

河南省农业碳排放时空分异、影响因素及趋势预测

常青¹, 蔡为民², 谷秀兰³, 吴云青², 张佰林²

(1.天津工业大学 经济与管理学院, 天津 300387; 2.天津工业大学
环境科学与工程学院, 天津 300387; 3.海南大学 公共管理学院, 海南 海口 570228)

摘要: [目的] 研究河南省农业碳排放时空演化特征及驱动机制, 预测未来 10 a 农业碳排放变化趋势, 以期制定农业固碳减排方案, 促进农业低碳绿色转型。[方法] 基于碳排放公平性评价模型、地理探测器及 GM(1,1) 模型, 分析河南省农业碳排放的时空演化特征、驱动因素及发展趋势。[结果] ① 研究期内河南省农业净碳排放量呈逐年减少趋势, 且表现为西南高、东北低的特征。碳源方面, 畜牧业碳排放占据较大比例, 且以牛、羊、猪碳排放为主。碳汇方面, 小麦、玉米和蔬菜对碳吸收的贡献较大。② 农业碳排放生态承载系数呈北部、南部高, 西部低的格局, 经济贡献系数呈东南高, 西南低的特征。③ 农业从业人口、农村居民人均可支配收入、农业机械总动力、财政教育支出是农业碳排放空间分异的关键因素, 且各因子交互作用较强。④ 2021—2030 年河南省农业净碳排放量持续下降, 预计全省在 2029 年可实现农业碳中和目标。[结论] 未来应加强科普宣传, 积极推广低碳农业生产技术, 提高农业资源综合利用效率。同时, 各地应注重系统整合, 加强区域协作, 实现农业碳减排区域一体化。

关键词: 农业碳排放; 时空分异; 公平性评价模型; 地理探测器; 灰色预测; 河南省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0367-11

中图分类号: F323, X321

文献参数: 常青, 蔡为民, 谷秀兰, 等. 河南省农业碳排放时空分异、影响因素及趋势预测[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 367-377. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230220.011; Chang Qing, Cai Weimin, Gu Xiulan, et al. Spatial-temporal variation, influencing factors, and trend prediction of agricultural carbon emissions in Henan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 367-377.

Spatial-Temporal Variation, Influencing Factors, and Trend Prediction of Agricultural Carbon Emissions in Henan Province

Chang Qing¹, Cai Weimin², Gu Xiulan³, Wu Yunqing², Zhang Bailin²

(1.School of Economics and Management, Tiangong University, Tianjin 300387,
China; 2.School of Environmental Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin
300387, China; 3.School of Public Administration, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: [Objective] The spatial-temporal evolution characteristics and driving mechanism of agricultural carbon emissions in Henan Province were determined to predict the change trend of agricultural carbon emissions during the next ten years in order to formulate an agricultural carbon sequestration and emission reduction scheme, and to promote the transformation to low-carbon and green agricultural production. [Methods] We used a carbon emission equity evaluation model, GeoDetector, and the GM (1,1) model to accomplish the study objectives. [Results] ① Agricultural net carbon emissions in Henan Province declined over time during the study period, with a distribution pattern of “high in the southwest and low in the northeast”. Carbon emissions from animal husbandry accounted for a large proportion of total emissions, and carbon emissions were mainly from cattle, sheep, and pigs. Wheat, corn and vegetables contributed more to carbon absorption than other sinks. ② The ecological carrying coefficient of agricultural carbon emissions was higher in the north and south, and lower in the west. The coefficient of economic contribution was high

收稿日期: 2022-07-08

修回日期: 2022-09-21

资助项目: 国家社会科学基金项目“我国乡村振兴中乡村治理与精准扶贫的政策协同研究”(18BZZ077)

第一作者: 常青(1998—), 女(汉族), 甘肃省兰州市人, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用碳排放、国土空间规划。Email: 1285067796@qq.com.

通信作者: 蔡为民(1970—), 男(汉族), 山东省淄博市人, 博士, 教授, 主要研究方向为土地资源管理及公共政策分析。Email: 2771215@sina.com.

in the southeast and low in the southwest. ③ The agricultural employee population, per capita disposable income of rural residents, agricultural machinery gross power, and fiscal expenditures on education were the key factors affecting spatial differences in agricultural carbon emissions, and interactions among these factors were strong. ④ Agricultural net carbon emissions in Henan Province will continue to decrease from 2021 to 2030. It is estimated that Henan Province will achieve the goal of agricultural carbon neutrality by 2029. [Conclusion] In the future, Henan Province should strengthen science popularization, actively promote low-carbon agricultural production technology, and increase the efficiency of comprehensive utilization of agricultural resources. Additionally, all localities should give increased attention to system integration, strengthening regional cooperation, and achieving regional integration of agricultural carbon emission reduction.

Keywords: agricultural carbon emissions; spatial-temporal differentiation; fairness evaluation model; GeoDetector; grey prediction; Henan Province

当前,全球变暖趋势明显加快,能源枯竭、自然灾害日趋频繁,严重阻碍了社会经济的可持续发展。为有效应对气候危机、改善生态环境,世界各国纷纷采取行动,加快重点领域、行业实现深度脱碳^[1]。二三产业是碳排放的主要来源,但农业对气候变化的影响也不容忽视^[2-3]。中国是农业大国,农业发展关乎国计民生,影响社会稳定,是全国高度关注的问题。由于农用物资的大量投入及牲畜饲养量的逐年增加,甲烷、氧化亚氮等温室气体排放仍处于较高水平,致使农业生态环境面临较大压力^[4]。现有研究表明,农业碳排放约占中国温室气体排放总量的 24%,且呈持续增长趋势^[5]。农业具有重要的生态保障功能及碳源、碳汇双重效应。因此,推进农业固碳减排,构建低碳绿色循环农业生产体系对于中国实现碳中和目标具有重要意义^[6-7]。

目前,许多学者从不同的角度对农业碳排放开展了较为深入的研究,为中国转变农业发展方式提供了新的思路。金书秦等^[8]分析了中国农业碳排放的阶段性特征。廖卫东等^[9]揭示了西部地区农业碳排放的时空演化规律。田云等^[10]科学评估了中国七大区域农业碳效应,并对碳排放的公平性进行综合评价。何艳秋等^[11]采用对应分析和面板模型研究中国农业碳排放的驱动因素。仇伟等^[12]采用 VAR 模型分析农业碳排放影响因素及动态响应机制。徐丽等^[13]基于标准差优选组合模型预测了中国农牧业碳排放状况。冉锦成等^[14]基于 SBM 模型测算了西北地区农业碳减排潜力。总体而言,现有研究多从农资投入方面估算区域农业碳排放总量,较少开展农业碳汇测算,且研究尺度较为宏观。此外,农业碳排放驱动机制分析中,较少考虑各因素的相互作用及空间分异。中国地域辽阔,各地资源禀赋不同,农业生产结构及碳排放特征存在较大差异。因此,基于多维视角构建省域农业碳排放、碳吸收核算体系,有利于精准识别区域农业绿色发展中的问题,因地制宜采取

差异化的农业减排增汇措施,推动农业低碳转型。

河南省是中国的农业大省,在稳定粮食安全、构建农业发展新格局等方面发挥着重要示范带动作用。近年来,河南省加快现代农业强省建设,着力提升农产品质量和效益,为实施乡村振兴战略提供重要支撑。随着农业经济实力的持续提升,河南省也面临农业面源污染加剧、农业绿色发展内生动力不足等问题。因此,本研究以河南省为研究对象,分析农业碳排放时空演变特征及驱动因素,并对农业碳排放趋势进行科学预测,以期为区域农业碳排放治理提供理论依据和政策启示,也为其他地区农业可持续发展提供借鉴。

1 研究区概况与数据来源

河南省位于中国中部,地理位置为北纬 $31^{\circ}23' - 36^{\circ}22'$,东经 $110^{\circ}21' - 116^{\circ}39'$,地势西高东低,总面积为 $16.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。境内土壤肥沃、气候温和,降水充沛,适宜多种农作物生长。2020 年河南省三次产业结构为 9.7 : 41.6 : 48.7,农业总产值达 9.96×10^{11} 元,其中种植业产值为 6.24×10^{11} 元,畜牧业产值为 2.86×10^{11} 元。粮食作物主要是小麦和玉米,经济作物以大豆、花生、蔬菜等为主。畜牧业是河南省的重要支柱产业,生猪、牛、羊、家禽等优势产业发展迅速,经济效益较高。2020 年全省常住人口 9.94×10^7 人,其中,农业人口 4.43×10^7 人,城镇化率为 55.53%。

本研究所涉及的化肥、农药、农膜、柴油等农用物资消耗情况、农作物播种面积、农田水利灌溉面积、主要农作物产量、猪、牛、羊、兔等畜禽年末存栏量、各地农业总产值、农业从业人口、农业产业结构、农村居民人均可支配收入、财政教育支出、农业机械总动力等社会经济原始数据均来源于《河南省统计年鉴(2010—2021)》。

2 研究方法

2.1 农业碳排放测算模型

(1) 种植业碳排放。种植业碳排放主要考虑农地利用碳排放及水稻种植产生的甲烷。其中,农地利用碳排放包括 3 个方面:化肥、农药、农膜、柴油等农用物资消耗所产生的碳排放、农业灌溉活动引发的碳排放及农地翻耕导致有机碳的流失。具体测算公式如下^[15-16]:

$$E_1 = \sum u_i \times r_i \quad (1)$$

$$E_2 = \sum s \times h \quad (2)$$

式中: E_1 表示农地利用碳排放量(10^4 t); u_i 和 r_i 分别表示第 i 类碳源实际使用量(10^4 t)及碳排放系数^[17],各类碳源排放系数见表 1。 E_2 为水稻种植碳排放量(10^4 t); s 为水稻种植面积(10^3 hm²); h 为水稻种植碳排放因子(g/m^2 , 以 C 计),参考何艳秋等^[18]的研究,取 $h = 17.85$ 。

表 1 种植业主要碳源及碳排放系数^[19-22]

Table 1 The main carbon source and carbon emission coefficient of planting industry

碳源	碳排放系数(以 C 计)	碳排放系数参考资料来源
化肥	0.89 kg/kg	美国橡树岭国家实验室 ^[19]
农药	4.93 kg/kg	美国橡树岭国家实验室 ^[19]
农膜	5.18 kg/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所 ^[20]
翻耕	312.60 kg/km ²	中国农业大学生物与技术学院 ^[20]
柴油	0.59 kg/kg	联合国政府间气候变化专门委员会 ^[21]
灌溉	266.48 kg/hm ²	丁宝根等 ^[22]

(2) 畜禽养殖碳排放。畜牧业碳排放主要来源于反刍动物肠道发酵及粪便管理过程中产生的温室气体。本研究主要考虑猪、牛、羊、家禽及兔的碳排放量,具体测算公式如下^[23]:

$$E_3 = k_{CH_4} \times \sum f_i \times a_i + k_{N_2O} \times \sum f_i \times b_i \quad (3)$$

式中: E_3 为畜禽养殖碳排放量(10^4 t); k 指全球升温潜能值,其中 $k_{CH_4} = 21$, $k_{N_2O} = 310$, f_i 表示各类畜禽年均饲养量(10^4 头), a_i , b_i 指各类畜禽 CH_4 及 N_2O 排放系数(见表 2)。

表 2 各类畜禽 CH_4 及 N_2O 排放系数^[24]

Table 2 CH_4 and N_2O emission coefficients for livestock and poultry breeding industry

碳源	肠道发酵		粪便管理	
	kg/(头·a) (以 CH_4 计)	kg/(头·a) (以 CH_4 计)	kg/(头·a) (以 N_2O 计)	kg/(头·a) (以 N_2O 计)
猪	1.00	4.00	0.53	
牛	47.00	1.00	1.39	
羊	5.00	0.16	0.86	
家禽	—	0.02	0.02	
兔	0.25	0.08	0.02	

2.2 农业碳吸收测算

本研究重点考虑河南省主要农作物的碳吸收,测算方法参考伍国勇等的研究,其公式如下^[25]:

$$E_4 = \sum A_i \times Y_i \times (1 - W_i) / C_i \quad (4)$$

式中: E_4 为主要农作物碳吸收量(10^4 t); A_i , Y_i 分别为各类农作物碳吸收率(%)及产量(10^4 t); W_i 和 C_i 分别表示各类农作物含水率(%)及经济系数,各参数取值如 3 所示。

表 3 农业碳汇测算关键参数^[25]

Table 3 The key parameters of agricultural carbon sink calculation

主要农作物	碳吸收率	经济系数	含水率
水稻	0.41	0.45	12
小麦	0.49	0.40	12
玉米	0.47	0.40	13
大豆	0.45	0.35	13
棉花	0.45	0.10	8
花生	0.45	0.43	10
蔬菜	0.45	0.60	90

2.3 农业碳排放公平性评价模型

(1) 碳排放生态压力测算。农业碳排放生态承载系数是反映区域农业碳汇能力大小的指标。计算公式如下^[26]:

$$P = \frac{T_i / E_i}{T / E} \quad (5)$$

式中: P 为农业碳排放生态承载系数; T_i , E_i 分别为各市农业碳吸收量(10^4 t)和碳排放量(10^4 t); T 和 E 指全省农业碳吸收量(10^4 t)和碳排放量(10^4 t)。若 P 大于 1,表明该市碳吸收贡献率大于碳排放贡献率,碳汇能力强,具有明显的正外部效应。反之,说明该地区农业碳生态容量较低,对周边地区生态环境产生负面影响。

(2) 碳排放经济效率测算。农业碳排放经济贡献系数是衡量区域农业碳生产力大小的指标。计算公式如下^[26]:

$$M = \frac{G_i / E_i}{G / E} \quad (6)$$

式中： M 为农业碳排放经济贡献系数； G_i, E_i 分别为各市农业生产总值 (10^8 元) 和碳排放量 (10^4 t)； G 和 E 表示全省农业生产总值 (10^8 元) 和碳排放量 (10^4 t)。若 M 大于 1, 表明该市农业生产效率高。反之, 说明该地区农业经济贡献小, 碳排放量较高, 损害了其他地区的利益。

2.4 地理探测器

地理探测器是探讨空间分异性及其成因的重要分析工具, 被广泛用于资源环境、区域经济等研究领域。其中, 因子探测模块主要用来判断各因素是否是造成因变量空间分布差异的重要原因, 并揭示各因素对因变量的影响力大小。地理探测器模型中交互探测模块可以分析各因子两两交互作用对因变量的影响。具体测算公式如下^[27-28]：

$$q = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum n_i \sigma_i^2 \quad (7)$$

式中： q 表示各因素对农业净碳排放的解释力, 其取值区间为 $[0, 1]$ 。 q 值越接近 1, 表明该因素对农业净碳排放的影响越大。 n 表示研究区域样本量, 本研究中 $n=18, \sigma^2$ 表示样本方差。

2.5 灰色预测模型

灰色预测模型 GM(1,1) 用来揭示事物发展变化规律, 因其具备“样本容量小、预测准确率高”等优势, 被广泛用于人口预测、销量预测、污染物浓度预测等领域。本研究采用 GM(1,1) 模型对河南省 2021—2030 年的农业碳排放趋势进行预测。建模基本步骤及公式如下：

$$\lambda(k) = \frac{x^{(0)}(k-1)}{X^{(0)}(k)} \quad (8)$$

首先, 计算原始数列 $x^{(0)}$ 的级比 λ ^[29-30], 若所有级比均位于区间 $(e^{-2/n+1}, e^{2/n+2})$ 内, 说明原始数据序列

适用本模型。否则需对原始数据进行平移转换得到新数列 $x^{(1)}$, 使其满足建模规则。

其次, 建立微分方程, 如公式 (9) 所示^[29-30], 求出参数 a 和 μ , 并将其带入公式 (10) 中^[29-30], 再经过平移转换, 求得对应年份农业碳排放的预测值。

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = \mu \quad (9)$$

$$x^{(1)}(t) = (x^{(0)}(1) - \frac{\mu}{a})e^{-a(t-1)} + \frac{\mu}{a} \quad (10)$$

最后, 对模型运行结果进行检验, 检验标准见表 4^[31]。

表 4 GM(1,1) 模型精度等级

Table 4 GM(1,1) model accuracy grade

精度等级	后验差比值 C	误差概率 p
1 级(好)	<0.35	>0.95
2 级(合格)	<0.50	>0.80
3 级(勉强)	<0.65	>0.70
4 级(不合格)	≥ 0.65	≤ 0.7

3 结果与分析

3.1 碳排放时序特征分析

由表 5 可知, 研究期内河南省农业碳排放总量呈波动下降趋势, 由 2011 年的 3.67×10^7 t 减至 2020 年的 2.73×10^7 t, 减少了 25.56%, 表明该时期农业发展模式发生转变, 碳排放总量得到有效控制。2020 年河南省农业碳吸收量为 1.43×10^7 t, 较 2011 年增长了 17.66%, 说明全省粮食产量稳步增长, 碳汇能力明显提升。整体来看, 河南省农业净碳排放量逐年减少, 其变化趋势与农业碳排放量基本保持一致。但 2020 年农业净碳排放量小幅回升, 表明当前农业减排成效不稳固, 存在一定程度波动。

表 5 2011—2020 年河南省农业碳排放量

Table 5 Agricultural carbon emission in Henan Province from 2011 to 2020

年份	种植业		畜牧业		碳排放/ 10^4 t	碳吸收/ 10^4 t	净碳排放/ 10^4 t
	总量	比例/%	总量	比例/%			
2011	830.85	22.62	2 841.64	77.38	3 672.50	1 213.55	2 458.95
2012	842.86	23.19	2 791.23	76.81	3 634.08	1 234.86	2 399.22
2013	861.62	23.71	2 772.92	76.29	3 634.53	1 265.55	2 368.98
2014	869.37	24.46	2 685.33	75.54	3 554.69	1 278.13	2 276.56
2015	876.21	25.55	2 553.20	74.45	3 429.41	1 334.71	2 094.70
2016	872.87	28.85	2 152.73	71.15	3 025.60	1 304.18	1 721.42
2017	857.36	31.28	1 883.80	68.72	2 741.15	1 362.69	1 378.47
2018	836.67	31.15	1 849.61	68.85	2 686.28	1 384.84	1 301.44
2019	806.37	32.13	1 703.57	67.87	2 509.93	1 396.69	1 113.24
2020	785.85	28.74	1 948.08	71.26	2 733.93	1 427.85	1 306.07

碳源方面,河南省畜牧业碳排放占比较高,且以牛、猪、羊碳排放为主。2020 年牛、猪、羊的碳排放量分别为 5.64×10^6 , 5.74×10^6 , 7.37×10^6 t, 占畜牧业碳排放总量的 96.20%。由图 1 可知,2011—2020 年,牛的碳排放量呈下降趋势且降幅较大,对河南省畜牧业碳减排具有较大贡献。究其原因,近年来国家加大环境整治力度,注重规模养殖,且牛饲养周期长,养殖成本高,部分农户退出养牛行业,因而全省牛的存栏量逐渐减少。种植业方面,化肥是农业碳排放的主要来源,2020 年化肥施用产生的碳排放为 5.80×10^6 t, 占

种植业碳排放总量 73.85%。

碳汇方面,小麦、玉米和蔬菜产量较高,对河南省碳吸收的贡献较大,且三者碳吸收量均呈波动增加态势。河南省是全国最大的小麦主产区,其碳吸收率和经济系数相对较高,因此小麦碳吸收量处于较高水平。2011—2020 年,小麦碳吸收量由 5.66×10^6 t 增长至 6.47×10^6 t, 增长了 14.45%。整体来看,河南省农作物播种面积较为稳定,主要农作物产量持续增长,农田生态系统固碳能力逐步提升,有效缓解农业减排压力。

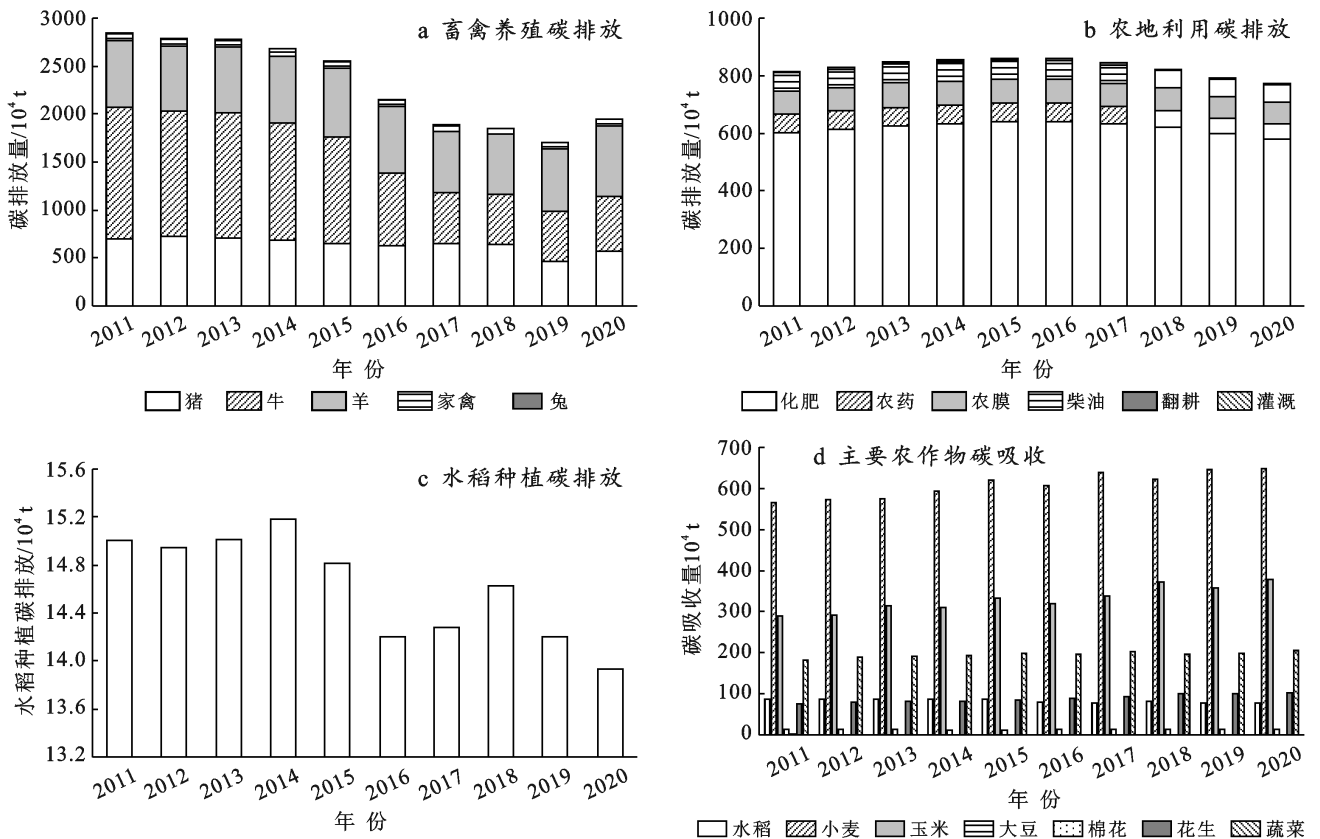


图 1 2011—2020 年河南省农业碳源/碳汇结构

Fig.1 Agricultural carbon source/sink structure in Henan Province from 2011 to 2020

3.2 碳排放空间差异分析

本研究采用 ArcGIS 10.3 软件中的自然间断点分级法将河南省各地级市农业净碳排放量进行空间可视化表达。限于篇幅有限,文中仅列出河南省 2011, 2014, 2017, 2020 年的碳排放空间分布情况(图 2)。

河南省农业净碳排放量呈西南高、东北低的特征,且各地农业净碳排放量与基期相比均呈下降趋势。其中,焦作、郑州、安阳这 3 个城市农业净碳排放量降幅较大,分别为 75.15%, 72.63%, 70.74%。开封和济源农业净碳排放量降幅相对较小,均低于 30%。2020 年农业净碳排放量居前 4 的城市分别为南阳、

驻马店、周口及商丘市,其农业净碳排放量占全省的 52.34%。该类区域是河南省农业大市,土地资源丰富,农用物资投入多,畜禽养殖规模大,农业生产能力较强。因此,这些地区农业碳排放处于较高水平。研究期内,济源、鹤壁、漯河、焦作农业净碳排放量排名相对靠后,均低于 6.00×10^5 t, 主要因为该类区域农业用地缺乏精细化管理,农业投入不足,基础设施建设滞后,农业发展水平较低,且猪、牛、羊等碳排放系数较大的牲畜存栏量少。

3.3 碳排放公平性区域差异

基于公式(5)—(6),测得河南省各地级市农业碳

排放生态承载系数及经济贡献系数,其空间分布差异如图 3 和图 4 所示。各地碳排放生态承载系数主要集中在 0.6~1.2 之间,且呈北部、南部高,西部低的特征。2020 年生态承载系数大于 1 的地区有 11 个,该类区域农业碳排放量占全省的 52.40%,但贡献了 61.91% 的碳汇量。安阳、信阳、焦作、鹤壁、濮阳、新乡市的 4 期农业碳排放生态承载系数平均值均大于 1.2,表明该类区域碳汇贡献率较大,农业生态容量强,有效分担了其他地区的碳排放压力。三门峡和平顶山市碳排放生态承载系数较小,生态容量较低,碳吸收能力相对有限。其中,三门峡市农业生态环境问题较为突出,其系数值低于 0.5。究其原因,是该区域农业基础设施薄弱、集约化程度低,制约了当地生态容量的扩展。

各地经济贡献系数主要集中在 0.8~1.2 之间,且呈东南高,西南低的特征。2020 年碳排放经济贡献系数大于 1 的城市有 9 个,该类区域碳排放量占全省的 27.34%,而农业生产总值贡献率为 36.91%,表明这些地区农业生产相对低碳。其中,信阳市农业产出效率较高,碳排放经济贡献系数高达 1.83。平顶山和驻马店农业碳排放的经济贡献能力相对较弱,4 期系数平均值分别为 0.72,0.81,一定程度上损害了低碳排放区域的利益。

从不同时间节点来看,全省有 11 个城市 2020 年农业碳排放生态承载系数较 2011 年均不同程度提升,表明该类区域生态容量逐步扩大,农业碳汇能力增强。其中上升幅度较大的是河南省中部的许昌、平顶山和郑州,其增幅分别为 25.33%,17.16%,16.52%。济源和周口生态承载能力明显降低,其系数值较 2011 年分别下降 26.55%和 16.67%。碳排放经济贡献系数方面,郑州、平顶山、安阳市等地系数值呈波动上升态势。其中,濮阳、三门峡和郑州市增幅较大,与基期相比系数值提升了 20.24%,18.47%,17.43%,表明该类区域产业化程度高,农业生产效益稳步提升。洛阳、开封等 7 个城市碳排放经济贡献系数呈波动下降趋势,且降幅较大的是济源和鹤壁,表明该区域农业生产方式较为粗放,产业效益有待提升。

3.4 影响因素分析

(1) 影响因素显著性分析。借鉴已有研究成果,本文重点选取了农业从业人口、农业生产效率、农业产业结构、农村居民人均可支配收入、农业经济水平、财政教育支出、农业机械总动力、农业投资 8 项指标。其中,农业生产效率指农业碳排放与种植业和畜牧业总产值之比,农业产业结构指种植业和畜牧业产值之和与农林牧渔总产值之比,农业经济水平指农业总产值与农业从业人口之比。由表 6 可知,农业从业人口、农村居民人均可支配收入、农业机械总动力、财政

教育支出对河南省农业碳排放空间分布格局的影响较大,均通过了显著性检验。其中,农业机械总动力是河南省碳效应空间变化的主导因素,解释力最高达 0.83。整体来看,农业机械总动力、农业从业人口、财政教育支出这 3 个因素对碳排放空间分异的解释度逐渐减弱,且财政教育支出影响力降幅较大。由此可见,河南省农业能源消耗总量得到有效控制,各地农业机械化水平不断提升,资源利用效率差异逐渐减小。随着城市化快速发展及绿色低碳理念深入人心,各地农业生产经营人员数量减少,农户生态保护意识增强,促使传统农业生产方式发生转变。

表 6 2011—2020 年各因素对河南省农业碳排放的解释力
Table 6 The values of various factors on agricultural carbon emission in Henan Province from 2011 to 2020

探测指标	2011 年	2014 年	2017 年	2020 年
农业从业人口 X_1	0.75**	0.79**	0.70**	0.70**
农业生产效率 X_2	0.48	0.18	0.39	0.52
农业产业结构 X_3	0.21	0.17	0.25	0.37
农村居民人均可支配收入 X_4	0.61*	0.63**	0.56*	0.62*
农业经济水平 X_5	0.08	0.13	0.15	0.18
财政教育支出 X_6	0.66**	0.69***	0.61**	0.50*
农业机械总动力 X_7	0.82***	0.83***	0.77**	0.71**
农业投资 X_8	0.21	0.21	0.30	0.25

注:*, **, *** 分别表示在 0.1, 0.05, 0.01 的置信度上统计显著。

(2) 影响因素交互作用分析。由表 7 可知,各因素两两交互作用均大于单个因素对河南省农业碳排放空间格局的影响,且交互值大多高于 0.7。农业机械总动力(X_7)与其余 7 个因素两两交互值较大,四期交互探测平均值为 0.92,表明该因素对河南省农业碳排放空间格局具有较强的控制作用。2014 年农业从业人口(X_1)与农业投资(X_8)交互值高达 0.99,表明两者交互叠加后对农业碳排放空间分布起主导作用。综上可知,河南省农业碳排放空间分异是各因子综合作用的结果。因此,基于多维视角探讨农业减排实施路径是推进农业提质增效和可持续发展的关键。

3.5 农业碳排放趋势预测

基于灰色预测模型基本原理,对河南省农业碳吸收量及碳排放量原始数列进行级比检验。结果显示,两者级比值均位于区间($e^{-2/n+1}$, $e^{2/n+2}$)内,因此,本研究适合采用 GM(1,1)模型。由表 8 可知,河南省农业碳吸收量原始值和预测值相对误差、级比偏差均小于 0.1,且后验差比 $C=0.0354 < 0.35$,小误差概率 $p=1$,说明该模型拟合效果较好。农业碳排放

量相对误差小于 0.1,级比偏差小于 0.2,后验差比 $C = 0.0979 < 0.35$,小误差概率 $p = 1$,表明模型拟合效

果也符合精度要求,但农业碳吸收量的预测结果更为准确。

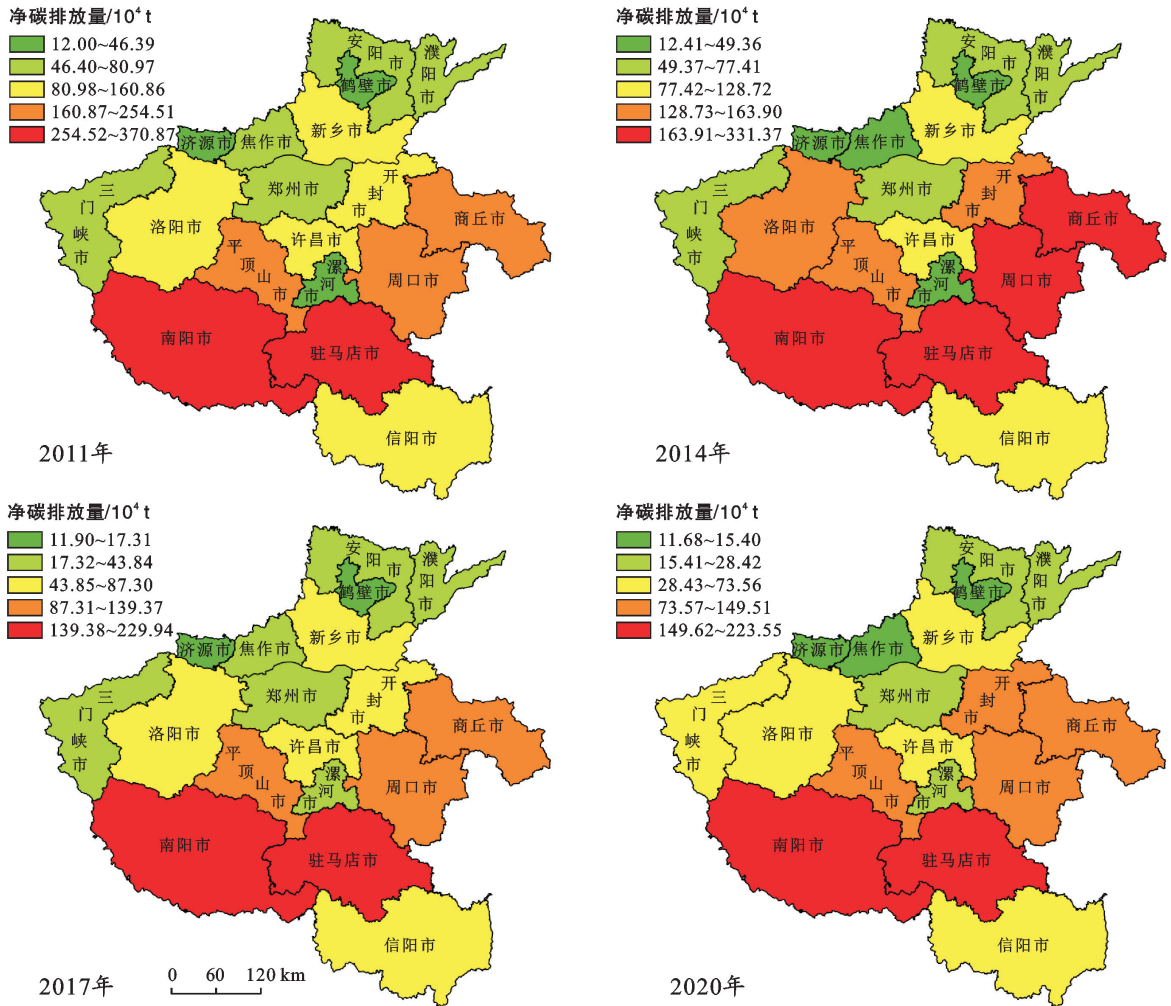


图 2 2011—2020 年河南省农业净碳排放空间格局

Fig.2 Spatial pattern of agricultural net carbon emission in Henan Province from 2011 to 2020

根据以上分析结果,测算出河南省农业净碳排放量预测值(如表 9 所示)。2021—2030 年河南省农业碳吸收量呈增长趋势,由 1.45×10^7 t 增长至 1.70×10^7 t,年均增长率 1.91%。农业碳排放量整体呈下降趋势,从 2021 年的 2.39×10^7 t 减至 2030 年的 1.51×10^7 t,年均降幅 4.07%。由此可见,河南省农业固碳减排潜力较大,预计全省在 2029 年可实现农业碳中和目标,甚至达到农业负碳排放。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究兼顾了农业碳源及碳汇功能,对种植业及畜牧业碳排放进行有效量化,有利于系统把握河南省农业碳排放现状。当前,各地农业净碳排放量与基期相比均呈下降趋势。究其原因,是河南省近年来持续推进农业面源污染综合防治,积极建设生态农场及

农业废弃物资源化利用示范区,为全省构建农业绿色发展新格局奠定坚实基础。未来各地应进一步挖掘畜牧业减排潜力,发挥粮食生产优势,通过引进先进养殖设备、改进饲料加工工艺等措施,提升农业资源综合利用水平,减少农业生产碳排放。从市域层面来看,各地碳排放差异显著,南阳、驻马店、商丘、周口市等地区农作物播种面积广,畜禽养殖规模大,是河南省农业重点减排区域。因此,该类区域应着力优化产业布局,充分发挥农业碳汇价值及减排优势,提高农作物单位面积产量及生产效率,推动全省农业绿色低碳转型。区域碳排放公平性评价中,本研究综合考察了河南省各地生态承载容量及经济贡献程度,并揭示了两者变化趋势,对完善农业碳减排补偿机制提供有益参考。2020 年河南省大部分地区农业碳排放生态承载系数及经济贡献系数较 2011 年均不同程度提升,说明各地在推动农业经济稳步增长的

同时,不断优化农业生产结构,提升农业生态效益,促使各地农业低碳发展已取得一定成效。此外,本文运用地理探测器模型探讨了河南省农业碳排放驱动机制及各因子间相互作用,为研究其农业碳排放时空分异机理提供了全新视角。农业机械总动力是河南省

碳效应空间变化的主导因素,其原因在于各地农业生产条件不同,农业机械化发展水平存在明显区域差异。因此,推广新型农机设备,构建区域农业机械化协调发展机制对于改善全省农业生产环境具有重要意义。

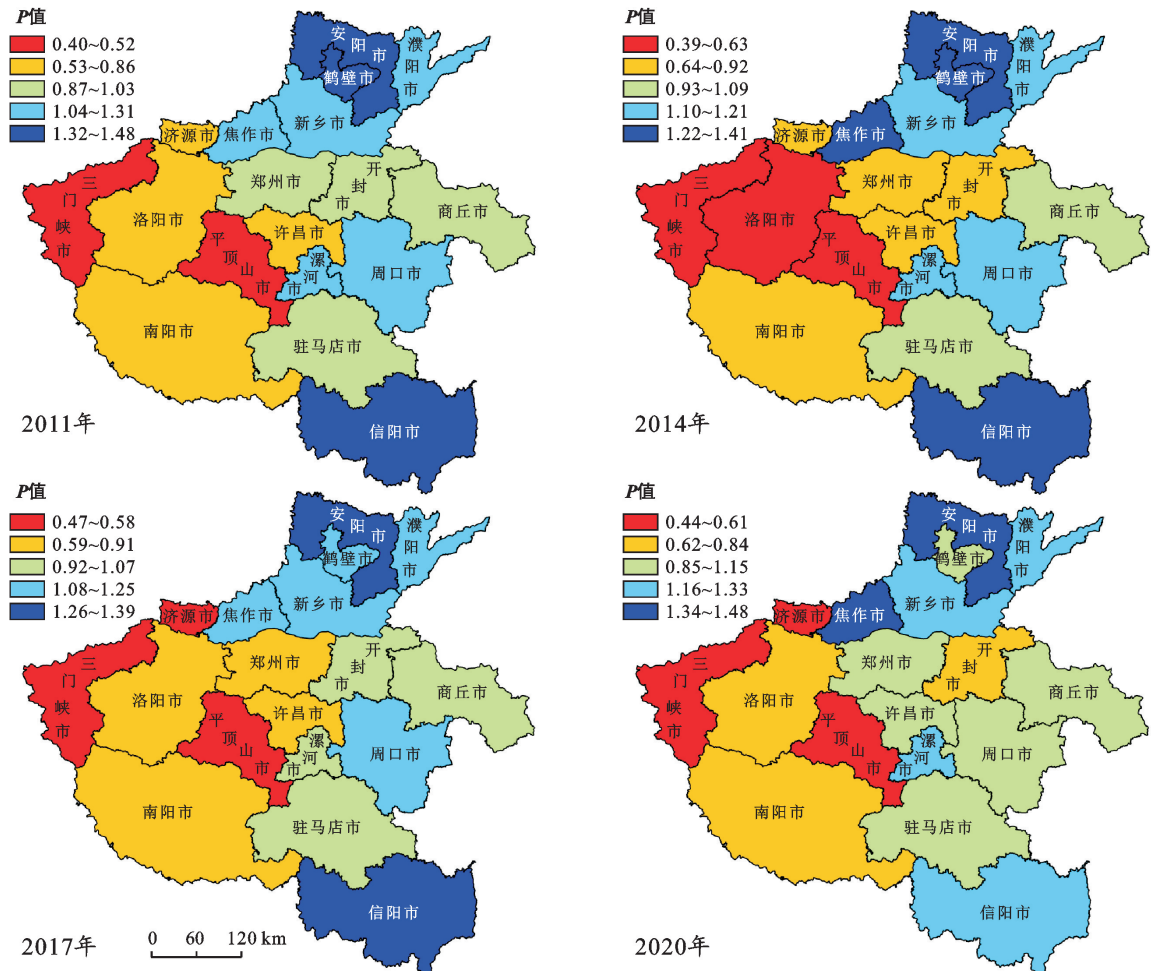


图3 2011—2020年河南省农业碳排放生态承载系数(P)空间分布

Fig.3 Spatial pattern of ecological carrying coefficient (P) of agricultural carbon emission in Henan Province from 2011 to 2020

综上所述,为进一步提升河南省低碳农业发展质量,建议各地继续完善农业碳中和转型策略,具体可从以下3方面着手:①加强科普宣传,提升农民低碳意识,引导农户开展低碳农业生产。政府应加大财政投入力度,完善农地设施管护体系,合理配置农业机械资源,并为农户提供适当补贴,降低农业生产成本。②各市应结合当地资源禀赋及农业发展实际,积极响应国家固碳减排行动,在保障粮食产量稳定增长及畜牧业生产能力持续提高的前提下,探索化肥农药减量增效路径,推进畜禽粪污转化增值。③注重系统整合,构建区域协同减排机制,发挥信阳、安阳、焦作等

地示范带动作用,通过经验分享、实地指导等方式推广其农业碳减排成功经验,实现各地农业低碳发展均衡化。

限于数据可得性,本文仍存在一定欠缺,有待进一步完善。如仅对农业碳排放总量进行了测算,缺乏农业碳排放效率的有效测度。下一步可尝试从投入、产出视角出发,运用数据包络分析、聚类分析等研究方法,将碳排放效率与碳排放公平性进行结合,开展碳分区补偿研究,以期拓展研究视野、丰富农业碳排放领域研究成果,推动区域协同创新与低碳发展。

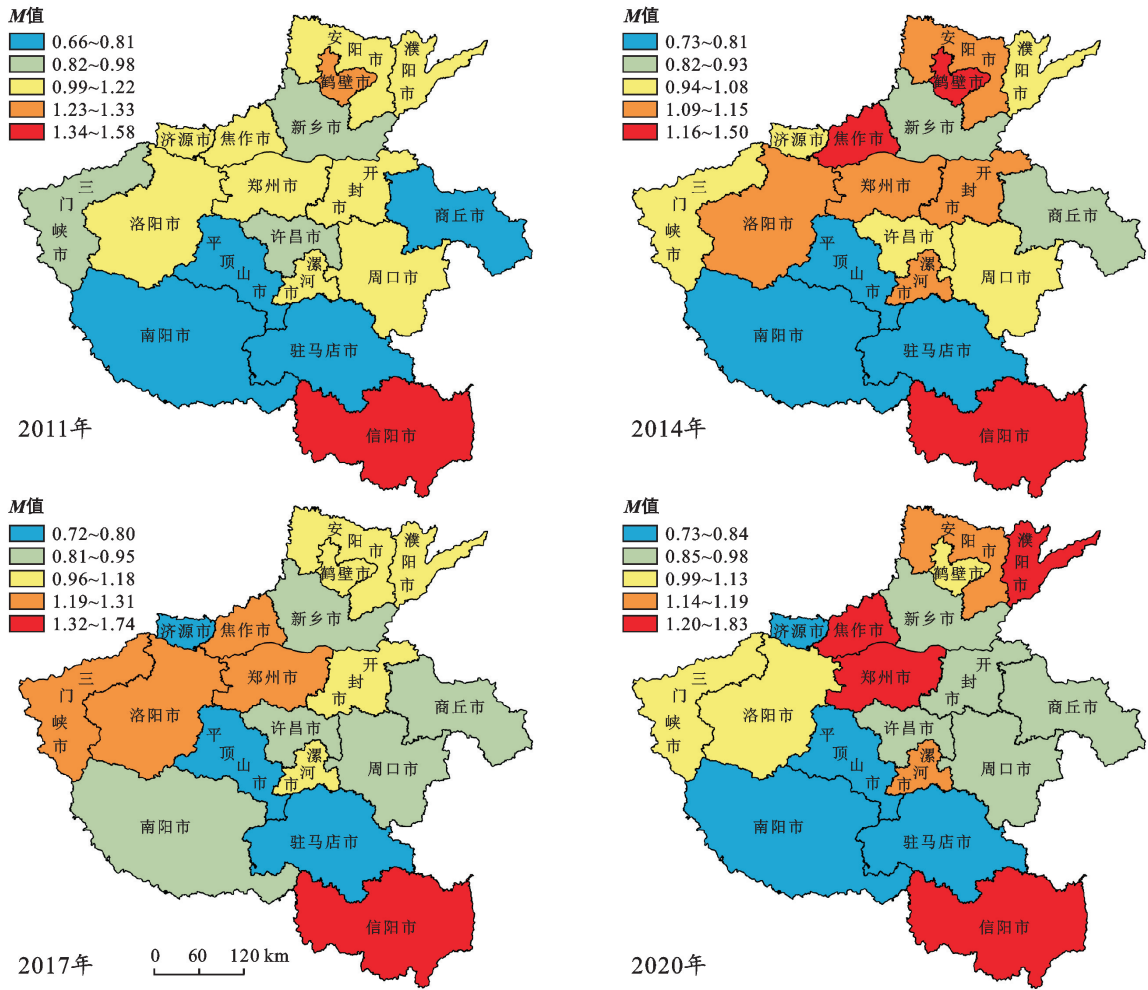


图 4 2011—2020 年河南省农业碳排放经济贡献系数(M)空间分布

Fig.4 Spatial pattern of economic contribution coefficient (M) of agricultural carbon emission in Henan Province from 2011 to 2020

表 7 2011—2020 年河南省农业碳排放影响因素交互探测结果

Table 7 Interactive detection results of influencing factors of agricultural carbon emission in Henan Province from 2011 to 2020

年份	因子	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈
2011	X ₁	0.75							
	X ₂	0.98	0.48						
	X ₃	0.96	0.90	0.21					
	X ₄	0.94	0.74	0.93	0.61				
	X ₅	0.87	0.78	0.94	0.97	0.08			
	X ₆	0.78	0.97	0.91	0.80	0.86	0.66		
	X ₇	0.86	0.96	0.92	0.96	0.87	0.91	0.82	
	X ₈	0.98	0.85	0.93	0.82	0.82	0.83	0.98	0.21
2014	X ₁	0.79							
	X ₂	0.98	0.18						
	X ₃	0.96	0.87	0.17					
	X ₄	0.94	0.86	0.73	0.63				
	X ₅	0.98	0.68	0.55	0.70	0.13			
	X ₆	0.82	0.86	0.94	0.77	0.93	0.69		
	X ₇	0.90	0.96	0.93	0.94	0.98	0.92	0.83	
	X ₈	0.99	0.83	0.65	0.86	0.80	0.83	0.98	0.21

续表 7:

Continued table 7:

年份	因子	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈
2017	X ₁	0.70							
	X ₂	0.93	0.39						
	X ₃	0.91	0.74	0.25					
	X ₄	0.73	0.80	0.97	0.56				
	X ₅	0.92	0.73	0.48	0.64	0.15			
	X ₆	0.73	0.80	0.90	0.66	0.79	0.61		
	X ₇	0.95	0.95	0.92	0.93	0.92	0.91	0.77	
	X ₈	0.93	0.81	0.85	0.76	0.54	0.71	0.98	0.30
2020	X ₁	0.70							
	X ₂	0.98	0.52						
	X ₃	0.91	0.97	0.37					
	X ₄	0.96	0.83	0.98	0.62				
	X ₅	0.78	0.75	0.43	0.83	0.18			
	X ₆	0.75	0.78	0.82	0.68	0.69	0.50		
	X ₇	0.84	0.97	0.88	0.93	0.87	0.76	0.71	
	X ₈	0.91	0.83	0.81	0.76	0.72	0.67	0.82	0.25

表 8 河南省农业碳排放与碳吸收预测值检验

Table 8 Prediction value detection of agricultural carbon emission and carbon absorption in Henan Province

年份	农业碳吸收/10 ⁴ t				农业碳排放/10 ⁴ t			
	原始值	预测值	相对误差	级比偏差	原始值	预测值	相对误差	级比偏差
2011	1 213.55	1 213.55	0.00%		3 672.50	3 672.50	0.00%	
2012	1 234.86	1 240.35	0.44%	0.00	3 634.08	3 771.08	3.77%	0.04
2013	1 265.55	1 262.36	0.25%	0.01	3 634.53	3 584.51	1.38%	0.05
2014	1 278.13	1 284.76	0.52%	-0.01	3 554.69	3 407.18	4.15%	0.03
2015	1 334.71	1 307.56	2.03%	0.03	3 429.41	3 238.62	5.56%	0.02
2016	1 304.18	1 330.76	2.04%	-0.04	3 025.60	3 078.40	1.75%	-0.08
2017	1 362.69	1 354.37	0.61%	0.03	2 741.15	2 926.10	6.75%	-0.05
2018	1 384.84	1 378.41	0.46%	0.00	2 686.28	2 781.34	3.54%	0.03
2019	1 396.69	1 402.87	0.44%	-0.01	2 509.93	2 643.74	5.33%	-0.02
2020	1 427.85	1 427.76	0.01%	0.00	2 733.93	2 512.95	8.08%	0.13

表 9 2021—2030 年河南省农业碳排放预测值

Table 9 Prediction value of agricultural carbon emission in Henan Province from 2021 to 2030

年份	10 ⁴ t		
	农业碳吸收量预测值	农业碳排放量预测值	农业净碳排放量预测值
2021	1 453.10	2 388.63	935.53
2022	1 478.88	2 270.45	791.57
2023	1 505.13	2 158.13	653.00
2024	1 531.84	2 051.36	519.53
2025	1 559.02	1 949.88	390.86
2026	1 586.68	1 853.41	266.73
2027	1 614.84	1 761.72	146.88
2028	1 643.50	1 674.56	31.07
2029	1 672.66	1 591.72	-80.94
2030	1 702.34	1 512.97	-189.37

4.2 结论

(1) 研究期内,河南省农业净碳排放量呈下降趋势,预计全省在 2029 年可实现农业碳中和目标。农业碳排放生态承载系数呈北部、南部高,西部低的特征,经济贡献系数呈东南高,西南低的分布格局。

(2) 农业从业人口、农业机械总动力、财政教育支出、农村居民人均可支配收入对河南省农业碳排放空间分布格局的影响较大,且各因素交互作用较强。

(3) 当前,各地应深入贯彻绿色发展理念,立足自身农业资源禀赋,制定差异化的农业固碳减排方案,推动农业经济与生态环境协调发展,提升全省农业低碳发展水平。

[参 考 文 献]

[1] 田云,尹恣昊.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.
- [2] 田云.中国低碳农业发展:生产效率、空间差异与影响因素研究[D].湖北 武汉:华中农业大学,2015.
- [3] 伍国勇,刘金丹,陈莹.中国农业碳排放强度空间特征及溢出效应分析[J].环境科学与技术,2021,44(11):211-219.
- [4] 刘杨,刘鸿斌.山东省农业碳排放特征、影响因素及达峰分析[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(4):558-569.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 桂河,李静,尚梦媛.“双碳”背景下的宁夏农业碳排放时序特征、驱动机理与脱钩效应研究[J].中南林业科技大学学报(社会科学版),2021,15(6):37-44.
- [8] 金书秦,林煜,牛坤玉.以低碳带动农业绿色转型:中国农业碳排放特征及其减排路径[J].改革,2021(5):29-37.
- [9] 廖卫东,刘森.西部地区农业碳排放的时空演变及 EKC 假说检验:基于西部大开发 12 省份动态面板数据模型的经验分析[J].世界农业,2020(6):62-70.
- [10] 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.
- [11] 何艳秋,戴小文.中国农业碳排放驱动因素的时空特征研究[J].资源科学,2016,38(9):1780-1790.
- [12] 仇伟,卢东宁.基于 VAR 模型的农业碳排放影响因素及其动态响应机制分析[J].湖北农业科学,2019,58(24):271-276.
- [13] 徐丽,曲建升,吴金甲,等.中国农牧业碳排放时空变化及预测[J].生态与农村环境学报,2019,35(10):1232-1241.
- [14] 冉锦成,马惠兰,苏洋.西北五省农业碳排放测算及碳减排潜力研究[J].江西农业大学学报,2017,39(3):623-632.
- [15] 王慧敏,朱玉林,王锦锦.湖南省农业碳排放与农业经济增长的脱钩效应研究[J].绿色科技,2021,23(22):262-267.
- [16] 伍国勇,孙小钧,于福波,等.中国种植业碳生产率空间关联格局及影响因素分析[J].中国人口·资源与环境,2020,30(5):46-57.
- [17] 陈炜,殷田园,李红兵.1997—2015 年中国种植业碳排放时空特征及与农业发展的关系[J].干旱区资源与环境,2019,33(2):37-44.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 李波,张俊飏.基于投入视角的我国农业碳排放与经济发展脱钩研究[J].经济经纬,2012,29(4):27-31.
- [21] International Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis Technical Summary [R]. IPCC,2013.
- [22] 丁宝根,赵玉,邓俊红.中国种植业碳排放的测度、脱钩特征及驱动因素研究[J].中国农业资源与区划,2022,43(5):1-11.
- [23] 吴强,张园园,张明月.中国畜牧业碳排放的量化评估、时空特征及动态演化:2001—2020[J].干旱区资源与环境,2022,36(6):65-71.
- [24] 闵继胜,胡浩.中国农业生产温室气体排放量的测算[J].中国人口·资源与环境,2012,22(7):21-27.
- [25] 伍国勇,刘金丹,杨丽莎.中国农业碳排放强度动态演进及碳补偿潜力[J].中国人口·资源与环境,2021,31(10):69-78.
- [26] 罗红,罗怀良,李朝艳,等.泸州市农业碳收支时空变化及公平性评价[J].生态与农村环境学报,2019,35(4):409-418.
- [27] 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.
- [28] 高超.基于地理探测器的河北省粮食产量影响因素研究[J].东北农业科学,2020,45(3):103-107.
- [29] 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.
- [30] 何慧爽,付帮杰.我国粮食主产区农业碳排放测度与减排压力研究[J].生态经济,2019,35(11):99-104.
- [31] 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.