

“双碳”背景下秦皇岛市畜禽粪便碳排放与减排潜力测算分析

齐海云, 赵忠宝, 刘圣阳, 李凤鑫, 耿世刚

引用本文:

齐海云, 赵忠宝, 刘圣阳, 等. “双碳”背景下秦皇岛市畜禽粪便碳排放与减排潜力测算分析[J]. 农业环境科学学报, 2026, 415(1): 262–268.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2024-1080>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

畜禽粪便堆肥过程中碳氮损失及温室气体排放综述

袁京, 刘燕, 唐若兰, 马若男, 李国学

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2428–2438 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0986>

畜禽粪便生物炭固碳量、养分量的估算及田间施用潜在风险预测

李飞跃, 吴旋, 李俊锁, 谢越, 范行军, 蔡永兵, 赵建荣

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2202–2209 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0025>

京津冀地区农业源氨排放的时空格局与减排潜力

吾拉哈提·阿达力别克, 展晓莹, 周丰, 居学海, 刁斌, 黄宏坤, 靳拓, 许丹丹

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2236–2245 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0129>

中国畜牧业温室气体排放现状及峰值预测

郭娇, 齐德生, 张妮娅, 孙铝辉, 胡荣桂

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2106–2113 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0132>

添加黄土或古土壤降低猪粪温室气体综合排放效应

雷鸣, 程于真, 陈竹君, 周建斌

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1624–1632 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1459>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

齐海云, 赵忠宝, 刘圣阳, 等. “双碳”背景下秦皇岛市畜禽粪便碳排放与减排潜力测算分析[J]. 农业环境科学学报, 2026, 45(1): 262–268.

QI H Y, ZHAO Z B, LIU S Y, et al. Calculation and analysis of carbon emissions and emission reduction potential of livestock and poultry manure in Qinhuangdao City under the background of the carbon peaking and carbon neutrality[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2026, 45(1): 262–268.



开放科学 OSID

“双碳”背景下秦皇岛市畜禽粪便碳排放与减排潜力测算分析

齐海云^{1,2,3}, 赵忠宝^{1,2,3*}, 刘圣阳^{4*}, 李凤鑫¹, 耿世刚^{1,2,3}

(1. 河北环境工程学院, 河北 秦皇岛 066102; 2. 河北省农业生态安全重点实验室, 河北 秦皇岛 066102; 3. 河北省高等学校人文社会科学重点研究培育基地, 河北 秦皇岛 066102; 4. 南京林业大学, 南京 210037)

摘要:为厘清秦皇岛市畜禽粪便碳排放现状及碳减排潜力,以畜禽粪便管理中产生的温室气体排放量为研究对象,以秦皇岛市2013年至2022年主要4种畜禽存栏量为活动水平数据,实地调研确立基线情景,采用排放因子法和多因素灰色模型,测算秦皇岛市畜禽粪便碳排放现状,并预测其动态变化以及不同管理情景下的碳减排潜力。结果表明:2013年至2022年秦皇岛市畜禽粪便碳排放量呈现上升-下降-缓慢上升趋势;猪和牛是主要的碳排放源;在基线情景下,预计2030年秦皇岛市畜禽粪便CO₂e达到137.9万t,并将处于持续上升态势;全制作沼气、全堆肥处理两种低碳情景下,2030年分别实现45.36万、65.00万t的碳减排;在管理方式动态调整情景下,可在2028年实现畜禽粪便碳排放拐点。

关键词: 畜禽粪便; 碳排放; 多因素灰色模型; 秦皇岛; 碳减排潜力; 资源化利用

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2026)01-0262-07 doi:10.11654/jaes.2024-1080

Calculation and analysis of carbon emissions and emission reduction potential of livestock and poultry manure in Qinhuangdao City under the background of the carbon peaking and carbon neutrality

QI Haiyun^{1,2,3}, ZHAO Zhongbao^{1,2,3*}, LIU Shengyang^{4*}, LI Fengxin¹, GENG Shigang^{1,2,3}

(1. Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao 066102, China; 2. Hebei Key Laboratory of Agroecological Safety, Qinhuangdao 066102, China; 3. Key Research and Cultivation Base of Humanities and Social Sciences in Higher Education Institutions in Hebei Province, Qinhuangdao 066102, China); 4. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: In order to clarify the current situation of carbon emissions from livestock and poultry manure and the carbon emission reduction potential in Qinhuangdao City, this study investigated greenhouse gas emissions from livestock and poultry manure management, using livestock and poultry population data from four major types in Qinhuangdao City from 2013 to 2022 as activity level data. A baseline scenario was established through field surveys. The emission factor method and multi-factor grey model were used to calculate the current carbon emissions from livestock and poultry manure in Qinhuangdao, predict their dynamic trends, and assess carbon reduction potential under different management scenarios. The results show that, from 2013 to 2022, the carbon emissions from livestock and poultry manure in Qinhuangdao City showed a trend of rising, then falling, followed by a slow rise; pigs and cattle are the main sources of carbon emissions; under the baseline scenario, the CO₂e of livestock and poultry manure emissions in Qinhuangdao City is expected to reach 1 379 000 t by 2030 and will be in a continuous upward trend. Under the two low-carbon scenarios of full biogas production and full composting, carbon

收稿日期: 2024-12-10 录用日期: 2025-09-23

作者简介: 齐海云(1981—),女,河北唐山人,硕士研究生,副教授,主要从事环境污染治理与碳排放研究。E-mail: qihaiyun322@foxmail.com

*通信作者: 赵忠宝 E-mail: zhaozhongbao@hebuee.edu.cn; 刘圣阳 E-mail: liushengyang0123@foxmail.com

基金项目: 河北省高等学校人文社会科学研究项目(SY2022045); 河北环境工程学院校级科研项目(XJXM-YB-2024004)

Project supported: Humanities and Social Sciences Research of the Higher Education Institutions of Hebei Province, China (SY2022045); Scientific Research Projects of Hebei University of Environmental Engineering (XJXM-YB-2024004)

emissions will be reduced by 453 600 t and 650 000 t respectively by 2030. Under the scenario of dynamic adjustment of management methods, the inflection point of carbon emissions from livestock and poultry manure can be achieved in 2028.

Keywords: livestock and poultry manure; carbon emissions; multi-factor grey model; Qinhuangdao; Carbon reduction potential; resource utilization

全球气候变暖是当前人类面临的重大环境问题,其中二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)等温室气体的大量排放被认为是导致气候变暖的主要因素。畜牧业排放的CO₂、CH₄等是温室气体的主要来源^[1]。据联合国粮食及农业组织(FAO)报道,畜牧业每年大约排放71亿tCO₂e,占人为温室气体排放总量的14.5%^[2]。畜禽粪便的管理方式直接决定了CH₄和N₂O的排放水平^[3]。但是,由于管理模式和技术的不完善,大量畜禽粪便已对部分地区的生态环境构成威胁^[4]。联合国发布的《2030年可持续发展议程》鼓励各企业通过合适的技术和管理方式降低农业生产过程中产生的温室气体排放^[5]。核算畜禽粪便的碳排放量及减排潜力,探索有效的减排措施,对于实现农业可持续发展和环境保护具有重要意义。

我国在畜禽粪便碳排放研究领域已经取得了一定的进展,早期的研究基于排放因子法对区域尺度的碳排放进行估算,初步分析了不同地区畜禽粪便的时空分布特征^[6-10]。但这些研究大多未充分考虑管理模式和环境因素等方面的差异,导致碳排放估算结果存在误差。随着“双碳”战略的推进,针对畜禽粪便低碳管理技术(如沼气和堆肥处理)的研究逐渐增多,分析了沼气工程和堆肥处理等措施的减排效益^[11-15]。现有研究多集中于单一技术模式的减排效果评估,缺乏对多种管理情景下减排潜力的系统性分析,导致难以了解不同技术路径的协同减排效应。在畜禽存栏量预测模型方面,主要依赖单一时间序列方法,模型缺少对政策导向与经济因素的考虑,导致预测结果缺乏现实指导依据^[16-17]。

针对上述问题,研究以2013—2022年秦皇岛市主要4种畜禽的存栏量为基础数据,采用排放因子法

对畜禽粪便的碳排放量进行测算,并分析排放现状;采用多因素灰色模型预测未来畜禽存栏量;基于基线情景、全制作沼气低碳情景、全堆肥处理低碳情景、管理方式动态调整情景测算未来几年秦皇岛市畜禽粪便碳排放量,研究不同情景的减排潜力。

1 数据来源与测算方法

1.1 研究区域概况

作为河北省重要的农业生产区,秦皇岛市畜牧业在全市农业经济中占据重要地位。2022年,畜牧业产值占秦皇岛市全市农业总产值的40%,主要饲养牲畜包括牛、猪、羊和家禽,养殖活动集中于抚宁区、青龙满族自治县、卢龙县及昌黎县4个区县,其养殖量占全市养殖总量的91.3%。丰富的农业资源和集中的畜牧业分布为研究区域内畜禽粪便管理碳排放特性研究提供了背景。

1.2 数据来源

2013至2022年秦皇岛市主要畜禽的存栏量来源于《秦皇岛统计年鉴》,畜禽粪便碳排放以及畜禽粪便管理模式对应的排放因子具体数据来源于《IPCC 2006年国家温室气体清单指南2019修订版》和农业行业标准《畜禽养殖场温室气体排放核算方法》(NY/T 4243—2022)。预测模型构建所需数据来源于《秦皇岛统计年鉴》《河北省畜禽养殖污染防治条例》《秦皇岛农业经济年报》。

1.3 碳排放量的核算方法

目前碳排放核算主要有排放因子法、质量平衡法、实测法3种方法^[18-20]。鉴于排放因子法具有操作简便、数据易得以及成本较低的特点,研究选用该方法对畜禽粪便进行碳排放核算。依据《IPCC 2006年

表1 秦皇岛市2013至2022年主要畜禽存栏量(头)

Table 1 Main livestock and poultry stocks in Qinhuangdao City from 2013 to 2022(head)

畜禽 Livestock and poultry	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
猪	1 489 800	1 476 400	1 474 900	1 377 300	1 121 000	1 050 200	895 000	943 200	976 900	1 040 500
牛	215 700	221 000	214 800	170 000	148 200	109 300	126 500	134 800	140 000	151 700
羊	1 155 100	1 209 500	1 149 000	1 159 400	980 200	880 100	875 400	890 300	927 600	954 600
家禽	17 310 100	17 442 900	17 041 700	17 842 000	16 580 600	14 056 700	14 498 300	14 959 000	15 461 600	15 836 500

国家温室气体清单指南2019修订版》，核算对象为畜禽粪便管理过程中带来的CH₄与N₂O排放，结合秦皇岛市现实情况，核算边界为猪、牛、羊、家禽这4种畜禽粪便管理过程中产生的碳排放。CH₄和N₂O计算式如下：

$$E_{CH_4} = \sum_{T,S,P} (N_{(T,P)} \times VS_{(T,P)} \times AWMS_{(T,S,P)} \times ET_{(T,S,P)}) / 1000$$

$$E_{N_2O} = \left\{ \sum_S \left[\sum_{T,P} [(N_{(T,P)} \times N_{ex(T,P)}) \times AWMS_{(T,S,P)}] + N_{cdg(S)} \right] \times EF_{(S)} \right\} \times \frac{44}{28}$$

式中： E_{CH_4} 为CH₄的排放量，kg·a⁻¹； $N_{(T,P)}$ 为存栏量，头； $VS_{(T,P)}$ 为畜禽的年均挥发性固体(VS)排泄量，kg·头·a⁻¹； $AWMS_{(T,S,P)}$ 为养殖环节不同粪便管理系统VS的比例； $EF_{(T,S,P)}$ 为不同粪便管理系统处理的CH₄排放因子，kg·kg⁻¹； E_{N_2O} 为N₂O排放量，kg·a⁻¹； $N_{ex(T,P)}$ 为畜禽的年均氮排泄量，kg·头·a⁻¹； $N_{cdg(S)}$ 为通过共消化输入的年度氮量，kg·a⁻¹，其中系统(S)仅指厌氧消化； $EF_{(S)}$ 为N₂O的排放因子，kg·kg⁻¹；S为粪便管理系统；T为畜禽种类；P为高生产系统或低生产系统；44/28为N₂O-N排放量转换为CO₂排放量。

其中，针对不同管理模式下的畜禽粪便碳排放计算需先计算出对应的碳排放因子，计算公式如下：

$$EF_{(T)} = (VS_T \times 365) [B_{0(T)} \times 0.67 \times \sum_{T,S,P} \frac{MCF_{S,k}}{100} \times AWMS_{(T,S,k)}]$$

式中： $EF_{(T)}$ 为CH₄排放因子，kg·a⁻¹； VS_T 为每日挥发固体粪污产生量，kg·d⁻¹；0.67为CH₄的质量体积密度，kg·m⁻³； $B_{0(T)}$ 为粪便的最大CH₄生产能力，m³·kg⁻¹； $MCF_{S,k}$ 为CH₄转化系数，%；k为气候区。

N₂O的排放因子计算公式为：

$$EF_{N_2O,粪污,T} = \sum_j [(EF_{N_2O,粪污,D,T} + EF_{N_2O,粪污,ID,T}) \times AP_T] \times 10^{-7}$$

N₂O的直接碳排放因子计算公式为：

$$EF_{N_2O,粪污,D,T} = Nex_T \times \left(\sum_k EF_{D,k} \times MS_{T,k} \right) \times \frac{44}{28}$$

N₂O的间接排放因子计算公式为：

$$EF_{N_2O,粪污,ID,T} = Nex_T \times \sum_k [(0.01 \times 20\% + 0.0075) \times \frac{Frac_{leachMS}}{100}] \times MS_{T,k} \times \frac{44}{28}$$

式中： $EF_{N_2O,粪污,D,T}$ 为N₂O直接排放因子，kg·a⁻¹·头⁻¹； $EF_{N_2O,粪污,ID,T}$ 为N₂O间接排放因子，kg·a⁻¹·头⁻¹； $EF_{D,k}$ 为N₂O-N直接排放因子，kg·kg⁻¹；0.01、0.0075为淋溶径

流产生的N₂O-N间接排放因子，kg·kg⁻¹；20%为气体挥发造成氮损失的比例，%； $Frac_{leachMS}$ 为淋溶径流造成氮损失的比例，本计算中取5%； $MS_{T,k}$ 为第T种畜禽的粪污在第k种粪污处理方式中所占比例，%。采用全球变暖潜能值，将CH₄与N₂O排放量折算为CO₂e，进行数据汇总。

1.4 多因素灰色模型构建

考虑到畜禽存栏情况较为复杂，单一因素的预测模型无法准确地对秦皇岛市未来畜禽养殖情况进行预测分析，研究采用政策、经济、历史存栏量多变量因素的复合灰色预测模型^[21]对秦皇岛市未来畜禽存栏情况进行预测。

目标变量：畜禽存栏量 $X^{(1)}$ (猪、牛、羊、家禽)。驱动因子：历史存栏量 $X^{(0)}$ (2013—2022年数据见表1)。政策导向指数 P_t ：基于《秦皇岛市“十四五”畜牧业绿色发展规划》量化，包括粪污综合利用率 U_t 和沼气覆盖率 B_t 的线性组合。经济水平 E_t ：畜牧业产值占农业总产值的比例，按年均增长率2.5%推算。

(1)对原始序列进行一次累加，以削弱随机性：

$$P^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k P_i(i)$$

$$E^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k E_i(i)$$

(2)构建微分方程：

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = b_1P^{(1)} + b_2E^{(1)} + c$$

离散化后得到白化方程：

$$X^{(0)}(k) + aX^{(1)}(k) = b_1P^{(1)}(k) + b_2E^{(1)}(k) + c$$

(3)参数估计(最小二乘法)：

将白化方程改写为矩阵形式 $Y=B\theta$ ，参数向量 $\theta=[a, b_1, b_2, c]^T$ 的最小二乘解为：

$$\theta = (B^T B)^{-1} B^T Y$$

(4)构造预测方程：

$$X^{(1)}(k) = [X^{(1)}(1) - \frac{b_1}{a}P^{(1)}(k) - \frac{b_2}{a}E^{(1)}(k) - \frac{c}{a}]e^{-a(k-1)} + \frac{b_1}{a}P^{(1)}(k) + \frac{b_2}{a}E^{(1)}(k) + \frac{c}{a}$$

1.5 碳减排潜力测算

根据秦皇岛市畜禽粪便实际管理情况设置4种情景。情景一：在2024年秦皇岛市现有畜禽粪便管理模式，经多因素灰色模型预测至2033年秦皇岛市畜禽存栏量，测算得到碳排放量，此为基线情景。情景二：假设秦皇岛市所有畜禽粪便均用于制作沼气，据此测算碳排放量，此为全制作沼气低碳情景。

情景三:假设秦皇岛市所有畜禽粪便均采用堆肥处理,据此测算碳排放量,此为全堆肥处理低碳情景。用基线情景和情景二、三碳排放量数据相减,即可得到两种管理方式的碳减排潜力。情景四:设置畜禽粪便堆肥、制作沼气、固体堆存3种管理方式的不同比例,以在2030年前实现秦皇岛市畜禽粪便碳排放增长达到拐点,此为动态管理情景。

1.5.1 基线情景

对秦皇岛市2024年15家标准化畜禽养殖场的调查结果显示,畜禽粪便主要有固体储存、堆肥处理和制作沼气这3种管理模式。在剔除信息不完全和统计结果误差较大的养殖场后,得出秦皇岛市标准化养殖场的畜禽粪便管理应用情况为:固体储存占15%,堆肥处理占65%,制作沼气占20%。依据该管理模式比例作为秦皇岛市现有的基线情景进行碳排放量计算。

1.5.2 全制作沼气低碳情景

研究发现,畜禽粪便通过厌氧发酵处理制作沼气不仅可以减少 CH_4 排放,还能提供清洁能源替代化石燃料满足能源需求^[22-23]。研究采用能源折算方法开展计算,即通过测算畜禽粪便在制作沼气管理方式下的 CH_4 产量,再将 CH_4 折算为煤的能源替代减排量,折标准煤系数采用国家标准《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2008)中规定的数值来测算制作沼气的碳减排量^[24-25]。

1.5.3 全堆肥处理低碳情景

堆肥管理模式不仅是一种低碳的粪便管理模式,同时还具有长远的潜在价值。由于化学氮肥施用是导致农田土壤 N_2O 气体排放的最重要因素之一,研究对畜禽粪便通过堆肥制作有机肥进行减排潜力测算^[26]。首先计算出畜禽粪便的产生量,再采用畜禽粪肥替代化肥潜力估算模型测算出有机肥量,并与传统化肥制作下产生的化石能源消耗进行数值对比以估算减排潜力^[27-29]。本情景主要考虑了粪便堆肥过程中产生的碳排放以及有机肥与化肥间的替代效应来对减排潜力进行分析。

1.5.4 管理方式动态调整情景

以提升堆肥比例为主减少因存栏量增长带来的碳排放增量;考虑到制作沼气的减排效益和成本,及实际沼气利用率低的现状,优化沼气比例;考虑到技术不可行区域,保留少量的固体储存比例($\leq 5\%$),见表2。通过逐年调整3类管理方式比例,最终实现在2030年前实现碳排放增长达到拐点。

2 结果与分析

2.1 碳排放现状核算结果与分析

对2013—2022年秦皇岛市畜禽粪便的碳排放测算结果表明,碳排放量呈现明显的波动趋势(图1)。2013—2014年碳排放量增加,主要受到畜禽产品需求增长和养殖规模扩展的影响,传统的粪便管理方式未能有效控制温室气体的排放。2015—2019年,随着低碳农业政策的实施,部分养殖场采用堆肥和沼气等低碳管理措施,使得碳排放有所减少。但是,2020—2022年,虽然低碳技术的推广力度不断加大,但由于畜禽存栏量的持续增长,整体碳排放量再次回升,年均增幅为6%。

基于2022年秦皇岛市现有畜禽存栏量与粪便管理模式对碳排放源进行分析(图2、图3), CH_4 和 N_2O 的排放主要来自猪和牛。猪在 CH_4 排放中的占比高

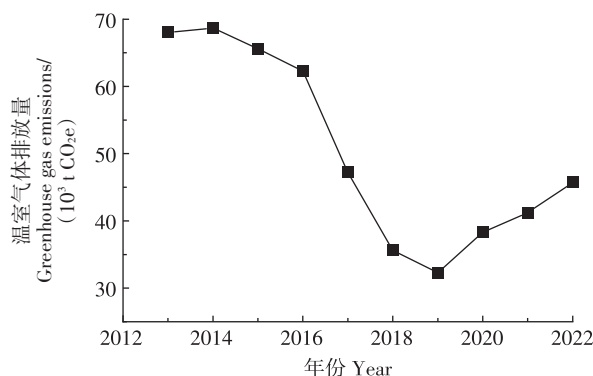


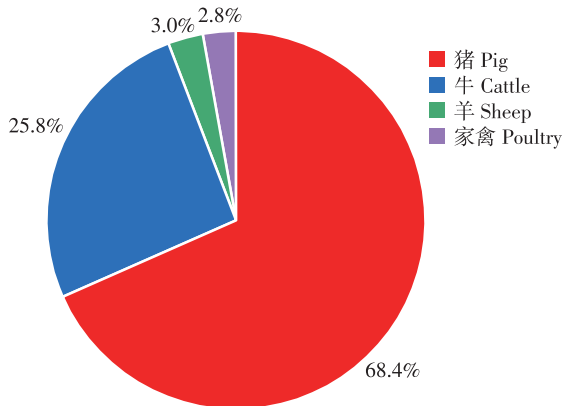
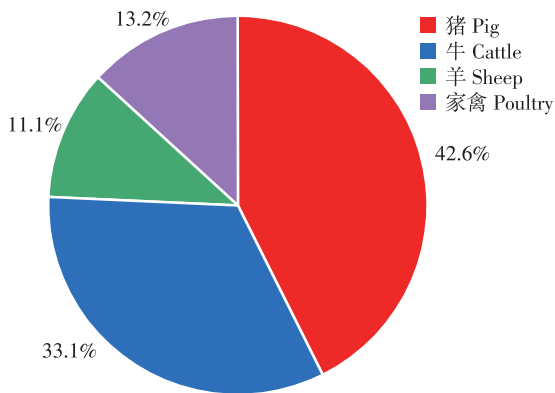
图1 秦皇岛市近10a碳排放趋势图

Figure 1 Trend of carbon emissions in Qinhuangdao City over the past decade

表2 畜禽粪便管理方式的特性与实施导向

Table 2 Characteristics and implementation orientation of livestock and poultry manure management methods

管理方式 Management method	核心优势 Core advantage	实施约束 Implementation constraint	政策导向 Policy orientation
堆肥处理	减排效率高、成本低	需配套农田消纳设施	优先扩容
制作沼气	能源替代、 CH_4 回收利用	沼渣沼液管理技术要求高	优先优化
固体储存	技术简单、无额外成本	温室气体逸散率高	限制固体储存比例 $\leq 5\%$

2022年CH₄排放CH₄ emissions by 2022图2 秦皇岛市畜禽粪便CH₄排放占比图Figure 2 Proportion of CH₄ emissions from livestock and poultry manure in Qinhuangdao City2022年N₂O排放N₂O emissions by 2022图3 秦皇岛市畜禽粪便N₂O排放占比图Figure 3 Proportion of N₂O emissions from livestock and poultry manure in Qinhuangdao City

达68.4%，牛为25.8%。尽管牛的存栏量明显低于猪，但其较高的碳排放因子和粪便中较高的有机物含量使得其CH₄排放水平较高。羊和家禽的CH₄排放占比较低，分别为3.0%和2.8%，这与它们较低的碳排放因子和低排放量相关。对于N₂O排放，牛和猪同样为主要排放源，分别占42.6%和33.1%，主要原因在于它们的粪便中含氮量较高，促进了N₂O的生成。相比之下，羊和家禽在N₂O的排放中所占比例较小，分别为11.1%和13.2%，这一现象与CH₄排放特征一致。

2.2 基线情景下碳排放预测结果与分析

经多因素灰色模型的预测，秦皇岛市未来几年畜禽存栏量将持续增长(表3)。基线情景下，预计到2030年，秦皇岛市畜禽粪便的碳排放量将达到137.9万tCO₂e，并且随着畜禽养殖量的增加碳排放量将继续上升(表4)。预测结果表明当前的粪便管理模式

表3 秦皇岛市未来主要4种畜禽存栏量表(头)

Table 3 Inventory of four major livestock and poultry in Qinhuangdao City in the future(head)

年份 Year	猪 Pig	牛 Cattle	羊 Sheep	家禽 Poultry
2030	1 350 000	183 500	1 201 000	19 070 000
2031	1 373 500	184 000	1 212 800	19 312 400
2032	1 391 200	184 200	1 220 500	19 502 700
2033	1 402 800	184 900	1 223 700	19 638 100

表4 秦皇岛市未来几年CO₂e排放(万t)Table 4 CO₂e emissions in Qinhuangdao City in the next few years(10⁴ t)

项目 Item	2030	2031	2032	2033
CO ₂ e排放量	137.9	146.37	169.1	185.93

难以有效减少碳排放。畜禽粪便的碳排放不仅受到存栏量变化的直接影响，还与养殖方式和粪便处理技术密切相关。为有效控制碳排放，未来可在减排技术和管理模式上进行优化。

2.3 全制作沼气和全堆肥处理低碳情景预测结果与分析

对情景二、情景三碳排放量进行对比分析，得出以下主要结论：在全堆肥处理低碳情景下碳减排潜力最大，预计到2030年可减排65.00万tCO₂e。堆肥处理不仅能有效减少CH₄和N₂O的排放，还能够替代化肥的使用，进一步减少农业生产中的碳排放，在未来的减排措施中具有重要地位。在全制作沼气低碳情景下，预计到2030年可实现45.36万tCO₂e的减排。制作沼气通过将畜禽粪便转化为能源，有助于减少温室气体排放，具有一定的减排潜力。但是由于沼液和沼渣的管理上仍存在资源浪费，其整体减排效果略低于堆肥处理。所以尽管制作沼气在能源替代方面表现出积极作用，但还需加强对该技术的优化。

2.4 管理方式动态调整情景

为实现碳排放拐点(年增长率≤0%)，研究设计管理方式动态调整情景：2024—2027年每年提升堆肥比例3%，充分利用其高效减排特性；2026年起调整沼气制作比例至15%；固体储存比例从15%降至5%，低碳覆盖率从85%提升至95%。结果表明(表5)：通过动态管理比例调整，秦皇岛市可于2028年实现畜禽粪便碳排放拐点(峰值为133.6万t)，2030年畜禽粪便碳排放量为131.9万t，相比基线情景实现6万t减排量。建议在2024—2027年对中小型养殖场提供堆肥设施补贴；2028年后将低碳覆盖率≥95%纳入养

表5 管理方式动态调整情景下的碳排放拐点路径

Table 5 Carbon emission inflection point paths under dynamic adjustment scenarios of management methods

年份 Year	固体储存 Solid storage/%	堆肥处理 Composting disposal/%	制作沼气 Biogas production/%	低碳覆盖率 Low-carbon coverage rate/%	碳排放量/(万 t) Carbon emission/(10 ⁴ t)	年增长率 Annual growth rate/%
2023	15	65	20	85	126.5	6.00
2024	12	68	20	88	130.2	2.90
2025	10	71	19	90	132.1	1.50
2026	8	74	18	92	133.2	0.80
2027	6	77	17	94	133.6	0.30
2028	5	80	15	95	133.5	-0.07
2029	5	82	13	95	132.8	-0.5
2030	5	85	10	95	131.9	-0.12

殖场环保许可强制指标;对固体储存>5%的区域征收碳税。

3 结论与建议

(1)猪和牛是秦皇岛市畜禽粪便碳排放的主要来源,可重点关注和优先考虑对猪和牛的粪便管理采取针对性减排措施。

(2)堆肥处理技术具有显著的减排效益,可优先发展堆肥作为畜禽粪便管理方式,特别是小型和中型养殖场。

(3)制作沼气处理具有一定的减排潜力,但其整体减排效果低于堆肥处理模式,需要在技术优化和管理上进一步提升,在大型养殖场可以采用。

(4)研究设计的畜禽粪便管理方式动态调整情景,可实现秦皇岛市畜禽粪便处理碳排放于2030年前出现拐点。

参考文献:

- [1] 菅瑞珍, 贾生美, 邢明勋, 等. 畜牧业温室气体的排放源及减排措施[J]. 当代畜禽养殖业, 2022, 32(6): 62-64. JIAN R Z, JIA S M, XING M X, et al. Greenhouse gas emission sources and emission reduction measures in animal husbandry[J]. *Contemporary Livestock and Poultry Farming*, 2022, 32(06): 62-64.
- [2] 联合国粮食及农业组织. 朱聪, 译. 以畜牧养殖应对气候变化: 全球温室气体排放评估与减排[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 15. FAO. ZHU C, trans. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 15.
- [3] 杨攀, 王猷鸿, 马现永, 等. 养猪生产碳排放核算方法、核算进展和减排技术研究报告[J]. 中国畜牧杂志, 2024, 60(8): 34-43. YANG P, WANG Y H, MA X Y, et al. The carbon emission accounting method for pig farming, accounting, and frontiers in carbon-mitigation technology research[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2024, 60(8): 34-43.
- [4] 安婧, 丁子明, 高程程, 等. 畜禽粪便污染的环境风险与资源化处理技术分析[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4764-4774. AN J, DING Z M, GAO C C, et al. Analysis of the environmental risk of livestock manure pollution and resource treatment technology[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(8): 4764-4774.
- [5] LIU Z, LIN H, ZHANG S, et al. Valorization of livestock waste and carbon neutrality[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2023, 10(3): 333-340.
- [6] 张哲瑜. 生猪养殖企业温室气体排放核算方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2018: 7-16. ZHANG Z Y. Study on the accounting method of greenhouse gas emission of pig breeding enterprises[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018: 7-16.
- [7] 娜仁花, 张东方, 王月, 等. 内蒙古地区家畜温室气体排放量估算研究[J]. 家畜生态学报, 2015, 36(3): 72-77. NA R H, ZHANG D F, WANG Y, et al. Estimation of greenhouse gas emissions by livestock in Inner Mongolia[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2015, 36(3): 72-77.
- [8] 韦秀丽, 高立洪, 徐进, 等. 重庆市畜牧业温室气体排放量评估[J]. 西南农业学报, 2013, 26(3): 1235-1239. WEI X L, GAO L H, XU J, et al. Evaluation on greenhouse gas emission of livestock in Chongqing City[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(3): 1235-1239.
- [9] 芮茜艺, 鞠昌华, 朱琳. 江苏省畜禽养殖温室气体排放空间格局分析[J]. 家畜生态学报, 2018, 39(1): 54-59. RUI H Y, JU C H, ZHU L. Analysis on spatial patterns of greenhouse gas emissions from livestock and poultry breeding in Jiangsu Province[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2018, 39(1): 54-59.
- [10] 王月, 张东方, 丁莹, 等. 内蒙古呼和浩特市家畜温室气体排放量估算[J]. 家畜生态学报, 2014, 35(10): 68-73. WANG Y, ZHANG D F, DING Y, et al. Greenhouse gas emission by livestock in Hohhot[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2014, 35(10): 68-73.
- [11] 周昕彦, 郑华宝. “双碳”背景下我国农业碳减排潜力研究进展[J]. 生物学杂志, 2024, 41(2): 1-7. ZHOU X Y, ZHENG H B. Research progress on carbon reduction potential of agriculture in China[J]. *Journal of Biology*, 2024, 41(2): 1-7.
- [12] 袁军委, 王羿, 林思远, 等. 好氧堆肥企业碳减排潜力及碳足迹核

- 算方法[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12):99-110. YUAN J W, WANG Y, LIN S Y, et al. Study on carbon emission mitigation potential and the carbon footprint accounting method of aerobic composting enterprises. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12):99-110.
- [13] 杨斌, 尹芳, 赵兴玲, 等. 云南不同地区畜禽粪便资源量及沼气潜力分析[J]. 农业与技术, 2023, 43(20):56-60. YANG B, YIN F, ZHAO X L, et al. Analysis of livestock and poultry manure resources and biogas potential in different regions of Yunnan Province[J]. *Agriculture and Technology*, 2023, 43(20):56-60.
- [14] 李杨. 基于云南省农村沼气发展现状调研的碳减排潜力测算与发展对策研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2022: 61-72. LI Y. Research on the carbon emission reduction potential and development strategy of rural biogas based on the field survey in Yunnan Province [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2022:61-72.
- [15] 李庆, 秦文杰, 曹秀芳, 等. 基于黑水虻转化的畜禽粪便资源化利用研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6):169-175. LI Q, QIN W J, CAO X F, et al. Research progress on resource utilization of livestock and poultry manure based on transformation by black soldier fly[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2022, 41(6):169-175.
- [16] 韦春波, 李洋洋, 冯晓宁, 等. 基于新陈代谢GM(1, 1)模型的家禽存栏量预测[J]. 中国家禽, 2016, 38(4):63-65. WEI C B, LI Y Y, FENG X N, et al. Poultry inventory prediction based on a metabolism GM(1, 1) model[J]. *China Poultry*, 2016, 38(4):63-65.
- [17] 丁圆苹. 灰色预测模型的优化研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2022: 13-64. DING Y P. Research on the optimization of grey prediction models[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2022:13-64.
- [18] 刘学之, 孙鑫, 朱乾坤, 等. 中国二氧化碳排放量相关计量方法研究综述[J]. 生态经济, 2017, 33(11):21-27. LIU X Z, SUN X, ZHU Q K, et al. Review on the measurement methods of carbon dioxide emissions in China[J]. *Ecological Economy*, 2017, 33(11):21-27.
- [19] 罗智星, 仓玉洁, 杨柳, 等. 面向设计全过程的建筑物碳排放计算研究方法[J]. 建筑科学, 2021, 37(12):1-7. LUO Z X, CANG Y J, YANG L, et al. Study on the design-oriented calculation methods of building embodied carbon emissions[J]. *Building Science*, 2021, 37(12):1-7.
- [20] 王萍萍, 赵永椿, 张军营, 等. 双碳目标下燃煤电厂碳计量方法研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(10):170-183. WANG P P, ZHAO Y C, ZHANG J Y, et al. Research progress on carbon measurement methods of coal-fired power plants under the background of carbon neutrality[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(10):170-183.
- [21] 周志, 田楠, 赵宇红. 天津市义务教育学龄人口规模预测与分析: 基于多因素灰色预测模型和人口推算法[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(3):49-55. ZHOU Z, TIAN N, ZHAO Y H. On analysis and prediction of schooling population in compulsory education of Tianjin: based on multi-factor gray model and recursive calculation method[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 42(3):49-55.
- [22] 邓良伟, 吴有林, 丁能水, 等. 畜禽粪污资源化利用研究进展[J]. 中国沼气, 2019, 37(5):3-14. DENG L W, WU Y L, DING N S, et al. A review of energy utilization of animal manure[J]. *China Biogas*, 2019, 37(5):3-14.
- [23] ABBASI T, TAUSEEF S M, ABBASI S A. Anaerobic digestion for global warming control and energy generation: an overview[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5):3228-3242.
- [24] 秦文弟, 黄凌志, 蒋湖波, 等. 不同牲畜粪便厌氧发酵产沼气性能研究[J]. 中国沼气, 2016, 34(4):37-40. QIN W D, HUANG L Z, JIANG H B, et al. Biogas production performance of different livestock dung[J]. *China Biogas*, 2016, 34(4):37-40.
- [25] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 综合能耗计算通则: GB/T 2589—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. General rules for calculation of the comprehensive energy consumption: GB/T 2589—2020[S]. Beijing: China Standard Press, 2020.
- [26] 石晓晓, 郑国砥, 高定, 等. 中国畜禽粪便养分资源总量及替代化肥潜力[J]. 资源科学, 2021, 43(2):403-411. SHI X X, ZHENG G D, GAO D, et al. Quantity of available nutrient in livestock manure and its potential of replacing chemical fertilizers in China[J]. *Resources Science*, 2021, 43(2):403-411.
- [27] 刘天旭, 陈昭辉, 刘继军. 畜禽养殖粪污处理研究进展[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2022, 15(17):26-30. LIU T X, CHEN Z H, LIU J J. Research progress of manure treatment in livestock and poultry breeding[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2022, 15(17):26-30.
- [28] 路国彬, 王夏晖. 基于养分平衡的有机肥替代化肥潜力估算[J]. 中国猪业, 2016, 11(11):15-18. LU G B, WANG X H. Potential estimation of organic fertilizer replacing chemical fertilizer based on nutrient balance[J]. *China Swine Industry*, 2016, 11(11):15-18.
- [29] 柴如山, 王擎运, 叶新新, 等. 我国典型省份小麦和玉米农田化学氮肥施用与生产运输过程的温室气体排放量估算[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3):707-713. CHAI R S, WANG Q Y, YE X X, et al. Estimation of greenhouse gas emissions from production, transportation and fertilization of synthetic nitrogen for wheat and maize in typical provinces of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3):707-713.

(责任编辑:宋潇)