

农业资源与环境学报^{CSCD核心期刊}

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

东北农区农业净碳汇时空分布及驱动因素

张慧,张力文,何正弘

引用本文:

张慧,张力文,何正弘. 东北农区农业净碳汇时空分布及驱动因素[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(3): 505-517.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0321

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长江经济带农业碳补偿修正测算及分析

曹俊文, 陶强强

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 693-698 https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0738

基于减排潜力与减排成本的水稻种植模式综合评价 ——以湖北省为例

周杏,李晶,于书霞,刘微,胡荣桂

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 568-575 https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0115

中国省际农业生态效率评价及其改进路径分析

方永丽,曾小龙

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 135-142 https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0148

基于京津翼一体化的农田生态系统碳足迹年际变化规律研究

田志会, 刘瑞涵

农业资源与环境学报. 2018, 35(2): 167-173 https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0222

湖北省农田生态系统温室气体排放特征与源/汇分析

谢婷, 张慧, 苗洁, 宋明伟, 曾艳琴

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 839-848 https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0494



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张慧,张力文,何正弘.东北农区农业净碳汇时空分布及驱动因素[J].农业资源与环境学报,2024,41(3):505-517.

ZHANG H, ZHANG L W, HE Z H. The spatiotemporal distribution and driving factors of agricultural net carbon sink in northeast agricultural areas[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(3): 505-517.



开放科学 OSII

东北农区农业净碳汇时空分布及驱动因素

张慧,张力文,何正弘

(东北农业大学公共管理与法学院,哈尔滨 150000)

摘 要:农业兼具碳源和碳汇双重属性,是我国实现碳达峰碳中和目标的重要组成部分。从农业碳排放公平性角度出发综合管控农业碳源和碳汇量,明晰农业净碳汇的驱动因素对于实现东北农区农业低碳发展具有重要意义。基于2000—2020年黑龙江省各市域的社会经济及农业生产等数据,本研究通过生态承载模型、经济效率模型和地理探测器对区域农业碳排放公平性特征及净碳汇驱动因素进行探究。结果表明:黑龙江省农业净碳汇总量呈现波动上升趋势,由2000年的1.21×10⁷ t上升至2020年的4.02×10⁷ t。齐齐哈尔、绥化和哈尔滨三市农业净碳汇量较高,三市总和占黑龙江省碳汇量的51%以上。从农业碳排放公平性分区来看,双高区主要向南部和中部的哈尔滨、黑河和绥化等地聚集,双低区逐渐向东部的鸡西、双鸭山和鹤岗等地集中。双低区持续向经济高值区、生态高值区以及双高区发展,但不同市域间差距依旧显著。耕地面积和机械化水平是农业净碳汇空间分异的主导驱动因素。交互探测结果显示耕地面积和机械化水平与其他各因素的交互作用最强,同时净碳汇量受机械化水平和城镇化水平交互作用的影响最大。研究表明,黑龙江省需根据各地区具体情况制定差别化的绿色农业管控措施,以推进东北农区农业可持续发展。

关键词:农业净碳汇;公平性评价;地理探测器;驱动因素;黑龙江省

中图分类号:X322

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2024)03-0505-13

doi: 10.13254/j.jare.2023.0321

The spatiotemporal distribution and driving factors of agricultural net carbon sink in northeast agricultural areas

ZHANG Hui, ZHANG Liwen, HE Zhenghong

(School of Public Management and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150000, China)

Abstract: Agriculture has dual roles as a carbon source and a carbon sink and is an important component of China's goal of achieving carbon peak and carbon neutrality. In terms of fairness in agricultural carbon emissions, it is of immense importance to comprehensively control agricultural carbon sources and sinks and clarify the driving factors of agricultural net carbon sinks to achieve low-carbon agricultural development in northeast agricultural areas. Based on social and economic data and agricultural production data from cities in Heilongjiang Province from 2000 to 2020, we explored the equity characteristics of regional agricultural carbon emissions and the driving factors of net carbon sinks using ecological carrying capacity models, economic efficiency models, and geographical detectors. The results showed that the total amount of agricultural net carbon sink in Heilongjiang Province demonstrated a fluctuating upward trend, from 1.21× 10⁷ t in 2000 to 4.02×10⁷ t in 2020. Qiqihar, Suihua, and Harbin had the highest net carbon sequestration in agriculture, with the three cities accounting for over 51% of the carbon sequestration in Heilongjiang Province. In terms of agricultural carbon emission equity zoning, the dual high zone primarily concentrated toward Harbin, Heihe, and Suihua in the south and central regions, whereas the dual low zone gradually concentrated toward Jixi, Shuangyashan, and Hegang in the east. The dual low zone is gradually developing toward an economic high-value zone, ecological high-value zone, and dual high zone; however, the gap between different cities is still significant. The area of arable land area and the mechanization level are the main driving factors for the spatial differentiation of agricultural net carbon sinks. The results of interaction detection show that the interaction between arable land area and mechanization level has the strongest correlation with

收稿日期:2023-05-18 录用日期:2023-08-30

作者简介: 张慧(1976—), 女, 山东济宁人, 博士, 副教授, 研究方向为土地利用与规划。 E-mail: 2003zhanghui@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41402297);黑龙江省博士后资助项目(LBH-Z12032)

other factors. The net carbon sink is most affected by the interaction between the mechanization and urbanization levels. Heilongjiang Province must develop differentiated green agriculture control measures based on the specific situation of each region to promote sustainable agriculture development in northeast agricultural areas.

Keywords: agricultural net carbon sink; fairness evaluation; geographic detectors; driving factor; Heilongjiang Province

温室气体排放导致的全球气候变暖是目前人类 面临的巨大挑战之一四,如何低碳高效发展成为各行 各业关注的重点[2]。IPCC(联合国政府间气候变化专 门委员会)报告显示,世界各国农业活动的碳排放量 占全球碳排放量的13.5%,并有增加趋势[3]。农业已 成为全球第二大温室气体排放源性。我国作为农业 大国,每年的农业温室气体排放量约占总排放量的 17%[5],同时农业碳储存量占全球碳储存量的10%左 右,约为170 Pg^[6],农业的碳汇能力不容小觑,若农业 碳汇在抵消农业生产碳排放之外仍有剩余,将对减少 全球温室气体排放产生积极作用。由于我国各地农 业资源禀赋、技术条件和生产结构不同,碳排放公平 性存在普遍差异,若在农业减排增汇过程中只考虑碳 排放量而不考虑碳排放公平性,会使部分区域在农 业生产过程中面临巨大压力四。因此,研究农业净碳 汇的时空分布格局、碳排放公平性及驱动因素对农业 高质量发展和我国"双碳"目标的早日实现具有重要 意义。

学界关于农业净碳汇的研究内容多聚焦于以下 三个方面:①对农业净碳汇量进行测算并分析其时空 分布规律[8],由于目前农业净碳汇的核算边界尚不统 一,学者主要从农用物资投入[9]、作物种植[10]、畜牧养 殖門碳排放以及作物固碳四方面入手。②对农业 净碳汇影响因素进行探究,常见研究方法为STAR-PAT模型[13]、灰色关联度法[14]、LMDI分解模型和KA-YA恒等式[15-16],影响因素多从经济层面、社会层面[17] 和农业生产[14]三个角度进行选取。③在核算碳源、碳 汇量的基础上对农业碳排放公平性进行分析,主要利 用基尼系数[18]、碳排放生态压力模型以及经济效率模 型[19]来评价碳排放公平性,研究尺度多为省级尺度。 当前研究成果丰富了农业净碳汇的研究体系,为"双 碳"目标在农业领域的实现提供了重要的现实支撑。 但在省域碳排放公平性问题显著存在的情况下[20],从 碳排放公平性的角度精准识别农业绿色发展问题并 针对性地制定农业碳减排政策尤为重要,而现有研究 对市域尺度这一提升碳排放公平性的关键研究尺度 关注较为缺乏。另外,社会经济和农业生产条件等因 素会综合影响净碳汇量,而目前的研究方法较少考虑

各因素对净碳汇产生的综合作用。

鉴于此,本研究从碳源和碳汇两个方面入手,分析东北农区黑龙江省13个市(地区)2000—2020年农业净碳汇的时空分异及碳排放公平性,并进一步利用地理探测器探究各因素对农业净碳汇量的综合作用,对黑龙江省制定区域差别化的农业减排增汇政策以及早日实现全省农业的低碳转型具有重要的指导意义,同时也可为全国产粮大省农业绿色发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

黑龙江省位于我国最北端,介于43°26′~53°33′N、121°11′~135°05′E之间,土地总面积约4.71×10⁷ hm²。属温带大陆性季风气候,年平均气温-5~5℃,年降水量在400~650 mm之间,日照时数多为2400~2800h。黑龙江省是我国的农业大省,2022年黑龙江省农林牧渔业总产值实现6718.2亿元,其中种植业产值为4320.5亿元,畜牧业产值为1842.8亿元。作为我国重要的粮食生产基地,黑龙江省2022年粮食作物播种面积达1.47×10⁷ hm²,占全国粮食播种面积的12.4%;粮食总产量为7.77×10⁷ t,占全国总产量的11.3%。主要种植粮食作物为玉米、水稻、豆类和小麦等,经济作物有蔬菜、油料和甜菜等。

1.2 数据来源

本研究中农业碳源、农业碳汇测算及驱动因子所需的化肥、农药、农膜使用量,各类农作物产量、播种面积,农业总产值、机械总动力等数据均取自2001—2021年《黑龙江统计年鉴》、各地级市统计年鉴以及经济公报。将2012年开始升级为直管县(市)的抚远县和绥芬河市划入原属地佳木斯市和七台河市,以保证研究数据的一致性,少量缺失数据采用线性插值法补齐。行政区划数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心网站(https://www.resdc.cn/)。

1.3 研究方法

1.3.1 农业碳排放量计算

(1)农资投入

基于IPCC碳排放系数法测算农资投入碳排放, 主要考虑农户种植行为直接或间接导致的温室气体 排放,将其划分为化肥、农药、农膜、农机、灌溉和翻耕 6种碳源,计算公式如下:

$$C_{\mathcal{R}^{\mathcal{R}}} = C_{\mathsf{f}} + C_{\mathsf{v}} + C_{\mathsf{m}} + C_{\mathsf{i}} + C_{\mathsf{s}} + C_{\mathsf{t}} \tag{1}$$

式中: $C_{x\bar{y}}$ 为农资投入过程中的碳源总量,kg; C_r 、 C_y 、 C_m 、 C_j 、 C_g 、 C_r 分别为农业过程中化肥、农药、农膜、农机、灌溉和翻耕过程中产生的碳排放量,kg。根据相关文献资料,确定农资投入碳排放计算公式及排放系数[$^{21-24}$](表1)。

(2)农田 N₂O 排放

农田 N_2O 直接排放包括氮肥、粪肥和秸秆还田所排放的 N_2O 。根据《省级温室气体清单编制指南》中规定的方法进行计算,公式如下:

$$E_{N_20}=(N_{4m}+N_{\beta m}+N_{6h})\times EF_{1ik}$$
 (2)
式中: E_{N_20} 为农田氧化亚氮直接排放量, $k_g;N_{4m}$ 为化
肥中的氮施用量, $k_g;N_{\beta m}$ 为动物粪肥中的氮施用量, $k_g;N_{6h}$ 为秸秆还田中的氮还田量, $k_g;EF_{1ik}$ 表示氧
化亚氮直接排放因子,为0.011 4 $k_g\cdot k_g^{-1}$ 。

 N_{LEE} 的计算公式为[25]:

$$N_{\text{km}} = (H_{\text{Mm}} + H_{\text{gem}}) \times (1 - EF_{\text{km}}) \tag{3}$$

式中: H_{MR} 为氮肥施用量,kg; H_{gen} 为复合肥中氮含量,按照300 $g \cdot kg^{-1}$ 计算; EF_{RR} 为施用化肥氮元素的挥发比例,为10%。

 N_{Am} 的计算公式为[25]:

$$N_{\text{me}} = \sum_{l=1}^{n} T_{l} \times P_{l} \times F_{l} \times K_{l}$$
(4)

式中: T_l 为第l种畜禽的数量,头; P_l 为第l种畜禽的粪便排泄系数, $kg \cdot d^{-1}$ 或 $t \cdot a^{-1}$,其中猪的饲养周期为 180 d; F_l 为第l种畜禽的粪便还田比例,%; K_l 为第l种畜禽的粪便还田比例,%; K_l 为第l种畜禽的粪便含氮量, $g \cdot kg^{-1}$ 。本研究未将人的粪尿加入计

算,仅计算黑龙江省较为常见的畜禽种类,相关参数^[25]见表2。

N_{秸秆}的计算公式为:

$$N_{\text{thft}} = \sum_{i=1}^{n} B_i \times Z_i \times J_i \times H_i \tag{5}$$

式中: B_i 为第i种作物的产量,kg; Z_i 为第i种作物的秸秆籽粒比; J_i 为第i种作物的秸秆含氮量, $g \cdot kg^{-1}$; H_i 为第i种作物的还田比例,%。相关参数^[25]见表3。

农田 N₂O 间接排放是施肥土壤和畜禽粪便中的 氮氧化物和氨挥发经过大气氮沉降以及土壤氮淋溶/ 径流损失进入水体而引发的 N₂O 排放,其计算方法与 相关参数来源于《省级温室气体清单编制指南》。

表2 粪肥中氮计算系数

Table 2 Calculation coefficient of nitrogen in manure

种类 Species	粪便排泄系数 Fecal excretion coefficient	粪便还田比例 Returned to soil of excreta/%	粪便含氮量 Nitrogen content in feces/(g·kg ⁻¹)
猪 Pig	$5.3 \text{ kg} \cdot d^{-1}$	65	2.38
羊Sheep	0.87 t•a ⁻¹	33	10.14
크 Horse	5.9 t•a ⁻¹	44	3.78
骡 Mule	5.0 t•a ⁻¹	44	3.78
牛 Cattle	7.7 t•a ⁻¹	30	3.51
驴 Donkey	5.0 t·a ⁻¹	44	3.78

表3 秸秆还田氮计算系数

Table 3 Calculation coefficient of nitrogen for straw returning to the field

种类 Crop	秸秆籽粒比 Straw grain ratio	秸秆含氮量 N content in straw/(g•kg ⁻¹)	还田比例 Returned to soil of straw/%
水稻Rice	0.9	9.1	30
小麦 Wheat	1.1	6.5	45
玉米 Corn	1.2	9.2	20
豆类 Bean	1.0	21.0	80

表1 农资投入碳排放系数及来源

Table 1 Carbon emission coefficient and source of agricultural inputs

碳源 Carbon source	公式 Formula	碳源投入量 Carbon source input	排放系数 Emission factor/(kg·kg ⁻¹ ,kg·hm ⁻²)
化肥 Chemical fertilizer	$C_i = G_{ii} \times A_{ii}$	G_n 为第 i 类化肥使用量, k g (A_m 为氮肥, A_n 为磷肥, A_n 为钾肥, A_n 为复合肥)	A_{fn} =1.740 A_{fl} =0.165 A_{fl} =0.120 A_{fl} =0.381
农药Pesticide	$C_y = G_y \times B$	G_{y} 为农药使用量,kg	B=4.934
农膜Plastic sheeting	$C_{\mathrm{m}}=G_{\mathrm{m}}\times D$	$G_{\scriptscriptstyle \mathrm{m}}$ 为农膜使用量,kg	D=5.18
农机 Agricultural machinery	$C_j = (A_\alpha \times E) + (W_e \times F)$	A_{α} 为农作物播种面积, hm^2	E=16.47
		W。为农业机械总动力,kW	F=0.18
灌溉 Irrigate	$C_{\rm g}=A_{\rm g}\times G$	$A_{\rm g}$ 为有效灌溉面积, ${ m hm}^2$	G=20
翻耕Ploughing	$C_1=A_1\times H$	A_ι 为翻耕面积, hm^2	H=312.6

大气氮沉降引起 N₂O 间接排放的计算公式为:

 $N_{\text{沉降}}=(N_{\text{化肥}}\times EF_{\text{化肥}}+N_{\text{类肥}}\times EF_{\text{类肥}})\times EF_{\text{沉降}}$ (6) 式中: $N_{\text{沉降}}$ 为大气土壤氮沉降引起的 N_2O 排放量,kg; $EF_{\text{类肥}}$ 表示施用粪肥氮元素的挥发比例,为 20%; $EF_{\text{沉降}}$ 表示土壤向大气沉降的间接排放因子,为 0.01 kg·kg⁻¹。

土壤氮淋溶径流引起N₂O间接排放的计算公式为:

(3)稻田甲烷

由于黑龙江省水稻种植面积较大,其产生的温室 气体量较多,故将稻田产生的 CH4作为重要碳源之 一。遵循《省级温室气体清单编制指南》中的计算方 法,由稻田甲烷排放因子与水稻播种面积的乘积计算 稻田 CH4的排放量,具体计算公式如下:

$$C_{\text{Aff}} = \sum I \times A_{d} \times M_{\text{CH}_{4}} \tag{8}$$

式中: C_{π} 为稻田甲烷排放量总量,kg;I 为水稻的甲烷排放因子,kg·kg·km2(以 CH_4 计),具体稻田甲烷排放系数见表4; A_d 为各市域的水稻播种面积,km2。 M_{CH_4} 为甲烷与碳的转换系数。 $1 t CH_4$ 所引发的温室效应相当于 $25 t CO_2$ (约合6.818 t C)所产生的温室效应,即 $1 t CH_4$ =6.818 t C。

(4)畜禽养殖

牛、羊等反刍动物在生命活动过程中肠道发酵和粪便会释放大量的 CH₄,其计算公式如下^[26]:

$$C_{\hat{\mathbf{a}}\hat{\mathbf{s}}} = \sum_{i}^{n} N_i \times (C1_i + C2_i) \times M_{CH_4}$$
 (9)

式中: $C_{\delta\delta}$ 为畜禽养殖的碳排放总量,kg;i为畜禽种类; N_i 为第i种畜禽的数量; $C1_i$ 为第i种畜禽肠道发酵的甲烷排放系数; $C2_i$ 为第i种畜禽粪便管理的甲烷排放系数; M_{CH_4} 表示甲烷与碳的转换系数,为6.818。表5为畜禽养殖的甲烷排放系数(数据来源于IPCC)。

1.3.2 农业碳吸收量计算

农作物通过光合作用将空气中的碳捕获并合成 碳水化合物,对其进行吸收和利用^[27]。农作物的产量

表 5 畜禽养殖甲烷排放系数(kg·头-1·a-1,以C计)

Table 5 Methane emission coefficient from livestock and poultry farming(kg·head⁻¹·a⁻¹, calculated in C)

碳源 Carbon source	$C1_i$	$C2_i$	碳源 Carbon source	$C1_i$	$C2_i$
猪Pig	1	3.5	牛 Cattle	47	1
羊Sheep	5	0.16	家禽 Poultry	0	0.02
耳 Horse	18	1.64	驴 Donkey	10	0.9
骡 Mule	10	0.9			

越高,越能吸收更多的碳,也就更有利于农业碳汇量的升高,其碳吸收估算公式如下[28]:

$$Z = \sum_{i=1}^{n} Z_{i} = \sum_{i=1}^{n} [S_{i} \times B_{i} \times (1 - W_{i}) \times (1 + R_{i})] / H_{i} \quad (10)$$

式中:Z为农业碳汇量,t;Z;为第i类作物类型的碳吸收量,t;S;为第i类农作物的碳吸收率;B;为第i类农作物产量,t;W;为第i类作物收获部分的含水率;R;为第i类作物的根冠比;H;为第i类农作物的经济系数。根据相关研究[29]和《省级温室气体清单编制指南》确定主要农作物的经济系数和碳吸收率(表6)。

1.3.3 农业净碳汇量计算

农业净碳汇量是指农业生产活动所引发的碳汇

表 6 主要农作物经济系数、碳吸收率、含水率以及根冠比

Table 6 Economic coefficient, carbon absorption rate, water content, and root-to-crown ratio of major crops

农作物类型 Crop type	主要农作物 Major crop	碳吸收率 Carbon absorption rate	含水率 Water content	根冠比 Root to crown ratio	经济系数 Economic coefficient
粮食作物	水稻Rice	0.414	0.120	0.600	0.450
Grain crop	小麦 Wheat	0.485	0.120	0.393	0.400
	玉米 Corn	0.471	0.130	0.156	0.400
	薯类 Potato	0.423	0.700	0.175	0.650
	豆类 Bean	0.450	0.130	0.129	0.350
经济作物	油料Oil	0.450	0.090	0.040	0.250
Cash crop	麻类 Ramie	0.450	0.130	0.400	0.830
	甜菜 Beet	0.407	0.700	0.720	0.700
	烟草Tobacco	0.450	0.170	0.320	0.830
	蔬菜 Vegetable	0.450	0.900	_	0.650

注:薯类为冠根比;蔬菜种类复杂,其根冠比不做考虑。

Note: Potato represent the crown-to-root ratio; The variety of vegetables is complex, and their root to crown ratio are not considered.

表4 水稻种植碳排放系数

Table 4 Carbon emission coefficients for rice planting

碳源	甲烷排放系数 Methane emi	ssion coefficient	转换系数	参考来源	
Carbon source	推荐值Recommendation value	范围Range	Conversion coefficient	Reference	
稻田 Paddy	168.0	112.6~230.3	6.818	《省级温室气体清单编制指南》	

量与碳排放量的差值[30]。具体计算公式为:

$$C_{\mathcal{A}} = Z - C_{\mathsf{t}} \tag{11}$$

$$C_{t} = C_{x \tilde{x}} + C_{x H} + C_{x \tilde{a}} + C_{\tilde{a} \tilde{a}}$$

$$\tag{12}$$

式中: C_{β} 为农业净碳汇量,t;Z为农作物生育期碳吸收总量,即碳汇量,t; C_{t} 为农业生产活动中碳源总量,t; C_{t} %, C_{t}

1.3.4 农业碳排放公平性评价

(1)生态承载模型

生态承载模型是衡量不同地区农业碳吸收能力的模型,反映不同地区生态压力大小,其计算公式如下^[19]:

$$ESC = \frac{Z_i}{Z} / \frac{C_i}{C} \tag{13}$$

式中: Z_i 表示i市域的碳汇量;Z表示黑龙江省的碳汇总量; C_i 、C分别表示i市域单元碳排放量和黑龙江省的碳排放总量。如果ESC值>1表明具有较好的生态承载能力,在平衡自身碳排放量的前提下还可以减轻其他地区的生态压力,具有正外部性;反之,该地区不仅无法平衡自身的碳排放量,而且其碳排放量还会对其他地区造成生态压力,产生负外部性。

(2)经济效率模型

经济效率模型可以衡量不同地区农业碳排放对该 区域农业经济发展的贡献程度,其计算公式如下[19]:

$$ECC = \frac{Y_i}{Y} / \frac{C_i}{C} \tag{14}$$

式中:Y,Y分别表示i市域和黑龙江省的农业生产总值。如果 ECC 值>1 表明农业碳排放具有较好的经济贡献能力,属于低耗高效率类型;反之,则属于高耗低效率类型,所产生的碳排放量对其他地区的利益造成了损害。1.3.5 农业净碳汇驱动因素分析

(1)驱动因素选取

本研究结合农业净碳汇的内涵,参考已有研究[14,31],从社会经济、农业生产和自然环境三个维度选取人均农业生产总值(X1)、农业产业结构(X2)、城镇化水平(X3)、耕地面积(X4)、化肥施用强度(X5)、机械化水平(X6)、气温(X7)、降水(X8)和日照(X9)作为驱动因素进行分析。

人均农业生产总值:经济水平是农业发展的基础,经济水平越高越能带动农业生产能力的提升,促进净碳汇量增加[32],以农业生产总值与农村总人口的比值来计算。

农业产业结构:由于种植业兼具碳源和碳汇双重功能,产业结构侧重方向不同会直接对农业净碳汇产

生影响,以种植业、畜牧业总产值占农业总产值比例来表示。

城镇化水平:城镇化水平提高虽然会为农村生产 提供便利条件,但在降低生产和交易成本的同时会挤 占耕地,造成耕地非农化,所以有必要考量其对农业净 碳汇量的影响^[33],通过城镇人口与总人口之比来计算。

耕地面积:耕地面积决定了农资投入的多少和农作物产量,直接影响农业净碳汇量。

化肥施用强度:化肥作为农业碳排放主要来源的同时也具备一定的作物增产作用,对农业净碳汇产生影响,以化肥总使用量和农作物总播种面积的比值表示。

机械化水平:机械化水平提升能够提高农资利用效率,减少其投入量[17],以农业机械总动力来衡量。

气温和降水:气温和降水会影响农作物生长,进而对农作物产量产生影响,最终作用于农业净碳汇量。

日照:日照是作物生长过程中光合作用的基础要素,与生物固碳效果紧密相关。

(2)地理探测器

地理探测器在检验单个变量空间分异性的同时,还可以通过交互因子识别不同驱动因子之间的交互作用,即探测不同驱动因子共同作用时是否会增加或减弱对农业净碳汇的解释力,或这些驱动因子对农业净碳汇的影响是否相互独立,可全方位地揭示空间差异的根本动因[34]。为了更好地分析黑龙江省农业净碳汇的驱动因素,本研究利用地理探测器模型,选取人均农业生产总值、农业产业结构、城镇化水平、耕地面积、化肥施用强度、机械化水平、气温、降水和日照9个因素探究驱动黑龙江省农业净碳汇的内在因素。具体公式如下:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{15}$$

式中: $h=1,2,\cdots,L$,为自变量的分类数; N_h 和N值分别为分类h和整个区域内单元的数量; σ_h^2 和 σ^2 分别为分类h和区域内因变量方差。q的值域为[0,1],q值越趋近于1,自变量的解释力越强,反之越弱;q值等于1或0时表示因变量空间分异被自变量完全控制或完全无关。

2 结果与分析

2.1 黑龙江省农业净碳汇

2.1.1 时序特征分析

2000-2020年间黑龙江省农业碳源、碳汇和净

表7 2000—2020年黑龙江碳排量、碳汇量和净碳汇量(104 t)

Table 7 Carbon emissions, carbon sinks, and net carbon sinks of Heilongjiang Province from 2000 to 2020(10⁴ t)

			碳源 Carbon sour	ce		1	炭汇 Carbon sin	k	小A 7世 3广 目。
年份 Year	农资投入 Agricultural input	农田 N ₂ O Farmland N ₂ O	水稻种植 Rice planting	畜牧养殖 Animal husbandry	碳源总量 Total carbon source	粮食作物 Grain crop	经济作物 Cash crop	碳汇总量 Total carbon sink	净碳汇量 Net carbon sink
2000	170.74	61.97	106.44	195.27	534.42	1 554.54	192.66	1 747.20	1 212.78
2001	170.81	62.65	103.03	206.60	543.09	1 599.57	182.60	1 782.18	1 239.09
2002	173.91	64.33	99.95	224.80	562.99	1 812.44	225.33	2 037.77	1 474.78
2003	170.02	62.66	84.90	262.94	580.52	1 434.32	156.73	1 591.04	1 010.52
2004	195.10	75.28	110.23	299.74	680.35	2 238.81	156.52	2 395.33	1 714.98
2005	197.95	77.63	127.31	324.25	727.14	2 517.70	185.37	2 703.07	1 975.93
2006	219.45	78.97	139.41	285.13	722.95	2 812.20	195.53	3 007.72	2 284.77
2007	230.83	76.61	138.19	215.97	661.60	2 753.77	175.47	2 929.23	2 267.63
2008	240.53	84.65	577.47	297.25	1 199.91	3 449.94	193.65	3 643.59	2 443.68
2009	257.19	91.57	177.58	324.99	851.34	3 843.70	82.76	3 926.46	3 075.12
2010	274.92	98.84	193.88	357.82	925.46	4 541.16	126.55	4 667.70	3 742.24
2011	587.61	217.55	228.08	381.76	1 415.01	4 988.72	127.19	5 115.90	3 700.89
2012	329.36	105.17	260.23	400.00	1 094.76	5 763.44	133.98	5 897.42	4 802.66
2013	320.34	101.90	282.21	412.05	1 116.50	4 754.49	109.99	4 864.48	3 747.98
2014	330.00	105.42	285.93	403.48	1 124.83	4 934.72	96.61	5 031.33	3 906.50
2015	335.92	103.67	272.43	373.65	1 085.67	5 009.62	82.84	5 092.46	4 006.79
2016	336.76	100.94	267.68	349.69	1 055.08	4 390.00	92.37	4 482.37	3 427.29
2017	558.03	95.61	268.55	229.02	1 151.20	4 017.58	85.58	4 103.17	2 951.97
2018	332.66	93.23	255.12	219.74	900.75	4 311.77	74.42	4 386.19	3 485.44
2019	371.21	110.34	435.66	214.16	1 131.37	5 085.22	74.78	5 160.00	4 028.63
2020	378.83	111.68	443.17	217.09	1 150.76	5 101.65	72.62	5 174.27	4 023.51

碳汇总量见表7。整体来看,黑龙江省净碳汇量全部 为正值,说明黑龙江省农业发挥着碳汇功能。其发展 趋势可大致分为4个阶段:①2000—2003年为快速下 降阶段。黑龙江省农业净碳汇总量从1.21×107 t下 降到1.01×10⁷t,年均减少率为6%,由于这3年中农 业碳排放量保持相对稳定,净碳汇量主要由于碳汇 量的下降而下降。可能的原因是作物生长的关键时 期遭遇干旱灾害,造成作物产量降低,碳汇量减少。 ②2004-2012年为大幅度上升阶段,由1.71×10⁷t上 升至4.80×10⁷t,年均增长率为14%。上升幅度大且 平稳,原因在于黑龙江省的惠农政策不断大力推进, "两减免、三补贴"措施有效地提升了农民的种粮积 极性,并且耕地面积不断扩张,推进了2004—2012 年间黑龙江省粮食产量的稳固增加,使碳汇总量不 断提升。③2013—2017年为波动下降阶段,由3.75× 10⁷ t下降为2.95×10⁷ t,年均减少率为6%。④2018— 2020年为快速上升阶段,由3.49×10⁷ t上升至4.02× 10⁷ t, 年均增长率为7%, 原因在于"十三五"时期中央 将绿色发展放在首要地位,大力促进农业技术改革的

一系列政策措施使得黑龙江省农业碳排放量减少,加之农作物产量不断增长,进一步提升了农业的碳吸收能力。

就2000—2020年黑龙江省农业碳排放结构而言,畜牧养殖、农资投入、水稻种植和农田N₂O对农业碳排放总量的贡献率分别为32.24%、32.17%、25.28%和10.31%。其中畜牧养殖碳排放占比呈现下降趋势由2000年的36.54%下降为2020年的18.86%,农资投入占比较稳定,水稻种植碳排放占比由19.92%增长至38.51%,农田N₂O占比略微下降,由11.60%下降至9.70%。这表明随着黑龙江省水稻种植面积的不断扩大,农业碳排放的主要源头开始由畜牧养殖向水稻种植过渡。

分析 2000—2020年黑龙江省农业碳汇量结构可知,黑龙江省作为产粮大省,其粮食作物对该省农业碳汇的贡献率较高,且占比不断增大,由2000年的88.97%增加到2020年的98.60%。而经济作物则由2000年的11.03%逐步减少为2020年的1.40%。粮食作物碳吸收以产量较高的玉米、豆类和水稻为主,占

比分别为68%、15%和11%,而各类经济作物碳吸收量占比均小于2%,对黑龙江省农业碳汇量的贡献较少。

2.1.2 空间特征分析

为了更好地对黑龙江省各市域(地区)农业净碳汇的空间分布进行分析,本研究利用ArcGIS软件,通过自然间断点分级法对各市域(地区)农业净碳汇量进行空间上的可视化表达,受限于篇幅,仅列出2000、2005、2010、2015和2020年5个代表年份的空间分布情况(图1)。

黑龙江省农业净碳汇量整体呈西南部高、东部和北部低的分布格局,各市(地区)的农业净碳汇总量较基期均呈上升趋势,其中大庆的涨幅最大,由2000年的2.66×10° t增长为2020年的2.90×10° t,年均增长率为12.69%。双鸭山、鹤岗、黑河三市净碳汇量增幅位居第二、三、四位,年均增长率分别为10.05%、9.97%和9.68%。相对来说,黑龙江省农业净碳汇量增幅最小的为哈尔滨市,年均增长率仅为3.55%,可能的原因是随着哈尔滨市产业结构转型,粮食播种面积相应

增长较缓,造成净碳汇量增长率不高。2020年黑龙江省各市域净碳汇量的前三名为地处黑龙江省中西部的齐齐哈尔、绥化和哈尔滨三市,净碳汇量分别为7.03×10⁶、6.89×10⁶ t和6.71×10⁶ t,三市农业净碳汇总和占当年黑龙江省净碳汇总量的51.28%。究其原因,这些地区位于松嫩平原,地势平坦,具有耕地面积大、作物产量高和机械化程度高的特点,使其农业碳汇量较高,可以充分中和农业生产过程中产生的碳排放。七台河、伊春和大兴安岭农业净碳汇最低,三者的农业净碳汇量占比均小于1.7%,大兴安岭和伊春林地资源较为丰富,农作物播种面积较小,可能是造成该地区农业净碳汇较低的原因之一。由此可见,黑龙江省各地区的农业净碳汇总量差别较大,各市(地区)的农业净碳汇增幅差异也较为明显。

2.2 黑龙江省农业碳排放公平性

为判断各地区的农业碳排放公平性,基于碳排放量、碳吸收量和农业总产值,计算各地的农业碳排放生态承载系数(ESC)和经济效率系数(ECC)。结果如表8所示,2000—2020年间ESC系数在0.447~1.785

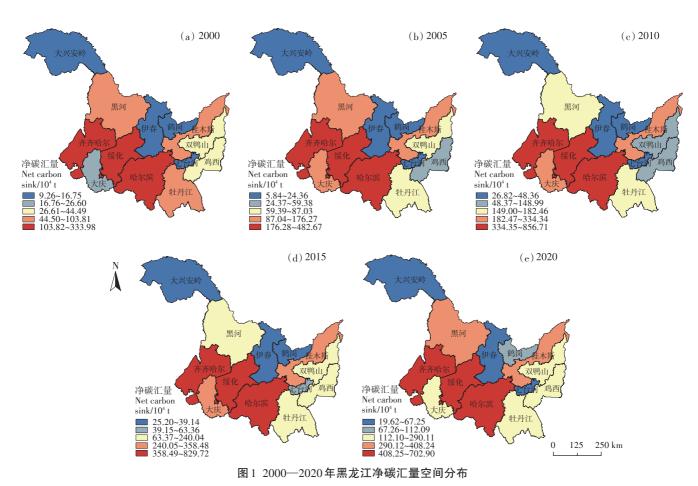


Figure 1 Spatial distribution of net carbon sink in Heilongjiang Province from 2000 to 2020

表8 2000-2020年黑龙江省农业碳排放 ESC、ECC 系数

Table 8 ESC and ECC coefficients of agricultural carbon emissions in Heilongjiang Province from 2000 to 2020

地区	20	00	20	05	20	10	20	15	20	20
Area	ESC	ECC								
哈尔滨	1.044	1.316	0.975	1.135	0.896	1.080	0.868	1.087	1.004	1.094
齐齐哈尔	1.288	0.983	1.144	0.942	1.100	0.818	1.088	0.722	1.107	0.762
鸡西	0.860	0.940	0.726	0.873	0.879	0.949	1.014	0.989	0.734	0.765
鹤岗	0.879	0.813	0.854	0.948	0.551	0.663	0.588	0.537	0.749	0.795
双鸭山	1.176	0.876	1.141	1.061	1.004	1.039	1.559	1.015	0.865	0.792
大庆	0.544	0.751	0.972	0.948	1.164	1.019	1.258	1.213	1.080	1.194
伊春	1.001	1.553	0.757	1.893	0.809	2.294	0.727	2.232	0.867	2.292
佳木斯	1.000	0.691	1.055	0.809	0.779	0.752	0.734	0.692	0.615	0.632
七台河	0.777	0.660	0.651	0.676	1.149	1.065	1.167	0.782	1.194	0.844
牡丹江	0.946	0.851	0.806	1.025	1.073	1.606	1.141	1.772	1.285	1.483
黑河	1.514	1.004	1.416	1.067	1.135	1.083	1.169	1.082	1.785	1.614
绥化	0.859	0.907	1.027	0.883	1.150	0.878	1.091	0.971	1.282	1.308
大兴安岭	0.812	0.994	0.447	1.647	0.837	2.390	0.791	2.598	0.837	2.769

之间, ECC 系数在0.537~2.769之间。2020年大庆、七 台河和绥化的 ESC 系数较 2000 年有了大幅度上升, 分别增长了98.53%、53.67%和49.24%;牡丹江、黑河 和大兴安岭也呈现上升趋势,较2000年分别增长 35.84%、17.90%和3.08%。佳木斯、双鸭山在研究期 间ESC系数呈现先升后降的变化规律,但总体下降态 势显著,降幅分别为38.50%和26.45%;鸡西、鹤岗、齐 齐哈尔、伊春和哈尔滨表现出不稳定的波动状态,但 整体呈现下降趋势,降幅分别为14.65%、14.79%、 14.05%、13.39% 和 3.83%。就 ECC 系数而言,大兴安 岭、牡丹江和黑河呈现大幅度上升趋势,分别增长了 178.57%、74.27%和60.76%,其中大兴安岭地区ECC 指数持续稳定上升,大庆、伊春、绥化和七台河呈现波 动上升状态。齐齐哈尔持续下降且降幅最大,为 22.48%。鸡西、哈尔滨、双鸭山、佳木斯和鹤岗在研 究期间均表现出波动下降态势。

为进一步明晰生态承载系数和经济效率系数在空间上的分布规律及其各自代表的碳排放公平性类型,本研究综合生态承载系数和经济效率系数的计算结果将黑龙江省各地区分为四个区域:①双高区:即生态承载系数和经济效率系数均大于1;②双低区:即生态承载系数和经济效率系数均小于1;③生态高值区:即生态承载系数大于1而经济效率系数小于1;④经济高值区:即经济效率系数大于1而生态承载系数小于1。2000—2020年的碳排放公平性类型空间分布情况如图2所示。

整体来看,双高区主要向南部和中部聚集,双低

区逐渐向东部集中。2020年较2000年双低区大幅度 减少,由2000年的7个市减少为2020年的4个市,双 高区逐渐增多,由2000年的3个市增加到2020年的5 个市,并且无论是双低区还是双高区均具有由分散逐 渐聚集的趋势,说明无论生态承载系数和经济效率系 数是高值还是低值,都会对周边地区产生有利或不利 影响,具有明显的外部性。2000—2020年黑河一直 属于双高区,说明其无论是生态承载能力还是经济效 率均具有较高水平,能够匹配自身农业碳排放量,在 一定程度上也为周边地区承担了碳排放压力。齐齐 哈尔在研究期内始终属于生态高值区,说明该地政府 对于生态发展较为注重,生态承载能力较高,但应注 意生态和经济并行发展。伊春由2000年双高区转变 为经济高值区,对黑龙江省的经济贡献程度大于农业 碳排放贡献率,同时也从侧面说明伊春市生态承载能 力出现了下降。哈尔滨由2000年的双高区转变为 2005-2015年间的经济高值区,而后在2020年恢复 为双高区,说明该市的碳排放量可以匹配同等的农业 产值,属于低耗高效率类型。绥化、大庆和牡丹江均 由双低区转变为双高区,这些区域的生态承载力和农 业生产效率均有大幅度提升。大兴安岭由双低区变 为经济高值区,说明其农业生产正在不断向好,以较 少的碳排放换取了较多的农业产出,但生态承载力仍 需加强。七台河由双低区变为生态高值区,其自身的 生态承载力可以中和其农业碳排放量,但农业碳排放 量并不能够匹配其同等的农业产值。双鸭山和佳木 斯由生态高值区变为双低区,说明该市的生态承载力

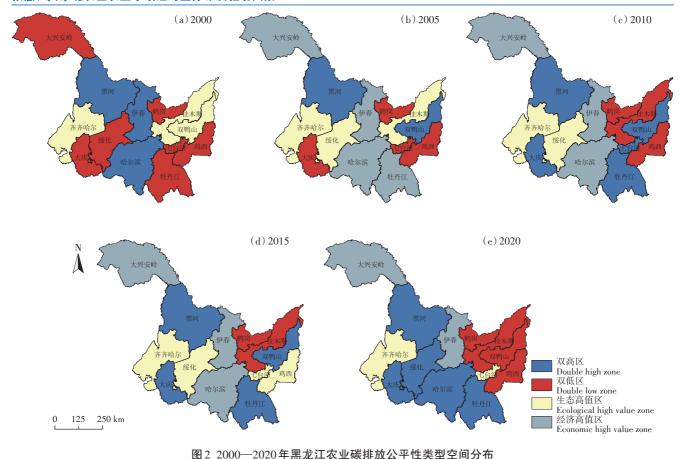


Figure 2 Spatial distribution of agricultural carbon emission equity types in Heilongjiang Province from 2000 to 2020

正在逐步下降,已不能承载农业碳排放量。鹤岗一直处于双低区,鸡西仅2015年为生态高值区,其他年份均为双低区,说明这些地区的碳排放量过度,自身的生态承载力无法中和,也没有匹配同等的农业产值,碳排放经济效率低下,对周边地区造成生态压力和经济利益损失。

2.3 黑龙江省农业净碳汇驱动因素

2.3.1 因子探测结果

运用地理探测器对黑龙江省农业净碳汇量空间分异的驱动因子进行分析,结果如表9所示。所有因素均通过1%的显著性检验,依据驱动程度排序为:耕地面积(X4)>机械化水平(X6)>城镇化水平(X3)>农业产业结构(X2)>化肥施用强度(X5)>人均农业生产总值(X1)>气温(X7)>日照(X9)>降水(X8),可以看出农业生产和社会经济因素对农业净碳汇空间分布的作用较强,自然环境因素对其驱动力相对较弱。

耕地面积和机械化水平的 q 值分别为 0.818 和 0.817, 说明耕地面积和机械化水平是农业净碳汇空间分异的主导因素。耕地面积越大, 可用于种植农作

表9 黑龙江省农业净碳汇空间分异驱动因子探测结果

Table 9 Detection results of driving factors for spatial differentiation of agricultural net carbon sink in Heilongjiang Province

维度 Dimension	因子 Factor	q值 q value	P值 P value	排序 Rank
社会经济	人均农业生产总值X1	0.148	< 0.001	6
	农业产业结构 X2	0.390	< 0.001	4
	城镇化水平X3	0.461	< 0.001	3
农业生产	耕地面积X4	0.818	< 0.001	1
	化肥施用强度X5	0.261	< 0.001	5
	机械化水平X6	0.817	< 0.001	2
自然环境	气温 X7	0.143	< 0.001	7
	降水 X8	0.048	< 0.001	9
	日照 <i>X</i> 9	0.060	< 0.001	8

物的土地面积越多,产出的农作物产量越高,农业净碳汇量就越大。目前黑龙江省大力推进农业科技现代化,使得农业机械化水平得到了显著提升,不断向低能耗高效率的方向靠拢,有效促进了农业生产效率提升,起到了减排增汇的作用。

城镇化水平、农业产业结构和化肥施用强度的q

值分别为 0.461、0.390 和 0.261,是影响黑龙江省农业净碳汇空间格局的主要因素。分析其原因,一方面由于城镇化水平的不断提高,农村人口不断流失,耕地撂荒现象随之而来,劳动力减少和老龄化迫使人们不得不加大生产过程中农用物资投入,造成碳排放量上升,耕地大面积撂荒也导致作物减产,降低了农业碳汇量。另一方面种植业由于其特殊的碳源/碳汇双重属性在农业产业中扮演着特殊角色,就黑龙江省而言,种植业的碳汇能力不仅可以中和自身的碳排放,还可以抵消养殖所带来的碳排放量,所以农业产业结构变化对农业净碳汇具有一定的驱动作用;化肥投入对于粮食增产具有明显的贡献作用,20世纪80年代我国化肥施用对粮食单位面积产量的贡献率为55%~57%,所以在科学合理的施用化肥和控制化肥使用量时,也不能忽视其对农业净碳汇量起到的积极作用。

人均农业生产总值和气温的 q 值分别为 0.148 和 0.143,均大于 0.1,是驱动农业净碳汇空间分异的重要因素。人均农业生产总值越高,流向农业基础设施建设和生产技术升级的资源越多,带动农业生产能力提高的同时还具有降低生产所造成的温室气体排放的作用。不仅如此,人均农业生产总值提高后,政府会逐渐将靠牺牲环境质量和生态进行发展的理念转变为生态和发展并重的发展策略,大力调整产业结

构、提升农业技术、采用低耗环保农业设备以及科学的种养措施可以有效降低农业碳排放量,提升农业净碳汇量。气温直接影响农作物的成熟率以及产量,作物关键生长期内过低或过高的温度都会影响作物生长,对农业净碳汇产生作用。

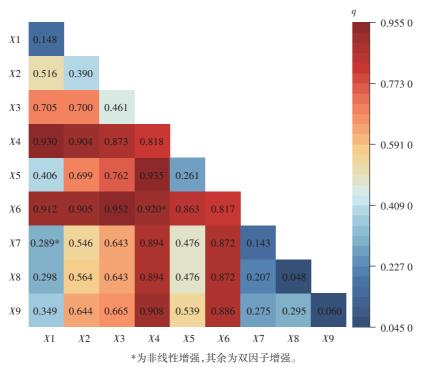
日照和降水的q值较小,分别为0.060和0.048,说明其对农业净碳汇空间分异的驱动力相对较弱。 2.3.2 交互探测结果

通过对各驱动因子进行交互探测发现,不同的 因子两两交互作用均为增强,无减弱或独立的情况, 说明农业净碳汇是耕地面积、机械化水平、城镇化水 平、农业产业结构、化肥施用强度、人均农业生产总 值和气温等不同因子交互作用的结果,具体数值如 图3所示。

耕地面积和机械化水平与其他因子的交互作用最强,q值均在0.810以上,说明耕地面积和机械化水平综合作用对农业净碳汇的空间格局影响较大。值得注意的是,机械化水平和城镇化水平的交互作用q值高达0.952,表明两者的交互作用对农业净碳汇空间分异起关键作用。

3 讨论

本研究中2000—2020年黑龙江省各市农业净碳



* refers to nonlinear enhancement, while the rest refer to double factor enhancement.

图 3 黑龙江省农业净碳汇空间格局驱动因素交互探测结果

Figure 3 Interactive detection results of influencing factors on the spatial pattern of agricultural net carbon sink in Heilongjiang Province

汇总量均为正值,与李强等^[3]、田云等^[15]以及谢永浩等^[35]的研究结果相似,但与FAO发布的农业生态系统可以抵消掉80%的因农业生产导致的温室气体排放的结论^[36]不符,主要是由于黑龙江省作为我国产粮大省,虽然其农业生产引发碳排放量较多,但由于该省相较于其他地区而言基础生态环境较好,科技投入较为充足,且作物产量较高,使其具有较强的碳汇能力和潜力,足以抵消掉产生的温室气体排放量。

为实现黑龙江省农业低碳可持续发展,基于本研究结果,对黑龙江省农业发展提出下列建议:

第一,继续推进低耗能、高产出的农业低碳生产技术发展。通过化肥施用方式和强度的科学合理化、清洁能源的开发与利用、基层农技的推广以及农机化水平的提升来达到增加净碳汇的目的。相关研究表明,保护性耕作和作物轮作等农业生产模式能够增加农业固碳量,政府可以针对不同地区条件调整其农业生产模式。对于畜牧业碳减排可以从优化饲料成分、改善畜舍条件、粪便无害化处理等方面入手减少其碳排放量。水稻种植作为黑龙江省最主要的碳源,可以在保证充分满足粮食需求的前提下,改种其他旱作作物,或在水稻生育期间适当进行排水来减少甲烷的排放。

第二,根据碳排放公平性分类结果制定差异化的 发展策略。对于鹤岗、佳木斯和鸡西等双低区的发展 要多方并重,一方面要在保护生态环境的前提下调整 农业产业结构和生产模式,另一方面要加强技术革新,重视提升农业生产效率;对于伊春等经济高值区 应强化低碳农业发展理念,利用自身良好的经济优势,大力发展生态农业,推动农业现代化发展;对于齐齐哈尔等生态高值区可在发展过程中提高农业生产效率来带动经济增长;对于绥化和哈尔滨等双高区要在保持现有优势的基础上,尽可能增加净碳汇量,为其他地区减轻压力。

第三,多视角、多维度制定农业减排增汇政策。 ①根据因子探测结果,要严格保证耕地面积不减少, 防止耕地撂荒现象发生。②在城镇化水平增长带动 机械化水平提升的同时,也要防止城镇化现象挤占耕 地,造成耕地非农化;③交互探测结果显示不同指标 的交互作用与其自身的驱动作用相比大大增强,说明 农业净碳汇是由一个复杂的系统决定的,想要提高农 业净碳汇量也要从社会经济和农业生产等不同角度 综合人手,应利用多方面政策的配合和调整优化来达 到"1+1>2"的减排增汇效果。

4 结论

本研究在测算 2000—2020 年黑龙江省农业净碳汇的基础上,分析了农业净碳汇在时间和空间上的特征及演变趋势,明晰了黑龙江省各市域农业碳排放的公平性差异,并基于地理探测器模型量化了各驱动因素对农业净碳汇空间分异的影响,主要结论如下:

- (1)从农业净碳汇时序特征来看,2000—2020年 黑龙江省农业始终发挥着碳汇的功能。其发展趋势 大致分为快速下降、大幅度上升、波动下降和快速回 升4个阶段。碳源中水稻种植碳排放占比不断上升, 农资投入保持稳定,农田 N₂O 碳排放占比略微下降, 畜牧养殖碳排放占比逐渐减小。碳汇则以玉米、豆类 和水稻三类作物的碳吸收为主。
- (2)从农业净碳汇的空间演变来看,各市(地区)的农业净碳汇总量均呈现上升态势,大庆涨幅最大,年均增长率为12.69%。地处黑龙江省中西部的齐齐哈尔、绥化和哈尔滨三市始终为黑龙江省各市域净碳汇量的前三名。
- (3)从农业碳排放的公平性分区来看,双高区主要向南部和中部的哈尔滨、黑河和绥化等地聚集,双低区逐渐向东部的鸡西、双鸭山和鹤岗等地集中。2020年较2000年双低区大幅度减少,由2000的7个市减少为2020年的4个市。双高区逐渐增多,由2000年的3个市增加到2020年的5个市。
- (4)从农业净碳汇的驱动因素来看,耕地面积、机械化水平、城镇化水平、农业产业结构、化肥施用强度和人均农业生产总值等社会经济和农业生产因素对农业净碳汇空间分异的影响较强,而气温、日照和降水等自然环境因素对其驱动力较弱。交互探测结果表明,耕地面积和机械化水平与其他各因素的交互作用较强,机械化水平和城镇化水平的交互作用q值最高,影响力最大。

参考文献:

- [1] 牛书丽, 陈卫楠. 全球变化与生态系统研究现状与展望[J]. 植物生态学报, 2020, 44(5): 449-460. NIU S L, CHEN W N. Global change and ecosystems research progress and prospect[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(5): 449-460.
- [2] 金贵, 邓祥征, 赵晓东, 等. 2005—2014年长江经济带城市土地利用 效率时空格局特征[J]. 地理学报, 2018, 73(7):1242-1252. JIN G, DENG X Z, ZHAO X D, et al. Spatio-temporal patterns of urban land use efficiency in the Yangtze River economic zone during 2005—2014

- [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7):1242-1252.
- [3] 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 CSAE*, 2022, 38(11):239-249.
- [4] FAO. The state of food and agriculture; social protection and agriculture; breaking the cycle of rural poverty[R]. Rome; FAO, 2016.
- [5] WENG B, ZHANG W, WANG Y. Path exploration and countermeasure innovation for developing circular agriculture in southeast China[J]. Asian Agricultural Research, 2014, 6(3):20-25.
- [6] PAUSTIAN K, ANDRÉN O, JANZEN H H, et al. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions[J]. Soil Use and Management, 2010, 13 (Suppl 4):230-244.
- [7] 戴小文, 李金花, 何艳秋, 等. 2000—2020年中国畜牧业区域碳排放公平性与排放效率[J]. 资源科学, 2023, 45(1):62-76. DAI X W, LI J H, HE Y Q, et al. Regional equity and efficiency of carbon emissions of China's livestock industry in 2000—2020[J]. Resources Science, 2023, 45(1):62-76.
- [8] ZHAO L, LI X, LI X, et al. Dynamic changes and regional differences of net carbon sequestration of food crops in the Yangtze River economic belt of China[J]. *International Journal of Environmental Research* and Public Health, 2022, 19(20):13229.
- [9] 李波, 张俊飚, 李海鵬. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解 [J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8):80-86. LI B, ZHANG J B, LI H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8):80-86.
- [10] 谭美秋, 崔耀平, 马晓哲, 等. 河南省农田生态系统碳汇核算研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(9):1129-1137. TAN M Q, CUI Y P, MA X Z, et al. Study on carbon sink estimation of cropland ecosystem in Henan Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(9):1129-1137.
- [11] 郑博福, 梁涵, 万炜, 等. 江西省县域农业碳排放时空格局及影响 因素分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23):70-80. ZHENG B F, LIANG H, WAN W, et al. Spatial-temporal pattern and influencing factors of agricultural carbon emissions at the county level in Jiangxi Province of China[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23):70-80.
- [12] CHEN X, MA C, ZHOU H, et al. Identifying the main crops and key factors determining the carbon footprint of crop production in China, 2001—2018[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 172: 105661.
- [13] 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.
- [14] 李绵德, 周冬梅, 朱小燕, 等. 河西走廊 2000—2020 年农业碳排放时空特征及其影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 940-952. LI M D, ZHOU D M, ZHU X Y, et al. Spatial-temporal

- characteristics of agricultural carbon emissions and influencing factors in the Hexi Corridor from 2000 to 2020[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(4):940–952.
- [15] 田云, 张君. 地理分区视角下的农业碳效应驱动机理研究[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2020(2):78-87. TIAN Y, ZHANG J. Research on driving mechanism of agricultural carbon effect from the perspective of geographical divisions[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Science Edition), 2020(2):78-87.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] HE W J, ZHANG B. A comparative analysis of Chinese provincial carbon dioxide emissions allowances allocation schemes in 2030; an egalitarian perspective[J]. Science of the Total Environment, 2021, 765: 142705.
- [19] 卢俊字, 黄贤金, 戴靓, 等. 基于时空尺度的中国省级区域能源消费碳排放公平性分析[J]. 自然资源学报, 2012, 27(12): 2006–2017. LU J Y, HUANG X J, DAI L, et al. Spatio-temporal scale analysis on the equality of energy consumption carbon emission distribution in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(12): 2006–2017.
- [20] 刘志华, 徐军委. "双碳"目标下中国省域碳排放公平性及其影响 因素[J]. 地理科学, 2023, 43(1):92-100. LIU Z H, XU J W. Equity and influence factors of China's provincial carbon emissions under the "Dual Carbon" goal[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(1):92-100.
- [21] 高晶, 唐增, 李重阳. 中国城乡居民食物消费碳排放的对比分析 [J]. 草业科学, 2018, 35(8):2022-2030. GAO J, TANG Z, LI C Y. Comparative analysis of food consumption carbon emission of urban and rural residents in China[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(8): 2022-2030.
- [22] 赵荣钦, 刘英, 丁明磊, 等. 河南省农田生态系统碳源/汇研究[J]. 河南农业科学, 2010(7): 40-44. ZHAO R Q, LIU Y, DING M L, et al. Research on carbon source and sink of farmland ecosystems in Henan Province[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2010(7): 40-44.
- [23] DUBEY A, LAL R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India and Ohio, USA[J]. *Crop Improve*ment, 2009, 23:332–350.
- [24] 杭晓宁, 张健, 胡留杰, 等. 2006—2015年重庆市农田生态系统碳足迹分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(5):524—531. HANG X N, ZHANG J, HU L J, et al. Analysis of carbon footprints in farmland ecosystem of Chongqing City 2006—2015[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science), 2018, 44(5):

524-531.

- [25] 张强, 巨晓棠, 张福锁. 应用修正的IPCC2006方法对中国农田 N₂O 排放量重新估算[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1):7-13. ZHANG Q, JU X T, ZHANG F S. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC2006 guideline method[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18 (1):7-13.
- [26] IPCC. Climate change 2007; mitigation of climate change contribution of working group

 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007;63−67.
- [27] 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 Y X, WANG L J, SHENG M Y. Empirical study on carbon emission of agricultural production in Karst region of Guizhou Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42 (3):150-157.
- [28] 翁翎燕, 朱振宇, 韩许高, 等. 江苏省农田植被净碳汇时空格局分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6):233-241. WENG L Y, ZHU Z Y, HAN X G, et al. Spatial-temporal pattern of net carbon sink of farmland vegetation in Jiangsu Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(6):233-241.
- [29] 郝小雨. 基于碳足迹的黑龙江垦区农业生态系统碳源/汇时空变化[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(8):64-73. HAO X Y. Spatiotemporal variation of carbon source/sink in agricultural ecosystem based on carbon footprint in Heilongjiang land reclamation areas[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(8):64-73.
- [30] 陈罗烨, 薛领, 雪燕, 中国农业净碳汇时空演化特征分析[J]. 自然

- 资源学报, 2016, 31(4):596-607. CHEN L Y, XUE L, XUE Y. Spatial-temporal characteristics of China's agricultural net carbon sink[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(4):596-607.
- [31] 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. Spatio-temporal variation and driving forces of net carbon sink of conservation tillage in China[J] China Population, Resources And Environment, 2022, 32(10):15-23.
- [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. Study on the spatiotemporal differentiation and driving mechanism of agricultural carbon effect in China[J]. Ningxia Social Sciences, 2021(5):74-84.
- [33] 黄晓慧, 杨飞, 陆迁. 城镇化、空间溢出效应与农业碳排放:基于2007—2019年省级面板数据的实证分析[J]. 华东经济管理, 2022, 36(4):107-113. HUANG X H, YANG F, LU Q. Urbanization, spatial spillover effects, and agricultural carbon emissions: empirical analysis based on the data of provincial panel from 2007 to 2019[J]. East China Economic Management, 2022, 36(4):107-113.
- [34] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72 (1):116-134. WANG J F, XU C D. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [35] 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.
- [36] FAO. FAOSTAT[DB/OL]. [2023-05-18]. https://www.fao.org/faostat/zh/#data