frac{\phi_L(T_s) - \phi_L(T_\infty)}{T_s - T_\infty}$	z_1 离地面某地参照高度(m)	ϕ_c 感热通量
$= \alpha(k_T + \delta) + \gamma_T + \Delta K$	$\alpha = E / \lambda e$ 蒸发风速函数	ϕ_L 潜热通量
散热系数	$\alpha_{00} = \alpha_{01} = 0.115 \text{ mm/d/hPa}$	ϕ_L 向上热通量
$L = 2500 - 2.39T \text{ J/g}$	$= 3.248 \text{ W/m}^2/\text{hPa}$	ϕ_s 水面向上长波辐射通量
水的蒸发潜热	$\alpha_{02} = 2$	ϕ_w 大气向水面的长波辐射通量
		$1 \text{ mm/d/hPa} = 28.24 \text{ W/m}^2/\text{hPa}$

STUDIES ON THE FORMULAE FOR CALCULATING EVAPORATION AND HEAT LOSS COEFFICIENT FROM WATER SURFACE IN CHINA (I)^{*}

Pu Peimin

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

Abstract

According to the abundant data collected in field and laboratory experiments by the State Collaboration Research Group on Evaporation and Heat Loss from Water Surface since 1976 and a number of historical data observed in hydrological stations in the typical regions in China, the elements influencing evaporation from water surface and the nonlinear interactions between them are determined, new non-dimensional parameters (W' , P_v , P_e) and new structure of the formulae are recommended. The constant coefficients in the formulae are determined based on the statistical analysis on measured data. The formulae for calculating daily evaporation and heat loss coefficient from water surface by using the data of regular hydrometeorological elements (water temperature; air temperature, vapour pressure; wind speed and atmospheric pressure) have been obtained. The formulae were tested by 1860 group data collected from both natural lakes (reservoirs) and thermal polluted water bodies during various seasons in different climate regions of China, and from laboratory experimental data as well. It is shown that the accuracy of these suggested formulae is higher than that of other existing formulae.

The paper consists of two parts. This is the first part, which includes the main non-dimensional parameters influencing the evaporation from water surface, revision of sensible heat flux and atmospheric saturation state on evaporation, structure of the formulae and their empirical constants.

Key Words Evaporation from water surface, evaporation formula, heat loss coefficient from water surface

^{*} Supported by the Ministry of Water Conservancy and Electricity (MWCE) as a key research project (No. 1211) in Development Plan of Hydraulic-Electric Sciences of MWCE during 1978—1985). The research project was accomplished by "National Coordination Group of Heat Loss Coefficient from Water Surface in China", including the following institutions (members): Cooling Water Research Institute, Academy of Water Conservancy and Hydroelectricity, Ministry of Water Conservancy and Electricity & Chinese Academy of Sciences (Chen Huiquan, He Shuehun, Liu Changgui, Zhang Siqun); Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences (Pu Peimin, Xu Aizhen, Yin Jinnan); Institute of Water Conservancy, Anhui Province (Mao Shumin, Chen Liye, Wang Xuegong); Design and Planning Institute of Electricity in East China (Wang Weixing, Chen Lian); in Shangdong (Wang Wei, Mao Kai, Cheng Weizeng); in Shanxi (Yan Xuanwei, Hu Yuman); in Xinjiang (Bai Zhenyun, Ma Lanhua); in Northeast China (Dai Feng, Zhao Rui); in North China (Li Yuedong, Zhao Guo), Ministry of Energy; and Institute of Water Conservancy and Hydroelectricity, Guangdong Province (Wu Chueai, Lu Yaoyao).