

黄笑颖, 李旭辉, 刘寿东, 等. ORYZA2000 模型中辐射模块的评估及改进[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(4): 803-809.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2016.04.015

ORYZA2000 模型中辐射模块的评估及改进

黄笑颖¹, 李旭辉^{1,2}, 刘寿东¹, 张 弥¹, 王 伟¹, 李 刚³, 越 昆¹, 汪天颖¹,
于 洲¹

(1. 南京信息工程大学大气环境中心, 江苏 南京 210044; 2. 耶鲁大学森林环境学院, 美国 纽黑文 06520; 3. 南京农业大学农学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 利用大田实测数据对 ORYZA2000 模型中的辐射模块进行了评估与改进。结果表明: 水稻产量和地上部分干质量对散射辐射比例变化敏感。但是模型模拟的 1 d 不同时刻太阳辐射中散射辐射比例与实测值相比存在较大误差, 傍晚时刻的均方根误差可达 0.15。而该模拟偏差(模拟值与观测值的差值)与大气透射系数呈二次曲线的关系, 利用模拟偏差与大气透射系数之间的关系改进了模型对散射辐射比例的模拟。改进的辐射模块对 1 d 3 个时刻散射辐射比例模拟的均方根误差分别缩小了 0.01、0.02 和 0.02。该结果可为 ORYZA2000 模型的改进提供参考。

关键词: ORYZA2000; 作物模型; 太阳辐射; 散射辐射

中图分类号: S 126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)04-0803-07

Assessment and improvement of radiation module in model ORYZA2000

HUANG Xiao-ying¹, LI Xu-hui^{1,2}, LIU Shou-dong¹, ZHANG Mi¹, WANG Wei¹, LI Gang³, YUE Kun¹,
WANG Tian-ying¹, YU Zhou¹

(1. Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Forestry and Environment, Yale University, New Haven 06520, USA; 3. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The radiation module in model ORYZA2000 for rice yield simulation was assessed and improved using the observed data. The results showed that rice yield and above-ground dry weight were sensitive to the changes of diffuse radiation fraction in global solar radiation. Big errors between simulated value of diffuse radiation fraction and observed value were found in different time points of a day; the root mean square error even reached 0.15 in late afternoon. A quadratic relationship between the difference of simulated value and observed value and the atmospheric transmission coefficient improve the simulation of radiation module. The root mean square error of diffuse radiation fraction simulated by the improved model was decreased by 0.01, 0.02, and 0.02 in three time points of a day, respectively.

Key words: model ORYZA2000; crop model; solar radiation; diffuse radiation

收稿日期: 2015-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31200377); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD); 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(PCSIRT)

作者简介: 黄笑颖(1991-), 女, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要从事农业气象研究。(Tel) 18951845518; (E-mail) della05hxy@qq.com

通讯作者: 张 弥, (E-mail) zhangm.80@nuist.edu.cn

作物模型将系统科学和计算机技术引入作物科学, 以作物为研究对象, 根据农业系统学与作物科学原理, 通过对作物生长发育过程获得的试验数据加以理论概括和数据抽象, 建立关于作物物候发育、光合生产、器官建成和产量形成等生理过程与环境因子之间关系的动态数学模型, 可用于作物生长发育

过程的定量预测、监测、预警与决策支持,以促进作物生产实现高产、优质、高效的目标。ORYZA 系列水稻模型是由国际水稻研究所与荷兰瓦赫宁根大学联合研制的。2001 年,国际水稻研究所 Bouman^[1]将之前各版本的模型装配在一起并进行完善,形成了 ORYZA 系列模型的最新版本,称之为 ORYZA2000。ORYZA 系列已经在不同地区进行了验证和应用,结果表明该模型在模拟水稻的生长发育和叶面积等方面具有较好的准确性。薛昌颖等^[2-4]利用 2003 年早稻田田间试验数据对模型进行调试,获得了早稻的基本作物参数,进行了北方早稻生长模拟;李亚龙等^[5]对 ORYZA2000 进行参数校正和验证,对早稻不同灌溉方式和密度管理下的氮肥经济最佳施肥量进行了探讨;张俊等^[6]通过田间试验,应用该模型对不同施氮水平下的水稻生物量、产量和吸氮量进行模拟;帅细强等^[7-8]将该模型引入到江南地区,探讨了利用该模型进行气候影响评价和产量预报的方法。然而,利用该模型对太阳辐射变化,特别是散射辐射变化对作物产量影响的研究较少。

作物依靠太阳能进行光合作用,太阳辐射的变化通过影响光合作用影响作物生物量及产量^[9]。近年来,中国雾霾天气频发,造成了重度的大气污染。雾霾发生时,大气气溶胶通过在辐射穿过大气时对其进行吸收和散射,直接影响到达地表的太阳辐射以及散射辐射占总辐射的比例^[10]。最近的研究结果显示,在中国的长三角地区,人为气溶胶在晴天条件下会减少 30% 的太阳辐射^[11]。除了减少总辐射量,在气溶胶含量较多的地区,可以观测到多云天气下散射辐射比例高达 0.5~0.7^[12]。研究结果表明,当作物接受的太阳辐射中散射辐射比例在 0.1 到 0.5 之间,只增加散射辐射比例而没有其他因子增加时,C3 植物大豆的辐射利用效率(RUE)增加了 53%,C4 植物玉米的 RUE 增加了 27%^[13]。Rochette 等^[14]观测到中散射辐射比例在 0.1 到 1.0 之间时,玉米的 RUE 增加了 90%。Choudhury^[15]做了多种植物多种模型的预测,结果显示散射辐射比例在 0 到 1.0 之间 RUE 可能会增加 2 倍。植被冠层中根据叶片接收辐射的不同,可分为阳叶和阴叶,阳叶可接收直接辐射及散射辐射,而阴叶仅可接收散射辐射。增加光合有效辐射中的散射辐射比例会增加到达阴叶的辐射,使阴叶光合作用速率增大,而总辐射一定程度的下降可使阳叶的光饱和现象得到

缓解,从而导致整个冠层光能利用率的提高。那么,当灰霾发生时,气溶胶增加导致的散射辐射比例增加会对农作物产量产生正效应还是负效应,成为关注的焦点。

在 ORYZA2000 水稻模型中,散射辐射是影响植被光合作用的一个重要变量。该模型中散射辐射比例计算的正确与否将直接影响到评估大气气溶胶导致的散射辐射比例改变对作物产量模拟的准确性。因此,本研究利用大田观测数据首先对模型进行散射辐射比例的敏感性分析,确定散射辐射比例对作物模型模拟结果的影响,并对模型中计算的散射辐射比例进行验证并提出改进,从而为 ORYZA2000 模型的使用提供参考。

1 材料与方法

1.1 模型介绍

ORYZA2000 模型可以假定在作物完全不受病害、虫害以及杂草的影响并且没有产量减少的情况下,模拟潜在生产以及水分限制和氮素限制条件下水稻的生长和发育情况,图 1 为其模拟的生理过程原理图。ORYZA2000 由多个模块构成,包括地上部作物生长模块、蒸腾蒸发模块、氮素动态模块、土壤水分平衡模块等。该模型以日为时间步长,动态和定量地描述潜在生产水平以及水分限制水平和氮素限制水平下的水稻生长发育和产量形成以及土壤水分、氮素的动态变化过程。作物参数主要包括发育速率(℃/d)、干物质分配系数和比叶面积等。该模型运行需要的驱动变量和参数近 200 个,模型中大部分作物参数是根据大量试验结果分析得出,具有普适性,约 10% 左右的作物参数需要根据具体试验

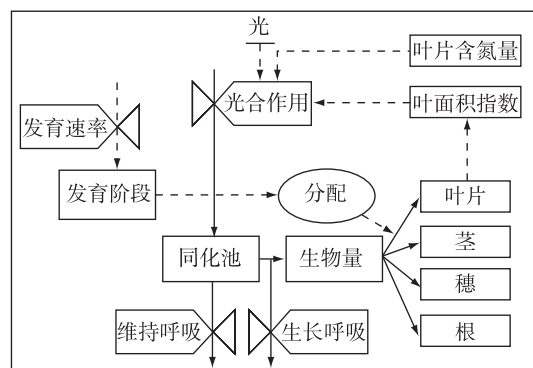


图1 ORYZA2000 模型模拟生理过程原理图

Fig.1 A physiological scheme of model ORYZA2000

结果进行调试(表 1)。

表 1 ORYZA2000 模型主要参数表

Table 1 Key parameters in model ORYZA2000

参数	描述
<i>RGRLMX</i>	叶面积最大相对生长速度
<i>RGRLMN</i>	叶面积最小相对生长速度
<i>SCP</i>	叶片 PAR 反射系数
<i>CO2</i>	环境 CO ₂ 浓度
<i>EMD</i>	播种期
<i>TMMAX</i>	日最高温度
<i>TMMIN</i>	日最低温度
<i>DUHOR</i>	日照时间
<i>SLATB</i>	单位质量叶片面积
<i>KDFTB</i>	叶片消光系数
<i>NFLVTB</i>	叶片氮质量分数
<i>FLVTB</i>	地上叶片质量分数
<i>FSTTB</i>	地上茎质量分数
<i>FSOTB</i>	地上穗质量分数
<i>DRLVT</i>	叶片衰亡系数
<i>NMAXLT</i>	最大叶片氮质量
<i>NMINLT</i>	最小叶片氮质量

模型运行所需的驱动数据包括逐日气象数据、作物数据、土壤数据以及相应的管理数据。逐日气象数据包括日照时数或辐射、最低温度、最高温度、水气压、平均风速以及降水量。其中辐射数据输入的是每日总辐射量。在计算日总光合积累量时,需要对 1 d 中每个时刻的瞬时光合速率进行积分,而 1 d 中每个时刻的太阳高度角是变化的,因此模型中使用高斯三点积分法^[16]对每天 3 个特定时刻的瞬时短波辐射进行估算,并根据瞬时短波辐射和理论辐射计算模拟散射辐射比例。高斯三点积分法是一种在作物模型中应用比较广泛的数学积分方法,通过选择 3 个有代表性的时刻进行积分计算,可以得到每日总光合积累量。根据高斯三点积分法的 3 个积分参数 $0.5 - \sqrt{0.15}$ 、0.5 和 $0.5 + \sqrt{0.15}$,可以得到每天计算瞬时短波辐射的 3 个时刻分别位于 12:30-13:00、14:30-15:00 和 16:30-17:00,覆盖正午、下午和傍晚 3 个时段,本文中简称为 1 时刻、2 时刻和 3 时刻。

该模型的辐射模块中,总入射辐射中散射辐射

的比例 $S_{\text{df}}/S_{\text{g}}$ 通过经验公式用大气透射系数进行计算。散射辐射比例和大气透射系数之间的非线性关系是基于不同纬度和不同海拔高度的气象站点的数据得到的^[17]。

$$S_{\text{df}}/S_{\text{g}} = 1 \quad (S_{\text{g}}/S_{\text{o}} \leq 0.22) \quad (1)$$

$$S_{\text{df}}/S_{\text{g}} = 1 - 6.4(S_{\text{g}}/S_{\text{o}} - 0.22)^2 \quad (0.22 < S_{\text{g}}/S_{\text{o}} \leq 0.35) \quad (2)$$

$$S_{\text{df}}/S_{\text{g}} = 1.47 - 1.66S_{\text{g}}/S_{\text{o}} \quad (0.35 < S_{\text{g}}/S_{\text{o}} \leq 1) \quad (3)$$

大气透射系数 $S_{\text{g}}/S_{\text{o}}$ 是地表接受的入射辐射与大气上界平行于地表面的平面接收到的理论辐射之比。这个理论辐射可以通过太阳常数 S_{cs} 进行计算,太阳常数在模型中取值为 $1\,370\text{ W/m}^2$ 。

$$S_{\text{o}} = S_{\text{cs}} [1 + 0.033 \cos(360t_{\text{d}}/365)] \sin\beta \quad (4)$$

式中, S_{o} 为地球大气上界平行于地表面上所接受的太阳辐射通量密度(单位: W/m^2),会随太阳高度角的变化发生变化。

1.2 敏感性分析方法

作物产量和地上部分生物量对散射辐射比例的敏感性用敏感度系数和变化的百分率表示,敏感度系数的计算方法^[18]:

$$\beta = \Delta Y / \Delta pb$$

式中, β 为产量(或其他生物量)对于参数 pb 的敏感度系数; ΔY 为参数 pb 发生变化(Δpb)时,产量(或其他生物量)的相应变化率(%); Δpb 为参数 pb 的变化率(%),本研究中设为 $\pm 10\%$ 。

变化百分率的计算方法如下^[19]:

$$VR = \frac{100 \times |run_{+10\%} - run_{-10\%}|}{run_{\text{ref}}}$$

式中 VR 为产量(或其他生物量)的变化百分率, $run_{+10\%}$ 为散射辐射比例增加 10% 时的模拟值, $run_{-10\%}$ 为散射辐射比例减少 10% 时的模拟值, run_{ref} 为散射辐射比例不变时的模拟值。

1.3 观测数据

进行敏感性分析时模型采用 2011 年在南京市浦口区南京信息工程大学生态园 ($32^{\circ}14'N$, $118^{\circ}42'E$, 海拔 22 m) 试验的校准结果。水稻品种为 6 两优 9368,试验重复 3 次,每块样田为 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$,水分、肥料均为最优栽培条件,按水稻病虫害预测服务防治病虫害,保证无病虫害。叶面积观测使用叶面积仪。气象资料采用生态园自动气象站资料。

太阳总辐射和散射辐射的观测点位于落桥农业

气象试验基地(32°12'N,118°40'E,海拔 5 m),采用 SPN1 太阳辐射计观测 2014 年 4 月—2015 年 3 月的总辐射和散射辐射,采样频率为 5 s,记录频率为 30 min。数据的资料控制以每天日出日落时间为准,剔除夜晚时间的数据。验证改进公式时所采用的数据为相同站点 2015 年 4 月—8 月的总辐射和散射辐射数据。

1.4 模拟偏差和均方根误差计算

作物模型模拟结果用平均偏差和均方根误差进行检验。计算方法分别如下:

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i) = \bar{M} - \bar{O}$$

$$E_{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中, N 为样本总数, M 为散射辐射比例模拟值, O 为散射辐射比例观测值。

2 结果与分析

2.1 散射辐射比例的敏感性分析

就散射辐射比例改变对产量和地上部分干质量的影响进行敏感性分析。敏感性分析过程中保持模型中其他参数不变。散射辐射比例初始值由 2011 年日总辐射数据输入模型中模拟所得,其中在作物的整个生长发育阶段 1 时刻、2 时刻、3 时刻的平均散射辐射比例分别为 0.81、0.84 和 0.90。

从图 2 可以看出,随着散射辐射比例的变化,产量呈现出先增加后减小的趋势。当散射辐射比例增加 30% 时,产量达到最大;当散射辐射比例增加小于 30% 时,产量随着散射辐射比例的增大而迅速增加;当散射辐射比例增加大于 30% 时,产量随着散射辐射比例的增大而缓慢减小。散射辐射比例的变化对地上部分干质量的影响也呈现出相同的趋势(图 3),当散射辐射比例增加到 30% 时,地上部分干质量达到最大。而散射辐射比例初始值的平均值已达到 0.8~0.9,散射辐射比例在此基础上增加 30% 的可能性很小,由此可见,散射辐射比例的增加对作物的产量和地上部分干质量有积极的影响。

产量和地上部分干质量的敏感度系数随着散射辐射比例的增加而下降,即散射辐射比例越大,产量和地上部分干质量随散射辐射比例的变化越平缓(表 2、表 3)。由表 2 和表 3 还可以看出,在散射辐

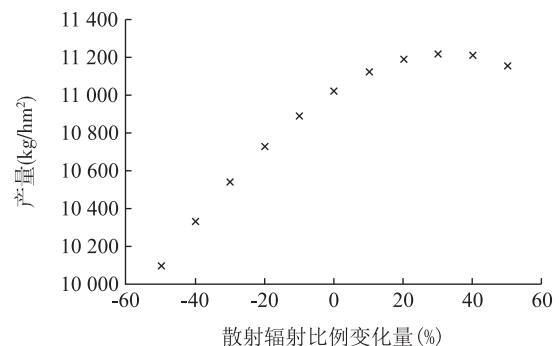


图 2 散射辐射比例对模拟产量的影响

Fig.2 The effect of diffuse radiation fraction on simulated yield

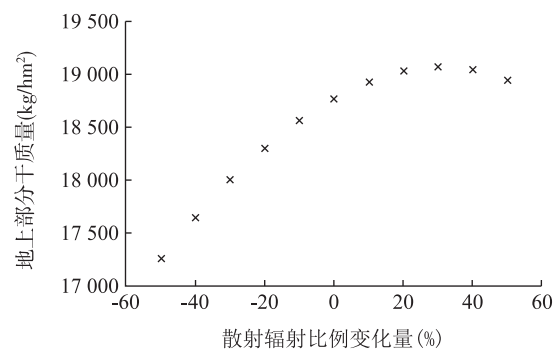


图 3 散射辐射比例对模拟地上部分干质量的影响

Fig.3 The effect of diffuse radiation fraction on simulated above-ground dry weight

表 2 产量对散射辐射比例的敏感度系数和变化百分率

Table 2 Sensitivity coefficient and percent change of yield affected by diffuse radiation fraction

散射辐射比例增加量 (%)	产量变化量 (kg/hm ²)	敏感度系数	变化百分率 (%)
50	134	268	
40	190	475	
30	199	663	
20	168	840	
10	100	1 000	
0	0	0	2.10
-10	-132	1 320	
-20	-291	1 455	
-30	-478	1 593	
-40	-690	1 725	
-50	-925	1 850	

射比例变化±10%的情况下,产量的变化百分率高

于地上部分干质量的变化百分率,这是因为地上部分干质量还包括了叶片部分的质量,而散射辐射比例变化对叶片生长也有重要影响。

综上所述,产量和地上部分干质量对总辐射中散射辐射比例敏感,散射辐射比例的增加会引起产量和地上部分干质量的增加。因此,有必要对总辐射中散射辐射的比例进行准确地模拟。

表 3 地上部分干质量对散射辐射比例的敏感度系数和变化百分率
Table 3 Sensitivity coefficient and percent change of above-ground dry weight affected by diffuse radiation fraction

散射辐射 比例增加量 (%)	地上部分干 质量变化量 (kg/hm ²)	敏感度系数	变化百分率 (%)
50	169	338	1.96
40	272	680	
30	300	1 000	
20	260	1 300	
10	158	1 580	
0	0	0	
-10	-211	2 110	
-20	-471	2 355	
-30	-778	2 593	
-40	-1132	2 830	
-50	-1522	3 044	

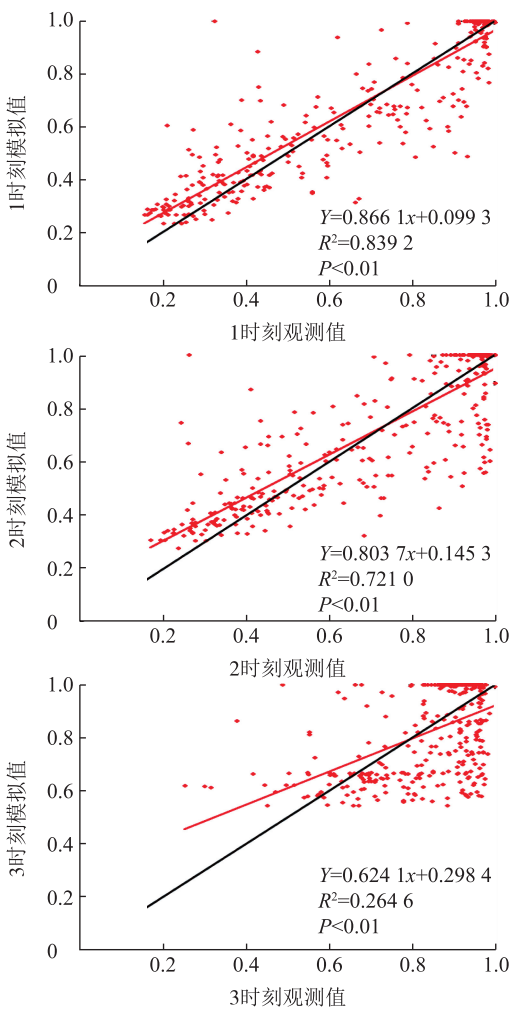
2.2 ORYZA2000 模型对散射辐射比例的模拟

根据 ORYZA2000 模型中计算散射辐射比例的方法,模拟出 2014 年 4 月—2015 年 3 月的散射辐射比例,并与观测值进行比较(图 4)。由于观测值的记录频率为 30 min,观测值选取距模拟时刻最近的数值。

可以看出,在模型所选取的 3 个具有代表性的时刻,散射辐射比例模拟值与实测值均存在偏差(表 4),3 时刻模拟偏差较大,其平均偏差及均方根误差分别达到 0.16 和 0.15。这是由于 3 时刻位于 16:30—17:00,接近日落时刻,太阳高度角较低,散射辐射比例的观测和模拟有很大的不确定性。

2.3 对散射辐射比例模拟的改进

散射辐射比例模拟的偏差可能与天气条件有关。用大气透射系数表示天气条件,作出散射辐射比例模拟偏差和大气透射系数的关系图(图 5)。图



1 时刻: 12 : 30 - 13 : 00; 2 时刻: 14 : 30 - 15 : 00; 3 时刻: 16 : 30 - 17 : 00。

图 4 3 个代表性时刻散射辐射比例模拟值与实测值的比较
Fig.4 Comparison of simulated diffuse radiation fraction with observed value at three representative time points

表 4 3 个时刻散射辐射比例模拟的平均偏差及均方根误差
Table 4 The mean bias and root mean square error of simulated diffuse radiation fraction at three representative time

时刻	平均偏差	均方根误差
1 时刻	0.10	0.12
2 时刻	0.13	0.14
3 时刻	0.16	0.15

1 时刻:12:30—13:00;2 时刻:14:30—15:00;3 时刻:16:30—17:00。

5 中将大气透射系数划分为 0 ~ 0.10、0.11 ~ 0.20……等 10 个范围,并求取每个范围内散射辐射比例模拟偏差的平均值进行分析。可以看出散射辐射比例模拟偏差和大气透射系数呈现出二次曲线的

关系,并且通过 0.01 的显著性检验。即在多云的中等辐射条件下(大气透射系数在 0.2~0.7),模拟值偏小,3 个时刻模拟值偏小最多可达 0.3;而在晴朗天气辐射较强及阴雨天辐射较弱(大气透射系数小于 0.2 或大于 0.7)的条件下,模拟值偏大,3 个时刻模拟值偏大最多可达 0.3。以这 3 个二次公式作为改进公式,对模型模拟出的散射辐射比例进行订正,使模型模拟的结果更加接近观测值。

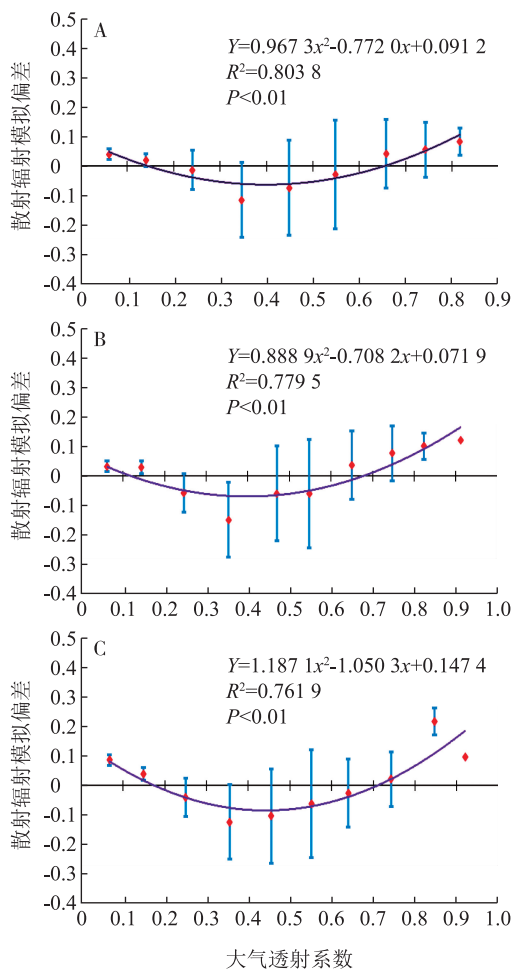


图 5 3 个时刻不同大气透射系数范围内散射辐射比例模拟的偏差(误差线为标准差)

Fig.5 The errors of simulated diffuse radiation affected by atmospheric transmission coefficient at three representative time points

2.4 模型改进效果的验证

将图 5 中的改进公式代入模型中,对 2015 年 4 月—8 月的散射辐射比例进行模拟。图 6 显示了

3 个时刻改进后的结果与未改进时的散射辐射模拟误差的比较。从图 6 中可以看出,通过改进能够使偏差缩小,但是缩小的幅度较小。计算发现,3 个时刻改进后散射辐射模拟的平均偏差分别缩小了 0.9%、0.9% 和 1.8%,平均缩小了 1.2%。改进前后均方根误差见表 5,对模型的散射辐射模拟模块改进之后,均方根误差减小,3 个时刻模拟的均方根误差分别减小了 0.01、0.02 和 0.02。因此,此方法可以用来对模型进行改进。

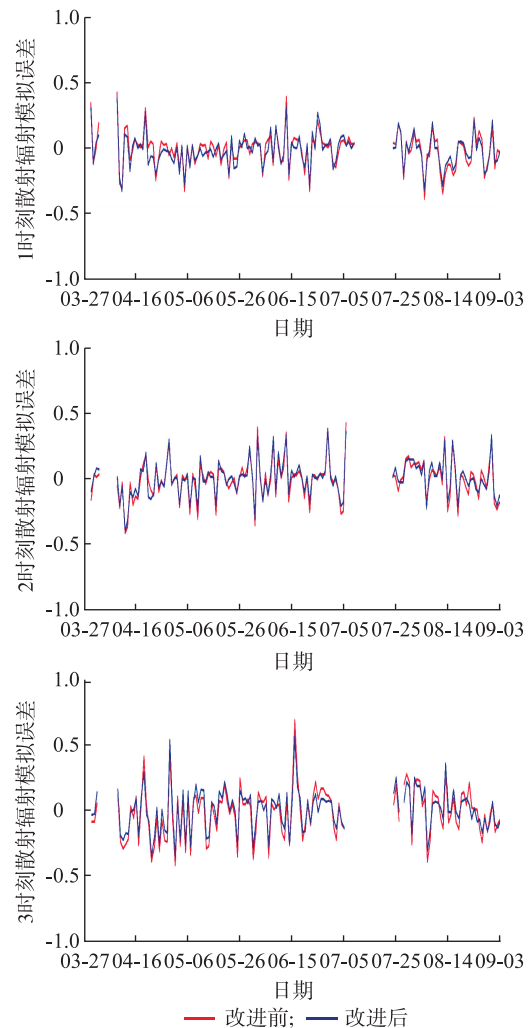


图 6 模型改进后的效果验证

Fig.6 Comparison of improved model with default model

3 结论

在 ORYZA2000 模型中,太阳辐射中的散射辐射

表 5 散射辐射比例模拟值与观测值比较

Table 5 Comparison between simulated value and observed value of diffuse radiation

时刻	改进前均方根误差	改进后均方根误差
1 时刻	0.13	0.12
2 时刻	0.16	0.14
3 时刻	0.18	0.16

1 时刻:12:30—13:00;2 时刻:14:30—15:00;3 时刻:16:30—17:00。

比例是影响作物产量和地上部分干质量的重要因素,产量和地上部分干质量对总辐射中散射辐射所占的比例敏感。在当前辐射水平下,当散射辐射比例增加 30%时,作物的产量和地上部分干质量达到最大。散射辐射比例的增加对作物产量和地上部分干质量有积极的影响。

通过比较模型对散射辐射比例的模拟值和观测值,可以看出 ORYZA2000 模型中对散射辐射比例的模拟存在一定偏差。3 个时刻平均偏差分别为 0.10、0.13 和 0.16,均方根误差分别为 0.12、0.14 和 0.15。

散射辐射比例模拟的偏差与大气透射系数呈现很好的二次曲线关系,可以用来作为对模型进行改进的公式。模型改进前三个时刻散射辐射模拟的均方根误差分别为 0.13、0.16 和 0.18,模型改进后分别缩小了 0.01、0.02 和 0.02。虽然改进后,对散射辐射比例模拟的偏差仍然存在,但该结果可为 ORYZA2000 模型的改进提供参考和依据。

参考文献:

- [1] BOUMAN B A M. ORYZA2000: modeling lowland rice[M]. Wageningen, Netherlands: IRRI, 2001.
- [2] 薛昌颖,杨晓光,冯利平,等. ORYZA2000 模型模拟北京地区旱稻的适应性初探[J]. 作物学报, 2005, 31(12): 1567-1571.
- [3] 薛昌颖,杨晓光,邓伟,等. 应用 ORYZA2000 模型制定北京地区旱稻优化灌溉制度[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 76-82.
- [4] 薛昌颖,杨晓光,邓伟,等. 利用 ORYZA2000 模型分析北京地区旱稻产量潜力及需水特征[J]. 作物学报, 2007, 33(4): 625-631.
- [5] 李亚龙,崔远来,李远华,等. 基于 ORYZA2000 模型的旱稻生长模拟及氮肥管理研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21

(12): 141-146.

- [6] 张俊,徐绍辉,刘建立,等. 应用 ORYZA2000 模型模拟水稻产量及吸氮量[J]. 土壤, 2007, 39(3): 428-432.
- [7] 帅细强,王石立,马玉平,等. 基于水稻生长模型的气象影响评价和产量动态预测[J]. 应用气象学报, 2008, 19(1): 71-81.
- [8] 帅细强,王石立,马玉平,等. 基于 ORYZA2000 模型的湘赣双季稻气候生产潜力[J]. 中国农业气象, 2009, 30(4): 575-581.
- [9] 张雪芬,王春乙,杜子璇,等. 太阳辐射的变化及其对小麦生长影响的数值模拟[C]//中国气象学会. 2007 年年会生态气象业务建设与农业气象灾害预警分会场论文集,北京:中国气象学会,2007.
- [10] GREENWALD R, BERGIN M H, XU J, et al. The influence of aerosols on crop production: A study using the CERES crop model[J]. Agricultural Systems, 2006, 89(2): 390-413.
- [11] CHAMEIDES W L, XINGSHENG L, XIAOYAN T, et al. Is ozone pollution affecting crop yields in China[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(7): 867-870.
- [12] LORENTE J, REDAN A, DE CABO X. Influence of urban aerosol on spectral solar irradiance[J]. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33(3): 406-415.
- [13] SINCLAIR T R, SHIRAIWA T, HAMMER G L. Variation in crop radiation-use efficiency with increased diffuse radiation[J]. Crop Science, 1992, 32(5): 1281-1284.
- [14] ROCLETTE P, DESJARDINS R L, PATTEY E, et al. Instantaneous measurement of radiation and water use efficiencies of a maize crop[J]. Agronomy Journal, 1996, 88(4): 627-635.
- [15] CHOUDHURY B J. Estimating gross photosynthesis using satellite and ancillary data: approach and preliminary results[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 75(1): 1-21.
- [16] GOUDRIAAN J. A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1986, 38(86): 249-254.
- [17] SPITTERS C J T, TOUSSAINT H A J M, GOUDRIAAN J. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis Part I. Components of incoming radiation[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1986, 38: 217-229.
- [18] CHURKINA G, TENHUNEN J, THORNTON P, et al. Analyzing the ecosystem carbon dynamics of four European coniferous forests using a biogeochemistry model[J]. Ecosystems, 2003, 6(2): 168-184.
- [19] 顾峰雪.典型陆地生态系统水碳循环关键过程的机理模拟及其与通量观测的比较研究[D].北京:中国科学院研究生院,2007.

(责任编辑:张震林)