

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

莫兴国

中国科学院
(国家计划委员会 地理研究所, 农业生态与环境技术试验站 北京 100101)

摘 要 建立了一个华北平原冬小麦群体冠层表面阻力与环境因子关系的模型。根据该地区冬小麦生态系统的一组波文比-能量平衡观测资料, 用非线性最优化方法模拟冠层表面阻力与太阳辐射、气温、空气饱和差和土壤含水量等环境因子的关系, 得到模型四个参数的拟合值。用另外两组观测资料验证该模型的预测能力。结果表明, 该模型能较好地模拟表面阻力, 拟合度分别为 0.93 和 0.67。将该模型应用到 Penman-Monteith 蒸散公式, 发现蒸散的模拟值与实测值的拟合度达 0.9 以上, 相对偏差小于 5%。通过比较发现, 该模型对蒸散的预测精度高于空气动力学方法。

关键词 冠层表面阻力 蒸散 环境因子 拟合模型

分 类 中图法 P333.1

1 引言

蒸散由植物叶面水分蒸发、叶片气孔蒸腾和土壤蒸发组成。蒸散的计算通常采用 Penman-Monteith ($P-M$)^[1] 公式。该公式将冠层和地表当作一层, 即“大叶”看待, 引入冠层表面阻力的概念。表面阻力既包含有植物生理因子, 如气孔阻力, 又包含非植物生理因子, 如冠层净辐射收支, 冠层空气动力学阻力和土壤蒸发等, 是反映植物层水分汽化过程所受阻碍的综合因子。冠层表面阻力与冠层气孔阻力有一定的差别, 后者根据受光叶和遮荫叶的气孔阻力, 以及叶面积比密的分布积分而得, 与冠层叶角分布有关, 它与气孔计的测值较吻合。冠层表面阻力与冠层气孔阻力的比值通常不等于 1, 变化范围在 0.4~1.3 之间^[2]。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^[3], 因此可用气孔阻力与环境因子间的关系探讨它。

此外, 由于气孔阻力在冠层内分布的空间变异性, 它与环境因子间的关系在推广到冠层尺度时, 往往产生较大的偏差^[4], 导致用 $P-M$ 公式估算蒸散时, 产生较大的不确定性, 直接将气孔阻力从叶片尺度扩展为冠层尺度是比较困难的。因而, 需要在冠层尺度上对冠层-大气交换的表面阻力进行深入研究。在植被叶面积指数较大 (> 3) 时, 入射太阳辐射大部分被冠层截获, 到达地表的辐射较少, 冠层蒸腾是总蒸散的主要分量, 地面蒸发对总蒸散

* 国家自然科学基金资助项目 (49471016)
收稿日期: 1995-12-13, 收到修改稿日期: 1996-10-15

的贡献只占小部分, 地表较干时尤其如此。此外, 叶面的空气动力学阻力远比气孔阻力小^[5], 在此基础上, 可以认为表面阻力主要由冠层叶片气孔阻力决定。假定它的变化过程与气孔阻力一致, 在气孔阻力与环境因子关系的基础上, 探讨表面阻力与环境因子的数值模型, 是本文的出发点。

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^[6,7]。Ball 模型将 CO₂ 净同化量对气孔阻力的调节也加以考虑, 是目前获得较多认同的模型之一。Stewart^[8], Dolman^[9], Ogink-Hendriks^[10] 将这些环境因子与表面阻力联系起来, 建立了森林冠层表面阻力与环境因子关系的模型, 这些模型在预测森林蒸散时取得较好结果。

本文的主要目的是利用在华北平原冬小麦农田生态系统中测定的波文比和能量平衡资料, 利用 P-M 公式, 反演麦田的表面阻力, 并建立冠层表面阻力与入射太阳总辐射、气温、饱和水汽压差和根层土壤含水量关系模型。利用非线性最小二乘法优化确定模型参数, 并用不同年份、地点的资料, 对模型进行检验, 以期建立能预测麦田生态系统表面阻力的模型。本文还藉此估算农田蒸散, 并用敏感性分析探讨影响蒸散和冠层表面阻力的主要因子。

2 材料和方法

2.1 试验概况

1992 年和 1995 年分别在位于华北平原的中国科学院禹城试验站和栾城试验站, 利用波文比-能量平衡自动观测系统, 测定冬小麦生育期生态系统上方的温度、湿度、风速梯度和辐射平衡。温度采用高精度铂电阻, 风速采用数字式风杯测定。净辐射用澳产 Midlton 净辐射表。这些仪器在测定前进行标定。测定系统每 15 秒钟扫描一次, 输出 5 分钟平均值。每隔 10 天测一次叶面积指数和生物量。定期用中子水分仪和土钻取土烘干测定根层土壤含水量。

2.2 表面阻力的计算

蒸散潜热 LE 表示为

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \tag{1}$$

式中 R_n 为净辐射, G 为土壤热通量。波文比 β 为感热与潜热之比, 可依据两个高度间的干、湿球温度差 δT_d 、 δT_w 计算, 即

$$\beta = \frac{1}{(1 + \Delta/\gamma)\delta T_w / \delta T_d - 1} \tag{2}$$

式中 Δ 为饱和水汽压-温度曲线斜率; γ 为干湿常数。

根据 P-M 公式有:

$$LE = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho C_p D}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})} \tag{3}$$

式中 ρ 为空气密度, C_p 为空气定压比热, D 为饱和水汽压差, r_a 为空气动力学阻力, r_c 为冠层表面阻力。假设土壤-作物系统不受水分胁迫时 $r_c = 0$, 相应地, LE 用 LE_m 表示, 则

$$LE_m = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho C_p D}{r_a}}{\Delta + \gamma} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可得冠层表面阻力 r_c :

$$r_c = r_a \left[1 + \frac{\Delta}{\gamma} \left(\frac{LE_m}{LE} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

水汽和热量传输的空气动力学阻力 r_a 由下式计算:

$$r_a = \frac{U}{u_*^2} \quad (6)$$

式中 U 为风速, u_* 为摩擦速度。此式适合于中性大气层结, 计算时对非中性大气层结进行了订正。

2.3 冠层表面阻力与环境因子关系模型

冠层叶片气孔的开启主要由太阳辐射、空气饱和水汽压差、气温、土壤含水量和环境 CO_2 浓度决定。Jarvis^[6] 把气孔阻力与环境因子的关系看成一个协同的胁迫函数, 而其中每个因子的胁迫函数却是相互独立的。假定冠层表面阻力也主要受这些环境因子的影响, 并具有气孔阻力与环境因子一样的函数关系, 则冠层表面阻力与环境因子关系可表示为:

$$r_c = r_{c\min} [F_1(S_t) F_2(D) F_3(T) F_4(\theta)]^{-1} \quad (7)$$

式中 $r_{c\min}$ 为最小冠层表面阻力 (s/m), 取 5 s/m ; S_t 为太阳总辐射 (W/m^2); D 为饱和水汽压差 (hPa); T 为气温 ($^\circ\text{C}$); θ 为土壤含水量; $F_1(S_t)$ 为太阳辐射胁迫函数; $F_2(D)$ 为饱和水汽压差胁迫函数; $F_3(T)$ 为温度胁迫函数; $F_4(\theta)$ 为土壤水分胁迫函数。这些单个因子胁迫函数的形式有许多研究^[11, 12], 本文对 S_t , D 和 T 采用比较常见的形式:

$$F_1(S_t) = \frac{S_t(1000 + a_1)}{1000(S_t + a_1)} \quad (8)$$

$$F_2(D) = \frac{1}{1 + a_2 D} \quad (9)$$

$$F_3(T) = 1 - a_3(T - 25)^2 \quad (10)$$

对土壤含水量, 根据 r_c 与环境因子单变量分析, 发现根层土壤最大有效含水量与实际有效含水量之比 $\frac{\theta - \theta_e}{\theta - \theta_e}$ 对 r_c 较敏感。因此将该比值作为土壤水分影响 r_c 的变量, 建立关系:

$$F_4(\theta) = 1 - a_4 \frac{\theta - \theta_e}{\theta - \theta_e} \quad (11)$$

式中 θ 为田间持水量, θ_e 为凋萎湿度。上述模型包含四个参数, 即 a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 , 它们分别与 S_t 、 D 、 T 和 θ 有关。

2.4 参数的优化

由于雨天无法观测太阳辐射量, 叶片潮湿等原因, 数据处理时, 先排除雨天资料, 然后再把微气象观测数据进行半小时平均。由于波文比-能量平衡法在中性大气层结和平流情况下, 容易产生较大误差, 故只用 9:00~16:00 期间的数据计算表面阻力。把 1992 年数据分成二组, 每隔一天的数据归为一组, 相互错开, 称第 1 组和第 2 组, 第 1 组资料共有 230 个记录。每个记录包含一组所测变量的观测值, 即冠层表面阻力、太阳总辐射、气温、空气饱和水汽压差和土壤含水量。土壤含水量取 0~100 cm 土层的平均体积含水量, 并假设无日变化。将第 1 组资料代入式 (7)、(8)、(9)、(10) 和 (11), 得到式 (7) 的一组非

线性方程，然后采用非线性最小二乘法求解，得到参数 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 最佳拟合值。之后用 1992 年第 2 组、1995 年的资料验证。

3 结果分析

3.1 模型验证

用 1992 年的第一组资料进行优化拟合，得到 a_1, \dots, a_4 的优化值分别为 59.53、0.501、 5.1×10^{-4} 、0.094。用 1992 年第 2 组和 1995 年观测资料，模拟冠层表面阻力，并与式 (5) 的计算结果（称为实测值）对比，结果见图 1 (a, b)。由图 1 (a, b) 可见，1992 的 r_c 主要落在 25~30 s/m 之间，1:1 线基本上在这些值的中间，对于大于 60 s/m 的值，分布较为离散，模拟值比实测值偏低。栾城站的土壤水分比禹城偏低，在空气饱和和水汽压差大致相同时，1995 年的表面阻力明显偏高，主要分布在 30~55 s/m 之间。在 r_c 的低值区，模拟值和预测值吻合较好，数值集中在 1:1 线附近，而对较高的 r_c 值，模拟值却显然偏向 1:1 线的下方，模拟值偏低（图 1b）。从图 1a、1b 对比可知，1992 年的模拟效果比 1995 年好。以 450 W/m^2 为界，小于该值时，模拟值偏高，大于该值时，模拟值偏低。

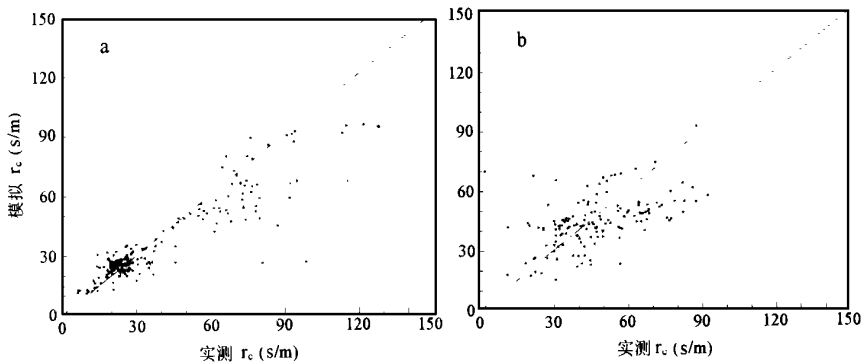


图 1 r_c 的模拟值和实测值对比

Fig.1 Comparison of the predicted and the measured r_c

为了更好理解模型的模拟能力，引入标准偏差和拟合度来说明问题。标准偏差和拟合度分别表示为：

$$rms = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \tag{12}$$

$$di = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i|^2 + |O_i|^2)} \tag{13}$$

式中 P_i 、 O_i 分别为模拟值和观测值， $P_i = P_i - O_m$ ， $O_i = O_i - O_m$ ， O_m 为观测平均值。对上述两年模拟结果的分析见表 1。1992 年 r_c 的标准差比 1995 年小许多，而偏差却相差不大，小于 10%，拟合度前者为 0.93，后者为 0.67。通过以上分析，说明模型及优化参数能

模拟冬小麦生态系统的冠层表面阻力。但对不同地点、不同年份和不同品种的小麦, 冠层表面阻力的预测效果稍有不同。这是由于气孔运动的滞后性和不确定性所致, 尤其在作物受到较严重胁迫时, 这种特征更为明显, 再加上冠层表面阻力并非完全由气孔阻力构成, 当 r_c 较高时, 对其模拟预测较为困难, 模拟与实测偏差稍大, 而低值则较为吻合。

表 1 模拟结果和观测结果的偏差 (%)、标准差与拟合度

Tab. 1 Bias error, standard error and agreement degree between the predicted and the measured results

年 份	r_c			LE		
	偏差 (%)	<i>rmse</i>	<i>di</i>	偏差 (%)	<i>rmse</i>	<i>di</i>
1992	7.5	11.2	0.93	- 0.4	34.7	0.97
1995	6.4	16.7	0.67	- 1.7	58.3	0.90

3. 2 模型应用

将该模型应用到 P-M 蒸散公式, 以研究麦田生态系统蒸散耗热。根据 1992 年第 2 组和 1995 年的观测资料估算蒸散潜热, 并将之与波文比-能量平衡法的计算结果 (称为实测值) 对比, 见图 2 (a, b)。由图 2 (a, b) 可见, 数值基本上均匀分布在 1:1 线两边, 只是当 LE 超过 500 W/m^2 时, 模拟值偏低, 总体拟合效果很好。1995 年的数值稍为离散, 标准差比 1992 年大, 相对偏差都很小, 在 $\pm 2\%$ 以内, 拟合度都在 0.9 以上 (表 1)。将这两组资料 9:00~16:00 之间的所有 LE 估算值分别相加, 发现模型模拟结果与波文比-能量平衡法结果的相对误差分别为 4% 和 1%。

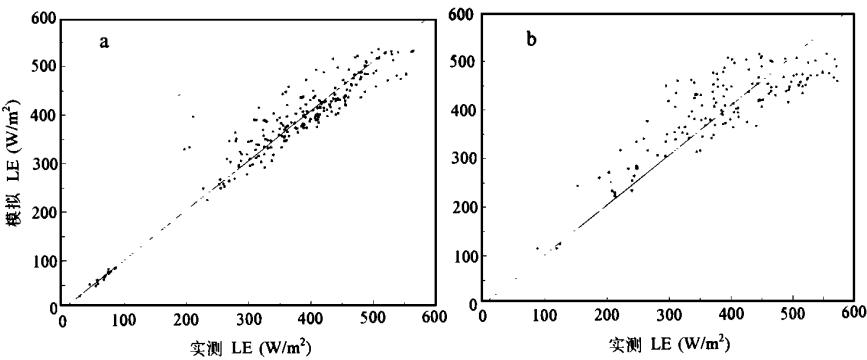


图 2 LE 的模拟值和实测值对比

Fig. 2 Comparison of the predicted and measured LE

作为比较, 本文另用空气动力学方法计算蒸散, 并将之与波文比-能量平衡法的计算结果对比, 相对误差分别为- 16% 和- 28%。由此可见, 本文模型比空气动力学法更为逼近实测, 其误差是可以接受的。1995 年的数据与 1992 第 2 组数据是完全独立的, 而本文模型能较为精确地模拟不同时段的蒸散, 说明模型应用到 P-M 公式, 可较准确地估算麦田蒸散。即使不同地点、不同年份和不同小麦品种, 也可达到良好的模拟效果。该模型可作为估算华北地区冬小麦农田生态系统蒸散量的方法之一。

3.3 敏感性分析

为分析模型参数对系统能量分配的影响程度, 将参数 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 变化 $\pm 20\%$, 模拟参数变化后蒸散的响应 (表 2)。当这些参数变化 +20% 时, 对应的蒸散都增加, 增加最明显的是 a_2 , 其次是 a_4 , a_1 、 a_2 的对应值变化很小。当 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 变化 -20% 时, 对应的蒸散都减小, 变化最大的仍是 a_2 和 a_4 , a_1 和 a_3 的变化小于 -0.2%。由此可见, 饱和水汽压差和土壤水分对蒸散的影响比温度和太阳辐射更为显著。因此, 对 r_c 的模拟精度, 很大程度上取决于这两个函数能否刻划 r_c 与空气饱和水汽压差及土壤含水量的关系。

环境因子对 r_c 胁迫的函数关系随环境因子的变化各不相同 (图 3), 由图 3a 可见, 太阳辐射大于 200 W/m^2 后对 r_c 影响很小; $F(D)$ 随 D 的增加而增加, 在 D 为 30 hPa 时, 可使 r_c 增加 16 倍 (图 3b); 气温在作物最适温度下, 对 r_c 的影响很小, 它对 r_c 的影响往往是与 D 相伴的, 独立性不强 (图 3c)。土壤含水量大于 $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时对 r_c 影响很不显著, 但当含水量进一步降低时, 影响就会急剧增加 (图 3d)。由此可知, 模型参数 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 变化 $\pm 20\%$ 时, 对函数值的影响程度与环境因子的大小有关。

表 2 模型参数变化 $\pm 20\%$ 时蒸散的变化 (%)

	Tab. 2 Variation of ET with a change of $\pm 20\%$ in the parameters			
	a_1	a_2	a_3	a_4
+ 20%	0.13	5.6	0.13	2.8
- 20%	- 0.14	- 6.5	- 0.13	- 2.6

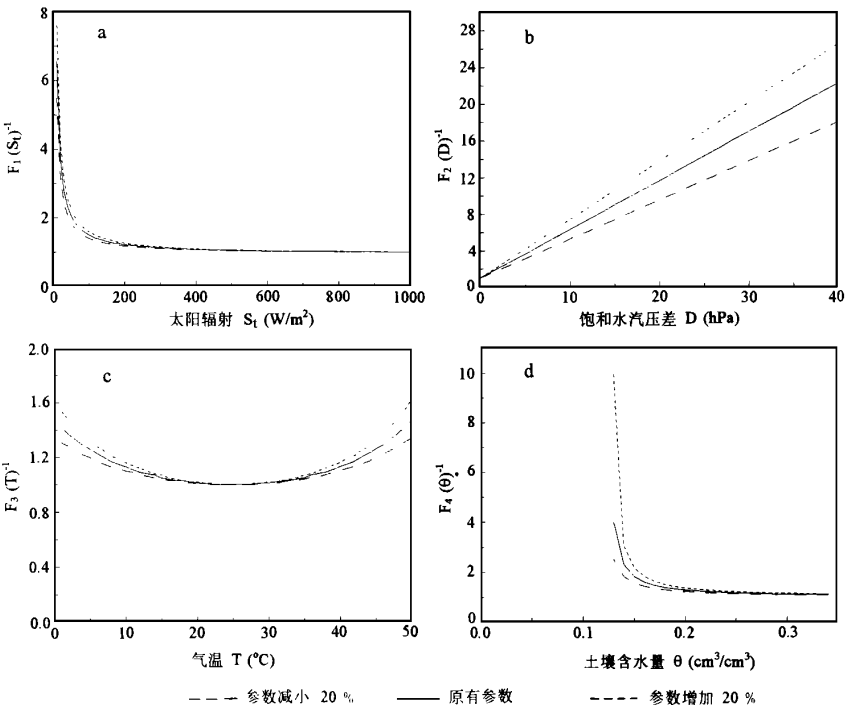


图 3 环境因子对 r_c 的响应

Fig. 3 Responses of the environmental factors to the stress functions

4 结论

冠层表面阻力在植被与大气的相互作用中起着重要作用, 由于它既受环境因子又受植物本身生理因子的影响, 所以冠层表面阻力的模拟常成为热点和难点。本文根据 1992 年在禹城的冬小麦生态系统第 1 组观测资料, 用最优化方法模拟冠层表面阻力与环境因子(太阳辐射、气温、空气饱和差和土壤含水量)的关系, 得到冠层表面阻力与环境因子关系模型参数 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 的拟合值。用 1992 年禹城第 2 组和 1995 年栾城的冬小麦波文比观测资料验证, 结果表明, 拟合模型能较好地模拟冠层表面阻力, 拟合度分别为 0.93 和 0.67, 但 1992 年的结果比 1995 年更为一致。

将该模型应用到 P-M 蒸散公式, 所得的蒸散估算值与波文比-能量平衡法的估算值拟合度达 0.9 以上, 相对偏差小于 5%, 优于空气动力学方法所得结果。

敏感性分析表明, 模型参数 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 变化 $\pm 20\%$ 时, 对应的蒸散都变化, 最明显的是 a_2 , 其次是 a_4 。 a_1 、 a_2 的对应值变化很小, 即饱和水汽压差和土壤含水量的影响较大, 气温和太阳辐射的影响较小。

参 考 文 献

- 1 Monteith J L. Evaporation and environment. In: G. E. Fogg (Editor). The status and movement of water in living organisms. New York: Academic Press, 1965. 205 ~ 234
- 2 Finnigan J J, Raupach M R. Modern theory of transfer in plant canopies in relation to stomatal characteristics. In: E. Zeiger, G. Farquhar and I. Cowan (Editors): Stomatal function. Stanford, CA: Stanford University Press. 1987. 385 ~ 429
- 3 Baldocchi D D, Hicks B B and Camara P. A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces. Atmos. Environ., 1987, **21**: 91 ~ 101
- 4 Baldocchi D D, Luxmoore R J and Hatfield J L. Discerning the forest from the trees: an essay on scaling canopy stomatal conductance Agric. For. Meteorol., 1991, **54**: 197 ~ 226
- 5 Stewart J B and Thom A S. Energy budgets in pine forest. Q. J. R. Meteorol. Soc., 1973, **99**: 154 ~ 170
- 6 Jarvis P G. Interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopy in field. Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B, 1976, **273**: 593 ~ 610
- 7 Ball J T, Woodrow I E, Berry J A. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: J. Biggins (Editor): Progress in Photosynthesis Research, V 4, Martinus Nijhoff, Dordrecht, 1987. 221 ~ 224
- 8 Stewart J B. Modelling surface conductance of pine forest. Meteorol. Agric. For., 1988, **43**: 19 ~ 35
- 9 Dolman A J, Gash H C. Stomatal and surface conductance of tropical rainforest. Meteorol. Agric. For. 1995, **54**: 303 ~ 318
- 10 Ogink-Hendriks M J. Modelling surface conductance and transpiration of an oak forest in the Netherlands. Agric. For. Meteorol., 1995, **74**(1-2): 99 ~ 118
- 11 Jones H G. Plant and microclimate. Cambridge university press., 1992. 131 ~ 162
- 12 Kim J, Verma S B. Modeling canopy stomatal conductance in a temperate grassland ecosystem. Agric. For. Meteorol., 1991, **55** (1-2): 149 ~ 166

A MODEL FOR THE RELATIONSHIP BETWEEN CANOPY SURFACE RESISTANCE AND ENVIRON- MENTAL FACTORS AND ITS APPLICATION TO EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION

Mo Xingguo

(Station for Agro-Ecology and Environmental Technology, Institute of Geography,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract

Surface resistance takes an important role in vegetation-atmosphere interaction. A model simulating the relationship between canopy surface resistance and environmental factors is established. According to one data set of Bowen ratio-energy balance above winter wheat canopy observed in 1992 in North China Plain, four parameters in the model are fitted by multi-variable nonlinear least-square optimum algorithm. The updated relationship between surface resistance and such environmental factors as solar radiation, air temperature, saturated vapour pressure deficit and soil moisture in root layer is obtained. The model is validated with other two data sets acquired in 1992 and 1995 for predicting canopy surface resistance. It is shown that the model is capable of modeling canopy surface resistance over the main growth stage of winter wheat with agreement index of 0.93 and 0.67, respectively. When the model is applied to Penman-Monteith formula, it is shown that the estimated evapotranspiration agrees well with that observed from field. The agreement index of evapotranspiration is over 0.90 and the mean bias is less than 5%. The evapotranspiration predicted by the model is closer to the observed with Bowen ratio-energy balance method than that by aerodynamics resistance method. The results of sensitivity analysis show that when four parameters change $\pm 20\%$, the corresponding changes of evapotranspiration are different. The changes caused by the parameters related to saturated vapour pressure deficit and soil moisture are more obvious than those caused by the parameters related to solar radiation and air temperature. Saturated vapour pressure deficit and soil moisture are shown the major factors affecting the evapotranspiration rate and canopy surface resistance. The influence of the parameters on evaporation depends on how much the environmental factors are.

Key words canopy surface resistance, evapotranspiration, environmental factors, model

作者简介

莫兴国, 男, 1966年2月生。1993年博士毕业, 副研。主要从事农田水热交换与物质生产模型与试验研究, 发表有关论文15篇。