



史晓晴, 张鑫, 徐霄, 张卫峰, 王红亮. 生猪养殖场碳核算评估分级标识与碳抵消路径——以衢州市170家生猪养殖场为例[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12): 141-151.

SHI Xiaoqing, ZHANG Xin, XU Xiao, ZHANG Weifeng, WANG Hongliang. Pig farm carbon accounting assessment grading labeling and carbon offsetting pathway-taking 170 pig farms in Quzhou city as an example[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12): 141-151.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.12.12

生猪养殖场碳核算评估分级标识与碳抵消路径 ——以衢州市170家生猪养殖场为例

史晓晴¹ 张鑫² 徐霄² 张卫峰¹ 王红亮^{1*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院/国家农业绿色发展研究院, 北京 100193;

2. 衢州市美丽乡村建设中心, 浙江 衢州 324100)

摘要 为解决目前生猪养殖碳排放数据量化困难、缺乏减排方向的问题,本研究首先建立了生猪养殖场碳排放核算方法,然后对衢州市170家生猪养殖场进行了碳排放核算,并结合碳排放强度等指标对养殖场进行深绿、浅绿、黄、红四色分级,为当地农业政策的精准实施提供参考。结果表明:1)衢州市生猪养殖场净碳排放量为254 t,其中46%的碳排放量可以被沼气利用和施用有机肥固碳量所抵消。粪便管理和肠道发酵CH₄排放、购入电力产生的CO₂排放是主要碳排放源。2)所有养殖场的平均碳排放强度为0.51 t,其中深绿、浅绿、黄和红色标识养殖场分别为34、68、60和8家。深绿标识养殖场各环节碳排放量均低于其他标识养殖场。因此,贴标落后养殖场应重点关注粪尿管理和能源消耗过程,积极探索低碳粪污处理模式和清洁能源的开发,以推动衢州市生猪产业绿色低碳发展。

关键词 碳账户; 碳排放; 生猪; 生命周期评价

中图分类号 DF413.1

文章编号 1007-4333(2024)12-0141-11

文献标志码 A

Pig farm carbon accounting assessment grading labeling and carbon offsetting pathway: taking 170 pig farms in Quzhou city as an example

SHI Xiaoqing¹, ZHANG Xin², XU Xiao², ZHANG Weifeng¹, WANG Hongliang^{1*}

(1. School of Resources and Environment National Institute for Green Agricultural Development, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Quzhou Beautiful Countryside Construction Center, Quzhou 324100, China)

Abstract To address the current difficulties in quantifying carbon emission data from pig farming and the lack of direction for emission reduction, this study firstly established a carbon emission accounting method for pig farms, then carbon emissions accounting was conducted on 170 pig farms in Quzhou City, and combined with indicators such as carbon emission intensity, dark green, yellow, and red were classified to provide a reference for the accurate implementation of local agricultural policies. The results showed that: 1) The net carbon emission from pig farms in Quzhou City was 254 t, of which 46% could be offset by carbon sequestration from biogas utilization and application of organic fertilizer. CH₄ emissions from manure management and enteric fermentation, and CO₂ emissions from purchased electricity were the main

收稿日期: 2024-03-20

基金项目: 地市局(含县)项目(衢农合2022-31);地市局(含县)项目(衢农合2021-27)

第一作者: 史晓晴(ORCID:0009-0005-8441-5856),硕士研究生, E-mail: shixq1027@163.com

通讯作者: 王红亮(ORCID:0000-0001-7233-4737),副教授,主要从事农牧系统养分管理研究, E-mail: wang_hl@cau.edu.cn

sources of carbon emissions. 2)The average carbon intensity of all farms was 0.51 t, with 34, 68, 60 and 8 dark green, light green, yellow and red labeled farms, respectively. The carbon emissions of dark green labeled farms in all segments were lower than those of other labeled farms. Therefore, outdated labeling farms should focus on the process of feces and urine management and energy consumption, and actively explore low-carbon feces treatment modes and the development of clean energy in order to promote the green and low-carbon development of the pig industry in Quzhou City.

Keywords carbon account; carbon emission; pig; LCA

为满足人们日益增长的肉蛋奶需求,我国畜牧业的生产规模不断提高。中国畜牧兽医年鉴数据显示,从2009年到2022年,我国生猪年出栏量呈现增长趋势,2022年我国生猪年出栏量为69 994万头,为2009年的1.08倍^[1]。研究表明,生猪养殖碳排放占中国畜牧业碳排放总量的17%,是我国畜牧业温室气体排放的主要来源之一^[2]。目前许多学者在畜牧业温室气体排放量估算^[3-5]、时空特征^[6]和影响因素分析^[7]、减排技术研究^[8-9]、未来发展趋势^[10]等方面开展研究,且此类研究多以国家尺度和省域尺度为主^[10-12],对市级和县域

的研究较少,因此不能形成具有区域特色的减排技术指导或政策建议。对区域生产主体进行碳排放核算、监测等活动一方面可以帮助当地政府了解其排放水平,从而针对性的制定减排政策^[13],另一方面可以在政府的主导下驱使相关排放主体优化资源配置,提高生产效率,促使主体企业低碳转型,以便在未来碳市场和碳税制度下保持竞争优势^[14]。衢州市是浙江省的主要养殖区域之一,畜禽养殖量(折算成猪当量)位于浙江省排名第三^[15],但同时也贡献了较高的农业碳排放。通过建立生猪碳账户进行区域碳核算,有助于农业生产降本增

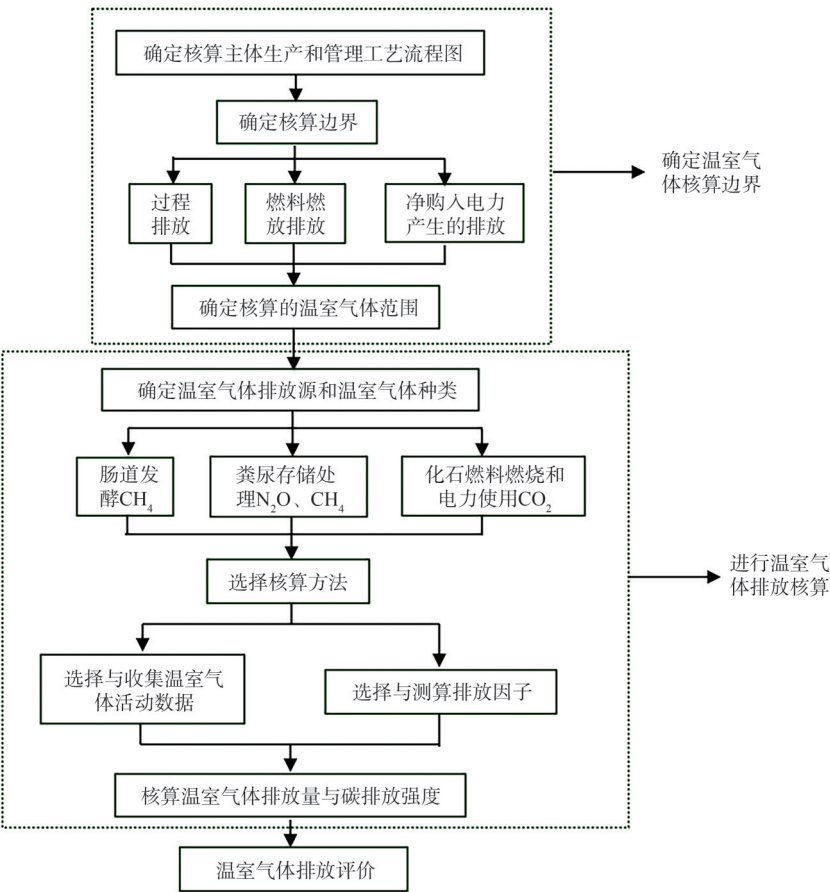


图1 生猪养殖场碳排放核算工作流程图

Fig. 1 Flowchart of carbon emission accounting for pig farms

效,助推农户增收和乡村振兴,实现可持续发展。因此,本研究基于衢州市 170 家生猪养殖场调研数据,利用生命周期评估方法建立衢州市生猪养殖场碳排放核算方法,并根据碳排放强度等指标对养殖场主体进行分级,为推动衢州市碳账户建设和农业低碳绿色发展提供技术支撑。

1 生猪碳排放核算方法学

1.1 核算流程

参考 IPCC 排放因子系数法^[16],通过生命周期评估(LCA)的方法,对衢州市生猪养殖场进行碳排放核算。生猪养殖场碳排放核算流程分为以下步骤:

(1)确定温室气体排放核算边界;

(2)温室气体排放核算;

(3)温室气体排放评价。

1.2 核算边界与范围

本研究碳排放核算方法包含生猪养殖环节、粪污储存环节、粪污处理环节和粪肥还田环节。系统边界如图 2 所示:生猪养殖环节包括生猪肠道发酵产生的 CH_4 、养殖场内风机、照明、供暖等设备运行消耗电、天然气和煤炭等能源产生的 CO_2 排放。粪污储存环节包括粪尿舍内和舍外储存过程产生的 CH_4 和 N_2O 的排放。粪污处理环节包括粪污进行固液分离、厌氧发酵和堆肥过程中产生的 CH_4 和 N_2O 的排放以及设备运行消耗电力等能源产生的 CO_2 排放,此外,还包括厌氧发酵中沼气利用减少的碳排放和粪肥农田施用所固定的碳。

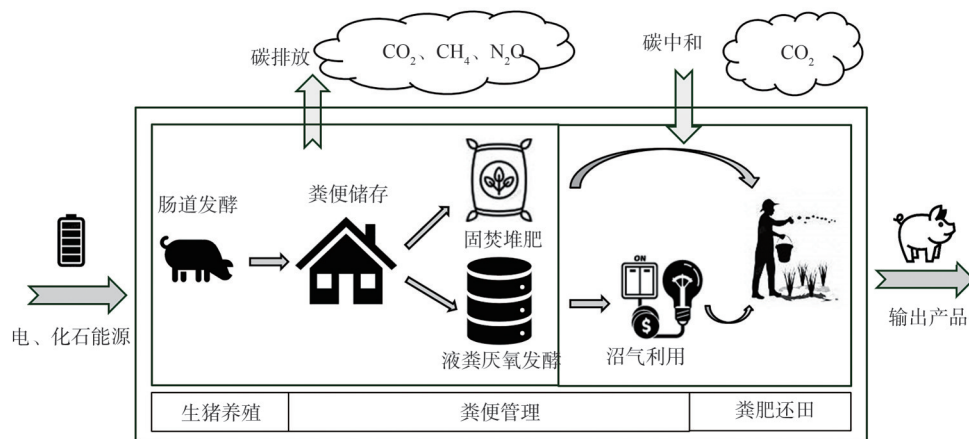


图 2 生猪养殖场碳排放核算系统边界

Fig. 2 Carbon emission accounting system boundary for pig farms

1.3 核算步骤与方法

1.3.1 过程排放

按照不同过程分别计算各过程产生的温室气体排放量,并以 t (除特殊标记外,全文中的温室气体配方量均以 CO_2 当量计)为单位进行加总。

$$E_{\text{过程}} = \sum_i E_{\text{过程}i} \quad (1)$$

式中: $E_{\text{过程}}$ 为过程温室气体排放量总和, t; $E_{\text{过程}i}$ 为第 i 个过程产生的温室气体排放, t。

生猪肠道发酵 CH_4 排放计算公式为:

$$E_{\text{E-CH}_4} = EF_{\text{E-CH}_4} \times AP \times 365 \times 10^{-3} \times GWP_{\text{CH}_4} \quad (2)$$

式中: $E_{\text{E-CH}_4}$ 为生猪肠道发酵甲烷排放量, t; $EF_{\text{E-CH}_4}$ 为生猪肠道发酵 CH_4 排放因子, $\text{kg}/(\text{头} \cdot \text{年})$, 仔猪、育肥猪、妊娠母猪、哺乳母猪肠道发酵 CH_4 排放因子

分别为 0.53、1.46、2.34 和 3.12 $\text{kg}/(\text{头} \cdot \text{年})$ ^[17]; AP 为年均生猪存栏数, 头, 取值来源于养殖场调研数据; GWP_{CH_4} 为 CH_4 的全球增温潜势值, 取 25。生猪粪便管理 CH_4 排放计算公式为:

$$E_{\text{M-CH}_4} = EF_{\text{M-CH}_4} \times AP \times 10^{-3} \times GWP_{\text{CH}_4} \quad (3)$$

$$EF_{\text{M-CH}_4,i} = (VS_i \times 365) \times [B_0 \times 0.67 \times \sum_j MCF_j \times MS_j] \quad (4)$$

$$VS_i = \left[GE \times \left(1 - \frac{DE\%}{100} \right) \times \left(\frac{UE}{GE} \right) \right] \times \left[\left(\frac{1 - ASH}{18.45} \right) \right] \quad (5)$$

式中: $E_{\text{M-CH}_4}$ 为生猪粪便管理 CH_4 排放量, t; $EF_{\text{M-CH}_4}$ 为生猪的粪便管理 CH_4 排放因子, $\text{kg}/(\text{头} \cdot \text{年})$ ^[16];

AP为年均生猪存栏数,单位为头; GWP_{CH_4} 为 CH_4 的GWP值,取25; VS_i 为第*i*种生猪类型每日易挥发固体排泄量,kg/(头·年); B_0 为生猪粪便的最大 CH_4 生产能力, m^3/kg ,规模化养殖取0.45,散养取0.29^[17];0.67为 CH_4 的质量体积密度, kg/m^3 ;MCF_{*j*}为粪便管理方式*i*的 CH_4 转化系数,%;粪便管理方式为氧化塘、液体贮存、固体贮存、舍内粪坑贮存、沼气池、堆肥和沤肥,取值分别为76%、32%、4%、3%、10%和0.5%^[16];MS_{*j*}为粪便管理方式*i*中所占比例,%;GE为生猪每天总能摄入量,MJ/(头·d),由饲料干物质摄入量乘以18.45计算获得;DE%为生猪摄入饲料的消化率(优先使用养殖场主体自身的测定值。如无测定值,推荐值为80%);UE/GE为尿能占总能的系数(优先使用养殖场主体自身的测定值。如无测定值,推荐值为0.02);ASH为粪便中的灰分含量(优先使用养殖场主体自身的测定值。如无测定值,推荐值生猪粪便的灰分为0.04);18.45为每kg干物质日粮总能的转化因子,MJ。

生猪粪便管理氧化亚氮排放估算如下所示:

$$E_{M-N_2O} = E_{M-N_2O-dir} + E_{M-N_2O-ind} \quad (6)$$

$$E_{M-N_2O-dir} = \sum_j Nex \times MS_j \times EF_j \times \frac{44}{28} \times AP \times 10^{-3} \times GWP_{CH_4} \quad (7)$$

式中: E_{M-N_2O} 为生猪粪便管理氧化亚氮排放的排放

总量,t; E_{M-N_2O-dir} 为生猪粪便管理氧化亚氮直接排放的排放总量,t; E_{M-N_2O-ind} 为生猪粪便管理氧化亚氮间接排放的排放总量,t; E_{M-N_2O-dir} 为生猪粪便管理氧化亚氮排放的排放总量,t;Nex为生猪的年均N排泄量,kg/(头·年),优先使用养殖场主体自身的测定值。如无测定值,推荐值为16 kg/(头·年);MS_{*j*}为生猪粪便*j*种粪便管理方式下的氮排泄管理,%;EF_{*j*}为*j*种粪便管理系统中每kg氮可产生 N_2O 的量,kg;粪便管理方式分为氧化塘、液体贮存、固体贮存、舍内粪坑贮存、沼气池、堆肥和沤肥,EF取值分别为0、0.005、0.02、0.002、0、0.01 kg^[16];AP为年均生猪存栏数,头; GWP_{N_2O} 为 N_2O 的GWP值,取298。

$$E_{M-N_2O-ind} = \sum_j Nex \times MS_j \times \frac{Frac_{gas}}{100} \times EF_{N_2O} \times 44/28 \times AP \times 10^{-3} \times GWP_{N_2O} \quad (8)$$

式中: E_{M-N_2O-ind} 为生猪粪便管理引起的 N_2O 间接排放量,t;Nex为生猪的年均氮排泄量,优先使用养殖场主体自身的测定值。如无测定值,推荐16 kg/(头·年);MS_{*j*}为生猪粪便*j*种粪便管理方式下的氮排泄比例,%;Frac_{gas}为通过 NH_3 和 NO_x 挥发的比例,%;如果不能获得此数值,可使用IPCC提供的缺省值(表1);EF_{*N_2O*}为氮挥发过程 N_2O 排放的排放因子,kg,取0.01;AP为年均生猪存栏数,头。

表1 粪便管理产生的 NH_3 和 NO_x 挥发引起的氮损失缺省值^[16]

Table1 Default values for nitrogen losses due to volatilization of NH_3 and NO_x from manure management

粪便管理系统(MMS)	粪便管理系统中 NH_3 和 NO_x 挥发引起的生猪粪便管理系统(MMS)氮损失/(%) (Frac _{gas} MS范围)	
	Nitrogen loss from pig manure management systems (MMS) due to volatilization of NH_3 and NO_x in MMS Frac _{gas} MS	
厌氧塘 Anaerobic ponds	40% (25~75)	
储粪 Manure storage	25% (15~30)	
液体/泥肥 Liquid/Mud fertilizer	48% (15~60)	
固体存储 Solid state storage	45% (10~65)	

1.3.2 燃料燃烧排放

按照燃料种类分别计算各种燃烧产生的温室气体排放量,并以 CO_2 为单位进行加总,公式如下^[18]:

$$E_{燃料} = \sum (AD_{燃料,i} \times EF_{燃料,i}) \quad (9)$$

式中: $E_{燃料}$ 为燃料燃烧产生的温室气体排放量总和,t;

AD_{燃料,*i*}为养殖场主体年度内第*i*种化石燃料的活动数据,GJ;EF_{燃料,*i*}为第*i*种化石燃料的排放因子,GJ;*i*为化石燃料的种类。

$$AD_{燃料,i} = FU_{燃料,i} \times NCV_{燃料,i} \quad (10)$$

式中:AD_{燃料,*i*}为第*i*种化石燃料的活动水平,GJ;

$FU_{\text{燃料},i}$ 为第 i 种化石燃料的年消耗量, 固体或液体燃料以 GJ/t 为单位, 气体燃料以 $\text{GJ}/10^4 \text{m}^3$ 为单位, 化石燃料消耗量数据统计以养殖场主体的能源台账或统计报表来确定; $NCV_{\text{燃料},i}$ 为第 i 种化石燃料的低位发热值, 采用表 2 提供的推荐值, 固体或液体燃料以 GJ/t 为单位, 气体燃料以 $\text{GJ}/10^4 \text{m}^3$ 为单位; i 为化石燃料的

种类。

$$EF_{\text{燃料},i} = CC_i \times OF_i \times 44/22 \quad (11)$$

式中: $EF_{\text{燃料},i}$ 为第 i 种燃料的排放因子, GJ; CC_i 为第 i 种燃料的单位热值含碳量, GJ; OF_i 为第 i 种燃料的碳氧化率, %; 44/22 为 CO_2 与碳的分子量之比; i 为化石燃料的种类。

表 2 常用化石燃料相关参数推荐值

Table 2 Recommended values for parameters related to commonly used fossil fuels

燃料品种 Fuel type	计量单位 Unit of measure	低位发热值 GJ/t 或 $\text{GJ}/10^4 \text{m}^3$	单位热值含碳量/GJ Carbon content per unit calorific value	燃料碳氧化率 Carbon content per unit calorific value
		Low calorific value		
固体燃料 Solid fuel	无烟煤	t	26.70	27.4×10^{-3}
	烟煤	t	19.57	26.1×10^{-3}
	褐煤	t	11.90	28.0×10^{-3}
	型煤	t	17.46	33.6×10^{-3}
液体燃料 Liquid fuel	汽油	t	43.07	18.9×10^{-3}
	柴油	t	42.65	20.2×10^{-3}
气体燃料 Gas fuel	天然气	10^4m^3	389.31	15.3×10^{-3}
	其他煤气	10^4m^3	52.27	12.2×10^{-3}

1.3.3 购入的电力、热力产生的排放

购入的电力、热力产生的 CO_2 排放通过养殖场购入的电力、热力量与排放因子的乘积获得^[18], 并以 t 为单位, 公式如下:

$$E_{\text{购入电}} = AD_{\text{购入电}} \times EF_{\text{电}} \quad (12)$$

$$E_{\text{购入热}} = AD_{\text{购入热}} \times EF_{\text{热}} \quad (13)$$

式中: $E_{\text{购入电}}$ 为购入的电力所产生的 CO_2 排放, t; $AD_{\text{购入电}}$ 为购入的电力量, MWh; $EF_{\text{电}}$ 为电力生产排放因子, MWh; $E_{\text{购入热}}$ 为购入的热力所产生的温室气体排放, t; $AD_{\text{购入热}}$ 为购入的热力量, GJ; $EF_{\text{热}}$ 为热力生产排放因子, GJ。

1.3.4 输出的电力、热力产生的排放

输出的电力、热力产生的 CO_2 排放通过养殖场输出的电力、热力量与排放因子的乘积获得^[18], 公式如下:

$$E_{\text{输出电}} = AD_{\text{输出电}} \times EF_{\text{电}} \quad (14)$$

$$E_{\text{输出热}} = AD_{\text{输出热}} \times EF_{\text{热}} \quad (15)$$

式中: $E_{\text{输出电}}$ 为输出的电力所产生的 CO_2 排放, t; $AD_{\text{输出电}}$ 为输出的电力量, MWh; $EF_{\text{电}}$ 为电力生产排

放因子, MWh; $E_{\text{输出热}}$ 为输出的热力产生的温室气体排放, t; $AD_{\text{输出热}}$ 为输出的热力量, GJ; $EF_{\text{热}}$ 为热力生产排放因子, GJ。

1.3.5 沼气回收利用甲烷减排量

厌氧发酵产生的沼气外供第三方利用纳入到粪便厌氧发酵后沼气回收利用甲烷减排量计算^[18], 公式如下:

$$E_{\text{CH}_4\text{外供}} = R_{\text{CH}_4\text{外供}} \times \text{GWP}_{\text{CH}_4} \quad (16)$$

式中: $E_{\text{CH}_4\text{外供}}$ 为农业废弃物厌氧发酵后沼气回收利用 CH_4 减排量, t; $R_{\text{CH}_4\text{外供}}$ 为养殖场回收沼气外供第三方的 CH_4 量, t; GWP_{CH_4} 为 CH_4 的全球增温潜势值, 取 25。

回收沼气外供 CH_4 去除量计算公式如下:

$$R_{\text{CH}_4\text{外供}} = Q_{\text{外供}} \times \text{PUR}_{\text{CH}_4} \times 6.7 \quad (17)$$

式中: $R_{\text{CH}_4\text{外供}}$ 为养殖场回收沼气外供第三方的 CH_4 量, t; $Q_{\text{外供}}$ 为养殖场外供第三方的沼气体积, 10^4Nm^3 ; PUR_{CH_4} 为沼气中 CH_4 气体的含量, %; 6.7 为 CH_4 气体在标准状况下的密度, 10^4Nm^3 。

1.3.6 核算碳减排总量

碳排放计算公式如下：

$$E = E_{\text{过程}} + E_{\text{燃烧}} + E_{\text{购入电}} - E_{\text{输出电}} - E_{\text{输出热}} - E_{\text{CH}_4\text{外供}}$$

(18)

式中： E 为温室气体排放总量， t ； $E_{\text{过程}}$ 为过程温室气体排放量总和， t ； $E_{\text{燃烧}}$ 为燃料燃烧产生的温室气体排放量总和， t ； $E_{\text{购入电}}$ 为购入的电力所产生的 CO_2 排放， t ； $E_{\text{购入热}}$ 为购入的热力所产生的温室气体排放， t ； $E_{\text{输出电}}$ 为输出的电力所产生的 CO_2 排放， t ； $E_{\text{输出热}}$ 为输出的热力产生的温室气体排放， t ； $E_{\text{CH}_4\text{外供}}$ 为废弃物厌氧发酵生成沼气外供第三方利用量， t 。

1.3.7 计算碳排放强度

$$P_{\text{养殖业}} = \frac{E_{\text{养殖}} \times 1\,000}{\text{AP} \times W}$$

(19)

式中： $P_{\text{养殖业}}$ 为养殖业排放强度（每 t 生猪活重中碳排放量）， t ； $E_{\text{养殖}}$ 为养殖场温室气体排放总量， t ； AP 为年均生猪年均存栏数，头数； W 为生猪活重，取120

kg/头。

2 衢州市生猪养殖场碳排放核算

2.1 衢州市生猪养殖场生产情况

衢州市170家生猪养殖场生产情况见表3，养殖场之间的饲养结构与粪便管理方式具有明显差异。农场饲养母猪数量平均为466头，年出栏生猪5200头（1000~72000头），料肉比平均为4。在饲舍阶段，88户猪场使用漏缝或半漏缝地板，31户猪场采用实体地板，51户猪场采用异位或原位发酵床，清粪频率平均为0.36次/d。固态粪便管理方式均为堆肥，167户具有液态粪便管理措施，包括固液分离后液粪厌氧发酵和固液分离处理后达标排放。养殖主体中70%选择固液分离—液粪厌氧发酵、固粪堆肥的粪污处理方式，剩余30%的养殖主体采用发酵床技术对粪污进行处理，另外，103户养殖场利用沼气来发电或发热。

表3 养殖场基本生产数据
Table 3 Basic production data of pig farms

养殖主体特征 Characteristics of the breeding body	单位 Unit	所有农场 All farms	
		平均值 Average value	范围 Range
农场数 No. of farms	个	170	
母猪 Sows	头	466	0~9 075
年出栏量 Annual output	万头	0.52	0.1~7.2
料肉比 Feed conversion ratio	kg/kg	4	2.00~5.71
饲舍结构 Feeder structure			
漏缝地板 Patchy flooring	养殖主体占比/%	24	
半漏缝地板 Semi-leakage flooring	养殖主体占比/%	28	
实体地板 Solid floor	养殖主体占比/%	18	
异位发酵床 Isotopic fermentation bed	养殖主体占比/%	28	
原位发酵床 In-situ fermentation bed	养殖主体占比/%	2	
清粪频率 Frequency of manure removal	次/d	0.36	0.01~3.00
粪污处理方式 Manure treatment methods			
固液分离-液粪厌氧发酵、固粪堆肥 Solid-liquid separation - anaerobic fermentation of liquid manure, solid manure composting	养殖主体占比/%	70	
固液未分离-原位/异位发酵床 Solid-liquid not separated - in situ/isotopic fermentation beds	养殖主体占比/%	30	
沼气利用 Biogas utilization	养殖主体数量 N	103	

2.2 衢州市生猪养殖场碳排放情况

不同生猪养殖场的碳排放量、碳中和量、净碳排放量和碳排放强度差距较大(表 4)。养殖

场平均碳排放量和碳中和量分别为 516 和 262 t ,净碳排放量为 254 t,养殖场碳排放强度(每 t 生猪活重的平均碳排放量)为 0. 23~5. 27 t 。

表 4 生猪养殖场碳排放情况
Table 4 Basic production data of pig farms

评价指标 Evaluation indicator	平均值 Average		
	所有猪场 All pig farms	最大值 Maximum	最小值 Minimum
平均碳排放量/t Average carbon emission	516	2 683	194
平均碳中和量/t Average carbon neutrality	262	1 483	68
平均净碳排放量/t Average net carbon emission	254	1 200	126
平均碳排放强度/t Average carbon intensity	0. 51	5. 27	0. 23

3 衢州市生猪养殖场贴标分级

3.1 衢州市生猪养殖场碳排放强度贴标分级

根据各养殖场碳排放强度进行分类评价,采用不同的颜色标识。具体如下:

- 1)深绿。指碳排放强度低,排名在前 20% 以上的养殖场。
- 2)浅绿。指碳排放强度较低,排名为 20%~60% 的养殖场。
- 3)黄色。指碳排放强度一般,排名在 60%~95% 的养殖场。
- 4)红色。指碳排放强度较高,排名在后 5% 的养殖场。

根据计算结果进行排序,按比例分配,共有 34 家生猪养殖场是深绿色标识,68 家生猪养殖场是绿色标识,60 家生猪养殖场是红色标识,8 家生猪养殖场是红色标识。不同标识养殖场的碳排放量、碳中和量、净碳排放量和碳排放强度差异显著(表 5),深绿标识养殖场平均碳排放量和净碳排放量,分别比红色标识养殖场低 6. 5% 和 18. 5%,深绿、浅绿和黄色标识养殖场的平均净碳排放量和平均碳排放强度与红色标识养殖场有显著性差异($P<0. 05$)。深绿、浅绿、黄、红色标识养殖场每 t 生猪活重的平均碳排放量(平均碳排放强度)分别为 0. 29、0. 40、0. 57 和 1. 81 t 。

3.2 不同标识生猪养殖场碳排放量比较与碳抵消路径分析

不同颜色标识生猪养殖场的净碳排放量具有显著差异(图 3)。深绿标识养殖场的净碳排放量平均为 236 t,浅绿、黄色标识养殖场的净碳排放量比深绿分别高 7 和 18 t,红色标识养殖场净碳排放量比深绿低 26 t。46% 的碳排放量可以被沼气利用和施用有机肥固碳量所抵消,碳中和量中 97% 来自有机肥固碳,浅绿、黄色标识养殖场平均碳中和量最高,均为 262 t,其次为深绿和红色标识养殖场,碳中和量分别为 255 和 215 t 。

生猪养殖场平均碳排放量为 516 t,其中 42% 来源于粪便管理 CH₄ 排放,深绿、浅绿、黄、红色标识养殖场粪便管理 CH₄ 排放量分别为 220、226、226 和 185 t,其次为购入电力产生的 CO₂ 排放、肠道发酵 CH₄ 排放和粪便管理 N₂O,占比分别为 27. 8%、20. 56% 和 9. 44%,最低的为化石燃料燃烧产生的 CO₂ 排放,占比为 0. 35%。

生猪养殖场平均碳中和量为 262 t,碳中和包含有机肥固碳和沼气利用 2 个部分,其中有机肥固碳占比较高,大多数养殖场对沼气的综合利用率不高,深绿、浅绿、黄、红色标识养殖场有机肥固碳量分别为 249、256、256 和 209 t,红色标识养殖主体有机肥固碳量较低,需要提高对有机肥的利用率,增加固碳量,进而减少碳排放。

表5 生猪养殖场碳排放强度贴标分级情况

Table 5 Carbon emission intensity labeling grading of pig farms

评价指标 Evaluation indicator	深绿 Dark green	浅绿 Light green	黄 Yellow	红 Red
平均碳排放量/t Average carbon emission	491±158a	505±188a	518±203a	425±179a
平均碳中和量/t Average carbon neutrality	255±124a	262±116a	262±89a	215±51a
平均净碳排放量/t Average net carbon emissions	236±63b	243±88b	254±111b	210±97a
平均碳排放强度/t Average carbon intensity	0.29±0.03c	0.40±0.05bc	0.57±0.07b	1.81±0.99a
养殖场数 Number of farms	34	68	60	8

注:表格中的数据为平均值±标准误差;根据Fisher的LSD检验,不同的字母代表 $P<0.05$ 时平均值差异显著。
Note: The data in the table are mean ± standard error, and different letters denote significantly different means at $P<0.05$ according to Fisher's LSD test.

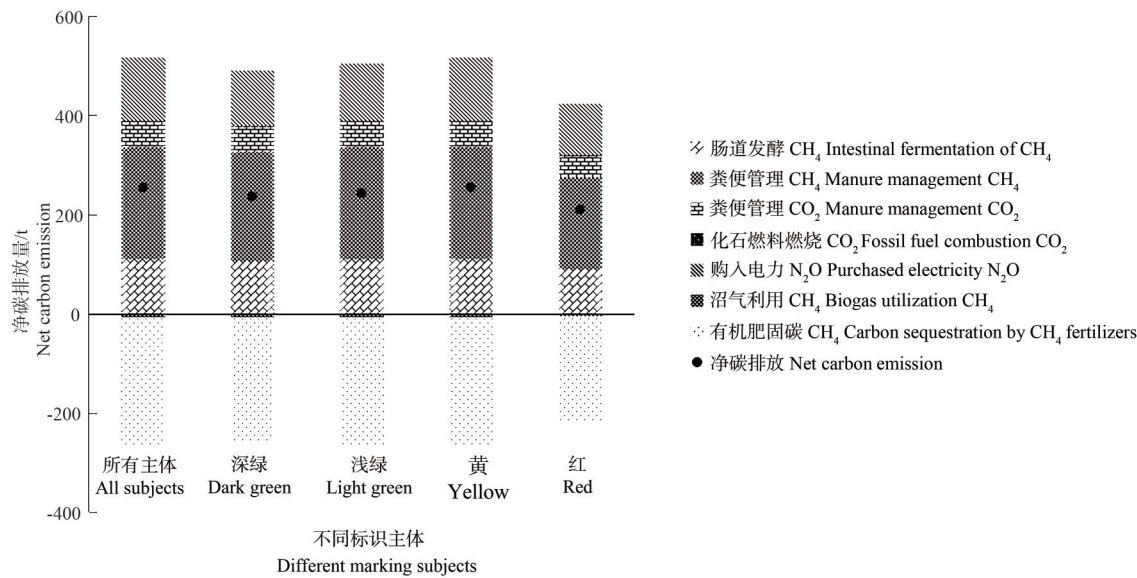


图3 不同标识生猪养殖场净碳排放量

Fig. 3 Net carbon emissions from differently labeled pig farms

总体来看,不同标识养殖场碳排放主要排放源与所有养殖场相同,深绿标识养殖场各环节碳排放量相对较低,碳中和量高,因此其净碳排放量低,因此浅绿、黄、红色标识养殖场需要在主要碳排放环节(粪便管理、电力购入和肠道发酵)探索低碳技术。与深绿、浅绿、黄色标识养殖场相比,红色标识养殖场碳排放量高是因为购入电力产生的CO₂排放量高,因此采用清洁能源(如太阳能等)减少电力消

耗是红色标识养殖场主要减排优化方向。

4 讨论

4.1 农业碳账户与碳排放核算方法

本研究在借鉴国内外研究经验的基础上进行总结整合生猪养殖碳排放领域的排放参数,制定了《农业碳账户碳排放核算与评价指南》^[19],并以此对衢州市170家生猪养殖企业进行碳账户核算和贴标

分级,为农业系统碳核算提供了科学依据。虽然本研究核算方法延伸了碳排放核算链条,考虑了有机肥还田固碳量和沼气利用减排量,使碳排放核算的准确性进一步提高,但未考虑饲料生产环节,主要原因是养殖场饲料均采用商品配合饲料,无法提供详细的饲料原料组成,从而无法追溯饲料生产过程的碳足迹。

未来农业碳核算体系的研究可以考虑从以下方面展开:首先应进一步提高农业碳排放测算的精度,综合多种核算方法,将更多农业碳排放源纳入碳排放核算体系。其次,应加快遥感、大数据与云计算等新型技术在实测领域的研究,通过实地监测、自然试验等方法辅助修正农业碳排放偏差^[20],分不同地区、不同温室气体种类和养殖品种等各类排放源全面测算符合我国农业生产实际的排放系数,为农业碳排放核算提供基础数据支撑。

4.2 衢州市生猪养殖场碳排放量影响因素分析

养殖场碳排放量的差异主要与以下因素相关:首先是养殖系统,研究表明畜牧业的规模化和集约化生产是减少畜牧业碳排放量的最有效途径^[21],深绿标识养殖场的规模化率为40%,而黄、红色标识养殖场的规模化率分别为33.3%和12.5%。其次是粪便管理方式,粪便管理和肠道发酵是畜禽CH₄排放的主要来源,粪便管理CH₄排放主要受清粪频率、粪便管理方式等因素的影响^[22]。深绿标识养殖场的清粪频率为0.33次/d,低于所有场的平均值(0.36次/d),生物发酵床模式产生的CH₄排放量低于传统粪尿储存方式^[23],深绿标识养殖场采用发酵床模式占比较高,而其他标识养殖场采用实体地板的比例较高,而且个别养殖场粪尿舍内储存时间较长,长期处于厌氧状态,CH₄排放量很高。最后购入电力产生的非生物源CO₂排放也是影响养殖场碳排放量的主要因素,主要是粪便管理过程中设备运行消耗的电力,因此需选择排放量和能耗低的粪便管理方式。

4.3 衢州市生猪养殖场减排方向展望

总体来看,粪便管理CH₄排放、购入电力产生的CO₂排放和肠道发酵CH₄排放是生猪养殖碳排放的主要排放源,这一结果与刘月仙等^[6]的结果相类似。因此,需进一步构建“饲料源头减氮—粪污处理—沼气工程—能耗管理”全链条碳减排技术优化服务体系,在饲喂环节可通过改善饲料管理如采用低蛋

白低豆粕多元化日粮从源头上减少生猪养殖氮素投入,从而减少氮素排泄来降低生猪养殖过程的碳排放^[24]或提高饲料质量。与深绿标识养殖场相比,其他养殖场在粪污管理方式上液粪选择达标排放,该方式需要通过添加外源药剂或者消耗大量电力来脱除液粪中的COD、总氮、总磷等指标才能达到浙江省农田灌溉水标准,而且灌溉水总养分含量低,不能满足作物提供生长发育的需求。而深绿标识养殖场大多采用厌氧发酵来处理粪污,这一过程能够将畜禽粪便转化成沼气进行利用,从而实现畜牧业降污减碳^[25]。此外,购入电力产生的CO₂排放仅次于粪便管理CH₄排放,占比达到27.8%,除关注畜禽本身产生的碳排放外,能源消耗产生的非生物源CO₂排放也是需要被重点关注的地方,还应在养殖场应用节能技术实现降碳,如可以考虑圈舍顶部安装光伏发电系统^[26],以此代替传统的电力来源。

5 结 论

本研究通过对衢州市170家生猪养殖场碳排放量进行核算和贴标分级,得出以下结论:

(1)衢州市生猪养殖场净碳排放量平均值为254 t,其中46%的碳排放量可以被沼气利用和施用有机肥固碳量所抵消,粪便管理和肠道发酵CH₄排放、购入电力产生的CO₂排放是主要碳排放源。

(2)衢州市生猪养殖场的平均碳排放强度为0.51 t,其中深绿、浅绿、黄和红色标识养殖场分别为34、68、60和8家。贴标落后的生猪养殖场可以考虑从粪便管理和能源消耗等方面探索具有区域适应性的碳减排技术,切实推动衢州市生猪产业绿色低碳发展。

参考文献 References

- [1] 国家统计局. 中国畜牧兽医年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023: 369
National Bureau of Statistics. *China Animal Husbandry and Veterinary Medicine Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023: 369 (in Chinese)
- [2] Bai Z H, Ma L, Jin S Q, Ma W Q, Velthof G L, Oenema O, Liu L, Chadwick D, Zhang F S. Nitrogen, phosphorus, and potassium flows through the manure management chain in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(24): 13409-13418
- [3] 周一凡, 李彬, 张润清. 县域尺度下河北省农业碳排放时空演变与影响因素研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 570-581
Zhou Y F, Li B, Zhang R Q. Spatiotemporal evolution and influencing

- factors of agricultural carbon emissions in Hebei Province at the county scale[J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2022, 30(4): 570-581 (in Chinese)
- [4] 贺青, 张俊彪. 粮食主产区农业碳排放的动态演进及驱动因素研究[J]. 生态经济, 2023, 39(6): 123-128, 162
- He Q, Zhang J B. Research on the dynamic evolution and driving factors of agricultural carbon emissions in major grain producing areas [J]. *Ecological Economy*, 2023, 39(6): 123-128, 162 (in Chinese)
- [5] 韦良煥, 林宁, 莫治新. 南疆四地州畜牧业温室气体排放估算及特征分析[J]. 家畜生态学报, 2022, 43(12): 81-86
- Wei L H, Lin N, Mo Z X. Estimation and characteristics analysis of greenhouse gases emission of animal husbandry from four prefectures of South Xinjiang[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2022, 43(12): 81-86 (in Chinese)
- [6] 刘月仙, 刘娟, 吴文良. 北京地区畜禽温室气体排放的时空变化分析[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 891-897
- Liu Y X, Liu J, Wu W L. Spatiotemporal dynamics of greenhouse gases emissions from livestock and poultry in Beijing area during 1978-2009[J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2013, 21(7): 891-897 (in Chinese)
- [7] Wang Q W, Chiu Y H, Chiu C R. Driving factors behind carbon dioxide emissions in China: A modified production-theoretical decomposition analysis [J]. *Energy Economics*, 2015, 51: 252-260
- [8] 杨璐, 于书霞, 李夏菲, 刘微, 胡荣桂. 湖北省畜禽粪便温室气体减排潜力分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(7): 2650-2657
- Yang L, Yu S X, Li X F, Liu W, Hu R G. Mitigation potential of greenhouse gas emission in livestock and manure management in Hubei Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(7): 2650-2657 (in Chinese)
- [9] 胡永浩, 张昆扬, 胡南燕, 武拉平. 中国农业碳排放测算研究综述[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(2): 163-176
- Hu Y H, Zhang K Y, Hu N Y, Wu L P. Review on measurement of agricultural carbon emission in China [J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2023, 31(2): 163-176 (in Chinese)
- [10] 谢婷, 张慧, 何家军, 刘煜, 黄凯璇, 宋明伟. 华中地区畜牧业温室气体排放特征分析与预测[J]. 中国环境科学, 2020, 40(2): 564-572
- Xie T, Zhang H, He J J, Liu Y, Huang K W, Song M W. Characteristics and prediction of greenhouse gas emission from livestock industry in Central China[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(2): 564-572 (in Chinese)
- [11] 白雪冰, 胡浩, 周应恒, 张岳. 中国畜牧业碳排放的时空演进及其影响因素分析[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(9): 260-274
- Bai X B, Hu H, Zhou Y H, Zhang Y. Study on space-time evolution and influence factors of carbon emissions in China's animal husbandry [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(9): 260-274 (in Chinese)
- [12] 郭娇, 齐德生, 张妮娅, 孙铝辉, 胡荣桂. 中国畜牧业温室气体排放现状及峰值预测[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 2106-2113
- Guo J, Qi D S, Zhang N Y, Sun L H, Hu R G. Current status and peak prediction of greenhouse gas emissions from animal husbandry in China [J]. *Journal of Agricultural Environmental Science*, 2017, 36(10): 2106-2113 (in Chinese)
- [13] 袁广达, 蒋松泽, 冯克玉. 净碳排放量测算与碳治理成本核算: 以长三角地区为例[J]. 财会月刊, 2023, 44(21): 53-61
- Yuan G D, Jiang S Z, Feng K Y. Calculation of net carbon emissions and cost accounting of carbon control: Taking Yangtze River Delta as an example [J]. *Finance and Accounting Monthly*, 2023, 44(21): 53-61 (in Chinese)
- [14] 王懋雄, 罗爱明. 基于碳源和碳汇视角的农业绿色发展研究: 以四川省为例[J]. 西南金融, 2024, (1): 69-80
- Wang M X, Luo A M. Research agricultural green development from the perspective of carbon sources and carbon sinks-a case study of Sichuan Province[J]. *Southwest Finance*, 2024, (1): 69-80 (in Chinese)
- [15] 浙江省统计局. 浙江统计年鉴-2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023
- Zhejiang Provincial Bureau of Statistics. *Zhejiang Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023 (in Chinese)
- [16] IPCC. 2019年IPCC国家温室气体排放清单指南[R]. 政府间气候变化专门委员会, 2019, IPCC
- IPCC. 2019 IPCC Guidelines for national greenhouse gas emission inventories [R]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019, IPCC (in Chinese)
- [17] 张笑颖. 农场尺度作物-生猪系统碳氮环境损失与减排途径足迹 [D]. 北京: 中国农业大学, 2020
- Zhang X Y. Environmental losses of carbon and nitrogen and emission reduction pathways in farm-scale crop-pig systems footprints [D]. Beijing: China Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [18] 国家发改委气候变化司. 省级温室气体清单编制指南(试行)[A]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2011
- Department of Climate Change, National Development and Reform Commission. *Guidelines for the Preparation of Provincial Greenhouse Gas Inventories (Trial)* [A]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2011
- [19] 高尚宾. 农业碳账户碳排放核算与评价指南[S]. 浙江: 衢州出版社, 2021
- Gao S B. Guidelines for carbon accounting and evaluation of carbon emissions from agricultural carbon accounts [S], Zhejiang: Quzhou Publishing House, 2021 (in Chinese)
- [20] 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, misunderstanding 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)
- [21] 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)
- [22] 尚杰, 杨果, 于法稳. 中国农业温室气体排放量测算及影响因素研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 354-364
- Shang J, Yang G, Yu F W. Agricultural greenhouse gases emissions and influencing factors of in China [J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2015, 23(3): 354-364 (in Chinese)
- [23] 邓明君, 王崇祐, 刘佳宇. 生猪养殖的碳氮排放与低碳氮模式推广策略分析[J]. 家畜生态学报, 2016, 37(5): 66-72
- Deng M J, Wang C H, Liu J Y. Strategy analysis on carbon and nitrogen emission of pig breeding and low carbon and nitrogen mode extension[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2016, 37(5): 66-72 (in Chinese)
- [24] Long W T, Wang H L, Hou Y, Chadwick D, Ma Y F, Cui Z L, Zhang F S. Mitigation of multiple environmental footprints for China's pig production using different land use strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(8): 4440-4451

- [25] Hou Y, Velthof G L, Lesschen J. P, Staritsky I G, Oenema O. Nutrient recovery and emissions of ammonia, nitrous oxide, and methane from animal manure in Europe: Effects of manure treatment technologies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(1): 375-383

- [26] 李建庆, 滕祥, 李泽波. 畜禽生态养殖废弃物利用及节能减排措施[J]. 畜牧兽医科学(电子版), 2022(20): 190-192

- Li J Q, Teng X, Li Z B. Waste utilization and energy saving and emission reduction measures of livestock and poultry ecological breeding [J]. *Grazing Veterinary Sciences (Electronic Version)*, 2022(20): 190-192 (in Chinese)

责任编辑: 秦梅



第一作者简介: 史晓晴, 硕士研究生, 目前就读于中国农业大学资源与环境学院资源利用与植物保护专业。硕士期间获得校级一等奖学金、国家绿色发展研究院一等奖学金、院级三农最佳日志奖和惠泽三农优秀贡献奖, 先后参与科技小院建设及种养一体化项目、衢州市农业碳中和账户建设项目和碳账户核算及减排固碳技术研究项目, 曾获中国研究生乡村振兴科技强农+创新大赛“拼多多杯”第二届科技小院大赛决赛二等奖。



通讯作者简介: 王红亮, 博士, 中国农业大学副教授, 博士生导师。目前主要在农牧系统养分管理、农业废弃物循环利用等方向开展交叉学科研究。担任生猪、奶牛等多个科技小院首席专家。主持国家自然科学基金 1 项、科技部重点研发项目子课题以及地方政府或企业委托项目多项, 在 *Environmental Science and Technology*, *Science of the Total Environment* 等国际期刊发表论文 10 余篇。荣获 2023 年第三届全国创新争先奖牌-中国农业大学科技小院团队(12/15); 入选 2022 年中国农技协“最美科技小院”; 获得 2022 年国家级赛事“中国研究生乡村振兴科技强农+创新大赛”特等奖及优秀指导教师称号、2022 年曲周县农业科技服务先进个人、2020 年中国农业大学优秀人才; 担任 *Animal Research and One Health* 青年编委。