

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.023

不均匀下垫面的地面光温模拟研究*

李彩霞 周新国 孙景生 李新强

(中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002)

摘要: 为了量化不均匀下垫面的地面光温分布,在作物生长条件下研究交替隔沟灌溉和常规沟灌在不同近地面环境下的地面光温分布规律,根据地表结构与太阳入射光线的物理几何关系,建立了地面光温传输模型,模拟地面不同点位处的太阳辐射和温度变化。结果表明,交替隔沟灌溉在非湿润点的地面太阳辐射量和地表温度高于湿润点,这种差异随玉米不同生长阶段而改变;在同一时间,交替隔沟灌溉的地面平均辐射量高于常规沟灌 18.64 ~ 30.60 W/m²,地表温度高于常规沟灌 0.38 ~ 3.00℃。不同沟灌方式下地面不同点位处的太阳辐射模拟结果与实测值间绝对偏差为 0.23 ~ 24.89 W/m²,模拟偏差(MAE)为 3.36 ~ 13.79,标准差(RMSE)为 4.90 ~ 13.51,拟合度 d_i 为 0.93 ~ 0.99;地表温度模拟结果与实测值间绝对偏差为 0.1 ~ 1.7℃,MAE 为 0.07 ~ 1.11, RMSE 为 0.16 ~ 0.93,拟合度 d_i 在 0.94 以上。所建光温传输模型较好地模拟了沟垄表面的太阳辐射和温度变化。

关键词: 不均匀下垫面 隔沟交替灌溉 沟灌 太阳辐射 地表温度

中图分类号: S275.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0140-08

Light and Temperature Distribution Simulation of Heterogeneous Underlying Surface

Li Caixia Zhou Xinguo Sun Jingsheng Li Xinqiang

(Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

Abstract: In order to quantify ground temperature and light distribution under furrow irrigation, a model of ground temperature and light transmission was developed, and changes of ground solar radiation and temperature in different positions of maize field with furrow irrigation were simulated. The model was based on the geometrical-physical relationship between ground surface structure and incident light, taking crops coverage into account under alternate furrow irrigation and conventional furrow irrigation. The results showed that the surface solar radiation and surface temperature at dry sites was higher than that at wet sites, and the difference changed among maize growing stage. At the same time, mean value of the surface solar radiation under alternative furrow irrigation was higher than that under conventional furrow irrigation by 18.64 ~ 30.60 W/m², difference in the surface temperature was 0.38 ~ 3.00℃. the absolute deviation between the simulated and measured values of solar radiation in different sits of soil surface under different furrow irrigation methods was 0.23 ~ 24.89 W/m², the MAE 3.36 ~ 13.79, the RMSE 4.90 ~ 13.51, the d_i 0.93 ~ 0.99; the absolute deviation between the simulated and measured values of soil temperature of soil surface was 0.1 ~ 1.7℃, the MAE 0.07 ~ 1.11, the RMSE 0.16 ~ 0.93, the d_i greater than 0.94. Therefore, changes of solar radiation and soil temperature in soil surface of furrow and ridge could be simulated by the model of ground temperature and light distribution with reasonable accuracy.

Key words: Inhomogeneous underlying surface Alternate furrow irrigation Furrow irrigation Solar radiation Soil surface temperature

收稿日期: 2012-12-18 修回日期: 2013-01-06

* 国家自然科学基金资助项目(51009139)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100502)

作者简介: 李彩霞,助理研究员,主要从事作物高效用水与节水理论研究,E-mail: ll.ccx@163.com

通讯作者: 孙景生,研究员,博士生导师,主要从事非充分灌溉原理与新技术研究,E-mail: jshsun@yeah.net

引言

随着人们对气候变化关注度的日益提高,地面光热研究受到重视。气候变化引起土壤热能的变化,随之引起土壤养分分解、微生物活性、土壤碳呼吸等一系列问题^[1-4]。土壤光热改变土壤化学性质的同时,也影响到土壤物理过程,主要表现在土壤-植物-大气体系内的水气运移,温度梯度是水气运动的主要推动力,随土温升高土壤吸水力线性降低,而在同一土壤水分条件下,土壤持水量随温度升高而降低;土温升高还可使植物叶水势、空气中水气分子密度增大,从而导致大气水势的降低^[5]。在干旱半干旱及沙化地区,土壤表面温度存在季节性和昼夜性频繁大幅变化,直接影响土壤水的蒸发与入渗过程,最终影响作物的生长,同时干燥地面对光照的接受与反射也不同于湿润地面。因此,地面光温与土壤水分运移是两个相互作用的过程,同时影响植物生长。在田间尺度,地面光热不仅受土壤水分的影响,还取决于地面结构。Shaw 等研究发现,对于地面起伏波动的沟灌裸地,在一天中随着太阳入射角度的不同,沟底、垄顶和坡面处所接受的光热也不同^[6]。然而,无论地面结构还是光照,都有规律可循,根据地面结构与太阳入射角度的光学几何原理,能够将地面光温分布量化。

本文研究交替隔沟灌溉与常规沟灌方式下垄作玉米田的地面光温分布模型,以期从几何结构、物理光学角度将沟灌不均匀湿润方式下地面光温分布定

量化,揭示不均匀下垫面的干燥与湿润交替地面的光温分布。

1 材料与方法

1.1 试验区概况及试验设计

试验于 2009 ~ 2010 年在中国农业科学院农田灌溉研究所的作物需水量试验场进行(N 35°19', E 113°53', 海拔 73.2 m)。试验场多年平均气温 14.1℃,无霜期 210 d,日照时数 2398.8 h。土壤类型为黄潮土,田间持水率 24.0% (质量含水率),凋萎含水率 8% (质量含水率)。

试验设置交替隔沟灌溉和常规沟灌两个处理,灌水下限为 75% 田间持水率,每个处理设 3 个重复小区,小区面积 100 m²。种植作物为玉米(品种浚单 18),播种日期分别为 2009 年 4 月 21 日、2010 年 4 月 22 日,种植密度为 41 668.8 株/hm²。收获日期分别为 2009 年 8 月 14 日、2010 年 8 月 26 日。播种前施复合肥(N、P₂O₅、K₂O 质量分数各为 15%) 675 kg/hm²,拔节期追施尿素(N 质量分数 46%) 300 kg/hm²。试验期间及时修整沟垄形状,减小沟垄结构受降雨的冲刷影响。

1.2 试验测定

由于交替隔沟灌溉与常规沟灌在不同点位处的土壤温湿环境不同,选取不同点位观测地面太阳辐射量和地温,交替隔沟灌溉观测点选在湿沟、湿坡、垄、干坡和干沟,常规沟灌观测点选在沟、坡和垄,如图 1 所示。

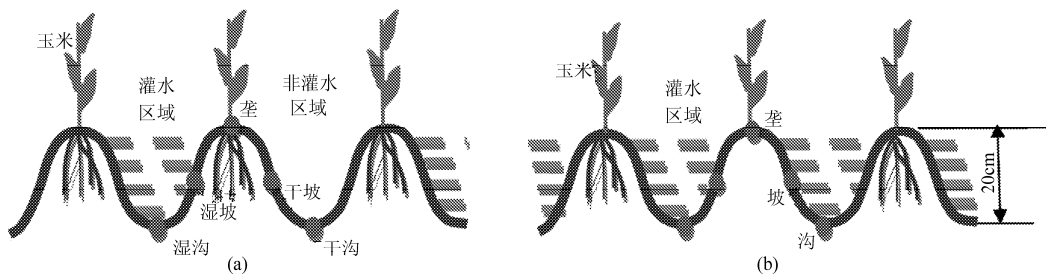


图 1 地表结构与灌溉方式示意图

Fig. 1 Ground surface structure and wetting method

(a) 交替隔沟灌溉 (b) 常规沟灌

地面太阳总辐射采用 LI-190SB 型光量子传感器(Li-Cor Inc., USA)测定,以 2 h 为间隔;由 PC-2-T1 型太阳辐射监测系统测定冠层上方太阳总辐射(波长范围 280 ~ 3 000 nm)和净辐射(波长范围 280 ~ 50 000 nm),在试验期间连续监测瞬时值和小时值。地表温度由直管地温表测定,距地表 5 cm 地温由曲管温度计测定,在玉米每个生育阶段连续 3 d 测定日变化。

2 模型建立

2.1 地面辐射传输模型的建立

沟垄结构的平面及剖面坐标近似为余弦函数(图 2、3),其边界形状函数为

$$z = H \cos(\pi x / W) \quad (1)$$

式中 H ——垄高 W ——沟宽或垄宽

(x, z) ——沟垄地表的边界形状曲线坐标

图 2 中, α 为太阳方位角(向东为正,向西为

负); β 为坡面方位角(向东为正,向西为负)。图3中, γ 为坡面与水平面的倾角; η 为坡面法线与太阳光线之间的夹角,即天顶角; ϕ 为太阳高度角; $2W$ 表示两垄之间的距离。

在一天中的日出与日落期间,太阳使土壤垄-沟表面产生日晒与遮荫区域。根据土壤剖面结构与太阳光线($z = ax + b$)位置关系(图3),当太阳光线与坡面相切时,切点为 $A(x_1, z_1)$,则与另一个坡面的交点 $B(x_2, z_2)$ 为日晒与遮荫区的分界点。在沟垄

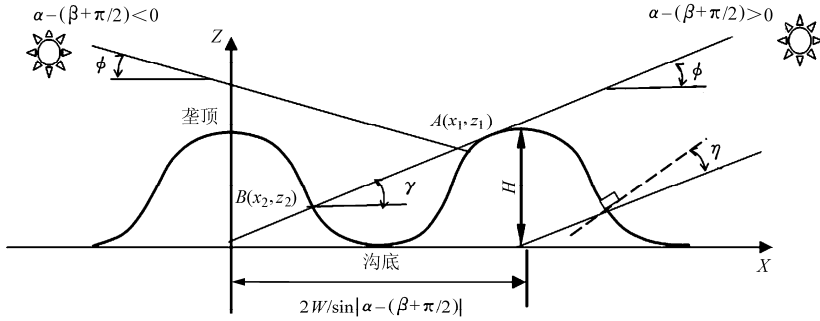


图3 沿地平线的截面图

Fig.3 Cross-section diagram of soil profile at horizontal direction

上的日晒区,当太阳光线 $z = ax + b$ 与沟的走向垂直时,可确定坡面倾角 γ ,此时的 γ 即为太阳高度角 ϕ ,即 $\tan\phi = -(\pi h/W) \sin(\pi x/W)$,而 $A(x_1, z_1)$ 应满足式(1),根据A点坐标,得到太阳光线方程

$$z_2 = z_1 + \tan\phi(x_2 - x_1) \quad (2)$$

同样,根据式(1),可求得日晒与遮荫区的分界点 $B(x_2, z_2)$ 。当太阳辐射光线不垂直于沟走向时,光线穿过的瞬时沟宽 $W(t) = W/\cos(\alpha - \beta)$,此时横坐标 $X' = x/\cos(\alpha - \beta)$ 。在应用式(1)时,直接用 $W(t)$ 、 X' 分别取代 W 和 X ,进而求得任一时刻边界函数坐标值。

地面接受的太阳总辐射(R_Q)由太阳散射辐射(R_d)和直接辐射(R_b)组成。在沟垄坡面上,假设散射短波辐射是不定向的, R_d 和 R_b 分别由Orgill等^[7]和Sharratt等^[8]方法确定。

$$R_d = \begin{cases} R_i(1 - 0.249K_T) & (K_T < 0.35) \\ R_i(1.557 - 1.84K_T) & (0.35 \leq K_T \leq 0.75) \\ 0.177R_i & (K_T > 0.75) \end{cases} \quad (3)$$

$$R_b = \cos\eta(R_i - R_d)/\sin\phi \quad (4)$$

其中 $K_T = R_i/R_0$ (5)

$$R_0 = S_{sc}E_0(\sin\delta\sin\xi + 0.997\cos\delta\cos\xi\cos(15(2\pi/360)(t_0 - t_n))) \quad (6)$$

$$\cos\eta = \cos\gamma_0\sin\phi + \sin\gamma_0\cos\phi\cos(\alpha - \beta) \quad (7)$$

$$\sin\phi = \sin\xi\sin\delta + \cos\xi\cos\delta\cos\omega \quad (8)$$

$$\omega = 2\pi(t_N + 12)/24 \quad (9)$$

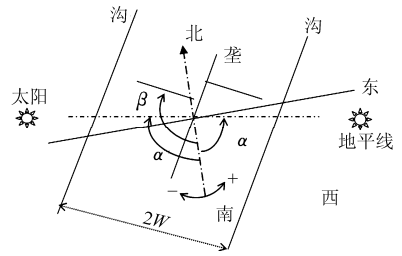


图2 沟垄走向与太阳辐射的顶视图
Fig.2 Orientation of furrow and vertical view of solar radiation

$$\sin\alpha = \cos\delta\cos\omega/\cos\phi \quad (10)$$

- 式中 R_i ——实测太阳总辐射, W/m^2
 K_T ——总透射比
 R_0 ——太阳总辐射的每小时均值, W/m^2 ^[9]
 S_{sc} ——太阳常数,取 $1367 W/m^2$
 E_0 ——地球轨道偏心率校正系数^[10]
 δ ——太阳赤纬角,由一年中的日序确定^[10]
 ξ ——纬度 t_0 ——时间, h
 t_n —— $\alpha = 0$ 时的地方标准时间
 ω ——时角 t_N ——太阳时间, h

则作物生长条件下地面任何一点的太阳总辐射为

$$R_Q(x, z, t) = \tau_p(R_d(x, z, t) + R_b(x, z, t)) \quad (0 \leq \tau_p \leq 1) \quad (11)$$

式中 τ_p ——太阳辐射冠层透过率,为实测天空反射率与冠层底部地面反射率比值, %

太阳辐射冠层透过率是地面光温分布模型中的重要参数。通过玉米苗期、抽穗期和成熟期的冠层顶部与底部的太阳辐射日变化分析表明,在玉米苗期,太阳辐射冠层透过率在80%以上;在玉米抽穗期, τ_p 在20%左右;而到玉米成熟期, τ_p 达到35%左右。在一天中, τ_p 随太阳辐射的增大而增大,天气比较晴朗时, τ_p 中午高,早晚低^[11]。通过交替隔沟灌溉与隔沟灌溉的日透过率比较,在玉米苗期无明显差异,在抽穗和成熟期交替隔沟灌溉分别高出常规沟灌15.62%和8.27%。太阳辐射冠层透过率与叶面积指数呈明显的指数关系,与时间 t 呈明显的二次曲线关系,则太阳辐射冠层透过

率可表示为

$$\tau_p = 188.4e^{-0.79R_L}(-312.8t^2 + 3 \times 10^7 t + 11) \quad (12)$$

则式(11)可表示为

$$R_Q(x, z, t) = 188.4e^{-0.79R_L}(-312.8t^2 + 3 \times 10^7 t + 11) \cdot (R_d(x, z, t) + R_b(x, z, t)) \quad (13)$$

式中 R_L ——叶面积指数

t ——时间, 24 小时制, 取 $7 < t \leq 18$

在一天中, 当沟垄表面坐标 (x, z) 满足 $|x_2| < |x| < |x_1|$ 时, 部分沟垄表面处于遮阴区(如图 3 中的 AB 以下区域), 此时式(11)中, $R_b = 0$ 。

2.2 地面温度分布模型

根据空气动力学原理和地面能量平衡

$$R_s - \lambda E_T - G - H_s = 0 \quad (14)$$

$$H_s = \rho_a C_p (T_s - T_c) / r_s \quad (15)$$

$$R_s = R_n e^{-kR_L} \quad (16)$$

$$\lambda E_T(x, z, t) = S_f C_w P_w + (1 - S_f) C_{nw} P_{nw} \quad (17)$$

将式(15)~(16)代入式(14)得到土壤表面温度传输模型

$$T_s(x, z, t) = \frac{r_s}{\rho_a C_p} [R_n e^{-kR_L} - S_f C_w P_w - (1 - S_f) C_{nw} P_{nw} - G] + T_c \quad (18)$$

其中 $k = -\ln \tau_p / R_L$ (19)

式中 $C_w P_w$ 、 $C_{nw} P_{nw}$ ——湿润区域和非湿润区域的土壤蒸发热通量^[11], MJ/(m²·d)

S_f ——湿润比例系数($0 < S_f < 1$), 其值由灌水后地面湿润部分面积与试验区总面积的比值确定^[11]

R_s ——地面太阳净辐射, W/m²

λ ——汽化潜热

E_T ——土壤蒸发量, mm/d

G ——实测土壤热通量, W/m²

H_s ——土壤面显热通量, W/m²

T_s ——土壤表面温度, °C

T_d ——距地表深度 z_d ($0 < z_d \leq 5$ cm) 处的土壤温度, 即 $(x, z - z_d)$ 处的地温, °C

ρ_a ——空气密度, 取 1.29 kg/m³

C_p ——空气比定压热容, 取 1 012 J/(kg·K)

T_c ——冠层温度, °C

r_s ——土壤与冠层之间的空气动力学阻力, s/m

R_n ——冠层上方的太阳净辐射, W/m²

k ——冠层消光系数

3 模型验证

地面太阳辐射日变化呈早晚低、中午高的变化趋势, 地面太阳辐射量峰值都出现在 12:00 左右。5 个观测时段交替隔沟灌溉在湿沟、湿坡、垄位、干坡和干沟的地面日均太阳辐射量分别为 174.04 ~ 602.41、201.46 ~ 596.52、226.53 ~ 622.62、185.40 ~ 668.26 和 221.45 ~ 604.60 W/m²。6 月 1 日 ~ 6 月 22 日, 干坡处的太阳辐射量最大; 6 月 30 日 ~ 7 月 26 日, 垄处的太阳辐射量最大; 在 8 月 13 日, 干沟处的太阳辐射量最大(图 4)。因此, 土壤含水率差异引起了地面太阳辐射差异, 非湿润点的地面太阳辐射量高于湿润点, 这种差异随不同玉米生长期而改变。在同一时间, 交替隔沟灌溉的地面平均辐射量高于常规沟灌, 二者日均差值为 18.64 ~ 30.60 W/m²。

由式(11)模拟两种沟灌方式下垄、坡面和沟 3 个位置的地面太阳辐射和地表温度 8:00 ~ 18:00 的日变化, 时间步长为 2 h(图 4)。图 4a ~ 4e 是交替隔沟灌溉, 图 4f ~ 4h 是常规沟灌。交替隔沟灌溉方式下地面太阳总辐射模拟结果与实测值间绝对误差: 湿沟 1.26 ~ 24.23 W/m²、湿坡 0.76 ~ 23.00 W/m²、垄位 2.03 ~ 24.54 W/m²、干坡 1.61 ~ 24.30 W/m²、干沟 2.89 ~ 24.89 W/m², 各点位处二者相对误差小于 11.74%; 模拟结果与实测值间模拟偏差(MAE)为 4.41 ~ 12.07, 标准差(RMSE)为 5.12 ~ 12.28, $d_i = 0.89 \sim 0.97$; 常规沟灌方式下地面太阳辐射模拟结果与实测值间的绝对误差为: 沟位 0.23 ~ 6.99 W/m²、坡位 3.78 ~ 13.42 W/m²、垄位 3.55 ~ 12.66 W/m²; 模拟结果与实测值间 MAE 为 3.36 ~ 13.79, RMSE 为 4.90 ~ 13.51, d_i 为 0.93 ~ 0.99。

地表温度日变化同太阳辐射量变化趋势非常一致, 为单峰型曲线, 地表温度日变化峰值出现在 12:00 ~ 14:00。共观测了 15 d 地表温度日变化, 包含 5 个时间段的连续 3 d 数据, 在玉米拔节期(6 月 30 日)之前, 地表温度的点位差异较大, 地表温度高于后期。交替隔沟灌溉在湿沟、湿坡、垄位、干坡和干沟处的日均地表温度分别为 22.99 ~ 33.59、23.49 ~ 34.80、23.67 ~ 34.54、23.51 ~ 33.99 和 23.51 ~ 33.99 °C。常规沟灌在沟位、坡位和垄位的日均地温分别为 22.71 ~ 32.86、23.23 ~ 32.71 和 22.90 ~ 33.63 °C。在同一时间, 交替隔沟灌溉的日均地表温度高于常规沟灌 0.38 ~ 3.00 °C。

由式(18)模拟两种沟灌方式下垄、坡面和沟 3 个位置的地表温度 8:00 ~ 20:00 的日变化, 对玉米生长期每个阶段进行了连续 3 d 的地表温度模拟, 截取 7 月 22 日 ~ 7 月 24 日的模拟结果(图 5)。

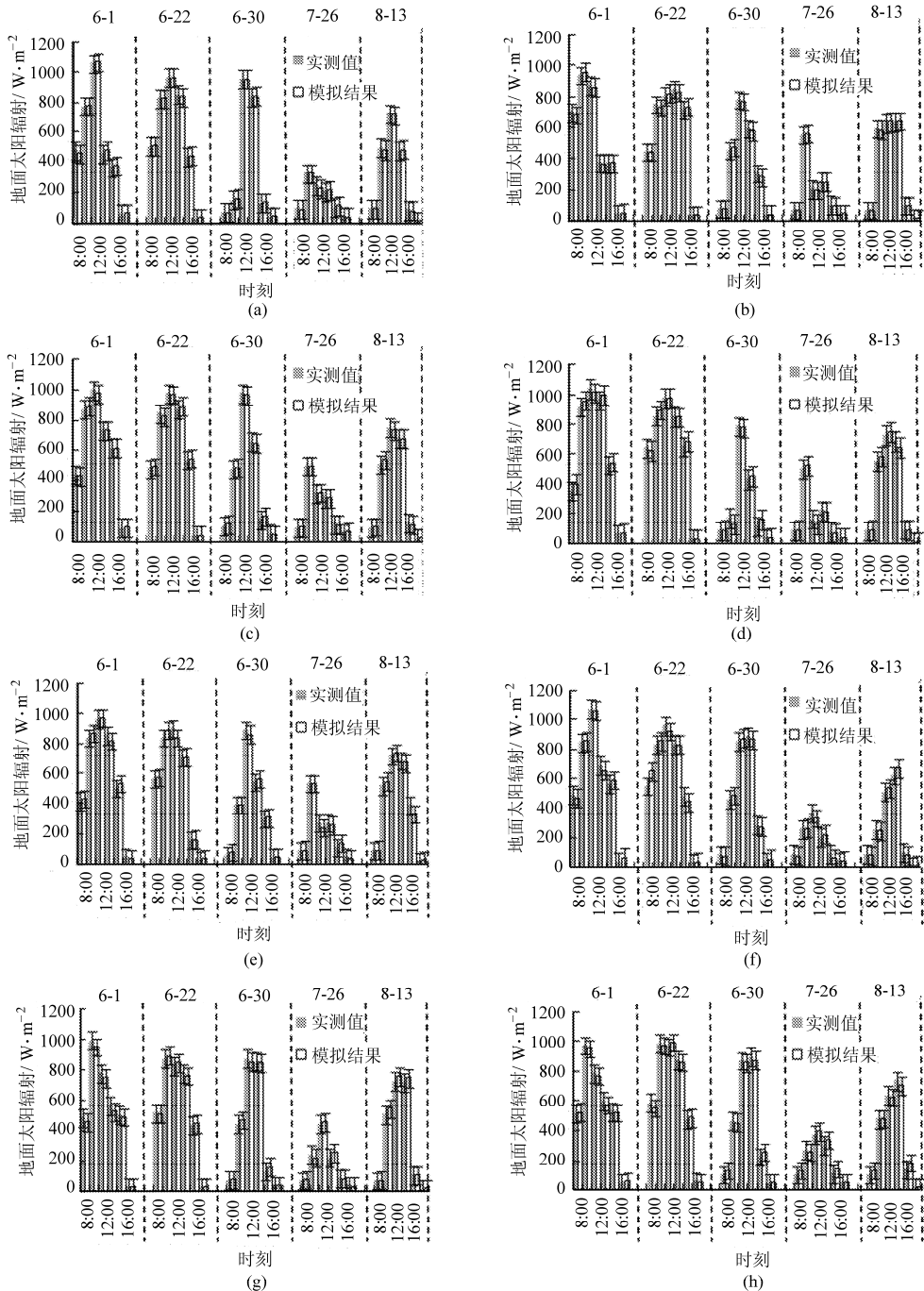


图4 玉米不同生长阶段在地面不同点位处的太阳辐射模拟结果

Fig.4 Simulated results of different positions ground solar radiation in different growth stages of maize

(a) 湿沟 (b) 湿坡 (c) 垄 (d) 干坡 (e) 干沟 (f) 沟 (g) 坡 (h) 垄

图5a~5e是交替隔沟灌溉,图5f~5h是常规沟灌。由图5可知,土壤温度模拟结果与实测值吻合较好,交替隔沟灌溉方式下土壤温度模拟结果与实测值间的绝对误差为:湿沟0.2~1.7℃、湿坡0.1~1.5℃、垄0.1~1.3℃、干坡0~1℃、干沟0~1.3℃,各点位处模拟结果与实测值间的相对误差低于5%;模拟结果与实测值间的偏差MAE为0.10~0.99、标准差RMSE为0.08~1.34。常规沟灌土壤温度模拟结果与实测值间的绝对误差为:0~0.8、0~1.5、0~1.3℃;模拟结果与实测值间的MAE为0.07~1.11、RMSE为0.16~0.93。拟合

度 d_i 在0.94以上。模拟精度较高。

从灌水方式来看,交替隔沟灌溉的平均地表温度高于常规沟灌约1.08℃,其中沟中地表温度平均高于常规沟灌3.91℃左右,交替隔沟灌溉的地温虽然较高,但土壤蒸发损失远小于常规沟灌^[11],从田间水分利用率角度考虑,交替隔沟灌溉优于常规沟灌。通过模拟偏差MAE、标准差RMSE和模型拟合度 d_i 3个指标来评价地面光温传输模型的模拟结果(表1)。由表1可知,交替隔沟灌溉方式下地面太阳辐射模型在不同点位处的MAE为4.41~14.62,

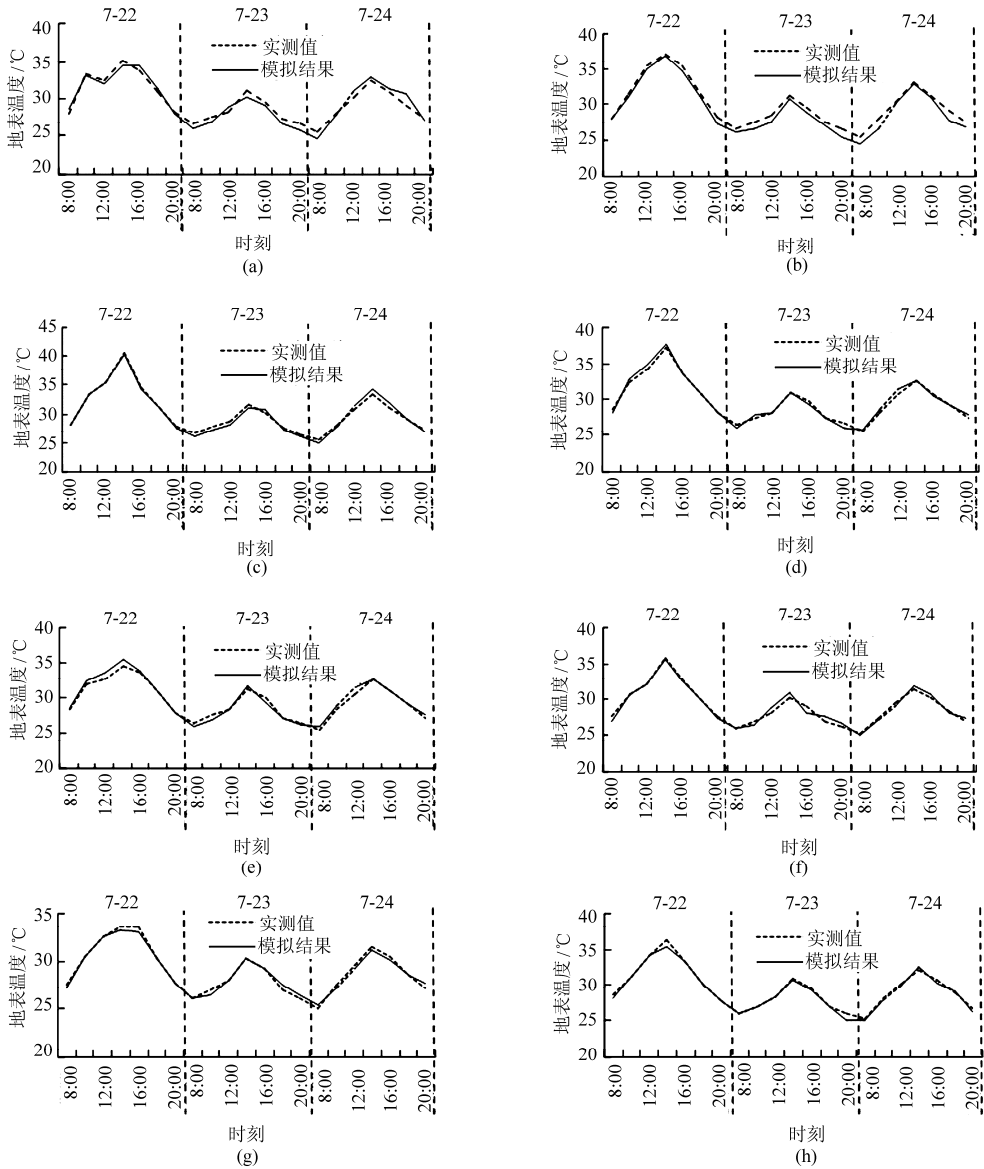


图 5 两种沟灌方式下不同点位处地表温度模拟结果

Fig.5 Simulated results of ground temperature in different positions under two ways of furrow irrigation

(a) 湿沟 (b) 湿坡 (c) 垄 (d) 干坡 (e) 干沟 (f) 沟 (g) 坡 (h) 垄

表 1 地面光温分布模型在不同点位处模拟结果与实测值间的 MAE、RMSE 和 d_i

Tab.1 MAE, RMSE and d_i of simulated and measured in different positions ground temperature and light transmission model

测定项目	位置	交替隔沟灌溉			位置	常规沟灌		
		MAE	RMSE	d_i		MAE	RMSE	d_i
地面太阳辐射	湿沟	5.24 ~ 10.54	6.72 ~ 12.28	0.88	沟	7.70 ~ 14.61	9.31 ~ 13.51	0.88
	湿坡	4.57 ~ 12.07	5.12 ~ 14.62	0.86	坡	3.36 ~ 14.49	4.90 ~ 15.14	0.86
	垄	4.41 ~ 13.41	5.19 ~ 14.70	0.85	垄	4.82 ~ 13.79	5.55 ~ 14.49	0.87
	干坡	11.61 ~ 14.62	5.25 ~ 13.25	0.90				
	干沟	14.24 ~ 14.11	7.10 ~ 12.35	0.84				
地温	湿沟	0.40 ~ 0.99	0.43 ~ 1.09	0.90	沟	0.07 ~ 0.34	0.16 ~ 0.46	0.97
	湿坡	0.41 ~ 0.76	0.44 ~ 0.90	0.98	坡	0.09 ~ 1.11	0.17 ~ 0.93	0.98
	垄	0.10 ~ 0.59	0.14 ~ 0.69	0.94	垄	0.07 ~ 0.42	0.19 ~ 0.67	0.95
	干坡	0.20 ~ 0.62	0.08 ~ 0.75	0.99				
	干沟	0.23 ~ 0.94	0.38 ~ 1.34	0.91				

RMSE 为 5.12 ~ 14.70, d_i 为 0.84 ~ 0.90; 常规沟灌在不同点位处的模拟结果与实测值间 MAE 为 3.36 ~ 14.49, RMSE 为 4.90 ~ 14.49, d_i 为 0.86 ~ 0.88。交替隔沟灌溉方式下地表温度模型在不同点位处的 MAE 为 0.10 ~ 0.99, RMSE 为 0.08 ~ 1.34, d_i 为 0.90 ~ 0.99; 常规沟灌在不同点位处的地表温度模拟结果与实测值间 MAE 为 0.07 ~ 1.11, RMSE 为 0.16 ~ 0.93, d_i 为 0.95 ~ 0.98。

地表太阳辐射和地表温度的模拟结果与实测值间有较好的相关性, 交替隔沟灌溉方式下地表土壤温度模拟结果与实测值间的相关性决定系数为 0.939, 地面太阳辐射的模拟结果与实测值间的相关性决定系数为 0.943 (图 6)。常规沟灌的地表土壤温度、地面太阳辐射的模拟结果与实测值间的相关性决定系数分别为 0.958 和 0.966。两种沟灌方式下, 地面太阳辐射和地表温度的模拟项与实测值间的相对误差为 2.31% ~ 8.96%, 都低于 9%。

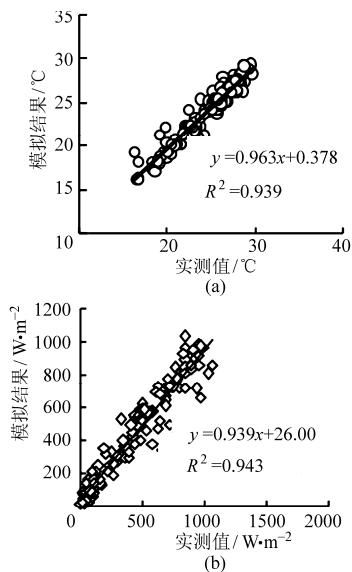


图 6 交替隔沟灌溉条件下地表太阳辐射、地温的模拟结果与实测值间相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of simulation results and measured with regard to surface solar radiation and ground temperature under alternate furrow irrigation

(a) 土温温度 (b) 太阳辐射

4 讨论

地表水热特征变化已成为地理、气象领域所共同关注的焦点问题^[12]。由于大气的多变性、多层性和复杂性, 使太阳辐射经过大气、植被到达地表的辐

射能量计算显得比较复杂^[13], 而植被下垫面与大气的相互作用影响着各种尺度的天气、气候变化, 在陆地相互作用中, 地面反照率、土壤温度和湿度等对大气环流和气候变化有重要影响^[14-15], 因此地表光、热和水特性构成了区域环境系统, 任一尺度下的地表光热有助于区域环境研究。覆盖条件下地表温度受近地面小气候的影响最大^[16], 近地面小气候的差异使得交替隔沟灌溉与常规沟灌存在不同的地表光热效应, 交替隔沟灌溉的地面未完全湿润, 不利于水气能量散失, 使地面增温较快, 交替隔沟灌溉在非灌水区域的土壤水气蒸发与扩散要突破较大的阻力, 同样不利于水气能量的传输与转换, 使地温高于灌水区域, 受冠层覆盖度的影响, 在玉米不同生长期地面不同点位处的光温差异也不同, 在 LAI 达到最大值之前, 交替隔沟灌溉在干沟处的光热量最大, 在 LAI 达到最大之后, 在垄顶的太阳辐射量最大^[11]。在田间条件下, 土壤表层光温存在显著的日变化和季节变化, 在地表能量平衡计算中忽略温度效应会给模拟结果带来很大的偏差^[17-20], 土壤热贮运同时影响土壤水分和溶质的迁移^[21], 准确模拟土壤的传热过程和地温变化规律, 对解决田间沟垄结构、温室工程建设等实际问题具有实用价值, 本文为地面光热研究提供了量化方法, 对人为干涉小气候环境、改善土壤热状况提供了理论依据^[22], 同时对土壤水动力学研究及能量平衡计算具有实际意义。

5 结论

(1) 所建地面光温分布模型考虑了太阳辐射角度与地表结构的方位关系、气象因素、土壤湿度和作物覆盖度因素, 模型的模拟结果与实测值较为一致, 地面太阳辐射模拟结果与实测值间的相对偏差低于 11.74%, 地面温度的模拟结果与实测值间相对偏差低于 5%, 拟合度都高于 0.84。

(2) 地表光温模拟中出现的误差源于模型中的各种参数输入, 如土壤、阻力和气象参数等都会对模拟结果产生影响。土壤阻力参数等的准确测量比较困难, 目前, 只根据与土壤水分相关的经验公式来确定, 未考虑土壤成分等的变化对其产生的影响; 不均匀下垫面的太阳辐射是在理想的余弦曲线条件下求取, 实际沟垄表面形状与理想曲线有一定差异, 另外, 地面的光温状态与栽培作物的品种、密度等相关, 所建模型的适用范围还需进一步研究与分析。

参 考 文 献

- Guntiñasm M E, Leirós M C, Trasar-Cepeda C, et al. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: a laboratory study[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 48: 73 ~ 80.
- Sierra J. Nitrogen mineralization and nitrification in a tropical soil: effects of fluctuating temperature conditions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1 219 ~ 1 226.

- 3 Karhu K, Fritze H, Tuomi M, et al. Temperature sensitivity of organic matter decomposition in two boreas forest soil profiles[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(1):72~82.
- 4 Peng S S, Piao S L, Wang T, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5):1 008~1 014.
- 5 张一平. 土壤水分热力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- 6 Shaw R H, Buchele W F. The effect of the shape of the soil surface profile on soil temperature and moisture[J]. *Iowa State College Journal Science*, 1957, 32: 95~104.
- 7 Orgill J F, Hollands K G T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface [J]. *Solar Energy*, 1977, 19(4): 357~359.
- 8 Sharratt B S, Schwarzer M J, Campbell G S, et al. Radiation balance of ridge-tillage with modeling strategies for slope and aspect in the subarctic [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 1 376~1 384.
- 9 Ipbal M. An introduction to solar radiation [M]. Toronto: Academic Press, 1983.
- 10 Spencer J W. Fourier series representation of the position of the sun [J]. *Search*, 1971, 2(5): 172.
- 11 李彩霞. 沟灌条件下 SPAC 系统水热传输模拟[D]. 新乡: 中国农业科学院农田灌溉研究所, 2011.
- 12 戚鹏程, 赵传燕, 冯兆东, 等. 干旱荒漠区土地利用变化对地表温度的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11):310~316.
Qi Pengcheng, Zhao Chuanyan, Feng Zhaodong, et al. Influence of land use change on land surface temperature in arid desert region[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11):310~316. (in Chinese)
- 13 段龙飞, 黄晓东, 王梦. 基于大气上界太阳辐射的地表温度估算[J]. *矿山测量*, 2011(2):64~67.
- 14 李崇银. 气候动力学引论[M]. 北京: 气象出版社, 1995.
- 15 杨新, 延军平. 陕甘宁地区气候暖干化趋势分析[J]. *干旱区研究*, 2002, 19(3): 67~70.
Yang Xin, Yan Junping. Analysys on the climatic warming-drying trend in the juncture of Shaaxi and Gansu provinces and Ningxia hui autonomous region[J]. *Arid Zone Research*, 2002, 19(3):67~70. (in Chinese)
- 16 刘明春, 李玲萍. 石羊河流域地表 0 cm 温度的长期变化[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(3):478~484.
Liu Mingchun, Li Lingping. Long-term change of ground temperature in the shiyang river basin[J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(3):478~484. (in Chinese)
- 17 Campbell G S, Jungbauer J D, Bidlake W R, et al. Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity[J]. *Soil Science*, 1994, 158(5): 307~313.
- 18 Hiraiwa Y, Kasubuchi T. Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature(5~75℃) [J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(2): 211~218.
- 19 陆森, 任图生. 不同温度下的土壤热导率模拟[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7):13~18.
Lu Sen, Ren Tusheng. Model for predicting soil thermal conductivity at various temperatures[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(7): 13~18. (in Chinese)
- 20 张鹏, 张宏升, 杜金林, 等. 科尔沁沙地地区地表温度的确定和分析[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2011, 47(4):655~663.
Zhang Peng, Zhang Hongsheng, Du Jinlin, et al. Analysis of the surface temperature over keerqin sand aera in inner Mongolia [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(4):655~663. (in Chinese)
- 21 袁巧霞. 温度和含水率对土壤比热容影响的神经网络预测[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(5):108~111.
Yuan Qiaoxia. Prediction for the effect of temperature and water content on the soil specific heat by BP neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(5):108~111. (in Chinese)
- 22 何芬, 马承伟, 周长吉, 等. 基于有限差分法的日光温室地温二维模拟[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(4):228~232.
He Fen, Ma Chengwei, Zhou Changji, et al. 2-D simulation of soil temperature in solar greenhouse based on finite difference method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(4):228~232. (in Chinese)

(上接第 173 页)

- 15 祝美云, 李梅, 梁丽松, 等. 西洋梨气调贮藏不同时间后货架期品质变化[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8):377~382.
Zhu Meiyun, Li Mei, Liang Lisong, et al. Quality changes in shelf-life of *Pyrus communis* L. after different CA storage period [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(8): 377~382. (in Chinese)
- 16 Thybo A K, Jespersen S N, Laerke P E, et al. Nondestructive detection of internal bruise and spraing disease symptoms in potatoes using magnetic resonance imaging[J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 2004, 22(9):1 311~1 317.
- 17 张德丰. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- 18 张建军, 张利, 穆海芳, 等. 基于改进粒子群优化 BP 网络的发动机故障诊断方法[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1): 198~203.
Zhang Jianjun, Zhang Li, Mu Haifang, et al. Improved BP-neural net work of the particle swarm optimization in the research on engine fault diagnosis [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(1):198~203. (in Chinese)
- 19 孙建平, 王逢瑚, 胡英成, 等. 基于遗传神经网络的农作物秸秆板材优化设计[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1):319~323.
Sun Jianping, Wang Fenghu, Hu Yingcheng, et al. Optimization design of panels made by crop straw based on genetic neural network [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 319~323. (in Chinese)