

文章编号: 100F 1498(2004) 03 0284 07

苹果-小麦复合系统小麦潜在蒸散模拟模型的研究

张劲松, 孟平

(中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

摘要: 根据 FAO(1991) 推荐的参考作物需水量 (ET_0) 计算模式 (FAO Penmar Monteith), 并通过作物系数、农林复合系统作物光胁迫系数及风速减弱系数的综合订正, 建立太行山低山丘陵区苹果-小麦复合系统小麦潜在蒸散量计算模型, 并利用 Li 1600 稳态气孔仪实测得到小麦蒸腾量, 经转换后得出蒸散量对模型进行验证, 旨在探索农林复合系统中作物蒸散的计算方法, 为进一步开展水分生态特征的研究提供可行性途径。结果表明: 小麦拔节-乳熟期间, 模拟值与测算值吻合效果较好, 二者线性相关系数可达 0.963 0 ($n=51$), 相对误差平均值为 9.68%, $t=0.075 < t_{0.01}^{100} = 2.618$ 。建立的模拟模型具有理想的计算精度, 可以用以计算苹果-小麦复合系统小麦日潜在蒸散量。

关键词: 苹果-小麦复合系统; 小麦潜在蒸散量; 模拟模型

中图分类号: S727.24 文献标识码: A

植物蒸散是土壤-植物-大气连续体水热传输过程中一个极为重要的环节。随着水资源紧缺等生态问题的日趋严重, 蒸腾蒸发(合称蒸散)的研究已成为农学、林学、农田水利学、植物生理生态学、农业气象学等相关学科日益共同关注的重要课题。准确计算农田或林地蒸散量, 对于加强水资源的集约管理, 促进节水农业、林业的发展, 具有重要的理论指导作用。农林复合系统中农田蒸散的计算是定量研究复合系统种间水分关系等生态特征的重要步骤。目前, 农林复合系统的蒸散量大都利用实测法或 Penmar Monteith 公式计算得到。实测法不仅需要大量人力和物力, 且结果难以清楚地解释蒸散的影响机制; 经典的 Penmar Monteith 公式只有在地面完全覆盖、低矮植被且下垫面均一的条件下才有较高的计算精度, 而应用于农林复合系统时, 因下垫面物理属性的非均一性, 会导致较大的误差。虽然 Shuttleworth^[1]、Lawson^[2]、Mcintyre^[3]、Toumebize^[4]、Irvine^[5] 和 Mobbs^[6] 等在农林复合系统蒸散的模拟计算方面做了很有意义的工作, 为蒸散计算方法的研究提供了重要的思路, 但也存在着某些局限性, 如 Shuttle^[1]、Lawson^[2] 和 Mobbs^[6] 等模型局限在于: (1) 假设复合系统中不同植被类型的温、湿度相等; (2) 只考虑植被覆盖度和植株高度对光截留的影响, 而未将林木与其下层植被之间相对高度差、林木行带走向(方位)以及太阳的日运动轨迹结合起来, 综合考虑林木对其下层植被的遮荫时间和遮荫范围的影响, 因此, 太阳辐射截留分配模型过于简单; (3) 只能得到下层植被蒸散平均值, 而不能

收稿日期: 2003 12 15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(39770624)及“九五”国家科技攻关专题(96-007 04 05)部分研究内容

作者简介: 张劲松, (1968—), 男, 浙江永嘉人, 博士、副研究员。

了解其水平变化规律; Irvine^[5]模型只能用以计算复合系统的总蒸散量, 而不能单独计算不同植被组分的蒸散量; McIntyre^[3]和 Tournebise^[4]等辐射传输概念模型虽比较完善, 但因传输过程复杂而涉及的物理参数较多, 故其蒸散模型不便于在实际工作中应用。总之, 农林复合系统蒸散问题以试验研究为主, 模拟研究相对较少, 模拟模型尚需继续探索。

本文根据 FAO 推荐的参考作物需水量(ET_0) 计算模式(FAO-Penman Monteith)^[7], 通过作物系数、农林复合系统作物光胁迫系数或透光率及风速减弱系数的综合订正, 建立苹果-小麦复合系统作物潜在蒸散量计算模型, 并利用 Li 1600 稳态气孔仪实测得到小麦蒸腾量, 经转换后得出的作物蒸散量对模型进行验证, 旨在探索农林复合系统中作物蒸散量的计算方法, 为进一步开展水分生态特征的研究提供可行性途径。

1 试验区概况

试验地设在河南省济源市裴村“太行山低山丘陵区复合农林业综合研究”试验区内($35^{\circ}11'N$, $112^{\circ}03'E$)。试验区内各类农林复合经营模式总面积达 160 hm^2 。试验区地处太行山南段南麓, 属温带大陆性季风气候。全年日照时数为 $2\ 367.7\text{ h}$, 年日照率为 54% , 历年平均降水量 641.7 mm , 受季风气候的影响, 年内季节性分布不均匀。6—9 月份多年平均降水量为 438.0 mm , 占全年降水量的 68.3% , 尤其集中在 7—8 月份, 占全年的 44.3% 。试验区土壤以石灰岩风化母质淋溶性褐土为主, 土层厚度 $50\sim 84\text{ cm}$; pH 值为 $6.8\sim 8.5$; 石砾含量为 $10\%\sim 18\%$, 有机质含量在 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右, 有效 N $21.4\sim 84.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 有效 P $5.4\sim 16.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效 K $50\sim 103\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2 试验设计

试验于 1998 年冬小麦拔节期-腊熟期(4 月 1 日—5 月 31 日)在水平梯田条件下的苹果-小麦复合系统内进行。梯田南北宽 36 m , 东西长 200 m 。土壤质地为沙壤-轻壤, 土层厚度为 80 cm , 面积为 0.72 hm^2 , 有灌溉条件。苹果品种为新红星(*Starkrimon*), 东西行向, 9 行带, 株行距为 $3\text{ m}\times 4\text{ m}$, 树盘直径为 80 cm , 株高 2.1 m , 冠幅 1.4 m ; 冬小麦行距 20 cm , 品种为“温 8”号, 播种期为 1997 年 9 月 25 日, 基本苗 $248.0\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在复合系统的中部选择一代表性较好的间作通道, 沿垂直于行带方向, 距果树带南北两侧各 80 cm 及间作中心处(分别简称“S80”、“N80”、“SN200”, 下文同)布置观测点。

2.1 小气候观测

除利用试验区所在地气象站日际资料外, 还选择典型晴天日, 于各观测点小麦活动面上 0.5 m 高度处及地面高度 2 m 处采用通风干湿球表和轻便风速表进行温、湿度和风速的观测, 于小麦活动面上 1.0 m 高度处采用 CN-11 辐射平衡表测定冠层净辐射。用 HF-1 热通量板测定地表土壤热通量, 热通量板埋在 $3\sim 5\text{ cm}$ 土层处。每生育期内观测 $1\sim 3\text{ d}$ 。测定时刻: $6:30$ 、 $19:30$, $6:30\sim 19:30$ 期间每整点观测 1 次。

2.2 小麦叶片蒸腾速率的观测

于各观测点随机选取 $5\sim 8$ 片冬小麦叶片, 采用 Li 1600 气孔稳态仪测定叶片蒸腾速率。测定时间同小气候观测。

2.3 叶面积及植株高度的测定

2.3.1 果树叶面积测定 选取4株代表性较好的植株,采用CF110冠层分析仪器测定叶面积指数,并从每株中抽取上、中、下层若干标准叶片,带回室内,先将样本叶片描写在坐标纸上,然后估算总面积,最后求取单株叶面积。每隔10~15d测定1次。

2.3.2 小麦叶面积测定 在试验小区内随机抽取15株小麦,带回室内,量取叶长和叶宽,然后采用式(1)^[8]计算某单株叶面积。测定时期同2.3.1。

$$A = 0.759 \sum_{i=1}^n L_i \times W_i \quad (1)$$

式(1)中, A 为某单株总绿色叶面积, n 为某植株总叶片数, L_i 为叶长度, W_i 为叶宽。

3 概念模型及主要计算公式和理论原理

根据FAO于1991年推荐的参考作物需水量(ET_0)计算模式(FAO-Penman Monteith)^[7],求取 ET_0 ,再进行作物系数的订正。首先计算单作物系统潜在蒸散量(ET_{pck}),然后对 ET_{pck} 进行果粮复合系统作物光胁迫系数、风速减弱系数的综合订正,建立果粮复合系统作物潜在蒸散量(ET_{ip})模型。

3.1 参考作物蒸散量计算模型^[7]

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (Rn - G) + \frac{900}{T + 273} \gamma U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (2)$$

式(2)中, $Rn = 0.77(0.25 + 0.5n/N)Ra - 2.45 \times 10^{-9}(0.1 + 0.9n/N)(0.34 - 0.14\sqrt{ed})(T_{kx}^4 + T_{kn}^4)$

$$Ra = 37.6dr(\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (3)$$

$$dr = 1 + 0.033 \cos \left[\frac{2\pi}{365J} \right] \quad (4)$$

$$\delta = 0.409 \sin \left[\frac{2\pi}{365J} - 1.39 \right] \quad (5)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (6)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (7)$$

$$e_a = [e_s(T_{\max}) + e_s(T_{\min})]/2 \quad (8)$$

$$e_s(T) = 0.611 \exp \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right] \quad (9)$$

$$e_d = RH / [50 / e_s(T_{\max}) + 50 / e_s(T_{\min})] \quad (10)$$

$$\gamma = 0.00163P / \lambda \quad (11)$$

$$\Delta = \frac{4098e_a}{(T + 237.3)^2} \quad (12)$$

$$P = 101.3 \left[\frac{293 - 0.0065H}{293} \right]^{5.26} \quad (13)$$

$$G = 0.1[T_i - (T_{i-1} + T_{i-2} + T_{i-3})]/3 \quad (14)$$

式(2)一式(15)中, ET_0 : 参考作物日蒸散($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n : 冠层表面净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G : 土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); R_a : 碧空条件下的太阳总辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); n : 每日实际日照时数(h); N : 理论日照时数(h); P : 大气压(kPa); H : 气象站海拔高度(m); δ : 太阳赤纬(rad); φ : 纬度(rad); U_2 : 2 m 高度处风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); ω_s : 日落时角度(rad); dr : 日地相对距离; T : 平均气温($^{\circ}\text{C}$); T_{\max} : 最高气温($^{\circ}\text{C}$); T_{\min} : 最低气温($^{\circ}\text{C}$); T_{kx} : 最高绝对气温(K); T_{kn} : 最低绝对气温(K); RH : 平均相对湿度(%); e_a : 实际水汽压; e_s : 饱和水汽压(kPa); Δ : 饱和水汽压-温度曲线斜率($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ : 干湿球常数($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); λ : 水潜热系数($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); J : 日序值(取 1 月 1 日为 1)。

3.2 单作系统小麦潜在蒸散量(ET_p)模型

$$ET_p = K_c \times ET_0 \quad (15)$$

式(15)中, K_c 为作物系数, K_c 与水分年型的关系不密切, 影响它的主要因素是作物的种类、品种、生育期和生长状况。对于同一作物, 在同一区域内, K_c 基本上是时间的函数^[9]。本文根据 1995 年及 1999 年小麦拔节至乳熟期麦田小气候观测资料, 采用波比法求出 ET_p , 再将该值除以相应日期的 ET_0 值计算得到 K_c 值。

3.3 复合系统作物潜在蒸散量(ET_{pp})计算模型

影响复合系统和单作系统作物潜在蒸散量差异的主要因子是热量驱动项和动力驱动项^[10], 其原因是林木的遮荫及树冠枝叶的摩擦所导致风速的减弱。4 月初时, 苹果叶幕已经形成, 因此可将苹果间作林带近似视为具有一定透光能力的“绿墙”。影响林带透光能力的主要生物因子就是果树枝叶的繁密程度, 对于某一特定果树而言, 在一定程度上可用果树的叶面积指数表示枝叶的繁密程度。林带对不同带距处的遮荫程度一般可用该点理论日照百分率表示^[11]; 林带的风速减弱效应与旷野条件下风速本身的大小有关外, 当间作林带行向已经确定、树高相对不变时, 其主要生物影响因子也是果树枝叶的繁密程度。果树枝叶的繁密程度本文采用叶面积指数来表示。本文采用下式表示复合系统中不同带距处的小麦潜在蒸散量(ET_{pp})。

$$ET_{pp} = f(LAI_{\text{tree}}, \beta(x), v) \times ET_p \quad (16)$$

式中, ET_p : 单作系统小麦潜在蒸散量; LAI_{tree} : 林带的叶面积指数; $\beta(x)$: 不同带距处(x)理论日照百分率; v : 旷野风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 近似于气象站测定的日平均风速值。 $f(LAI_{\text{tree}}, \beta(x), v)$ 则表示 LAI_{tree} 、 $\beta(x)$ 和 v 对潜在蒸散量的综合影响函数, 该综合影响函数的确定是本模型的关键步骤。本研究利用平流-干旱修正模型^[12]计算得到的 ET_{pp} 除以相应时段的 ET_p , 再将所得到的比值(ET_{pp}/ET_p)与 LAI_{tree} 、 $\beta(x)$ 、 v 进行非线性回归统计分析, 建立综合影响函数 $f(LAI_{\text{tree}}, \beta(x), v)$ 。因篇幅有限, 平流-干旱修正模型的计算公式及理论原理可见文献[12], 本文不再列出。

3.4 复合系统中不同带距处日照百分率计算

设间作系统中不同带距处(x)的理论日照时数为 N_x , 单作系统的理论日照时数为 N , 那么该点的日照百分率可表示为 N_x/N , N_0 可采用式 7 计算得到。 N_x 的计算可参考董宏儒等^[13]有关带田或果园行间可照时间的研究方法, 本文因篇幅所限, N_x 的推导过程从略。最终计算公式如式(18)、式(19)所示。

冬半年时($-23.5^{\circ} < \delta < 0^{\circ}$):

$$N_x = \begin{cases} \frac{24}{\pi} \arccos \left[-\tan \delta \times \frac{\tan \varphi - H/X}{1 + \tan \varphi \times H/X} \right] & (X \geq H \times \tan(\varphi - \delta)) \\ 0 & (X < H \times \tan(\varphi - \delta)) \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中, H 为果树株高与小麦株高的差值; X 为复合系统中麦田任意一点至南侧果树带距离; δ 的 φ 同式(6)。

夏半年时 ($0^\circ < \delta < 23.5^\circ$):

$$N_x = \begin{cases} \frac{24}{\pi} \arccos \left[-\tan \delta \times \frac{\tan \varphi - H/X}{1 + \tan \varphi \times H/X} \right] & (X < L - H \times \tan(\varphi - \delta)) \\ \frac{24}{\pi} \left[\arccos \left[-\tan \delta \times \frac{\tan \varphi - H/X}{1 + \tan \varphi \times H/X} \right] - \arccos(\tan \delta \tan \varphi) \right] & (X \geq L - H \times \tan(\varphi - \delta)) \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中, X 为复合系统中麦田任意一点至北侧果树带距离, L 为南北果树带间距离, 其它符号物理意义同式(17)。

3.3 蒸腾与蒸散比例系数的计算

模型的验证需要输入实测蒸散量(ET), 而 Li 1600 稳态气孔仪测定得到的是单位叶片面积上蒸腾量(TR_{leaf})。所以, 需要将 TR_{leaf} 换算为 ET 。本文通过叶面积指数 LAI 将 TR_{leaf} 换算为单位土地面积上的蒸腾量(TR), 即:

$$TR = LAI \times TR_{leaf} \quad (19)$$

然后采用康绍忠等^[8]提出的小麦蒸腾与蒸散比例计算公式, 将 TR 换算为 ET 。计算公式如下:

$$\frac{TR}{ET} = 1 - e^{-K \cdot LAI (1.0 + A) \sin^2 \frac{t - \frac{12}{24} \pi}{12}} \quad (20)$$

式(20)中, K : 小麦消光系数, 本文取 0.46; A : 消光系数在日变化过程中的振幅值, 本文取 1.01; t : 1 日中的时间, 从 0 点开始排序, 以小时为基本单位, 如, 6:30 时取 $t = 6.5$ 。

4 模型验证

本文以复合系统中 S80、SN200、N80 处由 Li 1600 稳态气孔仪实测并经转换得到的小麦日潜在蒸散量为参照值, 对所建模型进行验证。比较实测值和模拟计算值可知(图 1), 模拟值与实测值吻合效果较好。

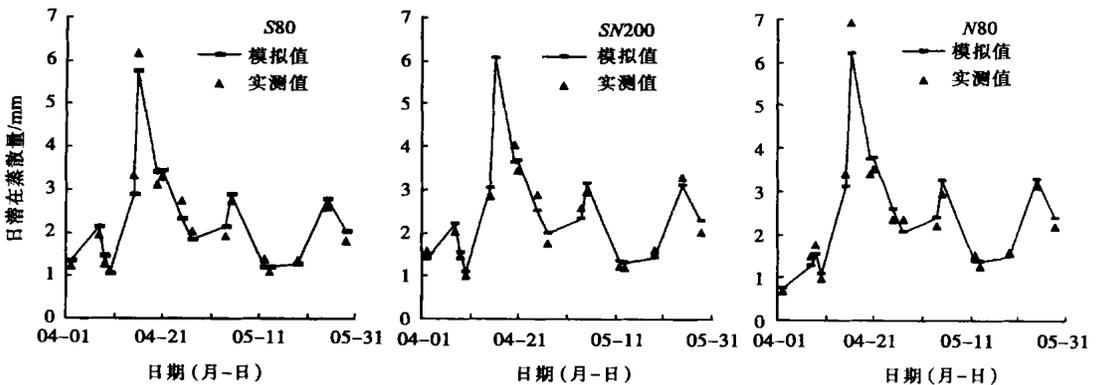


图 1 复合系统中作物日潜在蒸散量实测值与模拟值的比较

统计分析了 51 对日潜在蒸散量的模拟和实测数据, 结果表明: 模拟值和实测值之间的相对误差平均值为 9.68%, 最大值为 15.08%, 最小值为 4.39%, 线性拟合方程如式(21)所示, 线性相关系数 $R^2 = 0.9630$, $t = 0.075 \ll t_{0.01}^{109} = 2.618$, 说明模拟值与实测值无显著性差异, 即模型可通过实测值验证。

$$Y = 1.0807X - 0.1747 \quad (21)$$

式(21)中, X 和 Y 分别表示小麦日潜在蒸散量的模拟值和实测值(mm)。

建立的模拟模型具有理想的精度, 可以用以计算太行山低山丘陵区苹果-小麦复合系统小麦日潜在蒸散量。

从式(21)可知, 模拟值相对高于实测值, 其主要原因在于: FAO(1991)推荐的参考作物需水量模式(FAO-Penman-Monteith)计算得到的是昼夜蒸散量, 而实测值将夜间蒸散量忽略不计; 另外, 蒸散量实测值是通过蒸腾与蒸散比例关系模式计算得到, 该模式不是理论公式, 因此, 蒸散量实测值并非真正意义上的实测数据, 故会影响模型误差分析及可行性评估。

5 结论与讨论

(1) 所建立的苹果-小麦复合系统小麦日潜在蒸散量模型可通过实测值验证, 模拟值与实测值的相对误差平均值为 9.68%, 线性相关系数 R^2 可达到 0.9630, $t = 0.075 \ll t_{0.01}^{109} = 2.618$, 可以用以计算太行山低山丘陵区苹果-小麦复合系统小麦日潜在蒸散量。

(2) 所建模型含有经验参数, 经验参数不仅具有地域性, 而且还与林木生长状况有关。所以, 本研究模型能否应用于其他地区及其他果农复合系统, 有待进一步验证。

(3) 因试验条件的限制, 蒸散量的实测值并非真正意义上的实测数据, 在一定程度上影响了模型调试范围和可靠性分析。

(4) 本模型是针对太行山低山丘陵地区特定的自然条件和特定结构的农林复合模式建立的, 对于其它结构条件下(如不同株行距、不同行带方向)水分因子的模拟计算, 有关参数有待进一步调整。

参考文献:

- [1] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from crops an energy combination theory[J]. Q J R Meteorol Soc, 1985, 111: 839~ 855
- [2] Lawson G J, Crout N M J, Levy P E, et al. The tree crop interface: representation by coupling of forest and crop process models[J]. Agr forestry Systems, 1995, 30: 199~ 221
- [3] McIntyre R D, Riha S J, Ong C K. Light interception and evapotranspiration in hedgerow agroforestry systems[J]. Agri For Meteorol, 1996, 81: 31~ 40
- [4] Tournebise R, Sinoquet H, Bussiere F. Modelling evapotranspiration partitioning in a shrub/ grass alley crop[J]. Agri For Meteorol, 1996, 81: 255~ 272
- [5] Irvine M R, Gardiner B A, Morse A P. Energy partition influenced by tree spacing[J]. Agroforestry Systems, 1998, 39: 211~ 224
- [6] Mobbs D C, Cannell M G R, Crout N M J, et al. Complementarity of light and water use in tropical agroforestry: I: Theoretical model outline, performance and sensitivity[J]. Forest and Management, 1998, 102: 259~ 274
- [7] Smith M. Report on the expert consultation on the revision of FAO methodologies for crop water requirements. FAO, Rome[M]. 1991
- [8] 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
- [9] 李春友. 土壤水分运动与作物生长过程耦合机理模拟模型[D]. 北京: 中国农业大学, 1997
- [10] Nuberg I K. Effect of shelter on temperature crops: a review to define research for Australian conditions[J]. Agroforestry Systems, 1998,

41:3~ 34

- [11] 刘乃壮, 胡林, 宋兆民, 等. 农田遮光模式的研究[A]. 见: 中国林业气象文集[C]. 北京: 气象出版社, 1987
- [12] 张劲松, 孟平, 高峻. 基于平流干旱修正模型农林复合系统中农田蒸散量的计算方法[J]. 干旱区研究, 2004, 21(2): 139~ 143
- [13] 董宏儒, 邓针铺. 带田农业气候资源的利用[M]. 北京: 气象出版社, 1988

Model on Wheat Potential Evapotranspiration in Apple-Wheat Intercropping

ZHANG Jirong, MENG Ping

(Research Institute of Forestry, CAF, Beijing 100091)

Abstract: According to the reference crop potential evapotranspiration model (FAO-Penman-Monteith), which modified by crop coefficient, radiation stress coefficient and wind speed reduced coefficient, the wheat potential evapotranspiration (ET_p) model in an apple-wheat intercropping in the hilly land of Taihang Mountain was developed. This modified model was tested with the experimental data from LF 1600 steady state potometer. The results showed that the estimated value of ET_p had good agreement with the measured and that the linear correlation coefficient (R^2) between them was 0.963 0 ($n = 51$), the average relative error was 9.65%, $t = 0.075 << t_{0.01}^{10} = 6.87$). This model could provide useful reference for estimating wheat evapotranspiration in apple-wheat intercropping.

Key words: apple-crop intercropping; wheat potential evapotranspiration; model