



中国畜牧业氧化亚氮排放时空演变特征及影响因素

韩茹梅, 王颖, 樊益绮, 尚祉余

引用本文:

韩茹梅, 王颖, 樊益绮, 等. 中国畜牧业氧化亚氮排放时空演变特征及影响因素[J]. *农业资源与环境学报*, 2026, 43(1): 186–193.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0953>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国生猪主产区养殖碳排放时空特征与脱钩效应研究

汪爱娥, 游梦琪, 王德海

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 269–275 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0327>

惠州市畜禽养殖污染耕地承载负荷估算及风险评价

宋江燕, 吴根义, 苏文幸, 余磊, 马晓蕊, 柳王荣, 袁俊杰

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 191–197 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0312>

安徽省畜禽养殖粪尿及养分含量时空分布特征

张靖雨, 汪邦稳, 袁先江, 龙昶宇

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 295–304 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0374>

脲酶/硝化抑制剂减少农田土壤氮素损失的作用特征

宋涛, 尹俊慧, 胡兆平, 王亮亮, 张强, 陈清, 曹文超

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 585–597 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0344>

丹江口水库总氮、氨氮遥感反演及时空变化研究

刘轩, 赵同谦, 蔡太义, 肖春艳, 陈晓舒, 张文静

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 829–838 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0195>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

韩茹梅, 王颖, 樊益琦, 等. 中国畜牧业氧化亚氮排放时空演变特征及影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 186–193.

HAN R M, WANG Y, FAN Y Q, et al. Spatial-temporal evolution and influencing factors of nitrous oxide emissions from animal husbandry in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2026, 43(1): 186–193.



开放科学 OSID

中国畜牧业氧化亚氮排放时空演变特征及影响因素

韩茹梅, 王颖*, 樊益琦, 尚社余

(中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074)

摘要:为评估我国畜牧业氧化亚氮(N_2O)排放时空演变特征、脱钩状态及影响因素,本研究采用排放因子法核算2000—2022年全国31个省份畜牧业 N_2O 排放量,从总量、结构和强度三个角度分析其演进趋势和分布特征,利用Tapio弹性脱钩模型探究其与畜牧业产值间的脱钩状态,并采用对数平均迪氏分解法(LMDI)厘定影响因素及其贡献度。结果表明:从总量来看,全国畜牧业 N_2O 排放量呈上升-下降-反弹趋势,到2022年排放量达 2.418×10^5 t,排放高值区为西南、华北和华中地区;从结构来看,猪粪是畜牧业 N_2O 第一大排放源;从强度来看,各省 N_2O 排放强度均呈下降趋势,其中西北和西南地区降幅较大。研究期内我国畜牧业 N_2O 排放与其产值之间主要呈弱脱钩和强脱钩交替状态,稳定性较差。经济和人口规模因素促进了畜牧业 N_2O 排放,其中经济因素贡献最大,约为 6.173×10^5 t;效率和结构因素抑制了排放,效率因素是主要抑制因素,总减排贡献为 4.567×10^5 t。

关键词:畜牧业;氧化亚氮排放;时空演变;脱钩分析;影响因素

doi: 10.13254/j.jare.2024.0953

Spatial-temporal evolution and influencing factors of nitrous oxide emissions from animal husbandry in China

HAN Rumei, WANG Ying*, FAN Yiqi, SHANG Zhiyu

(School of Public Administration, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: To assess the spatial-temporal evolution, decoupling status, and influencing factors of nitrous oxide (N_2O) emissions from animal husbandry in China, this study applied the emission factor method to estimate N_2O emissions across 31 provinces from 2000 to 2022. Through multidimensional analysis encompassing total emissions, structural composition, and emission intensity, we systematically revealed the evolutionary trends and spatial distribution patterns. The Tapio elasticity decoupling model was applied to examine the emission-output value relationship of the animal husbandry, complemented by the Logarithmic Mean Divisia index (LMDI) model to determine the influencing factors and their contributions. Results showed that, from the total amount, national N_2O emissions of the animal husbandry exhibited a growth-decline-rebound trend, reaching 2.418×10^5 t in 2022, with high-emissions clusters concentrated in southwest, north, and central China. In terms of structure, swine manure constituted the dominant emission source. In terms of intensity, the intensity of N_2O demonstrated a declining trend across all provinces, particularly pronounced in the northwest and southwest regions. During the study period, the relationship between N_2O emissions and its production value primarily alternated between weak decoupling and strong decoupling, exhibiting poor stability. The analysis of influencing factors revealed that both economic and population size factors contributed to the increase in N_2O emissions from the animal husbandry, with economic factors being the predominant driver at approximately 6.173×10^5 t. In contrast, efficiency and structural factors acted as suppressors of emissions, with the efficiency factor playing the leading role in emission reduction, contributing a total of 4.567×10^5 t.

Keywords: animal husbandry; nitrous oxide emission; spatial-temporal evolution; decoupling analysis; influencing factor

收稿日期: 2024-12-04 录用日期: 2025-05-15

作者简介: 韩茹梅(2001—),女,四川内江人,硕士研究生,研究方向为资源环境政策。E-mail: 1202311030@cug.edu.cn

*通信作者: 王颖 E-mail: yingwang@cug.edu.cn

21世纪以来,人类面临着资源能源匮乏、污染加剧和全球变暖等各种问题。随着全球气候变化的加剧,温室气体排放量的增加已成为威胁人类生存的重大环境问题^[1]。畜牧业是发展中国家增长最快的产业之一^[2]。然而,畜禽养殖过程中会释放大量温室气体^[3],从而给气候和环境造成压力。《联合国气候变化框架公约》有关报告显示,全世界有17亿人依赖畜牧系统,畜牧业生产总值占全球农业GDP的40%。氧化亚氮(N₂O)是全球变暖贡献率第三的温室气体,其主要来源之一是畜禽养殖中的粪便^[4]。《世界气象组织(WMO)温室气体公报》显示,2022年全球大气中N₂O平均浓度达335.8 μg·kg⁻¹,二氧化碳(CO₂)平均浓度为417.9 mg·kg⁻¹,但N₂O在100年时间尺度的全球变暖潜势(GWP₁₀₀)是CO₂的300倍^[5]。同时,N₂O存在大气中的时间较长,需要120年左右才能被完全分解。因此,控制N₂O排放对于减缓气候变化有着不可忽视的作用。

我国是全球第二大经济体和最大的发展中国家,畜牧业是我国农业农村经济的支柱产业^[6]。我国确定的贡献目标和约束性碳强度指标主要是针对CO₂排放制定^[7]。近几年,我国逐渐扩大了温室气体的管控范围,将非二氧化碳温室气体也纳入其中。2021年《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中强调加强对CH₄和N₂O等非二氧化碳温室气体的管理。2023年《关于加强合作应对气候危机的阳光之乡声明》中提到,中美两国计划就各自管理N₂O排放的措施开展合作。因此,控制畜牧业N₂O排放对于我国全面落实温室气体减排政策与行动有重要意义。

目前,N₂O排放问题已引起学者和决策者的广泛关注^[8-10]。在核算方面,已有的研究普遍使用Meta分析^[11-12]、可计算一般均衡模型(CGE)^[13]以及IPCC排放系数法^[14-15],评估畜牧业温室气体排放,同时刻画排放的时空演化规律^[16]。其中,IPCC排放系数法对于不同区域展现出较强的适应性,联合国粮农组织(FAO)、世界银行(WB)、世界资源研究所(WRI)等多个机构,以及全球大气研究排放数据库(EDGAR),都采纳此标准来编制温室气体排放清单。此外,学者们利用Tapio脱钩模型对各行业碳排放与经济发展之间的关系开展大量研究。例如:冯博等^[17]探究了对建筑业碳排放与经济发展的关系,发现2004—2011年大部分省份处于碳排放的弱脱钩状态;杨青等^[18]研究交通行业碳排放与经济发展的关系,发现2012—2021

年40.0%的省份实现了绝对脱钩,53.3%的省份实现了相对脱钩。同时,学者们围绕温室气体排放影响因素开展广泛的研究。常见的影响因素方法包括指数分解分析法(IDA)和结构分解分析法(SDA)^[19-20]。其中,对数平均迪氏分解法(LMDI)是一种重要的IDA方法,能识别影响因素并提供具体、准确和完整的分解结果,还能消除分解过程中的“0”值和残差问题^[21],因此被广泛应用^[22-23]。现有研究较多关注我国CO₂排放量,而对于非二氧化碳温室气体排放(如CH₄、N₂O等)的研究相对较少。且多数研究往往局限在排放总量的分析,鲜有从多个维度关注畜牧业N₂O温室气体排放的时空演化特征。因此,本研究在核算畜牧业N₂O排放基础上,从总量-结构-强度视角揭示我国畜牧业N₂O排放的动态演进趋势和分布特征,探究其与经济发展之间的关系,厘清不同影响因素对我国畜牧业N₂O排放的贡献程度,以期为我国畜牧业减排以及可持续发展提供科学依据与决策参考。

1 材料与方法

1.1 IPCC排放因子法

畜牧业N₂O是指畜禽粪便施入土壤前存储及处理所产生的N₂O气体,排放源包括奶牛、非奶牛、水牛、绵羊、山羊、猪、家禽、马、驴、骡和骆驼等,基于IPCC排放因子法和《省级温室气体清单编制指南(试行)》(下称《指南》)推荐方法^[24],其计算公式为:

$$N = \sum EF_{\alpha} \times LN_{\alpha} \times 10^{-7} \quad (1)$$

式中: N 为畜牧业N₂O排放量,10⁴ t; LN_{α} 为 α 类畜禽的数量,头; EF_{α} 为 α 类畜牧业N₂O排放因子,kg·头⁻¹。畜牧业N₂O排放因子采用《指南》推荐值,见表1。

此外,畜牧业N₂O排放强度指标有利于深入揭示畜牧业产值增长与N₂O排放量之间的相互作用关系,其计算公式为:

$$IN = \frac{N}{LO} \quad (2)$$

式中: IN 为畜牧业N₂O排放强度(代表单位畜牧业产值释放的N₂O量),t·万元⁻¹; LO 为畜牧业总产值,亿元。

1.2 Tapio脱钩模型

Tapio^[25]在其研究中提出脱钩弹性,旨在量化分析环境压力与经济发展动力之间的关系,一般采用两者之间的比值来表示^[26]。

$$D = \frac{\Delta N/N}{\Delta LS/LS} = \frac{(N_i - N_{i-1})/N_{i-1}}{(LS_i - LS_{i-1})/LS_{i-1}} \quad (3)$$

式中: D 代表脱钩弹性值,即脱钩指数; LS 表示 i 年与

表1 不同区域畜牧业 N₂O 的排放因子(kg·头⁻¹·a⁻¹)

Table 1 Emission factors for N₂O from the animal husbandry in different regions(kg·head⁻¹·a⁻¹)

区域 Region	奶牛 Dairy cattle	非奶牛 Non-dairy cattle	水牛 Buffalo	绵羊 Sheep	山羊 Goat	猪 Swine	家禽 Poultry	马 Horse	驴 Donkey	骡 Mule	骆驼 Camel
华北	1.846	0.794	—	0.093	0.093	0.227	0.007	0.330	0.188	0.188	0.330
东北	1.096	0.913	—	0.057	0.057	0.266	0.007	0.330	0.188	0.188	0.330
华东	2.065	0.846	0.875	0.113	0.113	0.175	0.007	0.330	0.188	0.188	0.330
华中	1.710	0.805	0.860	0.106	0.106	0.157	0.007	0.330	0.188	0.188	0.330
华南	1.710	0.805	0.860	0.106	0.106	0.157	0.007	0.330	0.188	0.188	0.330
西南	1.884	0.691	1.197	0.064	0.064	0.159	0.007	0.330	0.188	0.188	0.330
西北	1.447	0.545	—	0.074	0.074	0.195	0.007	0.330	0.188	0.188	0.330

$i-1$ 年畜牧业产值变化的百分比,%。 $\Delta N/N$ 、 $\Delta LS/LS$ 分别表示畜牧业发展面临的环境压力 and 经济发展动力,具体表现为我国畜牧业的 N₂O 排放增长率以及畜牧业产值增长率,以前一年为基准年。相关的脱钩指数指标如表2所示。

借鉴李阳等^[27]的研究方法,本研究对 N₂O 排放量与畜牧业产值间的关系进行分析,推导出的脱钩稳定性公式见式(4):

$$S_d = \frac{1}{n-1} = \sum \left| \frac{D_i - D_{i-1}}{D_{i-1}} \right| \quad (4)$$

式中: n 代表样本数; D_i 、 D_{i-1} 分别表示第*i*年和*i-1*年的脱钩弹性值; S_d 则是衡量脱钩稳定性的指标,数值越小表明脱钩状态越稳定,反之则表示脱钩越不稳定。

表2 Tapio 脱钩弹性等级分类

Table 2 Classification of Tapio decoupling elasticity levels

脱钩状态 Decoupling status	$\Delta N/N$	$\Delta LS/LS$	脱钩指数 Decoupling index	状态 Status	
脱钩	强脱钩	<0	>0	$t < 0.00$	理想状态
	弱脱钩	>0	>0	$0.00 \leq t < 0.80$	较理想状态
	衰退脱钩	<0	<0	$t > 1.20$	可允许状态
连接	增长连接	>0	>0	$0.80 \leq t \leq 1.20$	不可取状态
	衰退连接	<0	<0	$0.80 \leq t \leq 1.20$	可允许状态
负脱钩	扩张负脱钩	>0	>0	$t > 1.20$	不可取状态
	弱负脱钩	<0	<0	$0.00 \leq t < 0.80$	不可取状态
	强负脱钩	>0	<0	$t < 0.00$	最不理想状态

1.3 LMDI 模型

本研究借鉴王诗云等^[28]的研究,采用扩展的 Kaya 恒等式选取畜牧业 N₂O 排放的相关驱动因素,具体如下:

$$N = \frac{N}{LO} \times \frac{LO}{GDP} \times \frac{GDP}{P} \times P \quad (5)$$

$$IE = \frac{N}{LO}; SE = \frac{LO}{GDP}; EE = \frac{GDP}{P} \quad (6)$$

式中: P 为人口数,亿人; IE 为畜牧业生产效率(畜牧业 N₂O 排放强度); SE 为畜牧业产业结构(畜牧业产

值在 GDP 中的占比); EE 为经济因素(人均 GDP)。上述指标均经过标准化处理,各指标之间具有可比性。

为了进一步厘定各驱动因素对畜牧业 N₂O 排放的贡献,参考郭玮等^[29]的研究,采用 LMDI 模型的加和分解法来分析各因素对畜牧业 N₂O 排放的影响。

$$\Delta N = N^k - N^0 = \Delta IE + \Delta SE + \Delta EE + \Delta P \quad (7)$$

$$\Delta IE = \sum \frac{N_i^k - N_i^0}{\ln N_i^k - \ln N_i^0} \times \ln \frac{IE_i^k}{IE_i^0} \quad (8)$$

$$\Delta SE = \sum \frac{N_i^k - N_i^0}{\ln N_i^k - \ln N_i^0} \times \ln \frac{SE_i^k}{SE_i^0} \quad (9)$$

$$\Delta EE = \sum \frac{N_i^k - N_i^0}{\ln N_i^k - \ln N_i^0} \times \ln \frac{EE_i^k}{EE_i^0} \quad (10)$$

$$\Delta P = \sum \frac{N_i^k - N_i^0}{\ln N_i^k - \ln N_i^0} \times \ln \frac{P_i^k}{P_i^0} \quad (11)$$

式中: ΔN 为畜牧业 N₂O 变化量, N^0 是基期畜牧业 N₂O 排放量, N^k 是第*k*期畜牧业 N₂O 排放量, ΔIE 、 ΔSE 、 ΔEE 和 ΔP 分别为由效率因素、结构因素、经济因素和人口规模因素导致的畜牧业 N₂O 增减变化量,单位均为万 t。式(7)~(11)中,各指标以各自初始值为底进行标准化处理,避免产生偏差。

1.4 数据来源

本研究所需的数据来源于《中国统计年鉴》《中国农业年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国畜牧兽医年鉴》以及我国 31 个省市(不含港澳台)的相关统计年鉴。

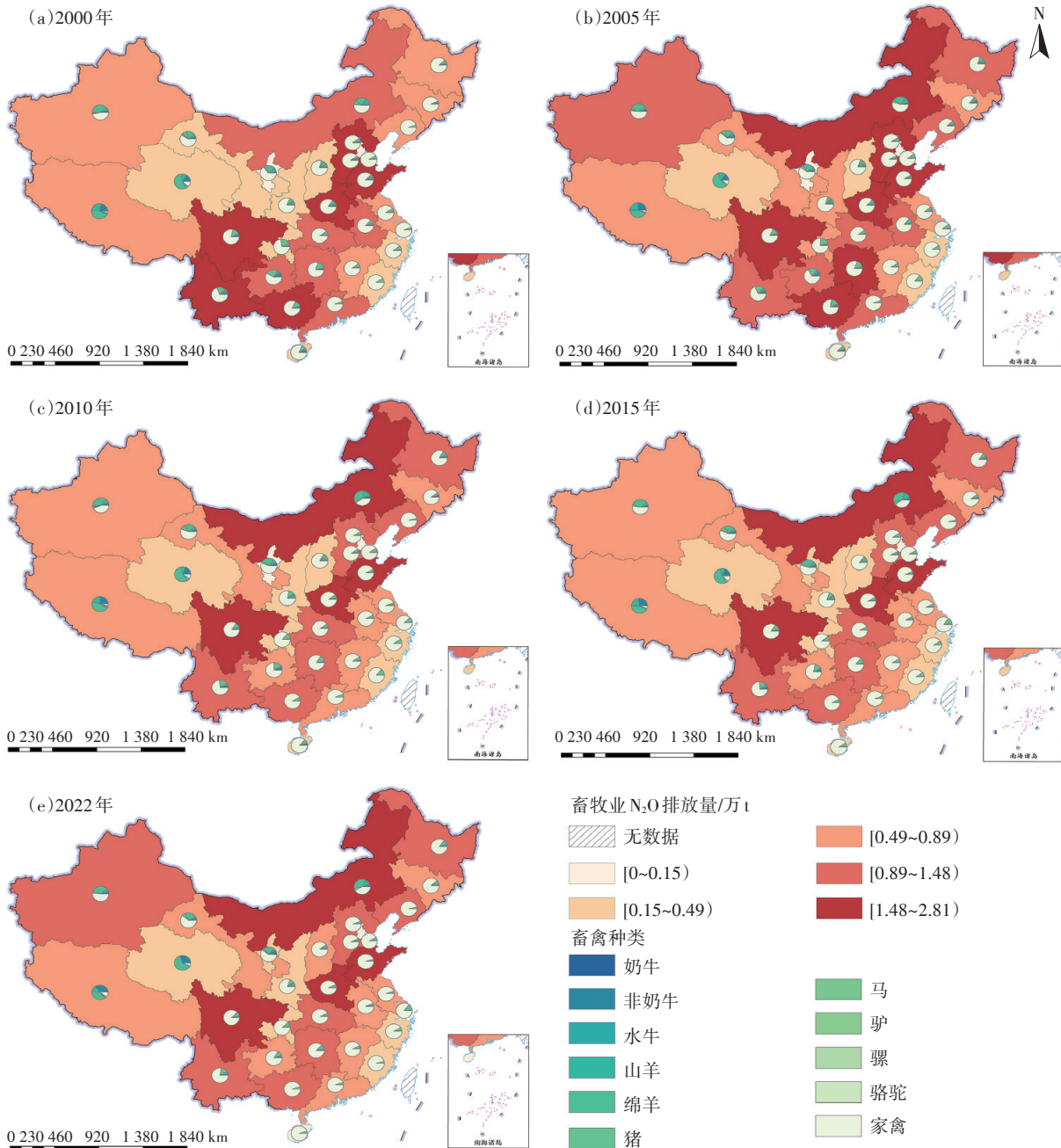
2 结果与分析

2.1 中国畜牧业 N₂O 排放时空演变特征

为深入剖析我国畜牧业 N₂O 排放量的动态演进趋势和空间分布特征,本研究从总量、结构和强度三个维度开展分析。从排放总量上来看,研究期内,我国畜牧业的 N₂O 排放量呈现上升-下降-反弹的变化趋势。具体而言,2000—2005 年,畜牧业 N₂O 排放呈现出明显的上升趋势,从 2000 年的 2.633×10⁵ t 上升至 2005 年的 2.993×10⁵ t,增幅为 13.67%。然而,2005

年排放开始下降,降幅达18.14%,到2015年排放量为 2.450×10^5 t。值得注意的是,2015—2022年,排放呈现反弹趋势,由2015年的 2.450×10^5 t下降到2019年的 2.049×10^5 t后,回升至2022年的 2.418×10^5 t。从空间分布看,排放区域差异明显(图1),排放高值区主要集中在我国的西南、华北和华中地区。河南、四川和山东三个省份排放量最高,年均排放量分别为 2.29×10^4 、 2.07×10^4 t和 1.93×10^4 t。排放低值区集中在华东以及西北地区,上海最低,排放量为500 t。

从畜禽结构上来看,猪是我国畜牧业 N_2O 最主要排放源(33%),其次是非奶牛(27%)和家禽(16%)。2000—2022年,猪粪导致的 N_2O 排放量从 7.74×10^4 t增至 8.02×10^4 t,河南、四川是主要排放省份。家禽 N_2O 排放量从 3.25×10^4 t增至 4.74×10^4 t,增幅为45.85%,主要集中在山东、广西、广东等地。非奶牛 N_2O 排放量从 9.44×10^4 t降至 6.58×10^4 t。此外,奶牛、山羊和绵羊三种牲畜 N_2O 排放增幅较大,保持中等排放水平,多分布在四川、云南、内蒙古等地。骡粪导致



审图号:GS(2025)2653号

图1 我国畜牧业 N_2O 排放的时空演变特征

Figure 1 Spatial-temporal variation characteristics of N_2O emissions from animal husbandry in China

的N₂O排放量很低,对总排放量影响不大。

从强度上看,2000—2022年各省N₂O排放强度呈下降趋势,平均强度从2000年的0.004 6 t·万元⁻¹下降至2022年的0.000 7 t·万元⁻¹。北京、天津和上海在研究期内畜牧业N₂O排放强度变动幅度较小,分别为-0.000 6、-0.001 0 t·万元⁻¹和-0.000 3 t·万元⁻¹,长期属于排放强度低值区。西北、西南地区排放强度降幅较大,其中西藏、青海、贵州和云南N₂O排放强度减少值均超过0.007 0 t·万元⁻¹,尤其是西藏下降了0.016 7 t·万元⁻¹,但其仍是排放强度最高的地区。

2.2 我国畜牧业N₂O排放与畜牧业产值间的脱钩分析

为进一步研究我国畜牧业N₂O排放量和畜牧业产值的脱钩关系,本研究采用Tapio弹性脱钩模型对二者关系进行分析(表3)。2000—2022年我国畜牧业N₂O排放量与其产值间的总脱钩弹性为-0.018 2,说明整体上呈强脱钩状态。具体到各时段,脱钩状况并没有保持这一理想状态。其中,2000—2005年N₂O排放与畜牧业产值之间始终处于弱脱钩状态,属于较为理想的状态。2005—2010年,脱钩状况呈强脱钩状态,即畜牧业N₂O排放量减少、产值增加的理想状态。2010—2015年间,脱钩状况呈弱脱钩和强脱钩交替状态。自2016年以来,我国畜牧业N₂O排放量与产值间的关系出现衰退连接向强脱钩的逐步改善过程,但这一时段呈现出增长连接、衰退连接和强负脱钩等多种状态。同时,衡量脱钩状态稳定性指标*S_d*结果为3.71,其值远远超过1,说明虽然脱钩状态从整体上来看主要呈现出弱脱钩和强脱钩两种状态,但从2005年起,由弱脱钩状态转为强脱钩状态,脱钩效果增强,但其脱钩状态并不稳定。

2.3 我国畜牧业N₂O排放影响因素分析

为厘清影响排放的主要因素,本研究采取LMDI模型对2000—2022年我国畜牧业N₂O排放进行分析,图2展现了研究期内畜牧业N₂O排放量的变化以及各影响因素的贡献程度。

2000—2005年,结构因素及效率因素分别导致我国畜牧业N₂O排放减少了3.63×10⁴、1.306×10⁵ t。然而,人口规模因素和经济因素导致其增加5.6×10³、1.973×10⁵ t,在这一时期,经济因素发挥了关键的推动力,而人口规模因素对整体贡献较为有限。2005年排放量相比于2000年提升了3.60×10⁴ t。2005—2010年间,人口规模因素、经济因素继续导致排放量增加;结构因素和效率因素有效减少排放,使得2010年畜牧业N₂O排放相较于2005年降低了5.76×10⁴ t。2010—

表3 2000—2022年我国畜牧业N₂O排放与畜牧业总产值间的脱钩状况

Table 3 Decoupling between N₂O emissions from the animal husbandry and the animal husbandry output in China (2000—2022)

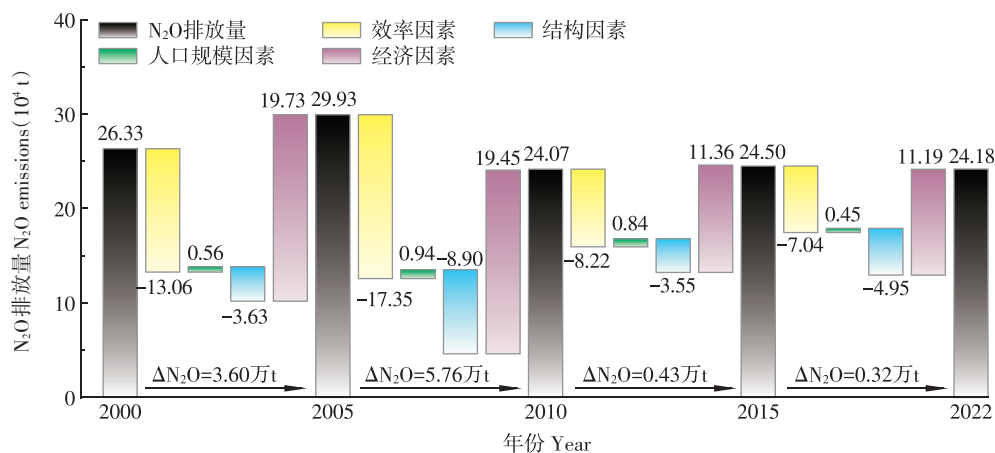
时间段 Time period	ΔN/N	ΔLS/LS	脱钩指数 Decoupling index	脱钩类型 Decoupling status
2000—2001	0.027 7	0.077 1	0.358 9	弱脱钩
2001—2002	0.016 5	0.061 7	0.266 5	弱脱钩
2002—2003	0.030 3	0.128 2	0.236 1	弱脱钩
2003—2004	0.036 3	0.276 2	0.131 3	弱脱钩
2004—2005	0.019 4	0.093 4	0.207 2	弱脱钩
2005—2006	-0.012 2	0.024 8	-0.494 1	强脱钩
2006—2007	-0.161 4	0.182 2	-0.886 2	强脱钩
2007—2008	-0.039 0	0.276 4	-0.141 0	强脱钩
2008—2009	0.011 4	-0.054 1	-0.210 0	强负脱钩
2009—2010	-0.001 0	0.069 7	-0.015 0	强脱钩
2010—2011	0.001 5	0.237 4	0.006 3	弱脱钩
2011—2012	0.011 9	0.055 1	0.215 2	弱脱钩
2012—2013	-0.005 1	0.045 8	-0.110 7	强脱钩
2013—2014	0.007 9	0.018 3	0.431 2	弱脱钩
2014—2015	0.001 5	0.028 5	0.053 1	弱脱钩
2015—2016	-0.023 6	0.064 6	-0.365 8	强脱钩
2016—2017	-0.064 9	-0.073 9	0.878 8	衰退连接
2017—2018	-0.019 1	-0.022 6	0.845 8	衰退连接
2018—2019	-0.065 9	0.152 2	-0.432 9	强脱钩
2019—2020	0.103 5	0.217 8	0.475 3	弱脱钩
2020—2021	0.047 5	-0.008 8	-5.378 9	强负脱钩
2021—2022	0.020 6	0.018 6	1.107 0	增长连接
2000—2022	-0.081 8	4.498 5	-0.018 2	强脱钩

2015年,人口规模因素、经济因素对排放的影响持续,但结构和效率因素改进的减排效果减弱。长期来看,减排效果可能因技术和结构因素趋于稳定而降低。2015—2022年,各因素的影响趋于稳定,贡献程度变化不大。

总体而言,经济因素和人口规模因素的估计值为正,即经济因素和人口规模因素与畜牧业N₂O排放量呈正相关关系,两者都显示出正效应。经济因素起主要的正向作用,总贡献量为6.173×10⁵ t。效率因素和结构因素测算值为负值,表明这两个因素对畜牧业N₂O排放量增长具有抑制作用。其中效率因素总贡献量为-45.67×10⁴ t,其抑制作用最为显著。

3 讨论

基于总量-结构-强度的分析视角,我国畜牧业N₂O排放存在显著的时空分异特征。首先,从排放总量演变来看,2000—2022年我国畜牧业N₂O排放经过

图2 我国畜牧业N₂O排放的影响因素Figure 2 Influencing factors of N₂O emissions from animal husbandry in China

上升-下降-反弹的波动性下降趋势,这一趋势与学界多数研究结论^[13,14,30]相一致。具体而言,2005年畜牧业N₂O排放达到历史峰值,这一现象可能与当时实施的系列优惠政策(如取消牲畜屠宰税、实施畜牧良种补贴)密切相关^[31]。随后,受2006年禽流感疫情及淮河大洪水等自然灾害的影响,畜牧业生产遭受重创,禽畜数量大幅下降导致N₂O排放量随之减少。值得注意的是,自2011年起,国家陆续发布《全国畜牧业发展第十二个五年规划》和《全国畜禽养殖污染防治“十二五”规划》,这些政策提倡优化养殖结构,强化畜禽粪污资源化利用,推动畜牧业向更加环保、高效的方向转型^[32],有效抑制畜牧业N₂O排放。然而,2019年以来,随着《关于压实“菜篮子”市长负责制做好农产品稳产保供工作的通知》和《关于促进畜牧业高质量发展的意见》等政策相继实施,畜牧业N₂O排放出现回弹,这主要源于国家对提升肉蛋奶的供应能力与自给水平的大力支持。其次,就畜禽结构而言,猪是我国畜牧业N₂O的最主要排放源^[33],随后是非奶牛和家禽。根据《指南》推荐值,猪和非奶牛的N₂O排放量与其排放因子密不可分;家禽虽然排放因子较小,但其庞大的养殖规模(截至2022年存栏量达67.73亿只)使其成为不可忽视的排放源。因此,在确保畜禽产品供给和质量的前提下,因地制宜发展畜禽养殖更有利于实现区域N₂O减排目标。最后,就排放强度而言,虽然全国畜牧业N₂O排放强度整体呈下降趋势^[16],但在西北、西南地区仍维持较高水平,尤以西藏、内蒙古和青海等牧区为甚。这些地区普遍采用放牧饲养模式,牲畜粪便直接排放在草地,缺乏系统的收集和处理设施。加之牲畜排泄物分布分散,在降解过程中氮素转化活跃^[34],进一步加剧N₂O排放强度。

这一现象凸显了在牧区推行科学化、集约化养殖模式的重要性。

从脱钩状态看,畜牧业N₂O排放与其产值之间总体呈弱脱钩和强脱钩交替状态,这一波动趋势与王欢等^[26]的研究结论相符。尽管我国已出台《关于加快推进畜禽标准化规模养殖的意见》(2010)《关于加快畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》(2017)等文件,但其政策重心主要集中于废弃物无害化处理与规模化生产效率提升。例如,2010年政策强调通过标准化圈舍改造降低疫病风险,2017年政策则要求2020年畜禽粪污综合利用率在75%以上。因此,此类政策对N₂O等温室气体的减排目标缺乏直接约束性指标。上述政策局限性导致畜牧业N₂O减排长期处于“被动协同”状态,即减排效果依赖于污染治理或能效提升的“副产品”,而非通过定向调控实现。这种间接减排机制解释了脱钩状态不稳定的内在原因。

从影响因素看,经济因素为主要促进因素,效率因素为主要抑制因素,这与大多数研究结果^[26-27]一致。畜牧业快速发展直接导致畜牧业粪便N₂O排放的增加。我国在过去几十年中,畜牧业规模生产比例从1994年的35%增长到2022年的71.5%,几乎在30年间翻了一番^[35]。经济因素的强促进作用正是体现了畜牧业发展中的“规模-排放”陷阱,即经济增长通常伴随着畜牧业规模的快速扩张,导致畜牧业N₂O排放的增长。但从另一方面来看,畜牧业规模生产比例越高,先进的管理技术和减排措施才越可能具备经济可行性和监管可操作性,从而实现规模效益与减排效益的协同。此外,人口规模因素对N₂O排放的弱促进作用反映了城镇化进程的双重抵消机制:一方面,人口总量增长理论上应驱动畜产品

需求同步上升;另一方面,城镇化率提高促使家庭动物蛋白摄入来源多元化,部分替代猪肉需求。同时,小散养户退出市场削弱了人口规模与养殖规模的线性关联,这些使得人口规模因素的净排放贡献被限制在较低水平。另外,畜牧业生产效率的提升对 N_2O 排放的抑制作用源于技术创新扩散与生产流程重构的协同效应,通过优良畜种培育、饲料配比优化、存储条件改善、以及厌氧处理升级等多种方式,可以从多个环节上减少畜禽粪污。当然,结构因素对畜牧业 N_2O 排放的抑制作用也不容忽视^[3,7],可通过畜种配额制度、养殖分区管控等策略放大减排效果。值得注意的是,技术进步存在边际效益递减规律:2010—2022年,效率因素的总降幅为 15.26×10^4 t,提示未来可能需要建立技术升级—结构优化—规模管控的协同调控机制以突破现有瓶颈。

4 结论

(1)2000—2022年我国畜牧业 N_2O 排放量呈波动式下降趋势(2.633×10^5 t下降至 2.418×10^5 t),空间分布呈现出显著异质性,西南、华北及华中地区贡献率较高。主要排放源为猪(33%)、非奶牛(27%)和家禽(16%),河南、四川是猪排放高值区,山东是家禽排放高值区。排放强度总体呈下降趋势,西藏常年居首。西北、西南地区降幅显著,大部分省份减少值超 0.0070 t·万元⁻¹。

(2)研究期内,总脱钩弹性为-0.018 2,显示为强脱钩状态,但稳定性指数为3.71,表明脱钩状态波动显著。2000—2005年呈现弱脱钩状态;2005—2015年向强脱钩转换,脱钩效果增强;2015年后因政策扰动出现增长连接、衰退连接、强负脱钩等状态。

(3)效率因素和结构因素对畜牧业 N_2O 排放起抑制作用,效率因素为主要抑制因素;经济因素和人口规模因素则对畜牧业 N_2O 起促进作用,经济因素起主要促进作用。

参考文献:

[1] CHEN L, MSIGWA G, YANG M Y, et al. Strategies to achieve a carbon neutral society: a review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2022, 20(4): 2277-2310.

[2] 苏旭峰, 杨小东, 冉启英. 基于碳排放视角的中国畜牧业绿色增长分析[J]. *生态经济*, 2022, 38(4): 101-107. SU X F, YANG X D, RAN Q Y. Analysis on the green growth of animal husbandry in China from the perspective of carbon emissions[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(4): 101-107.

[3] 白雪冰, 胡浩, 周应恒, 等. 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, et al. 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.

[4] 汪开英, 李鑫, 陆建定, 等. 碳中和目标下畜牧业低碳发展路径[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(1): 230-238. WANG K Y, LI X, LU J D, et al. Low-carbon development strategies of livestock industry to achieve goal of carbon neutrality in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(1): 230-238.

[5] KIKSTRA J S, NICHOLLS Z R J, SMITH C J, et al. The IPCC sixth assessment report WGIII climate assessment of mitigation pathways: from emissions to global temperatures[J]. *Geoscientific Model Development*, 2022, 15(24): 9075-9109.

[6] WANG Q, ZHAO M M, LI R R. Decoupling sectoral economic output from carbon emissions on city level: a comparative study of Beijing and Shanghai, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 126-133.

[7] 刘杨, 刘鸿斌. 山东省农业碳排放特征、影响因素及达峰分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(4): 558-569. LIU Y, LIU H B. Characteristics, influence factors, and prediction of agricultural carbon emissions in Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(4): 558-569.

[8] 张学智, 王继岩, 张藤丽, 等. 中国农业系统 N_2O 排放量评估及低碳措施[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(5): 1215-1223. ZHANG X Z, WANG J Y, ZHANG T L, et al. Assessment of nitrous oxide emissions from Chinese agricultural system and low-carbon measures[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(5): 1215-1223.

[9] 祝延立, 王鑫, 赵新颖, 等. 吉林省农业氧化亚氮排放现状及时空规律分析[J]. *农业与技术*, 2023, 43(24): 80-83. ZHU Y L, WANG X, ZHAO X Y, et al. Analysis of the current status and spatial-temporal patterns of agricultural nitrous oxide emissions in Jilin Province[J]. *Agriculture and Technology*, 2023, 43(24): 80-83.

[10] 丰睿, 李震华, 周荣, 等. 2021年中国农业源氧化亚氮排放及减排的经济成本和社会收益研究[J]. *环境科学学报*, 2024, 44(1): 424-437. FENG R, LI Z H, ZHOU R, et al. Investigation on China's agricultural nitrous oxide emissions with analysis of economic costs and social benefits of emission reductions in 2021[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(1): 424-437.

[11] MOHANKUMAR SAJEEV E P, WINIWARTER W, AMON B. Greenhouse gas and ammonia emissions from different stages of liquid manure management chains: abatement options and emission interactions[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2018, 47(1): 30-41.

[12] LI B V, JIANG B K. Responses of forest structure, functions, and biodiversity to livestock disturbances: a global meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(19): 4745-4757.

[13] WAŚ A, KRUPIN V, KOBUS P, et al. Towards climate neutrality in Poland by 2050: assessment of policy implications in the farm sector[J]. *Energies*, 2021, 14(22): 7595.

[14] 顾沈怡, 邱子健, 詹永冰, 等. 我国畜牧业碳排放时空特征与趋势预测[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(3): 705-714. GU S Y, QIU

- Z J, ZHAN Y B, et al. Spatial-temporal characteristics and trend prediction of carbon emissions from animal husbandry in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(3):705-714.
- [15] GRAHAM M W, BUTTERBACH-BAHL K, LINDE DU TOIT C J, et al. Research progress on greenhouse gas emissions from livestock in sub-Saharan Africa falls short of national inventory ambitions[J]. *Frontiers in Soil Science*, 2022, 2:927452.
- [16] 张帆, 宣鑫, 金贵, 等. 农业源非二氧化碳温室气体排放及情景模拟[J]. 地理学报, 2023, 78(1):35-53. ZHANG F, XUAN X, JIN G, et al. Agricultural non-CO₂ greenhouse gases emissions and scenario simulation analysis[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(1):35-53.
- [17] 冯博, 王雪青. 中国各省建筑业碳排放脱钩及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(4):28-34. FENG B, WANG X Q. Research on carbon decoupling effect and influence factors of provincial construction industry in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(4):28-34.
- [18] 杨青, 郭露, 刘星星, 等. 中国省域交通碳排放空间关联格局的驱动特征[J]. 中国环境科学, 2024, 44(2):1171-1184. YANG Q, GUO L, et al. Driving characteristics of the spatial correlation pattern of carbon emissions from provincial transportation in China[J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(2):1171-1184.
- [19] WANG Q, SU M. The effects of urbanization and industrialization on decoupling economic growth from carbon emission: a case study of China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 51:101758.
- [20] 潘栋, 李楠, 李锋, 等. 基于能源碳排放预测的中国东部地区达峰策略制定[J]. 环境科学学报, 2021, 41(3):1142-1152. PAN D, LI N, LI F, et al. Mitigation strategy of eastern China based on energy-source carbon emission estimation[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(3):1142-1152.
- [21] ANG B W. Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method?[J]. *Energy Policy*, 2004, 32(9):1131-1139.
- [22] 赵明正, 赵翠萍, 李天祥, 等. “零增长”行动背景下中国化肥使用量下降的驱动因素研究:基于LMDI分解和面板回归分析[J]. 农业技术经济, 2019(12):118-130. ZHAO M Z, ZHAO C P, LI T X, et al. Driving forces analysis for China's recent fertilizer use reduction under the “zero growth” action plan: estimation based on the LMDI approach and panel regression analysis[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2019(12):118-130.
- [23] 李军豪, 裴孝东, 杨国靖, 等. 青海省畜牧CO₂排放与经济效益的脱钩关系及其驱动效应分析[J]. 生态学报, 2024(22):1-16. LI J H, PEI X D, YANG G J, et al. Decoupling relationship and driving effect between livestock carbon emissions and economic efficiency in Qinghai Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024(22):1-16.
- [24] 国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南[S]. 北京: 中国统计出版社, 2011. National Development and Reform Commission. Guidelines for the preparation of provincial greenhouse gas inventories[S]. Beijing: China Statistics Press, 2011.
- [25] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. *Transport Policy*, 2005, 12(2):137-151.
- [26] 王欢, 乔娟. 中国畜牧业温室气体排放的脱钩与预测分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(5):793-802. WANG H, QIAO J. Decoupling and predictive analysis of greenhouse gas emission from animal husbandry in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(5):793-802.
- [27] 李阳, 陈敏鹏. 中国农业源甲烷和氧化亚氮排放的影响因素[J]. 环境科学学报, 2021, 41(2):710-717. LI Y, CHEN M P. Influencing factors of methane and nitrous oxide emissions from agricultural sources in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(2):710-717.
- [28] 王诗云, 李琦, 胡静怡, 等. “双碳”背景下辽宁省碳排放驱动因素分析:基于扩展Kaya恒等式[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2023, 35(5):372-379. WANG S Y, LI Q, HU J Y, et al. Driving factors of carbon emission in Liaoning Province under background of “double carbon”: based on extended Kaya identity[J]. *Journal of Shenyang University(Natural Science)*, 2023, 35(5):372-379.
- [29] 郭玮, 胡西武, 丁芬菱. 2000—2021年青海省农牧业碳排放驱动因素及脱钩效应[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3):347-355. GUO W, HU X W, DING F L. Driving factors and decoupling effects of carbon emissions from agriculture and animal husbandry in Qinghai Province during 2000—2021[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(3):347-355.
- [30] 孟祥海, 程国强, 张俊飏, 等. 中国畜牧业全生命周期温室气体排放时空特征分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8):2167-2176. MENG X H, CHENG G Q, ZHANG J B, et al. Analyze on the spatialtemporal characteristics of GHG estimation of livestock's by life cycle assessment in China[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(8):2167-2176.
- [31] XU P, LIAO Y J, ZHENG Y, et al. Northward shift of historical methane emission hotspots from the livestock sector in China and assessment of potential mitigation options[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 272/273:1-11.
- [32] 张英男, 龙花楼, 李裕瑞, 等. 平原农区农业生产系统转型及其环境效应的耦合类型划分[J]. 地理研究, 2022, 41(6):1623-1636. ZHANG Y N, LONG H L, LI Y R, et al. Classification of the coupling patterns between agricultural production system transition and their environmental effects in the plain farming regions[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(6):1623-1636.
- [33] 郭娇, 齐德生, 张妮娅, 等. 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, et al. Chinese greenhouse gas emissions from livestock: trend and predicted peak value[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10):2106-2113.
- [34] 杜子银, 蔡延江, 张斌, 等. 牲畜排泄物返还对草地土壤氮转化和氧化亚氮(N₂O)排放的影响研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(1):45-57. DU Z Y, CAI Y J, ZHANG B, et al. Research progress on livestock excreta returning on soil nitrogen transformation and nitrous oxide emission in grasslands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1):45-57.
- [35] WEI S, FAN J M, TIAN Y F, et al. Low-carbon development policies and achievements in the context of the livestock sector in China[J]. *Frontiers of Agricultural Science & Engineering*, 2024, 11(3):367-380.