

我国蒸发力计算的气候学方法

童 宏 良

提 要

本文根据我国的具体情况,利用10个大型蒸发池自由水面蒸发的实测资料,对计算水面蒸发力的彭曼公式作了修订。修正后的彭曼公式可用于我国水面蒸发力的计算;乘以合适的折算系数和作物系数,还可用来估算我国的自然蒸发力和农田可能蒸散。

蒸发力一般是指在一定气象条件下,水分供应充足时某种下垫面上最大可能蒸发的水量。按下垫面性质不同,蒸发力可分为水面蒸发力、自然蒸发力和农田蒸发力(或农田可能蒸散)等。彭曼^[1](Penman, H.L., 1956)定义的自然蒸发力系指从不缺水绿色草被(高度均一,约8—15厘米且完全覆盖地面)所蒸腾的水量,也称潜在蒸发蒸腾量或最大可能蒸散量。在水分供应充足条件下,自然蒸发力(ET,简称蒸发力)与水面蒸发力(E₀)有比例关系

$$ET=f \cdot E_0$$

系数f可由实验测得。据联合国粮农组织的技术报告^[2],只要风力不很大,f=0.8可用于温湿气候地区,也可用于温暖和半干旱气候地区。在风力较大的干旱地区,可取f=0.85。对于有栽培作物的农田可能蒸散(ET_c),可由ET直接乘一作物系数(K_c)求得

$$ET_c=K_c \cdot ET=K_c \cdot f \cdot E_0$$

不同作物的K_c值可参见文献[3]。

目前,测定蒸发力还存在许多经济和技术上的困难,测定水面蒸发力也是如此,所以现在多采用气候学方法计算。具体的方法有很多,可概括为空气动力学方法、能量平衡法、经验公式法和综合法。彭曼综合法是其中最好的方法之一。本文根据全国10个大型蒸发池自由水面蒸发量的实测资料和相应的气象资料,对彭曼公式进行修正,建立适合我国实际情况的彭曼修正式并用于水面蒸发力和自然、农田蒸发力的计算。

一、资料来源

影响水面蒸发的因素很多,除气象、水文因子之外,蒸发器面积的大小对蒸发量也有影响。研究表明,只有当蒸发器面积大于20平方米时,所测得的蒸发量才接近实际水面的蒸发量^[4]。因此,本文主要采用面积20平方米的大型蒸发池的实测资料近似作为水面蒸发力的检验标准。

10个大型蒸发池实测资料均取自水利部门的蒸发实验站(表1)。其中,湖北东湖和甘肃上谳两个蒸发池面积为10平方米。据研究,认为在平均情况下,10平方米和20平方米池的蒸发量差值较小^[5]。故在资料处理时,未对10平方米池资料进行订正。纬度较高的几个站,冬季结冰期间蒸发缺测。与蒸发池资料相对应时段的气象资料,除拉萨大桥站是采用附近气象站资料外,其它均采用蒸发实验站观测场资料。天文辐射自文献[6]中附表I查得。

表1 我国水面蒸发实验站概况

站 名	纬 度 (北纬)	经 度 (东经)	海拔高度 (米)	蒸发池面积 (平方米)	资 料 年 代 (年)
三 盛 公	40°23'	107°10'	1055.1	20	1961—1967
官 厅	40°16'	115°33'	502.2	20	1966—1970
上 谳	36°04'	103°17'	1596.0	10	1956—1967
三 门 峡	1958年前34°51' 1958年后34°48'	111°25' 111°11'		20	1956—1967
宜 兴	31°22'	119°48'		20	1964—1969
东 湖	30°31'	114°28'	26.0	10	1973—1978
拉萨大桥	29°38'	91°09'	3650.0	20	1976—1980
重 庆	29°36'	106°38'	302.0	20	1958—1967
古 田	26°33'	118°47'	327.5	20	1958—1959
广 州	23°13'	113°18'	17.8	20	1966—1980

二、彭曼公式及其研究概况

彭曼公式是在1948年由彭曼通过联解动力扩散方程和热量平衡方程而建立起来的^[1],其一般形式为

$$E_0 = \frac{\Delta H_0 + v E_a}{\Delta + v} \quad (1)$$

式中 E_0 为蒸发力(mm/d); $H_0 = (1 - \alpha) \cdot R_s - F$, 为辐射平衡。对自由水面而言, 反射率 α 可取0.05, 总辐射 R_s 在彭曼公式中根据英国南部的情况, 采用式 $R_s = Q_A(0.18 + 0.55n/N)$ 计算, Q_A 为天文辐射(太阳常数取 $8.37 \text{ J/cm}^2 \cdot \text{min}$)。有效辐射 F 采用布朗特(Brunt, 1939)公式计算。布朗特公式为

$$F = \delta \sigma T_K^4 (0.56 - 0.092 \sqrt{e_d}) (0.1 + 0.9 \frac{n}{N}) \quad (\text{mm/d})$$

式中 δ 为灰体系数, 取值为1; σ 为斯蒂芬—波尔兹曼常数, 其值为 $47.03 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot \text{d}$; T_K 为K氏温标下的气温(K), $T_K = 273 + T_A$ (T_A 为摄氏温标下的气温, $^{\circ}\text{C}$); e_d 为空气实际水汽压, 单位为hPa。(1)式中的 v 为干湿球常数

$$v = c_p \cdot P / \varepsilon \cdot L \quad (\text{mm}/^{\circ}\text{C})$$

v 的单位为hPa/ $^{\circ}\text{C}$; c_p 为空气定压比热; L 为水汽凝结潜热; P 为大气压力(hPa); ε 为水汽分子量与干空气分子量的比值。(1)式中的 Δ 为温度—饱和水汽压曲线的斜率

$$\Delta = \frac{e_s}{273 + T_A} \left(\frac{6463}{273 + T_A} - 3.927 \right) \quad (\text{mm}/^{\circ}\text{C})$$

其中空气饱和水汽压(e_s , 单位为hPa)可由公式

$$e_s = 6.11 \times 10^{\frac{7.36 T_A}{(241.9 + T_A)}}$$

求得。 E_s 为当蒸发面温度与气温相等时的水汽输送方程, 一般称之为空气的“干燥力”, 可视为空气运动的能量对水面蒸发的贡献。在彭曼原式中

$$E_s = 0.35 \left(1 + \frac{u_2}{100} \right) (e_s - e_d) \quad (\text{mm/d})$$

式中 u_2 为2米高处的风速(哩/日)。

我国自1955年朱岗昆等首先引用彭曼公式计算我国各地蒸发量以来, 不少学者对彭曼公式在我国的应用作了研究, 提出了一些适合各地的彭曼修正式^{[5][8][9]}。但总的来说, 尚存在以下两个问题: 一是直接应用彭曼原式进行蒸发力计算和分析, 而对计算结果的客观性讨论较少; 二是虽然作了修订, 但基本上是局部地区。因此, 有必要对彭曼公式在全国范围内的应用效果作一分析研究, 以便确定出适合我国各地的水面蒸发力和农田可能蒸散的计算方法。

三、彭曼公式的修订

彭曼公式虽具有物理基础牢靠、因子考虑全面和所用资料容易取得等优点, 但由于公式中各物理分量都是采用经验性方法确定的, 在具体应用时, 公式中的一套经验系数常会因使用地区地理环境的改变而不适用, 需根据各地的实际情况作出适当订正。表2列

出我国几个站点使用彭曼原式计算水面蒸发力的相对误差 $((E_0 \text{ 计算值} - E_0 \text{ 实测值})/E_0 \text{ 实测值})$ 。由表2可见,彭曼原式在我国华北地区的计算效果较好,在南方的计算值一般偏大。为了分析误差形成的原因,我们分别列出了原式中几个主要物理分量计算式在我国的

表2 彭曼公式的计算误差(%)

月份 误差(%) 站名	1	2	3	4	5	6	全蒸发季 (全年)
三盛公					-9.1	-3.3	-18.0
上 淦				8.2	18.2	17.0	5.5
官 厅				19.6	17.0	23.8	12.8
三 门 峡				-11.5	13.4	10.9	15.6
广 州	-15.8	12.3	57.7	62.3	53.4	44.6	18.2
东 湖	6.4	27.8	54.8	64.7	69.6	58.9	27.1
宜 兴	0.0	22.7	21.7	62.9	38.1	26.7	19.7
重 庆	25.8	32.4	40.2	40.6	33.4	44.5	23.5
拉萨大桥	-22.9	-22.8	-18.9	-11.1	-5.2	6.0	-11.6
月份 误差(%) 站名	7	8	9	10	11	12	全蒸发季 (全年)
三盛公	-3.9	-13.1	-23.3	-44.0			-18.0
上 淦	22.2	12.7	-2.4	-19.4	-46.3		5.5
官 厅	23.8	14.7	-5.2	-14.9			12.8
三 门 峡	23.2	37.1	25.1	12.6	24.2		15.6
广 州	38.7	34.4	17.5	-4.4	-17.3	-22.3	18.2
东 湖	45.7	30.1	9.3	2.2	-17.4	-20.5	27.1
宜 兴	38.8	29.5	-1.7	5.1	-17.1	-20.8	19.7
重 庆	31.6	21.0	5.3	7.1	-6.5	-1.1	23.5
拉萨大桥	6.2	6.8	-11.1	-25.8	-39.1	-30.7	-11.6

计算效果(表3、4、5)。结果表明,一般而言,几个主要物理分量的计算误差愈大,则彭曼公式计算水面蒸发力的误差也愈大。但拉萨站却例外,虽然几个物理分量的计算误差较大,但水面蒸发力的计算效果则较好,其原因可能是几个物理分量计算误差相互抵消了。这表明,彭曼公式的计算效果除取决于各分量的计算精度外,还与各分量计算误差之间的相互匹配有关。但作者认为,提高彭曼公式计算精度的有效途径应是提高各物理分量的计算精度。

表3 彭曼原式中总辐射公式验算结果*(%)

相对误差 站名	1	2	3	4	5	6
上 海	12.8	4.1	-6.1	-8.7	-8.5	-7.7
官 厅	-5.4	-3.5	-9.3	-2.1	-3.9	-0.7
重 庆	24.1	25.2	7.8	13.9	11.5	5.8
拉 萨	-18.5	-17.1	-22.1	-66.0	-14.2	-18.9
相对误差 站名	7	8	9	10	11	12
上 海	-4.1	-2.7	1.5	1.7	6.4	13.0
官 厅	0.6	2.5	0.9	0.5	-0.4	-5.3
重 庆	5.7	5.6	9.8	35.6	30.3	25.9
拉 萨	-23.9	-21.1	-13.6	-13.5	-15.6	-18.3

*相对误差(%) = ((计算值 - 实测值) / 实测值) × 100%

表4 彭曼原式中有效辐射公式验算结果(%)

相对误差 站名	1	2	3	4	5	6
上 海	16.1	14.4	8.8	8.7	14.2	9.2
官 厅	42.7	40.5	37.4	37.8	31.0	19.5
重 庆	-51.3	-39.0	-24.7	-12.7	-20.3	-21.8
拉 萨	2.0	1.2	-3.8	-3.2	7.1	14.9

续前页

相对误差 站名	月份	7	8	9	10	11	12
上 沅		19.8	6.9	18.5	19.2	15.0	5.4
官 厅		10.5	17.6	33.1	40.0	40.7	40.3
重 庆		7.5	15.8	-17.1	-20.9	-35.7	-54.5
拉 萨		19.7	25.8	24.5	12.5	8.3	2.9

表5 彭曼原式中“干燥力”公式检验结果**(%)

相对误差 站名	月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
上 沅					29.3	46.0	30.8	27.3	7.6	5.2	13.6	-8.4	
官 厅					39.0	43.5	56.1	53.1	58.8	57.1	58.9		
重 庆		86.0	72.0	57.0	57.8	56.9	64.7	49.4	67.6	59.2	71.4	57.1	77.0
拉 萨		5.6	14.6	18.4	14.1	19.9	32.7	32.8	40.4	27.7	30.1	22.4	16.0

**干燥力公式检验所使用的形式为 $E=f(u)(e_s-e_d)$, e_d 为水面温度下的饱和水汽压(hPa)

1.总辐射 R_s 的修正 太阳辐射是下垫面蒸发耗热的主要能量来源,总辐射的计算精度直接影响彭曼公式的计算效果。由表3知,彭曼原式中的总辐射公式与我国的实际情况相差较大。根据我国学者的研究结果,计算总辐射的公式拟采用下列形式^{[10][11]}

$$R_s = Q_A \left(a + b \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (\text{mm/d})$$

式中, a 、 b 为与大气透明度有关的经验系数。表6给出我国不同地区的 a 、 b 值^[11]。这里将全国分成4个区域:东北区、东部平原区、西北区和高原区。考虑到 R_s 的修正式是采用本国实测资料拟合的,由乔唐式日照计对曙暮光的感光效应所造成的误差已包括在系数 b 中,故对日照百分率未作订正。

2.有效辐射 F 的修正 有效辐射的观

表6 我国不同地区总辐射公式系数

地 区	a 值	b 值	误差(%)
东 北 区	0.173	0.553	5.1
东部平原区	0.136	0.602	5.7
西 北 区	0.225	0.525	4.2
青藏高原区	0.183	0.681	4.2

测资料极少且观测精度较差。在计算蒸发力时有效辐射的计算多采用布朗特形式^[9]

$$F = \delta \sigma T_K^4 \left(a - b \sqrt{e_d} \right) \cdot \left(c + d \frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

在计算蒸发力的彭曼原式(1948)中, $a=0.56$, $b=0.078$, $c=0.1$, $d=0.9$ 。邓根云根据北京日射站的资料拟合了(2)式, 得到系数 $a=0.32$, $b=0.026$, $c=0.3$, $d=0.7$ 。但总的来说, 目前对有效辐射的研究较少。原因一是受限于资料, 二是与总辐射相比有效辐射量值小, 故认为有效辐射对蒸发力的影响不大^[5]。

事实上, 随季节变化有效辐射与总辐射的比值是不同的。一般夏季比值小, 冬季比值大。我们作了有效辐射对水面蒸发力计算误差影响的数值试验。于三盛公和上谕两站选取1966年和1958年两年, 假定其它条件相同, 分别采用布朗特式和邓根云式计算其水面蒸发力, 结果见表7。由表7可见, 不同形式的有效辐射计算式对计算蒸发力的影响具有较明显的季节变化。

表7 不同有效辐射公式对蒸发力计算的影响(相对误差%)

站 名	公 式	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10月	11月
三 盛 公 (1966年)	布 朗 特 式		-14.9	-11.3	0.8	-4.2	-23.3	-34.2	
	邓 根 云 式		-8.9	-5.7	5.3	0.5	-14.9	-20.3	
	差 值		6.0	5.6	4.5	4.7	8.4	13.9	
上 谕 (1958年)	布 朗 特 式	-13.5	1.4	7.2	11.0	-8.5	-10.6	-34.8	-47.0
	邓 根 云 式	-5.0	9.4	12.8	16.8	4.4	-2.0	-23.8	-32.0
	差 值	8.5	8.0	5.6	5.8	12.9	8.6	11.0	15.0

根据北京、南京、上海、汉口、赣州、海口、广州及拉萨、狮泉河、格尔木、那曲、双湖等12站的有效辐射实测资料及由辐射平衡站的倒算资料, 采用最优化方法中的步长加速法, 以误差 $\frac{\sum |E_{0\text{计算值}} - E_{0\text{观测值}}|}{\sum E_{0\text{观测值}}}$ 最小为目标函数, 通过迭代求解的方法分别拟合出高原和平原两大区域的有效辐射计算公式。

$$\text{平原区: } F = \delta \sigma T_K^4 (0.320 - 0.093 \sqrt{W_\infty}) (0.43 + 0.57 \frac{n}{N}) \quad (\text{mm/d})$$

$$\text{高原区: } F = \delta \sigma T_K^4 (0.304 - 0.021 \sqrt{W_\infty}) (0.1 + 0.9 \frac{n}{N}) \cdot e^{0.12z} \quad (\text{mm/d}) \quad (3)$$

式中, W 为大气含水量(克/厘米³), 在我国

$$W = (0.1054 + 0.1513e_d)e^{0.06z} \quad *$$

z 为海拔高度, 以千米计。公式(3)的月平均误差在高原区为7.5%, 平原区为7.6%。月误差的频率分布见表8。

表8 月拟合误差累积频率分布

误差(%)	2	6	8	10	12	14	20	>20
频率(%)	19	50	60	69	79	84	96	100

由公式(3)知, 在高原地区由于大气含水量较少, 影响有效辐射的日照百分率和高度两因子相对来说更为重要; 对于平原区, 因高度相差不太大, 水汽充足, 故水汽因子的贡献增大。另外, 在(3)式中, 水汽因子是以大气含水量取代实际水汽压, 这是考虑到有效辐射的削减主要是受大气含水量的影响, 而水汽压本身与高度有关, 故以大气含水量为水汽因子更合适。

3. v 项的修正 干湿球常数 $v (= c_p \cdot P / \epsilon \cdot L)$ 实际上是一个与大气压 P 有关的变数。这是因为空气比热 c_p 可视为常数(取值 $1 \text{ cal}/^\circ\text{C} \cdot \text{g}$), $\epsilon = 0.622$, 水汽凝结潜热 L 虽与温度有关, 但变化不大, 亦可视为常数。因此, 有

$$v = 6.5 \times 10^{-4} P \quad (\text{mm}/^\circ\text{C}) \quad (4)$$

在彭曼原式中, v 是作为常数处理的, 取值 $0.66 \text{ hPa}/^\circ\text{C}$, 相当于海平面上的大气压。这在平原地区是可以的。但在我国, 因地形起伏变化很大, 青藏高原大部分地处3000米以上, 年平均气压只有600—700 hPa左右, 显然, 将 v 作为常数处理会削弱热力项的贡献, 扩大动力项的作用, 从而使蒸发力的计算值增加(将另文讨论)。事实上, 在使用彭曼公式时将(4)式直接代入计算是很方便的。

4. Δ 项的讨论 在彭曼的工作中, 曾假定用 $\Delta = \left. \frac{de}{dT} \right|_{T=T_a}$ 去代替 $\frac{e_s - e_a}{T_s - T_a}$, 为了估计这种假定带来的计算误差, 文献[12]直接从彭曼公式给出了下列理论误差分析

$$\left(\frac{dE_0}{d\Delta} \delta\Delta \right) / E_0 = \frac{v(H_0 - E_a)}{(\Delta + v)(\Delta \cdot H_0 + E_a \cdot v)} \cdot \left(\frac{e_s - e_a}{T_s - T_a} - \Delta \right) \quad (5)$$

式中, $\delta\Delta = \frac{e_s - e_a}{T_s - T_a} - \Delta$, E_0 为彭曼公式计算的蒸发力, $\left(\frac{dE_0}{d\Delta} \cdot \delta\Delta \right) / E_0$ 表示由 Δ 假设引起彭曼公式计算蒸发力的相对误差。由于

$$E_0 = H_0 - K = H_0 - v f(u) (T_s - T_a) \quad (6)$$

(上式可由热量平衡方程得到。 K 为感热通量; $f(u)$ 为一风速函数, 可由动力扩散方程导

出)则

$$\frac{v}{\Delta + v} (H_0 - E_a) = v f(u) (T_s - T_a) \quad (7)$$

由式(5)、(7)可得出下列定性结论:

(1) 当蒸发面温度高于气温, 即 $T_s - T_a > 0$ 时, 温度—水汽压曲线是单增型的, 有

$$\frac{e_s - e_a}{T_s - T_a} > 0. \text{ 而 } \Delta = \left. \frac{de}{dT} \right|_{T=T_a} \text{ 表示空气温度下的曲线斜率, 根据单增型曲线的性质,}$$

$\frac{e_s - e_a}{T_s - T_a} > \Delta$. 由式(7), $H_0 - E_a > 0$, 故 $\left(\frac{dE_0}{d\Delta} \cdot \delta\Delta \right) / E_0 > 0$, 表明作 Δ 假设后的彭曼公式计算值偏小.

(2) 当 $T_s - T_a < 0$ 时, 类似地, $\left(\frac{dE_0}{d\Delta} \cdot \delta\Delta \right) / E_0 > 0$, 意味着当作 Δ 假设后, 彭曼公式的计算值也偏小.

$$(3) \text{ 当 } T_s - T_a \rightarrow 0 \text{ 时, } \frac{e_s - e_a}{T_s - T_a} \rightarrow \Delta = \left. \frac{de}{dT} \right|_{T=T_a}, \text{ 则计算值无偏.}$$

王本善^[12]曾根据简化的布德科公式对类似(5)式的相对误差作了极端化处理, 认为在极端情况下其相对误差在 4%—20% 之间. 根据式(7)有

$$\left(\frac{dE_0}{d\Delta} \cdot \delta\Delta \right) / E_0 = \frac{1}{\Delta/v + 1} \cdot \frac{H_0/E_a - 1}{\Delta \cdot H_0/v \cdot E_a + 1} \cdot \frac{\delta\Delta}{\Delta}$$

在我国, 因为 Δ/v 的变化范围一般在 0.3—4.0 之间, H_0/E_a 在 0.5—3.0 之间, 则在极端情况下, 式(5)为

$$\left[\left(\frac{dE_0}{d\Delta} \cdot \delta\Delta \right) / E_0 \right]_{\max} = \frac{\delta\Delta}{\Delta}$$

在降温季节, $\delta\Delta/\Delta$ 的误差一般较大. 例如, 当地气温差相差 7℃ (这在西北地区是可能出现的) 时, 假定气温为 10℃, 则误差 $\delta\Delta/\Delta = 23\%$. 可见, 在极端情况下, Δ 假设可引起较大的误差. 但是, 实际上 Δ/v 与 H_0/E_a 一般有一定的出现规律, Δ/v 一般在 2.5 左右, $\frac{\Delta}{v} \cdot \frac{H_0}{E_a}$ 一般在 6.0 左右, $\frac{H_0}{E_a}$ 一般不超过 3.0, 则 $\left(\frac{dE_0}{d\Delta} \cdot \delta\Delta \right) / E_0$ 约为 2% 左右. 因此, 在一般情况下, Δ 假定不会引起十分显著的误差.

5. 干燥力项 E_a 的修正 彭曼公式引入干燥力的目的在于消除蒸发面温度项, 因为一般情况下蒸发面温度难以取得, 或误差较大. 干燥力 E_a 的表达形式为

$$E_a = f(u) \cdot (e_s - e_d) \quad (\text{mm/d})$$

式中, $f(u)$ 为风速函数, 采用经验形式拟合。由表 5 知, 将彭曼原式中的 $f(u)$ 形式直接应用到我国时一般误差较大, 需要订正。

为取得干燥力公式, 国内外学者多采用本地区大型蒸发池或漂浮蒸发器等实测资料直接利用道尔顿公式拟合^[9], 本文也采用此方法求导 E_a (实际上是 $f(u)$ 函数)。可以证明这样处理是合理的。

我们知道, 影响水面蒸发的因子很多, 主要有水汽压差、温度、风速、近地气层稳定度等。综合这些因素的影响可由道尔顿公式表示

$$E_0 = f(u)(e_s - e_d) \quad (8)$$

风速函数 $f(u)$ 与风速、层结稳定状况有关。在近地层层结中性时, 有 $T_s = T_a$, 则

$$E_a' = f_a(u)(e_s - e_d) \quad (9)$$

由(8)、(9)两式得

$$\frac{E_a'}{E_0} = \frac{f_a(u)}{f(u)} \cdot \frac{e_s - e_d}{e_s - e_d} \quad (10)$$

令 $k = \frac{f_a(u)}{f(u)}$ (k 是与近地层大气层结稳定性和风速 u 有关的函数), 于是, (10) 式为

$$\frac{1}{k} \cdot \frac{E_a'}{E_0} = \frac{e_s - e_d}{e_s - e_d} \quad (10')$$

将简化的热量平衡方程式(6)代入式(8), 再与(10')结合, 得

$$H_0 = E_0 \left(1 + \frac{v}{\Delta} \right) - \frac{v}{\Delta} \cdot \frac{1}{k} E_a' = E_0 \left(1 + \frac{v}{\Delta} \right) - \frac{v}{\Delta} \cdot f(u)(e_s - e_d)$$

即

$$E_0 = \frac{\Delta H + v f(u)(e_s - e_d)}{\Delta + v} \quad (11)$$

于(11)式中, 令 $E_a = f(u) \cdot (e_s - e_d)$, 比较(11)和(1)式, 可见 E_a 即为“干燥力”。因此, 在求导干燥力公式时, 只需根据实测资料对道尔顿公式直接拟合, 然后以 e_a 代 e_s 即可。 E_a 也并非一定指层结中性时的蒸发力。

关于 $f(u)$ 的形式问题, 存在着不同意见^[8]。起初认为, 蒸发率与风速的平方根成比例。此后, 萨顿, O.G. 和萨顿, N.G.L. 等人应用空气动力学原理, 推得蒸发与风速的 0.75 次方成正比^[8]; 施成熙等人采用 $f(u) = \sqrt{a + bV^2}$ 形式^[13]。但近来多数人则采用线性关系。作者通过计算比较, 也认为 $f(u)$ 函数的拟合采用线性形式最合适*。

在拟合 $f(u)$ 函数时, 对风速 u 作了分级处理, 即根据风速大小每隔 0.1 米/秒分成若

*童宏良, 中国蒸发力的研究(硕士论文), 1985 年

干等级,然后将每一级风速出现时所对应的水汽压差 $e_s - e_a$ 和 E_0 进行平均,求出 $f(u)$ 值,再进行 $f(u)$ 函数的拟合。分级的理由是,考虑到风速出现频率大的区域多集中在某一段,而风速较小和较大的区域则出现较少,分级后则可等权考虑各级风速对 $f(u)$ 函数的贡献。

据此分析,利用全国9个站(不包括宜兴,其作为检验站)的实测资料,以线性形式($f(u)=a+bu$)分别进行了单站和全国统一拟合,结果见表9。由表9知,西北地区的三盛公、上谿两站 a 、 b 值明显高于其它站点,拉萨站的 a 、 b 值也比较特别。因此,考虑到气候背景和地形特征,将全国分成三大区(即青藏高原区、西北干燥区和东部平原区),再进行分区拟合。这里,西北区公式拟合的站点包括三盛公、上谿两站;东部平原区包括广州、重庆、东湖、古田、三门峡和官厅;高原区因资料缺乏,只有拉萨一个站参加拟合。结果表明,分区拟合要比全国统一拟合的效果好(表10)。若比较表11和表5,可发现分区拟合所求得的 $f(u)$ 函数较彭曼原式中的更适合我国实际。因此,有风速函数

$$\text{东部平原区: } f(u)=0.200+0.066u_2$$

$$\text{西部干燥区: } f(u)=0.152+0.163u_2$$

$$\text{青藏高原区: } f(u)=0.123+0.124u_{10}=0.128+0.172u_2$$

式中, u_2 为2米高处的风速(米/秒), u_{10} 为10米高处的风速(米/秒)。

表9 风速函数的拟合效果

站 名	a 值	b 值	样 本 数 n	相关系数 r	误 差 (%)
三 盛 公	0.336	0.098	16	0.7717	8.1
上 谿	0.237	0.076	17	0.8317	12.8
官 厅	0.165	0.097	19	0.9517	7.5
三 门 峡	0.225	0.047	21	0.6287	17.3
东 湖	0.228	0.079	11	0.5561	13.5
古 田	0.208	0.051	8	0.8915	6.1
重 庆	0.174	0.082	13	0.7477	10.9
广 州	0.149	0.079	18	0.8257	11.1
拉 萨*	0.128	0.124	15	0.8883	9.2
全 国 统 一	0.214	0.066	36	0.8833	15.9

*拉萨站是以10米高风速拟合的

表10 分区拟合风速函数的结果

地 区	a 值	b 值	样 本 数 n	相关系数 r	误 差 (%)
东部平原区	0.200	0.066	25	0.8995	12.9
西北干燥区	0.152	0.163	25	0.9466	15.0
青藏高原区	0.128	0.124	15	0.8883	9.3

表11 风速函数检验结果(相对误差%)

站 名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
上 海				27.1	26.4	12.3	7.0	11.6	-15.9	-7.9	-25.7	
官 厅				-19.0	-15.0	-6.2	-4.1	0.9	-1.6	-3.5		
重 庆	11.78	4.1	-1.1	-1.9	-0.3	5.5	-5.1	5.7	1.1	11.7	2.4	14.3
拉 萨	-13.4	0.0	2.5	-4.5	0.3	9.9	3.9	9.8	-1.5	4.4	-3.0	-8.1

综合上述对彭曼公式的讨论和订正, 得到计算我国水面蒸发力的彭曼修正式(表12)。

表12 彭曼公式修正结果

地 区 物理分量	东部平原区	东 北 区	西 北 区	青藏高原区
总 辐 射	$R_s=Q_A(0.136+0.602\frac{n}{N})$	$R_s=Q_A(0.173+0.533\frac{n}{N})$	$R_s=Q_A(0.225+0.525\frac{n}{N})$	$R_s=Q_A(0.183+0.681\frac{n}{N})$
有效辐射	$F=\delta\sigma T_K^4(0.32-0.093\sqrt{W})\cdot(0.43+0.57\frac{n}{N})$		$F=\delta\sigma T_K^4(0.304-0.021\sqrt{W_\infty})\cdot(0.1+0.9\frac{n}{N})e^{0.12z}$	
干 燥 力	$E_a=(0.200+0.066u_2)(e_a-e_d)$		$E_a=(0.152+$	$E_a=(0.128+$
			$0.163u_2)(e_a-e_d)$	$0.124u_{10})(e_a-e_d)$
ν	$\nu=6.5\times10^{-4}P$			

表13 彭曼修正式计算水面蒸发力的相对误差(%)

站名 \ 月份	1	2	3	4	5	6	全蒸发季
三盛公					5.7	3.2	-3.2
上 淦				7.5	6.0	9.0	1.2
官 厅				16.6	14.6	20.3	9.6
三 门 峡				0.9	10.9	2.9	-5.4
东 湖	-13.9	5.5	29.8	42.7	44.5	35.5	8.9
重 庆	-43.6	-28.9	-0.5	4.9	6.7	7.9	-19.7
广 州	-33.7	-18.9	4.8	16.4	17.0	13.5	-4.6
拉 萨	11.4	10.8	9.9	14.6	16.5	25.3	10.2
站名 \ 月份	7	8	9	10	11	12	全蒸发季
三盛公	2.5	-3.6	-8.4	13.1			-3.2
上 淦	10.1	3.3	-4.2	-12.0	-28.7		1.2
官 厅	18.3	10.6	-2.5	-10.9			9.6
三 门 峡	13.8	2.9	-14.6	-22.0	-38.4		-5.4
东 湖	26.2	13.3	-5.8	-14.8	-26.8	-28.9	8.9
重 庆	9.2	1.4	-20.1	-38.9	-56.5	-62.6	-19.7
广 州	15.4	9.9	-1.4	-18.0	-26.6	-33.5	-4.6
拉 萨	25.5	24.7	2.4	-7.6	-15.0	3.9	10.2

利用彭曼修正式重新计算各蒸发试验站的水面蒸发量, 结果见表13(古田站因缺日照百分率, 未算)。由计算结果可见, 全年(或全蒸发季)的计算相对误差比较令人满意, 比彭曼原式的计算效果(见表2)有明显改进。这表明经过修正的彭曼公式可用于计算我国各地的全年水面蒸发力, 乘以一合适的折算系数 f 和作物系数 K_c 还可以计算各地的自然蒸发力 ET 和农田可能蒸散 ET_c 。在季节上, 大多数站点4—9月份(对应于农业生产上的生长季节)的计算误差较小, 说明使用彭曼修正式估算作物生长季节的农田可能蒸散也是可行的。

表12中的彭曼修正式在用作计算各月水面蒸发力时,某些站点的某些月份仍然存在较大的误差,主要是冷季月份(或蒸发季的始、末月份)计算值多数较实测值偏小。其原因,一方面是上述彭曼修正式尚存在不足之处(例如修正式同原式一样,没有考虑下垫面热通量的影响,将另文讨论此问题);另一方面,在本文中利用相对误差检验计算效果的优劣其本身有不妥的地方。事实上,冬季月份水面蒸发量的实测值较夏季月份要小得多,小量的计算绝对误差(实测值-计算值)会导致较大的相对误差。不过,比较表13和表2,使用彭曼修正式计算月水面蒸发力时总体情况要比彭曼原式有较大的改进,亦可用来求算逐月的水面蒸发力或农田可能蒸散。

四、结 语

彭曼综合法是计算蒸发力较好的方法之一,但因公式中系数的确定是经验性的,具有局地性,直接应用于我国蒸发力的计算误差较大。本文利用我国10个蒸发实验站水面蒸发实测资料作为检验标准,逐项修正彭曼公式中各物理分量的系数,求得了较适合我国实际情况的彭曼公式的修正式,可用于估算我国各地的全年和生长季的蒸发力,在计算各月水面蒸发力时也比彭曼原式的计算效果有较大的改进。此式也可用于逐月蒸发力的估算。不过,在一些站点的某些月份尚存在较大的误差,有待进一步研究。

本文是在欧阳海教授指导下完成的,程纯枢先生也曾提出宝贵意见,翁笃鸣教授、孙治安同志热情地为本文提供总辐射和有效辐射方面的资料,在此,一并致以衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Jensen, E.N. 编, 熊运来译, 耗水量与灌溉需水量, 44, 农业出版社, 1982.
- [2] Doorenbos, J. et al., Crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper 24, Rome, 1977.
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations, Yield response to water, FAO irrigation and drainage paper 33, Rome, 1979.
- [4] 孙芹芳, 10m²蒸发池水面蒸发实验研究, 水文, 1981, 4, 35—40.
- [5] 沈行毅, 大湖水面蒸发量的气候学计算, 水文, 1984, 4, 12—18.
- [6] 联合国粮农组织, 农业气象监测与作物收成预报, FAO植物生产及保护丛书第17号, 罗马, 1979.
- [7] Penman, H.L., Natural evaporation from open water, Bare Soil and Grass, Proc. Roy. Soc. (London), Vol. 193(A), 120—145, 1948.
- [8] 朱岗昆等, 中国各地蒸发量的初步研究, 气象学报, 26卷, 1—24, 1955.
- [9] 邓根云, 水面蒸发力的一种气候学计算方法, 气象学报, 37卷, 3期, 87—96, 1979.
- [10] 翁笃鸣, 试论总辐射的气候学计算方法, 气象学报, 34卷, 3期, 304—315, 1964.
- [11] 祝昌汉, 再论总辐射的气候学计算, 南京气象学院学报, 1982, 1, 15—24.
- [12] 王本善, 计算蒸发力的М.Н. Бухарко方法之简化与H.T. Penman法的比较, 地理学报, 35卷, 4期, 343—355, 1980.
- [13] 施成熙等, 确定水面蒸发模型, 地理科学, 4卷, 1期, 1—11, 1984.

A CLIMATIC CALCULATION METHOD FOR THE EVAPORATION POWER IN CHINA

Tong Hongliang

ABSTRACT

Using evaporation data from ten large open waters in China, Penman's formula for calculating evaporation from water surfaces is modified. The new formula can be used to estimate not only the evaporative power of open waters but also natural evaporative power and field evaporative capacity in China if a suitable proportion coefficient is multiplied.