

Penman– Monteith 蒸散模型及其在森林下垫面中参数的确定

李孝广, 毕华兴, 刘 胜, 刘利峰, 李笑吟
(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: Penman– Monteith 公式是在蒸散研究中应用最多, 也是变化形式最多的方法, 该文在对目前 Penman– Monteith 模型在森林下垫面中应用总结的基础上, 阐述了其中众多参数的意义和常用的确定方法, 着重探讨了影响该模型精确性的关键因子净辐射、空气动力学阻力和冠层阻力的计算方法, 并分析了 Penman– Monteith 模型在实际应用中存在的一些问题, 提出了该模型在今后森林蒸散研究中发展的思路。
关键词: Penman– Monteith 蒸散模型; 下垫面; 净辐射; 空气动力学阻力; 冠层阻力
中图分类号: S 715.4 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2005)06-0257-05

Penman– Monteith Evapotranspiration Model and Calculations
of Its Parameters in Forest Underlying Surface

LI Xiao-guang, BI Hua-xing, LIU Sheng, LIU Li-feng, LI Xiao-yin
(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The Penman– Monteith model is an affective approach used widely and variously in evapotranspiration research. On the basis of summarizing the application of the Penman– Monteith model in forest underlying surface, the evaluating method and significance of many parameters were expounded. The calculating methods of the key parameters were discussed including net radiation, aerodynamics resistance and canopy layer stomatic resistance, some problems were analyzed and some suggestions were given for practical application of this model in forest evapotranspiration research.
Key words: Penman– Monteith evapotranspiration model; underlying surface; net radiation; aerodynamics resistance; canopy layer stomatic resistance

1 引 言

森林作为功能强大的生态系统, 在发挥巨大生态效益和水文效益的同时, 也存在自身耗水的问题^[1]。目前, 森林蒸散的研究方法很多, 却没有相对标准的方法^[2], 且进展缓慢^[4, 3]。在农田蒸散研究中广泛采用的以蒸渗仪为主的实测法无法适用于树形大、地形复杂的森林蒸散; 基于空气动力学基础的涡动相关法忽略了平流, 要求有大范围的均一下垫面, 并需两个高度的气象资料, 实际应用较为困难; 而在森林蒸散中应用相对多的 Bowen 比法在森林下垫面的适用性还存在一定的争议^[3~5]。
蒙特斯(Monteith, 1965) 在彭曼(Penman, 1948) 等人工作的基础上提出了以能量平衡和水汽扩散理论为基础适用于作物蒸腾量计算的阻力模式, 即彭曼– 蒙特斯(Penman Monteith) 蒸散模型, 既考虑了作物的生理特征, 又考虑了空气动力学参数的变化, 具有较充分的理论依据和较高的计算精度, 能比较清楚地反映蒸散的变化过程及其影响机制, 为非均一下垫面蒸散的研究开辟了新的途径^{6~9]}。70 年代后,

随着不同形式气孔计的问世, 该模式得到了广泛的应用和发展, 与世界各地的蒸渗仪实测结果相比, Penman– Monteith 公式的计算精度比其它各种计算方法要好^{10, 11]}, 且该公式不仅能计算以月为周期的蒸散量, 还能计算以日或小时为周期的蒸散量^[12, 13], 是目前公认的适用性强、计算精度高和可靠的蒸腾量计算通用模式^[5, 12]。
Penman Monteith 模型是在蒸散研究中应用最多, 也是变化形式最多的方法^[5], 学者在计算中都试图将一些参数加以修正精确化, 但由于其参数不易确定, 观测工作量大, 误差不易分析^[5], 所以至今好多参数仍没有统一通用的确定方法。同时, 研究者在应用 Penman– Monteith 模型估算森林蒸散量的过程中发现, 其精度主要决定于净辐射 R_n 、空气动力学阻力 r_a 和冠层阻力 r_c 的准确性^[4, 5]。本文总结了 Penman– Monteith 蒸散模型的基本形式, 对其中参数的意义及其常用的计算方法做了介绍, 着重总结了在森林下垫面条件下, 学者对影响 Penman– Monteith 蒸散模型的关键因子净辐射、空气动力学阻力和冠层阻力的计算方法, 以助于 Penman– Monteith 模型在森林蒸散估算中的进一步运用, 为森林

* 收稿日期: 2005-01-19
基金项目: 国家 “973 项目 “森林植被调控区域农业水土资源与环境的尺度辨析与转换”(2002CB111503); 霍英东青年教师基金(81026) 共同资助
作者简介: 李孝广(1981-), 男, 在读硕士, 研究方向: 林业生态工程。

蒸散研究提供简便可行的手段。

2 Penman– Monteith 模型的具体形式

根据能量平衡定律,忽略平流作用、光合作用和农田内部物理变化所消耗的能量,可写出作物冠层能量平衡方程如下^[14, 15]:

$$R_n = \lambda E + H + G \tag{1}$$

由紊流扩散理论:

$$H = \rho C_p (T_o - T_z) / r_a \tag{2}$$

$$\lambda E = \frac{\rho C_p (e_{w0} - e_a)}{r(r_s + r_a)} \tag{3}$$

综合以上(1)、(2)、(3)式,消除难以观测的叶冠处气温项,并引入饱和水汽压—温度曲线斜率 $\Delta = \text{des}/\text{dT}$ 可得彭曼—蒙特斯的基本方程如下^[6, 14, 15]:

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p (e_s - e_a) / r_c}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)} \tag{4}$$

当海拔大于 500 m 时,应考虑气压订正,则有^[15, 16]:

$$\lambda E = \frac{\frac{P_0}{P} \Delta(R_n - G) + \rho C_p (e_s - e_a) / r_c}{\frac{P_0}{P} \Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)} \tag{5}$$

因测试和研究方法及研究目的不同,加之 Penman– Monteith 模型是以整个下垫面为研究对象,多数研究都把植物蒸腾耗水与土壤蒸发耗水不分,这很难准确了解森林个体和群体水文效益^[17]。所以在森林蒸散研究中,应将林冠和土壤分层考虑,考虑气压订正,用于冠层蒸腾量计算的 Penman– Monteith 模型公式^[15, 16, 18]为:

$$\lambda E = \frac{\frac{P_0}{P} \Delta R_{nl} + \rho C_p (e_s - e_a) / r_c}{\frac{P_0}{P} \Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)} \tag{6}$$

以及后来的修正式^[15, 18]:

$$\lambda E = \frac{\Delta R_n + \rho C_p (e_s - e_a) (1 + b r_a / \rho C_p) / r_c}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a) (1 + b r_a / \rho C_p) / r_c} \tag{7}$$

式中^[14, 15, 19~22]: R_n ——冠层表面吸收的太阳净辐射通量密度, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; λ ——汽化潜热,在气温为 t 时, MJ/kg , $\lambda = 2498.9 - 2.33t$; E ——蒸散的水汽通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; H ——增热空气消耗的显热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; G ——增热土壤消耗的热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; e_{w0} ——叶气孔腔内水汽压, Pa; e_a ——大气实际水汽压, Pa; T_o ——叶冠层处气温, ; T_z ——气象观测点气温, ; Δ ——饱和水汽压与温度关系曲线上的斜率, $\text{Pa}/$, $\Delta = 5966.89 \times 10^{2.63/241.9t} / (241.9 + t)^2$; γ ——干湿表常数, $\text{Pa}/$, $r = 0.6455 + 0.00064t$; ρ ——空气密度, kg/m^3 , $\rho = 1.2837 - 0.0039t$; C_p ——空气定压比热, $\text{MJ}/(\text{kg} \cdot)$, $C_p = 0.1012$; e_s ——大气饱和水汽压, Pa, $e_s = 6.11 \times 10^{7.63T/(241.9 + T)}$, ($T > 0$); $e_s = 6.11 \times 10^{9.5T/(266.5 + T)}$, ($T \leq 0$); r_a ——空气动力学阻力, s/m ; r_c ——作物对水汽传输的冠层阻力, s/m ; b ——系数, $b = -4\sigma(t_a + 273)$; R_{nl} ——林冠截流净辐射量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; P_o/P ——气压订正, $P_o/P = 10^{L_h/(18400(1 + t/273))}$; L_h ——海拔高度, m。

本文主要以森林下垫面为讨论对象,对计算参考作物蒸发散的几种 Penman– Monteith 的公式,不再列举。目前, Penman– Monteith 蒸发散模型有好多修正式,上面是最常见和最基本的几种表达式。无论哪一种表达形式,都涉及到了求解难度最大的关键参数冠层净辐射 R_n 、冠层阻力 r_c 和空气动力学阻力 r_a ,这几个参数的确定在一定程度上决定了 Penman– Monteith 蒸发散模型的准确性^[5, 23]。

3 Penman– Monteith 模型中关键参数的确定

3.1 净辐射的确定

3.1.1 理论太阳辐射 Q_A

理论太阳辐射是假定地球上不存在大气的条件下,地面上太阳辐射通量的理论日总量^[15, 24]:

$$Q_A = \frac{R_0 T}{\tau \rho_{\text{日地}}} (\omega \sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \sin \omega) \tag{8}$$

式中: R_0 ——太阳常数($1\,353.73\,\text{W}/\text{m}^2$); τ ——昼夜的时间; $\rho_{\text{日地}}$ ——以日地平均距离(1.496×10^8)为单位的日地距离,取近似值 1; π ——圆周率; ω ——日出时角, $\omega = \arccos(-\tan \Phi \tan \delta)$, 也可由理论日照时数 N 来计算,因每 15 相当于 1 h, 则^[18]: $\omega_0 = \frac{15}{2} \times N$; Φ ——地理纬度; δ ——赤纬。

其中,理论日照时数 N 可通过如下公式计算^[15]:

$$N = \frac{4}{15} \arcsin \frac{\sin(\frac{90.27 \pm \Phi - \delta}{2}) \sin(\frac{90.27 \pm \Phi + \delta}{2})}{\cos \Phi \cos \delta} \tag{9}$$

δ 可以从天文历年中查得,也可用以下公式近似计算: $\delta = 23.5 \sin(0.986m - 78.9)$; m ——日序(从 1 月 1 日开始排序)。

3.1.2 地面实际太阳辐射通量 Q

是指以短波的形式到达地面的太阳总辐射,可以用直接辐射仪测得,通用的方法是用日照比率确定到达地面的总辐射^[15, 22]:

$$Q = (a + b \frac{n}{N}) Q_A \tag{10}$$

式中: Q ——地面实际总太阳辐射总量, W/m^2 ; n ——实际日照时数,采用当地气象站资料; a 、 b ——用日照比率计算太阳辐射的经验系数,通常 $a = 0.2$ 左右, b 为 $0.4 \sim 0.8$ ^[15, 25]。康绍忠等(1985)分析了我国北方省区的辐射台的观测资料,得出了各站使用的系数 a 、 b 值,可供参考。

3.1.3 地面有效辐射 F_e (也称黑体长波辐射):

地面向天空传送的长波辐射和大气向地面传送的长波辐射之和为地面有效辐射^[14, 15, 19, 22]:

$$F_e = \sigma T_e^4 (0.32 - 0.026 \frac{e_a}{e_s}) (c + d_n / N) \tag{11}$$

式中: F_e ——地面有效辐射(W/m^2); σ ——斯蒂芬—玻尔茨曼常数,其值为 $5.673 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; c 、 d ——经验系数, Penman 公式在计算净辐射过程中涉及许多经验系数,如果这些系数取值不当,就会使冬季月份尤其是 12 月份的净辐射为负值,这是不合理的。刘晓英(2003)等在计算过程中发现,使净辐射为负值的主要原因在于黑体辐射结果偏大,因此,在对各种计算黑体辐射的公式比较之后,认为只有邓根云公式使冬季太阳净辐射不出现负值,比较符合我国北方干旱半干旱地区实际,故我国多采用邓根云黑体辐射公式, $c = 0.3$, $d = 0.7$ [邓根云, 1977]^[14, 15]。

3.1.4 净辐射 R_n

下垫面所接受的所有太阳辐射能与所支出的辐射能之差为净辐射^[15, 20]:

$$R_n = (1 - \alpha) Q - F \tag{12}$$

式中: R_n ——地表净辐射(冠层上方净辐射), W/m^2 ; α ——反射率,可实测获得,据许多学者的研究,森林的反射率在 $0.15 \sim 0.2$ 之间。

3.1.5 冠层截获净辐射 R_{nl}

冠层所截获的净辐射 R_{ni} 等于冠层上方的净辐射 R_n 与透过冠层到达林下地表的净辐射 R_{ns} 之差^[康绍忠等, 1994], 即^[15, 25~28]:

$$R_n=R_n-R_n=R_n(1-e^{-kLAI})\text{或}R_{ns}/R_n=e^{-kLAI}\quad(13)$$

式中: k ——消光系数,一天中,除太阳高度角的变化影响外,消光系数主要与冠层叶面积指数有关,通常取经验值,但误差较大,只能求得较大时间尺度上的 R_n 。要直接精确的确定 k 值是比较困难的,在不同的时期 R_{ns}/R_n 值由于叶面积指数 LAI 的变化而不同,可通过采用各月典型日各时段不同叶面积指数下的平均 R_{ns}/R_n 值,经统计分析计算出各月林冠的平均消光系数 k ,如果考虑以小时为单位时间因素,参照康绍忠的经验方程,可得冠层截留净辐射 R_n 的日变化为^[15,16]:

$$R_n=R_n(1-e^{-K(1+A|\sin(t-13)\pi/12|LAI)})\quad(14)$$

式中: t ——一天的时序; h ; K ——消光系数; A ——常数。 K 和 A 值可通过各月典型日实测净辐射日变化数据及相应林分的 LAI ,经回归计算确定^[15]。在计算以小时为单位的准确蒸腾量时,只要有林冠上方净辐射 R_n 值和叶面积指数 LAI ,就可采用(14)式推求小时尺度上的冠层截留净辐射 R_n 。

3.2 空气动力学阻力 r_a 的确定:

Penman- Monteith 模型中引入空气动力学阻力和植被冠层阻力之后,该模式就全面考虑了影响农田水分散失的大气因素和作物生理因素,为蒸散的研究开辟了一条新途径。空气动力学阻力是由于空气湍流而产生的输送阻抗,为不同下垫面分速轮廓线的函数,其准确测定相当困难^[6]。

对于均匀下垫面,冠层以上风速呈对数分布^[6,26]:

$$u(z)=\frac{u^*}{k}\ln\frac{Z-d}{Z_0}\quad(15)$$

$$u^*=ku(z)/\ln\frac{Z-d}{Z_0}\quad(16)$$

则冠层动量汇到参考高度的空气动力学阻力为^[29]:

$$r_a=\frac{1}{k^2u(z)}\cdot\left|\ln\left|\frac{Z-d}{Z_0}\right|\right|^2\cdot\Phi_n^2\quad(17)$$

式中: Φ_n ——大气稳定度函数,中性层结条件下 $\Phi_n=1$ 。Penman- Monteith 模型假定大气为中性层结,则从林冠到其上某一高度 Z 的空气动力学阻力可表示为^[7,15,26]:

$$r_a=\frac{1}{k^2u(z)}\cdot\left|\ln\left|\frac{Z-d}{Z_0}\right|\right|^2\quad(18)$$

对于森林下垫面,一些学者也用以下半经验半理论公式计算 r_a ^[15,16,18,30]:

$$r_a=\frac{4.72}{1+0.54u}\cdot\left|\ln\left|\frac{Z-d}{Z_0}\right|\right|\quad(19)$$

式中: u^* ——摩阻流速, m/s ; d ——零平面位移,取 $3/4$ 的平均树高^[25], m ; Z_0 ——林冠粗糙度,取 $1/10$ 树高, m ; k ——卡门常数,为 $0.38\sim0.43$,取平均 0.41 ; $u(z)$ ——粗糙度高度处的风速, m/s ; u ——观测点风速,风速, m/s ,须将气象站 $10m$ 高度风速通过风速廓线分布换算为观测高度值; Z ——蒸散面以上 $2m$ 处的风速高度, m 。

3.3 冠层阻力 r_c 的计算方法

Penman- Monteith 模型能否在实际中推广应用,很大程度在于冠层阻力能否参数化,围绕冠层阻抗参数化问题,不同学者提出了不同的理论和方法^[11,23]。Penman 最早使用冠层表面阻力的概念是,把计算单片叶子水汽交换的方程(叶片表面阻力)用于冠层,将冠层看成一个整体或是一片巨大的叶片,对应的冠层阻力为 r_c ; G. Szeicz 等认为冠层阻抗可以看成是各个叶片气孔阻抗的总和; Jones 将冠层整体气孔阻力看作是植物冠层内各层或不同部位叶片气孔阻力相并联的结果;卢振民们研究认为,农作物冠层内水汽主要来自冠层上部的叶片(占70%),可用冠层上部单叶的气孔阻抗乘以其比例系数来计算冠层阻抗; J. Bhaslr 的研究则表明:单叶气孔阻抗与冠层阻抗的比值与冠层有效叶面积指数有

关^[16,23]。

冠层阻抗如同零平面位移一样,是一个虚拟的物理量,它是表示不同层次、不同部位叶片的气孔阻抗、土壤湿润状况及冠层内空气动力学特性等因素对整个冠层蒸散影响总效果的一个参数。也就是说,冠层阻抗并不是一个纯粹的生理参数,其数值大小并不是仅仅从冠层上各个叶片的气孔阻抗值就可以完全确定的^[23]。而森林庞大的冠幅、复杂的冠型结构给确定森林冠层整体气孔阻力带来了更大的难度。国内外的研究者在这方面作了大量研究,基本由以下几种思路:

(1) 实测单叶气孔阻力,再考虑叶面积指数求得冠层整体气孔阻力 r_{si} 代替冠层阻力 r_c 。冠层整体气孔阻力可看作植物冠层内各层或不同部位叶片气孔阻力相并联的结果(H·G·Jones,1983),即^[15,16,1]:

$$r_{si}=\left[\sum_{i=1}^n\frac{1}{r_{si}}LAI_i\right]^{-1}\quad(20)$$

式中: LAI_i ——气孔阻力接近的叶片的叶面积指数; r_{si} ——叶片平均的单位叶面积的气孔阻力, s/m ; n ——划分的冠层叶片类型数或叶片个数。

储长树(1995)以小麦为对象研究认为J. Bhaskar 提出的考虑了不同层次叶片差异性和有效叶面积的方法精确度最高^[23]。对于森林,贺康宁等(2003)将整个冠层看成一个整体,认为冠层内蒸腾水汽主要来自叶片分布最集中的中部,将冠层中部单位叶片气孔阻力乘一系数,并采用冠层总叶面积指数,则上式可简化为^[16]:

$$r_{si}=K^*r_{si}/LAI\quad(21)$$

式中: r_{si} ——单叶气孔阻力, s/m 。

根据相关研究结果,当群体结构变化不大时, K^* 基本稳定。因此,可用某种独立方法测出典型天蒸散后,再反推出冠层整体气孔阻力,计算出系数 K^* 。

余新晓等(2002)采用了如下公式来修正叶面指数 LAI 对实测单叶气孔阻力值的影响,直接得到 r_c ^[7]:

$$r_c=r_{si}/[K\times\ln(LAI+1)]\quad(22)$$

式中: K ——树冠结构的修正参数,与树种有关,介于 $0.3\sim1.0$ 之间^[7]。

(2) 考虑影响气孔阻力的环境因子胁迫函数法(姚德良,2000;丛振涛,2004)。虽然冠层表面阻力只代表植被与大气水汽交换的表面阻力,并不等于冠层气孔阻力,但它确实包含气孔开闭的信息,因此可用气孔阻力与环境因子间的关系探讨它。姚德良等(2000)介绍了Noihan 等提出的冠层阻力参数化模型,其中气孔开启的水分调节因子为根层土壤的平均含水量,并且考虑了太阳短波辐射,田间持水量,凋萎含水量的影响。模型由下式表示^[26-28,31]:

$$r_c=(r_{min}/(LAI))\times(F_1\times F_2\times F_3\times F_4)^{-1}\quad(23)$$

$$F_1=((r_{min}/r_{max})+f)/(1+f)\quad(24)$$

$$f=0.55(Q_t/Q_{crit})\times(2/LAI)\quad(25)$$

$$F_2=(\theta-\theta_c)/(\theta_s-\theta_c)\quad(26)$$

$$F_3=1-\beta(e_{sat}-e_a)\quad(27)$$

$$F_4=1-1.6(T_o-T_a)^2/10^3\quad(28)$$

其中, F_1 ——太阳辐射胁迫函数; F_2 ——土壤水分胁迫函数; F_3 ——饱和水汽压差胁迫函数; F_4 ——温度胁迫函数; r_{min} 和 r_{max} ——最小和最大气孔阻力; LAI ——整个冠层叶面积指数; T_o ——叶面温度参考值,取 $25^\circ C$; T_a ——空气温度, $^\circ C$; Q_t ——到达冠层顶的太阳短波辐射, W/m^2 ; Q_{crit} ——辐射临界值,取 $100W/m^2$; θ_s 、 θ_c 、 θ_w ——土层平均体积含水率、饱和含水率、凋萎含水率; e_a 、 e_{sat} ——空气水汽压、饱和水汽压,

hPa; β ——系数,取0.0061/hPa。

莫兴国等(1997, 2000)以此冠层表面阻力与环境因子的关系为基础,对其中的参数进行了优化修正^[28,32],本文不再罗列。

(3) 结合气象因子的经验公式法。一般情况下,作物冠层阻力可通过单个叶片的气孔阻力和叶面积指数来计算。但由于水汽传输不仅受冠层结构和叶片气孔的影响,且还受土壤含水量、土壤质地等因素的制约,因此确定十分困难^[32]。为解决这一问题,一些学者通过建立经验公式来求得 r_c 。刘贤赵等(2001)介绍了Katerji和Perrier进行大量的试验研究发现 (r_c/r_a) 与 (r^*/r_a) 具有很好的线性关系,且 (r_c/r_a) 与 (r^*/r_a) 值的增大而增加,其数学表达式为^[6]:

$$r_c/r_a = a(r^*/r_a) + b \tag{29}$$

式中: r^* ——引入的临界阻力,可根据气象资料求得:

$$r^* = \frac{\Delta}{\Delta + r} \cdot \frac{\rho C_p (e_s - e_a)}{R_n - G} \tag{30}$$

a, b ——经验系数,实测或其它方法得到蒸腾量后,用回归法反推出 a, b 。

对比以上几种方法,第一种方法是以实测单叶气孔阻力为基础,结合叶面积指数的变化,求出整个林冠的整体气孔阻力后直接代替原公式中的冠层阻力项。由于气孔计的大量推广应用,该方法在近几年被不少学者所采用,有较大的发展空间;第二种方法从影响气孔阻力的环境因子出发,建立环境因子与森林冠层最小气孔阻力的胁迫函数,气孔阻力与诸如太阳辐射、气温、饱和水汽压差、土壤含水量等环境因子的参数化方法已有许多研究^[32],此方法无需实测气孔阻力,减小了实验难度,但由于考虑了众多环境参数,需具备一定的资料。前两种方法都认为叶片气孔阻力是决定冠层阻力的重要因素,所以都是以叶片气孔阻力为突破口来确定冠层阻力,而第三种方法避开了受复杂环境因子影响的叶面气孔阻力,建立冠层阻力与易观测和求解的气象因子间的关系,为确定冠层阻力提供了新的思路,这种模型一般较为简单,便于计算,但无统一的形式,通用性还有待提高。

4 讨论

虽然Penman-Monteith模型可以较为准确的估算下垫参考文献:

[1] 王华田.林木耗水性研究述评[J].世界林业研究, 2003, 16(2): 23- 27.
[2] 王安志,裴铁军.森林蒸散模型参数的确定[J].应用生态学报, 2003, 14(12): 2153- 2156.
[3] 王安志,裴铁军.长白山阔叶红松林蒸散量的测算[J].应用生态学报, 2002, 13(12): 1547- 1550.
[4] 魏天兴,朱金兆,张学培.林分蒸散耗水量测定方法述评[J].北京林业大学学报, 1999, 21(3): 85- 91.
[5] 王安志,裴铁军.森林蒸散测算方法研究进展与展望[J].应用生态学报, 2001, 12(6): 933- 937.
[6] 刘贤赵,康绍忠.不同光照条件下作物蒸腾量计算的研究[J].水利学报, 2001, (6): 45- 50.
[7] 余新晓,程根伟,赵玉涛,等.长江上游暗针叶林生态系统蒸散计算[J].水土保持学报, 2002, 16(5): 15- 16.
[8] Jensen M E, Burman R D, Allen R G. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements[R]. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 1990, No. 70: 332.
[9] 李玉霖,崔建坦,张铜会.参考作物蒸散量计算方法的比较研究[J].中国沙漠, 2002, 22(4): 372- 376.
[10] Jensen M E, Burman R D, Allen R G. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements [M]. Roma: ASCE Manual, 1990.
[11] 许迪,刘钰.测定和估算田间作物腾发量方法研究综述[J].灌溉排水, 1997, 16(2): 54- 59.
[12] 杜尧东,刘作新,张运福.参考作物蒸散计算方法及其评价[J].河南农业大学学报, 2001, 35(1): 57- 61.
[13] 史海滨,何京丽,郭克贞,等.参考作物腾发量计算方法及其适用性评价[J].灌溉排水, 1997, 16(2): 50- 54.
[14] 刘钰, L S Pereira, J L Teixeira, 等.参照腾发量的新定义及计算方法对比[J].水利学报, 1997, (6): 27- 33.
[15] 康绍忠,刘晓明,熊运章.土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M].北京:水利电力出版社, 1994. 122- 150.
[16] 贺康宁,田阳,张光灿.刺槐日蒸腾过程的Penman-Monteith方程模拟[J].生态学报, 2003, 23(2): 251- 257.

面的蒸散量,并被广泛的引用,但对于森林下垫面,在实际确定其参数时,仍有以下问题函待解决:该模型需要非常详尽的气象资料,而在许多地区,尤其是发展中地区,气象资料往往是有限的^[14];对于Penman-Monteith公式改进的计算蒸散的能量平衡空气动力学综合阻抗法,有两方面的缺陷,一是空气动力学阻抗的计算需要确定表面粗糙度参数,二是该式中假定了在动量输送阻抗和热量输送阻抗相等时取得表面粗糙度。因此,在中性层结条件下,可得到满意的结果;在非中性层结和稳定层结下,有一定误差;在早晚,也会像波文比法出现同样的问题,即净辐射和土壤热量很小或负值时,往往产生不合理的结果^[16];该模型一些参数的计算量较大、公式复杂,需用一些统计软件或编程以便提高效率。其次,为适应不同地区的情况,修正彭曼公式中加入了许多修正参数和函数,有些参数是难于准确量测的,而且过多的修正参数和函数会引起公式使用者的混淆;在确定影响模型准确性的关键参数净辐射 R_n 、空气动力学阻力 r_a 和冠层阻力 r_c 时,各种方法都采用了一些经验参数,尤其是冠层阻力 r_c 的计算,不同学者所用的方法差异很大,而且这些参数都无法实测获得,使得其精度缺乏可比性,故准确性和通用性需进一步探讨。

森林蒸散研究的未来发展趋势必定是向蒸散的物理机制、生理机制的深层次发展^[5],既考虑了作物生理机制又考虑了蒸散物理机制的Penman-Monteith模型以其坚实的理论基础和较高的准确性,将在蒸发散研究中发挥重要作用。今后, Penman-Monteith模型及其参数确定仍需在以下几个方面继续深入研究:在实际应用中,应对其中的经验系数采用一些更精密的仪器通过典型天的实测值来校正,以便提高准确性;尽量减少不必要的修正参数和一些复杂函数的加入,对原模型众多参数进一步简化,提高模型的通用性;将此法结合红外遥测技术测量森林表面温度,可测算大范围蒸散量;从理论的角度探讨非中性层结条件下 Penman-Monteith模型的应用。另外,实测法是估算精度判断标准,不断提高实测法的观测精度是森林蒸散研究发展的基础,也会为Penman-Monteith模型的更精确化、更通用化发展提供支持和依据。

[17] 苏建平, 康博文. 我国树木蒸腾耗水研究进展[J] . 水土保持研究, 2004, 11(2) : 177- 179.

[18] 程根伟, 余新晓, 赵玉涛, 等. 贡嘎山亚高山森林带蒸散特征模拟研究[J] . 北京林业大学学报, 2003, 25(1) : 24- 27.

[19] 刘晓英, 林而达, 刘培军. Priestley- Taylor 与 Penman 法计算参照作物腾发量的结果比较[J] . 农业工程学报, 2003, 19(1) : 32- 36.

[20] 闫俊华, 周国逸, 陈忠毅. 鼎湖山人工松林生态系统蒸散力及计算方法的比较[J] . 生态学杂志, 2001, 20(1) : 5- 8.

[21] 周杨明, 程根伟, 杨清伟. 贡嘎山东坡亚高山森林区蒸散力的估算[J] . 山地学报, 2002, 20(2) : 135- 140.

[22] 刘绍民, 刘志辉, 傅玮东. 作物农田蒸散计算模型的研究[J] . 生态学杂志, 1998, 17(4) : 66- 69.

[23] 储长树, 卢显富, 青吉铭. Penman- Monteith 公式中冠层阻抗的合成方法[J] . 南京气象学院学报, 1995, 18(4) : 494- 499.

[24] 王书功, 康尔泗, 金博文, 等. 黑河山区草地蒸散发量估算方法研究[J] . 冰川冻土, 2003, 25(5) : 558- 565.

[25] Jarvis P G, James G B, Landsberg J J. Coniferous forest. In vegetation and the atmosphere[M] . In: Monteith, J L ed. London: Academic Press, 1976. 171- 240.

[26] 罗毅, 雷志栋, 杨诗秀, 等. 非水分胁迫条件下作物腾发的模拟研究[J] . 农业工程学报, 1998, 14(2) : 154- 159.

[27] 姚德良, 谢正桐, 李家春. 禹城地区陆气相互作用耦合模式和观测研究[J] . 生态学报, 2000, 20(6) : 1076- 1082.

[28] 莫兴国, 林忠辉, 刘苏峡. 基于 Penman- Monteith 公式的双源模型的改进[J] . 水利学报, 2000, (5) : 6- 11.

[29] 周英, 中双和, 张红卫. 大气稳定度对农田蒸散计算准确性的影响[J] . 南京气象学院学报, 1994, 17(1) : 93- 96.

[30] Thom A S, Oliver H R. On Penman's equation for estimating regional evaporation[J] . Q. J. Roy. Meteorol. Soc. , 1977, 103: 345- 357.

[31] 丛振涛, 雷志栋, 杨诗秀. 基于 SPAC 理论的田间腾发量计算模式[J] . 农业工程学报, 2004, 20(2) : 6- 9.

[32] 莫兴国. 冠层表面阻力与环境因子关系模型及其在蒸散估算中的应用[J] . 地理研究, 1997, 16(2) : 81- 88.

(上接第212 页)

在桩(墙)顶后及半坡分别设1.46 m 和2 m 宽平台, 平台上设0.4 m × 0.4 m 矩形截水沟, 采用M 7.5 浆砌片石封闭, 平台及截水沟浆砌厚度0.3 m, 将边坡水排至路堑以外。

(4) 桩顶以上刷方边坡根据安全系数 $K = 1.3$ 计算推力设锚杆钢筋混凝土截水框架梁护坡, 在截水框架节点处设置锚杆。锚杆钻孔直径为 $\varnothing 10$ mm, 采用跟管钻进, 每根锚杆必须保证锚固段长度5.5 m, 锚杆采用 $\varnothing 6$ mm 钢筋, 孔内灌注M35 水泥砂浆, 注浆压力0.2 ~ 0.4 MPa, 孔口设止浆塞。锚杆纵、横向间距4.0 m。自桩顶平台坡脚至堑顶: 最下部两排锚杆长12 m, 第三、四排锚杆长14 m, 第五排锚杆长12 m, 第六、七排锚杆长10 m, 第七排以上锚杆长8 m。截水框架梁内采用液压喷播植草防护, 截水框架梁锚杆区边缘采用M 7.5 浆砌片石镶边。

(5) K9+ 487 ~ K9+ 553 长66 m, 右侧路堑设桩间挡土墙进行支挡加固。根据安全系数 $K = 1.15$ 计算整个滑坡推力值为980 kN/m ~ 1 130 kN/m, 因考虑锚杆承受110 kN/m ~ 256 kN/m, 桩承受720 kN/m ~ 970 kN/m 推力。其中桩工12 根, 桩间距(中- 中)6 m, 桩长26 ~ 27 m, 截面尺寸均为1.75 × 2.75 ~ 2 × 3 m, 3[#] ~ 10[#] 桩的桩中心距路线中心距离为7.5 m, 1[#]、2[#]、11[#]、12[#] 桩的桩中心距路线中心距离为约8.15 m, 桩身采用C30 混凝土灌注。具体桩位、截面尺寸及平面布置详见图1。每根锚固桩桩顶均设一节加强型锁口, 高2 m, 位于土层及岩层的严重风化带中的桩身均设置护壁, 在滑动面附近及松散或有地下水出露段的土体内采用加强型护壁。

(6) K9+ 488 ~ K9+ 552 长64 m, 右侧设重力式路堑挡土墙, 为个别设计。原4[#] 桩与新设3[#] 桩及新设10[#] 与原12[#] 桩之间及桩前墙高均为10 m, 埋深为自路肩下2 m。新设3[#] 桩至新设10[#] 桩之间墙高8 m, 基础为托梁, 挡土墙胸坡和背坡均为1 : 1.5。挡土墙墙身采用C15 片石混凝土浇注。桩间挡

参考文献:

[1] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M] . 北京: 地质出版社, 1997.

[2] 杨航宇, 颜志平, 朱赞凌. 公路边坡防护与治理[M] . 北京: 人民交通出版社, 2002.

土墙墙背设0.5 m 厚砂夹卵石反滤层, 反滤层上下部隔水层分别采用M 7.5 浆砌片石和C15 片石混凝土制作。上部厚0.5 m, 高0.5 m; 下部厚0.5 m, 高0.3 m。挡土墙每隔2 m 上下、左右交错设置泄水孔, 泄水孔的尺寸为0.1 m × 0.1 m, 呈梅花型布置。

(7) 新设3[#] 桩至新设10[#] 桩之间的挡土墙采用单桩托梁基础。托梁宽3.0 m, 厚1.5 m, 长4.0 m。托梁中心与挡土墙重心保持在同一垂线上, 托梁与边沟之间的缺口处采用M 7.5 浆砌片石回填。

(8) 在桩间挡土墙的最下面三排泄水处设三排仰斜排水孔, 每级边坡平台靠山侧约1 m 与3 m 高处各设一排仰斜排水孔, 间距2 m, 其深度至挡土墙后或坡面内10 ~ 14 m, 仰角均为10°。采用 $\varnothing 100$ mm 钻孔, 孔内设 $\varnothing 80$ mm 带孔PVC 管, 并用带膜透水土工包裹, 引排地下水。

(9) 凿除或拆除已损坏但未倒塌的挡土板, 根据现场情况重新挂板, 锯掉高出墙顶以上的桩, 凿除或拆除外露的锁口护壁, 采用C15 混凝土对外露的桩桩身进行抹面。

8 结 语

众所周知, 水对边坡稳定性有显著影响。它的影响是多方面的, 包括软化作用、冲刷作用、静水压力和动水压力作用及浮托力作用等。本边坡病害工程就是由于水的作用带来的病害的典型实例, 其主要原因是, 由于排水不畅, 地表水大量下渗, 板后的土体严重饱水, 下部土体被逐渐软化, 形成软弱层, 加大了土的容重并产生静水压力而造成。因而在以后的边坡设计及整治过程中都要充分考虑到水的作用, 作到及时引水、截水、排水, 使边坡免受损害, 从而尽可能高的提高工程质量。