

Spatiotemporal patterns of paddy rice production change in China during 1980–2018

ZHANG Qiang¹, ZHANG Geli¹, ZHU Daolin¹, DI Yuanyuan¹, YANG Tong¹,
LIU Ruoqi¹, DONG Jinwei²

(1. College of Land Science and Technology, Chinese Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Paddy rice, the essential staple grain in China, is important for national food security. As the largest producer and consumer of rice globally, China has undergone significant changes in the pattern of paddy rice production in recent decades. However, the spatial and temporal patterns of paddy rice production change since 1980 remains unclear. In this study, we analyzed the spatiotemporal patterns of paddy rice production change in China and determined the influences of planting area and yield on rice production during 1980–2018 based on the provincial-level statistics. The results show that: (1) The whole study period can be divided into three stages based on the interannual variations of paddy rice production: an unsteady increase phase in 1980–1997 (Stage 1), a significant decrease phase in 1998–2003 (Stage 2), and a rapid increase phase in 2004–2018 (Stage 3). Most of the provinces except Guangdong showed increasing trends in Stage 1. Almost all the regions, especially southern China, displayed decreasing trends in Stage 2. In Stage 3, Northeastern China and the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin exhibited increasing trends, while the southeast coastal region (Zhejiang, Fujian, and Guangdong) and Sichuan Province showed decreasing trends. (2) Paddy rice production had increased by 51.61% in China from 1980 to 2018. Rice production showed a spatial pattern of increasing in the south and increasing in the north. The spatial pattern of yield was similar to that of production, which continued to grow nationwide. The interannual changes in planting area were different, showing a trend of decreasing in the south and increasing in the north. (3) Rice production change in China was mainly dependent on yield (64.29%), supplemented by planting area (28.57%). The contribution of joint-dominant factors had little impact on production changes (7.14%). After 1998, rice production change gradually shifted from yield-dominated to planting area-dominated. As the yield may have reached the growth bottleneck, policy regulation is essential for stabilizing and increasing the rice planting area and yield.

Key words: paddy rice; spatiotemporal pattern; production; planting area; yield; contribution rate; China

引用格式:张强,张戈丽,朱道林,等.1980—2018年中国水稻生产变化的时空格局[J].资源科学,2022,44(4):687-700.[Zhang Q, Zhang G L, Zhu D L, et al. Spatiotemporal patterns of paddy rice production change in China during 1980—2018[J]. Resources Science, 2022, 44(4): 687-700.] DOI: 10.18402/resci.2022.04.04

1980—2018年中国水稻生产变化的时空格局

张 强¹,张戈丽¹,朱道林¹,邸媛媛¹,杨 彤¹,刘若琪¹,董金玮²

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院,北京 100083;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘要:水稻对于国家粮食安全具有重要意义。中国作为世界上最大的水稻生产和消费国,改革开放以来水稻生产格局发生了巨大变化,但是其生产变化完整过程的时空格局尚不清楚,特别是对于阶段性特征及区域差异的认识有待提高。本文基于省级面板数据分析中国1980—2018年水稻生产的时空变化,剖析播种面积和单产对总产量的贡献。研究表明:①1980年以来水稻总产量年际变化呈现3个阶段:波动上升时期(1980—1997年),除广东省显著下降外,大部分省份显著增加;显著下降时期(1998—2003年),南方地区下降较快;快速上升时期(2004—2018年),东北和长江中下游省份显著增加,东南沿海三省(浙江、福建和广东)和四川盆地显著下降。②近40年中国水稻总产量显著增加,由 13.99×10^3 万t增加至 21.21×10^3 万t,增加了51.61%,空间上呈现“南北齐增”格局;单产与总产量变化相似,在全国范围内持续增加;播种面积则不同,呈现出“北增南减”的态势。③全国水稻总产量变化总体上以单产贡献为主(64.29%),播种面积贡献为辅(28.57%),1998年以来水稻总产量逐渐由单产主导转为播种面积主导,随着单产可能或者已达到增长瓶颈,政策调控对于稳定和提高水稻种植面积和总产量尤为重要。本文结果可为政府部门粮食安全政策的制定、宏观农业规划和结构调整提供科学支持。

关键词:水稻;时空格局;总产量;播种面积;单产;贡献率;中国

DOI :10.18402/resci.2022.04.04

1 引言

水稻是世界上三大粮食作物之一,全球超过50%的人口以水稻为主食^[1]。预计到2050年,全球人口将突破90亿^[2],对水稻等主要粮食作物的需求量将随之急剧增加。因此,水稻在保障粮食安全方面扮演重要角色^[3]。此外,水稻种植也与气候变化^[4-6]、水资源利用和水资源安全^[7,8]、公共健康^[9,10]等问题密切相关。中国作为世界上人口最多的国家,也是最大的水稻生产国和消费国^[11],掌握水稻生产变化的时空格局信息对于国家的粮食安全、水安全和农业气候变化应对决策尤为重要。

自改革开放以来,中国水稻总产量增加了两倍多,受自然条件和人为因素的影响,其空间分布不

断变化^[12,13]。目前获取水稻生产变化时空信息的方法主要有3种:①遥感估产与监测,该方法时效性强、空间分辨率高,但尚难在宏观层面进行较长时序的连续监测^[14,15]。②利用作物模型,该方法能够进行长期的水稻生产模拟,但输入参数往往较多且具有不确定性,无法保证模拟结果的准确性;此外,该方法区域针对性较强,大尺度上的应用较为受限^[16],即使将作物模型与遥感信息结合^[17],也尚难进行大尺度上的长时间连续监测。③基于国家、地方统计部门的逐级上报数据,多以行政单元为基本单位,时间序列长、数据高度综合,尽管难以体现行政单元内的空间差异,但由于其数据的时间连续性,可更好地指导国家农业结构调整及政策制定,对掌

收稿日期:2021-05-07 修订日期:2021-07-05

基金项目:国家自然科学基金项目(42171115;81961128002);教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目(19JZD013)。

作者简介:张强,男,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事农业土地利用研究。E-mail: qiang.2019@outlook.com

通讯作者:张戈丽,女,山东淄博人,教授,主要从事土地利用遥感监测与生态评价研究。E-mail: geli.zhang@cau.edu.cn

握大尺度和长时间序列水稻总产量变化的时空格局具有重要作用^[18-20]。已有关于全国水稻变化的最新宏观分析较少,对改革开放以来水稻生产变化的关键时间拐点及其完整过程的时空格局尚不清楚。

水稻总产量受到播种面积和单产变化的直接影响,其他因素则通过影响播种面积和单产间接影响总产量^[21]。改革开放之前,中国水稻生产格局是自然禀赋、国家计划经济体制和复杂的国内外政治、经济形势综合作用的结果。改革开放至今,中国实行市场经济体制,从根本上改变了之前的资源配置基础,水稻生产格局也随之进行调整和优化^[22-25]。其主要表现在两个方面:①水稻播种面积减少而单产增加^[26];②生产空间布局的变化,南方尤其是长江中下游地区水稻播种面积减少^[27],北方尤其是东北地区大幅度增长^[28,29]。对于水稻总产量变化的驱动因素研究,学者多通过空间面板模型、地理探测器等手段,从自然、经济、技术等角度切入选取具体的驱动因子,探究影响总产量的主要驱动力^[30-33]。这些驱动因子通过影响水稻播种面积和单产间接影响水稻总产量,而不同驱动因子往往存在指标重叠和冗余,它们之间的交互影响较少被考虑。也有学者^[34-37]分析了播种面积和单产在不同时期对作物总产量的贡献,但往往是按照相等年份间隔(5或10年)进行“截面式”分析,虽便于了解水稻总产量在相同时间周期的变化,但并没有明晰其变化的具体时间拐点及对应时段内的空间格局,而这对于研究总产量变化的原因是非常重要的。

综上所述,中国改革开放以来水稻总产量变化完整过程的宏观时空格局及影响机制尚不清楚,特别是对于阶段性特征及区域差异的认识有待提高。本文基于省级统计数据,探究改革开放以来中国水稻总产量变化的时空格局,分析不同阶段水稻播种面积和单产对总产量的影响程度,从宏观上把握水稻的动态变化,并讨论其背后的深层次原因。本文有助于准确认识改革开放以来中国水稻总产量变化的时空格局以及播种面积和单产对总产量的贡献,可为中国农业结构调整、农业部门相关政策制定提供科学支持,从而服务于国家粮食安全和农业可持续发展。

2 数据与方法

2.1 数据来源

数据包括全国及各省级行政区水稻总产量、播

种面积和单位面积产量(简称单产)。时间范围为1980—2018年(海南省、重庆市分别设立于1988、1997年,时间范围分别为1988—2018年、1997—2018年)。空间范围包括30个省级行政区(香港、澳门和台湾地区因数据缺失而未包含,青海省因无水稻种植未包含)。以上数据来源于1981—2019年全国及省级统计年鉴。中国行政边界、省级行政区划底图数据来自自然资源部标准地图服务系统(www.mnr.gov.cn)。农业政策相关信息主要来自农业农村部(<http://www.moa.gov.cn>)和中国政府网(<http://www.gov.cn>)。本文着重关注水稻生产的宏观格局差异,因此按照中国四大地理分区(南方地区、北方地区、西北地区和青藏地区)进行区域格局分析,对于处在分界线处的省份,进一步结合《中国水稻种植区划》中水稻的分布进行分区确认,例如四川省的水稻主要集中在东部,因此将其归入南方地区。

2.2 研究方法

2.2.1 水稻总产量变化程度分析

为便于分析全国水稻总产量在研究时段内的变化程度和不同省份水稻生产差距,使用标准差来分析省际水稻总产量的变异程度。标准差是总体各单位标准值与其平均数离差平方的算术平均数的平方根,可反映各年份水稻总产量间的离散程度。

2.2.2 水稻生产时空特征分析

采用一元线性回归模型对1980—2018年中国水稻总产量/播种面积/单产年际变化趋势分别在全国及省级尺度进行分析。回归系数(Slope)可用于表示总产量随时间变化的趋势。同时,为分析水稻总产量/播种面积/单产变化的空间格局,对以上指标进行空间可视化。回归系数计算公式如下:

$$Slope = \frac{39 \times \sum_{i=1}^{39} i \times A_i - \sum_{i=1}^{39} i \sum_{i=1}^{39} A_i}{39 \times \sum_{i=1}^{39} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{39} i \right)^2} \quad (1)$$

式中:Slope表示水稻总产量/播种面积/单产的变化速率;i表示年份的顺序,i=1,2,...,39;Ai表示第i年水稻总产量/播种面积/单产的数值大小。如果Slope>0,则水稻总产量/播种面积/单产呈增加趋势,否则为减少趋势;如果通过0.05的显著水平($P < 0.05$),则认为增加或减少趋势显著。

2.2.3 水稻总产量贡献率分解

水稻总产量是水稻播种面积和单产的乘积,由

面积和单产共同决定^[21],因此可以将水稻总产量的变化分解为面积贡献、单产贡献、面积和单产相互作用贡献(简称互作贡献)3个部分^[38]。公式如下:

$$RS_{i+t} = (S_{i+t} - S_i) \frac{Y_i}{P_{i+t} - P_i} \quad (2)$$

$$RY_{i+t} = (Y_{i+t} - Y_i) \frac{S_i}{P_{i+t} - P_i} \quad (3)$$

$$RI_{i+t} = (S_{i+t} - S_i) \frac{Y_{i+t} - Y_i}{P_{i+t} - P_i} \quad (4)$$

$$RS_{i+t} + RY_{i+t} + RI_{i+t} = 1 \quad (5)$$

式中: RS_{i+t} 、 RY_{i+t} 、 RI_{i+t} 分别表示*i+t*年的水稻播种面积贡献率、单产贡献率、互作贡献率; S_i 、 S_{i+t} 分别表示*i*年和*i+t*年的水稻播种面积; P_i 、 P_{i+t} 分别表示*i*年和*i+t*年的水稻总产量; Y_i 、 Y_{i+t} 分别表示*i*年和*i+t*年的水稻单位面积产量。

为便于比较各部分的贡献率,对贡献率进行校正:

$$A_s^T = \frac{|RS_{i+t}|}{|RS_{i+t}| + |RY_{i+t}| + |RI_{i+t}|} \quad (6)$$

$$A_y^T = \frac{|RY_{i+t}|}{|RS_{i+t}| + |RY_{i+t}| + |RI_{i+t}|} \quad (7)$$

$$A_l^T = \frac{|RI_{i+t}|}{|RS_{i+t}| + |RY_{i+t}| + |RI_{i+t}|} \quad (8)$$

式中: A_s^T 、 A_y^T 、 A_l^T 分别表示校正后的播种面积贡献率、单产贡献率、互作贡献率。根据已有研究^[34,36],按照校正后的贡献率,将影响水稻总产量变化的主

导因素类型分解为面积绝对主导型、面积主导型、单产绝对主导型、单产主导型、互作绝对主导型、互作主导型6类,其具体划分标准如表1所示。这里的“主导”是指某一类因素相较于其他因素对水稻总产量变化的影响更大。

表1 水稻产量变化主导因素类型划分标准

Table 1 Classification for the leading factors of rice production change

类型	条件
面积绝对主导型	$A_s^T \geq 1.95 \max(A_s^T, A_l^T)$
面积主导型	$1.05 \max(A_s^T, A_l^T) < A_s^T \leq 1.95 \max(A_s^T, A_l^T)$
单产绝对主导型	$A_y^T \geq 1.95 \max(A_s^T, A_l^T)$
单产主导型	$1.05 \max(A_s^T, A_l^T) < A_y^T \leq 1.95 \max(A_s^T, A_l^T)$
互作绝对主导型	$A_l^T \geq 1.95 \max(A_s^T, A_y^T)$
互作主导型	$1.05 \max(A_s^T, A_y^T) < A_l^T \leq 1.95 \max(A_s^T, A_y^T)$

3 结果与分析

3.1 水稻总产量变化的时空特征

1980—2018年中国水稻年均总产量空间分布不均衡,总产量年际变化也有较大差异。从图1a可以看出,水稻年均总产量较高的区域主要分布在东北和长江中下游地区,其中湖南省水稻总产量最高(2.15×10^3 万t);而西部地区水稻总产量均较低,其中西藏自治区仅为0.48万t。同时,年均总产量较高的区域,其总产量年际标准差也较大,说明这些地区研究时段内总产量发生了较大变化(图1a)。从

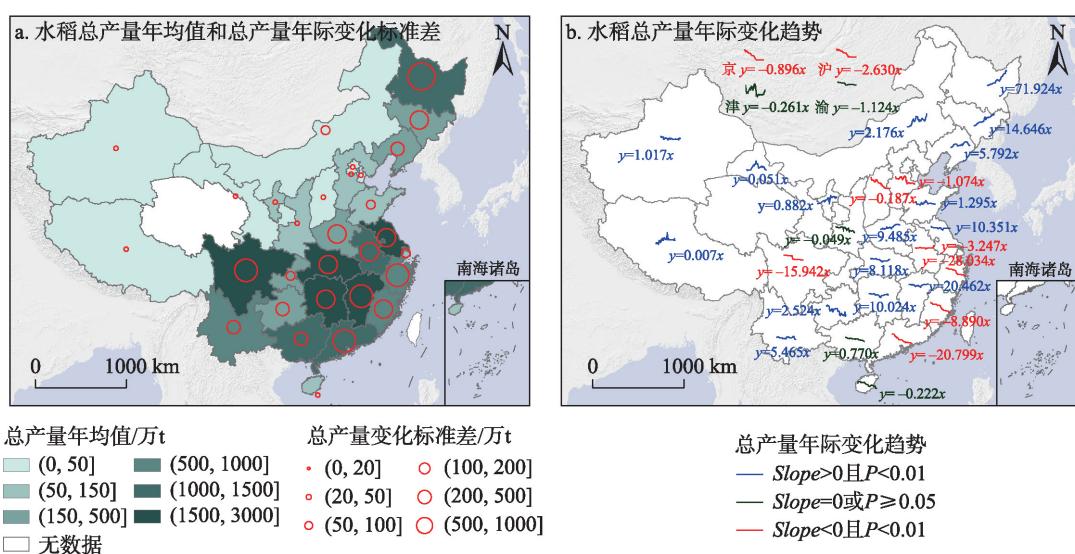


图1 1980—2018年省级尺度水稻总产量及其年际变化的空间格局

Figure 1 Spatial patterns of paddy rice production and its interannual change by province, 1980-2018

注:该图基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号为GS(2020)4634号的标准地图制作,底图边界无修改。

图1b可以看出,1980—2018年大部分省份水稻总产量呈显著增加趋势,但存在明显的区域分异。水稻主产区东北三省和长江中下游地区水稻总产量增长明显,其中黑龙江省增加最快(71.92万t/a);西北和青藏地区水稻总产量增加缓慢,尤其是西藏和甘肃,仅为0.007万和0.051万t/a;东南沿海地区的浙江、福建和广东以及西南地区的四川水稻总产量则呈现明显下降趋势,减少最快的为浙江省(-28.03万t/a);陕西、广西、海南、天津和重庆水稻总产量没有显著变化趋势。

中国水稻总产量年际变化可分为3个阶段(图2)。总体上看,近40年水稻平均总产量为 18.51×10^3 万t,由1980年的 13.99×10^3 万t增加至2018年的

21.21×10^3 万t,增加了51.61%。第一阶段(1980—1997年)为波动上升时期,水稻总产量由 13.99×10^3 万t增加至 20.07×10^3 万t,增加了43.46%,多年平均总产量为 17.50×10^3 万t。第二阶段(1998—2003年)为显著下降时期,水稻总产量至2003年下降到 16.07×10^3 万t,减少了19.12%,多年平均总产量为 18.30×10^3 万t。第三阶段(2004—2018年)为快速上升时期,水稻总产量至2018年增加了18.43%,与第一阶段相比,水稻总产量增加更平稳。

区域尺度上(图3),1980—1997年,作为水稻主产区的南方地区总产量增加明显(变化率为 0.17×10^3 万t/a),北方地区总产量变化率相对较低(变化率为 0.07×10^3 万t/a)。1998—2003年,下降较快的主要

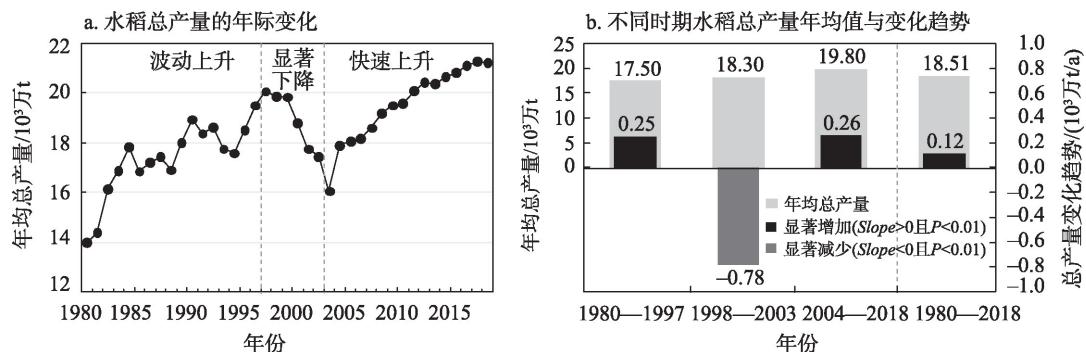


图2 1980—2018年水稻总产量年际变化的阶段性特征

Figure 2 Stage characteristics of interannual variations of paddy rice production, 1980-2018

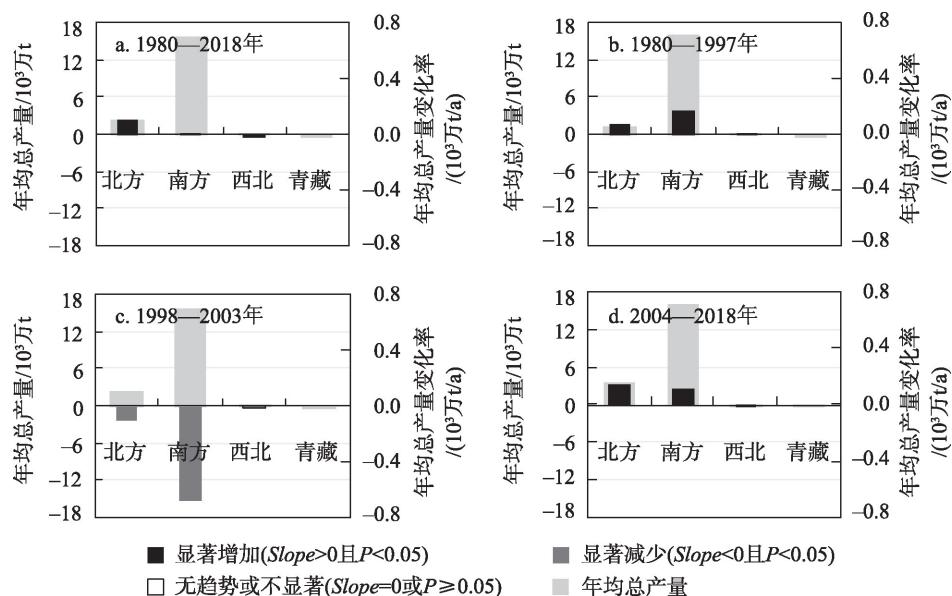


图3 不同时期区域尺度水稻总产量变化率

Figure 3 Variation rates of paddy rice production in different periods by region

要是南方地区(水稻占比 86.47% ,变化率为 -0.68×10^3 万t/a),北方地区总产量减少幅度较小(水稻占比 12.55% ,变化率为 -0.09×10^3 万t/a)。2004—2018年,南方地区年均总产量 15.91×10^3 万t,总体呈增加趋势(变化率为 0.11×10^3 万t/a),北方地区年均总产量 3.68×10^3 万t,变化率为 0.15×10^3 万t/a,明显高于南方地区。在以上3个阶段,西北、青藏地区年均总产量均无显著变化。

省级尺度上(图4、图5),1980—1997年,虽然北方地区总产量变化率相对较低,但黑龙江和吉林两省的年总产量增加非常显著,其中黑龙江总产量变化率达到 36.41 万t/a;长江中下游的江苏、安徽等也有较为显著的增加,总产量变化率均超过 17.54 万t/a;总产量减少的区域是广东、北京和山西,以广东省最为明显(变化率为 -11.27 万t/a);1998—2003年,大部分省份水稻总产量呈显著下降趋势,其中江苏、浙江和广东三省总产量下降速率最大,减少最快的江苏省变化率达到 -120.38 万t/a。2004—2018年,东南沿海和西南省份年均总产量显著减

少,减少最快的为浙江省(变化率为 16.12 万t/a);增加较快的集中在东北地区,其中黑龙江省总产量变化率最大(125.14 万t/a),共增加了 137.65% 。

3.2 水稻播种面积和单产变化的时空特征

3.2.1 水稻播种面积和单产年际变化特征

由水稻播种面积与单产的年际变化曲线来看(图6a、6c),播种面积同样在1998年和2004年发生较为明显的转折,而单产在1998—2003年轻微下降,但整体上呈波动上升趋势,相较于产量和播种面积其转折变化不明显,但为便于对比分析,将两者均划分为3个阶段。

从图6a、6b可以看出,水稻播种面积在第一阶段年波动下降,与图2a中第一阶段总产量呈反向变化,与第二、三阶段总产量同向变化。整体上,近40年来水稻播种面积显著下降,期间经历了“波动下降→快速下降→显著增加”的变化过程,自1980年的 33.88×10^2 万hm²减少至2003年的 26.51×10^2 万hm²,后又增加至2018年的 30.19×10^2 万hm²。从图6c、6d可以看出,水稻单产先快速增加,然后略微下

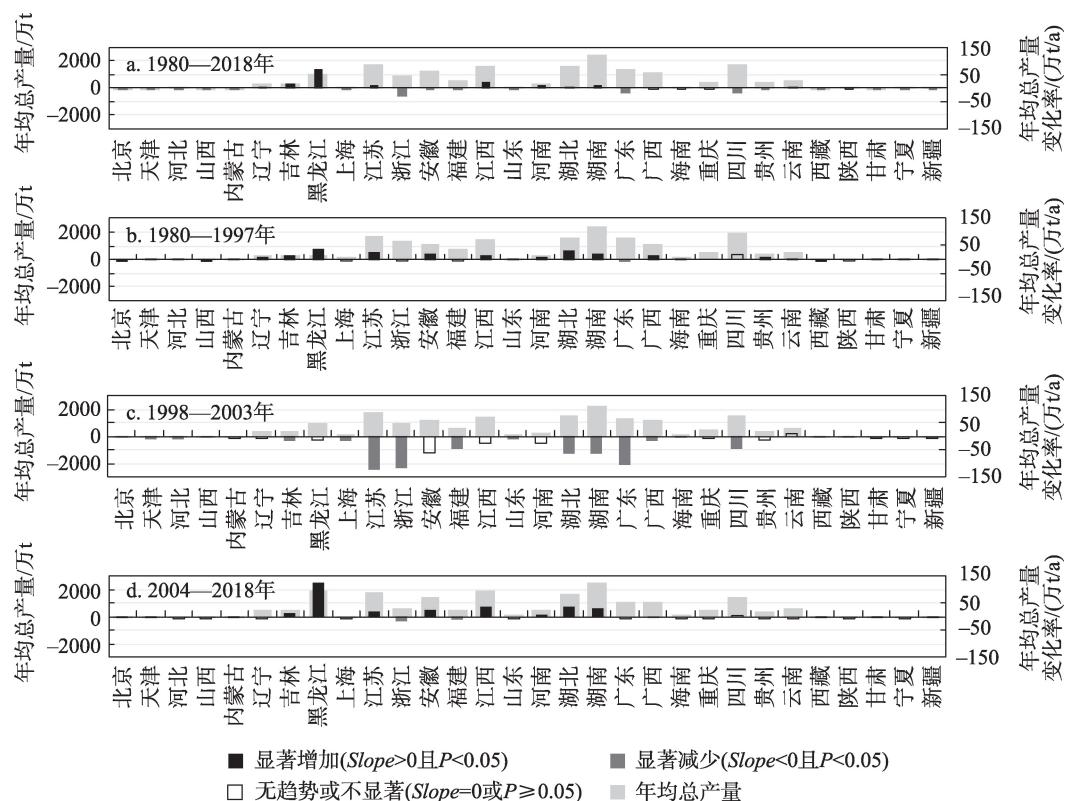


图4 不同时期省级尺度水稻总产量变化率

Figure 4 Variation rates of paddy rice production in different periods by province

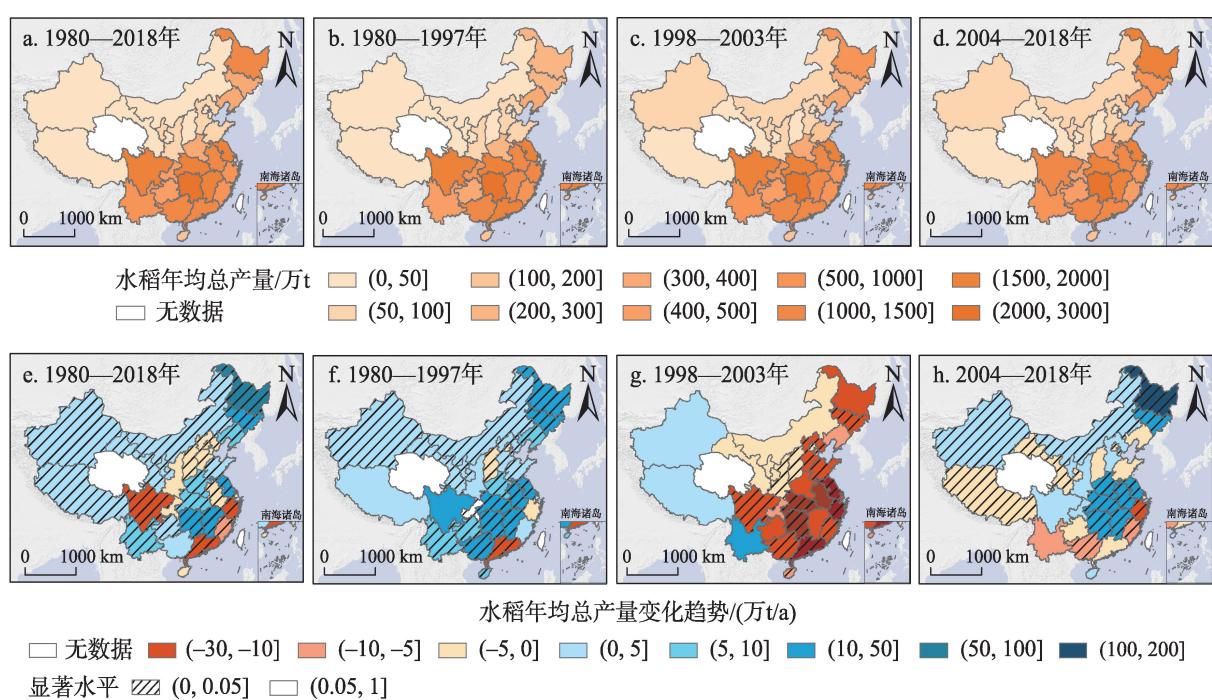


图5 不同时期省级尺度水稻总产量及其变化的空间格局

Figure 5 Spatial patterns of paddy rice production and its change in different periods by province

注:该图基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号为GS(2020)4634号的标准地图制作,底图边界无修改。

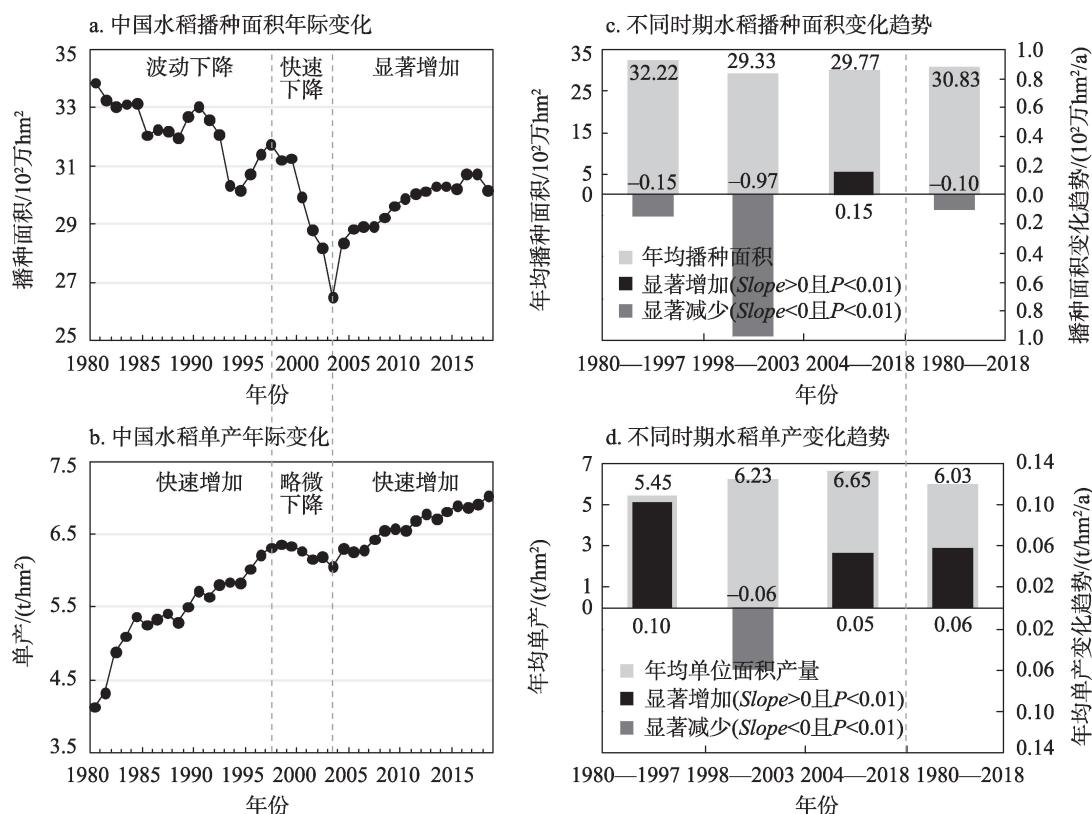


图6 1980—2018年水稻播种面积与单产年际变化的阶段性特征

Figure 6 Stage characteristics of interannual change of paddy rice planting area and yield, 1980-2018

降,之后又快速增加,3个阶段均与图2a中水稻总产量呈同向变化。水稻单产自1980年的 $4.13 \text{ t}/\text{hm}^2$ 增加至2018年的 $7.03 \text{ t}/\text{hm}^2$,增加了70.15%。整体而言,总产量与单产的总体变化趋势一致,但在阶段性变化幅度和波动上,总产量与播种面积具有更好的一致性,说明水稻总产量的长期增长对单产可能具有较强的依赖性,但总产量的短期波动可能更直接地受到播种面积的影响。

3.2.2 水稻播种面积和单产年际变化的空间格局

中国水稻主要集中在东北和南方地区,其中以湖南省播种面积最大,达到409.26万 hm^2 ,西部地区普遍较小。水稻播种面积“北增南减”趋势明显,与水稻总产量类似,尤其是东北地区和南方大部份省份,增加最快的为黑龙江省(9.43万 hm^2/a),减少最快的为广东省(-6.37万 hm^2/a),西北和青藏地区变化均较小(图7a、7e)。1980—1997年,超过一半数量的省份水稻播种面积呈明显下降,减少最快的为广东省(-10.06万 hm^2/a),43.3%的省份明显增加,黑龙江省增加最快(5.68万 hm^2/a),总体呈现出“北增南减”的态势(图7b、7f);1998—2003年,全国播种面积缩减剧烈,86.7%的省份播种面积减少,南方地

区省份下降尤为显著,下降最快的为浙江省(-22.01万 hm^2/a),东北和西部地区大部分省份下降不显著(图7c、7g);2004—2018年,全国播种面积总体回升,除东南沿海省份和四川显著下降外,大部分省份(特别是水稻主产区)显著增加(图7d、7h)。

中国水稻单产较高的区域也主要是在东北和南方地区省份,与水稻总产量类似,近40年,水稻单产也呈现出“南北齐增”的格局,除北京、河北、山西和宁夏无显著变化趋势外,其他省份均显著增加(图8a、8e)。1980—1997年,76.7%的省份水稻单产显著提高,东北和西北地区尤为明显,增加最快的为天津市(0.23 t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$))(图8b、8f);1998—2003年,63.3%的省份水稻单产有所下降但趋势并不显著,内蒙古和浙江省还呈现显著增加趋势(图8c、8g);2004—2018年,86.7%的省份水稻单产增加,华北平原及南方地区省份增加尤为显著,增长最快的是山西省(0.32 t/ hm^2/a)(图8d、8h)。

3.3 水稻播种面积和单产对产量贡献率时空变化

近40年中国水稻总产量变化贡献以单产为主(64.29%),以面积为辅(28.57%),互作贡献对总产量变化影响较小(7.14%)(图9)。单产主导型省份

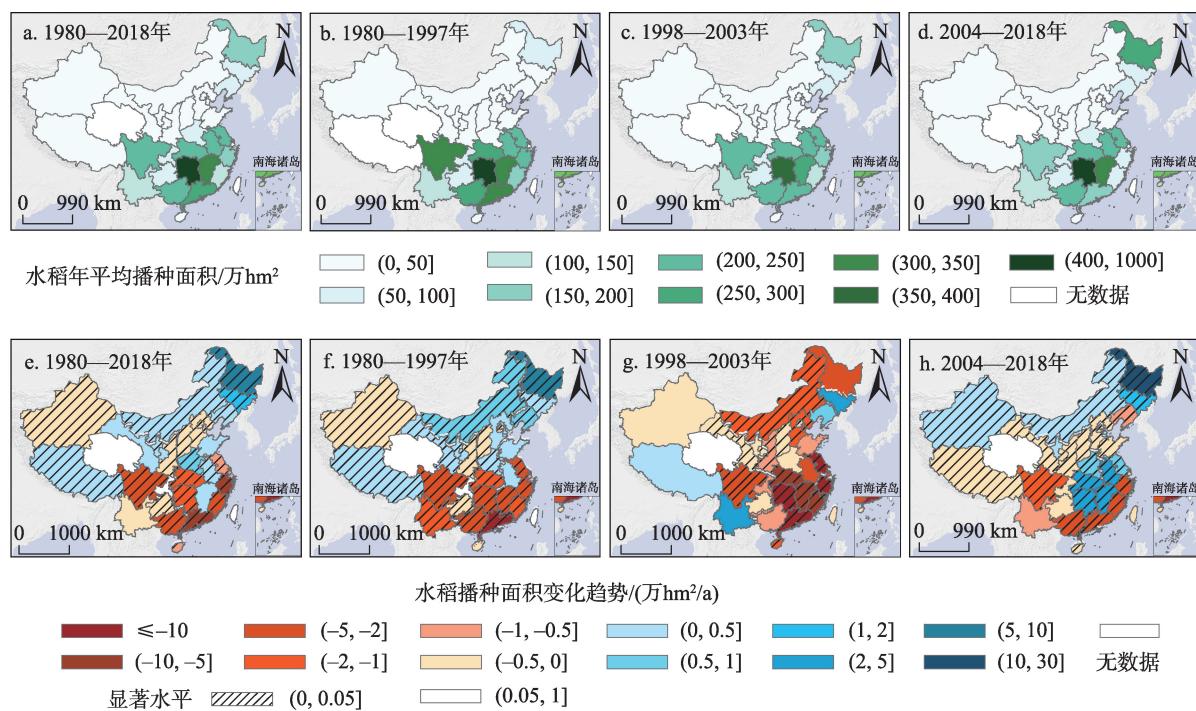


图7 不同时期省级尺度水稻播种面积及其变化的空间格局

Figure 7 Spatial patterns of paddy rice planting area and its change in different periods by province

注:该图基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号为GS(2020)4634号的标准地图制作,底图边界无修改。

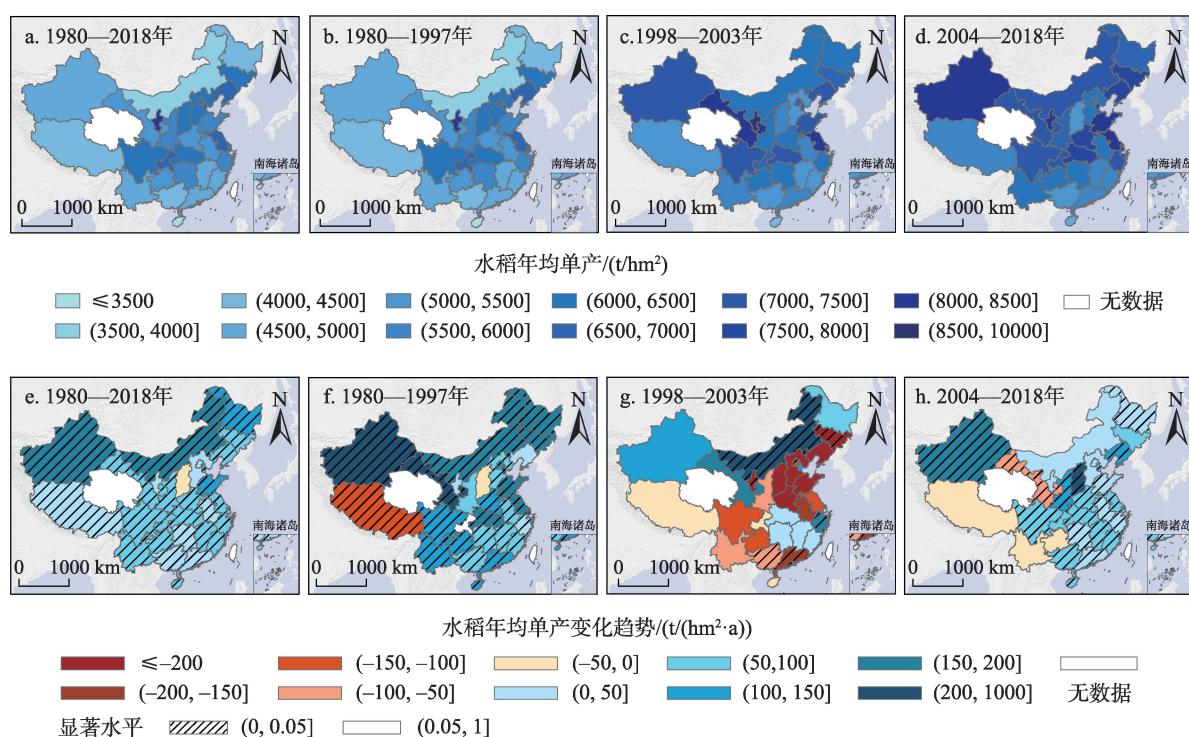


图8 不同时期省级尺度水稻单产及其变化的空间格局

Figure 8 Spatial patterns of paddy rice yield and its change in different periods

注:该图基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号为GS(2020)4634号的标准地图制作,底图边界无修改。

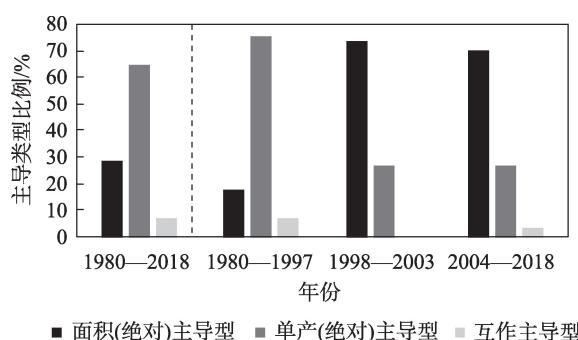


图9 水稻总产量变化不同主导因素类型省份占比

Figure 9 Proportion of provinces with different types of dominant factor affecting paddy rice production change

主要分布在南方长江中下游地区和西部地区,播种面积主导型省份主要分布在东北地区和东南沿海地区(图10a)。从全国层面来看,以1998年为转折点,越来越多的省份水稻总产量贡献由单产主导逐渐变为面积主导(图9)。1980—1997年,仅17.86%的省份水稻总产量为面积主导型,75.00%的省份都是单产主导,面积主导型省份主要分布在东北地区,单产绝对主导型省份主要分布在南方长江中下游地区和中国西北地区;1998—2003年,由播种面

积主导的省份增加至73.33%,而单产主导的省份则下降到26.67%,除西部地区省份为单产主导外,其他大部分省份水稻总产量由面积主导,特别是南方地区,大部分是由面积绝对主导;2004—2018年,延续前一阶段的态势,空间格局也与前一阶段类似,有70.00%的省份为面积主导,26.67%的省份为单产主导,较上一阶段不同的是,面积绝对主导型的省份由南方地区向东北、西南转移。3个阶段由面积单产互作主导的省份比例均较低。

4 讨论

自1980年以来中国水稻总产量显著增加,北方地区总产量的增加较南方地区更为明显,总体上呈现出“南北齐增”的趋势,单产与总产量变化类似,在全国范围内持续增加,而播种面积则不同,在全国呈现出“北增南减”的态势。尽管水稻总产量重心逐步“北移”^[12,34],但南方地区仍是中国水稻的主要产区,2018年南方地区的水稻总产量占到全国的77.44%,与前人研究^[12,19,34]结果一致。本文通过逐年数据分析中国水稻生产时空变化格局发现,改革开放以来中国水稻总产量分别在1998年和2004年发

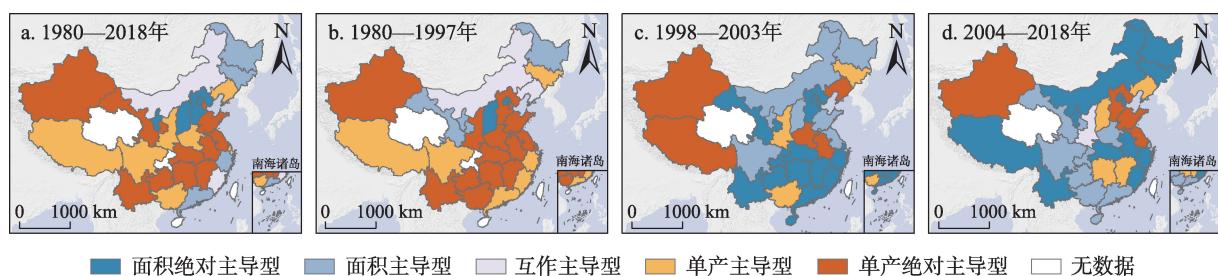


图10 不同时期水稻产量变化主导因素类型的空间格局

Figure 10 Spatial patterns of different types of dominant factor affecting paddy rice production change

注:该图基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号为GS(2020)4634号的标准地图制作,底图边界无修改。

生了重大转折,而已有相关研究按照相等年份间隔进行“截面式”的时空变化分析难以捕捉水稻总产量变化的转折时期^[34-37]。

进一步从影响水稻总产量更为直接的播种面积和单产因素出发,分析其对总产量的贡献,揭示水稻播种面积和单产对总产量贡献率的主、次变化的时空动态过程。本文发现全国水稻总产量变化由单产主导逐渐变为播种面积主导(图10b-10d),与前人研究^[19,34]结论相似,不同的是,本文进一步确定了由单产主导变为播种面积主导的具体时期(1998年),同时分析了相应时段内播种面积和单产贡献的空间格局,这对于中国农业宏观结构调整非常重要。对于不同区域而言,北方地区大部分省份水稻总产量一直以播种面积影响为主导,南方地区大部分省份则是由单产主导转为播种面积主导(图10b-10d)。本文一定程度上反映了水稻单产的增加可能已达到瓶颈,播种面积在水稻总产量变化方面越来越占据主导地位。例如,作为中国粮食安全和重要农产品的战略基地,东北黑龙江省水稻总产量自1980年以来增长迅速,除1998—2003年明显下降外,总体上呈显著增加趋势(图3-5),与播种面积的阶段性变化更为一致(图7);此外,基于对黑龙江产量贡献率的分析也发现,水稻总产量变化在2004年之后由面积主导变为面积绝对主导,可见该地区播种面积在水稻总产量变化中的作用进一步加强。而在经济相对发达的东南沿海地区,1980年以来水稻总产量呈显著下降趋势(图3-5),也与播种面积阶段性变化趋势一致(图7),而其水稻单产一直在不断增加(图8);该地区水稻总产量变化主导因素类型最初为面积主导型和互作主导型,1998年之后也变为面积绝对主导型(图10)。因此,水稻

播种面积在总产量变化中的作用越来越重要,稳定和扩大播种面积是提高水稻总产量的基础。

当前国家和地区的相关农业政策、经济发展水平、农业技术、自然条件等因素通过直接影响水稻播种面积和单产进而影响总产量的变化。通过梳理改革开放以来与水稻相关主要政策干预措施发现(图11a),1978年中央强调要实行农、林、牧、副、渔五业并举,家庭联产承包责任制逐渐实行,极大地调动了农民种植水稻的积极性,促进了水稻总产量的提高。随着粮食总量连年增长,逐渐出现了供过于求的问题^[22],国家在之后的一段时间不断进行政策干预,水稻播种面积和产量一直处于波动状态(图2、6a、11)。1998年,中央对农业发展状况作出了“粮食和其他农产品大幅度增长,由长期短缺到总量大体平衡,基本解决了全国人民的吃饭问题”的基本判断,把农村经济结构调整作为工作重心,增加经济作物种植面积,加上该时期(1998—2003年)自然灾害频发^[39],水稻播种面积、单产和总产量下降明显(图2、6、11)。直到2004年,中国推进农业产业结构调整,大力支持粮食主产区发展粮食产业,深入挖掘农业内部增收潜力,实施“三减免,三补贴”政策以及之后的一系列惠农措施^[40],使北方地区水稻播种面积较2004年之前增长更快,南方水稻播种面积2004年之前逐年减少,之后趋于平稳(图11b、11c),全国水稻总产量从2004年至今一直处于稳步增长状态(图2)。整体来看,国家政策调控在水稻总产量转折变化中扮演重要作用^[41],未来要想保证“谷物基本自给,口粮绝对安全”,应更加重视农业政策在水稻总产量变化方面的调节作用,继续通过系列惠农政策稳定或适度扩大重要粮食产区(如东北三省)及全国的水稻种植面积,为区域和国

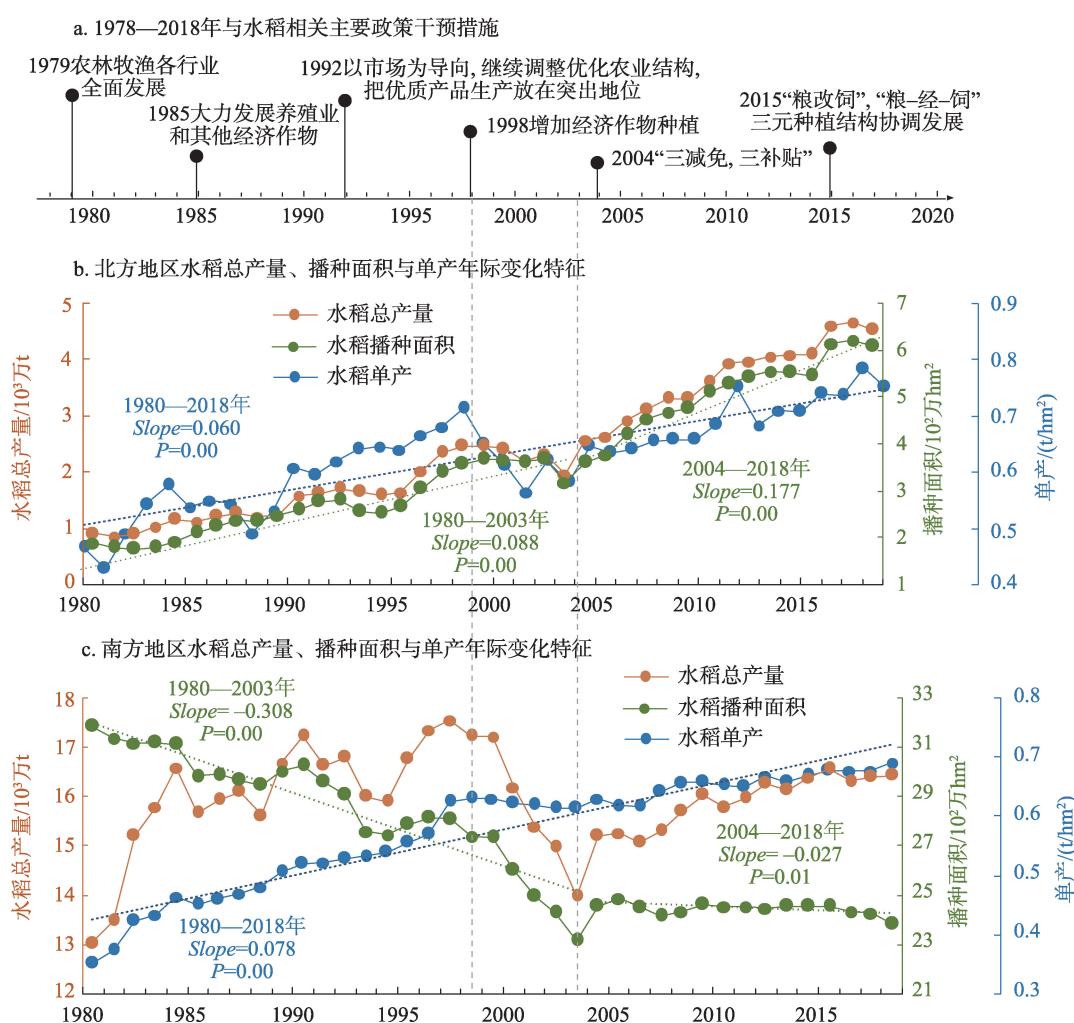


图11 中国北方、南方地区水稻总产量、播种面积与单产年际变化及主要政策干预

Figure 11 Key policy interventions and interannual change of paddy rice production, planting area, and yield in northern and southern China

注: 实线代表实际值,虚线代表线性拟合值; 蓝色字体的 Slope、P 分别表示单位面积产量的变化斜率及显著性大小,

绿色字体的 Slope、P 分别表示播种面积的变化斜率及显著性大小。

家粮食安全提供坚实基础。

除了政策之外,经济的发展、农业劳动力减少导致的水稻生产比较效益降低^[42],“双(季)改单(季)”^[43]和耕地撂荒现象^[44]增多,水稻市场价格的下跌也会影响农民的生产决策行为和积极性^[45],从而制约水稻播种面积的增加^[28,46]。这一问题在中国南方地区较为突出,经济发展相对较好的南方地区水稻播种面积呈减少趋势(图11c),尤其是东南沿海地区,虽然自1980年以来水稻总产量一直呈增加趋势,但是由于其经济的飞速发展导致水稻生产比较效益降低,农业劳动力锐减^[46],水稻播种面积不断减少(图7),进而限制了水稻总产量的增加。为此,地方政府应严格落实耕地保护政策,确保耕地数量、

质量的动态平衡,既不能落下经济发展,也不能忽视口粮安全。再者,农业技术(例如品种改良“籼改粳”)^[47,48]和栽培技术(例如增加氮肥投入)^[49,50]的改进也会提高水稻单产。1980年以来全国大部分省份水稻单产均呈增加趋势(图8),农业技术的提高起到了很大作用。特别是长江中下游地区的四川省,自2004年以来,水稻播种面积不断缩减(图7h),但是总产量却呈增加趋势(图5h),其单产的提高起到了重要作用;东北地区水稻总产量的增加,也与龙粳3号、东农416等水稻新品种^[51]的应用密切相关,未来继续培育高产稳产水稻品种对于水稻总产量的提高至关重要。此外,近年来气候变化异常,一方面,水稻各生长发育阶段对温度变化极为敏感,

气候变暖导致水稻种植区内极端温度事件频发,进而影响水稻单产^[52-54];另一方面,气候变暖为中国北方一些本来不适宜水稻种植的地区(例如黑龙江北部)提供了充足的热量条件,使水稻适宜种植区的界线向北迁移,从而扩大了水稻适宜种植面积^[28,55,56]。这启示中国在加强耐冷水稻品种培育的同时也应该在一些适宜种植水稻的地区适度扩大水稻种植面积。未来研究应着重于定量化政策、农业技术等因素,特别是要厘清影响中国水稻总产量的直接因素和间接因素之间的关系,进一步探究水稻生产变化的影响机制。

5 结论

本文基于省级面板数据,运用趋势分析、贡献率分解的方法分析了1980—2018年中国水稻生产变化的时空格局和阶段性变化特征,剖析播种面积和单产在总产量中的贡献,讨论其背后的深层次原因。得到以下结论:

(1)1980年以来中国水稻总产量在1998年和2004年发生了明显的转折,呈现出3个阶段:波动上升期(1980—1997年),除广东省显著下降外,大部分省份均显著增加;显著下降期(1998—2003年),大部分省份均呈下降趋势,南方地区省份下降更显著;快速上升期(2004—2018年),空间分异明显,东北和长江中下游省份显著增加,东南沿海三省和四川盆地显著下降。

(2)近40年来中国水稻总产量呈现“南北齐增”的格局,由1980年的 13.99×10^3 万t增加到2018年的 21.21×10^3 万t,增加了一半以上,年均总产量及年际波动在空间上分布不均衡,东北和长江中下游地区省份水稻的年均总产量较高,总产量的年际变化也较大;单产与总产量的变化类似,在全国范围内持续增加;而播种面积则不同,在全国呈现出“北增南减”的态势。

(3)近40年中国水稻总产量变化贡献总体上以单产为主(64.29%),面积为辅(28.57%),互作贡献对产量变化影响较小(7.14%);以1998年为转折点,水稻总产量由单产主导逐渐转为播种面积主导,并且面积的主导作用在北方地区越来越明显。水稻单产增加对产量的提高起关键作用,但随着单产可能已经达到增长瓶颈,稳定和提高水稻面积成为提

升产量的前提,而国家政策调控对于稳定中国水稻种植面积和总产量的作用更加重要。

参考文献(References):

- [1] Durand-Morat A, Nalley L L, Thoma G. The implications of red rice on food security[J]. Global Food Security, 2018, 18: 62–75.
- [2] Godfray H C J, Beddington J R, Crute I R, et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people[J]. Science, 2010, 327 (5967): 812–818.
- [3] Saha I, Durand-Morat A, Nalley L L, et al. Rice quality and its impacts on food security and sustainability in Bangladesh[J]. PloS One, 2021, DOI: 10.1371/journal.pone.0261118.
- [4] Khairulbahri M. Analyzing the impacts of climate change on rice supply in West Nusa Tenggara, Indonesia[J]. Heliyon, 2021, DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e08515.
- [5] Wu F, Wang Y H, Liu Y, et al. Simulated responses of global rice trade to variations in yield under climate change: Evidence from main rice-producing countries[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124690.
- [6] Wang X H, Ciais P, Li L, et al. Management outweighs climate change on affecting length of rice growing period for early rice and single rice in China during 1991–2012[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233: 1–11.
- [7] Lee S H, Taniguchi M, Mohtar R H, et al. An analysis of the water-energy-food-land requirements and CO₂ emissions for food security of rice in Japan[J]. Sustainability, 2018, 10(9): 3354–3354.
- [8] Ngammuangtueng P, Jakrawatana N, Nilsalab P, et al. Water, energy and food nexus in rice production in Thailand[J]. Sustainability, 2019, 11(20): 5852–5852.
- [9] Bartell J, Fledderjohaa J, Vellakkal S, et al. Subsidising rice and sugar? The public distribution system and nutritional outcomes in Andhra Pradesh, India[J]. Journal of Social Policy, 2020, 50(4): 681–705.
- [10] Weber A M, Baxter B A, Mcclung A, et al. Arsenic speciation in rice bran: Agronomic practices, postharvest fermentation, and human health risk assessment across the lifespan[J]. Environmental Pollution, 2021, DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117962.
- [11] 周正平, 占小登, 沈希宏, 等. 我国水稻育种发展现状、展望及对策[J]. 中国稻米, 2019, 25(5): 1–4. [Zhou Z P, Zhan X D, Shen X H, et al. Current status, prospection and countermeasure of rice breeding in China[J]. China Rice, 2019, 25(5): 1–4.]
- [12] 刘珍环, 李正国, 唐鹏钦, 等. 近30年中国水稻种植区域与产量时空变化分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 680–693. [Liu Z H, Li Z G, Tang P Q, et al. Spatial-temporal changes of rice area and production in China during 1980–2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(5): 680–693.]
- [13] He W J, Liu Y Y, Sun H P, et al. How does climate change affect

- rice yield in China? [J]. Agriculture, 2020, DOI: 10.3390/agriculture10100441.
- [14] 黄翀. 基于时序遥感的柬埔寨水稻种植时空格局监测[J]. 资源科学, 2021, 43(12): 2393–2402. [Huang C. Monitoring rice cropping system in Cambodia and its influencing factors using time series MODIS images[J]. Resources Science, 2021, 43(12): 2393–2402.]
- [15] Weiss M, Jacob F, Duveiller G. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, DOI: 10.1016/j.rse.2019.111402.
- [16] Jeong S, Ko J, Choi J, et al. Application of an unmanned aerial system for monitoring paddy productivity using the GRAMI–rice model[J]. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(8): 2441–2462.
- [17] 宋丽娟, 叶万军, 陆忠军, 等. 遥感与作物生长模型数据同化在水稻上的应用进展[J]. 中国稻米, 2020, 26(5): 84–89. [Song L J, Ye W J, Lu Z J, et al. Review on data assimilation of remote sensing and crop growth models in rice[J]. China Rice, 2020, 26(5): 84–89.]
- [18] 刘珍环, 杨鹏, 吴文斌, 等. 近30年中国农作物种植结构时空变化分析[J]. 地理学报, 2016, 71(5): 840–851. [Liu Z H, Yang P, Wu W B, et al. Spatio-temporal changes in Chinese crop patterns over the past three decades[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71 (5): 840–851.]
- [19] Chen B, Ao H J, Zeng X S. Analysis of the changes in sown area and yield of rice in China from 2009 to 2018[J]. Journal of Hunan Agricultural University Natural Sciences, 2021, 47(5): 495–500.
- [20] Sinnarong N, Pongcharoen K, Thaeye K, et al. The association of weather variables with rice production and simulation of agro-adaptation measure for northeast Thailand: Evidence from panel data model[J]. International Journal of Global Warming, 2018, DOI: 10.1504/IJGW.2018.10011580.
- [21] 邓文, 谭杰扬, 刘英, 等. 湖南不同熟制水稻产量重心变迁及影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(12): 114–118. [Deng W, Tan J Y, Liu Y, et al. Study on the changing of yield gravity center and the influencing factors of different maturity system rice production in Hunan[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(12): 114–118.]
- [22] 罗其友, 刘洋, 唐华俊, 等. 新时期我国农业结构调整战略研究[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 31–38. [Luo Q Y, Liu Y, Tang H J, et al. Strategic study on agricultural structure adjustment in China in the new era[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(5): 31–38.]
- [23] 李阔, 许吟隆. 适应气候变化的中国农业种植结构调整研究[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(1): 8–17. [Li K, Xu Y L. Study on adjustment of agricultural planting structures in China for adapting to climate change[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(1): 8–17.]
- [24] Li Z P, Long Y Q, Tang P Q, et al. Spatio-temporal changes in rice area at the northern limits of the rice cropping system in China from 1984 to 2013[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16 (2): 360–367.
- [25] 王红, 杨兴洪. 粮食安全与农业结构调整研究及展望[J]. 农业展望, 2018, 14(9): 17–19. [Wang H, Yang X H. Food security and agricultural structure adjustment and its prospect[J]. Agricultural Outlook, 2018, 14(9): 17–19.]
- [26] Xu L, Yuan S, Man J G. Changes in rice yield and yield stability in China during the past six decades[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(8): 3560–3569.
- [27] Li P, Feng Z M, Jiang L G, et al. Changes in rice cropping systems in the Poyang Lake Region, China during 2004–2010[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(4): 653–668.
- [28] 刘大千, 刘世薇, 温鑫. 东北地区粮食生产结构时空演变[J]. 经济地理, 2019, 39(5): 163–170. [Liu D Q, Liu S W, Wen X. Spatial-temporal evolution of grain production structure in Northeast China[J]. Economic Geography, 2019, 39(5): 163–170.]
- [29] Xin F F, Xiao X M, Dong J W, et al. Large increases of paddy rice area, gross primary production, and grain production in Northeast China during 2000–2017[J]. Science of the Total Environment, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135183.
- [30] Wang C Z, Zhang Z, Zhang J, et al. The effect of terrain factors on rice production: A case study in Hunan Province[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(2): 287–305.
- [31] 王凤, 刘艳芳, 孔雪松, 等. 中国县域粮食产量时空演变及影响因素变化[J]. 经济地理, 2018, 38(5): 142–151. [Wang F, Liu Y F, Kong X S, et al. Spatial and temporal variation of grain production and its influencing factors at the county level in China[J]. Economic Geography, 2018, 38(5): 142–151.]
- [32] 李勇, 何欢欢. 主产区粮食产量时空格局演变与影响因素[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(6): 216–224. [Li Y, He H H. Spatial and temporal pattern evolution and influencing factors of grain yield in major grain producing areas[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(6): 216–224.]
- [33] 米胜渊, 谭雪兰, 谭杰扬, 等. 近30年来洞庭湖地区水稻种植面积演变的影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2020, 35(10): 2499–2510. [Mi S Y, Tan X L, Tan J Y, et al. Analysis of influencing factors of rice planting area evolution in Dongting Lake Area during 1987–2017[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(10): 2499–2510.]
- [34] 王小慧, 姜雨林, 刘洋, 等. 基于县域单元的我国水稻生产时空动态变化[J]. 作物学报, 2018, 44(11): 1704–1712. [Wang X H, Jiang Y L, Liu Y, et al. Spatio-temporal changes of rice production in China based on county unit[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(11): 1704–1712.]
- [35] 马春玥, 买买提·沙吾提, 姚杰, 等. 1950–2015年中国棉花生产时空动态变化[J]. 地理学报, 2020, 75(8): 1699–1710. [Ma C Y, Sawut M, Yao J, et al. Spatio-temporal changes of cotton production in China from 1950 to 2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(8): 1699–1710.]
- [36] 刘杰安, 王小慧, 吴尧, 等. 近30年我国谷子生产时空变化与区

- 域优势研究[J]. 中国农业科学, 2019, 52(11): 1883–1894. [Liu J A, Wang X H, Wu Y, et al. Spatiotemporal variation and regional advantages of foxtail millet production in recent 30 years in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(11): 1883–1894.]
- [37] 白冰, 杨雨豪, 王小慧, 等. 基于农作制分区的1985—2015年中国小麦生产时空变化[J]. 作物学报, 2019, 45(10): 1554–1564. [Bai B, Yang Y H, Wang X H, et al. Spatio-temporal changes of China's wheat production based on division of farming system during 1985–2015[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(10): 1554–1564.]
- [38] 刘忠, 黄峰, 李保国. 2003—2011年中国粮食增产的贡献因素分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 1–8. [Liu Z, Huang F, Li B G. Investigating contribution factors to China's grain output increase in period of 2003 to 2011[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(23): 1–8.]
- [39] Xing Z X, Yang Z R, Fu Q, et al. Characteristics and risk assessment of agricultural meteorological disasters based on 30 years' disaster data from Heilongjiang Province of China[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(6): 144–154.
- [40] Lu L Y, Li G Q. Efficiency evaluation of effect of direct grain subsidy policy on performance of rice production[J]. *Asian Agricultural Research*, 2017, 9(4): 11–15.
- [41] 段园园, 林树文, 黄金泽, 等. 知识图谱视角下我国农业政策研究的演化发展及热点分析[J]. 南方农业学报, 2018, 49(1): 194–200. [Duan Y Y, Lin S W, Huang J Z, et al. Evolution and hotspots of agricultural policy research in China from the perspective of knowledge map[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(1): 194–200.]
- [42] 刘朝旭, 刘黎明, 彭倩. 南方双季稻区农户水稻种植模式的决策行为分析: 基于湖南省长沙县农户调查的实证研究[J]. 资源科学, 2012, 34(12): 2234–2241. [Liu Z X, Liu L M, Peng Q. Analysis of rice cropping decision-making in a double-cropping rice area of southern China[J]. *Resources Science*, 2012, 34(12): 2234–2241.]
- [43] Jiang M, Xin L J, Li X B, et al. Decreasing rice cropping intensity in southern China from 1990 to 2015[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(1): 35.
- [44] 张学珍, 赵彩杉, 董金玮, 等. 1992—2017年基于荟萃分析的中国耕地撂荒时空特征[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 411–420. [Zhang X Z, Zhao C S, Dong J W, et al. Spatio-temporal pattern of cropland abandonment in China from 1992 to 2017: A meta-analysis[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 411–420.]
- [45] 高雪, 李谷成, 范丽霞, 等. 雨涝灾害对农户生产要素投入行为的影响: 基于湖北农村固定观察点数据的分析[J]. 资源科学, 2017, 39(9): 1765–1776. [Gao X, Li G C, Fan L X, et al. Effect of rain-waterlog on the production factor investment by rice house-
- holds in Hubei based on Rural Fixed Observation Point Data[J]. *Resources Science*, 2017, 39(9): 1765–1776.]
- [46] Zhang L, Tan S K, Liu C W, et al. Influence of labor transfer on farmland sustainable development: A regional comparison of plain and hilly areas[J]. *Quality & Quantity*, 2018, 52: 431–443.
- [47] Shi X H, Hu R F. Rice variety improvement and the contribution of foreign germplasms in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(10): 2337–2345.
- [48] Zeng Y H, Tan X M, Zeng Y J, et al. Changes in the rice grain quality of different high-quality rice varieties released in southern China from 2007 to 2017[J]. *Journal of Cereal Science*, 2019, 87: 111–116.
- [49] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 等. 中国水稻栽培技术发展与展望[J]. 中国稻米, 2021, 27(4): 45–49. [Zhu D F, Zhang Y P, Chen H Z, et al. Development and prospect of cultivation technology of rice in China[J]. *China Rice*, 2021, 27(4): 45–49.]
- [50] 姚单君, 张爱华, 杨爽, 等. 新型氮肥对水稻产量养分积累及吸收利用的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(10): 2121–2126. [Yao D J, Zhang A H, Yang S, et al. Effects of new-type fertilizer application on yield, nutrient accumulation and fertilizer utilization of rice[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(10): 2121–2126.]
- [51] Yang Y L, Xu X, Zhang M C, et al. Genetic basis dissection for eating and cooking qualities of japonica rice in Northeast China[J]. *Agronomy*, 2020, 10(3): 423.
- [52] Huang J, Zhang F M, Zhou L M, et al. Regional changes of climate extremes and its effect on rice yield in Jiangsu Province, Southeast China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(3): 106.
- [53] 王品, 魏星, 张朝, 等. 气候变暖背景下水稻低温冷害和高温热害的研究进展[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2316–2326. [Wang P, Wei X, Zhang Z, et al. A review of cold injury and heat damage to rice growth under global warming[J]. *Resources Science*, 2014, 36(11): 2316–2326.]
- [54] 黄亿, 王靖, 赫迪, 等. 气候变暖下西南春玉米生长季不利气象条件的时空演变[J]. 资源科学, 2017, 39(9): 1753–1764. [Huang Y, Wang J, He D, et al. Temporal-spatial change in adverse meteorological conditions during spring maize growth in southwest China under climate warming[J]. *Resources Science*, 2017, 39(9): 1753–1764.]
- [55] Gao J, Liu Y S. Climate warming and land use change in Heilongjiang Province, Northeast China[J]. *Applied Geography*, 2011, 31(2): 476–482.
- [56] Dong J W, Liu J Y, Tao F L, et al. Spatio-temporal changes in annual accumulated temperature in China and the effects on cropping systems, 1980s to 2000[J]. *Climate Research*, 2009, 40(1): 37–48.