

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域 PM _{2.5} 和臭氧复合污染气象影响评估	杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)
“2+26”城市 PM _{2.5} 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析	吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)
武汉军运会前后大气 PM _{2.5} 化学组分和来源	刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)
2016~2020 年邯郸市冬季 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡偲豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)
渭南市冬季 PM _{2.5} 化学组成及来源解析	郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)
长三角城郊冬季 PM _{2.5} 中铵盐的形成过程及来源解析	项妍琨, 曹芳, 张雯洪, 范美益, 章炎麟 (6486)
上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析	杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)
吕梁市 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估	牟玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)
广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响	吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)
南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征	陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)
京津冀地区“煤改电”对 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)
基于化学损耗修正的青岛胶州市环境 VOCs 来源解析	孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)
聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析	李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)
基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析	张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)
中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素	欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)
基于无人机的城市大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展	曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)
京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析	郝永佩, 宋晓伟, 宋晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)
中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估	魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)
钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估	宋晓璐, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)
珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素	胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)
东莞市低碳路径下加速电气化对 CO ₂ 和污染物协同减排影响	吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)
县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系	刘贤赵, 李阳 (6664)
城市草坪温室气体排放特征及影响因素	陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)
双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应	刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)
中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估	赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)
黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险	彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳锋, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)
黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价	王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)
土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响	温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)
内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价	王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)
锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系	孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷玺 (6754)
西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素	艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)
巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价	刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)
亚硫酸氢盐强化微量 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解扑热息痛	莫茜婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)
污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星	郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)
NaHCO ₃ 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附	魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)
竹基 N、P 共掺杂活性炭的制备及其铜离子吸附性能	王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)
西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析	赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)
生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析	孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)
农田土壤碳循环过程及其量化方法	孙昭安, 朱彪 (6857)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响	牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霜, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)
喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征	蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)
中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估	陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)
基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析	赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)
某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析	张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)
重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析	张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)
高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征	陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)
有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响	邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)
有机肥处理对旱地红壤细菌群落及玉米生产力的影响	林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 梁璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)
微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响	段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)
设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响	赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)
3 种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系	李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)
河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构	刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)
玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析	汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)
外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染	王楷, 王丽, 王一钡, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)
1 株肠杆菌与硫酸盐联合施用对水稻积累镉的影响	张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)
《环境科学》第 44 卷(2023 年)总目录	(7045)
《环境科学》征订启事(6507)	
《环境科学》征稿简则(6620)	
信息(6743, 6846, 6856)	

双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应

刘舒乐¹, 严薇^{1,2}, 高庆先¹, 马占云^{1*}

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 东北师范大学长白山地理过程与生态安全教育部重点实验室, 长春 130024)

摘要: 准确评价甲烷(CH₄)的温室效应是制定有效减排路径的基础。首次采用新提出的、针对短寿命气候污染物(SLCP)设计的气候指标 GWP-star(GWP*)对中国畜牧业 CH₄ 排放的温室效应进行定量评价,并与常用的 GWP 指标评价结果相比较。结果表明,GWP 的视角下我国畜牧业 CH₄ 排放的温室效应持续增加。因此,畜牧业实现碳中和需要完全消除排放,或以增加碳汇、增加资源化利用的形式抵消每年稳定的 CH₄ 排放。在 GWP* 的视角下,2015~2019 年间畜牧业 CH₄ 排放的温室效应较 20 年前有所减少,降低的热量相当于从 20 年前的大气中减少 2.1 × 10⁴ 万 t CO₂ 的热量,畜牧业只需每年有效降低 0.3% 的 CH₄ 排放则可在短期内实现自身碳中和。在中国畜牧业持续采取有效减排措施的情况下,采用 GWP* 的标准制定减排目标比用 GWP 制定的减排目标更早达到,但选择 GWP 还是 GWP* 需要综合考虑评价的目的、评价的时间尺度和实际可操作性。

关键词: 甲烷(CH₄); 温室气体; 养殖业; 全球增温潜势(GWP); GWP-star(GWP*); 短寿命气候污染物(SLCPs)

中图分类号: X16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)12-6692-08 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202212226

Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China

LIU Shu-le¹, YAN Wei^{1,2}, GAO Qing-xian¹, MA Zhan-yun^{1*}

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Key Laboratory of Geographical Processes and Ecological Security of Changbai Mountain, Ministry of Education, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: Accurate quantitative evaluation of the greenhouse effects of methane(CH₄) is the foundation for developing effective mitigation strategies. This study was the first to quantitatively evaluate the warming effects of the CH₄ emissions from animal husbandry in China using the recently proposed climate metric GWP-star(GWP*), which is designed for short-lived climate pollutants(SLCP), and to compare the results with the commonly used climate metric global warming potential(GWP). The results showed: CH₄ emissions from animal husbandry in China decreased from 957.0 × 10⁵ t in 2000 to 764.0 × 10⁵ t. The GWP results showed that the greenhouse effect of CH₄ emissions from animal husbandry in China was increasing between 2015 and 2019, and the GWP* results showed that it decreased compared to that 20 years ago. The amount of reduction was equivalent to removing the warming of 2.1 × 10⁸ t of carbon dioxide. Under the GWP evaluation system, achieving carbon neutrality in the livestock industry in China requires eliminating or offsetting stable annual CH₄ emissions from increased carbon sinks. Instead, under the GWP* evaluation system, China's livestock industry could achieve its carbon neutrality in the short term by effectively reducing CH₄ emissions by only 0.3% per year. In the case that the livestock industry in China continues to take effective emission reduction measures, the reduction target under the GWP* metric will be reached earlier than that under GWP. Still, the choice of GWP or GWP* requires careful consideration of the objectives of evaluation, the time scale of assessment, and practical operability.

Key words: methane(CH₄); greenhouse gas; animal husbandry; global warming potential(GWP); GWP-star(GWP*); short-lived climate pollutants(SLCPs)

自工业革命以来,甲烷(CH₄)的大气体积分数从1750年的719 × 10⁻⁹上升到2021年的(1 895.3 ± 0.6) × 10⁻⁹^[1,2]。2015~2019年间全球平均气温较前工业时代升高了(1.1 ± 0.1)℃,其中CH₄贡献了0.5℃的温升,引起广泛的关注^[1]。IPCC第6次评估报告(AR6)明确指出,CH₄减排是全球气候治理的重点^[1]。中美两国宣布的《中美关于在21世纪20年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》中提到“加大行动控制和减少CH₄排放是21世纪20年代的必要事项”^[3,4]。

畜牧业是大气中CH₄的重要人为来源。据估算,在2008~2017年间,来自畜牧业的CH₄排放占全球人为源总排放量的30%^[5]。国内学者也已针对畜牧业CH₄减排开展了大量工作^[6~11]。在我国,

2014年来自畜牧业的CH₄排放约为1301万t,占人为源CH₄总排放的24%^[12]。正确认识畜牧业CH₄排放引起的温室效应对制定合理的减排路径有重要指导作用^[13~16]。

不同于二氧化碳(CO₂),CH₄是短寿命气候污染物(SLCPs),在大气中的光化学寿命约为(11.8 ± 1.8)a,不具有显著的累积效应^[1]。目前广泛采用的气候指标,全球增温潜势(GWP),可以解读为某种温室气体的温室效应相对于CO₂的倍数,即CO₂当量(CO_{2-eq})。例如,CH₄的GWP₁₀₀(100年全

收稿日期: 2022-12-29; 修订日期: 2023-03-01

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2022-纵向-0224)

作者简介: 刘舒乐(1986~),女,博士,助理研究员,主要研究方向为农业空气质量与气候变化适应, E-mail: liu.shule@cras.org.cn

* 通信作者, E-mail: mazy@cras.org.cn

球变暖潜势)为 34,通常被理解为,从 100 年的时间尺度看,CH₄ 的温室效应是 CO₂ 的 34 倍. GWP 难以准确刻画 SLCP 排放源在削减情景下的温室效应^[17~21].

GWP-star(GWP*)是 Allen 等^[17]根据 CH₄ 的短光化学半衰期,将 GWP 的应用方法加以改进形成的动态气候指标. GWP* 考量一定时间段内由 CH₄ 排放量变化所引起的温室效应,即 CO₂ 热当量(CO_{2-we}). GWP* 提出后经过持续改进^[18~21],数学表达式已大为简化. Lynch 等^[20]证明累积的 GWP* 与累积碳排放的瞬变气候响应(TCRE)的乘积能很好近似 SLCP 对地球表面温度变化的影响,比 GWP 更适于设计以控制全球温升为目标的政策措施;而 GWP₁₀₀ 将 CH₄ 恒定排放源的影响在 20 a 的尺度上低估 3~4 倍^[1].

目前,国外学者已针对 GWP* 在评价畜牧业 CH₄ 温室效应的优势及其在应用层面的潜在问题展开了广泛的讨论^[22~26]. Liu 等^[23]估算了美国加州养牛业 CH₄ 的排放量,并比较其在 GWP 和 GWP* 两种气候指标评价下的温室效应. Pérez-Domínguez 等^[24]将 GWP 和 GWP* 用于 3 种不同农业经济模型,探索了 CH₄ 的短期和长期变暖效应对减缓政策和饮食转变成成本效益的影响. Mar 等^[25]提出在现有的 UNFCCC 的框架下,GWP₁₀₀ 不能体现 CH₄ 强烈的短期气候影响. Beck 等^[26]认为现在评价指标的选择极大地影响了 CH₄ 的温室效应评估结果. 目前尚未有基于 GWP* 指标的中国畜牧业 CH₄ 温室效应研究.

本研究的目标是通过用 GWP 和 GWP* 两种气候指标计算我国 1960~2019 年间畜牧业 CH₄ 排放的温室效应,比较在各主要畜禽品种的不同排放特征下,两种气候指标对 CH₄ 温室效应的不同定量结果,评价气候指标选择对畜禽 CH₄ 排放温室效应定量的影响. 本文通过揭示 SLCP 在畜牧业低碳发展中的重要作用,以为畜牧业减污降碳路径的设计提供新思路.

1 材料与方法

1.1 数据来源

畜牧业的 CH₄ 总排放为畜禽肠道发酵与粪污管理排放的总和. 由于我国 2014 年后农业源温室气体排放清单尚未发布,本研究采用联合国粮农组织(FAO)FAOSTAT 数据库发布的 1961~2019 年 CH₄ 排放量^[27],比较和说明不同评价体系对畜牧业 CH₄ 排放温室效应评价结果的影响.

1.2 GWP 的计算

GWP 的计算公式如下:

$$GWP_i(H) = \frac{AGWP_i(H)}{AGWP_{CO_2}(H)} = \frac{\int_0^H RF_i(t) dt}{\int_0^H RF_{CO_2}(t) dt} \quad (1)$$

式中, H 为指定的研究时间尺度(a),通常为 20 a 或 100 a; RF_i 和 RF_{CO_2} 分别为温室气体 i 和 CO₂ 的全球平均辐射强迫; $AGWP_i(H)$ 和 $AGWP_{CO_2}(H)$ 为温室气体 i 和 CO₂ 在时间尺度 H 内的绝对全球增温潜势; t 表示气体在大气中存在的时间(a).

基于 GWP 的 CO₂ 当量计算公式如下:

$$CO_{2-eq} = E_{GHC_i} \times GWP_i(H) \quad (2)$$

式中,CO_{2-eq} 为温室气体 i 的二氧化碳当量; $GWP_i(H)$ 为温室气体 i 在 H 年尺度上的全球增温潜势; E_{GHC_i} 为温室气体 i 的排放量. 本文采用 CH₄ 的 GWP₁₀₀ 数值为 34^[28].

1.3 新的评价方法:GWP* 的计算

GWP* 的计算公式如下:

$$CO_{2-we} = g \times GWP_i(H) \times \left(r \times \frac{\Delta E_{SLCP}}{\Delta t} \times H + s \times E_{SLCP} \right) \quad (3)$$

式中,CO_{2-we} 为 SLCP _{i} 的 CO₂ 热当量; ΔE_{SLCP} 为 SLCP _{i} 在时间 Δt 前后的变化量; E_{SLCP} 为 SLCP _{i} 的排放量; r 和 s 分别为当下排放量和累积排放量的权重($r+s=1$); g 为常数,Smith 等^[21]推荐其取值为 1.13. CO_{2-we} 取值可为正或负,解读为当下的温室气体排放相对同一排放源 20 年前,增加(+)或减少(-)的温室效应.

Allen 等^[18]和 Lynch 等^[20]使用 FaIR 模型对 GWP 和 GWP* 的计算结果进行了比较和评价,发现当 $\Delta t = 20$ a, $r = 0.75$ 且 $s = 0.25$ 时,GWP* 能对 CH₄ 排放的温室效应提供良好的评价. 公式(3)可简化为:

$$CO_{2-we} = 1.13 \times GWP_{100} \times [4 \times E_{SLCP(t)} - 3.75 \times E_{SLCP(t-20)}] \quad (4)$$

式中, $E_{SLCP(t)}$ 和 $E_{SLCP(t-20)}$ 分别为当下的 CH₄ 排放量和 20 年前的 CH₄ 排放量.

1.4 比较 GWP 与 GWP* 对中国畜牧业 CH₄ 排放温室效应的评价结果

本研究根据 FAOSTAT 数据库提供的中国主要牲畜种类 1960~2019 年间 CH₄ 排放量,用 GWP 和 GWP* 两种气候指标[公式(2)和公式(4)]计算其逐年及累积的温室效应. 同时,本研究假设主要牲畜的生产将遵循农业农村部市场预警专家委员会发布

在《中国农业展望报告 2020-2029》的发展目标^[29], 估算了 2020~2029 年间中国畜牧业 CH₄ 排放引起的温室效应. 通过比较 GWP 和 GWP* 的不同评价结果, 分析两种气候指标在 SLCP 温室效应评价中具备的优势和存在的问题, 及其对我国畜牧生产 CH₄ 控排的启示.

2 结果与分析

2.1 主要牲畜 CH₄ 排放的温室效应

2.1.1 养牛业 CH₄ 排放的温室效应

养牛业的 CH₄ 排放总量从 1980 年的 357.2 万 t 增加至 1996 年的 665.7 万 t 后, 稳定下降至 2019 年的 474.8 万 t, 如图 1(a). 随着未来牛肉产量的增长 (肉牛与水牛增速为 2%, 奶牛为 2.7%), 假设维持现有的生产效率和管理水平, 养牛业的 CH₄ 排放量将稳步上升, 于 2029 年达到 594.7 万 t.

养牛业 CH₄ 排放年际 CO_{2-eq} 的变化与排放量一致, 每年均为正值, 1996 年达到最高值 (以 CO_{2-eq} 计), 为 2.3×10^4 万 t, 意味着每年向大气新增温室效应.

计算的年际 CO_{2-we} 比 CO_{2-eq} 对 CH₄ 的排放量变化更为灵敏, 数值上波动更大 [图 1(b)]. 1980~2006 年间年际 CO_{2-we} 数值上高于 CO_{2-eq}, 且在 2007 年后迅速降低直至 2012 年出现负值, 意味着 2012 年起养牛业 CH₄ 排放的温室效应较 20 年前已有降低.

从图 1(c) 可以看出, 累积的 CO_{2-we} (cum-CO_{2-we}) 在数值上高于累积的 CO_{2-eq} (cum-CO_{2-eq}), 两者的差值 (以 CO₂ 的热效应计) 在 2005~2010 年间高于 3.2×10^5 万 t. cum-CO_{2-we} 在 2011~2012 年间达到最大值 (8.5×10^5 万 t, 以 CO_{2-we} 计), 随后持续降低, 2022 年在数值上首次低于 cum-CO_{2-eq} 并维持稳定. 相反, cum-CO_{2-eq} 自 1980 年起保持持续地增长.

预计未来养牛业温室气体的 CO_{2-eq} 和 CO_{2-we} 都将逐年增加 [图 1(b)]. 基于 GWP 的估算表明未来 10 a 肉牛养殖业排放的 CH₄ 将以 2% 的年增速加剧温室效应; 而基于 GWP* 的估算表明肉牛养殖业 CH₄ 温室效应将于 2026 年左右恢复正值, 届时将向大气新增温室效应.

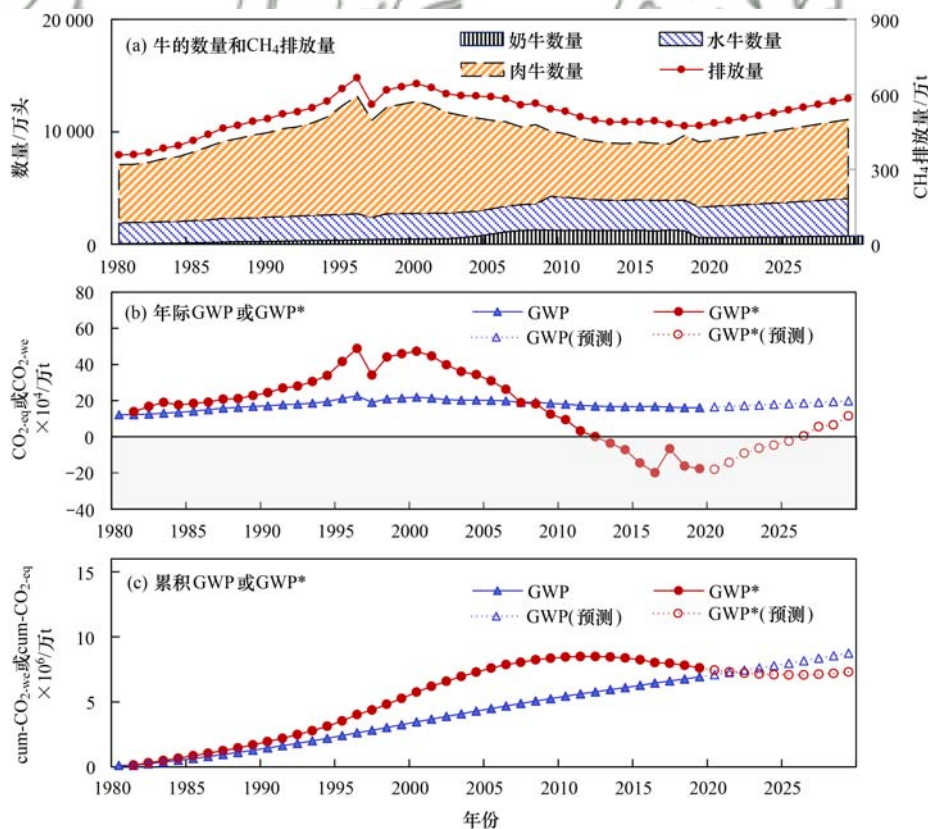


图1 养牛业 CH₄ 排放的温室效应

Fig. 1 Comparison of the warming effects of methane emissions from cattle and buffalo in China

2.1.2 养羊业 CH₄ 排放的温室效应

我国也拥有数量庞大的山羊和绵羊. 2015~2019 年间山羊和绵羊的 CH₄ 年均排放量分别为 71.4 万 t 和 83.4 万 t 左右, 如图 2(a). 除了牛和羊之外, 我国

还有骆驼、骡子、驴、马等反刍动物, 其 2012~2019 年间的 CH₄ 年排放量在 12.9 万 t 左右.

1980~2005 年间, 由于山羊和绵羊的 CH₄ 排放总量稳步增长, 每年 CH₄ 排放的 CO_{2-eq} 和 CO_{2-we} 同样

保持上升趋势,但 $\text{CO}_{2\text{-we}}$ 的增幅远高于 $\text{CO}_{2\text{-eq}}$,如图 2(b). 2005 年后,山羊和绵羊的 CH_4 排放总量在 144.9 ~ 155.5 万 t 之间波动, $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ 的年排放维持

稳定,而 $\text{CO}_{2\text{-we}}$ 的年排放迅速降低. $\text{cum-CO}_{2\text{-eq}}$ 和 $\text{cum-CO}_{2\text{-we}}$ 均呈稳步增长趋势. 2005 年之后 $\text{cum-CO}_{2\text{-we}}$ 在数值上高于 $\text{CO}_{2\text{-eq}}$,如图 2(c).

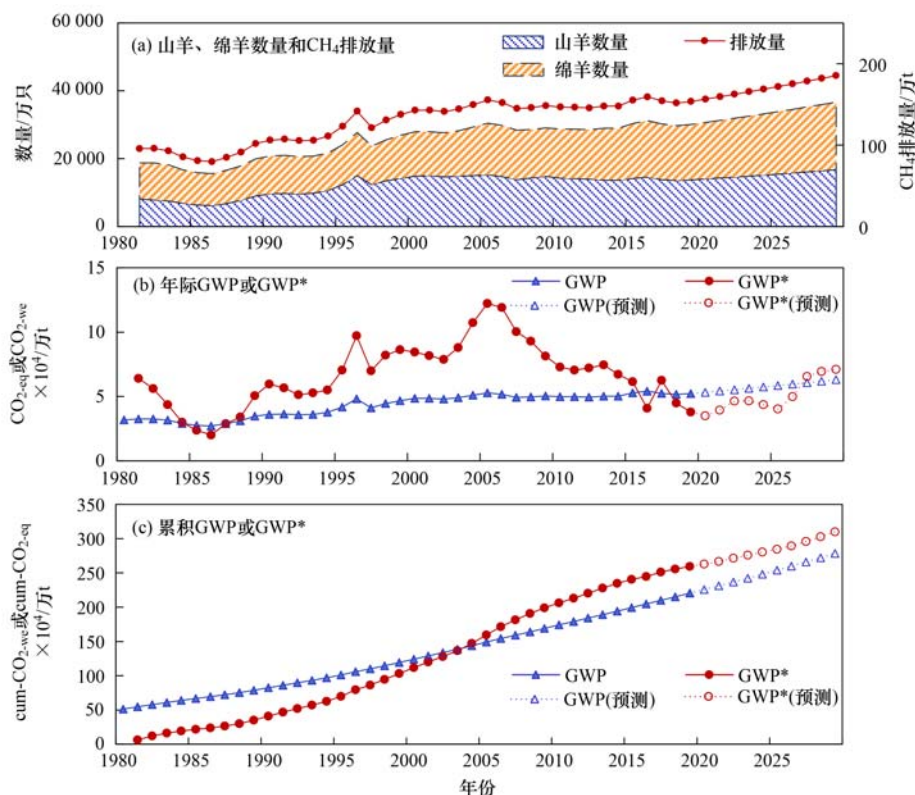


图2 绵羊和山羊 CH_4 排放的温室效应

Fig. 2 Comparison of the warming effects of methane emissions from goats and sheep in China

2.1.3 生猪养殖业 CH_4 排放的温室效应

与反刍动物集中于瘤胃和肠道厌氧发酵的 CH_4 排放不同,生猪养殖的 CH_4 主要来源于粪污的贮存和管理. 预计未来 10 年生猪养殖的年增长率为 1.9%^[29]. 来自生猪养殖的 CH_4 年排放量从 1980 年的 90 万 t 增加至 2012 年的 133.1 万 t, 2010 ~ 2019 年间,来自生猪养殖的 CH_4 年排放量约为 118.6 ~ 133.1 万 t,其中粪污管理的 CH_4 排放约占总排放量的 2/3,如图 3(a).

1980 ~ 2020 年间,除了 2019 年的 $\text{CO}_{2\text{-we}}$ 外,年际 $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ 和 $\text{CO}_{2\text{-we}}$ 均为正值,意味着生猪养殖业每年排放的 CH_4 向大气稳定新增温室效应;且 2010 年之后,两者在数值上非常接近,如图 3(b). $\text{cum-CO}_{2\text{-we}}$ 在数值上始终高于 $\text{cum-CO}_{2\text{-eq}}$ [图 3(c)].

2.2 中国畜牧业 CH_4 排放的温室效应

根据 FAO 的估算,我国畜牧业 CH_4 排放量从 1980 年的 587.8 万 t 增加至 1996 年的 988.2 万 t; 1996 ~ 2006 年期间, CH_4 年排放量基本保持在 900 万 t 以上; 2007 年起排放量降至 900 万 t 以下,并于 2019 年降至 743.4 万 t (图 4).

2010 ~ 2019 年期间,来自反刍畜禽肠道发酵的

CH_4 年排放量约为 682.1 万 t,主要来源于肉牛和奶牛养殖的排放,其中肉牛肠道发酵排放的 CH_4 贡献最大. 同期来自粪污管理的 CH_4 年排放量约为 120.4 万 t,其中约 65% ~ 84% 来自于养猪场粪污贮存和管理的排放.

在 GWP 视角下, $\text{cum-CO}_{2\text{-eq}}$ 在 1980 ~ 2019 年不断增长,至 2019 年已达 107.2×10^4 万 t (图 5). 若自 2019 年起,各牲畜数量按《中国农业展望报告 2020-2029》^[29] 的估计增长,畜牧业 $\text{cum-CO}_{2\text{-eq}}$ 将继续匀速增长, 2029 年达 136.1×10^4 万 t (以 $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ 计).

在 GWP* 视角下, $\text{cum-CO}_{2\text{-eq}}$ 在 1980 ~ 2005 年间迅速增加,之后增势趋缓;于 2014 年左右达到峰值 132.9×10^4 万 t 后逐步降低至 2019 年的 127.8×10^4 万 t (图 5). 预计未来 $\text{cum-CO}_{2\text{-we}}$ 或 $\text{cum-CO}_{2\text{-eq}}$ 逐步趋于稳定,并于 2025 ~ 2029 年间维持在 $123.6 \sim 128.4 \times 10^4$ 万 t 之间.

3 讨论

3.1 GWP 与 GWP* 的评价结果比较

AR6 强调气候指标需根据评价的目标选择^[1].

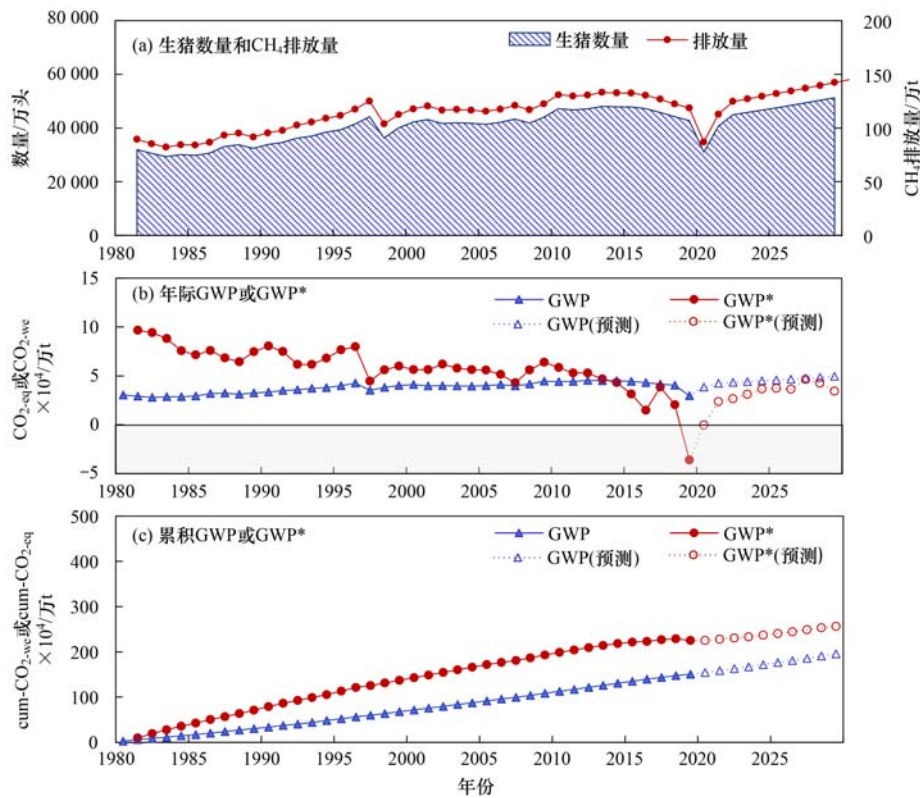
图3 生猪CH₄排放的温室效应

Fig. 3 Comparison of the warming effects of methane emissions from pigs in China

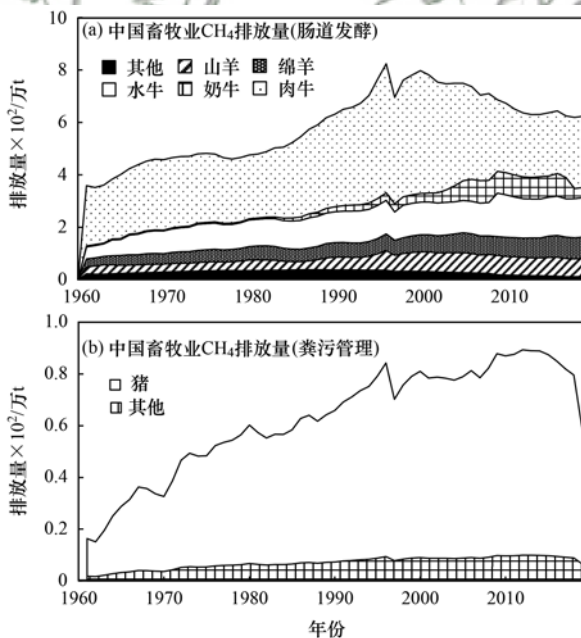
图4 中国畜牧业CH₄排放来源

Fig. 4 Sources of methane emissions from primary livestock species in China

GWP 和 GWP* 从不同的角度反映了中国畜牧业CH₄排放引起的温室效应. GWP 定量每年进入大气的碳当量,概念清晰,计算简单,在各种碳足迹评估体系和现行碳交易框架中可便捷地使用. 其局限性在于对SLCP短期温室效应评价的准确度较GWP*低^[30~33]. AR6引用了Lynch等^[20]的研究结果,指

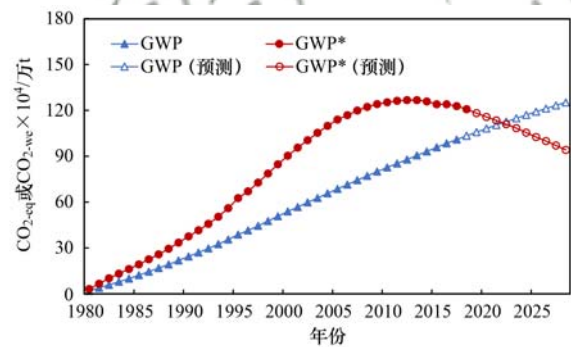
图5 中国畜牧业CH₄排放的累积温室效应

Fig. 5 Comparison of the warming effects of methane emissions from animal husbandry in China

出用GWP计算恒定CH₄排放源的累积温室效应时,会将其引起的温升在20 a的尺度上低估了3~4倍^[1],这意味着基于CO₂-eq制定的多气体协同减排路径实际上可能难以达到预期的温升控制效果.

GWP*是针对SLCP变暖贡献的定量工具,它从20 a的时间尺度说明排放源是否有向大气新增热量. GWP*在考虑CH₄排放的同时也考虑往年排放的CH₄在大气中的衰减,聚焦CH₄对大气的温室效应而非其CO₂当量. 对于排放量不断增加的CH₄排放源,CO₂-we比CO₂-eq有更高的数值. 对于维持不变或持续降低的排放源,GWP计算结果CO₂-eq均为正值;而同样情况在GWP*框架下则可能出现负的CO₂-we,认为不会加剧变暖,而是替代20年前排放

的、目前几近降解的这一部分 CH_4 的温室效应。

3.2 中国畜牧业 CH_4 减控的启示

3.2.1 GWP 和 GWP^* 对中国畜牧业 CH_4 减排的启示

在 GWP 的视角下,中国畜牧业实现碳中和需要完全消除排放或以增加碳汇的形式抵消每年稳定的 CH_4 排放;而在 GWP^* 的视角下,中国畜牧业只需每年有效降低 0.3% 的 CH_4 排放,则可在短期内实现自身碳中和。这意味着两种评价体系下畜牧业的达峰时间将完全不同。在畜牧业持续采取有效减排措施的情况下,采用 GWP^* 的标准制定减排目标比用 GWP 制定的减排目标更早达到。

GWP^* 指标体系对发达国家和发展中国家可能带来的不同影响, Schleussner 等^[34] 称其为“公平性”问题。由公式(4)可知, GWP^* 对于保持增长的排放源的温室效应定量约为 GWP 的 4.5 倍;而对于保持稳定或略有降低的排放源, GWP^* 则认为它未对气候变暖造成进一步影响。由此所引起的实际问题是,发达国家在其过去的发展阶段已造成大量排放,引起了全球变暖,此时只需保持其 CH_4 的排放不再增加即可轻松维持现有的高产量。而对于发展中国家而言,在尚未满足其人口的经济、甚至温饱需求的情况下,需限制化石燃料的使用量和养殖业的发展才能“达峰”。若无发达国家在技术和资金上的援助,在 GWP^* 体系下,发展中国家将面临着与其经济发展需求严重不协调的碳减排压力。

因此,选择 GWP 还是 GWP^* 需要综合考虑评价的目的、评价的时间尺度以及实际可操作性。GWP 以 CO_2 当量的形式定量温室气体气候效应,适合为当下的碳计量、碳交易和产品碳足迹体系下提供统一和便捷的标尺。另一方面, GWP^* 对 SLCP 温升效应的准确捕捉,使其有利于指导各国加强对 CH_4 等减排效益较高的 SLCP 的管理,制定分气体的减排路径,以优化农业、油气和废弃物等以 CH_4 为主的重要排放源的气候变化减缓路径和政策的设计。

3.2.2 中国畜牧业 CH_4 减控的展望

随着经济的发展,世界范围内人均奶制品的消耗量仍将继续上升^[35]。据农业农村部《推进肉牛羊生产发展五年行动方案》^[36] 的通知,到 2025 年,我国牛羊肉产量将分别稳定在 680 万 t 和 500 万 t 左右,与 2019 年的 667 万 t 和 487 万 t 基本持平。从 GWP 的视角看,来自牛羊肠道发酵所产生的 CH_4 的量,在未来 5 年将以稳定的量向大气排放。从 GWP^* 的视角看,若牛羊这两种主要反刍动物的生产维持稳定,则其肠道发酵所产生的 CH_4 与其 20 a 前的排放相比,并不会进一步加剧大气的温室效应;若牛羊养殖效率不断增加,维持目标产量所需的牛、羊

数量不断下降,则可能出现负的 $\text{CO}_{2\text{-we}}$ 数值,即较 20 a 前更低的温室效应。

2018 ~ 2021 年间我国用于“畜禽粪污资源化利用整县推进项目”的总财务预算达 138 亿元。在巨大的减排政策助力下,中国畜牧业粪污的 CH_4 排放已得到大幅的控制和减少。2022 年生态环境部等 5 部门联合印发了《农业农村污染治理攻坚战行动方案(2021—2025 年)》^[37],对我国未来进一步规范畜牧业粪污处理、降低粪污管理的温室气体排放、提高畜牧业粪污资源化利用水平等工作进行了部署。

畜牧业 CH_4 减排的根本是推动精准农业、循环农业的发展,无论是选择基于 GWP 还是 GWP^* 的评价体系,畜牧业的减污降碳都是我国“双碳”工作的重要抓手^[26,27,38]。应从源头做起,根据牲畜不同生长阶段的需求精准投喂饲料,减少营养物质的不完全利用和粪污产生的量^[39]。尽可能对粪污进行无害化、资源化后进行还田^[40]。因地制宜地设计粪污综合治理模式,协调粪污供需,精准设计还田方案,在整个产业生命周期尽量保持营养物质在生产系统内部循环,精准减控外部物质^[41]。选择基于自然的生产方式。深刻把握我国农业生产的特点,加强畜禽养殖环境监测,充分挖掘其碳减排潜力^[42~45]。

4 结论

2000 年后,我国畜牧业的 CH_4 排放不断降低,2019 年的排放量为 743 万 t,较 2000 年降低了 22.4%。从 GWP 的视角看,我国畜牧业 CH_4 排放累积的温室效应不断增加;而从 GWP^* 的视角看,畜牧业 CH_4 排放累积的温室效应在 2015 之后已开始降低。在 GWP 的评价体系下,中国畜牧业实现碳中和需要完全消除排放,或增加碳汇以补偿每年稳定的 CH_4 排放;在 GWP^* 的评价体系下,畜牧业可采取提高效率等方式不再增加 CH_4 排放,通过追求其在大气中源与汇在一定时间范围内的动态平衡实现碳中和。

参考文献:

- [1] Szopa S, Naik V, Adhikary B, et al. Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] National Oceanic & Atmospheric Administration. Trends in globally-averaged CH_4 , N_2O , and SF_6 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements[EB/OL]. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/doi.html>, 2023-02-20.
- [3] United Nations Framework Convention on Climate Change. Decision-/CP. 26: Glasgow climate pact[EB/OL]. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop26_auv_2f_cover_decision.pdf, 2021-11-13.
- [4] 中华人民共和国生态环境部. 中美关于在 21 世纪 20 年代强

- 化气候行动的格拉斯哥联合宣言[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202111/t20211111_959900.shtml, 2021-11-11.
- [5] Saunio M, Stavert A R, Poulter B, *et al.* The global methane budget 2000-2017[J]. *Earth System Science Data*, 2020, **12**(3): 1561-1623.
- [6] 张学智, 王继岩, 张藤丽, 等. 中国农业系统甲烷排放量评估及低碳措施[J]. *环境科学与技术*, 2021, **44**(3): 200-208.
- Zhang X Z, Wang J Y, Zhang T L, *et al.* Assessment of methane emissions from China's agricultural system and low carbon measures[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44**(3): 200-208.
- [7] 郭冬生. 基于 IPCC 排放系数估测主要畜禽甲烷温室气体排放量[J]. *家畜生态学报*, 2020, **41**(9): 65-68.
- Guo D S. Estimates on greenhouse gas emissions from methane of livestock and poultry based on IPCC emission factors[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2020, **41**(9): 65-68.
- [8] 孙亚男, 刘继军, 马宗虎. 规模化奶牛场温室气体排放量评估[J]. *农业工程学报*, 2010, **26**(6): 296-301.
- Sun Y N, Liu J J, Ma Z H. Evaluation of greenhouse gas emissions from scale dairy farm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, **26**(6): 296-301.
- [9] 陈昭辉, 马宗虎, 程琼仪, 等. 利用整体分析法研究华北地区奶牛产业温室气体排放[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(22): 225-235.
- Chen Z H, Ma Z H, Cheng Q Y, *et al.* Greenhouse gas emissions from dairy industry in Northern China using holistic assessment approach[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(22): 225-235.
- [10] 白玫, 马文林, 吴建繁, 等. 北京规模化奶牛养殖企业温室气体排放量评估[J]. *家畜生态学报*, 2017, **38**(5): 78-85.
- Bai M, Ma W L, Wu J F, *et al.* Evaluation on greenhouse gas emission of scale dairy farms in Beijing[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2017, **38**(5): 78-85.
- [11] 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 spatiotemporal characteristics of GHG estimation of livestock's by life cycle assessment in China[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(8): 2167-2176.
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/ywzg/ydqbhb/wsqtz/201907/P020190701765971866571.pdf>, 2018-12.
- [13] 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.
- [14] 叶兴庆, 程郁, 张玉梅, 等. 我国农业活动温室气体减排的情景模拟、主要路径及政策措施[J]. *农业经济问题*, 2022, (2): 4-16.
- Ye X Q, Cheng Y, Zhang Y M, *et al.* Scenario simulation, main paths and policy measures of greenhouse gas emission reduction of agricultural activities in China[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2022, (2): 4-16.
- [15] 程志, 王廷宁, 柳杨, 等. 宁夏畜牧业甲烷排放现状及减排措施研究[J]. *农业科学研究*, 2017, **38**(1): 7-9, 56.
- Cheng Z, Wang T N, Liu Y, *et al.* Methane emission of animal husbandry and reduction measures in Ningxia[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2017, **38**(1): 7-9, 56.
- [16] 张帆, 刁其玉. 畜牧业温室气体排放及其减排研究进展[J]. *家畜生态学报*, 2015, **36**(11): 81-85.
- Zhang F, Diao Q Y. Research progress on greenhouse gas emissions of animal husbandry and emission reduction measures[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2015, **36**(11): 81-85.
- [17] Allen M R, Fuglestedt J S, Shine K P, *et al.* New use of global warming potentials to compare cumulative and short-lived climate pollutants[J]. *Nature Climate Change*, 2016, **6**(8): 773-776.
- [18] Allen M R, Shine K P, Fuglestedt J S, *et al.* A solution to the misrepresentations of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation[J]. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2018, **1**(1), doi: 10.1038/s41612-018-0026-8.
- [19] Cain M, Lynch J, Allen M R, *et al.* Improved calculation of warming-equivalent emissions for short-lived climate pollutants[J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2019, **2**(1), doi: 10.1038/s41612-019-0086-4.
- [20] Lynch J, Cain M, Pierrehumbert R, *et al.* Demonstrating GWP*: a means of reporting warming-equivalent emissions that captures the contrasting impacts of short- and long-lived climate pollutants[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, **15**(4), doi: 10.1088/1748-9326/ab6d7e.
- [21] Smith M A, Cain M, Allen M R. Further improvement of warming-equivalent emissions calculation[J]. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2021, **4**(1), doi: 10.1038/s41612-021-00169-8.
- [22] Nason J. Carbon neutrality or climate neutrality? Scientists debate pathway for beef[EB/OL]. <https://www.beefcentral.com/news/carbon-neutrality-or-climate-neutrality-scientists-debate-pathway-for-beef>, 2023-12-29.
- [23] Liu S L, Proudman J, Mitloehner F M. Rethinking methane from Animal agriculture[J]. *CABI Agriculture and Bioscience*, 2021, **2**(1), doi: 10.1186/s43170-021-00041-y.
- [24] Pérez-Domínguez I, del Prado A, Mittenzwei K, *et al.* Short- and long-term warming effects of methane may affect the cost-effectiveness of mitigation policies and benefits of low-meat diets[J]. *Nature Food*, 2021, **2**(12): 970-980.
- [25] Mar K A, Unger C, Walderdorff L, *et al.* Beyond CO₂ equivalence: the impacts of methane on climate, ecosystems, and health[J]. *Environmental Science & Policy*, 2022, **134**: 127-136.
- [26] Beck M R, Thompson L R, Campbell T N, *et al.* Implied climate warming contributions of enteric methane emissions are dependent on the estimate source and accounting methodology[J]. *Applied Animal Science*, 2022, **38**(6): 639-647.
- [27] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT database[EB/OL]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>, 2023-12-29.
- [28] IPCC. Summary for policymakers[A]. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* (Eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [29] 农业农村部市场预警专家委员会. 中国农业展望报告 2020-2029[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020.
- [30] Harvey L D D. A guide to global warming potentials (GWPs)[J]. *Energy Policy*, 1993, **21**(1): 24-34.
- [31] Manne A S, Richels R G. An alternative approach to establishing

- trade-offs among greenhouse gases [J]. *Nature*, 2001, **410** (6829): 675-677.
- [32] Alvarez R A, Pacala S W, Winebrake J J, *et al.* Greater focus needed on methane leakage from natural gas infrastructure [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109**(17): 6435-6440.
- [33] Shine K, Cain M, Allen M. Climate metrics under ambitious mitigation [EB/OL]. https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/academic/Climate_Metrics_%20Under_%20Ambitious%20Mitigation.pdf, 2017-11-13.
- [34] Schleussner C F, Nauels A, Schaeffer M, *et al.* Inconsistencies when applying novel metrics for emissions accounting to the Paris agreement [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, **14**(12), doi: 10.1088/1748-9326/ab56e7.
- [35] Wyrzykowski Ł, Reincke K, Hemme T. IFCN long-term dairy outlook [R]. Kiel: IFCN, 2018.
- [36] 农业农村部. 农业农村部关于印发《推进肉牛肉羊生产发展五年行动方案》的通知 [EB/OL]. 北京: 农业农村部, 2021.
- [37] 生态环境部, 农业农村部, 住房和城乡建设部, 等. 关于印发《农业农村污染治理攻坚战行动方案(2021—2025 年)》的通知 [R]. 北京: 生态环境部, 农业农村部, 住房和城乡建设部, 水利部, 国家乡村振兴局, 2022.
- [38] 刘刚, 罗千峰, 张利庠. 畜牧业改革开放 40 周年: 成就、挑战与对策 [J]. *中国农村经济*, 2018, (12): 19-36.
Liu G, Luo Q F, Zhang L X. The development of animal husbandry since 40 years of reform and opening-up: achievements, challenges and countermeasures [J]. *Chinese Rural Economy*, 2018, (12): 19-36.
- [39] 周忠凯, 朱志平, 董红敏, 等. 笼养肉鸡生长过程 NH_3 、 N_2O 、 CH_4 和 CO_2 的排放 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2098-2106.
Zhou Z K, Zhu Z P, Dong H M, *et al.* NH_3 , N_2O , CH_4 and CO_2 emissions from growing process of caged broilers [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(6): 2098-2106.
- [40] 徐文倩, 董红敏, 尚斌, 等. 典型畜禽粪便厌氧发酵产甲烷潜力试验与计算 [J]. *农业工程学报*, 2021, **37**(14): 228-234.
Xu W Q, Dong H M, Shang B, *et al.* Experiment and calculation on the biochemical methane potential of typical livestock and poultry manure in anaerobic digestion [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, **37**(14): 228-234.
- [41] 王路路, 辛晓平, 刘欣超, 等. 基于全生命周期分析的呼伦贝尔家庭牧场肉羊温室气体排放 [J]. *应用与环境生物学报*, 2021, **27**(6): 1591-1600.
Wang L L, Xin X P, Liu X C, *et al.* Greenhouse gas emission of Hulunbuir family pasture sheep, based on full life-cycle analysis [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2021, **27**(6): 1591-1600.
- [42] 汪开英, 吴捷刚, 赵晓洋. 畜禽场空气污染物检测技术综述 [J]. *中国农业科学*, 2019, **52**(8): 1458-1474.
Wang K Y, Wu J G, Zhao X Y. Review of measurement technologies for air pollutants at livestock and poultry farms [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, **52**(8): 1458-1474.
- [43] 李阳, 陈敏鹏. 中国省域农业源非 CO_2 温室气体排放的影响因素分析与峰值预测 [J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(12): 5174-5189.
Li Y, Chen M P. Analysis of influencing factors and peak forecast of non- CO_2 greenhouse gas emissions from provincial agricultural sources in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(12): 5174-5189.
- [44] 王聪, 沈健林, 郑亮, 等. 猪粪化肥配施对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放及其全球增温潜势的影响 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3120-3127.
Wang C, Shen J L, Zheng L, *et al.* Effects of combined applications of pig manure and chemical fertilizers on CH_4 and N_2O emissions and their global warming potentials in paddy fields with double-rice cropping [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3120-3127.
- [45] 汪诗平, Wilkes A, 汪亚运, 等. 放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3225-3229.
Wang S P, Wilkes A, Wang Y Y, *et al.* Discussion on reduction potential of CH_4 emission intensity for early off-take practice of grazing yak [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3225-3229.

CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in “2+26” Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)