周镕基,徐沈玥.2000~2021 年中国水稻生产的净碳汇及其与水稻产值的耦合 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):4091-4106.
Zhou R J, Xu S Y. Net carbon sequestration of rice production in China and its coupling with rice output value from 2000 to 2021 [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):4091-4106.

2000~2021 年中国水稻生产的净碳汇及其与水稻产值的耦合

周镕基[1],徐沈玥[2*] (1.衡阳师范学院经济与管理学院,湖南 衡阳 421002；2.浙江工商大学会计学院,浙江 杭州 310018)

摘要：通过构建水稻生产净碳汇核算模型,对 2000~2021 年全国 30 个省份水稻生产净碳汇进行测算;在厘清其时空演变规律的基础上,运用耦合协调度模型和 Tapio 脱钩模型,探究水稻生产净碳汇与水稻产值之间的耦合协调度及耦合状态变化特征.结果表明:中国水稻生产净碳汇总体呈波动上升趋势,净碳汇量从 2000 年的 6634.50×10^4t 增加到 2021 年的 7990.81×10^4t.空间分布呈现显著异质性,表现为东部高、西部低的特征,且净碳汇重心由西南向东北迁移.水稻生产净碳汇量存在一定的空间关联性,但空间集聚效应趋于减弱.全局莫兰指数以 2010 年为界,呈现持续下降—波动平缓两阶段变化特征.全国 30 个省份水稻生产净碳汇和水稻产值的整体耦合协调度经历先下降,后上升的趋势.全国范围内大部分年份水稻生产净碳汇与水稻产值之间以有利耦合为主,且耦合效果逐渐向好;不同稻作区与不同省份之间耦合状态差距较大.

关键词：水稻生产；净碳汇；空间自相关；耦合协调度；Tapio 脱钩指数
中图分类号：X322 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-4091-16

Net carbon sequestration of rice production in China and its coupling with rice output value from 2000 to 2021. ZHOU Rong-ji[1], XU Shen-yue[2*] (1.College of Econmics and Management, Hengyang Normal University, Hengyang 421002,China；2.School of Accounting, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：4091~4106

Abstract：Develop a net carbon sequestration accounting model for rice production and estimate the net carbon sequestration across 30 provinces in China from 2000 to 2021. Building on an understanding of its spatiotemporal dynamics, the study employs the coupling coordination model and the Tapio decoupling model to assess the degree of coupling coordination and the evolution of the coupling state between net carbon sequestration and rice output value. The results are as follows: (1) Overall, net carbon sequestration in China's rice production demonstrates a fluctuating upward trend, increased from 6634.50×10^4t in 2000 to 7990.81×10^4t in 2021. with notable spatial heterogeneity—higher values in the eastern regions and lower values in the west. The centroid of net carbon sequestration has shifted from the southwest to the northeast. (2) While there is spatial correlation in net carbon sequestration, the spatial agglomeration effect has diminished over time. The global Moran's I index shows a two-phase pattern, characterized by a "steady decline followed by stable fluctuations," with 2010 marking the transition point. (3) The coupling coordination degree between net carbon sequestration in rice production and rice output value across the 30 provinces follows a "decline followed by increase" trend. (4) In most years, the coupling relationship between net carbon sequestration and rice output value is generally favorable, with a gradual improvement in coupling effects. However, significant variability in the coupling status exists across different rice production regions and provinces.

Key words：rice production；net carbon sink；spatial autocorrelation；coupling coordination degree；tapio decoupling index

农业碳源作为主要的碳排放源之一,其碳排放量约占全国总量的 17%[1-2],并且受到地理自然环境、经济发展水平和生产种植特点等多种因素的共同影响,呈现出显著的区域差异.其中,水稻生产因其特殊的种植环境而成为农业碳排放的重要组成部分.研究表明,我国稻田每年排放的 CH_4 和 N_2O 分别约为 7.41Tg 和 32Gg,占农业碳排放总量的 22%[3].同时,水稻生态系统具有独特的碳循环特征,既作为温室气体排放源,又表现出显著的碳汇功能[4].这种双重特性使得采用净碳汇指标来评估水稻生产的综合碳效应显得尤为重要.然而,尽管农业生态系统碳效应研究已取得丰硕成果,但针对水稻生产碳效应的系统性研究仍相对较少.

国内外学者在农业碳排放领域进行了大量的研究,主要集中在以下几个方面:一是农业碳排放测算及时空演变研究.相关研究运用碳排放系数法、模

收稿日期：2024-12-08
基金项目：国家社会科学基金一般项目(21BJY257);湖南省创新平台开放基金项目(2024HSKFJJ033)
* 责任作者, 硕士, 2816630193@qq.com

型模拟法和实地测量法等多种研究方法,对农用物资、农药利用、作物种植、畜禽养殖和秸秆焚烧等农业活动的碳排放进行了全面核算,在县域、省域乃至全国尺度上深入分析了农业碳排放的时空演变特征,揭示了农业碳排放的时空演变规律[5-7].二是农业碳排放驱动因素研究.相关研究表明,影响农业碳排放的主要因素包括经济发展水平、城镇化水平、农业生产效率、农业产业结构和自然气候条件等,为解释农业碳排放的成因和机制提供了重要依据[8-10].三是农业碳源和碳汇平衡研究.农业具备碳源和碳汇双重功能,单纯的碳排放分析并不能准确反映农业生产的净碳汇变化.一些学者运用 Tapio 模型、LMDI 模型、灰色预测模型等方法,结合莫兰指数、核密度估计和椭圆标准差等工具,分析了全国及地方层面农业净碳汇的空间关联性和演变趋势,为农业生产减排增汇提供了科学合理的参考依据[11-15].随着“双碳”目标的提出和生态文明建设的不断发展,农业生产碳效应与经济发展的协调关系逐渐成为研究热点.现有研究主要采用两类方法分析低碳协同发展机制:一是运用耦合协调度模型考察农业现代化[16]及新型城镇化[17]与碳排放效率的静态协调关系;二是基于 Tapio 脱钩模型揭示农业生产净碳汇与经济增长的中长期动态演进特征[4,18-19].

近年来,水稻生态系统研究也取得了一定的进展,主要围绕碳排放与固碳能力两大维度展开系统性探索.在水稻碳排放方面,学者们通过生命周期评价法(LCA)构建了涵盖全产业链的碳足迹评估体系[20-22],并深入探讨了不同稻作模式对碳足迹的影响机制[23-25].在水稻固碳能力方面,既有研究不仅量化了水稻生态系统的碳汇功能[26-27],还系统考察了提升土壤固碳效率的关键技术路径[28-29].最新研究发现,水稻生态系统碳平衡存在显著的空间异质性[30],我国水稻生态系统既可能处于碳盈余状态,也可能处于碳亏损状态,这进一步强调了水稻生产净碳汇研究的必要性.而在水稻生产碳效应与经济发展的耦合协调关系领域,较为系统的研究很少.

当前的研究大多集中于农业或农田生态系统,较少以单一作物为视角进行分析.尽管已有文献证明水稻生态系统具备碳源与碳汇双重属性,但针对水稻生产净碳汇与水稻产值耦合关系的研究尚显不足.鉴于此,本文基于 2000 ~2021 年全国 30 个省份的水稻生产碳排放与碳汇数据,揭示水稻生产净碳汇的时空变化特征.结合生态学、环境科学和经济学的多学科视角采用耦合协调度模型和 Tapio 脱钩模型,分析了水稻生产净碳汇与水稻产值之间的耦合关系,并据此提出了区域差异化的政策建议.

1 材料与方法

1.1 数据来源与处理

以中国 30 个省份为研究对象(不含青海省和港、澳、台地区,下同),研究区间为 2000~2021 年.其中,水稻生产碳排放、水稻生产碳汇测算所需的农药、化肥、农膜、农用柴油使用量、水稻产量等数据来自《中国统计年鉴(2001—2022)》和《中国农村统计年鉴(2001—2022)》,且在测算之前,本文参照田云等[31]的做法,根据各个省份自然条件和水稻生长周期的不同对水稻温室气体排放系数进行了调整.水稻经济产值、实际播种面积和实际灌溉面积数据来自《中国农村统计年鉴(2001—2022)》和中华人民共和国国家发展和改革委员会,研究根据当年最低稻谷收购价格估算水稻产值,以水稻实际播种面积为翻耕面积,以实际灌溉面积为水稻生产灌溉面积.我国的最低稻谷收购价格政策始于 2004 年,2000~2003 年数据依据同期市场价格估算.为保证研究数据的一致性,2014、2015 年水稻生产灌溉面积的缺失数据采用线性插值法填补.

1.2 研究方法

1.2.1 水稻生产净碳汇核算 水稻生产净碳汇是碳汇量与碳排放量的差值,计算公式为:

$$E_N = E_Z - E_C \quad (1)$$

式中:E_N 为水稻生产净碳汇(万 t),E_Z 和 E_C 分别为碳汇量和碳排放量(万 t).若 E_N>0,说明水稻生产处于碳盈余状态;若 E_N<0,则处于碳亏损状态;当 E_N=0 时,水稻碳吸收量与生产过程的碳排放恰好抵消,实现碳平衡.水稻生产过程中的碳排放源主要包括农用物资投入、农地利用和水稻种植三类.将各排放源的碳排放量加总,即为水稻生产碳排放总量;碳汇主要来自水稻在生命周期中通过光合作用从大气中吸收并固定 CO_2 形成的有机碳量.由于稻秆和土壤的固碳效应较为复杂,准确评估需要详细的数据支持,数据获取较为困难,加之本文主要研究水稻作为碳

汇在缓解全球气候变暖方面的能力,为保持研究的准确性和针对性,避免引入其他可能影响结果的变量,本文主要测算水稻光合作用的碳汇量,土壤和稻秆固碳效应未包含在内.具体测算公式如表 1 所示.

表 1　水稻生产碳排/碳汇来源、核算公式及所需数据说明

Table 1　Carbon emissions/sink sources, accounting formulas, and required data explanation for rice production

类别	测算公式	公式说明	来源
农用物资碳排放	$E_s=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\cdot Q_i$	λ_i表示第 i 种物资投入碳排放系数;Q_i表示第 i 种物资投入量	IPCC 碳排放系数法
土地利用碳排放	$E_u=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\cdot A_i$	λ_i表示稻田翻耕与灌溉的碳排放系数;A_i表示水稻种植面积与有效灌溉面积	
水稻种植碳排放	$E_y=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\cdot S_i$	λ_i表示水稻的碳排放系数;S_i表示水稻的种植面积	
碳汇量	$E_z=C_i\cdot P_i\cdot(1-W)/a_i$	C_i为水稻的碳吸收率;P_i为水稻的产量;W为水稻的含水量;a_i为水稻的经济系数.水稻的碳吸收率、含水量、经济系数分别为 0.414、0.12、0.45	[32]

根据已有研究成果,确定水稻生产过程中各种碳排放源所对应的碳排放系数如表 2 所示.

表 2　农用物资、农地利用、水稻种植的碳排放系数

Table 2　Carbon emission factors of agricultural materials, agricultural land utilization, and rice cultivation

碳源	碳排放系数	数据来源
化肥	0.9kg/kg	美国橡树岭国家实验室
农药	4.93kg/kg	
农膜	5.18kg/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所(IREEA)
柴油	0.59kg/kg	联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)
翻耕	3.13kg/hm^2	中国农业大学生物技术学院
农业灌溉	266.48kg/hm^2	[33]

为便于分析,将 CH_4 和 N_2O 统一置换成标准 C 对碳排放量进行加总,IPCC 第五次评估报告指出,1t CH_4 和 N_2O 所引发的温室效应分别约等于 25t CO_2 (6.8182tC)和 298t CO_2 (181.2727tC)所产生的温室效应.为了使测算结果更精准,本文借鉴田云等研究数据,使用差异化水稻甲烷排放系数计算各省份早中晚稻甲烷排放量.

1.2.2　空间相关性检验模型　全局空间自相关系数可以反映区域内相似属性的空间总体集聚特征.本文采用全局莫兰指数对水稻生产净碳汇量进行全局空间相关性检验,其计算公式如下:

$$I=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{S^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}} \tag{2}$$

式中:X表示每个省份净碳汇量的值;W_{ij}表示空间权重矩阵,若两省份相邻,则 W_{ij} 等于 1,否则等于 0;$S_o=\sum_{i=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}W_{ij}$ 是所有空间权重的聚合;n 为所有研究对象的个数.Moran's I 取值范围通常为[−1,1],大于 0 表示两省份水稻生产净碳汇量之间存在正相关,小于 0 表示存在负相关,等于 0 表示两省份水稻生产净碳汇量之间相互独立.

局部空间自相关系数[34]可以揭示各区域之间的空间关联程度.本文采用局部莫兰指数表示水稻生产净碳汇量的局部空间自相关系数,其计算公式如下:

$$I_i=\frac{(x_i-\bar{x})}{S^2}\sum_{i=1}^{n}W_{ij}(x_j-\bar{x}) \tag{3}$$

式中:Moran's I_i表示局部莫兰指数,大于 0 表示区域高(低)值被高(低)值包围;小于 0 表示区域高(低)值被低(高)值包围.

1.2.3　标准差椭圆　标准差椭圆模型能精确描述研究对象空间分布方向性特征及演变过程,其重心变化趋势能大致反映出水稻生产净碳汇在空间分布上的重心偏移,本文采用标准差椭圆探索水稻生产净碳汇在研究期内的转移路径,具体测算公式如下:

$$\bar{X}=\frac{\sum_{i=1}^{n}w_ix_i}{\sum_{i=1}^{n}w_i} \tag{4}$$

$$\bar{Y}=\frac{\sum_{i=1}^{n}w_iy_i}{\sum_{i=1}^{n}w_i} \tag{5}$$

$$\tan\theta=\frac{(\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{2-2}x_i-\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{2-2}y_i)+\sqrt{(\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{2-2}x_i-\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{2-2}y_i)^2+4\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{2-}\bar{x}_i\bar{y}_i}}{\sum_{i=1}^{n}2\omega_i^{2-}\bar{x}_i\bar{y}_i} \quad (6)$$

$$\delta_x=\sqrt{\frac{2\sum_{i=1}^{n}(\omega_i\bar{x}_i\cos\theta-\omega_i\bar{y}_i\sin\theta)^2}{\sum_{i=1}^{n}\omega_i^2}} \quad (7)$$

$$\delta_y=\sqrt{\frac{2\sum_{i=1}^{n}(\omega_i\bar{x}_i\sin\theta-\omega_i\bar{y}_i\cos\theta)^2}{\sum_{i=1}^{n}\omega_i^2}} \quad (8)$$

式中:n 代表省份个数;(x_i,y_i)为省市经纬度地理坐标;$(\bar{X},\bar{Y})$表示加权平均重心坐标;θ为椭圆方位角;$\bar{X},\bar{Y}$ 分别表示各省份到平均重心的坐标偏差.本文选取加权标准椭圆差,以水稻生产净碳汇为权重ω_i计算.

1.2.4 耦合协调度 耦合协调度可以刻画多要素或多系统之间的协调发展水平,关注系统内部结构的优化和系统功能的提升.本文参考田云等[31]的研究,构建水稻生产净碳汇与水稻产值的耦合度模型:

$$W=2\sqrt{E\cdot G}\big/(E+G) \quad (9)$$

式中:W 为耦合度;E 为水稻生产净碳汇量;G 为水稻经济产出,以水稻总产值衡量.以公式(9)为基础,进一步构建耦合协调模型:

$$D=aE+bG \quad (10)$$

$$H=\sqrt{W\cdot D} \quad (11)$$

式中:D 表示水稻生产净碳汇与水稻生产的综合发展度;a+b=1,考虑到经济效应与环境效应同等重要,取 a=b=0.5;H 表示耦合协调度,其取值范围在[0,1.0]之间.当 $H\in[0,\ 0.3)$时,系统间关系属于严重失调;当$H\in[0.3,0.5)$时,属于初级失调;当 $H\in[0.5,0.6)$时,属于初级协调;当$H\in[0.6,0.8)$时,属于良好协调;当$H\in[0.8,1.0]$时,属于优秀协调.

1.2.5 基于传统脱钩模型的耦合指数与耦合类型 耦合协调度侧重反映水稻产值与净碳汇之间的协调程度,即它们是否存在关联;而耦合指数更进一步细化了这种关联的强度,是对耦合协调度的进一步解释.传统的 Tapio 脱钩指数[4,35]可用于分析经济增长与环境压力之间的关系,如经济增长导致碳排放也增长,造成环境压力.不同于多数经济产业,水稻生产过程中碳排和碳汇同时发生,形成净碳汇,对环境产生正外部性效应.因此,使用传统的脱钩模型无法准确判断水稻产值与环境之间的关联趋势.基于传统 Tapio 脱钩指数模型,本文以水稻生产净碳汇替代碳排放量,重新定义并构建了水稻生产净碳汇与水稻产值之间的耦合关系评价模型:

$$e=\frac{(E_{t+1}-E_t)/E_t}{(\mathrm{GDP}_{t+1}-\mathrm{GDP}_t)/\mathrm{GDP}_t}=\frac{\Delta E_t/E_t}{\Delta\mathrm{GDP}_t/\mathrm{GDP}_t} \quad (12)$$

式中:e 为水稻生产净碳汇与水稻产值之间的耦合指数;E_t、GDP_t 分别代表 t 期水稻生产净碳汇量和水稻产值;$\Delta E_t/E_t$、$\Delta\mathrm{GDP}_t/\mathrm{GDP}_t$ 分别代表水稻生产净碳汇量和水稻产值的年增长率.

基于 Tapio 脱钩弹性计算公式,将中国水稻生产净碳汇与水稻产值的耦合状态分为 8 个类型:分别为扩张耦合、增长耦合、强耦合、弱耦合、强负耦合、衰退负耦合、弱负耦合和衰退耦合.具体标准如表 3 所示.

表 3 水稻生产净碳汇与水稻产值增长耦合关系评价标准

Table 3 Evaluation criteria for the coupling relationship between net carbon sink in rice production and rice production value

耦合状态	$\Delta E_t/E_t$	$\Delta\mathrm{GDP}_t/\mathrm{GDP}_t$	耦合指数 e
扩张耦合	+	+	$e\geqslant1.2$
增长耦合	+	+	$0.8\leqslant e<1.2$
强耦合	+	−	$e<0$
弱耦合	+	+	$0\leqslant e<0.8$
强负耦合	−	+	$e<0$
衰退负耦合	−	−	$e\geqslant1.2$
弱负耦合	−	−	$0\leqslant e<0.8$
衰退耦合	−	−	$0.8\leqslant e<1.2$

2 结果与分析

2.1 水稻生产净碳汇时间变化特征

如图 1 所示,2000~2021 年中国水稻生产净碳汇总量总体呈现上升趋势,从 2000 年的 6634.50×10^{4}t 增加到 2021 年的 7990.81×10^{4}t,增长了 20.44%,年均增幅 0.92%.碳排放量从 2000 年的 8578.50×10^{4}t 增加到 2021 年的 9240.91×10^{4}t,增长了 7.72%,年均增幅 0.37%,其中,三大碳源占比始终为水稻种植>农用物资>农地利用,但近年来农用物资占比有所下降;碳汇量从 2000 年的 15213.01×10^{4}t 增长到 2021 年的 17231.72×10^{4}t,增长了 13.27%,年均增幅 0.63%.水稻生产碳汇总量增速明显快于碳排放总量增速,说明

水稻生产处于碳盈余状态.

具体来看,2000~2003 年为下降阶段,水稻生产净碳汇总量从 2000 年的 6634.50×10^{4}t 下降至 2003 年的 5 083.56×10^{4}t,年均降幅为 8.50%,该阶段的下降可能主要与大规模的城市化建设相关.城市化建设占用耕地现象普遍,加之农业生产经济效益低,难以满足农民日益提升的生活需求,部分农民放弃农业生产,走向城市,导致水稻播种面积和产量同步下降,进而形成水稻净碳汇量逐年递减的趋势.此外,农业政策在这一阶段的实施细则不够完善,实际生产要素投入不足,进一步加剧了水稻产量的萎缩.

2004~2015 年为快速增长阶段,净碳汇量从 2004 年的 5908.79×10^{4}t 增加到 2015 年的 7650.76×10^{4}t,年均增幅为 2.38%,这一阶段的快速增长可能主要源于政策信号和技术支持.2004 年,国家开始执行粮食最低收购价政策,以保障农民种粮收入;同时,政府出台了“两减免,三补贴”的中央一号文件,为种粮农民提供直接补贴、良种补贴及大型农机具购置补贴.这些政策有效降低了水稻生产成本,保障了最低收益.然而,尽管水稻产量和碳汇量持续上升,碳排放量也同步增长.这一增长主要与农业机械化、化肥和农药等物资使用增加有关,尽管技术进步提升了生产效率,但并未根本性地改善水稻生产的净碳汇水平.

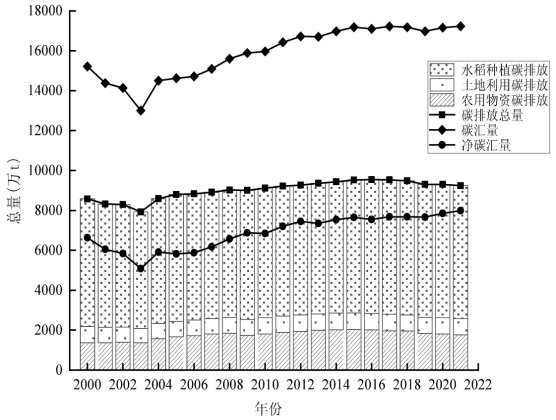


图 1　2000~2021 年水稻生产净碳汇情况趋势

Fig.1　Trend chart of net carbon sink of rice production, 2000~2021

2016~2021 年为稳定增长阶段,水稻生产净碳汇量从 2016 年的 7546.34×10^{4}t 增加到 2021 年的 7990.81×10^{4}t,年均增幅为 1.15%,这一趋势与生态文明建设的不断推进密切相关.“十三五”期间,国家强调“大力实施优质粮食工程”,在追求粮食生产经济效益的同时兼顾粮食安全和环境效益.政策信号引起了农民对生态建设的重视,开始探索更为安全绿色的种植模式.2016 年以后,水稻播种面积有所减少,但伴随着水稻生产效率的提升和投入要素的持续改善,水稻生产净碳汇量仍然保持稳定的上升状态.这一阶段的政策实施更加注重环境保护和可持续发展,技术进步极大地提升了水稻生产的净碳汇水平,例如:精准农业技术的应用减少了农药和化肥的过量使用,水稻品种改良和栽培技术的进步则提升了水稻的光合作用效率.

2.2　水稻生产净碳汇空间变化特征

基于水稻种植的自然条件,本文将研究区域划分为东北稻作区(黑龙江、吉林、辽宁)、华北稻作区(北京、天津、河北、山东、陕西、山西、河南)、华中稻作区(江苏、安徽、上海、浙江、湖北、湖南、江西)、东南稻作区(广东、广西、海南、福建)、西南稻作区(云南、贵州、四川、西藏、重庆)和西北稻作区(内蒙古、甘肃、新疆、宁夏)六大稻作区.六大稻作区 2000 年水稻生产净碳汇总量为华中>西南>东北>东南>华北>西北;2021 年水稻生产净碳汇量为华中>东北>西南>东南>华北>西北.

2000~2021 年,东北稻作区净碳汇量增长尤为显著,总增幅达 126.66%.这一增长与东北地区优越的自然条件及政策支持密切相关.东北地区黑土肥沃,气候适宜,一直是我国重要的粮食生产基地.近年来,气候变暖导致水稻种植北移,种植面积扩张,产量提升.此外,2020 年国家农业农村部颁布的《2020 年东北地区水稻生产技术指导意见》为集约化生产和实现水稻增汇减排提供了政策支持.

华中稻作区和华北稻作区也呈现较为明显的上升趋势,总增幅分别为 5.87%和 31.16%.华中稻作区得益于优越的水热条件和悠久的种植历史,尽管城镇化建设占用了一部分耕地,但通过优化种植结构和推广绿色生产技术,水稻生产保持了稳定增长.华北稻作区生态环境较为脆弱,增长主要受到政策扶持和生产条件改善的影响,尽管增长较快,但整体占比较低.

西南和东南稻作区则呈现明显下降趋势,总降幅分别为 9.95%和 16.85%.这与城镇化进程以及种植结构调整密切相关.一方面,东南和西南地区城市

化发展迅速,大量耕地被城市建设占用,导致水稻种植面积减少.另一方面,东北地区水稻产量和影响力的提升使得北方粮食主产区地位愈加突出,可能加剧了南北地区净碳汇量的差距.

此外,尽管南方水热条件较好,但土壤有机质含量低,水稻有机质含量也低于北方地区,导致整体净碳汇水平较低.而西北稻作区气候极端,降水量少,蒸发量大,水稻生产受限,净碳汇始终较低.

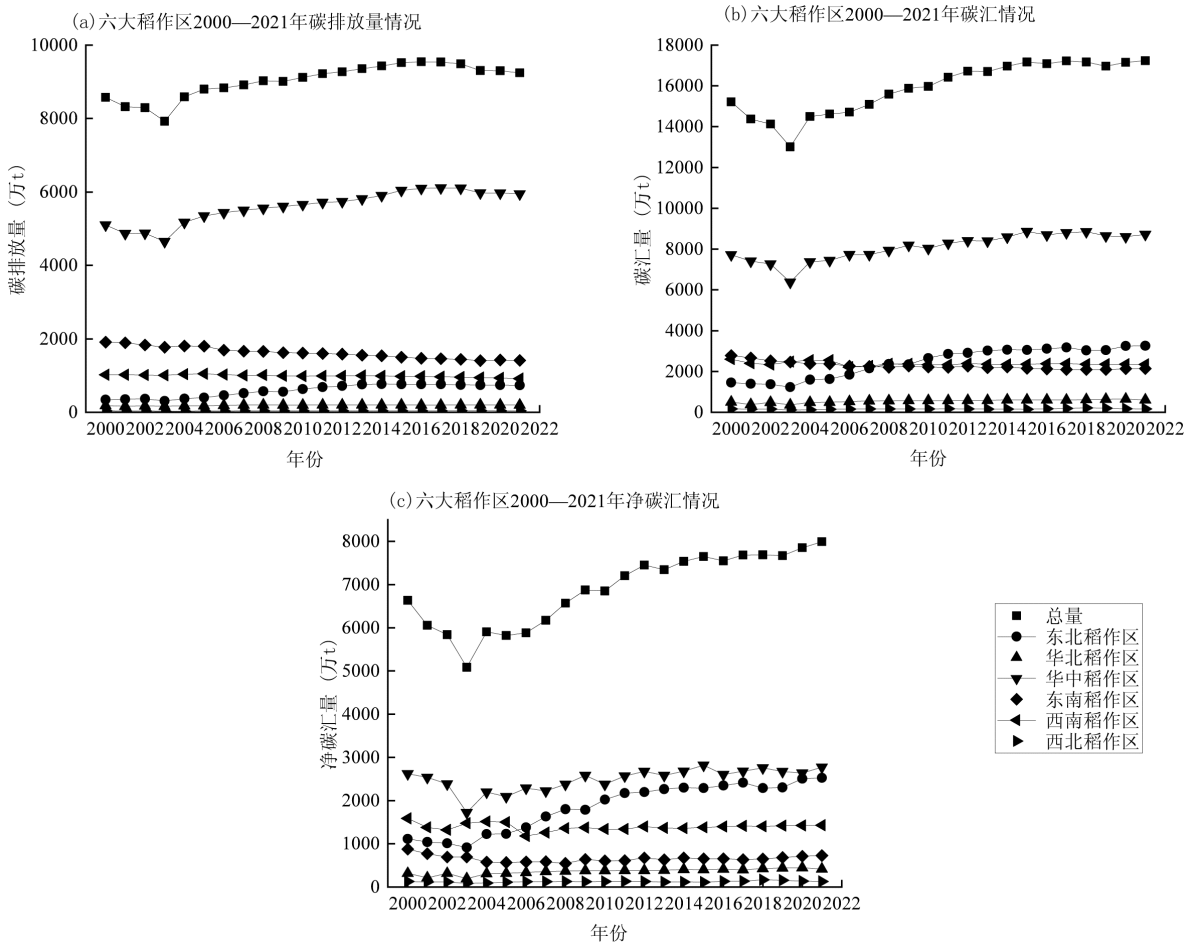


图 2 六大稻作区 2000~2021 年碳排放量、碳汇量、净碳汇量情况趋势

Fig.2 Trend chart of carbon emissions, carbon sinks, and net carbon sinks in six major rice growing areas, 2000~2021

由图 3 可见,2000~2021 年净碳汇量空间分异特征明显,大致呈现东高西低的特点.省域层面,2000 年水稻生产净碳汇最高的三个省份分别为湖南、四川、黑龙江,该年净碳汇量分别为 851.95×10^4t、796.58×10^4t、635.79×10^4t;2021 年净碳汇量最高的三个省份分别为黑龙江、湖南、四川,该年净碳汇量分别为 1806.65×10^4t、844.16×10^4t、718.52×10^4t.自 2000 年以来,天津、海南、黑龙江、吉林、内蒙古、河南、江西、安徽、江苏等省份的净碳汇量增长幅度较大,其中天津、海南、黑龙江三省的增长幅度最大,总增幅分别为 441.64%、195.50%、184.16%.而北京、甘肃、浙江、山西、上海、宁夏、新疆、福建、陕西等省份净碳汇量的下降幅度较大,其中北京、甘肃、浙江三省的下降幅度最大,总降幅分别为 98.41%、74.50%、57.41%.水稻生产重心不断向东北转移.至 2021 年,全国水稻生产净碳汇形成以黑龙江为高值核心,以湖南、四川、江苏为高值副核心,净碳汇量逐渐向外递减的格局.湖南、四川自古以来是中国农业大省,位于亚热带季风气候区,纬度低,热量和水分充沛,在我国水稻生产市场一直占有一席之地.黑龙江则拥有肥沃的黑土资源.2020 年,黑龙江财政厅等四部门印发了《黑龙江省稻谷生产者补贴工作实施方案》.该实施方案的发布进一步提升了稻农的生产者福利,大大激发了黑龙江水稻生产者的种植热情.

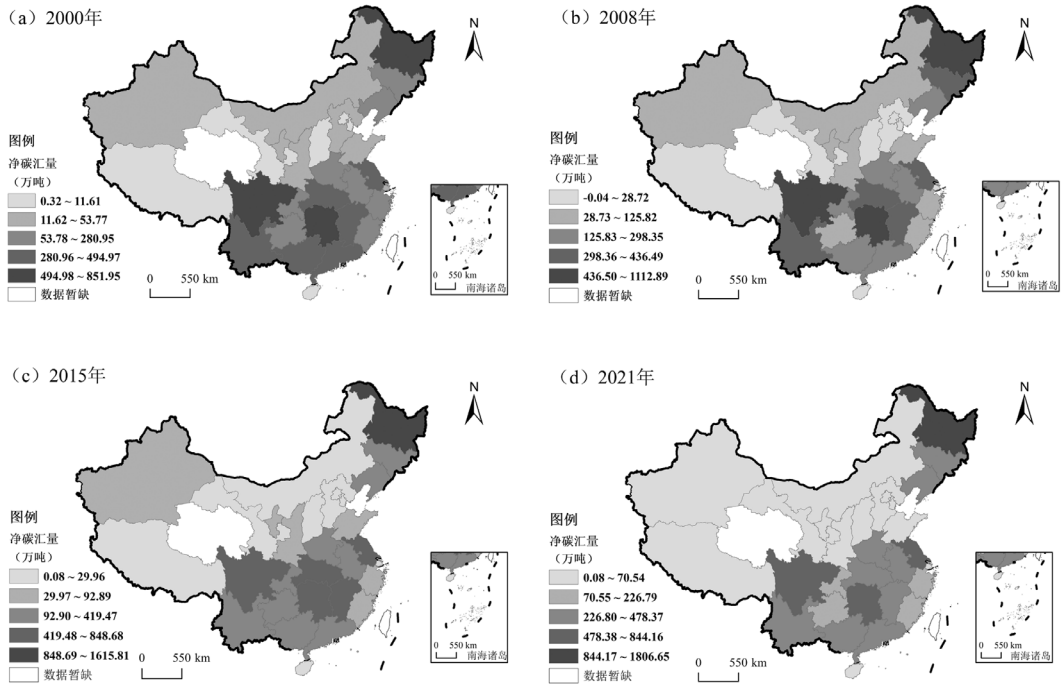


图 3　2000、2008、2015、2021 年水稻生产净碳汇量省际分布

Fig.3　Interprovincial distribution of net carbon sinks in rice production in 2000, 2008, 2015 and 2021

审图号:GS(2024)0650 号

2.3　空间自相关检验

2.3.1　全局空间自相关性检验　借助 ArcGIS 8.0 软件,利用全局空间自相关性方法测算 2000~2021 年中国水稻生产净碳汇的莫兰指数统计值,相关结果如表 4 所示.

表 4　2000~2021 年水稻生产净碳汇量全局莫兰指数

Table 4　Global moran index of net carbon sinks in rice production, 2000~2021

年份	Moran'*I*	*Z*	*P*	年份	Moran'*I*	*Z*	*P*
2000	0.210***	3.196	0.001	2011	0.112**	2.088	0.037
2001	0.209***	3.183	0.001	2012	0.113**	2.125	0.034
2002	0.177***	2.745	0.006	2013	0.102**	2.004	0.045
2003	0.224***	1.850	0.001	2014	0.108**	2.097	0.036
2004	0.189***	2.918	0.004	2015	0.113**	2.212	0.034
2005	0.194***	2.968	0.003	2016	0.111**	2.213	0.033
2006	0.161***	2.270	0.010	2017	0.107**	2.089	0.037
2007	0.140**	2.348	0.019	2018	0.104**	2.010	0.044
2008	0.137**	2.323	0.020	2019	0.104**	2.018	0.044
2009	0.136**	2.305	0.021	2020	0.096*	1.960	0.050
2010	0.114**	2.212	0.037	2021	0.100*	1.971	0.050

注:*,**,***分别表示在10%,5%,1%条件下的显著性.

从显著性水平来看,2000~2021 年,中国水稻生产净碳汇的 Moran'*I* 指数在 1%、5%和 10%显著性水平下均通过了检验,显示研究期内中国水稻生产净碳汇呈现显著的空间集聚特征,且水稻生产净碳汇存在较强的空间外部性.高净碳汇区对周边地区净碳汇水平的提升具有促进作用.

从数值变化来看,尽管 Moran' *I* 指数有所波动,但整体呈现下降趋势,从 2000 年的 0.210 下降至 2021 年的 0.100.2000~2010 年为第一阶段,Moran' *I* 指数持续下降,从 0.210 降至 0.114,累计下降 45.71%;2010~2021 年为第二阶段,指数在 0.114~0.096 之间轻微波动下降.这一变化可能受到水稻种植技术、种植结构及气候变化等多种因素的影响.一方面,不同区域的自然条件对水稻生产净碳汇的影响差异显著,自然条件的空间异质性维持了空间集聚效应;另一方面,随着城市化进程加快,东南沿海部分地区耕地被占用,水稻种植面积减少,而东北地区水稻种植面积和产量显著增加,水稻产业的空间转移使得水稻生产净碳汇的空间布局趋于分散,总体空间集聚效应减弱.此外,技术发展促进了水稻种植技术向周边地区的扩散,传统水稻主产区的相对优势减弱,生产受自然环境的影响逐渐降低,导致整体集聚效应进一步减弱.

2.3.2　局部空间自相关性检验　全局自相关检验仅能分析整个研究区内水稻生产净碳汇量的空间

自相关性,但无法揭示其局部空间自相关性.通过 ArcGIS 8.0 软件,以 4 个代表年份为例,利用局部莫兰指数方法计算各省份水稻生产净碳汇的莫兰指数值,并将 30 个省份的空间集聚特征划分为高—高集聚(H-H)、低—低集聚(L-L)、高—低集聚(H-L)、低—高集聚(L-H)4 种类型(图 4).

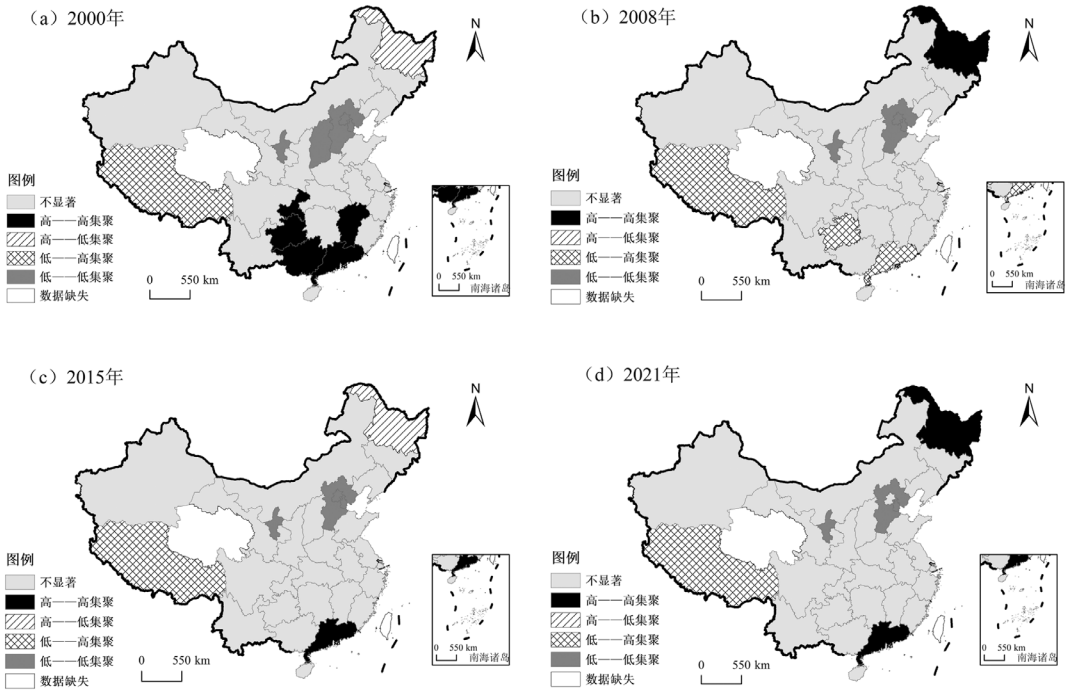


图 4 2000 年、2008 年、2015 年、2021 年水稻生产净碳汇量 LISA 聚类

Fig.4 LISA cluster plot of net carbon sinks in rice production in 2000、2008、2015、2021

审图号:GS(2024)0650 号

总体而言,中国水稻生产净碳汇在空间上具有一定的局部自相关性.研究期间,水稻生产净碳汇的空间分布格局有所变化,集聚区面积有所减少,但正相关依然占主导地位,四种类型的集聚区占比总体保持稳定.2000 年,H-H 集聚区分布在重庆、贵州、广西、江西、广东,这些省份处于亚热带季风区,水热条件佳,适宜水稻生长;L-L 集聚区分布在宁夏、山西、河北、天津、北京,北方省份水资源匮乏,水稻生产自然条件受限.到 2008 年,H-H 集聚区重心由西南地区转移至黑龙江,黑龙江水稻生产净碳汇的占比大幅度提升,L-L 集聚区减少了山西,基本保持稳定.2015 年,H-H 集聚区由黑龙江暂时转变为广东省,L-L 集聚区保持稳定.2021 年,H-H 集聚区分布在黑龙江和广东,两大集聚区形成,L-L 集聚区减少了北京,依然基本保持稳定.由此可以看出,H-H 集聚区重心逐渐从华南、西南地区向东北地区转移,这意味着整个东北地区净碳汇量普遍增加.相反,东南、西南地区净碳汇量上升趋势不明显.东北地区土壤肥沃,夏秋季节受海洋炽热湿气影响,气温高热,雨水充沛,为水稻生产提供了极佳的自然环境.“十四五”以来,国家大力支持东北地区水稻种植业发展,推行现代化水稻生产技术,为水稻生产减排增汇提供了政策支持和技术保障.L-L 集聚区主要分布在西北和华北地区,这些地区气候较为干旱,生态脆弱,自然环境本身不适宜水稻生长,水稻生产净碳汇总量较小.

2.4 水稻生产净碳汇动态演进

为进一步揭示水稻生产净碳汇中心的迁移轨迹,利用 ArcGIS 8.0 计算了 2000、2008、2015 和 2021 年四个代表年份的水稻生产净碳汇平均中心及标准差椭圆(图 5).从椭圆方向角度来看,2000~2021 年间,方向角变化范围为 45.45°~50.31°,椭圆边界逐渐向东北方向移动,显示出水稻生产净碳汇重心向东北的迁移趋势.从中心移动轨迹来看,水稻生产净碳汇中心总体呈现由西南向东北迁移的趋势,2000~2021 年间,中心向东北累计移动 418km,平均移动速度为 19.9km/a.这一变化主要归因于近年来东北地

区水稻产值的增加,导致整体水稻生产净碳汇中心　　向东北方.

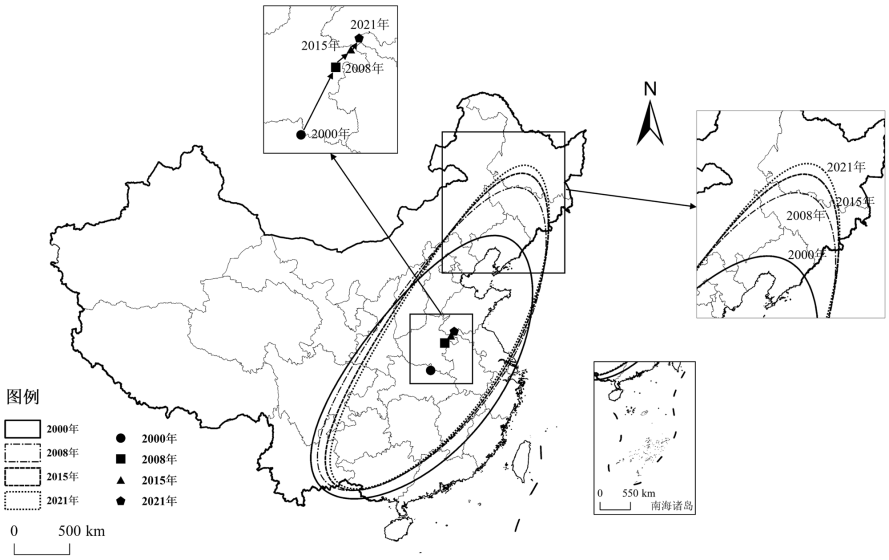


图 5　水稻生产净碳汇的动态演进(标准差椭圆分析)

Fig.5　Dynamic evolution of net carbon sequestration in rice production (standard elliptical deviation analysis)

审图号:GS(2024)0650 号

2.5　水稻生产净碳汇与经济增长的耦合协调度分析

水稻生产净碳汇主要反映水稻生产过程对大气温室气体的吸收能力,而水稻产值则更多体现水稻生产的经济价值.水稻净碳汇的变化不直接等同于水稻产值的增减.根据公式,对 2000~2021 年中国 30 个省份水稻生产净碳汇量与水稻产值的耦合协调度进行了测算(图 6),并明确了各自对应的类型.由于篇幅有限,仅列出 2000 年和 2021 年的耦合协调类型(表 5).

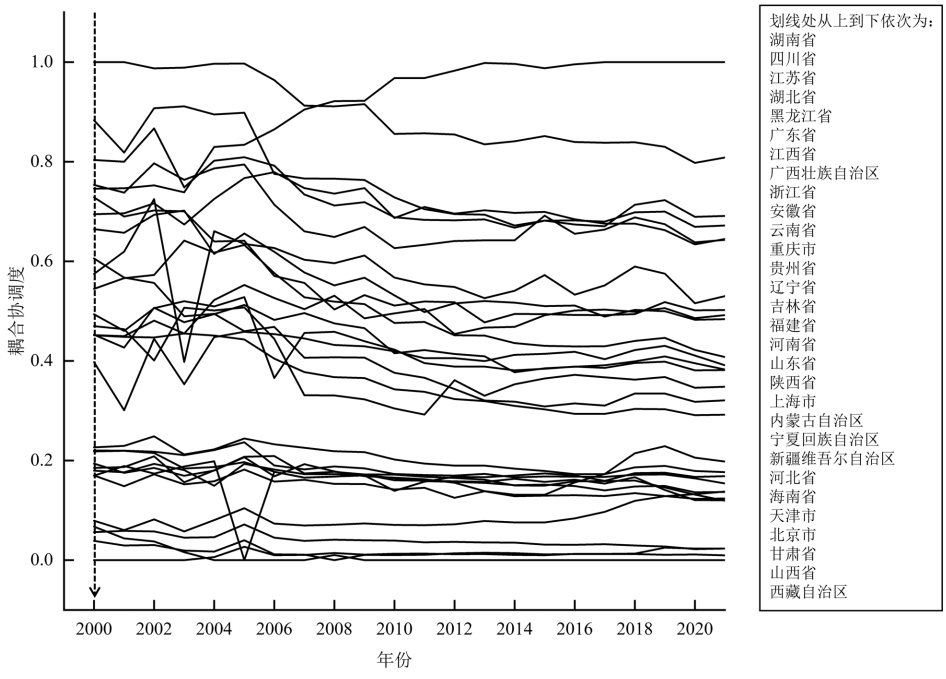


图 6　2000~2021 年全国 30 个省份耦合协调度变化趋势

Fig.6　Trend of coupling and co scheduling changes in 30 provinces in China from 2000 to 2021

由图 5 可知,总体而言,研究期间黑龙江省的耦合协调度上升趋势显著,而湖南、浙江等省份则呈显著下降趋势,其他大部分省份保持相对平稳或略微下降.具体到年份,2000 年实现水稻生产净碳汇与水稻产值优秀协调的省份有 3 个,分别是湖南(1.00)、四川(0.88)和江苏(0.80);实现良好协调的省份有 6 个,分别是湖北(0.75)、黑龙江(0.75)、广东(0.73)、江西(0.69)、广西(0.66)和浙江(0.61).这些省份在基期就表现出水稻生产净碳汇与水稻产值的同步增长,说明它们在水稻生产和生态管理方面实现了良好的平衡.与 2000 年相比,2021 年大部分省份的耦合协调度均有所下降.实现优秀协调的省份为黑龙江(1.00)和湖南(0.81),实现良好协调的省份为江苏(0.69)、四川(0.67)、江西(0.64)和湖北(0.64).需要注意的是,北京、天津和河北等 14 个省份在基期和研究期均表现出净碳汇与水稻产值的严重失调,其余省份则处于初级协调或初级失调状态.综合来看,研究期内东北地区水稻生产净碳汇量和产值不断上升,而其他地区净碳汇量和产值的上升幅度较小甚至下降,导致全国范围内水稻生产净碳汇与产值的综合耦合协调度有所下降.

表 5 2000 年和 2021 年 30 个省份耦合协调度分类

Table 5 Classification of coupling coordination degree among 30 provinces in 2000 and 2021

协调类型	2000 年	2021 年
优秀协调	湖南(1.00)四川(0.88)江苏(0.80)	黑龙江(1.00) 湖南(0.81)
良好协调	湖北(0.75)黑龙江(0.75)广东(0.73)江西(0.69)广西(0.66)浙江(0.61)	江苏(0.69) 四川(0.67)江西(0.64) 湖北(0.64)
初级协调	安徽(0.57)云南(0.54)	安徽(0.53) 广东(0.50)
初级失调	重庆(0.49)贵州(0.47)辽宁(0.45)吉林(0.45)福建(0.45)河南(0.40)	吉林(0.49)广西(0.48)云南(0.41)河南(0.39)辽宁(0.38)重庆(0.38 贵州(0.35)浙江(0.32)
严重失调	山东(0.23)陕西(0.22)上海(0.22)内蒙古(0.19)宁夏(0.19)新疆(0.18)河北(0.17)海南(0.17)天津(0.08)北京(0.07)甘肃(0.06)山西(0.04)西藏(0.00)	福建(0.29)内蒙古(0.20)山东(0.18)海南(0.17)陕西(0.15)天津(0.14)上海(0.14)河北(0.12)新疆(0.12)宁夏(0.12)甘肃(0.02)山西(0.02)西藏(0.01)北京(0.00)

为了更直观地展示各省份间水稻生产净碳汇与水稻产值耦合协调发展的空间分布特征,使用 ArcGIS 8.0 软件,选取 4 个代表年份绘制了 30 个省份的耦合协调分布(图 7).

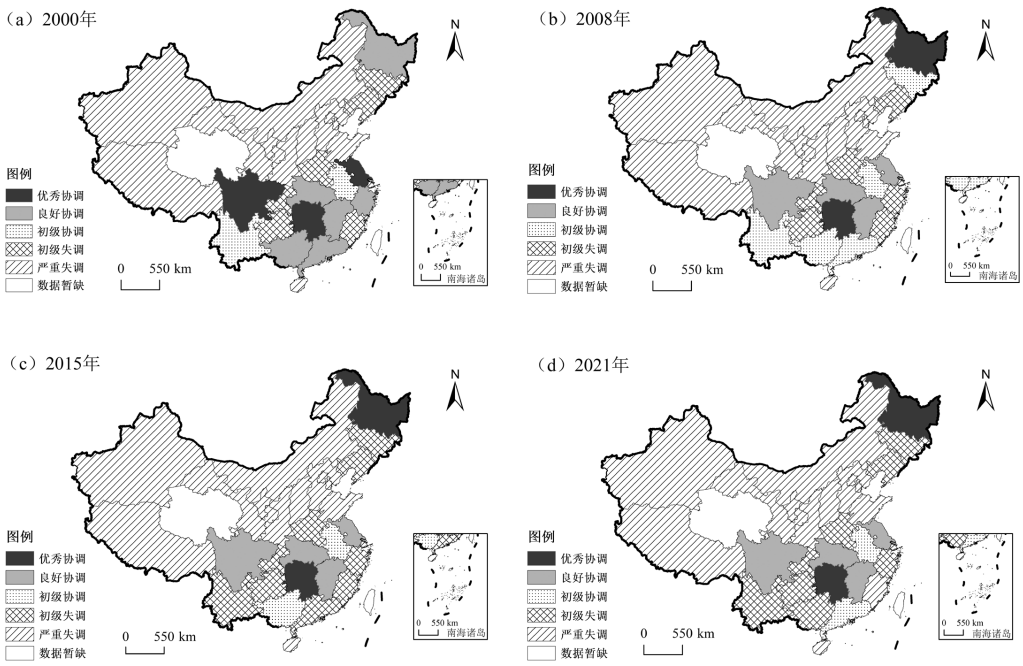


图 7 主要年份 30 个省份耦合协调度空间分布范围

Fig.7 Spatial distribution range of coupling coordination degree among 30 provinces in major years

审图号:GS(2024)0650 号

由图 7 可见,中国 30 个省份水稻生产净碳汇与水稻产值的耦合协调度总体呈现东高西低的特点,以及由沿海向内地递减的空间分布格局,这与我国水稻重点省份的分布呈正相关.具体来看,2000 年,全国有 3 个省份处于优秀协调状态,6 个省份处于良好协调状态,2 个省份处于初级协调状态,6 个省份处于初级失调状态,13 个省份处于严重失调状态.到 2008 年,各省的耦合协调度整体保持平稳,达到优秀协调的省份有 2 个,处于良好协调或初级协调的有 9 个,处于初级失调和严重失调的省份分别为 6 个和 13 个.到 2015 年,各省的耦合协调度差距拉大,黑龙江(0.99)和湖南(0.85)实现了净碳汇与水稻产值的优秀耦合,湖北(0.69)等 6 个省份处于良好协调或初级协调状态,初级失调和严重失调的省份分别为 9 个和 13 个.到 2021 年,整体耦合协调度有所提升,但未达到研究初期的水平.优秀协调的省份为黑龙江(1.00)和湖南(0.85),达到良好协调或初级协调的省份有 6 个,另外 22 个省份处于初级失调或严重失调状态.总体而言,研究期间,全国 30 个省份水稻生产净碳汇与水稻产值的整体耦合协调度经历了“先下降,后上升”的趋势,并且各省份差距逐步拉大,耦合协调度最好的省份从华中地区逐步转移到东北地区.

2.6　基于传统脱钩模型的水稻生产净碳汇与经济增长的耦合状态

2.6.1　全国总体情况　2000 年,全国水稻产值仅为 1 732.49 亿元;到 2021 年,该数值增至 5 427.45 亿元,22a 间水稻产值增长了 213.27%,年均增幅为 3.37%.基于 Tapio 脱钩弹性计算公式,得出 2000 年至 2021 年中国水稻生产净碳汇量与水稻产值之间的耦合指数,其耦合状态如表 6 所示.

从表 6 可以看出,研究期间我国 30 个省份水稻生产净碳汇与水稻产值之间的耦合状态整体上以有利耦合为主,且耦合效果逐渐理想.2003 年以前,整体耦合状态较不理想,以强负耦合和衰退负耦合为主,说明该时段内水稻生产的环境效益或经济效益的增长均不太显著.原因可能在于该时期水稻生产技术相对落后,化肥和农药的使用虽然一定程度上增加了水稻的产量,但其引起的碳排放反而加剧了环境的压力;此外,由于粮食价格较低,农民的生产积极性不高,进而影响到水稻的经济产值.随着时间的推移,耦合状态开始好转.2003 年至 2016 年,耦合状态以扩张耦合和弱耦合为主,少数年份呈现出强负耦合,说明该时段内虽然净碳汇和水稻产值有所波动,但大部分年份实现了水稻生产净碳汇与水稻产值之间的有利同向增长,环境效益开始显现.该时段内水稻种植技术得到了迅速地发展,农药、化肥的施用过程也更为科学合理,显著提升了水稻生产的效率和净碳汇能力;此外,政府政策的扶持和人民生活水平的提升,使越来越多的人开始关注到绿色生产的重要性,这也极大地促进了水稻生产的可持续发展.2017 年至 2019 年经历了耦合调整期,该时段内受粮价调整影响,水稻价格出现波动,导致水稻产值有所下降,但得益于较为成熟的水稻生产技术和农业供给侧结构性改革措施,净碳汇依旧保持总体上升趋势;2019 年之后,随着生产技术的不断深化以及政策的持续推动,水稻生产的净碳汇能力和经济效益得到进一步提升,水稻净碳汇与水稻产值实现扩张耦合,净碳汇与水稻产值实现同步正向增长,且净碳汇增速明显快于水稻产值.

表 6　2000~2021 年全国水稻净碳汇的耦合情况

Table 6　Coupling situation of net carbon sink of rice in China from 2000 to 2021

年份	水稻净碳汇量变化率	水稻产值变化率	耦合指数	耦合状态
2000~2001	−0.09	−0.05	1.59	衰退负耦合
2001~2002	−0.04	−0.02	1.84	衰退负耦合
2002~2003	−0.13	0.02	−8.01	强负耦合
2003~2004	0.16	0.12	1.38	扩张耦合
2004~2005	−0.01	0.43	−0.03	强负耦合
2005~2006	0.01	0.01	1.65	扩张耦合
2006~2007	0.05	0.21	0.24	弱耦合
2007~2008	0.06	−0.04	−1.67	强耦合
2008~2009	0.05	0.19	0.25	弱耦合
2009~2010	−0.00	0.07	−0.05	强负耦合
2010~2011	0.05	0.15	0.33	弱耦合
2011~2012	0.03	0.18	0.20	弱耦合
2012~2013	−0.01	0.08	−0.18	强负耦合
2013~2014	0.03	0.04	0.64	弱耦合
2014~2015	0.02	0.01	1.30	扩张耦合
2015~2016	−0.01	−0.01	1.76	衰退负耦合
2016~2017	0.02	−0.01	−1.56	强耦合
2017~2018	0.00	−0.09	−0.01	强耦合
2018~2019	−0.00	−0.01	0.23	弱负耦合
2019~2020	0.02	0.02	1.38	扩张耦合
2020~2021	0.02	0.01	1.59	扩张耦合

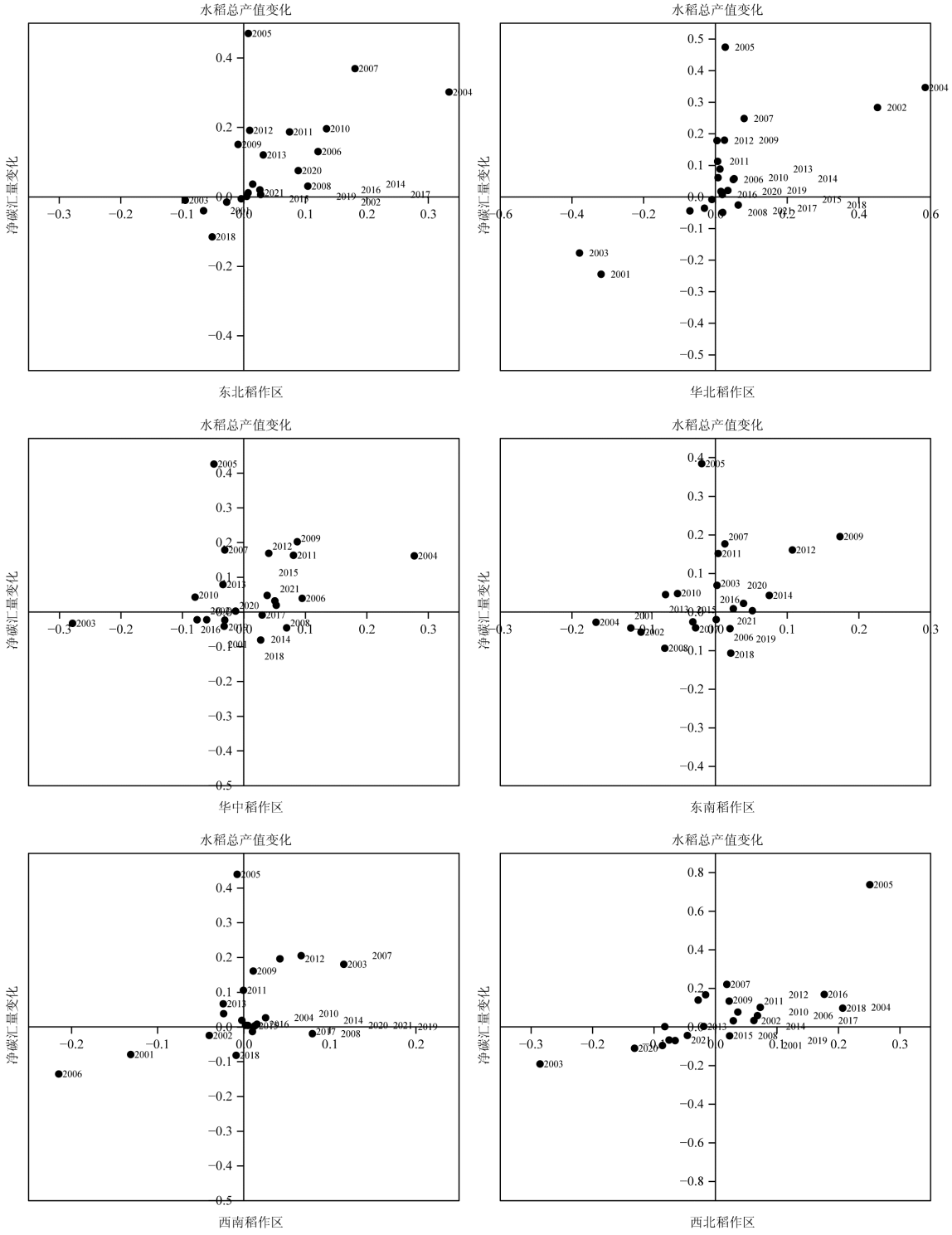


图 8 2000~2021 年六大稻作区水稻净碳汇的耦合情况

Fig.8 Coupling of net carbon sink of rice in six major rice growing areas from 2000 to 2021

2.6.2 六大稻作区情况 由图 8、图 9 可见,从整体情况来看,研究期间六大稻作区的耦合状况良好,与全国总体水平基本保持一致.研究初期,各稻作区均以衰退负耦合和强负耦合为主,研究中期,耦合状态表现为强耦合、弱耦合、增长耦合和强负耦合交替出现.近年来,以增长耦合和扩张耦合为主导.其中,东北稻作区和东南稻作区的耦合结果最为理想,近年来已经总体实现水稻生产环境效益和经济效益的同步正向增长,并且环境效益增长速度远大于经济效益.这得益于先进的水稻生产技术

和良好的生态环保措施,精准农业技术和绿色种植模式的推广提高了水稻生产的效率,水稻产量和净碳汇总量明显提升,《东北地区水稻生产技术指导意见》和《黑龙江省稻谷生产者补贴工作实施方案》则为水稻生产提供了政策支持.华北稻作区和西南稻作区的整体耦合结果较为理想,近年来也已基本实现净碳汇与水稻产值的同步正向增长.这可能得益于粮食最低收购价政策和耐旱水稻品种的推广.华中稻作区和西北稻作区的耦合结果较不理想,近年来大部分年份依旧表现为净碳汇或水稻产值或两者共同的负增长.相对于其他地区,华中稻作区的政策扶持力度较弱,且技术的推广提高了水稻生产的总体效率,导致华中地区传统的水稻生产优势减弱,水稻生产经济效益不高.西北稻作区则生态较为脆弱,本身自然条件不适宜水稻生长,产值占比较低.

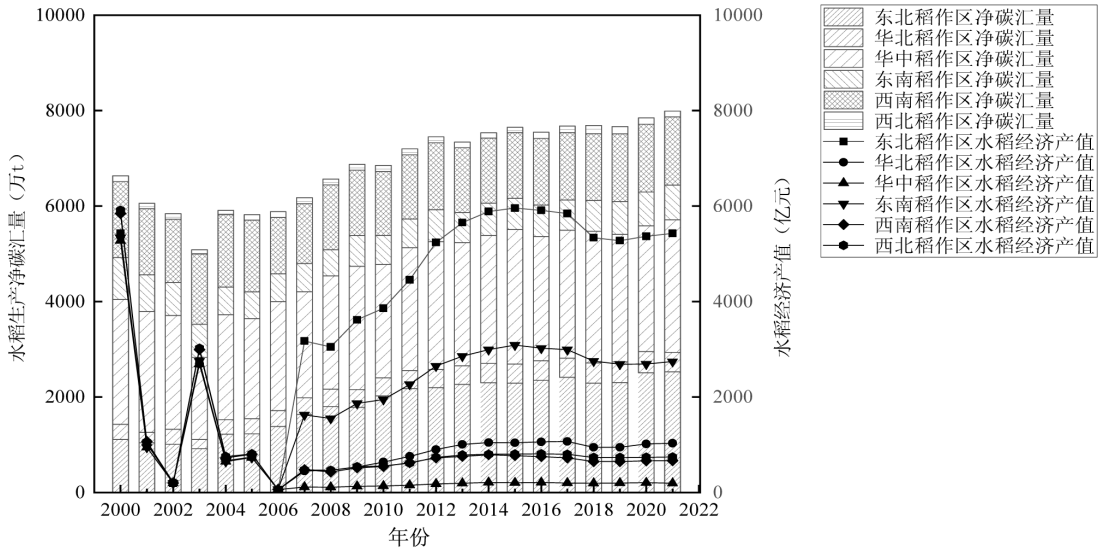


图 9　2000~2021 年六大稻作区水稻生产净碳汇量与水稻产值变化趋势

Fig.9　Trend of net carbon sink in rice production and agricultural economic output value in six major rice growing areas 2000~2021

2.6.3　各省具体情况　水稻生产净碳汇与水稻产值的耦合状态与水稻种植技术、资源利用效率、地域和生态环境等多种因素息息相关,并且受到农业政策和补贴机制的影响.为了更清晰地探究各阶段水稻生产净碳汇耦合状态的空间分布,使用 ArcGIS 8.0 软件,由图 10 可见,虽然各个省份之间的耦合状态存在明显差异,但 30 个省份的总体耦合状态明显好转.2000~2001 年,30 个省份中有 8 个省份处于衰退耦合状态,3 个省份处于强负耦合状态,仅有 4 个省份处于增长耦合或者扩张耦合状态,且主要为非水稻主产省份,水稻主产省份耦合状态不佳;2008~2009 年,仅有两个省份处于最理想的增长耦合或扩张耦合状态,有 19 个省份处于弱耦合状态,说明虽然大部分省份未达到最理想的增长模式,但已经处于水稻产值与净碳汇同向增长的较为理想状态;2015~2016 年,处于增长耦合或扩张耦合的省份增长到了 16 个,处于衰退耦合或弱负耦合的省份仅为 3 个,全国水稻主产省份基本上实现环境效益与经济效益的同步增长;2020~2021 年,全国有 19 个省份处于最为理想的增长耦合或扩张耦合状态,耦合趋势进一步优化.从空间分布上来看,耦合结果最好的省份由西部非水稻主产省份逐渐向中东部水稻主产省份转移,说明在研究期内,我国水稻主产省份净碳汇和水稻产值耦合结果得到了大幅度的提升.以黑龙江为例,黑龙江作为水稻种植强省,近年来积极响应国家提高粮食生产能力和生态保护的号召,加大了水稻种植技术的研发和推广力度,进行低耗能、低排放的水稻生产,随着市场对绿色有机农产品的需求增加,黑龙江大米因良好的生态和品质受到消费者的青睐,进一步推动了水稻产值的提升,实现经济效益和环境效益的同步增长.

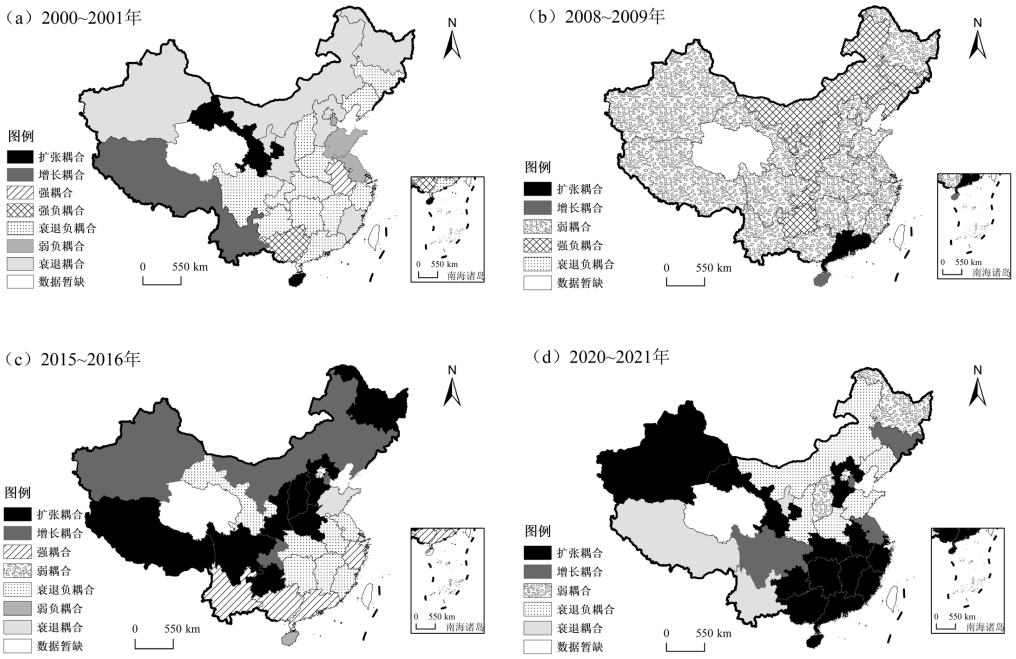


图 10 主要年份水稻生产净碳汇与水稻产值耦合状态的空间分布

Fig.10 Spatial distribution diagram of the coupling coordination between net carbon sink of rice production and agricultural economic output value in major years

审图号:GS(2024)0650 号

2.7 政策建议

加强水稻生产碳汇管理,建立区域协同机制.①制定区域差异化政策:我国水稻生产净碳汇能力存在明显的区域差异,特别是“东高西低”的特征.因此,应根据不同区域的实际情况,制定差异化政策.对黑龙江等高值核心区域和湖南、四川等副核心区域,应重点巩固和提升其净碳汇能力;而对华北和西北等低值区域,则可通过技术转移和资金扶持等措施缩小差距.②建立省际合作和监督机制:各省在优化自身水稻生产模式和要素投入结构的同时,应关注邻近地区的减排政策,通过建立省际监督约束机制,协同推进水稻生产的“减排增汇”目标.③推进城乡统筹协调发展:政府应发挥导向作用,推动水稻生产的企业化经营和乡镇一体化发展规划,优化农村经济环境,增加就业机会,鼓励农村人口回流,加快农业技术创新与人才引进,促进城镇化进程与低碳农业的协调发展.

推广现代化农业生产技术,推动水稻生产绿色转型.①加强技术推广:探索更高效的水稻种植模式,推广优良品种及配套技术,优化农药和化肥的使用方式,提高灌溉和翻耕效率,提升水肥利用率,推动水稻生产模式向集约型转变.②发展智能化农业:推动物联网、大数据、人工智能等技术在水稻生产中的应用,推动精准农业管理,提高水稻生产效率.③加强技术培训与示范:加强对稻农的技术培训,开展低碳学堂,建立现代化农业技术示范基地,提升稻农的环保意识和种植水平.

挖掘水稻生产净碳汇价值,促进环境与经济耦合发展.①建立健全碳汇交易市场和价格形成机制:探索将水稻碳汇交易纳入碳汇交易系统,丰富碳汇交易范围,为水稻生产创造更多经济价值;同时完善碳汇价格形成机制,为水稻碳汇提供公开透明的交易平台,推动水稻净碳汇和水稻产值的深度融合和协同发展.②建立生态补偿机制:建立跨区域的生态补偿机制,对净碳汇高值区进行生态补偿,鼓励其持续提升碳汇能力;对低值区则提供资金和技术支持,改善水稻生产条件,实现各区域水稻生产经济效益和生态效益的双赢.

3 结论

3.1 中国水稻生产净碳汇总体呈波动上升趋势,但在不同区域和省份之间存在明显的空间差异特征,基本表现为东高西低的特点.研究期间,水稻生产重心逐渐向东北转移,到 2021 年,全国水稻生产

净碳汇量形成了以黑龙江为高值核心,以湖南、四川、江苏为高值副核心,净碳汇总量逐渐向外递减的空间格局.

3.2　中国水稻生产净碳汇量存在一定的空间关联性.研究期间,全局莫兰指数以 2010 年为界,呈现“持续下降—波动平缓”两阶段变化特征,空间集聚效应趋于减弱.局部空间自相关始终以正相关为主导,四种类型的集聚区占比总体保持稳定.高值区重心由华南、西南地区逐渐向东北地区转移;低值区则主要分布在西北地区和华北地区.水稻生产净碳汇中心由西南向东北迁移.

3.3　中国 30 个省份水稻生产净碳汇和水稻产值的整体耦合协调度经历了先下降,后上升的趋势,耦合协调度总体呈现东高西低的特点以及由沿海向内地递减的空间分布格局,并且各省份差距逐步拉大,耦合协调度最好的区域从华中地区逐步转移到东北地区.

3.4　中国 30 个省份水稻生产净碳汇与水稻产值之间的耦合状态整体上以有利耦合为主,且耦合效果逐渐理想.各个稻作区的耦合状态有所差异,以东北稻作区和东南稻作区的耦合效果最为理想;水稻主产省份的耦合状况明显好转.

参考文献:

[1] 刘立涛,刘晓洁,伦　飞,等.全球气候变化下的中国粮食安全问题研究 [J]. 自然资源学报, 2018,33(6):927-939.
Liu L T, Liu X J, Lun F, et al. Research on China's Food Security under Global Climate Change Background [J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(6):927-939.

[2] 王巧玲,李双成.云南省碳排放时空演变特征及影响因素分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(1):528-537.
Wang Q L, Li C S. Dynamics of carbon emissions in Yunnan Province:Spatiotemporal characteristics and influencing factors [J]. China Environmental Science, 2025,45(1):528-537.

[3] Zhu E , Deng J , Wang H ,et al.Identify the optimization strategy of nitrogen fertilization level based on trade-off analysis between rice production and greenhouse gas emission [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,239:118060.

[4] 杨　果,陈　瑶.中国农业源碳汇估算及其与农业经济发展的耦合分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016,26(12):171-176.
Yang G, Chen Y. China’s agriculture carbon sink estimation and its coupling analysis with agricultural economy development [J]. China Population, Resources and Environment, 2016,26(12):171-176.

[5] 田　云,尹忞昊.中国农业碳排放再测算:基本现状、动态演进及空间溢出效应 [J]. 中国农村经济, 2022,(3):104-127.
Tian Y, Yin M H. Re-evaluation of China’s agricultural carbon emissions: basic status, dynamic evolution and spatial spillover effects [J]. Chinese Rural Economy, 2022,(3):104-127.

[6] 田成诗,陈　雨.中国省际农业碳排放测算及低碳化水平评价—基于衍生指标与 TOPSIS 法的运用 [J]. 自然资源学报, 2021,36(2):395-410.
Tian C S, Chen Y. China's provincial agricultural carbon emissions measurement and low carbonization level evaluation: Based on the application of derivative indicators and TOPSI [J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(2):395-410.

[7] 胡永浩,张昆扬,胡南燕,等.中国农业碳排放测算研究综述 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023,31(2):163-176.
Hu Y H, Zhang K Y, Hu N Y, Wu L P. Review on measurement of agricultural carbon emission in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023,31(2):163-176.

[8] 何艳秋,陈　柔,吴昊玥,等.中国农业碳排放空间格局及影响因素动态研究 [J]. 中国生态农业学报, 2018,26(9):1269-1282.
He Y Q, Chen R, Wu H Y, Xu J, Song Y. Spatial dynamics of agricultural carbon emissions in China and the related driving factors [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018,26(9):1269-1282.

[9] 高晨曦,卢秋萍,欧年青,等.“双碳”目标下河南省农业碳排放影响因素及预测研究 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022,30(11):1842-1851.
Gao C X, Lu Q P, Ou N Q, et al. Research on influencing factors and prediction of agricultural carbon emission in Henan Province under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality goal [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022,30(11):1842-1851.

[10] 卢奕亨,田　云,周丽丽.四川省农业碳排放时空演变特征及其影响因素研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2023,44(11):1-14.
Lu Y H, Tian Y, Zhou L L. Spatial-temporal evolution and influencing factors of agricultural carbon emissions in Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023,44(11):1-14.

[11] 陈罗烨,薛　领,雪　燕.中国农业净碳汇空间集聚与分异 [J]. 生态环境学报, 2015,24(11):1777-1784.
Chen L Y, Xue L, Xue Y. Spatial agglomeration and variation of China’s agricultural net carbon sink [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015,24(11):1777-1784.

[12] 李　强,高　威,魏建飞,等.中国耕地利用净碳汇时空演进及综合分区 [J]. 农业工程学报, 2022,38(11):239-249.
Li Q, Gao W, Wei J F, et al. Spatiotemporal evolution and comprehensive zoning of net carbon sink in cultivated land use in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(11):239-249.

[13] 李园园,薛彩霞,柴朝卿,等.中国保护性耕作净碳汇的时空分异特征及其驱动力 [J]. 中国人口·资源与环境, 2022,32(10):15-23.
Li Y Y, Xue C X, Chai C Q, et al. Spatiotemporal variation and driving forces of net carbon sink of conservation tillage in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2022,32(10):15-23.

[14] 贯　君,张少鹏,任　月,等.中国农业净碳汇时空分异与影响因素演进分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):1158-1170.
Guan J, Zhang S P, Ren Y, et al. Random forest model-assisted evaluation of spatiotemporal differentiation of China’s agricultural net carbon sink and evolution of influencing factors [J]. China Environmental Science, 2024,44(2):1158-1170.

[15] 谢永浩,刘　争.中国省域种植业碳汇量、碳排放量的时空分异及公平性研究 [J]. 世界农业, 2022,(2):100-109.
Xie Y H, Liu Z. Study on the temporal and spatial differentiation and equity of carbon sink and carbon emission of China’s provincial planting industry [J]. World Agriculture, 2022,(2):100-109.

[16] 石志恒,王瑞霞.中国农业现代化与碳排放效率的耦合协调关系研

究 [J]. 干旱区资源与环境, 2024,38(8):1-12.
Shi Z H, Wang R X. Research on the coupling coordination relationship between agricultural modernization and carbon emission efficiency in China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024,38(8):1-12.

[17] 田 云,卢奕亨.中国省域新型城镇化与农业碳排放效率的耦合协调关系 [J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2023,(4):33-46.
Tian Y, Lu Y H. Coupling Coordination Between New-type Urbanization and Agricultural Carbon Emission Efficiency in China's Provinces [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2023,(4):33-46.

[18] 吴昊玥,孟 越,黄瀚蛟,陈文宽.中国耕地利用净碳汇与农业生产的时空耦合特征 [J]. 水土保持学报, 2022,36(5):360-368.
Wu H Y, Meng Y, Huang H J, et al. Spatiotemporal coupling between the net carbon sequestration of cropland use and agricultural production in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5):360-368.

[19] 曹昱亮,倪 珣,巩红禹.长江经济带农业碳排放影响因素及脱钩效应 [J/OL]. 环境科学:1-18[2024-05-31].
Cao Y L, Ni X, Gong H Y. Influencing factors and decoupling effects of agricultural carbon emissions in the Yangtze river economic belt [J/OL]. Environmental Science:1-18[2024-05-31].

[20] Blengini G A , Busto M .The life cycle of rice: LCA of alternative agri-food chain management systems in Vercelli (Italy) [J]. Journal of Environmental Management, 2009,90(3):1512-1522.

[21] 王 兴,赵 鑫,王钰乔,等.中国水稻生产的碳足迹分析 [J]. 资源科学, 2017,39(4):713-722.
Wang X, Zhao X, Wang Y Q, et al. Assessment of the carbon footprint of rice production in China [J]. Resources Science, 2017,39(4):713-722.

[22] 曹黎明,李茂柏,王新其,等.基于生命周期评价的上海市水稻生产的碳足迹 [J]. 生态学报, 2014,34(2):491-499.
Cao L M, Li M B, Wang X Q, et al. Life cycle assessment of carbon footprint for rice production in Shanghai. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(2):491-499.

[23] 姜超强,刘炎红,徐海清,等.烟-稻轮作区不同种植模式碳汇效应及经济效益评价 [J]. 中国烟草学报, 2023,29(4):44-53.
Jiang C Q, Liu Y H, Xu H Q, et al. Evaluation on carbon sink and economic benefit of different cropping systems in tobacco-rice rotation region [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2023,29(4):44-53.

[24] 唐海明,李 超,肖小平,等.不同耕作模式对双季稻田生态系统净碳汇效应及收益的影响 [J]. 生态环境学报, 2020,29(2):215-222.
Tang H M, Li C, Xiao X P, et al. Influences of different tillage on net carbon sink and economic benefit of paddy ecosystem under double-cropping rice field [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(2):215-222.

[25] Qi S, Yang S, Yu W, et al. CO_2 Fluxes Over Water-Saving Paddy Fields with Different Straw Management Methods on the Basis of the Same Amount of Carbon Input [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2024,24(2):2577-2588.

[26] 何如海,张博睿,汪玉芳,等.秸秆还田配施化肥对油-稻轮作土壤固碳及作物经济效益分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2023,32(9): 1981-1991.
He R H, Zhang B R, Wang Y F, et al. Effects of Combining Returning Straw to Field and Applying Chemical Fertilizer on Soil Carbon Fixation and Economic Benefit in Rape-Rice Rotation Crops [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(9): 1981-1991.

[27] 路 壹,黄 璜,郑华斌,等.水稻生产系统固碳能力与碳足迹研究—以湖南省为例 [J]. 作物研究, 2015,29(3):240-243.
Lu Y, Huang H, Zheng H B, et al. Evaluation of the carbon sequestration capacity and carbon footprints in the rice production systems-a case of Hunan Province [J]. Crop Research, 2015,29(3): 240-243.

[28] 刘天奇,胡权义,汤计超,等.长江中下游水稻生产固碳减排关键影响因素及技术体系 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022,30(4):603-615.
Liu T Q, Hu Q Y, Tang J C, et al. Key influencing factors and technical system of carbon sequest-ration and emission reduction in rice production in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022,30(4):603-615.

[29] 郭长青,王 鑫,曹丹丹.“双碳”背景下水稻生态系统碳中和演化特征与对策研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2023,32(4):809-820.
Guo C Q, Wang X, Cao D D. research on the evolution characteristics and countermeasures of carbon neutralization in rice ecosystem under the background of carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(4): 809-820.

[30] 陈松文,刘天奇,曹凑贵,等.水稻生产碳中和现状及低碳稻作技术策略 [J]. 华中农业大学学报, 2021,40(3):3-12.
Chen S W, Liu T Q, Cao C G, et al. Situation of carbon neutrality in rice production and techniques for low carbon rice farming [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021,40(3):3-12.

[31] 田 云,张俊飚.中国省级区域农业碳排放公平性研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2013,23(11):36-44.
Tian Y, Zhang J B, Fairness research of agricultural carbon emissions between provincial regions in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2013,23(11):36-44.

[32] 郭海红,盖凌云.中国农业碳效应时空分异及驱动机理研究 [J]. 宁夏社会科学, 2021,(5):74-84.
Guo H H, Gai L Y. Research on the spatiotemporal differentiation and driving mechanism of carbon effect in Chinese agriculture [J]. Ningxia Social Sciences, 2021,(5):74-84.

[33] 段华平,张 悦,赵建波,等.中国农田生态系统的碳足迹分析 [J]. 水土保持学报, 2011,25(5):203-208.
Duan H P, Zhang Y, Zhao J B, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011,25(5):203-208.

[34] Luc Anselin L, Local Indicators of Spatial Association [J]. Geographical Analysis, 1995,27(2):93-115.

[35] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. Transport Policy, 2005,12(2):137-151.

作者简介： 周镕基(1978-),男,汉族,湖南永州人,教授,博士,主要从事环境经济学研究.发表论文 100 余篇.zhourongji@hynu.edu.cn.