

# RCP 8.5气候变化情景下21世纪印度粮食单产变化的多模式集合模拟

张学珍<sup>1,2</sup>, 李侠祥<sup>1,2</sup>, 张丽娟<sup>3</sup>, 席建超<sup>1</sup>, 戴尔阜<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 哈尔滨师范大学 寒区地理环境监测与空间信息服务  
黑龙江省重点实验室, 哈尔滨 150025)

**摘要:** 基于跨部门影响模型比较计划(ISI-MIP)中20种气候模式与作物模型组合的模拟结果, 预估了RCP 8.5排放情景下21世纪印度小麦和水稻单产变化。研究发现:①多模式集合模拟结果基本再现了印度小麦和水稻单产的空间差异;同时,再现了小麦和水稻单产对温度和降水变化的响应特征:与温度呈负相关,与降水呈正相关。②RCP 8.5情景下,水稻和小麦生长季温度和降水均呈增加趋势,小麦生长季的温度、降水增加幅度大于水稻。空间上,温度增加幅度自北向南逐渐减小,降水增幅则逐渐增加,并且小麦种植区升温幅度大于非种植区,降水增幅则少于非种植区,水稻种植区升温幅度小于非种植区,降水增幅则多于非种植区。③RCP 8.5情景下,小麦和水稻单产均呈下降趋势,21世纪后半叶尤为明显。小麦单产的下降速度明显大于水稻,其中21世纪前半叶小麦和水稻单产下降速度约分别为1.3%/10a ( $P < 0.001$ )和0.7%/10a ( $P < 0.05$ ),后半叶分别增至4.9%/10a ( $P < 0.001$ )和4.4%/10a ( $P < 0.001$ )。小麦和水稻单产变化存在明显的空间异质性,小麦单产的最大下降幅度出现在德干高原西南部,降幅约60%,水稻单产最大下降幅度出现在印度河平原北部,降幅约50%。这意味着未来气候变化情景下印度粮食供给将面临较大的挑战。

**关键词:** 印度;粮食单产;多模式集合预估;RCP 8.5情景;ISI-MIP

DOI: 10.11821/dlxb201911009

## 1 前言

粮食作为人类赖以生存的必需品,是社会经济发展和政治稳定的重要物质基础。历史古训:“立国兴邦,无粮则殇”。虽然当今世界人类财富和生产力水平已达到空前的高度,但粮食短缺仍是影响社会安定和政权稳定的重要因素<sup>[1]</sup>。印度是世界人口第二大国,也是粮食消费大国,其国内粮食供需关系变化,不仅影响自身的社会和政权稳定,而且在经济全球化背景下还可能对国际社会造成一定影响。自20世纪60年代以来,通过“绿色革命”,印度基本实现了粮食自给,并且开始出口部分余粮。但是,2001-2011年人口年均增长率达5.9%,同期小麦和水稻单产年均增长率仅为约1%和3%<sup>[2]</sup>,并且在全球气候剧烈变化的背景下,印度作为低纬度热带国家,粮食生产将受到未来气候变化的巨大

收稿日期: 2018-05-28; 修订日期: 2019-08-22

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0600401); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2016-6, QYZDB-SSW-DQC005); 中国科学院地理科学与资源研究所杰出青年人才基金项目(2015RC101); 中国科学院青年创新促进会(2015038) [Foundation: The National Key Research and Development Program of China, No.2016YFA0600401; Key Program from CAS, No.ZDRW-ZS-2016-6, No.QYZDB-SSW-DQC005; Outstanding Young Scholars from IGSNRR, No.2015RC101; Youth Innovation Promotion Association CAS, No.2015038]

通讯作者: 张学珍(1981-), 男, 山东济宁人, 博士, 副研究员, 主要从事气候变化研究。E-mail: xzzhang@igsrr.ac.cn

2314-2328 页

威胁<sup>[3-4]</sup>, 给未来的粮食安全带来了巨大挑战。因此, 研究未来气候变化情景下印度粮食产量变化, 对于评估未来印度粮食供需平衡具有重要意义。

学术界对未来气候变化情景下印度粮食安全问题开展了一系列研究。研究表明, 在未来温度不断升高且降水不稳定变化的情景下, 若不考虑CO<sub>2</sub>浓度增加带来的肥效作用, 印度作物单产将显著降低。基于历史气候变化与粮食单产之间的统计关系推测, 到21世纪末印度水稻单产与现在相比将降低15%, 小麦将降低22%<sup>[3]</sup>。利用面板数据的分析预测指出, 在短期(2010-2039年)气候变化情景下, 印度主要粮食作物单产将减产4.5%~9.0%, 在长期(2070-2099年)气候变化情景下, 将减产25%甚至更多<sup>[5]</sup>。基于作物模型的模拟表明: 到21世纪末印度小麦可能明显减产, 并且南部减产幅度尤为明显<sup>[6]</sup>。CO<sub>2</sub>是作物生长不可缺少的元素之一, 其浓度增加可以增强作物的光合作用、提高水分利用效率<sup>[7-8]</sup>, 在一定程度上能够弥补因温度升高导致的粮食单产降低<sup>[9-12]</sup>。CERES-Rice模型的模拟发现, 若不考虑CO<sub>2</sub>的肥效作用, 到21世纪中期印度水稻单产将下降3%~17%, 若考虑CO<sub>2</sub>的肥效作用, 将增加6%~20%<sup>[13]</sup>。APSIM模型的模拟发现, RCP 2.6排放情景下, 温度增加将导致印度中央邦小麦单产下降, 但CO<sub>2</sub>浓度增加带来的肥效作用可部分抵消增温的负面影响<sup>[11]</sup>。CLMcrop模型模拟的RCP 4.5和RCP 8.5排放情景下印度小麦、水稻单产变化也呈现出上述相同的结论<sup>[14]</sup>。此外, 氮、磷、钾等营养元素也是决定粮食作物最终单产的重要因素。在RCP 8.5排放情景下, 是否考虑氮元素的肥效作用对小麦、水稻等粮食作物单产的预估结果影响较大<sup>[15]</sup>。综上可知, 关于印度粮食单产预估的研究已取了一系列的重要成果, 但已有研究多数基于统计手段或单个(几个)模式。在统计预测模型中, 解释变量的选择及参数估计的差异对预估结果的影响较大。虽然也有一定数量的研究采用了作物模型, 但是模型之间差异较大, 并且部分研究忽视了CO<sub>2</sub>浓度增加以及氮、磷、钾等营养元素的肥效作用。

多模式集合模拟手段可以消除单个模式预估结果的不确定性, 提高预估的可靠性<sup>[16-18]</sup>, 但目前此类研究还比较薄弱, 这不利于制定合理有效的气候变化适应措施。为此, 本文拟引入气候预估领域的多模式集合模拟方法, 采用多个气候系统模式与多个作物模型组合预估结果, 开展21世纪印度小麦和水稻两大粮食作物单产变化趋势的预估研究, 以期为适应未来气候变化提供科学基础。

## 2 数据来源与方法

### 2.1 数据来源

本文采用的印度粮食产量模拟数据为跨部门影响模型比较计划(The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, ISI-MIP)提供的水稻和小麦单位面积产量(下文简称“单产”, 参见<https://esg.pik-potsdam.de/search/isimip-ft/>)。ISI-MIP由德国波茨坦气候影响研究所(Potsdam Institute for Climate Impact Research, PIK)和国际应用系统分析研究所(International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA)组织发起, 旨在搭建一个在不同空间尺度上, 气候变化对不同领域影响差异的研究比较平台<sup>[19]</sup>。其中, 21世纪气候变化情景下的农业风险评估是ISI-MIP的主要工作之一。其主要研究手段是将典型大气CO<sub>2</sub>排放路径(RCPs)驱动的气候系统模式与作物模型耦合, 即利用气候系统模式在4种典型排放路径下(RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5, 即人为排放温室气体至21世纪末产生的辐射强迫为2.6 W/m<sup>2</sup>, 4.5 W/m<sup>2</sup>, 6.0 W/m<sup>2</sup>, 8.5 W/m<sup>2</sup>)的气候变化预估结果分别驱动不同的作物模型, 模拟未来气候变化情景下的作物产量<sup>[15, 20]</sup>。

ISI-MIP 共完成了 5 个气候系统模式 (HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, GFDL-ESM2M, NorESM1-M) 与 7 个作物模型 (EPIC, GEPIC, pDSSAT, PEGASUS, GAEZ-IMAGE, LPJ-GUESS, LPJmL) 共计 35 种模式组合的小麦和水稻单产模拟。由于 GAEZ-IMAGE、LPJ-GUESS 与 LPJmL 作物模型仅考虑了水分胁迫 (W) 和温度胁迫 (T), 忽视了其他营养元素对粮食作物生长的影响, 模拟结果具有较大的不确定性<sup>[15, 21]</sup>。因此, 本文选用了 5 个气候系统模式、4 个作物模型 (EPIC, GEPIC, pDSSAT, PEGASUS) 共计 20 种模式组合的小麦和水稻单产模拟 (表 1)。其中, PEGASUS 模型缺失水稻的模拟结果, 因此水稻的模拟数据共有 15 种模式组合。模式组合的模拟时间起自 20 世纪 70-80 年代, 终止于 21 世纪末。根据气候变化模拟试验设计, 2005 年及其之前为历史模拟, 用于模式验证和评估, 2006 及以后为气候变化情景预估。所有作物模型模拟的空间分辨率为 0.5°×0.5°, 每个网格均涵盖了灌溉地与非灌溉地 (雨养地), 因此, 每个网格均包括了单一作物的灌溉地单产与雨养地单产。

表 1 气候系统模式与作物模型  
Tab. 1 Climate system models and crop models

气候系统模式		作物模型			
模式名称	研发机构	模型名称	研发机构	胁迫项	模拟时间及作物
HadGEM2-ES	哈德利气候中心	EPIC	维也纳(BOKU)自然资源与生命科学大学	W, T, H, A, N, P, BD, AL	1980-2099 年; 小麦、水稻
IPSL-CM5A-LR	法国 Pierre-Simon 物理学研究所	GEPIC	瑞士联邦水质科学技术研究所	W, T, H, A, N, P, BD, AL	1971-2099 年; 小麦、水稻
MIROC-ESM-CHEM	日本海洋地球科学与技术局、大气海洋研究所和国家环境变化研究所	PEGASUS	英国东英吉利大学延德尔气候变化研究中心, 加拿大麦吉尔大学	W, T, H, N, P, K	1971-2099 小麦
GFDL-ESM2M	美国地球物理流体动力学实验室	pDSSAT	芝加哥大学计算机学院	W, T, H, A, N	1971-2099 年 小麦、水稻
NorESM1-M	挪威气候中心				

注: W: 水分胁迫; T: 温度胁迫; H: 比热胁迫; A: 氧胁迫; N: 氮胁迫; P: 磷胁迫; K: 钾胁迫; BD: 土壤容重; AL: 铝胁迫。

4 种典型排放路径下的 RCP 8.5 排放情景是指: 在不实施有效气候变化减缓措施的情况下, 人类活动导致温度气体浓度达到的最高情景, 在一定程度上代表人类未来可能面临的最恶劣气候状态。在该情景下, 到 21 世纪末全球平均温度升幅约为 3.7 °C (2.6~4.8 °C)<sup>[22]</sup>, 其中印度地区升温幅度高达约 4.1 °C (3.3~4.8 °C)<sup>[23]</sup>, 明显高于全球平均水平。与此同时, 印度地区极端降水<sup>[24]</sup>、热浪<sup>[25]</sup>等极端气候事件频率将明显增加, 这对该地区粮食安全生产造成巨大威胁。因此, 本文以 RCP 8.5 排放情景下的粮食单产作为研究对象, 旨在揭示最恶劣气候状态下的印度粮食单产变化, 为应对未来气候变化提供“底线”。该排放情景下的模拟数据曾被用于评估全球平均的粮食产量<sup>[15]</sup>及中国区域的粮食产量变化趋势<sup>[26]</sup>。

本文采用的印度粮食产量统计 (观测) 数据为小麦和水稻历史单产及作物种植制度。其中, 小麦和水稻单产数据分两个时段, 1981-2005 年和 2015-2016 年, 前一时段的统计单元为印度全国, 后一时段的统计单元为印度各邦。这些数据均来自于印度农业部、印度农民福利农业合作部和印度农民福利经济和统计局联合提供的 2016 年农业统计报告。本文采用的历史观测温度和降水数据来自于东英吉利大学气候研究机构

(Climatic Research Unit, CRU) 2015年发布的TS v3.23数据集, 空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。该数据集的数据源为地面站点观测数据, 空间格网化过程考虑了站点数量和空间分布随时间的变化以及观测方法变化导致的不确定性<sup>[27]</sup>, 是当前全球气候变化研究领域使用最广泛的气象观测数据集。本文使用的灌溉地和雨养地数据与ISI-MIP中作物模型输入一致, 为法兰克福大学地理研究院提供的全球网格化的灌溉地及雨养地面积数据(<http://www.uni-frankfurt.de/45218031>), 分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。印度历史人口统计资料及未来百年印度人口预估资料均来源于联合国经济和社会事务部2017年发布的世界人口展望资料(<https://esa.un.org/unpd/wpp/Download/Standard/Population/>)。

## 2.2 分析方法

研究数据的分析包括两部分: 一是模型验证, 二是模拟预估。其中, 模型验证从两个方面展开, 一是验证多模式集合模拟粮食单产空间差异的能力, 二是验证多模式集合模拟粮食单产对温度、降水变化响应特征的能力。在未来粮食单产的模拟预估方面, 利用多模式集合模拟方法, 首先分别分析了水稻和小麦生长季的未来气候变化情景, 然后分析了气候变化情景下水稻和小麦单产的变化趋势及其空间差异, 并依据模式预估结果之间的离散程度评估了集合预估结果的不确定性。

**2.2.1 计算网格和区域平均单产** 印度灌溉地与雨养地共存, 统计的粮食单产是雨养地和灌溉地单产的“平均值”。模型模拟显示: 灌溉地水稻和小麦单产较雨养地单产分别偏高2.01 t/ha和0.49 t/ha。为进行模拟与观测数据的对比, 本文以灌溉地与雨养地的面积为权重, 加权计算每个网格一种作物的平均单产。在多模式集合过程中, 考虑到小麦和水稻模式组合数分别仅有20个和15个, 为避免极值对算术平均值的影响, 本研究利用所有模式组合的中位数表征多模式集合模拟结果(简称“MMs”)。进而, 以各网格的播种面积为权重, 加权计算了印度全国平均的单一作物单产。

**2.2.2 分析粮食单产对温度、降水变化的响应** 一般认为, 20世纪70年代以来气候变化背景下, 粮食单产的趋势变化主要由稳定发展的生产力(技术进步)和气候长期趋势性变化导致<sup>[28]</sup>, 而粮食单产的年际波动则与气候年际变率有密切关联。同时, 作物模型通常不考虑农业技术进步, 产量变化主要受水分、热量等自然环境要素的影响。因而, 为确保模型模拟与地面统计数据分析结果的可比性, 本文首先对观测与模拟的作物单产序列和温度、降水序列均进行高通滤波, 具体滤波方法为原始序列减去11年滑动平均序列; 再利用高通滤波结果分别分析作物单产与温度、降水的相关关系, 以此表征粮食单产对温度和降水变化的响应。需要说明的是, 考虑到印度的水稻和小麦生长季分别为5-11月, 和10月-次年4年, 上述相关分析采用的是作物各自生长季的温度和降水。

**2.2.3 模拟预估与不确定性分析** 为量化未来粮食单产及气候变化与当前状态的相对变化量, 本文以1981-2010年为气候参考期, 计算了未来气候变化情景下的温度、降水和粮食(小麦和水稻)单产的距平(百分率)。考虑到各模式组合模拟结果的差异, 本文计算了所有模式组合预估结果的标准差, 以此表征模拟结果的不确定性。

## 3 结果分析

### 3.1 粮食播种区域

由网格尺度上灌溉和雨养水稻、小麦的空间分布图(图1)可以看出, 水稻广泛分布于印度的北部和东部地区, 其中北部及东部沿海部分地区为灌溉水稻的集中分布区, 东北部则为雨养水稻的集中分布区, 雨养水稻面积13.5万 $\text{km}^2$ , 灌溉水稻面积相对较

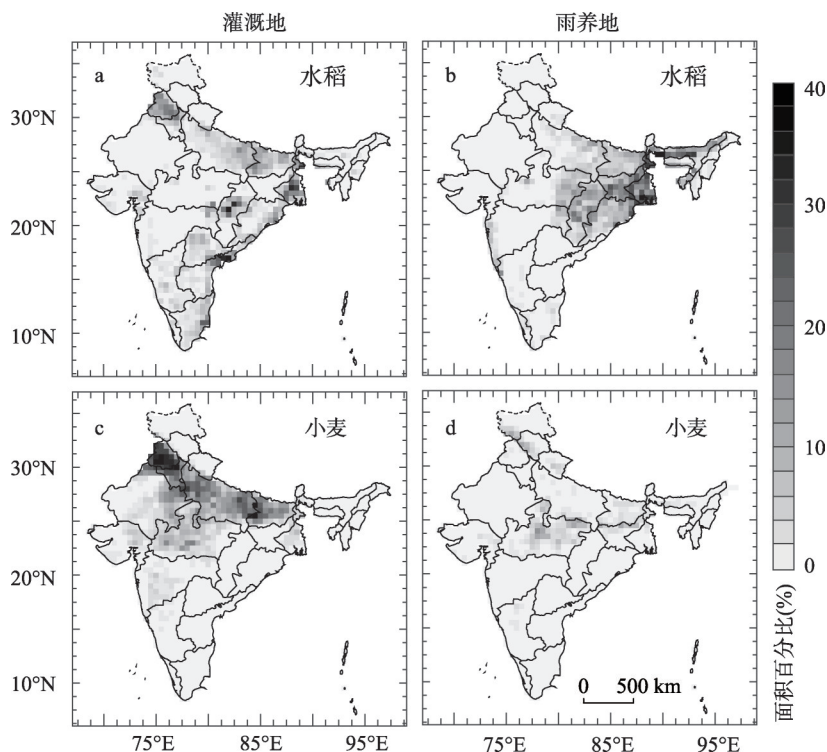


图1 作物模型网格内(0.5°×0.5°)灌溉、雨养水稻和小麦的面积百分比

Fig. 1 Area fraction of the irrigated and rainfed rice and wheat within the cell of 0.5- by 0.5-degree of crop models

小, 为 11.8 万  $\text{km}^2$ 。小麦主要分布于印度河平原北部、恒河平原以及德干高原的西北部, 其中大部分为灌溉小麦, 其面积高达 15.6 万  $\text{km}^2$ , 而雨养小麦面积相对较小, 仅为 3.6 万  $\text{km}^2$ , 主要分布于德干高原北部。雨养和灌溉农业的空间分布与印度的气候条件密切相关。水稻的需水量较大, 而印度东北部地势低洼属热带季风气候, 雨热同期, 印度半岛西南部海拔较高, 雨季盛行的偏南风携带大量的水汽, 受地形抬升的影响易在周边地区产生地形雨, 降水丰富, 因此有利于发展水稻种植业; 而恒河平原和德干高原西北部旱季干燥少雨, 西北印度河平原为亚热带草原和沙漠气候, 年降水量在 500 mm 以下, 是印度绿色革命的主要分布区, 近年来的农业发展高度依赖于灌溉, 且对抗旱的小麦灌溉量远多于需水量大的水稻。

### 3.2 模型验证

对比地面统计与模型模拟的 2015-2016 年粮食单产空间分布 (图 2) 可知, 地面统计数据显示小麦单产总体呈自北向南降低的趋势, 其中印度河平原北部的旁遮普邦和哈里亚纳邦单产最高, 约达 4~5 t/ha, 恒河流域其他各邦的单产约为 2~3 t/ha, 印度半岛南部的马哈拉施特拉邦和卡纳塔克邦最低, 约为 1 t/ha。模型模拟小麦单产呈现相同的自北向南逐渐降低的空间变化特征, 但是以邦为单元来看, 模型模拟低估了印度河平原北部旁遮普和哈里亚纳邦的单产, 低估幅度约为 1 t/ha, 除此之外, 模型模拟的其他各邦小麦单产普遍高于地面统计值, 模拟的恒河流域各邦单产平均为 3~4 t/ha, 印度南部约为 2 t/ha, 较统计数据偏高约为 1 t/ha。

对水稻而言, 除印度河平原北部的旁遮普邦和哈里亚纳邦以外, 地面统计的印度水稻单产整体呈南部偏高, 北部偏低的空间特征。印度半岛南部各邦单产相对较高, 约 3~

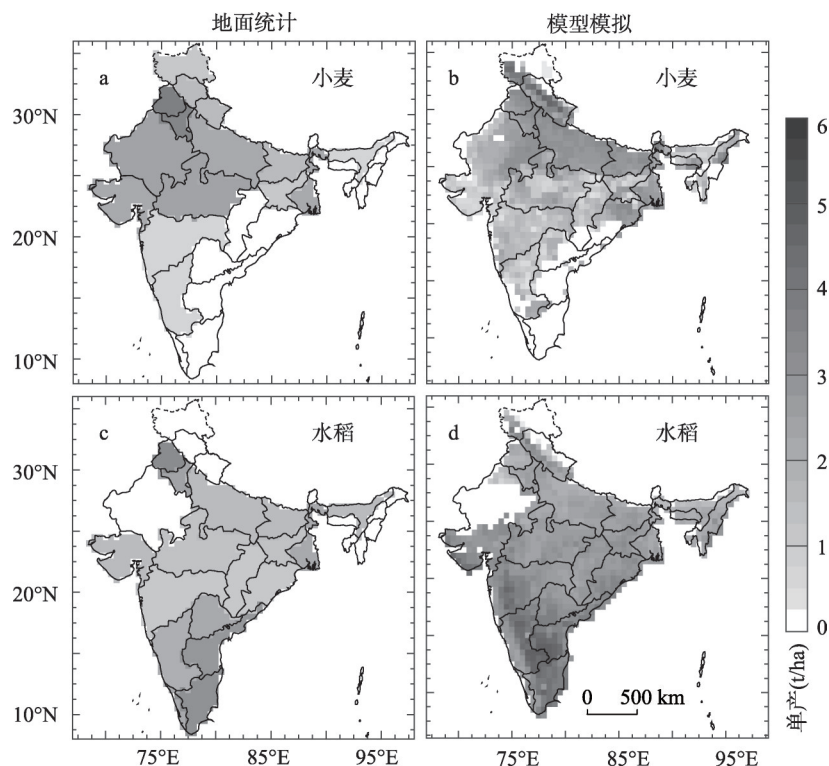


图2 地面统计和模型模拟的小麦和水稻单产的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of wheat and rice yields from the ground measurements and simulations

4 t/ha, 恒河流域及德干高原地区各邦相对较低, 约 2~3 t/ha。印度河平原北部的旁遮普邦单产最高约 4 t/ha 左右。模型模拟基本再现了水稻单产呈南高北低的空间特征, 但以邦为单位来看, 模型模拟低估了印度河平原北部旁遮普邦的单产, 约低估 1 t/ha, 并普遍高估了其他各邦的单产, 其中对印度半岛南部的安得拉邦和泰米尔纳邦约高估 2 t/ha; 对其他各邦约高估 1.5 t/ha。模拟的印度半岛各邦水稻单产平均约 4~6 t/ha, 德干高原地区平均约 3.5 t/ha, 恒河流域平均约为 3 t/ha。

由此可知, 模型模拟能够基本再现印度粮食单产的空间差异, 但模拟结果绝对数值与地面统计存在一定差异。总体来看, 小麦和水稻的模拟单产均为北方偏低、南方偏高。由于北方小麦和水稻单产均高于南方, 所以模拟单产的南北差异整体偏小; 另外, 小麦和水稻均主要种植在北方, 因而模拟的印度全国小麦和水稻平均产量可能偏低。因此, 本文未直接分析模拟结果的绝对数值, 而是对粮食单产的相对变化进行分析。通用大面积模型 (General Large-Area Model, GLAM) 等模型也呈现出类似的北方低估、南方高估的单产模拟误差<sup>[29-30]</sup>。误差来源比较复杂<sup>[31]</sup>, 其中有两方面的因素不容忽视: ① 作物模型输入气象数据的不确定性<sup>[29, 32]</sup>; ② 作物模型自身的不确定性<sup>[15, 31]</sup>。热量和水分等气象因子是影响作物生长的关键生态因子, 气候系统模式对印度地区气候空间差异的高估或低估, 直接影响作物模型的模拟精度<sup>[32]</sup>。作物模型的框架结构、参数方案和模型设定也是造成不确定性的的重要因素<sup>[15]</sup>, 例如作物模型未考虑病虫害等自然和田间管理等人为因素对粮食单产的影响。虽然本文采用多模式集合方法消除了单个模式预估的不确定性, 但模型的共有误差仍然存在。

由地面统计与模型模拟单产与生长季温度、降水异常的相关关系(图3)来看,模型模拟数据基本再现了地面统计数据显示的水稻、小麦单产与降水的正相关关系及与温度的负相关关系,并且模型模拟还再现了地面统计数据显示的水稻与温度、降水的相关性要强于小麦与温度、降水的相关性。这表明本文采用的作物模型具有一定的模拟能力,较好地描述了作物生长对水分和热量条件的响应。地面统计与模型模拟一致表明水分条件是印度小麦、水稻单产年际波动的重要影响因素,这可能与印度地处低纬度地区,热量资源充足,而水分条件则受季风影响具有较大的年际变率有密切关系。在季风降水丰沛的年份,温度一般偏低,地面水分条件较好,利于作物高产;而在季风降水偏少的年份,天空云量较少,辐射强,地面温度高,蒸发能力强,进一步加剧了地面水分的匮乏程度,不利于作物高产<sup>[33-35]</sup>。由于水稻的热量和水分需求量远高于小麦,因而其对地面热量和水分条件的敏感性较强,由此造成了水稻与温度、降水的相关性要强于小麦与温度、降水的相关性。

虽然模型较好的描述了作物生长对水分和热量条件的响应,但相比统计资料中水分和热量变化对粮食单产年际波动的方差解释量,模型模拟结果存在一定的偏差。如图3所示,除模拟水稻单产与降水的相关性( $r = 0.33, P < 0.10$ )小于地面统计( $r = 0.60, P < 0.01$ )之外,模拟小麦单产与温度、降水及模拟水稻单产与温度的相关性均普遍高于地面统计。其中,模拟水稻单产与温度相关性相对地面统计偏高幅度最大,模拟相关系数为 $-0.66 (P < 0.001)$ ,地面统计则为 $-0.30 (P < 0.15)$ 。作物模型未考虑病虫害、田间管理等因素对农作物产量的影响,可能是导致模型高估作物单产对温度和降水变化敏感度的原因之一。而水稻单产与降水的相关关系较地面统计偏弱,可能是由于全球气候模式对印度季风降水模拟的不确定性导致的。降水的频率和强度是影响作物生长的重要因子,而气候模式对此表现较差<sup>[36]</sup>。

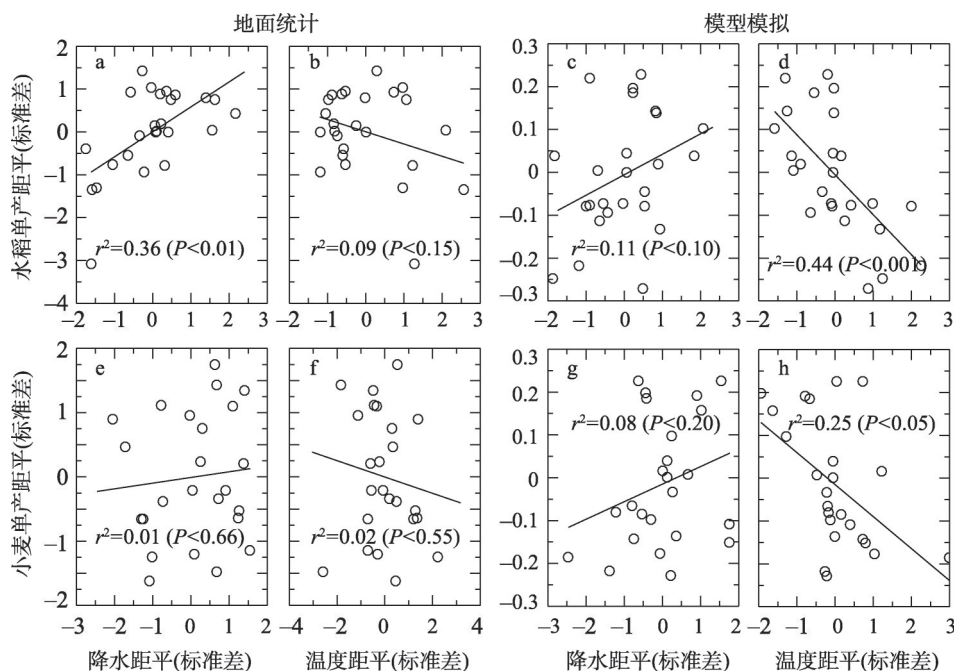


图3 地面统计与模型模拟的水稻和小麦单产与温度、降水距平年际变化的相关关系

Fig. 3 Correlations between the inter-annual variability of anomalies of wheat and rice yields and temperature, precipitation derived from the ground measurements and simulations

此外,模拟结果中的温度和降水变化对作物产量年际波动贡献程度的差异与地面统计的数据有所不同。以水稻为例,在模拟结果中,水稻单产与温度的相关性( $r = -0.66$ ,  $P < 0.001$ )明显强于降水( $r = 0.33$ ,  $P < 0.10$ ),而地面统计中水稻单产与降水的相关性( $r = 0.60$ ,  $P < 0.01$ )强于温度( $r = -0.30$ ,  $P < 0.15$ )。这可能是由于作物模型夸大了作物生长对温度变化的敏感性。温度在提供热量的同时也改变着地表蒸散发,特别是在热带地区,温度升高,地表蒸发增大,导致土壤水分流失,对作物生长产生水分强迫<sup>[15]</sup>。作物模型对此过程的突出描述,可能导致了作物生长对温度的敏感性强于对降水的敏感性。

### 3.3 预估结果

**3.3.1 粮食生产区气候变化情景预估** 21世纪小麦和水稻生长季内温度和降水均呈显著增加趋势,其中温度增加速度逐渐加快,降水增加速度相对缓慢且存在明显的年际—年代际波动(图4)。小麦生长季的气候变化表现尤为明显,除降水增加速度小于水稻外,其生长季温度和降水增加速度和幅度以及降水年际—年代际变率均明显大于水稻。具体而言,21世纪小麦和水稻生长季温度升高速度分别约为 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $P < 0.001$ )和 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $P < 0.001$ ),其中21世纪前50年分别约为 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $P < 0.001$ )和 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $P < 0.001$ ),后50年分别约为 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $P < 0.001$ )和 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $P < 0.001$ )年,到21世纪末温度分别升高约 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;对降水而言,21世纪小麦和水稻生长季降水增加速度分别约为 $1.5\text{ mm}/10\text{a}$  ( $P < 0.001$ )和 $2.0\text{ mm}/10\text{a}$  ( $P < 0.001$ ),到21世纪末分别增加约16.7%和19.3%,并且小麦生长季降水的年际—年代际变化相比水稻更明显,其变异系数分别为1.7和1.1。对于低纬度热带地区,高温是限制作物生长的主要因素之一,21世纪温度的持续升高将不利于作物增产;但降水量增加有利于作物增产。

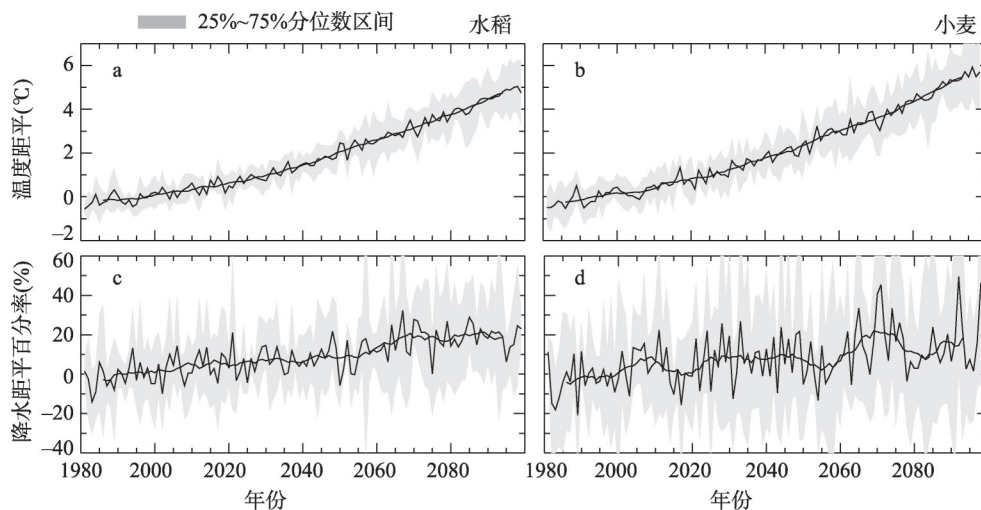


图4 RCP 8.5排放情景下印度小麦和水稻生长季温度和降水变化(参考1981-2010年)

Fig. 4 Temperature and precipitation changes for the wheat and rice growing season of India under the RCP 8.5 emission scenario (refer to 1981-2010)

21世纪末印度小麦、水稻生长季温度和降水普遍增加,小麦生长季的温度和降水变化尤为明显(图5)。并且,温度与降水变化的空间格局呈相反的特征。具体而言,小麦和水稻的生长季的升温幅度均呈由北向南逐渐减小的空间分布特征,小麦和水稻生长季温度在印度北部分别升高约 $4.5\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $4\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在印度半岛分别升高约 $3.5\sim 4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $3.5\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,小麦生长季升温幅度较水稻约偏高 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对于降水而言,两种作物生长季降水增

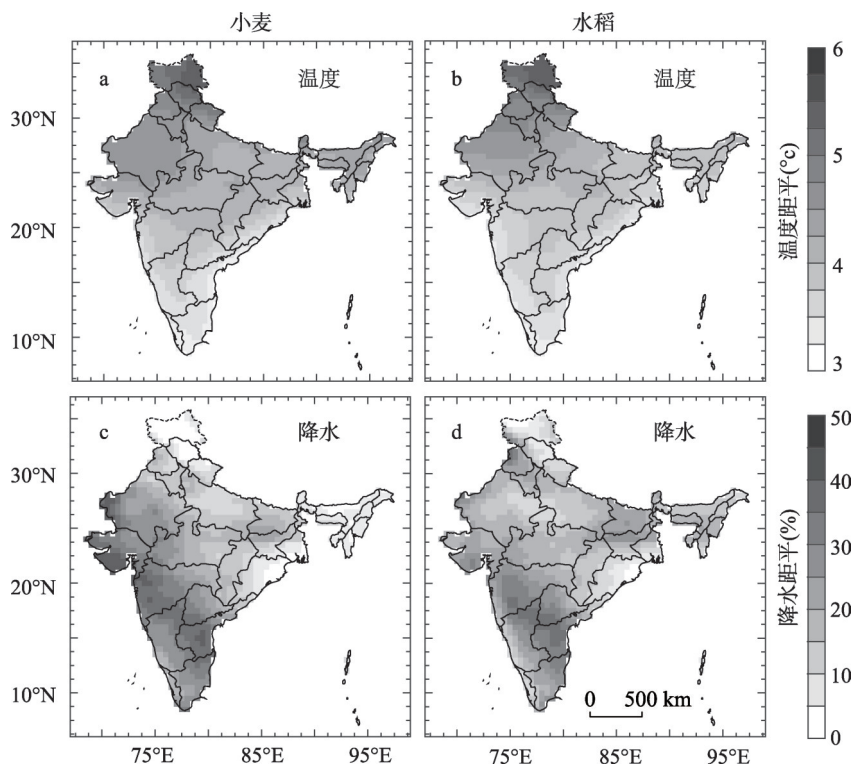


图5 RCP 8.5情景下2070-2099年温度和降水距平的空间分布(参考1981-2010年)

Fig. 5 Spatial distribution of temperature and precipitation anomaly of 2070-2099 under the RCP 8.5 emission scenario (refer to 1981-2010)

加幅度均整体表现为南部大于北部,与温度变化的空间格局基本相反。小麦和水稻生长季降水在北部分别增加约10%~35%和10%~30%,在印度半岛分别增加约35%~50%和30%~45%,小麦生长季降水增加较水稻约偏高5%。

综合温度和降水变化的空间格局以及小麦和水稻种植区,可以预见未来气候变化对小麦单产的影响可能大于水稻。因为,小麦种植区生长季温度升高幅度相对非种植区较大,降水增加相对较少;而水稻种植区生长季温度升高幅度相对非种植区较小,降水增加相对较多。具体而言,到21世纪末,小麦种植区生长季温度约平均升高5℃左右,相比非小麦种植区偏高约1.5℃,降水平均增加约15%,相比非小麦种植区偏低约10%。水稻种植区生长季温度约平均升高4℃,相比非水稻种植区偏低1℃,降水平均增加约20%,相比非水稻种植区偏高约5%。

**3.3.2 粮食单产变化预估** 分时段来看,小麦单产在21世纪前半叶开始下降,在后半叶降幅较为明显(图6)。但水稻单产在21世纪前半叶尚未出现明显下降,而后半叶出现明显下降。从下降速率上看,小麦单产下降速度在21前半叶与后半叶均明显大于水稻单产的下陷速度。这印证了上文提出的未来气候变化对小麦的影响可能大于水稻的推断。具体而言,21世纪小麦和水稻的单产均呈下降趋势,且后半叶尤为明显。其中21前半叶小麦和水稻单产下降速度约分别1.3%/10a ( $P < 0.001$ )和0.7%/10a ( $P < 0.05$ ),后半叶下降速度约分别为4.9%/10a ( $P < 0.001$ )和4.4%/10a ( $P < 0.001$ )。可见水稻单产下降速度在两个时段均明显低于小麦单产的下陷速度。从阶段性降幅看,21世纪前半叶小麦和水稻单产约平均分别下降4.3%和1.5%,而在后半叶约平均下降17.7%和15.5%。

小麦和水稻种植区未来气候变化差异是导致小麦和水稻单产变化不同的主要原因。水稻种植区主要分布在热带季风区,降水丰沛,并且上述分析发现水稻种植区未来温度升高相对非种植区偏小,降水增加相对偏多,虽然升温可导致水稻减产,但降水和 $\text{CO}_2$ 浓度增加导致的水稻增产在一定程度上抵消了高温减产的影响,从

而在21世纪前半叶减产幅度较小,但随着温度的持续升高,高温导致的减产不断增加,水稻由此大幅减产。而小麦种植区多分布于相对干旱地区,并且未来该地区温度升高相对非种植区偏大,降水增加相对偏小,温度升高导致的小麦减产可能始终高于由降水及 $\text{CO}_2$ 浓度增加导致的增产,因此随着温度的升高减产幅度不断增大。

在RCP 8.5排放情景下,21世纪末印度小麦和水稻单产在全国大部分地区均有所下降(图7)。具体而言,小麦单产除在印度北部小范围出现升高之外,在全国大部分地区均有所下降,且以德干高原西南部地区尤为明显,下降幅度约60%,其他大部分地区下降幅度在5%~40%之间,其中小麦集中种植区约下降20%左右;水稻单产除印度北部和西南沿海地区有小范围增加外,在全国其他地区均有所下降,且以印度河平原北部地区尤为明显,下降幅度约50%,其他地区下降幅度在5%~30%之间,其中水稻集中种植区在西南沿海地区约升高10%左右,其他地区约下降20%左右。由此来看,气候变化导致的粮食单产变化存在较大的区域差异。

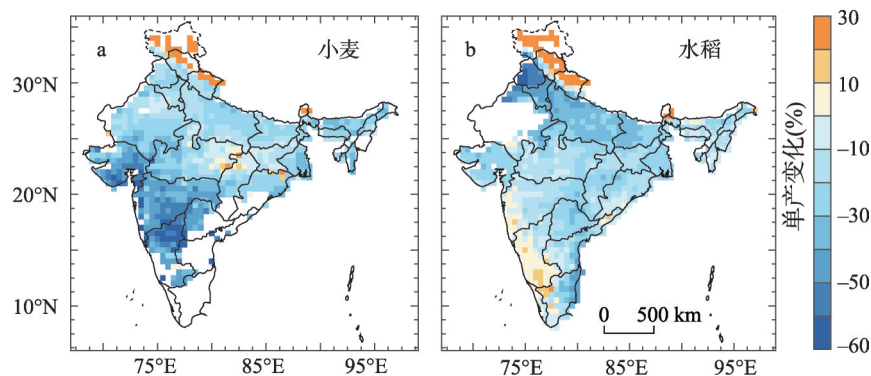


图7 RCP 8.5情景下2070-2099年小麦和水稻单产变化的空间分布(参考1981-2010年)

Fig. 7 Spatial distribution of changes of wheat and rice yield of 2070-2099 under the RCP 8.5 emission scenario (refer to 1981-2010)

气候的区域差异及其未来气候变化特征共同决定区域的粮食产量,是未来粮食单产变化空间异质性的主要成因。例如印度北部喜马拉雅山脉西南缘的查谟克什米尔邦、喜马偕尔邦和北阿坎德邦,海拔较高,低温是限制粮食高产的主要因素,在未来升温的气候背景下,粮食产量将显著提高。在当前温度偏高、降水偏少的地区,如德干高原西南部,高温可能仍是限制该地将来粮食增产的主要因素,虽然未来该地降水可能增加50%

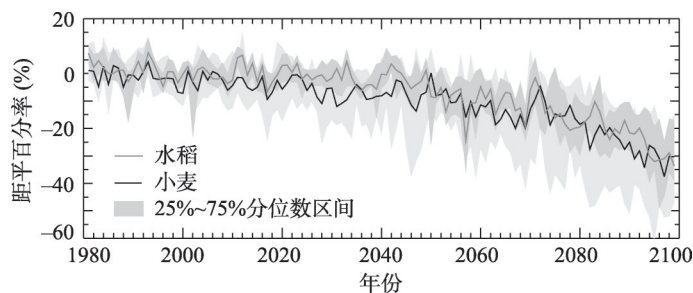


图6 RCP 8.5情景下印度水稻和小麦单产变化(参考1981-2010年)

Fig. 6 Changes of the wheat and rice yield of India under the RCP 8.5 emission scenario (refer to 1981-2010)

左右,但因其当前降水量相对偏小(基数小),因降水量增加(绝对降水增加量)带来的增产以及 $\text{CO}_2$ 浓度升高的肥效作用可能不足以抵消因温度升高导致的粮食减产。

综上,小麦和水稻生长季的气候变化特征基本相似,但小麦生长季气候变化相对更剧烈。到21世纪末,小麦生长季温度约升高 $6^\circ\text{C}$ ,水稻约升高 $5^\circ\text{C}$ ,降水增加约18%左右,但小麦生长季降水量存在更明显的年际—年代际波动。对粮食单产而言,RCP 8.5情景下气候变化对水稻单产的影响主要在21世纪后半叶,而对小麦单产的影响贯穿整个21世纪,因此未来气候变化对小麦的影响相对较大。这与小麦和水稻种植区未来气候变化差异有关。此外,未来气候变化对小麦和水稻单产影响存在明显的空间异质性。

**3.3.3 预估结果的不确定性分析** 需要指出,受模型精度所限,预估结果存在一定的不确定性:① 由于模拟小麦和水稻单产均是北方偏低、南方偏高(图2),同时模拟的21世纪南方小麦单产下降幅度明显大于北方,北方水稻单产下降幅度则略大于南方(图7),二者综合作用可能放大了21世纪印度平均小麦单产的下降趋势,减缓了水稻单产的下降趋势;② 由于作物模型可能夸大了作物生长对温度变化的敏感性(图3),主要通过温度升高导致水分胁迫从而限制光合速率所致,因此模拟的21世纪印度平均小麦和水稻单产下降趋势均可能偏大。综合上述两方面因素,模拟的21世纪印度平均小麦单产下降趋势可能偏大,水稻单产下降趋势是否偏大取决于上述第二方面因素影响是否大于第一方面因素。

标准差的大小反映了不同模拟结果之间的离散程度,可在一定程度上表征多模式集合预估的不确定性。如图8所示,小麦单产预估结果的不确定性广泛大于水稻,且存在明显的空间差异性,自北向南不确定性逐渐减小,而水稻单产预估结果的不确定性空间分布相对均一。具体而言,小麦单产预估结果的标准差大多介于25%~35%,其中印度西北部和东北部偏高,约35%,西南部偏低,约25%;水稻单产预估结果的标准差大多介于10%~30%,其中仅印度河西北部和德干高原西北部局部地区标准差偏大,约30%,其他大部分地区均约20%,半岛西南地区仅约10%。

预估结果的不确定性一方面来源于全球气候模式,另一方面来自于作物模型本身<sup>[26]</sup>;对于小麦和水稻单产的预估而言,作物模型导致的不确定性可能大于气候模式的不确定性<sup>[26]</sup>。

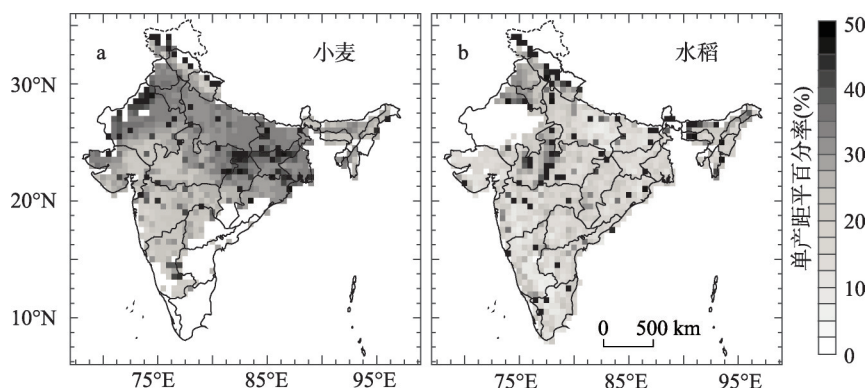


图8 多模式模拟的2070-2099年小麦和水稻单产距平百分率标准差的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of standard deviation of the anomaly of wheat and rice yield of 2070-2099 from the multi-mode simulations

## 4 结论与讨论

### 4.1 讨论

基于上述预估研究结果,在RCP 8.5排放情景下,21世纪印度小麦和水稻单产将呈明显下降之势。同时,据联合国经济和社会事务部发表的《世界人口展望》报告,印度人口将在2024年超过中国成为世界第一人口大国。在粮食单产下降与人口增加的共同作用下,印度人均粮食占有量将大幅下降,预计到2024年将下降20%,到21世纪末,降幅将高达

60% (图9)。Yin等<sup>[26]</sup>研究发现,在未来气候变化情景下,中国粮食产量也呈降低趋势。在当前生产力水平下,中国和印度因产量降低而致的粮食缺口均势必需要依靠进口弥补;同时,顾国达等<sup>[37]</sup>预计2050年世界粮食总量将出现缺口,稻米和大豆缺口分别约为1.03亿t和1.25亿t,届时世界粮食供应将面临巨大压力。中国作为世界上最大的粮食进口国,在国际粮食市场上的采购量可能会受到一定限制。因此,中国应重视印度粮食产量变化趋势,进一步科学评估未来的粮食进口环境,未雨绸缪,做好应对预案。

本文基于多模式集合的思路,利用ISI-MIP提供的20种模式组合模拟数据,预估了RCP 8.5排放情景下21世纪印度粮食生产区气候变化趋势,厘定了印度小麦和水稻单产在人类可能面临最恶劣气候变化情景下的单产及其不确定性,为认知印度在未来高排情景下的粮食安全提供了科学依据。但是,粮食产量不仅受气象因素影响,而且深受农业生产水平及其他自然和社会因素的影响。预估结果表明未来气候变化对粮食生产极为不利,因而迫切需要研发有效的气候变化适应技术,通过不断增加农业投入,改进农业技术,趋利避害,抵消未来气候变化的不利影响,确保粮食充分供给。

### 4.2 结论

(1) ISI-MIP的多模式集合模拟不仅再现了印度小麦、水稻单产的空间分布特征,而且展示了与地面观测数据基本一致的单产对气候年际变化的响应规律,即升温不利于粮食增产,降水增加促进粮食增产,这与Ortiz等<sup>[38]</sup>、Kang等<sup>[39]</sup>的研究结果也是一致的。

(2) RCP 8.5排放情景下,印度水稻和小麦生长季的气候变化过程基本一致,均呈升温、增雨趋势。到21世纪末,小麦和水稻生长季温度升幅分别约为6℃和5℃,降水增幅为15%~20%。在空间上,升温幅度自北向南逐渐减小,降水增加幅度南多北少,这与Chaturvedi等<sup>[40]</sup>的研究结果基本一致,但小麦生长季温度升幅大于水稻生长季,而降水增幅小于水稻生长季,偏小约5%。

(3) RCP 8.5排放情景下,21世纪印度小麦和水稻单产均呈下降趋势,且后半叶的下降速度显著大于前半叶,这与Mall等<sup>[9]</sup>的观点一致。水稻单产下降主要发生在21世纪后半叶,而小麦单产下降贯穿整个21世纪,由此可知,未来气候变化对小麦单产的影响大于水稻,与Birthal等<sup>[3]</sup>的研究结论相似,这主要由小麦和水稻种植区未来气候变化差异所致。小麦和水稻单产变化存在明显的空间异质性,小麦单产下降幅度高值区位于德干高原西南部,降幅约60%,水稻单产下降幅度高值区位于印度河平原北部,降幅约50%。多模型集合预估结果中,小麦预估结果的不确定性相对较大,且北部大于南部,

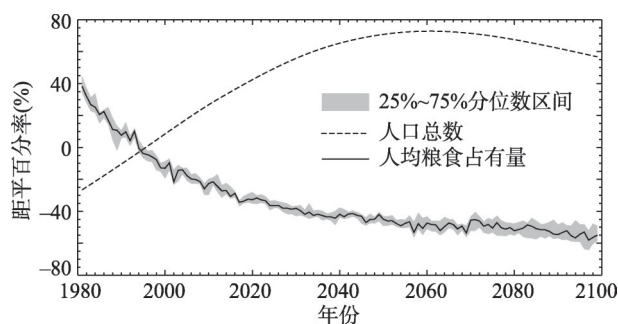


图9 21世纪印度人口数量和人均粮食(小麦和水稻)占有量的变化(参考1981-2010年)

Fig. 9 Changes of the per capita grain occupation (total of wheat and rice) and the population size of India in the 21st century (refer to 1981-2010)

水稻预估结果的不确定性相对较小,且不确定性未见明显的空间异质性。

(4) RCP 8.5 气候变化情景下,小麦和水稻单产下降给未来的粮食供应造成了较大压力,再加上人口数量的增加,未来的粮食安全将面临一定的挑战。为此,亟需研发气候变化适应技术,抵消未来气候变化的不利影响,确保粮食充分供给。

### 参考文献(References)

- [1] Godfray H C J, Beddington J R, Crute I R, et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 2010, 327(5967): 812-818.
- [2] Ministry of Agriculture. *Agricultural Statistics at a Glance 2016*. Oxford: Oxford University Press, 2017: 78-88.
- [3] Birthal P S, Khan T, Negi D S, et al. Impact of climate change on yields of major food crops in India: Implications for food security. *Agricultural Economics Research Review*, 2014, 27(2): 145-155.
- [4] Challinor A J, Wheeler T R. Crop yield reduction in the tropics under climate change: Processes and uncertainties. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(3): 343-356.
- [5] Guiteras R. *The Impact of Climate Change on Indian Agriculture*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2007: 3-4.
- [6] Aggarwal P K. *Applications of Systems Simulation for Understanding and Increasing Yield Potential of Wheat and Rice*. Netherlands: Wageningen University, 2000: 87-88.
- [7] Annette F. Regionalised inventory of biogenic greenhouse gas emissions from European agriculture. *European Journal of Agronomy*, 2003, 19(2): 135-160.
- [8] Lobell D B, Sibley A, Ortizmonasterio J I. Extreme heat effects on wheat senescence in India. *Nature Climate Change*, 2012, 2(3): 186-189.
- [9] Mall R K, Singh R, Gupta A, et al. Impact of climate change on Indian agriculture: A review. *Climatic Change*, 2006, 78 (2-4): 445-478.
- [10] Krishnan P, Swain D K, Bhaskar B C, et al. Impact of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 122(2): 233-242.
- [11] Mohanty M, Sinha N K, Reddy K S. Elevated temperature and carbon dioxide concentration effects on wheat productivity in Madhya Pradesh: A simulation study. *Journal of Agrometeorology*, 2015, 17(2): 185-189.
- [12] Kumar M. Impact of climate change on crop yield and role of model for achieving food security. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(8): 1-14.
- [13] Rathore L S, Singh K K, Saseendran S A, et al. Modelling the impact of climate change on rice production in India. *Mausam*, 2001, 52(1): 263-274.
- [14] Levis S, Badger A, Drewniak B, et al. CLMcrop yields and water requirements: avoided impacts by choosing RCP 4.5 over RCP 8.5. *Climatic Change*, 2016, 146: 1-15.
- [15] Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, et al. Assessing agricultural risks of climate change in the 21<sup>st</sup> century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(9): 3268-3273.
- [16] Elguindi N, Grundstein A, Bernardes S, et al. Assessment of CMIP5 global model simulations and climate change projections for the 21<sup>st</sup> century using a modified Thornthwaite climate classification. *Climatic Change*, 2014, 122(4): 523-538.
- [17] Chen L, Frauenfeld O W. Surface air temperature changes over the twentieth and twenty-first centuries in China simulated by 20 CMIP5 models. *Journal of Climate*, 2014, 27(11): 3920-3937.
- [18] Liu Y, Feng J, Zhuguo M A. An analysis of historical and future temperature fluctuations over China based on CMIP5 simulations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(2): 457-467.
- [19] Warszawski L, Frieler K, Huber V, et al. The inter-sectoral impact model intercomparison project (ISI-MIP): Project framework. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(9): 3228-3232.
- [20] Elliott J, Deryng D, Müller C, et al. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(9): 3239-3244.
- [21] Abedi T, Alemzadeh A, Kazemeyni S A. Wheat yield and grain protein response to nitrogen amount and timing. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5(3): 330-336.
- [22] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. *IPCC, 2013: Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge,

- United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2013: 1031.
- [23] Chaturvedi R, Joshi J, Jayaraman M, et al. Multi-model climate change projections for India under representative concentration pathways. *Current Science*, 2012, 103(7): 791-802.
- [24] Mukherjee S, Aadhar S, Stone D, et al. Increase in extreme precipitation events under anthropogenic warming in India. *Weather and Climate Extremes*, 2018, 20(C): 45-53.
- [25] Murari K K, Ghosh S, Patwardhan A, et al. Intensification of future severe heat waves in India and their effect on heat stress and mortality. *Regional Environmental Change*, 2015, 15(4): 569-579.
- [26] Yin Y, Tang Q, Liu X. A multi-model analysis of change in potential yield of major crops in China under climate change. *Earth System Dynamics*, 2015, 6(1): 45-59.
- [27] Mitchell T D, Jones P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(6): 693-712.
- [28] Fang Xiuqi, Wang Yuan, Xu Tan, et al. Contribution of climate warming to rice yield in Heilongjiang province. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 820-828. [方修琦, 王媛, 徐钺, 等. 近 20 年气候变暖对黑龙江水稻增产的贡献. *地理学报*, 2004, 59(6): 820-828.]
- [29] Challinor A J, Wheeler T R, Craufurd P Q, et al. Adaptation of crops to climate change through genotypic responses to mean and extreme temperatures. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2007, 119(1): 190-204.
- [30] Challinor A J, Wheeler T R. Use of a crop model ensemble to quantify CO<sub>2</sub> stimulation of water-stressed and well-watered crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(6/7): 1062-1077.
- [31] Koehler A K, Challinor A J, Hawkins E, et al. Influences of increasing temperature on Indian wheat: Quantifying limits to predictability. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3): 034016.
- [32] Hempel S, Frieler K, Warszawski L, et al. A trend-preserving bias correction the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics*, 2013, 4(2): 219-236.
- [33] Krishna K K, Rupa K K, Ashrit R G, et al. Climate impacts on Indian agriculture. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(11): 1375-1393.
- [34] Webster P J, Magana V O, Palmer T N, et al. Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C7): 14451-14510.
- [35] Selvaraju R. Impact of El Niño- Southern Oscillation on Indian food grain production. *International Journal of Climatology*, 2003, 23(2): 187-206.
- [36] Zhang Xuezheng, Li Xiaxiang, Xu Xinchuang, et al. Ensemble projection of climate change scenarios of China in the 21st century based on the preferred climate models. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(9): 1555-1568. [张学珍, 李侠祥, 徐新创, 等. 基于模式优选的 21 世纪中国气候变化情景集合预估. *地理学报*, 2017, 72(9): 1555-1568.]
- [37] Gu Guoda, Yin Jinghua. Analysis on mid and long-term global food supply and demand. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2014, 33(6): 6-16. [顾国达, 尹靖华. 全球中长期粮食供需趋势分析. *华中农业大学学报*, 2014, 33(6): 6-16.]
- [38] Ortiz R, Sayre K D, Govaerts B, et al. Climate change: can wheat beat the heat. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 126(1): 46-58.
- [39] Kang Y, Khan S, Ma X. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security a review. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(12): 1665-1674.
- [40] Chaturvedi R K, Joshi J, Jayaraman M, et al. Multi-model climate change projections for India under representative concentration pathways. *Current Science*, 2012, 103(7): 791-802.

## Multi-model ensemble projection of crop yield of India under RCP 8.5 climate change scenario during the 21st century

ZHANG Xuezhen<sup>1,2</sup>, LI Xiayang<sup>1,2</sup>, ZHANG Lijuan<sup>3</sup>, XI Jianchao<sup>1</sup>, DAI Erfu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Heilongjiang Province Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

**Abstract:** Using the multi-model ensemble projections of wheat and rice in India during the 21st century from the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, this study assessed the future changes in crop yield under the RCP 8.5 emission scenario. The results show that the multi-model ensemble simulations generally reproduce the spatial variability in crop yield that is represented by ground measurements. Furthermore, the simulations reproduce the response of crop yield to climate changes, which is characterized by negative correlations between crop yield and temperature and positive correlations between crop yield and precipitation. Under the RCP8.5 emission scenario, temperature and precipitation during the growing season of wheat and rice will increase. Generally, temperature will increase at a higher rate than precipitation; the increases in temperature and precipitation during the wheat growing season will be stronger than that during the rice growing season. In terms of spatial dimension, the increase in temperature will be weakened gradually from the north to the south, while that of precipitation will be intensified gradually from the north to the south. Temperature increase in the wheat producing areas will be stronger than that in the wheat non-producing area, while precipitation increase in the wheat producing areas will be weaker than that in the wheat non-producing areas. However, the scenario is predicted to be reversed for the rice producing areas. In response to the climate changes, wheat and rice yields will decrease in the 21st century, particularly in the second half. The decrease in wheat yield will be greater than that of rice yield. In the first half of the 21st century, wheat and rice yields are predicted to decrease at the rates of 1.3%/10 a ( $P < 0.001$ ) and 0.7%/10 a ( $P < 0.05$ ), respectively. In the second half of the 21st century, they are predicted to decrease at the rates of 4.9%/10 a ( $P < 0.001$ ) and 4.4%/10 a ( $P < 0.05$ ), respectively. The drought stress resulting from climate warming might be the main reason for this projected yield reduction. The greatest decrease in wheat yield (as high as 60%) will occur in the southwest part of the Deccan Plateau, and the greatest decrease in rice yield (as high as 50%) will occur in the northern part of the Gangetic Plain. These findings suggest that food supply in India will face extreme challenges under the future climate change scenarios.

**Keywords:** India; crop yield per unit area; multi-model ensemble projection; RCP8.5 scenario; ISI-MIP