



叶炳南, 孟海波, 冯晶, 丛宏斌. 海南省农业领域碳排放时空分布与预测[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(01): 157-166.  
YE Bingnan, MENG Haibo, FENG Jing, CONG Hongbin. Spatio-temporal distribution and prediction of agricultural carbon emissions in Hainan Province[J].  
Journal of China Agricultural University, 2024, 29(01): 157-166.  
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.01.15

## 海南省农业领域碳排放时空分布与预测

叶炳南 孟海波\* 冯晶 丛宏斌

(农业农村部农业废弃物资源化利用重点实验室, 农业农村部规划设计研究院, 北京 100125)

**摘要** 为探究海南省碳排放的时空分布特征,以海南省农业领域碳排放情况为研究对象,基于2016—2020年海南省农业年鉴数据,从种植业、养殖业、渔业和农用能源等4个方面入手,采用IPCC碳排放计算方法,分别计算全省与各县市农业年碳排放总量和碳排放强度。结果表明:海南省农业领域碳排放总量历年变化幅度较小,2018年海南省农业领域碳排放总量(以碳当量计)达到最大为495.69万t,种植业和农用能源碳排放所占比例最大,分别为61.62%和31.29%;海岛特点导致海南省农业领域碳排放总量在地域上存在明显差异,海口、文昌、琼海、澄迈、临高、儋州地区等沿海县区农业领域碳排放量远大于岛中央地区,呈现北高南低、外高内低的特点;海南省及各市县区农业领域碳排放强度逐年下降,2020年全省农业领域碳排放强度(以碳质量计)降低至0.26 kg/亿元,降低速度超过全国平均水平。在目前农业发展场景下,海南省已基本实现农业领域碳达峰,碳排放总量与碳排放强度虽处于高位,但在未来几年内仍会不断下降。

**关键词** 海南省; 农业; 碳排放总量; 碳排放碳; 碳排放强度

中图分类号 F323.2

文章编号 1007-4333(2024)01-0157-10

文献标志码 A

## Spatio-temporal distribution and prediction of agricultural carbon emissions in Hainan Province

YE Bingnan, MENG Haibo\*, FENG Jing, CONG Hongbin

(Key Laboratory of Energy Resource Utilization, Ministry of Agriculture, Academy of Agricultural Planning and Engineering, Beijing 100125, China)

**Abstract** To explore the temporal and spatial distribution characteristics of carbon emission in Hainan Province, based on the agricultural data from 2016 to 2020, the annual total agricultural carbon emission and carbon emission intensity of Hainan Province were calculated by IPCC carbon emission calculation and prevention from four aspects, which were planting industry, aquaculture industry, fishery industry and agricultural energy. The results showed that: The total carbon emissions from the agricultural sector in Hainan Province had a small change over the years. In 2018, the total agricultural carbon emissions in Hainan Province reached the maximum of 4 956 900 tons of carbon equivalent, and the carbon emissions from the planting industry and agricultural energy accounted for the largest proportion, 61.62% and 31.29%, respectively. The characteristics of island lead to significant regional differences in total agricultural carbon emissions. The agricultural carbon emissions are much higher in the north and lower in the south, higher in the outside and lower in the inside. The agricultural carbon emission intensity of Hainan Province has been decreasing year by year. In 2020, the agricultural carbon emission intensity of the

收稿日期: 2023-05-27

基金项目: 农业农村部规划设计研究院自主研发项目(QX202110)

第一作者: 叶炳南(ORCID:0000-0001-8076-3582), 中级工程师, 主要从事农业废弃物资源化利用技术与装备研发, E-mail:ngy\_ybn@163.com

通讯作者: 孟海波(ORCID:0000-0002-3504-7269), 研究员, 主要从事农业废弃物资源化利用技术、装备、政策研究, E-mail:newmhb7209@163.com

province has been reduced to 0.26 kg (in carbon equivalent) per 100 million yuan, which is faster than the national average. Under the current agricultural development scenario, Hainan Province has basically achieved the peak of carbon in the agricultural sector, and although the total carbon emission and carbon emission intensity are at a high level, they will continue to decline in the next few years.

**Keywords** Hainan Province; agricultural; carbon emissions; carbon intensity

降低人类活动造成的二氧化碳排放是应对全球气候变化的主要措施。作为全球最大的能源消耗国和碳排放国,我国提出“3060碳达峰碳中和”的发展目标,其中农业农村减排固碳既是重要举措,也是潜力所在。为促进我国农业农村领域减排固碳,我国在技术开发、装备创制、模式应用、政策扶持等方面开展了相关研究<sup>[1-9]</sup>。姜雨林等<sup>[10]</sup>针对当前气候环境下华北地区不同轮作模式对土壤耕层有机碳储量及温室气体排放的影响开展研究,提出在华北地区采取禾豆轮作模式,有助于提高土壤有机碳库和减少温室气体排放。张恪渝<sup>[11]</sup>分析了我国2005—2012年中国碳排、能耗及经济总量的变化趋势与关系,构建了我国低碳经济的优化模型,提出要“积极发展第三产业,适度发展第一产业,进一步调整第二产业”的政策建议。白若琦等<sup>[12]</sup>从农资投入、秸秆利用、土壤固碳等方面分析我国种植业减排潜力和固碳增汇空间,并总结梳理了低碳栽培、秸秆综合利用等减排固碳技术应用情况。上述研究成果或者政策建议在一定程度上有助于促进农业领域减排固碳,但由于缺少客观准确的数据支撑,减排固碳技术创新与政策制定均受到了较大限制。

我国领域辽阔,南北方气候变化、地形地貌差异明显,各地农业发展规模、结构、模式等各具特色,我国农业领域二氧化碳排放分布具有明显的地区差异<sup>[13-18]</sup>。李波等<sup>[19]</sup>探讨了1994—2008年中国农业碳排放时空特征,针对农业生产效率因素、农业结构因素、劳动力规模因素三项影响因素进行分析,提出农业经济发展是农业碳排放增加的最主要因素。吕洁华等<sup>[20]</sup>分析对比了全国各省域碳排放强度,构建了省域碳排放空间转移净值核算模型,提出河北、山西等中西部地能源密集地区碳排放强度高于平均水平。同时,由于数据核算方式的不同,不同学者对省级碳排放核算数据也存在明显差异。马晨等<sup>[21]</sup>从研究热度、核算要素、核算数据差异等方面,以中国知网文献检索数据为基础,总结分析了新疆地区碳排放研究情况,提出新疆省级能源消费总碳排放和第二产业碳排放核算数据存在

显著差异。李甜甜<sup>[22]</sup>统计估算了江苏省不同农田作物类别、生长阶段的碳吸收量及碳吸收强度,提出农田碳吸收量和碳排放量在进行估算时会出现较大的误差。

海南省地处我国大陆最南端,海陆交接、长夏无冬的地理、气候条件,为海南省发展热带特色高效农业提供了优质条件。近年来,海南省热带水果面积产量双升,粮食和天然橡胶干胶生产能力稳步增强,经济总量持续增长,农林牧渔业实现增加值1471.4亿元,比2021年增长13.12%,农林牧渔业增加值占全省生产总值的21.58%,是我国农业份额比例排名第二的省份。海南省农业产业快速发展,随之而来的也有温室气体排放问题,在不影响农业发展的前提下,如何实现农业领域碳达峰碳中和已成为海南省农业发展面临的重要问题之一。目前,由于农业生产环境复杂、影响因素繁多,海南省农业领域碳排放及减排潜力核算尚未有明确的计算方法,农业领域减排固碳技术及政策研究缺少数据支撑。因此,本研究拟以IPCC温室气体计算方法为基础,根据海南省农业发展情况,提出农业领域碳排放核算方法;基于2016—2020年海南省农业年鉴数据,研究探讨海南省农业领域碳排放量和碳排放强度在时间和空间上的分布特征及变化趋势,并根据海南省未来十年农业发展规划,对农业领域碳排放情况进行预测分析,以期为海南省农业领域减排固碳发展提供数据支撑。

## 1 研究方法数据来源

### 1.1 研究方法

根据IPCC温室气体清单指南对碳核算方法的界定,本研究对农业领域不同方面碳排放量进行计算,SC为碳排放总质量,计算公式如下:

$$SC = \sum_{i=1}^j \rho_i \times S_i$$

式中: $\rho_i$ 为第*i*项碳排放源的排放系数,即每kg碳排放源生产或消耗所产生的碳的质量,kg/kg; $S_i$ 为第*i*项碳排放源的质量,kg。

农业碳排放强度指的是在农业领域实现单位生产总值所需排放的二氧化碳当量,计算公式如下:

$$\delta_i = S_i / Q_i$$

式中: $\delta_i$ 为第*i*项碳排放源的碳排放强度,即农业每生产1亿元所需碳排放源生产或消耗生产的碳,kg/亿元; $Q_i$ 为第*i*项碳排放带来的农业领域生产总值。

### 1.2 研究对象及边界确定

本研究以海南省2016—2020年农业领域碳排放总量为研究对象,对农业生产、运输、加工、销售

等环节碳排放情况进行核算,结合海南省农业产业结构、规模特点以及发展方向等方面,将海南省农业领域碳排放划分为种植业、养殖业、渔业和农用能源4个方面。

### 1.3 数据来源

本研究数据来源于海南省2016—2020年统计年鉴,包含海南省海口市、三亚市、五指山市等18个市县农业领域碳排放相关数据。根据文献检索结果,确定种植业、养殖业、渔业和农用能源4个方面碳排放系数,详见表1。

表1 本研究选用海南省农业领域碳排放系数

Table 1 Carbon emissions from agriculture

碳排放源 Carbon emission source	种类 Sources type	碳排放系数(以碳质量计) Carbon emission coefficient (in carbon mass)	参考文献 Reference
种植业 Planting industry	氮肥 Nitrogenous fertilizer	2.12 kg/kg	[23]
	磷肥 Phosphatic fertilizer	0.64 kg/kg	[23]
	钾肥 Potash fertilizer	0.18 kg/kg	[23]
	复合肥 Compound fertilizer	1.77 kg/kg	[23]
	农药 pesticide	4.93 kg/kg	[23]
	农膜 Agricultural film	5.18 kg/kg	[23]
养殖业 Livestock industry	猪 Pig	2.386 kg/(头·年)	[24]
	牛 Cow	83.090 kg/(头·年)	[24]
	羊 Sheep	8.699 kg/(头·年)	[24]
	鸡 Chicken	0.017 kg/(头·年)	[24]
	鸭 Duck	0.017 kg/(头·年)	[24]
渔业 Fishery industry	淡水产品养殖 Fresh water product	0.527 kg/kg	[16, 25-26]
	海水产品养殖 Marine products	0.527 kg/kg	[16, 25-26]
农用能源 Agricultural energy	柴油 Diesel	0.592 kg/kg	[23]
	煤 Coal	1.900 kg/kg	[27]
	汽油 Gasoline	0.790 kg/kg	根据热值换算成标准煤进行碳排放计算
	电力 Electric	0.917 kg/kwh	根据煤发电换算成标准煤进行碳排放计算

## 2 结果与分析

### 2.1 全省农业领域碳排放分析与预测

本研究对海南省农业领域碳排放情况开展核算研究,并依据《海南省“十四五”生态环境保护规划》《海南省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》等文件中的发展目标,对全省2025年与2030年碳排放情况进行预测分析,结果如图1所示。可知:海南省2016—2020年农业领域碳总排放量变化较小,其中2018年碳排放

量达到峰值495.69万t(以碳质量计);在2018—2020年,农业领域的碳排放量处于不断下降趋势。因此预测,海南省农业领域碳排放量在目前场景下未来几年仍会不断下降,到2025年将会降低至467.28万t。之后,由于种、养、渔业不断发展,农用能源使用量不断提高,农业领域的碳排放量也会随之增长,到2030年预计达到474.98万t,但仍比2018年碳排放量降低了20万t左右。由此可以判断,在目前海南省农业产业发展场景下,海南省农业领域已基本实现碳达峰。

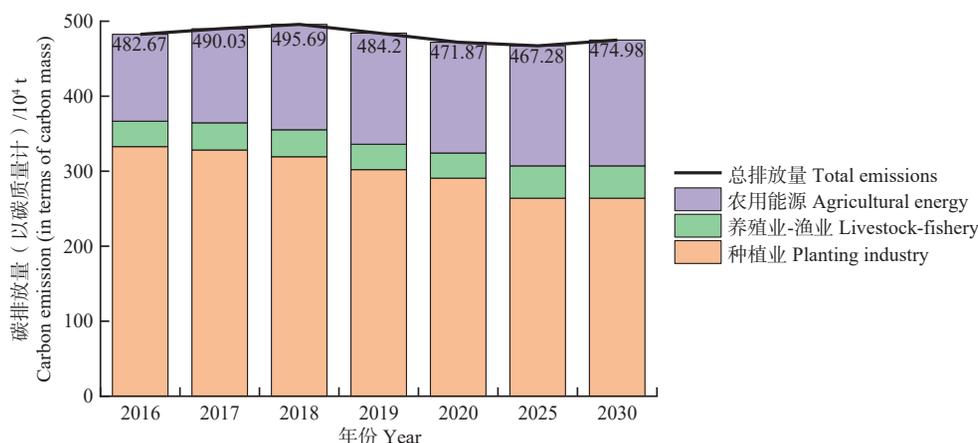


图1 2016—2030年海南省农业领域碳排放核算量及预测量

Fig. 1 Accounting and forecast of agricultural carbon emissions from 2016 to 2030

通过对种植业、养殖业、渔业和农用能源等方面历年碳排放情况分析,明确了不同领域碳排放占比情况,如图2所示。可知:种植业是农业领域碳排放的最大来源,其次是农用能源、渔业,最后是养殖业。其中,种植业包括化肥、农药、农膜等农业生产用品使用和生产环节所产生的碳排放,由于“十三五”期间化肥减施增效效果显著,种植业碳排放量由2016年的332.80万t降低至290.80万t,约占总排放量的61%~68%。养殖业和渔业的碳排放量主要来自于畜禽、水产养殖过程中的呼吸、粪污等环节,2020年养殖业和渔业碳排放量在全省占比较小,分别为0.19%和6.90%。在农业生产过程中所消耗的农用能源主要包括柴油、汽油、电力、煤炭等,2020年海南省农业领域农用能源消耗产生的碳排放总量为147.64万t,占总排放量的31.29%,相较于2019年的148.28万t有所下降,但整体呈现上升趋势。

### 2.2 各市县农业领域碳排放分析

海南省地形复杂,四面环海,种植、养殖、渔业等农业产业在不同市县区域各具特色,碳排放情况也差异较大。通过对2020年海南省各市县农业领域碳排放情况进行分析可知,海南省农业碳排放主要集中在沿海地区,尤其是北方的海口、文昌、琼海、澄迈、临高、儋州地区等,较南方市县差异显著,呈现北高南低的特点(图3);澄迈、临高、儋州地区在全省碳排放量占比均超过了10%,但由于其他市县农业产业发展迅速,导致这些地区碳排放量占比数值逐年下降(图4)。同时近年来海南省不断优化农业生产结构,在农业产值不断增加的情况下,碳排放总量呈现下降趋势,其中澄迈、临高、儋州地区碳排放量下降速度较其他地区更快。

通过对海南省各省市2016—2020年年碳排放量进行计算分析,结果见图5。可知:位于西北方的临高县是农业年碳排放量最高的地区,同时也是2016—2020年年碳排放量变化最明显的地区,分别

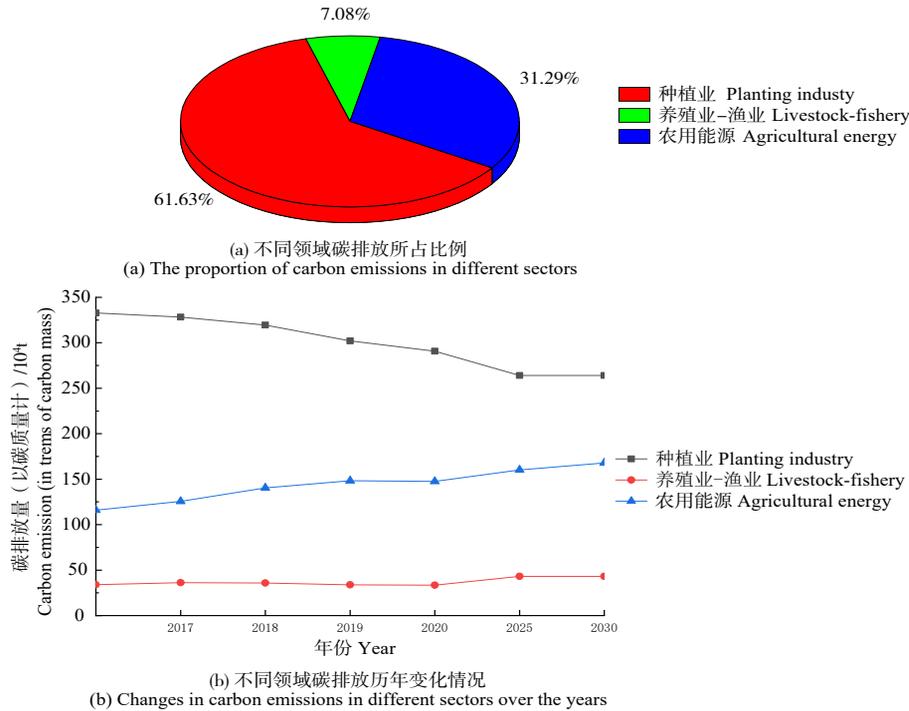


图 2 2016—2030 年农业领域不同方面碳排放核算量及预测量

Fig. 2 Accounting and forecasting agricultural carbon emissions from different aspects from 2016 to 2030

为 67.38 万、63.76 万、59.58 万、56.98 万、56.40 万 t (以碳当量)。与年碳排放量最低的五指山市相比,年碳排放量相差约为 20 倍左右,其原因主要在于五指山市处于海岛中央,农业产业不发达,种植业、养殖业、渔业等产量较低。

基于前面对各市县不同碳排放源的计算结果,分析得到图 6 所示的各市县农用能源、养殖业-渔业、种植业碳排放情况。可知:海南省各市县年碳排放量均以种植业为主,且集中在沿海地区,包括海口市、文昌市、澄迈县、临高县、儋州地区、昌江县、东方市、乐东县、三亚市、保亭县、陵水县、万宁市、琼海市等 13 个沿海市县。2020 年种植业碳排放量为 249.50 万 t,占种植业总排放量的 85.79%。而养殖业和渔业仅在临高、文昌、儋州等地区有明显的碳排放,如临高县渔业碳排放量为 22.69 万 t,占全省渔业碳排放量的 25.61%。

### 2.3 农业领域碳排放强度分析

碳排放强度可以显示出一个地区在促进经济生产的同时,实现减低二氧化碳浓度的能力水平<sup>[18,28-29]</sup>。根据对海南省碳排放量与农林牧渔业总产值进行统计分析,计算 2016—2020 年海南省农业领域碳排放强度数值,结果见图 7。可见:海南省

农业领域碳排放强度数值逐年降低,且在 2018 年以后呈现快速下降趋势,2020 年农业领域碳排放强度降至 0.26 kg/亿元。根据生态环境部公布数据,2020 年全国碳排放强度比 2015 年降低了 18.8%,而海南省则降低了 21.2%,超过全国平均水平。

针对各市县年碳排放量进行计算,结果见图 8。可知:除海口市、东方市、白沙县 3 地外,其余地区年碳排放强度均呈现逐年下降趋势,其中琼中县碳排放强度 2017—2018 年下降明显,但在碳排放总量方面,琼中县 2017—2018 年却有较大的提高,可以看出琼中县在降低碳排放能力水平方面有较大提升。

### 3 讨论与结论

与其他内陆省份相比,海南省由于其独特的地形地貌与海岛气候,种植业和渔业在农业生产中占据主要地位,其中种植业是海南省农产品产量最大的行业,也是产值最高的行业,蔬菜、粮油、热带水果等作物种植规模在逐年增加。海南省农业领域年碳排放量有 60% 多来自于种植业,种植业碳排放量能否有效降低是实现全省农业领域碳减排的关键,而目前海南省在种植业碳减排技术研发、政策体系制定等仍处于起始阶段,尚未提出完善的降碳

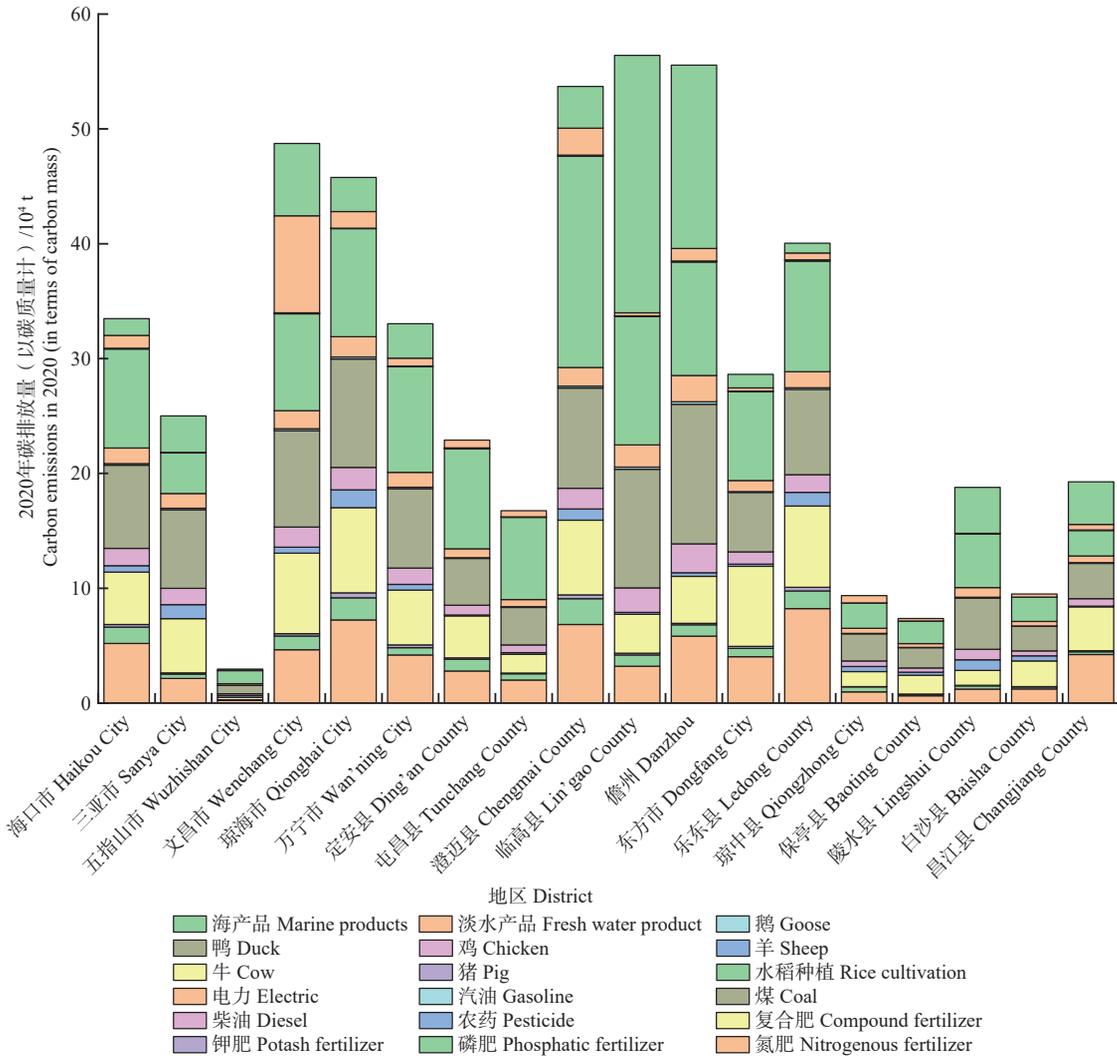


图3 2020年度海南省各市县碳排放量

Fig. 3 Carbon emissions of cities and counties in 2020

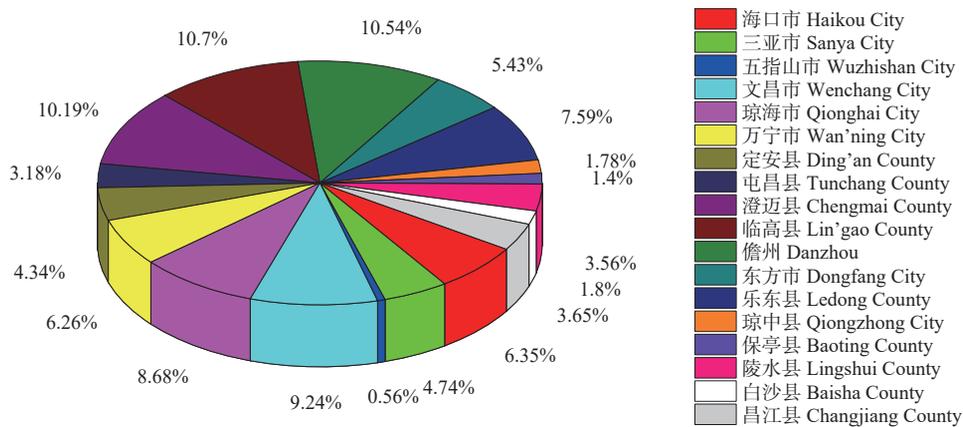


图4 2020年各市县碳排放所占比例

Fig. 4 Percentage carbon emissions of cities and counties in 2020

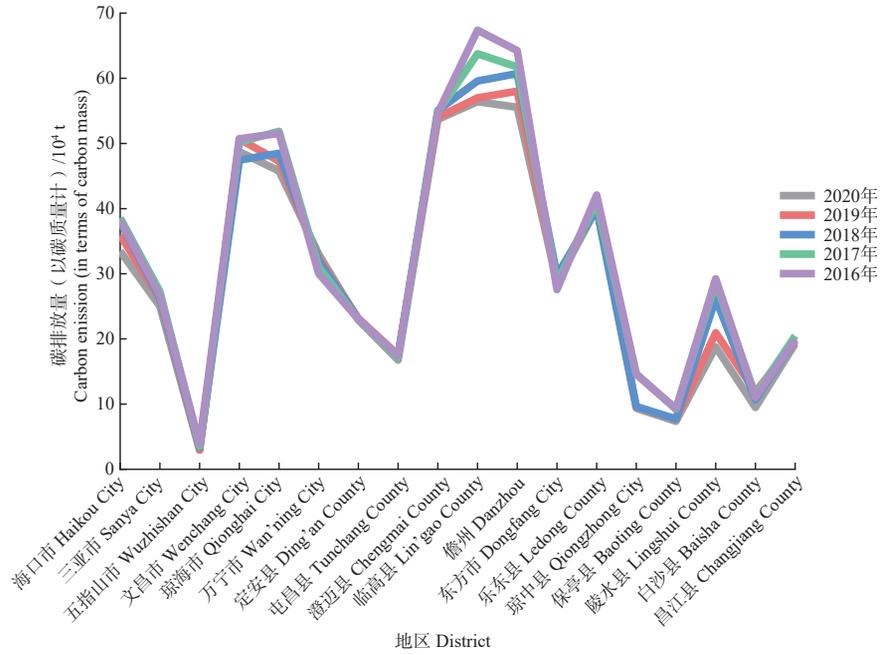


图 5 2016—2020 年度各市县碳排放总量变化

Fig. 5 Total carbon emissions change of city and county from 2016 to 2020

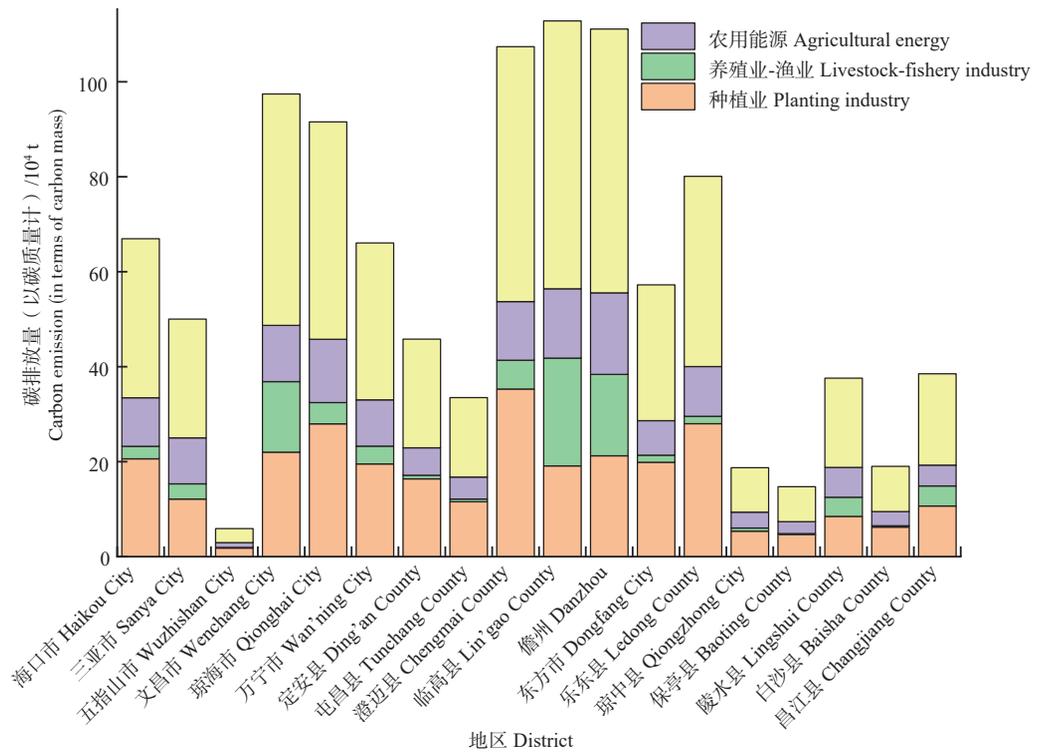


图 6 2020 年各市县在不同农业领域碳排放情况

Fig. 6 Different agricultural sectors carbon emissions of city and county in 2020

举措,种植业在未来海南省农业碳减排中仍具有较大降碳潜力。

海南省在发展渔业“蓝碳”方面也有先天性优

势,由于海南省临海的特点,淡水产品与海水产品等渔业产品量大质优,渔业发展迅速。并且渔业生产“蓝碳”汇集作用可以在一定程度上减缓由于人

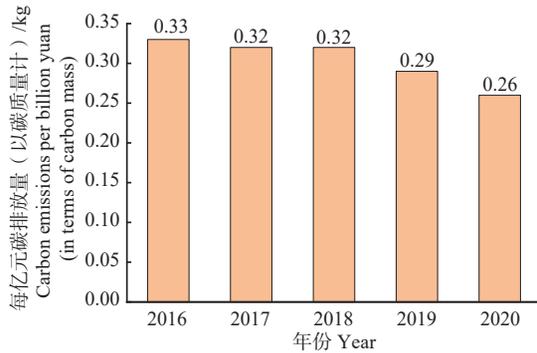


图7 2016—2020年海南省碳排放强度

Fig. 7 Carbon intensity of Hainan Province from 2016 to 2020

为活动在渔业生产时造成的过度碳排放,从而促进整个农业领域的碳减排,也导致海南省渔业虽然生产规模较大,但是碳排放量要远远小于种植业。尤其在碳排放总量较大的沿海市县地区,充分利用渔业“蓝碳”作用的先天优势,能够进一步降低农业碳排放量。

影响农业领域碳排放量的主要因素包括单位产量农产品碳排放量与农产品产量,在保障国家粮食安全、不降低粮食产量的前提下,促进碳减排的最有效途径就是降低单位产量农产品碳排放量。目前对于降低单位产量农产品碳排放量,已有研究

从品种改良、种植模式改善、水肥合理适用等方面开展相关技术研发,但尚未形成较为有效的工艺技术方案。而海南省由于耕地、气温等因素限制,海南省农业发展要求必须充分利用好农业资源,但如何处理好农业发展与碳排放之间的关系,是推进海南省碳减排的关键瓶颈问题,降低单位产量农产品碳排放量则是解决这个问题的一种有效手段。

本研究探索了海南省农业领域碳排放时空分布并进行了预测,主要结论如下:1)种植业和农用地能源碳排放量是海南省农业碳排放的主要来源,且年碳排放总量及碳排放强度均在逐年降低,海南省农业领域碳排放已达到“碳达峰”的目标,目前正走在“碳减排”的路程上;2)海南省农业领域碳排放空间分布上具有明显特征,呈现北高南低、外高内低的特点。

因此,建议在保证海南省碳排放强度不降低的基础上,加强农业生产结构调整,合理配置种植业、养殖业、渔业的发展规模,以种植业碳减排为重点,加大碳排放技术研发,降低单位产品生产出的碳排放量;加强农业能源中化石能源的使用比例,推进风、光、水、电、生物质等可再生能源开发利用;充分发挥海洋碳汇作用,促进“蓝碳”富集,全面推进

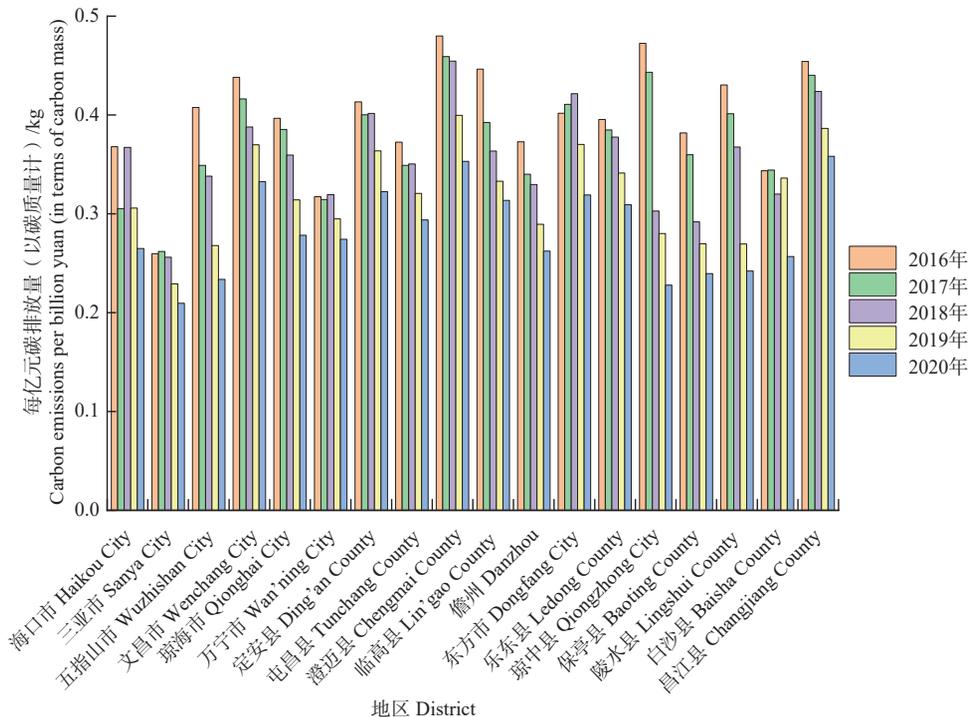


图8 2016—2020年各市县碳排放强度

Fig. 8 Carbon intensity of city and county from 2016 to 2020

农业领域碳减排。

## 参考文献 References

- [1] 李静. 我国南方稻田秸秆还田方式的固碳减排效应及推广政策建议[D]. 南京:南京农业大学, 2015
- Li J. Effects of straw return modes on carbon sequestration and emission mitigation and its extension policy suggestions in paddy fields of south China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015 (in Chinese)
- [2] 邓志明. 长江中游区域不同稻田种植系统的固碳能力和碳足迹[D]. 武汉:华中农业大学, 2020
- Deng Z M. Carbon footprints and carbon sequestration capacity of different rice cropping systems in the middle Yangtze River region[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [3] 刘明明. 中国碳排放权交易实践的成就、不足及对策[J]. 安徽师范大学学报:人文社会科学版, 2021, 49(3):119-124
- Liu M M. Achievements, deficiencies and countermeasures of China's carbon emission trading practice [J]. *Journal of Anhui Normal University: Humanities and Social Sciences*, 2021, 49(3):119-124 (in Chinese)
- [4] 陈松文, 刘天奇, 曹涛贵, 凌霖, 王斌. 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, Ling L, Wang B. 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 (in Chinese)
- [5] 陈庆, 李长江, 张俊丽, 王阳峰, 杨飞, 温晓霞. 保护性耕作农田固碳减排效应分析: 以陕西户县、大荔和临渭区为例[J]. 西北农业学报, 2016, 25(11): 1686-1695
- Chen Q, Li C J, Zhang J L, Wang Y F, Yang F, Wen X X. Analysis of farmland carbon sequestration and greenhouse gas mitigation under conservation tillage: Case study of Huxian, Dali and Linwei District[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2016, 25(11): 1686-1695 (in Chinese)
- [6] 杨果, 陈瑶. 新型农业经营主体参与低碳农业发展的激励机制设计[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(6): 94-99
- Yang G, Chen Y. Design of the incentive mechanism that new agricultural operators participate in low-carbon agricultural development [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(6): 94-99 (in Chinese)
- [7] 徐敏, 伍钧, 张小洪, 杨刚. 生物炭施用的固碳减排潜力及农田效应[J]. 生态学报, 2018, 38(2):393-404
- Xu M, Wu J, Zhang X H, Yang G. Impact of biochar application on carbon sequestration, soil fertility and crop productivity. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2):393-404 (in Chinese)
- [8] 赵自超, 韩笑, 石岳峰, 吴文良, 孟凡乔. 硝化和脲酶抑制剂对华北冬小麦-夏玉米轮作固碳减排效果评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 254-262
- Zhao Z C, Han X, Shi Y F, Wu W L, Meng F Q. Effect of nitrification and urease inhibitor on carbon sequestration and greenhouse gas emissions in winter wheat and summer maize rotation system in North China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(6): 254-262 (in Chinese)
- [9] 吉木色, 郭秀锐. 中国应对气候变化的碳减排研究进展[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(6): 128-133.
- Ji M S, Guo X R. Research progress on carbon emission reduction as a response to climate change in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(6): 128-133 (in Chinese)
- [10] 姜雨林, 陈中督, 逄晋松, 隋鹏, 陈阜. 华北平原不同轮作模式固碳减排模拟研究[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(1): 19-26.
- Jiang Y L, Chen Z D, Ti J S, Sui P, Chen F. Simulation of soil carbon storage and greenhouse gas emission under different rotation systems in the North China Plain [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(1): 19-26 (in Chinese)
- [11] 张格瑜. 中国低碳经济优化模型建立与分析[D]. 北京:首都经济贸易大学, 2016
- Zhang K Y. Setup and analyze on the optimization model of China's low-carbon economy[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2016 (in Chinese)
- [12] 白若琦, 白朴, 吴益伟, 朱相成. 种植业固碳减排潜力和技术对策研究[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(22): 279-283
- Bai R Q, Bai P, Wu Y W, Zhu X C. Study on carbon fixation and emission reduction potential and technical countermeasures of planting industry [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(22): 279-283 (in Chinese)
- [13] 刘昱. 中国农业生态系统的碳氮平衡模拟、耦合和政策评估[D]. 北京:清华大学, 2016
- Liu Y. Carbon and nitrogen balance modeling, coupling and policy evaluation in China's agro-ecosystem[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016 (in Chinese)
- [14] 朱徐凯, 谭春兰, 张颖. 浙江省海洋渔业碳净排放影响因素分解研究[J]. 海洋经济, 2023, 13(3): 25-33
- Zhu X K, Tan C L, Zhang Y. Research on decomposition of factors affecting net Carbon emissions from marine fisheries in Zhejiang Province [J]. *Marine Economy*, 2023, 13(3): 25-33 (in Chinese)
- [15] 姚成胜, 钱双双, 毛跃华, 李政通. 中国畜牧业碳排放量变化的影响因素分解及空间分异[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 10-19
- Yao C S, Qian S S, Mao Y H, Li Z T. Decomposition of impacting factors of animal husbandry carbon emissions change and its spatial differences in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(12): 10-19 (in Chinese)
- [16] 邵桂兰, 孔海峥, 于谨凯, 李晨. 基于LMDI法的我国海洋渔业碳排放驱动因素分解研究[J]. 农业技术经济, 2015(6): 119-128
- Shao G L, Kong H Z, Yu J K, Li C. Decomposition of driving factors of carbon emissions from marine fisheries in China based on LMDI method [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2015(6): 119-128 (in Chinese)
- [17] 周思宇, 郝凤明, 尹岩, 邢龙飞, 王娇月, 马铭婧, 张文凤. 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 S Y, Xi F M, Yin Y, Bing L F, Wang J Y, Ma M J, Zhang W F. Accounting and drivers of carbon emission from cultivated land utilization in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3865-3871 (in Chinese)
- [18] 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
- Wu G Y, Liu J D, Yang L S. Dynamic evolution of China's agricultural carbon emission intensity and carbon offset potential [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(10): 69-78 (in Chinese)
- [19] 李波, 张俊彪, 李海鹏. 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 Bo, Zhang Junbiao, Li Haipeng. 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 (in Chinese)
- [20] 吕洁华, 张泽野. 中国省域碳排放核算准则与实证检验[J]. 统计与决策,

- 2020, 36(3): 46-51
- Lv J H, Zhang Z Y. China's provincial carbon emission accounting standards and empirical test[J]. *Statistics & Decision*, 2020, 36(3): 46-51 (in Chinese)
- [21] 马晨, 陈前利, 胡方芳, 李松, 丛建辉. 新疆碳排放核算研究特征[J]. 资源开发与市场, 2020, 36(3): 233-240, 267
- Ma C, Chen Q L, Hu F F, Li S, Cong J H. Research characteristics of carbon emissions calculation in Xinjiang[J]. *Resource Development & Market*, 2020, 36(3): 233-240, 267 (in Chinese)
- [22] 李甜甜. 江苏省农田碳源、碳汇分布特征及影响因素分析[D]. 南昌: 江西财经大学, 2017
- Li T T. Jiangsu's farmland carbon source and carbon sink distribution characteristics and influencing factors analysis [D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2017 (in Chinese)
- [23] 陈林. 区域农牧业碳收支时空动态及碳强度分区研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2019
- Chen L. Study on spatiotemporal dynamics of carbon budget and carbon intensity zoning of regional agriculture and animal husbandry [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2019 (in Chinese)
- [24] 陈鑫洁. 大庆市畜禽粪尿及温室气体排放量的估算研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2021, 33(4): 29-32, 76
- Chen X J. Analysis of livestock manure and greenhouse gas production in Daqing City[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2021, 33(4): 29-32, 76 (in Chinese)
- [25] 曹俐, 张晨. 碳排放约束下海洋渔业全要素生产率评价及收敛分析: 以沿海地区为例[J]. 海洋经济, 2021, 11(4): 27-35
- Cao L, Zhang C. Evaluation and convergence analysis of total factor productivity of marine fisheries under carbon emission constraint: Take coastal areas as an example[J]. *Marine Economy*, 2021, 11(4): 27-35 (in Chinese)
- [26] 吴静颖. 中国淡水养殖碳排放效率研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021
- Wu J Y. Carbon emission efficiency of freshwater aquaculture in China [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [27] 霍丽丽, 田宜水, 孟海波, 赵立欣, 姚宗路. 生物质固体成型燃料全生命周期评价[J]. 太阳能学报, 2011, 32(12): 1875-1880
- Huo L L, Tian Y S, Meng H B, Zhao L X, Yao Z L. Life cycle assessment analysis for densified biofuel[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2011, 32(12): 1875-1880 (in Chinese)
- [28] 汪玉磊, 徐进, 单英杰. 浙江省农业主要投入要素碳排放时空变化特征[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(3): 311-313.
- Wang Y L, Xu J, Shan Y J. Spatial-temporal variation characteristics of carbon emission of main agricultural input factors in Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2016, 57(3): 311-313 (in Chinese)
- [29] 张伟, 王韶华. 碳强度对中国主要产业部门产值变动敏感性的动态估计[J]. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2015, 17(4): 41-48
- Zhang W, Wang S H. Dynamic estimation on sensitivity of carbon intensity to China's major industrial sectors' output changes[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology: Social Sciences Edition*, 2015, 17(4): 41-48 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



**第一作者简介:** 叶炳南, 中级工程师, 博士研究生, 现就职于农业农村部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 长期从事于农业农村废弃物资源化利用装备研发, 主要研究方向为干法厌氧发酵工程化系列装备研究开发。先后主持或参与国家重点研发计划项目、公益性(农业)行业科技项目、河北省重点研发项目等国家、省部级科研项目。曾获神农中华农业科技奖优秀创新团队、河北省科学技术进步二等奖等。



**通讯作者简介:** 孟海波, 研究员, 现任农业部农业废弃物资源化利用创新团队首席、中国农业工程学会常务理事、中国可再生能源学会生物质能专委会常务理事, 长期在科研一线从事农业农村废弃物资源化利用技术与推广工作。先后作为项目首席主持完成公益性行业(农业)科研专项1项, 以及北京市科技计划、国家科技支撑计划等其他4项国家、省部级课题。并入选国家“百千万人才工程”高层次人才、被授予“有突出贡献中青年专家”, 享受国务院特殊津贴。曾获得国家科技进步二等奖2项、省部级奖励8项; 授权专利67件; 制定标准23项; 出版专著3部。