

不同理论方程模拟华南桉树人工林蒸散量的比较

黄志宏^{1, 2}, 王旭^{3, 4*}, 周光益⁵, 吴志祥⁴

1. 韶关学院农业工程系, 广东 韶关 512005; 2. 中南林学院生态研究室, 湖南 长沙 410004; 3. 海南大学环境与植物保护学院, 海南 儋州 571737;
4. 农业部儋州热带农业资源与生态环境重点野外科学观测试验站, 海南 儋州 571737;
5. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520

摘要:森林生态系统蒸散作为生态系统中的重要生态过程,联系着生态系统的水分平衡和能量平衡,并与养分循环密切相关。以雷州半岛桉树人工林纪家、河头林场为研究样地,在样地调查的基础上,对林地有关气象因子、土壤水文生态因子作了近4 a 的定位观测。选取 TURC 公式、Penman-Monteith 方程 (PM) 和周国逸公式作为代表,三者分别以温度为指标、以辐射与能量转换为驱动因子和以物理过程为主导的蒸散量理论计算方法。并将理论计算结果同水量平衡法估算结果进行比较。结果表明,尽管各种计算方法的结果均存在一定的波动性,但是其波动的原因是不一样的。对于 PM 方程而言,结果对所选参数有一定的依赖性。对于周国逸公式来说,在计算较小时间尺度 (1 a) 蒸散量时可能会出现一定的波动,波动的原因可能在于参数的时间尺度匹配问题。对于 TURC 公式,计算结果波动的根本原因在于其公式的经验局限性。理论计算值同水量平衡估算结果比较说明,三者均可以在一定程度上反映系统的年蒸散量。比较而言,周国逸公式计算结果的波动性范围较小,较适用于热带、亚热带森林生态系统蒸散量的计算。

关键词:雷州半岛;桉树人工林;蒸散量;理论计算

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1672-2175 (2008) 03-1107-05

森林蒸散是森林水分平衡和热量平衡中的重要分量,它关联着生态系统的水分循环、能量流动,并进一步体现着生态系统功能,是森林生态系统中极其重要的生态过程。森林蒸散由林地蒸发、林冠截留蒸发和森林植物蒸腾组成,受气候、土壤与植被条件等多种因素影响^[1-4]。森林生态系统的结构复杂,蒸散的界面较多,且不同界面间水相转换的理论基础和发生原理也大相径庭,使得实际测定森林生态系统蒸散力变得没有可能,借助理论上推导的公式对其进行计算显得尤为必要^[5,6]。精确地计算各种气候、土壤与植被条件下的蒸散量,这正是蒸散量研究的首要目标所在。

有关蒸散量的推算,很多人提出过相应的方法,归纳起来不外乎涉及蒸散力的计算方法和实际蒸散的计算方法两个问题,所使用的手段大多为水热平衡联系的方法^[7-12]。Penman较早提出了一个计算自由水面的蒸散公式,后来考虑到冠层阻力并作相应修正后可应用于植被蒸散研究中。然而,找到一个统一的公式或模型可以比较精确地计算分布在各种自然条件下的森林的蒸散量几乎是不可能的^[13],如陈信雄等^[14]应用Hamon公式计算的蒸散量结果与实测蒸散量间相差甚远。闫俊华等利用3种

方法计算鼎湖山森林生态系统蒸散力,发现结果存在一定的差异^[15]。可见,在计算某个森林生态系统的蒸散力时,如何选择合适的蒸散公式是一个值得考虑的问题。

森林生态系统水分平衡影响整个森林生态系统的NPP,近年来将蒸散过程融入陆地生态系统水分平衡与净初级生产力模型研究中^[16-20],赋予森林生态系统蒸散研究新的内涵与要求,因此开展这方面的研究显得更为迫切。我们选取3种比较典型的蒸散计算公式来估算雷州桉树人工林蒸散量,并对计算结果差异的原因进行了探讨,提出了在华南地区选取蒸散计算公式时应注意的问题。

1 研究地概况

雷州半岛位于广东省西南部 (20°16'~21°55'N, 109°39'~110°36'E),地处热带北缘,属海洋性季风气候,高温高湿,年降水量分配不均,干、湿季明显,夏长冬暖。年均温 21~26 °C, 10°C年积温 7500~9000 °C。年降雨量从整个雷州半岛南部的 1300 mm 到北部的 2500 mm 不等,且年际变化大。4~9 月间降雨量占年降雨量 80%以上;10 月至翌年 3 月为旱季,降水量占全年降水量 20%左右;年相对湿度约 80%以上。地形为台地及缓坡低丘地形。

基金项目:国家重点基础研究发展计划 (2002CB111503);广东省自然科学基金项目 (032384);海南省自然科学基金项目 (807031; 807045);海南省教育厅高校科研项目 (Hjkj2008-17);中南林学院青年科学研究基金 (05009A);海南大学科技基金项目 (Rnd0721);科技部国际合作重点项目 (2007DFA31070)

作者简介:黄志宏 (1969 -),男,讲师,博士,主要研究方向为生态系统生态学。E-mail: zhihongmay2004@yahoo.com.cn

*通讯作者:王旭,讲师,博士,主要研究方向为热带林生态学。E-mail: wxdick@scbg.ac.cn

收稿日期: 2007-12-04

成土母质北部为砂页岩和花岗岩,中部为浅海沉积物,南部大部分为玄武岩。在这些不同母质上发育形成的土壤均为砖红壤 (latosol) [21]。热带土壤特征明显,土层深厚,具有发展桉树人工林的优越条件,是我国桉树人工林生产基地[22]。本研究选取纪家林场、河头林场两地作为研究样地,均属于较为典型的土壤质地—纪家林场属玄武岩发育的粘红壤,河头林场属浅海沉积物发育而来的砂红壤。两个样地相距近 40 km。研究地林分为桉树纯林,主要树种有尾叶桉 (*E. urophylla*)、刚果 12 号桉 (*E. ABL12*)、巨桉 (*E. grandis*)、赤桉 (*E. camaldulensis*) 和雷林 1 号桉 (*E. leizhouensis No. 1*)、W5 (*E. ABL12 W5*)、柠檬桉 (*E. citriodora*) 等。样地林分密度为 1970 株 hm^{-2} ,平均树高 18 m,郁闭度 0.6,林地平整。林下植被稀少,主要有鹧鸪草 (*Eviachne pallascens*)、坡柳 (*Dodencia viosa*) 等。6~11 月时有台风侵袭,台风风力一般 9~10 级。

2 研究方法

2.1 林冠层气象因子定位观测

在雷州半岛纪家林场、河头林场桉树人工林中分别选取有代表性的样地。采用自动气象观测系统 (Tain Electronics, Box Hill, Australia) 对桉树人工林林冠层主要气象因子进行定位观测,此系统由微功率数据采集器 (micropower data loggers) 和环境传感器 (environmental sensors) 组成。测定内容为辐射 (R_s)、降雨量 (P)、风速 (W)、最高温度 (T_{\max})、最低温度 (T_{\min})、相对湿度 (RH)。所有数据均为自动记录,数据采集时间间隔为 30 min。数据保存在存储器 (Data-logger) 中。

2.2 林地土壤水分定位观测

土壤水分测定地点与林冠层气象因子测定地点相同。在桉树人工林样地中,将土壤含水量测定仪 (Theta Probes, Delta T Devices, UK) 的水分感应探测探头分别埋于土壤剖面 50 cm、150 cm、250 cm、350 cm 不同深度的土层内实测土壤含水量,感应器数据传输时间步长设为 30 min 次⁻¹,自动记录数据。以此为基础,可以求得土壤含水量变化值 ΔS 。

2.3 林地生态水文观测

土壤蒸发测量采用环刀法。每月观测选择在晴天进行,每月一次。观测时每个样地每次有 6~10 个重复。

林内穿透雨观测,在林冠下安放 4 个水槽承接林内穿透雨水量,水槽总面积为 1.06 m^2 。树干径流用 PVC 软管绕树干收集,每样地 4 株树。降雨量 P 由安放在林外的自记雨量计观测。以上数据均保存于数据采集器中,定期下载数据。

地表径流、地下水位定位观测,在样地小集水

区的出口处,安装有自记水位记和地下水位记,分别定位观测集水区径流量和地下水位变化。

2.4 计算公式简介

目前,森林蒸散的研究方法很多,却没有相对标准的方法[23]。可见,桉树人工林林分蒸散量的理论估算可以有多种方法。在本文中主要采用如下三种方法:(1) Penman-Monteith 方程[24],(2) 周国逸公式[10],(3) TURC 公式[25]。

在现有绝大多数公式中, Penman-Monteith (PM) 方程是应用最为广泛的一种[26],尽管它还有一些值得改进的地方,但基于对蒸散物理过程的描述有其独到之处。PM 方程作为把能量平衡和质量转换方法结合起来的复合方法,使用 PM 公式计算结果具有同其他计算结果的可比性。周国逸公式是在前人[8]已有工作的基础上由量纲分析的 π 定律进行推导而来。同时它既有水热平衡联系的物理学基础,又具有较为坚实的数学分析基础,理论上较为严密。该公式在小良热带人工林和亚热带杉木人工林蒸散量计算中得到较好的验证[5]。TURC 公式的使用主要是考虑到其简单实用,参数易获取,属于以温度作为指标的一类蒸散公式。虽然有较 TURC 公式更为简单的公式,如 Kener 公式 ($E_p=100+50T-(1/3)\times T^2$, T 为年平均气温),但其过于简单,考虑因素太少结果误差可能会较大。

(1) PM 方程采用如下形式:

$$ET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中: ET 为蒸散潜力 (mm d^{-1}), R_n 为净辐射量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G 为土壤热通量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), T 为 2 m 高处日平均温度 ($^{\circ}\text{C}$), u_2 为 2 m 高处风速 (m s^{-1}), e_s 为饱和水汽压 (kPa), e_a 为实际水汽压 (kPa), $(e_s - e_a)$ 为饱和水汽压差 (kPa), Δ 为水汽压曲线斜率 ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ 为干湿球常数 ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

(2) 周国逸公式:

$$E = E_0 \left\{ 1 + \frac{r}{E_0} - \left[1 + \left(\frac{r}{E_0} \right)^{\frac{NP}{P^2 - P - 1} + N + 1} \right]^{\frac{1}{\frac{NP}{P^2 - P - 1} + N + 1}} \right\}$$

(N 0) (2)

式中: N 是一个无量纲的物理量,它反映系统的蓄水保水性,随着系统的保水性能的增加而增加,随着系统的保水性能减小而减小,反映了系统、特别是土壤涵养水源的能力。所以,可以认为 N 实际上是系统阻止水分以液态形式输出的能力。 r

为系统含水量，对于长期资料来说，可以用 R （系统降水输入量）来代替； P 为大气相对湿度； E_0 为系统蒸散潜力，以热量的质量当量表示。

(3) TURC公式:

$$E = \frac{P}{[0.9 + (P/E_0)^n]^{\frac{1}{n}}} \quad (3)$$

式中： E 为年实际蒸散量(mm)， P 为年降水量(mm)， E_0 为土壤水分饱和时的最大年蒸散量，即蒸散力(mm)，其值 $E_0=300 + 25T + 0.05T^3$ ， T 为年平均气温(°C)， n 为常数，这里取值为2。

(4) 水量平衡方程 (water balance budget equation-WB):

$$E_t = P - R_0 - \Delta S - R \quad (4)$$

式中： E_t 为系统总蒸散量， P 为降水量， R_0 为地表径流， ΔS 为土壤贮水量变化， R 为地下水补给量（一般认为下渗至根部以下的那部分水）； E_t 由林冠截留(I_c)、树木蒸腾(T)及土壤蒸发(E_s)组成。

3 结果与分析

用PM方程(1)所计算的结果和水量平衡方程(4)计算的结果相比较，计算结果见表1。周国逸公式(2)计算结果同水量平衡方程(4)比较，计算结果见表2。类似地，TURC公式计算结果见表3。

表1 PM方程计算的蒸散量与水量平衡法计算结果比较
Table 1 Comparison of evapotranspiration estimated by PM (1) and WB (4)

地点	时段	PM方程(1)	WB方程(4)	偏差率/%
纪家	1999.9 - 2000.9	1211	1118	8.3
Jijia	2000.10 - 2001.9	1031	1150	-10.3
河头	1999.9 - 2000.9	782	969	-19.3
Hetou	2000.10 - 2001.9	1119	1025	9.2

表2 周国逸公式法(2)同公式(4)所得结果比较
Table 2 Comparison of evapotranspiration calculated by Zhou's formula(2)and WB(4)

样地	时间	周氏公式(2)	WB方程(4)	偏差率/%
纪家 Jijia	1999.9 - 2000.9	1073.2	1118	-4.0
河头Hetou	1999.9 - 2000.9	783.3	969	-19.1

表3 TURC公式(3)同水量平衡方程(4)计算结果比较
Table 3 Comparison of evapotranspiration estimated by Turc formula (3) and WB (4)

样地	时间	TURC公式(3)	WB方程(4)	偏差率/%
纪家	1999.9 - 2000.9	1090	1118	-2.5
Jijia	2000.10 - 2001.9	1163	1150	1.1
河头	1999.9 - 2000.9	1150	969	18.6
Hetou	2000.10 - 2001.9	1374	1025	34.0

从表1中可以看出，河头样地第二年的PM方程计算结果较水量平衡法计算结果要略小；PM方程

计算的其他结果比水量平衡公式所计算的系统年蒸散量要大，这可能因为PM方程所计算的是系统蒸散潜力。从这个角度来说，出现这种差异是可以理解的。

用理论公式计算的结果与水量平衡结果相比，PM方程计算结果的偏差率是：纪家在2 a内分别为8.3%和-10.3%；河头的分别为-19.3%和9.2%；周国逸公式计算结果的偏差率在1 a内为纪家-4.0%、河头-19.1%；TURC公式计算结果的偏差率为：纪家在2a 内分别为-2.5%、1.1%，河头分别为18.6%、34.0%。三者的变化幅度分别为：-19.3%~9.2%、-4.0%~19.1%、-2.5%~34.0%。

由于我们研究所选时段有限，在此还不能得出哪个公式计算结果较好。对于PM方程而言，它是用热量平衡和空气动力学的方法解析得出了自由水面蒸散力的计算公式，有比较深厚的数理基础，但其最初公式中的各个参数的计算方法起初并不适合于陆面，特别是在森林生态系统内的差异可能更大^[27]。修改后比较适合于森林生态系统，周国逸等^[10, 28]证明了其应用的可能性。但是，PM方程毕竟是对蒸散过程的一种抽象，其结果对所选参数有一定的依赖性。PM方程同其修改公式FAO-17 PM方程计算结果相比，相对误差在-22.8%~7.7%之间^[29]；不同的PM方程所得结果相差很大^[30]。

周国逸公式的计算结果也呈现出一定的波动(表2)。周国逸公式的主要依据是蒸发过程的物理学原理，认为决定陆面蒸发的最终因素是热量供应条件和水分供应条件。在公式的推导过程中主要基于量纲分析，这一点与傅抱璞的推算^[9]类似。从理论上说，周国逸公式可以计算任意短时间内的蒸散作用，但是其计算中所应用的资料应该是长期的(如，降水量、辐射等)，有一定的地带性且相对稳定^[5]。这样，就涉及到时间尺度的匹配问题。由于气象因子有较大的波动性，在计算短时期(如1 a)蒸散量时可能会出现一定的波动。在使用不同的方法测定(或计算)森林生态系统蒸散量时存在时间尺度的匹配问题，从而导致结果有一定的差异。

TURC公式计算结果同样也有一定范围的波动(表3)。TURC公式属于计算蒸散潜力的经验公式。从热量和降水量角度来看，二者均涉及蒸散的本质问题，选用热量和水分可作为探讨蒸散量潜力的因子。TURC公式的计算是基于年内温度和降雨量，这样很可能导致计算结果出现波动。在年降水量一定的情况下，降水分配格局可以有较大的变化。研究地雷州半岛干、湿季明显，降雨多集中在雨季，而且雨季中降水以少数几场强度大的降雨占其降雨量中较大的比例。此外，即使是在年降水格

局和热量输入相近的情况下,仍会产生较大的差异。如,河头样地2 a的蒸散量偏差率分别为18.6%和34.0%,2 a的年均气温接近(分别为24.2 °C和24.9 °C),可见第二年的偏差率有很大一部分是由降雨量增大所引起的。纪家样地的计算结果与河头样地的存在一定的差异,一是2 a的蒸散量偏差率较小(分别为-2.5%和1.1%);二是与水量平衡方程估算结果较接近。比较两个样地的特征,其差异主要在于土壤质地的不同,纪家为玄武岩发育的粘质砖红壤,河头为第四纪浅海沉积物发育的砂质砖红壤,二者的持水性能和渗透性能差异很大,结果是使得两个系统的水分供应能力差异较大。而这种土壤质地与水分供应能力的差异并没有反映到TURC公式中,这也许正是其经验公式存在局限性的原因所在;周国逸公式考虑到了系统的保水性能问题,因而其计算结果同水量平衡方程结果间偏差较小。用周国逸公式计算南亚热带桉树人工林^[31]与南亚热带季风常绿阔叶林蒸散量^[32],均得到过较为理想的结果。

对三个理论公式计算结果与水量平衡估算值,进一步作非参数秩和统计(Nonparametric Chi-Square Test),以考察三个理论公式计算结果与水量平衡估算值间的一致性。统计结果表明,三个理论公式计算结果与水量平衡估算值间无显著差异($p=0.109$),未达到0.05的显著水平。这说明,这三个理论公式计算南亚热带森林生态系统蒸散量,其结果与水量平衡方程估算值之间具有较好的吻合性,表明用包括周国逸公式在内的三个理论公式计算南亚热带森林生态系统蒸散量是可行的。

4 结论

采用3种蒸散量计算公式计算结果同水量平衡结果相比较,可作如下小结:

(1) 尽管各种计算方法的结果均存在一定的波动性,但是其波动的原因是不一样的:对于PM方程而言,结果对所选参数有一定的依赖性。即使是采用PM方程修正公式也会产生一定的差异。对于周国逸公式来说,在计算短时期(如1 a)蒸散量时可能会出现一定的波动,波动的原因可能在于参数的时间尺度匹配问题。而对于TURC公式,计算结果波动的根本原因在于其公式的经验局限性。弄清各种蒸散计算公式的局限性对于选取适当的公式计算蒸散量是非常重要的。

(2) 在3种计算公式中,三者均可在一定程度上反映系统的年蒸散量。比较而言,周国逸公式计算结果的波动性范围较小,可适用于热带、亚热带森林生态系统蒸散量的计算,且在较大时间尺度(>1 a)时,较为理想。

参考文献:

- [1] BREN L, HOPMANS P. Paired catchments observations on the water yield of mature eucalypt and immature radiata pine plantations in Victoria, Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, (336): 416-429.
- [2] NEIL J D, DUGALD C C, MICHAEL B, et al. Eucalypt health and agricultural land management within bushland remnants in the Midlands of Tasmania, Australia[J]. *Biological conservation*, 2007, (139): 439-446.
- [3] SHUTTLEWORTH W J, WALLACE J S. Evaporation from sparse crops - an energy combination theory[J]. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 1985, 111: 839-855.
- [4] WALLACE J S, ROBERTS J M, SIVAKUMA M V K. The estimation of transpiration from sparse dryland millet using stomatal conductance and vegetation area indices[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1990, (51): 35-49.
- [5] 周国逸. 生态系统水热原理及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 1997: 178-187.
Zhou Guoyi. *The Principle of Water and Heat and Its Application in Ecosystem*[M]. Beijing: China meteorological press, 1997: 78-87.
- [6] ZIEMER R R. Evaporation and transpiration[J]. *Review of Geophysics and Space Physics*, 1979, 17(6): 1175-1186.
- [7] PENMAN H L. *Vegetation and hydrology*. Tech. Comm. No. 533. Harpenden[M]. England: Commonwealth Bureau of Soils, 1963: 125.
- [8] 崔启武, 孙延俊. 论水热平衡联系方程[J]. *地理学报*, 1979, 34(2): 169-176.
Cui Qiwu, Sun Yanjun. On the correlative equation of the heat and water balance[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1979, 34(2): 169-176.
- [9] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. *大气科学*, 1981, 5(1): 23-31.
Fu Baopu. On the calculation of the evaporation from land surface[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1981, 5(1): 23-31.
- [10] 周国逸, 潘维伟. 森林生态系统蒸发散计算方法的研究[J]. *中南林学院学报*, 1988, 8(1): 22-27.
Zhou Guoyi, Pan Weichou. Method of estimating evapotranspiration from forest ecosystem[J]. *Journal of Central South Forestry University*, 1988, 8(1): 22-27.
- [11] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. *Proceedings of the Royal Society of London: Series A*, 1948, 193: 120-145.
- [12] MONTEITH J L. Evaporation and environment: the state and movement of water in living organisms[C]//Fogg G E. *Symposium of the Society for Experimental Biology*. NY: Academic Press, Inc., 1965, 19: 205-234.
- [13] STEWART J B. Measurement and prediction of evaporation from forested and agricultural catchments[J]. *Agricultural Water Management*, 1984, 8: 1-26.
- [14] 陈信雄, 廖学诚, 黄正良, 等. 应用Hamon公式推估福山试验林蒸发散之研究[J]. 台大实验林研究报告, 1997, 11(4): 21-30.
Chen Xinxiong, Liao Xuecheng, Huang Zhengliang, et al. Evapotranspiration of Fushan experimental forest estimated by Hamon formula[J]. *Journal of experimental forest of National Taiwan University*, 1997, 11(4): 21-30.
- [15] 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.
Yan Junhua, Zhou Guoyi, Chen Zhongyi. Potential evapotranspiration of artificial *Pinus* forest in Mount Dinghu and the comparison of calculation methods[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 20(1): 5-8.
- [16] 林书蓉, 廖观荣, 李淑仪, 等. 雷州半岛桉树人工林土壤[C]//曾天勋. 雷州短轮伐期桉树生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1995, 1-12.
Lin Shurong, Liao Guanrong, Lishuyi, et al. The soils under the *Eucalyptus* plantation in Leizhou Peninsula[C]. *Studies on the eucalyptus ecosystem of short rotation in Leizhou, Guangdong province*. Binjing: China Forestry Press, 1995, 1-12.
- [17] 祁述雄. 中国桉树. 北京: 中国林业出版社, 1989, 21, 143.
Qi Shuxiong. *Eucalyptus in China*[M]. Binjing: China Forestry Press, 1989, 21, 143.

- [18] MARIO L G S, YARA S N. Above-ground biomass of mangrove species. I. Analysis of models[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, (65): 1-8.
- [19] NIGHTINGALE M, HILL M J, PHIM S R, et al. Use of 3-PG and 3-PGS to simulate forest growth dynamics of Australian tropical rainforests: parameterisation and calibration for old-growth, regenerating and plantation forests[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 254(2): 107-121.
- [20] DEREK E DEREK. How does ecosystem water balance affect net primary productivity of woody ecosystems?[J]. Functional Plant Biology, 2003, 30(2): 187-205.
- [21] CORNISHA P M, VERTESSY R A. Forest age-induced changes in evapotranspiration and water yield in a eucalypt forest[J]. Journal of Hydrology, 2001, 242: 43-63.
- [22] FISHER J B, DEBIASE T A, QI Y, et al. Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem[J]. Environmental Modelling & Software, 2005, 20(6): 783-796.
- [23] 王安志, 裴铁. 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.
Wang Anzhi, Pei Tiefan. Research progress on surveying and calculation of forest evapotranspiration and its prospects[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(6): 933-937.
- [24] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirement[M]. Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: Italy, FAO of the United Nations, 1998: 300.
- [25] BRUTSAERT W. Evaporation into the Atmosphere: theory, history, and applications[M]. Dordrecht: The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1982: 299.
- [26] PAUL K I, BOOTH T H, JOVANOVIĆ T, et al. Calibration of the forest growth model 3-PG to eucalypt plantations growing in low rainfall regions of Australia[J]. Forest Ecology and Management, 2007, (243): 237-247.
- [27] SHIAU S Y, DAVAR K S. Modified Penman method for potential evapotranspiration from forest regions [J]. Journal of Hydrology, 1973, 18: 349-365.
- [28] 周国逸, 余作岳, 彭少麟. 小良试验站3种生态系统中土壤及地下水动态的对比研究[J]. 生态学报, 1995, 15(A): 217-221.
Zhou Guoyi, Yu Zuoyue, Peng Shaolin. Comparison study on the soil and dynamic groundwater in three ecosystems of xiaoliang experimental station[J]. Acta Ecologica Sinica, 1995, 15(A): 217-221.
- [29] 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.
Du Yaodong, Liu Zuoxin, Zhang Yunfu. Evaluation of two reference crop evapotranspiration calculation methods [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2001, 35(1): 57-61.
- [30] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 1993, 56-66.
Chen Yumin, Guo Guoshuang, Wang Guangxing, et al. Research on the isoline map of the main crops water requirement in China[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1993, 56-66.
- [31] Zhou Guoyi, Yin Guangcai, MORRIS J, et al. Measured sap flow and estimated evapotranspiration of tropical *Eucalyptus urophylla* plantations in south China[J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(2): 202-210.
- [32] 闫俊华, 周国逸, 黄忠良. 鼎湖山亚热带季风常绿阔叶林蒸散研究[J]. 林业科学, 2001, 37(1): 37-45.
Yan Junhua, Zhou Guoyi, Huang Zhongliang. Evapotranspiration of the monsoon evergreen broad-leaf forest in Dinghushan, Guangdong province[J]. Scientia Silvae Sinica, 2001, 37(1): 37-45.

Comparison of different theoretical equations for modelling evapotranspiration from eucalypt plantations in southern China

Huang Zhihong^{1,2}, Wang Xu^{3,4}, Zhou Guangyi⁵, Wu Zhixiang⁴

1. Department of Agro-engineering, Shaoguan University. Shaoguan, Guangdong 512005, China ;

2. Ecological Research Section, Central South Forestry University. Changsha, Hunan 410004, China ;

3. College of Environment and Plant Protection, Hainu University, Danzhou 571737, China;

4. Ministry of Agriculture Danzhou Key Field Station of Observation and Research for Tropical Agricultural Resources and Environments, Danzhou 571737, China;

5. Research Institute of Tropical Forest, the Chinese Academy of Forestry. Guangzhou 510520, China

Abstract: Evapotranspiration, a major component in terrestrial water balance and net primary productivity models, is difficult to measure and predict. This study compared three equations of potential evapotranspiration applied to the eucalypt forest plantations on Leizhou Peninsula in southern China. The evapotranspiration models ranged from simple temperature and solar radiation-driven equations to physically-based combination approaches, represented by Turc formula, Penman-Monteith equation and Zhou equation. Each calculation of evapotranspiration was compared with estimation from water balance budget equation (WB). The deviation rate between calculations by the three equations and WB yielded coefficients of variation of -2.5% to 34.0%, -19.3% to 9.2%, -4.0% to 19.1% for Turc formula, Penman-Monteith equation, and Zhou equation, respectively. Fluctuations in overall estimated result from complex changes of climatic parameters and in situ conditions. The reason of fluctuations for the three models was different from each other. The parameter-dependant sensitivity may result in fluctuation for Penman-Monteith equation, while the time scale matching may be a major factor in fluctuation for Zhou's equation. And the fluctuation for Turc formula may result from extra emphasis on temperature factor, not accounting for any local factors such as precipitation patterns and soil hydro-physical properties, which may be a limitation of empirically-based model. The calculations from each model are in good agreement with the annual evapotranspiration of the eucalypt plantations estimated from water balance budget equation to some extent. By comparison, the fluctuation from Zhou's equation was less than those from the other two equations, which indicated the Zhou's equation was more suitable alternative for Penman-Monteith equation for the determination of evapotranspiration of forest ecosystems in the subtropics of south China.

Key words: Leizhou Peninsula, Eucalypt forest plantations, Evapotranspiration, Theoretical equations