

未来升温 1.5 °C 与 2.0 °C 背景下中国水稻产量可能变化趋势

李鸣钰¹, 高西宁², 潘 婕³, 熊 伟³, 郭李萍³, 林而达³, 李 阔³

(1. 辽宁省人工影响天气办公室, 沈阳 110166; 2. 沈阳农业大学农学院, 沈阳 110866;

3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要: 基于 ISI-MIP 的 5 个气候模式在 4 种 RCP 情景下模拟输出未来气候数据, 筛选未来升温 1.5 °C 和 2.0 °C 的情景数据, 依托 CERES-Rice 水稻模型, 模拟升温 1.5 °C 和 2.0 °C 的背景下中国各区水稻产量变化趋势, 综合分析未来气候变化特征与水稻产量之间的关系。结果表明: 在 1.5 °C 和 2.0 °C 升温背景下, 中国平均温度相对于基准时段分别升高 1.19 °C 和 1.87 °C, 平均降水量相对于基准时段分别增加 3.07% 和 6.17%。1.5 °C 升温背景下中国水稻单产平均减幅 7.49%, 减产面积占水稻种植总面积的 68.6%, 严重减产面积占水稻种植总面积的 10.3%, 其中华南双季稻区单产减幅最大, 而东北单季稻区单产增幅最大; 2.0 °C 升温背景下中国水稻单产平均减幅 12.02%, 减产面积占水稻种植总面积的 70.6%, 严重减产面积占水稻种植总面积的 18.7%, 其中华南双季稻区单产减幅仍然最大, 而西北单季稻区单产增幅最大。

关键词: 1.5 °C 升温; 2.0 °C 升温; CERES-Rice 模型; 水稻产量; 减产风险

全球气候变暖已经成为国际上不争的事实。IPCC 第五次评估报告指出, 1880—2012 年间全球地表升温幅度在 0.65~1.06 °C 之间, 平均升温 0.85 °C^[1]。在气候变暖背景下, 中国极端天气事件频率和强度出现明显变化, 北方旱灾面积扩大, 南方洪涝现象加重^[2], 已经给中国农牧业、生态系统、水资源、海岸带环境、人体健康与环境质量等其他领域造成严重的影响^[3,4]。为了应对气候变化产生的负面影响, 中国与近 200 个缔约方共同加入《巴黎气候变化协定》, 致力于将 21 世纪全球平均气温上升幅度控制在 2.0 °C 以内, 并为 1.5 °C 作出努力^[5]。目前对于气候变化的研究已经超过大气科学的研究范畴^[6], 各国学者都从不同的角度对其影响进行深入的探索, 特别是在中国研究气候变化对农业生产的影响变得尤为重要^[7]。水稻作为中国主要的粮食作物, 常年消费总量在 2 亿 t 左右, 其中 85% 以上用作口粮^[8], 在中国的粮食生产和安全保障中占有重要地位, 因此研究气候变化对水稻的影响具有重要的理论和现实意义^[9]。近年来国内外学者主要通过试验观测和模型的数值模拟分析气候变化对作物生产的影响, 在试验观测中大多使用 FACE (Free-air carbon dioxide enrichment) 装置探究 CO₂ 浓度增加条件下作物生长的变化^[10,11], 在作物模型研究中多是通过构建历史气候因子与水稻产量之间的经验回归函数^[12]、使用扩展的 C-D 生产函数模型进行分析^[13]、利用多种作物模型与气候模式相结合对作物生产

收稿日期: 2019-07-12; 修订日期: 2019-11-05

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2017YFD0300301); “十二五”国家科技支撑项目 (2013BAC09B00)

作者简介: 李鸣钰 (1995-), 男, 辽宁沈阳人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为气候变化影响风险评估与适应。

E-mail: limingyu1050@163.com

通讯作者: 李阔 (1982-), 男, 河北辛集人, 博士, 助理研究员, 研究方向为气候变化影响风险评估与适应。

E-mail: likuo@caas.cn

进行模拟^[14-16]。姚凤梅等^[17]将DSSAT模型与区域气候模式相结合对水稻产量进行模拟,认为升温对其产量呈现负面影响。刘珍环等^[18]利用作物空间分配模型,发现种植面积扩展对水稻增产的贡献率约54.5%,对减产的贡献率高达80%以上。Peng等^[19]发现在旱作季节,水稻生长季内最低温度每增加1℃产量下降10%,认为全球变暖下夜间气温升高导致水稻产量下降。Sarker等^[20]通过将1972—2009年的时间序列与水稻产量建立回归方程,认为最高温是水稻产量的主要影响因子。Zhou等^[21]认为中国东北黑龙江地区,在水稻生长季节,最低温每上升1℃增产约3.6%。Li等^[22]使用ORYZA 2000水稻模型模拟未来气候变化对南亚水稻生长的影响,认为干旱胁迫将导致水稻严重减产。以往的研究多是从历史的角度讨论气候变化对产量的影响或是所采用的未来气候模式比较单一,研究内容也多围绕站点尺度,并没有从区域的角度考虑,开展全球1.5℃和2.0℃升温背景下水稻产量变化的研究更是少之又少。本文将多气候模式、多气候情景与作物模型相结合,分析1.5℃和2.0℃升温背景下中国稻区温度和降水量的变化特征,评估未来不同升温背景下中国水稻产量变化趋势,为中国水稻生产适应气候变化行动提供科学支撑。

1 研究方法与数据来源

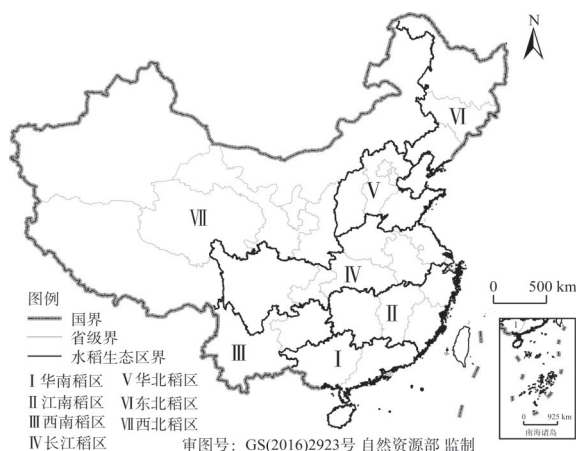
1.1 研究区概况

本文综合我国水稻种植分布^[23]、农业气候资源特征和省级行政区划,将我国分为7个水稻生态区(图1),分析未来升温情景对不同区域水稻产量的影响。包括:I为华南湿热双季稻区(广东、广西、海南),简称华南稻区;II为江南湿润双季稻区(浙江、江西、湖南、福建),简称江南稻区;III为西南高原湿润单季稻区(云南、贵州),简称西南稻区;IV为长江流域单季稻区(江苏、安徽、河南、湖北、重庆、四川),简称长江稻区;V为华北半湿润单季稻区(北京、天津、河北、山西、山东),简称华北稻区;VI为东北半湿润早熟单季稻区(黑龙江、吉林、辽宁),简称东北稻区;VII为西北干燥单季稻区(陕西、宁夏、甘肃、内蒙、新疆、青海、西藏),简称西北稻区。

1.2 数据来源

1.2.1 气象数据

本文使用的未来气候情景数据是由部门间影响模式比较计划(ISI-MIP)所推荐,基于第五阶段耦合模式比较计划(CMIP5)中5个全球气候模式(GCMs)以及4种典型排放情景(RCPs),模拟输出4种不同情景下的逐日格点降水量、最高气温、最低气温、太阳辐射等气象数据(基准时段1986—2005年,空间分辨率 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$)。其中气候模式包括HadGEM2-ES(英国哈德莱气候预测与研究中心模式)、GFDL-ESM2M(美国地球物理流体动力实验室模式)、IP-SL-CM5A-LR(法国皮埃尔—西蒙—拉



注:本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作,底图无修改,下同。

图1 中国水稻种植区划

Fig. 1 Rice planting regionalization in China

普拉斯研究所模式)、MIROC-ESM (日本海洋地球科学技术处模式)、NorESM1-M (挪威气候中心模式); 排放情景包括 RCP2.6 (低排放情景)、RCP4.5 (中低排放情景)、RCP6.0 (中高排放情景) 和 RCP8.5 (高排放情景)。

1.2.2 土壤数据

土壤数据来源于中国土壤数据库 (<http://vdb3.soil.csdb.cn/>), 包括土壤的整体性质 (土壤颜色、土壤种类、坡度、土壤剖面层数等) 和土壤各层的理化性质 (各层厚度、质地、有机质含量、pH 值、阳离子交换量等)。

1.2.3 田间管理数据

田间管理数据来自于中国气象局资料中心提供的分布在不同水稻种植区的农业气象实验站多年实测数据, 其中包括田间管理数据 (播种日期、水肥管理、移栽日期、种植密度、种植深度等)、物候期数据 (开花日期、成熟日期、收获日期等) 和产量要素数据 (穗粒数、千粒重、产量、地上部生物量等)。

1.3 研究方法

1.3.1 作物模型介绍及区域遗传参数的确定

DSSAT (农业技术转移决策支持系统) 作为当今世界上应用最为广泛的作物模型之一, 是由美国 IBISNAT (国际农业技术推广基准网) 研发, 用于模拟作物遗传特性、管理措施、环境等多个因素相互作用下, 作物的生长发育过程和最终产量的结果, 尤其是近年来被广泛应用于气候变化对农业生产影响评估方面。

本文使用的是 DSSAT 中 CERES-Rice 水稻模型, 模拟升温 1.5 °C 和 2.0 °C 条件下中国水稻产量的变化, 通过 DSSAT 中的 GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) 和 GenCalc (Genotype Coefficient Calculator) 模块的共同使用来进行遗传参数的站点校准与验证。先运用 GLUE 自动调参至少 5000 次以上, 再将 GLUE 中调好的参数结果放入 GenCalc 中进行微调, 使开花期、成熟期、千粒重、产量等模拟值与农气站实测值尽可能吻合, 从而确定站点的遗传参数。然后以水稻种植区为基本单位, 依据 RMSE 法进行遗传参数的区域校准与验证^[24,25], 从而得到适合该区域最具代表性的遗传参数。CERES-Rice 水稻模型需要重点考虑的 8 个遗传参数分别为: P_1 (完成基本营养生长期所需要的积温, °C · d); P_2R (光诱导期在不同光周期下所需要的积温, °C · d); P_3 (完成灌浆期所需的积温, °C · d); P_2O (最适光周期, h); G_1 (日辐射与同化物之间的转换系数); G_2 (籽粒重量, g); G_3 (相对分蘖系数); G_4 (温度胁迫系数)。

在对模型适用性进行验证时, 选取均方根误差 (RMSE), 符合度指数 (D) 作为评价指标。其中 RMSE 用来判别模型模拟值与实测值的误差大小, D 指数是一个标准化的度量指标, 用来判断模拟值与实测值的符合度, 取值范围在 0~1 之间。 D 值越接近 1 说明模拟值与实测值之间的一致性越好, 反之则越差^[25]。具体方法如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|sim_i - \overline{obs_i}| + |obs_i - \overline{obs_i}|)^2} \right] \quad (2)$$

式中: sim_i 为第 i 个模拟值; obs_i 为第 i 个实测值; $\overline{obs_i}$ 为实测值的平均值; n 为样本的

数量（个）。通过计算得到均方根误差 $RMSE$ 均在 $1042\sim1882\text{ kg/hm}^2$ 之间， D 指数均在 $0.23\sim0.66$ 之间，其中西北干燥单季稻区（Ⅶ）的水稻实验站点较少，农气站的作物观测数据不完整，使得该区域参数验证的 $RMSE$ 和 D 指数的数值不太理想。但除此之外，其他区域的模拟值与实测值吻合度较高，参数的验证较为理想，认为该套参数可对中国水稻进行模拟（表1）。

表1 中国不同水稻种植区域的品种遗传参数
Table 1 Genetic coefficients of rice in different planting regions of China

区域		品种参数							
		P_1	P_2R	P_3	P_2O	G_1	G_2	G_3	G_4
华南湿热双季稻区	早稻	880.0	55.5	315.0	12.0	45.0	0.2450	1.00	1.00
	晚稻	830.0	50.0	550.0	15.0	100.0	0.0265	1.00	1.00
江南湿润双季稻区	早稻	475.0	50.5	200.0	8.0	188.0	0.2750	1.00	1.00
	晚稻	450.0	115.0	390.0	11.7	88.0	0.2700	1.00	1.00
西南高原湿润单季稻区		596.0	55.0	345.0	12.0	65.0	0.2160	1.00	1.00
长江流域单季稻区		765.0	35.0	395.0	8.0	40.0	0.0285	1.00	1.00
华北半湿润单季稻区		450.0	85.5	360.0	11.5	68.0	0.0230	1.00	1.00
东北半湿润早熟单季稻区		220.0	35.0	295.0	9.1	55.0	0.0220	1.00	1.00
西北干燥单季稻区		625.0	38.0	355.0	8.3	50.0	0.0280	1.00	1.00

1.3.2 未来气候情景数据的确定

本文使用的全球升温 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 未来气候情景数据来自于4种RCPs（温室气体排放典型浓度路径）分别驱动5种GCMs（全球气候模式）所产生的模拟结果。首先对未来气候情景数据的基准时段进行确定，由于IPCC第五次评估报告以1850—1900年间平均温度为参照值，而中国大部分站点无该时段气象数据，故将1986—2005年定为基准期，并以该基准时段对气候模式输出的原始数据进行订正，利用订正过的各个情景逐年全球气温模拟值减去各自基准时段（1986—2005年）的模拟均值，再加上 $0.61\text{ }^{\circ}\text{C}$ （1986—2005年相对于1850—1900年平均增温 $0.61\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），得到逐年全球升温模拟值，再对其进行20年滑动平均处理，寻找升温 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间段。从20套未来气候情景数据中，按照“在21世纪末升温 $1.5\sim2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ”（全球升温 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）的标准，选择IPSL-CM5A-LR模式+RCP2.6情景和GFDL-ESM2M模式+RCP4.5情景；根据“在21世纪末升温 $2.0\sim2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且达到 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时段不早于2050年”（全球升温 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）的标准，选择NorESM1-M模式+RCP4.5情景和GFDL-ESM2M模式+RCP6.0情景。即升温 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 选用IPSL-CM5A-LR模式，RCP2.6，2021—2040年和GFDL-ESM2M模式，RCP4.5，2041—2060年；升温 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 选用NorESM1-M模式，RCP4.5，2061—2080年和GFDL-ESM2M模式，RCP6.0，2066—2085年。

1.3.3 水稻产量的模拟

由于主要研究未来气候变化对水稻产量的影响，故只考虑温度变化与水分胁迫所带来的影响，在施肥管理中设置为无胁迫状态，同时也不考虑 CO_2 的肥效作用。将各网格点的土壤数据、作物管理数据以及未来逐日气象格点数据输入到区域校准后的CERES-Rice模型中进行模拟，运行得到在升温 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 背景下，基准时段和未来气候情景逐年的水稻格点产量，以此计算在升温背景下不同区域水稻产量的相对变化。

2 结果分析

2.1 未来升温1.5℃与2.0℃背景下中国稻区温度和降水的概率密度分布

为了深入分析未来升温背景下的气候变化对水稻生产的影响, 首先开展升温1.5℃与2.0℃背景下中国各水稻种植区域温度和降水概率密度分布计算, 如图2所示。

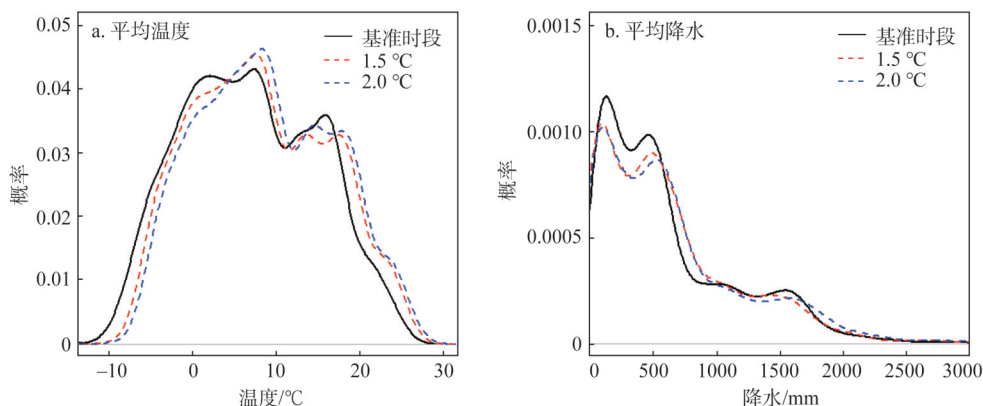


图2 全球升温1.5℃和2.0℃背景下中国温度和降水的概率密度分布曲线

Fig. 2 Probability Density Functions (PDFs) of Chinese temperature and precipitation under the 1.5 °C and 2.0 °C global warming scenarios

从全国温度概率密度分布来看(图2a), 基准时段最低温度和最高温度分别为 -11.5°C 和 26°C , 1.5°C 和 2.0°C 升温下最低温度和最高温度分别为 -10.5°C 、 27°C 和 -9.5°C 、 27.4°C 。在未来升温背景下, 两种升温阈值概率密度分布曲线较基准时段向正方向移动, 其峰值区均出现在 $6\sim 10^{\circ}\text{C}$ 之间, 次峰值区出现在 $12\sim 16^{\circ}\text{C}$ 之间; 低值区($<-5^{\circ}\text{C}$)的整体概率较基准时段偏低, 说明该范围内的格点占全国格点的比例有所减少; 高值区($>20^{\circ}\text{C}$)的整体概率较基准时段偏高, 说明该范围内的格点占全国格点的比例有所增加, 即在未来气候变化背景下, 高温发生概率增加而低温发生概率减少。

从全国降水量的概率密度分布来看(图2b), 两种升温背景下的降水量概率密度分布大致相同, 其概率分布呈现出双峰型, 两峰的峰值分别出现在 200 mm 和 600 mm 附近, 且均低于基准时段的概率。在 $0\sim 600\text{ mm}$ 区间内降水量的发生概率有所减少, $600\sim 1000\text{ mm}$ 范围内概率略微高于基准时段, 而在大于 1000 mm 范围内两者的概率分布基本相同, 说明未来我国不同格点平均降水量出现概率会有小幅度波动, 但极端降水事件概率与基准时段相似, 不会存在洪涝灾害概率增大的风险。

2.2 未来升温1.5℃与2.0℃背景下中国稻区气温变化特征

未来升温 1.5°C 背景下, 中国平均温度相对于基准时段升高 1.19°C 。在华北、东北和西北等中国北部稻区平均升温约为 1.07°C , 而在长江、西南、江南和华南等中国南部稻区平均升温在 1.51°C 左右, 升温超过 2.0°C 的高值区多出现在中国西南地区。未来升温 2.0°C 背景下, 中国平均温度相对于基准时段升高 1.87°C 。在华北、东北和西北等中国北部稻区平均升温约为 1.81°C , 而在长江、西南、江南和华南等中国南部稻区平均升温在 2.02°C 左右, 升温超过 3.0°C 的高值区多出现在南方及西北部分地区(图3)。

从图3可知,在1.5℃升温背景下,中国江南稻区升温幅度最大(1.69℃),华北稻区升温幅度最小(0.81℃)。在2.0℃升温背景下,长江稻区和江南稻区平均升温均超过2.0℃,且江南稻区升温幅度依然最大(2.17℃),华北稻区升温幅度最小(1.39℃)。总体来看,1.5℃阈值下中国北部与南部稻区温度变化差异明显,且呈现南高北低的趋势,而在2.0℃阈值下南北温度变化差异逐渐缩小。

2.3 未来升温1.5℃与2.0℃背景下中国稻区降水变化特征

未来升温1.5℃背景下,在长江、华北、东北等部分稻区降水量呈现增加的趋势,其相对增加了9.1%,而在华南、江南、西南、西北等部分稻区降水量呈现减少的趋势,其相对减少了2.95%。未来升温2.0℃背景下,除西北稻区外,其他稻区都呈现降水量增加的趋势,相对增加7.66%,变化趋势整体上呈现出东多西少的分布。

从图4可见,在1.5℃升温背景下,中国华北稻区降水量增幅最大(17.4%),西北稻区降水量减幅最大(7.47%)。在2.0℃升温背景下,华北稻区和西北稻区依然是降水量增幅和减幅的最大地区,其幅度分别为15.6%和6.2%。从总体来看,1.5℃阈值下中国南北稻区间的降水量变化差异明显,尤其是在华北稻区降水量增加趋势远超其他稻区,而在2.0℃阈值下,除西北稻区外各区域都呈现降水量增加趋势,其南北变化幅度差异逐渐减小,整体表现出大面积的增加趋势。

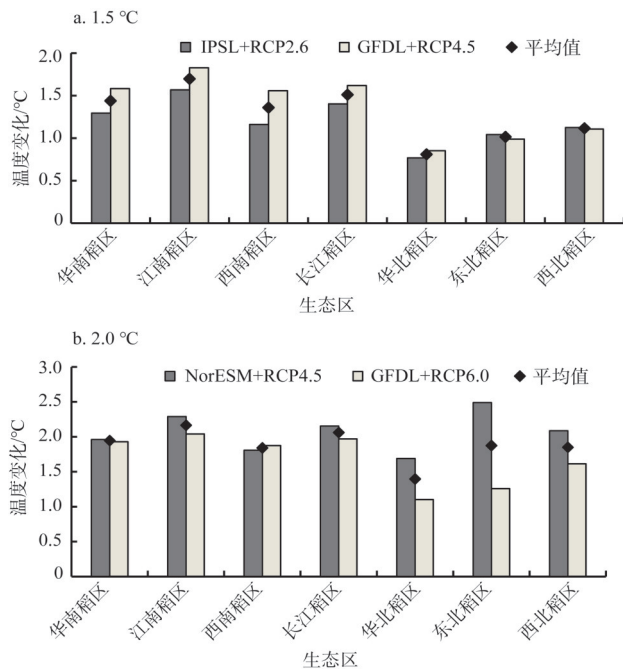


图3 全球升温1.5℃和2.0℃情景下各水稻种植区的温度变化

Fig. 3 Temperature change of different rice regions under the 1.5℃ and 2.0℃ global warming scenarios

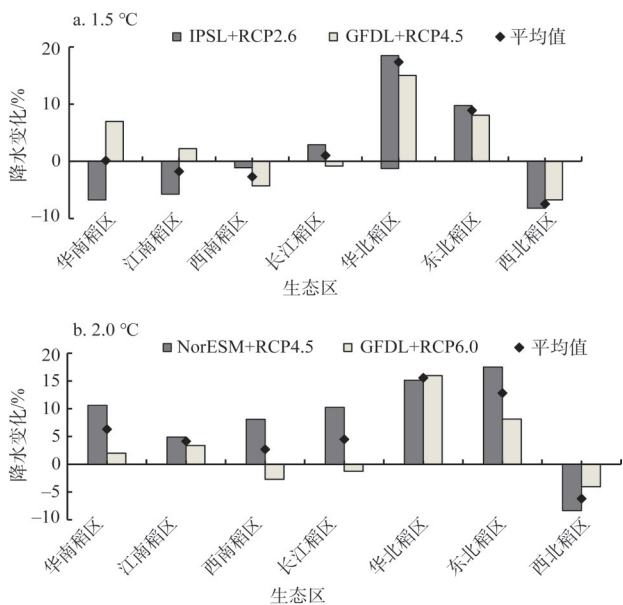


图4 全球升温1.5℃和2.0℃情景下各水稻种植区的降水量变化

Fig. 4 Precipitation change of different rice regions under the 1.5℃ and 2.0℃ global warming scenarios

2.4 升温1.5 °C背景下中国水稻产量变化分析

从图5可知,在未来1.5 °C升温情景下,中国大部分水稻种植区呈现减产趋势,而少数的增产区域主要集中在黑龙江北部、吉林东部、内蒙古东北部、甘肃南部及其他分散地区。中国水稻主产区位于华南稻区、江南稻区、长江稻区和东北稻区,四者产量之和约占全国稻作总产量的76%,其产量变化的趋势直接决定着我国水稻生产和粮食供应等重大安全问题。在水稻种植面积保持不变的前提下,升温1.5 °C背景下,华南稻区和西南稻区减产程度最严重,江南稻区和长江稻区存在不同程度减幅,其他三个稻区有轻微的增产趋势。

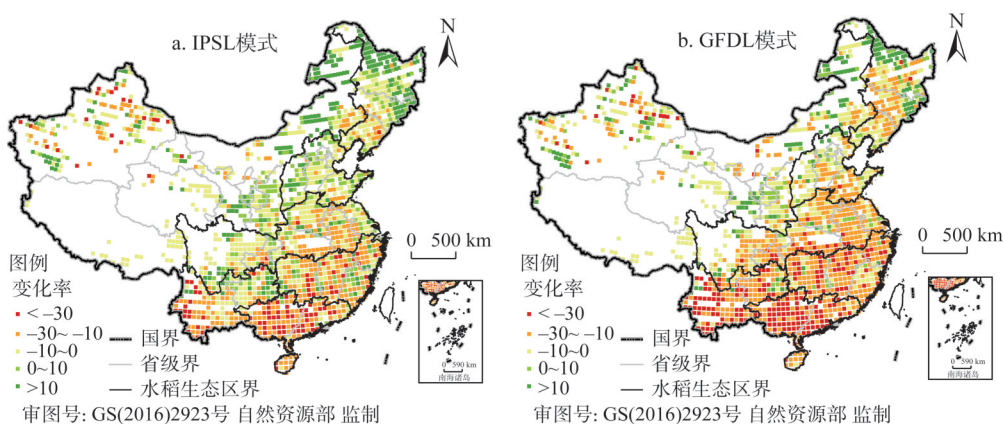


图5 升温1.5 °C背景下中国水稻产量变化的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of change of rice yield in China under the 1.5 °C global warming scenarios

在IPSL模式下(图5a),中国未来水稻单产相对于基准时段将减少3.09%。华南稻区减产面积占比97.9%,其中严重减产区域(减产30%以上)占华南水稻种植面积的42.9%;江南双季稻区减产面积占比72.4%,其中严重减产区域(减产30%以上)占江南水稻种植面积的9.78%,并主要集中于湖南南部和江西北部等地区;长江稻区减产面积占比77.9%,其中严重减产区域(减产30%以上)占长江水稻种植面积的1.03%,并主要集中于湖北东南部和安徽西南部等地区,即安徽、湖北、江西三省的交界处;而东北稻区增产面积占比52.8%,其中增产30%以上的区域占东北水稻种植面积的23.4%,并主要集中于黑龙江北部地区。

在GFDL模式下(图5b),中国水稻单产相对于基准时段平均减少11.8%。华南稻区减产面积占比99.6%,其中严重减产区域(减产30%以上)占华南水稻种植面积的60.6%,减产区域基本覆盖华南全境;江南稻区减产面积占比93.4%,其中严重减产区域(减产30%以上)占江南水稻种植面积的22.5%;长江稻区水稻减产面积占比89%,其中严重减产区域(减产30%以上)占长江水稻种植面积的12.9%,并主要集中于Ⅱ区(江南双季稻区)和Ⅳ区(长江流域单季稻区)的交界处;而东北稻区增产面积占比33.7%,其中增产30%以上的区域占东北水稻种植面积的19.3%,并主要集中于黑龙江北部及吉林东部地区。与IPSL模式相比,该模式下水稻的减产面积有所增加,尤其是华北地区、辽宁及吉林西部地区出现大范围减产现象,长江以南出现大范围的严重减产现象,在华南及云南地区表现最为明显。

对比两种模式 (IPSL+GFDL) 下的水稻单产变化率及面积占比结果可见 (图6), IPSL 模式下水稻减产面积占全部种植面积的 59.8%, GFDL 模式下水稻减产面积占比 73.3%。而从总体来看, 我国各稻区单产呈现北增南减的趋势, 东北稻区单产变化率最大 (+3.55%), 华南稻区单产变化率最小 (-25.21%); 水稻的减产面积呈现南多北少的趋势, 华南稻区减产面积占比最大 (98.8%), 西北稻区减产面积占比最小 (32.5%)。随着全球变暖, 在高纬度地区水稻适宜种植面积占比较多, 水稻单产也呈现略微增加趋势, 表明未来升温 1.5 °C 背景下北方高纬度地区将比南方低纬度地区更适宜水稻的种植生产。

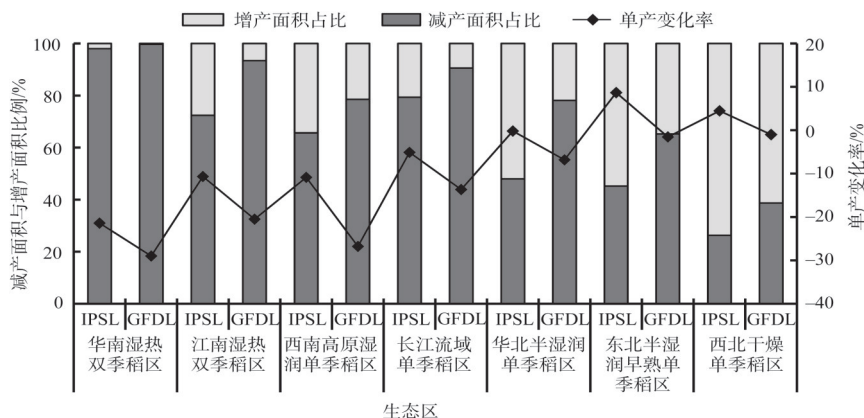


图6 升温 1.5 °C 背景下中国不同区域水稻产量变化

Fig. 6 Change of rice yield in different regions of China under the 1.5 °C global warming scenario

从图7中可以发现, 在两种模式下水稻产量变化率在-30%~0区间内集中了 65.1% 的水稻种植面积, 其中在-10%~0 范围的面积占比最大。研究表明, 升温 1.5 °C 背景下中国水稻产量总体表现为减产趋势, 一方面是因为水稻减产面积和单产减产幅度较大, 减产区域遍布我国的七大种植区, 且主要集中在华中、华南等水稻种植主产区, 气候变化对该地区水稻的影响直接导致全国水稻产量呈现减产趋势; 另一方面是由于水稻增产面积占比较小, 只占全国水稻种植面积的 24.6%, 增产区域多位于中国北方部分地方, 且其中一部分的增产区域集中于单产增幅较小的西北稻区和华北稻区。

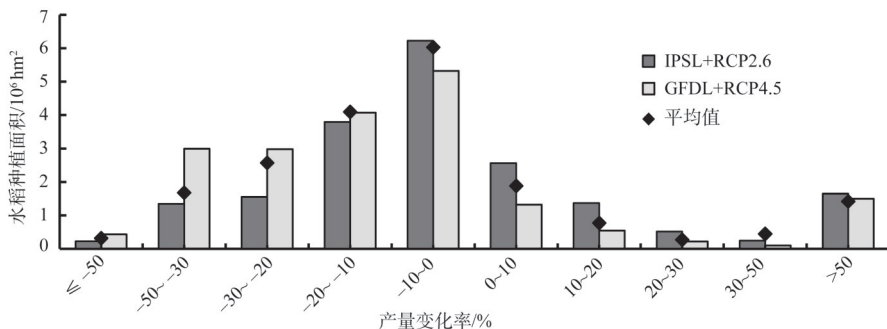


图7 升温 1.5 °C 背景下中国水稻产量相对基准时段变化的面积统计

Fig. 7 Statistics of grid area of different yield change rates between the simulation periods and the baseline periods in China under the 1.5 °C global warming scenario

2.5 升温 2.0 °C 背景下中国水稻产量变化分析

从图8可见, 中国大部分水稻种植区在升温 2.0 °C 背景下呈现减产趋势, 而增产区域主要集中在黑龙江北部、吉林东部、内蒙古呼和浩特周围以及宁夏甘肃交界处等地区, 相比于升温 1.5 °C 背景, 无论在减产分布还是产量变化上都更为严重。综合 2.0 °C 升温背景下产量的模拟结果来看, 东北稻区产量变化呈现更明显的北增南减趋势, 虽然东北稻区南部减产程度更加剧烈, 但整体上它仍是中国重要的水稻增产区, 华北地区从 1.5 °C 升温背景下的略微增产趋势, 逐渐变为大面积的减产, 而其他几个稻区则在原有的基础上表现出更为严重的减产趋势。

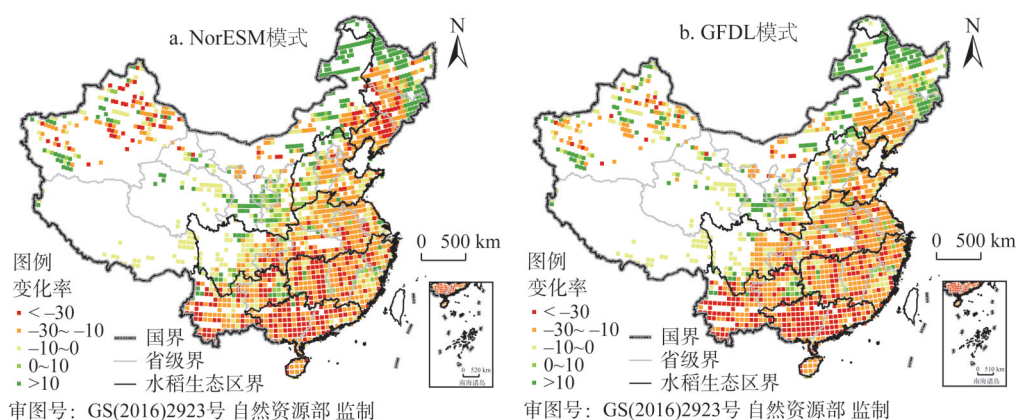


图8 升温 2.0 °C 背景下中国水稻产量变化的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of change of rice yield in China under the 2.0 °C global warming scenario

在 NorESM 模式下 (图 8a), 中国未来水稻单产相对于基准时段将减少 10.9%。华南稻区减产面积占比 99.6%, 其中严重减产区域 (减产 30% 以上) 占华南水稻种植面积的 56.1%; 江南稻区减产面积占比 91.9%, 其中严重减产区域 (减产 30% 以上) 占江南水稻种植面积的 28.4%, 以湖南为代表减产最为严重, 只有其东部沿海地区存在小范围增产或减产程度较小的区域; 长江稻区减产面积占比 92.3%, 其中严重减产区域 (减产 30% 以上) 占长江水稻种植面积的 20.1%, 除四川南部以外其余地区均有着不同程度的减产趋势; 而东北稻区增产面积占比 43.3%, 其中增产 30% 以上的区域占东北水稻种植面积的 29.8%, 并主要集中于黑龙江东北部地区。

在 GFDL 模式下 (图 8b), 中国未来水稻总产相对于基准时段将减少 13.1%。华南稻区减产面积占比 99.6%, 其中严重减产区域 (减产 30% 以上) 占华南水稻种植面积的 60.8%, 并大面积覆盖华南稻区; 江南稻区减产面积占比 94.4%, 其中严重减产区域 (减产 30% 以上) 占江南水稻种植面积的 24.7%; 长江稻区水稻减产面积占比 90.4%, 其中严重减产区域 (减产 30% 以上) 占江南水稻种植面积的 14.5%; 而东北稻区增产面积占比 45.1%, 其中增产 30% 以上的区域占东北水稻种植面积的 24.1%。与 NorESM 模式模拟结果相比, 长江、江南和东北稻区减产 30% 以上区域面积占比有所减少, 尤其是东北南部地区减产程度有明显的缓解趋势, 但大部分产量变化率仍然在 -30% ~ -10% 之间, 并且全国依然以水稻减产为主要的变化趋势。

对比两种模式 (NorESM+GFDL) 下的水稻单产变化率及面积占比结果可见

(图9), NorESM模式下水稻减产面积占全部种植面积的71.6%, GFDL模式下水稻的减产面积占比70.8%。而从总体来看, 中国各稻区单产变化和水稻减产面积的南北趋势与升温1.5℃背景基本相同, 华南稻区单产变化率最小(-29.4%), 东北稻区单产变化率最大(-0.74%); 华南稻区减产面积占比最大(99.6%), 西北稻区减产面积占比最小(30.7%), 但不同的是2.0℃升温背景下单产变化率呈现整体降低的趋势, 且趋势线变化更加平缓, 说明该背景下地区间产量极端变化差异逐渐缩小, 但减产趋势加重。

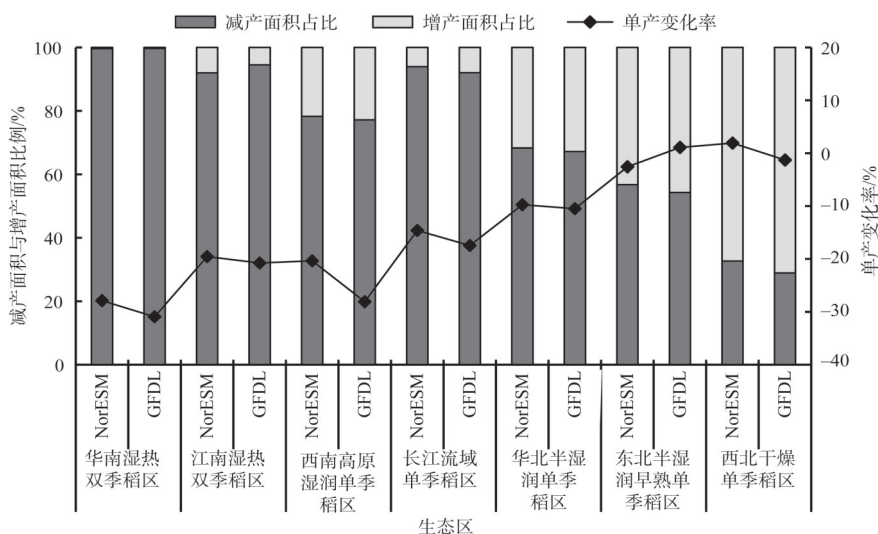


图9 升温2.0℃背景下中国不同区域水稻产量变化

Fig. 9 Change of rice yield in different regions of China under the 2.0℃ global warming scenario

从图10可以发现, 在两种模式下水稻产量变化率-50%~0区间内集中了74.7%的水稻种植面积, 其中变化率在-10%~0范围的面积占比最大, 而增产面积在产量变化率50%以上的区间占比最大。综合分析发现, 在2.0℃升温阈值条件下中国水稻整体呈现减产趋势, 其平均单产变化率达到-12.0%, 与1.5℃升温阈值相比减产程度更为严重, 增大了4.6%, 在全球升温气候变化背景下中国水稻的减产趋势将更为明显。

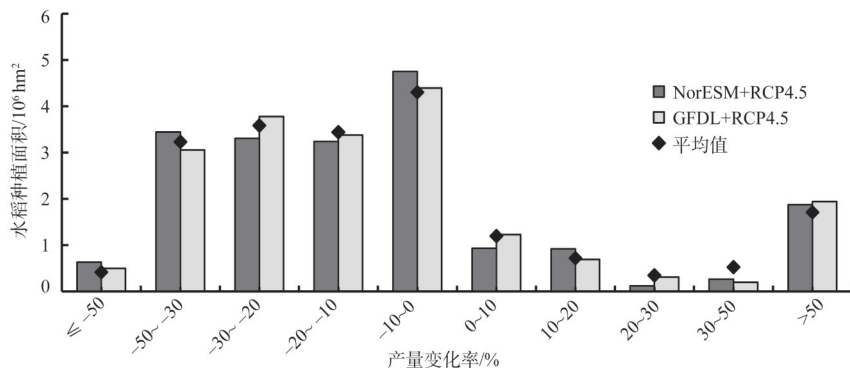


图10 升温2.0℃背景下全国水稻产量相对基准时段变化的面积统计

Fig. 10 Statistics of grid area of different yield change rates between the simulation periods and the baseline periods in China under the 1.5℃ global warming scenario

3 结论与讨论

3.1 结论

本文利用DSSAT中的CERES-Rice水稻模型进行区域校准,结合升温1.5 °C和2.0 °C背景下的气候数据模拟中国水稻在两种升温阈值下相对于基准时段(1986—2005年)的产量变化,并通过分析温度和降水量的变化趋势,来探究未来气候变化对中国水稻生产的影响,结果表明:

(1) 在1.5 °C和2.0 °C升温阈值下,中国平均温度相对于基准时段分别升高1.19 °C和1.87 °C,综合两者来看,江南稻区升温幅度最大(1.93 °C),华北稻区升温幅度最小(1.1 °C),南方地区平均温度增幅高于北方地区,呈现南高北低的趋势。随着未来温度阈值的不断升高,中国南北温度增幅差异缩小,平均温度的概率密度曲线相对于基准时段逐渐正向移动,且最低温增温幅度略高于最高温。

(2) 在1.5 °C和2.0 °C升温阈值下,中国平均降水量相对于基准时段分别增加3.07%和6.17%,综合两者来看,华北稻区降水量增幅最大(16.5%),西北稻区降水量减幅最大(6.84%),北方地区平均降水量增幅高于南方地区,尤其是在华北稻区,其降水量增加趋势远超其他稻区。随着未来温度阈值的不断升高,其南北降水量的变化差异有所减小,除西北稻区外其他各区降水量都开始呈现增加趋势。平均降水量的概率分布曲线相对于基准时段略微正向移动,极端降水事件出现的概率基本不变。

(3) 从气候变化对中国水稻产量的影响来看,2.0 °C升温阈值下我国水稻单产的减产风险明显高于1.5 °C升温阈值,其中1.5 °C升温背景下中国水稻平均单产减幅7.49%,减产面积占水稻种植总面积的68.6%,严重减产面积占总面积的10.3%;2.0 °C升温背景下中国水稻平均单产减幅12.02%,减产面积占水稻种植总面积的70.6%,严重减产面积占总面积的18.7%。与1.5 °C相比,2.0 °C升温背景下平均单产下降了近4.6%,减产面积占比增加了2%,严重减产面积占比增加了8.4%。结果表明,两种升温阈值下中国水稻平均单产减少,水稻减产面积增加,未来全球升温将给中国水稻带来严重的影响。

(4) 从产量变化的空间分布来看,两种升温背景下中国水稻产量变化的地理分布大致相同,全国大部分水稻种植区以减产趋势为主,而在东北稻区(黑龙江北部、吉林东部地区)和西北稻区(甘肃南部、宁夏地区)存在一定的增产区域。1.5 °C升温背景下,华南稻区单产减幅最大(25.21%),东北稻区单产增幅最大(3.55%);2.0 °C升温背景下,华南稻区单产减幅仍然最大(29.42%),西北稻区单产增幅最大(0.32%),整体表现出南方稻区减产严重而北方稻区略微增产的趋势。

3.2 讨论

本文通过将全球气候模式与作物模型相结合,探究升温1.5 °C和2.0 °C对水稻产量的影响。目前研究多是通过回归统计的方法建立气候要素与产量的关系模型,或是采用传统的C-D生产函数模型和加以改进的经济—气候模型探究气候与水稻产量之间的关系^[26-29],而使用DSSAT在区域尺度探究气候与水稻生产关系的研究还比较粗略^[30],尤其是在升温1.5 °C和2.0 °C背景下的研究更是少之又少。本文认为两种升温阈值下,北方稻区由于土壤肥沃,升温幅度较小,降水量增幅较大,且气候变化使其种植域扩大,导致升温背景下对该地区水稻生产的影响不大;而对于南方稻区来说,升温幅度较大,降水

量增幅较小,植物蒸腾作用变大,使得水稻生育期缩短,并出现明显的减产现象,导致升温背景下我国水稻减产趋势明显,给水稻的生产带来更多的不利影响。尽管前人的研究方法不尽相同,但最终都得到大致相同的结论,即未来升温情景对多数地区的水稻产量呈现负面影响^[31,32],这与本文的结论基本一致。

本文升温1.5℃和2.0℃背景是根据《巴黎协定》内容而来,其中“未来”时段的选择也是根据这两种升温阈值计算而来,通过将未来不同升温背景下模拟的水稻产量与基准时段进行对比,探究全球升温对中国水稻生产究竟有何种影响。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)最新发布的《IPCC全球升温1.5℃特别报告》(<https://archive.ipcc.ch/>)指出,目前全球气温较工业化前水平已经增加1℃,其升温1.5℃最快可能在2030年达到,将给全球带来更具破坏性的后果。结合本文模拟结果来看,若截取各个升温背景下1999—2018年(现阶段)的模拟产量,将各升温背景下未来时段与截取的1999—2018年产量进行对比,发现升温1.5℃和2.0℃背景下中国水稻平均减产幅度低于未来相对基准时段的减产幅度,表明随着全球升温,在不考虑农业技术更新、品种改良、基础设施完善等因素的影响下,气候变化对水稻生产是具有负面影响且较为严重的。在未来水稻的生产中,需采取相应趋利避害的措施、提高农业生产技术来实现水稻的稳产。

本文中还有着诸多不确定性因素。首先是使用模拟数据的不确定性,未来气候情景数据是气候模式在假设排放情景下的数值模拟,这就意味着当我们使用时要以“假设情景”为前提、“气候状态”为基础进行模拟,既不能把模拟结果认为是天气预报或短期气候预测的结果,也不能把气候情景数据与实际数据逐年对应,它表示的是一种气候的变化状态和趋势,应该从年代际以上的时间尺度进行考虑,这就导致了情景数据中不同年份的气象数据差异较大,可能与正常认知有些不同,使得模型模拟不同年之间的产量差异和不确定性更大。其模拟虽然不能得到未来气候变化下水稻产量的准确数值,但对于整个气候状态下水稻产量的变化趋势有着比较准确的方向性把控,可以在宏观决策方面对水稻生产提供一定的战略性指导。

其次是未来农业生产的技术发展的不确定性,本文建立在未来农业生产条件与现在保持一致的前提下,所得结论未考虑种植区域及边界变化、水稻品种、农作管理措施(例如播期、种植密度、水肥管理等)等其他因素的改变,如选择或培育耐高温和耐干旱的水稻品种来适应气候变化、改变中国南方稻区灌溉措施以应对未来降水量减少的趋势、将长江稻区和西南稻区的单季稻种植改为双季稻种植模式,提高当地的水稻复种指数、选用生育期长的中晚熟品种代替生育期较短的早中熟品种,以充分利用气候变化带来的有利种植条件。这些措施的考虑都可有效应对气候变化所带来的不利影响,使水稻生产变得更适应未来气候的变化,模拟出的产量结果也将更优于现有结果。

最后是来源于模型自身的不确定性因素,CERES-Rice水稻模型不能很好地模拟病虫害以及一些极端气象灾害对作物的影响,本文也未考虑在高温缺水条件下CO₂对水稻光合作用和蒸腾作用的影响,以及CO₂肥效作用对未来气候变化不利影响的补偿程度。按照目前的研究认为,未来气候变化很快会使全球温度超过1.5℃甚至达到2.0℃,针对这些气候变化问题如何采取合理的适应措施,确定何种水稻抗逆品种或基因型更能适应未来的气候变化,以及如何消除或修正研究中的不确定性,需要在以后的研究中进一步细化和完善。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge UK: Cambridge University Press.
- [2] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8. [DING Y H, REN G Y, SHI G Y, et al. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3-8.]
- [3] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告(II): 气候变化的影响与适应. 气候变化研究进展, 2006, 2(2): 51-56. [LIN E D, XU Y L, JIANG J H, et al. National assessment report of climate change (II): Climate change impacts and adaptation. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(2): 51-56.]
- [4] 吴绍洪, 罗勇, 王浩, 等. 中国气候变化影响与适应: 态势和展望. 科学通报, 2016, 61(10): 1042-1054. [WU S H, LUO Y, WANG H, et al. Climate change impact and adaption in China: Current situation and future prospect. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(10): 1042-1054.]
- [5] JOERI R, MICHEL D E, NIKLAS H, et al. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2.0 °C. *Nature*, 2016, 534(7609): 631-639.
- [6] 曾志勇. 气候变化对农业影响的研究进展与前沿: 以水稻为例. 江苏农业科学, 2019, 47(3): 20-26. [ZENG Z Y. Research progress and frontier on impact of climate change on agriculture: Taking rice as an example. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(3): 20-26.]
- [7] 潘根兴, 高民, 胡国华, 等. 气候变化对中国农业生产的影响. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1698-1706. [PAN G X, GAO M, HU G H, et al. Impacts of climate change on agricultural production of China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1698-1706.]
- [8] 章秀福, 王丹英, 方福平, 等. 中国粮食安全和水稻生产. 农业现代化研究, 2005, 26(2): 85-88. [ZHANG X F, WANG D Y, FANG F P, et al. Food safety and rice production in China. *Research of Agricultural Modernization*, 2005, 26(2): 85-88.]
- [9] 凌霄霞, 张作林, 翟景秋, 等. 气候变化对中国水稻生产的影响研究进展. 作物学报, 2019, 45(3): 323-334. [LING X X, ZHANG Z L, ZHAI J Q, et al. A review for impacts of climate change on rice production in China. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(3): 323-334.]
- [10] 蒋倩, 朱春梧, 刘钢, 等. 籼稻和粳稻品种糙米矿质营养对开放式空气 CO₂ 浓度升高的响应. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1363-1369. [JIANG Q, ZHU C W, LIU G, et al. Responses of mineral nutrients in brown rice of indica and japonica cultivars (*Oryza sativa* L.) to elevated atmospheric [CO₂]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(5): 1363-1369.]
- [11] LONG S P, AINSWORTH E A, LEAKEY A, et al. Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science*, 2006, 312(5782): 1918-1921.
- [12] 熊伟, 冯灵芝, 居辉, 等. 未来气候变化背景下高温热害对中国水稻产量的可能影响分析. 地球科学进展, 2016, 31(5): 515-528. [XIONG W, FENG L Z, JU H, et al. Possible impacts of high temperatures on China's rice yield under climate change. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(5): 515-528.]
- [13] 尹朝静, 李谷成, 范丽霞, 等. 生育期气候变化对我国水稻主产区单产的影响: 基于扩展 C-D 生产函数的实证分析. 中国农业大学学报, 2018, 23(10): 183-192. [YIN C J, LI G C, FAN L X, et al. Study on the impact of climate change during rice's growing seasons on rice yield in main region: An empirical analysis based on the extended C-D production function. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(10): 183-192.]
- [14] 李阔, 熊伟, 潘婕, 等. 未来升温 1.5 °C 与 2.0 °C 背景下中国玉米产量变化趋势评估. 中国农业气象, 2018, 39(12): 765-777. [LI K, XIONG W, PAN J, et al. Trend evaluation on changes of maize yield in China under global warming by 1.5 °C and 2.0 °C. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(12): 765-777.]
- [15] 孙茹, 韩雪, 潘婕, 等. 全球 1.5 °C 和 2.0 °C 升温对中国小麦产量的影响研究. 气候变化研究进展, 2018, 14(6): 573-582. [SUN R, HAN X, PAN J, et al. The impact of 1.5 °C and 2.0 °C global warming on wheat production in China. *Climate Change Research*, 2018, 14(6): 573-582.]
- [16] 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. 作物学报, 2010, 36(9): 1519-1528. [YANG S B, SHEN S H, ZHAO X Y, et al. Impacts of climate changes on rice production in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(9): 1519-1528.]
- [17] 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. 气候与环境研究, 2007, 12(5):

- 659-666. [YAO F M, ZHANG J H, SUN B N, et al. Simulation and analysis of effects of climate change on rice yields in Southern China. *Climatic and Environmental Research*, 2007, 12(5): 659-666.]
- [18] 刘珍环, 李正国, 唐鹏钦, 等. 近 30 年中国水稻种植区域与产量时空变化分析. *地理学报*, 2013, 68(5): 680-693. [LIU Z H, LI Z G, TANG P Q, et al. Spatial-temporal changes of rice area and production in China during 1980-2010. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 680-693.]
- [19] PENG S B, HUANG J L, JOHN E S, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *PNAS*, 2004, 101(27): 9971-9975.
- [20] SARKER M A R, ALAM K, GOW J. Exploring the relationship between climate change and rice yield in Bangladesh: An analysis of time series data. *Agricultural Systems*, 2012, 112: 11-16.
- [21] ZHOU Y, LI N, DONG G, et al. Impact assessment of recent climate change on rice yields in the Heilongjiang reclamation area of Northeast China. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(11): 2698-2706.
- [22] LI T, ANGELES O, RADANIELSON A, et al. Drought stress impacts of climate change on rainfed rice in South Asia. *Climatic Change*, 2015, 133(4): 709-720.
- [23] 梅方权, 吴宪章, 姚长溪, 等. 中国水稻种植区划. *中国水稻科学*, 1988, 2(3): 97-110. [MEI F Q, WU X Z, YAO C X, et al. Rice cropping regionalization in China. *Chinese Journal of Rice Science*, 1988, 2(3): 97-110.]
- [24] 熊伟. 站点 CERES-Rice 模型区域应用效果和误差来源. *生态学报*, 2009, 29(4): 2003-2009. [XIONG W. The performance of regional simulation of CERES-Rice model and its uncertainties. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2003-2009.]
- [25] 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. *生态学报*, 2008, 28(5): 2140-2147. [XIONG W, LIN E D, YANG J, et al. Comparison of two calibration approaches for regional simulation of crop model. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2140-2147.]
- [26] 左慧婷, 娄运生, 李忠良, 等. 不同气候带典型区域水稻产量主控气候因子分析及预测. *自然灾害学报*, 2018, 27(5): 116-127. [ZUO H T, LOU Y S, LI Z L, et al. Analysis and prediction of major climate factors controlling rice yield in typical climate regions of China. *Journal of Natural Disasters*, 2018, 27(5): 116-127.]
- [27] 陈超, 庞艳梅, 张玉芳, 等. 四川单季稻产量对气候变化的敏感性和脆弱性研究. *自然资源学报*, 2016, 31(2): 331-342. [CHEN C, PANG Y M, ZHANG Y F, et al. Study on the sensitivity and vulnerability of single cropping rice yield to climate change in Sichuan. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(2): 331-342.]
- [28] 周曙东, 朱红根. 气候变化对中国南方水稻产量的经济影响及其适应策略. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(10): 152-157. [ZHOU S D, ZHU H G. Economic analysis of climate change impact on the rice yield in southern China and its adaptive strategy. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(10): 152-157.]
- [29] 胡慧芝, 刘晓琼, 王建力. 气候变化下汉中盆地水稻产量变化研究. *自然资源学报*, 2018, 33(4): 609-620. [HU H Z, LIU X Q, WANG J L. Study on the change of rice yield in Hanzhong Basin under climate change. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(4): 609-620.]
- [30] 杜朝正. 基于 DSSAT 模型的中国水稻产量时空模拟研究. *现代农业科技*, 2015, (10): 211-213. [DU C Z. Study on spatial and temporal simulation of rice yield in China based on DSSAT model. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015, (10): 211-213.]
- [31] SHEEHY J E, MITCHELL P L, FERRER A B. Decline in rice grain yields with temperature: Models and correlations can give different estimates. *Field Crops Research*, 2006, 98(2): 151-156.
- [32] 朱红根. 气候变化对中国南方水稻影响的经济分析及其适应策略. 南京: 南京农业大学, 2010. [ZHU H G. The economic analysis of climate change impact on rice in Southern China and its adaptive strategies. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.]

Possible trends of rice yield in China under global warming by 1.5 °C and 2.0 °C

LI Ming-yu¹, GAO Xi-ning², PAN Jie³, XIONG Wei³, GUO Li-ping³, LIN Er-da², LI Kuo³

(1. Liaoning Weather Modification Office, Shenyang 110166, China; 2. College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: Five climate models of ISI-MIP were used to simulate and output future climate data under four RCP scenarios, and the scenario data of global warming by 1.5 °C and 2.0 °C in the future was screened. Based on CERES-Rice model, the trends of rice yield in various regions of China were simulated under the two scenarios, and the relationship between characteristics of future climate change and rice yield were comprehensively analyzed. The results showed that: under the global warming of 1.5 °C and 2.0 °C, the average temperature in China increased by 1.19 °C and 1.87 °C, respectively, and the average precipitation in China increased by 3.07% and 6.17%, respectively, relative to baseline period. Under the global warming of 1.5 °C, the yield of rice per unit area decreased by 7.49% on average, the area of yield reduction and serious yield reduction accounted for 68.8% and 10.3% of the total rice planting area, respectively. Results showed that the biggest reduction rate was found in double cropping rice planting area of South China, and the biggest increase rate was observed in single cropping rice planting area of Northeast China. Under the global warming of 2.0 °C, the yield of rice per unit area decreased by 12.02% on average, and the area of yield reduction and serious yield reduction accounted for 70.6% and 18.7% of the total rice planting area. And also, the biggest reduction rate was found in double cropping rice planting area of South China, and the biggest increase rate was observed in single cropping rice planting area of Northwest China.

Keywords: global warming by 1.5 °C; global warming by 2.0 °C; CERES-Rice model; rice yield; yield reduction risk