学术信息与动态

DOI: 10.20103/j.stxb.202405311257
张艺馨, 李玥, 朱振闯, 赵哲, 陈涛涛, 孙仕军.未来气候变化对中国水稻产量的影响 Meta 回归分析.生态学报,2025,45(4):2011-2023.

未来气候变化对中国水稻产量的影响 Meta 回归分析

张艺馨[1], 李　玥[2], 朱振闯[1], 赵　哲[1], 陈涛涛[1], 孙仕军[1,*]
1 沈阳农业大学水利学院,沈阳　110866
2 沈阳农业大学农学院,沈阳　110866

摘要:定量分析未来气候变化下中国水稻产量预估结果的差异来源,为制定未来水稻的发展规划和相关政策提供依据。采用 Meta 分析方法,通过检索和筛选得到相关文献 42 篇(2000 年以来),共有 1129 个样本。以水稻单产变化率作为因变量,对导致水稻产量预估差异的自变量进行统计整合。通过回归分析明确未来气候预估、CO_2肥效、气候变化的时空分布和气象因子对水稻产量的影响。研究表明:(1)未来气候预估的气候情景和气候模式对水稻产量影响显著。高排放的 A2 气候情景下水稻产量预估最低,而低排放的 RCP 2.6 情景最适宜未来水稻生产,其产量的预估比 A2 高出 5.6%。选择 PRECIS 模式预估未来气候得到的水稻产量比其他模式高 4.1%。(2)CO_2肥效作用对水稻产量有正面影响,考虑其作用的产量预估比不考虑其作用高 15.0%。(3)未来气候变化下水稻产量预估存在时空上的差异。时间上,中稻的产量比早稻高 2.8%。空间上,不同种植区划的水稻产量预估差异明显。当以全国区域水稻产量为基准,东北早熟单季稻稻作区有 11.6%的增产幅度,而华中双单季稻稻作区有 10.3%的减产幅度。(4)气温、降水和太阳辐射气象因子的变化对水稻产量影响显著。结合已有数据信息,气温每升高 1℃水稻减产 5.8%,降水变化率和太阳辐射变化率每增加 1%,分别增产 0.7%和 0.9%。建议未来中国水稻的发展应从低排放的气候情景、CO_2肥效作用、中稻的生育期时段内自然资源和东北早熟单季稻稻作区的生态环境等方面深入探讨,充分发挥对水稻有增产影响变量的作用。

关键词:水稻产量; 全国; Meta 回归分析; 气候变化; 气候情景; 粮食安全

近年来人类活动引起的碳排放增加[1],导致地球表面温度长期上升[2—3]。这一现象对地球生态系统[4]和人类社会[5]均产生了广泛的影响。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)发现全球气候变暖、降水模式改变、极端气候频率和强度增加,对粮食作物的生产产生影响,进而阻碍可持续发展目标的实现[6],气候变化与粮食安全之间的关系由此也越来越受到关注[7—8]。水稻作为中国的主要粮食作物,保障其稳定生产是确保我国粮食安全的一个关键问题[9—10]。准确预估未来气候变化对中国水稻产量的影响,对中国粮食生产决策、种植结构调整和定价等都有重要意义[11—12]。

许多学者已经从不同视角对未来中国水稻生产的发展前景进行了研究和预估[13—15]。然而,由于各研究选择的方法和考虑的因素出发点不同,研究结果之间存在较大差异,有时预估结果甚至截然相反[16—18]。学者们的研究成果差异增加了相关决策的选择难度。因此,尽管已有较多文献对中国未来水稻产量进行了研究和预估,但研究结果的可靠性和一致性仍需进一步验证。

Meta 分析方法可以充分利用现有的文献中的信息,将以往的研究结果更为客观综合地反映出来,提升了

基金项目:国家自然科学基金项目(42305030, 52379043);辽宁省应用基础研究计划(2023JH2/101300123)
收稿日期:2024-05-31;　　**网络出版日期**:2024-11-06
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: sunshijun2000@syau.edu.cn
#限于数据的可获取性,本研究尚未含中国港澳台统计数据。

综合性研究的可靠性和准确性[19—20],是学术界较为认可的文献计量分析方法。Meta 分析方法已经开始逐步应用于农业生产领域方面,例如评估某种农业管理措施对作物产量和品质的影响[21—22]、研究某种肥料对农田土壤质量的影响效果[23—25]等,为政策制定和生产实践提供理论支持。目前,已有少量对未来条件下作物产量评估的 Meta 分析研究[26—27],但仍缺少针对中国地区未来气候变化对水稻作物产量影响的研究。相关研究中的气候情景、是否考虑 CO_2肥效、水稻类型、种植区划、气候模式、作物模型和评估时段信息等难以统一,得出的结论不能直接用以比较。同时,相关研究也缺乏在大尺度上的综合分析。

本研究基于 Meta 分析方法,全面、系统化地整合了未来气候变化对中国水稻产量影响的相关文献,就导致研究结果差异的来源进行计算分析,量化各变量对产量预估的影响,以期为气候变化对水稻产量影响的相关研究提供数据基础,同时为制定适应未来气候变化的水稻种植战略布局和农业政策提供科学依据。

1 研究方法与数据

1.1 数据来源

数据库文献源于中国知网(Chinese National Knowledge Infrastructure,CNKI)、维普数据库、万方数据库、Science Direct 和 Web of Science 共 5 个中英文数据库。中文以“水稻”、“气候变化+气候变暖”、“气候情景+模拟”和“生产+产量”,英文以“Rice+Climate change scenario+Yield+China”为主题词,对 2000—2022 年发表的有关未来气候变化对中国水稻产量影响的研究文献进行检索。为保证研究样本的质量,根据文献筛选原则[28],本研究的文献筛选标准为:(1)必须包括对中国整体或中国某确定地区进行评估的文献;(2)仅纳入气候预估下水稻产量变化的文献,由气候情景和气候模式获得的气象信息;(3)仅纳入对水稻作物有独立分析的文献,不包括对农业整体、病虫害等其他方面的文献;(4)必须是依据水稻作物模型进行定量评估的文献;(5)水稻的产量变化计算必须基于当前的种植方式和模式,不考虑对适应性的分析;(6)为保证不同样本文献样本之间的独立性,对相同作者并且基于相同数据的多篇文献仅纳入结果最新或最全面的一篇;(7)在同一篇文献中,如包含对不同水稻类型、种植区划、气候情景、气候模式、作物模型以及评估时段,分别提取作为独立样本。文献筛选具体过程见表 1。为降低因文献选择偏误对研究结果的影响,提高文献的准确性,本研究仅检索期刊文献。数据库的样本按照统一的标准提取相关变量。如果文献中原始数据以图像展示应用 GetData Graph Digitizer 软件进行数据提取[29]。最终筛选得到 42 篇相关文献,其中中文 22 篇,英文 20 篇,共计 1129 个样本。

表 1 文献筛选过程

Table 1 Process of literature retrieval and filtration

文献类别 Category of literature	主题词 Key words	文献数量 Quantity of literature	重复筛选 Duplication elimination	摘要筛选 Abstract filtration	内容筛选 Content filtration	纳入文献 Included literature
中文 Chinese	水稻+气候变化/气候变暖+气候情景/模拟+生产/产量	134	102	36	31	22
英文 English	Rice+Climate change scenario+Yield+China	213	187	54	29	20
总数 Total		347	289	90	60	42

1.2 数据分类和预处理

1.2.1 因变量

本研究选择“水稻单产变化”描述中国地区水稻产量的预估结果。通过下式计算得到水稻单产变化率 ΔY,作为统计的因变量:

$$\Delta Y = Y_p / Y_b \tag{1}$$

式中,Y_p和 Y_b分别为预估时期和基准时期的水稻平均单产量。

1.2.2　自变量

本研究选择对未来气候条件下水稻产量预估结果可能有重要影响的因素为自变量。根据自变量的数据类型分为虚拟变量和数值型变量。虚拟变量包括气候情景、CO_2肥效、水稻类型、种植区划、气候模式和作物模型共 6 类,它们分类亚组情况见表 2。

表 2　虚拟变量数据分组

Table 2　Classification of dummy variable data

虚拟变量 Dummy variable	分类亚组 Classification of sub-group
气候情景 Climate scenario	A2、B2、RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 8.5、其他情景
CO_2肥效 CO_2 fertilization effect	不考虑、考虑
水稻类型 Rice type	早稻、中稻、晚稻、其他类型
种植区划 Cropping region	华南双季稻稻作区、华中双单季稻稻作区、西南高原双季稻稻作区、华北单季稻稻作区、东北早熟单季稻稻作区、西北干旱区单季稻稻作区、全国区域、其他区域
气候模式 Climate model	PRECIS 模式、其他模式
作物模型 Crop model	CERES-Rice 模型、ORYZA 模型、其他模型

A2 和 B2 是 IPCC 发布的社会经济情景 Special Report on Emissions Scenarios(SRES),A2 假设人口增长快速、经济和技术发展缓慢,B2 假设人口和经济增长处于中等水平;RCP:典型浓度路径 Representative Concentration Pathways,数值为假设 2100 年达到的辐射强迫;PRECIS 是由英国气象局 Hadley 气候预测与研究中心开发的区域气候模式;种植区划参照中国水稻种植区划[30]进行分组

数值型变量包括气象因子和评估时段。记录的气象因子包括气温、降水和太阳辐射,它们的数据信息统一通过下式获得:

$$\Delta T = T_p - T_b \tag{2}$$

$$\Delta P = (P_p - P_b)/P_b \times 100\% \tag{3}$$

$$\Delta S = (S_p - S_b)/S_b \times 100\% \tag{4}$$

式中,ΔT 为气温变化量,°C;ΔP 为降水变化率,单位%;ΔS 为太阳辐射变化率,单位%;下标 p 和 b 分别表示预估期时段和基准期时段。

评估时段信息统计包括预估时期、时间长度、基准期时长和预估期时长 4 项内容。具体的统计方法,以预估期为 2021—2040 年和基准期为 1961—1990 年为例,统计预估时期为 2030s 记为 2030,预估期时长为 20a,时间长度是预估时期中值和基准时期中值的差值为 55a,基准期时长 30a。

1.3　Meta 分析过程

1.3.1　Meta 回归分析方法

Meta 分析方法最早由 Glass[31]提出和应用,是一种基于文献的定量分析方法。本研究采用由此方法发展而来的 Meta 回归分析(Meta Regression Analysis,MRA)方法。通过设定一定的标准,将具有相同或相似的研究主题的研究结果进行定量整合,分析自变量和因变量之间的关系,得到更加客观、全面地反应先前的相关研究结果,并探索研究结果差异性原因,为后续相关领域研究提供参考。MRA 模型由下式构建:

$$Y = \alpha_0 + \sum_{k=1}^{K} \alpha_k X_{ik} + \varepsilon \tag{5}$$

式中,Y 为因变量;α_0为常数项;X_i为文献中参与影响结果的特征变量;α_k为相应变量的回归系数;ε 为残差项。

本研究应用 Stata/MP 17.0 软件进行计算分析。考虑到在数据库中,同一篇文献会产生多个样本数据,采用加权最小二乘法(Weighted Least Squares,WLS)减少估计偏误[32],本研究选择以样本文献中的观测样本数量平方根的倒数作为权重[33]。

1.3.2　多重共线性分析

在多元线性回归模型中,需要保证各自变量是独立的。如果存在两个及以上的自变量高度相关就会难以区分单个自变量对因变量的影响,即多重共线性,会导致模型估计失真[34]。本研究采用计算方差膨胀系数(Variance Inflation Factor,VIF)进行多重共线性诊断,可以表示为:

$$\mathrm{VIF}=\frac{1}{1-R_i^2} \tag{6}$$

式中,R_i^2是自变量 X_i对模型其余自变量线性回归的 R^2值。

一般认为,VIF>10 说明自变量间存在严重的多重共线性。为消除多重共线性的不利影响,对 VIF>10 的自变量逐个剔除,直至剩余自变量的 VIF 值均小于 10。

2 结果

2.1 描述性统计

本研究样本的统计结果见表 3,共提取样本 1129 个。从气候情景上看,对未来气候发展的假设主要应用 A2(N=159)、B2(N=165)、RCP2.6(N=127)、RCP4.5(N=225)和RCP8.5(N=191)气候情景,少部分样本

表 3 数据库样本描述性统计

Table 3 Sample descriptive statistics

变量 Variable	分类 Category	样本 Sample		ΔY	
		N	平均值/频率 Mean/Frequency	平均值 Mean	SD
(1)气候情景	A2	159	(14.08)	-0.03	0.20
Climate scenario	B2	165	(14.61)	0.00	0.17
	RCP 2.6	127	(11.25)	-0.04	0.10
	RCP 4.5	225	(19.93)	-0.04	0.11
	RCP 8.5	191	(16.92)	-0.08	0.18
	其他情景	262	(23.21)	-0.02	0.15
(2)CO_2肥效	不考虑	530	(46.94)	-0.11	0.14
CO_2 fertilization effect	考虑	599	(53.06)	0.03	0.14
(3)水稻类型	早稻	100	(8.86)	-0.06	0.12
Rice type	中稻	547	(48.45)	-0.01	0.18
	晚稻	130	(11.51)	-0.05	0.13
	其他类型	352	(31.18)	-0.07	0.14
(4)种植区划	华南双季稻稻作区	143	(12.67)	-0.02	0.10
Cropping region	华中双单季稻稻作区	493	(43.67)	-0.09	0.12
	西南高原双季稻稻作区	57	(5.05)	0.00	0.15
	华北单季稻稻作区	42	(3.72)	-0.07	0.11
	东北早熟单季稻稻作区	284	(25.16)	0.06	0.19
	西北干旱区单季稻稻作区	15	(1.33)	0.07	0.25
	全国区域	63	(5.58)	-0.05	0.10
	其他区域	32	(2.83)	-0.21	0.17
(5)气候模式	PRECIS 模式	323	(28.61)	0.02	0.20
Climate model	其他模式	806	(71.39)	-0.06	0.13
(6)作物模型	CERES-Rice 模型	600	(53.14)	-0.04	0.13
Crop model	ORYZA 模型	386	(34.19)	-0.05	0.18
	其他模型	143	(12.67)	-0.01	0.20
(7)气象因子	ΔT	606	2.04	-0.02	0.15
Meteorological factor	ΔP	476	0.68	-0.04	0.16
	ΔS	423	2.47	-0.02	0.15
(8)评估时段	预估时期	1129	2051.07		
Assessment period	时间长度	1129	61.86	-0.04	0.16
	基准期时长	1129	26.86		
	预估期时长	1129	22.68		

N:样本数 Number of samples;SD:标准差 Standard Deviation;( )中数值表示虚拟变量在样本中出现的频率

应用其他情景,如 A1B、RCP 6.0 和发展共享社会经济路径(Shared Socio-economic Pathways, SSPs)等气候情景。从 CO_2 肥效上看,考虑($N=599$)该因素的样本略多于不考虑($N=530$)该因素的样本。从水稻类型上看,多数研究选择的是中稻($N=574$),早稻和晚稻的研究较少,还有 352 个样本是其他类型,即未具体说明水稻类型。从种植区划上看,样本的分布比较集中,主要在华中双单季稻稻作区($N=493$)和东北早熟单季稻稻作区($N=284$)。其他区域的样本是研究区域不是以全国区域为整体且无法归类为单一稻作区的情况。结合 CO_2 肥效作用统计不同种植区划样本产量预估结果见图 1,点的大小代表样本量大小,发现 CO_2 肥效作用显著提高水稻产量,甚至使部分地区的水稻生产出现增产现象。从气候模式上看,统计中使用较多的气候模式可分为 PRECIS 模式($N=323$)和其他模式($N=806$)2 类,其他模式的样本绝大多数选择的是 IPCC 提出的国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project,CMIP)中的 1 种或多种全球气候模式,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)和 NorESM1-M(挪威气候中心模式)等。从作物模型上看,研究水稻生产的主流模型是 CERES-Rice 模型($N=600$)和 ORYZA 模型($N=386$),而其他模型($N=143$)的使用频次相对较低,包括 Agro-C 模型和 APSIM 模型等。提供明确气象数据信息的样本较少,选择分析的气象因子包括气温($N=606$)、降水($N=476$)和太阳辐射($N=423$)。同时提供了这 3 类气象因子的相关信息且符合纳入标准的共有 315 个样本。从评估时段上看,样本的预估时期分布在 2010—2110 年,时间长度平均值为 61.86a。

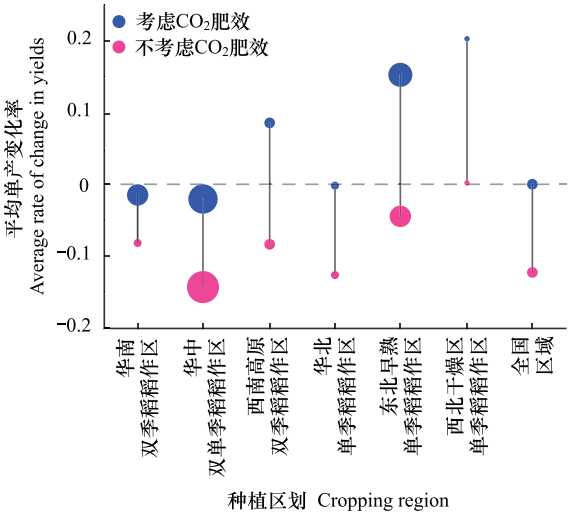


图 1　不同种植区划样本产量预估统计图

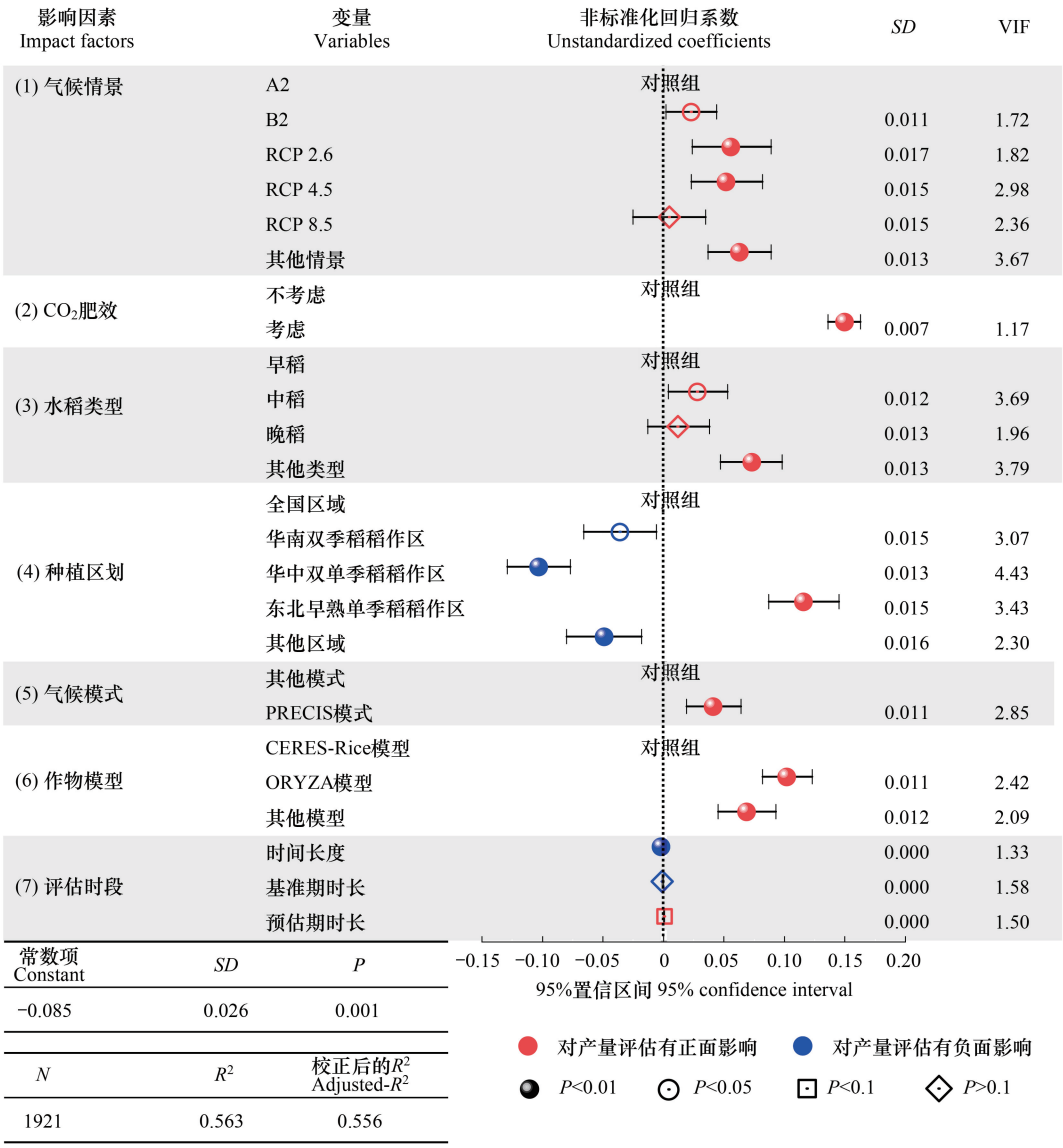
Fig.1　Statistical map of sample yield prediction for different cropping region

2.2　未来气候条件下水稻产量预估的差异原因

2.2.1　MRA 结果分析

构建描述未来气候条件下中国水稻产量预估的 MRA 模型,自变量包括气候情景、CO_2 肥效、水稻类型、种植区划、气候模式、作物模型和评估时段,设为模型 I。考虑样本量大小,将西南高原双季稻稻作区、华北单季稻稻作区和西北干旱区单季稻稻作区向其他区域合并。通过 WLS 和 VIF 值计算得到模型 I 的回归结果见图 2。具体而言,气候情景的选择对水稻产量预估的影响表现不同。在其他条件保持不变的情况下,B2、RCP 2.6、RCP 4.5 和其他气候情景下的水稻产量相比于 A2 分别增产 2.3%、5.6%、5.2%和 6.3%。RCP 8.5 情景下水稻产量与 A2 没有统计意义上的显著影响。是否考虑 CO_2 肥效作用对水稻产量预估有显著影响。在其他条件保持不变的情况下,考虑 CO_2 肥效作用会提高水稻产量预估结果,表现为增产 15.0%。CO_2 肥效与其他自变量相比,系数为正的且为最大值,即在此模型中 CO_2 肥效作用对水稻产量有正面影响且影响程度大。选择不同的水稻类型对产量预估差异明显,中稻和其他类型水稻比早稻有 2.8%与 7.3%的增产幅度,而晚稻产量与早稻没有统计意义上的显著影响。不同种植区划的产量预估有显著影响且差异较大。与全国区域相比,华南双季稻稻作区、华中双单季稻稻作区和其他区域产量预估分别表现为减产 3.6%、10.3%和 4.9%,而东北早熟单季稻稻作区的产量预估表现为增产 11.6%。是否采用 PRECIS 模式对水稻产量的预估结果有显著影响,该模式比其他模式有 4.1%的增产幅度。作物模型的选择对水稻产量预估具有显著影响。在其他条件保持不变的情况下,采用 ORYZA 模型和其他模型类型得到的产量要高于 CERES-Rice 模型,分别表现为 10.2%和 6.9%增产幅度。评估时段对水稻产量预估具有显著影响。基准期至预估期的时间长度每增加 10a 水稻产量下降

2.0%。预估期时长每增长 10a,水稻产量增加 1.0%。



常数项 Constant	SD	P
−0.085	0.026	0.001

N	R^2	校正后的R^2 Adjusted-R^2
1921	0.563	0.556

图 2 模型 I 回归结果

Fig.2 The regression results of Model I

A2 和 B2 是 IPCC 发布的社会经济情景 Special report on emissions scenarios(SRES),A2 假设人口增长快速、经济和技术发展缓慢,B2 假设人口和经济增长处于中等水平;RCP:典型浓度路径 Representative concentration pathways;*N*:样本数 Number of samples;*SD*:标准差 Standard deviation;VIF:方差膨胀因子 Variance inflation factor

2.2.2 稳健性检验

调整样本期是检验模型稳健性的一种方法[35]。本研究将样本期调整为 2030s—2070s 进行稳健性检验,变量设置与模型 I 相同。由图 3 发现,当缩小样本期后,回归拟合程度、各变量的回归系数和显著性结果与模型 I 的回归情况具有一定的相似性,证明研究结论具有稳健性。

2.3 气象因子对未来气候条件下水稻产量预估的影响

在模型 I 的自变量选择基础上加入气象因子数值型变量进行分析,构建出包含气温、降水和太阳辐射数据为自变量的 MRA 模型,设为模型 II,进而定量分析各气象因子对水稻产量预估的影响。考虑到分组的样本数问题,对样本的自变量信息进行重新分组:A2、B2 气候情景向其他情景合并;早稻和晚稻向其他类型合并;

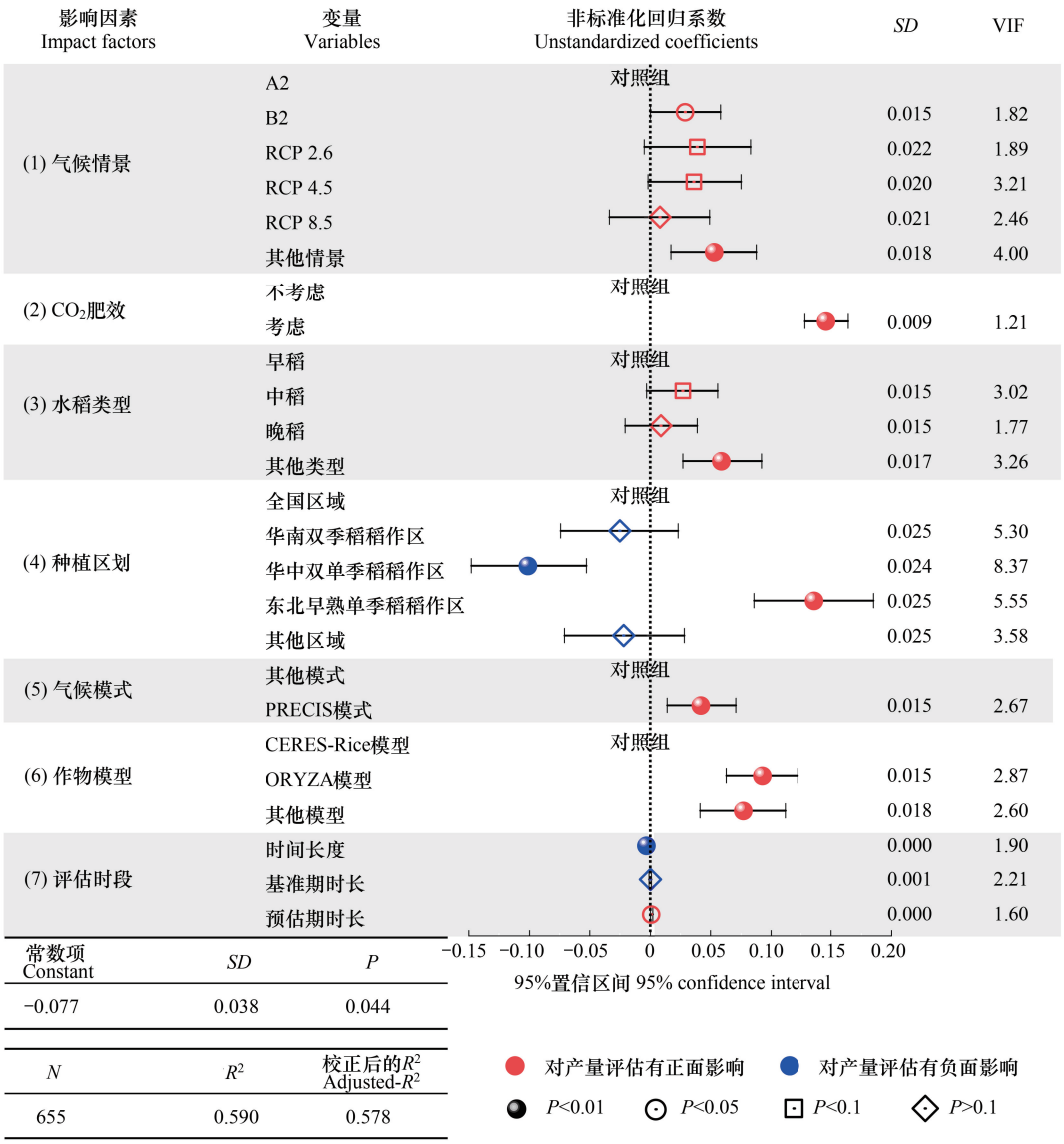
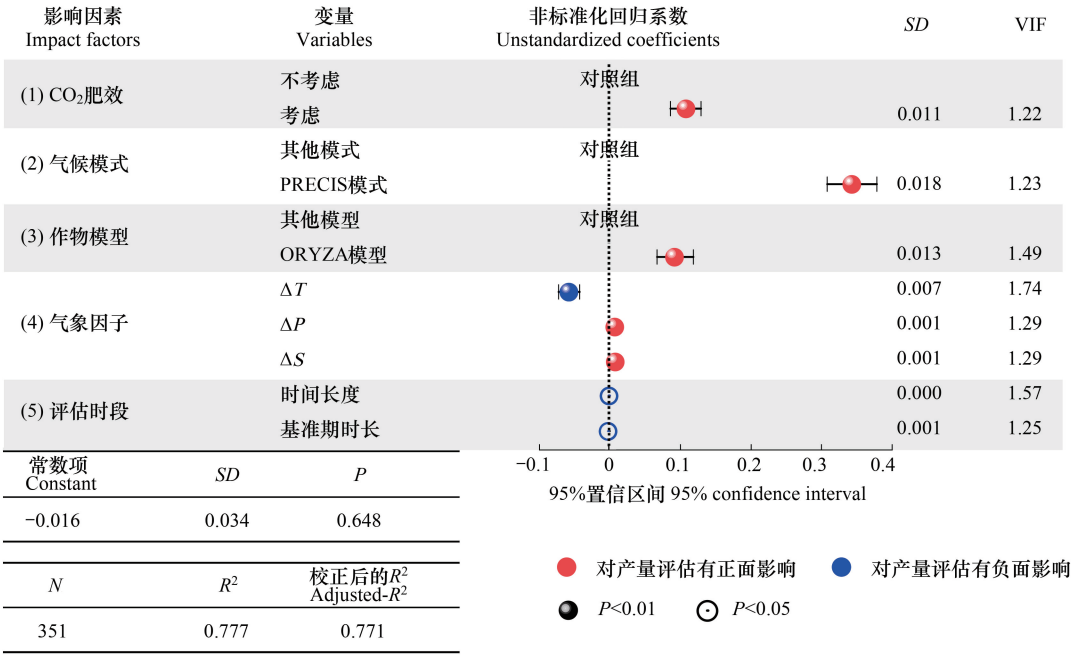


图 3　稳定性检验结果

Fig.3　Results of robustness test

东北早熟单季稻稻作区向其他区域合并为一组。VIF 检验时,多个自变量的 VIF>10,这可能是因为气象因子是由气候情景、气候模式以及评估时期等信息获得,自变量间不是完全独立的。采用向前逐步回归分析进行变量筛选以解决多重共线性问题。

由模型 II 显著变量回归结果(图 4)可知,对未来气候条件下水稻产量预估结果有显著影响变量为 CO_2肥效、气候模式、作物模型、气象因子和评估时段。具体而言,CO_2肥效、作物模型和气候模式变量对产量预估影响趋势与模型 I 的回归结果一致,仅在数值上有变化。考虑 CO_2肥效作用比不考虑其作用水稻有增产 10.8%的幅度。ORYZA 作物模型相较于其他作物模型水稻产量提高 9.2%。应用 PRECIS 模式的产量预估结果高于其他模式 34.3%。变量评估时段因素的变量影响发生部分改变。时间长度的回归结果与模型 I 相似,每增加 10a 时间长度水稻减产 1%幅度。而基准期时长在模型 II 中对水稻产量的影响显著,其每增加 10a 水稻减产 2%幅度。变量气温、降水和太阳辐射气象因子对水稻产量预估均有显著影响。保持其他条件恒定的情况下,当气温提高 1°C 时预估结果减产 5.8%,降水变化率每增加 1%时预估结果增产 0.7%,太阳辐射变化率每增加 1%时预估结果增产约 0.9%。



常数项 Constant	SD	P
−0.016	0.034	0.648

N	R^2	校正后的R^2 Adjusted-R^2
351	0.777	0.771

图 4 模型 II 显著变量回归结果

Fig.4 Significant variable regression results of Model II

进一步分析表现显著的变量对水稻产量预估结果的贡献率,计算标准化回归系数,结果见表 4。在模型 II 中 PRECIS 模式对产量预估结果的贡献率最大。在各项气候相关变量中,CO_2肥效作用仍是贡献率最高的,其标准化系数为 0.291,气温变化量和降水变化率的贡献率略低于 CO_2肥效的贡献率,分别为−0.278 和 0.251,而太阳辐射变化率的贡献率相对低,其标准化系数为 0.175。ORYZA 作物模型的标准化回归系数为 0.234,其对预估产量结果的贡献也相对较大。时间长度和基准期时长虽然对水稻产量预估影响显著,但相比于其他因素的贡献率低。

3 讨论

3.1 未来气候预估对水稻产量的影响

3.1.1 气候情景

气候情景,是对未来气候做出的一种合理且简化的表述,通常作为输入因子应用于影响模型[36]。气候情景应用于气候模拟、评估气候变化和分析气候变化相关政策等方面,同时由于其统一了气候研究领域中未来气候变化的假设,使相关研究的研究结果更具有可比较性[37—38]。IPCC 先后为未来气候相关领域的研究提出和发展了多种气候情景[36,39—41],即对未来气候发展存在多种假设,不同情景下气候预估存在明显差异。梁玉莲等[42]利用 CMIP5 中 26 个气候系统模式的集合模拟结果,发现预估 21 世纪末期中国地区在 RCP 2.6、RCP 4.5 和 RCP 8.5 情景下年均温增幅分别为 1.87℃、2.88℃和 5.51℃,降水增幅分别为 0.123mm/d、0.214mm/d 和 0.323mm/d。本研究结果表明 RCP 2.6 与其他气候情景相比更能适应于水稻的生产,其相比于高排放的 A2 气候情景得到的产量预估结果有 5.6%增加幅度。RCP 2.6 气候情景基于较强的减排措施,该气候情景下未来气候改变相对最小。RCP 2.6 气候情景假设全球温室气体排放在 21 世纪中叶达到峰值 3W/m^2后下降[40],这与我国的“双碳目标”比较接近[43],因此坚持减排措施和可持续发展策略对中国水稻生产以及粮食安全十分重要。

表 4　显著变量标准化回归系数结果

Table 4　Results of standardized regression coefficients for significant variables

变量 Variable	标准化回归系数 Normalized regression coefficient	变量 Variable	标准化回归系数 Normalized regression coefficient
CO_2肥效 CO_2 fertilization effect	0.2911	ΔP	0.2513
PRECIS 模式 PRCIS model	0.5812	ΔS	0.1754
ORYZA 模型 ORYZA model	0.2343	时间长度 Time length	-0.0682
ΔT	-0.2778	基准期时长 Length of baseline period	-0.0616

3.1.2　气候模式

气候模式是气候系统的数值表述,建立在气候系统各部分的物理、化学和生物学特性及其相互作用和反馈过程的基础上,以解释已知的全部或部分特性[36]。地球系统非常复杂,选择不同的气候模式和计算方法会影响气候预估的结果[44],进而对未来气候条件下水稻产量的预估产生影响。本研究通过统计相关研究的气候模式类型,将其归为 PRECIS 模式和其他模式 2 类,其中其他模式多为 CMIP 中的全球气候模式。CMIP 旨在比较各种气候模式在模拟全球气候变化上的不同结果,以提高对气候变异和气候变化的认识[45]。CMIP 目前处于第 6 阶段(CMIP6),由于本研究中检索文献年份范围,相关研究多采用 CMIP5 中的模式。已有研究发现基于相同的中国地区历史气候条件,选择不同的气候模式模拟得到的未来气温和降水的结果不同[46—47]。Zhang 等[48]发现 PRECIS 模式相比于全球气候模式在模拟中国地区温度上更加具有优势。Marengo 等[49]发现 PRECIS 模式能够很好的模拟极端温度和降雨的时空分布特征。本研究发现,应用不同的气候模式对水稻产量预估存在显著影响。应用 PRECIS 模式的研究对水稻产量的预估相对更高,与应用其他模式的研究相比有 4.1%的增产幅度。

3.2　CO_2肥效对水稻产量的影响

大气中 CO_2浓度变化会直接影响作物的生理生化过程[50]。Kimball 等[51]研究发现当大气 CO_2富集,农作物的光合作用、气孔导度、物候期和生物量产量均会因受其影响而改变。对水稻这类 C3 作物来说,当大气 CO_2浓度升高,叶片的光合作用加强[52],同时对水蒸气的气孔导度降低[53—54]。邵在胜等[55]利用自然光体熏蒸平台提高 CO_2浓度 200μmol/mol,发现水稻在拔节期、抽穗期和灌浆期的净光合速率分别有 15%、11%和 28%的增幅。光合作用直接影响着作物产量[56]。同时,CO_2浓度变化也会对作物的呼吸作用和水分利用效率等产生影响[57],同样也会对产量有影响。因此,是否考虑 CO_2肥效作用对水稻产量预估结果影响较大[58—60]。研究表明当以 CO_2肥效的作用为唯一变量时,大气 CO_2浓度增加,水稻产量也随之增加[61]。周娟等[62]采用大气 CO_2浓度增高技术保持水稻全生育期过程中 CO_2浓度比大气中的浓度高 200μmol/mol,对不同类型水稻品种的产量进行测量发现,大气 CO_2浓度增高技术的应用平均增加水稻产量 24.17%。周景博等[63]基于 Meta 回归分析,定量分析了未来气候变化对小麦产量影响的差异性来源,发现 CO_2肥效可显著提高小麦产量。本研究结果发现,CO_2肥效作用能显著提高水稻作物产量,考虑 CO_2肥效作用的产量预估相比于不考虑其作用有 15.0%的增产趋势。在未来水稻产量预估相关研究中,应考虑 CO_2浓度变化对水稻产量的积极影响,以避免较大的低估。

3.3　气候变化的时空分布不均对水稻产量的影响

3.3.1　水稻类型

气候资源年内分配不均,作物的生长期处于不同的时段,温度、降水和太阳辐射等自然资源条件存在差异。本研究按水稻的移栽时间对各研究的水稻类型重新分类统计,包括早稻(3 月下旬至 4 月下旬)、中稻(5 月上旬至 6 月上旬)和晚稻(6 月下旬至 7 月上旬),以揭示未来水稻产量预估在年内不同时间生长上的差异。叶廷红等[64]通过整合 2000—2016 年的水稻田间相关试验研究,发现不同水稻类型在干物质累积和氮素吸收利用均存在一定的差异,中稻的平均产量相对更高且干物质快速累积持续时间更长。本研究发现,目前对中

稻的研究相对较多,中稻更能适应未来气候的变化,其产量预估相比于早稻有 2.8%的增产幅度。中稻在现阶段和未来的生产发展都具有一定优势,有进一步推广种植的潜力。孔祥智等[65]指出目前早稻的生产规模和地位均呈下降趋势,2021 年早稻产量占全国稻谷的 13.16%与 2012 年相比下降了 2.38%,但早稻具有稳定性强、耐储藏、增产潜力高等特点,发展其生产对我国粮食安全具有重要的战略价值。因此,在未来发展中稻的同时,早稻和晚稻的发展也需要兼顾,充分发挥它们各自的优势,全面释放生产力,对稳定我国粮食储备具有关键作用。

3.3.2 种植区划

中国地域辽阔,气候资源和土地资源等在空间上分布存在差异。目前,已有较多对中国地区水稻历史产量在空间分布上变化规律的研究。Xu 等[66]对 2000—2015 年的中国地区水稻田间试验进行统计分析发现,水稻产量分布具有空间变异性。汤勇华等[67]利用农业统计数据和土壤属性数据建立了地力贡献统计模型与 GIS 技术耦合,研究结果发现水稻作物的地力贡献率和产量空间分布差异较大。赵彦茜等[68]基于国内相关研究总结过去几十年中国主要粮食作物对气候变化的响应和适应发现,气候变化有利于东北地区水稻产量增加,对长江流域等南方主要稻作区的产量有消极作用。本研究按中国水稻种植区划[30]标准对相关研究中水稻种植区域进行重新划分,统计结果发现目前对华中双单季稻稻作区和东北早熟单季稻稻作区的研究相对较多。回归分析结果发现,未来中国水稻产量分布存在空间变异性,与全国区域的水稻产量相比,东北早熟单季稻稻作区水稻产量有 11.6%的增产幅度,其他分组中以华中双单季稻稻作区的水稻产量预估最低,表现为 10.3%的减产幅度。这也说明东北早熟单季稻稻作区对未来气候条件的适应性相对更强,甚至可能出现增产的现象,这与现在水稻种植中心向北迁移的发展趋势相适应[69]。因此在未来可以考虑继续发挥东北早熟单季稻稻作区的生态环境优势,制定科学合理的耕地策略,优化和改善种植结构,以保障粮食的生产满足需求。

3.4 气温、降水和太阳辐射气象因子对水稻产量的影响

水稻生长发育在一个复杂的自然—社会系统中,其对气候变化的响应敏感。熊伟等[70]分析了 1987—2007 年平均温度、日较差和辐射的历史气候因子变化对中国水稻产量的影响,发现该时期中国有 30%种植区的水稻产量对气候变化敏感,少部分地区甚至表现脆弱。本研究纳入的文献中,在评估气象因子对水稻产量影响时,主要选择气温、降水和太阳辐射指标进行分析。具体表现为,提供气温数据的样本最多,超过总样本量的 1/2。而同时具有 3 项气象因子数据信息的样本量不足总样本量的 1/3,在此数据基础上本研究建立了模型 II 以揭示水稻产量对各气象因子变化的响应。Abbas 等[71]发现气温和降水会显著影响作物产量,气候变化会引起气温和降水格局的变化,进而影响水稻的生长发育,最终导致产量的变化。Pickson 等[72]分析了历史气候中平均气温和平均降水量的变化对中国地区水稻产量的影响,发现平均气温升高会对水稻产量产生负面影响,而平均降水量增加会对水稻产量有正面作用。本研究也得到了相似的结果,气温、降水和太阳辐射均对水稻产量预估影响显著,具体表现为气温每提高 1°C 时减产 5.8%,降水变化率每增加 1%有 0.7%的增产幅度,太阳辐射变化率每增加 1%时有 0.9%的增产幅度。

3.5 影响水稻产量预估的其他因素

在未来气候变化对水稻产量预估的相关研究中,作物模型和评估时段的非气象因素也会对产量预估有显著影响。已有研究结合相关实验发现 CERES-Rice 模型和 ORYZA 模型对模拟中国地区水稻生长发育过程和产量的表现良好[73—74]。然而,本研究发现作物模型对产量预估有显著影响,特别是选择 CERES-Rice 模型对产量有较大的低估,选择 ORYZA 模型模拟和其他模型的产量预估分别比其高出 10.2%和 6.9%幅度。评估时段上,本研究发现时间长度每增加 10a 水稻产量有 2.0%的减产幅度,预估期时长每增长 10a 水稻产量有1.0%的增产幅度。

同时,本研究未考虑的人为因素也可能会对产量预估有影响。纳入的样本都建立在不改变种植模式和管理措施的前提下分析的,生产实际中水稻的产量会受到如水资源管理、农业管理措施等的诸多影响[61,75]。未来水稻发展有自适应性,包括延迟或提前移栽时间以及选择更加适合的水稻品种[76—78]等。未来中国水稻的

生产规划上需要科学应用这些措施,对水稻供给侧进行结构性的改革[79],优化水稻产业的发展以缓解粮食安全面对的压力。综上所述,准确预估未来气候变化下水稻产量需要科学合理地预测未来气候的发展假设、考虑 CO_2肥效的作用、土壤等信息的完善、更精确的作物模型和气候模式以及对人为干预的管理措施效果更准确评估等方面。

此外,样本量、样本信息和建模的方法等也会导致水稻产量预估出现差异。本研究仅采用期刊论文,如果加入非期刊论文数据则可能会使数据库整体的统计结果发生一定的改变。目前,有很多学者关注本领域的相关问题并展开研究,但是文献中对具体的计算过程说明较少,如研究采用的统计方法、分辨率设置和降尺度方法等。这些细节方法和设置可能对产量预估产生影响,但在文献中无法提取或可提取的样本较少,因此本研究并未对这些因素进行统计分析。在本研究的模型 II 中,具有详细气象资料的样本数较少,部分稻作区缺少足够数量的样本,因此回归结果在一定程度上无法反映中国区域整体情况,这需要加入后续的相关研究以扩充样本量以提升回归结果的精度。

4　结论

(1)未来气候预估对中国水稻产量预估有显著影响。选择气候情景时,应用低排放的 RCP 2.6 的产量预估比高排放的 A2 的结果提高 5.6%。选择气候模式时,应用 PRECIS 模式比其他模式获得的产量预估高 4.1%。

(2)是否考虑 CO_2肥效作用也对未来中国水稻产量预估有显著影响。大气 CO_2浓度提升会对水稻产量有正面影响,当考虑 CO_2肥效作用产量预估有 15.0%的增产幅度。

(3)气候变化的时空分布不均匀对中国水稻产量预估有显著影响。时间上,中稻比早稻的产量预估高出 2.8%。空间上,与全国区域相比,东北早熟单季稻稻作区水稻产量有 11.6%的增产幅度,而华中双单季稻稻作区水稻产量有 10.3%的减产幅度。

(4)气温、降水和太阳辐射气象因子对未来中国水稻产量预估的影响显著。气温每提高 1°C 产量预估降低 5.8%,降水量每增加 1%产量预估增加 0.7%,太阳辐射每增加 1%产量预估增加 0.9%。

参考文献(References):

[1] Ekwurzel B, Boneham J, Dalton M W, Heede R, Mera R J, Allen M R, Frumhoff P C. The rise in global atmospheric CO_2, surface temperature, and sea level from emissions traced to major carbon producers. Climatic Change, 2017, 144(4): 579-590.

[2] Hansen J, Ruedy R, Sato M, Lo K. Global surface temperature change. Reviews of Geophysics, 2010, 48(4): RG4004.

[3] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 初子莹, 张莉, 邹旭凯, 李庆祥, 刘小宁. 近 50 年中国地面气候变化基本特征. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956.

[4] Bazzaz F. The response of natural ecosystems to the rising global CO_2 levels. Annual Review of Ecology and Systematics, 1990, 21: 167-196.

[5] Raj B, Singh O. Study of impacts of global warming on climate change: rise in sea level and disaster frequency. Global Warming-Impacts and Future Perspectives. Rijeka: InTechOpen, 2012: 93-118.

[6] IPCC. Climate change 2023: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023.

[7] 刘立涛, 刘晓洁, 伦飞, 吴良, 鲁春霞, 郭金花, 曲婷婷, 刘刚, 沈镭, 成升魁. 全球气候变化下的中国粮食安全问题研究. 自然资源学报, 2018, 33(6): 927-939.

[8] 苏芳, 刘钰, 汪三贵, 尚海洋. 气候变化对中国不同粮食产区粮食安全的影响. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(8): 140-152.

[9] 赵凌, 赵春芳, 周丽慧, 王才林. 中国水稻生产现状与发展趋势. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 105-107.

[10] 章秀福, 王丹英, 方福平, 曾衍坤, 廖西元. 中国粮食安全和水稻生产. 农业现代化研究, 2005, 26(2): 85-88.

[11] 吕东辉, 徐彩芬, 张郁. 价格波动对黑龙江省种植结构影响的模拟分析. 农业技术经济, 2019(12): 96-106.

[12] 徐春春, 纪龙, 陈中督, 方福平. 中国水稻生产、市场与进出口贸易的回顾与展望. 中国稻米, 2021, 27(4): 17-21.

[13] Saud S, Wang D P, Fahad S, Alharby H F, Bamagoos A A, Mjrashi A, Alabdallah N M, AlZahrani S S, AbdElgawad H, Adnan M, Sayyed R Z, Ali S, Hassan S. Comprehensive impacts of climate change on rice production and adaptive strategies in China. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 926059.

[14] 吕彤, 郭倩, 丁永霞, 刘力, 彭守璋. 基于 MaxEnt 模型预测未来气候变化情景下中国区域水稻潜在适生区的变化. 中国农业气象, 2022, 43(4): 262-275.

[15] 熊伟, 冯灵芝, 居辉, 杨笛. 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.
[16] Xiong W, Conway D, Lin E, Holman I. Potential impacts of climate change and climate variability on China's rice yield and production. Climate Research, 2009, 40: 23-35.
[17] Lin E D, Xiong W, Ju H, Xu Y L, Li Y, Bai L P, Xie L Y. Climate change impacts on crop yield and quality with CO_2 fertilization in China. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences, 2005, 360(1463): 2149-2154.
[18] Liu Y J, Tang L, Qiu X L, Liu B, Chang X N, Liu L L, Zhang X H, Cao W X, Zhu Y. Impacts of 1.5 and 2.0℃ global warming on rice production across China. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 284: 107900.
[19] Moher D, Shamseer L, Clarke M, Ghersi D, Liberati A, Petticrew M, Shekelle P, Stewart L A, Group P P. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. Systematic Reviews, 2015, 4(1): 1-9.
[20] Mengist W, Soromessa T, Legese G. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. MethodsX, 2019, 7: 100777.
[21] Gao H H, Yan C R, Liu Q, Ding W L, Chen B Q, Li Z. Effects of plastic mulching and plastic residue on agricultural production: a meta-analysis. Science of the Total Environment, 2019, 651: 484-492.
[22] 魏欢欢, 王仕稳, 杨文稼, 孙海妮, 殷俐娜, 邓西平. 免耕及深松耕对黄土高原地区春玉米和冬小麦产量及水分利用效率影响的整合分析. 中国农业科学, 2017, 50(3): 461-473.
[23] 王旭东, 庄俊杰, 刘冰洋, 李帅帅, 赵鑫, 刘洋, 张海林. 秸秆还田条件下中国农田土壤有机碳含量变化及其影响因素的 Meta 分析. 中国农业大学学报, 2020, 25(8): 12-24.
[24] 蔡岸冬, 张文菊, 杨品品, 韩天富, 徐明岗. 基于 Meta-Analysis 研究施肥对中国农田土壤有机碳及其组分的影响. 中国农业科学, 2015, 48(15): 2995-3004.
[25] Shakoor A, Shakoor S, Rehman A, Ashraf F, Abdullah M, Shahzad S M, Farooq T H, Ashraf M, Manzoor M A, Altaf M M, Altaf M A. Effect of animal manure, crop type, climate zone, and soil attributes on greenhouse gas emissions from agricultural soils—a global meta-analysis. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 124019.
[26] Li S Y, Wu F, Zhou Q, Zhang Y L. Adopting agronomic strategies to enhance the adaptation of global rice production to future climate change: a meta-analysis. Agronomy for Sustainable Development, 2024, 44(3): 23.
[27] Knox J, Daccache A, Hess T, Haro D. Meta-analysis of climate impacts and uncertainty on crop yields in Europe. Environmental Research Letters, 2016, 11(11): 113004.
[28] 徐双丽, 吕昭河. Meta 分析方法在经济学中的发展及应用. 统计与信息论坛, 2019, 34(8): 34-41.
[29] 王媛媛, 秦刚, 汪徐林, 张建, 何书, 沈毅. GetData Graph Digitizer 软件在生存分析中的应用. 中国卫生统计, 2016, 33(2): 339, 342.
[30] 梅方权, 吴宪章, 姚长溪, 李路平, 王磊, 陈秋云. 中国水稻种植区划. 中国水稻科学, 1988, 2(3): 97-110.
[31] Glass G V. Primary, secondary, and meta-analysis of research. Educational Researcher, 1976, 5(10): 3-8.
[32] Nelson J P, Kennedy P E. The use (and abuse) of meta-analysis in environmental and natural resource economics: an assessment. Environmental and Resource Economics, 2009, 42(3): 345-377.
[33] 应瑞瑶, 潘丹. 中国农业全要素生产率测算结果的差异性研究——基于 Meta 回归分析方法. 农业技术经济, 2012(3): 47-55.
[34] 肖霞, 伍兴国. 线性回归中多重共线性的几何解释. 统计与决策, 2021, 37(21): 46-51.
[35] 李卫兵, 张凯霞. 空气污染对企业生产率的影响——来自中国工业企业的证据. 管理世界, 2019, 35(10): 95-112, 119.
[36] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2007.
[37] van Vuuren D P, Isaac M, Kundzewicz Z W, Arnell N, Barker T, Criqui P, Berkhout F, Hilderink H, Hinkel J, Hof A, Kitous A, Kram T, Mechler R, Scrieciu S. The use of scenarios as the basis for combined assessment of climate change mitigation and adaptation. Global Environmental Change, 2011, 21(2): 575-591.
[38] IPCC. Special report on emissions scenarios: a special report of working group III of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
[39] Rosentrater L D. Representing and using scenarios for responding to climate change. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2010, 1(2): 253-259.
[40] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, Manning M R, Rose S K, van Vuuren D P, Carter T R, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl G A, Mitchell J F B, Nakicenovic N, Riahi K, Smith S J, Stouffer R J, Thomson A M, Weyant J P, Wilbanks T J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, 2010, 463(7282): 747-756.
[41] 曹丽格, 方玉, 姜彤, 罗勇. IPCC 影响评估中的社会经济新情景(SSPs)进展. 气候变化研究进展, 2012, 8(1): 74-78.
[42] 梁玉莲, 延晓冬. RCPs 情景下中国 21 世纪气候变化预估及不确定性分析. 热带气象学报, 2016, 32(2): 183-192.
[43] 刘燕华, 李宇航, 王文涛. 中国实现"双碳"目标的挑战、机遇与行动. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 1-5.
[44] Eyring V, Cox P M, Flato G M, Gleckler P J, Abramowitz G, Caldwell P, Collins W D, Gier B K, Hall A D, Hoffman F M, Hurtt G C, Jahn A, Jones C D, Klein S A, Krasting J P, Kwiatkowski L, Lorenz R, Maloney E, Meehl G A, Pendergrass A G, Pincus R, Ruane A C, Russell J L, Sanderson B M, Santer B D, Sherwood S C, Simpson I R, Stouffer R J, Williamson M S. Taking climate model evaluation to the next level. Nature Climate Change, 2019, 9(2): 102-110.
[45] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(4): 485-498.

[46] 张艳武, 张莉, 徐影. CMIP5 模式对中国地区气温模拟能力评估与预估. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 10-19.
[47] 陈晓晨, 徐影, 许崇海, 姚遥. CMIP5 全球气候模式对中国地区降水模拟能力的评估. 气候变化研究进展, 2014, 10(3): 217-225.
[48] Zhang L, Xu Y L, Meng C C, Li X H, Liu H, Wang C G. Comparison of statistical and dynamic downscaling techniques in generating high-resolution temperatures in China from CMIP5 GCMs. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2020, 59(2): 207-235.
[49] Marengo J A, Jones R, Alves L M, Valverde M C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. International Journal of Climatology, 2009, 29(15): 2241-2255.
[50] 杨敏慎, 刘晓雨, 郭辉. 气候变暖和 CO_2浓度升高对农作物的影响. 江苏农业学报, 2021, 37(1): 246-258.
[51] Kimball B A, Kobayashi K, Bindi M. Responses of agricultural crops to free-air CO_2 enrichment. Advances in Agronomy, 2002, 77: 293-368.
[52] Kirschbaum M U F. Does enhanced photosynthesis enhance growth? Lessons learned from CO_2 enrichment studies. Plant Physiology, 2011, 155(1): 117-124.
[53] Drake B G, Gonzalez-Meler M A, Long S P. MORE EFFICIENT PLANTS: a consequence of rising atmospheric CO_2? Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1997, 48: 609-639.
[54] Long S P, Ainsworth E A, Rogers A, Ort D R. Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the future. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55: 591-628.
[55] 邵在胜, 赵铁鹏, 宋琪玲, 贾一磊, 王云霞, 杨连新, 王余龙. 大气 CO_2和 O_3浓度升高对水稻'汕优 63'叶片光合作用的影响. 中国生态农业学报, 2014, 22(4): 422-429.
[56] Long S P, Zhu X G, Naidu S L, Ort D R. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? Plant, Cell & Environment, 2006, 29(3): 315-330.
[57] 房世波, 沈斌, 谭凯炎, 高西宁. 大气[CO_2]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, 18(5): 1116-1124.
[58] 万素琴, 刘志雄, 刘敏, 帅细强, 向华, 邓爱娟. 未来气候变化对华中地区中稻产量影响的模拟. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2788-2796.
[59] Xu C C, Wu W X, Ge Q S. Impact assessment of climate change on rice yields using the ORYZA model in the Sichuan Basin, China. International Journal of Climatology, 2018, 38(7): 2922-2939.
[60] Zhang J T, Feng L P, Zou H P, Liu D L. Using ORYZA2000 to model cold rice yield response to climate change in the Heilongjiang Province, China. The Crop Journal, 2015, 3(4): 317-327.
[61] Hussain S, Huang J, Huang J, Ahmad S, Nanda S, Anwar S, Shakoor A, Zhu C Q, Zhu L F, Cao X C, Jin Q Y, Zhang J H. Rice production under climate change: adaptations and mitigating strategies. Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth. Cham: Springer, 2020: 659-686.
[62] 周娟, 舒小伟, 赖上坤, 许高平, 黄建晔, 姚友礼, 杨连新, 董桂春, 王余龙. 不同类型水稻品种产量和氮素吸收利用对大气 CO_2浓度升高响应的差异. 中国水稻科学, 2020, 34(6): 561-573.
[63] 周景博, 刘亮. 未来气候变化对中国小麦产量影响的差异性研究——基于 Meta 回归分析的定量综述. 中国农业气象, 2018, 39(3): 141-151.
[64] 叶廷红, 李鹏飞, 侯文峰, 邢烈火, 吴海亚, 张建设, 李小坤. 早稻、晚稻和中稻干物质积累及氮素吸收利用的差异. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 212-222.
[65] 孔祥智, 何欣玮. 粮食安全背景下早稻生产的战略价值与发展路径. 农村经济, 2022(10): 37-46.
[66] Xu X P, He P, Pampolino M F, Qiu S J, Zhao S C, Zhou W. Spatial variation of yield response and fertilizer requirements on regional scale for irrigated rice in China. Scientific Reports, 2019, 9(1): 3589.
[67] 汤勇华, 黄耀. 中国大陆主要粮食作物地力贡献率和基础产量的空间分布特征. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 1070-1078.
[68] 赵彦茜, 肖登攀, 唐建昭, 柏会子. 气候变化对我国主要粮食作物产量的影响及适应措施. 水土保持研究, 2019, 26(6): 317-326.
[69] 张强, 张戈丽, 朱道林, 邸媛媛, 杨彤, 刘若琪, 董金玮. 1980—2018 年中国水稻生产变化的时空格局. 资源科学, 2022, 44(4): 687-700.
[70] 熊伟, 杨婕, 吴文斌, 黄丹丹, 曹阳. 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性. 生态学报, 2013, 33(2): 509-518.
[71] Abbas S, Ali Mayo Z. Impact of temperature and rainfall on rice production in Punjab, Pakistan. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23(2): 1706-1728.
[72] Pickson R B, He G, Boateng E. Impacts of climate change on rice production: evidence from 30 Chinese Provinces. Environment, Development and Sustainability, 2022, 24(3): 3907-3925.
[73] 姚凤梅, 许吟隆, 冯强, 林而达, 延晓冬. CERES-Rice 模型在中国主要水稻生态区的模拟及其检验. 作物学报, 2005, 31(5): 545-550.
[74] Yuan S, Peng S B, Li T. Evaluation and application of the ORYZA rice model under different crop managements with high-yielding rice cultivars in central China. Field Crops Research, 2017, 212: 115-125.
[75] Zhou G P, Gao S J, Lu Y H, Liao Y L, Nie J, Cao W D. Co-incorporation of green manure and rice straw improves rice production, soil chemical, biochemical and microbiological properties in a typical paddy field in Southern China. Soil and Tillage Research, 2020, 197: 104499.
[76] 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.
[77] 周桐宇, 江敏, 孙汪亮, 孙彬. RCPs 情景下福建省水稻生产的适应性调整模拟研究. 中国水稻科学, 2018, 32(3): 265-276.
[78] Guo Y H, Wu W X, Du M Z, Bryant C R, Li Y, Wang Y Y, Huang H. Assessing potential climate change impacts and adaptive measures on rice yields: the case of Zhejiang Province in China. Sustainability, 2019, 11(8): 2372.
[79] 虞国平, 徐春春, 邬亚文, 修晓杰, 童汉华. 我国水稻产业供给侧结构性改革的思考. 中国农业资源与区划, 2020, 41(3): 53-62.