

中国超级杂交稻在孟印缅地区的生产潜力模拟

王小博^{1,2}, 王绍强^{1,2}, 陈敬华^{1,2}, 崔惠娟¹, 吴宜进³,

N H RAVINDRANATH⁴, A RAHMAN⁵

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079; 4. 印度科学研究院可持续技术中心, 印度 班加罗尔 560012; 5. 孟加拉国高级研究中心, 孟加拉 国达卡 1212)

摘要: 水稻是孟加拉国、印度和缅甸最重要的粮食作物, 研究中国超级杂交稻对孟印缅地区的水稻增产潜力, 对于保障孟中印缅经济走廊的粮食安全与区域可持续发展具有重要的现实意义。在全面收集孟印缅地区气候、土壤、田间管理信息和农业统计数据的基础上, 结合中国籼型杂交稻F优498和丰两优4号的品种信息和区试数据, 通过EPIC模型模拟了1996-2005年雨季孟印缅3国在不同情景下的超级稻生产潜力, 并分析了孟印缅地区主要胁迫因子对超级稻单产潜力的影响。研究表明: ① 中国超级杂交稻在孟印缅地区2000年的灌溉和施肥水平下单产潜力为10.22 t/ha, 在充分灌溉且合理施肥的水平下单产潜力为11.33 t/ha。② 孟印缅地区雨季稻的增产空间达22771万t, 水稻增产潜力最大的地区是印度的恒河平原东部、印度半岛东南沿海与缅甸的伊洛瓦底三角洲。③ 印度德干高原东北部、西南部和印度大平原西北部需要进一步完善灌溉设备以满足高产水稻用水, 缅甸的中南部平原地区和印度的东北地区则需要增施氮肥以满足高产水稻用肥。

关键词: 超级杂交稻; 生产潜力; 产量差; EPIC模型; 孟中印缅经济走廊

DOI: 10.11821/dlxb201811010

1 引言

中国农业部、外交部、国家发改委和商务部共同发布的《共同推进“一带一路”建设农业合作的愿景与行动》指出, “一带一路”沿线各国需要强化农业科技合作交流, 突出科技合作的先导地位, 促进品种、技术和产品的合作交流。作为“一带一路”倡议的重要一环, 孟中印缅经济走廊经过的孟加拉国、印度和缅甸, 由于优越的水热区位条件而成为世界重要的水稻生产基地。据美国农业部估算, 2016-2017年孟印缅地区的水稻产量占全球水稻产量的1/3, 印度、孟加拉国和缅甸的稻谷总产量分别为10800万t, 3458万t和1240万t, 在全世界分别排第二位、第四位和第七位, 水稻是当地超过15亿人的重要粮食作物。尽管如此, 孟印缅地区的农业现代化程度不高, 水稻的主要品种单产低。面对该地区持续增长的庞大人口与日益紧张的耕地资源, 评估水稻的增产潜力对当地的粮食安全乃至社会安全具有重要意义。

收稿日期: 2017-10-31; 修订日期: 2018-06-19

基金项目: “一带一路”典型区域地缘环境系统演化模拟研究(ZDRW-ZS-2016-6); 国家重点研发计划(2017YFC0503803) [Foundation: Key Program of the Chinese Academy of Sciences, No.ZDRW-ZS-2016-6; National Key Research and Development Program of China, No.2017YFC0503803]

作者简介: 王小博(1995-), 男, 江苏南京人, 博士研究生, 主要从事生态模拟与生态遥感相关研究。

E-mail: wangxiaobo17@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 王绍强(1972-), 男, 研究员, 主要从事生态模拟与生态遥感相关研究。E-mail: sqwang@igsrr.ac.cn

2184-2197 页

目前，估算农作物生产潜力的方法主要有3种：① 经验统计法，包括统计特定气候区内水稻田实际单产数据中的最大值或者第95个百分点值^[1-3]，使用边界生产函数计算潜在生产量等^[4]。② 田间实验法，其目的是通过理想条件下的水稻种植获得水稻单产的最大值^[5]。③ 模型模拟法，即通过生态生理过程模型模拟水稻的生长。在孟印缅3国的水稻产量模拟研究中，使用较多的模型包括DSSAT-CERES-rice、ORYZA、EPIC模型等^[6-11]。④ 基于多源数据与多种模型的升尺度研究。此类方法综合分析各地的田间实验数据和农业统计数据、经验模型与过程模型的模拟结果，在合理分区的基础上对全球或地区的粮食生产潜力进行评价^[12-14]。由于经验统计法和田间实验法在大尺度区域的研究中缺乏代表性，且不利于对作物产量差进行解释，所以国家尺度以上的水稻生产潜力估算多见于模型模拟研究和基于多源数据与多种模型的升尺度研究。但是这些研究主要以本地种植的水稻品种为依据，没有考虑潜在的优异种质资源尤其是高产杂交稻的研究与引进对水稻生产潜力的影响。

1992年，联合国粮农组织将发展杂交水稻作为解决贫困地区饥饿问题的首选技术，孟加拉国、印度、缅甸3国充分重视杂交水稻对贫困地区水稻增产的积极作用，均从20世纪90年代开始研究与引进高产杂交水稻。至2016年，印度的杂交水稻种植面积超过300万ha，约占水稻种植面积的7%，孟加拉国和缅甸的杂交水稻种植面积则分别稳定在60万ha和3万ha左右，约占本国水稻种植面积的5%与0.4%，与中国超过50%的杂交水稻种植面积比例仍有很大的差距^[15-18]。中国作为世界上第一个成功利用水稻杂种优势的国家，在已有的高产杂交稻基础上又提出了超级杂交水稻培育计划，目前已拥有丰富的优异种质资源。2000年以来，孟印缅3国从中国湖北、四川、安徽等地的种业公司引进了大量的杂交水稻种子，比如缅甸审定了来自中国安徽的3S/Long8R杂交水稻组合和来自中国四川的JX5A/JX5R和DAR杂交水稻组合^[17]。

本文结合中国超级杂交稻的南方区试数据，通过EPIC模型模拟不同灌溉和施肥情景下超级杂交稻在孟印缅各地区的生产潜力，既可为中国超级稻在孟印缅地区的科学推广提供参考，加快中国农业“走出去”的脚步，还能够摸清孟印缅地区的水稻增产潜力，有利于保障孟中印缅经济走廊的粮食安全与区域可持续发展。

2 数据来源与处理

2.1 中国超级杂交稻的品种数据

基于籼型二系杂交水稻F优498、籼型三系杂交水稻丰两优4号的产量区试数据和生长特性数据，本文对中国超级杂交稻的生长参数进行校正。

两类超级稻的产量区试数据为2016年中国长江流域45个水稻区试站点的实验数据，数据源自中国水稻研究所主办的中国南方水稻区试网。区试站点的2016年日尺度气象数据和辐射数据使用该站点所在县的气象观测数据代替，如果无法获取所在县的气象台站数据，则使用与试验站点最近的国家气象台站数据，气象台站数据来源于中国气象数据共享网。

两类超级稻的生长特性数据包括收获指数、生长期叶面积指数、生长期有效积温、株高、种植密度、辐射利用率等，数据主要源自于国家水稻数据中心的国家水稻品种及其系谱数据库，同时也参考实际生产活动中F优498和丰两优4号的生长特性。

2.2 孟印缅地区水稻生产的环境数据

本文中输入EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) 模型的作物生长环境数

据主要包括孟印缅地区的气象数据、土壤数据、田间管理与耕作数据、基本地理信息和农业统计数据。具体输入参数与数据来源如表1所示。其中,耕种技术、深度、作业宽度和速度等参数从EPIC模型的播种模式参数库中获取,收割效率等参数从模型的收割模式参数库中获取。模型默认土壤含水量达到田间持水量时的水势为-33 kpa,达到凋萎系数时的水势为-1500 kpa,土壤初始含水量、不同氮形态含量等参数由EPIC模型根据已输入数据和内置公式推算得到。

表1 EPIC模型参数与数据来源

Tab. 1 EPIC model parameters and data sources

数据类型	参数	数据来源
气象数据	月最高温、月最低温、月降水量、湿润天数、风速	NCDC、CRU TS V3.23 ^[19]
	月太阳辐射强度、月温度标准差、日最高温、日最低温、日降水量、最大0.5 h降水量、相对湿度等	由EPIC、G-EPIC和MODAWEC模型生成
土壤数据	各土层厚度、质地、石砾含量、容重、pH值、有机碳含量、阳离子交换量、碳酸钙含量、反射率	ISRIC-wise ^[20] 、WISE30sec ^[21]
	田间持水量、凋萎系数等	模型推算
田间管理与耕作	水稻种植期与收获期分布、2000年最大施肥量分布(氮肥)和最大灌溉量分布 耕种技术参数、收割技术参数等	EarthStat ^[1-2] 、GEPIC模型 ^[22-23] EPIC0509模型耕作模式参数库
基本地理信息	孟加拉国、印度和缅甸的国境线、邦州行政分界线、DEM数据、坡度数据、土地利用信息等	AVHRR、GMTED2010 ^[24] 、中国地图出版社
农业统计数据	2000年水稻的雨养面积分布、灌溉面积分布、产量分布、气候生产潜力分布	EarthStat、SPAM 2000 ^[25]

将水稻生产的各类环境数据进行如下处理:①基于NCDC气象站点的月观测数据和CRU TS气象数据的插值结果,生成孟印缅地区1996-2005年月尺度气象指标的空间分布栅格图,分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。将栅格图中每一个像元的中心点作为EPIC模型模拟的站点,对气象数据进行处理。再利用MODAWEC程序生成日尺度气象数据。②基于ISRIC-wise和WISE30sec土壤剖面数据库,生成孟印缅地区 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 分辨率的土壤属性分布图。将分布图中每一个像元的中心点作为EPIC模型模拟的站点,对土壤数据进行处理。研究区的土壤一共被分为7层,每一层输入的主要属性包括:深度、土壤容重、机械组成、pH、有机碳含量、阳离子交换量和电导率,其他属性由模型自动生成。③田间管理与耕作数据、基本地理信息和农业统计数据经校正后统一重采样为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 分辨率的栅格数据。

3 研究方法

3.1 EPIC模型与GEPIC模型介绍

EPIC模型是一个模拟“气候—植被—土壤—管理”的系统动力学模型,由美国农业部和德克萨斯农工大学共同开发。该模型最早用于定量评估土壤侵蚀对农业的影响,之后又增加了大气CO₂变化,水质变化,土壤碳氮循环等模拟功能,已在全球不同地区成功地应用到作物估产、气候影响评价、精准农业、区域农业规划等多个领域^[26-27]。

由于EPIC模型是一个点尺度的模型,其所能模拟的最大田间尺度是101.17 ha。在模拟的过程中,模型假设整个农田的气候、土壤、管理措施是均一的,这使得该模型无法用于较大尺度区域的空间异质性分析。为此,Liu等基于EPIC0509和GIS 9.1的平台开发

了GEPIEC模型，对中国和全球的水稻、小麦和玉米生长过程进行模拟，并分析了各类作物的水分生产力（CWP）及其空间差异，取得了良好的模拟效果^[22-23]。

EPIC模型以日为步长对农作物的生长进行模拟，其对水稻产量的计算主要可分为以下4个步骤：①根据积温、潜热与胁迫因子计算每天叶面积指数的变化，从而得出作物每日接受的光合有效辐射量；②根据大气CO₂、湿度和光合有效辐射计算每天增长的潜在生物量；③根据潜在生物量与作物胁迫因子计算出每天作物的实际生物量；④根据收获指数计算作物的最终产量。在以上的估产步骤中，EPIC模型将作物叶面积指数（LAI）的变化分为两个阶段进行计算：一是从出苗到最大值阶段，二是从最大值到作物成熟阶段^[28]；作物生长所吸收的太阳辐射量使用Monsi等提出的Beer定律计算^[29]；潜在生物量采用Monteith方法计算^[30]，最终产量由实际生物量乘以收获指数得到。

3.2 模型作物参数率定

本文选取中国农业部冠名的超级稻示范推产品种——籼型二系杂交水稻F优498和籼型三系杂交水稻丰两优4号作为EPIC模型水稻生长参数的率定依据。根据中国水稻品种及其系谱数据库、发表文献中的F优498和丰两优4号的生长特性对超级稻的收获指数、潜在最大叶面积指数、叶面积指数开始下降的时间点、株高等参数进行赋值，并根据中国水稻南方区试数据和气象数据确定两个品种水稻的生长期有效积温。最后以固定间隔变化的生物量—能量转换效率（范围：20~40 kg/MJ，间隔：1 kg/MJ）重复运行模型，确定模拟效果最佳的生物量—能量转换效率。

3.3 设置耕作区域、时间与方式

模型中农作物的生长参数主要由农作物的内禀因素决定。在模拟不同地区同一作物时，生长参数通常被作为常量处理。但是已有研究表明，当作物的生长环境差异很大时，EPIC模型的作物生长参数会发生变化^[31]。为了降低中孟印缅不同地区超级杂交稻生长参数的差异给模拟结果带来的不确定性，本研究在模型模拟过程中进行如下设置：①仅选取孟印缅的水稻主产区进行超级杂交稻的产量模拟。孟印缅水稻主产区的土壤主要包括冲积水稻土、淋溶水稻土和富铁铝水稻土（红壤性水稻土和砖红壤性水稻土）。同时考虑到孟中印缅各地区全年水热分配上的差异，本研究把孟印缅地区的雨季作为超级稻的生长季。②进行超级稻生长参数的率定时，从中国南方的47个水稻区试站点中筛选出水稻生长季日均温与孟印缅地区雨季日均温差距小于10%的18个区试站点。这18个站点所在地区的水稻土主要为冲积水稻土、淋溶水稻土、富铁铝水稻土（黄壤性水稻土和红壤性水稻土）与紫色土，土壤类型与孟印缅的水稻主产区接近。18个水稻区试站点的基本信息如表2所示。

依据柯本气候分类法，孟印缅水稻主产区的气候主要有亚热带季风气候、热带疏林草原气候和热带季风气候，3类气候区的面积分别占水稻主产区的35%、40%和11%^[32]。孟印缅水稻主产区亚热带季风气候典型城市——巴特纳、热带季风气候典型城市——仰光和热带疏林草原气候典型城市——达卡与筛选的18个中国南方水稻区试站点的水稻生长季气候指标如表3所示^[33]。

为确定孟印缅地区在雨季播种与收获超级稻的最佳时间，分别在EPIC模型中设置每年的4月、5月、6月、7月、8月、9月和10月为播种期，根据中国超级稻的生长季有效积温自动调整播种时间与收获时间，进而计算出不同播种期对应的水稻产量。在每个像元中取模拟产量的最大值，得到其对应的最佳播种期。孟印缅地区超级稻的雨季最佳播种月份分布如图1所示。此外，超级稻的耕作方式设置为条播后覆平的播种模式与95%效率收割并除去作物的收割模式。

表2 2016年中国南方水稻区试站点信息

Tab. 2 Rice regional experimental sites in southern China in 2016

站点序号	承试单位	试验地点	经度	纬度	播种期(月/日)
1	重庆三峡农科院	重庆市万州区甘宁镇	108.26°	30.67°	3/18
2	重庆市农科院水稻所	重庆市南川区大观镇铁桥村	106°33'	29°35'	3/26
3	重庆市农科院再生稻研究中心	重庆市永川区双竹镇	105.8°	29.3°	3/14
4	重庆渝东南农科院	重庆市涪陵区江北办事处二渡村	107°25'	29°45'	3/14
5	四川达州市达川区种子管理站	达川区麻柳镇铜鼓堆村	106°59'	30°49'	3/18
6	四川嘉陵农作物品种研究中心	简阳市平武镇皮匠街村七队	104°38'	30°23'	4/9
7	四川隆平高科种业有限公司	射洪县	105°22'	30°48'	4/10
8	四川宜宾市农科院	宜宾市南溪区大观镇	104°54'	28°58'	3/16
9	安徽黄山市种子站	黄山市农科所双桥基地	118°14'	29°40'	4/27
10	福建建阳市良种场	建阳市莒口马伏	118°22'	27°03'	5/13
11	湖北惠民农业科技有限公司	鄂州市路口原种场	114°38'	30°04'	5/5
12	湖北京山县农科所	京山县永兴镇苏余畈村五组	113°07'	31°01'	5/1
13	湖南怀化市农科所	怀化市鹤城区石门乡坨院村	109°58'	27°33'	4/26
14	湖南金色农华种业有限公司	浏阳市永安镇建新村	113°17'	28°11'	5/16
15	江西九江市农科所	九江县马回岭镇	115°48'	29°26'	5/17
16	江西省农科院水稻所	南昌市莲塘伍农岗	115°58'	28°41'	5/16
17	浙江江山市种子站	江山市上余镇大夫弟村	118°40'	28°47'	5/20
18	中国水稻研究所	浙江省富阳市	120°19'	30°12'	5/16

表3 孟印缅水稻主产区城市与中国区试站点生长季气候对比

Tab. 3 Climate comparison between Chinese stations and major rice-producing areas in the BIM region

城市名称	巴特纳	仰光	达卡	中国南方水稻区试站点	
所属国家	印度	缅甸	孟加拉国	中国	
柯本气候分类	亚热带季风气候(Cwa)	热带季风气候(Am)	热带疏林草原气候(Aw)	亚热带季风气候(Cwa)、夏季炎热型常湿温暖性气候(Cfa)	
水稻生长	平均高温(°C)	34.1	30.8	31.9	29.0~31.5
季气候指标	平均低温(°C)	25.2	24.4	25.5	20.9~23.2
	降水量(mm)	1060	2585	1856	749.3~1770.2

3.4 设置情景

本文模拟了以下3种情景的超级稻区域产量(图2):

① 孟印缅地区2000年灌溉和施肥水平下的超级稻单产潜力(Y_{2000}): 分别计算超级稻在雨养条件下的单产和灌溉条件下的单产, 以上两种条件的水稻生长都受到2000年孟印缅不同地区化肥使用量的限制。再根据公式(1)计算出2000年灌溉和施肥水平下两种超级稻单产的空间分布。

$$Y_{2000j} = \frac{Y_{rj} \times S_{rj} + Y_{ij} \times S_{ij}}{S_{rj} + S_{ij}} \quad (1)$$

式中: Y_{2000j} 表示研究区第 j 个像元覆盖地区2000年生产水平下的水稻单位面积产量; Y_{rj} 和 Y_{ij} 分别表示第 j 个像元内, 水稻在雨养条件下的单位面积产量和在灌溉条件下的单位面积产量; S_{rj} 和 S_{ij} 分别表示第 j 个像元内水稻的雨养面积和灌溉面积。

② 充分灌溉条件下的超级稻单产潜力 (Y_{irr})：在自动灌溉条件下模拟两种超级稻的生长，确保水稻生长季内的水分胁迫天数接近于0，在此情景下计算两种超级杂交稻单产潜力的均值。

③ 充分灌溉和理想施肥条件下的超级稻单产潜力 (Y_{max})：在自动灌溉的条件下，根据中国超级杂交稻的施肥量调整孟印缅各区域的施肥量，确保水稻生长季内的水分胁迫和养分胁迫天数均接近于0，在此情景下算出两种超级杂交稻最大单产潜力和区域总产量的均值。

4 结果与分析

4.1 超级稻生长参数率定结果

杂交稻F优498和丰两优4号在筛选的18个中国南方水稻区试站点中，2016年单产均值为9107 kg/ha，经过参数率定后EPIC模型模拟的平均单产为9006 kg/ha，相对误差为1.11%。参数率定的结果如表4所示。

各区试站点的实测单产与模拟单产如图3所示，图3中的区试站点序号对应表2中的站点序号。除福建建阳市良种场外，其他区试站点的实测单产与模拟单产的相对误差均小于15%。根据EPIC模型模拟结果，福建建阳市良种场（10号站点）的水稻模拟单产比实测单产高出31.23%。建阳市2016年的平均高温、平均低温与降水量均高于中国南方水稻区试站点的平均水平，良好的水热条件使福建建阳市良种场的预期生物量高达23.8 t/ha，模拟单产为10.1 t/ha。但在实际生产环节中，建阳市良种场的水稻有轻微的纹枯病和2.8%的杂株率，这会一定程度上降低水稻的单产。此外，不同区试站点浸种催芽方式、育秧方式、栽插方式与农药使用情况的差异也是产生模拟误差的可能原因。

4.2 孟印缅地区超级杂交稻的生产潜力分布

根据EPIC模型模拟结果，孟印缅地区1996-2005年超级稻的单产潜力 Y_{2000} 、 Y_{irr} 和 Y_{max} 分别为10.22 t/ha、10.70 t/ha和11.33 t/ha。1996-2005年超级稻生产潜力总体呈波动中下

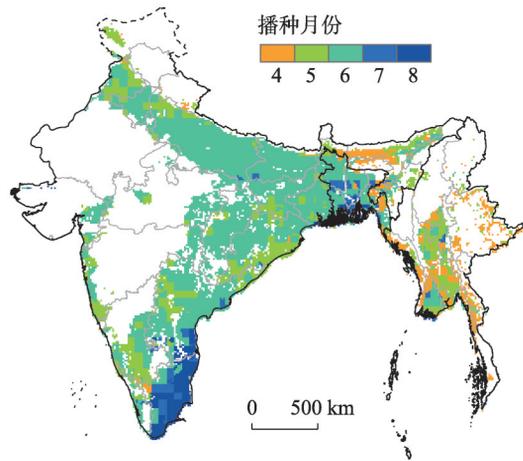


图1 超级杂交稻在孟印缅地区的最佳播种月份

Fig. 1 Best sowing months for super hybrid rice in the BIM region

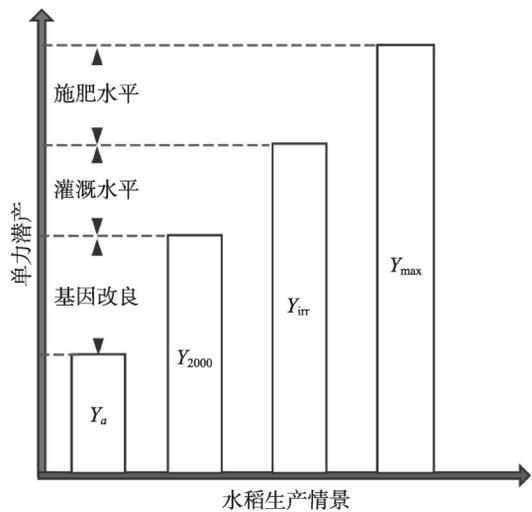


图2 不同情景下水稻生产潜力关系

(Y_a : 2000年水稻实际单产; Y_{2000} : 2000年灌溉和施肥水平下的超级稻单产潜力; Y_{irr} : 充分灌溉条件下的超级稻单产潜力; Y_{max} : 充分灌溉和理想施肥条件下的超级稻单产潜力)

Fig. 2 Relationship between rice potential yields under different conditions (Y_a : actual rice yield in 2000; Y_{2000} : potential yield of super hybrid rice under irrigation and fertilization levels in 2000; Y_{irr} : potential yield of super hybrid rice under sufficient irrigation; Y_{max} : potential yield of super hybrid rice under sufficient irrigation and fertilization)

降的趋势(图4)。受孟印缅地区水稻生长季水分、温度和养分胁迫的综合影响, Y_{2000} 、 Y_{irr} 和 Y_{max} 的最大值都出现在1998年, 分别达到10.97 t/ha、11.85 t/ha和12.63 t/ha; Y_{2000} 和 Y_{irr} 的最小值出现在2005年, 分别为9.66 t/ha、9.96 t/ha; Y_{max} 的最小值出现在1999年, 为10.62 t/ha。

2000年不同情景下超级杂交稻单产潜力的空间分布如图5所示。其中, 就 Y_{2000} 的均值而言, 孟加拉国>緬

表4 中国超级杂交稻EPIC模型生长参数率定结果

Tab. 4 Calibrated EPIC model parameters of Chinese super hybrid rice

水稻主要生长参数	F优498	丰两优4号
WA(生物量—光能转换效率 单位:kg/MJ)	27.00	27.00
HI(收获指数)	0.56	0.56
TOP(最适温度 单位:℃)	25.00	25.00
DMLA(潜在最大叶面积指数)	7.94	10.08
DLAI(叶面积指数开始下降的时间)	0.80	0.80
HMX(最大株高 单位:m)	1.12	1.24
PHU(潜在热量单位 单位:℃)	2233	2284

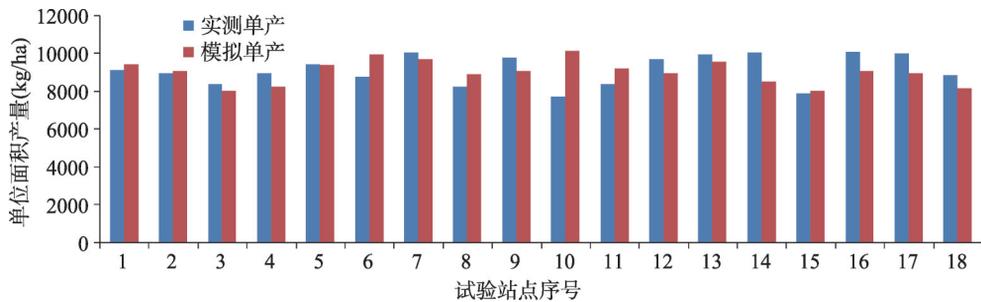


图3 中国18个南方区试验站的实测单产与模拟单产

Fig. 3 Measured and simulated yields in 18 southern Chinese regional experimental sites

甸>印度; 就 Y_{irr} 的均值而言, 孟加拉国>印度>緬甸; 就 Y_{max} 的均值而言, 孟加拉国>緬甸>印度。受雨季降水量、温度与太阳辐射的影响, 单产潜力最高的地区分布于印度西南部的Goa邦、Karnataka邦、Tamil Nadu邦、孟加拉国东北部的Sylhet区和印度东北部Assam邦的部分地区; 而单产潜力最低的地区分布于印度西北部的Punjab邦、Himachal邦和Jammu and Kashmir邦等地。对比孟印缅地区的 Y_a 与 Y_{max} 可知, 产量差最大的地区位于印度德干高原东北部以及Assam邦, 产量差最小的地区位于印度大平原的西北部与緬甸中部。

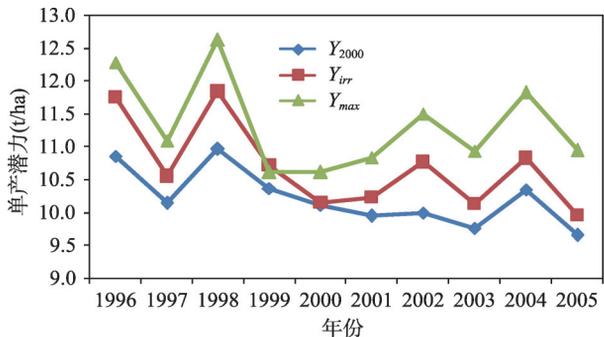


图4 孟印缅地区1996-2005年不同情景下超级杂交稻的单产潜力

Fig. 4 Potential yields of super hybrid rice under different conditions in the BIM region during 1996-2005

孟印缅地区2000年灌溉和施肥水平下超级稻增产潜力总量为21255万t, 充分灌溉条件下的超级稻增产潜力总量为22534万t, 充分灌溉和理想施肥条件下的超级稻增产潜力总量为22771万t(图6), 三者空间分布上一致。从国家尺度看, 均表现为印度>緬甸>孟加拉国。在各地区均种植超级杂交稻且充分灌溉和理想施肥的条件下, 水稻增产潜力超过1000万t的省份包括位于恒河平原的Uttar Pradesh邦、West Bengal邦和Bihar邦、位于印度半岛东南沿海的Orissa邦、Andhra Pradesh邦、Jharkhand邦和Tamil Nadu邦, 以

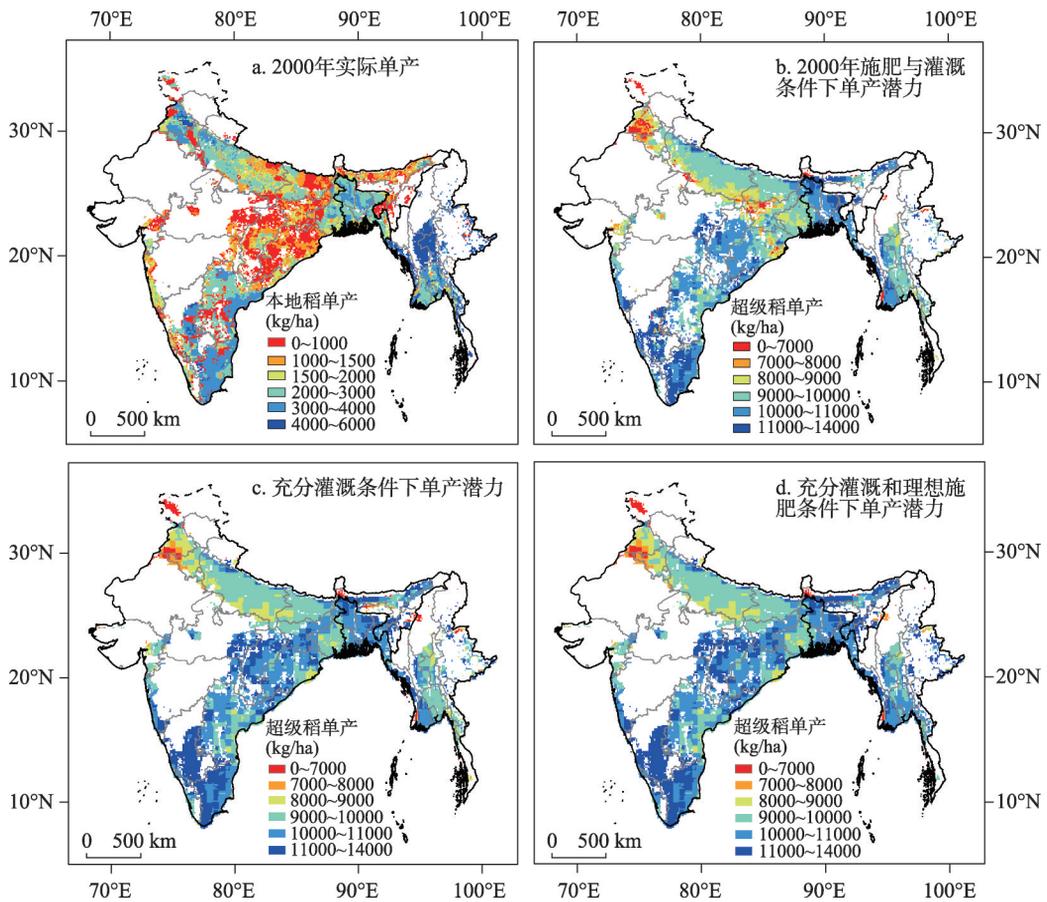


图5 2000年孟印缅地区不同情景的超级杂交稻单产潜力分布

Fig. 5 Potential yields of super hybrid rice under different conditions in the BIM region in 2000

及位于缅甸伊洛瓦底三角洲的Ayeyarwady省。

根据Foley等研究的全球水稻气候生产潜力分布^[1], 孟印缅地区各省份水稻实际单产的气候潜力利用率平均仅为6%, 总体呈现出较干旱地区气候潜力利用率高, 较湿润地区气候潜力利用率低的特点。如果全部种植杂交水稻, 孟印缅地区单季水稻生产的气候潜力利用率有希望超过25%。其中, 印度大平原北部、德干高原东北部和西南部的部分地区单季超级稻的气候生产潜力利用率有较大提升空间(图6)。

4.3 超级杂交稻的生长胁迫因素分析

就1996-2005年的时间序列数据而言, 水稻在雨养农田中受到的胁迫比在灌溉农田中更为显著。孟印缅地区雨养超级稻的单产潜力与生长季各类胁迫因子的影响天数如图7所示。可以看出, 雨养水稻在1998年的单产潜力最高, 生长季内受胁迫天数平均仅为14 d; 在2002年的单产潜力最低, 生长季内受胁迫天数平均达到26 d。当地的灌溉和施肥条件下, 雨养水稻受到的水分胁迫>温度胁迫>养分胁迫, 其中水分胁迫和养分胁迫可解释雨养农田水稻单产年际变化的81% ($p < 0.05$), 3种主要胁迫中水分胁迫对雨养水稻的单产潜力影响最为显著。此外, 随着模拟年份的推进, 雨养农田的土壤肥力持续退化, 水稻生长的养分胁迫天数逐年增加, 是导致该地区超级稻生产潜力呈下降趋势的原因之一。结合图4中 Y_{2000} 、 Y_{ir} 和 Y_{max} 的年际变化还可发现, 2002年孟印缅地区的旱灾虽然

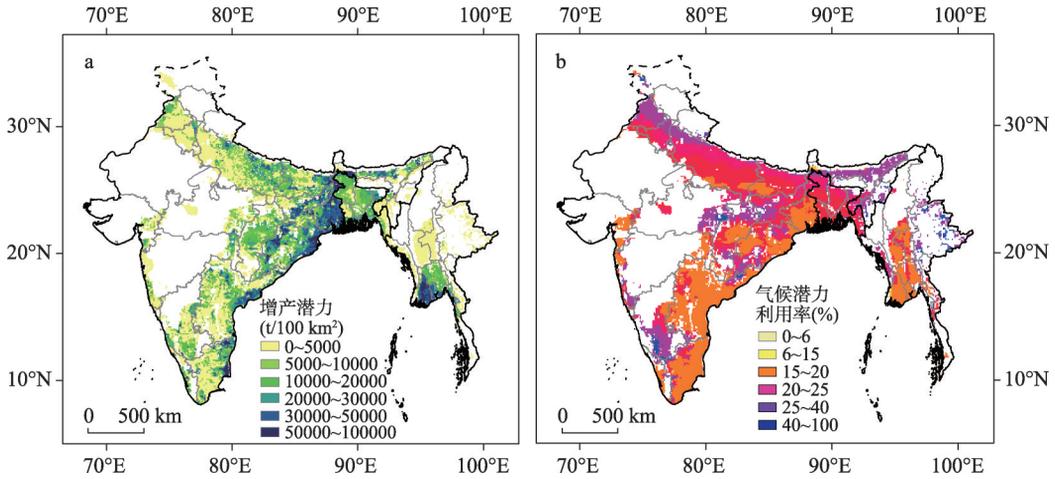


图6 孟印缅地区超级稻最大增产潜力与气候生产期潜力利用率

Fig. 6 Maximum production potential and climatic utilization efficiency of super hybrid rice in the BIM region

使雨养水稻的单产潜力降至最小值，但同期的 Y_{2000} 、 Y_{irr} 和 Y_{max} 并未出现下降，这主要得益于干旱胁迫严重的印度西部地区具有相对较高的灌溉农田比例，同时该年灌溉水稻的单产潜力也有所上升^[25]，这减弱了雨养水稻单产下降带来的负面影响，增强了印度西部地区水稻抵御干旱的能力。

就2000年的截面数据而言，将 Y_{2000} 与 Y_{irr} 相减，可得到2000年灌溉不足导致的超级杂交稻产量差 ΔY_{irr} ；将 Y_{max} 与 Y_{irr} 相减，可得到2000年施肥不足导致的超级杂交稻产量差 ΔY_{fer} 。孟印缅水稻产区的50个省级行政区中，两类生产要素的增产量及其空间分布如图8所示。由于EPIC模型预测的结果具有一定的随机性，即使在相同生产条件下，水稻单产模拟数值也会存在微小差异。经过多次重复模拟，同一地点超级杂交稻的单产标准差小于0.01 t/ha，极差小于0.2 t/ha。因此灌溉与施肥的增产效果小于 ± 0.2 t/ha的地区，可认为水稻生长过程基本不受这两类生产因素的限制。由图8可以看出，印度半岛东南沿海地区、印度大平原中东部地区、孟加拉国和缅甸的伊洛瓦底三角洲大部分地区的水稻生长不受当前灌溉水平与施肥水平的限制。由于EPIC模型遵循利比希最小因子定律，所以模型模拟的孟印缅水稻产量受限于当地供给量最少的必须元素。

从国家尺度来看，在2000年的灌溉与施肥水平下，印度超级稻产量受水分胁迫更为明显，缅甸超级稻产量受养分胁迫更为明显，而孟加拉国超级稻的生长基本不受水分与养分的胁迫。从地区尺度来看，孟印缅中西部的水稻产量主要受到水分的限制，具体包括印度德干高原东北部与西南部，印度大平原西北部等，通过发展灌溉平均可增产0.58 t/ha，最多可增产6.53 t/ha。印度德干高原的东北部以雨养农田为主，灌溉农田的分布面

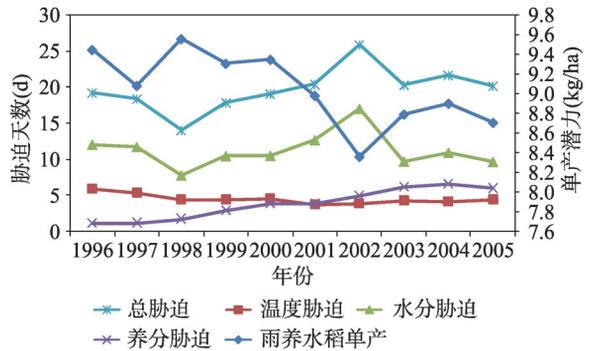


图7 1996-2005年孟印缅地区雨养水稻的单产潜力与生长季胁迫天数

Fig. 7 Potetial yields and stress days of rainfed rice in the BIM region during the growing seasons of 1996-2005

积低于 50 ha/100 km² [25], 而印度西北部尤其是旁遮普邦等地虽然具有较高的灌溉农田比例, 但是雨季降水量过低依然会使水稻的生长过程受到水分胁迫。孟印缅东部的水稻产量主要受到养分的限制, 具体包括缅甸的中南部平原地区和印度的东北地区如 Assam 邦等, 通过发展灌溉平均可增产 0.69 t/ha, 最多可增产 5.34 t/ha。这些地区在雨季虽然拥有充足的水热资源或较好的灌溉设备, 但是土壤中养分的缺乏以及年均仅 66 kg/ha 的氮肥投入^[1]使得超级杂交稻在生长过程中会受到养分的胁迫。

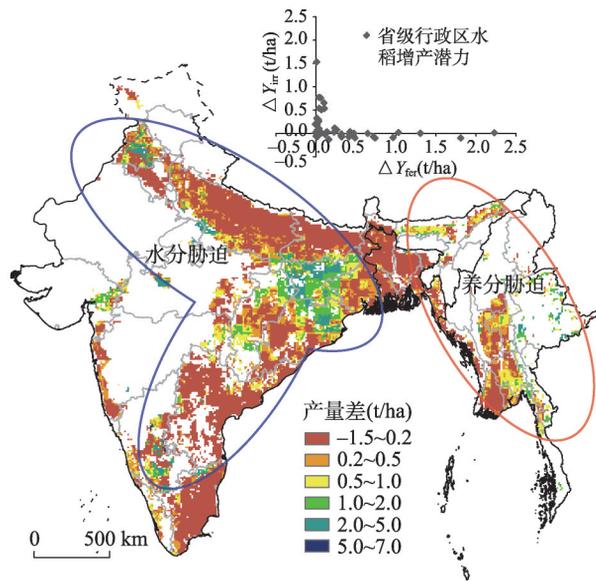


图8 2000年孟印缅地区灌溉与施肥水平下的超级稻产量差
Fig. 8 Simulated yield gaps of super hybrid rice between Y_{2000} and Y_{max} in the BIM region

5 讨论

5.1 模拟方法评价

一个地区在引进杂交稻新品种时, 需要在本地对新品种进行区试。但是新品种的区试需要消耗大量人力、物力和时间, 而且实验站点的结果在区域尺度上的代表性也值得商榷。本文选择在中国进行过广泛区试的超级稻推广品种, 筛选出与孟印缅水稻主产区雨季气候、土壤环境接近的实验站点, 对EPIC模型的作物生长参数进行校正。同时, 通过生长季有效积温与模型模拟计算出超级杂交稻在孟印缅各地的最佳播种期与最佳收获期, 结合孟印缅地区实际的灌溉与化肥水平设置不同情景模拟超级杂交稻的生长, 在模拟的过程中充分考虑了超级杂交稻耕种的本土化。尽管如此, 筛选出的中国 18 个区试站点的气候与孟印缅地区仍然存在差异, 比如孟印缅地区的水稻生长季日平均低温与日平均高温相比于中国区试站点偏高, 缅甸热带季风气候区的雨季降水量也高于中国的任何一个区试站点。另一问题在于单一的生态过程模型难以准确描述水稻生长的所有特性, 尤其是超级杂交稻对孟印缅水稻主产区频发的旱涝灾害和特定病虫害的抗逆性。孟印缅地区的自然灾害对中国超级杂交稻的生长特性与产量的影响尚需进一步研究。

5.2 孟印缅水稻的生产潜力

目前, 已有许多研究涉及到南亚与东南亚地区的水稻生产潜力。IRRI 和 PhilRice 的农田站点在理想条件下的实验数据表明, 亚洲热带低地灌溉条件下的高产常规稻种的生产潜力是 9.90 ± 0.30 t/ha, 籼型杂交稻的生产潜力是 10.80 ± 0.40 t/ha^[5], 这与本文通过模型模拟得到的籼型超级杂交稻潜力相近。Foley 等通过统计相似区域的高产记录估算出孟加拉国和印度水稻的单产潜力为 4.98 t/ha, 缅甸水稻的单产潜力为 5.85 t/ha^[1-2]。Waddington 等用类似的方法估算出南亚的水稻耕作系统与稻麦轮作系统中单产潜力为 6.98 t/ha 与 6.23 t/ha^[3]。Neumann 等使用随机前沿生产函数分析了全球水稻的单产潜力与产量差, 单产潜力在孟印缅 3 国的空间分布趋势与本研究一致, 但是估算的单产潜力低于本研究的模型模拟结果^[4]。Ittersum 和 Wart 等结合农业气候分区, 对世界各地水稻单产潜力的农田站点实验结果与各类模型的模拟结果进行了升尺度研究, 发现在一个生长季内灌溉条件

下的孟加拉国水稻单产潜力为11.98 t/ha, 与本文中孟加拉国的模拟结果仅相差2%, 而印度水稻单产潜力为9.01 t/ha^[12-13], 比本文中印度的模拟结果低20%。

就水稻单产潜力而言, 使用经验统计法(包括实际产量调查与边界函数分析)估算的结果明显低于本文的EPIC模型模拟结果, 而使用田间实验法和综合多种模型模拟结果的升尺度研究得到的潜力则等于或略高于本文的研究结果。相比于理想实验与理想模型, 水稻在实际生产活动中受到更多因素的影响。Waddington等对全球672位农业专家进行了调查, 认为除了化肥使用与营养管理不足外, 水稻产品的低价格、茎叶病虫害与不恰当的病虫害管理等是影响东南亚低地水稻单产潜力的最重要因素; 杂草竞争与土壤肥力退化等因素则是影响南亚水稻耕作系统与稻麦轮作系统中水稻单产潜力最重要的因素^[9]。以往学者在使用经验统计法计算单产潜力时, 没有很好地区分并提取这些因素对单产潜力的影响, 尤其是地方尺度下社会经济因素对水稻产量差的影响, 还需要更为细致地讨论。此外, 在孟加拉国和缅甸地区, 本文估算的超级稻生产潜力没有显著高于其他文献测算的水稻单产潜力, 说明孟加拉国和缅甸引种本文中两种超级杂交稻未必能提升当地水稻单产的潜力上限。

5.3 缩小产量差

通过本文的研究, 如果孟印缅3国在超级杂交稻推广、灌溉设施配套与化肥投入3个方面做出努力, 水稻总产量最大可提升至2000年实际总产量的2.47倍, 该地区的水稻增产具有非常广阔的前景。但是缩小孟印缅3国的水稻实际产量与潜在产量的产量差, 不仅仅是一个技术问题, 更是一个社会经济问题^[34]。孟印缅地区有很多农民无法购买到合适的杂交水稻种子、学习到栽培技术要点, 收获稻米后也没有渠道将其运往更大的消费市场。同时, 当灌溉、化肥、种子等投入成本过大时, 农民也会根据投入产出比选择是否要培养高产水稻。以缅甸为例, 在农业生产技术落后的情况下, 化肥、农药、农机等都依赖进口, 水稻的培养成本提高, 加之稻米价格低迷, 农民不愿意培育高产水稻。相比于印度与孟加拉国, 缅甸地广人稀, 田间管理方式也更为粗放。这使得缅甸水稻生长在普遍受到养分胁迫的情况下, 2002年以来, 化肥与农药的投入量依然没有提高, 每公顷投入水稻生产的氮肥量仅为中国的16%。此外, 缩小产量差虽然能大幅提升粮食供应的能力, 但是会对环境产生不确定的影响。水稻生产具有重要的外部效应, 比如水稻田能够排放大量的温室气体—— CH_4 与 N_2O ^[35]; 在水稻生产过程中过量施用化肥不仅会损耗地力, 造成土壤退化, 多余的养分还会随径流进入地下水与湖泊, 造成水体富营养化; 不恰当的土地利用与农田管理方式会使当地的生态安全受到威胁^[36]。因此, 若要强化研究结果的实践价值, 需要加强农户决策行为对产量差形成机制的研究。不仅要分析导致产量差的直接因素如管理和投入水平, 还要以农户为主体, 结合社会、经济和生态3方面因素进行综合分析, 为孟印缅地区粮食安全和农业发展战略提供科学支持^[37]。

6 结论

本文结合中国超级杂交稻的南方区试数据对EPIC/GEPIC模型中的水稻生长参数进行校正, 模拟了2000年灌溉和施肥水平下、自动灌溉条件下和理想施肥水平下超级杂交稻在孟印缅水稻主产区雨季的生产潜力空间分布, 得到如下结论:

(1) 中国超级杂交稻在孟印缅地区2000年灌溉和施肥水平下的单产潜力是10.22 t/ha, 在充分灌溉的条件下单产潜力是10.70 t/ha, 在充分灌溉且合理施肥的条件下单产潜力是11.33 t/ha。单产潜力最高的地区分布于印度西南部的Goa邦、Karnataka邦、Tamil Nadu

邦、孟加拉国东北部的 Sylhet 区和印度东北部 Assam 邦的部分地区, 这些地区可以作为超级杂交稻培育、驯化与推广的重点区域。

(2) 孟印缅地区雨季水稻的增产空间达 22771 万 t, 水稻增产潜力最大的地区是印度的恒河平原东部、印度半岛东南沿海与缅甸的伊洛瓦底三角洲。如果雨季全部种植杂交水稻, 孟印缅水稻生产的气候潜力利用率有望超过 25%。

(3) 印度水稻生长受水分胁迫更为明显, 缅甸水稻生长受养分胁迫更为明显, 而孟加拉国水稻生长受水分与养分的胁迫较小。印度德干高原东北部、西南部和印度大平原西北部需要进一步完善灌溉设备以满足高产水稻用水, 缅甸的中南部平原地区和印度的东北地区则需要增施氮肥以满足高产水稻用肥。

参考文献(References)

- [1] Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 2011, 478(7369): 337-342.
- [2] Mueller N D, Gerber J S, Johnston M, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 2012, 490(7419): 254-257.
- [3] Waddington S R, Li X, Dixon J, et al. Getting the focus right: Production constraints for six major food crops in Asian and African farming systems. *Food Security*, 2010, 2(1): 27-48.
- [4] Neumann K, Verburg P H, Stehfest E, et al. The yield gap of global grain production: A spatial analysis. *Agricultural Systems*, 2010, 103(5): 316-326.
- [5] Peng S, Cassman K G, Virmani S S, et al. Yield potential trends of tropical rice since the release of IR8 and the challenge of increasing rice yield potential. *Crop Science*, 1999, 39(6): 1552-1559.
- [6] Timsina J, Wolf J, Guilpart N, et al. Can Bangladesh produce enough cereals to meet future demand? *Agricultural Systems*, 2018, 163: 36-44.
- [7] Amgain L, Timsina J. Simulation of growth and yield of rice under different levels of nitrogen and irrigation in Punjab, using CSM-CERES-Rice model. *Journal of the Institute of Agriculture and Animal Science*, 2008, 28: 15-26.
- [8] Das L, Lohar D, Sadhukhan L, et al. Evaluation of the performance of ORYZA2000 and assessing the impact of climate change on rice production in Gangetic West Bengal. *Journal of Agrometeorology*, 2007, 9(1): 1-10.
- [9] Priya S, Shibasaki R. National spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model. *Ecological Modelling*, 2001, 136(2/3): 113-129.
- [10] Subash N, Mohan H S R. Evaluation of the impact of climatic trends and variability in rice-wheat system productivity using Cropping System Model DSSAT over the Indo-Gangetic Plains of India. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2012, 164(164): 71-81.
- [11] Basak J K, Ali M A, Islam M N, et al. Assessment of the effect of climate change on boro rice production in Bangladesh using DSSAT model. *Journal of Civil Engineering (IEB)*, 2010, 38(2): 95-108.
- [12] Wart J V, Bussel L G J V, Wolf J, et al. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crops Research*, 2013, 143(1): 44-55.
- [13] Ittersum M K V, Cassman K G, Grassini P, et al. Yield gap analysis with local to global relevance: A review. *Field Crops Research*, 2013, 143(1): 4-17.
- [14] Guilpart N, Grassini P, Sadras V O, et al. Estimating yield gaps at the cropping system level. *Field Crops Research*, 2017, 206: 21-32.
- [15] Spielman D J, Kolady D E, Ward P S, et al. Public expenditures, private incentives, and technology adoption: The economics of hybrid rice in South Asia. IFPRI Discussion Paper No.01233, 2013. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2197486> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2197486>.
- [16] Hu Jiyin, Jiang Aiqing. Current status and developing strategy of hybrid rice in India. *Hybrid Rice*, 2010, 25(3): 82-87. [胡继银, 蒋艾青. 印度杂交水稻现状及发展对策. *杂交水稻*, 2010, 25(3): 1826-1830.]
- [17] Chen Li, Hu Jiyin, Hmwe H, et al. Current status and developing strategy of hybrid rice in Myanmar. *Hybrid Rice*, 2014, 29(2): 78-83. [陈立, 胡继银, 妹妹, 等. 缅甸杂交水稻现状及发展对策. *杂交水稻*, 2014, 29(2): 78-81.]
- [18] HU Jiyin, Jiang Aiqing, Jiang Xuguo. Current status and developing strategy of hybrid rice in Bangladesh. *Hybrid Rice*, 2011, 26(3): 76-81. [胡继银, 蒋艾青, 蒋许国. 孟加拉杂交水稻现状及发展对策. *杂交水稻*, 2011, 26(3): 76-81.]
- [19] Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations: The CRU TS3.

- 10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 623-642.
- [20] Batjes N H. ISRIC- WISE Harmonized Global Soil Profile Dataset (Ver. 3.1). Report 2008/02, ISRIC: World Soil Information, Wageningen (with data set, available at www.isric.org).
- [21] Batjes N H. World soil property estimates for broad-scale modelling (WISE30sec). Report 2015/01, ISRIC - World Soil Information, Wageningen (with data set, available at www.isric.org).
- [22] Liu J, Williams J R, Zehnder A J B, et al. GEPIC- modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale. *Agricultural Systems*, 2007, 94(2): 478-493.
- [23] Liu J. A GIS-based tool for modelling large-scale crop-water relations. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(3): 411-422.
- [24] Danielson J J, Gesch D B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010): U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1073, 2011: 26.
- [25] You L, Wood-Sichra U, Fritz S, et al. Spatial Production Allocation Model (SPAM) 2005 v2. 0. October 19, 2017. Available from <http://mapspam.info>.
- [26] Gassman P W, Williams J R, Benson V W, et al. Historical development and applications of the EPIC and APEX Models. Center for Agricultural & Rural Development Publications, 2005.
- [27] Fan Lan, Lu Changhe, Chen Zhao. A review of EPIC model and its applications. *Progress in Geography*, 2012, 31(5): 584-592. [范兰, 吕昌河, 陈朝. EPIC 模型及其应用. *地理科学进展*, 2012, 31(5): 584-592.]
- [28] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 2. User manual. Technical Bulletin - United States Department of Agriculture, 1989, 4(4): 206-207.
- [29] Hirose T. Development of the Monsi-Saeki theory on canopy structure and function. *Annals of Botany*, 2005, 95(3): 483-494.
- [30] Monteith J L, Moss C J. Climate and the efficiency of crop production in Britain [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1977, 281(980): 277-294.
- [31] Xiong W, Balković J, Velde M V D, et al. A calibration procedure to improve global rice yield simulations with EPIC. *Ecological Modelling*, 2014, 273(8): 128-139.
- [32] Peel M C, Finlayson B L, McMahon T A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2007, 11(3): 259-263.
- [33] <http://worldweather.wmo.int/>
- [34] 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.
- [35] Smith P, Martino D, Cai Z, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2008, 363(1492): 789-813.
- [36] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington DC: Island Press, 2005.
- [37] Fan Lan, Lve Changhe, Chen Zhao. A review on crop yield gaps and the causes. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(12): 2155-2166. [范兰, 吕昌河, 陈朝. 作物产量差及其形成原因综述. *自然资源学报*, 2011, 26(12): 2155-2166.]

Modelling potential productivity of Chinese super hybrid rice in Bangladesh, India and Myanmar

WANG Xiaobo^{1,2}, WANG Shaoqiang¹, CHEN Jinghua^{1,2}, CUI Huijuan¹, WU Yijin³,
N H RAVINDRANATH⁴, A RAHMAN⁵

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. The College of Urban and
Environmental Sciences at Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 4. Centre for Sustainable
Technologies, India Institute of Science, Bangalore 560012, India; 5. Bangladesh Centre for Advanced Studies,
Dhaka 1212, Bangladesh)

Abstract: In this study, information is collected from statistics on the weather, soils, field management and agriculture in the Bangladesh, India and Myanmar (BIM) region. Crop growth parameters within the EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) model are calibrated using cultivar data and regional experimental records of indica hybrid rice Fyou498 and Fengliangyou4 in China. Potential yields of rice are then simulated in the BIM region from 1996 to 2005. The effects of local irrigation and fertilization levels on super hybrid rice yield are examined. The potential yields of Chinese hybrid rice at local irrigation and fertilization levels in 2000 and at full irrigation and rational fertilization levels are found to be 10.22 t/ha and 11.33 t/ha, respectively. The potential for increasing monsoon rice production in the study area is 227.71 million tonnes. The eastern Indo-Gangetic Plain in India, the southeast coast of India Peninsula and the Ayeyarwady Delta in Myanmar have the largest potentials for monsoon rice production. It is necessary for the northeastern and southwestern parts of the Deccan Plateau and the northwestern part of the Indo-Gangetic Plain to improve irrigation equipment to meet the water-use requirements of high-yield rice. The central and southern plains in Myanmar and northeastern India should have greater access to nitrogen fertilization for high-yield rice.

Keywords: super hybrid rice; potential productivity; yield gap; EPIC model; the BCIM-EC