

我国畜牧业碳排放时空特征与趋势预测

顾沈怡, 邱子健, 詹永冰, 钱锟, 熊若男, 戴海洋, 尹君, 申卫收

引用本文:

顾沈怡, 邱子健, 詹永冰, 钱锟, 熊若男, 戴海洋, 尹君, 申卫收. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0666>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

江苏省农业碳排放时序特征与趋势预测

邱子健, 靳红梅, 高南, 徐轩, 朱津宏, 李庆, 王子清, 徐拥军, 申卫收

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 658-669 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0647>

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>

山西省畜禽粪污土地承载力及粪尿替代化肥潜力分析

郭彩霞, 杨子森, 马文奇, 焦光月, 张建杰

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1548-1557 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1431>

中国畜牧业环境约束的量化分析——基于土地环境承载力和生态足迹

熊学振, 杨春, 于琳

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1799-1807 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0136>

新疆绿洲区秸秆燃烧污染物释放量及固碳减排潜力

杨乐, 邓辉, 李国学, 王琦

农业环境科学学报. 2015, 34(5): 988-993 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.05.023>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.

我国畜牧业碳排放时空特征与趋势预测

顾沈怡¹, 邱子健¹, 詹永冰¹, 钱锟¹, 熊若男¹, 戴海洋¹, 尹君², 申卫收^{1*}

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院/江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室/江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院, 南京 210044)

摘要:为了探讨全国畜牧业碳排放的时空特征并预测到2060年的碳排放趋势,本研究利用排放因子法对全国2001—2017年畜牧业碳排放进行估算,并根据中国膳食协会所制定的膳食指标的食肉量进行预测。结果表明:2001—2017年全国畜牧业CO_{2e}排放量整体呈现升高-降低-回升-降低的趋势,并在2005年达到畜牧业碳排放峰值,估算为4.86亿t。在碳排放源中,畜禽胃肠道发酵的碳排放量占比高于畜禽粪便管理系统,并且在主要畜禽种类中非奶牛养殖过程中的碳排放量要高于其他的畜禽种类。在空间分布上,中南和西南地区的碳排放量相较于我国其他地区更高。根据膳食指标规定的健康食肉量标准进行调整,对于碳减排有着显著的积极影响,在未来40年内可减少畜牧业碳排放量的25%~75%。研究表明,在2001—2017年间全国畜牧业已在2005年实现碳达峰,在未来膳食结构中肉类消费量改善的前提下,畜牧业碳排放量的持续降低有利于我国碳中和目标的实现。

关键词:畜牧业碳排放;时空特征;碳达峰;膳食结构;趋势预测

中图分类号:F326.3;X322 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)03-0705-10 doi:10.11654/jaes.2022-0666

Spatial-temporal characteristics and trend prediction of carbon emissions from animal husbandry in China

GU Shenyi¹, QIU Zijian¹, ZHAN Yongbing¹, QIAN Kun¹, XIONG Ruonan¹, DAI Haiyang¹, YIN Jun², SHEN Weishou^{1*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology/ Key Laboratory of High Technology Research on Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control in Jiangsu Province/ Jiangsu Atmospheric Environment and Equipment Technology Collaborative Innovation Center, Nanjing 210044, China; 2. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The emission factor method was used to estimate and explore the temporal and spatial characteristics of carbon emissions from animal husbandry in China from 2001 to 2017. Based on the amount of meat consumed according to the dietary index of the Chinese Dietetic Association, the carbon emission trend was projected in 2060. The results demonstrated that from 2001 to 2017, CO_{2e} emissions from the animal industry in China fluctuated and reached their peak at approximately 486 million tons in 2005. The proportion of carbon emission from gastrointestinal fermentation was considerably larger than that from livestock manure management. Further, the carbon emission from non-dairy farming was notably higher than that from other livestock and poultry. Additionally, in terms of spatial distribution, carbon emissions in south-central and southwest China were higher than those in other regions. Adjustments to healthy meat consumption standards set by dietary targets might yield a significant positive impact on carbon emission reduction, thereby decreasing

收稿日期:2022-06-29 录用日期:2022-11-13

作者简介:顾沈怡(1998—),女,江苏苏州人,硕士研究生,从事畜牧业氨气和氧化亚氮排放控制研究。E-mail:2691259196@qq.com

*通信作者:申卫收 E-mail:wsshen@nuist.edu.cn

基金项目:江苏省发展和改革委员会碳达峰策略和路径前期研究;南京信息工程大学气候与环境治理研究院开放课题(ZKKT2022A09)

Project supported: Preliminary Study on Strategies and Paths of Carbon Emission Peak for Jiangsu Development and Reform Commission; Open Project of Research Institute of Climatic and Environmental Governance, Nanjing University of Information Science and Technology (ZKKT2022A09)

carbon emissions from livestock industry by 25%–75% over the next 40 years. Our study showed that the carbon emission peak of the livestock industry in China was achieved in 2005 during 2001 to 2017. The continuous reduction of carbon emissions from the animal industry in the future through the improvement of dietary structure will enable the realization of national carbon-neutral goals in China.

Keywords: carbon emissions from the animal industry; temporal and spatial characteristics; carbon emission peak; dietary pattern; trend prediction

全球变暖是当今世界人类发展所面临的巨大挑战,二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)的排放是造成全球温室效应的主要原因之一。据Global Carbon Budget 2021数据统计,1950年大气CO₂浓度为277 μg·cm⁻³,而到2021年时已上升了49%,达到415 μg·cm⁻³。我国也是受气候变化影响较大的国家之一。实现碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,要把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局,2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和的目标。

农业是国民经济的基础,近年来随着畜牧业快速发展,其已成为我国农业及农村经济的支柱产业^[1]。2015年全国畜禽规模养殖占比较2011年提高了10%~15%^[2],畜牧业产值占农林牧渔业总产值的36%。随着畜禽养殖规模的增大,畜牧业的碳排放也不容忽视,畜牧业的碳排放主要包括反刍动物胃肠道发酵和畜禽粪便管理缺氧产生的CH₄排放,以及畜禽粪便在收集、贮存和堆肥等过程中产生的N₂O排放^[3]。研究表明,全球畜牧业产生的CH₄和N₂O占农业非CO₂温室气体排放量的80%^[4],占全球人为温室气体排放总量的12%;同时2006年联合国粮农组织(FAO)指出全球畜牧业CO₂、N₂O、CH₄排放占人类活动排放总量的9%、65%、37%,按照CO₂当量(CO₂e)计算,畜牧业温室气体排放总量占人类活动温室气体排放量的18%^[5]。

现有的研究主要围绕农业,特别是种植业对碳排放的影响^[6-7]。而在畜牧业碳排放中主要侧重时间维度上的变化趋势分析,而对空间尺度方面的分析不够细致深入^[8];或单独选取某个地区作为主要的研究对象,缺少对全国各个地区的分析比较研究^[9-10]。此外,很多研究着眼于碳排放的影响因素、措施性建议^[11-13]等方面,缺少从较为新颖的视角来分析预测我国的碳排放趋势。为了解决上述问题,并对我国畜牧业的温室气体产生量在时间、空间上有更加全面、深入的认识,本研究将《中国农村统计年鉴》上从2001年至2017年的畜禽养殖量进行统计。考虑到数据获取难易程度以及反映碳排放结果的准确性,本研究利用排

放因子法^[14]对全国畜牧业碳排放量进行估算。参考联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的《2006年国家温室气体清单编制指南报告》等获取排放因子,对各排放源以活动水平和排放因子的乘积估算其碳排放量^[15-16]。

对畜牧业碳排放预测方法的选择,本研究从“膳食结构”这一新角度入手。我国是肉类消费大国,猪肉、牛肉、羊肉和禽肉这些主要肉类均来自于畜禽养殖。通过改变食物需求倒逼畜牧业生产调整逐渐成为温室气体减排的一大措施。调整饮食结构,更多的用植物蛋白来代替动物蛋白,从而影响肉类的供给,减少畜牧业中的碳排放^[17-19]。膳食消费、食物系统与畜牧业的发展息息相关,食物系统对于全球温室气体的贡献尤为突出,而食物系统始于农业生产止于膳食消费。对食物的大类进行区分,发现动物源性食物的碳足迹约是植物源性食物碳足迹的12倍,甚至更高^[20-21],而动物源性食物主要来自于畜牧业生产。中国营养学会编撰的《中国居民膳食指南》中指出,健康饮食结构的人均食肉量应为40~75 g·d⁻¹,即14.6~27.4 kg·a⁻¹。2017年的统计数据显示,我国每年的人均食肉量为49 kg,远高于建议食肉量,因此在食肉量方面进行调整对减少碳排放具有积极作用。本研究将膳食结构中的食肉量进行合理调整,预估通过膳食结构调整后的畜牧业碳排放对我国“双碳”目标实施的影响,为畜牧业绿色健康发展提供科学依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 畜牧业碳排放估算方法

畜牧业温室气体排放源主要是畜禽胃肠道发酵(即在正常的代谢过程中,寄生在动物消化道内的微生物发酵消化道内饲料时从动物口、鼻和直肠排出体外的CH₄)和动物畜禽粪便管理系统(即在畜禽粪便施入到土壤之前动物粪便贮存和处理所产生的CH₄、N₂O排放)。

目前碳排放估算方法主要包括排放因子法、物料平衡法^[22]、生命周期法^[23]、质量平衡法、实测值法以及模型法。物料平衡法的基本原理是物质守恒定律,即

输入物料量等于输出物料量与物料流失量之和,该方法可以对产生和排放的物质进行系统和全面的研究,具有较强的科学性及实施有效性,但工作量大,需要搜集详细的工业生产过程数据,而且要全面了解生产工艺、化学反应、副反应和管理等情况;产品生命周期是指产品生产和使用的全过程,该方法有详细的计算过程而且结果比较准确,适合于微观层面的计算,但生命周期阶段和边界的确定比较复杂,边界的限制使得系统完整性较差,因此需要大量具有时效性的基础数据作为前提条件,进而使得核算成本高且耗时长;质量平衡法是根据每年用于国家生产生活的新化学物质和设备,计算为满足新设备能力或替换去除气体而消耗的新化学物质份额,其优势在于该方法可反映实际碳排放量,但中间考虑过程多、数据获取困难、误差较大;实测值法是通过排放源的现场实测基础数据计算碳排放量,其中间环节少、结果较准确,但数据获取较困难、投入较大;模型法主要通过数学模型等进行估算,但运行模型所需数据种类较多。对比各方法的优缺点后,本研究选用了排放因子法,该方法所涉及到的数据获取容易,且可较为准确地反映我国畜牧业的温室气体排放量。

全国畜牧业碳排放量计算方法中涉及的活动水平数据为各地区的畜禽养殖量(年末存栏量),从《中国农村统计年鉴》《中国畜牧兽医年鉴》以及各地区统计年鉴中获取。

畜牧业碳排放量计算公式:

$$I = \sum I_i = \sum AD_i \times EF_i$$

式中: I 为畜牧业的CO₂e排放总量; I_i 为第*i*类温室气体排放源的CO₂e排放量; AD_i 为第*i*类温室气体排放源的活动水平; EF_i 为第*i*类温室气体排放源的CO₂e排放系数。

我国缺少适用于本土的排放因子,且排放因子法对于本土的适用性修正需要大量的实际观测数据,但这些数据短期内较难获得。因此本研究选用了在全球范围内较为权威的IPCC排放因子,畜牧业温室气体排放源的排放系数主要参考《2006年国家温室气体清单编制指南报告》的推荐值,具体见表1。

1.2 依据膳食指南中肉类摄入量进行碳排放预测

碳足迹是指个人、组织、活动或产品直接或者间接导致的温室气体排放总量,碳足迹计算器是一种用于估计个人或家庭碳排放量的网络计算器。该结果的生成通过边界核查、数据收集、基于LCA生命周期核算(排放因子数据库包括Ecoinvent、DECC等)、报

告生成几个阶段来实现,因此产出的结果较为准确且具有参考价值。本研究根据碳足迹计算器中每种肉类每千克的碳排放量以及《中国居民膳食指南》中建议的食肉量预测出到2060年时的碳排放量,计算公式如下:

$$L = X_i \times Y_i \times \gamma$$

$$E = L \times P \times \gamma$$

式中: L 为每年人均碳排放量; X_i 为肉类的碳排放量; Y_i 为人均每年食肉量; E 为该年的CO₂当量排放量; P 为该年人口数; γ 为校正系数,为已知年份估算值与已知年份预测值的比值,单位禽肉的碳排放量不只涉及到畜牧业,因此预测值需用校正系数进行修正。

1.3 数据来源

本研究中2001—2017年全国各地区主要畜禽的年底存栏数等数据均来自于历年的《中国农村统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国畜牧兽医年鉴》以及国家统计局网站;文中的膳食标准肉类摄入量数据来自于《中国居民膳食指南》;2017、2020年的人口数据来自于国家统计局;2025—2060年的人口预测值来自于《国务院关于印发国家人口发展规划(2016—2030年)的通知》以及《世界人口展望2022》中等情景下中国人口预测值;人均肉类消费量数据来自于经济合作与发展组织(OECD)《全球肉类人均消费量1990—2029》。

2 结果与分析

2.1 畜牧业碳排放时空特征

在2001—2017年间,全国畜牧业CO₂e排放量总体呈升高-降低-回升-降低的变化趋势(图1),具体表现为2005年较2001年碳排放量增加了16.41%,2007

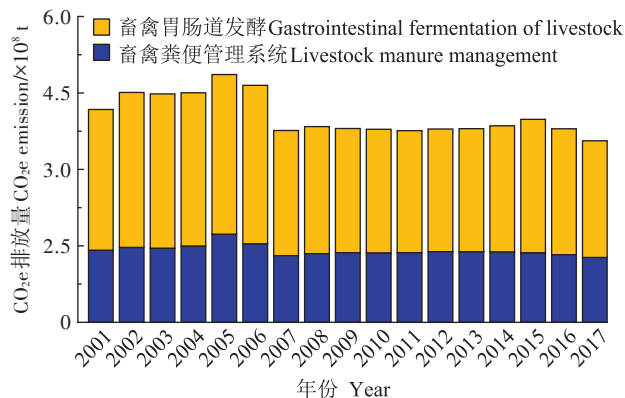


图1 2001—2017年全国畜牧业CO₂e排放变化

Figure 1 CO₂e emission from animal industry in China from 2001 to 2017

表 1 全国畜牧业各地区温室气体排放系数(kg·头⁻¹·a⁻¹)

Table 1 Greenhouse gas emission coefficient of each region of national animal husbandry(kg·head⁻¹·a⁻¹)

地区 Region	畜禽 Livestock	胃肠道发酵 Gastrointestinal fermentation	粪便管理系统 Manure management	
		CH ₄ 排放系数	CH ₄ 排放系数	N ₂ O 排放系数
华北	奶牛	88.1	7.46	1.846
	非奶牛	52.9	2.82	0.794
	绵羊	8.2	0.15	0.093
	山羊	8.9	0.17	0.093
	猪	1.0	3.12	0.227
	家禽	忽略不计	0.01	0.007
	奶牛	88.1	2.23	1.096
东北	非奶牛	52.9	1.02	0.913
	绵羊	8.2	0.15	0.057
	山羊	8.9	0.16	0.057
	猪	1.0	1.12	0.266
	家禽	忽略不计	0.01	0.007
	奶牛	88.1	8.33	2.065
	非奶牛	52.9	3.31	0.846
华东	绵羊	8.2	0.26	0.113
	山羊	8.9	0.28	0.113
	猪	1.0	5.08	0.175
	家禽	忽略不计	0.02	0.007
	奶牛	88.1	8.45	1.710
	非奶牛	52.9	4.72	0.805
	绵羊	8.2	0.34	0.106
中南	山羊	8.9	0.31	0.106
	猪	1.0	5.85	0.157
	家禽	忽略不计	0.02	0.007
	奶牛	88.1	6.51	1.884
	非奶牛	52.9	4.72	0.691
	绵羊	8.2	0.34	0.064
	山羊	8.9	0.31	0.064
西南	猪	1.0	5.85	0.159
	家禽	忽略不计	0.02	0.007
	奶牛	88.1	5.93	1.447
	非奶牛	52.9	1.86	0.545
	绵羊	8.2	0.28	0.074
	山羊	8.9	0.32	0.074
	猪	1.0	1.38	0.195
西北	家禽	忽略不计	0.01	0.007

注:CH₄、N₂O 均按照 IPCC AR6 评估报告中百年尺度 CO₂ 增温潜势的 27 倍和 273 倍换算成 CO₂e 估算。
Note: The following CH₄ and N₂O are calculated according to the CO₂e of 27 times and 273 times of the 100-year-scale CO₂ warming potential in the IPCC AR6 Assessment Report.

年较 2005 年减少了 22.57%,2015 年较 2007 年增加了 3.31%,2017 年较 2015 年降低了 8.42%。在 2001—2017 年间,峰值出现在 2005 年,为 4.86 亿 t,2006 年至 2007 年期间生猪行业出现疫病,养殖结构发生了变化,同时也造成牛和羊的养殖量减少,使得畜牧业

CO₂e 排放量降幅最为明显,为 3.76 亿 t;2007 年到 2015 年排放量相对平稳,2015 年后因为动物性传染病和奶牛养殖业的问题使得畜牧业 CO₂e 排放量又开始下降。在畜禽业的两个主要排放源的占比中可以看出,畜禽胃肠道发酵所产生的 CO₂e 排放量高于畜

表2 单位畜禽肉量的碳排放量

Table 2 Carbon emissions per unit of meat

种类 Specy	质量 Mass/kg	碳排放量 Carbon emissions/kg
羊肉	1	39.20
牛肉	1	27.00
猪肉	1	12.10
鸡肉	1	1.80

注:本研究中使用的数据是取这4类畜禽肉的平均值作为单位肉量的碳排放量,即1 kg肉产生的碳排放为20.025 kg,此数据与中国产品全生命周期温室气体排放系数库(CPCD)所得数据误差(0.03%)较小。

Note: The data in this research are used to calculate the carbon emissions per unit of meat quantity by taking the four kinds of meat as a whole, that is, the carbon emissions generated by 1 kg meat are 20.025 kg, with small error (0.03%) with the data obtained from the life-cycle greenhouse gas Emission Coefficient Database (CPCD) of Chinese products.

禽粪便管理系统。我国主要分为西北、西南、中南、华东、东北和华北6个地区。从图2a可以看出,畜禽粪便管理系统中CO₂e排放量各地区占比大小为中南>华东>西南>华北>东北>西北;图2b为各地区畜禽胃肠道发酵的CO₂e排放量的贡献占比,整体表现为西南、中南地区排放量较多,西北、华北地区次之,华东、东北地区的排放量较少。

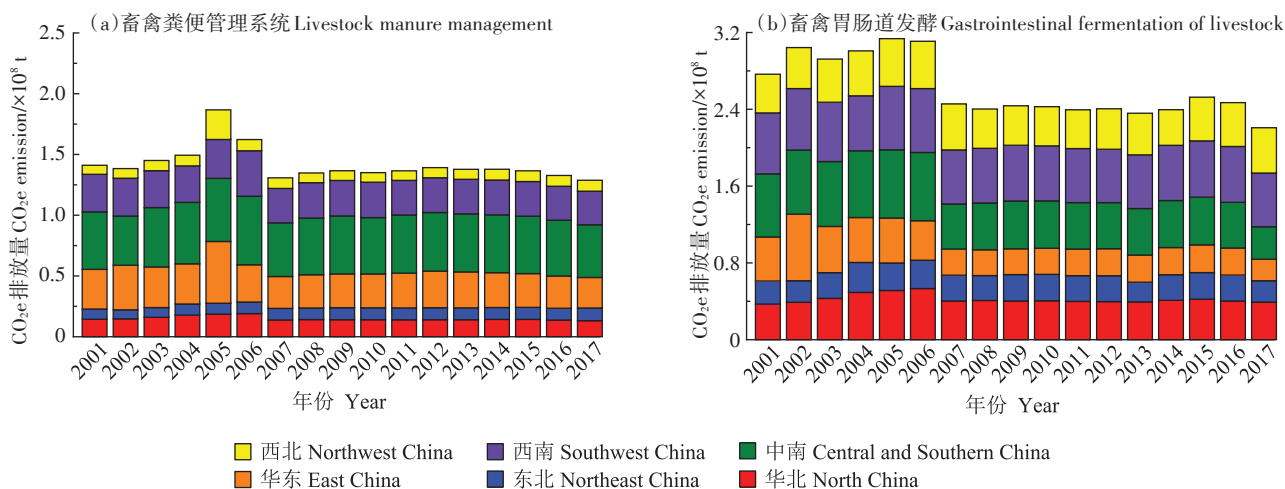
从畜禽种类角度分析,本研究考虑了畜牧业中常见的畜禽种类,分别为奶牛、非奶牛、家禽、山羊、绵羊和猪。图3a是畜禽粪便管理系统的CO₂e排放量,可以看出2005年和2006年呈现出明显的年际差异,在2007年持续下降后有所回升,自2014年后则逐年降低。在所有畜禽中,猪是畜禽粪便管理系统中最重要的排放源,平均占比56.70%,其次是奶牛、家禽、非奶牛、山羊、绵羊,分别占比18.53%、9.56%、7.91%、

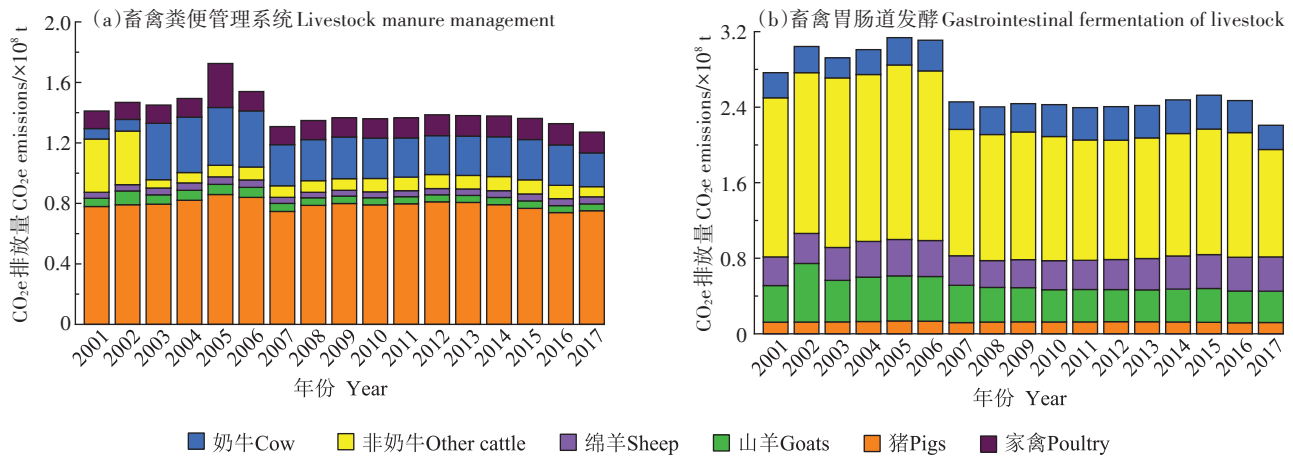
3.82%和3.02%。图3b是在各畜禽胃肠道发酵系统中产生的CO₂e排放量的占比,与畜禽粪便管理系统的变化趋势大致相同,畜禽胃肠道发酵CO₂e排放量在2007年较2006年大幅降低,此后趋于平稳,自2015年后逐年下降。2001—2017年间,所有畜禽中,非奶牛胃肠道发酵贡献的排放量最多,平均占比55.41%,其次是山羊(15.00%)、绵羊(12.89%)、奶牛(11.88%),猪贡献最少,平均占比4.84%。结合上述各地区、各畜禽种类对CO₂e排放量的影响,对于畜牧业碳减排的重点可以考虑畜禽胃肠道发酵方面,可以从西南、中南等地区控制养殖规模,针对非奶牛的养殖方式进行优化改进。

2.2 基于膳食结构中食肉量调整对畜牧业碳排放的预测

在上述畜牧业碳排放估算中主要考虑了胃肠道发酵和畜禽粪便管理系统两大排放源,但表2中单位肉量碳排放不仅涉及上述两大排放源,还包括生产运输过程等碳排放过程,因此需对数据结果进行校正。基于OECD的2017年人均肉类消费量和该年人口数得出碳排放量预测值为 1.37×10^5 万t,结合2017年的估算值为 3.56×10^4 万t,得出校正系数为0.26。

根据OECD中2020—2029年的人均肉类消费量数据分析,每年消费量的增长率相对固定,2020—2025年的年均增幅约为3%,2026—2029年的年增幅均稳定在0.4%。为了探究食肉量对碳排放的影响,将2030—2060年的每年增幅也控制在0.4%左右,并将此作为情景1;情景2则是人均肉类消费量从2017年的49.01 kg减少至27.4 kg(建议最大食肉量),具体

图2 2001—2017年全国各地区畜牧业CO₂e当量排放变化Figure 2 Changes of CO₂e emissions from animal husbandry in China from 2001 to 2017

图3 2001—2017年全国不同畜禽种类CO₂e排放变化Figure 3 CO₂e emission from livestock and poultry species in China from 2001 to 2017

表现如表3所示,每个时间段分别降低1.84、1.00、1.00、0.30、0.15、0.16 kg·a⁻¹;情景3则是人均肉类消费量从2017年的49.01 kg减少至14.60 kg(建议最小食肉量),具体表现为每个时间段分别降低2.00、1.20、1.20、0.55、0.55、0.54 kg·a⁻¹。

根据羊肉、牛肉、猪肉、鸡肉的碳足迹(表2),以及不同年份预测的食肉量(表3)进行估算,得到如图4a所示的人均碳排放量。根据国家统计局统计的数据,2017、2020年全国总人口数分别为140 011万、141 212万人,国家统计局预测全国总人口数在2025—2030年达到峰值,其中2025、2030年的全国总人口数的预测值分别为150 000万、145 200万人,2030—2060年的人口数参考《世界人口展望2022》中等情景下对中国人口数的预测值。根据公式得出全国畜牧业碳排放量的修正值如图4b所示。2020—2060年间碳排放峰值出现在2025年,为4.01亿t,2025年之后呈现出下降趋势。自2025年起3种情景的CO₂e排放量呈现出显著差异,情景2较情景1在2025、2030、2040、2050、2060年时,分别能减少25%、38%、43%、48%、53%的CO₂e;情景3较情景1在2025、2030、2040、2050、2060年时,分别能减少28%、40%、53%、64%、75%的CO₂e。从上述结果可以看出,通过改善膳食结构食肉量有助于减少畜牧业碳排放,且效果显著。

3 讨论

3.1 全国畜牧业碳排放变化趋势与现状

本研究是以全国畜牧业碳排放量作为研究对象,将全国各省按照地区进行碳排放量的计算。系统地将畜牧业产生温室气体的两类排放源进行分别计算并整合成CO₂e排放量来分析。从本研究的计算结果发现,全国畜牧业碳排放量已经呈现出下降的趋势,并且从2001年至2017年间,在2005年排放量达到了峰值,这和郭娇等^[8]计算出的中国畜牧业碳排放趋势大致相同。畜牧业的碳达峰具有很多不确定因素,如社会转型(人口规模、年龄结构、城镇化率)、经济发展(GDP、国内外贸易)、技术进步(颠覆性技术、成本)、行为模式(消费行为)、相关政策(宏观政策)。2006年受禽流感、口蹄疫、猪链球菌病以及不断曝光的还原奶、注水肉、瘦肉精等畜产品质量卫生事件的影响,畜产品消费快速减少,畜产品价格大幅下滑,畜禽存栏量急剧降低,兽药饲料业陷于困境,畜牧业进入发展的低谷期。上述卫生质量问题导致养殖结构发生了变化,牛、羊等反刍动物数量明显降低,造成了肠道发酵过程中CH₄排放量的降低,最终导致2006—2007年的畜牧业碳排放量于2005年后呈现出断崖式下降,并在后面几年疫病缓解的同时也未大幅度增加。

表3 2017—2060年不同食肉量的情景设置(kg)

Table 3 Different meat consumption settings from 2017 to 2060(kg)

情景 Scenario	2017	2020	2025	2030	2040	2050	2060
情景1(目前人均肉类消费量)	49.01	45.12	51.49	51.69	53.80	55.99	58.27
情景2(建议最大食肉量)	49.01	43.50	38.50	33.50	30.50	29.00	27.40
情景3(建议最小食肉量)	49.01	43.00	37.00	31.00	25.50	20.00	14.60

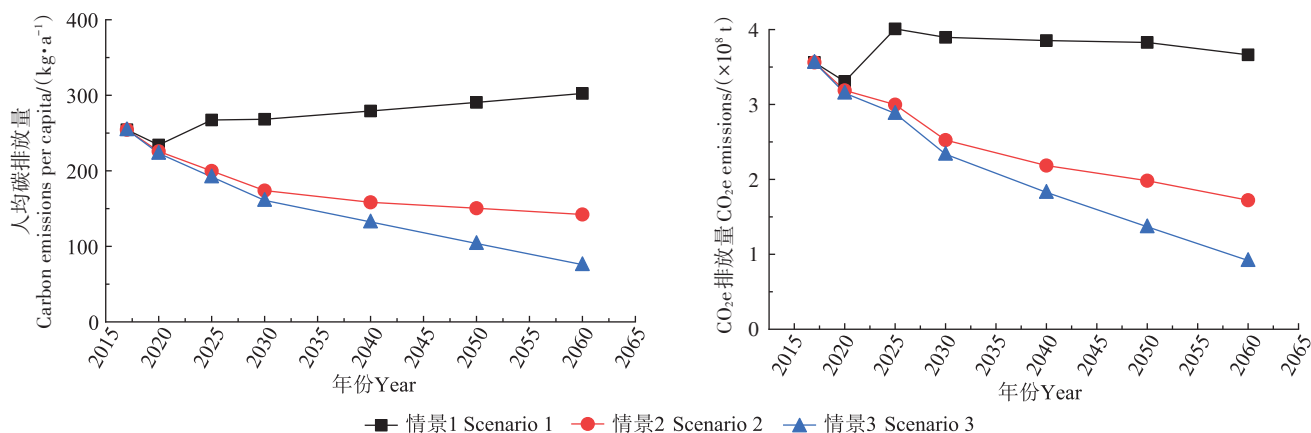


图4 不同情景下2020—2060年全国畜牧业碳排放预测

Figure 4 Prediction of animal industry CO₂e emissions in China from 2020 to 2060 under different scenarios

结合预测结果来看,2020—2060年间碳排放量的峰值(2025年)为4.01亿t,低于2005年的碳排放量(4.86亿t),且2025—2060年间呈现出持续降低的趋势,因此合理预测在2060年后碳排放也将呈现下降趋势,这也增强了2005年全国畜牧业碳达峰这一结论的可信度。

本研究以畜牧业的两类碳排放源进行分析,研究的主要种类为奶牛、非奶牛、绵羊、山羊、猪和家禽,但家禽在胃肠道发酵过程中的CH₄排放很少,可忽略不计。从整体来看,两类排放源中畜禽胃肠道发酵的占比高于畜禽粪便管理系统的占比,并且在胃肠道发酵中非奶牛的排放贡献量达到55.41%,这与胡向东等^[3]对各省畜禽温室气体排放的测算结果相对应。因此若从畜禽种类考虑减排,可通过规模化、集约化和标准化养殖来提高畜禽的生产效率,采用低蛋白饲料来减少畜禽肠道发酵所产生的碳排放。

本研究不仅在时间维度上分析畜牧业碳排放现状以及不同畜禽种类对碳排放的影响,而且还在空间维度上对其进行深入分析,探究了全国6个地区的碳排放现状和差异,做到“横向+纵向”分析。田云等^[24]通过计算全国31个省份的农业碳排放强度,发现其在省际之间存在较大差异,因此本研究也在空间分布上对我国畜牧业碳排放进行了细致分析,将全国31个省市自治区划分为华北、东北、华东、中南、西南、西北6个地区。全国不同地区的畜禽养殖具有不同的特点,华北地区主要是养牛、羊、猪等大型家畜,其中河北省的牧业较为发达;东北地区具有适合种植的平原地区,森林、草原资源丰富,主要是农耕区畜牧业和林区畜牧业,发达的种植业为农耕区畜牧业提供了丰富的饲料;华东地区主要以家禽、猪、牛、羊养殖为主,

其中山东省、江苏省、安徽省的养殖业较为发达;中南地区以牛、猪养殖为主,河南省以牛养殖最为突出;西南地区是农区和牧区并重的畜牧业,是我国重要的畜牧业生产基地之一,以猪、牛、羊为主,农牧结合,为其提供了役畜、肥料和其他经济收入;西北地区依靠自身天然条件发展山地畜牧业,草场资源丰富,牧草种类丰富,以羊和牦牛养殖为主。从畜禽粪便管理系统来看,猪业养殖产生的碳排放占比较大(图3),而全国养猪量大的地区主要集中在中南、西南和华东地区,因此中南、西南和华东地区粪便管理系统的碳排放较多(图2a)。由此也可印证猪是粪便管理系统碳排放的主要畜禽贡献种类。从图2b可以看出,畜禽胃肠道发酵排放源中的主要畜禽种类为非奶牛,我国水牛、黄牛等非奶牛养殖主要集中在广西、云南、四川、河南等西南地区和华中地区,因此在胃肠道发酵的碳排放中西南、华中地区的排放量较高(图2)。

3.2 膳食结构调整对于畜牧业碳减排的必要性

对人体健康而言,在整个生命周期中,膳食是人体生长发育和健康最直接且至关重要的因素,长期规律的合理膳食能促进人体健康、提高机体免疫力。《中国居民膳食指南》建议要遵循平衡膳食原则,维持以植物性食物为主。近年来越来越多的研究者发现膳食结构与碳排放有着密切的关系,减少食用动物类的食物,以植物类食物进行替代能够明显减少畜牧业的碳排放^[25]。研究表明用植物蛋白代替动物蛋白可以使2050年的全球温室气体排放量降低56%^[26];通过健康饮食的宣传教育改变人们的膳食选择,进而改变食物需求的结构,从而可降低动物类食物的消费占比。Hu等^[27]的研究发现动物类食物消费占比减少10%,2030年N₂O的排放可减少12%。

不同于之前注重于峰值分析等常见角度,本研究从膳食结构中“食肉量”这一新颖的视角来对畜牧业碳排放进行预测,为碳减排提供了一个新的思路。利用健康膳食结构中的建议食肉量和我国预测的食肉量进行对比,可以发现在膳食结构方面进行调整的减排效果将会非常显著。若达到表3中的建议最大食肉量水平时,在未来40 a中可减少25%~48%的畜牧业碳排放;若达到建议最小食肉量水平时,则在未来40 a中可减少28%~75%的碳排放,虽然该水平较难达到,但可以从图4中看出减少畜禽肉(尤其是反刍动物肉类^[20])食用量的必要性。同时也有研究表明^[28-31],在动物源性食物中畜禽肉类的占比与温室气体排放强度成正比。不同类型的人对于膳食结构的选择存在着差异,因此不能实行完全相同的膳食调整:对于一般人群采用鼓励宣传的手段让他们适当增加蔬菜、水果等食物占比,从而减少牛肉、羊肉等禽肉消费;对于禽肉食用过多的肥胖人群可以通过干预他们的膳食选择;对于营养缺乏的人群可以提供补助来提高他们的膳食营养^[32-33]。

3.3 畜牧业碳减排措施

本研究表明膳食结构的调整对于畜牧业碳减排有着重要的作用。畜牧业碳减排措施可以考虑从调整膳食结构、优化养殖模式^[34]、政策倡导等方面来进行。

(1)提倡科学膳食,减少食肉量。从本研究结果可看出少吃肉可以显著减少畜牧业碳排放,并且合理的膳食结构可以增强人的体质,同时实现健康和环保的目标。

(2)优化畜禽养殖模式。优化畜禽饲料:选择低蛋白饲料,减少反刍动物胃肠道发酵中的CH₄排放。优良的饲料可以减少饲料的消耗量。有研究表明日粮中蛋白酶的使用使全球增温潜势减少12%^[35];低蛋白日粮较正常蛋白水平日粮,可使全球增温潜势降低18%^[36];每降低1%粗蛋白含量能够减少氮排放8%~10%^[37]。优化畜禽粪便管理系统:主要分为养殖方式的优化以及粪便处理工艺的优化。研究发现发酵床养殖的温室气体排放量比传统养殖舍内温室气体排放量减少26.3%^[38]。对于粪便处理主要采用堆肥的方式,可通过添加化学添加剂、物理添加剂以及接种微生物的方法^[39-45]降低堆肥过程中温室气体的排放。

(3)因地制宜,进一步促进畜牧业集约化发展。在人地矛盾相对较小的地区鼓励发展畜牧业,同时注重保护当地生态环境,例如西南、西北地区占地面积大,具有丰富草场、森林资源的地方;在经济发展较

快、人口密度较大的省区应合理控制养殖规模,如长三角、珠三角等经济发达地区。

4 结论

(1)全国2001—2017年畜牧业CO₂e排放量整体呈现升高—降低—回升—降低的趋势,并在2005年达到了峰值,为4.86亿t。

(2)在全国畜牧业的两类碳排放源中,畜禽胃肠道发酵的碳排放量占比高于动物粪便管理系统的碳排放量。在动物粪便管理系统中各地区的CO₂e排放量的占比大小为中南>华东>西南>华北>东北>西北;在主要畜禽中猪是畜禽粪便管理系统中最重要排放源。在畜禽胃肠道发酵系统中各地区的CO₂e排放量的占比大小为西南>中南>西北>华北>华东>东北;在主要畜禽中非奶牛是动物胃肠道发酵系统中最重要排放源。因此,全国畜牧业的碳减排可从畜禽胃肠道发酵系统重点考虑,着重考虑我国西南、中南地区;此外也要特别注意非奶牛的养殖和碳减排。

(3)按照健康膳食结构的食肉量进行调整,可有效减少畜牧业的CO₂e排放量,结合畜禽饲料优化和畜禽粪便管理等技术可进一步减少畜牧业碳排放,完成国家2060年碳中和的目标。

参考文献:

- [1] 王锋. 中国碳排放峰值及其倒逼机制研究的发展动态[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(2): 141-150. WANG F. Development trend of the study on China's carbon emission peak and its forcing mechanisms[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(2): 141-150.
- [2] 姚成胜, 钱双双, 李政通, 等. 中国省际畜牧业碳排放测度及时空演化机制[J]. 资源科学, 2017, 39(4): 698-712. YAO C S, QIAN S S, LI Z T, et al. Provincial animal husbandry carbon emissions in China and temporal-spatial evolution mechanism[J]. *Resources Science*, 2017, 39(4): 698-712.
- [3] 胡向东, 王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 247-252. HU X D, WANG J M. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(10): 247-252.
- [4] HAVLIK P, VALIN H, HERRERO M, et al. Climate change mitigation through livestock system transitions[J]. *PNAS*, 2014, 111(10): 3709-3714.
- [5] 孟祥海, 张俊彪, 李鹏, 等. 畜牧业环境污染形势与环境治理政策综述[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(1): 1-8. MENG X H, ZHANG J B, LI P, et al. Summary of livestock environmental pollution and environmental management policies[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(1): 1-8.

- [6] 吴义根, 冯开文. 中国省际农业碳排放的时空分异特征及关联效应[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(3): 180-190. WU Y G, FENG K W. Spatial-temporal differentiation features and correlation effects of provincial agricultural carbon emissions in China[J]. *Environment Science & Technology*, 2019, 42(3): 180-190.
- [7] 伍国勇, 刘金丹, 杨丽莎. 中国农业碳排放强度动态演进及碳补偿潜力[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(10): 69-78. WU G Y, LIU J D, YANG L S. Dynamic evolution of China's agricultural carbon emission intensity and carbon offset potential[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(10): 69-78.
- [8] 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.
- [9] 谢婷, 张慧, 苗洁, 等. 湖北省农田生态系统温室气体排放特征与源/汇分析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 839-848. XIE T, ZHANG H, MIAO J, et al. Greenhouse gas emission characteristics and source/sink analysis of farmland ecosystem in Hubei Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 839-848.
- [10] 庄明浩, 贡布泽仁, 张静, 等. 草原畜牧业温室气体排放现状、问题及展望[J]. 生态学报, 2021, 41(24): 9970-9977. ZHUANG M H, GONGBU Z R, ZHANG J, et al. Greenhouse gas emissions from grassland and animal husbandry: Current status, problems and future perspectives[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(24): 9970-9977.
- [11] 陈苏, 胡浩. 中国畜禽温室气体排放时空变化及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(7): 93-100. CHEN S, HU H. Study on the spatial-temporal changes and influence factors of greenhouse gases emission from livestock and poultry in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(7): 93-100.
- [12] 冉锦成, 苏洋, 胡金凤, 等. 新疆农业碳排放时空特征、峰值预测及影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(8): 16-24. RAN J C, SU Y, HU J F, et al. Temporal and spatial characteristics, peak value forecast and influencing factors of agricultural carbon emissions in Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(8): 16-24.
- [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] LIU Y H, WANG L X, BAO S M, et al. Effects of different vegetation zones on CH₄ and N₂O emissions in coastal wetlands: A model case study[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 412183.
- [15] ALIYU G, LUO J, DI H, et al. Nitrous oxide emissions from China's croplands based on regional and crop-specific emission factors deviate from IPCC 2006 estimates[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 547-558.
- [16] SOOK J E, HAK Y S, BACK C S, et al. Application of 2006 IPCC guideline to improve greenhouse gas emission estimation for livestock agriculture[J]. *Journal of Animal Environmental Science*, 2012, 18(2): 75-84.
- [17] STEVANOVIĆ M, POPP A, BODIRSKY B L, et al. Mitigation strategies for greenhouse gas emissions from agriculture and land-use change: Consequences for food prices[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(1): 365-374.
- [18] BODIRSKY B L, POPP A, LOTZE-CAMPEN H, et al. Reactive nitrogen requirements to feed the world in 2050 and potential to mitigate nitrogen pollution[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3858.
- [19] SPRINGMANN M, CLARK M, MASON-D'CROZ D, et al. Options for keeping the food system within environmental limits[J]. *Nature*, 2018, 562(7728): 519-525.
- [20] STEPHEN C, ENDA C, KARLI V. Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 766-783.
- [21] GERBER P J. Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities[R]. Beijing: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013.
- [22] 贺大为, 金贵, 望元庆, 等. 湖北省不同类型土地整治项目施工阶段的碳排放核算[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2018, 40(6): 568-573. HE D W, JIN G, WANG Y Q, et al. Carbon emissions accounting for construction of different types of land consolidation projects in Hubei Province[J]. *Journal of Hubei University (Natural Science)*, 2018, 40(6): 568-573.
- [23] SHI R B, MUHAMMAD I, LIU G L, et al. Analysis of the impact of livestock structure on carbon emissions of animal husbandry: A sustainable way to improving public health and green environment[J]. *Frontiers in Public Health*, 2022, 145: 835210.
- [24] 田云, 张俊飏, 尹朝静, 等. 中国农业碳排放分布动态与趋势演进: 基于31个省(市、区)2002—2011年的面板数据分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(7): 91-98. TIAN Y, ZHANG J B, YIN C J, et al. Distributional dynamics and trend evolution of China's agricultural carbon emissions: An analysis on panel data of 31 provinces from 2002 to 2011[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(7): 91-98.
- [25] HONG C, BURNEY J A, PONGRATZ J, et al. Global and regional drivers of land-use emissions in 1961—2017[J]. *Nature*, 2021, 589(7843): 554-561.
- [26] POORE J, NEMECEK T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers[J]. *Science*, 2018, 360(6392): 987-992.
- [27] HU Y, SU M, WANG Y, et al. Food production in China requires intensified measures to be consistent with national and provincial environmental boundaries[J]. *Nature Food*, 2020, 1(9): 572-582.
- [28] XAVIER E L, MARIA T M, GUMERSINDO F, et al. Linking environmental sustainability and nutritional quality of the Atlantic diet recommendations and real consumption habits in Galicia (NW Spain)[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 683: 71-79.
- [29] JUAN J H M, ALICIA G V, MARIA L S S, et al. The mediterranean diet: A historical perspective on food for health[J]. *Maturitas*, 2019, 132: 65-69.

- [30] ABDERRAHIM O, JULIEN L, CLEMENCE B, et al. Health outcomes associated with vegetarian diets: An umbrella review of systematic reviews and meta-analyses[J]. *Clinical Nutrition*, 2020, 39:3283–3307.
- [31] SARA G G, ROSEMARY F G, PEULINE F S, et al. Dietary recommendations in Spain affordability and environmental sustainability[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254:120125.
- [32] 卢凌霄, 李太平. 国外发展环境友好型食品消费的经验与启示[J]. 食品科学, 2016, 37(7):213–218. LU L X, LI T P. International experience and enlightenment on the consumption of environmentally friendly foods[J]. *Food Science*, 2016, 37(7):213–218.
- [33] GAO C, XU J, LIU Y, et al. Nutrition policy and healthy China 2030 building[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2021, 75: 238–246.
- [34] 冯适, 张奕, 陈新平, 等. 食物系统的温室气体排放及其减排策略研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(11):273–283. FENG S, ZHANG Y, CHEN X P, et al. Review of greenhouse gas emissions from food systems and emission reduction strategies[J]. *Food Science*, 2022, 43(11):273–283.
- [35] LEINONEN I, WILLIAMS A G. Effects of dietary protease on nitrogen emissions from broiler production: A holistic comparison using life cycle assessment[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(15):3041–3046.
- [36] BERTON M, GALLO L, CARCÒ G, et al. Effect of genetic type and low protein diets on the environmental footprint of intensive medium heavy pig production system[J]. *Journal of Central European Agriculture*, 2018, 19(4):852–857.
- [37] 王敬, 任连泉, 钱坤. 低蛋白饲料在养殖业中应用现状的分析[J]. 现代畜牧兽医, 2020(6):55–58. WANG J, REN L Q, QIAN K. Analysis on the current situation of low protein feed in breeding[J]. *Modern Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2020(6):55–58.
- [38] 郭海宁, 李建辉, 马晗, 等. 不同养猪模式的温室气体排放研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12):2457–2462. GUO H N, LI J H, MA H, et al. Greenhouse gas emissions in different pig raising modes [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12):2457–2462.
- [39] LEI L S, GU J, WANG X J, et al. Effects of phosphogypsum and medical stone on nitrogen transformation, nitrogen functional genes, and bacterial community during aerobic composting[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 753:141746.
- [40] CAO Y, WANG X, BAI Z, et al. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions during solid waste composting with different additives: A meta-analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235:626–635.
- [41] FUKUMOTO Y, INUBUSHI K. Effect of nitrite accumulation on nitrous oxide emission and total nitrogen loss during swine manure composting[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55(3):428–434.
- [42] 雷平, 刘标, 尹红梅. 过磷酸钙在病死猪堆肥中保氮效果研究[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(3):266–271. LEI P, LIU B, YIN H M. Effects of calcium superphosphate additive on nitrogen conservation during dead-pig composting[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(3):266–271.
- [43] HE Y L, XING Z B, WU X D, et al. Effects of biochar on substrate degradation and ammonia emission during aerobic composting of chicken manure[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2018, 19(3):58–66.
- [44] KAZUTAKA K, AKIHIRO T, KENICH F, et al. Application of *Bacillus* sp. TAT105 to reduce ammonia emissions during pilot-scale composting of swine manure[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2017, 81(12):2400–2406.
- [45] KURODA K, WAKI M, YASUDA T, et al. Utilization of *Bacillus* sp. strain TAT105 as a biological additive to reduce ammonia emissions during composting of swine feces[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2015, 79(10):1702–1711.

(责任编辑:朱晓昱)