

利用彭曼公式预测水面蒸发量

闵 蹇

(江西省都昌蒸发实验站,江西 都昌 332600)

摘要:以彭曼公式为基础,建立月、旬水面蒸发量预测模型.根据中长期气候预报中一般可给出月、旬平均气温和中雨(雪)以上降水天数的实际情况,将彭曼公式进行分解,分别建立月、旬水面辐射平衡 R 、空气干燥力 E_a 的预测模式.利用江西省都昌蒸发实验站实测资料,确定各模型中的参数,取得月、旬水面蒸发量预测公式.对此公式进行模拟检验和应用检验,其中月、旬水面蒸发量的拟合误差为:平均相对误差分别是8.9%和10.4%,相对误差在 $\pm 20\%$ 以内的保证率分别是90.6%和87.5%;月、旬水面蒸发量的预测误差为:平均相对误差分别是11.9%和11.2%,相对误差在 $\pm 20\%$ 以内的保证率分别是70.4%和72.2%.拟合误差和预测误差都较小,达到了生产上的一般精度要求.

关键词:水面蒸发量;彭曼公式;辐射平衡值;空气干燥力

中图分类号:P333.1

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2001)01-0037-03

水面蒸发是湖泊(水库)规划、调度与管理及水文、水资源分析与计算中必须考虑的水文要素.水面蒸发量的预测,对于合理利用水资源、提高与水体水量和水位变化有关的生产单位和管理部门的社会经济效益有重要意义.

关于水面蒸发量的预测预报,国内外所做研究甚少,可供应用的成果更是凤毛麟角,这与当前全球水资源严重短缺、科学利用水资源呼声日益高涨的形势不相适应.因此,水面蒸发量的预测是水资源科学管理、合理利用中急待解决的重大问题之一.

彭曼(Penman)公式是目前国内外水面蒸发量计算的常用模型,本文以它为基础,利用江西省都昌蒸发实验站1980~1995年资料,建立月、旬水面蒸发量预测公式,供有关人员参考.

1 彭曼公式的修正与应用

1.1 彭曼公式结构的分析

水面蒸发是在一定的热力学条件与动力学条件的共同作用下产生的,英国学者彭曼根据水面蒸发的形成机制,通过联解空气动力学方程和能量平衡方程,得出计算水面蒸发量的组合型公式:

$$E = \frac{\Delta \cdot R + r \cdot E_a}{\Delta + r} \quad (1)$$

式中: E 为水面蒸发量; R 为水面辐射平衡值; E_a 为水面附近的空气干燥力; Δ 为饱和水汽压曲线的斜

率; r 为干湿球常数.

式(1)以 R 和 E_a 的加权平均值作为 E (权重分别为 $\Delta/(\Delta+r)$ 和 $r/(\Delta+r)$),其物理含义实际是用“热力蒸发”与“动力蒸发”的综合值作为水面蒸发量^[1].由于式(1)物理意义明确,而且所包含的水面蒸发诸影响因素的资料易于获得,已成为当前国内外计算水面蒸发量的主要方法.

但必须注意到,原型彭曼公式中 R 和 E_a 的计算方法,是依据英国特定的海洋性气候条件下取得的实验资料建立的,而我国绝大多数地方处在典型的季风气候区内,与原型公式所采用资料的气候背景差异很大,因此,原型彭曼公式不宜在我国应用^[2].

1.2 彭曼公式的修正

我国学者一般采用以下办法修正彭曼公式的原型^[3,4]:

a. 利用布朗特公式或别尔良德公式计算水面有效辐射 F ;根据埃斯川姆公式建立计算水面太阳辐射总量 Q 的区域性经验公式;经验估计水面反射率 α 后,由公式 $R = (1 - \alpha)Q - F$ 确定水面辐射平衡 R 的数值.

b. 采用 20 m^2 蒸发池或漂浮蒸发器的蒸发量与饱和水汽压差及风速等资料,建立以道尔顿模型为基础的半经验公式,用以确定 E_a .

笔者以江西省都昌蒸发实验站1980~1995年

资料,用上述方法对彭曼公式进行修正,发现修正后的彭曼公式的拟合误差依然较大.究其原因,主要有以下两个方面:一是 R 的计算尽管非常复杂,但误差仍然很大;二是以 20m^2 蒸发池或漂浮蒸发器的计算蒸发量代表空气干燥力 E_a 欠妥.尤以后者影响更大.这是由于彭曼公式中的 E_a 并非明确的物理量,而仅仅是一个用以表示空气干燥程度的虚设量(E_a 与 R 的根本区别在于, R 是个可以用仪器直接测量到的物理量,而 E_a 是个无法用仪器直接测量出的虚拟量),它应满足 $E_a > E > R$ 或 $E_a < E < R$ 的条件.而 20m^2 蒸发池或漂浮蒸发器的计算蒸发量代替 E_a ,往往不能满足上述条件.

用江西省都昌蒸发实验站资料所作的试验表明,引用洪嘉琰先生提出的以下公式^[5],直接计算湖面辐射平衡值,不仅简便,而且精度较高:

$$R_{\text{月}} = 0.575 Q_{\text{月}} + 11.45 \quad (2)$$

$$R_{\text{旬}} = 0.575 Q_{\text{旬}} + 3.82 \quad (3)$$

式中: $R_{\text{月}}$, $R_{\text{旬}}$ 为月或旬的水面辐射平衡, mm ; $Q_{\text{月}}$, $Q_{\text{旬}}$ 为月或旬的太阳辐射总量, mm . 其中 mm 与 J/m^2 的换算关系为: 1mm 相当于 $2.501 \times 10^6 \text{J}/\text{m}^2$.

用都昌蒸发实验站资料建立的 $Q_{\text{月}}$, $Q_{\text{旬}}$ 计算公式分别为^[6]

$$Q_{\text{月}} = 2.206 n e^{0.032t} \quad (4)$$

$$Q_{\text{旬}} = 0.159 n (t + 7.3) \quad (5)$$

式中: t 为月或旬的平均地表温度, $^{\circ}\text{C}$; n 为月或旬内的天数.

对于 E_a 的确定,必须注意到: R 是个明显的物理量,应通过改变 E_a 的计算方法,使 E 值处于 R 值与 E_a 值之间.有效的办法是,先利用历史实测资料反求 E_a ,然后再建立推求 E_a 的经验公式,供水面蒸发量计算时引用.

E_a 的反求公式为

$$\hat{E}_a = \frac{(\Delta + r)E - \Delta R}{r} \quad (6)$$

式中 $\hat{E}_a$ 为利用 E 和 R 反求的空气干燥力, mm .

反求 E_a 的作用,是为了确保 E 的数值处于 R 与 E_a 的数值之间,即为了满足 $E_a < E < R$ 或 $E_a > E > R$ 的条件.

E_a 的计算公式,本应像彭曼原型公式那样同时包含饱和水汽压差 $\Delta e (\Delta e = e_0 - e_d)$ 与风速 w ,考虑到以月和旬为预见期的中长期气候预报中没有提供月或旬平均风速的预报值,故这里仅建立用 Δe 单因子计算 E_a 的经验公式.根据都昌蒸发实验站 1980~1995 年资料,经相关分析得到的计算 E_a 的经验公式为

$$E_a = 0.031 n (\Delta e^{2.07} - 4.41) \quad (7)$$

式中: E_a 为空气干燥力的计算值, mm ; Δe 为饱和水汽压差, $\Delta e = e_0 - e_d$, hPa .

应用上面各式模拟(计算)都昌蒸发站 1980~1995 年逐月、旬水面蒸发量,其误差较小(见表 1),表明用上述方法修正彭曼公式,效果良好.

表 1 修正彭曼公式的拟合误差统计

计算时段	均方误差 /mm	平均相对 误差/%	相对误差保证率/%	
			$\pm 10\%$ 以内	$\pm 20\%$ 以内
月	9.7	8.9	68.8	90.6
旬	4.0	10.4	62.5	87.5

2 预测模型的建立与检验

2.1 模型的建立

彭曼公式是一种气候学模型,利用它预测水面蒸发量,必须以气象台、站发布的气候、天气预报资料为基本依据.具体地说,本文建立预见期为月、旬的水面蒸发预测模型,是以中长期气象预报中给出的一般因素,作为其中的基本因子.

我国各地气象台、站目前以月和旬为预见期的中长期气候预报中,一般给出月、旬平均气温和各级(小、中、大、暴)降水天数.建立以修正的彭曼公式为基础的水面蒸发量预测模型的关键,在于如何利用这两者确定预见期内的 R 和 E_a 的数值.

2.1.1 R 的确定

由式(2)~(5)可见, R 是由地表温度计算的,只要建立地表温度 t 与气温 T 的关系, R 就随之而确定了.

从大气升、降温机理可知,气温是随地表温度的改变而变化的,因而两者之间的关系很密切.用都昌蒸发实验站 1980~1995 年地、气温资料求得的由 T 计算 t 的经验公式为

1~5 月和 10~12 月

$$t = 1.083 T \quad (8)$$

6~9 月

$$t = 0.214 T^{1.50} \quad (9)$$

式中: t 为月或旬的平均地表温度, $^{\circ}\text{C}$; T 为月或旬的平均气温, $^{\circ}\text{C}$.

将气象台、站发布的中长期气候预报中的月或旬平均气温预报值代入式(8)和式(9),即可求出预见期(月或旬)内的平均地表温度,用以估算预见期内的水面辐射平衡值.

2.1.2 E_a 的确定

从式(7)中可知, E_a 是由 Δe 计算得来的,故应建立 Δe 与中长期气候预报因素的关系,方能决定预见期内的 Δe 值.

分析都昌蒸发实验站 1980~1995 年资料,发现饱和水汽差 Δe 与空气饱和差 d 有良好的正变关系,其经验公式为

$$\Delta e = 1.268d + 0.19 \quad (10)$$

式中: Δe 为水面附近的饱和水汽压差, hPa; d 为地面附近的空气饱和差, hPa.

根据气象学上的定义,有:

$$d = (1 - S)e \quad (11)$$

式中: S 为地面附近空气的相对湿度; e 为地面附近空气的饱和水汽压, hPa.

其中的 e 可用月或旬平均气温 T 查气象专用数表而得;月、旬平均相对湿度 S 与月、旬内中雨(或雪)以上(日降水量在 10mm 以上)降水天数 N 的关系较密切,用 1980~1995 年资料综合统计得到的结果见表 2 和表 3(表中, $S_{\text{月}}$, $S_{\text{旬}}$ 为月、旬平均相对湿度; $N_{\text{月}}$, $N_{\text{旬}}$ 为月、旬内中雨(或雪)以上降水天数).

表 2 都昌蒸发实验站 $S_{\text{月}}$ 与 $N_{\text{月}}$ 关系统计

$N_{\text{月}}$	不同月份的 $S_{\text{月}}$											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$0 \leq N_{\text{月}} < 3$	0.80	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.80
$3 \leq N_{\text{月}} < 7$	0.82	0.82	0.82	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.82	0.82	0.82
$7 \leq N_{\text{月}} < 10$	0.84	0.88	0.88	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82			
$N_{\text{月}} \geq 10$		0.88	0.84	0.84	0.84	0.86	0.86					

表 3 都昌蒸发实验站 $S_{\text{旬}}$ 与 $N_{\text{旬}}$ 关系统计

$N_{\text{旬}}$	不同月份的 $S_{\text{旬}}$											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.74	0.74
1, 2	0.84	0.84	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
3, 4	0.88	0.88	0.88	0.88	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
5	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90

2.1.3 r 和 Δ 的确定

r 一般采用不考虑水、气温差对辐射平衡影响情况下的数值,即以干湿表方程的常数作为 r 的取值, $r = 0.66 \text{ hPa/K}$.

饱和水汽压曲线的斜率 Δ , 由月、旬平均气温 T 在气象专用数表中查得.

2.2 模型的检验

利用江西省都昌县气象站逐月、旬发布的中长期气候预报资料,代入上面建立的水面蒸发量预测模型中,分别预测都昌蒸发实验站 1996~1998 年逐月、旬水面蒸发量,与实测(E_{60} 蒸发器)蒸发量进行比较,其预测误差较小,可以满足生产上的基本要求(见表 4).

表 4 都昌蒸发实验站月、旬水面蒸发量预测误差统计(1996~1998 年)

预测时段	均方误差 /mm	平均相对 误差/%	相对误差保证率/%	
			$\pm 10\%$ 以内	$\pm 20\%$ 以内
月	11.9	11.2	61.1	72.2
旬	4.2	11.9	62.0	70.4

3 结 语

干旱和水资源短缺是当前制约我国社会经济发展的重要因素,对科学管理水资源和合理利用水资源提出了更高的要求.而在干旱地区以及湿润地区的旱季,水面蒸发是水量损失的主要部分,是水管理与调度中必须考虑的因子.水面蒸发量的预测,也就显得十分重要.完全可以预料,随着时间的推移,水面蒸发量的预测会变得越来越重要.

本文在水面蒸发量预测方面所做的尝试,希望能在此领域起到抛砖引玉的作用,盼望更多的水文学专家能涉足这方面的研究.同时,建议国家有关部门开展水蒸发预测预报技术的专题试验与研究,以提高我国水计划、管理和调度水平.

参考文献:

- [1] 闵寿.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(2):229~236.
- [2] 闵寿.彭曼公式应用中的两个问题的探讨[J].气象,1992(11):17~21.
- [3] 王本善.计算蒸发力的 M.N. Byrnbko 方法之简化与 H. L. Penman 法的比较[J].地理学报,1990(4):395~401.
- [4] 裴步祥.蒸发和蒸散的测定与计算[M].北京:气象出版社,1998.
- [5] 洪嘉珪.华北平原水面蒸发的计算与分析[A].见:刘金明.水量转换[C].北京:科学出版社,1988.
- [6] 闵寿.利用地表温度计算日射总量[J].气象,1996(7):32~34.

(收稿日期:1999-06-21 编辑:熊水斌)

• 简讯 •

伊泰普水电站在扩建中

伊泰普水电站是当今世界上已建成的最大的水电站,它位于巴西和巴拉圭的界河巴拉那河上,装机 18 台共 1260 万 kW,年平均发电量为 750 亿 kW·h.

该电站于 1984 年开始投入,1991 年全部建成.近年来年发电量逐年攀升,1997 年即达到 892 亿 kW·h,超过设计的年平均发电量 142 亿 kW·h.发出的电力分别占巴西全国用电量的 25% 和巴拉圭全国用电量的 89%,是两国的主要电源基地.

由于伊泰普是一个以发电为主的工程,水库水位变化小,一般消落只在 1m 范围以内,因而发电水头变化小,基本上能保持满负荷运行.为充分发挥电站发电效益,1997 年两国协议利用原电站厂房的预留机坑,扩建两台机组,单机容量仍为 70 万 kW,现正在施工中,计划 2001 年投产.届时伊泰普电站将拥有 20 台机组,装机容量也将由 1260 万 kW 扩大到 1400 万 kW.

(吴美高供稿)