

水面蒸发与散热系数公式研究(二)

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和公式结构, 用实测资料统计确定了公式中的常数, 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, 本文刊出第二部分, 内容包括: 公式的检验; 水文气象要素对 α 的影响; 水面散热系数的计算和结语。

关键词 水面蒸发 蒸发公式 水面散热系数

1 公式的检验

除采用全国水面散热系数协作组在杭州艮山门(GS)、山西晋阳湖(JY)、山东微山湖(WS)、新疆红雁池(HY)和猛进水库(MZ)、东北开嘎利水库(HG)、北京实验室(LAB)等室内外资料外, 还采用了东北营盘大伏房水库(YP)、北京官厅水库(GT)、浙江新安江水库(XA)、中国科学院南京地理与湖泊研究所宜兴湖泊实验站(YX)和广州(GZ)等地分布于全国各主要气候带内的自然水面漂浮筏, 包括各季节的资料和实验室资料检验了本文公式。

取各湖泊(水库)开敞水面漂浮 E_{601} 资料乘以0.89^[1]为该地湖面蒸发量。该地的 T_a , W_1 , T_s , e_s , P 实测资料为计算依据。对其他漂浮蒸发器蒸发量的修正根据[1], 对 3 m^2 池为 $0.89 \times 1.08 = 0.96$, 微山湖 $64 \times 40 \times 50\text{ cm}$ ($L \times W \times H$) 铜皿, 为 $0.89 \times 0.90 = 0.80$, 满足水平均匀定常条件的北京水槽—风洞实验资料则不作修正。近岸蒸发器受陆地地形和地面粗糙度增加气流扰动的影响, 蒸发量比敞水区大, 根据测点离岸距离, 陆面情况和短期对比, 对艮山门河道型小水体上取地形修正系数0.8; 微山湖有浮水植物水面, 取0.85, 红雁池有陡岸取0.75。应该指出, 本文公式计算结果与水平均匀定常实验室资料及开敞水面漂浮筏 E_{601} 蒸发量乘以0.89结果的一致性, 说明这种折算处理是合理的。

检验结果列于表1。表中各站第一行及V为本文建议的综合公式的结果, I、II分别为综合公式中第I、第II部分的结果; 第二、第三行分别为修正的北京实验室公式(方案III见4.1式)和施成熙公式(方案IV见表1)的结果。

• 水面蒸发与散热系数公式研究(一)载于《湖泊科学》, 1994年4(1): 1—12。
收稿日期: 1991年11月19日; 接受日期: 1993年3月9日。

表1 蒸发风速函数计算值 α_{cal} 与观测值 α_{mes} 的比较*Tab. 1 Comparison between α_{cal} and α_{mes}

	N_c	N_r	X_{cal}	Y_{mes}	σ_x	σ_y	R_{xy}	a	b	σ	D_{sym}
LAB	97	0	0.310	0.308	0.066	0.081	0.958	-0.056	1.174	0.026	0.002
		0	0.311	0.308	0.083	0.081	0.966	0.013	0.947	0.022	0.003
		0	0.288	0.308	0.060	0.081	0.784	0.002	1.065	0.054	-0.020
GS	148	0	0.273	0.267	0.041	0.049	0.761	0.020	0.906	0.033	0.006
		0	0.266	0.267	0.045	0.049	0.769	0.045	0.836	0.032	-0.001
		0	0.277	0.267	0.038	0.049	0.807	-0.022	1.041	0.031	0.010
HG	36	0	0.420	0.423	0.077	0.069	0.986	0.053	0.881	0.015	-0.003
		0	0.439	0.432	0.101	0.069	0.995	0.126	0.687	0.037	0.015
		0	0.442	0.423	0.102	0.069	0.997	0.124	0.677	0.038	0.019
HY	177	3	0.440	0.450	0.131	0.134	0.880	0.055	0.892	0.066	-0.010
		5	0.443	0.450	0.161	0.134	0.874	0.128	0.724	0.079	-0.007
MZ		5	0.455	0.450	0.156	0.134	0.871	0.110	0.747	0.077	0.005
		5	0.455	0.450	0.156	0.134	0.871	0.110	0.747	0.077	0.005
WS	203	1	0.412	0.403	0.074	0.096	0.589	0.088	0.765	0.080	0.009
		5	0.448	0.403	0.101	0.096	0.536	0.175	0.509	0.105	0.045
		5	0.458	0.403	0.100	0.096	0.546	0.162	0.527	0.108	0.055
JY	364	3	0.365	0.064	0.062	0.084	0.504	0.115	0.693	0.075	0.001
		5	0.360	0.364	0.073	0.483	0.166	0.552	0.552	0.081	-0.004
		4	0.367	0.364	0.073	0.084	0.417	0.189	0.477	0.085	0.002
GT	192	4	0.414	0.423	0.163	0.122	0.790	0.180	0.589	0.101	-0.009
		10	0.424	0.423	0.183	0.122	0.683	0.230	0.455	0.133	0.001
		11	0.445	0.423	0.174	0.122	0.683	0.211	0.477	0.129	0.021
GZ	117	0	0.381	0.413	0.126	0.118	0.754	0.144	0.707	0.092	-0.032
		4	0.392	0.413	0.152	0.118	0.696	0.202	0.540	0.112	-0.021
		4	0.412	0.413	0.144	0.118	0.694	0.179	0.569	0.105	-0.001
XA	245	9	0.363	0.372	0.111	0.111	0.732	0.107	0.732	0.082	-0.009
		15	0.373	0.372	0.135	0.111	0.686	0.161	0.565	0.100	0.001
		16	0.393	0.372	0.127	0.111	0.673	0.140	0.592	0.099	0.021
YP	172	0	0.359	0.358	0.097	0.109	0.626	0.098	0.705	0.090	0.011
		4	0.363	0.358	0.093	0.109	0.526	0.135	0.616	0.099	0.005
		4	0.380	0.358	0.088	0.109	0.513	0.116	0.636	0.101	0.022
YX	109	2	0.404	0.393	0.106	0.116	0.807	0.039	0.881	0.070	0.009
		5	0.436	0.395	0.143	0.116	0.797	0.114	0.645	0.096	0.041
		6	0.456	0.395	0.137	0.116	0.796	0.087	0.674	0.103	0.061
V	1860	22	0.377	0.379	0.109	0.112	0.761	0.085	0.781	0.076	-0.002
		50	0.384	0.379	0.132	0.112	0.731	0.141	0.621	0.091	0.005
N		51	0.398	0.380	0.131	0.111	0.685	0.148	0.582	0.099	0.019
I	1860	46	0.380	0.380	0.124	0.109	0.760	0.126	0.669	0.082	0.000
■		51	0.378	0.380	0.121	0.109	0.734	0.131	0.660	0.085	-0.002
N		51	0.391	0.380	0.118	0.109	0.729	0.117	0.673	0.085	0.011

* N_c, N_r 分别为资料总数及 $|\alpha_{cal} - \alpha_{mes}| > 0.25 \text{ mm/d/hPa}$ 的次数; $X_{cal}, Y_{mes}, \sigma_x, \sigma_y$ 分别为 $\alpha_{cal}, \alpha_{mes}$ 的平均值和均方差; R_{xy}, a, b 为 $\alpha_{cal}, \alpha_{mes}$ 的相关系数和回归系数; σ 为 $\Delta\alpha$ 的均方差; D_{sym} 为 $\alpha_{cal}, \alpha_{mes}$ 平均值之差。

结果表明, $a \sim W$ 线性公式可反映各地 a, W 的基本关系, 但其计算精度低于本文公式且其中的回归系数有明显的地区性、季节性差异。施成熙公式是统计全国资料后得到的“平

方-平方根”公式。它在小风速区略偏小,能反映 $\partial^2\alpha/\partial W^2 > 0$ 的特点,但没有反映温度层结的作用,在大风时偏大,平均值也偏大。北京实验室公式考虑了温度层结的作用,有更高的精度(表1)。为使该公式能适用于稳定层结和提高计算精度(表2),对 ΔT 项作如下修正:

$$|\Delta T|/(1 + \alpha_{04}\Delta T^2), \alpha_{04} = 0(\Delta T \geq 0), \text{或 } 0.01(\Delta T < 0)$$

$$\text{得 } \alpha_{\text{II}} = [0.027 + 0.0156W_1^2 + 0.0025|\Delta T|/(1 + \alpha_{04}\Delta T^2)]^{1/2} \text{ mm/d/hPa} \quad (1)$$

$$\text{或 } \alpha_{\text{II}} = [22.0 + 12.5W_1^2 + 2.0|\Delta T|/(1 + \alpha_{04}\Delta T^2)]^{1/2} \text{ W/m}^2/\text{hPa} \quad (2)$$

由表1可见,本文建议公式给出的 α 计算值(α_{II})更接近于观测值(α_{obs}),表现为1860组资料中 $\Delta\alpha = |\alpha_{\text{II}} - \alpha_{\text{obs}}| > 0.25 \text{ mm/d/hPa}$ 的次数比方案 III、IV 要少得多,前者为22次,后者为50和51次。 α_{II} , α_{obs} 的相关系数则分别为0.761, 0.731和0.722,均方差分别为0.076, 0.091和0.092 mm/d/hPa,均值误差分别为-0.002, 0.005和0.017 mm/d/hPa,本文建议公式比后二者约减少相对误差3%—7%。就各站点而言,除个别河道、池塘以外一般也是本文公式计算值明显地更接近于实测值(图1)。

表2 北京实验室公式原方案(a)与对稳定层结的修正方案(b)的比较

Tab. 1 Comparison between former (a) and revised (b) schemes

站名	方案	N_e	N_w	R_{xy}	SD	D_{err}
GT	a	192	10	0.622	0.125	-0.010
	b	192	10	0.668	0.123	-0.008
GZ	a	117	5	0.743	0.097	-0.027
	b	117	5	0.746	0.096	-0.027
HY	a	177	4	0.835	0.078	-0.029
MZ	b	177	4	0.842	0.075	-0.024
XA	a	245	15	0.713	0.092	-0.005
	b	245	15	0.712	0.092	-0.005
YP	a	172	4	0.544	0.096	0.006
	b		4	0.550	0.095	0.007
YX	a	109	5	0.839	0.081	0.032
	b		5	0.884	0.081	0.033
全部	a	1860	50	0.733	0.085	-0.001
	b		50	0.738	0.085	-0.000

用我国上述资料检验了美国由 R-H 公式发展而来的 Adams 公式([7]中表1, [11]), 它有系统性偏差,对我国情况需作修正后才能应用。表1上列出的苏联公式也与我国实测资料相差较大,难以在我国应用。图1上标明了北京实验室资料[9]与公式(实线)及本文公式(虚线)和 Adams 公式(波纹线)的比较。从图上可见本文公式能更好拟合实测资料,特别是在 $\Delta T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, 风速大于 1 m/s 的区域,原实验室公式偏大,而本文公式则较符合观测值。Adams 公式在水—气温差大时对于风速 1 m/s 以下的情况计算值偏低,而对于大风速则偏高。在 $\Delta T \approx 0$ 或 ΔT 较小的情况下,Adams 公式给出偏低的值。

值得指出,本文综合公式第二部分,即第 II 方案的形式与北京实验室公式(III 方案)是相同的,很有意思的是 II 方案中的常数平均值与 III 方案一致。

为此对比 II、III 方案的统计结果是很有意思的。在1860组资料中, II、III 方案 a 的计算值 α_{II} 与实测值 α_{obs} 的误差 $|\Delta\alpha| > 0.25 \text{ mm/d/hPa}$ 的分别有46和51次(减少10%),相关系数为

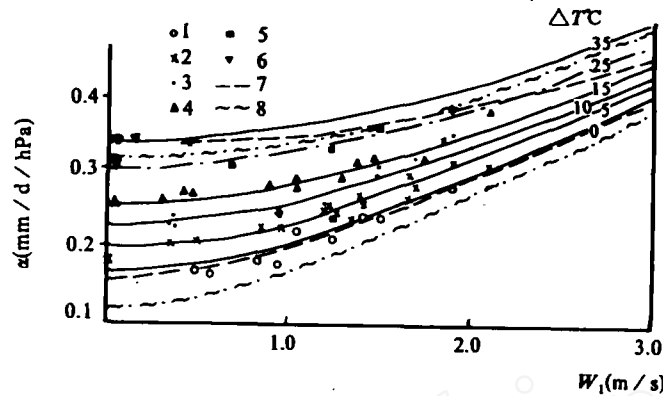


图1. $\alpha \sim (\Delta T, W_1)$ 的关系

1—6: 北京实验室 $f = 0.55 - 0.9$, ΔT 分别为的, 5, 10, 15, 25, 35, $^{\circ}\text{C}$, 实线为公式(1)计算值

7: 本文公式, $f = 0.7$, $P = 1000 \text{ hPa}$, $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$ ($T_s = 25^{\circ}\text{C}$)及 $\Delta T = 35^{\circ}\text{C}$ ($T_s = 45^{\circ}\text{C}$)

8: R-H-A 公式, 波纹线, $\Delta T_s = 9^{\circ}\text{C}$, 37°C , 约相当于 $\Delta T = 0, 35^{\circ}\text{C}$

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

0.760和0.734 (提高3.5%), α 均方差分别为0.082和0.085 mm/d/hPa (减少3.6%), α 平均值误差为0.000和-0.002. 这说明所有指标 III 方案均优于 II 方案, 也这说明本文公式中所取的参数和公式结构形式是合理的, 在原来考虑 $W_1, \Delta T$ 基础上又前进了一步, 比较合理地考虑了近水面温度、湿度和鲍温比的高阶影响, 扩大了公式对多种自然条件的适用性, 以更好地适用于全国. III 方案是本文公式的简化, 它简洁和便于应用.

2 水文气象要素对 α 的影响

根据[8]、(3.8)式计算的结果简要地汇总在表3上. 图2给出了不同 T_s, P 和 f 条件下 α 随 W_1 和 ΔT 的变化的几个理论计算实例.

从表3和图2可见, 其他条件不变时, α 随风速增大而加大, 比线性关系要复杂得多. 在 $W_1 < 0.5 \text{ m/s}$ 时, α 与 W_1 基本无关, 主要决定于自由对流热力不稳定因素, 与 $\Delta T^{1/2}$ 成正比; 在 $0.5 - 2 \text{ m/s}$ 区, 有 $\partial^2 \alpha / \partial W^2 > 0$ 的特点, 这是以自由对流为主向强迫对流过渡的区域; 在 $2 - 4 \text{ m/s}$ 时具有线性变化特点, 是以强迫对流为主的区域; $W_1 > 5 \text{ m/s}$ 的大风速时 $\partial^2 \alpha / \partial W^2 < 0$, 这是蒸发散热使水面失热, 冷水膜加强, 传热过程抑制蒸发过程的区域.

水—气温差对 α 有显著影响, 不可忽略. 尤其在小风速区, 影响随风速增大而减小, 使图形呈“扫帚”状. 水面温度愈低, “扫把”收缩越快, 并可以出现“剪刀差”, 即 α 随 ΔT 增大反而减小, 或者冷水时 α 随 W_1 增加快, 热水时随 W_1 增加慢, 二条线可以相交. 相交点在 4 m/s 以上.

在 ΔT 等参数不变条件下, 水面温度 T_s 的增加将抑制水面蒸发, 其减少则使 α 增加. T_s 由 15°C 减至 5°C 时, α 增加 $1\% - 4\%$; 在中性和逆温时, α 将增加 $6\% - 8\%$; 当 T_s 由 45°C 减至 35°C 时, α 的变化更大, 一般情况下有 $1\% - 5\%$, 在中性及逆温时可达 $6\% - 12\%$ (表略). 当

表3 水文气象要素对 α 的影响Tab. 3 Influences of hydrometeorological elements on α

W (m/s)	P (hPa)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	$f=0.9$			$f=0.7$			$f=0.5$		
			$T_s=45^{\circ}\text{C}$	$T_s=25^{\circ}\text{C}$	$T_s=5^{\circ}\text{C}$	$T_s=45^{\circ}\text{C}$	$T_s=25^{\circ}\text{C}$	$T_s=5^{\circ}\text{C}$	$T_s=45^{\circ}\text{C}$	$T_s=25^{\circ}\text{C}$	$T_s=5^{\circ}\text{C}$
1	1000	-5	65.2	67.4	69.5	65.9	73.7	81.3	61.9	70.2	79.8
		0	57.6	59.2	62.2	60.2	61.1	63.3	62.0	62.4	64.3
		10	67.3	69.4	71.5	68.5	70.3	72.5	69.5	71.1	73.3
		15	80.0	82.7	85.5	80.6	83.1	85.7	81.1	83.5	86.0
		35	98.2	101.8	106.1	98.5	102.0	106.1	98.8	102.1	106.1
	700	-5	65.7	68.0	70.3	64.9	72.8	81.3	63.1	69.3	78.7
		0	58.1	59.6	62.3	61.1	61.7	63.7	63.1	63.2	64.8
		10	67.9	70.0	72.4	69.2	71.0	73.4	70.4	71.8	74.2
		15	80.6	83.3	86.3	81.2	83.8	86.7	81.9	84.3	87.0
		35	98.7	102.5	106.6	99.0	102.7	106.7	99.3	102.9	106.7
	500	-5	66.1	68.6	71.1	63.7	71.9	81.2	65.2	69.2	77.6
		0	58.7	60.0	62.5	62.1	62.4	64.2	64.3	64.2	65.4
		10	66.4	70.5	73.1	70.0	71.6	74.1	71.4	72.5	75.0
		15	81.1	83.9	87.1	81.9	84.5	87.6	82.6	84.9	87.9
		35	99.9	103.1	107.3	99.4	103.3	107.4	99.7	103.6	107.5
3	1000	-5	102.2	110.7	117.8	108.6	136.2	163.1	101.3	124.5	157.9
		0	97.5	108.4	122.9	102.1	111.4	125.1	105.7	114.0	127.0
		10	105.5	114.1	121.1	108.6	117.2	124.6	111.1	119.6	127.5
		15	115.4	124.0	131.2	117.2	124.7	132.2	118.8	127.1	133.1
		35	127.5	136.3	145.8	128.6	137.0	145.9	129.5	137.5	145.8
	700	-5	103.1	112.7	120.9	105.6	133.0	163.0	101.0	121.6	153.7
		0	97.7	108.5	123.0	103.2	112.1	125.4	107.3	115.1	127.6
		10	106.5	115.8	124.2	109.8	118.9	127.8	112.7	121.3	130.7
		15	116.7	126.3	134.3	118.6	128.0	135.7	120.4	129.6	136.9
		35	129.0	139.0	148.0	130.1	139.9	148.2	131.1	140.6	148.3
	500	-5	103.6	114.3	123.8	102.5	129.6	162.8	103.4	118.8	149.9
		0	97.8	108.6	123.0	104.2	112.9	125.8	108.9	116.4	128.2
		10	107.3	117.2	127.0	111.0	120.3	130.5	114.1	122.9	133.2
		15	117.7	128.1	137.5	119.8	129.9	139.1	121.7	131.6	140.5
		35	130.0	141.3	150.8	131.2	142.3	151.2	132.3	143.2	151.5
7	1000	-5	174.2	192.8	208.6	191.7	253.9	315.3	182.4	228.5	303.5
		0	174.2	203.6	240.7	179.2	207.7	244.7	183.6	211.3	248.2
		10	177.3	199.2	215.1	182.4	205.4	223.0	186.6	210.2	229.4
		15	185.1	205.0	219.1	188.7	208.5	221.3	191.8	211.7	223.4
		35	194.8	212.5	229.7	197.1	214.1	229.7	199.1	215.4	229.5
	700	-5	173.0	196.7	215.4	185.5	246.4	314.9	179.5	223.0	294.0
		0	172.6	203.0	240.5	178.5	207.5	244.7	183.6	211.5	243.8
		10	177.6	202.2	222.0	182.9	208.0	229.9	187.3	212.6	236.1
		15	186.4	209.3	226.0	190.0	213.0	229.0	193.3	216.3	231.6
		35	196.8	218.2	234.4	199.3	220.2	234.8	201.4	221.9	235.0
	500	-5	172.5	199.4	221.7	179.4	238.5	314.4	178.4	218.0	285.2
		0	170.5	202.2	240.2	177.4	207.2	244.6	183.4	211.7	248.4
		10	177.1	204.1	227.9	182.7	209.8	235.5	187.5	214.4	241.4
		15	186.7	212.5	232.9	190.5	216.3	236.3	193.9	219.7	239.3
		35	197.6	222.7	240.5	200.2	225.0	241.4	202.5	227.0	242.0

T , 小, 有强逆温时, $B_0 < 0$ 而 $|B_0|$ 很大, 可以大大加强 α , 使 α 随风速增大而迅速加大。这与我国北方一些水库资料观测结果一致。

α 与相对湿度 f 一般有负相关, 在逆温时则视具体条件配置而定, 可正、可负; 但其绝对变化则较大。 f 每减少 20%, α 一般可增加 1%—3%。气压的下降(高山地区)一般可使 α 增加, 当 P 由 1000 hPa 降到 700 hPa 时, α 一般可增加 1%—3%, 逆温时则下降 2%—3%。

应该指出, 有些要素作为单项因素来说, 对 α 的影响只百分之几, 但综合起来和在不同配置下, 则可造成较大误差。特别是以全国、全年, 自然水面和受热污染水面等多种条件, 除了考虑 $W_1, \Delta T$ 外, 充分考虑 T_s, f, P 的作用是非常必要的。尤其对于计算水面散热系数来说更有其重要性。因为后者不仅与 α 值有关, 而且与 $\partial\alpha/\partial T_s$ 有关(参见下节)。

3 水面散热系数的计算

散热系数 K 是计算水面冷却能力和水体对热污染的自净能力的基本参数; 直接影响电厂规划装机容量、工程布置和环境评价的确定。它定义为水面温度 T , 平均变化 1℃ 时水面总散热通量 $q_L(T_s)$ 的改变量, 即:

$$K = [q_L(T_s) - q_L(T_\infty)]/[T_s - T_\infty] \approx \partial L/\partial T_s \quad (3)$$

式中 T_∞ 为热水注入前的自然水面温度, q_L 中包括潜热 q_e 、感热 q_r 和长波辐射通量 q_r 三项。

$$q_L = q_e + q_r + q_r \quad (4)$$

q_e 可由长波辐射仪或辐射平衡仪直接测定或按半经验公式计算。 q_r , q_r 可用脉动相关仪直接测定, 或用温、湿、风的梯度观测资料由半经验理论算得, 或由蒸发量算得 q_e 和蒸发散热风速函数 $\alpha = q_e/\Delta e$, 并由鲍恩比求得 q_r 。这就是常用的水文气象方法。当 α 用 $W/m^2/hPa$ 表示时, 所求得的 E 等于 q_e 。当求出 q_L 中各项与 T_s 的关系后, 就可根据(3)求得 K [6]:

$$K = \alpha(k_r + b) + \gamma_r + \Delta K \quad (5)$$

$$\Delta K = (\Delta e + b\Delta T)(\partial\alpha/\partial T_s) \quad (6)$$

这里 $k_r = \partial e_r/\partial T_s$, $\gamma_r = 4\sigma e T_s^3$, 问题的复杂性是确定 α 及 $\partial\alpha/\partial T_s$ 。

测定和计算 K 的其他方法可参见[6]。(5)式是在忽略热水对近水面大气的温度和湿度的反馈影响后得到的。一般热水可使 T_1, e_1 略增(参见[10]), 因此, 实际冷却池上的散热系数将比用热水入池前的气象条件计算得的值要小些。其修正应另行讨论, 可参见[10]。

应该指出, 计算 α 的公式是否能正确反映各水文气象要素对 α 的影响极为重要, 因为问题不仅是要通过它计算 α , 而且要计算 $\partial\alpha/\partial T_s$, 如果说有的公式在计算 α 时误差不一定大, 但在计算 K 值时就可能有很大误差。 ΔK 在水面蒸发和感热散热中所占的比例为:

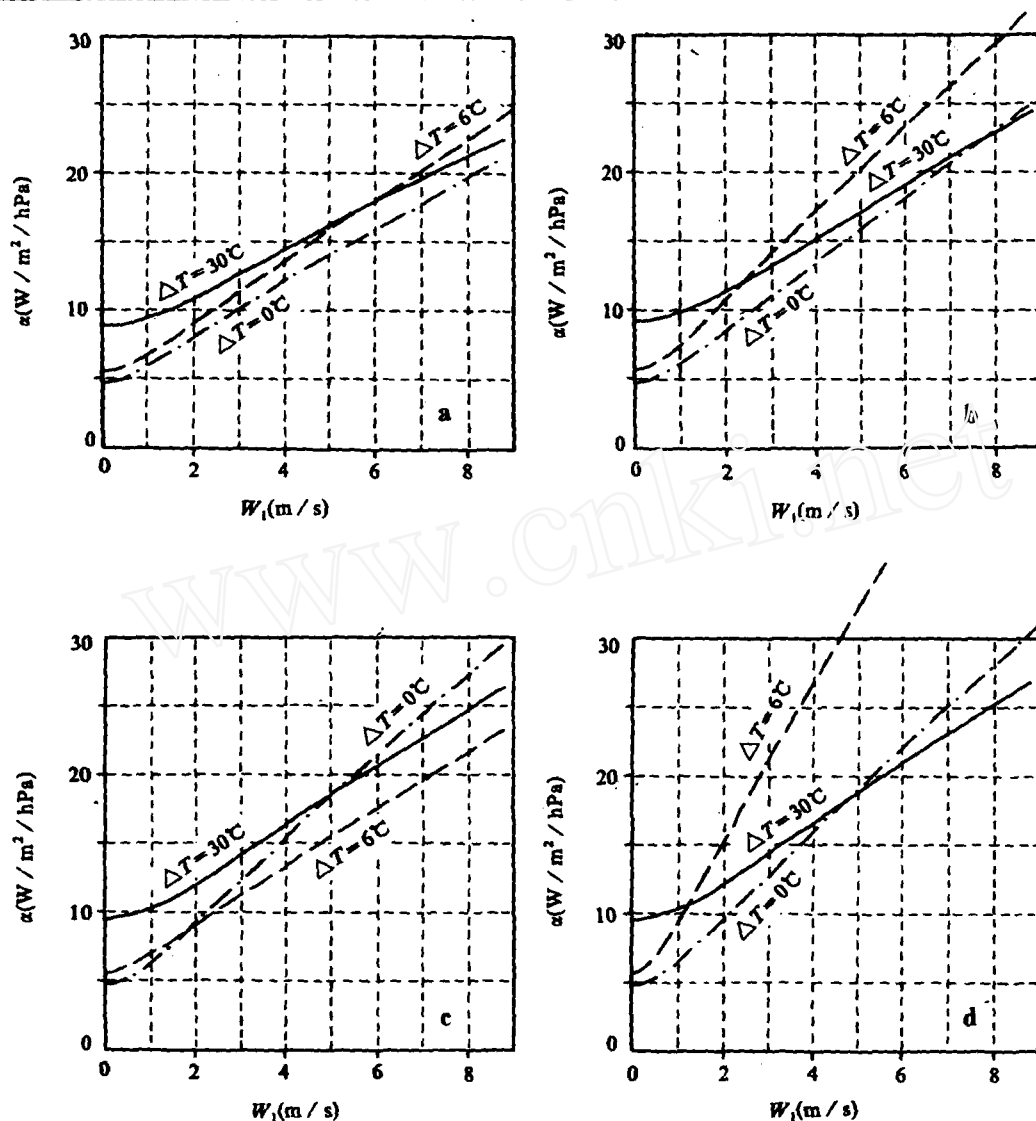
$$\delta K = [(\Delta e + b\Delta T)/(k_r + b)]/[(\partial\alpha/\partial T_s)/\alpha]$$

考虑到 $\Delta e/\Delta T \geq k_r = \partial e_r/\partial T_s$, $\alpha \approx (\alpha_0 + \alpha_1 W_1^2 + \alpha_2 \Delta T)^{1/2}$, 故:

$$\delta K \geq \Delta T / [(\partial\alpha/\partial T_s)/\alpha] = (\alpha^2 \Delta T) / [2(\alpha_0 + \alpha_1 W_1^2 + \alpha_2 \Delta T)]$$

由此可见, 忽略 $\partial\alpha/\partial T_s$ 项可能引起的相对误差在小风速时较大。极大值为当 $W_1 \rightarrow \pm\infty$ 时, $\Delta K \approx 50\%$ 。当 $W_1 = 2 \text{ m/s}$, $\Delta T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_s = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\Delta K = 16\%$ 。

本文建议公式中水面温度 T_s 一方面通过 ΔT 项直接影响 α 和 K , 另一面通过 B_0, D_s ,

图2 α 与 $W_1, \Delta T, T_s, f$ 和 P 的关系Fig. 2 α versus $W_1, \Delta T, T_s, f$ and P a: $P=101 \text{ hPa}, T_s=45^\circ\text{C}, f=0.7$; b: $P=1010 \text{ hPa}, T_s=25^\circ\text{C}, f=0.7$;c: $P=1010 \text{ hPa}, T_s=5^\circ\text{C}, f=0.7$; d: $P=700 \text{ hPa}, T_s=5^\circ\text{C}, f=0.3$

v_s, T_s 等项又间接(一般为负)影响 α 和 K 。由于一般情况下,特别在 3 m/s 风速以下,前者影响是主要的,故一般 $\partial\alpha/\partial T_s$ 大于零。

由于 α 的计算公式较复杂,即使是小风时以本文 III 方案为近似公式,计算也宜用电子计算机进行。只要有相应概率下可能出现的水文气象条件,就可算出相应条件下的 α 和 K 值供设计使用。在做初步设计时,可采用(1)式 III 方案简化公式。

对于小水域或近岸区, α 及 K 还应进行相应的地形影响订正。即对于已求得的大水面的 α, K 值视各地情况除以 <1 (一般为 $0.75-0.9$) 的修正系数。

关于如何根据湖边陆上气象站资料推算湖面 T_s, W_1, T_a, e_s 等水文气象要素值的方法, 可参考苏联有关技术指南^①, 结合我国具体情况选定。

4 结 语

水面蒸发长期来是国际水文气象学界一个重要研究对象。由于其测量技术难度大, 目前所能达到的精度不高和影响因子众多, 相互关系复杂, 至今还是一个难题。用水文气象方法计算水面蒸发有众多公式, 但其中经验系数有较大的地方性、季节性和冷热水差异。

首先要消除局地的影响, 讨论开敞湖面的水面蒸发现律。作者提出[1]用各地自然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。对于水面 E_{601} 型蒸发器来说, 其(动力)折算系数为0.89。这个结论得到水平均匀定常的北京水槽—风洞实验室结果支持, 说明是合理的。

在决定蒸发函数 α 的因素中, 风速占最重要地位。考虑风速可视为零级近似。在晋阳湖散热系数研究中[2-4]提出以类似 Ri 数的 Pv 数作为影响 α 的另一重要参数以考虑温度层结的影响。根据相似理论和实测资料得到在极端不稳定层结下 $\alpha \sim \Delta T_s^{1/2}$ 的规律。这也为随后北京实验[9]所证实。这可视为对 α 的一级修正。

由于水面蒸发不仅涉及水—气间的质量交换, 而且涉及动量和能量交换, 所以还必须考虑在贴水层中空气分子的粘滞系数, 温度热扩散和分子扩散系数对风速动力因素的影响和感热输送对蒸发潜热转换的反馈影响, 以及大气中水汽饱和度对 α 的影响等因素。经过对我国各地野外和室内资料的统计分析, 本文提出引入鲍恩比及相对湿度两个无量纲参数并进一步由此组成一个新的无量纲量 $Pe = (\alpha_s \alpha_0)^{1/4} a_b a_r$, 以及对风速进行温度修正的“蒸发有效风速” We 概念。进一步考虑了 $W_1 \rightarrow 0$, $\Delta T \rightarrow 0$ 及 $\Delta T < 0$ 的特点和自由对流与强迫对流的非线性相互作用, 提出了一个综合公式。这可视为对 α 的二级修正。

经位于我国各主要气候带内11个站及北京水槽—风洞实验共1860组逐日资料检验, 结果表明 $\alpha \sim W$ 线性公式的回归系数有明显的地区性、季节性和冷热水差异。我国冷却水设计中原来沿用的苏联火电设计院公式([7]中(表1内2式)与我国实际相差较大。该表1上的其他苏联公式, 美国 R-H 公式和 Adams 公式也都有较大误差, 难以直接引用。北京实验室公式(III)和施成熙公式(IV)在小风速区能较好拟合实际, 前者比后者有更高精度且能反映 ΔT 的作用。本文公式比这二个公式有更高精度, 计算值与观测值的相关系数更高, 均方误差和平均值误差都更小, 约可减少相对误差3%—7%。(1)式 III 方案结构简单, 便于计算, 可作为简化公式供初算估计时使用。

从分析理论曲线中可看到, α 随 W_1 增加比线性关系要复杂得多。 $W_1 < 0.5 \text{ m/s}$ 时, $\alpha \sim \Delta T_s^{1/2}$, 随风速增大, ΔT 的影响减小。在小风速区 $\partial \alpha / \partial W^2 > 0$, 在大风速区 $\partial \alpha / \partial W^2 < 0$ 。在其它条件相同情况下, α 与 T_s , f 和 P 有负相关。他们的影响在小风速时不如在大风速时明显。 T_s 减少5℃, α 一般增加1%—4%, 最大可达6%—12%。 f 减少20%, α 一般可增加1%

① 苏联国家水文研究所编著, 计算水面蒸发量的技术指南, 朱顺成译, 濮培民校, 水利电力出版社(特出版)。

-3%。 P 由1000降到700 hPa时, α 一般可增加1%—3%。各因素综合起来,在某些配置下,可造成更大误差。特别是为使公式能适用于全国、全年,自然水面和受热污染水面等多种条件,考虑这些高阶影响是非常必要的。

公式结构形式的合理性对计算水面散系数 K 十分重要。因为 K 不仅与 α 有关,而且与 $\partial\alpha/\partial T$ 有关。后者可引起对 K 的修正约2%—20%。计算可通过已编好的程序由电子计算机进行,也可由附表查算得(表略)。所需的基本资料是水面1.5 m处的风速、气温、水汽压和水面温度、气压等5个要素,由此可求得敞水区的 α 及 K 值。若有地形影响则还要作相应的订正。只要有相应概率下可能出现的水文气象条件,就可算出相应条件下的 α 及 K 值,供设计部门使用。

分析表明,北京实验资料的精度大大高于野外观测值,这对于揭示实际过程是很有益的。建议对大风速和逆温情况也能作类似实验研究,以便进一步揭示水面蒸发机理和完善计算公式。

野外实际大气过程为非定常过程,对于这种过程下的日平均、旬平均或更长时段的平均情况如何确定和寻求简便计算公式是值得进一步研究的。

对于实际应用来说,如何确定气象要素的水—陆关系,以及岸边地形对沿岸局部水域上蒸发的影响以及水面流动、波动对蒸发的影响等等均很重要,也是有待探讨解决的问题。

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,第2号.北京:科学出版社,1984:1—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.近地面层中不同温度层结下的湍流运动.气象学报,34(2):210—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 濮培民.水面蒸发与散热系数分式研究(一).湖泊科学,1994,6(1):1—12.
- 8 施成熙等.确定水面蒸发模型.地理科学,1984,4(1).
- 9 陈惠泉、毛世民等.超温水体水面蒸发与散热.水利学报,1989,(10).
- 10 徐爱珍,濮培民等.晋阳湖面对气象要素影响的初步分析.中国海洋湖沼学会水文气象学学术会议(1980)论文集,北京:科学出版社,1982:49—60.
- 11 Adams E. E., Cosler D. J., Hetch K. R., Evaporation from heated water bodies; Predicting combine forced plus free convection, *Water Resources Research*, 1990;26(3), 425—435.
- 12 Bowen I. S., The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from air water surface, *Phys. Rev.*, 1926,27. 779
- 13 Kondo J. Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Boundary-layer Meteorology*, 1975,9, 91—112
- 14 Pu P., Yan X., Xu A., Evaporation and heat loss from warm water surface, *Resources Management in the Developing*

- Countries of Asia and Pacific, 1982; 71.
- 15 Ryan P. J., Harleman D. R. F., et al., Surface heat loss from cooling ponds, *Water Resources Research*, 1974, 10(5), 930—938.
- 16 Гета Р. И., Применение теории подобия к расчету испарения с водной поверхности, М и Г. 1979, № 2, 88—95.
- 17 Ераславский А. П., Нуркальев С. Н., Новая формула расчета испарения с учетом разности между водой и воздухом. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, 1966, вып. 4, 195—206.

STUDIES ON THE FORMULAE FOR CALCULATING EVAPORATION AND HEAT LOSS COEFFICIENT FROM WATER SURFACE IN CHINA (II)^①

Pa 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 located 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 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 also from laboratory experimental data. It is shown that the accuracy of this suggested the formulae is higher than that of other existing formulae.

This paper consists of two parts. This is the second part, which includes the test of the formulae, influence of hydrometeorological elements on evaporation, calculation of heat loss coefficient, and conclusion.

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

① The first part of this paper was published in *Journal of Lake Sciences*, 1994, ①(1): 1—12.