

用不同气象要素估算蒸发力的模式研究¹⁾

张 敏 宛公展

(天津气象科学研究所, 300074)

提 要

以实际计算的PENMAN蒸发力作为模拟对象,设计了9种由不同气象要素组合的经验回归模式,用计算机筛选确定统计参数。从中找到一些更简化的,可在很大程度上取代PENMAN法的繁琐计算的模式,依此进一步确定实际蒸发量。

关键词: 蒸发力 估算 PENMAN

引 言

蒸发,是参与地球表面水热平衡的重要因子,因此蒸发的研究与计算,在地球物理学的应用领域内有着重要的意义。凡与水热有关的一系列过程,如农田灌溉,水利发电,水库调蓄,工业与城市用水等,都需要考虑蒸发对水的消耗。估算蒸发的方法有两种,一种是器测法,即利用专门的仪器测定;另一种是算法,即根据经验的或接近经验的公式计算。目前,国内外较公认的估算蒸发力较好的方法为PENMAN法。但该法需要至少有4个气象要素的实测值,手算十分繁琐。本文力图采用更简化的模式与算法,用不同气象要素的简单组合(线性与非线性),直接估算蒸发力,即建立一组以PENMAN蒸发力为模拟对象的,可估算不同时间尺度蒸发力的经验公式,供有关部门参考和使用。

1 彭曼法简介

PENMAN公式的一般形式为:

$$E_0 = (\Delta H_0 + \gamma E_0) / (\Delta + \gamma) \quad (1)$$

这里, E_0 为蒸发力,或最大可能蒸发(单位为毫米水层/日), H_0 为以蒸发单位(mm)表示的辐射平衡,即

$$H_0 = H/L \quad (2)$$

式中, H 为辐射平衡, L 为蒸发潜热,其值为 $247\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。 H 为下垫面接收的短波辐射与地面长波有效辐射之差,即 $H=Q-R_b$ 。这里, Q 为地面接收的太阳总辐射,本文按下式估算,即

$$Q = Q_0(A + B \cdot n/N) \quad (3)$$

Q_0 为晴天辐射, A, B 为经验系数, n/N 为日照百分率。 R_b 为地面有效辐射,用下式计算

$$R_b = \sigma T_a^4 (0.32 - 0.026 \sqrt{e_d}) \\ (0.30 + 0.70n/N) \quad (4)$$

式(4)中, σ 为斯捷潘-波尔兹曼常数,取 $4.9076 \times 10^{-7} \text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{度}^4 \cdot \text{日}$, T_a 为平均气温, e_d 为 T_a 时的实际水汽压。式(1)中的 E_0 可用下式计算

$$E_0 = 0.26(e_s - e_d)(1 - 0.5u), \quad (5)$$

$e_s - e_d$ 为饱和差, u 为百叶箱高度的平均风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。将10m风标高度风速换算成百叶箱高度,公式为

$$u = u_{10}(0.1903 - \lg z_0) / (1 - \lg z_0)$$

其中, u_{10} 为10m高风速, z_0 为地面粗糙度,即通常风速为零的高度,一般 z_0 取15—30cm。式(1)中的 $\Delta = dE/dt$,为饱和水汽压 E -温度 t 曲线的斜率,可按气象常用表提供的公式

1) 国家气象局《短平快》项目。

计算。式(1)中的 γ 值取 0.486mm/°C。

本文用 PENMAN 法计算逐日蒸发力, 然后作为基数存入数据文件, 供进一步建模或查询检索时使用。

2 不同气象要素组合计算蒸发力的模式设计

蒸发力, 也称最大可能蒸发, 是指有充足水分供应时, 由大气状况控制的蒸发过程的能力, 在数值上与自由水面蒸发相近。因此, 它主要受当地天气条件的影响。采用 PENMAN 法计算的蒸发力, 与实际值较为接近; 但计算的方法较为复杂, 计算量较大, 不适宜在广大基层推广使用。鉴于此, 我们以 PENMAN 蒸发力作为基数值, 然后设计下面的 9 种简化模式, 上机模拟计算和筛选。希望能找出一些在一定精度保证下, 可以取代 PENMAN 蒸发力的计算公式, 以便于在广大基层台站选择使用。这 9 种统计模式设计为:

$$\begin{aligned} y_1 &= b_0 + b_1 L \\ y_2 &= b_0 + b_1 L + b_2 L^2 \\ y_3 &= b_0 + b_1 D \\ y_4 &= b_0 + b_1 D + b_2 D^2 \\ y_5 &= a(b + Ta)^2(1 - R) \\ y_6 &= b_0 + b_1 Ta + b_2(1 - R) \\ y_7 &= aD^c(1 + cV) \\ y_8 &= b_0 + b_1 Ta + b_2 E_d + b_3 V + b_4 S \\ y_9 &= f(Ta, T_{\max}, T_{\min}, E_d, P, V, L, D_{\min}, S) \end{aligned}$$

在模式 $y_1 - y_9$ 中, 小写字母 $a, b, c, b_0, b_1, b_2, \dots$ 为待定系数, 大写字母代表某一气象要素, 即 Ta 为气温, T_{\max} 为极端最高气温, T_{\min} 为极端最低气温, E_d 为实际水汽压, P 为降水量, L 为 20cm 小型蒸发皿蒸发量, V 为风标高处定时风速, D_{\min} 为地面最低温度, S 为日照时数, D 为饱和差 ($D = E_s - E_a$, E_s 为饱和水汽压), R 为相对湿度 ($R = E_d / E_s$), 模型 y_9 为逐步回归, 括号中的符号为候选因子。

所有模式, 一律用 PENMAN 蒸发力 PL 作为模拟的对象, PL 为天津地区的逐日值 (选用天津市塘沽站提供的最近 10 年资料,

样本总数为 3652), 待定参数的确定采用经典最小二乘法, 设正规方程为

$$\begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1p} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_{p1} & L_{p2} & \dots & L_{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{1y} \\ L_{2y} \\ \vdots \\ L_{py} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式(6)中, p 为进入模拟方程的因子数目, 通常为待定参数的个数减 1, 如模型 y_2 , 待定参数为 3, 则 $p = 3 - 1 = 2, \dots$ 余可类推。元素 $L_{ij} = \sum(x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j), L_{iy} = \sum(x_i - \bar{x}_i)(y - \bar{y})$, 解(6)先得到 $b_i (i = 1, 2, \dots, p)$, 而 $b_0 = \bar{y} - \sum b_i \bar{x}_i$, 至此待定参数可全部解出。

复相关系数 $R_c = \sqrt{U/L_{yy}}$, 其中回归平方和 $U = \sum b_i \cdot L_{iy}, L_{yy} = \sum(y - \bar{y})^2$ 。剩余平方和 $Q = L_{yy} - U$, 绝对剩余误差 $E = \sqrt{Q/(N - p - 1)}$, 相对误差 $E(\%) = E/\bar{y} \times 100$, 统计量 $F = (U/p)/(Q/(N - p - 1))$ 。

注意, 模型 y_5 与 y_7 , 为非线性模式, 需先进行线性化处理。比如对于 y_5 :

$$\begin{aligned} y_5 &= a(b + Ta)^2(1 - R) \\ &= (ab^2 + 2abTa + aTa^2)(1 - R) \end{aligned}$$

设 $ab^2 = a_0, 2ab = a_1, a = a_2, y = y_5/(1 - R)$ 则

$$y = a_0 + a_1 Ta + a_2 Ta^2 \quad (7)$$

至此, 原模型 y_5 转化为(7), 已线性化, 解出待定系数 $a_i (i = 0, 1, 2)$ 后, 即可还原出原参数, $a = a_2, b = 2a_0/a_1$ 。

而模型 y_7 稍复杂一些, 可采用多重模拟的方法来确定待定参数, 首先, 令 $y_0 = aD^b$, 则有

$$\log(y_0) = \log(a) + b \log(D)$$

令 $V = \log(y_0), A = \log(a), U = \log(D)$, 则

$$V = A + bU \quad (8)$$

式(8)已线性化, 解出 A, b 值, 原参数 $a = \exp(A)$ 。

然而, 再用 a, b 估算出 y_0 后, 代入模型 y_7 , 可有

$$y_7/y_0 = (1 + cV) \text{ 或 } y = (1 + cV)y_0 \quad (9)$$

式(9)中, y 与 V 都已知, 根据样本 n 逐点确

定 $c_i (i=1, 2, \dots, n, n$ 为样本数) 后, $c = \sum c_i / n$ 。至此, 模型 y_i 的所有参数均可确定下来。

3 计算结果分析

本文设计的 9 种模式, 分别对不同尺度的蒸发力进行模型计算, 包括日型, 月型, 四季型及年型。它们可分别满足不同使用者的需求, 现分述如下。

3.1 日型

估算逐月的日蒸发力时, 不同模式之间

表 1 估算逐月日蒸发力最优模式的有关参数

月	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	R	E	$E\%$	选中因子
1	0.972	0.059	-0.15	0.050	0.052	0.958	0.078	11	T_a, E_d, V, L
2	0.899	0.074	-0.14	0.088	0.030	0.957	0.098	10	T_a, E_d, V, S
3	0.700	0.112	-0.13	0.107	0.060	0.969	0.129	7	T_a, E_d, V, S
4	-0.21	0.141	-0.09	0.142	0.119	0.981	0.150	5	T_a, E_d, V, S
5	-0.75	0.148	-0.06	0.131	0.150	0.982	0.187	5	T_a, E_d, V, S
6	-0.143	0.148	-0.04	0.129	0.195	0.994	0.118	3	T_a, E_d, V, S
7	-1.36	0.135	-0.03	0.095	0.229	0.995	0.110	3	T_a, E_d, V, S
8	-1.43	0.104	0.096	0.221	-0.0026	0.991	0.135	3	T_a, V, S, P
9	-1.23	0.142	-0.04	0.116	0.158	0.982	0.147	5	T_a, E_d, V, S
10	-0.38	0.075	0.058	0.053	0.113	0.955	0.167	8	V, S, T_{max}, L
11	0.505	0.098	-0.11	0.097	0.048	0.957	0.119	9	T_a, E_d, V, S
12	0.878	0.068	-0.14	0.082	0.012	0.967	0.073	9	T_a, E_d, V, S

表 1 中, $b_i (i=0, 1, \dots, 4)$ 为回归系数, R 为相关系数, E 与 $E(\%)$ 分别为绝对与相对剩余误差。从表 1 可以看出, 夏季 6、7、8 月, 估计精度最高, 相对误差仅为 3%, 冬季 12、1、2 月最大, 为 9—11%, 全年平均误差仅在 7% 左右。估算日蒸发量的最优模式为 y_8 与 y_9 , 为多元线性回归类型, 但仅为选中 4 个因子的简单线性组合, 比 PENMAN 算法简单得多, 而精度仍很高。因此, 是替代 PENMAN 法的最佳模型选择。

3.2 月型

估算年内各月的蒸发力时, 不同模式之间的差异与日型蒸发力相似。其中, 模型 y_5 精度较低, 复相关系数平均为 0.6 左右, 相对误差在 10%—43%; 模型 y_8 与 y_9 误差仍最小, 复相关系数可达 0.95—0.99, 相对误差在 2% 以下, 其余各类模式, 复相关系数在 0.70—0.90, 相对误差在 10% 以内。表 2 中,

差异如下, 其中模型 y_5 相关系数平均仅为 0.35 左右, 相对误差 > 75%, 是估算精度最低的; 模型 y_8 与 y_9 , 相关系数可达 0.95 以上, 相对误差在 3%—11%, 估算精度最高。其它模式, 相关系数平均可达 0.70—0.90, 相对误差在 15—20% 上下。表 1 中, 给出了估算逐月蒸发最优模式及选中的气象因子的主要统计参数。

列举了最优模式估算年内各月蒸发力的主要统计参数。由表 2 可以看出, 暖季 5、6、7、8、9、10 各月, 估算的蒸发力精度最高, 与用 PENMAN 法计算的结果几乎一致, 冷季 11、12、1、2 月, 误差稍大, 但仍在 2% 以内。

3.3 四季与年型

估算春, 夏, 秋, 冬四季及年蒸发量的模式, 除模型 y_5 误差较大(复相关系数 0.5 左右, 相对误差 20—30%) 外, 其余模型都还不错, 复相关系数可达 0.8 左右, 相对误差多在 10% 以下。模型 y_8 与 y_9 仍最佳。在表 3 中, 列出了最优模式估算季节及年蒸发力的主要统计参数。从表 3 可以看出, 估算四季与年蒸发力的复相关系数, 在 0.96—0.99, 相对误差在 1% 以下, 与用 PENMAN 法计算的结果极为一致。

从不同时间尺度估算蒸发力的模式来看, 一般规律是估算的时间尺度愈大(如季,

年),精度较高,时间尺度愈小(如日、月),精度稍低。特别是对逐日蒸发力的估算,相对误差较大,表中所列的模式,除夏季以外,误差均在5%或以上,因此,对计算精度要求较高

时,可用PENMAN法直接估算。而计算月,季,年蒸发力时,相对误差通常在2%以下,完全可以代替PENMAN蒸发力的计算。

表2 估算月蒸发力最优模式的有关参数

月	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	R	E	$E\%$	选中因子
1	17.840	-2.22	0.772	0.269	0.443	0.995	0.328	1	E_d, T_{max}, L, D_{min}
2	36.934	2.111	-5.17	1.195	0.026	0.992	0.68	2	T_a, E_d, V, S
3	-6.092	5.944	0.009	1.422	0.176	0.988	0.93	1	V, S, T_{min}, L
4	4.003	3.198	-3.14	4.405	0.136	0.995	0.95	1	T_a, E_d, V, S
5	-11.056	3.648	-1.98	3.745	0.185	0.999	0.586	<1	T_a, E_d, V, S
6	-39.193	4.594	-1.50	4.218	0.189	0.996	0.843	<1	T_a, E_d, V, S
7	-23.976	1.085	0.230	2.563	-0.01	0.999	0.460	<1	V, S, T_{min}, P
8	-6.070	1.574	0.253	0.029	0.011	0.997	0.656	<1	T_a, S, L, P
9	-2.764	1.490	0.184	0.043	1.969	0.998	0.649	<1	V, S, L, D_{min}
10	32.517	0.296	0.012	0.132	-0.15	0.995	0.548	<1	T_a, S, L, P
11	10.413	2.919	-2.77	3.032	0.057	0.992	0.798	2	T_a, E_d, V, S
12	33.061	2.246	-5.25	2.498	-0.003	0.952	0.663	2	T_a, E_d, V, S

表3 模型 y_8 与 y_9 估算四季及年蒸发力的有关参数

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	R	E	$E\%$	选中因子
春季	-80.568	8.869	-3.05	17.495	0.149	0.964	3.621	1	T_a, E_d, V, S
夏季	13.914	10.446	-10.5	17.329	0.118	0.995	2.219	<1	T_a, E_d, V, S
秋季	-189.41	14.023	-2.19	10.122	0.224	0.996	1.611	<1	T_a, E_d, V, S
冬季	-20.193	0.016	0.403	0.125	-1.16	0.998	0.873	1	S, L, P, D_{min}
全年	14.896	34.943	-14.5	49.076	0.114	0.995	5.369	<1	T_a, E_d, V, S

4 实际蒸发量的确定

蒸发力(自由水面蒸发量)只代表某种气象条件下的最大可能蒸发,而实际蒸发量,还与蒸发面水源供应的是否充裕等密切相关。实际蒸发量 E_p 通常可用下式计算,即

$$E_p = k_p \cdot E_0 \quad (10)$$

式(10)中, E_0 为蒸发力, k_p 为订正系数,它与

下垫面状况(如植被种类,植被覆盖率,土壤类型,含水量,水分含盐量,作物发育阶段等)有密切关系。在表4,5,6中,我们提供一些研究成果,可供使用部门参考。

表4 华北平原主要作物的耗水特性系数 k_p *

作物	谷子	小麦	棉花	夏玉米	水稻	夏大豆
k_p	0.70	0.90	0.90	1.0	1.3	1.5

* 农田的 E_p 为作物耗水量

表5 不同作物各发育阶段的耗水系数 k_p 值

作物	各个发育阶段						
	移栽—返青	—分蘖—	—拔节—	—抽穗—	—乳熟—	—腊熟—	—收获—
水稻	0.82	1.10	1.37	1.80	1.45	1.17	0.95
冬小麦	播种—越冬	返青—拔节	—抽穗—	—乳熟—	—腊熟—	—收获—	
	0.76	0.91	0.23	1.22	0.98	0.78	
棉花	播种—三叶	—现蕾—	—开花—	开花前期	开花后期	裂铃前	裂铃后
	0.63	0.52	1.03	1.29	1.15	0.91	0.66

表6 不同浓度卤水比蒸发系数 k_p 的逐月变化*

浓度(Be')	4	5	6	7	8	9	10	11(月)
3.8	0.93	0.93	0.96	0.92	0.91	0.87	0.93	0.94
5.4	0.91	0.91	0.94	0.92	0.91	0.83	0.93	0.94
10.5	0.87	0.84	0.91	0.81	0.86	0.80	0.85	0.94
15.3	0.75	0.72	0.80	0.73	0.74	0.70	0.78	0.82
20.3	0.70	0.65	0.72	0.60	0.60	0.57	0.74	0.71
24.2	0.57	0.54	0.57	0.51	0.51	0.47	0.59	0.53

* 表中数据用 E601型蒸发池测得

在表4中,谷子最为抗旱节水,实际蒸发耗水仅为蒸发力的0.70,水稻与大豆实际蒸发量要超过蒸发力1.3—1.5倍,这与作物生态类型以及“绿洲效应”(也称“晒衣绳”效应)有关,后者是指大范围的平流热交换。表5中列举了一些作物不同发育阶段的耗水系数,通常在作物的穗花期(群体发育最旺盛的阶段),耗水量很大,可超过同期的蒸发力值。表6中则列举了我国沿海产盐区的实际蒸发量与卤水浓度的关系,比蒸发系数 k_p 为卤水蒸发量与淡水蒸发量的比值。一般讲,卤水浓度愈高,实际蒸发量愈小。 k_p 与空气相对湿度 R 及卤水浓度(Be')的关系,可用下面经验公式表示,即

$$k_p = 1 - 0.011(1 - R)^{-0.379} (Be')^{1.001}$$

表6数据为E601蒸发池所测得,由于 k_p 为

比例系数,可用来估算大面积的卤水蒸发量。

由表4,5,6提供的数据可以看出,实际蒸发量的确定较为复杂,须先通过实地的测量与试验得到折算系数 k_p ,再进行估算。

5 结束语

从应用角度来看,用一些取代模式代替PENMAN法去估算蒸发力,是完全可行的,其中最佳模型为多元回归类型模式,当然,使用单位也可以根据自己手头拥有的资料和对精度的要求,选择更简易的模型,取代较为繁琐的PENMAN法。由于资料年代所限,本研究仍很初步,有待日后进一步完善。

参考文献

- 1 苑公展. 天津地区蒸发量气候学计算方法的初步探讨. 天津农业区划, 1989年第1期.
- 2 谢贤群等. 农田蒸发与计算. 北京: 气象出版社, 1991.

The Model Studies of Calculating the amount of Evaporation Using Different Meteorological Elements

Zhang Min Wan Gongzhan

(Tianjing Meteorological Institute 300074)

Abstract

A new empirical regression model is designed with nine meteorological elements based on the simulation of calculated Penman evaporative power. Statistical factors of the model are determined by calculation. A simple model has been obtained instead of Complex Penman model partially, which can be used to calculate portical evaporation capacity of water.

Key Words: evaporation calculation PENMAN