

水面蒸发计算模型研究

闵 蹇

(江西省水利厅鄱阳湖水文分局,江西 九江 332800)

摘要:根据水面蒸发形成机制和水面蒸发量与气象要素关系的试验分析结果,选择饱和水汽压差、风速、相对湿度作为水面蒸发计算因子;综合国内外水面蒸发计算研究成果,选取适用的风速函数和相对湿度函数,提出一种具有较强适应性的水面蒸发计算模型.简要评析目前国内出现的3个水面蒸发全国通用计算公式,指出这3个公式尚存在欠缺,有待进一步完善;最后提出水面蒸发计算模型研究应统一水面蒸发量标准,正确选择风速函数,并应加强水面蒸发计算模型空间变化规律的研究.

关键词:水面蒸发;风速函数;相对湿度;水文计算;计算模型

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2003)01-0041-04

水面蒸发是湖泊水库等自然大水体水量平衡的主要项目,正确估算水面蒸发量,对水资源科学管理与合理利用极为重要.

水面蒸发量计算方法的研究,是个较古老的课题,至今已有200多年历史,自19世纪80年代以来,研究成果层出不穷,但绝大多数计算公式是利用局部地区单站观测资料,由经验分析取得的,或为纯经验公式,或为半经验公式.

由于水面蒸发对微地形、微气象条件的影响非常敏感,加上近地面空气水平平流对器测蒸发量及其与气象因素关系的影响突出,造成水面蒸发经验公式具有很强的局地性特征,使得由单站资料建立的水面蒸发量计算公式,缺乏空间上的适应性(或大范围通用性),难以在其它地区引用.

建立在时间上和空间上具有较强适应性的水面蒸发量计算模型,不仅可以满足当前水文分析计算、径流预测预报、水资源调查评价中的技术需求,还可以为今后建立旨在广大范围(全国乃至全世界)普遍实用的水面蒸发量通用计算公式,提供理论参考和实践基础.

时至今日,尚未有水面蒸发世界通用计算公式问世的报道,但见于报道的水面蒸发全国通用计算公式则已有3例.本文利用多站水面蒸发实验资料,检验它们的引用误差,以说明这3个公式尚有待进一步完善.

1 一种适应性较强的水面蒸发模型

1.1 计算因子选择

目前应用最广泛的是以饱和水汽压差 Δe 和风速 W 为因子的道尔顿模型 $E = \Delta e f(W)^{[1-3]}$.

笔者在这次建模试验中,发现利用双因子模型 $E = \Delta e f(W)$ 模拟月、旬水面蒸发量与月、旬平均饱和水汽压差、风速的关系时,不同季节出现正、负号不同的系统偏差.究其原因,主要在于不同季节的相对湿度差异很大,而且具有显著的季节性交替演变特性,造成模型拟合误差正、负号随季节而交替变化.如果加入相对湿度的影响,其拟合误差明显减小,尤其是季节性的系统性误差基本消失.说明将相对湿度 r 作为水面蒸发计算模型的因子,对于提高水面蒸发量的计算精度,有明显的积极意义.故此,本文选择以下形式的3因子水面蒸发模型:

$$E = \Delta e F(r, W) \quad (1)$$

1.2 模型结构的设计

令 $F(r, W) = g(r)f(W)$,则有:

$$E = \Delta e g(r) f(W) \quad (2)$$

式中: E 为水面蒸发量,mm/d; Δe 为饱和水汽压差,hPa; r 为相对湿度,以小数计; $g(r)$ 为相对湿度函数; W 为平均风速,m/s; $f(W)$ 为风速函数.

由式(2)可见,构建本文提出的水面蒸发量计算模型的关键,在于相对湿度函数 $g(r)$ 和风速函数 $f(W)$ 具体形式的确定.

从理论上说,空气相对湿度在一定程度上反映了流经水面的空气的水平非均匀性特征^[4].但目前我国各地空气温湿观测高度一般采用 150 cm 或 200 cm,远远超出了有限水域温湿适应层的高度^[5,6],故即使观测到的相对湿度达到 1,贴近水面层空气的水平非均匀性特征依然存在,因此, $g(r)$ 中必须设置常数项.

先假设 $f(W)$ 为一次线性函数,即令 $f(W) = p + qW$,由 $E/\Delta e \sim W$ 线性相关分析决定系数 p 与 q ;再根据 $\frac{E}{\Delta e f(W)} \sim r$ 相关点的分布特征,选择 $g(r)$ 的形式为

$$g(r) = a + b(1 - r^2)^{1/2} \quad (3)$$

式中 a, b 为待定系数.

风速虽然是公认的影响水面蒸发的重要气象因素,但各地在建立水面蒸发经验公式时,都认为风速对水面蒸发的影响是最难模拟的.绝大多数研究成果中,将风速函数设置成带常数项的幂函数形式,即令:

$$f(W) = A + BW^\alpha \quad (4)$$

其中风速幂指数 α 的取值,有 2.0, 1.0, 0.85, 0.76, 0.5 等几种,我国一般采用 $\alpha = 1$,即使用线性风速函数.笔者曾根据鄱阳湖岸边陆地(都昌)、半岛(康山)、岛屿(棠荫)3 站水面蒸发实验资料,分析风速幂指数随环境的变化特性,提出风速较小的站取 $\alpha = 1$ 较好,风速较大的站应取 $\alpha < 1$;风速越大的站, α 应取越小的数值^[7].进一步的研究表明,随着 W 自零逐渐加大,风速函数的二阶阶数 $d^2f(W)/dW^2$ 呈大于 0,等于 0,小于 0 的变化过程^[8],表明在不同风速段,风速函数 $f(W)$ 应使用不同的幂指数 α ,即 α 随着 W 的增大而减小.

根据上述研究结果,结合笔者反复试验情况,本文采用以下变数作为风速函数的幂指数:

$$\alpha = m - nW^{0.05} \quad (5)$$

风速函数(式(4))中设置常数项 A ,说明当风速仪测得的风速为零($W = 0$)时,水面仍然有蒸发现象存在.对此,可以从以下两个方面去理解:一是风速仪受到技术性能的限制,当风速很小时,难以测出真实风速;二是在水平风速接近零时,空气的脉动紊流依然存在.

将式(3), (4), (5)代入式(2),得到本文提出的水面蒸发计算模型为

$$E = \Delta e[a + b(1 - r^2)^{1/2}](A + BW^{m-nW^{0.05}}) \quad (6)$$

其中 a, b, A, B, m, n 均为模型参数.

1.3 模型参数的确定

在式(6)中,先令 $S = a + b(1 - r^2)^{1/2}$,则 $E/\Delta e$

$= S(A + BW^{m-nW^{0.05}})$,点绘 $E/\Delta e \sim W$ 相关点群分布图,通过点群中心初步确定一条 $E/\Delta e \sim W$ 关系曲线,在此曲线的 $W = 0$ 和 $W = 1$ 处,分别读出 SA 和 $SA + SB$ 值,由此得到 $SA = 0.1098$, $SB = 0.1765$.

将原式做以下变型: $(E/\Delta e) - SA = SBW^{m-nW^{0.05}}$
 $\rightarrow \frac{(E/\Delta e) - SA}{SB} = W^{m-nW^{0.05}} \rightarrow \ln \frac{(E/\Delta e) - SA}{SB} = (m - nW^{0.05}) \ln W$
 $\rightarrow \ln \frac{(E/\Delta e) - SA}{SB} / \ln W = m - nW^{0.05}$. 从 $\ln \frac{(E/\Delta e) - SA}{SB} / \ln W \sim W^{0.05}$ 相关分析中,求出 $m = 2$, $n = 1.3369$,即 $\alpha = 2 - 1.3369W^{0.05}$.

再假定不同的 S_i 值,可以得到不同的 A_i, B_i 数组;取使 $\frac{E}{\Delta e(A_i + B_iW^{2-1.3369W^{0.05}})} \sim (1 - r^2)^{1/2}$ 相关

关系最密切(相关系数最大)的 S_i 值,决定所需的 A, B 值;并从 $\frac{E}{\Delta e(A_i + B_iW^{2-1.3369W^{0.05}})} \sim (1 - r^2)^{1/2}$ 相关分析中,得到相应的 a, b 值.本文通过设置近 1000 个 S_i 值,经计算机反复筛选,取 $S = 0.2441$,求得 $A = 0.4498$, $B = 0.7232$; $a = 0.09$, $b = 0.2567$.代入式(6),即为本文提出的水面蒸发量计算模型的具体表达式:

$$E = \Delta e[0.09 + 0.2567(1 - r^2)^{1/2}] \cdot (0.4498 + 0.7232W^{2-1.3369W^{0.05}}) \quad (7)$$

1.4 模型适应性检验

利用鄱阳湖岛屿棠荫水文气象站、半岛康山水文气象站、岸边都昌蒸发实验站 1983 ~ 1992, 1993 ~ 1997 年资料,分别进行拟合检验和外延检验,月、旬水面蒸发量的计算误差见表 1 和表 2.

表 1 1983 ~ 1992 年 3 站水面蒸发量拟合计算误差

时段	绝对误差	绝对误差均	平均相对	合格率/%	
	总和/mm	方差/mm	误差/%	±10% 以内	±20% 以内
月	-115.2	6.64	6.4	86.1	97.5
旬	16.1	3.42	8.5	72.0	93.0

表 2 1993 ~ 1997 年 3 站水面蒸发量外延计算误差

时段	绝对误差	绝对误差均	平均相对	合格率/%	
	总和/mm	方差/mm	误差/%	±10% 以内	±20% 以内
月	-106.4	7.23	7.3	80.0	91.7
旬	20.7	4.20	9.2	69.4	86.1

从表 1 和表 2 可见,式(7)的拟合误差和外推误差都较小,表明其精度较高.检验结果还表明,式(7)的多站适应性远远强于道尔顿模型 $E = \Delta e(A + BW^\alpha)$ (这里的 α 为一定值),原因主要在于道尔顿模型中的风速幂指数为固定数值;其次是未能包含对有限水域水面蒸发与风速关系有重要影响的空气相对湿度(反映空气饱和与接近饱和程度).

此外,利用笔者近十几年来收集到的我国各地 47 个蒸发实验站(其中有陆地蒸发池的站 21 个,有漂浮蒸发器的站 26 个——多为水库蒸发实验站)零散水面蒸发实验资料(年或月统计资料),对式(7)进行异地引用检验,表明该式用于漂浮水面蒸发量计算的误差较小,用于陆地蒸发池水面蒸发量计算的误差稍大,但仍可达到一般精度要求(表 3)。

表 3 式(7)异地引用误差统计

多站平均相对误差/%		平均相对误差 20% 以内的站所占比例/%	
水面	陆地	水面	陆地
19.3	20.4	61.9	50.0

2 现有水面蒸发全国通用计算公式评析

建立能在广大范围实用的水面蒸发量通用计算公式,早已受到国内外水文气象学专家的重视。国外(美、英和前苏联等国)自 20 世纪 50 年代陆续推出水面蒸发量通用计算公式,但引用到我国,与实际差别仍然很大^[3,8,9]。我国学者自 20 世纪 80 年代初开展水面蒸发量通用计算公式的研究,于 80 年代末先后提出两个水面蒸发全国通用计算公式^[3,4,8],90 年代末又提出了一个适用于全国范围的水面蒸发量计算模型^[10]。这 3 个全国通用公式(均由原作者命名)是从不同途径建立起来的,下面对它们的来源与结构分别进行简略的介绍,并利用笔者手头上 47 个水面蒸发实验站资料,进行通用性检验。

2.1 全国通用公式 A

中国科学院南京地理与湖泊研究所濮培民等,通过分析水面蒸发过程中水-气界面上质量、能量和动量传递过程,及水文、气象要素对水面蒸发的非线性影响,提出用反映感、潜热通量之比的波恩比和反映空气稳定状况的层结稳定度两个无量纲量,与蒸发有效风速一道,建立水面蒸发量的计算模型^[4,8],称之为水面蒸发全国通用计算公式 A。利用不同气候区漂浮筏上取得的水面蒸发试验资料,确定模型中的系数。

该公式的结构很复杂,综合概括了水、气温度,相对、绝对湿度,气压与风速等众多因子对水面蒸发量和蒸发系数的影响,得到了国内部分野外实验资料和室内试验资料的验证^[4,8]。

利用笔者收集的 47 站资料进行引用检验,表明此式用于漂浮水面蒸发和陆地蒸发池水面蒸发计算的误差均较小(见表 4),但在风速小于 0.5 m/s 和风速大于 5 m/s 段均出现较大的系统偏差,且公式结构过于复杂,尤其是气压资料不便借用,造成引用困难。

表 4 全国通用计算公式引用误差统计

通用公式	多站平均相对误差/%		平均相对误差 20% 以内的站所占比例/%	
	水面	陆地	水面	陆地
通用公式 A	17.6	19.6	66.7	53.8
通用公式 B	17.8	24.2	66.7	42.3
李万义公式	23.6	32.1	42.9	26.9

2.2 全国通用公式 B

中国水利水电科学研究院冷却水研究所陈惠泉、安徽省水利科学研究所毛世民等,利用北京与广州实验室环境参数可控的回流式低速风洞系统中取得的水面蒸发试验资料,建立了包含风速与水气温差两个因子的水面蒸发系数($E/\Delta e$)计算模型,模型中的系数完全由实验室资料所作的经验相关分析确定^[3]。

该公式既包含了风力对水面蒸发的作用,又包括了水气温差对水面蒸发的影响,故综合反映了水面蒸发过程中自由对流与强迫对流的共同作用,并得到了国内多个蒸发试验基地室内、外资料的检验,也受到国外部分蒸发实验资料的检验^[3]。

使用 47 个蒸发实验站资料检验的结果表明,此式用以计算陆地(蒸发池)水面蒸发量的误差较大,表明该式不宜用以计算陆地气候条件下的水面蒸发量。

通用公式 B 的适应性较通用公式 A 稍差,原因主要在于公式 B 中的系数均为固定的常数,而公式 A 中的系数全为随气象条件(温度、湿度、风速、气压)而改变的变数。

2.3 李万义公式

水利部黄河水利委员会巴彦高勒蒸发实验站李万义,在对影响水面蒸发因素分析和对水面蒸发物理过程所作假设的基础上,提出了一种“适用于全国范围的水面蒸发量计算模型”,利用处于内蒙古境内的巴彦高勒蒸发实验站 1984 ~ 1996 年资料,确定了模型中的系数^[10]。

此模型的结构较简单,而且其中的两个系数(蒸发系数 $C = \frac{E}{\Delta e f(W)}$ 和风速指数 $\alpha = \frac{0.85 W}{W + 2}$)不是定值,而是分别由相对湿度和风速决定的变数,与一般水面蒸发计算模型相比,有一定改进。但模型结构在水面蒸发机制与数学原理的关系上,存在一定的矛盾,且模型参数的确定仅使用了单站资料。

利用 47 个蒸发实验站资料对该公式进行引用检验表明,无论对于漂浮水面蒸发量的计算,还是对陆地蒸发池水面蒸发量的计算,误差都很大,达不到一般的精度要求。

以上分析表明,目前见于报道的由公式提出者命名为全国通用计算公式的 3 个水面蒸发量计算模型,尚存在一些欠缺,有待进一步完善。

3 对水面蒸发计算模型研究的几点看法

水面蒸发计算模型的研究仍然是今后水文科技研究的重要内容之一.由于技术、经费及认识等方面的限制,给水面蒸发计算模型的研究造成许多困难.作者认为,解决以下几个方面的问题,对于克服水面蒸发计算模型研究中的困难至关重要.

3.1 应统一水面蒸发量标准

我国各地在建立水面蒸发量计算公式时,有的以漂浮蒸发器的蒸发量为标准,有的以陆地蒸发池的蒸发量为标准.由于采用了两种水面蒸发量标准,致使不同地方建立的水面蒸发量计算模型难以进行比较和沟通.

我国先后有近 100 处设置过水面蒸发实验站,分别以陆地蒸发池(面积有 10 m^2 , 20 m^2 , 100 m^2 几种)或漂浮蒸发器(规格有 ГИЗ000, E601, $\varnothing 180$ 几种)为标准仪器,其中以后者居多(约占 70%).自 20 世纪 50 年代起,我国水文学术界就形成了水面蒸发量标准的两种不同观点,至今尚未取得一致意见.目前尚未见到在同一蒸发实验站同时设立陆地蒸发池与漂浮蒸发器进行同步对比观测,并取得长序列(10 a 以上)资料的报道.这是我国水面蒸发实验研究的一个重大缺陷,急需在我国各大气候区分别进行这样的试验,以统一我国各地水面蒸发量的使用标准,这对我国水面蒸发计算模型、尤其是通用型计算模型的研究,必将起到极大的推动作用.

3.2 正确选择风速函数是关键

风速是公认的影响水面蒸发的重要因子,但在建立水面蒸发量计算模型时,却很难得以恰当地应用,说明水面蒸发与风速的关系非常复杂,同时也表明风速对水面蒸发影响的模拟是建立水面蒸发模型的关键性工作.

目前比较一致的看法是,应采用变指数的风速函数刻画水面蒸发与风速的关系,即在不同风速段选用不同形式的风速函数,而且应满足风速函数的二阶导数随着风速自零逐渐加大,经历自正到负的变化过程的先决条件.究竟以何种函数描述水面蒸发与风速的关系为佳,值得深入研究.本文在此方面进行了初步尝试,希望能起抛砖引玉的作用.

3.3 应加强水面蒸发计算模型空间变化规律的研究

目前我国各地提出的水面蒸发量计算公式的形式各异,千差万别,对于分析与认识水面蒸发与气象要素关系的空间变化规律极为不利.应选择适当的模型,使用同一模型建立不同站点的水面蒸发量模型,据此分析各站模型参数的差异及空间变化规律.通过模拟模型参数的空间变化规律,获取在很大范

围适用的水面蒸发量计算模型,是大范围水面蒸发研究的有效途径,对推动我国水面蒸发计算技术的进步,将会大有裨益.

4 结 语

由于天然水体水面蒸发测量技术难度很大,目前所能达到的观测精度依然不高,加上其影响因素众多,相互关系十分复杂,使得水面蒸发量的计算至今仍然是个难题.寻求能在大范围具有较强适应性的水面蒸发量计算模型,无论在理论上还是实际应用中,都具有重要的积极意义,但困难很大,尤其是全国通用公式的提出,更是难上加难,应特别慎重.

水面蒸发及其与气象要素的关系受微地形影响极为突出,给水面蒸发计算公式的异地引用造成很大困难,这是今后水面蒸发计算模型研究应攻克的技术难关,希望有更多的水文、气象学专家和学者积极投身于此项研究.

参考文献:

- [1] 施成熙,卞毓明,朱晓原.确定水面蒸发模型[J].地理科学,1984,4(1):1~10.
- [2] 水利电力部规划设计管理局.技术参考资料(水面冷却译文)[J].电力,1980(6):97~166.
- [3] 陈惠泉,何树椿,刘长贵,等.超温水体水面蒸发与散热[J].水利学报,1989(10):27~36.
- [4] 濮培民.水面蒸发与散热系数公式研究(I)[J].湖泊科学,1994,6(1):1~12.
- [5] 毛锐,高俊峰.太湖地区湖泊水面蒸发[M].北京:科学技术文献出版社,1993.
- [6] 濮培民.影响水面蒸发诸因素的分析与蒸发量的折算[J].中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊,1984(2):1~13.
- [7] 闵骞,苏崇萍.水面蒸发计算中几个问题的研究[J].武汉水利电力大学学报,1993,26(2):229~236.
- [8] 濮培民.水面蒸发与散热系数公式研究(II)[J].湖泊科学,1994,6(3):201~210.
- [9] 朱岗崑.自然蒸发的理论及应用[M].北京:气象出版社,2000.
- [10] 李万义.适用于全国范围的水面蒸发量计算模型的研究[J].水文,2000,20(4):13~17.

(收稿日期:2002-03-18 编辑:熊水斌)

