

基于 CERES-Rice 模型的覆膜旱作稻田增温效应模拟

马雯雯¹, 金欣欣¹, 石建初¹, 宁松瑞², 李 森¹, 陶玥玥¹, 张亚男¹, 左 强^{1*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘 要: 水稻覆膜旱作技术具有显著的节水、增温、防污和减排效应, 是节水稻作技术体系的重要措施之一, 将 CERES-Rice 模型用于覆膜旱作条件时, 必须首先解决覆膜增温效应的准确模拟问题。该文拟应用热量传输理论及目前旱地作物生产系统中采用的覆膜增温效应模拟方法, 来模拟水稻覆膜旱作生产体系中的增温效应, 从而为完善 CERES-Rice 模型并使其能用于覆膜旱作水稻的生长模拟奠定基础。参数调校与模型检验验证通过 2013、2014 年在湖北房县开展的 2 a 水稻覆膜旱作田间试验来进行, 共涉及淹水(对照)、覆膜湿润栽培和覆膜旱作共 3 个水分处理, 分别对 2 个生长季、2 个覆膜处理地表 5 cm 及地下 10、20 cm 处温度的变化过程进行了模拟, 结果表明: 经过参数调校后, 所建立的覆膜增温模型可较好地模拟覆膜稻田地表和剖面上土壤温度的变化规律, 地表 5 cm 处土壤温度模拟值与实测值的均方根差、相对均方根差分别低于 1.8℃和 10%, 相关系数在 0.89 以上 ($P < 0.01$); 尽管地下 10、20 cm 处的模拟误差稍大, 也基本可满足要求, 相应的均方根误差 $< 3.2^\circ\text{C}$, 相对均方根差 $< 15\%$, 相关系数 > 0.65 ($P < 0.01$)。

关键词: 模型; 土壤; 覆膜; 水稻覆膜旱作; 增温效应; 模拟; CERES-Rice

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.033

中图分类号: Q178.51⁺6; TU205

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-09-0215-08

马雯雯, 金欣欣, 石建初, 等. 基于 CERES-Rice 模型的覆膜旱作稻田增温效应模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 215—222.

Ma Wenwen, Jin Xinxin, Shi Jianchu, et al. Modeling increasing effect of soil temperature through plastic film mulch in ground cover rice production system using CERES-Rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 215—222. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

水稻是主要粮食作物之一, 全世界 50%以上的人口以水稻为生。2013 年中国水稻种植面积和单位面积产量分别占全世界的 19%和 149%^[1], 确保水稻生产对保障中国粮食安全具有十分重要的意义。近年来, 由于农业灌溉用水紧缺, 为了应对和解决传统水稻生产耗水量巨大及其他相关的环境问题, 国际水稻研究所(International Rice Research Institute, IRRI)提出了节水稻作(water-saving rice production)的理念, 对水稻的各种节水栽培模式和技术体系进行了系统的分析和总结^[2], 水稻覆膜旱作是其中的重要措施之一。

水稻覆膜旱作生产体系是指在水稻全生育期内不建立水层, 地表覆盖厚度 5~7 μm 的塑料薄膜, 分蘖中期后保持根系层土壤处于非饱和状态, 进行水稻生产的技术^[3-4]。与传统的淹水种植体系相比, 覆膜旱作减少了地表蒸发和深层渗漏, 有效避免了地表径流的产生, 除可以节水外, 还可减少氮素损失, 降低对地表和地下水体

污染的风险, 提高水分和氮素的利用效率。此外, 在此条件下, 土壤通气、透水状况较好, 氧化还原电位较高, 可抑制还原过程的发生, 基本上不存在 CH_4 产生与释放的环境条件^[5]。由于其显著的节水、增温、防污和减排效应, 水稻覆膜旱作生产体系在中国北方稻作区和南方山丘稻作区有着十分广阔的应用前景。但由于该体系提出和产生的时间较短, 相关的机理与效应研究相对滞后, 从而限制了其在生产实践中的推广应用。

在评估不同水肥管理措施条件下的稻类作物生长情况及环境效应方面, 水稻生长模型起到了非常重要的作用, 如 DSSAT (decision support system for agrotechnology transfer) 决策支持系统中的 CERES (crop estimation through resource and environment synthesis) -Rice 模型在经历了数 10 a 的改良后, 在 DSSAT4.5 版本中已经相对成熟, 能较好地模拟分析众多影响因子(如天气、土壤、品种、水肥管理等)对水稻生长发育和产量的影响, 从而可以制定出适合当地条件的最佳决策, 已在世界各国获得广泛的成功应用^[6-7]。但其针对的研究对象均为传统的淹水水稻生产体系, 是否适用于覆膜旱作条件下的水稻生长模拟尚属未知, 显然, 覆膜增温效应是其中首先需要考虑和解决的问题之一。

尽管覆膜增温效应模拟在 CERES-Rice 模型中未涉及, 但相关研究在旱作生产体系中却并不鲜见, 已形成一些较为成熟、可靠的方法, 如 Han 等^[8]全面考虑空气、土壤和膜等因素的影响, 提出并建立了覆膜条件下表层土壤增温效应模拟模型, 并将模拟模块应用于 DNDC

收稿日期: 2015-03-05 修订日期: 2015-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51139006, 51321001)

作者简介: 马雯雯, 女, 山东德州人, 博士生, 主要从事覆膜旱作条件下的水稻生长过程模拟。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。

Email: ma20072613650@126.com

*通信作者: 左 强, 男, 湖北人, 教授, 主要从事土壤物理与节水农业机理研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。

Email: qiangzuo@cau.edu.cn

(denitrification–decomposition) 模型, 模拟结果表明表层土壤温度模拟值和实测值显著相关。

本文拟改进和完善 CERES-Rice 模型中的土壤温度模拟模块, 并利用改进后的 CERES-Rice 模型模拟水稻覆膜旱作生产体系中覆膜的增温效应, 通过田间试验来修正参数和验证模型, 为进一步应用改进后的 CERES-Rice 模型模拟覆膜旱作水稻生长奠定可靠的基础。

1 材料与方法

1.1 覆膜增温效应模拟

1.1.1 土壤表层温度

覆盖塑料薄膜后, 土壤表面和空气之间的热传递受阻, 土壤表层温度主要取决于无覆膜时的表层温度及覆膜后增加的热量、土壤热容量和表层土壤质量等因素^[8]:

$$T_{\text{film}} = T_{\text{old}} + \frac{dH}{c \times m_{\text{soil}}} \tag{1}$$

式中: T_{film} 为覆膜后表层土壤温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{old} 为无覆膜条件下的表层土壤温度, $^{\circ}\text{C}$; dH 为从土壤通过地膜到空气中的热流量, J ; c 为表层土壤的质量热容量, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; m_{soil} 为覆膜表层土壤的质量, kg 。

本文取表层土壤厚度为 5 cm 。式 (1) 中, m_{soil} 根据表层土壤容重、含水率等参数计算获得^[8]; c 通过土壤体热容量和其中组成物质 (矿物质、水) 的比热等参数获得^[9-10]; dH 与空气和土壤间的温度差、地膜厚度及其导热率^[11]有关, 其中空气和土壤间的温度差取决于日平均气温和最高气温^[8], 并受植物残余或秸秆还田等因子 (导致有机质含量的变化) 的影响^[12]。

1.1.2 土壤剖面温度

除土壤表面温度外, 覆膜还将导致土壤剖面温度发生变化, 基于 EPIC (erosion-productivity impact calculator)

土壤温度模型, 计算剖面土壤日均温度变化如下^[13]:

$$T(Z_i, t) = \bar{T} + e^{ZD} \left[\frac{\text{AMP}}{2} \cos(\text{ALX} + \text{ZD}) + \text{DT} \right] \tag{2}$$

式中: Z_i 为第 i 层土壤中心至地表的埋深, cm ; t 为时间, d , 表示一年中自 1 月 1 日起的序数天数 (DOY, day of year); $T(Z_i, t)$ 为第 i 层土壤第 t 天日均土温, $^{\circ}\text{C}$; \bar{T} 为年均气温, $^{\circ}\text{C}$; ZD 为考虑土壤温度随深度衰减变化的因子, 根据剖面上各层土壤的容重、萎蔫含水率和实际含水率等参数计算获得; AMP 为日均气温年振幅, $^{\circ}\text{C}$; ALX 为计算当天理想土壤地表温度的因子, 由时间 t 和所处地理位置决定, 其中的理想土壤地表温度与 \bar{T} 、 AMP 等因子有关; DT 为随时间变化的实际地表温度矫正因子, $^{\circ}\text{C}$, 采用经验公式通过实际土壤地表温度、日均气温和当天理想土壤地表温度等变量估算^[13]。

1.2 田间试验

1.2.1 试验地点概况

田间试验在湖北省十堰市房县红塔乡况营村境内的房县农业局苗木场 ($32^{\circ}7'\text{N}$ 、 $110^{\circ}42'\text{E}$, 海拔 450 m) 进行。当地属亚热带季风性湿润气候, 年均日照时数 $1\,700 \sim 2\,000\text{ h}$, 无霜期 $210 \sim 240\text{ d}$, 降水量 830 mm 以上, 雨日 $100 \sim 140\text{ d}$, 夏季平均气温大都高于 25°C 。由于地处丘陵山区, 春季“倒春寒”和夏季“卡脖子”成为影响农作物生长的主要灾害性天气^[14]。目前房县水稻种植主要包括传统淹水和覆膜旱作 2 种生产体系, 覆膜旱作因具有明显的节水、增温、保肥、增产以及提高出苗率和抑制杂草生长等优势, 在当地已获得大范围的推广应用^[15-16]。

试验区 $0 \sim 60\text{ cm}$ 土壤剖面大致可分为 3 层, 各层质地与基本理化性质如表 1 所示。水稻生长季内地下水埋深变化基本介于 $>20 \sim 70\text{ cm}$ 之间。

表 1 土壤质地与基本理化性质
Table 1 Soil texture, physical and chemical properties

土层深度 Depth/cm	颗粒组成 Particle size distributions /%			$\rho_b/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	$\theta_f/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	$\theta_r/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	$K_s/(\text{cm}\cdot\text{d}^{-1})$	pH 值	SOM/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
	$<0.002\text{ mm}$	$\geq 0.002 \sim 0.05\text{ mm}$	$\geq 0.05 \sim 2\text{ mm}$							
0~20	19.77	59.98	20.25	1.36	0.464	0.409	0.076	6.92	6.2	13.9
>20~40	17.84	65.46	16.70	1.53	0.462	0.383	0.072	0.45	6.3	9.7
>40~60	16.93	64.46	18.61	1.52	0.483	0.381	0.090	0.44	6.5	5.6

注: ρ_b 为容重; θ_s 为饱和含水率; θ_f 为田间持水率; θ_r 为萎蔫含水率; K_s 为饱和导水率; SOM 为有机质含量; 下同。
Note: ρ_b is bulk density; θ_s is saturated water content; θ_f is field capacity; θ_r is wilting point water content; K_s is saturated hydraulic conductivity; and SOM is organic matter content; Same as below.

1.2.2 试验布置与处理

田间试验共设置 3 个水分处理, 分别记为 W1、W2 和 W3, 其含义分别如下:

W1 为水稻淹水种植, 全生育期内保持水层厚度 $1 \sim 5\text{ cm}$;

W2 为水稻覆膜种植, 全生育期内不建立水层, 根系层土壤保持饱和 (覆膜湿润栽培);

W3 为水稻覆膜种植, 全生育期内不建立水层, 根系层土壤前期保持饱和, 分蘖中期后保持在田间持水率 (据

最大扎根深度和表 1 中的参数 θ_f 确定) 的 $80\% \sim 100\%$ (覆膜旱作栽培)。

每个处理设 3 次重复, 共计 9 个小区, 小区 (田块) 长 10 m 、宽 9 m , 随机布置。为防止小区之间的侧渗影响, 试验开始前各小区四周均铺设深 80 cm 的防渗膜做防渗处理。如图 1 所示, 每个小区定植水稻 5 厢, 每厢 6 行, 厢宽 156 cm , 行距 26 cm , 株距 18 cm , 采用沟灌方式对水稻进行灌溉, 各小区厢间间距即为输水毛沟, 沟宽 15 cm 、深 15 cm , 每个小区均安装进水表和出水表, 用以记录灌溉水量及排出水量。

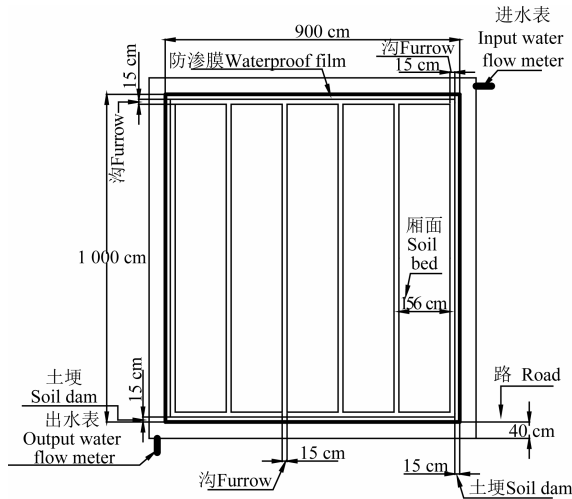


图1 试验小区平面图
Fig.1 Layout of experimental plot

2013—2014 年共开展了 2 季田间试验, 试验水稻品种为宜香 3728。2013 年 4 月 2 日育苗, 4 月 28 日开始移栽, 9 月 9 日收获, 生育期共 160 d。2014 年 4 月 5 日育苗, 4 月 29 日至 5 月 1 日移栽, 9 月 19 日收获, 生育期共 167 d。

1.2.3 测定项目与方法

1) 气象

试验小区东边安装有小型自动气象站 (WeatherHawk 500, Campbell Scientific, USA), 按 30 min 间隔自动记录太阳辐射量 (kJ/m^2)、降雨 (mm)、气温 ($^{\circ}\text{C}$, 最高、最低、平均) 等气象数据。

2) 土壤

各小区表层土壤温度采用温度球 (EBI-20T, Ebro Instruments, 德国) 每 1 h 自动测量 1 次, 埋深 5 cm, 剖面土壤温度采用多点温度自动测定系统 (CB0221, 北京思爱迪生态科学仪器有限公司) 每 1 h 自动测量 1 次, 温度探针的埋深分别为 10、20 cm, 忽略温度在水平方向上的差异。

覆膜处理 (W2、W3) 各小区剖面土壤含水率通过便携式土壤水分速测仪 (Diviner 2000, Sentek, 澳大利亚) 每 2 d 测量 1 次。水平方向上, W2 处理仅在厢面中心位置埋设 100 cm 长 Diviner 监测管 1 根; W3 处理从厢面中心到输水毛沟中心处等间距埋设 100 cm Diviner 监测管 3 根, 以监测剖面含水率的变化动态。垂直方向上, 每根管的测量深度均设定为地表下 10、20、30、40、50 和 60 cm。

田间持水率与水分特征曲线: 试验开始前每层土样取 3 个重复, 通过压力薄膜仪 (Soil Moisture Equipment Co., 美国) 测定土壤水分特征曲线。田间持水率 (θ_f) 取 -300 cm 基质势所对应的含水率^[17]。

表层土壤有机质、有机碳含量: 试验开始前各层土样取 3 个重复, 通过元素分析仪 (EA1108, Fisons, 意大利) 测量有机碳含量。按照土壤有机质含有约 58% (即 van Bemmelen 因数) 的有机碳, 计算土壤有机质含量^[18]。

3) 水、肥管理及作物生长

水稻自移栽 (2013 年 4 月 28 日、2014 年 4 月 29 日) 后即严格按处理设计进行水分管理, 具体灌溉控制如下: W1 处理从移栽到分蘖中期 (2013 年 5 月 27 日、2014 年 5 月 28 日) 保持田面水层深 1~2 cm, 分蘖中期到生理成熟期 (2013 年 8 月 19 日、2014 年 8 月 28 日) 2~5 cm; W2 处理从移栽到生理成熟期保持畦间沟内水深 10~15 cm; W3 处理从移栽到分蘖中期保持畦间沟内水深 10~15 cm, 分蘖中期到生理成熟期根据实测含水率和控制要求间歇灌溉。各处理晒田均在最大分蘖期后期进行, 生理成熟期至收获期 (2013 年 9 月 9 日、2014 年 9 月 19 日) 不实施灌溉。当降雨量较大, 超过控制标准 (田面、沟内水深分别设定为 2、1 cm) 时进行排水。每小区不同位置 (厢面、沟) 插入直尺 5 把, 每天定时 (08:00、18:00) 观测记录田面或沟内水深的动态变化。各小区的灌溉量和排水量均通过水表 (海泉 GB/T778-96, 宁波) 量测。

覆膜前对所有处理各小区施肥, 均为一次性基施。共施尿素 $320 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (总 N 质量 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$); 磷肥为过磷酸钙, 施用量为 $375 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (含 P_2O_5 约 $45 \text{ kg}/\text{hm}^2$); 钾肥为硫酸钾, 施用量为 $75 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (含 K_2O 约 $45 \text{ kg}/\text{hm}^2$)。

从移栽后第 10 天左右开始, 每 5 d 观察 1 次水稻的生长发育状况。

1.3 模拟结果检验标准

分别采用均方根差 (RMSE)、相对均方根差 (NRMSE) 以及相关系数 r 来检验模型的模拟效果^[19-20]。

2 结果与分析

2.1 气温、降水与土壤含水率

水稻从移栽 (2013 年 4 月 28 日、2014 年 4 月 29 日) 至收获期 (2013 年 9 月 9 日、2014 年 9 月 19 日) 日均降水和日均气温的变化情况如图 2 所示。每个生长季内的降水总量均在 600 mm 以上, 总体而言, 5、8 月较少, 6~7 月则较为集中。4 月底 5 月初日均气温相对较低, 最低至 12.4°C (2014 年 5 月 3 日), 6~7 月气温最高, 日均最高温达 29.4°C (2013 年 6 月 18 日)。当地呈现出典型的夏季炎热多雨的气候特点。就试验所涉及的 2 个生长季而言, 2013 年降水较多, 日均气温较高, 从而导致水稻生育期较短、收获较早。

水稻生长季内, 由于沟内始终保持 $>10\sim15 \text{ cm}$ 的水层, W2 处理仅 $0\sim20 \text{ cm}$ 土层的含水率有明显波动 (图 3a、3b); 其中 $0\sim10 \text{ cm}$ 土层的变化范围较大, 介于 $0.22\sim0.46 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 之间, $10\sim20 \text{ cm}$ 变化相对较小, 介于 $0.31\sim0.44 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 之间, 20 cm 以下土层的含水率则较为稳定、基本饱和。除晒田期 (2013 年 7 月 3~9 日、2014 年 7 月 16~23 日) 外, $0\sim40 \text{ cm}$ 土层的平均含水率总体在 $0.39\sim0.44 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 之间, 接近饱和。

自分蘖中期 (2013 年 5 月 27 日、2014 年 5 月 28 日) 开始水分处理后, 在每个灌水周期内, W3 处理的灌水沟都将经历从较高水位 ($10\sim15 \text{ cm}$) 逐渐衰减至 0 的过程, 从而使得距沟不同位置处呈现出不同的剖面含水率分布和变化规律, 因此, W3 处理的每个小区自厢面中心至灌

水沟中心均埋设 3 根 Diviner 监测管（依次标记为 W3-0、W3-1 和 W3-2），以监测含水率分布的变化规律。总体而言，3 个位置处的含水率在垂直方向上的变化规律大致相似：0~20 cm 变幅较大，20 cm 以下变化较小，W3-1 位置处的含水率基本介于 W3-0 与 W3-2 之间（与 3 个位

置处的平均值大致相近）。为节省篇幅，仅绘出 W3-1 位置各深度实测含水率的变化过程如图 3c、3b 所示。水稻生长季内（除晒田期外），2013 和 2014 年 W3 处理根层 0~40 cm 平均土壤含水率均变化于 0.24~0.42 cm³/cm³ 之间，多在 80% 田持以上。

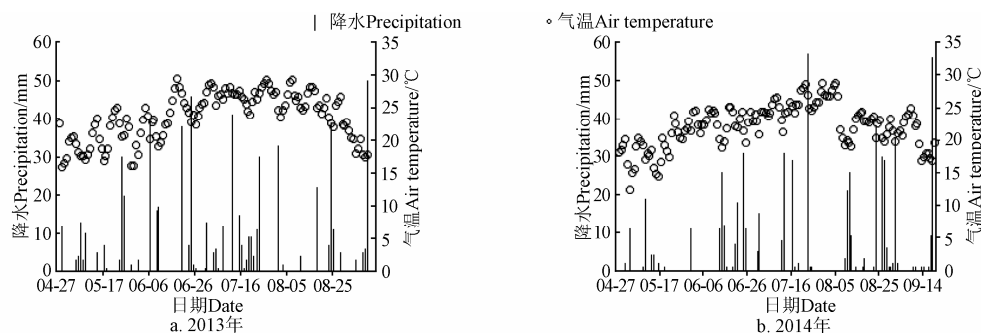
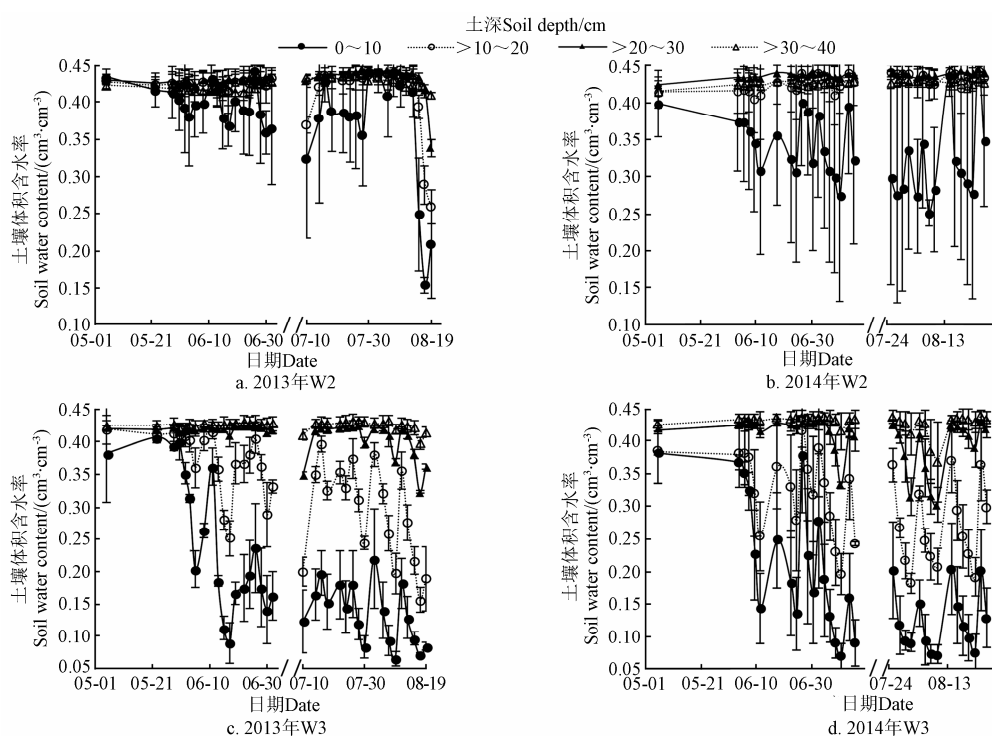


图 2 试验区 2013—2014 年水稻全生育期日均气温和日降水量的变化情况

Fig.2 Daily average air temperature and precipitation during two growth seasons of rice in 2013 and 2014



注：W2、W3 分别表示覆膜湿润和覆膜旱作栽培，下同。

Note: W2 and W3 are to keep saturated water content and 80%~100% field water content, respectively, in the root zone in ground cover rice production system (with plastic film mulching), same as below.

图 3 水稻生长季覆膜处理 0~40 cm 土壤各深度实测含水率的变化过程

Fig.3 Changing processes of measured soil water contents at different root-zone depths (0~40 cm) during two growth seasons of rice for mulching treatments

2.2 参数调校

由前述介绍可知，本文增温模型所用到的各类参数分别来源于实测（如容重、水分特征曲线、有机质含量等）、从文献中查阅的理论值（如比热、导热率等）和经验模型（如土壤理想温度、温度矫正因子、土温衰减因子等）等 3 类，其中与温度相关的参数（包括覆膜后土壤所能增到的最高温度 T_{adj} 、地表温度矫正因子 DT、表层土壤理想温度 TA、土温衰减因子 ZD 等）基本采用经验公式予以计算。

太阳辐射的作用使得土壤不断经历复杂的放热或吸热过程，从而导致产生土壤温度的变化^[21]，由于到达地面的太阳辐射具有区域性差异^[22]，因此覆膜后土壤所能增到的最高温度（ T_{adj} ，℃）也可能随地域差异而发生变化，且膜的厚度、透光程度也会影响 T_{adj} 。原土壤表层温度模拟模型中估算 T_{adj} 的经验公式如下^[8]：

$$T_{adj} = 0.5(T_{air} + T_{max}) \quad (3)$$

式中： T_{air} 、 T_{max} 分别表示日平均气温和最高气温，℃。式 (3) 难以反映上述区域性差异，应根据具体情况进行检验、

验证和适当调整。检验结果表明，采用原式估算 T_{adj} 时，整体低估表层土壤温度 $0.5\sim3^{\circ}\text{C}$ ，当将原式调整为：

$$T_{adj} = 0.5(T_{air} + T_{max}) + 2.0 \tag{4}$$

时，可获得较好的模拟效果，保证模拟值和实测值间的相对均方根差在 10% 以内。

此外，当采用式（2）（土壤剖面温度模拟模型）中的原地表温度矫正因子 DT 模拟 10、20 cm 处的土壤温度时，也出现了明显的低估、滞后现象，主要原因在于：在淹水或裸地情况下，原 DT 均依据土壤表面温度（ T_{surf} ， $^{\circ}\text{C}$ ），覆膜条件下 $T_{surf}=T_{film}$ ）与日均气温（ T_{air} ）基本相等计算获得^[13]：

$$DT = \frac{(5T_{air-1} - T_{air-4} + T_{surf-1})}{5} - TA(t) \tag{5}$$

式中： T_{air-1} 、 T_{air-4} 分别表示前 1 天和前 4 天的日均气温；相应地， T_{surf-1} 表示前 1 天的地表温度。覆膜后，土壤表面温度显然应高于日均气温，而原式根据前几天气温和前 1 天土壤表层温度计算 DT，从而导致低估、滞后现象，因此为了考虑覆膜产生的增温效应，经反复调试，将原式（5）调校为：

$$DT = \frac{(5T_{air} - T_{air-1} + T_{surf})}{5} - TA(t) \tag{6}$$

这样可以较好地模拟剖面土壤温度的变化规律，保

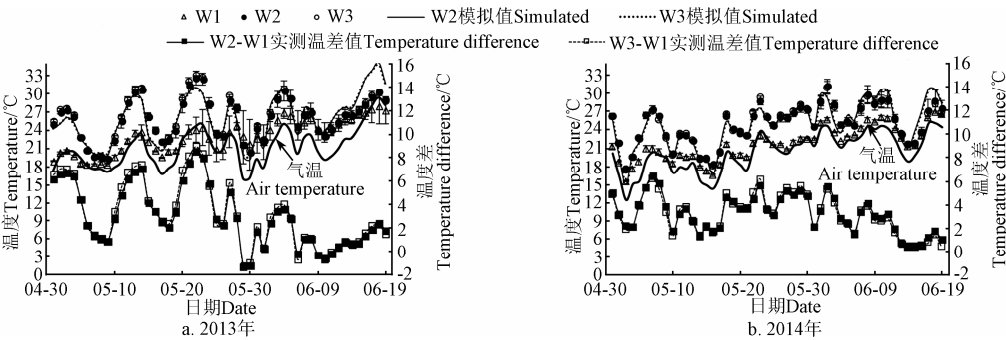


图 4 2013 和 2014 年水稻生长季不同处理 5 cm 处实测和模拟土壤温度
Fig.4 Measured and simulated soil temperatures at soil depth of 5 cm for different treatments

无论是 2013 年，还是 2014 年，覆膜处理（W2、W3）地表下 5 cm 处土壤温度的模拟值都较好地反映了实测值的变化过程（图 4，表 2），两者间的均方根差 RMSE 均在 1.8°C 以内，相对均方根差 NRMSE 均 $<10\%$ ，而相关系数 r 均在 0.89 以上，实测值和模拟值之间呈极显著的相关关系（ $P<0.01$ ）。一般认为，当 NRMSE $<10\%$ 时，模拟效果极好^[23]，因此，经过调校后的土壤表层温度模拟模型可以很好地用于当地覆膜旱作稻田表层土壤的增温效应模拟。

2.4 剖面土壤温度模拟

鉴于水分差异对 2 个覆膜处理（W2、W3）的土壤温度影响较小（图 4），以下仅以 W3 处理为例来分析土壤温度在剖面上的变化规律及覆膜的增温效应。另外，由于 30 cm 以下土层的温度变化较小^[24-25]，本文仅对地表下 10 和 20 cm 处的土壤温度进行模拟、分析。

证模拟值和实测值间的相对均方根差在 12% 以内。
除覆膜后土壤所能增到的最高温度 T_{adj} 和地表温度矫正因子 DT 外，其他相关参数或过程均按“1.1 覆膜增温效应模拟”一节中所介绍的方法进行估算。以上调参过程均依据 2013 年的实测数据进行，为节省篇幅和便于讨论，将 2013 年调参和 2014 年检验的模拟结果一并在以下两节展示，不再单独说明。

2.3 表层土壤温度模拟

覆膜增温效应主要体现在最大分蘖期之前，因此本文仅对水稻移栽到最大分蘖期（6 月 19 日）之间的温度数据进行对比分析。

2013、2014 年 W1、W2、W3 处理土壤 5 cm 处实测和模拟温度及 W2、W3 与 W1 处理间温度差（W2-W1 温差、W3-W1 温差）如图 4 所示。从实测值可以看出，3 个处理土壤 5 cm 处温度均高于气温且与日均气温的变化趋势基本一致；2 个覆膜处理（W2、W3）5 cm 处的土壤温度基本相同，几乎没受水分差异的影响；与淹水处理 W1 相比，覆膜后的增温效应十分明显，2013 年增温幅度达 $-1.31\sim8.97^{\circ}\text{C}$ ，2014 年在 $0.35\sim6.43^{\circ}\text{C}$ 之间，增温幅度较小甚至小幅降温现象的出现通常由降雨（如 2013 年 5 月 5—9 日、5 月 29 日、6 月 9—10 日，2014 年 5 月 9—10 日、5 月 13—14 日、6 月 12、19 日等）所导致。

表 2 2013—2014 年水稻生长季覆膜处理不同深度处土壤温度
Table 2 Root mean squared errors(RMSE), normalized root mean squared errors(NRMSE), and correlation coefficients(r) between measured and simulated soil temperatures at different depths for film mulched treatments in growth seasons of rice in 2013-2014

年份 Year	土层 深度 /cm	W2			W3		
		RMSE/ $^{\circ}\text{C}$	NRM- SE/%	r	RMSE/ $^{\circ}\text{C}$	NRMSE/ %	r
2013	5	1.72	6.65	0.90**	1.74	6.68	0.89**
	10	2.83	11.69	0.74**	2.93	11.94	0.72**
	20	2.79	11.68	0.76**	2.62	10.84	0.74**
2014	5	1.26	5.07	0.94**	1.28	5.15	0.94**
	10	2.18	9.49	0.83**	2.30	9.90	0.83**
	20	3.19	14.07	0.68**	2.28	10.05	0.82**

注：**极显著相关（ $P<0.01$ ）。
Note: ** Significantly correlated to each other ($P<0.01$).

与淹水处理（W1）相比，覆膜后无论是 10 cm 处（图 5a、5b）、还是 20 cm 处（图 5c、5d），增温效应

都十分明显,尤其是在水稻生长前期(6月前),其2013和2014年的最高增幅分别达6.5℃(5月20日)和5.2℃(5月7日),与图4所示5 cm处的温度变化规律类似,增温幅度较小甚至小幅降温现象的出现通常由降雨所导致。受气象、地表覆盖和土壤传热等因素的影响,

覆膜处理10和20 cm处的温度变化均较淹水处理剧烈,在2013—2014年的2个生长季内,从4月30日至6月19日,W3处理10和20 cm处的温度变化分别介于17.2~30.6、17.0~29.0℃之间,其中10 cm处的温度变幅更大。

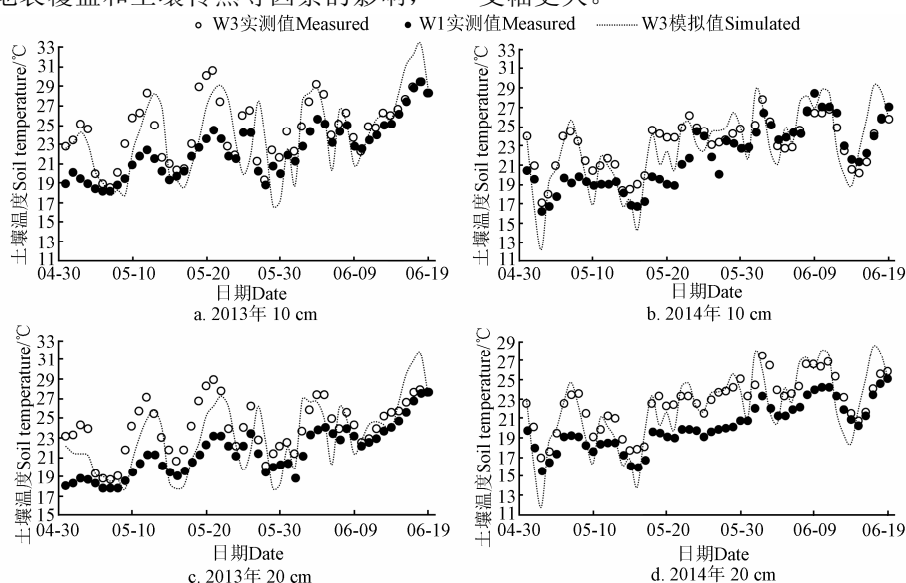


图5 水稻生长季淹水处理和覆膜处理实测和模拟土壤温度

Fig.5 Measured and simulated soil temperatures at depths of 10 and 20 cm for saturated water and mulching treatments during growing season of rice

2013、2014年2个覆膜处理(W2、W3)10 cm处土壤温度模拟值和实测值的变化趋势基本一致(表2,图5a~b),两者间的误差较为理想:RMSE在3.0℃以内,NRMSE在15%以内, r 在0.7以上。20 cm处的模拟结果也基本可满足要求(表2,图5c、5d):RMSE<3.2℃,NRMSE<15%, $r>0.65$ 。实测值和模拟值之间均呈极显著的相关关系($P<0.01$)。

与地表(5 cm处)温度的模拟结果相比,剖面(10和20 cm处)温度的模拟效果稍差,其主要原因可能在于剖面土壤质地分布的空间变异:土壤表面温度的模拟仅涉及表层土壤,尽管也存在一定的空间变异性,但相对较为均匀;而剖面土壤温度的模拟则涉及多层土壤(表1),其土温衰减因子需根据各层土壤的物理参数(容重、萎蔫含水率等)和实际含水率加权计算获得。显然,无论是土壤物理性质、还是土壤含水率,均存在着较强的空间变异性^[26-27],因此与表层土壤温度的模拟相比,剖面土壤温度的模拟存在着更大空间变异性的可能,涉及的土壤层次越多,则这种影响可能越大,所以,总体而言,本研究中20 cm处温度的模拟效果最差、10 cm处的次之、5 cm处的最好(表2)。尽管如此,本文不同土层深度的土壤剖面温度模拟值与实测值间的最大NRMSE也仅为14%左右。鉴于土壤的空间变异性广泛存在,采用NRMSE评价模拟效果时,通常可以遵循以下原则^[23]:当NRMSE≤10%时,模拟效果极好;10%<NRMSE≤20%,模拟效果较好;20%<NRMSE≤30%,模拟效果一般;当NRMSE>30%时,模拟效果较差。所以,本文的模拟结果均在效果较好的范畴之内,而且,

显著性检验结果也表明,实测值和模拟值之间呈极显著相关。

3 结论与讨论

借鉴现有的温度模拟研究成果,本文通过2013—2014年2a的水稻覆膜旱作田间试验,采用参数调校和模拟检验等方法,建立了覆膜旱作稻田表层(5 cm)及剖面(10、20 cm)土壤增温效应模拟模型,主要结果包括:

1) 经过参数调校和改进后的表层土壤(5 cm)增温效应模型可较好地模拟稻田覆膜后表层土壤温度的变化过程,模拟值与实测值间的均方根差(RMSE)和相对均方根差(NRMSE)分别在1.8℃和10%以内。

2) 经过参数调校和改进后的剖面土壤(10、20 cm)温度模拟模型也基本可较好地模拟稻田覆膜后剖面土壤温度的变化过程,10 cm处模拟值和实测值间的RMSE和NRMSE分别小于3.0℃和12%,20 cm处的RMSE和NRMSE分别小于3.2℃和15%。

所建立的覆膜增温效应模拟模型可用于分析覆膜稻田的能量传输规律及其对水稻生长的影响,为应用CERES-Rice模型模拟覆膜旱作条件下水稻的生长奠定了良好的基础。理论上讲,经过改进的温度模型应可客观地描述当地覆膜旱作稻田的增温效应,但由于客观条件的限制,本研究仅仅只设置了一处观测点,未来仍需在当地设置更多的观测点来对模型在区域上的模拟效果进行更为充分的检验验证。此外,关于覆膜增温效应对水稻生长及产量形成的影响、覆膜增温效应模型在CERES-Rice模型中的适应性及对覆膜旱作条件下水稻生

长模拟改善效果的评价等均有待于更进一步研究。

致谢: 感谢美国 Washington State University 的 Gerrit Hoogenboom 教授、西北农林科技大学何建强教授及美国 University of New Hampshire 邓佳博士在模型运用过程中所提出的良好意见和建议。

[参 考 文 献]

- [1] FAOSTAT. Compare Data [Z/OL]. 2014[2015-04-07]. <http://faostat3.fao.org/compare/E>.
- [2] 刘军, 刘美菊, 官玉范, 等. 水稻覆膜湿润栽培体系中的作物生长速率和氮素吸收速率[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(2): 9—17.
Liu Jun, Liu Meiju, Guan Yufan, et al. Grain yield and nitrogen uptake were affected by the Ground-Cover-Rice-Production-System with plastic film covering[J]. Journal of China Agricultural University, 2010, 15(2): 9—17. (in Chinese with English abstract)
- [3] 梁永超, 胡峰, 杨茂成, 等. 水稻覆膜旱作高产节水机理研究[J]. 中国农业科学, 1999, 32(1): 26—32.
Liang Yongchao, Hu Feng, Yang Maocheng, et al. Mechanisms of high yield and irrigation water use efficiency of rice in plastic film mulched dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1999, 32(1): 26—32. (in Chinese with English abstract)
- [4] 沈康荣, 汪晓春, 刘军, 等. 水稻全程地膜覆盖湿润栽培法增产因子及关键栽培技术的研究[J]. 华中农业大学学报, 1997, 16(6): 547—551.
Shen Kangrong, Wang Xianchun, Liu Jun, et al. Increasing factors of rice film-covering through growing season and its key cultural techniques[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 1997, 16(6): 547—551. (in Chinese with English abstract)
- [5] Kreye C, Dittert K, Zheng X H, et al. Fluxes of methane and nitrous oxide in water-saving rice production in north China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 77(3): 293—304.
- [6] 罗霄, 李忠武, 叶芳毅, 等. 水稻生长模型 CERES-Rice 的研究进展及展望[J]. 中国农业科技导报, 2009, 11(5): 54—59.
Luo Xiao, Li Zhongwi, Ye Fangyi, et al. Progress and prospects of studies on CERES-Rice models[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2009, 11(5): 54—59. (in Chinese with English abstract)
- [7] Mahmood R. Air temperature variations and rice productivity in Bangladesh: A comparative study of the performance of the YIELD and the CERES-Rice models[J]. Ecological modelling, 1998, 106(2): 201—212.
- [8] Han J, Jia Z, Wu W, et al. Modeling impacts of film mulching on rainfed crop yield in Northern China with DNDC[J]. Field Crops Research, 2014, 155(1): 202—212.
- [9] Campbell G S. Soil Physics with BASIC: Transport Models for Soil-plant Systems [M]. New York: Elsevier, 1985: 32.
- [10] 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 134.
- [11] 维基百科. 热导率[Z/OL]. 2009-07-20. <http://zh.wikipedia.org/wiki/热导率>.
- [12] Li C S. User's Guide for the DNDC Model (version 9.3)[M]. Report of the Institute, 2009: 7.
- [13] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modelling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(1): 129—144.
- [14] 中共房县县委房县人民政府. 房县城市介绍及气候背景[EB/OL]. 2010-06-12. <http://www.fangxian.gov.cn/html/mlfx/2010-06/408.html>.
- [15] 汪晓春, 刘军. 水稻地膜覆盖栽培地抗旱节水效应[J]. 湖北农业科学, 2001(1): 8—11.
Wang Xiaochun, Liu Jun. Effect of drought resistance and water save on rice by plastic mulching[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2001(1): 8—11. (in Chinese with English abstract)
- [16] 湖北省房县农业局. 红塔乡地膜水稻高产攻关示范生产总结 [EB/OL]. 2008-9-19. <http://www.fxagri.gov.cn/Sites/MainSite/Detail.aspx?StructID=2896>.
- [17] Romano N, Santini A. Water Retention and Storage. Field-field Water Capacity[M]// Dane J H, Topp G C. Methods of Soil Analysis, Part 4. SSSA Book Ser No 5. Madison, WI: SSSA, 2002: 723—729.
- [18] 陶贞, 高全洲, 谢美琪, 等. 水文过程对河流悬移质化学组成的影响: 以珠江流域为例[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 569—576.
Tao Zhen, Gao Quanzhou, Xie Meiqi, et al. Effect of hydrological processes on the chemical composition of riverine suspended sediment: A case study from the Zhujiang River, China[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2002, 33(6): 569—576. (in Chinese with English abstract)
- [19] Yang J Y, Huffman E C T. EasyGrapher: software for graphical and statistical validation of DSSAT outputs[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 45(1): 125—132.
- [20] Xiong W, Holman I, Conway D, et al. A crop model cross calibration for use in regional climate impacts studies[J]. Ecological Modelling, 2008, 213(3/4): 365—380.
- [21] 陈继康, 李素娟, 张宇, 等. 不同耕作方式麦田土壤温度及其对气温的响应特征—土壤温度日变化及其对气温的响应[J]. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2592—2600.
Chen Jikang, Li Sujuan, Zhang Yu, et al. Characteristics of soil temperature and response to air temperature under different tillage systems—diurnal dynamic of soil temperature and its response to air temperature[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(7): 2592—2600. (in Chinese with English abstract)
- [22] 查良松. 我国地面太阳辐射量的时空变化研究[J]. 地理科学, 1996, 16(3): 232—237.
Zha Liangsong. A study on spatial and temporal variation of solar radiation in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 1996, 16(3): 232—237. (in Chinese with English abstract)
- [23] Michele R, Nicola L, Zina F. Evaluation and application of the OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy[J]. Agricultural Systems, 2003, 78(1): 17—30.
- [24] 范爱武, 刘伟, 王崇琦. 不同环境条件下土壤温度日变化的计算模拟[J]. 太阳能学报, 2003, 24(2): 167—171.
Fan Aiwu, Liu Wei, Wang Chongqi. Simulation on the daily change of soil temperature under various environment

- conditions[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2003, 24(2): 167—171. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李毅, 王文焰, 门旗, 等. 宽地膜覆盖条件下土壤温度场特征[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(3): 32—36.
- Li Yi, Wang Wenyan, Men Qi, et al. Field characters of soil temperature under the wide plastic-mulch[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (Transactions of the CSAE), 2001, 17(3): 32—36. (in Chinese with English abstract)
- [26] 塔娜, 五十六, 马文娟, 等. 不同含水率下日光温室土壤温度变化规律的峰拟合法拟合[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 204—210.
- Ta Na, Wu Shiliu, Ma Wenjuan, et al. Peak-fitting based prediction of soil temperature according to soil moisture content in solar greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (Transactions of the CSAE), 2014, 30(20): 204—210. (in Chinese with English abstract)
- [27] 任图生, 邵明安, 巨兆强, 等. 利用热脉冲-时域反射技术测定土壤水热动态和物理参数 I[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2): 225—229.
- Ren Tusheng, Shao Mingan, Ju Zhaoqiang, et al. Measurement of soil physical properties with thermo-time domain reflectometry I. Theory[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 225—229. (in Chinese with English abstract)

Modeling increasing effect of soil temperature through plastic film mulch in ground cover rice production system using CERES-Rice

Ma Wenwen¹, Jin Xinxin¹, Shi Jianchu¹, Ning Songrui², Li Sen¹, Tao Yueyue¹, Zhang Ya'nan¹, Zuo Qiang^{1*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: As one of the most promising water-saving rice production technologies, the ground cover rice production system (GCRPS) has been found to save water application, increase soil temperature, and reduce nitrogen pollution and methane emission. However, the feasibility of CERES-Rice, a software package widely and successfully applied in the traditional paddy rice production system (TPRPS), for simulating the rice growth in the GCRPS still remains unknown and needs further research. Undoubtedly, it should be based on accurately quantifying the effect of soil temperature enhancement caused by the ground cover material (chosen as the plastic film in this study). Therefore, the objective of this study was to improve the two simulation models for both soil surface and subsurface temperatures in CERES-Rice through taking the effect of soil temperature enhancement by the film mulch into consideration. The simulation model of surface soil temperature (at the depth of 5 cm) was referred from other study for dry land crops, and the other one was from CERES-Rice for simulating the subsurface temperatures (at 10 and 20 cm, respectively) in the TPRPS. To justify and rectify the simulation models, we conducted a field experiment in Fangxian, Hubei, China (32°7'N, 110°42'E, altitude 450 m) from 2013 to 2014, covering two growth seasons of rice. Three treatments (named as TPRPS, GCRPS_{sat} and GCRPS_{80%}, respectively) were designed and replicated three times in 9 plots, each with an area of 9×10 m². A seepage-proof material was laid around each plot to the depth of 80 cm to avoid lateral percolation between neighbor plots. Five soil beds (156 cm wide and 940 cm long) in each plot were built for planting rice, with the space of 26×18 cm² and at a rate of two plants per hill. Small furrows (15 cm in width and depth) were dug around each soil bed. In the three replicated plots without plastic film for treatment TPRPS, a water layer of 2-5 cm in thickness was always maintained on the soil beds. In the three plots with plastic film for GCRPS_{sat}, the root zone averaged soil water content was kept close to saturation by completely filling the furrows with water but without water layer on the soil beds. The remaining three plots with plastic film for GCRPS_{80%} were managed as the same way as that for GCRPS_{sat} before mid-tillering stage, and then transient irrigation was intermittently implemented through the furrows to keep the root zone averaged soil water content between 80% and 100% field water capacity. Among the two growth seasons, the experimental data obtained in 2013 and 2014 were used to rectify the simulation models and verify the rectified models, respectively. Based on the measured air temperatures, soil water contents, soil physical parameters and organic matter contents, and other related heat coefficients, the changing processes of soil temperature at the depths of 5, 10, and 20 cm in the two GCRPS treatments were simulated using the rectified models. The simulated and measured surface soil temperatures at 5 cm during both growth seasons were in good agreement, with the root mean squared error (RMSE) less than 1.8°C, normalized root mean squared error (NRMSE) less than 10%, and correlation coefficient (*r*) higher than 0.89 (*P* < 0.01). The simulated subsurface soil temperatures at 10 and 20 cm in 2013 or in 2014 were also within acceptable ranges, with RMSE < 3.2°C, NRMSE < 15%, and *r* > 0.65 (*P* < 0.01), respectively, between the measured and simulated values. The rectified models should be helpful to simulate the changing processes of soil temperature or soil heat transfer, and improve CERES-Rice for further evaluating rice growth in the GCRPS.

Key words: models; soils; plastic films; ground cover rice production system (GCRPS); effect of increasing soil temperature; simulation; CERES-Rice