

三种计算可能蒸发方法的比较

裴步祥　邹耀芳

（气象科学研究院）

提要

彭曼（Penman）、桑斯维特（Thornthwaite）和布德科（Будыко）计算可能蒸发的方法，是当前国内外普遍采用的三种方法。本文根据这三种计算方法的公式，对它们的精确度、计算复杂性等方面得出了比较结果。

一、三种可能蒸发的计算方法

1.彭曼方法

彭曼利用波恩比的热量平衡公式得出可能蒸发（E_0）的公式[1]为：

$$E_0=\frac{\Delta R+rE_a}{\Delta+r}$$

式中R为辐射平衡(mm/日)；Δ为平均气温时饱和水汽压曲线的斜率（$\frac{mm}{℃}$）；r为干湿表常数；E_a为用空气饱和水汽压e_a代替表面温度时的饱和水汽压e_s情况下按道尔顿公式得出的蒸发量，即：

$$E_a=f(v)(e_a-e_d) \qquad (2)$$

式中f(v)表示风速的函数；e_d为空气水汽压。

（1）式中的R、E_a在一般情况下都是用实测资料来计算的，彭曼得出的结果为：

$$R=R_0(0.18+0.55\frac{n}{N})(1-A)-S\sigma T_k^4\cdot(0.56-0.092\sqrt{e_d})(0.1+0.9\frac{n}{N}) \qquad (3)$$

式中R_0为完全透明时的太阳辐射(mm/日)；n为日照时数(小时/日)；N为最大可能日照时数(小时/日)；A为下垫面反射率；S为灰体系数；σ为斯捷凡-波尔茨曼常数；T_k为绝对温度（K）。

彭曼使用的E_a计算公式，1956年前后不同。它们分别为：

1956年前

$$E_a=0.35(1+0.5V_2)(e_a-e_d) \qquad (4)$$

1956年后

$$E_a=0.35(0.5+0.5V_2)(e_a-e_d)$$

式中V_2为2m高处的风速（$m\cdot s^{-1}$）。

（3）、（4）式是彭曼在英国罗桑斯特（Rothamsted）试验场得出的结果。为了使彭曼公式符合我国的条件，我们利用我国辐射观测和长江三峡水面蒸发等试验资料，得出了R、E_a等的计算公式[2]，E_0的计算式可写为：

$$E_0=\frac{\frac{e_{(a+4)}-e_a}{1.84}\cdot 10^{\frac{Z}{18400(1+\alpha T_a)}}\cdot R+E_a}{\frac{e_{(a+4)}-e_a}{1.84}\cdot 10^{\frac{Z}{18400(1+\alpha T_a)}}+1} \qquad (5)$$

（5）式中

$$R=(Q+q)\left[1+0.098(\lg Z-2)\right]\cdot(0.202+0.643\frac{n}{N'})(1-A)-S\sigma T_k^4\cdot(0.39-0.058\sqrt{e_d})(0.1+0.9\frac{n}{N})$$

$$E_a=0.16(1+0.41V)(e_a-e_d)$$

（5）式中部分符号及R、E_a式中各符号

表示为：$e_{(a+4)}$为温度比气温高4℃时的饱和水汽压（mm）；Z为台站拔海高度（m）；α为气体膨胀系数$=\frac{1}{273}$；T_a为空气温度（℃）；$(Q+q)$为晴天碧空条件下的太阳辐射可能值（mm/日）；N'为实际可能日照时数（小时/日）；V为气象台站观测的风速（$m\cdot s^{-1}$），其余符号含意同前。

彭曼方法可用来计算不同时段，如月、旬的可能蒸发量和水面蒸发量。

2.桑斯维特方法

它是一种经验方法，其公式[3][8]：

$$E_0 = 16\left(10\cdot\frac{T}{I}\right)^a \qquad (mm/月) \qquad (6)$$

式中T为月平均温度（℃），I为年热指数，它是由每个月的热指数i计算得出。i的公式为：

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \qquad (7)$$

（6）式中a为热指数的非线性函数，

$$a = 6.75\times10^{-7}I^3 - 0.771\times10^{-4}I^2 + 0.017921I + 0.49239 \qquad (8)$$

按（6）式求出的E_0再用月的日照时数加以订正，就得出月可能蒸发量。桑斯维特把（6）式得出可能蒸发的计算结果用来研究水分平衡和气候分类。

3.布德科方法

布德科认为在充分湿润条件下的陆面蒸发量，可以用确定水面蒸发量的同样方法来计算，即湿润表面的蒸发量与按蒸发表面温度计算出来的饱和差成正比。因此可得[4]

$$E_0 = \rho D(q_s - q) \qquad (9)$$

式中ρ为空气密度；D为外扩散积分系数；q_s为表面温度时的空气饱和比湿，q为空气比湿。

在足够湿润情况下，蒸发表面温度是由陆面热量平衡公式来确定。根据蒸发表面温度确定q_s后，就可按（9）式来得出可能蒸发量。

布德科公式用来计算月可能蒸发量。他根据计算结果，编制了地球陆地年和各月的可能蒸发图。

二、三种方法的比较

1.旬可能蒸发值比较

在农业气象业务和服务工作中，旬可能蒸发量是很需要的。我们用彭曼方法的几种计算式与作物地段的实测值进行了比较。彭曼方法的计算式包括彭曼1956年前、后和我们得出的（5）式。

可能蒸发是当农田在水分充分供给条件下，大面积同类作物覆盖地面时的水分损失量。一般在冬小麦拔节期和地段充分湿润时的水分损失量即可作为可能蒸发量。因此，我们利用北京农业气象试验站固定地段灌溉的冬小麦地的土壤湿度观测资料，用水分平衡法得出的蒸发量作为实测值，与几种计算式的结果进行比较（见图1、2）。

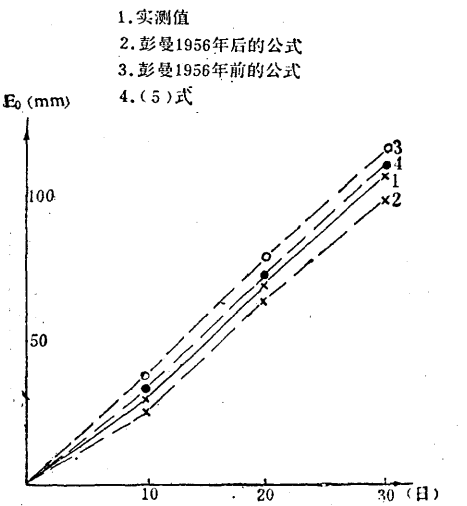


图1　彭曼方法的几种计算式计算得出的可能蒸发量与实测值比较（1961年4月冬小麦地）

从图1、2可以看出，利用彭曼方法的

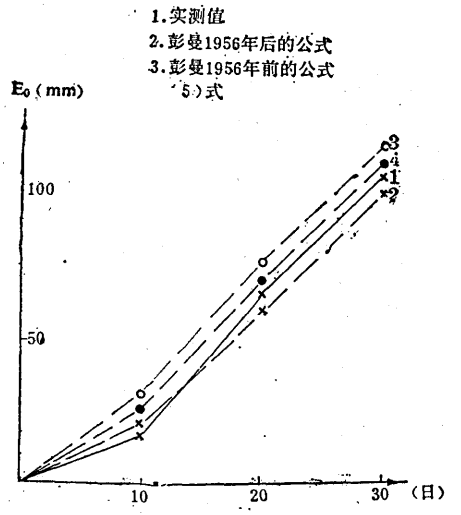


图 2　彭曼方法的几种计算式计算得出的可能蒸发量与实测值比较（1962年4月冬小麦地）

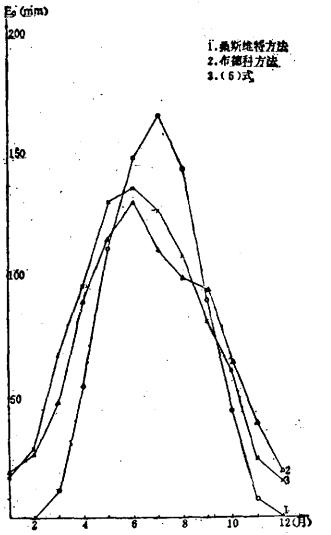


图 3　三种方法计算月可能蒸发量结果比较(北京)

几种计算式得出的结果与实测值都相差不大，其月值的差值不超过10%，而其中(5)式的结果与实测值最接近。彭曼方法1956年前计算式所得结果偏大，而1956年后计算式的结果又偏低了。

利用彭曼方法的三种计算式均可得出较好的结果，然而不同作者利用本地区的资料得出众多的计算式也不是都是如此，如孙惠南利用他们得出的彭曼方法的计算公式，计算并绘制了年可能蒸发分布图（略）[5]。图中可能蒸发的变化趋势与朱岗昆[6]、高国栋[7]的结果是相近的。但在黄河下游一带的可能蒸发的最大值为1200mm[5]，偏高20%以上。可见用彭曼方法不同的计算式，结果有的可能会得出较大的误差，所以在选用计算式前，最好是经过检验。

2.月、年可能蒸发量比较

桑斯维特与布德科方法是用来计算月可能蒸发量的。我们用三种方法计算得出北京年内月平均可能蒸发量进行比较（图3）。

由图3可见，三种方法的计算结果中，彭曼和布德科方法的结果相近，而桑斯维特方法仅5、9月值与彭曼、布德科方法的结果接近，其余月份：6—8月的值偏大，而冬半年10—4月的值又偏小。冬季北京12月和1、2月的平均气温为负值，按桑斯维特方法计算其可能蒸发量为零。

以1961年4月和1962年4月的可能蒸发量为例，把桑斯维特方法的计算结果与实测值进行比较（附表）。附表中也列入了用（5）式得出的月可能蒸发量。由附表可见，用桑斯维特方法计算得出的月可能蒸发量与实测值比较，其误差为50%左右，而按（5）式得出结果的相对误差为3—5%，这说明用桑斯维特方法计算得出月可能蒸发量的误差是比较大的。

附表　几种可能蒸发月值计算结果与实测值比较（单位：mm）

时间 \ 方法类别	(5)式	桑斯维特方法	实测值	相对误差(%) (5)式	相对误差(%) 桑斯维特方法
1961年4月(北京)	109.6	56.7	105.9	3	48
1962年4月(北京)	113.5	48.2	107.6	5	55

用三种方法计算年可能蒸发量则比月值的误差要小得多。以彭曼方法（5）式的年平均可能蒸发量为准，布德科方法偏高2%，桑斯维特方法偏低12.5%。可见年可能蒸发量用三种方法的计算结果是接近的。

桑斯维特是利用月可能蒸发量与月平均气温的关系建立的模式。用它得出年内各月可能蒸发量的最高值与月平均气温最高值的月份相同（图3）。上述比较表明：这种经验公式的适用范围有一定限制。在受季风影响较大的我国大部地区，干湿季分明，空气湿度、日照等气象要素在这些季节中急剧变化，对可能蒸发有很大影响，如华北地区春季少雨，晴天多，空气湿度小，所以在5、6月份可能蒸发量达最高值，而到了7月，气温虽较高，但由于阴雨天多，空气湿度增大，日照时数减少，可能蒸发量低于5、6月份。所以在这些地区用桑斯维特方法不可能得到月蒸发量的准确结果。同时这也从另一方面说明在季风气候区域宜采用多要素的综合法，即彭曼方法和布德科方法。

三、三种方法复杂性的比较

计算方法是否简便易行，也是方法能否广泛采用的一个重要原因。对计算方法的复杂性主要指两个方面：1）计算式的复杂程度；2）计算所需资料是否容易得到。

从上述两个方面看，三种计算方法中以桑斯维特方法最好。它不仅所用的计算式简单，而且仅需1、2个气象要素即可。

布德科方法的计算公式（9）也并不复杂，但为得出q_s所进行的蒸发表面温度的计算是很困难的。如大家都知道的，地表温度是气象台站观测的要素，但由于仪器和观测方法的问题，它的观测结果是不够准确的，而草地、作物活动面的温度缺乏资料。所以一般蒸发表面的温度用计算方法得出。

布德科方法求蒸发表面的温度是用热量平衡公式：

$$R = P + B + LE$$

式中P为乱流热通量；B为土壤热通量；L为蒸发潜热。P、R、B可写为[7][9]

$$P = \rho c_p D(T_s - T_a)$$

$$R = R_w - 4S\sigma T_k^3(T_s - T_a) \qquad (11)$$

$$B = \omega' \int_0^{Z_H} [T(Z, t_2) - T(Z, t_1)\,dz$$

式中c_p为定压比热；R_w为按气温决定有效辐射所计算的湿润表面的辐射平衡值；T_s为蒸发表面的温度（℃）；ω'为土壤容积热容量；Z_H为土壤温度变化波及的深度，$T(Z, t_1)$，及$T(Z, t_2)$为起始时间t_1及终止时间t_2期间Z深度处的土壤温度。

把上式代入（10）式后，经过整理得出：

$$R_w - B - d = (e_s - e_a) + 0.8(T_s - T_a) \qquad (12)$$

式中d为空气饱和差，R_w和B可计算得出，T_a、e_a和d取自气象资料，再用马格拉斯公式代入就可求出e_s（及T_s）值。于是按（9）式求得E_0值。

从上述可以看出：在求取蒸发表面温度时的计算复杂，工作量大，且不太容易得到准确的结果。

彭曼在求取可能蒸发的公式时，应用了波恩比的热量平衡公式：

$$E = \frac{R}{1 + r\left(\frac{T_s - T_a}{e_s - e_d}\right)} \qquad (13)$$

式中也有蒸发表面温度T_s及与它有关的饱和水汽压e_s，但在推导中彭曼把T_s、e_s消去了，因而避免了计算蒸发表面温度的困难，这是彭曼公式便于使用的一个重要原因。

彭曼在应用道尔顿公式时，引入了E_a，即将道尔顿公式中的e_s用e_a代替时的蒸发量，即（2）式。

其次，在推导中彭曼假设

$$\Delta=\frac{e_s-e_a}{T_s-T_a}$$

即温度为平均气温（$T=T_a$）时饱和水汽压曲线的斜率。

把上述代入（13）式和推导后得出的（1）式。在彭曼方法的计算可能蒸发公式中已经没有表面温度，仅用空气温度和水汽压、日照时数、风速就够了。

为简化计算，桑斯维特和彭曼方法都编制了查算表。近年来使用小型计算机和已编好的程序进行计算，只要几分钟就可得出可能蒸发值。

附彭曼方法按（5）式编制的可能蒸发程序及说明。

```
 5:"A":REM "Eo"
10:INPUT "month";
   O,"detate";D
20:INPUT "Ta=";TA
   ,"ed=";ED,"U=
   ";U,"n=";SN,"N1
   =";N1,"Q+q=";Q
   ,"Z=";Z,"A=";A
30:N=N1+1
40:ED=INT (10*.75
   *ED+.5)/10
50:X=273.16+(273.
   15+TA):GOSUB 3
   00
60:EA=INT (10*.75
   *Y+.5)/10
70:TS=TA+4
80:X=273.16+(273.
   15+TS):GOSUB 3
   00
90:ES=INT (10*.75
   *Y+.5)/10
100:TK=273.15+TA
110:B=Z/18480/(1+T
   A/273)
120:B1=(ES-EA)/1.8
   4*10^B
130:B2=Q*(1+.098*(
   LOG (Z-2))*(.20
   2+.643*SN/N1)*
   (1-A)
140:B3=.9*2.01*10^
   -9*TK*TK*TK*TK
   *(.39-.058*ED
   )*(.1+.9*SN/N)
150:B4=.18*(1+.41*
   U)*(ES-ED)
160:B5=B1+1
170:E0=(B1*(B2-B3)
   *B4)/B5
180:E0=INT (10*E0+
   .5)/10
190:COLOR 1
200:LPRINT O;" ";
   month";D;" ";
   detate"
210:GRAPH
220:LINE (0,15)-(2
   90,151,7
230:TEXT :LF 1
240:LPRINT "Ta=";T
   A;LPRINT "ed="
   ;ED:LPRINT "U=
   ";U:LPRINT "n=
   ";SN:LPRINT "N
   1=";N1:LPRINT
   "Q+q=";Q:
   LPRINT "Z=";Z
250:LPRINT "A=";A#
   COLOR 3
260:LPRINT "Eo=";E
   0
270:LF 1:GOTO 10
300:M=10.295*24*(1-
   X)-5.028*LOG (
   1*X)
310:M=M+1.58475E-4
   *(1-10^(-8.295
   9*(1/X-1)))
320:M=M*3.28/3E-4*
   (10^(4.70955*(
   1-X))-1)+.7881
   4
330:Y=10^M
340.RETURN
```

程序说明：

5：标号“A”程序名“E_0”。

10：输入月、旬，月按实际月份输入；上、中、下旬分别以1、2、3号码代替输入。

20：输入空气温度T_a（℃）、水汽压e_d（hPa）、台站风速$V(m\cdot s^{-1})$以及日照时数n(h/日）的旬平均值，输入用查算表查得的N′（在程序中以N1代替)和（Q+q）值；输入台站拔海高度Z*及反射率A值。

30：最大可能日照时数N由机器赋值。

40：将e_d由hPa换为mm值。

50—60：计算T_a时的饱和水汽压e_a。

70—90：计算$T_{(a+4)}$时的饱和水汽压$e_{(a+4)}$。

100—180：计算E_0值。

190—250：打印输入项目。

260：打印E_0值（mm/日）。

270：返回继续计算下一旬的E_0值。

300—340：计算饱和水汽压的子程序。

四、结果

1.计算可能蒸发的精确度：月值以彭曼和布德科方法较好；旬值本文给出的彭曼方法的三种计算式均可得出较好的结果；其中以（5）式的误差最小；桑斯维特方法所得月值误差大，仅适用于计算年值。

2.计算方法的复杂性：以桑斯维特方法最简便；布德科方法最复杂。

3.彭曼方法可用来计算各种时段的可能蒸发量，且有较高的精确度，适宜气象台站在农业气象业务和服务中使用。计算式较复杂的问题，在使用计算机（如PC-1500）后可得到满意的解决。

参考文献

〔1〕Penman H. L. Natural evaporation from open water bare soil and grass, proceedings of Royal society of London, series vol. 4, 193, 1948.

〔2〕陶祖文、裴步祥、农田蒸散和土壤水分变化的计算方法，气象学报，vol. 37, No. 4, 1979。

〔3〕J. R. Mather Climatology: Fundamentals and application Mcgraw-Hill book comp, 1974.

〔4〕M. N. 布德科著，地球热量平衡，沈钟泽，气象出版社，1980。

〔5〕孙惠南，用自然地理观点探讨蒸发力，地理学报，vol. 39, No. 1, 1984。

〔6〕朱岗昆等，气象纪录在经济建设中的应用（Ⅱ）中国各地蒸发量的初步研究，气象学报，第26卷，第1—2合期，1955。

〔7〕高国栋等，中国物理气象图集，农业出版社，1981。

〔8〕国家气象局农业气象区划办公室，全国农业气候资料集（水分部分之一），国家气象局编印，1983年。

〔9〕陆渝蓉等，中国水分气候图集，气象出版社，1984。

* 对于某个站点来说，拔海高度Z可以改为赋值语句直接赋值，不必每次输入。