

彭曼公式风函数的应用

Richard H. Cuenca Martin T. Nicholson

引言

当现有资料充足时,计算蒸散量(ET)的彭曼(Penman)综合公式是一个理论可靠且应用广泛的公式。这个公式把 ET 分为能量平衡和空气动力学两部分而把吸收太阳能和平流能的效应分开。空气动力学项包括两部分:第一部分是来自经验的风速函数,它与第二部分相乘。第二部分是饱和水汽压与环境或露点水汽压之差,这个差值叫饱和差。测定 ET 时,可将风函数与计算的饱和差进行验证。然而,计算饱和差的方法很多,其结果各不相同。因此,在实践中,计算饱和差的方法必须与所要使用的特定的风函数相一致。由于在饱和差的计算上概念不清,所以用这个公式时往往出现不确切和误差,

计算饱和差的方法,至少有六种。因为风函数是用饱和差由经验得出的,所以风函数的大小和形式的变化决定于饱和差的计算方法。以前,有些研究人员比较风函数的不同形式时,往往不注意相应的计算饱和差的方法。在有的时候,则是因为推导某一风函数用来计算饱和差的方法尚未发表。

本文介绍计算饱和差的具体方法,评述这些方法的主要差别和经验上得出风函数形式和数值的相应变化。由不同学者导出的公式在使用时一般都列成了风函数系数表。文章对计算饱和差的方法和有关能提供补充资料的个别试验的参考资料也作了简要说明。进行灌溉系统设计的工程师、水资源规划人员和为各种应用必须计算蒸散量的农业气象专家都能利用这个资料。

关于参照蒸散量的解释

值得注意的是,许多作者在应用彭曼公式计算蒸散量时,已经不用“潜在 ET ”(potential ET)这个概念了。这是最近在欧洲地球物理学学会蒸发专题讨论会上(1979,维也纳)和美国土木工程师学会灌溉需水量委员会的一次会议上(1980年,爱达荷的Boise)的讨论结果。通常,作物蒸散量(ET_c)与用彭曼公式计算得出的 ET ,通过作物系数 K_c 把它们联系起来,如下式:

$$ET_c = K_c ET \quad (1)$$

因为很多作物都有大于1的作物系数,特别是在作物生长季节的需水高峰时期,因而“潜在”这个概念的含意和重要性是有一定疑问的。原彭曼公式的应用指的是高度均一的矮秆绿色作物完全覆盖住地面且水分特别充足的情况。这个定义适合于20—50毫米(0.79—1.97英寸)高的草地。应用公式(1)导出的作物系数,则是参照草的用水量。另外一些学者,特别是美国西部地区的学者,将彭曼公式应用于200—500毫米(7.87—19.69英寸)高的苜蓿的用水量计算,这就使作物系数的推导与苜蓿有关,这个系数也可能大于1。因为在介绍用彭曼公式计算 ET 的过程中,“潜在”这个概念容易使人误解。所以,我们建议用参照 ET 的概念代替潜在 ET ,则公式(1)变为:

$$ET_c = K_c ET_r \quad (2)$$

式中的下标 r 代表一种参照作物(一般用草或苜蓿)。要正确地应用这个公式,这个作物系数必须始终对同一参照作物来取。

风函数的由来

由于彭曼最初推导出的风函数对其他学者的补充推导有一定影响,所以有必要做进一步的说明。广泛应用的计算蒸散量的彭曼公式来源于1802年多尔顿(Dalton)导出的关系式。彭曼给出的多尔顿公式如下:

$$E = f(u)(e_{srf} - e_{air}) \quad (3)$$

式中, E 为单位时间的蒸发量, e_{srf} 和 e_{air} 分别为蒸发面及其上面的空气水汽压。 $f(u)$ 为水平风速函数。彭曼还参考了罗沃(Rohwer)1931年的研究成果。罗沃提供了从1876年到1929年与气候有关的蒸发的全部资料,其中论述最多的是风函数的一些形式和饱和差的测定值。罗沃的主要目的是描述自由水面蒸发。他推导了一个类似多尔顿公式的蒸发公式,此外又增加了一个高度修正项。完整的罗沃公式是:

$$E = (1.465 - 0.0186B)(0.44 + 0.118u_0) \cdot (e_{srf} - e_{sp}) \quad (4)$$

式中, E 为蒸发量(英寸/天); $(1.465 - 0.0186 B)$ 为高度订正系数, 从 0—15000 英尺 (4575 米) 的高度均列成表格; B 为 32°F (0°C) 时的平均气压(英寸水银柱); $e_{s, \text{sr}}$ 为地面温度的平均饱和水汽压, 单位是英寸水银柱; $e_{s, \text{dp}}$ 为露点温度下的平均饱和水汽压, 单位是英寸水银柱; u_0 为表面平均风速, 单位是英里/小时 (罗沃在地面以上测定风速, 恰好是风速表风杯高度测定的风速)。高度修正系数在海平面是 0.91。用海平面这个修正值, 彭曼简化了公式 (4), 得出下式:

$$E = 0.40(1 + 0.27 u_0)(e_{s, \text{sr}} - e_{s, \text{dp}}) \quad (5)$$

式中, E 的单位为毫米/天; 饱和差 $(e_{s, \text{sr}} - e_{s, \text{dp}})$ 的单位是毫米水银柱, 风速项同上。

彭曼所用的辅助曲线是由罗沃提出的, 它表示地面以上的高度和这个高度的风速与地面风速之间的关系。彭曼利用这个比值, 提出了公式 (4) 的变换形式如下:

$$E = 0.40(1 + 0.17 u_2)(e_{s, \text{sr}} - e_{s, \text{dp}}) \quad (6)$$

式中 u_2 是在 2 米 (6.56 英尺) 高处测定的 24 小时的平均风速, 单位是英里/小时。比较 (6) 式与 (5) 式, 得到 u_2/u_0 之比值等于 1.6。罗沃得的数值大约为 1.9, 这似乎更适于 2 米高处测定的风。而稍小于 1.6, 比如 1.5, 可能适合于修正 2 英尺高处测定的风。由于彭曼对公式 (6) 的应用是从经验出发的, 这个风速比值的差虽无关紧要, 不过它可能是造成概念模糊的根源。

据我们现在所知彭曼当初在校准综合公式中的空气动力学项的风函数时, 是用的 1944 年到 1945 年 Rothamsted 试验站的试验结果。把试验资料分组, 每组至少包括有大致相同风速的 4 天, 再以 $E_0/(e_{s, \text{sr}} - e_{s, \text{dp}})$ 与风速对照点图。 E_0 是直径 762 毫米 (2.5 英尺)、深度大于 610 毫米 (2.0 英尺) 的圆形露天水池的蒸发量。利用一个统计上拟合这些数据的线性函数就得出风函数的下述形式:

$$E_0 = 0.35(1 + 0.0098 u_2)(e_{s, \text{sr}} - e_{s, \text{dp}}) \quad (7)$$

彭曼的文章没有明确说明, 但他特别强调, 要用下面的方法计算饱和差。 $e_{s, \text{sr}}$ 是根据用水银钢管温度计连续记录温度测定值绘出的一条光滑曲线计算的, 再计算从曲线间隔四小时量取六个温度测定值。与其相对应的饱和水汽压是每天的 $e_{s, \text{sr}}$ 的平均值。因此, 平均温度法和间隔四小时量测温度法曾被一起使用。

$e_{s, \text{dp}}$ 是用在 Rothamsted 测定的露点温度与气象局 Dunstable 分局间隔六小时测定的露点温度,

通过加权计算得的全天的露点温度平均值计算的。因此, 露点的饱和水汽压也是根据平均温度计算的, 在这种情况下间隔时间是六小时。

彭曼最后得出了综合算法。最初是用来计算露天水体的蒸发量, 单位是毫米/天, 计算公式如下:

$$E_0 = \frac{\Delta}{\Delta + r} R_n + \frac{r}{\Delta + r} E_a \quad (8)$$

式中, Δ 为水汽压对温度曲线的斜率, 在温度等于平均气温的情况下, 用毫米水银柱/ $^\circ\text{F}$ 表示; r 为干湿表常数, 用毫米水银柱/ $^\circ\text{F}$ 表示; R_n 为地面得到的净辐射能量, 用等效的毫米/天表示; E_a 与公式 (7) 中的 E_0 相似, 由下式表示:

$$E_a = 0.35(1 - 0.0098 u_2)(e_{s, \text{air}} - e_{s, \text{dp}}) \quad (9)$$

这里 $e_{s, \text{air}}$ 为空气的饱和水汽压, 单位是毫米水银柱, 其余各项如上述。从要求的数据叙述中可以很明显地看出, 用公式 (9) 时, 饱和水汽压是根据每天的平均温度计算的。

彭曼在 1952 年和 1956 年发表的文章, 修改了他的成果, 建立了用公式 (8) 计算的 E_0 与作物蒸散量的关系式:

$$ET = E_0 \frac{ET}{E_0} \quad (10)$$

式中 ET/E_0 之比针对一年中的不同季节进行了计算。彭曼根据 1952 年美国地质局在赫夫奈尔 (Hefner) 湖收集的资料, 提出对风函数系数的修正, 得出的风函数是:

$$f(u) = 0.35(0.5 - 0.01 u_2) \quad (11)$$

式中的主要变化只是常数 0.5, 而风速系数 0.01 是公式 (9) 中 0.0098 的四舍五入值。

彭曼后来提出, 为了计算矮杆绿色作物, 在完全覆盖的地面、高度均一和水分充足等条件的定义下的潜在蒸散量, 可以不用 (10) 式, 而直接采用下式:

$$ET = \frac{\Delta}{\Delta + r} R_n + \frac{r}{\Delta + r} E_a \quad (12)$$

式中 E_a 由下式给出, 这个公式与公式 (9) 表示的较原始的空气动力学项几乎一样。

$$E_a = 0.35(1 + 0.01 u_2)(e_{s, \text{sr}} - e_{s, \text{dp}}) \quad (13)$$

公式 (12) 和 (13) 就是广泛用来计算草的参照蒸散量的彭曼公式。

计算饱和差的方法

计算饱和差的方法能改变经验上确定的风函数的形式和大小。因此, 应该对计算饱和差的各种方

法进行认真的评述和分类。计算饱和差的方法基本上可分为温度平均法和水汽压平均法。在温度平均法中,饱和水汽压和环境或露水水汽压是根据平均温度计算的,为此,平均温度用 $(T_{max}+T_{min})/2$ 表示。式中 T_{max} 为每天的最高温度, T_{min} 为相对应的每天的最低温度。水汽压平均法是计算一天不同时间的饱和差值,然后对这些值求平均。计算饱和差的六种方法如下:

1. 平均温度时的饱和水汽压减去最低露点温度时的水汽压:

$$\Delta e = e_{s,ave} - e_{d,pmin} \quad (14)$$

2. 平均温度时的饱和水汽压减去平均露点温度时的水汽压:

$$\Delta e = e_{s,ave} - e_{d,pave} \quad (15)$$

3. 平均温度时的饱和水汽压减去平均相对湿度乘平均温度时的饱和水汽压的乘积:

$$\Delta e = e_{s,ave} - RH_{ave}(e_{s,ave}) \quad (16)$$

4. 最高和最低温度时的饱和水汽压之平均值减去平均露点温度时的水汽压:

$$\Delta e = \frac{e_{s,max} + e_{s,min}}{2} - e_{d,pave} \quad (17)$$

5. 最高和最低温度时计算的饱和水汽压差的平均值:

$$\Delta e = \frac{(e_{s,max} - e_{max}) + (e_{s,min} - e_{min})}{2} \quad (18)$$

6. 平均温度时的饱和水汽压减去实际水汽压。实际水汽压是用干湿表测定的干湿球温度差计算的:

$$e_{air} = e_{wet} - r(\Delta T_{wet}) \quad (19)$$

$$\Delta e = e_{s,ave} - e_{air} \quad (20)$$

上面的方法 1、2 和 3 属于温度平均法,而 4 和 5 是水汽压平均法,方法 6 虽不能直接归于哪一种,但计算结果近于温度平均法。

饱和水汽压不随温度呈线性变化。对于同样的资料,除了相对湿度为 100% 外,用最高最低温度平均值计算的饱和差(方法 1)总比用最高最低温度的饱和水汽压平均值计算的饱和差(方法 4)小。这一点可以用下面取自詹森(Jensen)根据赖特(Wright)于 1970 年 6 月 21 日在爱达荷州的金伯利(Kimberly)所收集的资料作为例子来说明:

1. 24 小时平均温度为 22.1°C;
2. 最高温度($e_{max}=14.5$ 毫巴)为 30.5°C;
3. 最低温度($e_{min}=10.9$ 毫巴)为 12.5°C;
4. 最高和最低温度的平均值为 21.5°C;

5. 最高和最低温度时的平均相对湿度为 53%;
6. 山地夏季时间上午八时水汽压 $e_{d,pmin}=12.6$ 毫巴;
7. 24 小时平均差值为 16.2 毫巴。

计算方法

在这部分开头,先把按上述公式顺序计算的结果列在下面:

1. 用公式(14)将 21.5°C 时的 $e_{s,ave}$ 减 $e_{d,pmin}$, $25.6 - 12.6 = 13.0$ 毫巴;
3. 用公式(16)将 21.5°C 时的 $e_{s,ave} \times (1 - RH_{ave})$, $25.6 \times (1 - 0.53) = 12.0$ 毫巴;
4. 用公式(17)将 30.5°C 和 12.5°C 的平均 e_s 减 $e_{d,pmin}$, $(43.7 + 14.9)/2 - 12.6 = 16.7$ 毫巴;
5. 用公式(18)计算平均水汽压差值, $[(43.7 - 14.5) + (14.9 - 10.9)]/2 = 16.6$ 毫巴。

詹森指出,根据平均温度计算的饱和差,不能代表每天的平均饱和差。在这个例子里,温度平均法 1、3 和水汽压平均法 4、5 相比较,说明了这一点。根据已知的 24 小时的实际饱和差平均值,说明后两种方法比较合适。

因为经验的风函数正适用于计算饱和差,所以实际上,计算饱和差的精度不是重要的因素。只要计算 ET 时使用大量的经验关系,仍将是正确的。重要的是计算饱和差的方法要与最初用来验证风函数的方法相一致。普鲁伊特(Pruitt)和杜伦博斯(Doorenbos)在他们的文章里给出了这个重要性的充分证据。但因为它的范围较窄,所以尚未得到更广泛的重视。附图表示从三个不同地方用蒸散量测定装置得到相同的资料,用温度平均法(附图 a、b、c)和水汽压平均法(附图 d、c、f)计算的最适合的风函数形状。从图中可以看出,风函数的形状和大小,决定于计算饱和差的方法。

可以证明,彭曼最初是在潮湿环境下推导的风函数,那种情况下用温度平均法或水汽压平均法计算的饱和差没有大的差别,这无疑是正确的,并且说明在比较干燥的气候条件下,应该用水汽压平均法与彭曼风函数系数。然而,在半干旱或干旱的气候条件下,特别是在美国西部,大多数风函数的推导以及关于计算饱和差的特殊方法已由其他学者导出。因此,要反复劝告大家计算饱和差的方法与最初推导经验风函数的方法应相吻合。

计算饱和差的不同方法的差异,随着最高最低温度差、平均温度和相对湿度的变化而变化。通过

水汽压平均法计算饱和差的差异，不可能形成一个简化的表示关系。

新的发展

许多学者提供了与彭曼公式空气动力学项有关的资料，特别是对最初提出的风函数系数作进一步改进的有关资料。说明新系数的最佳途径是对希尔(Hill)提出的方法作修正，其空气动力学项可以表示为：

$$E_a = m(W_1 + W_2 u) \Delta e \quad (21)$$

式中 m 为经验常数，其值决定于 ET_r 的单位和数据分析， W_1 和 W_2 为经验上得出的风函数常数； u 为在一特定高度测定的风速； Δe 是用上面介绍过的方法之一计算的饱和差。

为了选择风函数和相应的计算饱和差的方法，必须知道用来导出所发表的关系式的经验方法。而用来得出经验的空气动力学项的十分详细的试验方法不一定都发表。因此，作者把公式(21)中的参数对常用的空气动力学项列在表1中。

表 1 彭曼公式空气动力学项的单位与方法

ET_r 的单位 (1)	u 的单位 (2)	测定风的高度(m) (3)	e 的单位 (4)	m (5)	W_1 (6)	W_2 (7)	计算 Δe 的方法 (8)	参照作物 (9)
毫米/天	英里/天	2	毫米 Hg	0.35	1.0	0.0098	2	水
毫米/天	英里/天	2	毫米 Hg	0.35	0.5	0.01	2	水
毫米/天	英里/天	2	毫米 Hg	0.35	1.0	0.01	2	草
卡/厘米 ² ·天	公里/天	2	毫巴	15.36	1.0	0.0062	2	草
毫米/天	英里/天	2	毫巴	0.01034	1.1	0.017	4	苜蓿
毫米/天	公里/天	2	毫巴	0.27	0.75	0.0115	5	苜蓿
毫米/天	公里/天	2	毫巴	0.27	1.0	0.01	1、3、6	草
卡/厘米 ² 天	公里/天	2	毫巴	15.36	1.06*	0.0091*	4	苜蓿

* 由公式(22)和(23)中给出的多项式计算的随时间变化的系数的季节平均值

应该特别提出的是赖特最近曾发表一个与其他人不同的风函数。在这个函数中，系数 W_1 和 W_2 是用多项式表示的，在生育季节是时间的函数，公式表示如下：

$$W_1 = 23.8 - 0.7865 D + (9.7182 \times 10^{-3}) D^2 - (5.4589 \times 10^{-5}) D^3 + (1.42529 \times 10^{-7}) D^4 - (1.41018 \times 10^{-8}) D^5 \quad (22)$$

$$W_2 = -0.0122 + (5.2956 \times 10^{-4}) D - (5.9923 \times 10^{-6}) D^2 + (3.4002 \times 10^{-8}) D^3 - (9.00872 \times 10^{-11}) D^4 + (8.79179 \times 10^{-14}) D^5 \quad (23)$$

式中 D 为一年中的一天。

上面的系数供修正风函数用，以说明全年中明显影响感热平流的周围地区环境条件的变化。在爱达荷州的 Kimberly 进行的测定验证了上述多项式。当时对应用这个关系式的地理范围不清楚。不过，这个方法表明季节的变化是应该注意的。

结 论

这篇文章介绍了彭曼综合公式的空气动力学项中普遍应用的风函数的推导，说明最初是用温度平均法计算饱和差的。文中也指出计算饱和差的主要差异在于是用温度平均法还是用水汽压平均法。根据普鲁伊特和杜伦博斯的观点，反复说明由于计算

饱和差的方法，以前发表的风函数可能不同。实际上，当根据经验校验两个不同的风函数时，除非计算饱和差的方法完全相同，否则得出的风函数的大小和形状都将不同。

关键问题是，如果不了解最初计算饱和差的方法，那么，在研究或设计过程中就不可能正确地应用风函数。在一个新的场合要应用风函数时，必须用同样的方法计算饱和差。这篇文章介绍了最常用的风函数计算饱和差的方法。有些方法在部分著作中

只是模糊提到，甚至根本没有提到。表1的资料对应用理论完整的彭曼公式计算ET将是有帮助的。在遍及世界的许多地方随着收集的气象资料日益完善，这个重要的方法势必得到更广泛的应用。

唐德富译自 *«Journal of the Irrigation and Drainage Division»*, Vol.108, No. IR 1, 1982.13-22.

董德显、王石立校