

DOI: 10.20103/j.stxb.202410292636

苏询,梁钰茹,华而实,陈敏鹏.评估东北水稻种植分布迁移适应气候变化的增产效果.生态学报,2025,45(13): - .

Su X, Liang Y R, Hua E S, Chen M P. Evaluating the yield-increasing effect of the migration of rice cultivation distribution in the northeast in adapting to climate change. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): - .

评估东北水稻种植分布迁移适应气候变化的增产效果

苏 询, 梁钰茹, 华而实, 陈敏鹏*

中国人民大学农业与农村发展学院, 北京 100872

摘要: 理解粮食生产适应气候变化的机制, 并评估其效果是提高农业适应能力的关键。作物迁移是一种重要的农业适应气候变化策略, 但是已有研究尚未对其适应效果开展充分评估。以东北地区为例, 采用随机森林模型研究了 1985—2015 年该区域水稻种植分布迁移的驱动因素, 并量化了水稻种植分布迁移适应气候变化的增产效果。研究发现: 首先, 1985—2015 年气候变化促使东北地区水稻种植的重心向东北方向迁移了约 106 km。其中, 积温增加是影响东北地区水稻布局变迁最关键的气候因素, 使得水稻种植重心向东北方向的迁移了约 83 km, 并推动了该地区水稻种植面积扩张了 68 万 hm^2 , 这一增量占该时期内扩张总面积的 37%; 然而, 降水量的变化对东北水稻种植分布迁移的影响较小。其次, 东北水稻种植区域北移有效缓解了水稻生长期的高温胁迫, 对提升东北水稻单产产生了积极影响。进一步量化分析发现, 若不考虑水稻种植分布的迁移, 气候变化仅能带来 273 万 t 的水稻产量增益。然而, 同时考虑气候变化对水稻单产以及种植分布的影响时, 其对于东北水稻总产量的提升效果则显得尤为显著, 增产总量达到了约 843 万 t, 占据了实际增产总量的 31%。这一发现凸显了作物种植分布迁移在适应气候变化对粮食生产风险中的关键作用。为了充分发挥水稻种植分布迁移的积极效应, 应着重于选育具有更强耐寒性的水稻品种, 提升农业机械化水平, 构建全面且有效的农业支持政策体系与灌溉基础设施, 并同步提升产量与环境的协同效应。本研究成果为深理解农业适应气候变化的机制、优化中国水稻生产布局以及提升农业的气候适应能力提供了坚实的科学依据。

关键词: 气候变化; 适应; 作物迁移; 水稻; 种植分布

Evaluating the yield-increasing effect of the migration of rice cultivation distribution in the northeast in adapting to climate change

SU Xun, LIANG Yuru, HUA Ershi, CHEN Minpeng*

School of Agricultural Economics and Rural Development, Renmin University of China, Beijing 100872, China

Abstract: Understanding agricultural adaptive mechanisms to climate change and evaluating adaptation efficacy are critical for improving agricultural climate resilience. Crop migration is an important agricultural adaptation strategy, yet existing research has not adequately assessed its adaptive effectiveness. Using Northeast China as a case study, we apply the Random Forest algorithm to analyze drivers behind the migration of rice cultivation distribution in this region from 1985 to 2015, and quantify its adaptation benefits. The results show that: Firstly, climate change from 1985 to 2015 prompted a northeastward shift of ~ 106 km in rice cultivation's centroid within Northeast China. Among them, the increase in accumulated temperature is the most critical climatic factor influencing the changes in rice cultivation distribution in the Northeast region. It has contributed to the migration of the center of gravity of rice cultivation towards the northeast by approximately 83 kilometers and promoted an expansion of rice cultivation area in the region by 680,000 hectares, accounting for 37% of the total expansion during this period. However, changes in precipitation have no significant effect on the shift of the rice cultivation distribution. Secondly, the northward shift of rice cultivation areas in the Northeast has effectively alleviated high temperature stress during the rice growing period, positively influencing rice yield enhancement across the region. Further

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF0805900-04)

收稿日期: 2024-10-29; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: minpeng.chen@ruc.edu.cn

quantitative analysis reveals that if the migration of rice cultivation distribution is ignored, climate change alone would increase rice production by 2.73 million tons. However, when considering both the increase in yield and changes in cultivation distribution comprehensively, the effect of climate change on enhancing the total rice production in the Northeast becomes more prominent, with an increase of approximately 8.43 million tons, accounting for 31% of the total actual increase in production. This finding highlights the crucial role of the migration of crop cultivation distribution in adapting to the risks posed by climate change on food production. To fully leverage the positive effects of the migration of rice cultivation distribution, emphasis should be placed on selecting and breeding rice varieties with stronger cold tolerance, improving the level of agricultural mechanization, developing integrated agricultural policy frameworks and irrigation infrastructure, and simultaneously enhancing the synergistic effect between yield and the environment. The research findings of this study provide a solid scientific basis for deepening the understanding of mechanisms for agriculture to adapt to climate change, optimizing the layout of rice production in China, and enhancing agricultural adaptability to climate change.

Key Words: climate change; adaptation; crop migration; rice; cropping distribution

粮食安全是国家经济发展和社会稳定的基石^[1]。水稻是中国主要的粮食作物之一,支撑了超过 65% 的人口的口粮需求,其产量增长对保障中国的粮食安全至关重要^[2]。然而,气候变化已经成为影响全球粮食生产的主要风险因素之一^[3]。气温上升、降水模式变化以及极端天气事件频发,对中国的水稻生产构成了严峻挑战^[4]。若不采取有效的适应措施,预计到 21 世纪中叶,气候变化将导致中国的水稻减产 10%—19%,并且其负面影响在长期内将持续加剧^[5]。因此,中国的水稻生产如何有效地适应气候变化,减少其不利影响和风险,已成为中国粮食安全战略中的重要问题^[6-7]。

理解粮食生产适应气候变化的机制,并评估其效果是提高农业适应能力的关键^[8]。现有文献已对灌溉设施建设^[9]、播种日期调整^[10-11]、作物品种更替^[12-13]、种植多样化^[14]以及土壤管理^[15-16]等适应措施的效果进行了量化分析。这些措施都是原位适应策略,强调在现有粮食生产区域内,通过优化农田管理措施或选择更具抗逆性的作物品种,来降低作物单产对气候的敏感性^[17]。与原位适应不同,作物迁移适应是指农民根据当地气候变化趋势,主动将作物种植区域迁移至气候条件更为适宜的新区域^[18]。作物迁移适应可以有效地利用热量资源的变化,促进农业种植区域的扩展^[19]。然而,当前的研究主要集中于原位适应措施上,对于作物迁移适应的分析显得相对不足^[20]。

过去数十年间,中国东北地区水稻种植分布已经明显的北移东扩^[21]。东北水稻迁移是对气候变暖的自适应,不仅推动了种植北界北移,还减缓了水稻生长季内极端高温持续上升的趋势,保障了水稻生长期间的适宜温度环境^[22-23]。水稻品种的改良在推动水稻种植分布北移的进程中发挥了重要的作用。比如,龙粳、吉粳、辽粳等一批耐寒水稻新品种在东北推广,显著提升了东北地区的水稻产量及其稳定性^[24]。从 1980 年以来,黑龙江地区水稻主栽品种生长所需的积温呈明显的下降趋势,这说明高纬度地区水稻的耐寒性在不断增强^[25]。同时,早育稀植技术的普及使得东北水稻的成熟期提前,有效降低水稻遭遇冷害侵袭的概率^[26]。这一系列适应举措使得一些热量条件有限的高纬度地区能够稳定种植水稻,从而推动了水稻种植区域的北扩。

为了充分利用东北水稻迁移适应所带来的增产潜力,需要深入探讨其驱动机制和实际效果。因此,本文分析了 1985—2015 年间东北水稻迁移适应的驱动机制及其对产量的影响,以期为优化中国水稻生产布局和提高农业的气候适应能力提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

东北地区包括黑龙江、吉林、辽宁三省(图 1)。耕地面积约为 2500 万 hm^2 ,占全国总耕地面积的五分之一^[27]。该地区的土壤以黑土为主,含有较高的有机质,土层深厚,规模化生产水平高,是世界上最大的优质粳稻种植区,由于热量条件的限制,其农作物种植制度多为一年一熟^[28]。

1.2 分析框架

气温是影响作物单产最重要的气候因子,其影响具有明显的区域性差异^[29]。在高纬度地区,适度的气温上升和蒸腾作用的增强有利于提高作物单产;而在低纬度地区,高温胁迫会导致作物减产^[30]。这种影响的区域差异性,会促使农民根据当地的气温条件的变化,对作物的种植面积进行相应地调整,进而表现为作物种植分布在不同区域间的迁移现象^[31]。本文将气候因素分别纳入水稻单产和种植面积的生产函数,综合分析气候变化对东北地区水稻总产量的影响。研究过程如下(图2):首先,本文构建了水稻种植面积的生产函数模型,并借助随机森林算法,量化了气候因素对水稻种植面积变化的贡献程度;其次,采用空间重心统计模型,分析了气候变化驱动水稻种植面积重心的变化;最后,运用非线性面板数据模型,计算了气候变化对东北地区水稻单产的影响,并结合种植面积的变化,评估了气候变化对水稻总产量的影响。

1.3 研究方法

1.3.1 水稻种植面积对气候变化的适应模型

本文采用随机森林模型来模拟水稻种植面积的生产函数。首先,本文对随机森林模型的模型拟合精度进行评价,本文采用决定系数 R^2 作为随机森林模型拟合能力的评价指标, R^2 是拟合值与观测值的拟合程度,越接近于 1,表明模型的拟合精度越高;本文再利用随机森林模型计算各驱动因素对东北地区水稻种植面积的影响程度。在此基础上,将除气候因素以外的所有变量均固定在初始时期水平,并借助随机模型模型对水稻的种植面积进行预测,从而分离出气候变化对水稻种植分布的影响。

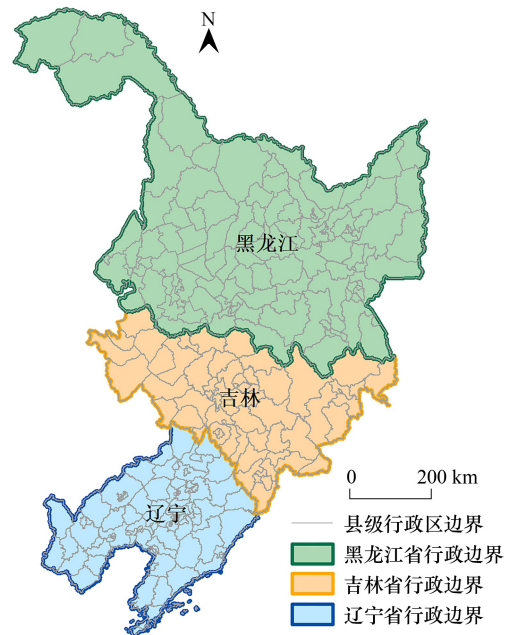


图1 研究区域图

Fig.1 Study region

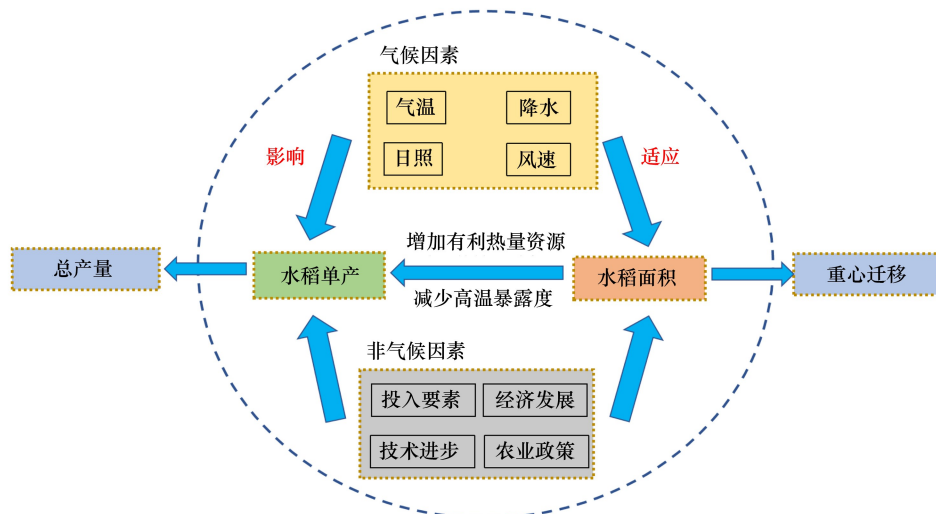


图2 分析框架

Fig.2 The analysis framework

随机森林模型的优势主要体现在以下两个方面:一方面,已有研究通常采用线性回归模型,来分析气候因素或者社会经济因素对作物种植面积的影响^[32-33]。然而,当面对多重共线性问题时,多元线性回归模型难以

精确区分各因素对种植面积的影响程度。相比之下,随机森林模型通过参数正则化、变量筛选和特征重要性分析等技术,能够有效地比较不同因素对作物种植面积影响程度的差异^[34]。另一方面,现有研究在分析气候变化对作物种植面积的影响时,往往基于变量间线性关系的假设^[35]。然而,相关研究已明确指出,气候因素与作物种植面积之间存在着非线性关系^[35]。随机森林模型不依赖于预设的变量间函数关系,而是基于训练集数据拟合变量间的复杂关系。这种高度的灵活性赋予了随机森林模型更精确的拟合能力。本文借鉴现有文献的变量设定^[36],构建随机森林模型设定如下:

$$A_{it} = f(\text{Climate}_{it}, \text{Input}_{it}, \text{Econ}_{it}, \text{Policy}_{it}, \text{trend}_{it}, \text{Geo}_i) \quad (1)$$

式中, i 表示县, t 表示年份, A_{it} 表示水稻播种面积。自变量说明见表1。随机森林决策树个数和特征数量设定过程参考文献^[31]。

表1 变量说明

Table 1 Variable Description

变量类别 Variable type	变量名称 Variable name	变量说明 Description of variable
气候因素 Climate	积温	前30年水稻生长季日均气温超过10℃之和 ^[36]
	降水量	前30年水稻生长季降水量总量
	日照时数	前30年水稻生长季日照总量
	平均风速	前30年水稻生长季平均逐日风速
农业投入 Input	农业劳动力	单位面积人数
	农业机械总动力	单位面积机械动力
	有效灌溉面积比例	有效灌溉面积/耕地面积
	土地投入	耕地面积
	种子投入	单位面积费用
	化肥投入	单位面积费用
	农药投入	单位面积费用
经济发展 Econ	城市化率	城市人口/总人口 ^[36]
	夜间灯光	夜间灯光平均强度
农业政策 Policy	流通体制改革	虚拟变量 $D=1$ 1990—2003年 ^[23]
	水稻最低收购政策和生产补贴政策	虚拟变量 $D=1$ 2004—2015年 ^[37]
技术进步 trend	水稻单产	前一年的水稻单产
地理特征 Geo	地形	高程和海拔
	土壤质量	土壤有机碳、含沙量和黏土含量

为了分离非气候因素的影响,考察1985—2015年气候变化对东北水稻种植面积的贡献程度,本文构造了反事实情景。在此情景下,将非气候因素分别保持在研究时段的初期(1985—1989年的平均值),而气候因素设定为每年的实际观测值。反事实情景预测的水稻种植面积即为气候因素对水稻种植面积的影响值。为了评估样本在研究期末的变化,本文对研究时段的后5年气候变量进行了平均,以消除某些年份波动的干扰。具体公式如下:

$$A_{i2015}^a = f(\text{Climate}_{i2015}, \text{Input}_{i1985}, \text{Econ}_{i1985}, \text{Policy}_{i1985}, \text{trend}_{i1985}, \text{Geo}_i) \quad (2)$$

式中, A_{i2015}^a 表示1985—2015年由气候变化驱动的水稻种植面积变化(以1985年为基期)。 Climate_{i2015} 表示2011—2015年的气候变量的平均值; Input_{i1985} , Econ_{i1985} , Policy_{i1985} , trend_{i1985} 分别表示1985—1989年农业投入要素、社会经济变量、农业政策和技术进步的平均值; Geo_i 表示地理特征。自变量的说明同表1。

1.3.2 空间重心模型

本文利用空间重心统计模型,分析气候变化驱动的东北水稻种植面积的空间重心变化,计算公式如下:

$$X_{2015} = \sum X_i A_{i2015}^a / \sum A_{i2015}^a \quad (3)$$

$$Y_{2015} = \sum Y_i A_{i2015}^a / \sum A_{i2015}^a \quad (4)$$

式中, X_{2015} 和 Y_{2015} 为2015年由气候变化驱动的水稻种植面积重心的经度值和纬度值; X_i 和 Y_i 分别为第*i*个县的经度和纬度。

1.3.3 作物迁移对气候暴露度的影响

本文参照文献^[19]的方法,利用线性回归模型分析东北地区水稻种植区域迁移对水稻生长季的气候暴露度的影响。回归分析以东北地区各县的水稻种植面积作为权重(Weight)。水稻种植面积较大的县在回归分析中被赋予更高的权重,能够反映出东北地区水稻种植区域整体所经历的气候暴露度变化趋势^[17]。本文考虑了两种权重情景,第一种情景假定 2015 年水稻种植分布的变化是由气候变化所驱动的,表征对气候变化的自适应。

$$\text{Climate}_{it} = a + bt \quad (\text{Weight} = A_{i2015}^a) \quad (5)$$

第二种情景假定水稻种植分布维持在 1985 年不变(反事实情景):

$$\text{Climate}_{it} = a + bt \quad (\text{Weight} = A_{i1985}^a) \quad (6)$$

式中,Climate_{it}表示东北地区水稻经历的气候暴露度(冷害积温<0℃、有效积温 10—29℃、热害积温>29℃以及降水量);*t*表示年份;*a*是常数项;*b*是气候暴露度随时间变化的趋势。

1.3.4 气候变化对作物单产的影响模型

计量经济学模型是评估气候变化对作物单产影响的主流方法。国内学者已运用非线性面板数据模型,测算了气候变化对中国水稻单产的影响^[38—39]。本文借鉴文献^[39]所构建的面板数据模型,测算气候变化对东北各县水稻单产的影响。具体公式如下:

$$\Delta y = \hat{\beta}(Z_{2015} - Z_{1985}) \quad (7)$$

式中,Δ*y*表示从 1985—2015 年气候变化导致的东北水稻单产的变化量(以 1985 年为基期)。Z₂₀₁₅表示 2015 年的天气变量,包括积温、降水量和日照时数;Z₁₉₈₅表示 1985 年的天气变量,包括积温、降水量和日照时数; $\hat{\beta}$ 表示文献^[39]中表 4 方程 2 所估计的气候变量系数。

1.3.5 气候变化对东北水稻总产量的影响

气候变化对水稻总产量的影响取决于单产和种植面积的影响,计算公式如下:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n \Delta y_i \Delta A_{i1985} + \Delta A_i \Delta y_{i1985} \quad (8)$$

式中,*i*表示县;Δ*Y*表示从 1985—2015 年气候变化对东北水稻总产量的影响(以 1985 年为基期);A_{i1985}和 y_{i1985}分别表示 1985 年东北各县的水稻种植面积和水稻单产;Δ y_i表示从 1985—2015 年气候变化对东北水稻单产的影响;Δ A_i表示从 1985—2015 年气候变化对水稻种植面积的影响。本文考虑了三种情景:第一种情景 S1 仅考虑气候变化对水稻单产的影响(Δ A_i=0);第二种情景 S2 仅考虑气候变化对水稻种植面积的影响(Δ y_i=0);第三种情景 S3 综合考虑了气候变化对水稻单产和种植面积的影响。

1.4 数据来源及处理

本研究所使用的数据包括水稻生产数据、农业投入数据、城市化数据、气象数据以及地理特征数据。水稻生产数据(水稻种植面积和水稻总产量)、农业投入数据(劳动力投入、农业机械总动力、有效灌溉面积和耕地面积)和城市化数据(总人口和城市人口)来自于中国农业科学院县级农作物统计数据库;水稻种子、化肥及农药投入费用来自于《全国农产品成本收益资料汇编》;夜间灯光栅格数据来自于国家青藏高原数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>),利用 ArcGIS 软件将栅格数据分区汇总到县域;气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括日值最低气温、最高气温、平均气温、降水量、日照时数和平均风速,借鉴已有文献的处理方法^[38],使用逆距离加权方法匹配到县,并计水稻生育期积温、平均降水量、日照时数和平均风速;土壤质量数据(土壤有机碳、含沙量和黏土含量)来自于国家青藏高原数据中心^[40];高程和坡度数据来自于 NASA(<https://www.nasa.gov>);水稻生育期数据来自于国家生态科学数据中心^[41]。

2 研究结果

2.1 东北水稻种植分布变化的驱动因素分析

本文随机将 80%的数据集作为随机森林模型的训练集,剩余的 20%作为测试集,以评估模型的拟合能

种植分布重心迁移轨迹。从 1985 年到 2015 年,东北水稻种植分布向东北方向迁移了 222.18km;由气候变化驱动的种植重心达到了 106.40km。其中,积温是影响东北地区水稻布局变迁最关键的气候因素,使得水稻种植重心向东北方向的迁移了 82.62km(图 5)。

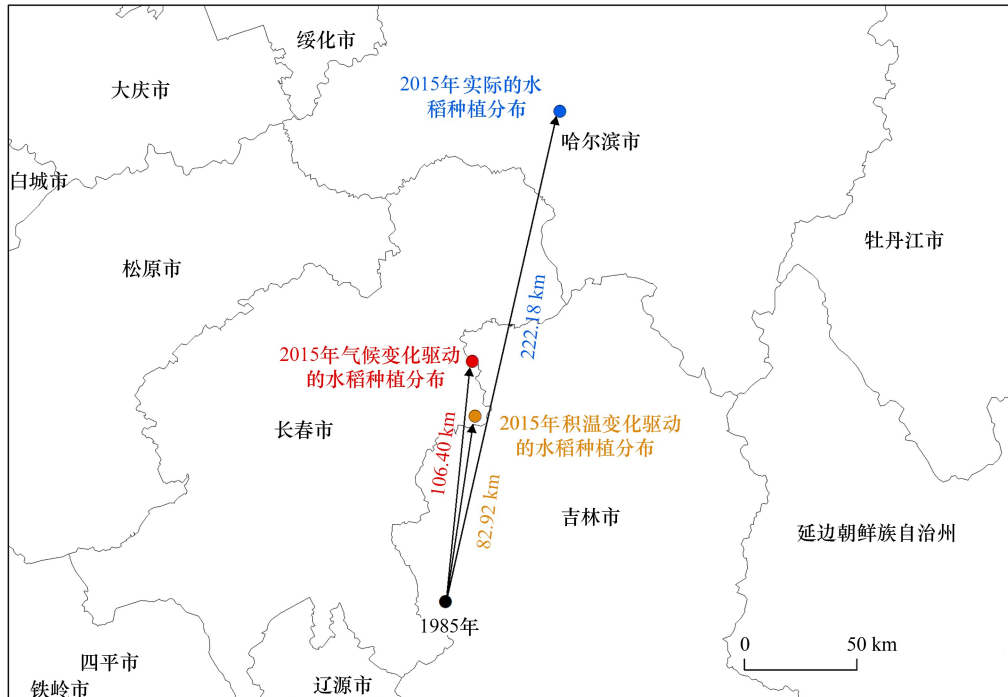


图 5 东北水稻种植重心的迁移

Fig.5 Migration of rice area centroid

2.3 东北水稻迁移对气候暴露度的影响

从 1985—2015 年,气候变化驱动的东北水稻种植分布的迁移有效缓解了热害积温($>35^{\circ}\text{C}$)的暴露度上升的趋势(图 6)。由于热害积温作为制约水稻单产增长最重要的气候因子,水稻的迁移可以在一定程度上降低气候变化对水稻单产的负面影响。同时,这种迁移还伴随着有效积温暴露度($10\text{—}29^{\circ}\text{C}$)的轻微下降以及冷害积温暴露度($<0^{\circ}\text{C}$)的增加。自 1980 年以来,黑龙江省推广的耐寒品种已降低水稻种植所需的活动积温,在一定程度上促进了水稻北扩^[48]。由于东北北部的降水量相对较少,水稻的北移也使得东北水稻生长季降水量的暴露度呈现出下降的趋势(图 6)。

2.4 气候变化对东北水稻总产量的影响

1985—2015 年气候变化有利于东北水稻单产增加,并且这种正面效应在纬度更高的地区表现得更为显著(图 7)。这是由于气温的上升减轻了热量不足对东北地区水稻生长发育的制约,适度的温度提升有益于水稻的物质积累与产量形成^[46]。1985—2015 年气候变化使得东北水稻单产平均增加 6.2%,如果不考虑种植面积的变化,单产的增益能增加 273 万 t 的水稻产量。1985—2015 年气候变化使得东北水稻种植面积扩张了约 68 万 hm^2 ,因此综合考虑气候变化对单产和种植面积的影响后,气候变化对东北水稻总产量的提升效果更为显著,增长达到了约 843 万 t,占实际增量的 31%(图 8)。

3 讨论

本研究发现,积温是推动东北地区水稻布局变迁最重要的气候因素。从 1970—2009 年,东北水稻生长季的有效积温($>10^{\circ}\text{C}$)平均增加了 177°C ^[47]。东北水稻冷害发生的频率呈现显著减少的趋势^[48]。显著的升温改善了东北地区的热量资源,减轻了热量不足对水稻生长的制约,扩大了水稻适宜种植的面积。从 1970—

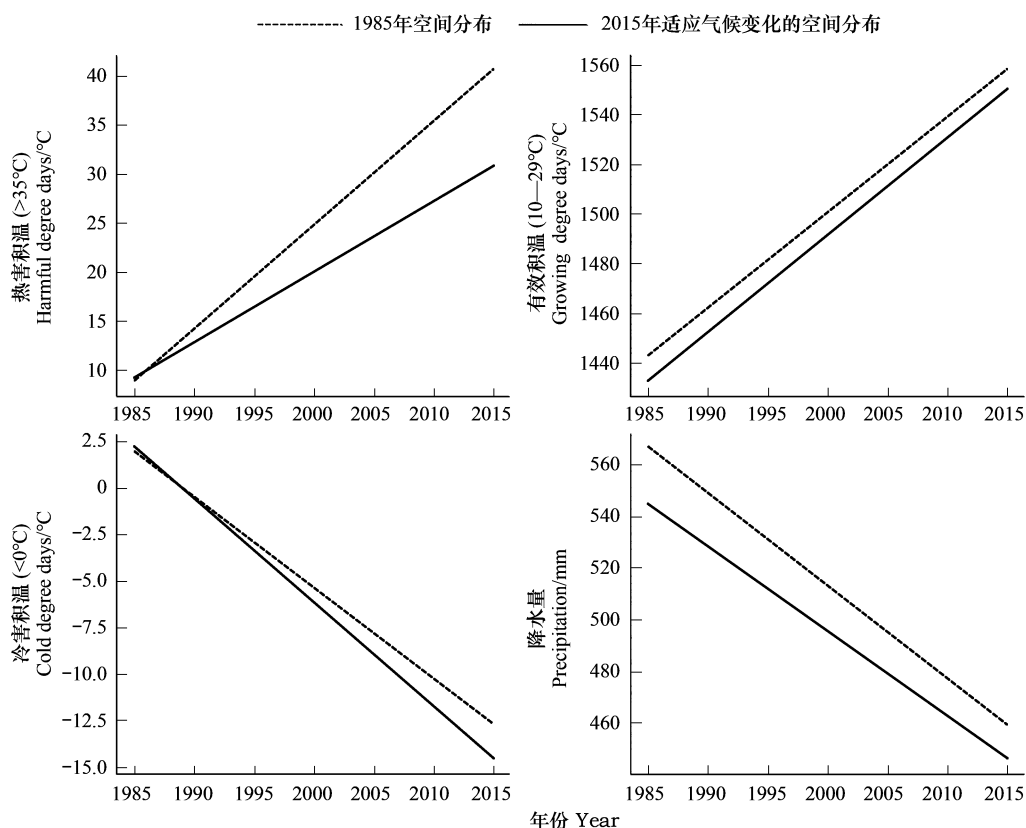


图6 水稻迁移对气候暴露度的影响

Fig.6 The impact of rice migration on climate exposure

2010 年黑龙江省的水稻种植面积扩大了 24 倍^[47]。水稻种植北界已经扩张到 52°N 的呼玛地区^[49]。本研究发现,积温增加推动了东北水稻种植重心向东北方向移动了近 83km(图 5)。这与东北水稻生长季有效积温带北移的幅度和方向相一致^[50]。这表明了东北水稻生产在种植区域上正在逐步适应气候变暖的趋势。

以往研究发现,气候变化将缩短水稻生育期并引发高温热害,导致水稻大幅度减产^[38]。然而,本研究发现,气候变暖已经使得东北地区水稻平均单产增加 6.2%(图 7)。这是由于气温的上升减轻了低温对东北地区水稻生长发育的制约,进而延长了水稻的生长季^[21]。为了充分利用气候变暖带来的增产潜力,东北地区的水稻生产采取了延长新品种的生育期、调整播种日期以及实施种植分布北扩等适应措施^[51]。本研究量化了种植分布北扩对水稻增产的贡献,结果显示,这一措施带来的增量高达约 843 万 t,占实际增产总量的 31%(图 8)。此外,若综合考虑 CO₂ 浓度升高对水稻的增产效应,在未来气候变化情景下,东北地区的水稻产量有望进一步增加,展现出巨大的增产潜力。

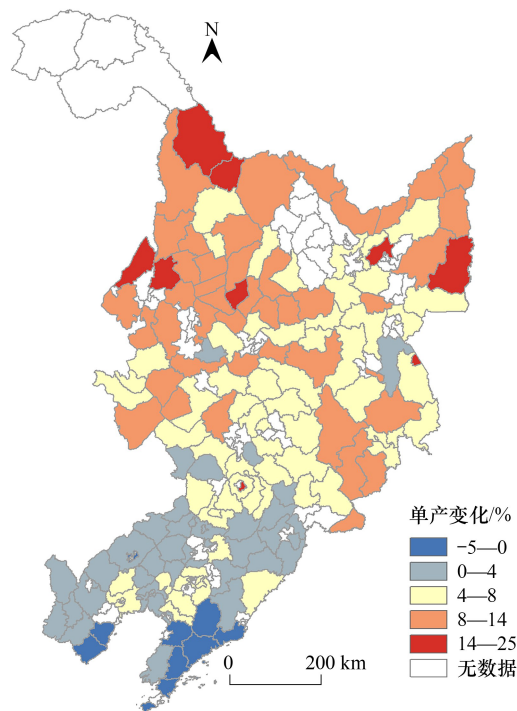


图7 1985—2015 年气候变化对东北水稻单产的影响

Fig.7 The impact of climate change on rice yields in Northeast China

本文的研究结论对评估气候变化影响的方法论具有重要的启示。以往评估气候变化对粮食生产影响的研究通常假定作物种植分布保持不变^[52]。这一假定与微观尺度数据揭示的全球粮食作物种植重心发生明显迁移的现象相违背^[17]。作物迁移是农民对气候变化的一种自适应机制。本研究发现,不考虑水稻种植分布对气候变暖的适应,将会低估约 600 多万 t 气候变暖对东北水稻增产的收益(图 8)。作物种植分布的迁移会减缓极端高温暴露度上升的趋势(图 6)。因此,若实证模型未将作物迁移纳入考量,将会导致评估气候变化对作物产量的影响产生偏差。

4 结论

本文采用随机森林模型研究了 1985—2015 年间东北水稻种植区域的迁移现象,并量化了其对气候变化的适应效果。本文发现,从 1985 年至 2015 年间,气候变化驱动东北地区水稻种植区域向东北方向迁移约 106km。其中,积温是影响东北地区水稻布局变迁最关键的气候因素,使得水稻种植重心向东北方向的迁移了 83km。东北水稻迁移有效减轻了水稻生长期间的高温胁迫风险。1985—2015 年气候变化使得东北水稻单产平均增加 6.2%。当综合考虑单产提升与种植分布变化后,气候变化对东北水稻总产量的正面效应更为显著,增量高达约 843 万 t,占实际增量的 31%。

参考文献(References):

- [1] 钟钰,巴雪真,陈萌山. 新时代国家粮食安全的理论构建与治理进路. 中国农村经济, 2024(2): 2-19.
- [2] Huang M, Hu L Q. Low glycemic index: The next target for rice production in China? Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(6): 1727-1729.
- [3] Hasegawa T, Sakurai G, Fujimori S, Takahashi K, Hijioka Y, Masui T. Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs. Nature Food, 2021, 2(8): 587-595.
- [4] 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.
- [5] Chen X G, Chen S. China feels the heat: negative impacts of high temperatures on China's rice sector. Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, 2018, 62(4): 576-588.
- [6] 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.
- [7] 陈敏鹏,苏询. 趋利避害: 农业面临的气候变化影响及适应举措. 可持续发展经济导刊, 2023(1): 66-70.
- [8] 刘东,冯晓龙,司伟. 中国粮食生产的气候变化适应水平及其机制研究. 经济学: 季刊, 2024, 24(5): 1516-1532.
- [9] Wang D, Zhang P, Chen S, Zhang N. Adaptation to temperature extremes in Chinese agriculture, 1981 to 2010. Journal of Development Economics, 2024, 166: 103196.
- [10] Cui X M, Xie W. Adapting agriculture to climate change through growing season adjustments: evidence from corn in China. American Journal of Agricultural Economics, 2022, 104(1): 249-272.
- [11] Minoli S, Jägermeyr J, Asseng S, Urfels A, Müller C. Global crop yields can be lifted by timely adaptation of growing periods to climate change. Nature Communications, 2022, 13(1): 7079.
- [12] Moscona J, Sastry K A. Does directed innovation mitigate climate damage? evidence from U.S. agriculture. The Quarterly Journal of Economics, 2023, 138(2): 637-701.
- [13] Zhang L L, Zhang Z, Tao F L, Luo Y C, Zhang J, Cao J. Adapting to climate change precisely through cultivars renewal for rice production across China: When, where, and what cultivars will be required? Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 316: 108856.
- [14] 陈有华,曾梦晴,陈彬. 气候变化对粮食生产韧性的影响——基于作物多样化的调节效应研究. 生态学报, 2024, 44(16): 6937-6951.
- [15] Deng X, Huang Y, Yuan W P, Zhang W, Ciais P, Dong W J, Smith P, Qin Z C. Building soil to reduce climate change impacts on global crop yield. Science of the Total Environment, 2023, 903: 166711.
- [16] Qiao L, Wang X H, Smith P, Fan J L, Lu Y L, Emmett B, Li R, Dorling S, Chen H Q, Liu S G, Benton T G, Wang Y J, Ma Y Q, Jiang R F,

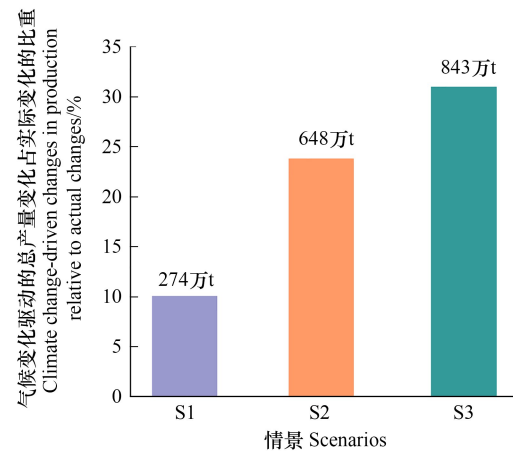


图 8 1985—2015 年气候变化对东北水稻总产量的影响

Fig.8 The impact of climate change on rice production in Northeast China from 1985 to 2015

S1: 单产影响; S2: 面积影响; S3: 单产+面积影响

- Zhang F S, Piao S L, Müller C, Yang H Q, Hao Y N, Li W M, Fan M S. Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change. *Nature Climate Change*, 2022, 12: 574-580.
- [17] Sloat L L, Davis S J, Gerber J S, Moore F C, Ray D K, West P C, Mueller N D. Climate adaptation by crop migration. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1243.
- [18] Paterson R R M. Optimised and systematic suitable climate modelling confirms future longitudinal-trends for growing oil palm in Africa. *Journal of Environmental Management*, 2021, 300: 113785.
- [19] Su X, Chen M P. Maize migration mitigates the negative impact of climate change on China's maize yield. *Environmental Research Letters*, 2024, 19(7): 074058.
- [20] Leng G Y, Huang M Y. Crop yield response to climate change varies with crop spatial distribution pattern. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1463.
- [21] 陈浩, 李正国, 唐鹏钦, 胡亚南, 谭杰扬, 刘珍环, 游良志, 杨鹏. 气候变化背景下东北水稻的时空分布特征. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2571-2579.
- [22] Wang H, Hijmans R J. Climate change and geographic shifts in rice production in China. *Environmental Research Communications*, 2019, 1(1): 011008.
- [23] Liang S F, Wu W B, Sun J, Li Z P, Sun X, Chen H, Chen S, Fan L L, You L Z, Yang P. Climate-mediated dynamics of the northern limit of paddy rice in China. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(6): 064008.
- [24] 徐春春, 周锡跃, 李凤博, 方福平. 中国水稻生产重心北移问题研究. *农业经济问题*, 2013, 34(7): 35-40.
- [25] 梁社芳. 中国水稻种植北界演变过程、驱动机制及其水资源效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
- [26] 王明秋. 浅谈东北水稻旱育稀植栽培技术的关键问题. *农业与技术*, 2017, 37(10): 116.
- [27] 李宇. 东北地区水稻分布的时空演变特征及驱动机制分析. *测绘与空间地理信息*, 2021, 44(1): 73-76, 81.
- [28] 黄莹泽, 邱炳文, 何玉花, 张珂, 邹凤丽. 东北地区水稻扩张的海拔优势区间分析. *地理科学进展*, 2020, 39(9): 1557-1564.
- [29] Zhan P, Zhu W Q, Zhang T Y, Li N. Regional inequalities of future climate change impact on rice (*Oryza sativa* L.) yield in China. *Science of the Total Environment*, 2023, 898: 165495.
- [30] Rising J, Devineni N. Crop switching reduces agricultural losses from climate change in the United States by half under RCP 8.5. *Nature Communications*, 2020, 11: 4991.
- [31] Gu W Y, Ma G S, Wang R, Scherer L, He P, Xia L L, Zhu Y Y, Bi J, Liu B B. Climate adaptation through crop migration requires a nexus perspective for environmental sustainability in the North China Plain. *Nature Food*, 2024, 5(7): 569-580.
- [32] Miao R, Khanna M, Huang H. Responsiveness of crop yield and acreage to prices and climate. *American Journal of Agricultural Economics*, 2016, 98(1): 191-211.
- [33] Li Z G, Liu Z H, Anderson W, Yang P, Wu W B, Tang H J, You L Z. Chinese rice production area adaptations to climate changes, 1949-2010. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(4): 2032-2037.
- [34] 陈运森, 周金泳, 彭嘉续. 中国上市公司分红的动因研究——基于机器学习的证据. *中国工业经济*, 2024(5): 155-173.
- [35] Yu Y, Tian Q S, Yan F X. Climate change and its impact on rice acreage in high-latitude regions of China: an estimation by machine learning. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 2022, 14(4): 313-331.
- [36] Hu Y, Fan L, Liu Z, Hu Y, Fan L, Liu Z, Yu Q, Liang S, Chen S, You L, Wu W, Yang P. Rice production and climate change in Northeast China: Evidence of adaptation through land use shifts. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(2): 024014.
- [37] 尹朝静. 气候变化对中国水稻生产的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [38] Deng Q, Xie W, Wang K. Impact of extreme temperatures on production of different rice types: A county-level analysis for China. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 2023, 45(2): 1097-1133.
- [39] 陈帅, 徐晋涛, 张海鹏. 气候变化对中国粮食生产的影响——基于县级面板数据的实证分析. *中国农村经济*, 2016(5): 2-15.
- [40] 刘峰, 张甘霖. 中国高分辨率国家土壤信息网格基本属性数据集(2010-2018). 国家青藏高原数据中心, 2021.
- [41] 骆玉川, 张朝. 2000—2019 年全国三大粮食作物 1km 物候数据集. 国家生态科学数据中心, 2022.
- [42] 李荣强, 陈轩, 施龙中. 中国主粮种植面积变化的影响因素——基于荟萃分析. *科技导报*, 2024, 42(7): 76-83.
- [43] 彭长生, 王全忠, 李光泗, 钟钰. 稻谷最低收购价调整预期对农户生产行为的影响——基于修正的 Nerlove 模型的实证研究. *中国农村经济*, 2019(7): 51-70.
- [44] 邹小娇, 张郁. 黑龙江省粮食作物种植结构变化的政策驱动分析——基于 DID 模型. *中国农学通报*, 2021, 37(15): 150-157.
- [45] 李阔, 许吟隆. 适应气候变化的中国农业种植结构调整研究. *中国农业科技导报*, 2017, 19(1): 8-17.
- [46] Xia T, Wu W B, Zhou Q B, Yu Q Y, Verburg P H, Yang P, Lu Z J, Tang H J. Spatio-temporal changes in the rice planting area and their relationship to climate change in NorthEast China: a model-based analysis. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(7): 1575-1585.
- [47] 张卫建, 陈金, 徐志宇, 陈长青, 邓艾兴, 钱春荣, 董文军. 东北稻作系统对气候变暖的实际响应与适应. *中国农业科学*, 2012, 45(7): 1265-1273.
- [48] 余会康, 郭建平. 气候变化下东北水稻冷害时空分布变化. *中国生态农业学报*, 2014, 22(5): 594-601.
- [49] 云雅如, 方修琦, 王丽岩, 田青. 我国作物种植界线对气候变暖的适应性响应. *作物杂志*, 2007(3): 20-23.
- [50] 方修琦, 盛静芬. 从黑龙江省水稻种植面积时空变化看人类对气候变化影响的适应. *自然资源学报*, 2000, 15(3): 213.
- [51] Yang X, Lin E D, Ma S M, Ju H, Guo L P, Xiong W, Li Y, Xu Y L. Adaptation of agriculture to warming in NorthEast China. *Climatic Change*, 2007, 84(1): 45-58.
- [52] Zhang P, Zhang J J, Chen M P. Economic impacts of climate change on agriculture: The importance of additional climatic variables other than temperature and precipitation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2017, 83: 8-31.