

RCPs 情景下福建省水稻生产的适应性调整模拟研究

周桐宇¹ 江敏^{1,2,*} 孙汪亮¹ 孙彬¹

(¹ 福建农林大学 作物科学学院, 福州 350002; ² 福建农林大学 作物遗传育种与综合利用教育部重点实验室, 福州 350002; *通讯联系人, E-mail: fjaujm@163.com)

Simulation of Rice Adaptability Adjustment in Fujian Province Under RCPs Scenarios

ZHOU Tongyu¹, JIANG Min^{1,2,*}, SUN Wangliang¹, SUN Bin¹

(¹College of Crop Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; ²Key Laboratory of Ministry of Education for Genetics, Breeding and Multiple Utilization of Crops, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; *Corresponding author, E-mail: fjaujm@163.com)

Abstract: 【Objective】 The impact of climate change on agricultural production has become increasingly obvious, and some adaptive adjustments on crop cultivation can significantly reduce the negative effects of future climate change.

【Method】 Based on the coupling of the BCC_CSM climate model and the crop model CERES-Rice, we selected the most adaptive rice varieties and the best sowing dates for each rice growing region in Fujian Province, China under the two scenarios of RCP4.5 and RCP8.5 (named after a possible range of radiative forcing values in 2100 relative to pre-industrial values +4.5, and +8.5 W/m², respectively), and then we assessed their changes in rice yield, yield stability and the overall output of rice. 【Result】 The simulated yields of early rice with adaptive adjustments in the double cropping rice region in southeastern Fujian under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios increase by 1.6% and 1.9%, respectively compared with those without adaptive adjustments; and for late rice, by 13.5% and 9.8%, respectively. In double cropping rice region in northwestern Fujian, the simulated yields of early rice with adaptive adjustments increased by 1.4% and 1.0% under the two climate change scenarios compared with those without adaptive adjustments; and for the late rice, by 11.5% and 7.9%. The simulated yields of single rice with adaptive adjustments increased by 14.1% and 13.7% under the two climate change scenarios compared with those without adaptive adjustments. With adaptive adjustments, the overall output of rice in Fujian under the two climate change scenarios increased by 9.3% and 10.5%. 【Conclusion】 Climate change had adverse effects on rice yield in Fujian, and some adaptive adjustments could be taken to alleviate the negative impact.

Key words: climate change; RCPs scenarios; rice; adaptability measure; crop model

摘要: 【目的】 气候变化对农业生产的影响日趋明显。分析未来气候变化所产生的影响, 模拟调整作物耕作和栽培措施, 为有效减轻未来气候变化带来的负效应提供参考。【方法】 根据联合国政府间气候变化专门委员会第5次工作报告中未来可能的温室气体排放情况, 以 BCC_CSM 模式模拟未来的气候变化情景, 选取 RCP4.5 和 RCP8.5 两种典型浓度路径情景, 与作物模型 CERES-Rice 耦合, 筛选出了未来气候变化条件下福建省各稻区可能的最佳品种和播期, 并研究分析了品种更替和播期调整后的水稻单产、稳产性以及全省水稻总产的变化。【结果】 在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 闽东南双季稻区早稻的模拟产量较未作适应性调整分别增加 1.6% 和 1.9%, 晚稻的模拟产量依次增加 13.5% 和 9.8%; 闽西北双季稻区早稻的模拟产量依次提高 1.4% 和 1.0%, 晚稻的模拟产量依次提高 11.5% 和 7.9%; 闽西北山地单季稻区一季稻的模拟产量分别增加 14.1% 和 13.7%。在综合考虑两种适应性措施后, 福建省各稻区总产也较当前明显提高, 在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下, 分别提高 9.3% 和 10.5%。【结论】 未来气候变化对福建省水稻产量有不利影响, 可采取一定的适应性措施缓解负效应。

关键词: 气候变化; RCPs 情景; 水稻; 适应性措施; 作物模型

中图分类号: S181; S511.01

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2018)03-0265-12

收稿日期: 2017-08-29; 修改稿收到日期: 2017-11-09。

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2014J01091); 福建农林大学发展基金资助(CXZX2016165, CXZX2017238)。

近年来随着气候变化日益加剧, 极端天气频发、生态环境恶化对农业造成的不利影响日益严重^[1-2]。国内外关于主要粮食作物的研究结果中, 气候变化对粮食作物产量的消极影响较之于其积极影响更为普遍^[3-5]。然而, 在上述研究中, 大部分学者均假设粮食的生产方式和田间管理措施在未来保持不变。这样简化的研究设计可以更为直观地展现气候变化对粮食生产带来的影响, 但所得出的各种结论难免过于悲观。随着气候变化不断为人们所重视, 农民必将采取有别于当前的农业生产方式和田间管理措施, 例如, 调整粮食播期以避免高温、季节性干旱等农业气象灾害; 采用耐高温品种来适应变暖的气候和极端高温的出现; 提高复种指数以充分利用热量资源等^[6-8]。因此, 在评价气候变化对粮食生产影响时, 考虑采用相应的措施后将更为科学合理。

观测试验和模型模拟是研究气候变化对农业生产影响的两种主要方法^[9]。观测试验方法主要是在田间或者温室条件下, 通过控制 CO₂ 浓度或者温度来研究气候要素的变化对作物生产的影响, 是揭示气候变化对作物影响机理的重要途径^[10], 其缺点是构建的作物生长环境与田间实际情况很难一致, 对各气象因子之间的交互研究也受到一定限制, 因此在使用中存在很大的局限性。模型模拟方法则通常采用统计回归模型或者作物机理模型, 利用未来气候情景, 预估气候变化对作物生长的影响^[11]。其中, 机理模型所设置的对作物生理生态学机制的描述, 可更准确地解释作物对气象要素变化的响应机制, 在气候变化研究中得到广泛应用^[12,13]。鉴于观测试验方法的局限性, 而模型模拟较观测试验具有成本低、时效高、变量易于控制等优点, 目前利用作物模型耦合气候模式逐渐成为气候变化评价研究中较为普遍的方法。但是由于大多数作物模型是基于样点的小尺度机理模型, 而气候模式提供的是大范围大尺度的气候情景, 在区域研究中要将两者结合必须对作物模型升尺度^[14]或对气候模式降尺度^[11]。随着科学技术的进步, 气候变化影响评价研究的深度和广度也有新进展。研究方法不再限于单一确定的气候情景, 而是基于多情景多模型、参数随机扰动下的集合模拟^[15]。近年来, 也有学者将社会经济发展情景与区域气候模式、水文模型与作物生长模型整合嵌套, 实现气候变化对农业影响的多因素评估^[16,17]。

水稻是我国主要的粮食作物之一。气候变暖可能使得水稻生育期缩短, 产量降低, 而采取恰当的

农业适应性调整措施, 如调整种植制度和种植模式, 采用新的作物品种等, 来延长作物的生长时间。这些举措能在规避气候变化对农业生产不利影响的同时扩大其正效应, 是应对气候变化对水稻生产影响的重要举措。目前, 通过作物模型定量评估气候变化和农业适应措施对农作物生产的影响, 已经有学者开展了研究^[18-19]。水稻是福建省的主要粮食作物, 水稻的丰欠关系到福建省的粮食自给。由于福建省地形复杂, 以山地丘陵为主, 不同地形的光温水条件相差甚远, 应对未来气候变化亦需采取不同的措施。因此以县域为单位对福建省的水稻生产开展研究, 能更精确地分析未来气候变化所产生的影响。中国气候中心的 BCC_CSM 大气环流模式是根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第5次评估报告生成的未来气候变化情景, 本研究采用其中的 RCP4.5 和 RCP8.5 情景, 读取当前和未来不同时期共 90 年的逐日气象要素文件, 并将之与 DSSAT4.6 平台支持下的 CERES-Rice 模型耦合, 模拟分析福建省各稻区共 66 个县域在未来两种情景下的水稻生产变化, 在此基础上结合农业气候指标, 进一步模拟研究各稻区、县域在未来不同情景下可能的品种类型及播种日期的变化, 并以此作为未来可能的适应性调整措施输入作物模型, 进一步模拟全省各稻区考虑适应性调整后的水稻产量、稳产性以及全省水稻总产的变化。

1 研究方法与资料来源

1.1 研究区域概况

福建省位于我国东南部, 属于典型的亚热带季风气候。地形地势复杂, 总体上西北高、东南低, 海拔高差大, 农业气候类型丰富多样。常见的农业气象灾害有高温热害、台风、干旱和低温冷害等。福建省水稻品种类型多样, 部分水热资源丰富的地区可种植双季稻和再生稻, 闽西北高海拔地区则以单季稻种植为主。本研究根据福建省气候特点和水稻种植情况, 将全省水稻种植区按不同地形及稻作制度划分为 3 个稻作区, 即闽东南双季稻区、闽西北双季稻区、闽西北山地单季稻区。除少数高海拔县市的热量条件不能满足水稻生长外, 对全省 66 个县域开展不同气候变化情景下的水稻生产模拟研究(图 1)。

1.2 未来气候变化情景

IPCC 第 5 次工作报告(AR5)提出的典型浓度路径情景(representative concentration pathway, RCP)

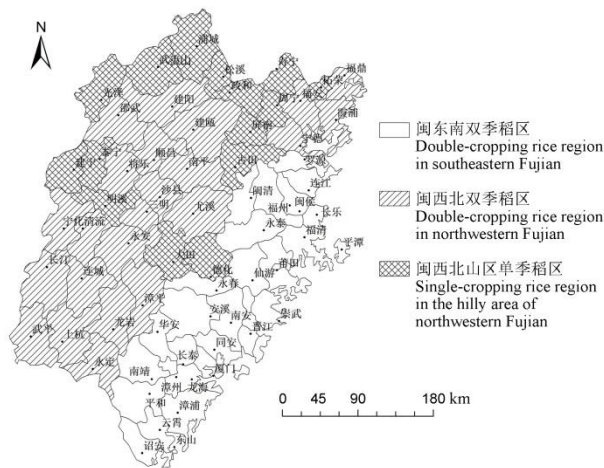


图 1 福建省水稻种植分区

Fig. 1. Distribution of rice growing regions in Fujian Province, China.

是根据 2100 年不同的辐射强迫值, 将 RCP 分为四种情景, 即 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5, 表示 2100 年辐射强度将依次上升至 2.6、4.5、6.0、8.5 W/m^2 ^[20]。本研究根据中国的科技发展状况, 选取 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景, 分别代表未来中国可能的中端稳定排放路径和高端排放路径, 利用 BCC_CSM(Beijing Climate Center Climate System Model)气候模式基于这两种情景下的气候预估结果, 生成了研究区域基准时段(1981—2005 年)和未来时段(2021—2050 年)的两种气候变化情景, 包括研究区域 66 个样点的逐日最高温度、最低温度、辐射和降水量。

1.3 水稻品种选择、模型参数的确定与验证

根据福建省区试资料选取产量高, 代表性好的

早、中、晚熟品种进行试验, 其中双季稻区的早稻仅选取晚熟品种作为当地的代表性品种, 单季稻和晚稻分别选取早、中、晚熟三个代表性品种进行试验, 共选择 7 个具有代表性的品种作为福建省的主栽品种。早稻仅选晚熟品种的原因是当前早稻中的早中熟品种口感、产量均较差, 所以近年来福建省大部分地区以种植晚熟品种为主。

本研究采用在国际上广泛应用的 CERES-Rice 模型对水稻进行生长过程的模拟。该模型需要输入的作物资料包括水稻的播种日期、播种密度与行株距、栽插深度、施肥与灌溉日期等多项耕作与管理措施; 环境资料包括各样点的经纬度、土壤参数和逐日气象数据等资料。模型运算在 DSSAT 4.6(农业科技转换决策支持系统)软件平台支持下进行^[21-22]。模型设置了 8 个遗传参数描述水稻的生长状况, 其中 4 个参数用来描述水稻发育特性, 分别为基本营养生长所需有效积温 P_1 ($^{\circ}C \cdot d$)、可以最大速率发育的最适光周期 P_2O (h)、光敏感期参数 P_2R ($^{\circ}C \cdot d$)、完成灌浆期所需有效积温 P_5 ($^{\circ}C \cdot d$); 另外 4 个参数用来描述水稻产量的形成及其各个器官的性状, 分别为开花期潜在穗数系数 G_1 、理想状况下的潜在粒重 G_2 (g)、分蘖系数 G_3 和温度容忍系数 G_4 ^[23]。

本研究基于 2011 年 7 个代表性水稻品种在福建省 22 个区试站的产量及生育期资料, 采用 GLUE (generalized likelihood uncertainty estimation)方法^[24]对作物遗传参数进行初步调试, 在此基础上进一步采用试错法(Trial and Error)对各代表性水稻品种的遗传参数进行优化(表 1), 并用 2012 年同品种在同地区栽种的产量及生育期资料对模型参数进行验证(图 2)。上述遗传参数调试所需的逐日气象数据

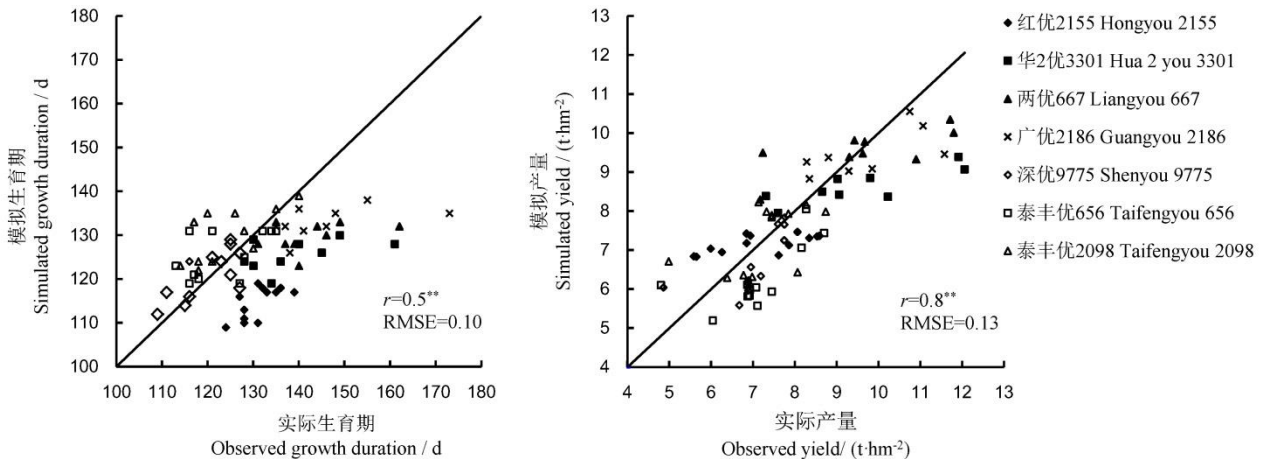
表 1 福建省代表性水稻品种遗传参数

Table 1. Genetic parameters of representative rice combinations in Fujian Province, China.

水稻品种 Rice combination	类型 Type	P_1	P_2R	P_5	P_2O	G_1	G_2	G_3	G_4
红优 2155 Hongyou 2155	迟熟早籼 EILM	601.2	54.7	135.3	12.4	88.6	0.034	0.48	1.13
花 2 优 3301 Hua 2 you 3301	早熟中籼 MIEM	703.0	90.0	370.3	11.5	88.0	0.016	1.15	1.10
两优 667 Liangyou 667	中熟中籼 MIMM	620.5	132.0	660.2	11.7	72.0	0.019	0.47	0.65
广优 2186 Guangyou 2186	迟熟中籼 MILM	716.0	75.4	515.0	11.3	99.0	0.016	1.64	1.10
深优 9775 Shenyong 9775	早熟晚籼 LIEM	505.0	204.0	124.0	11.0	59.0	0.016	0.53	1.14
泰丰优 656 Taifengyou 656	中熟晚籼 LIMM	696.0	130.0	439.0	11.0	77.0	0.016	0.06	0.67
泰丰优 2098 Taifengyou 2098	迟熟晚籼 LILM	811.0	204.0	214.0	11.1	47.0	0.017	1.01	1.04

P_1 —基本营养生长所需有效积温; P_2R —光敏感期参数; P_5 —完成灌浆期所需有效积温; P_2O —最大速率发育的最适光周期; G_1 —开花期潜在穗数系数; G_2 —理想状况下的潜在粒重; G_3 —分蘖系数; G_4 —温度容忍系数。

EILM, Early-indica with late-maturity; MIEM, Medium-indica with early-maturity; MIMM, Medium-indica with medium-maturity; MILM, Medium-indica with late-maturity; LIEM, Late-indica with early-maturity; LIMM, Late-indica with medium-maturity; LILM, Late-indica with late-maturity. P_1 , Effective accumulated temperature for vegetation growth; P_2R , Parameter of photosensitive phase; P_5 , Effective accumulated temperature for tillering; P_2O , Optimal photoperiod for maximum developmental rate; G_1 , Potential coefficient of panicle number; G_2 , Potential grain number; G_3 , Tiller coefficient; G_4 , Temperature tolerance coefficient.



**表示在 0.01 水平上显著相关。

**, Significant correlation at 0.01 level.

图2 CERES-Rice 模型在福建省主要稻区的验证结果

Fig. 2. Verification results of CERES-Rice model in the main rice growing regions in Fujian Province, China.

(2011—2012 年)取自中国气象科学数据共享服务网 (<http://www.cma.gov.cn>)。其中, 太阳辐射的缺省样点值根据逐日日长及经纬度计算得出^[25]。播种期、生育期、行株距、种植密度等作物资料, 取自 2011—2012 年的福建省水稻区域试验结果。

1.4 农业气候指标的建立

1.4.1 水稻稳产性指标

未来气候变化除了影响水稻的生长过程和产量, 同样也将影响产量的稳定性。本研究采用的产量标准差变化率 $\Delta SD\%$ 可用来表示未来产量的波动情况, 其计算公式如下:

$$\Delta SD\% = |(\mu_c \pm \sigma_{\mu_c}) / \mu_a| \times 100 \quad 1);$$

$$\text{其中, } \mu_c = \mu_b - \mu_a \quad 2);$$

$$\sigma_{\mu_c} = \sqrt{\sigma_{\mu a}^2 + \sigma_{\mu b}^2} \quad 3);$$

$\Delta SD\%$ 表示产量标准差的变化率, 用来衡量水稻产量的不稳定性; μ_c 表示未来不同气候变化情景下模拟产量的平均值(μ_b)与基准时段模拟产量的平均值(μ_a)之差; σ_{μ_c} 为联合方差。显然 $\Delta SD\%$ 的值越小, 说明水稻稳产性越好; 反之则稳产性越差。

1.4.2 水稻总产估算模型

假定未来不同排放情景下, 研究区域现有水稻种植面积不变, 采用以下统计模型估算福建省水稻总产的变化百分比^[30], 即:

$$TYC\% = \sum_{i=1}^3 (RY_i / TY) \times RYC_i\% \quad 4);$$

$i=1, 2, 3$

式中 $TYC\%$ 为福建省未来水稻总产的变化百分比; RY_i 为 2011—2015 年各稻区水稻平均总产; TY 为同一时段全省水稻的平均总产; $RYC\%$ 为未来气候变化情景下全省各稻区水稻单产的变化百分比。

1.5 气候变化影响评价的具体方案

本研究利用 CERES-Rice 模型对基准时段和未来时段各稻区的水稻产量分别进行模拟, 分为两种情况: 一是假定未来稻作制度、水稻栽培措施及品种类型等依旧维持在当前水平不变, 模拟各样点的代表性品种在不同排放情景下的水稻产量, 并与基准时段的模拟产量进行比较, 在此基础上分析气候变化对水稻产量的可能影响; 二是分析在未来不同排放情景下, 水稻生产方式随气候变化进行适应性调整, 如更换品种, 调整播期等, 进而模拟分析适应性调整后的水稻产量变化。据此可比较水稻生产采用适应性调整措施后对产量的影响。此外, 在 CERES-Rice 模型中专门设置的 CO_2 增益模块可以模拟 CO_2 浓度升高对水稻生产的直接肥效作用。但有学者在研究中指出 CO_2 浓度增加对产量的影响会受到土壤中氮肥含量的影响及限制^[26], 且模型未考虑 CO_2 浓度的日变化, 也会使得模拟结果偏高。因此, 本研究模拟不考虑 CO_2 肥效作用时的水稻生产状况, 以作比较。

1.5.1 未来气候变化情景下品种的更替

随着未来气候变暖导致的光温水资源的改变, 可能导致水稻生育期改变。为了应对高温对水稻生产造成的不利影响, 同时充分利用热量资源获取较高的产量, 未来水稻生产过程中农民可能通过引进耐高温的水稻品种或调整水稻品种类型(熟型)的方

式来适应气候变化。本研究利用 CERES-Rice 模型开展未来各个稻区不同熟型品种的模拟试验, 将其模拟结果分别与基准时段和未来时段未替换品种时的模拟产量进行比较, 看产量是否因品种更替而有明显的改善。最后, 通过产量和稳定性等指标, 得出未来情景下该地区最适宜的品种或品种组合。需要注意的是, 在筛选过程中仍假定未来的稻作制度和田间管理均维持在当前水平不变, 并尽可能用生育期较长的中晚熟品种替代早熟品种。

1.5.2 未来水稻适宜播期的调整

随着未来温度升高, 调整水稻播期可以改变水稻生育期内的光温水配置, 更有效地利用生育期内的资源, 使水稻生育期调整到能获得较高产量的时间段内。本研究在模拟水稻生长的最佳播期时, 以 5 d 为时间步长, 即针对当前播期提前 5 d、10 d、推迟 5 d、10 d, 在 3 种不同排放情景下分别运行 CERES-Rice 模型, 选择产量高且稳产性好的模拟结果所对应的播种日期作为水稻的适宜播期。在对双季稻种植区进行播期调整时, 为了避免低温危害, 还需注意早稻的安全播期, 即春季日均温连续 3 d $\geq 12^{\circ}\text{C}$ 的初日; 同时在晚稻的播期调整中, 除考虑早稻和晚稻两季间的 5 d 茬口外, 还要保证水稻能在安全齐穗期前抽穗。对于籼稻, 安全齐穗期是指秋季日均温连续 3 d $\geq 22^{\circ}\text{C}$ 的终日。在模拟过程中, 仍假定未来稻作制度、品种类型和田间管理措施等均维持在当前水平上。

2 结果与分析

2.1 未来不同情景下水稻品种的适应性调整

由于本研究选择了早稻的晚熟品种作为当前研究区域的代表性品种, 所以品种的适应性调整仅针对单季稻和晚稻进行。模拟筛选过程中在保证水稻高产的同时也要兼顾其稳产性。根据模型模拟结果, 筛选出了福建省 3 个稻区 66 个样点在未来不同排放情景下适宜种植的水稻品种。结果显示, 各稻区适宜种植的水稻品种均为晚熟品种(表 2), 且生育期较长的中晚熟品种产量最高, 稳产性也很好。其主要原因是长生育期晚熟的品种光合持续时间长, 在一定程度上可以弥补水稻因高温引起的生育期缩短现象。因此, 福建省 3 个稻区未来均可种植晚熟品种以提高产量。

2.2 未来不同情景下播期的适应性调整

2.2.1 早稻及单季稻播期的调整

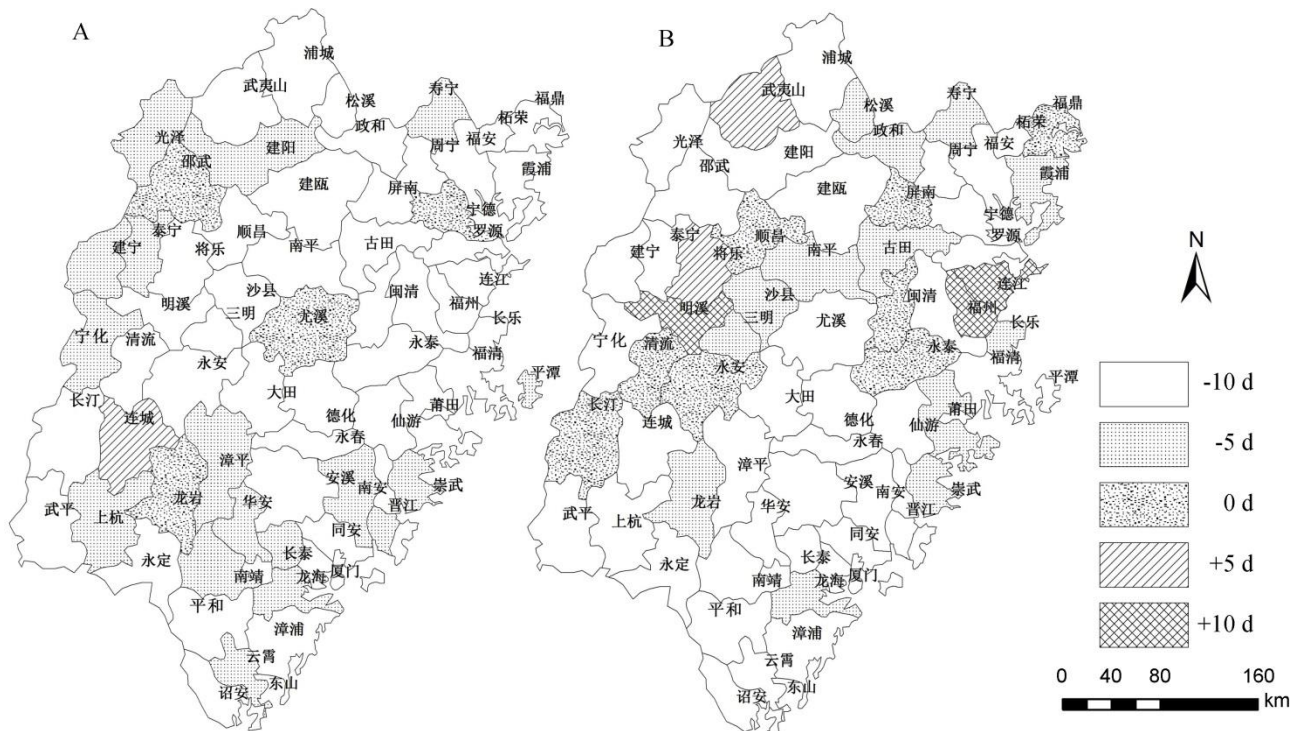
在未来气候变化条件下, 根据上述品种优化结果, 保持田间管理措施不变, 调整播种日期进行 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下各样点水稻生产的模拟实验。根据不同情景下水稻产量的高低及稳定性指标 ($\Delta SD\%$) 筛选出各样点的最佳播期。图 3 显示, 两种情景下, 大部分样点的最佳播期均较当前播期提前 5~10 d, RCP8.5 情景下播期提前更为明显。RCP4.5 情景下宁德、邵武、尤溪、连城四县以及 RCP8.5 情景下的个别样点出现最佳播期延迟现象, 究其原因, 是由于这些地区的早稻当前易遭受低温胁迫影

表 2 基于两种气候变化情景下福建省各稻区不同品种类型的模拟产量及稳产性指标

Table 2. Simulated yields and stability index($\Delta SD\%$) for various varietal types under the two representative concentration pathway(RCP) scenarios in different rice growing regions of Fujian Province.

稻区 Rice region	品种类型 Varietal type	RCP4.5		RCP8.5	
		模拟产量 Simulated yield /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	稳产性指标 $\Delta SD\%$	模拟产量 Simulated yield /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	稳产性指标 $\Delta SD\%$
闽东南双季稻区 Double-cropping rice region in southeastern Fujian	早熟晚籼 LIEM	4495.8	8.6	4842.7	11.3
	中熟晚籼 L IMM	5533.8	9.7	5983.0	18.4
	晚熟晚籼 L ILM	6045.1	4.3	6133.4	5.7
闽西北双季稻区 Double-cropping rice region in northwestern Fujian	早熟晚籼 LIEM	4948.1	9.5	5277.2	9.0
	中熟晚籼 L IMM	5843.6	12.2	6235.2	18.3
	晚熟晚籼 L ILM	6268.4	3.2	6336.8	4.1
闽西北山地单季稻区 Single-cropping rice region In hilly area of northwestern Fujian	早熟中籼 MIEM	9305.2	1.7	9465.4	2.4
	中熟中籼 M IMM	7429.8	11.4	7698.0	14.6
	晚熟中籼 M ILM	10079.3	2.0	10205.9	2.6

LIEM, Late-*indica* with early-maturity; L IMM, Late-*indica* with medium-maturity; L ILM, Late-*indica* with late-maturity; E ILM, Early-*indica* with late-maturity; MIEM, Medium-*indica* with early-maturity; M IMM, Medium-*indica* with medium-maturity; M ILM, Medium-*indica* with late-maturity.



A—RCP4.5 情景; B—RCP8.5 情景; -10 d, -5 d, 0 d, +5 d 和 +10 d 分别指播期提前 10 d、提前 5 d、与当前相同、推迟 5 d 和推迟 10 d。图 4 中的缩写与图 3 相同。

A, RCP4.5 scenario; B, RCP8.5 scenario; -10 d, -5 d, 0 d, +5 d and +10 d represent 10 days advanced, 5 days advanced, the same with the baseline, 5 days delayed and 10 days delayed, respectively. The same as those in Fig. 4.

图 3 基于两种气候变化情景下福建省早稻和单季稻区各样点最佳播期的可能改变

Fig. 3. Changes in proper sowing dates of early rice and single-cropping rice under the two representative concentration pathway(RCP) scenarios in Fujian Province, China.

响, 而将播期推迟以后, 则有效缓解了低温阴雨可能导致的烂秧死苗现象; 而部分样点在未来气候变化过程中播期依旧与当前一致, 说明未来气候变化过程中这些样点的水稻播期无需改变。

2.2.2 晚稻播期的调整

依照前述方法, 并兼顾早稻和晚稻的茬口, 模拟得出了两种情景下晚稻的最佳播期(图 4)。结果显示, 未来两种情景下除闽清、永泰和福鼎三个县的播期将提前 10 d, 少数地区播期不变以外, 多数地区播期均将推迟 5~10 d, 尤以推迟 10 d 为多。闽清、永泰和福鼎的播期提前, 是因为未来种植的最佳品种为中熟品种, 故播期提前有利于其生育期的延长。其余地区的最佳播期出现推迟现象, 是因为福建省当前晚稻晚熟品种的播期处于 6 月下旬, 孕穗开花期为 9 月中下旬, 恰逢当地高温时段, 而 35℃ 以上高温连续 3 d 将导致水稻颖花败育, 造成水稻减产甚至绝收。因此, 未来气温升高后可以通过延迟播种使得孕穗开花期错开当地温度最高时段。

2.3 品种与播期同时改变对水稻的影响

2.3.1 不同影响因子下的产量变化对比

随着气候变化的日益加剧以及社会经济与科技水平的不断进步, 农民所采取的适应措施不可能仅仅局限在单一方式上, 往往是多项调整并存。因此, 选择各样点水稻的最佳品种和播期并保持其他栽培管理措施不变, 模拟得出了福建省未来 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下水稻产量的变化(图 5)。

由图 5 可见, 如果在未来气候变化过程中不考虑 CO₂ 肥效作用(NCE), 各个稻区在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下均表现为减产, 减产幅度最大可达 5%; RCP4.5 情景下减产幅度最大的是闽西北双季稻区晚稻, 同时未来 30 年产量异常年份较多, 说明未来该地区晚稻产量稳定性较差。RCP8.5 情景下, 依然是闽西北双季稻区晚稻的年际间波动幅度最大。推测未来气候变化将使得闽西北晚稻的产量不稳定性增加。当考虑 CO₂ 肥效作用时(CE), 各个稻区将转为增产, 增产幅度在 10% 以下。

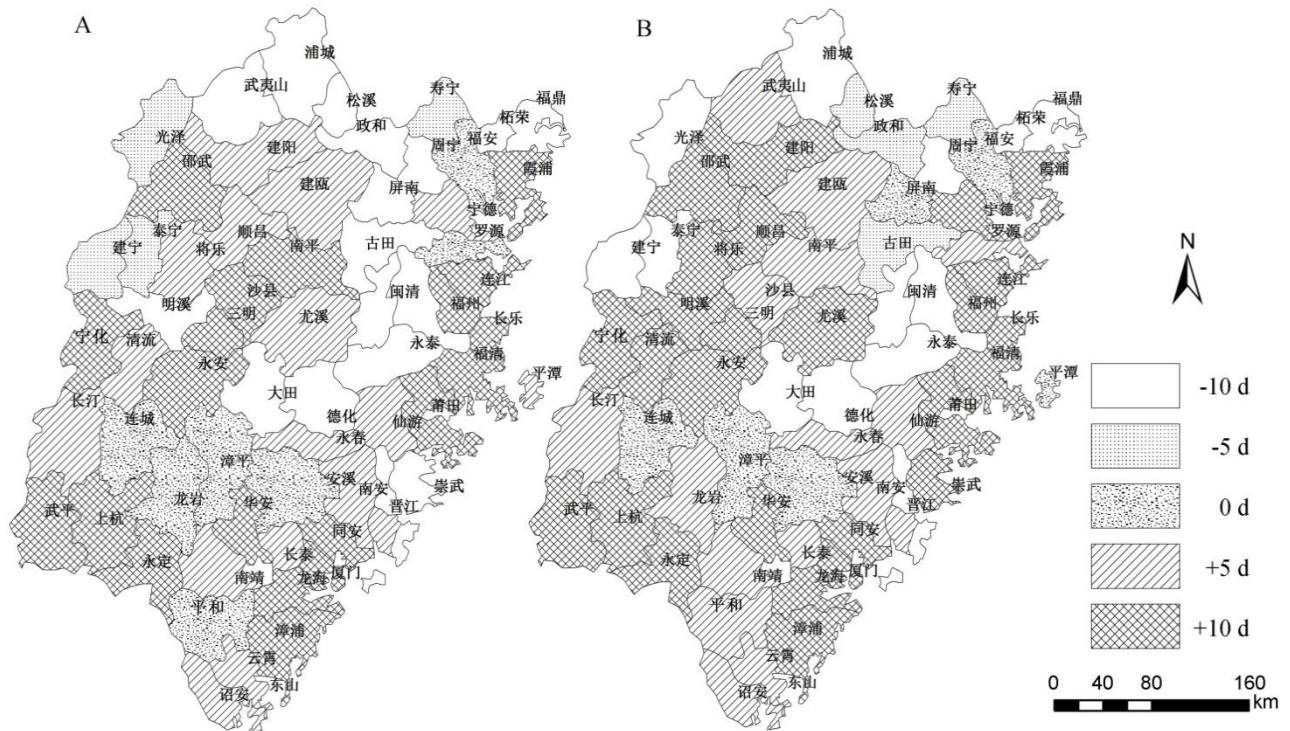
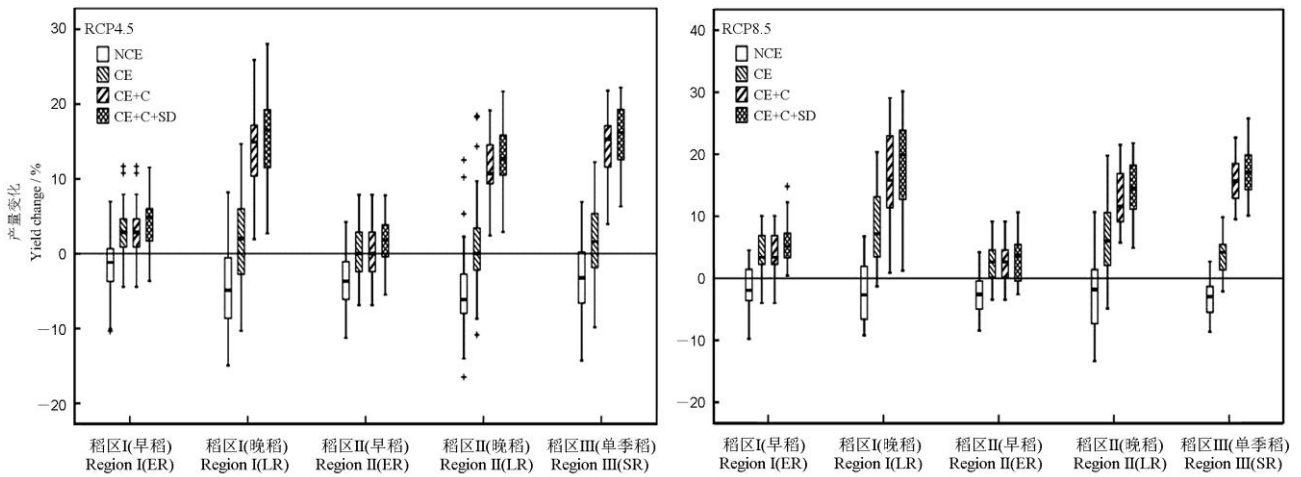


图 4 基于两种气候变化情景下福建省晚稻和单季稻区各样点最佳播期的可能改变
 Fig. 4. Changes in proper sowing dates of late rice and single-cropping rice under the two representative concentration pathway(RCP) scenarios in Fujian Province, China.



稻区 I—闽东南双季稻区; 稻区 II—闽西北双季稻区; 稻区 III—闽西北山地单季稻区; ER—早稻; LR—晚稻; SR—单季稻; NCE—不考虑 CO₂ 肥效作用时气候变化的影响; CE—考虑 CO₂ 肥效作用时气候变化的影响; CE+C—考虑 CO₂ 肥效作用时气候变化影响+优化品种; CE+C+SD—考虑 CO₂ 肥效作用时气候变化影响+优化品种+播期调整。

Region I, Double-cropping rice region in Southeastern Fujian; Region II, Double-cropping rice region in Northwestern Fujian; Region III, Single-cropping rice region in mountain area of Northwestern Fujian; ER, Early rice; LR, Late rice; SR, Single-cropping rice; NCE, Without taking into consideration CO₂ fertilization effect; CE, Taking into consideration CO₂ fertilization effect; CE+C, Combined effects of CE and optimized in cultivar; CE+C+SD, Combined effects of CE+C and adjustments in sowing date.

图 5 两种气候变化情景下福建省不同稻区在适应性调整后水稻模拟产量相对于基准时段的变化
 Fig. 5. Change in rice yields under the two representative concentration pathway(RCP) scenarios with adaptive adjustments compared with the base yields in different rice growing regions in Fujian Province, China.

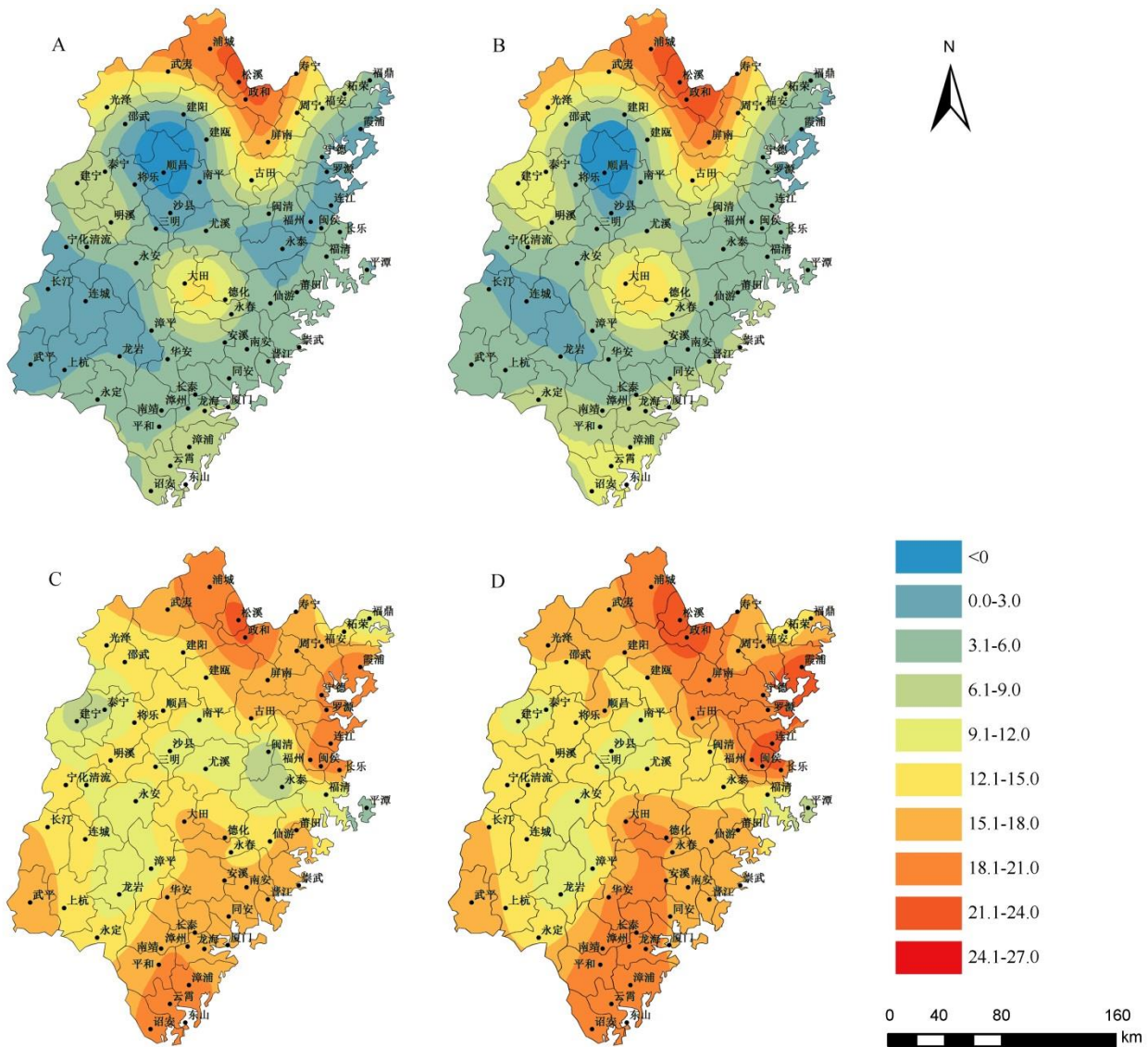
在上述基础上考虑品种优化(CE+C), 选用生育期较长的中晚熟品种来替代早熟品种, 则晚稻和单季稻的模拟产量显著提高。在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 闽东南双季稻区晚稻产量较之品种优化前分别提高了 11.9%和 8.1%; 闽西北双季稻区晚稻分别提高 10.8%和 6.5%; 闽西北山地单季稻区的提升最为明显, 分别提高了 12.7%和 12.1%。

在品种优化基础上进一步模拟各县的最佳播期, 并假设未来各地均调整为最佳播期进行播种(CE+C+SD), 则全省各个稻区的模拟产量又有不同程度的提高。与基准时段的模拟产量相比, 产量增

幅最大的为闽东南双季稻区的晚稻, RCP4.5 和 RCP8.5 情景下增幅达 15.8%和 17.8%; 其次是闽西北山地单季稻, 两种情景下分别增产 15.7%和 17.4%; 各稻区早稻增幅最小, 最高不超过 6%。

2.3.2 综合适应性调整措施下福建省水稻单产的空间变化

利用 Arcgis 软件绘制产量相对于未作任何适应调整时的变化幅度差值。从图 6 中可以明显看出, 综合适应措施使得福建省水稻生产显著增产, 尤其对晚稻和单季稻的增产效果十分明显。种植早稻的将乐、顺昌两县在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下均表现



A 和 B—早稻和单季稻种植区; C 和 D—晚稻和单季稻种植区; 其中 A 和 C 是 RCP4.5 情景, B、D 是 RCP8.5 情景。
A and B, Early rice and single-cropping rice region; C and D, Late rice and single-cropping rice region; A and C, RCP4.5 scenario; B and D, RCP8.5 scenario.

图 6 两种排放情景下福建省各稻区水稻在考虑适应调整前后的产量相较基准时段产量的变化

Fig. 6. Change in rice yields under the two representative concentration pathway(RCP) scenarios with adaptive adjustments compared with the base yields in different rice growing regions in Fujian Province, China.

表 3 未来两种气候变化情景下福建省适应性调整后的水稻生产方式及管理措施

Table 3. Rice production patterns and managements with adaptive adjustments under the two representative concentration pathway(RCP) scenarios in different rice growing regions of Fujian Province, China.

稻区 Rice region growing	样点 Site	RCP4.5		RCP8.5	
		品种搭配 Variety collocation	播种日期 Sowing date	品种搭配 Variety collocation	播种日期 Sowing date
闽东南双季稻区 Double-cropping rice region in southeastern Fujian	闽清、永泰 Minqing, Yongtai	晚熟早籼+中熟晚籼 EILM+LIMM	提前 10 d+提前 10 d 10 days advanced +10 days advanced	晚熟早籼+中熟晚籼 EILM+LIMM	提前 10 d+提前 10 d 10 days advanced +10 days advanced
	其余样点 The rest sites	晚熟早籼+晚熟晚籼 EILM+LILM	提前 10 d+推迟 10 d 10 days advanced +10 days delayed	晚熟早籼+晚熟晚籼 EILM+LILM	提前 10 d+推迟 10 d 10 days advanced +10 days delayed
闽西北双季稻区 Double-cropping rice region in northwestern Fujian	福鼎 Fuding	晚熟早籼+中熟晚籼 EILM+LIMM	提前 10 d+提前 10 d 10 days advanced +10 days advanced	晚熟早籼+中熟晚籼 EILM+LIMM	提前 10 d+提前 10 d 10 days advanced +10 days advanced
	其余样点 The rest sites	晚熟早籼+晚熟晚籼 EILM+LILM	提前 10 d+推迟 10 d 10 days advanced +10 days delayed	晚熟早籼+晚熟晚籼 EILM+LILM	提前 10 d+推迟 10 d 10 days advanced +10 days delayed
闽西北山地单季稻区 SCR	所有样点 All sites	晚熟中籼 MILM	提前 10 d 10 days advanced	晚熟中籼 MILM	提前 10 d 10 days advanced

EILM, Early-*indica* with late-maturity; MILM, Medium-*indica* with late-maturity; LIMM, Late-*indica* with medium-maturity; LILM, Late-*indica* with Late-maturity. SCR, Single-cropping rice region in hilly area of northwestern Fujian.

表 4 两种气候变化情景下考虑与不考虑适应性调整各稻区水稻模拟总产对全省水稻总产的贡献

Table 4. Contribution of overall rice output of rice growing regions to Fujian Province with adaptive adjustment and without adaptive adjustment under the two representative concentration pathway(RCP) scenarios.

稻区 Rice region	稻作类型 Rice pattern	RCP4.5		RCP8.5	
		不考虑适应性调整 Without adaptive adjustment	考虑适应性调整 With adaptive adjustment	不考虑适应性调整 Without adaptive adjustment	考虑适应性调整 With adaptive adjustment
对总产量变化的贡献率 Contribution to change in overall rice output / %					
闽东南双季稻区 Double-cropping rice region in southeastern Fujian	早稻 Early rice	0.31	0.50	0.45	0.67
	后季稻 Late rice	0.20	1.53	0.75	1.73
闽西北双季稻区 Double-cropping rice region in northwestern Fujian	早稻 Early rice	0.05	0.18	0.23	0.33
	后季稻 Late rice	0.25	2.04	0.98	2.21
闽西北山地单季稻区 Single-cropping rice region in hilly area of northwestern Fujian	单季稻 Single rice	-0.16	5.00	0.63	5.60
总产量变化 Change in overall rice output / %		0.66	9.25	3.05	10.54

为明显的减产,说明适应措施并不能完全改善未来气候变化对该区域水稻生产的不利影响。对于单季稻而言,松溪、政和两县增产幅度最大,增幅可达 24.3%;而晚稻增产明显区域主要集中在闽东南双季稻区,这可能是未来晚稻生育期内水热资源增加明显,恰当的种植调整措施可以更加充分利用水热资源,从而表现为明显的增产。

2.4 未来不同情景下福建省基于适应性调整方案的水稻总产变化

表 3 给出了福建省不同稻区在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的最佳水稻品种和播期,将其作为最

终的适应性调整方案,同时作为模型新的输入,并在两种排放情景下分别运行 CERES-Rice 模型,即可模拟计算出未来福建省各稻区水稻在考虑适应性调整后的总产变化(表 4)。在总产计算过程中假定未来福建省各稻区播种面积不变。

由表 4 可以看出,在未来气候变化对福建省水稻生产的影响评价中,是否对水稻采取适应性调整措施,其结果是大不一样的。考虑适应性调整后,3 个稻区在不同排放情景下,水稻模拟总产都有不同程度提高;单季稻模拟总产增产幅度最大,在 RCP4.5 情景下,由不考虑适应性措施时的减产转为

增产;此外,在各双季稻区,晚稻总产增幅较早稻大。考虑适应性调整后,在RCP4.5与RCP8.5情景下模拟出的全省总产较不考虑适应性调整时增幅分别达到了8.6%和7.5%。

3 讨论

气候变化对水稻生产的影响是多方面的,目前国内外关于气候变化下水稻生产的研究内容也较多,包括研究气候变化对水稻生育期、产量与产量差、稻田蒸散以及水稻品质等的影响^[27-28]。但在以往的这些研究中,大多数学者在评估未来气候变化对粮食生产状况的影响时,均假定未来几十年的种植制度、品种类型和生产管理措施等维持在当前水平不变^[4,16,18,29],对未来可能的适应调整对粮食生产带来的影响不够重视。本研究在考虑了水稻品种和播期的适应性调整后对未来的水稻生产进行模拟,结果表明,采取更替品种、调整播期等措施来适应未来气候变化,不仅可以缓解未来由于气温过高导致生育期缩短带来的减产现象,还会因为CO₂浓度增高产生的肥效作用使得产量有一定幅度的提高。这样的模拟结果显然较不考虑适应性调整的结果更为科学合理也更为乐观。本研究所提出的适应性调整方案还仅是在当前现有的水稻品种上进行筛选调整,面对未来更为严峻的生态环境,必定会出现更具抗性的水稻品种;并且随着气候变暖,一些县市还可能出现种植制度的调整,某些单季稻种植区域在未来温度升高的条件下,可能改种双季稻或再生稻^[30]。当然,这些适应性措施的调整是较为复杂的过程,会牵涉到各种社会、环境、制度和人力物力的因素,如当前耕地面积不断缩小可能导致未来水稻播种面积减少,进一步影响总产的改变。所以只能在研究中重点考虑农业生产方式和管理措施的改变。

由于作物模型的机理是运用数学方法建立起各种数学模型或子模型,按照一定规律和原理,将各个子模型嵌套在一起,形成了可在计算机上模拟作物生产全过程的模拟系统。而极端天气、病虫害等因素的发生发展尚无规律可寻,所以在当前的模型中尚未考虑这些因子。而福建省是受台风影响比较严重的地区,台风带来的暴雨和风灾必将对水稻生产带来显著影响,所以未来气候变化的模拟评价中由于未能考虑此类影响,使得水稻产量的模拟存在着一定的不确定性。随着模型模拟技术的不断成

熟和发展,这个问题一定会得到解决。另外,今后的研究也可以结合水稻的历史产量、生长季内自然灾害发生频率和防灾抗灾能力等对模拟产量进行一定程度的矫正,使得未来水稻生产的模拟结果更为科学合理。目前,已有大量的研究表明,CO₂浓度升高可以提高作物光合速率,抑制呼吸,降低气孔导度,提高水分利用率,增加干物质质量从而提高作物产量,这相当于增施肥料的作用,即所谓的CO₂肥效作用^[10,27]。CERES-Rice模型在模拟CO₂浓度升高对水稻影响时,并未考虑CO₂浓度的日变化情况,而是根据CO₂的浓度线性地乘以相关系数得到水稻的产量^[23]。同时有学者在研究中指出CO₂浓度增加对产量的影响会受到土壤中氮肥含量的影响及限制^[26],这样模型所模拟的结果实际上是偏高的,所以研究中给出考虑了CO₂肥效作用前后的不同模拟结果以作比较。

4 结论

未来气候变暖将使得福建省各稻区水稻生育期缩短,而温度升高又将使得水稻的生长季显著延长。所以未来选择生育期较长的中晚熟品种替代早熟品种可以充分利用当地的水热资源,同时采用播期的调整来规避高温灾害并延长生育期,是未来水稻生产的主要适应性调整措施。产量的模拟结果表明,未来气候变化对水稻产量既有正面影响也有负面影响,视不同稻作制度和种植区而异。未来两种情景下,双季稻区晚稻的年际间波动范围加大,意味着产量不稳定性增加。而双季稻产区的主要粮食产量来自生育期较长的晚稻,所以晚稻的产量波动很可能会影响全省的粮食供给,需引起政府部门重视。当考虑CO₂的肥效作用后,各稻区水稻的模拟产量明显提高。在此基础上如果进一步考虑品种更替和播期调整,水稻模拟产量可进一步提高。在RCP4.5和RCP8.5情景下,闽东南双季稻区早稻的模拟产量较未作适应性调整时分别增加1.6%和1.9%,晚稻的模拟产量依次增加13.5%和9.8%;闽西北双季稻区早稻的模拟产量依次提高1.4%和1.0%,晚稻的模拟产量分别提高11.5%和7.9%;闽西北山地单季稻区模拟产量分别增加14.1%和13.7%。在综合考虑适应性措施后,福建省各稻区总产也较当前明显提高,在RCP4.5和RCP8.5两种情景下,分别提高9.3%和10.5%。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, Ruane A C, Muller C, Arneth A, Boote K J, Folberth C, Glotter M, Khabarov N, Neumann K, Piontek F, Thomas A M, Schmid E, Stehfest E, Yang H, Jones J W. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111(9): 3268-3273.
- [3] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 何勇. 未来气候变化情景下中国主要粮食作物产量变化模拟. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(5): 208-213.
Zhang J P, Zhao Y X, Wang C Y, He Y. Simulation of the yields change of China' main crops under climate change scenario. *Agric Res Arid Areas*, 2007, 25(5): 208-213. (in Chinese with English abstract)
- [4] 杨沈斌, 申双和, 赵小艳, 赵艳霞, 许吟隆, 王主玉, 刘娟, 张玮玮. 气候变化对长江中下游稻区水稻产量的影响. *作物学报*, 2010, 36(9): 1519-1528.
Yang S B, Shen S H, Zhao X Y, Zhao Y X, Xu Y L, Wang Z Y, Liu J, Zhang W W. Impacts of climate changes on rice production in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Acta Agron Sin*, 2010, 36(9): 1519-1528. (in Chinese with English abstract)
- [5] Chun J A, Li S, Wang Q, Lee W S, Lee E J. Assessing rice productivity and adaptation strategies for Southeast Asia under climate change through multi-scale crop modeling. *Agric Syst*, 2016, 143: 14-21.
- [6] 周曙东, 周文魁, 朱红根, 王传星, 王艳. 气候变化对农业的影响及应对措施. *南京农业大学学报: 社会科学版*, 2010, 10(1): 34-39.
Zhou S D, Zhou W K, Zhu H G, Wang C X, Wang Y. Impact of climate change on agriculture and its countermeasures. *J Nanjing Agric Univ: Soci Sci Ed*, 2010, 10(1): 34-39. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响: I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量的可能影响分析. *中国农业科学*, 2010, 43(2): 329-336.
Yang X G, Liu Z J, Chen F. The possible effects of global warming on cropping systems in China: I. The possible effects of climatic warming on northern limits of cropping systems and crop yields in China. *Sci Agric Sin*, 2010, 43(2): 329-336. (in Chinese with English abstract)
- [8] 肖风劲, 张海东, 王春乙. 气候变化对我国农业的可能影响及适应性对策. *自然灾害学报*, 2006, 15(6): 327-331.
Xiao F J, Zhang H D, Wang C Y. Impact of climatic change on agriculture and its adaptation countermeasures in China. *J Nat Disas*, 2006, 15(6): 327-331. (in Chinese with English abstract)
- [9] 孙白妮, 门艳忠, 姚凤梅. 气候变化对农业影响评价方法研究进展. *环境科学与管理*, 2007, 32(6): 165-168.
Sun B N, Men Y Z, Yao F M. Advancement of study on assessing impacts of climate change on agriculture. *Environ Sci Manag*, 2007, 32(6): 165-168. (in Chinese with English abstract)
- [10] 房世波, 沈斌, 谭凯炎, 高西宁. 大气 CO₂ 和温度升高对农作物生理及生产的影响. *中国生态农业学报*, 2010, 15(5): 1116-1124.
Fang S B, Shen B, Tan K Y, Gao X N. Effect of elevated CO₂ concentration and increased temperature on physiology and production of crops. *Chin J Eco-Agric*, 2010, 15(5): 1116-1124. (in Chinese with English abstract)
- [11] 秦鹏程, 姚凤梅, 曹秀霞, 张佳华, 曹倩. 利用作物模型研究气候变化对农业影响的发展过程. *中国农业气象*, 2011, 32(2): 240-245.
Qin P C, Yao F M, Cao X X, Zhang J H, Cao Q. Development process of modeling impacts of climate change on agricultural productivity based on crop models. *Chin J Agrometeorol*, 2011, 32(2): 240-245. (in Chinese with English abstract)
- [12] 石春林, 冯慧慧, 金之庆, 王华. 水稻发育期模型比较. *中国水稻科学*, 2010, 24(3): 303-308.
Shi C L, Feng H H, Jin Z Q, Wang H. Comparison of phasic development models in rice. *Chin J Rice Sci*, 2010, 24(3): 303-308. (in Chinese with English abstract)
- [13] 姚凤梅, 秦鹏程, 张佳华, 林而达, Boken V. 基于模型模拟气候变化对农业影响评估的不确定性及其处理方法. *科学通报*, 2011, 56(8): 547-555.
Yao F M, Qin P C, Zhang J H, Lin E D, Boken V. Uncertainties in assessing the effect of climate change on agriculture using model simulation and uncertainty processing methods. *Chin Sci Bull*, 2011, 56(8): 547-555. (in Chinese with English abstract)
- [14] 江敏, 金之庆. CERES-Rice 模型区域应用中遗传参数升尺度的一种方法. *中国水稻科学*, 2009, 23(2): 172-178.
Jiang M, Jin Z Q. A method to upscale the genetic parameters of CERES-Rice in regional applications. *Chin J Rice Sci*, 2009, 23(2): 172-178. (in Chinese with English abstract)
- [15] 叶宏宝, 石晓燕, 李东, 华珊, 徐志福. 气候变化对浙江水稻生产影响的集合模拟分析. *浙江农业学报*, 2016, 28(7): 1183-1192.
Ye H B, Shi X Y, Li D, Hua S, Xu Z F. Ensemble simulation of impacts of climate change on rice production in Zhejiang Province. *Acta Agric Zhejiang*,

- 2016, 28(7): 1183-1192. (in Chinese with English abstract)
- [16] 熊伟, 林而达, 蒋金荷, 李岩, 许吟隆. 中国粮食生产的综合影响因素分析. *地理学报*, 2010, 65(4): 397-406.
Xiong W, Lin E D, Jiang J H, Li Y, Xu Y L. An integrated analysis of impact factors in determining China's future grain production. *Acta Geol Sin*, 2010, 65(4): 397-406. (in Chinese with English abstract)
- [17] Osborne T M, Lawrence D M, Challinor A J, Slingo J M, Wheeler T R. Development and assessment of a coupled crop-climate model. *Global Change Biol*, 2007, 13(1): 169-183.
- [18] 马锐, 江敏, 薛昌颖, 孙彬, 周桐宇. 基于适应性调整的豫南地区水稻生产对未来气候变化的相应. *中国水稻科学*, 2016, 30(4): 417-430.
Ma R, Jiang M, Xue C Y, Sun B, Zhou T Y. Response of rice to future climate change based on adaptive adjustment in southern Henan Province. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30(4): 417-430. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王连喜, 刘静, 李琪, 钱蕊. 气候变化对宁夏水稻的影响及适应性研究. *地球科学进展*, 2013, 28(11): 1248-1256.
Wang L X, Liu J, Li Q, Qian R. Simulation study of the climate change impact on the rice and its adaptability in Ningxia. *Adv Earth Sci*, 2013, 28(11): 1248-1256. (in Chinese with English abstract)
- [20] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, Manning M R, Rose S K. The next generation of scenarios for climate research and assessment. *Nature*, 2010, 463: 747-756.
- [21] Hoogenboom G, Jones J W, Wilkens P W, Porter C Q, Boote K, Hunt L D, Singh U. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4. 6. Washington: DSSAT Foundation, Prosser, 2014.
- [22] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, Boote K J, Batchelor W D. DSSAT Cropping System Model. *Eur J Agron*, 2003, 18(3/4): 235-265.
- [23] Ritchie J T, Alcocilja E C, Uehara G. IBSNAT/CERES-Rice model. *Agrotechnol Transfer*, 1986, 3: 1-5.
- [24] He J Q, Jones J W, Graham W D, et al. Influence of likelihood function choice for estimating crop model parameters using the generalized likelihood uncertainty estimation method. *Agric Syst*, 2010, 103(5): 256-264.
- [25] 孙睿, 梁璐, 杨玲. 基于气象站资料的中国地区太阳日辐射量算法研究. *气象与环境科学*, 2007, 30(1): 24-27.
Sun R, Liang L, Yang L. Estimation of daily solar radiation in China based on weather station data. *Meteorol Environ Sci*, 2007, 30(1): 24-27. (in Chinese with English abstract)
- [26] Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D B, Nosberger J, Ort D R. Food for thought: lower-than-expected crop yield simulation with rising CO₂ concentrations. *Science*, 2006, 312: 1918-1921.
- [27] 谢立勇, 林而达. 二氧化碳浓度增高对稻、麦品质影响研究进展. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 659-664.
Xie L Y, Lin E D. Effects of CO₂ enrichment on grain quality of rice and wheat: A research review. *Chin J Appl Ecol*, 2007, 18(3): 659-664. (in Chinese with English abstract)
- [28] 郭尔静, 杨晓光, 王晓煜, 张天一, 黄晚华, 刘子琪, Tao L. 湖南省双季稻产量差时空分布特征. *中国农业科学*, 2017, 50(2): 399-412.
Guo E J, Yang X G, Wang X Y, Zhang T Y, Liu Z Q, Tao L. Spatial-temporal distribution of double cropping rice's yield gap in Hunan Province. *Sci Agric Sin*, 2017, 50(2): 399-412. (in Chinese with English abstract)
- [29] 张强, 邓振镛, 赵映东, 乔娟. 全球气候变化对中国西北地区农业的影响. *生态学报*, 2008, 28(3): 1210-1218.
Zhang Q, Deng Z Y, Zhao Y D, Qiao J. The impacts of global climatic change on the agriculture in northwest China. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(3): 1210-1218. (in Chinese with English abstract)
- [30] 江敏, 金之庆, 石春林, 林文雄. 福建省基于自适应调整的水稻生产对未来气候变化的响应. *作物学报*, 2012, 38(12): 2246-2257.
Jiang M, Jin Z Q, Shi C L, Lin W X. Response of rice production based on self-adaption to climate change in Fujian Province. *Acta Agron Sin*, 2012, 38(12): 2246-2257. (in Chinese with English abstract)