

# 水稻灌溉需水量对气候变化响应的模拟

王卫光, 孙凤朝, 彭世彰, 徐俊增, 罗玉峰, 缴锡云

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

**摘要:** 气候变化会导致作物耗水过程改变, 从而影响灌溉需水。研究水稻灌溉需水对气候变化的响应规律, 有助于合理制定应对气候变化的灌溉策略, 保障水资源可持续利用和粮食安全。该文基于 1961—2010 年气象数据和 HadCM3 大气环流模式 A2 和 B2 两种情景下的统计降尺度模拟结果, 利用经田间试验资料验证后的水稻模型 ORYZA2000, 模拟淹水灌溉和间歇灌溉两种灌溉处理下、历史和未来情景下水稻灌溉需水对气候变化的响应规律。结果表明: 过去 50 年, 间歇灌溉和淹水灌溉模式下水稻耗水量呈现显著上升趋势, 而水稻灌溉需水量和产量都呈现下降趋势, 分别由降水增加和气温升高、辐射下降导致的生育期缩短引起; 未来气候情景下, 间歇灌溉和淹水灌溉模式下水稻耗水量在未来 3 个时期 (2020s, 2050s 和 2080s) 均呈现不同程度的增加; 耗水量的显著增加和降水的减少导致了未来 3 个时期水稻灌溉需水量的明显增加; 受持续增温的减产效应影响, 水稻产量在未来 3 个时期呈现减少趋势, 且降幅逐渐变大。

**关键词:** 灌溉, 气候变化, 模型, 未来情景, ORYZA2000, 水稻产量

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.012

中图分类号: S162.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-14-0090-09

王卫光, 孙凤朝, 彭世彰, 等. 水稻灌溉需水量对气候变化响应的模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 90—98.

Wang Weiguang, Sun Fengchao, Peng Shizhang, et al. Simulation of response of water requirement for rice irrigation to climate change[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 90—98. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

全球气候变化及其可能造成的影响引起各国政府、研究机构和公众的广泛关注<sup>[1]</sup>。IPCC 和 FAO 都将农业生产列为最易遭受气候变化影响的产业之一<sup>[2]</sup>。气温升高、CO<sub>2</sub> 浓度增大以及降水波动加剧等气候变化主要特征都会对作物生长发育形成直接影响。作物生长及农业生产受气候变化影响改变的同时, 必然导致作物耗水过程的变化, 再加上气候变异带来的降水波动, 将会引起灌溉需水量的变化<sup>[3]</sup>。目前, 中国农业灌溉用水量仍占到总用水量 60%以上<sup>[4]</sup>。因此, 开展灌溉需水对气候变化的响应研究, 对于减少气候变化对农业用水和作物生产的不利影响, 从而保障粮食安全和水资源可持续利用都具有重要的科学意义。

开展气候变化对作物需水和灌溉需水影响评估

研究一般是通过增量情景模拟和模型模拟两种手段实现。增量情景分析类似于敏感性分析, 主要是通过假定未来温度的增温情景下 (比如假定未来温度增加 1~4℃) 研究作物需水量的变化 (如, 刘晓英和林而达<sup>[5]</sup>; 张建平<sup>[6]</sup>)。模型模拟又可分为两类: 一类以作物系数法和水平衡模型为基础, 分析气候变化对灌溉需水的变化 (如, 丛振涛<sup>[4]</sup>; 李勇<sup>[7]</sup>; 王卫光<sup>[8]</sup>)。另一类是将未来气候信息与反映作物生长变化的作物模型相耦合实现未来气候条件下的作物耗水与灌溉需水的模拟。作物模型可以定量和动态地描述作物生长、发育以及耗水过程<sup>[9]</sup>。广泛应用于气候变化对作物生长和耗水影响评价研究的作物模型主要包括美国农业部开发的 CERES 系列模型<sup>[10]</sup>、CropSyst<sup>[11]</sup>和 ORYZA2000<sup>[12]</sup>等。未来气候变化信息主要通过大气环流模式 (GCM) 的预估结果获取。相比水平衡模型而言, 作物模型更能够全面反映作物生产耗水过程, 同时, 相对于人为假定的温度增加的增量情景, 大气环流模型 GCM 更能反应气候因子变化的大气环境物理基础。因此, 利用 GCM 构建未来气候变化情景, 再与作物模型结合的评估方法最近受到了越来越多的关注<sup>[13-15]</sup>。

水稻是中国第一大粮食作物, 对中国粮食安全具有举足轻重的作用。因此, 探讨气候变化对水稻水分

收稿日期: 2012-08-21 修订日期: 2013-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51009046); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2010519)

作者简介: 王卫光 (1979—), 男, 河南开封人, 博士, 教授, 主要从事农业水循环方面的研究。南京 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 210098。Email: wangweiguang006@126.com

※通信作者: 彭世彰 (1959—), 男, 上海人, 博士, 教授, 主要从事水稻节水灌溉方面的研究。南京 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 210098。Email: szpeng@hhu.edu.cn

利用的影响尤为重要。水稻耗水量是指水稻生长过程中田间土面（或水面）蒸发量与植株蒸腾量之和，水稻灌溉需水量定义为水稻生长过程中需要依靠灌溉补充的水量。相对于气候变化对水稻生长的研究而言，有针对性地研究气候变化对水稻耗水量与灌溉需水的影响较少，尤其是基于统计降尺度模拟获取全球气候模式的高分辨率数据，驱动作物模型模拟水稻灌溉需水对未来气候变化响应的研究工作尚未见到。

本文基于历史气象资料和大气环流模式 HadCM3 的统计降尺度数据，采用经田间试验资料验证的水稻模型 ORYZA2000，模拟过去和未来不同时期、不同灌溉方式下苏南地区水稻灌溉需水对气候变化的响应，为该领域相关研究提供一定的借鉴。

## 2 材料与方法

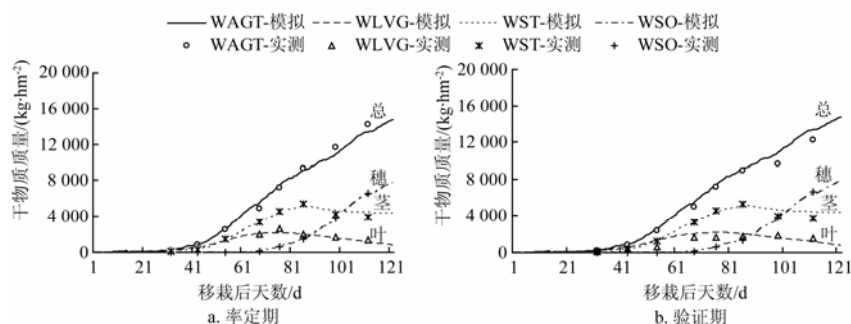
### 2.1 田间试验

ORYZA2000 模型参数率定所采用的水稻生长资料、土壤特性资料和气象要素资料来自于在河海大学国家重点实验室昆山试验基地进行的水稻灌溉生长田间试验。试验基地位于苏南地区昆山市（31°15′15″N，120°57′43″E），属亚热带南部季风气候区，年平均气温 15.5℃，年降雨量 1 097.1 mm，年蒸发量 1 365.9 mm，日照时数 2 085.9 h/a。当地习惯稻麦轮作，土壤为潴育型黄泥土，耕层土壤为重壤土。在水稻品种、育秧、移栽、密度、植保、用肥、用药等技术措施以及基础地力相同的条件下，安排常规灌溉（分蘖后期晒田、田间水层控制在 30~50 mm），在 3 个小区设置 3 个重复处理。每个小区面积 150 m<sup>2</sup>（20 m×7.5 m），各小区之间用砖砌混凝土隔离（高 30 cm，宽 30 cm），田埂向地下内嵌 50 cm 深的塑料防渗膜，防止小区间的水体交换。试验区布置有 WS-STD1 型自动监测气象站。前茬作物为小麦，供试水稻品种为早熟晚粳型 9314，6 月 25 日左右插秧，密度为 22.74 万穴/hm<sup>2</sup>，每穴 3~4 株，10 月 26 日左右收割。灌溉处理从水稻大田移栽开始一直维持 30~50 mm 水层，直到黄

熟期后自然落干至收割。试验测定的项目主要包括：田间水平衡要素、气象资料、农艺记录、土壤特性、水热和养分资料、水稻生长生理数据等。

### 2.2 ORYZA2000 作物模型及其参数率定验证

水稻模型 ORYZA2000 由国际水稻研究所（IRRI）与荷兰瓦赫宁根大学联合开发，集成和发展了早期开发的 ORYZA1，ORYZA\_W 和 ORYZA\_N 模块，是一种动态、机理性较强的水稻生长模型。该模型以日为时间步长，可以很好地模拟不同气候条件下、CO<sub>2</sub> 肥效作用下以及水分限制和氮素限制条件下的水稻生长发育、水稻蒸发蒸腾量（即水资源消耗量）和土壤水分平衡。模型包括作物生长和发育、蒸散和水分胁迫、植株氮素平衡以及土壤水分平衡在内的多个模拟模块。ORYZA2000 要求输入的数据包括作物特性，土壤性质，作物田间管理，逐日气象资料等。ORYZA2000 模型运行时需要建立不同的管理文件，包括：作物参数文件、田间管理文件、气象数据文件和土壤数据文件等。模型 ORYZA2000 中，约 90% 的作物参数是对所有水稻品种有效的，不需要校正。但反映水稻遗传特性的参数需要根据实测试验资料确定。本文根据昆山试验基地 2007 年（率定期）和 2008 年（验证期）水稻生长过程实测资料，运用 ORYZA2000 模型内嵌的定标程序 DRATES 和 PARAM 率定验证了包括发育速率、同化物分配系数、比叶面积、相对叶片生长率、叶片死亡率、茎秆保留系数在内的作物参数。图 1 给出了水稻总干物质质量 WAGT（total aboveground dry matter）、绿叶干物质质量 WLVG（dry weight of green leaves）、茎秆干物质质量 WST（dry weight of stems）和穗部干物质质量 WSO（dry weight of storage organs）在率定期和验证期的模拟效果，可以看出，水稻生育期内模型模拟值与观测值之间有较好的吻合程度。从表 1 可以看出，大部分模拟值与实测值线性回归  $t$  检验水平在 0.9 左右，均达到显著水平，相关系数  $R^2$  在 0.74~0.99 之间。由此可见，模型对水稻产量、各阶段干物质累积和叶面积指数等均有较好的模拟效果，表明 ORYZA2000 模型适合在该研究区应用。



注：水稻总干物质质量 WAGT（total aboveground dry matter）；绿叶干物质质量 WLVG（dry weight of green leaves）；茎秆干物质质量 WST（dry weight of stems）；穗部干物质质量 WSO（dry weight of storage organs）。

图 1 率定期和验证期水稻干物质质量模拟值与实测值的比较

Fig.1 Simulated and measured dry biomass in calibration period and validation period

表 1 ORYZA2000 对干物质量和叶面积指数的模拟评价  
Table 1 Evaluation results for ORYZA2000 simulations of crop growth variables

时期 Period	变量 Variables	<i>N</i>	<i>Xobs</i> (SD)	<i>Xsim</i> (SD)	<i>P</i> ( <i>t</i> *)	$\alpha$	$\beta$	$R^2$	<i>RMSEa</i>	<i>RMSEn</i>
率定期 Calibration period	WAGT	16	6079(4616)	6253(4619)	0.92*	1.62	-76.81	0.99	556.31	9.21
	WLVG	16	1333(760)	1347(696)	0.96*	0.90	302.72	0.91	300.82	22.62
	WST	16	2877(1931)	2929(1965)	0.94*	1.41	13.71	0.99	304.43	10.61
	WSO	10	1570(2329)	1533(2247)	0.96*	1.90	234.24	0.99	131.92	8.42
	LAI	16	4.21(2.07)	3.42(1.64)	0.24*	0.61	0.95	0.80	1.42	34.54
验证期 Validation period	WAGT	16	5776(4239)	6166(4642)	0.84*	0.94	-19.3	0.99	646.4	12.6
	WLVG	16	1221(686)	1340(671)	0.78*	0.92	74.9	0.90	327.6	29.2
	WST	16	2712(1907)	3033(1960)	0.88*	0.90	30.4	0.98	356.6	10.1
	WSO	10	1498(2356)	1610(2239)	0.95*	1.1	315.3	0.96	173.1	14.4
	LAI	16	4.11(1.91)	3.51(1.74)	0.35*	0.81	0.99	0.74	1.55	44.4

注: *N* 为样本数; *Xobs* 为实测平均值; *Xsim* 为模拟值平均值; *SD* 为标准偏差; *P*(*t*\*)=*t* 为检验显著性;  $\alpha$  为模拟值与实测值线性相关的斜率;  $\beta$  为模拟值与实测值线性相关的截距;  $R^2$  为模拟值与实测值线性相关系数; *RMSEa* 为绝对均方根误差; *RMSEn* 为归一化均方根误差。在 *P*(*t*\*) 中, \* 表示模拟值和实测值无显著性差异的可信度为 95%。

Note: *N* is the sample number; *Xobs* is the observed mean value; *Xsim* is the simulated mean value; *SD* is the standard deviation; *P*(*t*\*)=*t* is the significance test;  $\alpha$  is the slope of linear correlation between the simulated and observed values;  $\beta$  is the intercept of linear correlation between the simulated and observed values;  $R^2$  is the linear correlation coefficient between the simulated and observed values; *RMSEa* is the absolute root mean square error; *RMSEn* is the normalized least root mean square error. \* means the confidence level of insignificant differences between simulated and observed values is 95%.

### 2.3 未来气象数据的统计降尺度模拟

在长序列历史气象资料收集方面: 昆山试验基地距离上海仅有 24 km, 可以认为属于上海气象站覆盖范围之内, 并且上海站气象资料序列较长, 其数据也通过国家气象中心的一致性检验, 具有很好的完整性。因此, 本文选择上海站 1961—2010 年气象资料, 利用率定好的 ORYZA2000 模拟, 分析已发生气候变化对水稻灌溉需水的影响。

GCM 模式是很重要的一种获取未来气象数据的来源。但由于 GCM 模式往往提供数据的分辨率较低, 难以满足模型模拟输入数据的要求。弥补 GCMs 分辨率不足的重要途径是降尺度方法, 包括动力降尺度和统计降尺度。其中, 统计降尺度是通过确立大尺度预报因子和区域尺度或者点尺度预报变量间的经验统计关系, 从而实现尺度转换。Wilby 等<sup>[16]</sup>提出的统计降尺度模型 (SDSM) 是一种多元回归和天气发生器相耦合的统计降尺度方法, 具有很好的模拟效果和易操作性, 在全球气象、水文、农业及环境评价领域应用广泛<sup>[17-20]</sup>。因此, 本文选择 SDSM 获取 ORYZA2000 模型需要的未来气象数据集。以最高日平均气温、最低日平均气温、气压、太阳辐射、风速和降水为预报量, 遵循预报因子的选择原则, 通过 SDSM 中的“筛选变量”程序、季节相关分析、偏相关分析和散点图等确定各预报量的预报因子。待选择预报因子来自于美国环境预报中心 (NCEP) 和国家大气研究中心 (NCAR) 联合推出的再分析逐日大气要素因子 (简称 NCEP), 起止年份分别为 1961 年和 2001 年。GCM 输出数据采用由英国 Hadley 气候预测与研究中的海气耦合模式 HadCM3 在 A2 情景 (反映区域性合作, 但对新技术的适应较慢, 人口继续增长) 和 B2 情景 (假定生态环境得到改善, 全球人口趋于稳定) 下<sup>[21]</sup>输出的 1961—2099 年与 NCEP 相同的逐日大气要素因子, 数据来源于

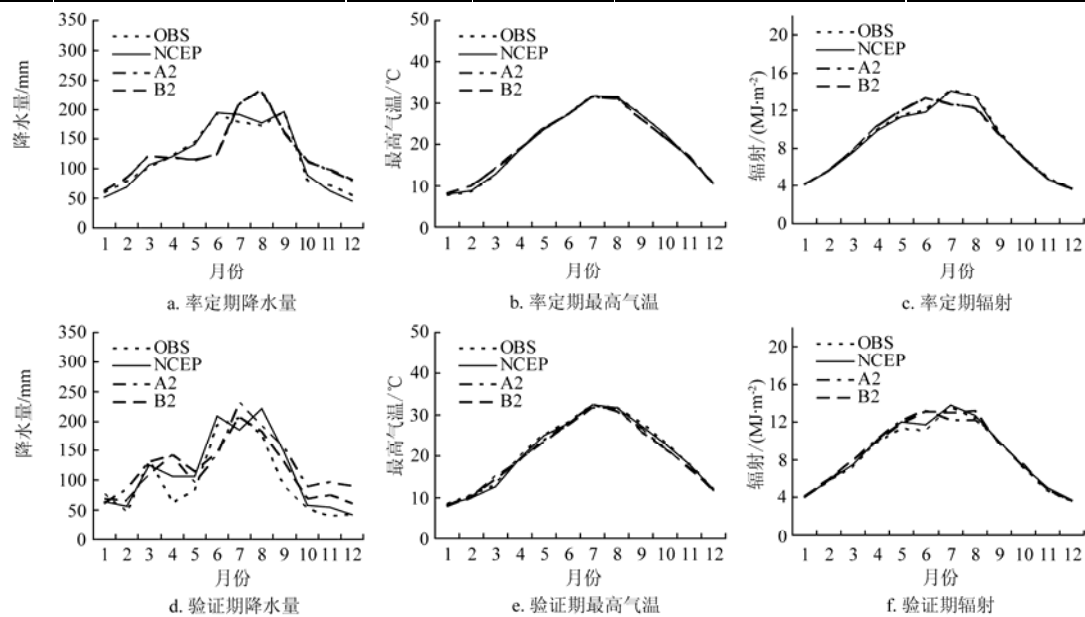
<http://www.cics.uvic.ca/scenarios/sdsm/select.cgi>。基于 1961—1990 年上海站预报量数据与选择的 NCEP 预报因子建立多元回归统计关系, 计算 SDSM 天气发生器模型参数, 构建 SDSM 模型。以相关系数 *R*, 效率系数 *E<sub>ns</sub>*, 模拟和观测标准偏差比 *R<sub>s</sub>* 和模型偏差系数 *B<sub>ias</sub>* (评价最优值分别为 1, 1, 1 和 0) 为评价指标<sup>[8]</sup>, 利用 1991—2001 年逐日数据对 SDSM 模型进行验证。

表 2 给出了 SDSM 在率定期和验证期对各气象变量的模拟效果。其中, 辐射, 最高最低气温和气压的模拟值和实测值在率定期和验证期都比较一致。相关系数 *R*, 效率系数 *E<sub>ns</sub>* 以及模拟和观测标准偏差比 *R<sub>s</sub>* 在率定和验证期都在 0.98 以上。对于风速和降水, *R*, *E<sub>ns</sub>* 和 *R<sub>s</sub>* 虽然小于前述 4 个变量的相应评价指标 (*E<sub>ns</sub>* 和 *R* 在 0.38~0.62 之间), 但也能较好的刻画变量的总体变化特征。降水的模型偏差系数 *B<sub>ias</sub>* 在率定期和验证期分别为 0.14 和 0.30 mm/d。以降水、最高气温和辐射为例, 图 2 给出了率定期和验证期实测和模拟值的年内分布。由于 SDSM 模型运行中所需的 NCEP、HadCM3 中 A2 和 B2 情景数据均由原始数据标准化所得 (标准化的原则是尽量降低实测气象数据和相关气候因子数据之间的误差, 使 NCEP、HadCM3 中 A2 和 B2 的数据尽量与历史实测值相一致), 这种标准化在一定程度上削弱了不同排放情景数据与 NCEP 之间的差异<sup>[16]</sup>。同时, 经 SDSM 降尺度后的气候因子数据 (NCEP、A2 和 B2 情景下) 和历史实测数据愈接近, 是模型模拟效果愈好的一个判断标准<sup>[20]</sup>。从图 2 可以看出, 基于 3 种数据集 (NCEP, HadCM3 的 A2 和 B2 情景) 模拟的各变量季节性变化规律与观测值较为一致。同时, 对于最高气温和辐射的降尺度模拟效果要好于降水的模拟效果。总的来说, SDSM 模拟效果总体较好, 可以用于 GCM 输出结果的降尺度应用。

表 2 统计降尺度模型率定期和验证期的模拟效果评价

Table 2 Evaluation results of meteorological variables in calibration period and validation period of SDSM

变量 Variables	时期 Period	相关系数 $R$ Correlation coefficient	效率系数 $E_{ns}$ Coefficient of efficiency	模拟和观测标准偏差比 $R_s$ Ratio of simulated and observed standard deviation	模型偏差 $B_{ias}$ Model biases
辐射 Radiation	率定期 Calibration period	0.99	0.99	0.99	-0.01
	验证期 Validation period	0.98	0.98	1.02	0.03
风速 Wind speed	率定期 Calibration period	0.59	0.51	0.66	0.05
	验证期 Validation period	0.58	0.57	0.81	-0.01
最低气温 Minimum temperature	率定期 Calibration period	1.00	0.99	0.99	0.02
	验证期 Validation period	0.99	0.99	1.01	-0.06
最高气温 Maximum temperature	率定期 Calibration period	0.99	0.99	1.00	0.00
	验证期 Validation period	0.99	0.99	1.01	-0.01
降水 Precipitation	率定期 Calibration period	0.62	0.59	0.87	0.14
	验证期 Validation period	0.60	0.38	1.02	0.30
气压 Vapor pressure	率定期 Calibration period	0.99	0.99	1.00	0.00
	验证期 Validation period	0.99	0.99	1.03	0.03



注：OBS 为实测数据，NCEP 为再分析资料数据，A2 为 A2 情景下模拟值，B2 为 B2 情景下模拟值。

Note: OBS is the observed data; NCEP is the reanalysis data; A2 is the simulated value under A2 scenarios; B2 is the simulated value under B2 scenarios.

图 2 基于 SDSM 的 NCEP、A2 和 B2 情景下率定和验证期降水、最高气温和辐射模拟值与实测值的年内分布

Fig.2 Monthly distribution for modeled and observed precipitation, maximum temperature and radiation under NCEP, A2 and B2 scenarios based on SDSM

## 2.4 趋势检验方法

本文应用简单线性回归方法分析由 ORYZA2000 水稻模型模拟得到的水稻产量和水稻灌溉需水等相关变量的变化趋势，同时，应用参数  $t$  检验和 Mann-Kendall (MK) 方法来判别这种变化趋势是否具有统计学上的显著性。参数  $t$  检验方法是一种判别序列整体长期线性趋势是否显著的有效方法。一般地，参数  $t$  检验中的  $p$  值小于 0.05，表示序列变化趋势通过 95% 显著性检验<sup>[22]</sup>。MK 方法由 Mann 在 1945 年首先提出，Kendall 在 1975 年加以改进，其优点在于不需要检验数据服从某种分布，也不受少数异常值的干扰，因此受到世界气象组织高度推荐并普遍应用于水文气象参数的变化趋势的显著性检验。如果 MK 检验得到的统计量  $Z$  值是正值，表明被检验序列呈现增加的变化趋势，负的  $Z$  值表示减

少的变化趋势，如果  $Z$  值绝对值大于 95% 置信水平统计值 1.96，表明序列呈现的变化趋势是显著的<sup>[23]</sup>。此外，在应用 MK 检验对数据样本进行趋势显著性分析前，应对相关序列进行自相关判断。如果序列存在自相关，则对序列进行处理，消除序列的自相关成分。本文应用 Yue 等<sup>[24]</sup>提出的 Trend Free Pre-Whitening 方法对存在自相关性的序列去除其自相关性。

## 2.5 模拟方案设定

未来水稻水分利用和产量的模拟研究中，选取 HadCM3 模式下 A2 和 B2 两种情景下未来气象数据为模型输入。现状取 1961—2010 年，同时，将未来 2011—2099 年分为 3 个时段即：2020s (2011—2040 年)、2050s (2041—2070 年)、2080s (2071—2099 年)。利用统计降尺度后的逐日气象数据驱动率定验

证后的 ORYZA2000 进行模拟。在灌溉处理方式上, 分别考虑传统淹水灌溉和间歇灌溉。淹水灌溉为水稻生育期田面保持 30 mm 水层。间歇灌溉选择轻度间歇方式, 田面水层消失 3 d 为灌溉临界指标。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 水稻灌溉需水及产量的历史模拟分析

利用 ORYZA2000 对研究区过去 50 年的水稻耗水量、灌溉需水量和产量进行了模拟。在此基础上, 对水稻耗水量、灌溉需水量和产量序列进行了趋势分析, 并采用参数  $t$  检验和 MK 方法检验变化趋势的显著性 (图 3)。从图 3 可以看出, 在过去

50 年来, 水稻耗水量总体上呈现明显增加趋势 (淹水和间歇灌溉下  $p$  值分别为 0.0024 和 0.0023, MK 检验  $Z$  值分别为 2.71 和 2.73)。但淹水灌溉和间歇灌溉模式下水稻灌溉需水量都呈现出下降趋势, 相比淹水灌溉 ( $p$  值为 0.2538,  $Z$  值为 -0.99), 间歇灌溉下的灌溉需水量下降更为明显 ( $p$  值为 0.1199,  $Z$  值为 -1.41)。2 种灌溉模式下水稻产量也都呈现显著的下降趋势, 且下降幅度较为一致。

引起模拟产量下降的主要原因可能是辐射下降。在过去 50 年, 辐射呈现显著的下降趋势 (下降坡度值为  $-0.0345 \text{ MJ/m}^2$ , MK 检验  $Z$  值为 -4.83) (图 4)。辐射是作物光合作用的能量来源, 这一点

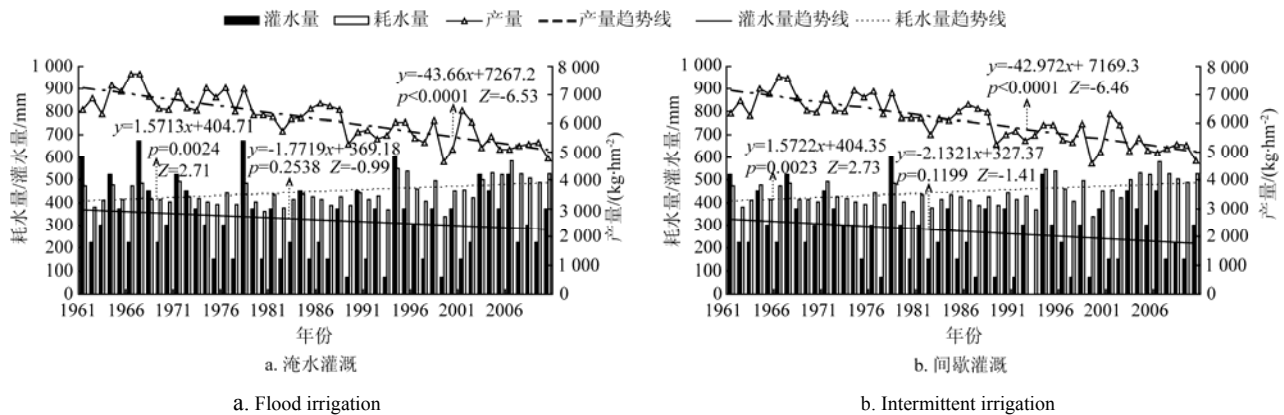


图 3 1961 - 2010 年 2 种灌溉模式下水稻灌水量、耗水量及产量的变化趋势

Fig.3 Trend of the rice irrigation water requirement, water consumption and yield under two irrigation conditions in 1961 - 2010

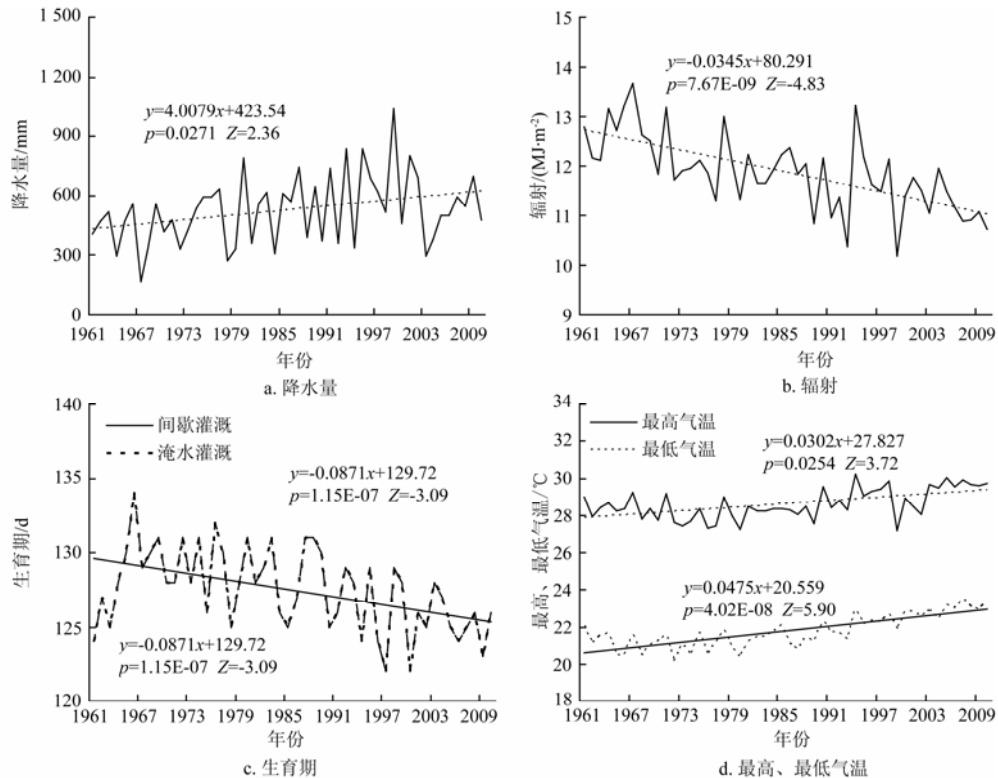


图 4 1961 - 2010 年降水量、辐射、生育期长度、最高气温、最低气温变化趋势

Fig.4 Trend of average maximum temperature, minimum temperature, precipitation, radiation and growth duration in 1961 - 2010

在包括 ORYZA2000 在内的众多作物模型都有明确体现<sup>[9]</sup>。辐射的下降直接导致光合作用减弱，从而引起水稻产量的下降。在过去 50 年里，研究区最高最低气温都呈现显著的上升趋势，两种灌溉模式下生育期呈现完全一致的显著下降趋势（ORYZA2000 模型没有考虑土壤水肥条件对生育期的影响，因此，生育期长度不受灌溉处理方式影响）（图 4）。一般情况下，气温升高虽然对光合作用有利，但其引起的水稻生育期缩短，使得水稻干物质累积过程缩短，导致产量下降。而水稻耗水量显著增加主要是由于过去 50 年最高气温和最低气温同时大幅度升高引起的。虽然水稻耗水量增加，但灌溉需水量下降，这更多是由于降水量的明显增加引起的（图 4）。

### 3.2 未来气候变化情景下水稻灌溉需水量及产量变化

以 HadCM3 模式下 1961—2010 时段平均值为基准气候现状，表 3 给出了研究区未来气候变化下模型模拟的水稻耗水量、灌溉需水量及水稻产量。从表 3 中可以看出，A2 和 B2 两种气候情景下的水

稻耗水量、灌溉需水量及产量呈现比较一致的变化规律。两种灌溉模式下，水稻耗水量在 2020s、2050s 和 2080s 均呈现不同程度的增加，且增加幅度随时间的推移逐渐变大。以 B2 情景为例，间歇灌溉模式下的水稻灌溉耗水量在未来 3 个时期较现状平均增幅为 8.00%，最高增幅为 13.20%；淹水灌溉模式下平均增幅为 8.26%，最高增幅为 13.42%。两种灌溉模式下水稻灌溉需水量呈现出同耗水量类似的变化趋势，并随着时间的推移在未来 3 个时期的增加幅度逐渐变大。以 B2 情景为例，间歇灌溉模式下水稻灌溉需水量在未来 3 个时期较现状平均增幅为 25.31%，最高增幅为 31.83%；淹水灌溉模式下水稻灌溉需水量平均增幅为 23.47%，最高增幅为 28.13%。相比水稻耗水量和水稻灌溉需水量，水稻产量在未来 3 个时期内呈现出相反的变化趋势，在 2020s、2050s 和 2080s 水稻产量逐渐减少，且降幅逐渐变大。以 B2 情景为例，间歇灌溉模式下的水稻产量在未来 3 个时期较现状平均降幅为 6.39%，最高降幅为 8.73%；淹水灌溉模式下水稻产量平均降幅为 6.02%，最高降幅为 8.12%。

表 3 ORYZA2000 模型模拟的 HadCM3 模式下未来气候情景下水稻耗水量、灌溉需水量和产量变化  
Table 3 Change of rice water consumption, irrigation water requirement and yield for ORYZA2000 model under HadCM3

气候情景 Climate scenarios	代表年 Representative years	灌溉处理 Irrigation treatment	变化量 Variation			变化率 Rate of change /%		
			耗水量 Water consumption /mm	灌溉需水量 Irrigation water requirement /mm	产量 Yield /( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	耗水量 Water consumption /mm	灌溉需水量 Irrigation water requirement /mm	产量 Yield /( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )
A2	现状	间歇灌溉	421.9	136.5	6500.5			
		淹水灌溉	424.3	184.5	6573.7			
B2	现状	间歇灌溉	425.3	139.3	6608.6			
		淹水灌溉	427.9	183.7	6686.0			
A2	2020s	间歇灌溉	435.9	150.0	6451.5	3.32	9.89	-0.75
		淹水灌溉	438.4	207.5	6531.5	3.32	12.47	-0.64
	2050s	间歇灌溉	479.5	215.0	6251.0	13.63	57.51	-3.84
		淹水灌溉	484.5	265.0	6344.0	14.19	43.63	-3.49
	2080s	间歇灌溉	537.2	227.6	5570.8	27.32	66.73	-14.30
		淹水灌溉	542.6	284.5	5657.3	27.87	54.19	-13.94
	2020s	间歇灌溉	436.3	162.5	6435.3	2.59	16.67	-2.62
		淹水灌溉	440.3	212.5	6527.9	2.91	15.69	-2.37
B2	2050s	间歇灌溉	460.4	177.5	6092.6	8.24	27.44	-7.81
		淹水灌溉	464.1	232.5	6179.8	8.46	26.58	-7.57
	2080s	间歇灌溉	481.4	183.6	6031.3	13.20	31.83	-8.73
		淹水灌溉	485.3	235.3	6143.1	13.42	28.13	-8.12

### 3.3 讨论

图 5 给出了 A2 和 B2 情景下未来 3 个时期最高最低气温、辐射、风速、降水量和生育期长度的变化情况。辐射增加和气温升高会导致水稻耗水量增加，在 2020s、2050s 和 2080s 3 个时期内，辐射和气温均呈现显著的增加趋势，且增幅逐渐变大。虽然风速的下降可能会导致水稻耗水量的减少，但辐射和气温的持续上升导致水稻耗水量在未来 3 个时期表现为增加

趋势。水稻耗水量的变化影响灌溉需水量，除此之外，降水量的变化是影响水稻灌溉需水量的主要气候因素。在未来 3 个时期，A2 和 B2 两种情景下降水量均呈现出减少趋势，且水稻耗水量在未来 3 个时期有所增加，因此，水稻灌溉需水量在未来 3 个时期均呈现更为明显的上升趋势。对于产量而言，在未来 3 个时期内，虽然辐射增加，有利于作物光合作用，增加干物质累积<sup>[25-26]</sup>，但最高最低气温显著升高，引起水稻

生育期缩短<sup>[27]</sup>,三者共同作用的结果是产量下降<sup>[28]</sup>。从图 5 中可以明显看出相比 2020s 时期,2050s 时期的气温升高幅度变大。增温引起水稻生育期缩短,致使光合作用减少,灌浆不充分。另外,更为重要的是增温可能使得水稻在 7、8 月份受到极端高温事件的影响机率增加。因此,水稻产量在此时段进一步下降。在 2080s 时段,气温进一步升高,增幅最大,由此可

能会导致水稻生长期热害加重,高温也加剧了水稻的呼吸消耗,使得水稻产量下降最为明显。相比淹水灌溉而言,尽管在未来 3 个时期间歇灌溉模式下水稻灌溉需水增幅更大,但实际灌溉需水量比淹水灌溉模式下仍有较大幅度节约,同时产量跟淹水灌溉方式下相差不大。因此,未来气候条件下,间歇灌溉仍然是有效的节水灌溉模式。

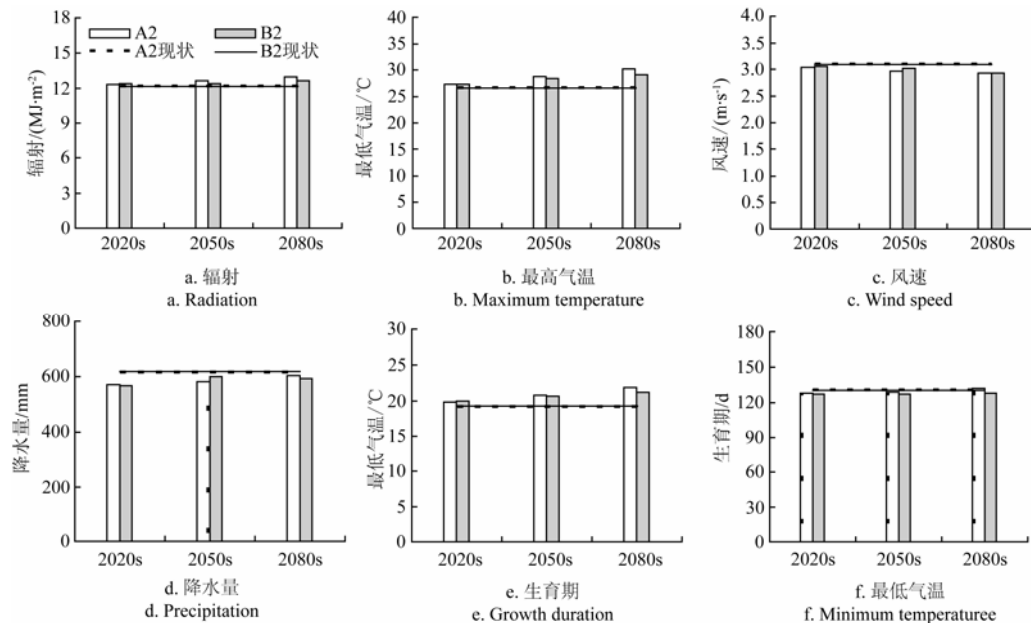


图 5 A2 和 B2 情景下未来 3 个时期主要气象变量和生育期长度

Fig.5 Main meteorological variables and growth duration in the future three periods under A2 and B2 scenarios

## 4 结 论

本文基于历史气象资料和大气环流模式 HadCM3 的统计降尺度数据,驱动 ORYZA2000 水稻模型,模拟了苏南地区两种灌溉方式下历史和未来 3 个时期(2020s, 2050s 和 2080s)水稻耗水量、水稻灌溉需水量和产量的变化规律,得到以下结论:

1) 在过去 50 年,间歇灌溉和淹水灌溉模式下水稻耗水量显著增加,而水稻灌溉需水量和产量均呈现下降趋势。生育期里气温升高、辐射下降是水稻产量下降的主要原因,降水量增加是引起灌溉需水量减少的主要气候变化因素。

2) 水稻产量在未来 3 个时期内呈现出下降趋势。随着温度的增加,水稻生育期缩短,同时增加热害发生的概率。由于持续增温的负面效应,未来 2020s、2050s 及 2080s 3 个时段内水稻产量降幅逐渐变大,但两种灌溉模式下产量基本一致。

3) 未来两种情景下,间歇灌溉和淹水灌溉模式下水稻耗水量在未来 3 个时期呈现持续的增加趋势,辐射和气温的增加是导致水稻耗水量增加的主要因素。水稻耗水量的增加和降水量减少导致了未来 3

个时期水稻灌溉需水量的明显增加。同时,在未来气候条件下,相对淹水灌溉而言,间歇灌溉模式能保持产量,减少灌溉量,仍具有很好的节水效果。

本研究中未考虑品种改良、施肥等农艺措施以及病虫害引起的水稻水分利用和产量的变化。同时,源自 GCMs 模式、统计降尺度模拟过程和作物模型参数的不确定性增加了结论的不确定性,更完善的研究工作有待进一步开展。

## [参 考 文 献]

- [1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis[M]. New York Cambridge University Press, 2007.
  - [2] 许小峰,王守荣,任国玉. 气候变化应对战略研究[M]. 北京:气象出版社,2006.
  - [3] 王卫光,彭世彰,缴锡云,等. 气候变化对作物灌溉需水量研究进展及述评[C]// 农业工程学会年会会议论文集,2010: 234—242.
- Wang Weiguang, Peng Shizhang, Jiao Xiyun, et al. Impact of climate change on crop irrigation water requirement research progress and review[C]// The proceeding of the Annual Conference of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010: 234—242. (in Chinese with English abstract)

- [4] 丛振涛, 姚本智, 倪广恒. SRA1B 情景下中国主要作物需水预测[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 38—43.  
Cong Zhentao, Yao Benzhi, Ni Guangheng. Crop water demand in China under the SRA1B emissions scenario[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(1): 38—43. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘晓英, 林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响[J]. 水利学报, 2004, 2: 77—82.  
Liu Xiaoying, Lin Erda. Impact of climate change on water requirement of main crops in North China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 2: 77—82. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张建平, 王春乙, 杨晓光, 等. 未来气候变化对中国东北三省玉米需水量的影响预测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 50—55.  
Zhang Jianping, Wang Chunyi, Yang Xiaoguang, et al. Impact forecast of future climate change on maize water requirement in three provinces of Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(7): 50—55. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李勇, 杨晓光, 叶清, 等. 1961-2007 年长江中下游地区水稻需水量的变化特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 175—183.  
Li Yong, Yang Xiaoguang, Ye Qing, et al. Variation characteristics of rice water requirement in middle and lower reaches of Yangtze River during 1961-2007[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(9): 175—183. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王卫光, 彭世彰, 孙凤朝, 等. 气候变化下长江中下游水稻灌溉需水量时空变化特征[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 656—664.  
Wang Weiguang, Peng Shizhang, Sun Fengchao, et al. Spatiotemporal characteristics of paddy irrigation water requirement changes in the Mid-Lower Reaches of Yangtze River under future climate change[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(5): 656—664. (in Chinese with English abstract)
- [9] 丛振涛, 王舒展, 倪广恒. 气候变化对冬小麦潜在产量影响的模型模拟分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(9): 46—50.  
Cong Zhentao, Wang Shuzhan, Ni Guangheng. Simulations of the impact of climate change on winter wheat production[J]. *J Tsinghua Univ: Sci and Tech*, 2008, 48(9): 46—50. (in Chinese with English abstract)
- [10] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. *Eur J Agron*, 2003, 18: 235—265.
- [11] Stockle C O, Donatelli M, Nelson R L. CropSyst, a cropping systems simulation model[J]. *Eur J Agron*, 2003, 18: 289—307.
- [12] Bouman B A M, van Keulen H, van Laar H H, et al. The 'School of De Wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview[J]. *Agric Syst*, 1996, 52: 171—198.
- [13] 丛振涛, 辛儒, 姚本智, 等. 基于 HadCM3 模式的气候变化下北京地区冬小麦耗水研究[J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1101—1107.  
Cong Zhentao, Xin Ru, Yao Benzhi, et al. Impact of climate change on water use of winter wheat with HadCM3 Model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(9): 1101—1107. (in Chinese with English abstract)
- [14] Wang W, Sun F, Luo Y, et al. Changes of rice water demand and irrigation water requirement in Southeast China under future climate change[C]// *Procedia Engineering*, 2012, 28: 341—345.
- [15] Tao F, Hayashi Y, Zhang Z, et al. Global warming, rice production, and water use in China: Developing a probabilistic assessment[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 94—110.
- [16] Wilby R L, Dawson C W, Barrow E M. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2002, 17(2): 147—159.
- [17] Harpham C, Wilby R L. Multi-site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amounts[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 312: 235—255.
- [18] Dibike Y B, Coulibaly P. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: Comparison of downscaling methods and hydrologic models[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 307: 145—163.
- [19] 赵芳芳, 徐宗学. 黄河源区未来地面气温变化的统计降尺度分析[J]. 高原气象, 2008, 27(1): 153—161.  
Zhao Fangfang, Xu Zongxue. Statistical downscaling of future temperature change in source of the Yellow River Basin[J]. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(1): 153—161. (in Chinese with English abstract)
- [20] 褚健婷, 夏军, 许崇育. SDSM 模型在海河流域统计降尺度研究中的适用性分析[J]. 资源科学, 2008, 30(12): 1825—1832.  
Chu Jianting, Xia Jun, Xu Chongyu. Suitability analysis of SDSM Model in the Haihe River Basin[J]. *Resources Science*, 2008, 30(12): 1825—1832. (in Chinese with English abstract)
- [21] Nakićenović N, Alcamo J, Davis G, et al. Special report on emissions scenarios, A special report of working group of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge University Press, 2000: 599.
- [22] 王苏斌, 郑海涛, 邵谦谦, 等. SPSS 统计分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [23] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13: 245—259.
- [24] Yue S, Pilon P, Phinne Y B. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16: 1807—1829.



- [25] Chaturvedi G S, Ingram K T. Growth and yield of low land rice in response to shade and drainage[J]. *Crop Science*, 1989, 14: 61—67.
- [26] Chang X M, Alderson P G, Wright C J. Solar irradiance level alters the growth of basil (*Ocimum basilicum* L.) and its content of volatile oils. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 63: 216—223.
- [27] 韩冰, 罗玉峰, 王卫光, 等. 气候变化对水稻生育期及灌溉需水量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(1): 29—32.  
Han Bing, Luo Yufeng, Wang Weiguang, et al. Impacts of climate change on rice growing period and irrigation water requirements[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(1): 29—32. (in Chinese with English abstract)
- [28] 赵海燕. 气候变化对长江中下游地区水稻生产的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2010.  
Zhao Haiyan. Impacts of Climate Change on Rice Production in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)

## Simulation of response of water requirement for rice irrigation to climate change

Wang Weiguang, Sun Fengchao, Peng Shizhang, Xu Junzeng, Luo Yufeng, Jiao Xiyun

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The climate change will cause the alteration of the processes of crop water consumption, and thus affect the irrigation water requirement. As one of the most important crops in China, rice accounts for 18% of the country's total cultivated area. Therefore, understanding the impacts of climate change on rice water consumption is of great significance. Investigations on response of rice irrigation water requirements to climate change are beneficial to develop adaptation strategies to climate change and thus ensure food security and the sustainable use of water resources. In this study, changes in rice yield and irrigation water requirements in the past five decades (1961-2010) under flood irrigation and intermittent irrigation were investigated using rice model ORYZA2000 based on historical meteorological data. The rice model ORYZA2000 genetic parameters were calibrated and validated using two calibration programs, DRATES and PARAM, built in the ORYZA2000 model based on two years farm experiment data in Kunshan Station. The potential impacts of future climate change on the rice yield and irrigation water requirements were also examined using validated rice model ORYZA2000. Climate data in the future were generated by the HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model version 3) of the IPCC 3rd Assessment Report under A2 and B2 emission scenarios. Statistical downscaling method (SDSM) was employed in this study to get future input meteorological data (2011-2099) (including precipitation, daily air temperature, vapor pressure, wind speed, and radiation data) in Kunshan station of the rice model ORYZA2000. Daily NCEP/NCAR reanalysis data sets during the period of 1961–2001 were used to calibrate and validate the SDSM model. The results indicated ORYZA2000 model can be used to simulate the rice index in a relative high accuracy, and thus can be used to conduct the climate change impact assessment. The SDSM performed generally well in reproducing daily meteorological data for input of rice model ORYZA2000. The simulation of changes in related variables during historical period indicated the significant increases in rice water consumption were found during the past decades. However, rice water irrigation requirements and yield present significant decreasing trends because of increasing precipitation and shorten growth duration caused by increasing air temperature and decreasing radiation, respectively. The rice water consumption will increase under both intermittent irrigation and flood irrigation in the future. Irrigation water requirements will decrease significantly due to increasing precipitation and rice water consumption in the future. Compared with that in the baseline, the rice yield will experience decrease and the decrease magnitudes will be enlarged over time due to the negative effect from increasing air temperature.

**Key words:** irrigation, climate change, models, future scenario, ORYZA2000, rice yield

(责任编辑: 曾懿婷)