

中国耕地利用净碳汇时空演进及综合分区

李强^{1,2}, 高威¹, 魏建飞¹, 姜志法³, 张杨^{1,2}, 吕军骁¹

(1. 首都经济贸易大学城市经济与公共管理学院, 北京 100070; 2. 城市群系统演化与可持续发展的决策模拟北京市重点实验室, 北京 100070; 3. 福建工程学院管理学院, 福州 350118)

摘要: 耕地利用净碳汇是影响耕地利用进程的重要因素, 分区优化耕地利用是实现中国农业绿色、可持续发展的有效手段。基于耕地利用碳源-碳汇视角测算了 2005—2020 年中国 31 省(市、区)耕地利用净碳汇量, 利用核密度估计分析其动态演进趋势, 并探究耕地利用净碳排放与农业经济的脱钩效应; 结合脱钩结果和粮食产区进行综合分区优化, 借助灰色模型预测了 2021—2035 年各综合分区的净碳汇量及脱钩状态。结果表明: 1) 研究期内耕地利用净碳汇量呈波动式上升, 年均增速 3.740%, 粮食主产区碳汇能力优于其他粮食产区; 2) 核密度估计显示, 中国耕地利用净碳汇地区差距逐渐缩小, 但仍存在区域发展不均衡, 粮食主产区、产销平衡区和主销区均呈向碳汇高值区的扩散态势; 3) 研究期内耕地利用净碳排放与农业经济脱钩状态主要为强脱钩, 2020 年除北京、上海、广东和海南外, 其他省(市、区)均处于实现经济效益和生态效益协调的综合分区; 4) 预测 2021—2035 年中国耕地利用碳汇能力保持平稳增长, 各综合分区脱钩状态主要为强脱钩。并对全国及各综合分区提出针对性优化策略, 推进实现耕地利用低碳、绿色、高质量发展。

关键词: 土地利用; 碳排放; 净碳汇; 综合分区; 粮食产区; 演进趋势; 核密度估计; 脱钩模型; 灰色预测

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.027

中图分类号: F301.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-11-0239-11

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.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.011 <http://www.tcsae.org>

Li Qiang, Gao Wei, Wei Jianfei, 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 (Transactions of the CSAE), 2022, 38(11): 239-249. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.011 <http://www.tcsae.org>

0 引言

全球温室气体的排放对经济社会发展和生态环境保护带来诸多挑战。耕地利用过程中向环境排放大量温室气体, 根据 IPCC 报告结果, 世界各国的农业活动占全球碳排放量的 13.5% 并有增加趋势, 耕地利用过程导致的碳排放成为全球温室气体增加的重要来源。而耕地资源及其上的农作物具备碳吸收能力, 因此耕地利用具有碳源-碳汇的双重作用。分区考察耕地利用净碳汇不仅能够科学引导耕地利用低碳转型, 而且有助于中国实现“双碳”目标, 推动经济社会高质量发展。

在土地利用碳排放的已有研究中, 着重分析了不同土地类型在利用过程中的碳源和碳汇作用, 对耕地碳效应的测度多采用间接估算法和直接系数法进行核算, 这为耕地利用碳排放的研究夯实了基础^[1-2]。耕地既是碳源又是碳汇, 对耕地碳排放的研究多聚焦于耕地生产过程中产生的碳排放, 主要从耕地利用、作物种植、农田土壤等方面进行测算, 并进一步剖析耕地碳排放空间分布和演进特征^[3-5]。而耕地利用碳效应还包括耕地资源本身及产出物的固碳作用, 即耕地发挥碳汇效应^[6-8]。通过对

耕地碳源和碳汇的综合分析发现, 耕地利用整体呈碳汇功能^[9]。研究区域类型日益丰富, 由区域内部分异向区域间差异转变, 从单一区域向全国范围耕地利用碳效应延展。研究尺度逐渐多元化, 涵盖全国^[10-13]、地区^[14]、省域^[15]、市域^[16]等, 但多数宏观分区采用东中西部等传统分区方式, 难以充分体现耕地生产和利用的区域特征, 使得综合分区研究的重要性凸显。在对耕地碳效应与农业经济关系的研究中, 主要利用 Tapio 脱钩^[11,17]、ECK 模型^[18]等探究耕地利用经济效益与生态效益的协调程度, 结果展示了耕地利用碳源-碳汇的转型效果和趋势。在可持续发展战略的指导下, 部分研究运用 GM 灰色预测模型、幂函数等方法对不同尺度下地区耕地利用碳效应趋势进行预测, 并提出针对性优化策略^[19-20]。当前研究成果对全面了解耕地利用碳效应提供了良好的理论基础, 为“双碳”目标在耕地利用领域的实现提供了重要的现实支撑。但存在以下不足之处: 1) 对全国尺度下耕地利用净碳汇效应研究较少。仅考察耕地利用碳排放难以全面体现耕地的碳效应, 综合考量中国耕地利用净碳汇有助于衡量耕地在“双碳”目标实现过程中的作用。2) 分区方式有待完善。已有研究的耕地利用分区多采用东中西部传统方式, 缺乏立足于粮食产区的综合分区方式对全国不同区域的耕地利用及净碳汇进行精细化分析和优化。

基于此, 本文从碳源和碳汇两方面分析中国 31 省(市、区) 2005—2020 年耕地利用净碳汇的时空特征, 运

收稿日期: 2022-04-26 修订日期: 2022-05-24

基金项目: 教育部哲学社会科学后期资助重大项目(19JHQ013); 首都经济贸易大学青年学术创新团队项目(QNTD202209)

作者简介: 李强, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向为土地科学与资源环境评价等。Email: cq1977@163.com

用核密度估计考察了地区间差异和演进趋势,利用脱钩弹性模型探究了耕地利用净碳汇与农业经济增长的关系,进一步基于脱钩结果和粮食产区对中国各省(市、区)进行耕地利用综合分区分析和优化,并使用 GM(1,1)灰色预测模型对全国和各综合分区的净碳汇量及脱钩趋势进行预测,以期为全国和不同省份的耕地利用实现生态效益与经济效益的协调发展提供理论参考。

1 研究方法数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 耕地利用碳排放测算方法

依据《IPCC 国家温室气体清单指南》^[21],结合国内专家学者的相关研究^[4,22-24],立足中国耕地利用现状,选取耕地生产、农田土壤、水稻种植作为耕地利用碳排放源,采用各类碳源量与碳排放系数的乘积之和测算中国耕地利用碳排放总量,具体计算式如下:

$$E = \sum E_i = \sum T_i \cdot \alpha_i \cdot R_i \quad (1)$$

式中 E 为耕地利用碳排放总量 (t); E_i 为第 i 类耕地碳源的碳排放量 (t); T_i 为第 i 类耕地碳源的数量, α_i 为第 i 类耕地碳源的碳排放系数, R_i 为碳源转换系数。

一是耕地生产碳排放。在农业生产过程中,耕地生产物质投入和农业生产活动所引发的碳排放,包括化肥、农药、农膜、农用柴油、农业灌溉、农地翻耕等直接或间接产生的碳排放,具体碳排放系数见表 1。

表 1 耕地利用碳源碳排放系数

Table 1 Carbon emission coefficient of cultivated land use carbon source

碳源 Carbon source	排放系数 Emission coefficient/ (kg·kg ⁻¹ /kg·hm ⁻²)	参考来源 Reference source
化肥 Fertilizer	0.896	美国橡树岭国家实验室
农药 Pesticide	4.934	
农膜 Mulching films	5.180	南京农业大学农业资源与生态环境研究所 (IREEA)
农用柴油 Agricultural diesel	0.593	联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC)
农业灌溉 Agricultural irrigation	25.000	Dubey 等 ^[25]
农地翻耕 Agricultural land tilling	312.600	中国农业大学生物技术学院

二是农田土壤碳排放。在耕地作物种植过程中,其对土壤表层造成破坏而造成的 N₂O 的溢出效应,主要包括水稻、小麦、玉米、大豆及蔬菜等,本文按增温潜势系数^[14]将 CH₄ 和 N₂O 排放量换算为碳排放当量,具体碳排放系数见表 2。

三是水稻种植碳排放。从全国范围来看,由于水稻种植面积较大,且产生的温室气体量较多,故将稻田产生的 CH₄ 和 N₂O 作为重要碳源之一。碳排放核算结果以碳当量表示,根据 IPCC 评估报告,CH₄ 和 N₂O 的增温潜势效应分别为 25 和 298。具体碳排放系数见表 3。

表 2 农田土壤碳源碳排放系数

Table 2 Carbon emission coefficient of farmland soil carbon source

碳源 Carbon source	排放系数 Emission coefficient/ (kg·hm ⁻²)	备注 Note	转换系数 Conversion factor	参考来源 Reference source
水稻 Rice	210.000	以 CH ₄ 计	25.000	王明星等 ^[26]
	0.240	以 N ₂ O 计	298.000	
小麦 Wheat	1.218	以 N ₂ O 计	298.000	庞军柱等 ^[27] 于克伟等 ^[28]
玉米 Maize	2.532	以 N ₂ O 计	298.000	王少彬等 ^[29]
大豆 Soybean	0.770	以 N ₂ O 计	298.000	熊正琴等 ^[30]
薯类 Potatoes	0.948	以 N ₂ O 计	298.000	邱炜红等 ^[31]
蔬菜 Vegetables	4.210	以 N ₂ O 计	298.000	
油料 Oil	4.210	以 N ₂ O 计	298.000	王智平 ^[32]

表 3 水稻种植碳排放系数

Table 3 Carbon emission coefficient of rice cultivation

碳源 Carbon source	排放系数 Emission coefficient/ (kg·hm ⁻²)	备注 Note	转换系数 Conversion factor	参考来源 Reference source
稻田 Paddy fields	422	以 CH ₄ 计	25.000	高标等 ^[33]
	2.980	以 N ₂ O 计	298.000	

1.1.2 耕地利用碳吸收测算方法

依据《IPCC 国家温室气体清单指南》^[21],结合国内专家学者^[4,23]的相关研究,耕地上的农作物通过光合作用将空气中的碳捕获合成为碳水化合物。对环境中的碳进行吸收和利用,其碳吸收估算式为

$$Z_i = \sum S_i \cdot Q_i = \sum_{i=1}^n S_i \cdot B_i / h_i \quad (2)$$

式中 Z_i 为耕地碳吸收量 (t); S_i 为第 i 种农作物的碳吸收率; Q_i 为第 i 种农作物的生物产量 (t); B_i 为第 i 类农作物产量 (t), h_i 为第 i 类农作物的经济系数。耕地中主要农作物的经济系数和碳吸收率 (表 4) 来源于文献^[24]和《省级温室气体清单编制指南》。

表 4 主要农作物经济系数与碳吸收率

Table 4 Economic coefficient and carbon absorption rate of main crops

农作物类型 Crop type	主要农作物 Main crop	碳吸收率 Carbon absorption rate	经济系数 Economic coefficient
粮食作物 Food crops	水稻	0.414	0.450
	小麦	0.485	0.400
	玉米	0.471	0.400
	薯类	0.423	0.650
	豆类	0.450	0.350
经济作物 Economic crops	花生	0.450	0.430
	油菜	0.450	0.260
	棉花	0.450	0.100
	麻类	0.450	0.830
	甜菜	0.407	0.700
	烟草	0.450	0.830
	蔬菜	0.450	0.650

1.1.3 核密度估计

核密度估计是一种非参数估计方法,能够在一定程度上避免因函数设定而造成的估计误差,常用于估计随

机变量的概率密度^[34]。设随机变量的密度函数为 $f(x)$, x 点的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K \left[\frac{X_i - x}{h} \right] \quad (3)$$

式中 n 为观测值的个数, h 为带宽, $k(\cdot)$ 为核密度函数, 本文采用 Epanechnikov 的核密度。带宽用来控制估计密度的平滑程度, 应满足以下 $\lim_{N \rightarrow \infty} h(n) = 0$ 和 $\lim_{n \rightarrow \infty} nh(H) = N \rightarrow \infty$ 。

1.1.4 脱钩指数计算公式与脱钩类型

脱钩理论用于分析经济增长与资源消耗或环境污染之

间的关系。脱钩指数用于衡量碳排放量变化对经济增长变化的敏感程度, 为定量分析低碳发展水平提供可靠依据。本文采用 Tapio 构建的弹性脱钩指数^[11,17], 其计算公式为:

$$e = \frac{\Delta CO_2 / CO_2}{\Delta GDP / GDP} \quad (4)$$

式中 e 为 CO_2 和经济增长的脱钩弹性指数; ΔCO_2 为报告期与基期 CO_2 排放量的差值, $10^4 t$; ΔGDP 为报告期与基期农业产值的差值。

依据 e 值范围的不同, 将脱钩类型划分为弱脱钩、强脱钩、弱负脱钩、强负脱钩、扩张负脱钩、扩张连接、衰退脱钩和衰退连接 8 类, 具体等级划分标准见表 5。

表 5 Tapio 脱钩类型和含义
Table 5 Types and meanings of Tapio decoupling

类型 Type	状态 State	环境压力增长率 Environmental pressure growth rate $\Delta CO_2 / CO_2$	经济驱动增长率 Economic driving growth rate $\Delta GDP / GDP$	脱钩弹性指数 e Decoupling elasticity index e	状态含义 State meaning
脱钩 Decoupling	弱脱钩	>0	>0	$0 \leq e < 0.8$	两者均增长, 但农业 GDP 增速相对较快
	强脱钩	<0	>0	$e < 0$	耕地利用净碳排放降低, 农业 GDP 增长, 其为最理想状态
	衰退脱钩	<0	<0	$e > 1.2$	两者均减少, 但耕地利用净碳排放减速相对较快
负脱钩 Negative decoupling	扩张负脱钩	>0	>0	$e > 1.2$	两者均增长, 但耕地利用净碳排放增速较快
	强负脱钩	>0	<0	$e < 0$	耕地利用净碳排放增长, 农业经济减少, 其为最不理想状态
	弱负脱钩	<0	<0	$0 \leq e < 0.8$	两者均减少, 但农业经济减速较快
连接 Connection	扩张连接	>0	>0	$0.8 \leq e < 1.2$	两者均增加, 且速率相对同步
	衰退连接	<0	<0	$0.8 \leq e < 1.2$	两者均减少, 且速率相对同步

1.1.5 GM(1, 1) 灰色预测模型

灰色预测模型是利用预测对象已知信息对未确定信息进行预测的模型, 简称 GM(1,1) 模型^[35]。该模型对预测对象发展规律作出模糊性的中长期模拟, 建模精度高, 易于检验, 对耕地碳汇量的预测具有良好的拟合度和可靠性。本研究根据 2005—2020 年中国各省(市、区)耕地利用碳汇量预测 2021—2035 年耕地利用碳汇量和农业产值的趋势, GM(1,1) 模型的基本形式如下:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (5)$$

式中 $x^{(0)}$ 为原始非负数列, $z^{(1)}$ 为 $x^{(1)}$ 的紧邻生成数列, k 为期数, a 为发展系数, b 为灰色作用量。

经过计算得到白化方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + \alpha x^{(1)} = b \quad (6)$$

式中 $x^{(1)}$ 为累加后生成数列, t 为时间。

模型预测精度等级越小, 说明预测模型通过检验, 且拟合结果越可靠。预测精度等级分类见表 6。

表 6 预测精度等级分类标准

预测精度等级 Prediction accuracy level	后验差比 C 值 Posteriori difference ratio C value	误差概率 P Error probability P
1 级 (优良) (Good)	<0.35	>0.95
2 级 (合格) (Qualified)	<0.50	>0.80
3 级 (一般) (General)	<0.65	>0.70
4 级 (不合格) (Rejected)	≥ 0.65	≤ 0.70

1.2 数据来源

耕地生产碳排放测算中的化肥、农药、农膜、农用

柴油数据均来自《中国农村统计年鉴(2006—2021)》; 以当年实际灌溉面积作为农业灌溉面积, 以当年农作物实际播种面积作为农地翻耕面积, 数据分别来自《中国环境统计年鉴(2006—2019)》和《中国农村统计年鉴(2006—2021)》; 农田土壤碳排放测算中的水稻、小麦、玉米、大豆和其他农作物面积, 水稻种植碳排放测算使用实际水稻种植面积; 耕地碳吸收测算中的粮食作物和经济作物产量数据来自《中国农村统计年鉴(2006—2021)》和《中国统计年鉴(2006—2021)》; 社会经济相关数据来自《中国统计年鉴(2006—2021)》和《中国农业年鉴(2006—2019)》; 其中, 港、澳、台数据暂缺, 未列入研究范围。

2 结果与分析

2.1 耕地利用净碳汇时空演进分析

2.1.1 耕地利用净碳汇时序变化

由表 7 可知, 2005—2020 年中国耕地利用净碳汇量全部为正值, 说明中国耕地发挥碳吸收功能。碳汇总量整体呈波动上升态势, 从 45 459.177 万吨提高到 81 800.853 万吨, 年均增速 3.740%。具体而言, 中国耕地净碳汇波动上升经历了三个阶段。第一阶段 2005—2014 年为稳步提升时期, 耕地利用碳排放保持相对稳定, 净碳汇主要受碳吸收增加的影响。净碳汇量从 45 459.177 万吨增加到 72 278.079 万吨, 平均增速为 4.746%。第二阶段 2015—2016 年为过渡时期, 受耕地种植结构变化的影响, 耕地碳汇作用明显削弱。净碳汇从 762 18.429 万吨降低到 69 024.797 万吨, 平均降速为 4.836%。第三

阶段 2017—2020 年为快速增长时期, 净碳汇从 70 498.736 万吨提升到 81 800.853 万吨, 平均降速为 3.787%, 增速高于平均水平, 其原因是“十三五”时期中国农业转型升级和生态文明建设步伐加快, 新型科学技术与农业融合, 耕地质量和利用效率得到提高, 耕地保护政策效果显现, 进一步控制了耕地碳排放量并增加了耕地碳汇能力。

研究期内耕地碳源呈“先升后降”的变化趋势, 2004—2015 年, 中央持续颁布惠农型的“一号文件”并取消农业税, 农业生产活力释放, 耕地生产投入和利用强度增加, 水稻种植规模也逐步拓展, 耕地利用碳排放量保持上升态势。2016—2020 年, “十三五”发展时期国家生态文明建设和可持续发展战略实施, 科技兴农举措提高耕地生产效

率, 使得耕地碳排放水平逐步降低。从碳源结构看, 在三大碳源中水稻种植和农田土壤碳排放占比最大, 分别为 50.460%~52.437%和 35.398%~36.886%; 其次是耕地农业生产碳排放, 占比为 11.486%~13.361%。

耕地碳汇能力在研究期内呈波动上升态势, 从 108 314.085 万吨增加到 148 871.874 万吨, 年均增速 2.008%。尤其在 2016 年后, 耕地保护长效机制和生态文明建设的不断向纵深推进, 以及人口增长和城市规模的拓展, 使得对农作物需求量增加, 共同推动各类农作物种植面积和产量保持稳步增长, 为耕地碳汇能力的提升提供了物质保障。此外, 合理布局和调整耕地种植结构为进一步增强农作物碳汇水平创造了客观条件。

表 7 2005—2020 年中国耕地利用净碳汇情况
Table 7 Net carbon sink of cultivated land use in China from 2005 to 2020

年份 Year	碳源 Carbon source					碳汇 Carbon sink			
	耕地生产碳排放 Cultivated land produces carbon emissions/(10 ⁴ t)	水稻种植碳排放 Carbon emissions from rice cultivation/(10 ⁴ t)	农田土壤碳排放 Farmland soil carbon emission/(10 ⁴ t)	总量 The total/ (10 ⁴ t)	增速 Growth/%	耕地碳汇 Cultivated land carbon sink/(10 ⁴ t)	增速 Growth rate/%	净碳汇 Net carbon sink/(10 ⁴ t)	增速 Growth rate/%
2005	7 219.646	32 959.827	22 675.436	62 854.908	-	108 314.085	-	45 459.177	-
2006	7 458.995	33 470.891	22 959.999	63 889.885	1.647	111 810.233	3.228	47 920.348	5.414
2007	7 768.949	33 041.519	22 361.827	63 172.295	-1.123	110 071.566	-1.555	46 899.271	-2.131
2008	7 869.884	33 409.307	23 904.764	65 183.955	3.184	116 638.916	5.966	51 454.961	9.714
2009	8 121.200	33 850.105	23 476.772	65 448.076	0.405	118 706.562	1.773	53 258.485	3.505
2010	8 373.450	34 131.858	23 791.267	66 296.575	1.296	123 660.125	4.173	57 363.550	7.708
2011	8 603.389	34 347.915	24 044.199	66 995.504	1.054	129 251.735	4.522	62 256.232	8.529
2012	8 814.842	34 433.493	24 278.280	67 526.614	0.793	134 288.452	3.897	66 761.838	7.237
2013	8 962.336	34 633.097	24 524.494	68 119.926	0.879	137 868.159	2.666	69 748.233	4.473
2014	9 012.084	34 630.240	24 659.676	68 302.001	0.267	140 580.080	1.967	72 278.079	3.627
2015	9 141.397	34 523.069	24 751.761	68 416.227	0.167	144 634.656	2.884	76 218.429	5.452
2016	9 051.740	34 480.337	24 757.717	68 289.794	-0.185	137 314.591	-5.061	69 024.797	-9.438
2017	8 855.168	35 130.222	25 008.839	68 994.229	1.032	139 492.965	1.586	70 498.736	2.135
2018	8 515.826	34 493.134	24 579.145	67 588.105	-2.038	140 251.387	0.544	72 663.282	3.070
2019	8 179.632	33 926.427	24 582.432	66 688.491	-1.331	142 671.272	1.725	75 982.781	4.568
2020	7 968.655	34 362.540	24 739.826	67 071.020	0.574	148 871.874	4.346	81 800.853	7.657

2.1.2 耕地利用净碳汇空间格局特征

中国各省份经济发展水平、耕地生产基础和资源环境状况等各异, 耕地利用碳源、碳汇能力也不同。传统东、中、西部的分区方式主要考虑经济水平和地理条件, 难以充分体现耕地利用情况, 本文采取粮食产区的分区方式不仅能体现以上条件, 而且能够充分展现耕地利用基础和耕地生产条件, 并与耕地利用碳源、碳汇紧密联系。依据《国家粮食安全中长期规划纲要(2008—2020年)》的划分标准, 将河北、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、山东、河南、江苏、安徽、江西、湖北、湖南、四川等 13 个省(市、区)作为中国粮食主产区, 主要位于中国东北和中东部地区, 土壤、气候、技术等条件适合作物种植, 粮食生产除供给区内自身消费外还供应其他地区; 将山西、广西、重庆、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆等 11 个省(市、区)作为中

国粮食产销平衡区; 将北京、天津、上海、浙江、福建、广东、海南等 7 个省(市)作为中国粮食生产的主销区。

由图 1 可知, 2005—2020 年中国耕地利用净碳汇平均水平总体呈波动式上升趋势, 粮食主产区受农业政策、耕地生产物质投入和耕地生产技术等影响大, 年际间波动明显高于其他产区。其中, 粮食主产区、产销平衡区和主销区增幅分别为 58.477%、169.531%和 139.255%。平衡区增幅最大, 碳汇潜力显现; 主销区净碳汇绝对值最小, 主产区净碳汇绝对值最大, 空间分异明显, 表明耕地利用净碳汇与作物生产、自然条件关系密切。从空间分布上看, 2005—2020 年耕地利用净碳汇平均水平粮食主产区 > 全国 > 产销平衡区 > 粮食主销区, 表明粮食主产区具有较强的碳汇能力, 是今后“双碳”目标中需要重点利用的区域, 而粮食产销平衡区和主销区耕地碳汇功能有限, 在未来耕地利用中需要重点进行控制。

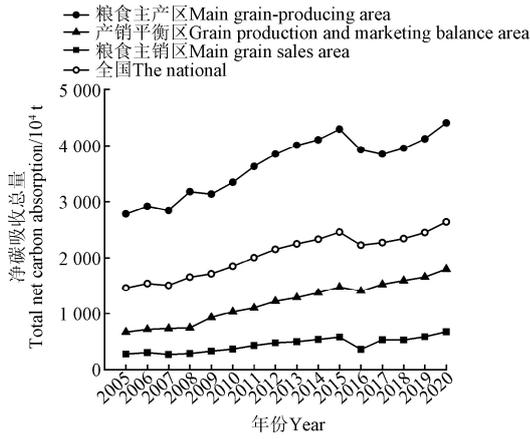


图 1 2005 - 2020 年中国及各粮食产区净碳汇情况
Fig.1 Net carbon sink in China and its grain producing regions from 2005 to 2020

如图 2 所示，2005 - 2020 年耕地利用平均净碳吸收总量为正值，即发挥碳汇作用在前 4 位的省（市、区）是山东、河南、河北、江苏，均位于粮食主产区，碳汇量占全国的 55.724%，净碳汇量均高于 3 800 万吨。由此看出，虽然粮食主产区由于农业生产而引发耕地利用碳排放较多，但良好的生态环境基础和充足的科技投入使得其大部分省区具有较强的碳汇能力和潜力。净碳吸收量为正值，即发挥碳汇作用在后 4 位的省（市、区）是西藏、海南、青海、广西，净碳汇量均低于 220 万吨，占全国的 0.947%，位于粮食产销平衡区和主销区，原因是非粮食主产区的耕地面积较少，自然条件较弱，耕地

上作物碳汇能力有限，从而使得碳吸收作用低于主产区。耕地利用净碳汇为负值，即发挥碳源作用的地区为江西、湖南，均位于粮食主产区，占全国的 5.313%，净碳排放均高于 900 万吨。原因可能是两省水稻种植面积和产量在全国前列，作物生长和生产物质投入大，造成碳汇增长难以抵消碳排放的增加。

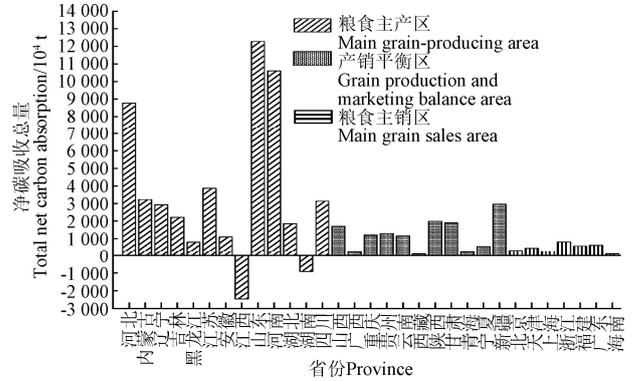


图 2 2005 - 2020 年中国不同粮食产区平均净碳汇量
Fig.2 Average net carbon sink of different grain producing areas in China from 2005 to 2020

2.1.3 耕地利用净碳汇演进趋势

为科学反映中国耕地利用净碳汇的演进特征，本文采用全国各省（市、区）2005 - 2020 年面板数据对耕地利用净碳汇进行核密度估计，绘制出全国及各产区在 2005、2010、2015 及 2020 年的净碳汇核密度分布曲线（图 3）。

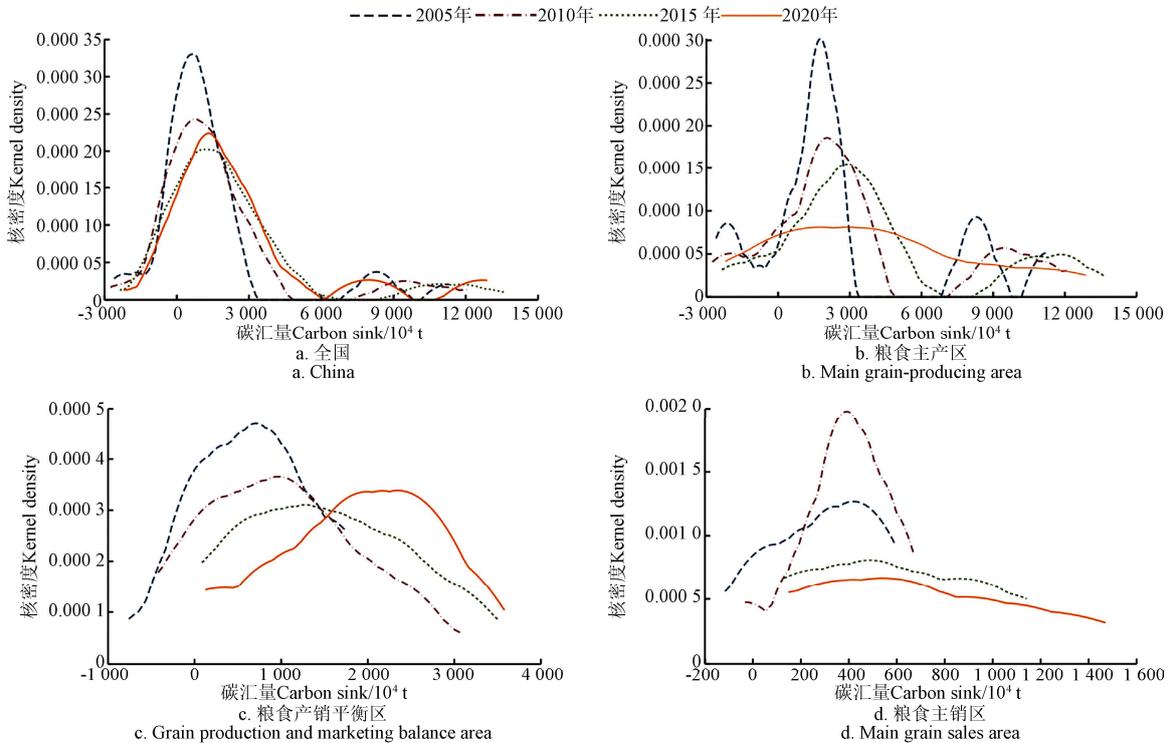


图 3 耕地利用净碳汇演进趋势
Fig.3 Evolution trend of net carbon sink of cultivated land use

1) 全国耕地利用净碳汇的核密度估计。由图 3a 可知，整体上核密度函数中心向右偏移，波峰呈不断下降趋势，

核密度函数变动区间变宽，区间变化明显，这表明中国总体净碳汇量呈上升趋势，中国地区间的耕地利用净碳

汇差距有一定程度上的扩大。从波峰上看,“一主两小”的格局继续保持,主峰和两个次峰均变平缓,说明较高净碳汇呈集聚和扩散相结合的态势。出现全国净碳汇的增加趋势的原因,一方面可能是中国农业科技投入增加,绿色发展理念融入耕地生产,生产方式由高投入、高消耗、高污染向低投入、低污染、高产出转变,另一方面可能是中国生态文明建设和可持续发展战略实施,耕地保护红线等措施效果明显,使得耕地碳汇能力持续增加。在研究期间,中国地区间耕地利用净碳汇差距存在一定扩大趋势,其原因是由于地区产业结构、农业发展基础、农业现代化水平、自然生产条件等存在差异。

2) 粮食主产区、平衡区和主销区耕地利用净碳汇核密度估计。由图 3b 可知,粮食主产区净碳汇在研究期内函数曲线中心向右偏移,峰值呈逐步下降,变化区间在变小,表明主产区净碳汇量呈上升趋势,区内耕地利用净碳排放差距逐步缩小。双峰格局下的波峰逐步消失,说明研究期内粮食主产区整体存在向耕地利用净碳汇高值区扩散的趋势。

由图 3c 可知,整体上,粮食产销平衡区耕地利用净碳汇函数曲线在研究期内向右移动,峰值呈现下降的过程,变化区间逐渐变宽,说明平衡区内耕地净碳排放净碳排放差距在扩大。平衡区在研究期内始终保持单峰格局,波峰在 2020 年变平缓,说明平衡区在净碳汇高值区呈扩散态势。

由图 3d 可知,粮食主销区净碳汇核密度函数在研究期内整体向右移动,波峰呈“先升后降”的特征,重心向右偏移,区间逐步扩大,表明区内净碳汇差距扩大。在波峰上,由单峰格局转变为无峰格局,2020 年主销区的核密度曲线在右侧分布已无明显波峰,说明主销区净碳汇量在高值区分布较为均匀。

结合图 3b~3d 分析发现,从曲线位置来看,粮食主产区、产销平衡区和主销区的密度分布函数在研究期内均呈现向右移动的趋势,说明各产区净碳汇都在增加,其中产销平衡区变化较为显著;从函数中心来看,粮食主产区、产销平衡区和主销区的主峰均位于正值区(即碳汇区),说明粮食主产区、产销平衡区和主销区的大部分省份碳汇大于碳源;主产区核密度曲线位于产销平衡区和主销区右侧,说明主产区的碳汇能力强于其他产区,可能的原因是主产区农业技术投入多,耕地利用和保护等措施落地,自然条件优良,耕地利用碳汇效果显著;从变化区间来看,各个产区内净碳汇变化程度不同,产销平衡区变化幅度最大,说明相对于其他产区,产销平衡区耕地利用净碳汇地区间的差距最大。

2.1.4 耕地利用净碳汇脱钩效应

为探究耕地利用碳源和碳汇与农业经济之间的关系,利用耕地利用净碳排放量,基于式(4)脱钩弹性公式,得到中国 2006—2020 年耕地利用净碳排放与农业经济增长的脱钩弹性结果(表 8),且耕地利用净碳排放的增加代表耕地利用净碳汇水平的提升。

在 2006—2020 年间,中国耕地利用净碳排放与农业

经济增长间的脱钩类型以强脱钩为主,即农业经济在保持正向增长的同时,耕地利用净碳排放保持降低态势,即耕地利用碳汇能力增强。具体来说,可分为两个阶段,第一阶段是 2006—2015 年,耕地利用净碳排放与农业经济增长间主要表现为良好的脱钩状态,即农业经济增速快于耕地利用净碳排放增速。其中,在 2007 年呈现为弱脱钩状态,其余年份呈强脱钩状态,说明耕地利用净碳排放量持续降低,耕地利用取得经济效益和生态效益的相对平衡。第二阶段是 2016—2020 年,2016 年表现为扩张负脱钩状态,耕地利用净碳排放和农业经济均增长,但耕地利用净碳排放增速相对更快;2017 年表现为衰退连接状态,耕地利用净碳排放与农业经济均减少,且速率相对同步。2018—2020 年脱钩状态表现为强脱钩,说明耕地利用净碳排放持续降低,耕地碳汇功能巩固,生态文明建设和可持续发展战略效果逐步显现,农业经济绿色发展成效良好。

表 8 2006—2020 年中国耕地利用净碳排放脱钩弹性结果

Table 8 Results of decoupling elasticity of net carbon emissions from cultivated land use in China from 2006 to 2020

年份 Year	$\Delta\text{CO}_2/\text{CO}_2$	$\Delta\text{GDP}/\text{GDP}$	e	净碳排放特征 Net carbon emission characteristics
2006	-0.054 1	0.098 7	-0.548 6	强脱钩
2007	0.021 3	0.144 3	0.147 7	弱脱钩
2008	-0.097 1	0.144 1	-0.673 9	强脱钩
2009	-0.035 1	0.085 0	-0.412 4	强脱钩
2010	-0.077 1	0.206 8	-0.372 7	强脱钩
2011	-0.085 3	0.136 6	-0.624 2	强脱钩
2012	-0.072 4	0.117 8	-0.614 4	强脱钩
2013	-0.044 7	0.097 2	-0.460 1	强脱钩
2014	-0.036 3	0.063 6	-0.570 3	强脱钩
2015	-0.054 5	0.052 3	-1.042 8	强脱钩
2016	0.094 4	0.028 7	3.293 6	扩张负脱钩
2017	-0.021 4	-0.020 7	1.031 0	衰退连接
2018	-0.030 7	0.058 4	-0.525 4	强脱钩
2019	-0.045 7	0.044 5	-1.025 6	强脱钩
2020	-0.076 6	0.048 4	-1.580 6	强脱钩

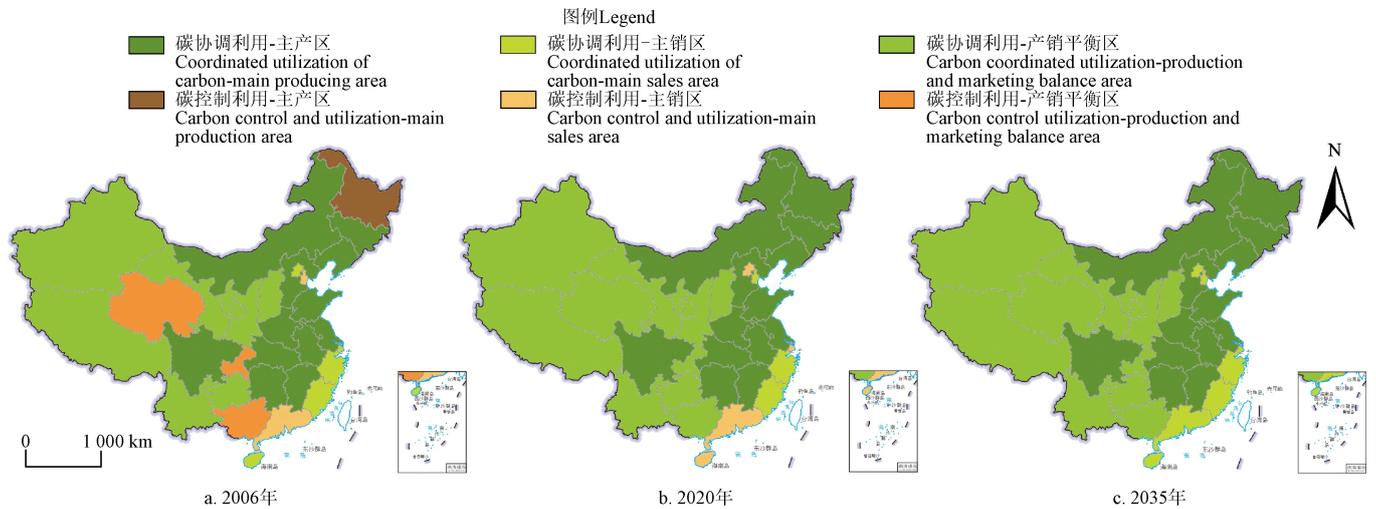
2.2 耕地利用净碳汇综合分区分析

2.2.1 耕地利用综合分区及调控

根据以上对中国耕地利用净碳汇时空演进及脱钩效应的分析,发现粮食产区内各省份耕地利用净碳汇趋势及其与农业经济脱钩状态具有区内相似和区间差异的特征,综合考虑耕地利用净碳汇量及其与农业经济脱钩类型等,依据脱钩弹性特征的内涵和实际效果,在《中华人民共和国耕地保护法》成为立法预备审议项目的基础上,结合全国层面开展耕地保护规划和分区等相关要求,将中国分为两类耕地利用碳效应分区,分别是耕地碳协调利用区(包括强脱钩、弱脱钩、衰退脱钩、扩张连接)和耕地碳控制利用区(包括扩张负脱钩、强负脱钩、弱负脱钩、衰退连接)。根据《国家粮食安全中长期规划纲要(2008—2020 年)》的划分标准可将中国耕地利用划分为粮食主产区、产销平衡区和主销区,并以省(市、区)为划分单元。粮食产区是中国耕地利用现状和耕地碳排放优化的方向,不仅能较全面地考虑地区自然水热、土壤、气候和生态环境等条件,而且与农业经济水平、

耕地生产基础和条件相结合。本文将耕地利用碳效应分区与粮食产区有机融合，结合“十四五”规划要求，探究各区域低碳绿色发展的时空演进趋势。将中国各省（市、区）耕地利用碳效应分区与粮食产区进行叠加，从而将中国省（市、区）单位重构为碳协调利用-主产区、

碳协调利用-产销平衡区、碳协调利用-主销区、碳控制利用-主产区、碳控制利用-产销平衡区和碳控制利用-主销区（见图 4）。针对各分区的自然条件、耕地利用碳排放特征、经济和资源利用水平等，提出科学精准的区域优化策略。



注：港澳台数据暂时缺失，故未纳入研究范围。

Note: The data of Hong Kong, Macao and Taiwan are temporarily missing, so they are not included in the research scope.

图 4 2005—2035 年中国耕地利用综合分区变化情况

Fig.4 Changes in comprehensive zoning of cultivated land use in China from 2005 to 2035

总体上，研究期内耕地碳协调利用区省（市、区）的占比由 2006 年的 80.95% 提升到 2020 年的 87.10%，耕地利用基本实现了生态效益和经济效益的平衡，并对 2035 年的耕地利用综合分区进行预测发现碳协调利用区省（市、区）占比进一步提高到 100%。具体分析各综合分区的时空演进并提出优化策略，如下：

1) 主要处于碳协调利用-主产区的安徽、江西、湖南、河北、内蒙古、辽宁、吉林、江苏、山东、河南、湖北、四川等省（市、区），虽然湖北和江西的净碳汇为负值，耕地发挥碳源效应，但其农业经济增速快于净碳排放增长，说明耕地减碳和绿色农业发展潜力大。大部分碳协调利用-主产区农业产业基础好，耕地生产物质投入多，农业技术运用多，耕地作物碳汇储量高，因此未来应科学规划耕地结构和布局，以保护为前提提高耕地生产效率和能力，加大科技投入，从种子、作物等层面将耕地生产与碳汇储备相结合，推进建设高标准农田，形成现代化碳汇农业区。

2) 就碳控制利用-主产区而言，2006 年黑龙江耕地生产方式较粗放，农业种植和生产引发的碳排放量增加，使得耕地利用经济效益和生态效益失衡。尽管 2020 年粮食主产区的省（市、区）全部为碳协调区，但碳控制利用-主产区仍可能在未来发展中出现。针对此类综合分区，在今后发展中应注重结合地区自然地理、气候等条件，尤其是合理保护区内生态脆弱区，增强各类耕地空间的生态承载能力，优化农业生产环境，提高耕地生产质量和碳汇水平。

3) 碳协调利用-产销平衡区在研究期内呈增加态势，

主要的省（市、区）包括山西、重庆、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、宁夏、新疆等，结合净碳汇变化的绝对值，产销平衡区的碳汇能力整体弱于主产区，区内大部分省份生态环境相对脆弱，耕地生产的自然和物质基础也弱于主产区。因此在发展中要结合自身农业生产特点，因地制宜地优化作物种植结构，将碳汇能力和作物产出能力相结合，在满足自身粮食需要前提下增加高效益、高碳汇作物的种植规模，同时扩大绿色生态空间比重，增强耕地利用韧性和抗冲击能力。

4) 碳控制利用-产销平衡区虽然在 2020 年的产销平衡区内未出现，但仍需对碳控制利用区进行重视。在今后发展过程中，要树立生态保护、绿色发展的理念，改变原有粗放耕地利用方式，使用现代化耕地生产方式，将经济作物和粮食作物种植生产相结合，以保障粮食安全为前提逐步提高耕地利用的经济效益。注重区内生态脆弱的保护，加快构建耕地保护长效机制等，稳步增强碳吸收水平和能力，科学推进绿色高效发展。

5) 处于碳协调利用-主销区的主要省（市、区）包括天津、福建、浙江，粮食主销区整体为耕地利用碳汇效应，但是碳汇能力最弱。由于主销区均位于中国的经济发达地区，土地城市化水平高，耕地面积有限。在未来发展中要注重保持区内耕地的碳汇能力，推动实现区域碳中和目标，避免城市的无序扩张而挤占绿色发展空间，改善人居环境，构建都市绿色农业系统，实现经济效益与生态效益的平衡。

6) 在 2020 年处于碳控制利用-主销区的省（市、区）是北京、上海、广东、海南，原因可能是耕地利用净碳

汇变动与经济的快速发展不协调,且此类省(市、区)经济发展水平极高,产业结构侧重于二、三产业,耕地面积较小,农业生产能力有限。今后发展要立足主销区和经济发达区的定位,调整区域作物的种植结构,在保护生态的前提下优先引入低碳高质的经济作物种植,率先实现农业现代化和耕地利用绿色化;适当加大土地整治力度,合理规划作物种植布局和结构,形成粮食输入和碳汇增强的良性循环。

2.2.2 耕地利用净碳汇与脱钩状态预测

通过使用 Matlab 软件建立 GM(1,1) 灰色预测模

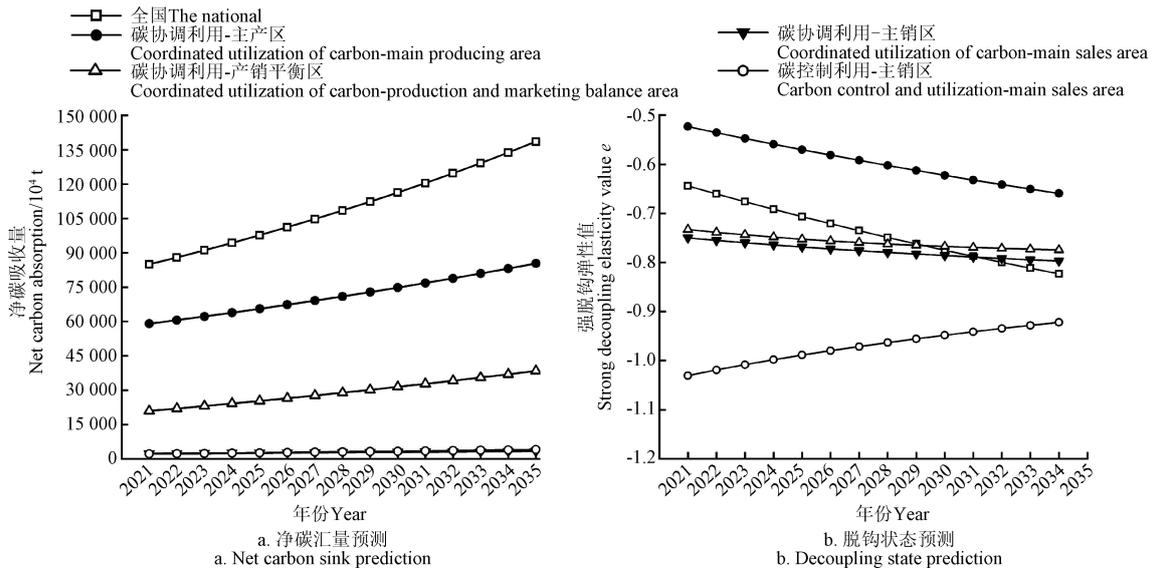


图5 2021—2035年中国耕地利用综合分区净碳汇量和脱钩状态预测

Fig.5 Prediction of net carbon sink and decoupling status of comprehensive zoning of cultivated land use in China from 2021 to 2035

全国耕地利用净碳汇 2021—2035 年呈稳定上升趋势,说明全国耕地利用碳汇功能不断增强。通过对不同综合分区的具体分析发现:碳协调-主产区、碳协调-产销平衡区、碳协调-主销区和碳控制-主销区的耕地利用净碳汇在预测期内均呈持续上升,碳协调-主产区和碳协调-产销平衡区保持较强的碳汇能力,碳协调-主销区和碳控制-主销区的碳吸收潜力相对稳定,表明各耕地利用综合分区的碳汇效应对“双碳”的目标实现均具有正向促进作用。从脱钩状态来看,总体上强脱钩类型占绝大多数,除 2021 年碳控制-主销区脱钩状态为扩张负脱钩 ($e=1.385$) 外,全国和所有综合分区 2021—2035 年脱钩类型预测结果均为强脱钩,但弹性值存在差异,说明大部分省(市、区)耕地利用净碳汇与农业经济的关系良好,实现农业经济增长的同时净碳汇逐步提升,其中全国、碳协调-主产区、碳协调-产销平衡区和碳协调-主销区保持良好的强脱钩状态,碳控制-主销区脱钩弹性改善幅度最大。在未来发展中全国及各综合分区农业绿色发展和碳汇潜力势头良好,各省(市、区)应根据自身特点和优势保持和提升耕地碳汇水平。

3 结论与政策启示

本文在测算中国 31 省(市、区)2005—2020 年耕地

型,考虑到 2020 年及之后的综合分区中的已无碳控制-主产区和碳控制-主销区,因此利用 2005—2020 年相关数据对碳协调-主产区、碳协调-产销平衡区、碳协调-主销区和碳控制-主销区四类分区及全国 2021—2035 年的净碳汇量及脱钩弹性状态进行预测,结果显示碳协调-主产区、碳协调-主销区与碳控制-主销区的净碳汇和脱钩状态的预测模型 $C<0.35$, $0.8<P<0.95$, 模型精度合格(2 级);其他地区净碳汇和脱钩状态的预测模型 $C<0.35$, $P>0.95$, 模型精度优良(1 级)。具体预测结果见图 5。

利用净碳汇的基础上,分析了耕地利用净碳汇的时空特征和演进趋势,探究了耕地利用净碳汇与农业经济增长的脱钩效应,并基于脱钩效应和粮食产区对各省(市、区)进行综合分区,提出差异化的优化策略,进一步利用 GM(1,1) 灰色预测模型对全国和各综合分区的净碳汇量及脱钩状态进行了预测和分析,得出以下结论:

1) 从耕地利用净碳汇来看,全国净碳汇在研究期内整体呈波动上升趋势,始终发挥碳吸收效应,并且存在明显的空间差异,粮食主产区平均碳汇能力明显高于产销平衡区和主销区。在研究期内,山东、河南、河北和江苏耕地碳汇效果优良,而湖南和江西耕地利用表现为碳源效应。

2) 从耕地利用净碳汇演进趋势来看,中国耕地利用净碳汇整体呈上升趋势,地区差距逐渐变小,但仍存在区域发展不均衡的现象。粮食主产区、产销平衡区和主销区均呈现出向碳汇高值区的扩散效应。

3) 整体上中国耕地利用净碳汇与农业经济脱钩主要分为两个阶段,但强脱钩状态始终占据主导地位,净碳汇与农业经济增长呈现良好协调的关系。从耕地利用综合分区来看,综合分区划分为碳协调利用-主产区、碳协调利用-产销平衡区、碳协调利用-主销区、碳控制利用-主产区、碳控制利用-产销平衡区和碳控制利用-主销区,

碳协调利用区要实现生态和经济效益的统一, 碳控制利用区以保护耕地生态为主。

4) 从净碳汇量和脱钩状态预测来看, 2021—2035 年全国及各综合分区的耕地利用净碳汇均为持续增加状态, 耕地利用碳汇功能不断增强, 其中碳协调-粮食主产区和碳协调-产销平衡区碳汇增加量占比较大。全国和各综合分区的预测脱钩状态以强脱钩为主, 耕地利用生态效益和经济效益继续协调发展, 在未来实现“双碳”目标的过程中, 耕地利用持续发挥碳汇功能和潜力。

综上所述, 本文提出以下建议:

1) 在全国层面上, 加快出台耕地保护法, 开展耕地保护规划和分区, 稳步推进耕地利用的优化配置, 巩固和提高耕地的碳库功能; 以碳中和所需碳汇量为导向, 加紧完善耕地保护的长效机制; 加大耕地利用的科技和资金投入, 在保障粮食安全的前提下调整耕地作物种植结构和布局, 发挥农业的规模化和集约化作用, 科学推进耕地可持续化、现代化、绿色化利用。

2) 针对不同粮食产区的空间差异, 通过增加区域内碳汇, 并利用周边地区碳汇的溢出效应, 逐步控制粮食主产区中碳源省份的碳排放; 不断优化主产区的耕地利用结构, 增强耕地碳汇能力和潜力, 引导藏汇于地; 建立生态脆弱区保护机制, 促进产销平衡区持续向净碳汇高值区集聚, 保持碳汇能力相对稳定; 加快主销区生态建设步伐, 稳定固碳能力, 避免碳源化趋向。

3) 碳协调利用-主产区科学规划耕地结构和布局, 防止耕地非粮化, 进一步提高耕地生产效率, 形成优势碳汇农业区; 碳控制利用-主产区增强各类耕地空间的生态承载能力, 优化农业生产环境; 碳协调利用-产销平衡区将碳汇能力与作物产出能力相结合, 扩大绿色生态空间规模, 增强耕地利用韧性; 碳控制利用-产销平衡区加快构建生态系统建设, 稳步增强碳吸收水平和能力; 碳协调利用-主销区构建都市绿色农业系统, 实现经济效益与生态效益的平衡; 碳控制利用-主销区在保护生态的前提下优先引入低碳高质的经济作物种植, 率先实现农业现代化和耕地利用绿色化。

4) 立足全国及各综合分区的碳汇潜力和脱钩预测, 以“双碳”目标为导向, 推动政策创新和落地, 建立“农业碳基金”, 为耕地利用增汇减排提供资金支持, 引导耕地低碳技术规模化应用, 培育耕地利用碳中和的持续发展和内生动力; 在主销区充分利用新兴种业和信息技术, 完善耕地基础设施建设, 推动形成低碳源、高碳汇、高效益的城郊耕地利用模式, 实现经济效益与生态效益的统一。

[参 考 文 献]

- [1] 孙赫, 梁红梅, 常学礼, 等. 中国土地利用碳排放及其空间关联[J]. 经济地理, 2015, 35(3): 154-162.
Sun He, Liang Hongmei, Chang Xueli, et al. Land use patterns on carbon emissions and spatial association in China[J]. Economic Geography, 2015, 35(3): 154-162. (in Chinese with English abstract)
- [2] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋, 等. 区域土地利用结构的碳效

应评估及低碳优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 220-229.

Zhao Rongqin, Huang Xianjin, Zhong Taiyang, et al. Carbon effect evaluation and low-carbon optimization of regional land use [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(17): 220-229. (in Chinese with English abstract)

- [3] 李波, 张俊飏. 基于我国农地利用方式变化的碳效应特征与空间差异研究[J]. 经济地理, 2012, 32(7): 135-140.
Li Bo, Zhang Junbiao. Study on carbon effects and spatial differences based on changes in China's agricultural land use [J]. Economic Geography, 2012, 32(7): 135-140. (in Chinese with English abstract)
- [4] 白义鑫, 王霖娇, 盛茂银. 黔中喀斯特地区农业生产碳排放实证研究[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(3): 150-157.
Bai Yixin, Wang Linjiao, Sheng Maoyin. Empirical study on carbon emissions of agricultural production in region of Guizhou province[J]. China Agricultural Resources and Zoning, 2021, 42(3): 150-157. (in Chinese with English abstract)
- [5] Shen Y L, Yu S. Analysis on measurement, decoupling effect and influencing factors of agricultural carbon emissions in major grain producing areas: Taking Henan Province as an example[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 261:04030.
- [6] Huang X Q, Xu X C, Wang Q Q, et al. Assessment of agricultural carbon emissions and their spatiotemporal changes in China, 1997–2016[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(17): 3105-3105.
- [7] Warrick R A, 袁大中. 二氧化碳、气候变化与农业[J]. 地理译报, 1991(1): 46-51, 21.
Warrick R A, Yuan Dazhong. Carbon dioxide, climate change and agriculture[J]. Geography Translation, 1991(1): 46-51, 21. (in Chinese with English abstract)
- [8] 尚杰, 杨滨键. 种植业碳源、碳汇测算与净碳汇影响因素动态分析: 山东例证[J]. 改革, 2019(6): 123-134.
Shang Jie, Yang Binjian. Estimation of carbon source and carbon sequestration in planting industry and dynamic analysis of influencing factors of net carbon sequestration: A case study of Shandong province[J]. Reform, 2019(6): 123-134. (in Chinese with English abstract)
- [9] 宋长青, 叶思菁. 提升我国耕地系统碳增汇减排能力[N]. 中国科学报, 2021-11-09 (0032).
- [10] Cui Y, Sufyan U K, Deng Y, et al. Regional difference decomposition and its spatiotemporal dynamic evolution of Chinese agricultural carbon emission: considering carbon sink effect[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(29): 1-20.
- [11] 丁宝根, 杨树旺, 赵玉, 等. 中国耕地资源利用的碳排放时空特征及脱钩效应研究[J]. 中国土地科学, 2019, 33(12): 45-54.
Ding Baogen, Yang Shuwang, Zhao Yu, et al. Study on spatial-temporal characteristics and decoupling effect of carbon emissions from cultivated land resource utilization in China[J]. China Land Science, 2019, 33(12): 45-54. (in Chinese with English abstract)
- [12] Tian Y, Zhang J B, Chen Q Q. Distributional dynamic and trend evolution of China's agricultural carbon emissions-an analysis on panel data of 31 provinces from 2002 to 2011[J]. Chinese Journal of Population Resources and Environment, 2015, 13(3): 206-214.

- [13] 柯楠, 卢新海, 匡兵, 等. 碳中和目标下中国耕地绿色低碳利用的区域差异与影响因素[J]. 中国土地科学, 2021, 35(8): 67-76.
Ke Nan, Lu Xinhai, Kuang Bing, et al. Regional differences and influencing factors of green and low-carbon utilization of cultivated land under the carbon neutrality target in China[J]. China Land Science, 2021, 35(8): 67-76. (in Chinese with English abstract)
- [14] 周思宇, 郗凤明, 尹岩, 等. 东北地区耕地利用碳排放核算及驱动因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3865-3871.
Zhou Siyu, Xi Fengming, Yin Yan, et al. Carbon emission accounting and driving factors of cultivated land use in Northeast China[J]. Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3865-3871. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘洁, 梁红梅, 曾业隆, 等. 基于投入视角的山东省农地利用碳排放与经济发展脱钩研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 303-308.
Liu Jie, Liang Hongmei, Zeng Yelong, et al. Input perspective-based decoupling of carbon emissions of agricultural land utilization and economic development in Shandong Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(4): 303-308. (in Chinese with English abstract)
- [16] 邓楚雄, 卢涛, 李忠武, 等. 长沙市农地利用净碳排放变化趋势及驱动因素分析[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2021, 44(3): 9-17.
Deng Chuxiong, Lu Tao, Li Zhongwu, et al. Analysis of trend and driving factors of net carbon emissions in Changsha's agricultural land utilization[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2021, 44(3): 9-17. (in Chinese with English abstract)
- [17] 田云, 张俊飏, 李波. 湖北省农地利用碳排放时空特征与脱钩弹性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(12): 1514-1519.
Tian Yun, Zhang Junbiao, Li Bo. Research on spatial-temporal characteristics and decoupling elasticity in agricultural land use carbon emissions in Hubei Province[J]. Resources and Environment of Yangtze River Basin, 2012, 21(12): 1514-1519. (in Chinese with English abstract)
- [18] 赵先超, 宋丽美. 湖南省农地利用碳排放与农业经济关系研究[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(11): 976-981.
Zhao Xianchao, Song Limei. Carbon emission from agricultural land use and its relationship with agricultural economy in Hunan Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(11): 976-981. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王琦, 黎孔清, 朱利群. 南京都市农业农地利用碳排放测算及趋势预测[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 288-294, 302.
Wang Qi, Li Kongqing, Zhu Liqun. Estimation of carbon utilization and prediction of agricultural land use in urban agriculture of Nanjing city[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 288-294, 302. (in Chinese with English abstract)
- [20] 黎孔清, 陈俭军, 马豆豆. 基于STIRPAT和GM(1,1)模型的湖南省农地投入碳排放增长机理及趋势预测[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(2): 345-352.
Li Kongqing, Chen Jianjun, Ma Doudou. Growth mechanism and trend forecast of carbon emissions from farmland input in Hunan Province based on Stirpat and GM(1,1) model[J]. Resources and Environment of Yangtze River Basin, 2018, 27(2): 345-352. (in Chinese with English abstract)
- [21] IPCC.2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M/OL]. Japan: IGES.2006.
- [22] 田云, 张俊飏, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2097-2105.
Tian Yun, Zhang Junbiao, Li Bo. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects[J]. Resource Science, 2012, 34(11): 2097-2105. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张梅, 赖力, 黄贤金, 等. 中国区域土地利用类型转变的碳排放强度研究[J]. 资源科学, 2013, 35(4): 792-799.
Zhang Mei, Lai Li, Huang Xianjin, et al. The carbon emission intensity of land use conversion in different regions of China [J]. Resource Science, 2013, 35(4): 792-799. (in Chinese with English abstract)
- [24] 游和远, 吴次芳. 农地集约利用的碳排放效率分析与低碳优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 224-234.
You Heyuan, Wu Cifang. Analysis of carbon emission efficiency and optimization of low carbon for agricultural land intensive use[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(2): 224-234. (in Chinese with English abstract)
- [25] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India and Ohio, USA[J]. Crop Improvement, 2009, 23: 332-350.
- [26] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理[J]. 大气科学, 1998(4): 218-230.
Wang Mingxing, Li Jing, Zheng Xunhua. Methane emission and mechanisms of methane production, oxidation, transformation in the rice fields[J]. Atmospheric Science, 1998(4): 218-230. (in Chinese with English abstract)
- [27] 庞军柱, 王效科, 牟玉静, 等. 黄土高原冬小麦地 N₂O 排放[J]. 生态学报, 2011, 31(7): 1896-1903.
Pang Junzhu, Wang Xiaoke, Mou Yujing, et al. Nitrous oxide from winter wheat fields in Loess Plateau[J]. Journal of Ecology, 2011, 31(7): 1896-1903. (in Chinese with English abstract)
- [28] 于克伟, 陈冠雄, 杨思河, 等. 几种旱地农作物在农田 N₂O 释放中的作用及环境因素的影响[J]. 应用生态学报, 1995(4): 387-391.
Yu Kewei, Chen Guanxiong, Yang Sihe, et al. Role of several upland crops in N₂O emission from farmland and its response to environmental factors[J]. Journal of Applied Ecology, 1995(4): 387-391. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王少彬, 苏维瀚. 中国地区氧化亚氮排放量及其变化的估算[J]. 环境科学, 1993(3): 42-46, 92-93.
Wang Shaobin, Su Weihuan. Estimation of nitrous oxide emission and its future change in China[J]. Environmental Science, 1993(3): 42-46, 92-93. (in Chinese with English abstract)
- [30] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治雄, 等. 种植夏季豆科作物对旱地氧化亚氮排放贡献的研究[J]. 中国农业科学, 2002(9): 1104-1108.
Xiong Zhengqin, Xing Guangxi, Kazuo Tsuda, et al. The effects of summer legume crops cultivation on nitrous oxide emission from upland farmland[J]. Chinese Agricultural Sciences, 2002(9): 1104-1108. (in Chinese with English abstract)
- [31] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 等. 种植蔬菜地与裸地氧化亚氮排放差异比较研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(12): 2982-2985.
Qiu Weihong, Liu Jinshan, Hu Chengxiao, et al. Comparison

- of nitrous oxide emission from bare soil and planted vegetable soil[J]. *Journal of Ecological Environment*, 2010, 19(12): 2982-2985. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王智平. 中国农田 N₂O 排放量的估算[J]. *农村生态环境*, 1997(2): 52-56.
Wang Zhiping. Estimation of Nitrous oxide emission of farmland in China[J]. *Rural Ecological Environment*, 1997(2): 52-56. (in Chinese with English abstract)
- [33] 高标, 房骄, 卢晓玲, 等. 区域农业碳排放与经济增长演进关系及其减排潜力研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(1): 13-18.
Gao Biao, Fang Jiao, Lu Xiaoling, et al. Evolution relationship between agricultural carbon emissions and economic growth and its emission reduction potential[J]. *Resources and Environment in Arid Areas*, 2017, 31(1): 13-18. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李波, 刘雪琪, 王昆. 中国农地利用结构变化的碳效应及时空演进趋势研究[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(3): 43-51.
Li Bo, Liu Xueqi, Wang Kun. Study on the carbon effects and spatial-temporal evolution trend based on the changes of agricultural land use in China[J]. *China Land Science*, 2018, 32(3): 43-51. (in Chinese with English abstract)
- [35] 赵爱文, 李东. 中国碳排放灰色预测[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(4): 61-69.
Zhao Aiwen, Li Dong. Grey forecast of China's carbon dioxide emissions[J]. *Practice and Understanding of Mathematics*, 2012, 42(4): 61-69. (in Chinese with English abstract)

Spatiotemporal evolution and comprehensive zoning of net carbon sink in cultivated land use in China

Li Qiang^{1,2}, Gao Wei¹, Wei Jianfei¹, Jiang Zhifa³, Zhang Yang^{1,2}, Lyu Junxiao¹

(1. School of Urban Economics and Public Administration, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China;

2. Beijing Key Laboratory of Megaregions Sustainable Development Modelling, Beijing 100070, China;

3. School of Management, Fujian University of Technology, Fuzhou, 350118, China)

Abstract: Net carbon sink from land-use change has been one of the most important factors on the process of cultivated land use. The comprehensive zoning optimization of cultivated land use can be an effective way to realize the green and sustainable development of agriculture and improve the net carbon sink level of cultivated land use in China. A theoretical basis can also be provided for the protection of cultivated land at the national level, and the optimal allocation of cultivated land resources. In this study, the trend of net carbon sink of cultivated land use was estimated in 31 Provinces (cities and districts) in China from 2005 to 2020, particularly from the perspective of carbon source and carbon sink of cultivated land use. The dynamic evolution and interval difference were analyzed using Kernel density estimation. The decoupling effect was also established between the net carbon emission of cultivated land and agricultural economy. After that, the comprehensive zoning of cultivated land use was optimized to combine with the decoupling and characteristics in the main grain producing areas. A Grey Model (GM) was utilized to predict the change trend and decoupling status of net carbon sink in each comprehensive zoning from 2021 to 2035. The results showed that: 1) There was a fluctuating upward trend for the net carbon sink of cultivated land use, with an average annual growth rate of 3.740% in the study period. The spatial difference of carbon sink capacity was much better in the main grain producing areas, compared with the rest. 2) Kernel density estimation shows that the regional gap of net carbon sink of cultivated land use was gradually narrowing. However, there was still a regional imbalance. The main grain producing areas, the balance of production and marketing areas, and the main sales areas all showed a trend of diffusion to the high-value carbon sink areas. 3) There was the mainly strong decoupling between the net carbon emissions from the cultivated land use and agricultural economy in the study period. A comprehensive zone was achieved for the coordination of economic and ecological benefits in the most provinces (cities and districts), except for Beijing, Shanghai, Guangdong and Hainan in 2020. 4) The GM predicted that the carbon sink capacity of cultivated land use would maintain a steady growth from 2021 to 2035, and there was the strong decoupling status of each comprehensive zone. Consequently, it is very feasible for the unification of economic and ecological benefits in the future cultivated land use. The finding can also provide a strong reference and guidance for the “double carbon” goal in the field of cultivated land. Finally, the targeted optimization strategies and directions can be greatly contribute to the coordinated development of economic and ecological benefits of cultivated land use in the whole country and various comprehensive divisions, in order to achieve low-carbon, green, and high-quality development of cultivated land use.

Keywords: land use; carbon emission; net carbon sink; comprehensive zoning; grain producing areas; evolution trend; kernel density estimation; decoupling model; grey prediction