

小麦/玉米套作田棵间土壤蒸发的数学模拟

王自奎^{1,2}, 吴普特^{1,2,3*}, 赵西宁^{1,2,3}, 王玉宝^{1,2}, 高莹^{2,3}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100;
3. 中科院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 为了探明小麦/玉米套作条件下棵间土壤蒸发规律及内在机制, 该文将 Ritchie 模型和间套作群体光能传输模型结合起来模拟了小麦/玉米套作田的棵间土壤蒸发, 并用 2012 年和 2013 年微型蒸渗仪的实测值对该方法进行了验证。结果表明, 2 a 模拟值和实测值的变化趋势都非常一致。与实测蒸发相比, 该文所建模型 2012 年模拟结果的均方根误差为 0.447 mm/d, 平均绝对误差为 0.331 mm/d, 分别比原 Ritchie 模型降低 16.8% 和 20.8%。在实测数据的 88 d, 累计实测蒸发量为 107.2 mm, 而模型的模拟值为 100.5 mm, 仅低估实测值 6.7%。在 2013 年实测数据的 68 d, 累计实测蒸发量为 83.1 mm, 而模型的模拟值为 73.7 mm, 低估 11.3%。模拟值与实测值的均方根误差和平均绝对误差分别为 0.465 和 0.333 mm/d, 略大于 2012 年。套作群体根系层水量平衡分析结果表明, 小麦/玉米套作系统整个生育期土壤蒸发占总蒸发蒸腾的比例高达 41.1%, 故有必要在该套作农田实施秸秆覆盖等农艺措施, 以减少棵间土壤蒸发, 提高土壤水分的利用效率。该研究成果可为小麦套作种植模式下田间水分管理提供依据。

关键词: 作物, 土壤, 蒸发, 小麦/玉米套作, Ritchie 模型, 河套灌区

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.21.010

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-21-0072-10

王自奎, 吴普特, 赵西宁, 等. 小麦/玉米套作田棵间土壤蒸发的数学模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 72-81.

Wang Zikui, Wu Pute, Zhao Xining, et al. Mathematical simulation of soil evaporation from wheat/maize intercropping field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 72-81. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

土壤蒸发是农田生态系统水分传输过程中的一个重要部分。在干旱及半干旱地区, 由于大气蒸发能力强, 且地表不能被植被完全覆盖, 大量水资源通过土壤蒸发被无效消耗^[1]。Allen 发现半干旱区大麦田的土壤蒸发占生育期总蒸发蒸腾量的 67%~77%^[2], Pilbeam 等发现半干旱地区种植密度较小的玉米和大豆田的土壤蒸发占生育期降雨量的 50%以上^[3]。如果土壤蒸发能够得到有效控制, 农田的水分利用效率将会大幅提高, 所以科学家们一直以来非常重视对农田土壤蒸发的研究。微型蒸

渗仪 (Micro-lysimeters, MLS) 由于其制作简单、成本低、测量精度较高等原因而成为目前国内外最常用的测定土壤蒸发的仪器^[4-8], 但它的主要缺点是需要频繁更换蒸渗仪内部土体以保证测量精度, 并且测定经常会被灌溉、降雨等打断, 很难实现连续测定^[2,9]。因此有必要建立估算土壤蒸发的数学模型, 以实现对于农田土壤蒸发的实时预测。Ritchie 土壤蒸发模型是 Ritchie 在总结众多学者研究成果的基础上提出的根据气象条件、土壤特性及作物生长状况预测农田土壤蒸发的数学模型^[10]。该模型将降雨或灌溉后的土壤蒸发分为 2 个阶段, 并假定第 1 阶段的蒸发速率主要受气象条件的影响, 而第 2 阶段的蒸发速率主要跟土壤的导水特性有关。虽然该模型在蒸发阶段划分等方面具有一定的经验性, 但已被成功应用于裸露土壤、农田及林地蒸发的模拟研究^[2,9,11-12]。

小麦/玉米套作是中国西北内陆灌溉农业区一种集约高产的种植方式, 有关该套作群体根系生长分布、养分吸收利用、节水增产效应的研究较多^[13-16], 但这种套作模式下农田棵间土壤的蒸发规律及其动力学机制尚不清楚。本研究拟将 Ritchie 模型和间套作条件下作物群体冠层光能传输模型结合起来, 模拟

收稿日期: 2013-06-13 修订日期: 2013-09-28

基金项目: 国家科技支撑计划 (2011BAD29B09); 教育部、国家外国专家局“111”计划 (B12007); 西北农林科技大学青年学术骨干项目和基本科研业务费资助项目; 旱区农业共性节水技术集成与示范 (K303021301)

作者简介: 王自奎 (1987-), 男, 汉族, 甘肃会宁人, 博士生, 从事农业水土资源管理方面的研究。杨凌 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 712100。Email: wzk09@126.com

*通信作者: 吴普特 (1963-), 男, 陕西武功人, 教授, 博士生导师, 中国农业工程学会会员 (E041200091S), 主要从事节水农业与水土保持方面的研究。杨凌 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 712100。Email: Gjzwpt@vip.sina.com

小麦/玉米套作田的棵间土壤蒸发, 阐明土壤蒸发的形成原因, 以期为该种植模式的田间水分管理提供一定的理论依据。为了验证该模型的可靠性, 本研究利用微型蒸渗仪对套作田的土壤蒸发进行了测定。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2012 年和 2013 年在内蒙古河套灌区沙

壕渠试验站进行。该站位于 107°09'E, 40°54'N 处, 海拔 1 036 m, 属于中温带干旱气候, 多年平均降雨量 135 mm, 蒸发量 2 196 mm, 年均气温 9.1℃, 相对湿度 50.6%。试验田土壤属黄河灌淤土, 具有明显分层, 0~60 cm 为粉质黏土, >60~150 cm 为砂壤土。0~100 cm 土层土壤容重、田间持水量、凋萎含水量及初始含盐量(土水质量比为 1:5 的土壤溶液的电导率)列于表 1 中。

表 1 试验田土壤的主要水力学特性及初始含盐量
Table 1 Main soil hydraulic properties and initial salinity of experimental field

层次 Layer	深度 Depth/cm	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	田间持水量 Field capacity/(cm ³ ·cm ⁻³)	凋萎含水量 Wilting point/(cm ³ ·cm ⁻³)	电导率 Electrical conductivity/(mS·cm ⁻¹)
1	0~10	1.492	0.342	0.164	0.286~0.342
2	>10~30	1.435	0.356	0.152	0.210~0.331
3	>30~60	1.451	0.401	0.169	0.238~0.381
4	>60~100	1.512	0.378	0.203	0.324~0.488

1.2 试验布置与测定

试验共设 3 个套作小区, 每个小区宽 5.1 m, 长 8 m, 内设 3 个套作条带, 每个条带包括 6 行小麦和 2 行玉米。2012 年小麦于 3 月 27 日播种, 7 月 15 日收获, 玉米于 4 月 25 日播种, 9 月 21 日收获; 2013 年小麦于 3 月 20 日播种, 7 月 12 日收获, 玉米于 4 月 21 日播种。小麦播种密度为 667 万株/hm², 行距 15 cm, 玉米播种密度为 8.33 万株/hm², 行距 40 cm, 株距 30 cm, 小麦边行与玉米行相距 27.5 cm, 套作条带总带幅宽 1.7 m。灌溉、施肥及锄草等田间管理措施按当地生产实践, 以保证作物的生长不受水肥的限制。

生育期内每 15 d 左右用量测法观测作物的株高和叶面积。作物单个叶片面积的计算方法为: 玉米叶片叶面积=长×宽×0.70, 小麦叶片叶面积=长×宽×0.835^[17-18]。测定群体叶面积指数时, 玉米带内取 5 株作为样本, 小麦带内每个对称行(边 1、边 2 和边 3 行)取 10 株共 30 株作为样本。

棵间土壤蒸发量用自制微型蒸渗仪(Micro-lysimeter)直接测定。微型蒸渗仪用内径 10.4 cm 的 PVC 管制成, 深度 15 cm。为了便于测量及不破坏微型蒸渗仪周围的土体结构, 用内径为 11.5 cm 的镀锌铁皮做成蒸渗仪外套, 固定于土壤中^[17]。微型蒸渗仪布置在小麦带中间及玉米带中间, 小区的土壤蒸发值取不同位置微型蒸渗仪测定结果的平均值。为了保持测定精度, 使微型蒸渗仪内部的土壤水分与周围土壤一致, 内部土体每 3 d 更换一次, 降雨和灌溉后立即更换土体。每次换土时, 用铁锤将微型蒸渗仪垂直慢慢砸入土壤, 取出盛有原状土柱的微型蒸渗仪, 削去底部多余的土壤, 用网布封底, 然后使用精度为 0.1 g 的电子天

平称其质量, 每天测量时间为上午 07:00~08:00。

试验小区 0~100 cm 土层的土壤水分每 10 cm 为 1 个层次进行分层测定, 每个小区测 2 个重复点。每个重复的测定值为小麦带中间、玉米带中间及小麦玉米边界 3 个点测定值的平均。5 月 1 日以前用烘干法每 15 d 测定一次, 5 月 1 日以后用土壤水分廓线仪(Diviner 2000, Sentek Pty Ltd, Australia)每 5~7 d 测定一次。土壤水分廓线仪在使用前先用烘干法对其进行标定。土壤盐分(EC)采用土水质量比为 1:5 的土壤溶液速测^[19], 所用仪器为 DDS-307 精密电导率仪。地下水位用试验田内的观测井, 每 2~3 d 观测一次。气象资料包括太阳辐射、大气最高和最低温度、最大和最小相对湿度、2 m 高处风速及降雨量等用试验田旁 50 m 处的自动气象站(Vantage Pro2, Davis Instruments, USA)测定。

1.3 Ritchie 模型

Ritchie 模型是估算土壤蒸发最常用的模型之一, 它将降雨或灌溉后土壤的蒸发分为 2 个阶段。在第 1 个阶段, 蒸发以潜在的速率进行, 蒸发量的大小主要取决于大气的蒸发能力。当累积蒸发量达到一定的 U 值以后, 蒸发进入第 2 个阶段。第 2 个阶段的蒸发速率主要和土壤的水力特性有关, 大量试验研究结果表明第 2 个阶段土壤累积蒸发量与时间的平方根成正比^[10]。第 1 阶段与第 2 阶段的累积蒸发量为

$$\sum E_{s1} = \sum_{i=0}^t E_{s0} = U \quad t < t_1 \quad (1)$$

$$\sum E_{s2} = \alpha \sqrt{(t-t_1)} \quad t > t_1 \quad (2)$$

式中, $\sum E_{s1}$ 和 $\sum E_{s2}$ 分别为第 1 阶段和第 2 阶段的累积蒸发量, mm; t 和 t_1 分别为蒸发开始的时间

和第 1 阶段所用的时间, d ; α 是一个与土壤水力特性有关的参数, $\text{mm/d}^{0.5}$, 可通过试验确定; E_{s0} 是土壤的潜在蒸发速率, mm/d , 可根据 Penman-Monteith^[20]公式计算

$$\lambda E_{s0} = \frac{\Delta(R_{ns} - G_s) + \rho c_p D/r_a}{\Delta + \gamma} \quad (3)$$

式中, λ 是水的汽化潜热, 2.45 MJ/kg ; R_{ns} 为土壤表面的净辐射, $\text{MJ/m}^2/\text{d}$; G_s 为土壤热通量, $\text{MJ/m}^2/\text{d}$; Δ 为饱和水汽压—温度曲线的斜率, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; γ 是湿度计常数, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; D 是饱和水汽压差, kPa ; r_a 是空气动力学阻力, s/m ; ρ 是空气密度, 1.209 kg/m^3 ; c_p 是空气比热容, $1.013 \times 10^3 \text{ MJ/Kg}/^\circ\text{C}$ 。在土壤表面裸露的情况下, r_a 根据下式计算

$$r_a = \frac{\ln^2[(z-d)/z_0]}{k^2 u} \quad (4)$$

式中, z 为参照高度, 2 m ; d 为零平面位移, 裸土取 0 ; z_0 为表面粗糙度, 裸土取 0.01 m ; k 为 von Karman 常数, 取 0.41 ; u 是参照高度处的风速, m/s 。对于处于冠层底下的土壤, 可假设其潜在蒸发不受空气动力的影响, 所以其计算公式简化为

$$\lambda E_{s0} = \frac{\Delta(R_{ns} - G_s)}{\Delta + \gamma} \quad (5)$$

对于套作群体, 2 种作物冠层的时空搭配直接影响光能在作物冠层的传输, 需采用与套作每个生长时期冠层结构相对应的光能传输模型计算土壤表面接收的净辐射。本文根据套作群体的不同时期冠层结构特征将其分为 3 个时期, 即前期、中期和后期 (前期和后期仅有一种作物, 中期 2 种作物共生, 具体划分方法见 2.1), 在计算套作前期和后期土壤表面的净辐射时, 采用 Pronk 等推导的宽行作物光能传输模型^[21]

$$R_{nP} = R_n [a + (1-a) \exp(-K \cdot LAI)] \quad (6)$$

$$R_{nR} = R_n [b \exp(-K \cdot LAI_{comp}) + (1-b) \exp(-K \cdot LAI)] \quad (7)$$

$$a = (\sqrt{H^2 + P^2} - H) / P \quad (8)$$

$$b = (\sqrt{H^2 + W^2} - H) / W \quad (9)$$

$$LAI_{comp} = LAI \cdot (W + P) / W \quad (10)$$

式中, R_n 、 R_{nP} 和 R_{nR} 分别为作物冠层表面、空行和作物行土壤表面接收的净辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; K 为相应作物的消光系数; LAI 为作物的叶面积指数, m^2/m^2 ; LAI_{comp} 为不计空行土地面积时的叶面积指数, m^2/m^2 ; H 、 W 及 P 分别为作物冠层高度、宽度及空行宽度, cm ; a 和 b 为运算过程中的中间变量。套作中期 2 种作物共生时, 土壤表面的净辐射可按

Wallace 等提出的经验方法计算^[22]

$$R_{ns} = R_n \exp(-K_W \cdot LAI_W - K_M \cdot LAI_M) \quad (11)$$

式中, K_W 和 K_M 分别为小麦和玉米的消光系数; LAI_W 和 LAI_M 分别为小麦和玉米的叶面积指数, m^2/m^2 。根据 Zhang 等^[18]及 Tsubo 等^[23]的研究, 分别取小麦和玉米的消光系数为 0.7 和 0.5 。

为了保证计算精度, 当降雨或灌溉使土壤表层 50 cm 的土壤水分完全增大至田间持水量时一个完整的蒸发模拟过程方可开始。如果蒸发的第 1 阶段发生了降雨, 若降雨量 P 小于 $\sum E_{s1}$, 则 $\sum E_{s1} = \sum E_{s1} - P$, 若降雨量大于 $\sum E_{s1}$, 则计算过程回到起点。如果蒸发的第 2 阶段发生了降雨, 若降雨量小于 $\sum E_{s2}$, 则 $\sum E_{s2} = \sum E_{s2} - P$, 若降雨量大于 $\sum E_{s2}$ 但小于 $\sum E_{s2} + \sum E_{s1}$, 则蒸发计算过程回到第 1 阶段, 若降雨量大于 $\sum E_{s2} + \sum E_{s1}$, 则计算过程回到起点^[10]。

降雨或灌溉当天的蒸发跟降雨或灌溉发生的时间有关, 本文在计算时采用了 Wallace 等的假定, 认为所有的灌溉和降雨发生在中午, 前半天的蒸发按降雨或灌溉前蒸发所处的阶段计算, 后半天的蒸发按潜在蒸发速度计算^[11]。因为河套地区气候干旱、降雨少, 这样的假定带来的误差较小。

1.4 套作群体耗水量的计算

为了量化小麦/玉米套作田棵间土壤蒸发占总蒸发蒸腾量的比例, 本文分析了 2012 年套作农田的土壤水量平衡, 以确定套作群体的实际耗水 ET_a

$$ET_a = \Delta W + P_e + I + V_z + G_c - D_r \quad (12)$$

式中, ΔW 为计算时段初和时段末根系层土壤储水量之差, mm ; P_e 为有效降雨, mm ; I 为灌溉量, mm ; V_z 为由于根系层的增加而增加的土壤储水量, mm ; G_c 为地下水的补给量, mm ; D_r 为土壤水的深层渗漏量, mm 。小麦生育期 (3 月 21 日至 7 月 15 日) 取根 3 次, 5 月 12 日、6 月 18 日、7 月 15 日小麦根系伸长的深度分别为 50 、 80 和 100 cm 。玉米生育期 (4 月 25 日至 9 月 21 日) 取根 4 次, 6 月 18 日、7 月 15 日、8 月 17 日及 9 月 20 日玉米根系伸长的深度分别为 60 、 70 和 90 和 100 cm , 该结果与 Yang 等在甘肃武威地区测得的结果一致^[24]。本文在水量平衡计算中根系层深度 4 月取 40 cm , 5 月取 60 cm , 6 月取 80 cm , 7 月、8 月和 9 月均取 100 cm 。如果降雨量小于当日参考蒸发蒸腾量的 0.2 倍, 则视为无效降雨^[25]。土壤水分的深层渗漏量根据 FAO56 分册中提供的方法计算, 即假定降雨或灌溉先补给根系层土壤水分至田间持水量, 多余的水即为深层渗漏损失量^[25]。地下水补给量 G_c 根据潜在补给量由

下式^[26]求得

$$G_c = G - R \cdot G / R_{\min} \quad (13)$$

式中, G 为地下水潜在补给量, mm, 主要与地下水的深度和土壤质地有关。本试验中土壤为砂壤土, G 根据 FAO24 分册中图 18 估算^[27]。 R 为根系层实际储水量与根系层土壤含水量为凋萎含水量时储水量的差; R_{\min} 为根系层适宜含水量的下限, 通过下式计算

$$R_{\min} = D(\theta_{fc} - \theta_{pwp})(1 - p) \quad (14)$$

式中, D 为根系层深度, mm; θ_{fc} 和 θ_{pwp} 分别为土壤田间持水量和凋萎含水量, cm^3/cm^3 ; p 为土壤水分的消耗系数, %, 取 FAO56 分册的推荐值, 小麦和玉米均为 0.55^[24]。 G_c 的详细计算过程读者可参考文献^[26]。

2 结果与分析

2.1 土壤表面接收的太阳辐射

作物的株高和叶面积是影响冠层光能传输进而影响土面蒸发的主要因素。套作条件下, 作物群体冠层结构的时空变化与单作完全不同, 从而使农田土面的蒸发规律变得更加复杂。小麦/玉米套作群体中, 小麦和玉米叶面积指数的变化如图 1。玉米苗期叶面积指数的变化较为缓慢, 6 月中旬以前, 小麦在套作群体中占主导地位, 进入 7 月以后, 玉米的叶面积指数迅速增大, 并于 8 月上旬达到最大值。对于套作群体而言, 其叶面积指数为小麦和玉米叶面积指数的叠加, 在小麦收获前达到最大, 约为 $2.8 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 。

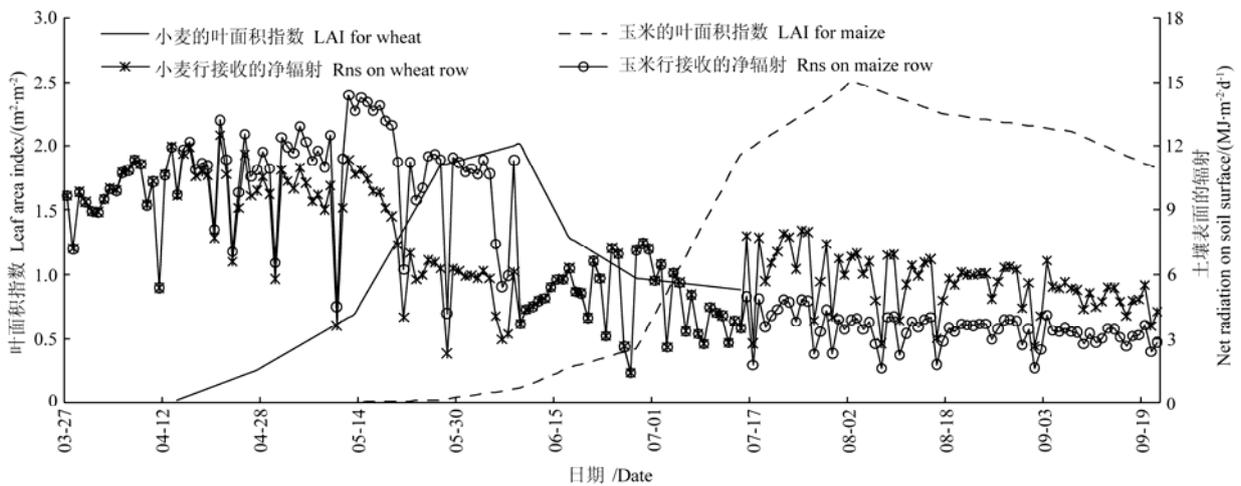


图 1 小麦/玉米套作田小麦和玉米的叶面积指数及土壤表面接收的净辐射

Fig.1 Leaf area index and soil surface received net radiation of wheat/maize intercropping field

6 月 9 日以前, 玉米的叶面积指数不足 $0.1 \text{ m}^2/\text{m}^2$, 株高小于 40 cm, 所以这一阶段设为套作前期。这一阶段和小麦收获后(套作后期)土壤表面接收的辐射根据宽行作物光能传输模型(式(6)至式(10))计算, 而 6 月 9 日至 7 月 15 日(套作中期)土壤表面接收的辐射按间作群体光能传输的模型(式(11))计算。套作田不同时期土面接收的净辐射也绘制于图 1 中。由图可见, 6 月 9 日以前, 随着小麦的生长小麦行和玉米行土壤接收的净辐射差距越来越大, 而小麦收获以后, 小麦行和玉米行土壤接收净辐射间的差距变化不大, 因为玉米株高和叶面积变化已趋于稳定。需要指出的是, 将 6 月 9 日作为套作前期和中期的分界具有一定的经验性, 可能会使光能传输的计算结果有一定的误差, 进而影响土壤蒸发的模拟精度。

2.2 Ritchie 模型中参数 U 和 α 的确定

Ritchie 指出第 1 阶段的累积蒸发量 U 主要与土壤的水力特性如非饱和导水率有关, 但他并未给出

U 与这些参数之间确定的数学关系。Ritchie 总结大量蒸发试验结果发现, 黏土、壤土和砂土的 U 分别大约为 12、9 和 6 mm^[10], Allen 等也概括了不同类型土壤的 U 值^[24], 后来学者大都按这些经验的方法估算 U 值。本研究中表层土壤为粉质黏土, 取 U 值为 9 mm。土壤蒸发第 1 阶段的持续时间 t_1 与降雨或灌溉量、大气蒸发能力及植被覆盖程度有关。Daamen 等发现作物叶面积指数较小的农田中, 降雨较小(不足 10 mm)的情况下, t_1 甚至少于 1 d, 这时他们假设 t_1 为 0, 蒸发直接从第 2 阶段算起^[9]。Wallace 等在研究中假设第 2 阶段从降雨后的第 2 天算起, 因为降雨后第 2 天土壤蒸发一般显著低于潜在蒸发值^[11]。本文根据 Ritchie 模型的假设确定 t_1 , 即如果第 1 阶段累积蒸发在第 n 天时小于 U , 而在第 $n+1$ 天时大于 U , 则 t_1 为 n 天^[10]。

由式(2)可知, α 可根据第 2 阶段的持续时间和累积蒸发通过线性回归的方法得到。为了计算 α 值, 专门测定了 2012 年 5 月 28 日灌溉后和 8 月 12

日降雨后裸露土地的土壤蒸发，如图 2 所示。灌溉后的测定被 6 月 6 日的降雨打断，只测定了 8 d，而降雨后持续测定了 13 d。由图 2 可知，降雨或灌溉后第 1 天土壤的蒸发量略高于潜在蒸发，但第 2 天已明显低于潜在蒸发，蒸发的第 2 阶段开始。第 2 阶段累积蒸发量和持续时间的开方之间的回归关系呈现于图 3 中。灌溉后回归线的斜率为 5.1254，略高于降雨后的值。这与 Wallace 等的研究结果一致，说明第 2 阶段的蒸发不仅与土壤的水力特性有关，还与土壤含水量有一定的关系^[11]。因此取 α 为两次测定的平均值， $4.62 \text{ mm/d}^{0.5}$ 。结合式 (2) 和 α 值，第 2 阶段的土壤蒸发速率为

$$E_{s,2} = 4.62(t - t_1)^{0.5} - 4.62(t - 1 - t_1)^{0.5} \quad (15)$$

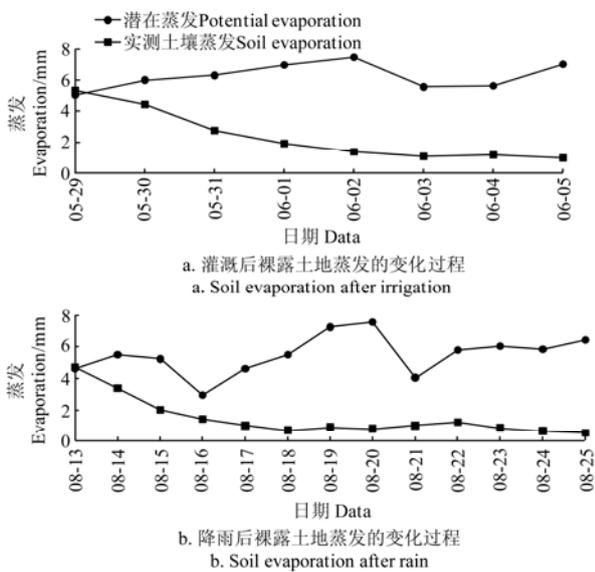


图 2 2012 年灌溉和降雨后裸露土地蒸发的变化过程
Fig.2 Soil evaporation trends after irrigation and rain events in 2012

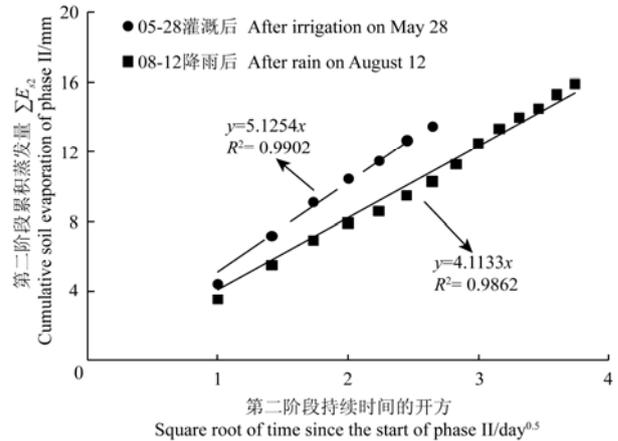


图 3 2012 年两次蒸发过程第二阶段累积蒸发量和持续时间的开方之间的回归关系

Fig.3 Relationship between cumulative soil evaporation of phase II and square root of time since start of phase II

2.3 土壤蒸发的模拟结果

由于降雨等原因，土壤蒸发未能连续测定，2012 年整个生育期共测得 88 d 的蒸发量。从 5 月 1 日至 9 月 8 日套作田土壤蒸发的模拟值和实测值的变化动态如图 4 所示，期间的降雨量和灌溉量也列于图中，以显示它们对蒸发的影响。图中的蒸发值为小麦行和玉米行蒸发的平均值。从图 4 可以看出，模拟值和实测值的变化趋势大致相同，套作前期（6 月 9 日以前）灌溉和降雨对土壤蒸发的影响较大，而后土壤蒸发受灌溉和降雨的影响较小。这主要是因为前期地面覆盖度小，土面的潜在蒸发大，灌溉后土壤蒸发迅速增大，而后后期土壤表面接收的太阳能较少，导致土壤潜在蒸发小，第 1 阶段和第 2 阶段的蒸发差别不大。

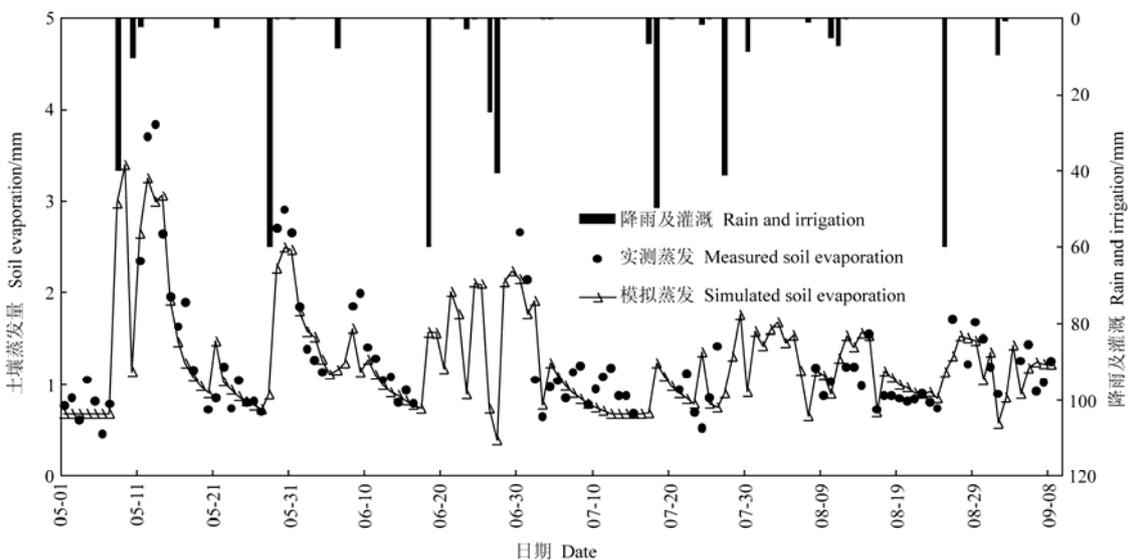


图 4 2012 年小麦/玉米套作田土壤蒸发的实测值和模拟值的变化动态及生育期的降雨量和灌溉量
Fig.4 Measured and simulated soil evaporation of wheat/maize intercropping filed during 2012 growing season and rainfall and irrigation of this season

5 月 8 日以前, 农田未接收过任何降雨和灌溉, 采取 Salado-Navarro 等的方法^[12], 假定这段时间的蒸发不变, 为第 2 阶段持续 12 d 时的蒸发速率, 即 0.68 mm/d。由图 4 可知 5 月 1 日至 5 月 7 日有 5 个实测值略高于该值, 而 2 个实测值略低于该值, 说明该方法可用于粗略估算此阶段的土壤蒸发。从图 4 中还可以看出, 灌溉和降雨后 2~3 d 之内, 蒸发的实测值明显大于模拟值, 也就是说在第 1 个阶段模型有低估蒸发的趋势, 例如 5 月 10 日降雨后,

5 月 28 日灌溉后, 6 月 27 日降雨后等。这可能是因为计算第 1 阶段潜在蒸发时没有考虑冠层内部的风速和空气湿度对蒸发的影响。套作条件下, 由于空行的存在或作物的高低搭配, 使得冠层通风较为流畅, 这对潜在蒸发具有一定的影响。图 5 以散点图的形式给出了蒸发第 1 阶段和第 2 阶段实测值和模拟值的比较。该图更明显地表明模型低估了第一阶段大部分的实测蒸发值, 而模型在第 2 阶段表现较好。

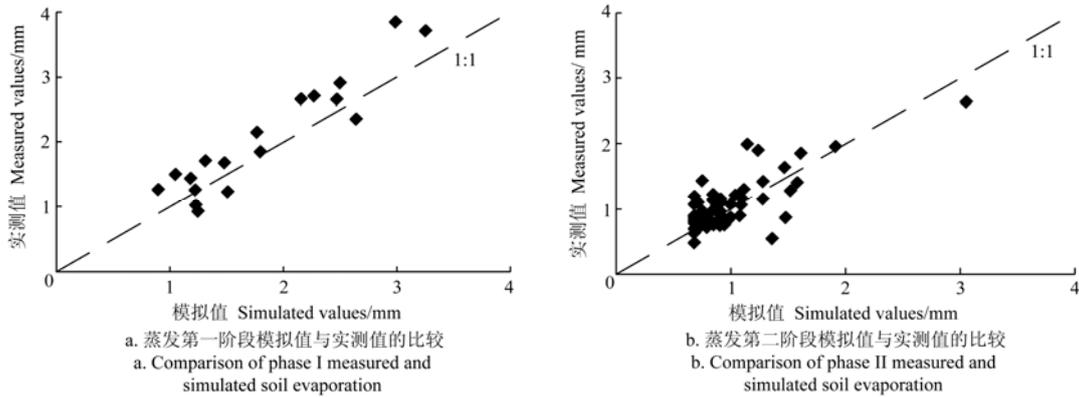


图 5 2012 年小麦/玉米套作田土壤蒸发两个阶段的实测值和模拟值的比较

Fig.5 Comparison between measured and simulated soil evaporation of different evaporation phase during 2012 growing season

误差统计结果显示, 在实测数据的 88 d, 模拟值与实测值的均方根误差为 0.447 mm/d, 平均绝对误差为 0.331 mm/d, 相关系数为 0.705。误差高于 Ritchie 在宽行作物田的模拟结果^[10], 但低于 Wallace 等在林地的模拟结果^[11]。累计实测蒸发量为 107.2 mm, 而模型的模拟值为 100.5 mm, 仅低估 6.7%, 这与 Wallace 等的结果非常一致, 说明 Ritchie 模型模拟长时间序列累积蒸发量的效果较好。若 Ritchie 模型中的辐射项还按单作条件计算,

则模型的模拟值与实测值的均方根误差为 0.537 mm/d, 平均绝对误差为 0.418 mm/d, 分别比改进后的 Ritchie 模型高 16.8%和 20.8%。2012 年 Ritchie 模型改进前后的计算的小麦行和玉米行的土壤蒸发如图 6 所示, 从图中看出未改进模型误差较大主要是因为没考虑两种作物的相互影响, 生长前期高估了玉米行的蒸发而过分低估了小麦行的蒸发, 而生长后期高估了小麦行的蒸发而过分低估了玉米行的蒸发。

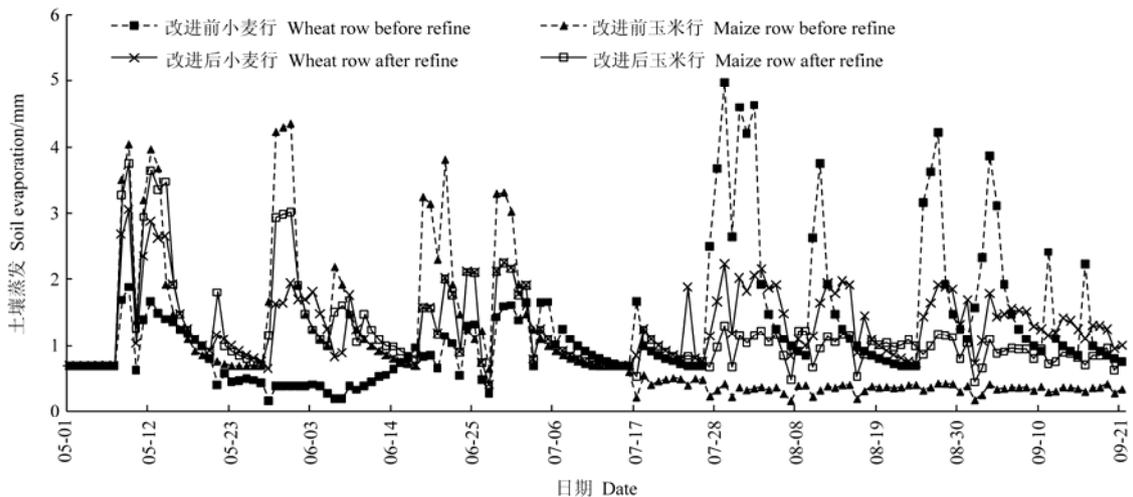


图 6 2012 年辐射项改进前和改进后小麦行和玉米行土壤蒸发模拟结果的比较

Fig.6 Comparison of simulated soil evaporation from wheat row and maize row during 2012 growing season with original and refined Ritchie model

为了进一步验证本文所建立模型的可靠性,用其模拟了 2013 年 4 月 21 日至 8 月 10 日小麦/玉米套作田的棵间蒸发,模拟结果如图 7 所示。从图中可以看出模拟值和实测值的变化趋势非常一致,虽然模型低估了部分较大的蒸发值。在实测数据的 68 d, 累计实测蒸发量为 83.1 mm, 而模型的模拟值为 73.7 mm, 低估 11.3%。模拟值与实测值的均方根误差为 0.465 mm/d, 平均绝对误差为 0.333 mm/d, 略大于 2012 年。

2.4 棵间土壤蒸发占实际蒸发蒸腾的比例

由前面的分析可知, Ritchie 模型可以有效地模拟小麦/玉米套作田的棵间土壤蒸发量。根据 2012

年整个生育期的模拟结果,求得每个月的累积土壤蒸发,如表 2 所示,土壤水量平衡的各个收支项也列于表 2 中。

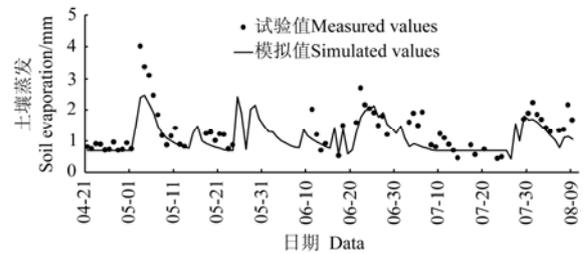


图 7 2013 年土壤蒸发实测值和模拟值的比较

Fig.7 Comparison of measured and simulated soil evaporation during 2013 growing season

表 2 2012 年小麦/玉米套作田土壤蒸发和作物蒸发蒸腾的比例关系

Table 2 Ratio of soil evaporation to crop evapotranspiration of wheat/maize intercropping field during 2012 growing season

月份	E_s /mm	ET_c /mm	ΔW /mm	$I+P_e$ /mm	V_z /mm	D_r /mm	G_c /mm	E_s/ET_c %
4 月	20.4	26.6	26.6	0	0	0	0	76.8
5 月	46.4	85.4	-100.2	115.2	90.7	20.3	0	54.4
6 月	41.7	114	-86.6	135.8	90.9	26.1	0	36.6
7 月	31.1	107.4	-36.3	58.4	82.8	0	2.5	29.0
8 月	37.9	90.2	11.7	73.8	0	0	4.8	42.0
9 月	22.1	62.3	39.7	16.0	0	0	6.6	35.4
合计	199.7	485.9	-145.2	399.2	264.4	46.4	13.9	41.1

注: E_s 、 ET_c 、 ΔW 、 $I+P_e$ 、 V_z 、 D_r 、 G_c 及 E_s/ET_c 分别表示土壤蒸发、蒸发蒸腾量、土壤储水的变化、有效降雨和灌溉量、由于根系层增加而增加的土壤储水、深层渗漏量、地下水补给及土壤蒸发占蒸发蒸腾的比例。

Denote: E_s , ET_c , ΔW , $I+P_e$, V_z , D_r , G_c and E_s/ET_c present soil evaporation, evapotranspiration, change of soil stored water, soil water stored in the deeper layer, soil water deep Percolation, ground water contribution and the ratio of E_s to ET_c .

2012 年生育期地下水和地下水潜在补给量的变化趋势如图 8 所示,根据 FAO24 分册中方法^[27]计算的相应地下水潜在补给量也绘制于图 8 中。降雨和灌溉以后地下水变浅,潜在补给量增大,随着地下水位的变深,潜在补给量减小。由式 (13) 可知,地下水的实际补给主要跟潜在补给量和土壤储水量有关。根据表 2 的计算结果,2012 年套作整个生育期地下水的补给量仅为 13.9 mm,这主要是因

为每次灌溉后虽然地下水位浅,潜在补给量大,但土壤储水量高,地下水很难向上补给。随着土壤水分的减少,地下水也降低,根系层需要水分补给时,地下水降至 1.5~2 m 左右,向上补给量很少。地下水补给量少的另一个原因是土壤是深层土壤为沙壤土,导水能力差。5 月由于灌溉量大、作物耗水量小,导致 20.3 mm 被深层渗漏损失,6 月 18 日灌溉 8 d 后的强降雨也造成了大量水分的渗漏损失。

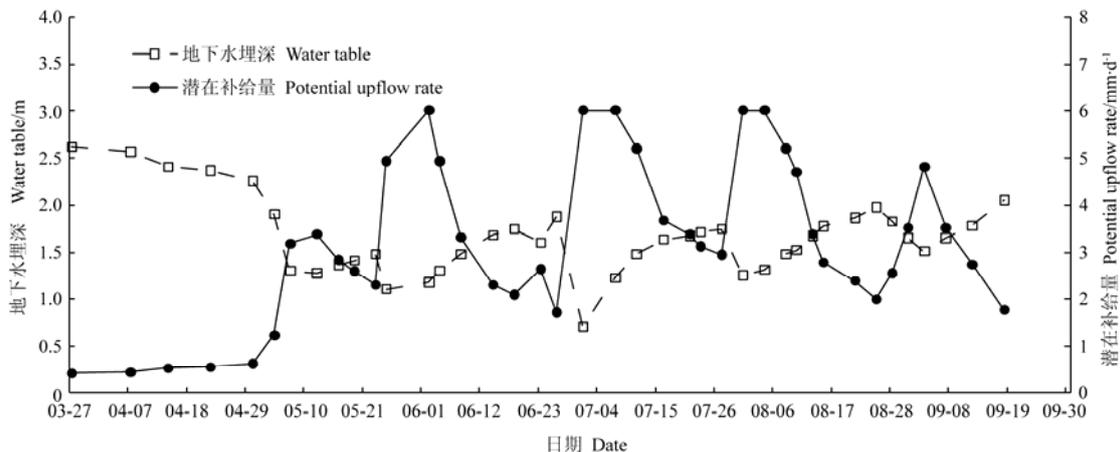


图 8 2012 年生育期地下水和地下水潜在补给量的变化趋势

Fig.8 Changes of water table and potential groundwater up flow rate during 2012 growing season

由表 2 可知, 整个生育期套作田总蒸发蒸腾为 485.9 mm。该值高于齐万海在甘肃省河西地区的测定结果 (440.5 mm)^[28], 但低于 Yang 等 2006 年至 2008 年的测定结果 (506~590.5 mm)^[29], 这可能是因为 Yang 等试验中作物生育期的降雨和灌溉量较大, 但他们未考虑水分的深层渗漏。4 月和 5 月小麦处于苗期和拔节期, 叶面积指数小, 土壤蒸发占蒸发的蒸腾的比例较大。6 月小麦叶面积指数达到最大, 但玉米仍处于苗期, 土面蒸发达总蒸发蒸腾的 36.6%。前面 2.1 部分的分析可知, 7 月玉米叶面积指数迅速增高, 整个套作田的地表覆盖达到最大, 土壤蒸发仅占蒸发蒸腾的 29.0%。小麦收获后, 土壤蒸发再次增大, 8、9 月分别占蒸发蒸腾的 42.0%和 35.4%。整个生育期, 土壤蒸发占蒸发蒸腾的比例高达 41.1%, 这主要是由于套作田空行的长期存在造成的。所以, 有必要在套作田实施能够减少土壤蒸发的农艺措施, 如秸秆覆盖等, 以提高农田土壤水分的利用效率。

3 结 论

1) 本文将 Ritchie 模型和间套作群体光能传输模型相结合, 模拟了小麦/玉米套作田的棵间土壤蒸发, 结果表明模型模拟值和微型蒸渗仪实测值的变化趋势非常一致, 在有实测数据的 88 d 内, 模型仅低估累积实测蒸发 6.7%, 模拟值与实测值的均方根误差为 0.447 mm/d, 平均绝对误差为 0.331 mm/d, 分别比未经改进的 Ritchie 模型低 16.8%和 20.8%, 说明本文提出的方法可有效模拟套作农田的棵间土壤蒸发。

2) 在 2013 年实测数据的 68 d, 累计实测蒸发量为 83.1 mm, 而模型的模拟值为 73.7 mm, 低估 11.3%。模拟值与实测值的均方根误差为 0.465 mm/d, 平均绝对误差为 0.333 mm/d, 略高于 2012 年。

3) 2012 年土壤水量平衡分析表明, 小麦/玉米套作田整个生育期土壤蒸发占蒸发蒸腾的比例达 41.1%, 说明这种种植方式虽然可高效利用光、热、肥等资源, 但同时也存在大量水资源无效消耗, 因此建议在该套作田采取能够抑制土壤蒸发的农艺措施, 以提高农田土壤水分的利用效率。

[参 考 文 献]

- [1] Enrique A T, Alfonso C. Bare soil evaporation under high evaporation demand: A proposed modification to the FAO-56 model[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2010, 55(3): 303—315.
- [2] Allen S J. Measurement and estimation of evaporation from soil under sparse barley crops in northern Syria[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 49(4): 291—309.
- [3] Pilbeam C J, Daamen C C, Simmonds L P. Analysis of water budgets in semi arid lands from soil water records[J]. *Experimental Agriculture*, 1995, 31(2): 131—149.
- [4] Boast C W, Robertson T M. A “micro lysimeter” method for determining evaporation from bare soil: Description and laboratory evaluation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(4): 689—696.
- [5] 刘钰, Fernando R M, Pereira L S. 微型蒸发器田间实测麦田与裸地土面蒸发强度的试验研究[J]. *水利学报*, 1999, 30(6): 45—50.
- Liu Yu, Fernando R M, Pereira L S. Measurement of evaporation from wheat field and bare soil by using micro-lysimeters[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 30(6): 45—50. (in Chinese with English abstract)
- [6] 孙宏勇, 刘昌明, 张永强, 等. 微型蒸发器测定土面蒸发的试验研究[J]. *水利学报*, 2004, 35(8): 114—118.
- Sun Hongyong, Liu Changming, Zhang Yongqiang, et al. Study on soil evaporation by using micro-lysimeter[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(8): 114—118. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王健, 蔡焕杰, 康燕霞, 等. 夏玉米棵间土面蒸发与蒸发蒸腾比例研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(4): 17—22.
- Wang Jian, Cai Huanjie, Kang Yanxia, et al. Ratio of soil evaporation to the evapotranspiration for summer maize field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(4): 17—22. (in Chinese with English abstract)
- [8] 赵娜娜, 刘钰, 蔡甲冰, 等. 夏玉米棵间蒸发的田间试验与模拟[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(21): 66—73.
- Zhao Nana, Liu Yu, Cai Jiabing, et al. Research on soil evaporation of summer maize by field measurement and model simulation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(21):66—73. (in Chinese with English abstract)
- [9] Daamen C C, Simmonds L P, Sivakumar, M V K. The impact of sparse millet crops on evaporation from soil in semi-arid Niger[J]. *Agricultural Water Management*, 1995, 27(3): 225—242.

- [10] Ritchie J T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover[J]. *Water Resource Research*, 1972, 8(5): 1204—1213.
- [11] Wallace J S, Jackson, N A, Ong C K. Modelling soil evaporation in an agroforestry system in Kenya[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 94(3): 189—202.
- [12] Salado-Navarro L R, Sinclair, T R, Morandini M. Estimation of soil evaporation during fallow seasons to assess water balances for no-tillage crop rotations[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2013, 199(1): 57—65.
- [13] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I. Yield advantage and interspecific inter-actions on nutrients[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71(2): 123—137.
- [14] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or soybean strip intercropping. II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71(3): 173—181.
- [15] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Root distribution and interactions between intercropped species[J]. *Oecologia*, 2006, 147(2): 280—290.
- [16] 张礼军, 张恩和, 郭丽琢, 等. 水肥耦合对小麦/玉米系统根系分布及吸收活力的调控[J]. *草业学报*, 2005, 14(2): 102—108.
Zhang Lijun, Zhang Enhe, Guo Lizhuo, et al. Regulation of water fertilizer coupling on root distribution and absorbing ability in wheat/maize intercropping system[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(2): 102—108. (in Chinese with English abstract)
- [17] 高阳. 玉米/大豆条带间作群体 PAR 和水分的传输与利用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
Gao Yang. Transport and Use of PAR and Water in Maize/Soybean Strip Intercropping System[D]. Beijing: Chinese Agricultural Science Academy, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [18] Zhang L Z, Van Der Werf W, Bastiaans L, et al. Light interception and utilization in relay intercrops of wheat and cotton[J]. *Field Crops Research*, 2008, 107(1): 29—42.
- [19] 乔冬梅, 史海滨, 霍再林. 浅地下水埋深条件下土壤水盐动态 BP 网络模型研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(9): 42—46.
Qian Dongmei, Shi Haibin, Huo Zailin. BP network model for soil water-salt movement with a shallow groundwater table[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2005, 21(9): 42—46. (in Chinese with English abstract)
- [20] Monteith J L. Evaporation and environment[J]. *Symposium of the Society of Experimental Biology*, 1965, 19: 205—234.
- [21] Pronk A A, Goudriaan J, Stilma E, et al. A simple method to estimate radiation interception by nursery stock conifers: A case study of eastern white cedar[J]. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 2003, 51(3): 279—295.
- [22] Wallace J S, Batchelor C H, Dabeising D N, et al. A comparison of the light interception and water use of plant and first ratoon sugar cane intercropped with maize[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1991, 57(1): 85—105.
- [23] Tsubo M, Walker S. A model of radiation interception and use by a maize-bean intercrop canopy[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 110(3): 203—215.
- [24] Yang C H, Chai Q, Huang, G B. Root distribution and yield responses of wheat/maize intercropping to alternate irrigation in the arid areas of northwest China[J]. *Plant Soil Environment*, 2010, 56(6): 253—262.
- [25] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. *Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements*[M]. FAO Irrigation and Drainage Daper 56, United Nations FAO, Rome, Italy, 1998, 300.
- [26] Sepaskhah A R, Kanooni A, Ghasemi M M. Estimating water table contributions to corn and sorghum water use[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 58(1): 67—79.
- [27] Doorenbos J, Pruitt W O, Aboukhaled A, et al. *Crop Water Requirements*[M]. Irrigation and Drainage Paper 24, United Nations FAO, Rome, Italy, 1977, 179.
- [28] 齐万海. 绿洲灌区小麦间作玉米的耗水特性及其与根系时空分布的关系[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2009.
Qi Wanhai. Water Consumption Characteristics and Root Distribution of Wheat Corn Intercropping Systems in Oasis Area[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [29] Yang C H, Huang G B, Chai Q, et al. Water use and yield of wheat/maize intercropping under alternate irrigation in the Oasis field of northwest China[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124(3): 426—432.

Mathematical simulation of soil evaporation from wheat/maize intercropping field

Wang Zikui^{1,2}, Wu Pute^{1,2,3*}, Zhao Xining^{1,2,3}, Wang Yubao^{1,2}, Gao Ying^{2,3}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2 Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Soil evaporation is one of the most important components of crop field water balances, especially in arid and semiarid environments where soil evaporation can be prominent due to incomplete cover. Understanding and reducing this part of water consumption is important, since it can not be used by a crop. The effects of a crop and of crop management on this water loss from the soil have been estimated in the past using combinations of field measurement and simple models, but few works have been done for the wheat/maize intercropping system, which is a commonly practiced planting pattern in arid and semiarid areas of China due to its high productivity. The primary objects of this were to develop a mathematic model that was suitable for the intercropping system and then use this model for analyzing the soil evaporation from a wheat/maize intercropping field. The Ritchie model has been successfully applied to simulate soil evaporation from different kinds of sole crop fields. In this study, the Ritchie model and specific light transmission models were combined together to simulate the soil evaporation from an intercropping system. The performance of the models was evaluated with micro-lysimeter measured values. Soil evaporation data from two dry circles of bare soil after rain and irrigation were used to calculate the parameter α of the Ritchie model and a value of 4.62 was derived. The parameter U was set as 9 mm according to the soil hydraulic properties. Results showed that during the 2012 growing season, the estimated soil evaporation with the new model showed almost the same trend as the measured values, and they had a correlation coefficient of 0.705 with the measured ones. During the 88 days that had measured soil evaporation, the total measured value was 107.2 mm, while the total simulated value was 100.5 mm, which revealed that the models only underestimated the measured values by 6.7%. The root mean square error and mean absolute error of the modeled values from the measured ones were 0.447 mm/d and 0.331 mm/d respectively. If the original Ritchie model was used, the root mean square error and mean absolute error of the modeled values from the measured ones would be 0.537 mm/d and 0.418 mm/d, which were 16.8% and 20.8% higher than the refined model. During the 2013 growing season, the total measured value was 83.1 mm, while the total simulated value was 73.7 mm, which revealed that the models underestimated the measured values by 11.3%. The root mean square error and mean absolute error of the modeled values from the measured ones were 0.465 mm/d and 0.333 mm/d, which are slightly higher than that of 2012. These results demonstrated the superiority of the model developed here. Analysis of the soil root zone water balance showed that total actual evapotranspiration of the intercropping system was 485.9 mm. The soil evaporation calculated from the new model throughout the growing season was 199.7 mm, which accounted for as much as 41.1% of the actual evapotranspiration across the whole intercropping season. This value was very significant and could cause a large waste of water. The results of this study implied that some evaporation reducing actions should be applied to improve water use efficiency of this intercropping system. The results of this paper will provide some theoretical basis for the water management of a wheat/maize intercropping field and the methods provided here can also be applied to other intercropping systems.

Key words: crops, soils, evaporation, wheat/maize intercropping, Ritchie model, Hetao irrigation district

(责任编辑: 张俊芳)