



姚澜, 陈嘉涛, 徐霄, 张鑫, 张卫峰, 李扬阳. 农业系统碳排放构成及演变——以衢州市为例[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12):82-98.
YAO Lan, CHEN Jiatao, XU Xiao, ZHANG Xin, ZHANG Weifeng, LI Yangyang. Carbon emission composition and evolution of agricultural system: A case study of Quzhou City[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12):82-98.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.12.08

农业系统碳排放构成及演变 ——以衢州市为例

姚澜¹ 陈嘉涛¹ 徐霄² 张鑫² 张卫峰^{1,3} 李扬阳^{1,3*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;
2. 衢州市美丽乡村建设中心, 浙江 衢州 323000;
3. 农业农村部农业绿色低碳重点实验室, 北京 100193)

摘要 为探究农业系统中不同子系统碳排放时空变化,明确农业系统与各级子系统对环境碳排放的贡献度以及关键的排放源,制定适宜的温室气体靶向减排策略,本研究以浙江省衢州市农业综合系统为研究对象,分析了衢州市2004—2021年6个县市4个子系统(作物子系统、养殖子系统、初级食品生产子系统和土壤子系统)的碳排放与碳固存时空变化规律,构建了作物子系统、养殖子系统、初级食品生产子系统和土壤子系统数据库,并基于生命周期理论和IPCC温室气体核算方法,开发了一个农业系统碳管理模型。结果表明:各县市碳排放总体呈“增-减-增-减”趋势,2013年衢州市农业系统碳达峰,随后波动式下降,2021年农业系统总碳排放353.8万t,相比2013年减排185.7万t;作物子系统和初级食品生产子系统平均碳排放占比最高,分别为88.4%和10.7%。不同区域存在较大的空间差异,衢江区、江山市、龙游县地区(高贡献区)的碳排放贡献度高于柯城区、常山县、开化县(低贡献区)。“十二五”中期以后,作物子系统、初级食品生产子系统碳排放量按高、低贡献区逐渐走向收敛,而各县市养殖子系统整体收敛。目前,衢州市已经基本实现农业系统碳达峰,但单个子系统仍有较高的碳排放强度,尤其是作物子系统,且土壤子系统的固碳潜力未充分发挥。因此,在探索衢州市现有农业规模的条件下降低碳排放强度时,应重点考虑发挥土壤碳汇潜力的具体行动方案,以及如何进一步加强子系统的耦合协调度。

关键词 农业系统; 生命周期; 农业系统碳核算; 碳固定; 碳排放时空变化

中图分类号 F323.2 文章编号 1007-4333(2024)12-0082-17 文献标志码 A

Carbon emission composition and evolution of agricultural system: A case study of Quzhou City

YAO Lan¹, CHEN Jiatao¹, XU Xiao², ZHANG Xin², ZHANG Weifeng^{1,3}, LI Yangyang^{1,3*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
2. Quzhou Beautiful Village Construction Center, Quzhou 323000, China;
3. Key Laboratory of Low-carbon Green Agriculture of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

Abstract In order to explore the temporal and spatial changes of carbon emissions of different subsystems in the agricultural system, identify the contribution degree of agricultural system and subsystems at all levels to environmental carbon emissions and key emission sources, and formulate appropriate targeted

收稿日期: 2024-01-29

基金项目: 衢州市农业农村局委托项目(衢农合2022-31);现代农业产业技术体系共性关键技术联合攻关项目(CARS-53绿色低碳);农业农村部农业绿色低碳重点实验室科研能力提升项目(15053346)

第一作者: 姚澜(ORCID:0009-0004-5552-9291),博士研究生,E-mail:yaolan@cau.edu.cn

通讯作者: 李扬阳(ORCID:0009-0000-4388-0384),副教授,主要从事农业全产业链碳核算研究,E-mail:liyy@cau.edu.cn

greenhouse gas emission reduction strategies, this study took the agricultural integrated system of Quzhou City, Zhejiang Province as the research object. The spatial-temporal changes of carbon emission and carbon sequestration in 4 sub-systems (crop subsystem, aquaculture subsystem, primary food production subsystem and soil subsystem) of 6 counties and cities in Quzhou City from 2004 to 2021 were analyzed. The database of crop subsystem, aquaculture subsystem, primary food production subsystem and soil subsystem was constructed. Based on the life cycle theory and the IPCC greenhouse gas calculation method, a carbon management model for agricultural systems was developed. The results showed that: The carbon emissions of all counties and cities showed an overall trend of “increase-decrease-increase-decrease”. The carbon emissions of the agricultural system in Quzhou City peaked in 2013 and then decreased in a fluctuating manner. The total carbon emissions of the agricultural system in 2021 were 3.538 million tons, which was 1.857 million tons lower than that in 2013. The crop subsystems and primary food production subsystems accounted for the highest average carbon emissions, which were 88.4% and 10.7%, respectively. The carbon emission contribution of Qujiang District, Jiangshan City and Longyou County (high contribution area) is higher than that of Kecheng District, Changshan County and Kaihua County (low contribution area). After the middle of the “Twelfth Five-Year Plan”, the carbon emissions of the crop subsystem and the primary food production subsystem gradually converged according to the high and low contribution areas, while the county and city aquaculture subsystem converged as a whole. At present, Quzhou has basically achieved the peak of agricultural system carbon, but the individual subsystems still have high carbon emission intensity, especially the crop subsystem, and the carbon sequestration potential of the soil subsystem has not been fully utilized. Therefore, when exploring the reduction of carbon emission intensity under the conditions of the existing agricultural scale in Quzhou City, we should focus on the specific action plan to play the potential of soil carbon sink, and how to further strengthen the coupling coordination degree of subsystems.

Keywords agricultural system; LCA; agricultural system carbon accounting; carbon fixation; temporal and spatial changes of carbon emissions

农业既是重要的温室气体排放源,也具有碳汇的功能,是实现国家“双碳”战略的重要领域。2014年中国温室气体排放总量为111.9亿t(除特殊标注外,本研究中的温室气体排放量均以CO₂当量计)^[1]。其中,非CO₂温室气体排放占全国温室气体排放总量的18.4%;农田非CO₂温室气体(主要指CH₄和N₂O)排放为4.8亿t,占全国农业活动非CO₂排放总量(8.3亿t)的57.8%,占全球农田非CO₂温室气体排放总量的26.8%^[2]。于此同时,随着人类饮食结构向动物密集型食品的转变,反刍动物和单胃动物的养殖规模逐渐增加^[3-4],不合理的养殖类型配比与作物系统-养殖系统的脱钩加剧了畜牧业的碳排放。据估计,2050年全球农作物和畜禽养殖产生的温室气体排放预计增加30%~40%,相当于每年温室气体排放量增加8~9亿t^[5]。土壤碳固定占自然气候解决方案总潜力的25%,畜禽粪肥施用是增强土壤碳固定的主要方式之一。但种植业和畜牧业相结合的家庭比例从1986年的71%急剧下降到2017年的12%,2个系统的脱钩降低了粪便回田

率^[6-7],严重阻碍了土壤系统对碳的捕获和储存功能。种植系统和养殖系统温室气体排放的增加与低耦联状态对全球实现“碳中和”的承诺提出了巨大挑战,耦合种养系统是制定农业系统减排目标的优先事项。

温室气体在区域农业活动中的每个阶段(从摇篮到工厂大门)都会被释放,如农业投入品生产与运输、作物生产与废弃物处理、畜禽养殖、畜禽粪污处置和食品原料生产等过程^[8]。在食品原料生产的全链条中,温室气体排放主要有3个来源:原料运输、生产过程以及废弃物管理的排放^[9]。生产过程中排放的碳被人们广泛关注,而食品供应链前端的投入品生产与运输和废弃物再利用产生的碳固定能力通常被忽视或割裂看待。Tubiello等^[10]研究发现,作物系统中超过三分之一的碳排放来自供应链生产前与生产后,是CH₄的主要排放源。此外,种植、畜禽养殖和废弃资源处理等方面的区域差异影响着农业不同生产阶段的碳源和排放因子组成,以及生产中由资源配置不合理而产生的冗余碳排放。

最近的研究在农业系统温室气体排放方面取得了重大进展。在模型方法方面,Liu等^[11]开发了一种基于多区域投入产出的混合生命周期评价(MIRO-based hybrid LCA)模型,重点解析食品系统供应链的碳排放,以及区域贸易间的联系;Xing等^[12]构建了作物-畜牧-生物能源一体化系统来分析综合系统对减轻不同子系统环境负担的压力。在系统研究方面,一是基于大尺度下的单个系统(例如动物系统)分析单个食物(例如猪)供应链的特有环境影响^[13],二是基于大区域的不同农业生产阶段(例如作物、动物)全面评估多系统的环境负担^[12]。尽管这些结果为明确农业系统不同生产阶段主要碳来源和促进低碳排放提供了宝贵的理论指导,但这些研究进展主要基于“自上而下”的大尺度、大区域的顶层角度进行的碳排放趋势分析与再设计,而小区域的农业活动与废弃物管理的基层做法决定了上一级或国家尺度的温室气体碳排放的数量与强度。然而,目前对小区域农业生产发展在空间和时间上的碳排放量与强度差异了解有限,对降低小区域不同系统碳排放贡献和多系统强耦合的解决方案理论支撑不足。

浙江省衢州市是农业现代化转型的快速发展区,人口从2004年的245.6万增加到2021年的255.9万,增长了4.2%^[14]。过去二十年中,国家出台一系列农业环保政策,其中2016年发布的《全国生猪生产发展规划(2016—2020年)》^[15]提出了“南猪北养”的区域布局,浙江省(大区域)作为养殖约束区,给衢州市(小区域)农业系统碳减排带来了严峻挑战。本研究调研了衢州市2004—2021年6个县市作物子系统、养殖子系统、初级食品生产子系统和土壤子系统的碳排放与碳固存时空变化规律,构建了作物子系统、养殖子系统、初级食品生产子系统和土壤子系统数据库,在此基础上基于生命周期理论和联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)温室气体计算方法,开发了一个农业系统碳管理模型(Agricultural carbon management model, ACM)。该模型开发的重点是以土壤系统为碳汇,引入食物贸易流动概念中的潜在生产转移^[16-18],并考虑小区域承担的粮食生产任务^[19],将由作物子系统和养殖子系统生产的初级食品(植物性食品、动物源食品)产生的碳排放纳入源产区中,以完整考虑源产区的碳排放贡献力。本研究重点探讨衢州

市不同农业子系统、不同排放来源和环节的碳排放性质与幅度,指出当前减排工作所面临的问题,并提出可能行之有效的技术和政策建议,以期对浙江省和全国减排固碳提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

衢州市位于浙江省西部,钱塘江源头,辖6个县市,地理坐标118°01′~119°20′E,28°15′~29°30′N。2021年,全市平均气温19.3℃,年降水总量1881.0mm,年日照时数1632.8h,水热资源丰富。现有农业人口160.50万人,农林牧渔业总产值指数91.7%。全市耕地面积105012.0hm²,以水田为主,其中江山市、衢江区和龙游县占全市耕地面积的66.9%。粮食总产量55.4万t,畜禽总产量(猪、牛、羊肉)11.2万t^[14]。总体而言,衢州市自然条件优越,农产品资源丰富,是浙江省重要的商品粮基地和畜禽食品生产基地。

1.2 系统边界及核算模型

1.2.1 碳排放核算体系边界

本研究农业碳排放核算体系边界从“源头”到“坟墓”,即从农业系统生产前端(上游投入品的生产与运输)、生产中上端(作物生产与资源循环利用)、生产中下端(畜禽生产与资源循环利用)到生产初级产品(植物性食品、动物源食品)。涵盖农业系统4个子系统:土壤系统(Soil)、作物系统(Crop)、养殖系统(Animal)和初级食品生产系统(Primary food production)(图1)。值得注意的是,本研究将土壤系统视为碳汇,仅考虑秸秆和有机肥以CO₂形式固定在土壤中的碳量。同时,本研究纳入区域尺度内生产的初级食品自身直接碳排放(生产的不同类型食品被消耗后直接产生的碳排放),以核算源产区初级食品生产子系统被动产生的碳排放压力,即区域尺度内初级食品生产系统的碳排放受作物系统和养殖系统生产产品的产量地调节与控制。此外,人类位于食物链的顶端,是农业系统生产的植物性产品和动物源产品的最终消费者,其碳排在环境系统中的作用不容忽视,将其纳入生态系统碳排放的考量,有利于系统地实现联合国可持续发展目标(SDGs),但由于当前数据可获性问题,此文章中暂未考虑消费产品进入人体的碳排放情况。

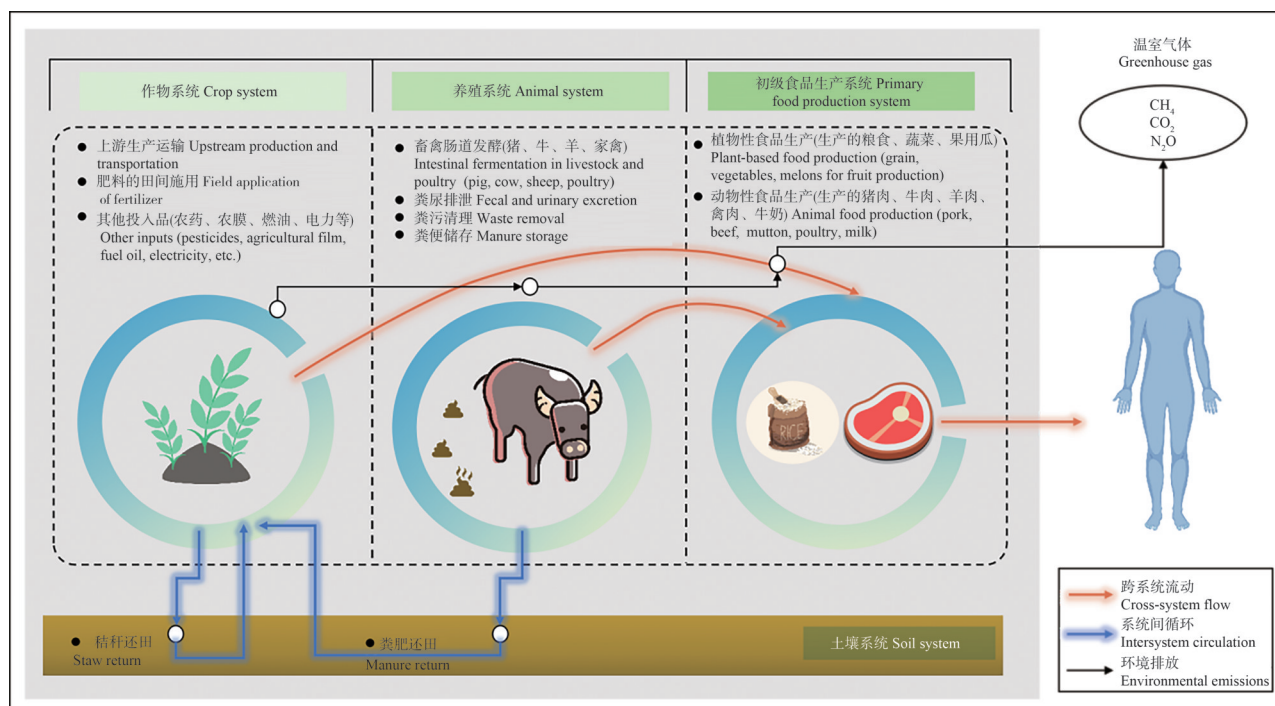


图 1 农业系统碳排放边界

Fig. 1 Carbon emissions boundary of agricultural system

1.2.2 碳核算模型

本研究构建了农业系统碳管理模型,该模型核算的碳排放气体主要包括 CH_4 、 N_2O 、 CO_2 (非生物源)。本研究不同系统中的 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 排放参数来源于国内外公开发表的文献,最终确定作物系统、养殖系统、初级食品生产系统和土壤系统4个方面的碳排放系数。不同农业子系统详细碳来源与排放系数见表1。

1) 作物系统碳排放:生产前端主要核算氮肥、磷肥、钾肥、有机肥、农药、农膜、燃油和电力等投入品在生产与运输中产生的 CO_2 排放,即年度内实际用于农业的投入品数量;生产中上端主要核算种植过程中由施用化肥和有机肥产生的 N_2O 排放,以及施用有机肥和水稻种植产生的 CH_4 排放。作物系统碳排放核算不包含生产的初级农产品,即不包括粮食作物、蔬菜和果用瓜籽粒消耗产生的碳排放。

$$\text{CE}_{\text{Crop}} = C_{\text{CO}_2} + C_{\text{N}_2\text{O}} \times 273 + C_{\text{CH}_4} \times 27 \quad (1)$$

$$C_{\text{CO}_2} = I_{\text{FerN}} \times \text{EF}_{\text{FerN}} + I_{\text{FerP}} \times \text{EF}_{\text{FerP}} + I_{\text{FerK}} \times \text{EF}_{\text{FerK}} + I_{\text{Manu}} \times \text{EF}_{\text{Manu}} + I_{\text{Pest}} \times \text{EF}_{\text{Pest}} + I_{\text{Film}} \times \text{EF}_{\text{Film}} + I_{\text{Oil}} \times \text{EF}_{\text{Oil}} + I_{\text{Elec}} \times \text{EF}_{\text{Elec}} \quad (2)$$

$$C_{\text{N}_2\text{O}} = I_{\text{FerN}} \times \text{EF}_{\text{FerN}, \text{N}_2\text{O}} + I_{\text{Manu}} \times \text{EF}_{\text{Manu}, \text{N}_2\text{O}} \quad (3)$$

$$C_{\text{CH}_4} = \text{EF}_{\text{Paddy}, \text{CH}_4} \times \text{Growth_Days} + \text{EF}_{\text{Manu}, \text{CH}_4} \times I_{\text{Manu}, \text{C}} \quad (4)$$

式中: CE_{Crop} 为作物生产系统碳排放, 万 t; C_{CO_2} 为投入品上游生产运输环节产生的碳排放量, 万 t; $C_{\text{N}_2\text{O}}$ 为由氮肥和有机肥的田间施用引起的 N_2O 排放, 万 t; C_{CH_4} 为稻田的甲烷排放, 万 t; I_{FerN} 、 I_{FerP} 、 I_{FerK} 、 I_{Manu} 、 I_{Pest} 、 I_{Film} 和 I_{Oil} 分别为上游生产的氮肥、磷肥、钾肥、有机肥、农药、农膜和燃油的投入量, kg; I_{Elec} 为生产中投入的电力, kWh; EF_{FerN} 、 EF_{FerP} 、 EF_{FerK} 、 EF_{Manu} 、 EF_{Pest} 、 EF_{Film} 和 EF_{Oil} 分别为上游相应投入品的碳排放系数, kg/kg; EF_{Elec} 为生产中投入电力的碳排放系数, kg/kWh; $\text{EF}_{\text{FerN}, \text{N}_2\text{O}}$ 为施用氮肥引起的 N_2O 排放系数, kg/kg; $\text{EF}_{\text{Manu}, \text{N}_2\text{O}}$ 、 $\text{EF}_{\text{Manu}, \text{CH}_4}$ 为施用有机肥引起的 N_2O 和 CH_4 排放系数, %; $\text{EF}_{\text{Paddy}, \text{CH}_4}$ 为水稻 CH_4 排放系数, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; Growth_Days 为水稻生育期, d; $I_{\text{Manu}, \text{C}}$ 为有机肥中总含碳量, kg。

2) 养殖系统碳排放:生产中下端主要核算生物源排放途径中的畜禽肠道发酵、粪尿排泄、粪污清理、粪便储存中产生的 CH_4 ; 以及由粪肥中氮的硝化与反硝化作用产生的直接 N_2O , 和由氮挥发、径流或淋洗产生的间接 N_2O 等; 非生物源排放途径主要来自畜禽养殖机械活动产生的 CO_2 。养殖系统核算的动物主要包括猪、牛、羊和家禽, 水产品暂不列入畜禽养殖系统碳排放的核算。

表1 不同农业子系统碳来源与排放系数

Table 1 Carbon sources and emission coefficients of different agricultural subsystems

子系统 Subsystem	环节 Process	排放因子 Emission factor	排放源 Emission source	排放系数 Emission coefficient	参考文献 Reference
作物系统 Crop system	生产前端	CO ₂	氮肥	8.30 kg/kg	[20]
			磷肥	0.79 kg/kg	
			钾肥	0.55 kg/kg	[21]
			有机肥	0.223 kg/kg	[22]
			农药	20.0 kg/kg	[20]
			农膜	19.0 kg/kg	[21]
			燃油	3.75 kg/kg	
			电力	1.16 kg/kWh	
	生产中上端	N ₂ O	氮肥	0.010 9 kg/kg	
			有机肥	0.63%	
		CH ₄	稻田	0.44 g/(m ² ·d)	
			有机肥	0.2%	
养殖系统 Animal system	生产中下端	CH ₄	肠道发酵	猪:1.5 kg/(头·年) 牛:66 kg/(头·年) 羊:10 kg/(头·年) 家禽:忽略不计	[26]
				猪:1.75 g/kg 牛:0.7 g/kg 羊:0.83 g/kg 家禽:0.6 g/kg	
				猪:71.9 g/kg 牛:32.2 g/kg 羊:25.3 g/kg 家禽:2.4 g/kg	
				猪:7.8 g/kg 牛:3.5 g/kg 羊:3.5 g/kg 家禽:2.4 g/kg	
			粪尿排泄		
			粪污清理		
			粪便储存		
			直接排放 氨挥发间接排放 径流、淋洗间接排放	0.02 kg/kg 0.010 kg/kg 0.011 kg/kg	
		CO ₂	养殖机械	0.18 kg/kW	[27]
初级食品生产系统 Primary food production system	初级产品直接排放	CO ₂	食品直接排放	植物性食品 粮食:0.326 8 kg/kg 蔬菜:0.027 4 kg/kg 瓜果:0.049 8 kg/kg 动物性食品 猪肉:1.189 2 kg/kg 牛羊肉:1.365 7 kg/kg 禽肉:1.006 2 kg/kg 禽蛋:0.902 6 kg/kg 牛奶:0.425 6 kg/kg	[28]
土壤系统 Soil system	碳汇		秸秆(y, kg/hm ² ; x, t/hm ²)	y = 29.025x + 272.33	[20]
			有机肥	12.1%	

$$CE_{\text{Animal}} = C_{\text{CH}_4} \times 27 + (C_{\text{Direct_N}_2\text{O}} + C_{\text{Indirect_N}_2\text{O}}) \times 273 + C_{\text{Machinery_CO}_2} \quad (5)$$

式中： CE_{Animal} 为养殖系统碳排放总量，万 t； C_{CH_4} 为养殖过程中产生的 CH_4 总排放，万 t； $C_{\text{Direct_N}_2\text{O}}$ 为直接 N_2O 排放量，万 t； $C_{\text{Indirect_N}_2\text{O}}$ 为间接 N_2O 排放量，万 t； $C_{\text{Machinery_CO}_2}$ 为非生物源产生的 CO_2 排放量，万 t。

$$C_{\text{CH}_4} = C_{\text{Intestinal_CH}_4} + C_{\text{Manu_CH}_4} \quad (6)$$

$$N_j = D_j \times N_{j-p} / 365 \quad (7)$$

$$C_{\text{Intestinal_CH}_4} = N_j \times EF_{\text{Intestinal_CH}_4} \quad (8)$$

$$C_{\text{Manu_CH}_4} = \sum_{i=1}^n (N_j \times VS \times AWMS_{ij} \times EF_{\text{CH}_4,ij}) / 1000 \quad (9)$$

式中： $C_{\text{Intestinal_CH}_4}$ 为肠道发酵 CH_4 排放，万 t； $C_{\text{Manu_CH}_4}$ 为排泄、清粪和储存环节中的 CH_4 总排放量，万 t； N_j 为第 j 类畜禽的年均养殖数量，头； D_j 为不同类别畜禽的存栏时间，d； N_{j-p} 为各类别畜禽年均种群数，头； $EF_{\text{Intestinal_CH}_4}$ 为畜禽肠道甲烷排放因子，kg/(头·年)； VS 为每头（只、羽）畜禽的年均挥发固体排泄物的量，kg/(头·年)； $AWMS_{ij}$ 为第 j 类畜禽在养殖过程中的第 i 个环节处理 VS 的比例，%； $EF_{\text{CH}_4,ij}$ 为第 j 类畜禽在养殖过程中的第 i 个环节的 CH_4 排放因子，g/kg。

$$C_{\text{Direct_N}_2\text{O}} = \sum_{i=1}^n (N_j \times Nex \times AWMS_{ij} \times EF_{\text{Direct_N}_2\text{O}}) \times 44/28 \quad (10)$$

式中： Nex 为每头（只、羽）畜禽的年均 N 排泄量，kg/(头·年)； $EF_{\text{Direct_N}_2\text{O}}$ 为粪便管理产生的直接 N_2O 排放因子，kg/kg。

$$C_{\text{Indirect_N}_2\text{O}} = [\sum_{i=1}^n (N_j \times Nex \times AWMS_{ij} \times \text{Frac}_{\text{GasMS}}) \times EF_{\text{GasMS_N}_2\text{O}} + \sum_{i=1}^n (N_j \times Nex \times AWMS_{ij} \times \text{Frac}_{\text{LeachMS}}) \times EF_{\text{LeachMS_N}_2\text{O}}] \times 44/28 \quad (11)$$

式中： $\text{Frac}_{\text{GasMS}}$ 为牲畜粪污挥发为 NH_3 和 NO_x 的比例，%； $EF_{\text{GasMS_N}_2\text{O}}$ 为大气中氮沉积在土壤和水面产生 N_2O 的排放因子，kg/kg； $\text{Frac}_{\text{LeachMS}}$ 为径流和淋溶引起的粪便氮损失比例，%； $EF_{\text{LeachMS_N}_2\text{O}}$ 为氮淋溶和径流 N_2O 排放因子，kg/kg。

$$C_{\text{Machinery_CO}_2} = \text{ACT}_{\text{Machine}} \times EF_{\text{Machine}} \quad (12)$$

式中： $\text{ACT}_{\text{Machine}}$ 为畜禽养殖机械总动力，kW； EF_{Machine} 为机械碳排放系数，kg/kW。

3) 初级食品生产系统碳排放：初级食品生产系统的碳排放核算主要包括种植业农产品产量（粮食作物、蔬菜、瓜果）和畜禽产品产量（总牛羊肉类、蛋、奶），初级食品在贮藏、加工、运输中产生的碳排

放暂未列入核算体系。

$$CE_{\text{Food}} = C_{\text{Direct}} = \sum_{i=1}^n I_{\text{Food}} \times EF_{\text{Food_direct}} \quad (13)$$

式中： CE_{Food} 为初级食品生产系统碳排放量，万 t； C_{Direct} 为食品的直接碳排放量，万 t； I_{Food} 为不同食品产量，kg； $EF_{\text{Food_direct}}$ 为不同食品的综合碳折算系数，kg/kg。

4) 土壤系统碳固定：土壤固碳包括粪尿有机碳还田、农场内作物秸秆还田固定的碳。

$$\text{SOC}_{\text{SR}} = (I_{\text{Straw}} \times 29.025/1000 + 272.33 + I_{\text{Manu_C}} \times \text{SF}_{\text{Manu}}) \times 44/12 \quad (14)$$

式中： SOC_{SR} 为作物生产系统碳固定量，万 t； I_{Straw} 为秸秆还田量，kg； SF_{Manu} 为有机肥的碳固定比例，%。

5) 农业系统总碳排放。

$$CE_{\text{Total}} = CE_{\text{Crop}} + CE_{\text{Animal}} + CE_{\text{Food}} - \text{SOC}_{\text{SR}} \quad (15)$$

式中： CE_{Total} 为区域初级农产品生产全链条排放到环境中的总碳量，万 t。

1.3 数据来源

本研究数据来自 2005—2022 年的《衢州统计年鉴》^[14]。其中，作物系统核算数据包括播种面积、农业机械总动力、化肥施用量、农用塑料薄膜使用量、柴油、农药和电力等；养殖系统核算数据包括猪、牛、羊和家禽的年末出栏量和年内存栏量，以及畜禽养殖机械动力等；初级食品生产系统核算包括种植业农产品产量（粮食作物、蔬菜、瓜果等）、畜禽产品产量（总牛羊肉类、蛋、奶等）。作物系统主要碳输入数据（投入品生产与运输、氮肥或有机肥田间 N_2O 排放系数、水稻或有机肥 CH_4 排放系数、有机肥含碳量等）来自文献[21~26]；养殖系统、初级食品生产系统主要碳输入数据（畜禽肠道甲烷排放因子、年均固体排泄物、粪污 CH_4 或 N_2O 排放因子、不同食品直接碳排放系数等）来自文献[21, 26~28]。

2 结果与分析

2.1 作物系统碳排放时空变化

衢州市近 20 年三大粮食作物种植面积与产量变化情况见图 2。2004—2021 年所有粮食作物种植面积均有较大幅度降低（图 2(a)）。水稻种植面积占衢州市粮食作物总面积比例最高（平均约为 89.0%），玉米、小麦种植面积分别为 4 068~8 907 hm^2 、210~2 300 hm^2 ，平均占粮食作物总面积的 7.2% 和 1.3%。其中，2018 年玉米种植面积较 2017 年下降 47.2%。在产量方面，2021 年水稻、小

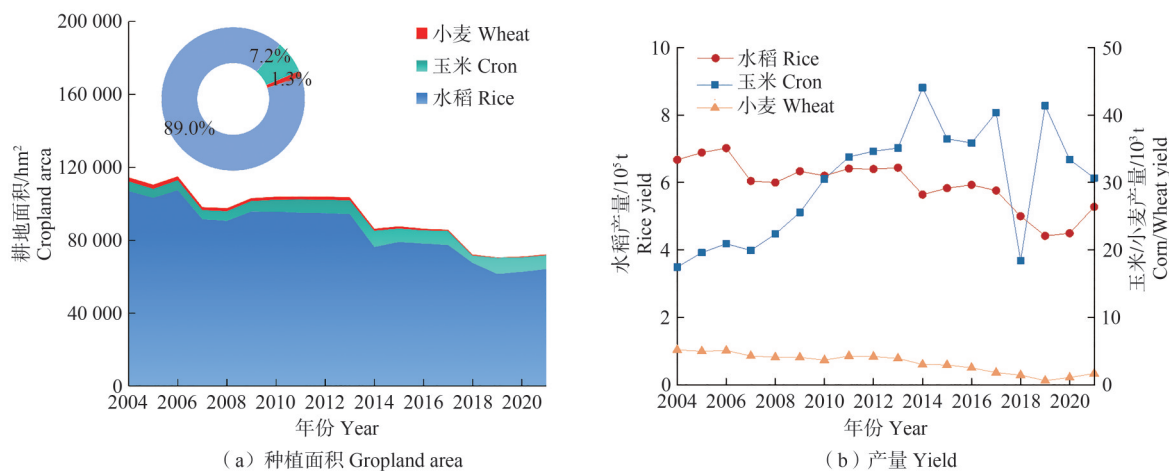


图2 2004—2021年衢州市三大粮食作物种植面积与产量

Fig. 2 Planting area and output of three major grain crops in Quzhou City from 2004 to 2021

麦和玉米单产均有所提升,分别较2004年提升24.2%、31.1%和18.9%(图2(b))。2021年水稻和小麦的总产量较2004年分别下降了20.9%和67.6%,玉米产量上升76.6%。

衢州市作物系统碳排放变化及构成见图3。2004—2021年衢州市作物系统碳排放总量呈先上升后下降趋势(图3(a))。2021年种植业碳排放量为353.8万t,相比2004年减少了26.6%;碳排放量于2011年达峰值,为555.0万t。温室气体排放强度从2004年的 $152.3 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ 下降到2021年的 $120.7 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$,年均递减率为1.4%。这一结果表明衢州市近20年作物系统碳管理水平有较大提升。

通过不同县市种植业碳排放比较发现,2004年江山市的碳排放最高,达到120.3万t,柯城区的碳排放最低,这与江山市承担着衢州市种植业主要生产任务有关(图3(b))。与2021年相比,江山市碳排放量下降44.7%,柯城区碳排放量下降41.3%,6个县市种植业碳管理水平均有较大提升(图3(c))。总体来看,氮肥的生产运输和种植过程中产生的 N_2O 和 CH_4 的减少是衢州各县市碳排放量下降的主要原因。

2.2 养殖系统碳排放时空变化

养殖业规模与养殖结构见图4。2004—2021年衢州市畜禽年内总存栏量约 $1.6 \times 10^7 \sim 4.8 \times 10^7$ 头(只、羽),呈上升趋势,年末总出栏量缓慢上升后趋于平稳(图4(a))。从不同养殖结构来看,衢州市以养殖家禽和猪为主,平均占畜禽养殖总量的

87.7%、11.8%,其次为羊和牛(图4(b))。其中,猪的养殖量(出栏量)呈先上升后下降最后平稳发展的趋势,家禽养殖量呈先上升后下降再上升的趋势。受环境治理等因素影响,2014年衢州市家禽养殖量(出栏量)1140.3万羽,较2011年下降18.7%。牛、羊总体养殖规模相对较小,养殖量均呈“W”型波动变化。由于家禽养殖的周期相对较短,其养殖规模的改变相对较快,在“南猪北养”政策的推动下,浙江作为约束发展区,家禽对猪养殖产生了较强的替代效应;而牛、羊养殖易受市场环境和客观因素的影响,如市场价格,因此其养殖量波动较大。

衢州市养殖业碳排放呈先上升后下降趋势(图5)。其中, CH_4 是衢州养殖业碳排放的主要来源,占养殖业温室气体总排放的58.3%,2004—2021年由 CH_4 产生的碳排放累积量为372.9万t(图5(a)); CH_4 主要源于畜禽肠道和粪便清理环节,分别占 CH_4 总碳排放的47.7%和47.4%,其他环节仅占5.0%。 N_2O 直接排放占养殖业温室气体总排放量的34.7%, N_2O 间接排放仅占总排放的7.1%。

从近20年衢州各类畜禽养殖碳排放情况来看(图5(b)),猪养殖碳排放量明显高于牛、羊和家禽养殖产生的碳排放。十八大以来,衢州市按照发展高效生态农业的总体要求,不断优化养殖规模与区域养殖格局,以推进畜禽养殖业的转型升级。在2013—2021年取得了各养殖类型碳排放量达峰后持续降低的减排成果,猪养殖从43.4万t下降到8.3

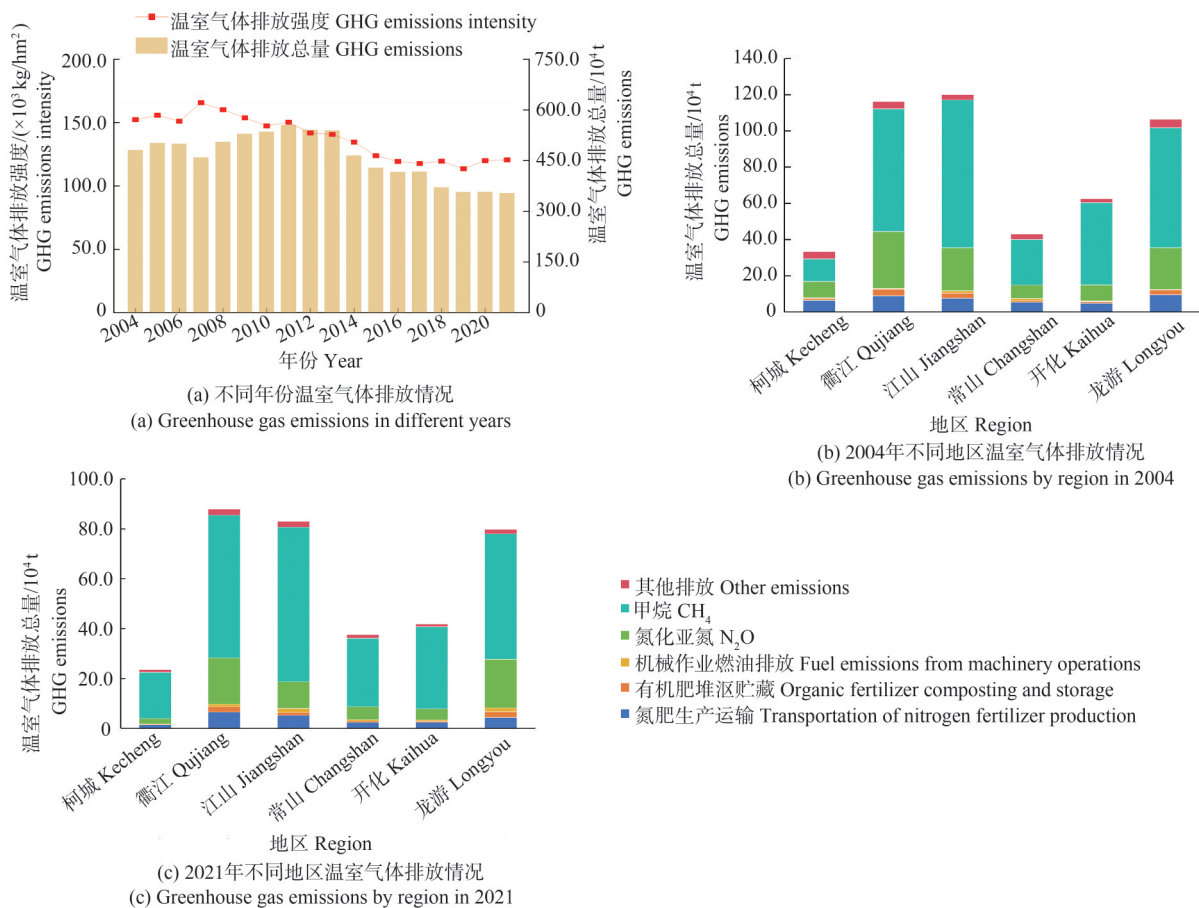


图 3 2004—2021 年衢州市作物系统碳排放变化及构成

Fig. 3 Changes and components of carbon emissions from crop system in Quzhou City from 2004 to 2021

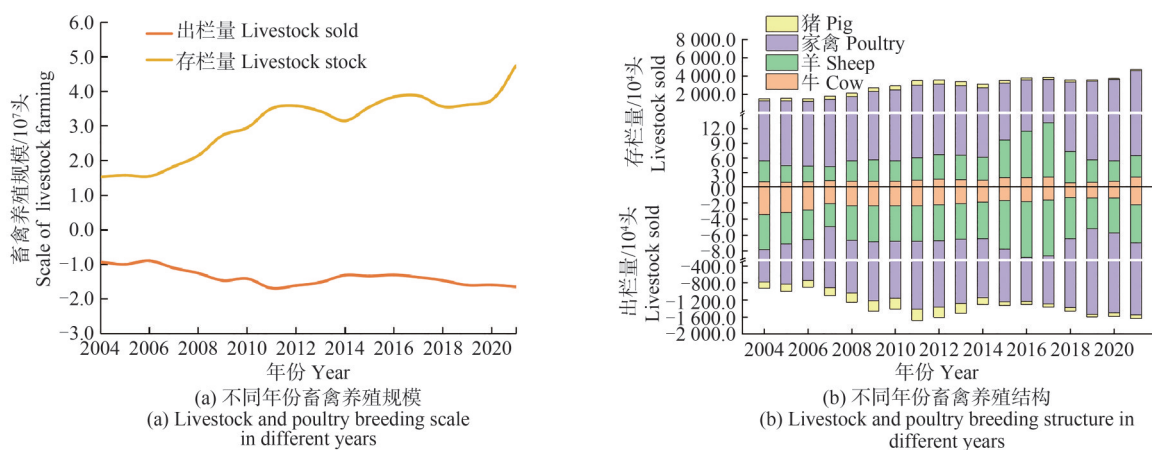


图 4 2004—2021 年衢州市养殖业规模及结构变化

Fig. 4 Changes of scale and structure of aquaculture industry in Quzhou City from 2004 to 2021

万 t,减排效果显著;牛、羊养殖碳排放无较大变化;家禽养殖排放从 3.2 万 t 上升到 3.8 万 t。由此可见,适当改变养殖结构(增加家禽养殖数量、减少猪养殖数量)对缓解猪养殖碳排放有一定替代效应。

通过分析不同碳排放来源的相对贡献发现(图 5(c)),粪便清理是第一大排放来源,占养殖业碳排放总量的 43.4%,平均每年碳排放量为 15.8 万 t;肠道发酵是碳排放的第二大来源,占碳排放总量的

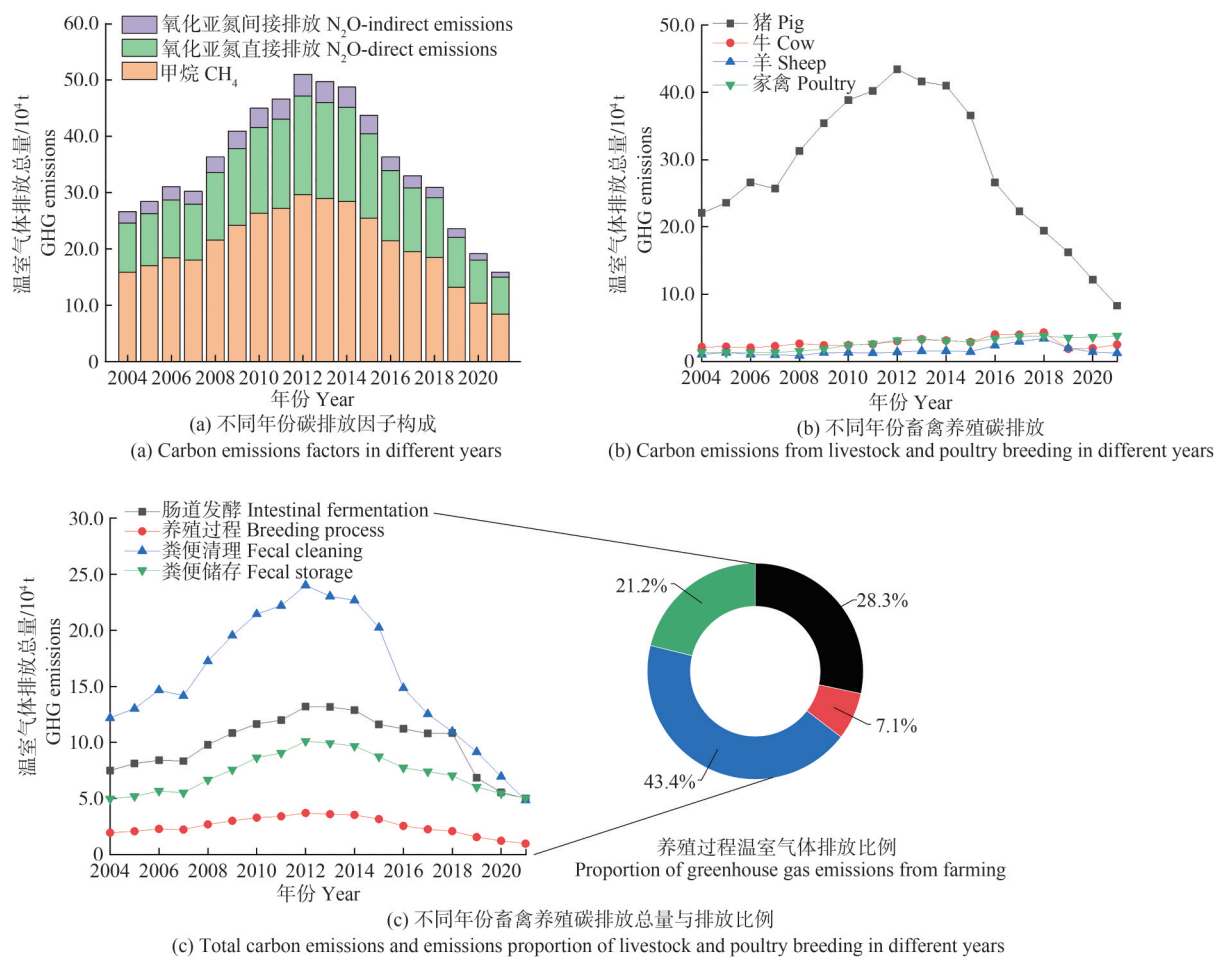


图5 2004—2021年衢州市养殖业碳排放时空变化

Fig. 5 Temporal and spatial changes of carbon emissions from aquaculture industry in Quzhou City from 2004 to 2021

28.3%；养殖过程中产生的碳排放最少（占7.1%）。由此可见，不同养殖环节碳排放减少是衢州市总碳排放量减少的主要原因，对粪便清理、肠道发酵和粪便储存过程的碳管理是畜禽养殖减碳的关键。

2.3 初级食品生产系统碳排放

衢州市作物系统-养殖系统生产的初级食品产量见图6。衢州市植物性食品产量明显高于动物源食品产量。植物性食品包括粮食类、蔬菜类和瓜果类等，历年总产量为144.8~198.9万t（图6(a)）；动物源食品包括猪肉、牛肉、羊肉、禽肉、禽蛋和牛奶等，总产量为19.3~32.9万t（图6(b)）。其中，粮食类占植物性食品总产量的比例逐渐降低，从2004年的51.3%降低到2021年的31.1%，年均递减率为2.1%；蔬菜类产量占比从44.7%增长到62.1%。动物性初级食品生产中，猪肉生产量呈先上升后下

降趋势，2021年产量10.8万t，占总生产量的44.4%；禽肉和禽蛋的产量占比逐渐增大，2021年占比分别为28.7%和21.5%。猪肉仍是衢州地区生产的第一大动物源食品。

2004—2021年衢州初级食品生产系统碳排放情况见图7。衢州市近20年由植物性食品生产和动物源食品生产产生的累积碳排放量达到479.8和519.2万t，动物源食品生产的碳排放平均比例较植物性食品生产高3.1%。从时间尺度来看，植物性食品生产产生的碳排放比例逐渐降低，占比从2004年的54.9%下降到2021年的46.0%，碳排放量以1.5%的速度逐年递减；动物源食品生产则以0.8%的速度递增，2021年的碳排放量达25.5万t。以2004年为碳排放基准，2005—2018年初级食品生产系统碳排放累积增加116.8万t，2019—2021年碳排放量开始降低，累积减排17.9万t。

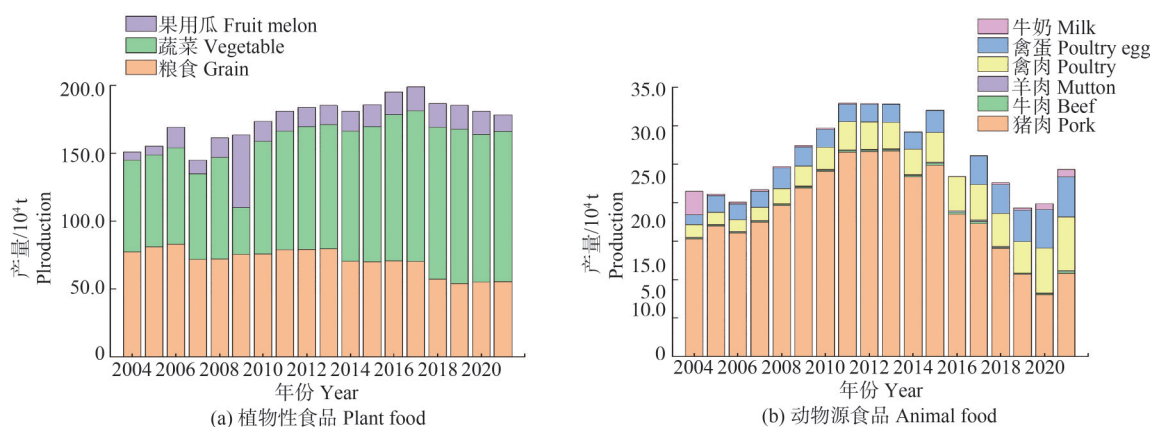


图 6 2004—2021 年衢州市初级食品生产产量

Fig. 6 Primary food production output in Quzhou City from 2004 to 2021

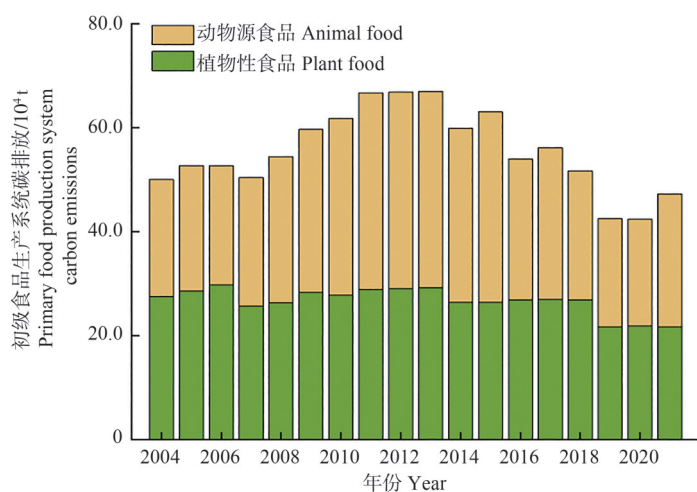


图 7 2004—2021 年衢州市初级食品生产系统碳排放

Fig. 7 Carbon emissions of primary food production system in Quzhou City from 2004 to 2021

2.4 农业系统碳排放量与总碳排放时空分布

2004—2021 年,农业系统碳排放总体呈先上升后下降趋势,碳排放总量是 634.2~391.8 万 t (图 8)。其中,作物系统碳排放是农业系统碳排放的主要来源,碳排放平均占比为 88.4%;初级食品生产系统碳排放量第二,历年累积碳排放 999.1 万 t,占系统总碳排放的 10.7%;养殖系统的碳排放量最小,累积排放量为 637.5 万 t,仅占系统总碳排放的 6.7%;土壤系统中通过秸秆和有机肥还田减少的碳排放累积 532.5 万 t,通过土壤固碳减少的碳排放比例为 5.7%。

从衢州市 2004—2021 年总体碳排放坡度图来看(图 9),各县市碳排放总体呈“增-减-增-减”趋势,2013 年各县市不同系统碳排放达到高峰期后波动式下降。同时,衢州市不同区域存在较大的空间差异,

衢江区、江山市和龙游县地区(高贡献区)的碳排放贡献度高于柯城区、常山县、开化县(低贡献区);自“十二五”中期以后,作物子系统、初级食品生产子系统碳排放量按高、低贡献区逐渐走向收敛(图 9(b)和(d)),而各县市养殖子系统整体收敛(图 9(c))。从不同子系统来看,仅柯城区和常山县土壤系统的固碳水平有所提升;养殖子系统龙游县,初级品生产子系统江山市、龙游县的碳排放量升高;作物子系统碳管理效果较好,各系统排放量均有不同程度降低。

本研究基于草谷比法估算了衢州市主要农作物(小麦、玉米、水稻)秸秆资源量,同时基于畜禽(羊粪、牛粪、猪粪)养分含量法估算主要畜禽粪尿资源量^[21](图 10)。作物系统产生的秸秆数量累积 1 193.3 万 t,平均 62.8 万 t/年,以水稻秸秆为主,其

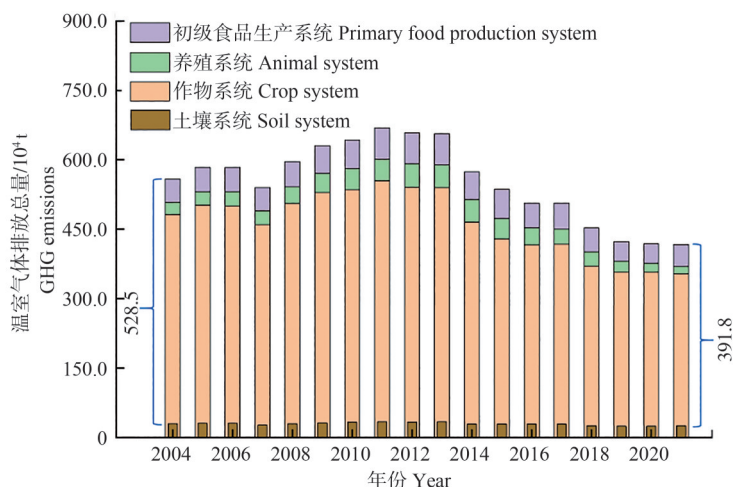


图8 2004—2021年衢州市农业系统碳排放总量及排放构成

Fig. 8 Total carbon emissions and emissions composition of agricultural system in Quzhou City from 2004 to 2021

年平均产量为 59.3 万 t, 玉米、小麦平均产量仅为 3.1 和 0.4 万 t。养殖系统产生的有机肥资源量为 239.4 万 t/年, 以猪粪资源为主, 资源量为 206.3 万 t/年, 羊粪、牛粪仅占有有机肥资源总量的 14.0%。

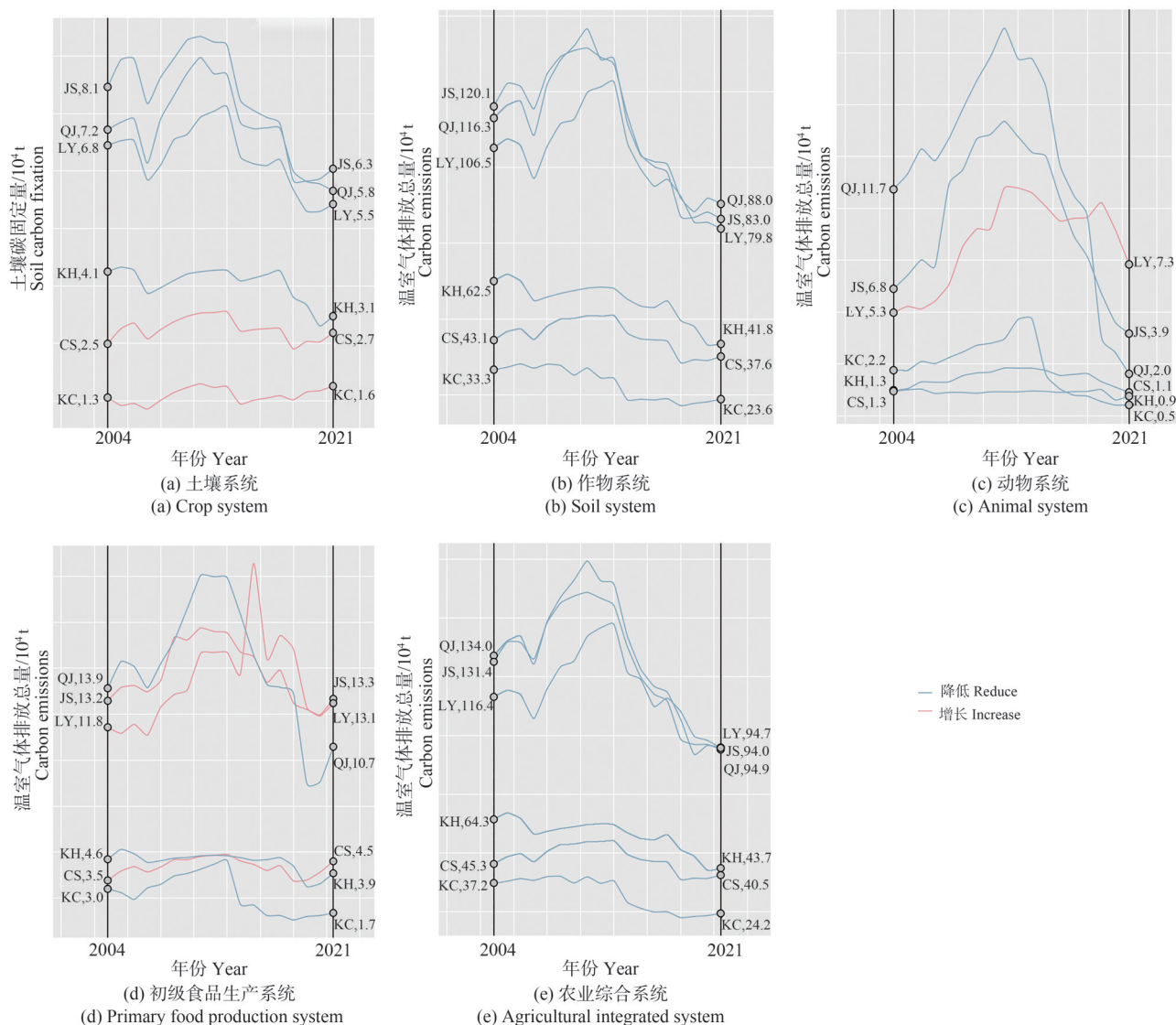
3 讨论

“双碳”战略对中国农业的可持续发展至关重要, 如期实现有利于中国农业的高质量发展, 但是如何保障粮食安全的同时产生最低环境代价至今仍是挑战^[29]。一方面, 各级农业部门对于农业系统如何为“2030年前碳达峰, 2060年实现碳中和”做出贡献的具体做法或行动方案尚未达成一致^[30-32]。另一方面, 农业系统中的各级子系统脱钩严重^[6], 绿色低碳循环发展的农业产业体系不成熟, 农业减排固碳的能力未被发挥到最大。

衢州市作为中国农业系统碳减排的市级执行区, 其农业系统的减排程度直接影响浙江省为全国农业碳减排作出的贡献。本研究建立农业系统碳管理(ACM)模型, 计算了衢州各县市的农业系统碳排放时空格局, 确定了作物子系统、养殖子系统、初级食品生产子系统的主要碳排放来源与对应排放因子。通过模型计算得出衢州市的碳排放主要来自作物系统和养殖系统。作物子系统中, 由三大粮食作物种植面积下降导致的作物系统产量水平下降, 最终导致了作物系统碳排放总量下降, 这一点可以从稻田 CH₄排放量的减少中得出; 氮肥生产运输中减少的碳排放也是衢州降碳的主要原因, 这与

马娜^[33]的研究结果一致。养殖子系统中, 随着中国人均家庭收入的普遍增加, 消费模式从植物性食品为主转向动物源食品为主^[34], 这直接刺激了畜禽养殖数量的增加。其中, 生猪类动物养殖周期较长, 养殖过程中消耗的食物和产生的废弃物较多, 有研究表明, 每生产 1 kg 猪肉需要消耗 3 kg 谷物^[35], 也就是猪肉生产会消费大量谷物, 这进一步增加了农业源温室气体排放。2016年颁布的“南猪北养”政策促进了养殖结构调整^[15]。衢州市以增加家禽养殖量替代一部分生猪养殖, 有效降低了本区域养殖系统生产的碳排放量, 这与李泽坤^[36]的研究一致。但由此产生的植物性食品与动物源食品的生产与消费分离(食品贸易碳转移程度)是否增加了衢州市农业系统整体碳排放负担还需进一步证明, 这是本模型中暂未纳入的。值得注意的是, 链接作物系统和养殖系统的土壤系统的作用尚未发挥到最大。

土壤碳固存是应对全球环境危机的核心。土壤有机碳(SOC)储量约占自然气候解决方案抵消全球人为温室气体排放潜力的 25%(总潜力为每年 2 380 亿 t)^[37-38]。农田碳管理实践措施是土壤碳固存的有效策略之一, 但不同施肥策略下的土壤碳动态变化差异较大, 主要受气候、土壤特性和肥料类型等多重因素的影响^[39]。在管理方式中, 我国秸秆还田和免耕技术的土壤碳固存潜力分别为每年 34.4×10^3 和 4.6×10^3 万 t^[40]; 在肥料类型中, 牛粪的碳固存率高于猪粪和马粪, 这与牛粪有较低的 C/N (14:1) 和含有相对稳定的有机化合物有关^[41]。此外, 粪肥碳固存效率(约占碳输入量的 9.6%)还随



KC, 柯城区; CS, 常山县; KH, 开化县; LY, 龙游县; QJ, 衢江区; JS, 江山市。图中数字分别为 2004 年和 2021 年衢州各县市碳排放量。

KC, Kecheng District; CS, Changshan County; KH, Kaihua County; LY, Longyou County; QJ, Qujiang District; JS, Jiangshan City. Figures in the figure are respectively carbon emissions of Quzhou counties and cities in 2004 and 2021.

图 9 2004—2021 年衢州市不同系统碳排放总量时空变化

Fig. 9 Temporal and spatial changes of total carbon emissions of different systems in Quzhou City from 2004 to 2021

时间、还田量和土壤碳含量的增加而降低^[41]。虽然政府已经非常重视土壤的固碳潜力,但对于土壤碳气候战略的实际实施落后于其潜力。从中国当前的实际情况看,农业技术仅实现了土壤固碳理论潜力的三分之一^[42],而施用化学氮肥几乎不具备有效的固碳潜力^[43],因此,秸秆还田和有机肥替代仍是增加土壤碳固定水平的关键措施^[44-45]。衢州市秸秆和畜禽粪便资源丰富,但由二者还田产生的总碳固定水平较低,平均每年约为 $8\,439\text{ kg/hm}^2$,总固碳量为 29.6 万 t。这在一定程度上阻碍了衢州土壤系统固

碳潜力的发挥。

在政策与农业碳排放关系方面,通过了解衢州市 20 年农业碳排放历史背景与现行趋势发现,衢州市农业系统碳排放治理取得了良好效果,自 2013 年达到峰值后波动性下降。从政策角度来看,这种成果可能得益于 2013 年以来衢州市政府对家庭农场模式的大力培育,截至 2016 年,注册登记家庭农场 5 057 个,粮食类家庭农场 652 个,蔬菜类家庭农场 568 个,其他水果类家庭农场 934 个^[46]。养殖业的结构调整也是碳减排的重要原因之一,例如,猪棚改

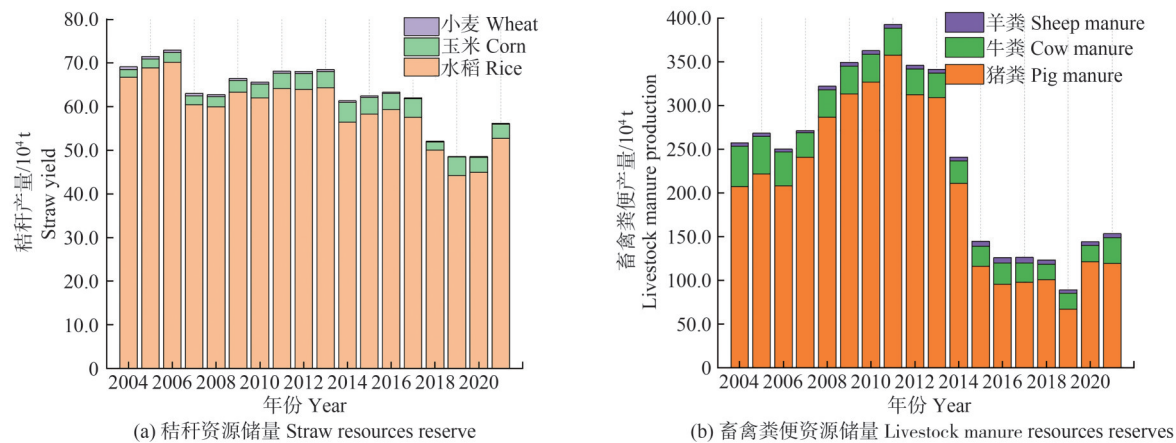


图 10 2004—2021 年衢州市作物系统-养殖系统主要废弃物产量

Fig. 10 Main waste output of Quzhou crop system-aquaculture system from 2004 to 2021

建菌棚种植金针菇或茶树菇等食用菌,在为种植户增收 10 万元的同时实现了碳减排^[47]。杭州 G20 峰会后对衢州市种植和养殖重心的调整可能也有一定影响^[48-49]。但这些政策与碳减排效果的关联性或关联程度有待证明。综合来说,在政策激励、市场

引导和监管约束等多向引导机制下,可通过促生种植系统、养殖系统、食品系统和土壤系统等子系统的生产管理技术创新、减排标准体系、监管与监控的内驱力和约束力来促进农业系统“碳中和”的实现(图 11)。

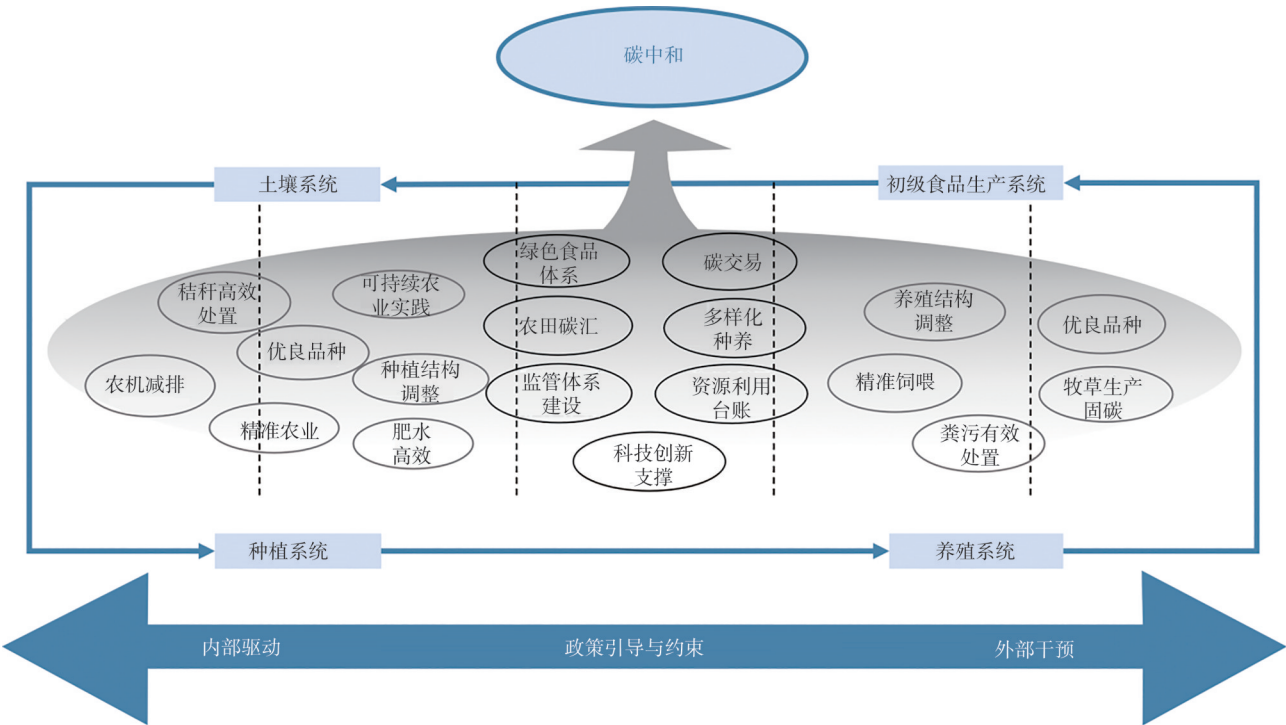


图 11 农业综合系统实现“碳中和”有效路径

Fig. 11 Effective path to achieve "carbon neutrality" in integrated agricultural systems

本研究展示了小区域农业系统碳排放的综合评估框架,用于估算食物“从摇篮到工厂大门”各个子系统的碳排放,并确定现有可用资源量。基于本

研究搭建的模型,2013 年衢州市农业系统碳达峰,随后波动式下降,2021 年农业系统总碳排放相比 2013 年减排 185.7 万 t;作物系统和初级食品生产系

统平均碳排放占比最高,分别为 88.4% 和 10.7%。不同区域存在较大的空间差异,衢江区、江山市、龙游县地区(高贡献区)的碳排放贡献度高于柯城区、常山县、开化县(低贡献区)。“十二五”中期以后,作物子系统、初级食品生产子系统碳排放量按高、低贡献区逐渐走向收敛,而各县市养殖子系统整体收敛。在探索衢州市现有农业规模的条件下降低碳排放强度时,应重点考虑发挥土壤碳汇潜力的具体行动方案,以及如何进一步加强子系统的耦合协调度。尽管关于碳排放的核算方法有很多^[50],但本研究基于食品贸易理论进一步加深了对源产区碳排放的理解,增加了初级食品生产系统碳排放的估计结果,以更好的为区域降碳提供支撑。本研究提出的方法可以在县域尺度进行广泛、深入的研究。

然而,ACM 模型对土壤系统碳汇的评估仍然存在不确定性,本研究的系统边界只考虑了秸秆还田和畜禽粪肥施用 2 种来源,由大气沉降、生物固定和灌溉水等来源引入土壤的碳量还不明确。本研究的数据时间段较长(2004—2021 年),且数据来源单一,缺少对农户实际生产数据的调研,农户间的管理差异也可能决定了对碳排放水平和土壤碳固存量的影响。此外,本研究对源产区农业系统全链条碳排放的考虑仍不够完善,尤其是初级食品生产系统碳排放,未考虑衢州市人口食物需求,以及食品省际贸易运输贡献的碳。未来 ACM 模型的小区域实践中需要更好考虑这几点,同时重视不同农业子系统的耦合协调度分析。

4 结 论

本研究系统分析了衢州市 2004—2021 年 6 个县市作物、养殖、初级食品生产和土壤系统的碳排放与碳固存时空变化规律,并基于生命周期理论和 IPCC 温室气体计算方法,开发了一个农业系统碳管理模型。通过模型计算,2004—2021 年衢州市农业系统碳排放总体呈先上升后下降趋势,作物系统碳排放是农业系统碳排放的主要来源(88.4%),养殖系统的碳排放量最小。通过土壤固碳可减少 5.7% 碳排放。种植业碳排放量于 2011 年达峰值(555.0 万 t),单位面积碳排放量年均递减率为 1.4%。养殖业碳排放量于 2012 年达峰值(51.0 万 t),CH₄是衢州养殖业碳排放的主要来源,粪便清理占养殖业碳排放总量的 43.4%,是

养殖业碳排放第一大排放来源。衢州市植物性食品生产产生的碳排放量以 1.5% 的速度逐年递减,动物源食品生产则以 0.8% 的速度递增。以 2004 年为碳排放基准,2005—2018 年初级食品生产系统碳排放累积增加 116.8 万 t,2019—2021 年碳排放量开始降低,累积减排 17.9 万 t。不同区域存在较大的空间差异,衢江区、江山市、龙游县地区的碳排放贡献度高于柯城区、常山县、开化县。未来在探索衢州市现有农业规模的条件下降低碳排放强度时,应重点考虑子系统的耦合协调度提升和发挥土壤碳汇潜力。

参考文献 References

- [1] 生态环境部. 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告[EB/OL]. [2023-12-08]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtzk/201907/P020190701765971866571.pdf>
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Second Biennial Update Report on Climate Change of the People's Republic of China[EB/OL]. [2023-12-08]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtzk/201907/P020190701765971866571.pdf> (in Chinese)
- [2] 张广斌, 马静, 徐华, 颜晓元. 中国农田非 CO₂ 温室气体减排的研究现状与建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 504-517
Zhang G B, Ma J, Xu H, Yan X Y. Status Quo of research and suggestions on reduction of non-CO₂ greenhouse gas emission from Chinese farmland[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(3): 504-517 (in Chinese)
- [3] Bouwman L, Goldewijk K K, Van Der Hoek K W, Beusen A H W, Van Vuuren D P, Willems J, Rufino M C, Stehfest E. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(52): 20882-20887
- [4] Ren M, Huang C, Wu Y Z, Deppermann A, Frank S, Havlik P, Zhu Y Y, Fang C, Ma X T, Liu Y, Zhao H, Chang J F, Ma L, Bai Z H, Xu S S, Dai H C. Enhanced food system efficiency is the key to China's 2060 carbon neutrality target[J]. *Nature Food*, 2023, 4(7): 552-564
- [5] Xuan X, Zhang F, Deng X Z, Bai Y P. Measurement and spatio-temporal transfer of greenhouse gas emissions from agricultural sources in China: A food trade perspective [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 197: 107100
- [6] Jin S Q, Zhang B, Wu B, Han D M, Hu Y, Ren C C, Zhang C Z, Wei X, Wu Y, Mol A P J, Reis S, Gu B J, Chen J. Decoupling livestock and crop production at the household level in China [J]. *Nature Sustainability*, 2020, 4(1): 48-55
- [7] Li C, Wan D W, Xu X B, Li J, Gaffney P P J, Ma Y H, Zhang L X. Anti-substitution effect of coupling crop and livestock production on fertilizer use: Evidence from Chinese smallholder farms[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 412: 137359
- [8] Zhu J Y, Luo Z Y, Sun T T, Li W X, Zhou W, Wang X N, Fei X C, Tong H H, Yin K. Cradle-to-grave emissions from food loss and waste represent half of total greenhouse gas emissions from food systems[J].

- Nature Food*, 2023, 4(3): 247-256
- [9] Zuo C C, Wen C, Clarke G, Turner A, Ke X L, You L Z, Tang L P. Cropland displacement contributed 60% of the increase in carbon emissions of grain transport in China over 1990-2015[J]. *Nature Food*, 2023, 4(3): 223-235
- [10] Tubiello F N, Karl K, Flammini A, Gütschow J, Obli-Laryea G, Conchedda G, Pan X Y, Qi S Y, Halldórudóttir Heiðarsdóttir H, Wanner N, Quadrelli R, Rocha Souza L, Benoit P, Hayek M, Sandalow D, Mencos Contreras E, Rosenzweig C, Rosero Moncayo J, Conforti P, Torero M. Pre- and post-production processes increasingly dominate greenhouse gas emissions from agri-food systems [J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(4): 1795-1809
- [11] Liu G, Zhang F, Deng X Z. Half of the greenhouse gas emissions from China's food system occur during food production[J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4: 161
- [12] Xing J H, Song J N, Liu C S, Yang W, Duan H Y, Yabar H, Ren J Z. Integrated crop-livestock-bioenergy system brings co-benefits and trade-offs in mitigating the environmental impacts of Chinese agriculture [J]. *Nature Food*, 2022, 3(12): 1052-1064
- [13] Tong B X, Zhang L, Hou Y, Oenema O, Long W T, Velthof G, Ma W Q, Zhang F S. Lower pork consumption and technological change in feed production can reduce the pork supply chain environmental footprint in China[J]. *Nature Food*, 2023, 4: 74-83
- [14] 衢州市统计局. 衢州统计年鉴(2005—2022)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005—2022
- Quzhou Bureau of Statistics. *Quzhou Statistical Yearbook(2005—2022)* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2005—2022 (in Chinese)
- [15] 农业农村部. 农业部关于印发《全国生猪生产发展规划(2016—2020年)》的通知[EB/OL]. [2023-12-08]. https://www.moa.gov.cn/nybgb/2016/diwuqi/201711/t20171127_5920859.htm
- Ministry of Agriculture and rural areas. Circular of the Ministry of Agriculture on the Publication of the National Plan for Pig Production and Development (2016-2020)[EB/OL]. [2023-12-08]. https://www.moa.gov.cn/nybgb/2016/diwuqi/201711/t20171127_5920859.htm (in Chinese)
- [16] Barbieri P, Mac D G K, Bernard R A, Nesme T. Food system resilience to phosphorus shortages on a telecoupled planet [J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5, 114-122
- [17] Xu Z C, Chen X Z, Liu J G, Zhang Y, Chau S, Bhattarai N, Wang Y, Li Y J, Connor T, Li Y K. Impacts of irrigated agriculture on food-energy-water-CO₂ nexus across metacoupled systems [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5837
- [18] Yao G L, Zhang X, Davidson E A, Taheripour F. The increasing global environmental consequences of a weakening US-China crop trade relationship[J]. *Nature Food*, 2021, 2(8): 578-586
- [19] Lu H W, Feng W, Yan P D, Kang J J, Jiang C F, Yu Q, Yao T C, Xue Y X, Liang D Z, Yan Y M. Enhanced mitigation in nutrient surplus driven by multilateral crop trade patterns [J]. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3: 291
- [20] 陈晓辉. 中国种植业结构演变及其资源环境代价研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018
- Chen X H. Studies on the evolution of crop structure and its resource and environmental costs in China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [21] 张丹. 中国粮食作物碳足迹及减排对策分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2017
- Zhang D. Carbon footprint of grain crops in China and countermeasures for emission reduction [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [22] 严圣吉, 邓艾兴, 尚子吟, 唐志伟, 陈长青, 张俊, 张卫建. 我国作物生产碳排放特征及助力碳中和的减排固碳途径[J]. 作物学报, 2022, 48(4): 930-941
- Yan S J, Deng A X, Shang Z Y, Tang Z W, Chen C Q, Zhang J, Zhang W J. Characteristics of carbon emission and approaches of carbon mitigation and sequestration for carbon neutrality in China's crop production [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(4): 930-941 (in Chinese)
- [23] 赵永存, 徐胜祥, 王美艳, 史学正. 中国农田土壤固碳潜力与速率: 认识、挑战与研究建议[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 191-197
- Zhao Y C, Xu S X, Wang M Y, Shi X Z. Carbon sequestration potential in Chinese cropland soils: Review, challenge, and research suggestions [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 191-197 (in Chinese)
- [24] 唐志伟, 张俊, 邓艾兴, 张卫建. 我国稻田甲烷排放的时空特征与减排途径[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 582-591
- Tang Z W, Zhang J, Deng A X, Zhang W J. Spatiotemporal characteristics and reduction approaches of methane emissions from rice fields in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(4): 582-591 (in Chinese)
- [25] 万合锋, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 邬玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚. 施用畜禽粪便堆肥品的蔬菜地 CH₄、N₂O 和 NH₃ 排放特征[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 892-900
- Wan H F, Zhao C Y, Zhong J, Ge Z, Wei Y S, Zheng J X, Wu Y L, Han S H, Zheng B F, Li H M. Emission of CH₄, N₂O and NH₃ from vegetable field applied with animal manure composts [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(3): 892-900 (in Chinese)
- [26] 马于清, 曹丁戈, 罗文海, 李国学, 张卫峰, 李扬阳. 基于生命周期理论的我国畜禽养殖业碳排放核算方法学[J/OL]. 中国环境科学, 1-14[2023-12-29]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20231127.019>
- Ma Y Q, Cao D G, Luo W H, Li G X, Zhang W F, Li Y Y. Based on the life cycle theory of our country livestock and poultry industry carbon emissions accounting methodology [J/OL]. *China Environmental Science*, 1-14[2023-12-29]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20231127.019> (in Chinese)
- [27] 郑博福, 梁涵, 万炜, 刘忠, 朱锦奇, 吴之见. 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, Liu Z, Zhu J Q, Wu Z J. 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 (in Chinese)
- [28] 庞梦伊. 中国城乡居民食品消费碳排放时空演变特征及影响因素分析[D]. 长春: 吉林大学, 2023
- Pang M Y. Spatio-temporal evolution of carbon emissions from food consumption of urban and rural residents in China and its influencing factors [D]. Changchun: Jilin University, 2023 (in Chinese)
- [29] Wei W, Cui Q, Yu S. Dual carbon goals and the impact on future agricultural development in China: A general equilibrium analysis [J]. *China Agricultural Economic Review*, 2022, 14(4): 664-685
- [30] 于博, 刘雪晴, 赵晓杰, 孙华. “双碳”目标下农业“土-能-粮-废”关联作用与影响机制[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(11): 67-77
- Yu B, Liu X Q, Zhao X J, Sun H. Exploring the mechanisms of the land-energy-food-waste nexus in agriculture in the context of achieving the 'dual carbon' goals [J]. *China Population, Resources and Environment*,

- 2023, 33(11): 67-77 (in Chinese)
- [31] 葛继红, 孔阿敬, 王猛. “双碳”背景下中国农业碳排放分布动态及减排路径[J]. 新疆农垦经济, 2023(4): 44-52
- Ge J H, Kong A J, Wang M. The distribution and emission reduction paths of agricultural carbon emissions in China under the “double carbon” background [J]. *Xinjiang State Farms Economy*, 2023 (4): 44-52 (in Chinese)
- [32] 张俊彪, 何可. “双碳”目标下的农业低碳发展研究: 现状、误区与前瞻[J]. 农业经济问题, 2022, 43(9): 35-46
- Zhang J B, He K. Current situation, misunderstandings and prospects of agricultural low-carbon development under the targets of carbon peak and carbon neutrality [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2022, 43(9): 35-46 (in Chinese)
- [33] 马娜. 浙江省各地级市碳排放脱钩特征与低碳经济水平评价研究[D]. 杭州: 浙江财经大学, 2016
- Ma N. Study on the characteristics of carbon emission decoupling and the evaluation of low-carbon economy level of cities in Zhejiang Province [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Finance and Economics, 2016 (in Chinese)
- [34] Yu Z Y, Jiang S J, Cheshmehzangi A, Liu Y, Deng X Z. Agricultural restructuring for reducing carbon emissions from residents’ dietary consumption in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 387: 135948
- [35] Bai Z H, Lee M R F, Ma L, Ledgard S, Oenema O, Velthof G L, Ma W Q, Guo M C, Zhao Z Q, Wei S, Li S L, Liu X, Havlik P, Luo J F, Hu C S, Zhang F S. Global environmental costs of China’s thirst for milk [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(5): 2198-2211
- [36] 李泽坤. 浙江省碳排放时空格局与排放配额研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2020
- Li Z K. Study on spatio-temporal pattern and emission quota of carbon emissions in Zhejiang Province [D]. Ningbo: Ningbo University, 2020 (in Chinese)
- [37] Bossio D A, Cook-Patton S C, Ellis P W, Fargione J, Sanderman J, Smith P, Wood S, Zomer R J, von Unger M, Emmer I M, Griscorn B W. The role of soil carbon in natural climate solutions [J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(5): 391-398
- [38] Beillouin D, Demenois J, Cardinael R, Berre D, Corbeels M, Fallot A, Boyer A, Feder F. A global database of land management, land-use change and climate change effects on soil organic carbon [J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 228
- [39] Liu L, Zheng H F, Liu Z, Ma Y Z, Han H F, Ning T Y. Crop-Livestock integration via maize straw recycling increased carbon sequestration and crop production in China [J]. *Agricultural Systems*, 2023, 210: 103722
- [40] Lu F, Wang X K, Han B, Ouyang Z Y, Duan X N, Zheng H, Miao H. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China’s cropland [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(2): 281-305
- [41] Jiang G Y, Zhang W J, Xu M G, Kuzyakov Y, Zhang X B, Wang J Z, Di J Y, Murphy D V. Manure and mineral fertilizer effects on crop yield and soil carbon sequestration: A meta-analysis and modeling across China [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, 32(11): 1659-1672
- [42] 郑聚峰, 程琨, 潘根兴, Smith Pete, 李恋卿, 张旭辉, 郑金伟, 韩晓君, 杜彦玲. 关于中国土壤碳库及固碳潜力研究的若干问题[J]. 科学通报, 2011, 56(26): 2162-2173
- Zheng J F, Cheng K, Pan G X, Pete S, Li L Q, Zhang X H, Zheng J W, Han X J, Du Y L. Perspectives on studies on soil carbon stocks and the carbon sequestration potential of China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(26): 2162-2173 (in Chinese)
- [43] 遯非, 王效科, 韩冰, 欧阳志云, 段晓男, 郑华. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2239-2250
- Lu F, Wang X K, Han B, Ouyang Z Y, Duan X N, Zheng H. Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China’s cropland soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10): 2239-2250 (in Chinese)
- [44] 马子钰, 马文林. 秸秆还田对中国农田土壤固碳效应影响的研究[J]. 土壤, 2023, 55(1): 205-210
- Ma Z Y, Ma W L. Effects of straw returning on soil organic carbon in China’s cropland: A meta-analysis [J]. *Soils*, 2023, 55(1): 205-210 (in Chinese)
- [45] 夏龙龙, 颜晓元, 蔡祖聪. 我国农田土壤温室气体减排和有机碳固定的研究进展及展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 834-841
- Xia L L, Yan X Y, Cai Z C. Research progress and prospect of greenhouse gas mitigation and soil carbon sequestration in croplands of China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 834-841 (in Chinese)
- [46] 国家统计局衢州调查队. 打造衢州现代田园化农业生产新布局的研究与思考 [EB/OL]. [2023-12-08]. http://zjzd.stats.gov.cn/qz/dcfx/201611/t20161101_58963.shtml
- The National Bureau of Statistics of the People’s Republic of China Quzhou Investigation Team. Research and Thinking on Creating a New Distribution of Modern Rural Agricultural Production in Quzhou [EB/OL]. [2023-12-08]. http://zjzd.stats.gov.cn/qz/dcfx/201611/t20161101_58963.shtml (in Chinese)
- [47] 国家统计局衢州调查队. 改革开放四十年衢州市农民收入增长的历程与思考 [EB/OL]. [2023-12-08]. http://zjzd.stats.gov.cn/qz/dcfx/201811/t20181130_91077.shtml
- The National Bureau of Statistics of the People’s Republic of China Quzhou Investigation Team. The Course and Thinking of the Increase of Farmers’ Income in Quzhou in the Past 40 Years of Reform and Opening Up [EB/OL]. [2023-12-08]. http://zjzd.stats.gov.cn/qz/dcfx/201811/t20181130_91077.shtml (in Chinese)
- [48] 徐霄, 王宏航. 衢州市畜禽排泄物资源化利用现状及对策建议[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(7): 1260-1262
- Xu X, Wang H H. Present situation and countermeasures of resource utilization of livestock and poultry excreta in Quzhou City [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2017, 58(7): 1260-1262 (in Chinese)
- [49] 胡燕芳, 颜雯婷, 郑建军, 万渭清. 衢州市柯城区农作物秸秆综合利用现状及对策[J]. 现代农业科技, 2015(23): 201-202
- Hu Y F, Yan W T, Zheng J J, Wan W Q. Present situation and countermeasures of comprehensive utilization of crop straw in Kecheng District of Quzhou City [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(23): 201-202 (in Chinese)
- [50] 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(1): 157-166
- Ye B N, Meng H B, Feng J, Cong H B. Spatio-temporal distribution and prediction of agricultural carbon emissions in Hainan Province [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(1): 157-166 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介:姚澜,中国农业大学资源与环境学院植物营养学博士研究生。主要从事区域和田块尺度养分综合管理工作,从系统角度分析农业综合系统中的碳氮养分流动与资源高效利用,推动不同农业子系统(作物子系统-动物子系统-食品子系统-生态子系统)的耦合协调发展。博士期间获得2022—2023学年二等学业奖学金。



通讯作者简介:李扬阳,中国农业大学资源与环境学院副教授,博士生导师。主要从事城乡之间和种养加一体化之间各类生物质资源物能管理与循环利用、行业全产业链生命周期评价、碳核算和认证认可、技术经济与综合管理、环境评价和能值分析等内容,在基于“零”沼液的高湿物料厌氧-好氧耦合堆肥技术研究上有重要创新。目前,在环境工程领域top期刊发表SCI论文26篇,其中以第一/通讯作者发表SCI论文12篇(累计影响因子121.4);主持中国博士后科学基金特别资助(站前)项目1项、内蒙古自治区科技支撑计划项目1项;作为骨干,参与国家、省部级项目6项。