

黄 亮, 谢小萍, 杨沈斌, 等. SRES A1B 情景下气候变化对长江中下游稻区单双季稻生产的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(9): 36–41.

SRES A1B 情景下气候变化对长江中下游稻区单双季稻生产的影响

黄 亮¹, 谢小萍¹, 杨沈斌², 于庚康¹, 高 苹¹

(1. 江苏省气象服务中心, 江苏南京 210008; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏南京 210044)

摘要:以长江中下游稻区单双季稻为研究对象, 采用 ORYZA2000 水稻作物模型评估 IPCC SRES A1B 温室气体排放情景下 2021—2050 年单双季稻生育期、产量及需水量相对基准时段(1961—1990 年)的变化。根据中国水稻种植区划, 对研究区域所处的 5 个水稻生态亚区分别进行水稻遗传参数的调试和确定, 并以 HWSO 土壤数据库作为 ORYZA2000 模型土壤参数的来源, 构建区域影响评估方案。结果显示: 与基准时段相比, 增温效应使 2021—2050 年单双季稻生育期缩短 2~7 d, 其中早稻生育期对增温更为敏感, 但在增温效应下单季稻产量下降幅度最高, 平均达 21%。增温效应增加了稻田蒸散, 使单季稻和双季晚稻需水量在 2021—2050 年分别增加 1.4% 和 0.9%。CO₂ 肥效作用对单双季稻产量有显著贡献, 但对单季稻产量的贡献仍不足以抵消增温的负面影响。双季早稻需水量在 CO₂ 肥效作用下仍呈现减少趋势, 与早稻生长期太阳总辐射减少、相对湿度增加及生育期缩短有密切联系。另外, A1B 情景下的气候变暖将改善稻区北部及西部山区热量条件, 使其成为潜在的双季稻区, 为提高稻区水稻总产创造了有利条件。

关键词: ORYZA2000; 稻作制度; 气候情景; 产量

中图分类号: S162.53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2013)09-0036-06

利用全球气候模式(GCM)模拟气候变化数据, 再与作物模型结合是研究人员评估气候变化对农业生产影响的重要手段^[1-6]。近年来, 关于运用区域气候模式(RCM)评估气候变化对农作物生产的影响研究已有诸多报道^[7-12]。RCM 数据时空分辨率较高, 其模拟的未来气候数据能够较好地反映区域气候变化特征。Lin 利用区域气候模式 PRECIS 和 CERES 系列作物模型, 分析 SRES A2 和 B2 情景下气候变化对中国小麦、玉米、水稻生产力的影响^[10]。Chavas 等根据 SRES A2 情景, 利用 RegCM3 区域气候模式模拟 2071—2100 年气候数据, 结合 EPIC 模型分析了中国东部地区农业生产力受气候变化的影响^[11]。Xiong 等根据 SRES A2 和 B2 情景, 提出了导致中国粮食产量下降的温度阈值^[12]。长江中下游稻区是中国重要的水稻生产区, 已有多位学者提出, 未来气候变化将影响该地区的水稻生产^[3, 13-15]。本研究拟结合水稻作物模型 ORYZA2000 分析 SRES A1B 情景下 2021—2050 年时段(2040s)水稻生产相对基准时段(1961—1990 年)的变化, 以中国水稻种植区划为依据, 重点探讨增温和 CO₂ 肥效作用对稻区单双季稻生育期、产量和水稻需水量的影响。

1 材料与方法

1.1 长江中下游稻区

长江中下游稻区位于北纬 25°~34°、东经 109°~122°之

间, 包括江苏、安徽、浙江、江西、湖北、湖南等 6 省以及上海市, 是我国重要的水稻生产区。位于稻区内的长江中下游平原是我国的三大平原之一, 水稻种植面积约占平原总面积的 78%。根据中国水稻种植区划^[16], 长江中下游稻区处于 3 个水稻生态区, 共包括 5 个水稻生态亚区(图 1)。其中, 大部分稻区处于华中单双季稻生态区, 江苏和安徽北部地区处于华北单季稻生态区, 湖南西部和湖北西南部分地区处于西南高原单双季稻生态区。各水稻生态亚区热量、降水条件及水稻种植制度如表 1 所示。近年来, 随着稻区种植结构的调整, 单双季稻生态亚区双季稻面积呈现下降趋势, 以一季中稻或晚稻为主的单季稻面积逐渐上升^[17-19]。为方便分析, 本研究将 II 1、II 3、III 1 作为双季稻区, II 2、IV 2 作为单季稻区。

1.2 土壤数据

选用联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)构建的 HWSO 土壤数据库 1.1 版。该数据结合了土壤属性数据库和栅格土壤图, 分辨率为 1 km, 拥有超过 16 000 种不同的土壤绘图单位(soil mapping units), 包含全球各地区和国家最新的土壤信息。其中, 中国区域的土壤数据主要来自第 2 次中国土壤普查。HWSO 数据将土壤分为 2 层, 即土壤表层(0~30 cm)和底层(30~100 cm)。每层拥有各自的土壤属性数据, 包括土壤结构、容重、有效含水量、酸碱度等。为了满足水稻生长模型的需要, 结合 HWSO 数据各层土壤黏土、沙土、质地、容重等参数, 运用 SPAW 模型提供的 SWCT(soil-water-characteristics)模块估算其他土壤物理属性参数, 如饱和体积含水量、田间持水量、凋萎系数、饱和水传导系数等^[15, 20]。

1.3 水稻数据

从中国气象局资料中心获取长江中下游稻区 65 个农业气象站 1981—2006 年的水稻试验资料(表 1), 包括水稻品

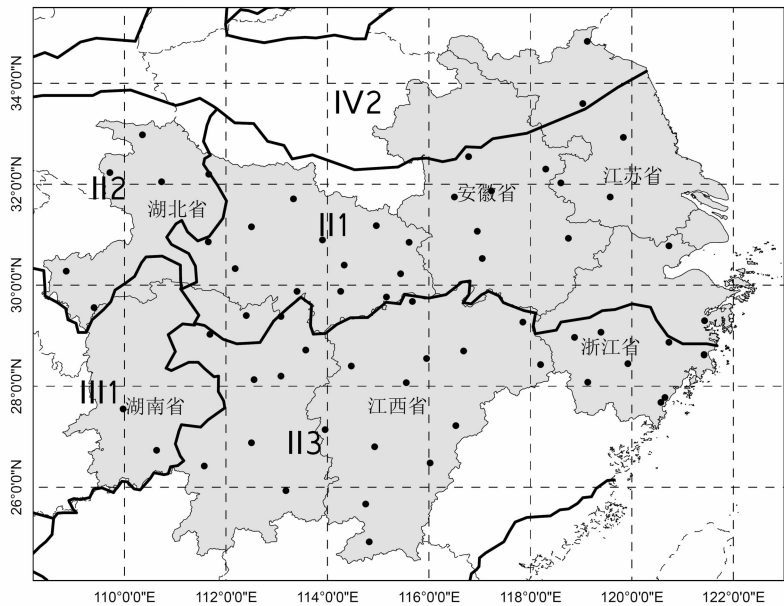
收稿日期: 2013-05-03

基金项目: 国家公益性行业(气象)科研专项(编号: GYHY201306035)。

作者简介: 黄 亮(1981—), 男, 江苏南京人, 工程师, 主要从事应用气象科研和业务工作。E-mail: newstrawman@126.com。

通信作者: 杨沈斌, 博士, 副教授, 主要从事农业气象科研与教学。

E-mail: jaasyang@163.com。



Ⅱ1、Ⅱ2、Ⅱ3分别代表长江中下游平原双单季稻亚区、川陕盆地单季稻两熟亚区、江南丘陵平原双季稻亚区；
Ⅲ1和Ⅳ2分别代表黔东南湘西高原山地单双季稻亚区和华北单季稻亚区；“·”代表农业气象站

图1 长江中下游水稻种植区划

表 1 长江中下游稻区各水稻生态亚区气候基本特征及水稻种植制度

水稻生态亚区	≥10℃积温 (℃)	降水量 (mm)	日照时数 (h)	主要种植制度
Ⅱ1	4 500 ~ 5 500	700 ~ 1 300	1 300 ~ 1 500	双季稻/(小麦、油菜)
Ⅱ2	4 500 ~ 6 000	800 ~ 1 600	700 ~ 1 000	单季稻/(小麦、油菜)
Ⅱ3	5 300 ~ 6 500	900 ~ 1 500	1 200 ~ 1 400	双季稻/(小麦、油菜)
Ⅲ1	3 500 ~ 5 500	800 ~ 1 400	800 ~ 1 100	双季稻/油菜
Ⅳ2	3 500 ~ 4 500	400 ~ 800	1 200 ~ 1 600	单季稻/小麦

种、生育期、产量等,其中拥有单季稻试验数据的站点有 26 个,多分布在安徽、江苏、湖北、浙江等省。受农业气象灾害的影响,部分站点水稻产量年际间波动较大。通过查对各年主要气象灾害,兼顾各站点试验数据的完整性,剔除了受灾严重或产量低于多年平均产量 40% 的站点或资料缺失的年份和站点,重新组织水稻试验资料,提高了数据可靠性。

1.4 ORYZA2000 模型

1.4.1 模型简介 ORYZA2000 模型由国际水稻研究所 (IRRI) 和荷兰瓦赫宁根大学联合开发,动态模拟潜在条件、氮肥胁迫、水分胁迫下的水稻生长,具有较强的机理性和普适性。模型包含多个模块,如作物生长和发育、蒸散和水分胁迫、植株氮素平衡、土壤水分平衡模块等。模型将水稻发育过程划分为 4 个阶段:基本营养生长阶段 (BVP)、光周期敏感阶段 (PSP)、穗形成阶段 (PFP)、灌浆阶段 (GFP),并采用发育阶段变量 (DVS) 定量描述水稻生理年龄。在 PFP 阶段,模型考虑了低温 (<22℃) 对穗生长的不利影响;在 GFP 阶段,考虑了高温 (>36.6℃) 对穗结实率的影响。模型计算单叶片初始光能利用率 (initial light-use efficiency) 时,引入 CO₂ 效应订正系数来模拟大气 CO₂ 浓度变化对水稻生长的影响^[21]。ORYZA2000 模型通过计算水稻植株和土壤间的氮素供需关系来模拟氮素限制对水稻生长的影响。在水分胁迫下,该模型通过计算稻田潜在蒸散和实际蒸散,并结合土壤水分平衡模型确定水分胁迫对水稻生长的影响。土壤水分平衡模型用

于模拟稻田土壤含水量和土壤水势的动态变化,并向蒸散和水分胁迫模块反馈土壤水势信息以确定是否存在水分胁迫。需要注意的是,ORYZA2000 模型在上述模式下均忽略杂草和病虫害对水稻生产的影响。

1.4.2 模型定标与验证 由于研究区域范围较广,各地稻作制度和水稻品种时空分布差异较大,因此以水稻生态亚区为分区,确定各稻区代表性水稻品种的遗传参数,包括水稻发育速率、相对叶片生长速率、叶片衰老速率、茎秆存留系数。干物质分配系数和比叶面积系数采用模型默认值。结合农业气象站水稻试验数据,采用标准差校准法对各稻区水稻遗传参数进行定标^[22]。该方法采用 3 年试验数据进行 3 次校准和验证,最终取验证年中标准差最小的遗传参数作为该区域代表性品种的参数。然而,该方法容易出现无效模拟 (如生育期模拟值无意义或模拟出错)。因此,尽量选择品种相同或生育期相近站点的试验数据。Ⅱ1 和 Ⅱ3 稻区农业气象站分布较多,为简化定标过程,选择稻区覆盖范围的各省 2~4 个站点用于定标。对于单季稻区,定标一季稻的遗传参数;对于双季稻区,定标早稻、晚稻、一季稻的遗传参数。Ⅱ3 稻区只有 1 个站点有单季稻的观测数据,Ⅲ1 没有单季稻观测数据,因此,未进行一季稻参数的定标。最后,各稻区内每个站点选择 2 年的实测生育期和产量用于验证。由表 2 可知,Ⅱ1 和 Ⅱ3 稻区水稻参数定标结果误差较大,这主要是由于 2 个稻区内水稻品种和物候期时空差异较大,导致参数定标困难,但

表 2 ORYZA2000 模型参数标定结果验证

水稻生态 亚区	生育期模拟值与实测值 绝对误差(d)			产量模拟值与实测值 根均方误差(%)		
	早稻	晚稻	一季稻	早稻	晚稻	一季稻
Ⅱ1	5	7	3	22.2	29.3	18.6
Ⅱ2	—	—	2	—	—	11.9
Ⅱ3	3	6	—	19.4	23.0	—
Ⅲ1	2	—1	—	9.1	8.6	—
Ⅳ2	—	—	2	—	—	5.5

注：“—”代表与实测值没有误差。

定标结果能够反映各稻区水稻品种和种植制度差异。

1.5 影响评估方案

将 A1B 气候情景数据输入到 ORYZA2000 模型中,模拟 2040s 各稻区水稻生育期、产量、需水量相对基准时段的变化,讨论温度升高和大气 CO₂ 浓度增加对稻区水稻生产的影响。考虑到未来气候变暖对长江中下游稻区水稻生长季热量条件的影响,针对单季稻区,不但模拟了一季稻的生长,还模拟了 2040s 双季稻生长,采用 Ⅱ1 稻区双季稻代表品种。对于双季稻区,则分别模拟早稻、晚稻和一季稻的生长。其中,Ⅱ3 和 Ⅲ1 稻区单季稻均使用 Ⅱ1 稻区代表品种替代。将 ORYZA2000 模型中大气 CO₂ 浓度参数值设定为 A1B 情景下每年大气 CO₂ 浓度估计值。综合各稻区水稻播种期,设定一季稻播种期为 5 月 20 日,早稻为每年日平均温度稳定通过 13℃ 的初始日期(采用五日滑动平均法),晚稻为 6 月 22 日。参考近年来各省氮肥施用量数据,设定总氮肥施用量为 200 kg/hm²,移栽期、分蘖期、拔节期、孕穗期施肥比例分别为 30%、30%、30%、10%。采用自动灌溉方式,即当土壤含水量低于 0.3 m³/m³ 时自动灌溉 75 mm 水量。

表 3 A1B 情景下 2040s 水稻生长季(3—10 月)月平均气候要素相对基准时段(1961—1990 年)的变化

月份 (月)	基准时段(1961—1990 年)				2040s(2021—2050 年)			
	$R(\text{MJ}/\text{m}^2)$	$T_{\min}(\text{℃})$	$T_{\max}(\text{℃})$	$P(\text{mm})$	$\Delta R(\%)$	$\Delta T_{\min}(\text{℃})$	$\Delta T_{\max}(\text{℃})$	$\Delta P(\%)$
3	501.2	6.8	16.8	144.8	0.1	2.0	2.0	-4.0
4	586.1	11.3	21.8	170.2	-0.1	2.1	2.2	-1.4
5	683.4	15.9	26.8	159.0	-2.4	2.4	2.1	8.8
6	638.4	20.3	29.9	197.7	-1.5	2.1	2.0	4.5
7	752.1	22.6	33.1	130.9	-3.3	1.9	1.4	12.0
8	699.1	22.1	32.5	133.5	0.9	2.2	2.2	-8.4
9	586.5	18.5	28.9	87.0	-0.5	2.3	2.2	6.7
10	505.3	11.5	22.2	40.3	2.2	2.4	2.4	-6.6
年平均	6 576.6	11.2	21.5	1 228.1a	-0.3	2.1	2.2	1.6

注: R 和 ΔR 分别为月平均太阳总辐射及其相对变化; T_{\min} 和 ΔT_{\min} 分别为月平均最低温度及其相对变化; T_{\max} 和 ΔT_{\max} 分别为月平均最高温度及其相对变化; P 和 ΔP 分别为月平均降水量及其相对变化。

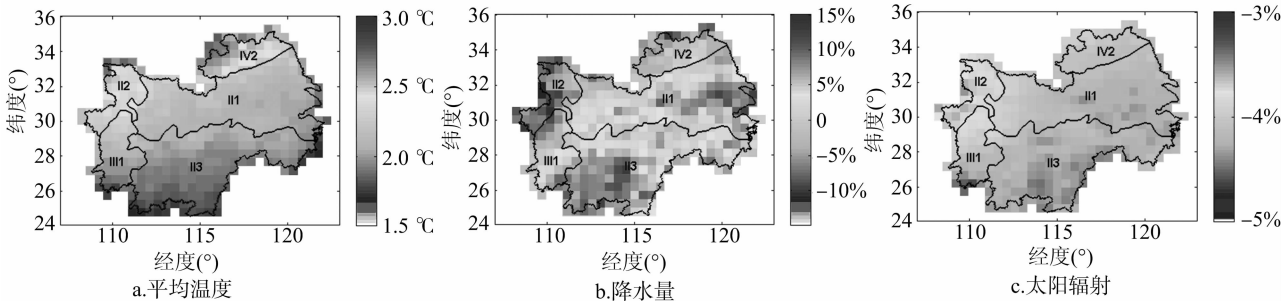


图2 A1B情景下2040s长江中下游稻区水稻生长季(3—10月)各气候要素相对基准时段(1961—1990年)的变化

1.6 统计分析模拟结果

从 ORYZA2000 模拟结果中提取各格点水稻产量、生育期、实际蒸腾、蒸发量数据。将实际蒸腾和蒸发量数据求和,作为水稻需水量。计算 2040s 和基准时段上述变量 30 年平均值,并统计年际变化率,同时计算 2040s 各稻区上述变量相对基准时段的变化。采用 SPSS 13.0 软件进行方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 A1B 情景下长江中下游稻区气候变化特征

由表 3 可知,相对基准时段 2040s 水稻生长季各月平均最高和最低温度的升高幅度相近,除最热月 7 月温度有小幅升高外,其他各月温度升高幅度都在 2℃ 以上。此外,相对基准时段 2040s 降水量在 5—7 月连续增加,容易形成洪涝、连阴雨等不利早稻生产的气象灾害。8 月温度升高,降水减少,容易形成高温天气,威胁中晚稻抽穗扬花,造成产量下降。2040s 水稻生长季平均温度、太阳总辐射和降水量相对基准时段的变化还表现出较大的空间差异(图 2)。由南向北温度升高幅度逐渐增大。处于稻区北部的Ⅳ2 和Ⅱ2 增温幅度相对较大,Ⅱ3 增温幅度最小。太阳总辐射变化和降水量变化局域差异性一致。降水量明显增加(>5%)区域集中在Ⅱ3 的中南部和Ⅱ1 的中东部地区,分别对应湖南和江西中南部以及江苏和安徽南部地区。该区域太阳辐射相应减少,幅度在 1% 以上。降水量减少 4% 的区域大多分布在Ⅳ2 北部和Ⅱ2 区域,分别对应江苏和安徽的北部地区以及湖北省西部。该区域太阳辐射增加幅度超过 0.2%。评估方案中设定自动灌溉模式,降低了降水变化对水稻生产的影响。因此,温度和太阳总辐射变化是影响模拟结果的主要气候因素。

2.2 气候变化对单季水稻生产的影响

2.2.1 生育期变化 从表 4 可以看出,在 A1B 情景下,长江中下游稻区单季稻生育期平均缩短约 3 d,由南向北呈现逐步增大趋势。其中,位于稻区北部的Ⅳ2 和Ⅱ2 水稻生育期受增温影响较大,平均缩短 6 和 4 d。Ⅱ1 水稻生育期缩短天数(2 d)小于稻区南部Ⅱ3 和Ⅲ1 地区,这可能与南部山区单季水稻生育期受增温影响相对较大有关。

2.2.2 产量变化 仅考虑增温效应时,2040s 单季水稻平均产量相对基准时段下降约 21%。其中,Ⅱ1 产量下降最大,为 22.4%,各水稻生态亚区产量变化差异较小,这表明增温是导致整个稻区水稻减产的主要原因。考虑 CO₂ 肥效作用时,2040s 单季水稻平均减产约 11%。较仅考虑增温效应时,减产幅度降低了 10%(表 4)。图 3-a 显示了 CO₂ 肥效作用下单季稻产量变化的空间分布情况。可以看出,减产幅度在 15% 以上的区域集中在Ⅱ1 中西部、Ⅱ2 北部、Ⅱ3 中西部区

域,对应湖南和湖北省中部、江西中北部以及安徽中部地区。小幅增产区域多零星分布在Ⅱ1 和Ⅱ3 稻区。

2.2.3 水稻需水量变化 温度升高促进水稻蒸腾作用,导致水稻需水量增加。仅考虑增温效应时,2040s 单季稻需水量相对基准时段平均增加了 1.4%(表 4)。增温缩短了水稻生长期,除Ⅱ3 稻区外,其他各稻区单季稻需水量均表现出增加态势。其中,Ⅳ2 稻区单季稻需水量增加最大,为 4.6%。考虑 CO₂ 的肥效作用,各稻区单季稻需水量均呈现增加趋势,全区 2040s 单季稻需水量相对基准时段平均增加了 2.4%。图 3-b 显示了 CO₂ 肥效作用下单季稻需水量变化的空间分布情况。可以看出,大部分稻区单季稻需水量都呈现增加态势。其中,增加幅度超过 5% 的区域集中在Ⅱ1 西部、Ⅱ2 北部、Ⅳ2 中西部地区,主要对应江苏和安徽的北部以及湖北省中北部。该区域减产幅度在 10% 以上,表明未来气候变化下该区域单季稻水分利用率降低的可能性较大。

表 4 A1B 情景下长江中下游稻区 2040s 单季稻生育期、产量、水稻需水量相对基准时段的变化

水稻生态亚区	基准时段(1961—1990 年)			2040s - N*			2040s - Y*	
	Ds(d)	Y(kg/hm ²)	ET(mm)	ΔDs(d)	ΔY(%)	ΔET(%)	ΔY(%)	ΔET(%)
Ⅱ1	140	7 792.1	682	-2	-22.4	1.9	-13.2	3.0
Ⅱ2	150	5 575.3	659	-4	-21.5	2.5	-11.6	3.8
Ⅱ3	139	7 109.5	618	-3	-19.1	-0.2	-8.1	0.6
Ⅲ1	145	6 015.3	627	-3	-21.0	0.1	-10.4	0.8
Ⅳ2	142	7 202.8	783	-6	-20.0	4.6	-10.9	5.4

注:2040s - N* 表示不考虑 CO₂ 肥效作用;2040s - Y* 表示考虑大气 CO₂ 肥效作用;Ds 和 ΔDs 分别表示生育期天数及其相对变化;Y 和 ΔY 分别表示产量及其相对变化;ET 和 ΔET 分别表示水稻蒸发量及其相对变化。

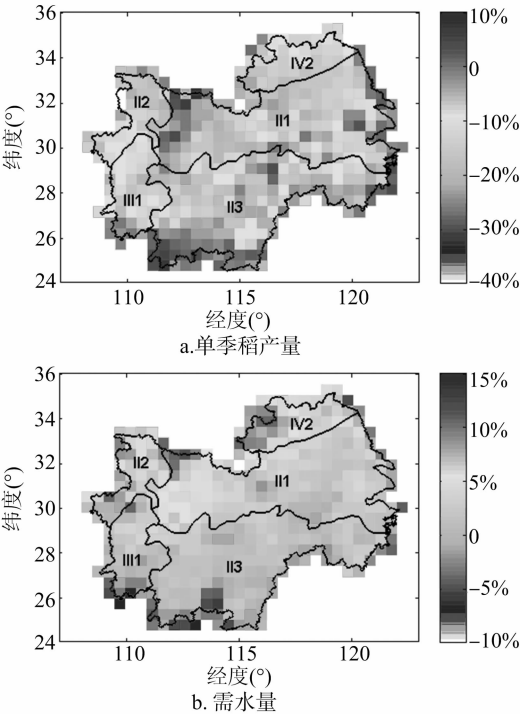


图3 考虑CO₂肥效作用时,A1B情景下2040s单季稻产量和需水量相对基准时段的变化

2.3 气候变化对双季稻生产的影响

2.3.1 生育期变化 从表 5 和表 6 可以看出,增温效应下,2040s 全稻区早稻生育期相对基准时段平均缩短约 5 d,晚稻约 4 d,表明早稻生育期对温度升高更加敏感。Ⅲ1 稻区早稻

与晚稻生育期缩短天数差异较大。其中早稻生育期缩短 7 d,晚稻生育期缩短 2 d,因此增温效应对该稻区早稻生育期影响更为明显。增温改善了 2040s Ⅱ2 和Ⅳ2 稻区的热量条件,Ⅱ2 和Ⅳ2 稻区成为潜在的双季稻区。与基准时段双季稻区平均早稻和晚稻生育期相比,Ⅱ2 和Ⅳ2 稻区早稻和晚稻生育期均呈现增加趋势,但增加幅度≤4 d,表明两稻区在 2040s 双季稻生长季的平均热量水平略低于基准时段双季稻区的平均水平。

2.3.2 产量变化 由表 5 和表 6 可知,在增温效应下,2040s 全稻区早稻平均产量相对基准时段减产 11.5%,晚稻减产 13.2%,表明增温对晚稻产量的影响较大,这与其生长期经历更多的极端高温天气有关。在 CO₂ 肥效作用下,2040s 双季稻区水稻产量均显著提升。早稻平均产量相对基准时段增加了 4.4%,晚稻产量平均增加了 4.6%。CO₂ 肥效作用对早稻增产的贡献达 15% 以上,对晚稻的贡献超过 17%。由图 4 可知,早稻增产超过 10% 的区域主要集中在Ⅱ1 中西部区域和Ⅲ1 西部,形成连片的高增产区域,对应安徽中部、湖北中南部以及湖南中西部地区。晚稻增产在 10% 以上的区域主要集中在Ⅱ1 的北部一线,对应湖北省中北部、安徽中部、江苏中部地区。其他各区也有零星或小片分布的高增产区。早稻减产在 5% 以上的区域主要集中在Ⅱ1 的东南区域,对应浙江东部沿海地区。晚稻减产在 5% 以上的区域则主要集中在Ⅱ3 南部地区,对应江西和湖南的南部地区。作为潜在双季稻区,不考虑 CO₂ 肥效作用时,Ⅱ2 和Ⅳ2 稻区在 2040s 的早稻平均产量相对基准时段双季稻区分别低 4.8% 和 21.1%。Ⅱ2 和Ⅳ2 稻区在 2040s 的晚稻平均产量相对基准时段双季稻

表 5 A1B 情景下长江中下游稻区 2040s 早稻生育期、产量和水稻需水量相对基准时段的变化

水稻生态亚区	基准时段(1961—1990 年)			2040s - N *			2040s - Y *	
	<i>Ds</i> (d)	<i>Y</i> (kg/hm ²)	<i>ET</i> (mm)	ΔDs (d)	ΔY (%)	ΔET (%)	ΔY (%)	ΔET (%)
Ⅱ 1	108	6 586.2	502	-4	-10.1	0.6	6.1	1.1
Ⅱ 3	107	5 621.4	461	-5	-14.0	-5.3	1.9	-5.4
Ⅲ 1	113	5 603.8	479	-7	-10.5	-5.9	5.2	-6.1
Ⅱ 2 **	109	5 937.1	481	1	-4.8	3.9	10.3	4.0
Ⅳ 2 **	109	5 937.1	481	4	-21.1	27.6	-9.6	28.5

注:2040s - N * 表示不考虑 CO₂ 肥效作用;2040s - Y * 表示考虑 CO₂ 肥效作用;“ ** ”表示以Ⅱ 1、Ⅱ 3、Ⅲ 1 区域基准时段水稻生育期、产量、需水量平均值作为计算Ⅱ 2 和Ⅳ 2 区域上述变量 2040s 相对变化率的参照值;*Ds* 和 ΔDs 分别为生育期天数及其相对变化;*Y* 和 ΔY 分别为产量及其相对变化;*ET* 和 ΔET 分别为水稻蒸发量及其相对变化。

表 6 A1B 情景下长江中下游稻区 2040s 晚稻生育期、产量和水稻需水量相对基准时段的变化

水稻生态亚区	基准时段(1961—1990 年)			2040s - N *			2040s - Y *	
	<i>Ds</i> (d)	<i>Y</i> (kg/hm ²)	<i>ET</i> (mm)	ΔDs (d)	ΔY (%)	ΔET (%)	ΔY (%)	ΔET (%)
Ⅱ 1	132	7 343.1	484	-4	-11.7	1.4	8.0	2.7
Ⅱ 3	130	7 837.6	472	-7	-16.5	-0.8	1.3	0.3
Ⅲ 1	132	5 789.9	464	-2	-11.4	4.8	6.9	6.1
Ⅱ 2 **	131	6 990.2	473	2	-12.6	-2.2	3.2	-1.3
Ⅳ 2 **	131	6 990.2	473	4	-14.5	20.4	3.6	22.5

注:2040s - N * 表示不考虑 CO₂ 肥效作用;2040s - Y * 表示考虑 CO₂ 肥效作用;“ ** ”表示以Ⅱ 1、Ⅱ 3、Ⅲ 1 区域基准时段水稻生育期、产量、需水量的平均值作为计算Ⅱ 2 和Ⅳ 2 区域上述变量 2040s 相对变化率的参照值;*Ds* 和 ΔDs 分别代表生育期天数及其相对变化;*Y* 和 ΔY 分别代表产量及其相对变化;*ET* 和 ΔET 分别代表水稻蒸发量及其相对变化。

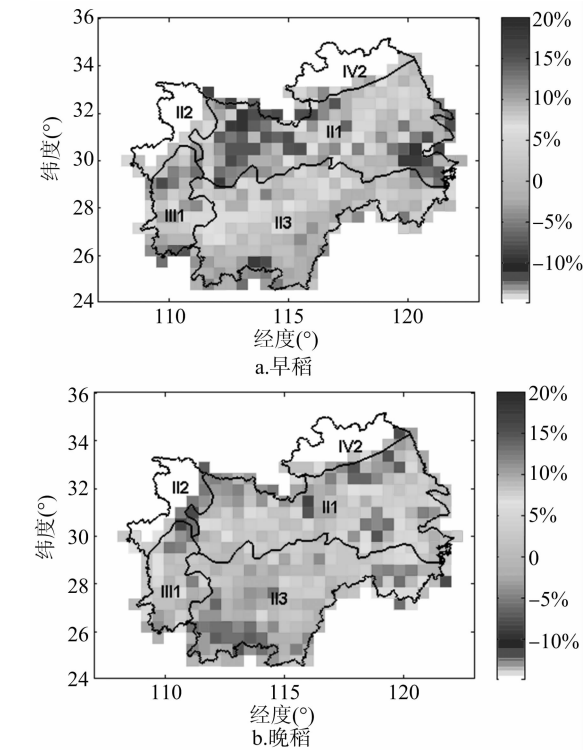


图 4 考虑 CO₂ 肥效作用时, A1B 情景下 2040s 长江中下游双季稻区早稻和晚稻产量相对基准时段的变化

区分别低 12.6% 和 14.5%, 表明该时期 2 个稻区早晚稻产量水平均低于基准时段双季稻区。CO₂ 肥效作用显著提高了潜在双季稻区早晚稻的产量水平, 对早稻产量贡献超过 11%, 对晚稻的贡献超过 15%。对于Ⅳ 2 稻区, 尽管晚稻产量高于基准时段双季稻区晚稻平均产量水平, 但 CO₂ 肥效作用不能缓解该稻区早稻生长期热量条件不足对早稻生产的影响。

2.3.3 水稻需水量变化 由表 5 和表 6 可知, 考虑增温效应

时, 2040s 双季稻区早稻需水量相对基准时段的变化与晚稻需水量变化存在一定差异。早稻平均需水量减少 2.7%, 晚稻平均需水量增加 0.9%。Ⅱ 3 和Ⅲ 1 稻区早稻需水量相对基准时段减少 5% 以上, 与增温作用下早稻生育期缩短有关。另外, 2 个稻区早稻生长期降水偏多, 导致太阳总辐射减少, 空气相对湿度增加。在 CO₂ 肥效作用下, 早稻与晚稻需水量变化仍然存在明显差异。Ⅱ 3 和Ⅲ 1 稻区早稻需水量仍呈现减少趋势, 表明早稻生育期缩短和太阳总辐射、相对湿度等气候要素变化是早稻蒸散减少的主要原因。与早稻不同, 晚稻需水量对 CO₂ 肥效作用表现为正响应。较仅考虑增温效应时, 晚稻平均需水量增加了 1.2%。图 5 显示了考虑 CO₂ 肥效作用时早晚稻需水量相对基准时段变化的空间分布, 由此可以看出, 二者存在明显差异。除Ⅱ 1 稻区早稻需水量呈现微弱的增加外, 大部分双季稻区早稻需水量减少。与此相反, 大部分稻区晚稻需水量增加, 其中增幅在 5% 以上的区域多集中在Ⅱ 1 和Ⅲ 1 的西部, 以及Ⅱ 3 的东部小片区域。考虑 CO₂ 肥效作用时, 潜在双季稻区Ⅱ 2 和Ⅳ 2 早晚稻需水量均增加, 较仅考虑增温效应时平均提高了 1%。

3 结论与讨论

本研究讨论了 A1B 情景下未来气候变化对长江中下游稻区单双季稻生产的影响, 模拟结果与同类研究结论相似^[6, 13-15]。温度升高将加速水稻生育期进程, 缩短水稻生长期。增温是造成水稻减产的主要气候因素。CO₂ 肥效作用能够提升稻区水稻产量的整体水平, 但受到局地气候环境因素的影响, 水稻生育期和产量变化的区域差异较大。作为潜在双季稻区, Ⅱ 2 和Ⅳ 2 区域在 2040s 的热量条件还未达到基准时段双季稻区的热量水平。尽管部分水稻生态亚区基准时段单季稻产量水平高于双季晚稻, 但在未来气候变化下, 种植双季稻可提高水稻总产。有学者认为, CO₂ 浓度升高会引起植

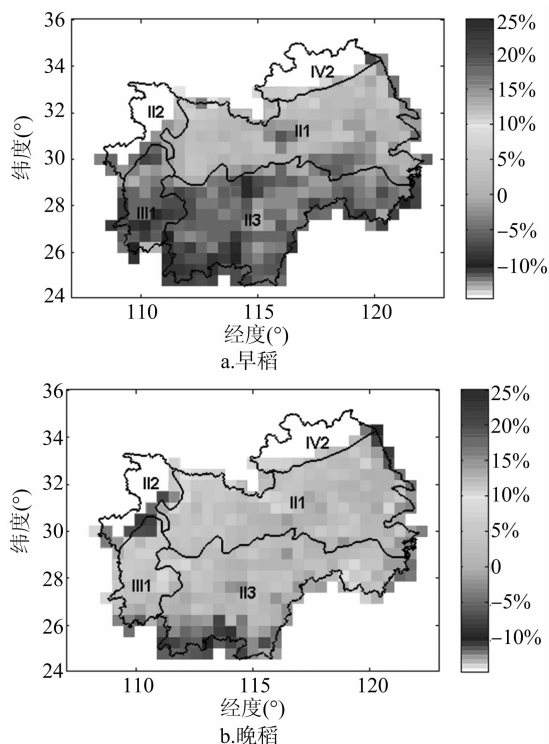


图5 考虑CO₂肥效作用时, A1B情景下2040s长江中下游双季稻区早稻和晚稻需水量相对基准时段的变化

物气孔关闭,减少蒸腾,导致未来气候变化下作物蒸腾减弱^[23-25]。也有学者认为,随着CO₂浓度升高,作物光合速率和蒸腾速率有上升趋势^[26]。本研究的模拟结果还存在较多不确定性,主要源自A1B气候情景数据本身、ORYZA2000模型及模型参数定标、影响方案中试验参数的设定等^[27-28]。例如,ORYZA2000模型中主要土壤参数是由SWCT模块估算得到,其精度还需要进一步验证。山区土壤类型多不适宜种植水稻,因此,方案中土壤类型的确定方法还需要进一步完善。另外,定标的水稻遗传特征参数多代表20世纪90年代的水稻品种,不能代表改良水稻品种的特性。同时,代表性水稻品种对增温和大气CO₂肥效响应存在差异,也增加了结果的不确定性。在后续研究中,将针对上述问题进一步优化方案,同时针对影响评估结果,建立适应性措施,如改良品种、调整播种期、调整水稻种植制度、改善水利设施等。

参考文献:

- [1] 金之庆,葛道阔,石春林,等. 东北平原适应全球气候变化的若干粮食生产对策的模拟研究[J]. 作物学报,2002,28(1):24-31.
- [2] 陈华,金之庆,葛道阔,等. 一种用于评价全球气候变化对中国南方水稻生产影响的效应模型——RCCMOD[J]. 江苏农业学报,2004,20(3):129-134.
- [3] 葛道阔,金之庆. 气候及其变率变化对长江中下游稻区水稻生产的影响[J]. 中国水稻科学,2009,23(1):57-64.
- [4] 裘国旺,王馥棠. 气候变化对我国江南双季稻生产可能影响的数值模拟研究[J]. 应用气象学报,1998,9(2):24-32.
- [5] 张宇,王馥棠. 气候变暖对中国水稻生产可能影响的研究[J]. 气象学报,1998,56(3):369-376.
- [6] Kang Y H, Khan S, Ma X Y. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security - A review[J]. Progress in

Natural Science,2009,19:1665-1674.

- [7] 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.
- [8] Xiong W, Matthews R, Holman I, et al. Modelling China's potential maize production at regional scale under climatic change[J]. Climatic Change,2007,85:433-451.
- [9] 熊伟,居辉,许吟隆,等. 气候变化下我国小麦产量变化区域模拟研究[J]. 中国生态农业学报,2006,14(2):164-167.
- [10] Lin E D. Agricultural vulnerability and adaptation to global warming in China[J]. Water, Air, and Soil Pollution,1996,92:63-73.
- [11] Chavas D R, Cesa L R, Thomson A M, et al. Long-term climate change impact on agricultural productivity in Eastern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2009,149:1118-1128.
- [12] Xiong W, Lin E D, Ju H, et al. Climate change and critical threshold in China's food security[J]. Climatic Change,2007,81:205-221.
- [13] 赵海燕. 气候变化对长江中下游地区水稻生产的影响及适应性研究[M]. 北京:中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,2006.
- [14] 姚凤梅,张佳华,孙白妮,等. 气候变化对中国南方稻区水稻产量影响的模拟和分析[J]. 气候与环境研究,2007,12(5):659-666.
- [15] 杨沈斌,申双和,赵小艳,等. 气候变化对长江中下游稻区水稻产量的影响[J]. 作物学报,2010,36(9):1519-1528.
- [16] 程式华,李建. 现代中国水稻[M]. 北京:金盾出版社,2007.
- [17] 胡忠孝. 中国水稻生产形势分析[J]. 杂交水稻,2009,24(6):1-7.
- [18] 石英. RegCM3对21世纪中国区域气候变化的高分辨率数值模拟[M]. 北京:中国科学院大气物理研究所,2010.
- [19] Shi Y, Gao X J, Wang Y G, et al. Simulation and projection of monsoon rainfall and rain patterns over Eastern China under global warming by RegCM3[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters,2009,2(5):1-6.
- [20] 魏怀斌,张占庞,杨金鹏. SWAT模型土壤数据库建立方法[J]. 水利水电技术,2007,38(6):15-18.
- [21] Jansen D M. Potential rice yields in future weather conditions in different parts of Asia[J]. Netherlands Journal of Agricultural Science,1990,38:661-680.
- [22] 熊伟,林而达,杨婕,等. 作物模型区域应用两种参数校准方法的比较[J]. 生态学报,2008,28(5):2140-2147.
- [23] Guo R P, Lin Z H, Mo X G, et al. Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management,2010,97(8):1185-1194.
- [24] 蒋跃林,张庆国,张仕定,等. 小麦光合特性、气孔导度和蒸腾速率对大气CO₂浓度升高的响应[J]. 安徽农业大学学报,2005,32(2):169-173.
- [25] 罗卫红, Yoshimoto M, 戴剑锋,等. 开放式空气CO₂浓度增高对水稻冠层微气候的影响[J]. 应用生态学报,2002,13(10):1235-1239.
- [26] 房世波,沈斌,谭凯炎,等. 大气[CO₂]和温度升高对农作物生理及生产的影响[J]. 中国生态农业学报,2010,18(5):1116-1124.
- [27] Webster M, Forest C, Reilly J, et al. Uncertainty analysis of climate change and policy response[J]. Climatic Change,2003,61(3):295-320.
- [28] Tao F L, 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.