



中国知网
CNKI

水土保持通报

Bulletin of Soil and Water Conservation

ISSN 1000-288X, CN 61-1094/X

《水土保持通报》网络首发论文

题目：2001—2020年福建省县域单元农业碳排放核算和时空演变特征
作者：郑瑞，姜春，谢臻，邱龙霞，江晓忠，史聪敏
DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20240611.001
收稿日期：2023-12-14
网络首发日期：2024-06-12
引用格式：郑瑞，姜春，谢臻，邱龙霞，江晓忠，史聪敏. 2001—2020年福建省县域单元农业碳排放核算和时空演变特征[J/OL]. 水土保持通报.
<https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20240611.001>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

2001—2020年福建省县域单元农业碳排放核算和时空演变特征

郑瑞^{1,2}, 姜春^{1,2}, 谢臻^{1,2}, 邱龙霞^{1,2}, 江晓忠^{1,2}, 史聪敏^{1,2}

(1.福建农林大学 公共管理与法学院, 福建 福州 350002;

2.自然资源部东南生态脆弱区监测修复工程技术创新中心, 福建 福州 350001)

摘要: [目的] 分析福建省县域尺度农业净碳排放量时空特征, 为福建省及其他各省市制定碳减排对策提供参考依据。[方法] 基于种植业和畜牧业的12种碳源构建农业碳排放核算清单, 采用碳排放因子法测算出农业碳排放总量; 结合福建省农业特征选取7种主要农作物计算碳吸收量; 并利用探索性空间分析方法分析了2001—2020年福建省农业净碳排放的时空演变特征。[结果] ①研究期内净碳排放量呈现出先上升后下降的倒“V”型变化趋势。碳源方面, 农地利用碳排放占据较大比例; 碳汇方面, 水稻、蔬菜和甘蔗对碳吸收的贡献较大。大部分县(市)农业碳排放强度呈下降趋势, 但年均下降幅度较小。②福建省县域碳排放量存在显著的全局空间正相关, 呈现出空间集聚特征, 聚集态势以高高集聚和低低集聚为主。农业碳排放强度空间分布格局变化较大, 整体呈现下降趋势, 其中约有一半的县(市)处于较低强度区。③2001—2020年福建省各县(市)的空间等级分布格局有一定程度的变动, 中等排放区和中低排放区数量增多, 高等排放区、中高排放区和低排放区数量减少, 两极分化情况有所缓解。[结论] 2001—2020年福建省大部分县域农业碳排放量和碳排放强度都呈下降趋势, 碳减排取得了一定成效, 但下降幅度不大, 未来还应从政策激励、产业结构优化等方面采取措施强化减排效果, 促进农业低碳转型。

关键词: 农业碳排放; 碳汇; 县域单元; 探索性空间分析; 福建省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)03-0000-00

中图分类号: X321, F323

文献参数: 郑瑞, 姜春, 谢臻, 等. 2001—2020年福建省县域单元农业碳排放核算和时空演变特征[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3):-. Zheng Rui, Jiang Chun, Xie Zhen, et al. Accounting and spatial-temporal evolution characteristics of agricultural carbon emissions in County units of Fujian Province during 2001—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3):-.

Accounting and Spatial-temporal Evolution Characteristics of Agricultural Carbon Emissions in County Units of Fujian Province During 2001—2020

Zheng Rui^{1,2}, Jiang Chun^{1,2}, Xie Zhen^{1,2}, Qiu Longxia^{1,2}, Jiang Xiaozhong^{1,2}, Shi Congmin^{1,2}

(1.School of Public Administration & Law, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou,

Fujian 350002, China; 2.Technology Innovation Center for Monitoring and Restoration Engineering of Ecological Fragile Zone in Southeast China, Ministry of Natural Resources, Fuzhou, Fujian 350001, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial characteristics of net carbon emissions from agriculture at the county scale in Fujian Province were analyzed in order to provide a reference for the formulation of carbon emission reduction countermeasures in Fujian Province and in other provinces and municipalities. [Methods] We constructed an accounting inventory of agricultural carbon emissions based on 12 carbon sources in plantation and livestock industries, and measured the total agricultural carbon emissions by using the carbon emission factor method. We selected seven major crops to calculate carbon uptake by combining with the agricultural characteristics of Fujian Province. We analyzed the spatial and temporal characteristics of the net agricultural carbon emissions in Fujian Province from 2001 to 2020 by using the exploratory spatial analysis

收稿日期: 2023-12-14

修回日期: 2024-02-23

资助项目: 福建省社科研究基地重大项目“乡村振兴和‘双碳’背景下农村人居环境碳排放研究”(FJ2022MJDZ020); 国家自然科学基金青年资助项目“面向膳食需求转型的南方山区耕地果树‘非粮化’扩张机制与适应性管控研究”(42201280)

第一作者: 郑瑞(1999—), 女(汉族), 河南省信阳市人, 硕士研究生, 研究方向为土地可持续利用。Email: 2577648904@qq.com。

通信作者: 姜春(1984—), 女(汉族), 河南省周口市人, 博士, 讲师, 主要从事土地资源可持续利用与碳排放研究。Email: 000q816030@fafu.edu.cn。

method. [Results] ① During the study period, the net carbon emissions showed an inverted “V” trend of first increasing and then decreasing. In terms of carbon sources, carbon emissions from agricultural land use accounted for a larger proportion. In terms of carbon sinks, rice, vegetables, and sugarcane contributed more to carbon sequestration. The intensity of agricultural carbon emissions in most counties (cities) showed a decreasing trend, but the average annual decline was small. ② There was a significant global spatial positive correlation of carbon emissions in counties in Fujian Province, showing spatial agglomeration characteristics. The agglomeration pattern was dominated by high-high and low-low agglomeration. The spatial distribution pattern of the intensity of agricultural carbon emissions changed considerably, with an overall decreasing trend, in which about half of the counties (cities) were in the lower intensity zone. ③ The spatial class distribution pattern of counties (cities) in Fujian Province from 2001 to 2020 had changed to a certain extent, with an increase in the number of medium-emission zones and medium-low-emission zones, and a decrease in the number of high-emission zones, medium-high-emission zones, and low-emission zones, and the polarization had been alleviated. [Conclusion] During 2001—2020, most counties in Fujian Province have shown a decreasing trend in agricultural carbon emissions and carbon emission intensity, and carbon emission reduction has achieved certain results, but the decline has not been large. In the future, policy incentives and measures should be taken to optimize industrial structure in order to strengthen emission reductions and to promote the transition to low-carbon agriculture.

Keywords: agricultural carbon emissions; carbon sinks; county units; exploratory spatial analysis; Fujian Province

气候变化是全人类面临的共同挑战,而碳减排是解决这一问题的关键。为有效应对气候危机,世界各国纷纷采取行动以实现深度脱碳,2020 年中国提出力争于 2030 年前达到峰值,2060 年前实现碳中和的碳排放目标^[1]。近年来,中国农业生产过程中排放的 CO₂ 占全国总碳排放量的 17%^[2],且呈现年均速率 5% 的增长态势^[3]。IPCC 第五次评估报告显示,农业生产活动所带来的碳排放量仅次于化石燃料燃烧,成为人类活动排放温室气体的第二大源头,约占总排放量的 1/3^[4]。农业是中国国民经济发展的基础产业,推进农业领域的碳减排不仅关乎国家粮食安全和农业可持续发展,对于中国实现“双碳”目标也具有重要意义。

农业碳源/碳汇的核算为农业碳排放研究夯实了基础,监测其长期变化情况则为制定区域碳减排策略提供了科学依据。目前学者们多采用间接估计法和直接系数法核算农业碳排放/碳汇量^[5],农业碳排放呈现多源性特征,随着研究的不断深入,农业碳源核算体系越来越丰富。段华平等^[6]对农业灌溉碳源纳入碳排放核算清单并对其产生的碳排放量进行了测算;田云等^[7]将畜禽养殖过程中产生的 CH₄ 和 N₂O 换算为标准二氧化碳当量,增加了不同部门之间的可比性。农田生态系统具有明显的碳汇效应,其碳储量占到了全球陆地生态系统碳储量的 10% 以上^[8]。Lal R 等^[9]在分析农田生态系统土壤固碳潜力的过程中发现农田生态系统的固碳能力较强。叶文伟等^[10]构建农田生态系统碳足迹模型,探讨海南岛

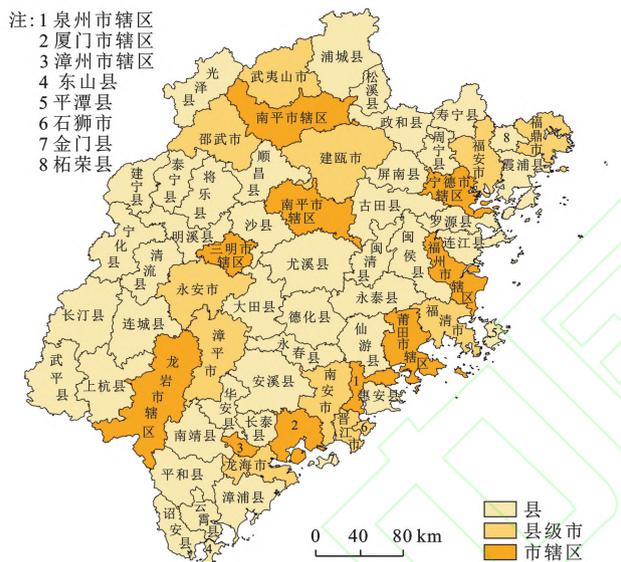
农田生态系统碳足迹时空变化及其影响因素。这些研究成果为后续相关研究奠定了坚实基础。但仍存在以下不足:①学者们多选取单一角度核算农业碳排放量,将种植业与畜牧业碳源同时纳入核算体系的研究较少,测算结果仅为农业碳排的一部分;②农业同时具有碳源和碳汇双重效应,相关研究以农业碳排放为主,碳汇研究相对较少,将二者衔接在一起的研究更少;③研究尺度涉及国家^[11-14]、地区^[15-16]、省等^[17-21]多个尺度,多从宏观层面考虑农业碳源、碳汇,而对于小地理单元碳排放的时空动态演变的研究较少^[22-24]。

基于此,本研究从农地利用、水稻种植和畜禽养殖 3 大类碳源入手构建农业碳排放核算体系,同时结合福建省农业特征,选取 7 种主要农作物构建碳吸收核算体系,测算了福建省 55 个县域单元 2001—2020 年的农业碳排放/碳汇量。利用探索性空间分析方法分析福建省县域单元农业净碳排的空间集聚特征,并以农业碳排放量、农业碳排放强度为研究指标分析农业碳排放强度空间格局和等级变动情况,以期为推动各省市低碳减排工作、制定碳减排对策提供参考依据。

1 研究区域

福建省地处东南沿海,年平均气温 17~21℃,平均降雨量 1 400~2 000 mm。全省陆地总面积 1.24 × 10⁵ km²,其中山地丘陵面积约占全省总面积的 89%,地势西北高,东南低,东西最大间距约 480 km,南北最大间距约 530 km。福建省县级行政单位包括 29 个市辖区,12 个县级市和 44 个县,考虑到市辖区

与县、县级市的经济发展水平差异较大,而经济因素是驱动碳排放的关键因素,且研究时段福建省市区调整频繁,部分年份的数据将市辖区作为一个整体统计,因此该文只对县和县级市作具体讨论。由于金门县数据缺失,最终选择55个县(市)作为研究区域(图1)。种植业和畜牧业是福建省重要支柱产业,2020年全省农林牧渔总产值 4.90×10^{11} 元,其中农牧业总产值为 2.96×10^{11} 元,占比60.38%。粮食作物中水稻产量最高,经济作物则以蔬菜、瓜果、甘蔗和花生为主。畜牧业中,仅对猪、牛、羊、家禽和兔等牲畜的年末存栏量和出栏量进行了统计,其中家禽由于生长期短且经济效益高,数量增长较快。



注:底图来源于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号为GS(2022)1873号的中国标准地图,无修改。

图1 研究区范围示意图

Fig.1 Schematic of extent of study area

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

所需数据包括农业碳源、碳汇核算数据及农林牧渔产值数据,均来源于《福建省统计年鉴》和《福建省农村统计年鉴》(2002—2021年)。农林牧渔产值数据以2001年为基期做不变价处理,农业碳排放强度为碳排放量与不变价处理后的农牧业产值之比。畜牧业的碳排放量参考胡向东等^[25]的计算方法,根据年末存栏数和出栏数进行修正,其中,猪、兔和家禽的出栏率大于1,他们的平均生命周期分别以200,105,55 d计算。

2.2 研究方法

2.2.1 农业碳排放测算模型 农业碳排放主要包括农地利用、水稻种植和禽畜养殖过程中产生的碳排放。具体来看,农地利用碳排放包括化肥、农药、农膜、柴油等农用物资投入、灌溉过程中的电能消耗以及农地翻耕过程中有机碳的流失;水稻种植过程中产生的碳主要来源于产甲烷细菌分解稻田土壤中的有机物产生的 CH_4 ;畜牧业碳排放包括畜禽肠道发酵和粪便管理系统产生的 CH_4 和 N_2O 。

该文采用碳排放系数法估算碳排放量,各碳源的碳排放系数及参考来源见表1。据此,构建农业碳排放测算公式如下:

$$C_1 = \epsilon_i \times \varphi_i \quad (1)$$

式中: C_1 为农业碳排放总量; ϵ_i 为第*i*种碳源的量; φ_i 为第*i*种碳源的碳排放系数。为便于核算,将 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 统一折算为标准C,根据IPCC第四次评估报告,1 t CO_2 、 CH_4 和 N_2O 可分别转化为0.27,6.82,81.27 t标准C。

表1 各碳源碳排放系数及参考来源

Table 1 Carbon emission factors and reference sources for each carbon source

碳源因子	碳排放系数(以C计)	参考来源	
农地利用	化肥	0.90 kg/kg	美国橡树岭国家实验室(ORNL) ^[26]
	农药	4.93 kg/kg	美国橡树岭国家实验室(ORNL) ^[26]
	农膜	5.18 kg/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所(IREEA) ^[27]
	农用柴油	0.59 kg/kg	联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC) ^[4]
	农业灌溉	266.48 kg/hm ²	Tristram O. West ^[28]
	土地翻耕	312.60 kg/hm ²	中国农业大学农学与生物技术学院(IABCAU) ^[27]
水稻种植	水稻	346.20 kg/hm ²	联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC) ^[4]
	猪	34.09 kg/头	联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC) ^[4]
畜禽养殖	牛	415.91 kg/头	联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC) ^[4]
	羊	35.18 kg/头	联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC) ^[4]
	兔	3.90 kg/只	联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC) ^[4]
	家禽	1.76 kg/只	联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC) ^[4]

2.2.2 农业碳汇测算模型 具体考虑福建省主要农作物的碳吸收,测算方法参考许萍萍等^[29]的研究,其公式为:

$$C_2 = \sum C_d = \sum \frac{C_i Q_i (1 - \omega_i)}{H_i} \quad (2)$$

式中: C_2 为农田系统的总吸收量; C_d 为主要农作物的碳吸收量; C_i 为第*i*类作物的碳吸收率; ω_i 为第*i*类作物收获部分的含水率; Q_i 为第*i*类作物的经济产量; H_i 为第*i*类作物的经济系数,具体参数取值参考任国勇等^[30]研究结果,见表 2。

表 2 农业碳汇测算关键参数

Table 2 Key parameters for measuring agricultural carbon sinks

作物类型	碳吸收率(C_i)	含水率(ω_i)	经济系数(H_i)
水稻	0.414 4	0.12	0.45
薯类	0.422 6	0.70	0.65
玉米	0.470 9	0.13	0.40
大豆	0.450 0	0.13	0.35
花生	0.450 0	0.10	0.43
甘蔗	0.450 0	0.50	0.50
蔬菜	0.450 0	0.90	0.65

2.2.3 空间相关性分析 莫兰指数是应用较广的空间自相关分析指标,有全局莫兰指数(Global Moran's I)和局部莫兰指数(Local Moran's I)之分,Global Moran's I 用来判断本区域是否出现集聚或异常值,Local Moran's I 则用来计算具体的空间自相关区域。本研究利用 Geoda 软件计算邻接矩阵下福建省 55 个县域单元农业碳排放的 Global Moran's I 和 Local Moran's I ,参考文献^[31],计算公式为:

$$\text{Global Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n W_{ij} (y_i - \bar{y})^2 \right)} \quad (3)$$

$$\text{Local Moran's } I = \frac{n (y_i - \bar{y}) \sum_{j=1}^m W_{ij} (y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

式中: n 表示县域样本量; m 表示与县域*i*相邻的县域个数; y_i, y_j 分别表示第*i*和第*j*个县域的碳排放量, \bar{y} 表示*y*的均值; W_{ij} 表示县域*i*和*j*的空间权重矩阵。

2.2.4 农业碳排放空间等级分析 农业碳排放空间等级变动用于深入理解农业碳排放空间格局的演变。参考何艳秋等^[14]的研究,首先要计算农业净碳排放量和强度的空间标准差系数,计算公式为:

$$\delta_1 = \frac{\sigma_1}{\mu_1} \quad (5)$$

$$\delta_2 = \frac{\sigma_2}{\mu_2} \quad (6)$$

式中: $\delta_1, \sigma_1, \mu_1$ 分别为农业碳排放量的空间标准差系数、标准差和均值; $\delta_2, \sigma_2, \mu_2$ 则分别表示农业碳排放强度的相关指标。

然后,以 2001 年,2020 年福建省 55 个县(市)的农业碳排放量和碳排放强度数据为样本进行正态性检验,结果 2001 年,2020 年的数据均接受原假设,符合正态分布。最后,根据正态分布原理,按表 3 标准进行等级划分。

表 3 福建各县(市)农业碳排放空间等级划分标准

Table 3 Spatial classification standard of agricultural carbon emission in counties (cities) of Fujian Province

排放水平	分区标准
高等	$N > (\mu_1 + 0.44\sigma_1); S > (\mu_2 + 0.44\sigma_2)$
中高	(1) $N > (\mu_1 + 0.44\sigma_1); (\mu_2 - 0.44\sigma_2) < S < (\mu_2 + 0.44\sigma_2)$ (2) $(\mu_1 - 0.44\sigma_1) < N < (\mu_1 + 0.44\sigma_1); S > (\mu_2 + 0.44\sigma_2)$
中等	(1) $(\mu_1 - 0.44\sigma_1) < N < (\mu_1 + 0.44\sigma_1);$ $(\mu_2 - 0.44\sigma_2) < S < (\mu_2 + 0.44\sigma_2)$ (2) $N < (\mu_1 - 0.44\sigma_1); S > (\mu_2 + 0.44\sigma_2)$ (3) $N > (\mu_1 + 0.44\sigma_1); S < (\mu_2 - 0.44\sigma_2)$
中低	(1) $N < (\mu_1 - 0.44\sigma_1); (\mu_2 - 0.44\sigma_2) < S < (\mu_2 + 0.44\sigma_2)$ (2) $(\mu_1 - 0.44\sigma_1) < N < (\mu_1 + 0.44\sigma_1); S < (\mu_2 - 0.44\sigma_2)$
低等	$N < (\mu_1 - 0.44\sigma_1); S < (\mu_2 - 0.44\sigma_2)$

注: N 农业净碳排放量; S 农业碳排放强度。

3 结果与分析

3.1 农业碳排放时序特征

3.1.1 农业碳排放整体变化趋势 农业净碳排放量与农业碳排放总量的演变趋势基本一致,整体呈先上升后下降的倒“V”型变化(图 2)。农业碳排放总量由 2001 年的 3.40×10^6 t 降至 2020 年的 3.05×10^6 t,减少了 10.29%,但农业净碳排放量却从 2001 年的 1.68×10^6 t 升至 2020 年的 1.90×10^6 t,相较于 2001 年增加了 13.10%,原因在于碳汇降幅高于碳排。2020 年农业碳吸收量为 1.15×10^6 t,较 2001 年减少了 33.59%。因此,实现福建省农业低碳转型不仅需要最大限度降低农业碳排强度,还要充分释放农业的碳汇功能,以有效控制农业生产的净碳排放量。

2001—2020 年福建省 3 大类碳源的碳排变化趋势见图 2,整个研究时段内农业碳排放总量从高到低依次为农地利用(2.59×10^6 t)、畜禽养殖(6.58×10^5 t)、稻田(2.52×10^5 t),分别占全省总量的 73.99%,18.80%和 7.20%,农地利用为福建省的主要农业碳源,其次是禽畜养殖。在变化趋势上,2001—2016 年农地利用碳排放量变化较为平缓,2016 年以后下降趋势明

显,最主要的原因是福建省在优化种植结构的过程中,扩大中草药材等非粮作物面积的同时减少了粮食作物的播种面积,而翻耕以农作物播种面积代替,是以翻耕引起的碳排放量大幅减少;稻田甲烷排放产生的碳排放量由 2001 年的 3.33×10^5 t 下降到 2020 年的 1.81×10^5 t,较 2001 年下降了 45.64%,并呈现逐年下降的趋势;畜禽养殖碳排放量呈波动下降态势,2006 年下降的幅度最大,由 7.68×10^5 t 下降到了 6.17×10^5 t。

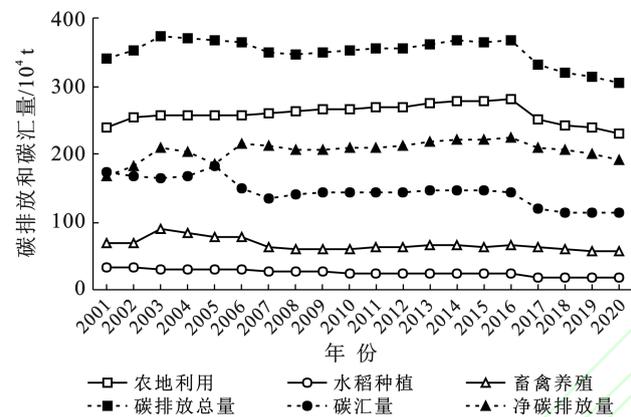


图 2 2001—2020 年福建省农业碳排放和碳吸收变化趋势

Fig.2 Trends in agricultural carbon emissions and sequestration in Fujian Province from 2001 to 2020

3.1.2 不同碳排结构变化趋势 图 3 和图 4 分别展示了农地利用和禽畜养殖的具体碳排情况。由图 3 可知,化肥、翻耕和农用柴油是农地利用碳排放的主要来源。2020 年福建省化肥、翻耕、农用柴油的碳排放量分别是 9.07×10^5 t, 5.26×10^5 t, 4.62×10^5 t, 占农地利用碳排放总量的 70.92%。由图 4 禽畜养殖碳排可知,2001—2020 年牛的碳排放量由 4.60×10^5 t 降到了 1.39×10^5 t,而家禽的碳排放量由 5.84×10^4 t 增加到了 2.43×10^5 t。自 2007 年起畜禽养殖碳排放量显著降低,这是因为农户减少了牛的养殖量,而牛的碳排放系数远远高于其他牲畜。主要碳源由牛、猪、家禽变为家禽、猪、牛,造成农户养殖意愿改变的原因可能是牛的养殖成本高且生长周期较长,收益见效较慢,而家禽恰好与之相反,农户更愿意投入家禽养殖。

图 5 为 2001—2020 年福建省主要农作物的碳吸收情况。由图 5 可知,水稻、蔬菜、甘蔗的碳吸收量较高,对福建省碳汇的贡献很大;除蔬菜以外其他农作物产量都呈波动下降态势,归因于耕地大量撂荒致使农作物播种面积逐年下降。福建省的蔬菜产量远高于水稻产量,但由于其含水率高达 90%,碳吸收量远低于水稻。整体上,水稻的碳吸收量一直处于较高水

平,2001—2020 年福建省水稻碳吸收量由 1.53×10^6 t 减至 8.66×10^5 t,在碳吸收总量中的占比也从 72.67% 降至 63.84%。近年来,福建省农村劳动力大量流向城市,耕地撂荒,主要农作物的产量整体呈现下降趋势,农作物固碳能力也随之削弱,一定程度上增大了减排压力。

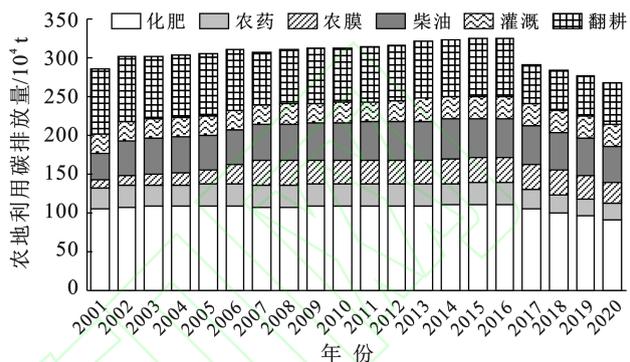


图 3 2001—2020 年福建省农地利用碳排情况

Fig.3 Carbon emissions from agricultural land use in Fujian Province from 2001 to 2020

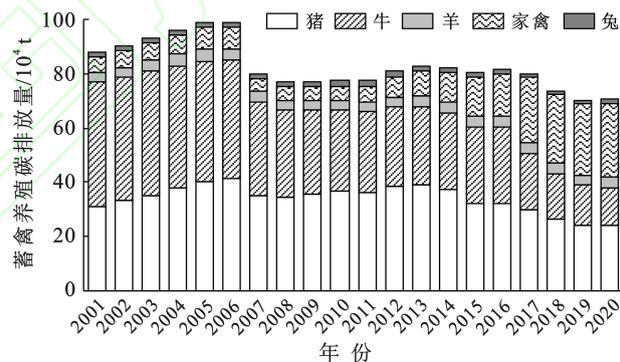


图 4 2001—2020 年福建省禽畜养殖碳排情况

Fig.4 Carbon emissions from livestock farming in Fujian Province from 2001 to 2020

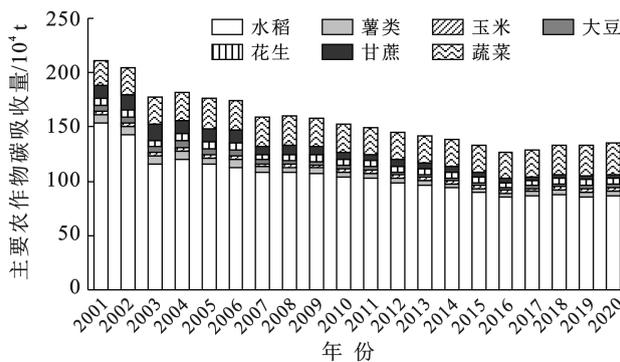


图 5 2001—2020 年福建省主要农作物碳吸收情况

Fig.5 Carbon sequestration of major crops in Fujian Province from 2001 to 2020

3.1.3 农业碳排放强度特征 以福建省 55 个县域单元 2001—2020 年农业碳排放强度的年均变化率为指

标分析其时序变化特征。由图 6 可知,年均变化率呈下降趋势的有 46 个县,占比 83.64%。各县域的下跌幅度不同,其中,33 个县(市)的下跌幅度低于 2%,占比 60%,东山县的下跌幅度最小;下跌幅度最大的 5 个县依次为建宁县、石狮市、南安市、长汀县、诏安县,年平均下降率在 5.51%~7.72% 之间。农业碳排放强度呈上升趋势的有 9 个,增速由快到慢依次为光泽县、华安县、屏南县、浦城县、政和县、福安市、罗源县、尤溪县和福鼎市,其中光泽县农业碳排放的增速最快,由 2001—2020 年增加了 672.1 kg/10⁴ 元,平均每年以 8.54% 的速度增长。在碳排放强度减少的县(市)中,83.63% 的县(市)碳排放强度年均下降幅度不足 5%,说明福建省大部分县碳排放强度虽然呈下降趋势,但下降幅度不高,低碳减排之路仍任重道远。

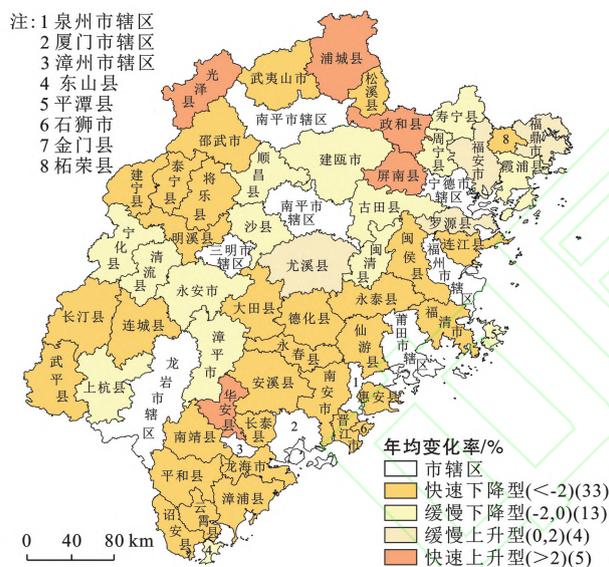


图 6 福建省 2001—2020 年县域农业碳排放强度变化特征

Fig.6 Characteristics of changes in agricultural carbon emission intensity in counties in Fujian Province from 2001 to 2020

3.2 农业碳排放的空间演变特征

3.2.1 农业碳排放空间自相关分析

(1) 全局自相关分析。由于篇幅有限,该文仅列出 2001, 2005, 2010, 2015, 2020 年的 Moran's *I* 指数,见表 4。除 2016 年外福建省其余年份农业碳排放量均通过了 5% 的显著性检验,呈现出空间集聚特征。研究期内福建省县域农业碳排放的 Moran's *I* 指数均为正值,表明县域碳排放量存在空间正相关关系,而 Moran's *I* 指数数值逐年降低,反映了农业碳排放量空间集聚程度逐年减弱的事实。

(2) 局部空间自相关分析。为直观反映福建省县域碳排放量的空间集聚特征,选取 2005, 2010,

2015, 2020 年共 4 a 为样本分别绘制出福建省农业碳排放量的 LISA 聚类图(图 7)。福建省县域农业碳排放始终呈现空间正相关,正相关特征随着时间推移有所衰减。聚集态势以高高(HH)聚集和低低(LL)聚集为主,低高(LH)聚集和高低(HL)聚集区域因溢出效应散布在 HH 及 LL 聚类周边。漳州市的平和县、漳浦县、南靖县和龙海市 4 个县域单元始终表现为 HH 集聚,该区域位于福建省内最大平原—漳州平原,农业资源丰富,农业发达,素有闽南粮仓之称,优越的农耕条件使得该区域农业碳排放量较高。HH 集聚区分布集中,说明农业碳排放存在空间溢出效应。这也为我们提供了一个很好的减排思路,即通过推动漳州下辖 4 县区等重点区域减排带动周边地区的碳减排,以实现碳排放外部性的内部化。

表 4 福建省全局 Moran's *I* 指数

Table 4 Global moran's *I* index in Fujian province

年份	Moran's <i>I</i>	<i>p</i> 值	Z 值
2001	0.426 3	0.001 0	4.249 5
2005	0.310 1	0.007 0	3.256 8
2010	0.196 8	0.028 0	2.091 2
2015	0.172 4	0.048 0	1.849 1
2020	0.165 2	0.049 0	1.814 5

(1) 2005—2010 年农业碳排放量空间集聚特征的显著性大大增强,集聚显著单元数量增长 50%。其中,表现为 LL 集聚的区域增加 3 个,但占比却从 80% 降至 73%,泰宁县、将乐县、顺昌县、光泽县、浦城县由不显著的空间特征转变为 LL 集聚,寿宁县由 LL 集聚转变为不显著。漳平市和惠安县分别由不显著特征转变为 LH 集聚和 HL 集聚特征,表现为 HL 集聚和 LH 集聚单元数量分别增加了一个。

(2) 2010—2015 年农业碳排放量空间集聚特征的显著性有所衰减,集聚显著单元数量减少 20%。其中,表现 LL 集聚的县域单元数量减少 3 个,光泽县由 LL 集聚演变为 HL 集聚,周宁县和福安市由 LL 集聚转变为不显著的空间特征;表现为异质性的县域单元数量没有发生改变,但分布发生了变化。LH 集聚的县域单元数量由 2 个减少到了 1 个,HL 集聚县域数量增加了 1 个。具体变化为漳平市和建瓯市分别由 LH 集聚和 HL 集聚转变为不显著的空间特征,宁化县由不显著特征演变为 HL 集聚特征。

(3) 2015—2020 年农业碳排放量空间集聚特征的显著性明显增强,集聚显著单元数量增长 33%。其中,表现为 LL 集聚县域单元增加了 4 个,具体变化为建宁县、明溪县、沙县、尤溪县由不显著的空间特

征转变为 LL 集聚特征, 宁化县由 HL 集聚演变为 LL 集聚特征。表现为异质性的县域单元数量不变, 分布发生变化较小, 空间分布格局呈现稳定状态。具

体来看, 表现为 LH 集聚仍然是云霄县, 表现为 HL 集聚的县域单元由宁化县、漳平市和光泽县转变为浦城县、漳平市和光泽县。

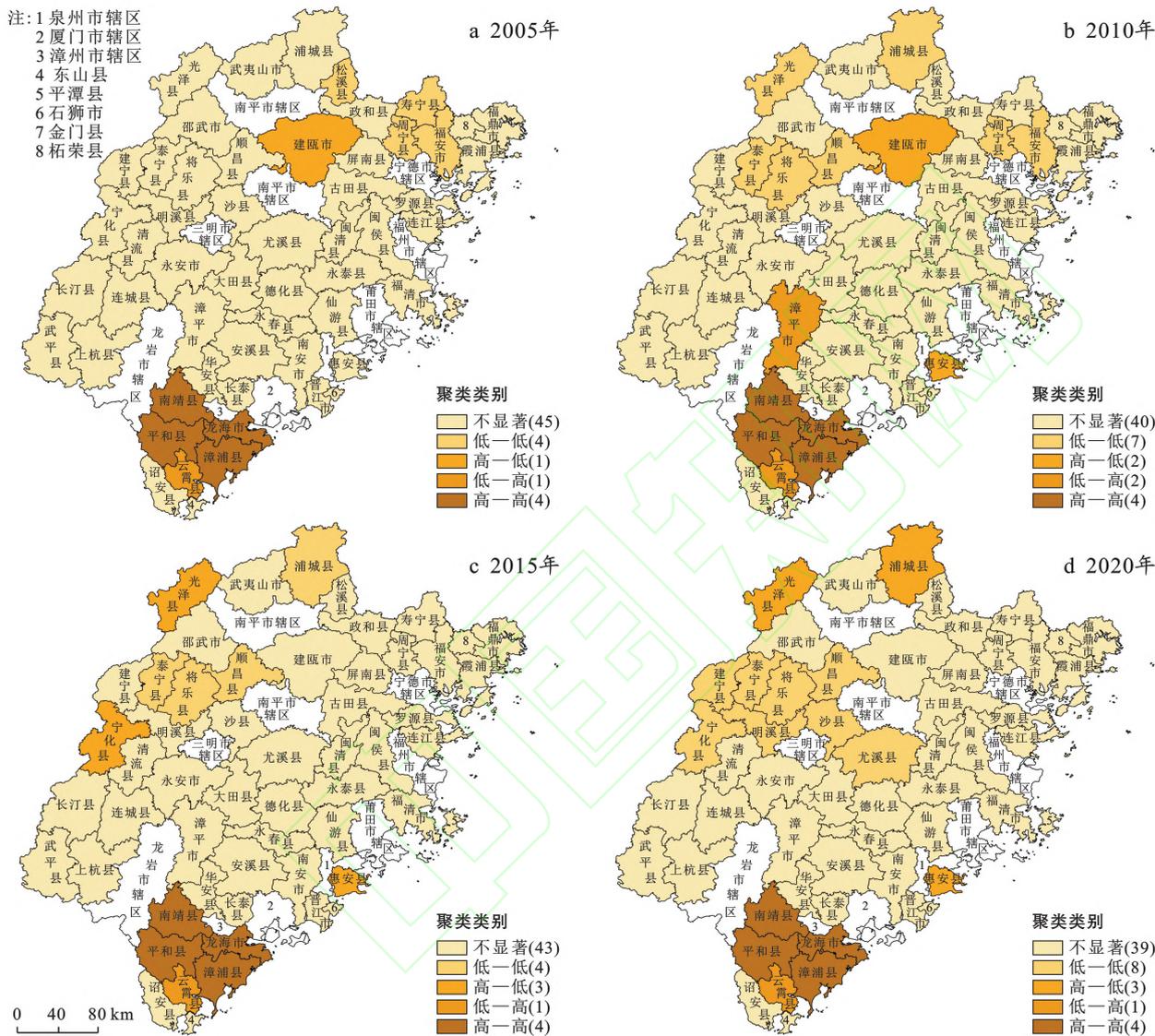


图7 2005—2020年福建省各县LISA聚类分布

Fig.7 Distribution of LISA clusters by counties in Fujian Province during 2005—2020

3.2.2 农业碳排放强度空间格局分析 选取2005, 2010, 2015, 2020年的农业碳排放强度, 参考夏四友等^[32]的划分方法, 按照当年碳排放强度均值的0.5倍以下、0.5~1.0倍、1.0~1.5倍和1.5倍以上4个区间将福建省各县域单元农业碳排放强度划分为低、较低、较高和高强度区(图8)。总体来看, 研究期内, 碳排放强度整体呈现出下降趋势, 约有一半的县域处于较低强度区。各县域单元碳排放强度的变化较大, 较低强度区呈聚集态势, 而低强度区呈离散态势, 较高强度区经历了先扩大后收缩的过程, 高强度区的变化则与之相反, 这是由于碳吸收量的减少, 导致2020年碳减排效果有所反弹。具体而言: ①2005—2010年

高强度区和低强度区有所收缩, 高强度区主要形成了南靖县—平和县和大田县—永春县—安溪县两个分布区, 低强度区形成了以闽清县为中心的环状空间格局; 较高强度区由分散向集中演变, 形成东西向的条带状空间格局; 较低强度区数量没有发生变化, 但是空间分布变化较大。②2010—2015年高强度区和较低强度区在空间上有所收缩; 较高强度区呈扩张态势, 主要形成仙游县—永春县—德化县—大田县、连城县—清流县和顺昌—建瓯市—屏南县—政和县—浦城县3个分布区; 低强度区明显扩张, 在2010年低强度区的基础上扩张了闽清县、泰宁县、将乐县、云霄县和南安市5个县域单元。③2015—2020年高强度

区有所扩张,平和县、南靖县和安溪县始终处于高强度区;较高强度区呈收缩态势,东部形成以长汀县为中心的带状空间格局,北部形成顺昌县—建瓯市—屏

南县分布区;低强度区数量没有发生改变,但集中程度有所上升;较低强度区呈扩张态势,主要扩张区域分布在福建省中部,形成“O”字型格局。

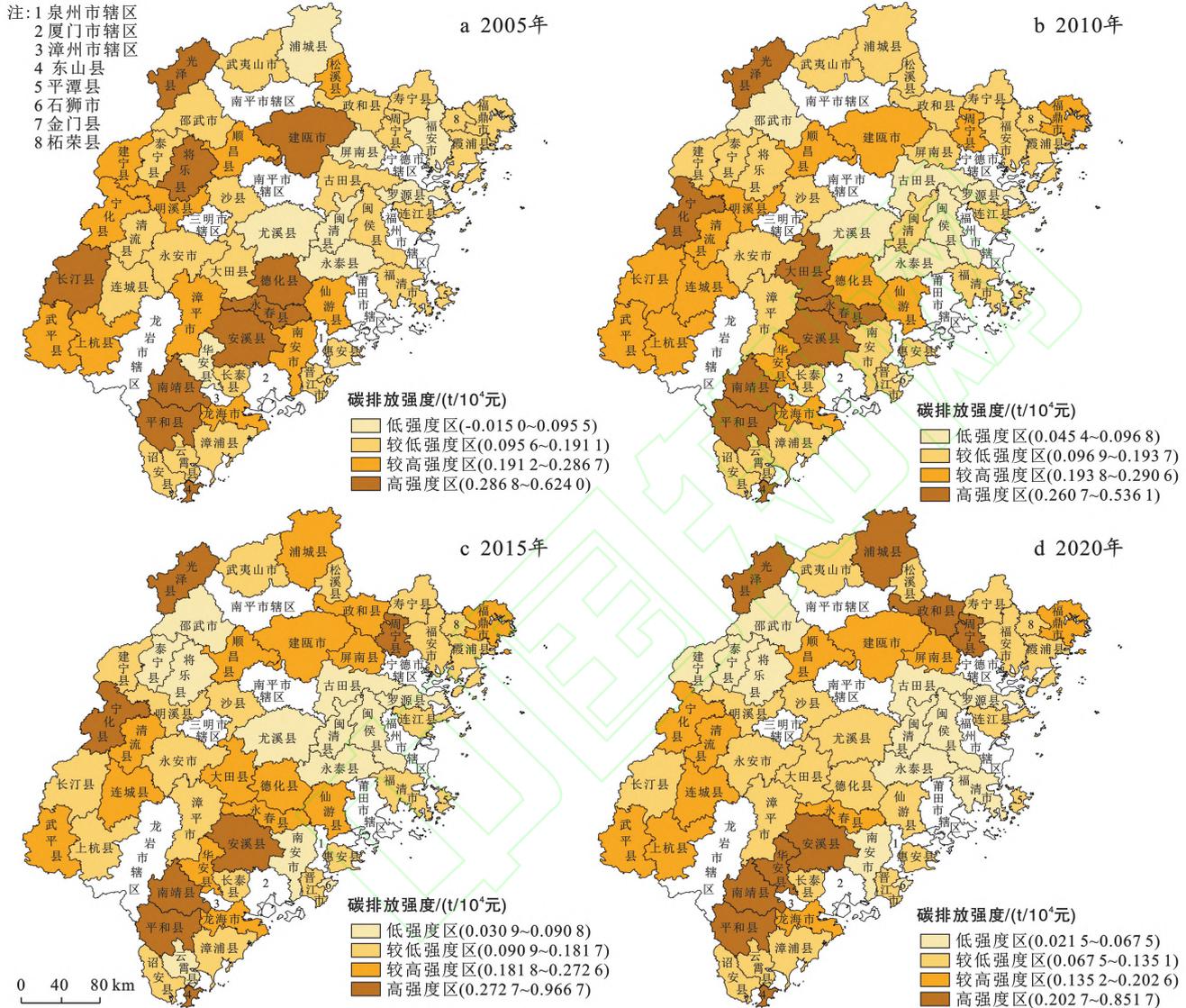


图 8 2001—2020 年福建省农业碳排放强度空间格局

Fig.8 Spatial pattern of agricultural carbon emission intensity in Fujian Province from 2001 to 2020

3.3 农业碳排放空间等级变动分析

2001—2020 年福建省各域单元农业碳排放空间等级分布格局有一定程度的变动(表 5)。排放等级升高和降低的县域数量相等,分别占比 25.45%,其余 49.1%的县域单元碳排放等级不变。中等、中低排放区数量增多,高等、中高等和低排放区数量减少,碳排放空间等级的两极分化情况有所缓解。其中,高排放区由福建省南部诏安县、漳浦县、武平县和东部仙游县、永泰县向北部光泽县、浦城县和福鼎市转移;中高排放区收缩到政和县、建瓯县、华安县和上杭县;中等排放区由福鼎市向福安市和霞浦县扩张,由上杭县向长汀县和永安市扩张;中低排放区由霞浦、政和、浦城等

地扩展到闽侯、沙县等地区;低排放区收缩到云霄县、南安市和建宁县。农业碳排放等级有升高趋势的县(市)由福建省东北方向延伸到西南方向,福建省的东南沿海以及西部部分区域排放等级有降低趋势,呈条带状分布。

4 讨论

在研究尺度上,本文在县域空间尺度下对福建省 55 个县域单元的农业碳排放/碳汇量进行了核算,较国家、地区和省域等宏观层面的研究,可以更深层次刻画小地理单元长时序碳排放的时空演变特征。在碳排核算上,福建省相关研究多集中在种植业,忽略

了畜牧业在农业碳排放中的重要地位。农业同时具有碳源和碳汇效应,但现有研究大多仅从碳源方面考虑,忽视了农业的碳汇作用。而本文基于农业碳源和碳汇双重效应量化农牧业净碳排放量,有利于更加准确地把握福建省农业碳排放现状。当前,福建省农业碳排/碳汇均呈下降趋势,但由于碳汇下降幅度较大,净碳排放量整体呈上升趋势。这一变化为我们提供了一个很好的减排思路,即要实现福建省的低碳转型不仅需要最大限度降低农业碳排强度,还要充分释放农业的碳汇功能。在农业碳排时空特征分析上,对福建省农业碳排已有研究结果表明东南沿海地区和西北山区的农业生产碳排放存在着区域差异,碳排放总体呈现东高西低的空间分布特征,漳州市的农用物资与农地利用碳排放量最大^[33-34]。与现有省级层面研究相比,本文在对福建省农业碳排放时空特征的分析中,发现漳州市的南靖县、平和县、龙海市、东山县等地区空间集聚特征表现为高高集聚,是重点减排区域。这与已有其他福建省的研究结论基本一致,但本研究能深入探析农业碳排放的空间集聚性。

表 5 2001—2020 年福建省各县(市)农业碳排放等级演变
Table 5 Evolution of agricultural carbon emission levels in counties (cities) of Fujian Province from 2001 to 2020

排放等级 升高县(市)	排放等级 升高情况	排放等级 降低县(市)	排放等级 降低情况
尤溪县	低—中低	武平县	高—中高
沙县	低—中低	仙游县	高—中高
屏南县	低—中低	长泰县	高—中等
寿宁县	低—中低	漳浦县	高—中等
福安市	低—中等	诏安县	高—中低
华安县	低—中高	长汀县	中高—中等
霞浦县	中低—中等	龙海市	中高—中等
永安市	中低—中等	永春县	中高—中等
政和县	中低—中高	惠安县	中高—中等
浦城县	中低—高	德化县	中高—中低
光泽县	中低—高	闽侯县	中高—中低
建瓯市	中等—中高	云霄县	中高—低
上杭县	中等—中高	南安市	中低—低
福鼎市	中等—高	建宁县	中低—低
比例/%	25.45	比例/%	25.45

对福建省县域单元农业碳排放时空特征展开研究不仅有利于推进县域农业碳排放区域协同治理,还为福建省制定低碳减排政策提供了参考。具体可从以下 4 方面着手:①制定差异化的排放目标和激励措施,推动区域协同发展。根据文中划定的排放区等级,确定各区域的减排任务,同时辅以财政奖励,提高其减排积极性;②使用清洁能源替代柴油,提高化肥

等农业物资的利用效率。因为化肥、柴油是农地利用过程中最主要的碳源,通过减少柴油使用、测土配方施肥提高化肥吸收效率等措施,能有效降低农业碳排放;③进一步优化畜牧业产业结构。牛等碳排放系数较高的牲畜养殖成本高,收益见效慢,农户转而投向家禽等碳排放系数较低的牲畜,畜牧业碳排放量整体呈下降趋势,因此未来可进一步优化其产业结构以促进农业碳减排;④改善农业管理,提升农业碳汇。在农业管理过程中通过保护性耕作、秸秆还田、有机肥使用等手段,实现农田碳源到碳汇的转变,达到固碳增汇的效果。

限于数据可得性,本研究主要核算了种植业和畜牧业的碳排放量,碳汇核算侧重于农田生态系统农作物的碳吸收,没有把农业生产相关的秸秆田间燃烧、秸秆堆肥等纳入核算范围,主要因为秸秆处理方式的差异会导致不同的碳效应,而实际研究中无法判定不同处理方式所对应的秸秆数量。未来应综合了解福建省各县(市、区)农作物秸秆的具体处置情况,将其引入到农业碳排放/碳汇的核算体系之中,并采用多种方法进行评估,使得测算结果更加准确,从而为各省市制定低碳减排政策提供参考。

5 结论

(1) 碳排放总量方面,2001—2020 年福建省农业碳排放总量与净碳排放量变化趋势基本一致,呈现出先上升后下降的倒“V”型变化,碳吸收量则始终处于下降趋势;碳排放结构方面,农业碳排放量从高到低依次为农地利用、畜禽养殖、稻田,分别占全省碳排放总量的 73.99%,18.80%和 7.20%;碳排放强度方面,大部分县(市)的农业碳排放强度呈下降趋势,农业碳减排已取得了一定成效,但碳排强度年均下降幅度较小,福建省低碳减排之路仍任重道远。

(2) 空间集聚特征方面,呈现空间集聚特征,存在显著的空间正相关关系,正相关特征随着时间推移有所衰减。聚集态势以高高(HH)聚集和低低(LL)聚集为主,低高(LH)聚集和高低(HL)聚集区域因溢出效应散布在 HH 及 LL 聚类周边,漳州市的平和县、漳浦县、南靖县和龙海市 4 个县域单元始终表现为 HH 集聚,说明漳州市应划入碳减排重点区域。

(3) 从农业碳排放强度空间格局来看,研究期内约有半数的县域单元处于较低强度区,各碳排放强度区的空间分布变化较大,整体上呈下降趋势;农业碳排放空间等级变化方面,福建省 2001—2020 年各县域单元农业碳排放空间等级分布格局有所变化。排放等级升高和降低的县域数量相等,接近一半的县域单元

排放等级不变。中等、中低排放区数量增多,高等、中高和低排放区数量减少,两极分化情况有所缓解。

参考文献 (References)

- [1] 习近平.在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N].人民日报,2020-09-23(1).
Xi Jinping. Address to the General Debate of the seventy-fifth session of the United Nations General Assembly [N]. People's Daily, 2020-09-23(1).
- [2] 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]. Resources Science, 2012,34(11):2097-2105.
- [3] 冉光和,王建洪,王定祥.我国现代农业生产的碳排放变动趋势研究[J].农业经济问题,2011,32(2):32-38.
Ran Guanghe, Wang Jianhong, Wang Dingxiang. Study on the changing tendency and counter-measures of carbon emission produced by agricultural production in China [J]. Issues in Agricultural Economy, 2011, 32(2):32-38.
- [4] Climate Change 2013: The Physical Science Basis Technical Summary[R]. IPCC,2013.
- [5] 龚钰,陆建飞,罗云建,等.江苏省县域种植业碳源/汇测算与农业园区空间相关性分析[J].生态与农村环境学报,2023,39(8):963-972.
Gong Yu, Lu Jianfei, Luo Yunjian, et al. Spatial correlation analysis between carbon source/sink measurement and agricultural parks in Jiangsu Province [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023,39(8):963-972.
- [6] 段华平,张悦,赵建波,等.中国农田生态系统的碳足迹分析[J].水土保持学报,2011,25(5):203-208.
Duan Huaping, Zhang Yue, Zhao Jianbo, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 203-208.
- [7] 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 emission in Hubei Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(12):1514-1519.
- [8] 白义鑫,盛茂银,胡琪娟,等.贵州喀斯特农田生态系统碳足迹时空差异研究[J].四川农业大学学报,2019,37(5):685-694.
Bai Yixin, Sheng Maoyin, Hu Qijuan, et al. Study on spatial and temporal differences of carbon footprint of Karst farmland ecosystem in Guizhou [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2019,37(5):685-694.
- [9] Lal R, Bruce J P. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect [J]. Environmental Science & Policy, 1999,2(2):177-185.
- [10] 叶文伟,王城城,赵从举,等.近20年海南岛热带农田生态系统碳足迹时空格局演变[J].中国农业资源与区划,2021,42(10):114-126.
Ye Wenwei, Wang Chengcheng, Zhao Congju, et al. Spatial and temporal evolution of carbon footprint of tropical farmland ecosystem in Hainan Island in recent 20 years [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021,42(10):114-126.
- [11] 韦沁,曲建升,白静,等.我国农业碳排放的影响因素和南北区域差异分析[J].生态与农村环境学报,2018,34(4):318-325.
Wei Qin, Qu Jiansheng, Bai Jing, et al. Influencing factors of agricultural carbon emission and regional differences between south and north in China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018,34(4):318-325.
- [12] 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.
Tian Yun, Yin Minhao. Re-evaluation of China's agricultural carbon emissions: Basic status, dynamic evolution and spatial spillover effects [J]. Chinese Rural Economy, 2022(3):104-127.
- [13] 田云,张俊飏.中国农业生产净碳效应分异研究[J].自然资源学报,2013,28(8):1298-1309.
Tian Yun, Zhang Junbiao. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China [J]. Journal of Natural Resources, 2013,28(8):1298-1309.
- [14] 何艳秋,陈柔,吴昊玥,等.中国农业碳排放空间格局及影响因素动态研究[J].中国生态农业学报,2018,26(9):1269-1282.
He Yanqiu, Chen Rou, Wu Haoyue, et al. Spatial dynamics of agricultural carbon emissions in China and the related driving factors [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018,26(9):1269-1282.
- [15] 肖晰文,刘春红,刘再森,等.三峡库区(湖北段)农业碳排放特征、驱动因素与趋势预测[J].中国农业资源与区划,2023,44(9):212-222.
XIAO Xiwen, LIU Chunhong, LIU Zaisen, et al. Characteristics, driving factors and trend prediction of agriculture carbon emissions in the Three Gorges Reservoir Area (Hubei Section) [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023,

- 44(9):212-222.
- [16] 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 Miande, ZHOU Dongmei, ZHU Xiaoyan, et al. Spatio-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.
- [17] 李波,杜建国,刘雪琪.湖北省农业碳排放的时空特征及经济关联性[J].中国农业科学,2019,52(23):4309-4319.
- Li Bo, Du Jianguo, Liu Xueqi. Spatial-temporal characteristics and economic relevance of agricultural carbon emissions in Hubei Province [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019,52(23):4309-4319.
- [18] 张志高,袁征,张翠贞,等.河南省农业碳排放时空特征与脱钩弹性研究[J].江苏农业科学,2017,45(17):281-285.
- Zhang Zhigao, Yuan Zheng, Zhang Cuizhen, et al. Spatial-temporal characteristics and decoupling elasticity of agricultural carbon emissions in Henan Province [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017,45(17):281-285.
- [19] 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 emission from farmland inputs in Hunan Province based on stirpat and GM (1,1) model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018,27(2):345-352.
- [20] 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.
- 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.
- [21] 邱子健,靳红梅,高南,等.江苏省农业碳排放时序特征与趋势预测[J].农业环境科学学报,2022,41(3):658-669.
- Qiu Zijian, Jin Hongmei, Gao Nan, et al. Temporal characteristics and trend prediction of agricultural carbon emission in Jiangsu Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022,41(3):658-669.
- [22] 张再杰,杨伟芳.湖北省农业碳排放及基于 K-means 聚类算法的县级碳排放研究[J].云南农业大学学报(社会科学),2023,17(2):134-140.
- Zhang Zaijie, Yang Weifang. Agricultural carbon emissions in Hubei Province and county-level carbon emission research based on K-means clustering algorithm [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Social Science), 2023,17(2):134-140.
- [23] 李远玲,王金龙,杨伶.基于县域尺度的湖南省农业碳排放时空特征分析[J].中国农业资源与区划,2022,43(4):75-84.
- Li Yuanling, Wang Jinlong, Yang Ling. Study on temporal and apatial characteristics of agricultural carbon emissions in Hunan Province at county scale [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022,43(4):75-84.
- [24] 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 Bofu, Liang Han, Wan Wei, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(23):70-80.
- [25] 胡向东,王济民.中国畜禽温室气体排放量估算[J].农业工程学报,2010,26(10):247-252.
- Hu Xiangdong, Wang Jimin. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(10):247-252.
- [26] 贺亚亚,田云,张俊飏.湖北省农业碳排放时空比较及驱动因素分析[J].华中农业大学学报(社会科学版),2013(5):79-85.
- He Yaya, Tian Yun, Zhang Junbiao. Analysis on spatial-temporal difference and driving factors of agricultural carbon emissions in Hubei Province [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2013(5):79-85.
- [27] 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.
- Li Bo, Zhang Junbiao. Decoupling of China's agriculture carbon emissions and economic development based on the input perspective [J]. Economic Survey, 2012, 29(4):27-31.
- [28] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002,91(1/2/3):217-232.
- [29] 许萍萍,赵言文,陈颢明,等.江苏省农田生态系统碳源/汇、碳足迹动态变化[J].水土保持通报,2018,38(5):238-243.
- Xu Pingping, Zhao Yanwen, Chen Haoming, et al. Dynamic change of carbon source/sink and carbon footprint of farmland ecosystem in Jiangsu Province [J].

- Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 238-243.
- [30] 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 Guoyong, Liu Jindan, Yang Lisha. Dynamic evolution of China's agricultural carbon emission intensity and carbon offset potential [J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(10): 69-78.
- [31] 张赫, 黄雅哲, 王睿, 等. 中国县域碳排放脱钩关系及其时空特征演变[J]. 资源科学, 2022, 44(4): 744-755.
Zhang He, Huang Yazhe, Wang Rui, et al. Decoupling and spatiotemporal change of carbon emissions at the county level in China [J]. Resources Science, 2022, 44(4): 744-755.
- [32] 夏四友, 赵媛, 许昕, 等. 近 20 年来中国农业碳排放强度区域差异、时空格局及动态演化[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3): 596-608.
- Xia Siyou, Zhao Yuan, Xu Xin, et al. Regional inequality, spatial-temporal pattern and dynamic evolution of carbon emission intensity from agriculture in China in the period of 1997-2016 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(3): 596-608.
- [33] 林舒晗, 郑晶. 福建省农业生产碳排放的区域差异分析[J]. 长春理工大学学报(社会科学版), 2016, 29(6): 81-86.
Lin Shuhan, Zheng Jing. Analysis on regional differences of carbon emissions from agricultural production in Fujian Province [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Social Sciences Edition), 2016, 29(6): 81-86.
- [34] 王方怡, 洪志猛, 康智明, 等. 福建省农业碳排放时空变化及其驱动因素[J]. 福建农业学报, 2019, 34(1): 124-134.
Wang Fangyi, Hong Zhimeng, Kang Zhiming, et al. Spatial-temporal variations and driving forces of agricultural carbon emissions in Fujian [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2019, 34(1): 124-134.