



楚天舒, 贺雪妮, 张海星, 赵智强, 吴显斌, 蒲胜海, 吴湘琳, 马兴旺. 基于温室气体排放的畜禽养殖大气环境承载力估算[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(05): 190-200.

CHU Tianshu, HE Xueni, ZHANG Haixing, ZHAO Zhiqiang, WU Xianbin, PU Shenghai, WU Xianglin, MA Xingwang. Estimation of the atmospheric environment bearing capacity of livestock and poultry farming based on greenhouse gas emissions[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(05): 190-200.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.05.16

基于温室气体排放的畜禽养殖大气环境承载力估算

楚天舒^{1,2} 贺雪妮³ 张海星¹ 赵智强³ 吴显斌⁴ 蒲胜海⁵ 吴湘琳⁵ 马兴旺^{5*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

2. 生态环境部南京环境科学研究所 国家环境保护土壤环境管理与污染控制重点实验室, 南京 210042;

3. 中国农业大学 工学院, 北京 100083;

4. 黑龙江省农垦科学院 农业工程研究所, 哈尔滨 150038;

5. 新疆维吾尔自治区农业科学院 农业资源与环境研究所/农业农村部西北绿洲农业环境重点实验室, 乌鲁木齐 830091)

摘要 针对温室气体减排与畜禽养殖业发展矛盾, 构建基于温室气体排放的畜禽养殖大气承载力估算方法, 核算温室气体排放强度, 结合温室气体排放强度阈值, 对区域畜禽养殖潜力进行仿真分析。结果表明: 1) 2010—2021年, 新疆生产建设兵团种养业温室气体排放量强度呈现“先增长后下降”趋势; 2021年排放强度为1 544.50 kg/hm², 农田土壤N₂O排放和动物肠道CH₄排放为主要排放源。北大荒集团呈现“先增长后下降”趋势, 2021年排放强度为3 125.40 kg/hm², 主要来源于稻田CH₄排放和农田土壤N₂O排放。两地区温室气体排放逐步与种养业产值、农产品产量呈现脱钩状态。2) 新疆生产建设兵团和北大荒集团的畜禽养殖均未超过大气环境承载力, 未来养殖潜力以猪当量计分别为423.4万~2 117.0万头和733.5万~3 667.5万头。未来两地区应重点推广稻田减排技术和水肥高效管理技术, 推动种养业机械化高质量发展, 促进土壤固碳。本研究可为区域种养循环与大气环境保护提供参考案例。

关键词 温室气体排放; 大气环境承载力; 减排增效; 畜禽养殖; 新疆生产建设兵团; 北大荒集团

中图分类号 X713

文章编号 1007-4333(2025)05-0190-11

文献标志码 A

Estimation of the atmospheric environment bearing capacity of livestock and poultry farming based on greenhouse gas emissions

CHU Tianshu^{1,2}, HE Xueni³, ZHANG Haixing¹, ZHAO Zhiqiang³, WU Xianbin⁴,
PU Shenghai⁵, WU Xianglin⁵, MA Xingwang^{5*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. State Key Laboratory of Soil Environmental Management and Pollution Control for Environmental Protection, Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China;

3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

4. Institute of Agricultural Engineering, Heilongjiang Academy of Land Reclamation Sciences, Harbin 150038, China;

5. Institute of Agricultural Resources and Environment, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Environment in Northwest Oasis, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Urumqi 830091, China)

收稿日期: 2024-09-03

基金项目: “天山英才”培养计划(2022TSYCLJ0050); 国家环境保护土壤环境管理与污染控制重点实验室开放课题; 农业科技创新稳定支持项目(xjnywdzc-2023005-1); 农业农村部西北绿洲农业环境重点实验室开放基金(XBL2-20225)

第一作者: 楚天舒(ORCID:0000-0003-4143-7017), 助理研究员, 博士, 主要从事农业资源高效利用与环境保护研究, E-mail: chuts@cau.edu.cn

通讯作者: 马兴旺(ORCID:0000-0002-9597-2480), 研究员, 博士, 主要从事棉花水肥高效利用、面源污染防控研究, E-mail: maxw@xaas.ac.cn

Abstract To address the challenge between greenhouse gas emissions reduction and animal husbandry development, this study developed a method to estimate the atmospheric bearing capacity of livestock and poultry farming based on greenhouse gas emissions. The intensity of greenhouse gas emissions was calculated, and by combining it with the threshold values, the regional animal breeding potential was assessed through simulation. The results showed that: 1) From 2010 to 2021, the greenhouse gas emissions intensity in livestock and poultry farming in Xinjiang Production and Construction Corps (XPCC) displayed a “first rising and then falling” trend; By 2021, the intensity of emissions reached 1 544.50 kg/hm², with N₂O emissions from farmland soil and CH₄ emissions from animal intestines being the main emissions sources. Similarly, Beidahuang Group (BG) exhibited a “first rising and then falling” trend. The intensity emissions was 3 125.40 kg/hm² on 2021, which was largely due to CH₄ emissions from rice fields and N₂O emissions from farmland soil. 2) The livestock and poultry farming in both XPCC and BG remained within the atmospheric bearing. The future potential estimated, measured in pig equivalents, is 4.234 million to 21.17 million for XPCC and 7.335 million to 36.675 million for BG, respectively. It was recommended that the two regions should focus on promoting emissions reduction technologies for rice fields, efficient water and fertilizer management, and advancing high-quality mechanization in agriculture and animal husbandry, as well as enhancing soil carbon sequestration. This study provided valuable insights into the integration of crop and livestock production with atmospheric environmental protection in the future.

Keywords greenhouse gas emissions; atmospheric environmental bearing capacity; emissions reduction and efficiency improvement; animal breeding; Xinjiang Production and Construction Corps; Beidahuang Group

全球气候变暖及极端气候事件的频繁发生,与人类活动导致的温室气体排放量增加密切相关。农业生产是温室气体排放的重要来源,约占排放总量的23%。^[1]在这一背景下,协同实现农业生产的绿色转型与大气环境保护,已经成为国际社会关注的焦点。

在种养业温室气体排放量的核算研究方面,1910—2015年,全球农业温室气体排放量从19亿t增加到67亿t,增长了3.5倍。其中,2015年畜禽养殖业的肠道CH₄排放占农业总排放量70%,约为47亿t;同时,畜禽养殖业对农业总排放量增长贡献率高达63%,成为温室气体排放量增加的主要驱动因素^[2]。2018年中国水稻、小麦和玉米的净碳排放量约为6.7亿t^[3],其中肥料施用和灌溉是主要来源途径^[4-5]。在农业温室气体减排研究方面,Yang Xiaolin等^[6]研究发现多样化的轮作可使作物产量提高38%,并减少39%氧化亚氮排放量。Cameron-Harp等^[7]提出种植覆盖作物和减少耕作强度,有利于美国农业减排增效。王欢等^[8]利用Tapio脱钩分析发现,中国畜禽养殖业温室气体排放量与产值主要呈现弱脱钩状态。在区域尺度上,2011—2020年新疆生产建设兵团农牧业的温室气体净排放量与

产值已呈现脱钩状态,同时与农牧产品产量的脱钩趋势也逐渐显现^[9]。张帆等^[10]研究发现,种养结合能有效减缓约10%~67%的环境影响,中国西北、东北和华北地区的减排潜力较大。王如玉等^[11]采用Super-SBM模型实证分析发现,种养结合通过降低饲料投入、提升肉羊出栏活重和减少碳排放来提升肉羊养殖环境技术效率。朱志平等^[12]研究发现禽粪便资源化利用最高可减少97.79%的粪便处理碳排放量。王海婷^[13]核算天津某有机肥厂为纽带的区域种养循环项目温室气体排放量发现,年温室气体减排量可达196.44 t。现有研究集中于畜禽养殖的温室气体排放量核算与减排措施,并采用脱钩分析等宏观分析方法解析了畜禽养殖与温室气体排放之间的关系。为了满足农业绿色低碳发展需求,控制温室气体排放是否会制约畜禽养殖业发展,鲜有研究报道。

本研究拟以新疆生产建设兵团和北大荒集团种养业生产系统为研究区域,构建基于温室气体排放的畜禽养殖大气承载力估算方法,核算2010—2021年温室气体排放量与强度,结合温室气体排放强度阈值,仿真分析区域畜禽养殖潜力,以期为区域畜禽养殖业绿色发展与大气环境保护提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

新疆生产建设兵团位于新疆维吾尔自治区境内,地处欧亚大陆中部(北纬 $35^{\circ}30'$ ~ $48^{\circ}34'$,东经 $75^{\circ}50'$ ~ $95^{\circ}34'$),为干旱温带大陆性气候。2021年年均降水量为18.3~149.3 mm,年平均气温 8.6°C ~ 13.5°C ;农作物播种面积141.5万 hm^2 ,主要种植棉花和粮食作物,分别占总面积的60.2%和20.8%;产量分别为208.3万和280.9万 $\text{t}^{[14]}$ 。猪、牛、羊、家禽年末存栏量分别为286.7万头、54.8万头、341.1万头和852.2万羽,肉类、禽蛋和牛奶产量分别为60万、14.7万和78万 $\text{t}^{[14]}$ 。

北大荒集团位于黑龙江省境内,地处东北部小兴安岭南麓、松嫩平原和三江平原(北纬 $40^{\circ}10'$ ~ $50^{\circ}21'$,东经 $123^{\circ}40'$ ~ $134^{\circ}40'$),属于寒温带大陆性季风气候。2021年年均降水量为430~600 mm,年平均气温 1.7°C ~ 4.8°C ;农作物播种面积

299.1万 hm^2 ,主要种植水稻、玉米和大豆,分别约占总面积的51.9%、23.7%和22.2%;产量分别为1433.4万、685.3万和173.9万 $\text{t}^{[15]}$ 。猪、牛、家禽年末存栏量分别为156.9万头、19.0万头和7191.2万羽,肉类、禽蛋和牛奶产量分别为24.8万、2.8万和40.6万 $\text{t}^{[15]}$ 。

1.2 畜禽养殖大气环境承载力估算方法

结合专家咨询与农业绿色发展规划,本研究提出基于温室气体排放量的畜禽养殖大气环境承载力估算方法流程(图1):1)核算区域种养业温室气体排放量与排放强度。2)采用脱钩分析法解析温室气体净排放量与产值、产量的关联程度,判断其种养业生产是否以环境消耗为代价。3)判断区域温室气体排放量是否超过阈值。若超载,则建议推广绿色低碳生产技术;若未超载,则采用情景分析等方法探究区域畜禽养殖发展潜力,即仿真分析当温室气体排放量分别增加5%、10%、15%、20%和25%时是否超载,若未超载则估算对应的畜禽养殖潜力。

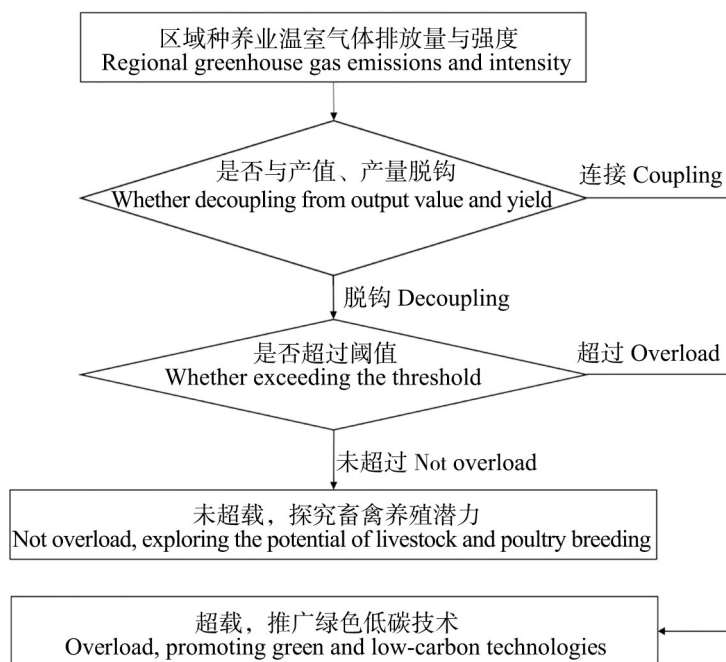


图1 畜禽养殖大气环境承载力估算方法流程

Fig. 1 Estimation process of atmospheric environmental bearing capacity of animal

1.3 温室气体排放量核算方法

依据政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)最新发布的温室气体核算方法指南^[16],本研究基于新疆生产建设兵团(Xinjiang Production and Construction

Corps, XPCC)和北大荒集团(Beidahuang Group, BG)在种植业及畜禽养殖业方面的实际生产情况,核算其 CH_4 与 N_2O 气体排放量,全文均以 CO_2 计。

1.3.1 种养业温室气体排放核算方法

新疆生产建设兵团和北大荒集团种养业生产

系统的温室气体排放主要分为种植业和畜禽养殖业2部分。其中,种植业包含稻田CH₄排放、土壤N₂O排放、秸秆焚烧排放3部分;畜禽养殖业包含畜禽肠道CH₄排放、粪便管理过程中CH₄排放和粪便管理过程中N₂O排放3部分。本研究从《新疆生产

建设兵团统计年鉴》^[14]和《黑龙江垦区统计年鉴》^[15]中获取2010—2021年新疆生产建设兵团和北大荒集团种养业的基础数据,选择相应的排放系数,带入式(1)计算种养业生产系统的温室气体排放量。计算公式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = P_{\text{paddy}} + P_{\text{N}_2\text{O}} + P_{\text{straw}} + A_{\text{EN}} + A_{\text{MM-CH}_4} + A_{\text{MM-N}_2\text{O}} \\ P_{\text{paddy}} = S_{\text{paddy}} D [R_{\text{return}} E_1 + (1 - R_{\text{return}}) E_2] \times 27.9 \\ P_{\text{N}_2\text{O}} = \left\{ \sum_{j=1}^4 [N_j (E_{j+2} + E_{j+6})] + N_5 E_{11} \right\} \times 44/28 \times 273 \\ P_{\text{straw}} = N_6 R_{\text{burn}} R_{\text{suff}} E_{12} \\ A_{\text{EN}} = n E_{13} \times 27.9 \\ A_{\text{MM-CH}_4} = n W V_{\text{ex}} E_{14} \times 27.9 \\ A_{\text{MM-N}_2\text{O}} = n W N_{\text{ex}} E_{15} \times 44/28 \times 273 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: C 为种养业温室气体排放量,kg; P_{paddy} 为稻田CH₄排放量,kg; $P_{\text{N}_2\text{O}}$ 为土壤N₂O排放量,kg; P_{straw} 为秸秆焚烧温室气体排放,kg; A_{EN} 为畜禽肠道CH₄排放量,kg; $A_{\text{MM-CH}_4}$ 为粪便管理过程中CH₄排放量,kg; $A_{\text{MM-N}_2\text{O}}$ 为粪便管理过程中N₂O排放量,kg; E_i 为种植业排放系数(表1); S_{paddy} 为水稻种植面积^[12-13],hm²; D 为水稻生长周期的天数,本研究中北大荒集团取130 d^[17],新疆生产建设兵团取150 d^[18]; R_{return} 为秸秆还田率^[19-20],%; N_j 为第 j 种途径输入农田土壤

的氮量,kg,本研究中 $j=1,2,3,4$ 分别表示化肥、有机肥、秸秆还田和土壤矿化的氮量; N_5 为大气干湿沉降进入农田的氮量^[21-22],kg; N_6 为秸秆氮量,kg,由作物产量^[12-13]、草谷比^[16]和秸秆含氮量^[16]计算获得; R_{burn} 为秸秆焚烧比例^[17-18],%; R_{suff} 为焚烧因子,本研究中玉米、水稻、小麦和其他作物分别取80%、80%、90%和85%^[14]; E_p 为养殖业排放系数,详见表2; n 为畜禽年养殖量^[12-13],头; W 为畜禽生长期间的平均体重,kg; V_{ex} 为畜禽单位体重的挥发性固体

表1 新疆生产建设兵团和北大荒集团种植业温室气体排放系数

Table 1 Greenhouse gas emission factor of the planting industry in XPCC and BG

排放系数 Emission factor	项目 Item	子项 Sub-item	数值 Value
E_1	稻田 CH ₄ 排放	秸秆还田	按文献[16]方法计算
E_2		秸秆离田	0.650 kg/(hm ² ·d) ^[16]
E_3	土壤 N ₂ O 直接排放	化肥	0.011 kg/kg ^[24]
E_4		有机肥	0.010 kg/kg ^[24]
E_5		秸秆还田	0.005 kg/kg ^[16]
E_6		土壤矿化	0.005 kg/kg ^[16]
E_7	土壤 N ₂ O 溶径流间接排放	化肥	
E_8		有机肥	0.011 kg/kg ^{①[16]}
E_9		秸秆还田	0.001 kg/kg ^{②[25]}
E_{10}		土壤矿化	
E_{11}	土壤 N ₂ O 大气沉降间接排放		0.005 kg/kg ^{①[16]}
			0.010 kg/kg ^{②[16]}
E_{12}	秸秆焚烧		0.240 kg/kg ^[26]

注:①表示新疆生产建设兵团种植业相关数据;②表示北大荒集团种植业相关数据;下表同。

Note: ① Data related to the planting industry in XPCC (Xinjiang Production and Construction Corps); ② Data related to the planting industry in BG (Beidahuang Group); Same as the following Table.

的排泄量^[14], kg/kg; N_{ex} 为畜禽单位体重的氮排泄量^[14], kg/kg; $i=1, 2, \cdots, 12$; $p=13, 14, 15$ 。CH₄ 的 100 a 全球增温潜势为 27.9^[23]; N 和 N₂O 的质量转换系数为 44/28; N₂O 的 100 a 全球增温潜势为 273^[23]。

表2 新疆生产建设兵团和北大荒集团养殖业温室气体排放系数^[16]
Table 2 Greenhouse gas emission factor of the breeding industry in XPCC and BG

排放系数 Emission factor	项目 Item	畜禽种类 Animal species	规模养殖 Large-scale breeding	非规模养殖 Small-scale breeding	放牧 ^① Pasture
E_{13}	肠道 CH ₄ 排放	猪	1.5 kg/头	1.0 kg/头	—
		蛋鸡、肉鸡	—	—	—
		肉牛	62.5 ^① , 81.1 ^② kg/头	51.4 ^① , 74.9 ^② kg/头	0.01 kg/头
		奶牛	170.3 kg/头	179.5 ^① , 166.7 ^② kg/头	
		绵羊	10.5 kg/头	10.5 ^① , 10.3 ^② kg/头	
		山羊	5.1 kg/头	5.1 kg/头	
		兔、马、驴、鹿、 骆驼	—	—	
E_{14}	粪便管理 CH ₄ 排放	猪	0.006 0 kg/kg	0.003 9 kg/kg	—
		蛋鸡、肉鸡	0.005 2 kg/kg	0.002 4 kg/kg	—
		肉牛	0.002 4 kg/kg	0.001 7 kg/kg	0.000 6 kg/kg
		奶牛	0.003 2 kg/kg	0.001 7 kg/kg	
		绵羊	0.002 5 kg/kg	0.001 7 kg/kg	
		山羊	0.002 4 kg/kg	0.001 7 kg/kg	
		兔	—	0.08 kg/只	
E_{15}	粪便管理 N ₂ O 排放	马、驴、鹿、骆驼	—	—	0.003 kg/kg
		所有	0.01 kg/kg	0.01 kg/kg	

注：—，表示不计算。
Note: —, represented not calculated.

1.3.2 单位面积温室气体排放量核算与阈值设定
本研究设置单位面积温室气体排放量作为衡量区域种养业温室气体排放强度指标,计算公式为:

$$E_p = \frac{C}{S} \tag{2}$$

式中: E_p 为温室气体排放强度, kg/hm²; C 为种养业温室气体排放量, kg; S 为种植面积, hm²。

德国、丹麦、瑞典、法国、日本、韩国、加拿大、美国和澳大利亚是农业强国,以其温室气体排放现状作为排放阈值设定依据,能有效引导我国农业低碳发展。本研究根据联合国粮食及农业组织统计数据库(FAOSTAT)^[27],获取 2010—2021 年德国等 9 个国家种养业温室气体排放量和种植面积数据,带入式(2)得其温室气体排放强度,取平均值作为阈值。

1.4 Tapio 脱钩分析法

本研究采用 Tapio 脱钩分析法^[28],定量分析新疆生产建设兵团和北大荒集团种养业温室气体排

放量与产值、产量之间的关联程度,评估区域种养业发展是否以环境消耗为代价,以定性判断其种养业绿色发展状态。若关联程度判断为脱钩状态,即表示区域种养业产品生产与经济收益不以牺牲环境为代价,处于绿色发展状态。计算公式如下:

$$e = \frac{\Delta C/C}{\Delta H/H} \tag{3}$$

式中: e 为脱钩指数; H 为第 t 年产值或产量^[12-13], 万元或 kg; ΔH 为第 t 年比第 $t-1$ 年产值或产量的增量; C 为第 t 年种养业温室气体排放量, kg; ΔC 为第 t 年比第 $t-1$ 年种养业温室气体排放量的增量。

2 结果与分析

2.1 种养业温室气体排放强度

2010—2021 年新疆生产建设兵团种养业温室气体排放量呈现“先增长后波动下降”趋势,种植业温室气体排放量略高于养殖业(图 2(a))。

2021年新疆生产建设兵团种植业温室气体排放量为 2.7×10^9 kg, 相比2010年增长约31.6%; 主要来源为农田土壤 N_2O 排放, 约占95.4%。而2021年新疆生产建设兵团养殖业温室气体排放量为 2.2×10^9 kg, 相比2010年增长约19.8%; 主要来源为动物肠道 CH_4 排放, 约占86.4%, 这是由于当地饲养大量反刍动物。

2010—2021年北大荒集团种养业温室气体排放量呈现“先增长后下降”的趋势, 种植业温室气体排放量远高于养殖业(图2(b))。2010年北大荒集团种

养业温室气体排放量为 9.4×10^9 kg, 快速增长至2012年达到最高值 1.1×10^{10} kg; 2012年后, 北大荒集团温室气体排放量下降后趋于平稳。2021年北大荒集团种植业温室气体排放量为 8.7×10^9 kg, 相比2010年增长约16.7%; 主要来源为稻田 CH_4 和农田土壤 N_2O 排放, 约占69.0%和23.3%。而2021年北大荒集团养殖业温室气体排放量为 7.5×10^8 kg, 相比2010年降低约70.5%; 主要来源为动物肠道 CH_4 排放和粪便管理 N_2O 排放, 约占73.7%和22.2%, 主要是北大荒集团畜禽养殖量下降导致的。

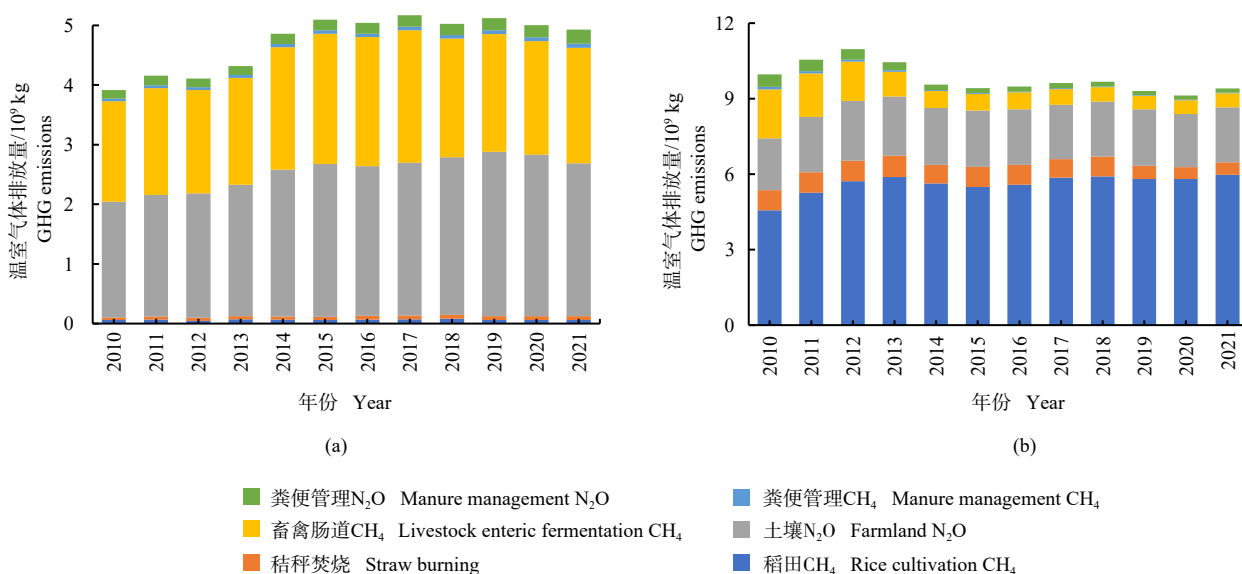


图2 新疆生产建设兵团(a)和北大荒集团(b)种养业温室气体排放量

Fig. 2 Greenhouse gas (GHG) emissions from the planting and breeding industry in XPCC (a) and BG (b)

2010—2021年新疆生产建设兵团种养业温室气体排放强度呈现“先增长后下降”趋势(图3)。2010年

新疆生产建设兵团种养业温室气体排放强度为 $1\,381.1$ kg/hm^2 , 2010—2017年波动增长, 平均增长率为2.9%,

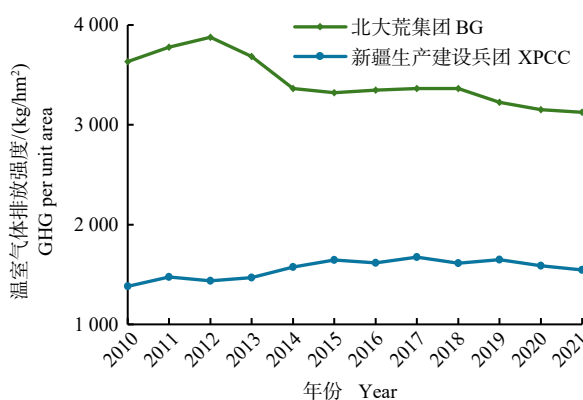


图3 新疆生产建设兵团和北大荒集团种养业温室气体排放强度

Fig. 3 Greenhouse gas (GHG) emissions per unit area of the planting and breeding industry in XPCC and BG

2017年达到最大值1 673.9 kg/hm²。2019—2021年排放强度呈现下降趋势,平均下降率达到3.2%,2021年排放强度降至1 544.5 kg/hm²。

2010—2021年北大荒集团种养业温室气体排放强度呈现“先增长后下降”趋势(图3)。2010年北大荒集团种养业温室气体排放强度为3 633.1 kg/hm²,2010—2012年持续增长,2012年达到最大值3 877.3 kg/hm²。2012—2021年排放强度呈现下降趋势,平均下降率为1.8%,2021年排放强度降至3 125.4 kg/hm²,相比2010年降低约14.0%。

2.2 种养业温室气体排放阈值

选取德国等9个农业强国,核算其2010—2021年种养业温室气体排放强度(图4)。其中,韩国温室气体排放强度最高,为7 364.2~7 884.6 kg/hm²;加拿大最低,为1 315.5~1 421.2 kg/hm²。德国、日本、法国和澳大利亚温室气体排放强度则呈现较为明显的下降趋势,韩国和丹麦温室气体排放强度的波动较大,其余国家则处于平稳波动趋势。2010—2021年9个国家种养业温室气体排放强度平均值为3 978.1 kg/hm²,本研究将此作为种养业温室气体排放阈值。

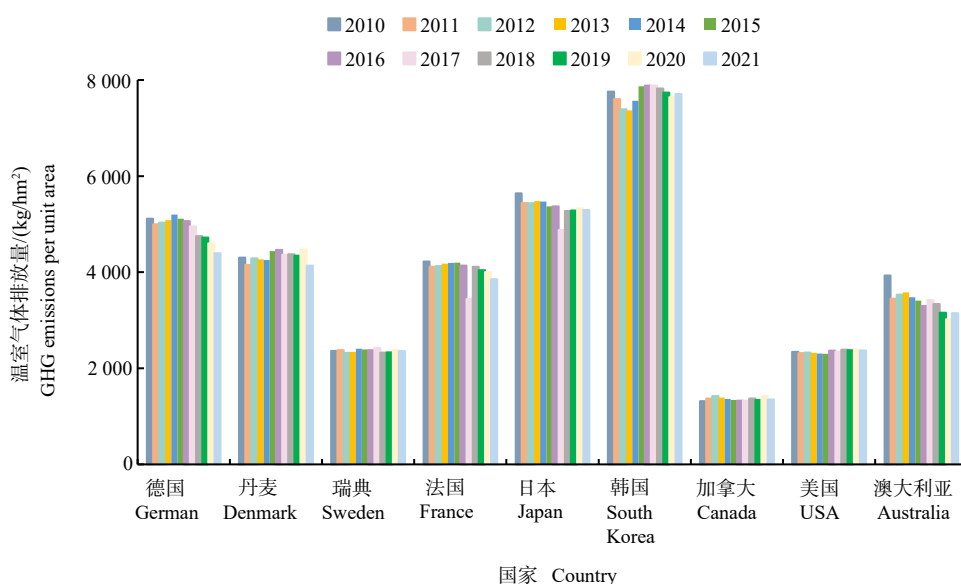


图4 2010—2021年9个农业强国种养业温室气体排放强度

Fig. 4 Greenhouse gas (GHG) emissions per unit area of the planting and breeding industry in nine strong agricultural countries from 2010 to 2021

2.3 脱钩分析结果

2010—2021年新疆生产建设兵团种养业温室气体排放量与种养业产值、产量由负脱钩状态转向主要处于弱脱钩和强脱钩状态(表3)。其中,2021年脱钩指数分别为-0.08和-0.45,这意味着新疆生产建设兵团种养业经济增长、农产品生产与环境保护步入协同发展阶段。2010—2021年北大荒集团种养业温室气体排放量与种养业产值、产量由负脱钩状态转向脱钩状态(表3)。其中,2021年脱钩指数分别为0.17和0.42,这表示北大荒集团种养业温室气体排放量逐步与种养业产值、农产品产量脱钩。

2.4 畜禽养殖大气环境承载力估算

按照畜禽养殖大气环境承载力估算方法流程,结

合种养业温室气体排放量(图2)、排放强度(图3)、阈值(图4)和脱钩分析结果(表3)可知,新疆生产建设兵团和北大荒集团畜禽养殖未超过大气环境承载力,可以探索其畜禽养殖潜力。因此,以2021年为基准,当温室气体排放强度增加5%~25%时,其温室气体排放强度均未超过阈值;新疆生产建设兵团和北大荒集团的畜禽养殖潜力分别为423.4万~2 117.0万头和733.5万~3 667.5万头(以猪当量计,全文同),是2021年实际畜禽养殖量的0.1~0.5倍和0.6~2.9倍(图5)。由此可见,新疆生产建设兵团和北大荒集团未来畜禽养殖潜力较大。

为便于推广应用,本研究根据不同畜禽的温室气体排放特性,推导出猪当量折算规则,新疆生产建设

表 3 新疆生产建设兵团和北大荒集团种养业温室气体排放量脱钩分析结果
Table 3 Decoupling analysis results of planting and breeding industry GHG in XPCC and BG

年份 Year	新疆生产建设兵团 XPCC				北大荒集团 BG			
	e_1	产值脱钩状态 Value decoupling status	e_2	产量脱钩状态 Yield decoupling status	e_1	产值脱钩状态 Value decoupling status	e_2	产量脱钩状态 Yield decoupling status
2010	0.20	弱脱钩	0.38	弱脱钩	0.38	弱脱钩	0.98	扩张连接
2011	0.62	弱脱钩	0.51	弱脱钩	0.25	弱脱钩	1.90	扩张负脱钩
2012	-0.06	强脱钩	0.24	弱负脱钩	0.29	弱脱钩	87.57	扩张负脱钩
2013	0.66	弱脱钩	0.85	扩张连接	-3.88	强脱钩	0.34	弱负脱钩
2014	-1.44	强负脱钩	0.96	扩张连接	1.38	衰退脱钩	-0.58	强脱钩
2015	-2.08	强负脱钩	0.66	弱脱钩	0.15	弱负脱钩	4.68	衰退脱钩
2016	-0.11	强脱钩	-0.23	强脱钩	-0.06	强负脱钩	-1.14	强负脱钩
2017	0.69	弱脱钩	0.33	弱脱钩	-0.38	强负脱钩	0.12	弱脱钩
2018	-0.23	强脱钩	-2.23	强脱钩	-0.06	强负脱钩	-0.09	强负脱钩
2019	0.21	弱脱钩	0.36	弱脱钩	22.58	衰退脱钩	0.29	弱负脱钩
2020	-0.15	强脱钩	-1.11	强脱钩	-0.13	强脱钩	-0.28	强脱钩
2021	-0.08	强脱钩	-0.45	强脱钩	0.17	弱脱钩	0.42	弱脱钩

注： e_1 为排放量与产值的脱钩指数， e_2 为排放量与产量的脱钩指数。

Note: e_1 was the decoupling index between emissions and output value, and e_2 was the decoupling index between emissions and yield.

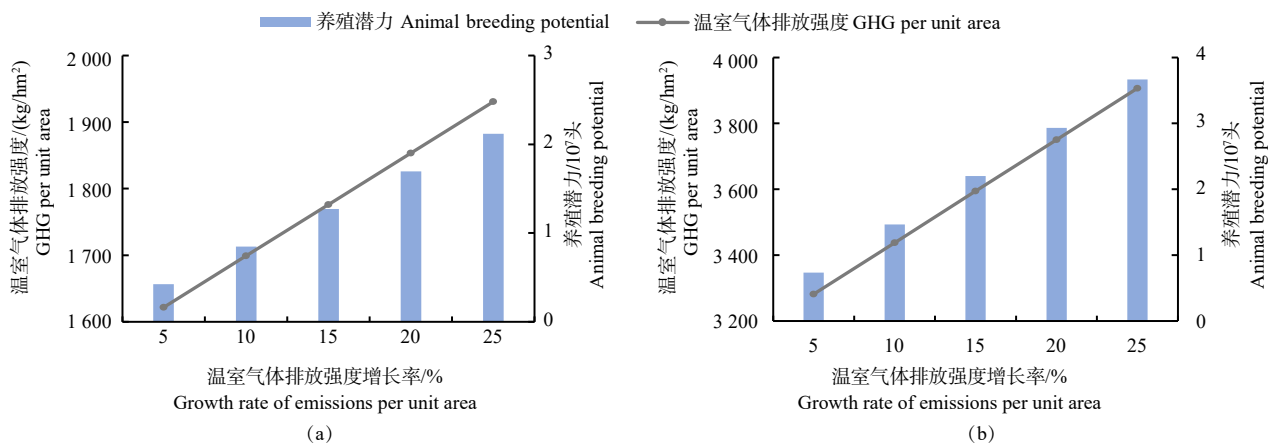


图 5 新疆生产建设兵团(a)和北大荒集团(b)畜禽养殖潜力情景分析结果

Fig. 5 Scenario analysis results of animal breeding potential in XPCC (a) and BG (b)

兵团:100.0 头猪相当于 1.6 头奶牛或 2.6 头肉牛或 1 204.9 羽蛋鸡或 6 306.1 羽肉鸡或 23.0 头绵羊或 34.0 头山羊,北大荒集团:100.0 头猪相当于 1.5 头奶牛或 2.3 头肉牛或 1 341.1 羽蛋鸡或 7 354.6 羽肉鸡或 20.4 头绵羊或 41.6 头山羊。

3 讨论

3.1 与现有行业标准测算结果的对比分析

现行 NY/T 3877—2021《畜禽粪便土地承载力测算方法》^[29]立足于农田养分管理,以作物养分需

求与粪肥养分供给平衡为准则,核算得到2021年新疆生产建设兵团和北大荒集团的畜禽粪便农田承载力分别为5 777.2万和19 914.9万头,当前养殖的906.3万和453.8万头,均未超过农田承载力。本研究以种养业温室气体排放强度阈值为基础,评价表明新疆生产建设兵团和北大荒集团畜禽养殖均未超过大气环境承载力(图4),与行业标准测算结论一致。

在方法学上,行业标准方法主要平衡作物养分需求与粪肥养分供给,以农田养分高效利用为核心目标;这也是种养循环的本质,即养分在种养业之间高效循环利用。而本研究构建了畜禽养殖大气承载力估算方法,定量解析畜禽养殖量与区域温室气体排放强度的关系,仿真分析区域未来养殖潜力,为区域大气环境保护与畜禽养殖业发展提供理论基础。因此,未来畜禽承载力估算可根据区域环境特征,优选不同方法,以促进区域种养深度结合。

3.2 减排增效,协同实现绿色发展与种养结合

与9个农业强国(图4)的对比分析可知,新疆生产建设兵团和北大荒集团温室气体排放强度(图3)相对较低,并呈下降趋势。这表明两地在种养业绿色低碳生产水平上不逊于世界农业强国,并且排放强度的下降趋势基本与9个世界农业强国一致。本研究进一步运用Tapio脱钩分析法得出的结果表明,新疆生产建设兵团和北大荒集团的温室气体排放已与种养业的产值及农产品产量实现脱钩(表3),表明两地当前的种养业发展并不以牺牲环境为代价,这为挖掘畜禽养殖增长潜力提供了有利条件。然而值得注意的是,这种脱钩状态在新疆生产建设兵团和北大荒集团尚不稳定,受化肥、农药等农业投入品的过量使用以及种养业机械化生产水平不均衡等因素影响^[9]。因此,减排增效仍是两地农业绿色低碳发展的关键方向。具体而言,新疆生产建设兵团种养业温室气体排放量相对平稳,未来可通过推动种养业机械化高质量发展,实施有机无机肥料配施来促进土壤固碳^[9],全面落实减排增效措施。北大荒集团的温室气体排放主要来自于种植业,其中稻田CH₄排放和农田土壤N₂O排放占总排放量的92.2%。因此,北大荒集团未来应重点推广稻田CH₄减排技术和旱地水肥管理优化技术^[30],以保护黑土地,促进种养结合。

4 结 论

本研究构建了基于温室气体排放的畜禽养殖大气承载力估算方法,核算新疆生产建设兵团和北大荒集团温室气体排放强度,结合温室气体排放强度阈值,探究未来两地畜禽养殖潜力,得到以下结论:

1)2010—2021年,新疆生产建设兵团种养业温室气体排放量强度呈现“先增长后下降”趋势;2021年温室气体排放强度为1 544.5 kg/hm²,农田土壤N₂O排放和动物肠道CH₄排放为主要排放源,分别占种植业排放量的95.4%和养殖业的86.4%。北大荒集团种养业温室气体排放量强度呈现“先增长后下降”趋势,2021年温室气体排放量强度为3 125.4 kg/hm²,稻田CH₄排放和农田土壤N₂O排放为主要排放源,分别占种植业排放量的69.0%和23.3%。

2)新疆生产建设兵团和北大荒集团的温室气体排放逐步与种养业产值、农产品产量呈现脱钩状态。2021年,新疆生产建设兵团种养业温室气体排放量与种养业产值、产量的脱钩指数分别为-0.08和-0.45,北大荒则分别为0.17和0.42。

3)新疆生产建设兵团和北大荒集团当前的畜禽养殖均未超过大气环境承载力。两地区未来畜禽养殖增长潜力较大,分别为423.4万~2 117.0万头和733.5万~3 667.5万头。未来应重点推广稻田减排技术和水肥高效管理技术,推动种养业机械化高质量发展,促进土壤固碳。

参考文献 References

- [1] 政府间气候变化专门委员会. 气候变化与土地[EB/OL]. (2020-06-30). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_zh.pdf
IPCC. Climate change and land [EB/OL]. (2020-06-30). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_zh.pdf in Chinese)
- [2] Gingrich S, Theurl M, Erb K H, Le Noë J, Magerl A, Bauernschuster S, Krausmann F, Lauk C. Livestock increasingly drove global agricultural emissions growth from 1910 - 2015 [J]. *Environmental Research Letters*, 2024, 19(2): 024011
- [3] Xia L L, Cao L, Yang Y, Ti C P, Liu Y Z, Smith P, Van Groenigen K J, Lehmann J, Lal R, Butterbach-Bahl K, Kiese R, Zhuang M H, Lu X, Yan X Y. Integrated biochar solutions can achieve carbon-neutral staple crop production[J]. *Nature Food*, 2023, 4: 236-246
- [4] 王钰乔, 赵鑫, 王兴, 刘胜利, 刘洋, 张海林. 基于碳足迹角度的中国小麦生产可持续性评价[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(2): 1-10
Wang Y Q, Zhao X, Wang X, Liu S L, Liu Y, Zhang H L. Assessment of wheat production sustainability in China based on carbon footprint

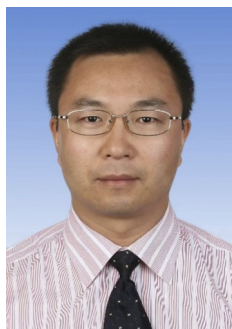
- analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(2): 1-10 (in Chinese)
- [5] Chen X H, Ma C C, Zhou H M, Liu Y, Huang X M, Wang M K, Cai Y Y, Su D, Muneer M A, Guo M C, Chen X J, Zhou Y, Hou Y, Cong W F, Guo J X, Ma W Q, Zhang W F, Cui Z L, Wu L Q, Zhou S G, Zhang F S. Identifying the main crops and key factors determining the carbon footprint of crop production in China, 2001 - 2018 [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2021, 172: 105661
- [6] Yang X L, Xiong J R, Du T S, Ju X T, Gan Y T, Li S E, Xia L L, Shen Y J, Pacenka S, Steenhuis T S, Siddique K H M, Kang S Z, Butterbach-Bahl K. Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 198
- [7] Cameron-Harp M V, Hendricks N P, Potter N A. Predicting the spatial variation in cost-efficiency for agricultural greenhouse gas mitigation programs in the U. S [J]. *Carbon Balance And Management*, 2024, 19(1): 6
- [8] 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 (in Chinese)
- [9] 楚天舒, 赖世宣, 黄译萱, 马红红, 吴湘琳, 蒲胜海, 李晓红. 新疆生产建设兵团农牧业温室气体排放的脱钩与驱动效应分析[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(10): 216-228
Chu T S, Lai S X, Huang Y X, Ma H H, Wu X L, Pu S H, Li X H. Decoupling and driving effects analysis of greenhouse gas emissions from agriculture and animal husbandry in Xinjiang Production and Construction Corps[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(10): 216-228 (in Chinese)
- [10] 张帆, 蔡颖, 邓祥征, 姜群鸥, 吴锋. 作物-牲畜-生物能源综合系统对中国农业源温室气体的影响评估[J]. 地理学报, 2024, 79(1): 28-44
Zhang F, Cai Y, Deng X Z, Jiang Q O, Wu F. Assessment of the impact of the integrated crop-livestock-bioenergy system on agricultural greenhouse gases in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(1): 28-44 (in Chinese)
- [11] 王如玉, 肖海峰. 种养结合对肉羊养殖减排增效的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(2): 192-204
Wang R Y, Xiao H F. Effect of combination of planting and breeding on the emission reduction and efficiency of mutton sheep breeding [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(2): 192-204 (in Chinese)
- [12] 朱志成, 钟民正, 侯磊, 田玉聪, 付锦涛, 杨阳. 整县推进畜禽粪污资源化利用项目温室气体减排量评估方法[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(1): 25-32
Zhu Z C, Zhong M Z, Hou L, Tian Y C, Fu J T, Yang Y. Evaluation on greenhouse gas emission reduction of the whole county's promotion project of livestock and poultry manure resource utilization [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(1): 25-32 (in Chinese)
- [13] 王海婷. 区域种养循环模式温室气体排放评估研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2022
Wang H T. Assessment of greenhouse gas emissions from regional planting and breeding cycles [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022 (in Chinese)
- [14] 新疆生产建设兵团统计局. 新疆生产建设兵团统计年鉴 2010—2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011-2022
XPCC. *XPCC Statistical Yearbook 2010-2021* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2011-2022 (in Chinese)
- [15] 黑龙江省农垦总局统计局. 黑龙江垦区统计年鉴 2010—2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011-2022
Bureau of Statistics of Heilongjiang Land Reclamation Area. *Statistical Yearbook of Heilongjiang Reclamation Area 2010—2021* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2011-2022 (in Chinese)
- [16] IPCC. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory [R]. Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019
- [17] 国家水稻数据中心. 龙粳31号(龙花01—687)[EB/OL]. (2019-08-02). <http://www.ricedata.cn/variety/varis/609156.htm>
China Rice Data Center. Longjing No. 31 (Longhua 01-687) [EB/OL]. (2019-08-02). <http://www.ricedata.cn/variety/varis/609156.htm> (in Chinese)
- [18] 杨晨芳. 阿克苏地区新稻36号高产栽培技术措施[J]. 新疆农业科技, 2016(4): 41-42
Yang C F. High-yield cultivation techniques and measures of Xindao 36 in Aksu area[J]. *Xinjiang Agricultural Science and Technology*, 2016(4): 41-42 (in Chinese)
- [19] 郭玄, 佟启玉. 黑龙江垦区农作物秸秆综合利用评估报告[J]. 现代农业, 2015(2): 42-43, 44
Guo X, Tong Q Y. Evaluation report on comprehensive utilization of crop straw in Heilongjiang reclamation area [J]. *Modernizing Agriculture*, 2015(2): 42-43, 44 (in Chinese)
- [20] 凌一波, 司马义江·玉素甫. 新疆秸秆资源化利用现状、存在问题及对策建议[J]. 新疆农业科技, 2018(3): 4-5
Ling Y B, Sima Y J·Yu S P. Present situation, existing problems and countermeasures of straw resource utilization in Xinjiang [J]. *Xinjiang Agricultural Science and Technology*, 2018(3): 4-5 (in Chinese)
- [21] 贾彦龙, 王秋凤, 朱剑兴, 陈智, 何念鹏, 于贵瑞. 2006—2015年中国大气无机氮干沉降时空格局数据集[J]. 中国科学数据, 2021, 6(2): 213-221
Jia Y L, Wang Q F, Zhu J X, Chen Z, He N P, Yu G R. A spatial and temporal dataset of atmospheric inorganic nitrogen dry deposition in China (2006-2015) [J]. *China Scientific Data*, 2021, 6(2): 213-221 (in Chinese)
- [22] 贾彦龙, 王秋凤, 朱剑兴, 陈智, 何念鹏, 于贵瑞. 1996—2015年中国大气无机氮湿沉降时空格局数据集[J]. 中国科学数据, 2019, 4(1): 8-17
Jia Y L, Wang Q F, Zhu J X, Chen Z, He N P, Yu G R. A spatial and temporal dataset of atmospheric inorganic nitrogen wet deposition in China (1996-2015) [J]. *China Scientific Data*, 2019, 4(1): 8-17 (in Chinese)

- Chinese)
- [23] IPCC. AR6 synthesis report: climate change 2022 [R]. Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022
- [24] 王桂良. 中国三大粮食作物农田活性氮损失与氮肥利用率的定量分析 [D]. 北京: 中国农业大学, 2014
- Wang G L. Quantitative analysis of loss of active nitrogen and nitrogen utilization rate of three major grain crops in China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [25] 蔡祖聪. 中国氮素流动分析方法指南 [M]. 北京: 科学出版社, 2018
- Cai Z C. *Guidelines for Nitrogen Flow Analysis in China* [M]. Beijing: Science Press, 2018 (in Chinese)
- [26] 霍丽丽, 姚宗路, 赵立欣, 罗娟, 张沛祯. 秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 349-359
- Huo L L, Yao Z L, Zhao L X, Luo J, Zhang P Z. Contribution and potential of comprehensive utilization of straw in GHG emissions reduction and carbon sequestration [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(1): 349-359 (in Chinese)
- [27] 联合国粮食及农业组织. 统计数据库 (FAOSTAT) 2010—2021 [EB/OL]. (2024-03-02). <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT database 2010—2021 [EB/OL]. (2024-03-02). <https://www.fao.org/faostat/en/#home> (in Chinese)
- [28] 田云, 林子娟. 长江经济带农业碳排放与经济增长的时空耦合关系 [J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(1): 208-218
- Tian Y, Lin Z J. Spatio-temporal coupling relationship between agricultural carbon emissions and economic growth in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(1): 208-218 (in Chinese)
- [29] NY/T 3877—2021 畜禽粪便土地承载力测算方法 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2021
- NY/T 3877—2021 Method for calculating land bearing capacity of animal manure [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2021 (in Chinese)
- [30] 楚天舒, 赖世宣, 杨增玲. 黑龙江农垦种养业生产系统温室气体排放与土壤固碳的核算 [J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(4): 143-156
- Chu T S, Lai S X, Yang Z L. Accounting on Greenhouse gas emissions and SOC stocks of the crop-farm animal production system in Heilongjiang Land Reclamation Area [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(4): 143-156 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 楚天舒, 工学博士, 中国农业大学资源与环境学院助理研究员。主要从事农业资源利用与环境保护研究工作, 结合长期实地调研, 针对土壤环境、水环境与大气环境风险防控, 构建畜禽粪便农田承载力模型, 优化畜禽粪便资源化模式, 促进区域种养平衡。主要参加国家重点研发计划项目子课题, 主持重点实验室开放基金等项目, 已发表相关论文 21 篇。



通讯作者简介: 马兴旺, 农学博士, 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所研究员。主要从事棉花水肥高效利用、面源污染防控、土壤改良利用等研究与推广, 担任农业农村部西北绿洲农业环境重点实验室主任、农业农村部农业环境重点实验室学术委员会委员、新疆农业大学硕博士生导师、新疆土壤与肥料学会副理事长, 入选自治区“天山英才”计划第一期、第二期培养计划。主持国家重点研发项目、国家科技支撑课题、新疆科技支撑课题等 11 项, 作为项目骨干参与国家自然科学基金、新疆科技支撑等 15 项。获得国家发明专利 2 项, 实用新型专利 8 项, 软件著作权 3 项, 制定自治区地方标准 5 项, 合编专著 3 部, 在核心期刊发表学术论文 100 余篇。