

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20240916001

楚天舒, 贺雪妮, 张海星, 等. 基于氨排放的畜禽养殖大气环境承载力估算[J]. 生态毒理学报, 2025, 20(1): 190-197

CHU T S, HE X N, ZHANG H X, et al. Estimation on atmospheric environment bearing capacity of livestock and poultry farming based on ammonia emissions [J]. Asian journal of ecotoxicology, 2025, 20(1): 190-197

基于氨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, 邓仕婕⁴, 孙嘉棋⁴, 张起赫⁵, 汤树生^{6,*}

1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

2. 国家地质实验测试中心 自然资源部生态地球化学重点实验室, 北京 100037

3. 中国农业大学工学院, 北京 100083

4. 衢州学院化学与材料工程学院, 衢州 324000

5. 中国农业大学人文与发展学院, 北京 100193

6. 中国农业大学动物医学院, 北京 100193

收稿日期: 2024-09-16

录用日期: 2024-11-04

摘要: 为解决大气氨污染防治与畜禽养殖业发展的矛盾, 本研究以京津冀地区的种养生产系统为研究对象, 构建畜禽养殖大气环境承载力的估算方法, 核算了该地区种养业氨排放强度; 在设定大气氨减排目标的基础上, 运用情景分析法评估了该地区畜禽养殖增量。结果表明: (1) 2011—2020 年期间, 京津冀地区种养业氨排放强度呈现“增长—下降—增长”趋势, 2021 年达到了 $33.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中粪便管理和粪肥施用的氨排放分别占总排放的 50.4% 和 42.9%。(2) 在“技术换取养殖量”情景中, 通过使用低蛋白饲料配方等技术降低粪肥氮质量分数, 京津冀地区的畜禽养殖增量达到 1 726.9 ~ 6 907.5 万头猪当量; 通过应用肥水注射等技术降低粪肥排放系数, 畜禽养殖增量为 793.6 ~ 3 174.4 万头猪当量。在综合运用 6 类技术以实现氨减排达标的情景中, 当氨减排达 5.0% 时, 该地区畜禽养殖增量高达 3 141.5 万头猪当量。研究表明, 随着种养业氨减排技术的推广实施, 京津冀地区的畜禽养殖业将展现出良好的发展潜力。本研究可为区域种养结合与大气氨污染防治提供参考。

关键词: 氨排放; 大气环境承载力; 减排技术; 畜禽养殖; 京津冀地区

文章编号: 1673-5897(2025)1-190-08

中图分类号: X171.5

文献标识码: A

Estimation on Atmospheric Environmental Bearing Capacity of Livestock and Poultry Farming Based on Ammonia Emissions

CHU Tianshu^{1,2}, HE Xueni³, ZHANG Haixing¹, ZHAO Zhiqiang³, DENG Shijie⁴, SUN Jiaqi⁴, ZHANG Qihe⁵, TANG Shusheng^{6,*}

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

2. Key Laboratory of Eco-Geochemistry, Ministry of Natural Resources, National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China

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

4. College of Chemical and Material Engineering, Quzhou University, Quzhou 324000, China

5. College of Humanities and Development Studies, China Agricultural University, Beijing 100193, China

6. College of Veterinary Medicine, China Agricultural University, Beijing 100193, China

基金项目: 自然资源部生态地球化学重点实验室开放基金项目(ZSDHJJ202203); 畜禽普通病监测及群体保健技术研发与应用(2023YFD1801105)

第一作者: 楚天舒(1992—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为农业资源高效利用与环境保护研究, E-mail: chuts@cau.edu.cn

*** 通信作者 (Corresponding author),** E-mail: tssfj@163.com

Received 16 September 2024

accepted 4 November 2024

Abstract: This research addresses the conflict between controlling atmospheric ammonia pollution and developing the livestock and poultry farming industry. Using the planting and breeding production system of Beijing-Tianjin-Hebei Region as the research focus, it constructed a method to estimate the atmospheric bearing capacity of livestock and poultry farming and calculated ammonia emission intensity for the region's planting and breeding husbandry. With set targets for atmospheric ammonia reduction, scenario analysis was employed to assess the increment for regional livestock and poultry farming. Key findings included: (1) From 2011 to 2020, ammonia emission intensity in the planting and breeding husbandry of the Beijing-Tianjin-Hebei Region followed an “increase-decline-increase” trend, reaching $33.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in 2021, with manure management and application accounting for 50.4% and 42.9% of total emissions, respectively. (2) In the “Technology for Breeding Capacity” scenario, increment in livestock and poultry farming capacity enabled by using low-protein feed formulations to reduce manure nitrogen mass fraction ranged from 17.269 to 69.075 million pig equivalents. In scenarios applying fertilizer injection technology to reduce manure emissions, the increment ranged from 7.936 to 31.744 million pig equivalents. When combining six types of technologies to achieve targeted ammonia emission reductions, the region's increment in livestock and poultry farming reached 31.415 million pig equivalents with a 5.0% reduction in ammonia emissions. These findings highlighted that the Beijing-Tianjin-Hebei Region held significant future potential for livestock and poultry farming with the implementation of ammonia reduction technologies. This research provided valuable reference material for integrating regional planting and breeding systems and advancing atmospheric environmental protection.

Keywords: ammonia emissions; atmospheric environmental bearing capacity; emission reduction technology; livestock and poultry farming; Beijing-Tianjin-Hebei Region

0 引言

氨(NH_3)是大气中值得关注的 1 种碱性污染气体,其与大气中的酸性污染物如二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)等反应会生成颗粒态铵,在 $\text{PM}_{2.5}$ 污染中的贡献率为 29.8%,会加剧大气环境污染^[1-2]。2018 年中国氨排放量为 990 万 t,80% 的氨排放来源于农业生产^[3]。因此,区域农业绿色发展与大气氨污染防治间的协同显得尤为重要。

在种养业氨排放方面,XU 等^[4]的研究显示,2018 年全球稻田、小麦和玉米的氨排放量合计约为 430 万 t。王琛等^[5]在绘制 2017 年中国 1 km 空间分辨率的氨排放清单时发现,华北和华南地区为主要的排放热点区,排放高峰期集中在春季和初夏。吾拉哈提·阿达力别克等^[6]基于排放因子法和高分辨率农业活动数据,建立了京津冀地区的氨排放清单,发现 50% 的县(区、市)贡献了超过 80% 的氨排放。康嘉慧等^[7]基于排放因子法和大田试验监测数据发现,2019 年曲周县氨排放总量为 6 559.7 t,在空间分布上呈现出南高北低的趋势。在种养业氨减排技术方面,WANG 等^[8]通过 86.3 万份实地调研发现,农

场平均规模每增加 1%,农田氨排放量减少 0.07%。XU 等^[9]运用荟萃分析和机器学习方法量化了有机和保护性农业对氨排放的影响机制,发现用粪肥替代 40%~60% 的化肥能协同实现作物增产与氨减排。由此可见,推进区域种养结合是氨减排的有效途径^[10]。然而如何根据区域种养业氨排放特征,构建畜禽养殖大气环境承载力模型,进而优化畜禽养殖量与畜禽粪肥施用量,从而指导区域协同实现种养平衡与大气氨污染防治,是亟需解决的重要科学问题。

因此,本研究以京津冀地区种养业生产系统为研究对象,构建基于氨排放的畜禽养殖大气承载力估算方法,核算 2010—2021 年京津冀地区种养业氨排放量与排放强度,并设置大气氨减排目标,运用情景分析法探究该地区畜禽养殖增量,以期该地区畜禽养殖业的发展与大气氨污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

京津冀地区是中国氨排放的热点地区^[3],也是 2023 年 11 月国务院发布《空气质量持续改善行动

计划》^[11]中提出的大气氨排放控制试点地区。京津冀地区地处东北亚中国地区环渤海中心地带(36°1'N~42°4'N, 113°3'E~119°5'E), 覆盖北京、天津2个直辖市以及河北省保定、唐山等11个地级市。地区人口高达1亿, 面积2 180万 hm^2 , 地形以平原为主, 气候以温带半湿润大陆性季风气候为主。京津冀地区耕地面积865.2万 hm^2 , 农业产值4 367.1亿元, 占全国农业总产值的5.3%。2021年, 粮食、棉花和油料产量分别为4 112.7、16.4和119.2万t; 猪、牛、羊年内饲养量分别为3 645.4、1 169.2和1 846.7万头; 当地牛奶产量达557.7万t, 占全国牛奶总产量的16.2%, 是重要的奶牛养殖区^[12]。

1.2 畜禽养殖大气环境承载力估算方法

京津冀地区是中国主要农区之一, 为助力打好蓝天保卫战, 三地需落实大气联防联控责任。因此, 氨减排成为了京津冀地区种养业绿色发展的重要目标。结合专家咨询成果, 本研究提出基于氨排放的畜禽养殖大气环境承载力定义与估算方法流程(图1)。承载力定义为: 为了防控大气氨污染, 核算区域种养业氨排放强度, 根据氨减排目标, 优化得到区域适宜的畜禽养殖量。其估算流程: (1)以《大气氨源排放清单编制技术指南》^[13]为标准, 核算区域种养业氨排放量与排放强度。(2)根据区域大气环境政策,

设置氨减排目标。(3)采用情景分析法, 探究区域畜禽养殖业发展潜力。设置2种情景。情景I: “技术换取养殖量”, 即在维持当前种养业氨排放强度情况下, 推广氨减排技术, 减少相同的种养业活动水平下部分环节的氨排放量, 来换取畜禽养殖增量。情景II: “综合减排达标”, 设置氨减排目标, 综合应用各类氨减排技术, 探究畜禽养殖增量。

1.3 种养业氨排放核算与评价方法

1.3.1 种养业氨排放核算方法

根据《大气氨源排放清单编制技术指南》^[13], 本研究依据京津冀地区作物种植与畜禽养殖的实际情况^[14], 详细核算了种养业氨排放量。在种植业生产系统中, 氨排放主要有氮肥施用、土壤本底、固氮植物、粪肥施用4个途径。畜禽养殖业生产系统的氨排放主要发生在粪便管理阶段, 分为圈舍固态、圈舍液态、储存固态、储存液态4个粪便管理阶段。各排放源的计算公式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = C_F + C_M + C_S + C_P + C_A \\ T = L \times L_U \times N_C \times R_{A,N} \\ C_F = A_F \times B_e \times F_N \times F_M \\ C_M = A_M \times E_M \times 1.214 \\ C_S = A_S \times E_S \\ C_P = A_P \times E_P \\ C_A = \sum_{j=1}^4 T \times R_S \times R_O \times X \times E_j \times 1.214 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: C 为种养业氨排放量, kg; C_F 为氮肥氨排放量, kg; C_M 为粪肥施用氨排放量, kg; C_S 为土壤氨排放量, kg; C_P 为固氮植物氨排放量, kg; C_A 为粪便管理氨排放量, kg; T 为畜禽粪便铵态氮排放量, kg; L 为畜禽年饲养量^[14], 头; L_U 为单位畜禽排泄量^[13], $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1}$; N_C 为畜禽粪便的氮质量分数^[13], %; $R_{A,N}$ 为畜禽粪便中铵态氮比例^[13], %。 A_F 为氮肥施用量^[14], kg; B_e 为氮肥基准排放系数^[13], 本研究中根据温度和土壤 pH 值, 取 14.66%; F_N 为氮肥施肥率校正系数^[13], 本研究中取 1.18; F_M 为施肥方式校正系数^[13], 本研究中取 0.592; A_M 为粪肥施用量, kg, 由畜禽粪便铵态氮排放量 T 减去圈舍和储存的损失量后, 再除以畜禽粪肥的铵态氮质量分数^[13]得到; E_M 为粪肥排放系数^[13], %; A_S 为耕地面积^[14], hm^2 ; E_S 为土壤本底排放系数^[13], kg; A_P 为固氮植物种植面积^[14], hm^2 ; E_P 为固氮植物排放系数^[13], 本研究中, 大豆为 $1.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、花生为 $1.20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、绿肥为 $1.35 \text{ kg} \cdot$

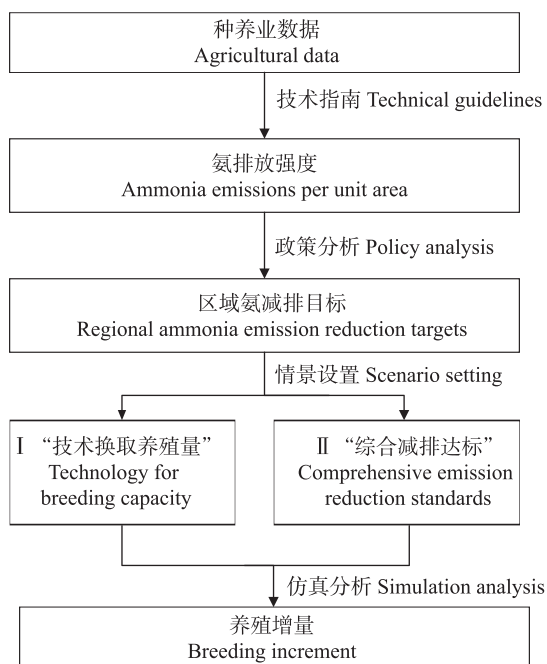


图1 畜禽养殖大气环境承载力估算方法流程

Fig. 1 Process of estimation of atmospheric environmental bearing capacity of livestock and poultry farming

hm^{-2} 。 R_s 为畜禽规模化或非规模化养殖的比例^[15], 详见表 1; R_o 为室内排泄量占比^[16], 本研究中规模化养殖时取 100%, 非规模养殖时取 50%; X 为液态或固态粪肥占总粪肥质量比值^[13]; E_j 为粪便管理阶段排放系数^[13], %, 本研究中 $j=1, 2, 3, 4$ 分别表示圈舍液态、储存液态、圈舍固态、储存液态。 畜禽养殖业氮-大气氨转换系数为 1.214^[13]。

1.3.2 评价方法

本研究设置单位面积氨排放量作为衡量京津冀地区种养殖业氨排放强度指标, 计算公式如下:

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

式中: C_p 为氨排放强度, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; S 为种植面积, hm^2 , 京津冀地区历年种植面积来源于统计数据^[14]。

1.4 情景分析

1.4.1 “技术换取养殖量”情景下承载力估算方法

在“技术换取养殖量”情景中, 本研究采用情景分析法探究不同减排技术应用后, 京津冀地区畜禽养殖量发展潜力。 即从种植业肥料施用环节、畜禽养殖业圈舍管理环节和粪污储存环节出发, 设置 6 个子情景^[3], 仿真分析各个因素变化 5% ~ 20% 情况下, 每变化 5% 时的畜禽养殖增量, 具体变化因素设置如表 2。

1.4.2 “综合减排达标”情景下承载力估算方法

根据《空气质量持续改善行动计划》^[11], 预计到 2025 年, 京津冀及周边地区大型规模化畜禽养殖场大气氨排放总量将比 2020 年下降 5%。 基于此目标, 本研究在“综合减排达标”情景下, 假设在京津冀地区已完成 6 类减排技术(表 2)的推广与应用, 设定了区域种养殖业不同的氨减排目标, 即氨减排 2.5%、5.0%、7.5%、10.0%、12.5% 和 15.0%, 并探究在这些减排目标下京津冀地区畜禽养殖的潜在增长空间。

2 结果

2.1 京津冀地区种养殖业氨排放强度

2010—2021 年京津冀地区种养殖业氨排放量呈现出“平稳波动—下降—增长”趋势, 见图 2(a)。 2010—2014 年京津冀地区种养殖业氨排放量平稳波动, 均值为 $3.1 \times 10^8 \text{ kg}$; 2014—2018 年种养殖业氨排放量逐渐降低, 年均降低率达到 6.7%, 2018 年达到最低值 $2.4 \times 10^8 \text{ kg}$; 2018 年后, 种养殖业氨排放量逐年上升, 年均增长率高达 7.3%。 2021 年京津冀地区种养殖业氨排放量为 $2.9 \times 10^8 \text{ kg}$ 。 其主要来源为粪便管理和粪肥施用, 分别占氨排放总量的 50.4% 和 42.9%。

2010—2021 年京津冀地区种养殖业氨排放强度呈现“增长—下降—增长”趋势, 见图 2(b)。 2010—2014 年京津冀地区种养殖业氨排放强度呈增长态势, 年均增长率为 1.8%, 2014 年达到最大值 $33.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 2014—2018 年排放强度呈现下降趋势, 平均下降率达到了 5.0%, 2018 年达到最低值 $27.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 2018 年后, 排放强度快速增长, 年均增长率高达 7.6%; 2021 年京津冀地区种养殖业氨排放强度达到 $33.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表 1 2010—2021 年各类畜禽规模化养殖比例

Table 1 The proportion of large-scale breeding for various types of livestock and poultry from 2010 to 2021 (%)

年份	生猪	家禽	肉牛	奶牛	羊
2010	34.54	33.22	14.10	30.63	6.34
2011	36.63	36.55	14.81	32.87	7.91
2012	38.50	40.20	16.30	37.20	9.60
2013	40.80	42.30	16.70	41.10	11.40
2014	41.80	44.70	17.40	45.20	12.90
2015	43.40	45.50	17.50	48.30	12.90
2016	44.90	49.60	17.50	52.30	13.70
2017	46.90	56.30	17.70	58.30	15.30
2018	49.10	59.10	16.90	61.40	15.50
2019	53.00	61.60	17.60	64.00	15.80
2020	57.10	64.90	18.70	67.20	17.20
2021	62.00	67.90	20.40	70.80	18.10

表 2 情景具体内容
Table 2 Scenario content

子情景具体变化因素	实施技术
减少氮肥施用量	测土配方控制氮肥用量
降低氮肥排放系数	深施肥、水肥一体化、施用控释肥、脲酶抑制剂、双抑制剂等
降低粪肥氮质量分数	采用低蛋白饲料配方
降低粪肥排放系数	肥水注射或混施、开沟施肥后迅速覆土
降低圈舍氨排放系数	采用半漏缝地板、传送带或 V 型刮板 提高清粪频率, 对排出气体进行挡尘、过滤、水洗或酸洗除臭
降低储存氨排放系数	塑料膜或秸秆覆盖污水贮存池、加酸使污水 pH 值低于 6、堆肥添加剂、密闭堆肥、生物基过滤器吸附排出气体

2.2 畜禽养殖大气环境承载力估算

2.2.1 “技术换取养殖量”情景下承载力估算结果

从表 3 可知,在“技术换取养殖量”情景中,不同氨减排技术可换取的畜禽养殖增量存在差异。其中,“降低粪肥氮质量分数”和“降低粪肥排放系数”子情景可换取的畜禽养殖增量相对较大,分别达到 1 726.9~6 907.5 万头猪当量和 793.6~3 174.4 万头猪当量;而“减少氮肥施用量”换取的畜禽养殖增量相对较小,仅为 21.0~84.1 万头猪当量。由此可见,低蛋白饲料配方和粪肥施用后覆土是未来京津冀地区重点推广的氨减排技术。

2.2.2 “综合减排达标”情景下承载力估算结果

从图 3 可知,在“综合减排达标”情景中,6 类减

排技术的变化率均取 20% 时,随着氨减排目标的提高,畜禽养殖增量在快速下降。当氨减排目标设置为 5.0% 时,京津冀地区未来畜禽养殖增量为 9 913.9 万头猪当量;而当氨减排目标设置为 15.0% 时,京津冀地区未来畜禽养殖增量为 6 199.1 万头猪当量。由此可见,综合应用与推广 6 类氨减排技术,是未来京津冀地区畜禽养殖业绿色发展与大气氨污染防治的基础。

为便于推广应用,本研究根据 2021 年京津冀地区畜禽氨排放数据,将各类畜禽氨排放量除以养殖量得到单位动物的氨排放量;进而以生猪为基准,推导出不同畜禽氨排放量相对于生猪的倍数,作为本研究猪当量折算规则,即 100.0 头猪相当于 1.6 头奶

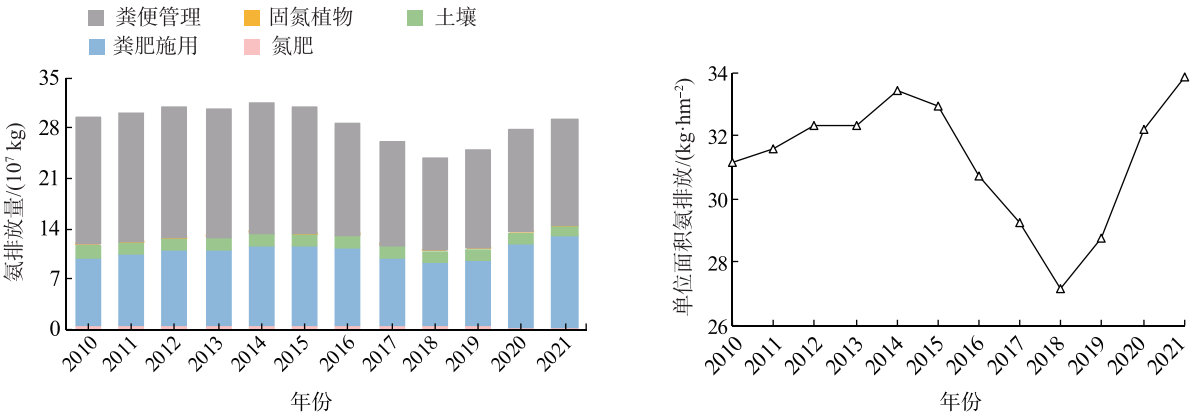


图 2 京津冀地区种养业氨排放量 (a) 和氨排放强度 (b)

Fig. 2 Ammonia emissions (a) and ammonia emissions per unit area (b) from the planting and breeding systems in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

表 3 京津冀地区氨减排情景分析结果

Table 3 Scenario analysis results of ammonia emission reduction in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

子情景	变化率/%	氨排放强度变化量 (kg·hm ⁻²)	畜禽养殖增量 /万头猪当量	子情景	变化率/%	氨排放强度变化量 (kg·hm ⁻²)	畜禽养殖增量 /万头猪当量
减少氮肥 施用量	5.0	-0.02	21.02	降低粪肥 排放系数	5.0	-0.73	793.60
	10.0	-0.04	42.04		10.0	-1.45	1 587.19
	15.0	-0.02	21.02		15.0	-2.18	2 380.79
	20.0	-0.08	84.07		20.0	-2.90	3 174.38
降低氮肥 排放系数	5.0	-0.04	40.98	降低圈舍氨 排放系数	5.0	-0.08	83.80
	10.0	-0.07	79.87		10.0	-0.15	167.60
	15.0	-0.11	116.65		15.0	-0.23	251.40
	20.0	-0.14	151.33		20.0	-0.31	335.20
降低粪肥氮 质量分数	5.0	-1.58	1 726.89	降低储存氨 排放系数	5.0	-0.25	269.46
	10.0	-3.16	3 453.77		10.0	-0.49	538.92
	15.0	-4.73	5 180.66		15.0	-0.74	808.38
	20.0	-6.31	6 907.54		20.0	-0.98	1 077.85

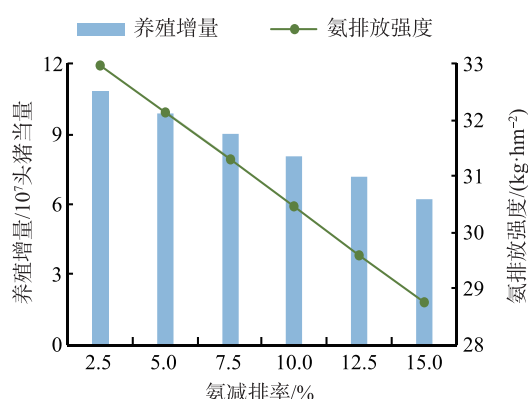


图3 京津冀地区畜禽养殖大气环境承载力估算

Fig. 3 Estimation of atmospheric environmental bearing capacity of livestock and poultry farming in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

牛或3.1头肉牛或1 556.4羽家禽或18.7头绵羊或16.0头山羊。

3 讨论

3.1 与现有行业标准计算结果的对比分析

依据行业标准《畜禽粪便土地承载力测算方法》(NY/T 3877—2021)^[17],基于作物养分供需关系,测算出2021年京津冀地区农田承载力为51 047.4万头猪当量,当前实际畜禽养殖量为14 418.3万头猪当量,表明未超过农田承载力,因此未来仍有较大的养殖增量可挖掘。本研究以大气污染防治为导向,核算京津冀地区种养业氨排放量与排放强度,设置氨减排目标,估算发现该地区未来具有一定的畜禽养殖增量(图3),与行业标准评估结果一致。

从方法学方面分析,行业标准着力于作物养分需求与粪肥养分供给的关系,是区域种植业与养殖业养分流动的核心内容,解决最基本的养分平衡问题。而本研究是从大气氨污染防治的角度出发,通过建立畜禽养殖量与区域氨排放强度的关系,仿真分析各类氨减排技术应用效果后,得到区域未来畜禽养殖增量。本研究结果为区域空气质量改善与种养循环发展提供参考资料,并间接证明了未来畜禽养殖业发展与大气氨污染防治可以兼顾。因此,本方法更多是对行业标准方法的补充,助力区域种养业绿色发展。

3.2 技术换取养殖量,协同实现区域氨减排与畜禽养殖业发展

在国外发展经验中,欧盟畜牧业经历了被动氨减排、规划氨减排和氨减排瓶颈3个时期40余年的

探索,当前推行了以经济效益最优为基础的长效可持续减排技术^[18]。由此可见,畜牧业发展与氨减排不应该是对立的问题,而是应协同发展的关系。因此,基于京津冀地区畜禽养殖业发展与大气环境保护需求,本研究提出“两步走”方案,重点在于通过种养业生产技术的进步,换取畜禽养殖业发展空间。

第1步“技术换取养殖量”:首先在种养业推广水肥一体化技术^[19]、粪肥施用后覆土技术^[20]、低蛋白饲料配方技术^[21-22]和堆肥添加菌剂^[23-24]等氨减排技术,区域氨排放量与排放强度将呈现出下降趋势,这使得在不增加环境负担的情况下,当前畜禽养殖量能够实现小幅度增加。在技术推广与应用方面,2021年中华环保联合会发布了《规模化畜禽养殖场氨减排技术指南》(T/ACEF 018—2020)和《典型种植业氨减排技术指南》(T/ACEF 016—2020),明确氨减排技术要求。各地区农技推广部门也进行技术的示范与推广。随着各类氨减排技术的成熟应用,并达到氨减排目标值后,可以逐步适度增加畜禽养殖量,实现第2步“综合减排达标”。由此可见,为了实现种养业绿色发展与大气环境保护,实施氨减排技术至关重要。

本研究构建了基于氨排放的畜禽养殖大气环境承载力估算方法,并对京津冀地区种养业氨排放量与排放强度进行了核算,同时在情景分析中评估了该地区未来的畜禽养殖增量,结论如下。

(1)2011—2020年间,京津冀地区种养业氨排放量整体呈现“平稳波动—下降—增长”态势,2021年京津冀地区种养业氨排放量为 2.9×10^8 kg。氨排放的主要来源为粪便管理和粪肥施用,分别占总量的50.4%和42.9%。氨排放强度呈现“增长—下降—增长”趋势,2021年达到 $33.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(2)在“技术换取养殖量”情景中,通过“降低粪肥氮质量分数”和“降低粪肥排放系数”的子情景,可以明显增加畜禽养殖量,畜禽养殖增量分别达到1 726.9~6 907.5万头猪当量和793.6~3 174.4万头猪当量。在“综合减排达标”情景中,综合应用各类氨减排技术,设定氨减排目标为5.0%时,京津冀地区的未来畜禽养殖增量为9 913.9万头猪当量;当氨减排目标提高到15.0%时,增量减少至6 199.1万头猪当量。

(3)随着种养业氨减排技术的推广实施,京津冀地区的畜禽养殖业将展现出良好的发展潜力。

4 结束语

本研究构建畜禽养殖大气环境承载力的估算方法,核算2021年京津冀地区种养业氨排放强度达到了 $33.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中粪便管理和粪肥施用的氨排放分别占总排放的50.4%和42.9%。若综合运用6类氨减排技术,以实现减排5.0%目标时,该地区畜禽养殖增量高达3 141.5万头猪当量。

通信作者简介:汤树生(1973—),男,博士,教授,主要研究方向为兽药分子毒理学。

5 参考文献

- [1] 薛文博,许艳玲,唐晓龙,等.中国氨排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响[J].中国环境科学,2016,36(12):3531-3539.
XUE W B, XU Y L, TANG X L, et al. Impacts of ammonia emission on $\text{PM}_{2.5}$ pollution in China[J]. China environmental science, 2016, 36(12): 3531-3539.
- [2] CHENG L, YE Z L, CHENG S Y, et al. Agricultural ammonia emissions and its impact on $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2018[J]. Environmental pollution, 2021, 291: 118162.
- [3] 刘学军,沙志鹏,宋宇,等.我国大气氨的排放特征、减排技术与政策建议[J].环境科学研究,2021,34(1):149-157.
LIU X J, SHA Z P, SONG Y, et al. China's atmospheric ammonia emission characteristics, mitigation options and policy recommendations[J]. Research of environmental sciences, 2021, 34(1): 149-157.
- [4] XU P, LI G, ZHENG Y, et al. Fertilizer management for global ammonia emission reduction[J]. Nature, 2024, 626(8000): 792-798.
- [5] 王琛,张秀明,段佳堃,等.中国农畜牧业高分辨率氨排放清单[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(12):1973-1980.
WANG C, ZHANG X M, DUAN J K, et al. A high-resolution ammonia emission inventory for cropland and livestock production in China[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2021, 29(12): 1973-1980.
- [6] 吾拉哈提·阿达力别克,展晓莹,周丰,等.京津冀地区农业源氨排放的时空格局与减排潜力[J].农业环境科学学报,2021,40(10):2236-2245.
ADALIBIEKE W, ZHAN X Y, ZHOU F, et al. Spatiotemporal pattern and potential to mitigate ammonia emissions from agriculture in Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. Journal of agro-environment science, 2021, 40(10): 2236-2245.
- [7] 康嘉慧,孟凡磊,刘学军,等.华北平原曲周县人为源氨排放清单及分布特征[J].环境科学,2023,44(1):94-103.
KANG J H, MENG F L, LIU X J, et al. Emission inventory and distribution characteristics of anthropogenic ammonia in Quzhou County, North China Plain[J]. Environmental science, 2023, 44(1): 94-103.
- [8] WANG C, DUAN J K, REN C C, et al. Ammonia emissions from croplands decrease with farm size in China[J]. Environmental science & technology, 2022, 56(14): 9915-9923.
- [9] XU P, LI G, HOULTON B Z, et al. Role of organic and conservation agriculture in ammonia emissions and crop productivity in China[J]. Environmental science & technology, 2022, 56(5): 2977-2989.
- [10] 刘红南,印遇龙.以种养结合模式推进养殖氨减排的治理[J].中国科学院院刊,2021,36(1):93-96.
LIU H N, YIN Y L. Establish integrated crop-livestock production to promote ammonia reduction in livestock industry[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(1): 93-96.
- [11] 中华人民共和国国务院.国务院关于印发《空气质量持续改善行动计划》的通知[EB/OL].(2023-12-07)[2024-07-13].https://www.gov.cn/zhengce/content/202312/content_6919000.htm.
- [12] 国家统计局.中国统计年鉴2011(总第30期)[M].北京:中国统计出版社,2011:378-397.
- [13] 生态环境部.大气氨源排放清单编制技术指南[EB/OL].(2014-08-20)[2024-07-15].<https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293771578.pdf>.
- [14] 国家统计局农村社会经济调查司.中国农村统计年鉴-2010[M].北京:中国统计出版社,2010:105-119.
- [15] 农业农村部畜牧兽医局,全国畜牧总站.中国畜牧兽医统计2010-2021[M].北京:中国农业出版社,2023:36.
- [16] 杨叶华,张松,王帅,等.中国不同区域常见绿肥产量和养分含量特征及替代氮肥潜力评估[J].草业学报,2020,29(6):39-55.
YANG Y H, ZHANG S, WANG S, et al. Yield and nutrient concentration in common green manure crops and assessment of potential for nitrogen replacement in different regions of China[J]. Acta praeiculturae sinica, 2020, 29(6): 39-55.
- [17] 农业农村部.畜禽粪便土地承载力测算方法:NY/T 3877—2021[S].北京:全国畜牧业标准化技术委员会,2021:5.
- [18] 周元清,聂善明,张利宇,等.欧盟畜牧业氨减排路径

- 研究[J]. 世界农业, 2024(2): 48-58.
- ZHOU Y Q, NIE S M, ZHANG L Y, et al. Research on ammonia emission reduction path in EU livestock industry[J]. World agriculture, 2024(2): 48-58.
- [19] 姚春生, 任婕, 张震, 等. 微喷水肥一体化氮肥管理对冬小麦产量、品质、氮素积累和利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(3): 25-37.
- YAO C S, REN J, ZHANG Z, et al. Effects of micro-sprinkler irrigation integration and nitrogen fertilizer management on yield, quality and nitrogen accumulation and utilization of winter wheat[J]. Journal of China agricultural university, 2023, 28(3): 25-37.
- [20] 张万钦, 李南西, 周元清. 京津冀畜牧业氨减排现状及建议[J]. 中国畜牧业, 2024(1): 45-47.
- ZHANG W Q, LI N X, ZHOU Y Q. Current situation and suggestions for ammonia emission reduction in animal husbandry in Beijing, Tianjin and Hebei[J]. China animal industry, 2024(1): 45-47.
- [21] 张思轩. 不同蛋白源低蛋白日粮对蛋鸡生产性能、含氮化合物排放的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2022: 21.
- ZHANG S X. Effects of low-protein diets with different protein sources on performance and nitrogen compounds emission of laying hens[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022: 21.
- [22] 张辉耀, 张秋良, 颜国华, 等. 豆粕减量替代研究进展[J]. 河北农业, 2024(1): 87-88.
- ZHANG H Y, ZHANG Q L, YAN G H, et al. Research progress of soybean meal reduction substitution[J]. Hebei agriculture, 2024(1): 87-88.
- [23] 曹立群, 喻其林, 肖维伟, 等. 鸡粪好氧发酵高效同程硝化-反硝化菌筛选及其生物学特性研究[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(5): 63-69.
- CAO L Q, YU Q L, XIAO W W, et al. High-effective simultaneous nitrifying-denitrifying bacteria screening in composting of chicken manure and their characteristics[J]. Journal of China agricultural university, 2008, 13(5): 63-69.
- [24] 张国言, 董元杰, 孙桂阳, 等. 复合菌剂对兔粪堆肥碳氮转化与损失的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(11): 153-165.
- ZHANG G Y, DONG Y J, SUN G Y, et al. Effects of compound bacterial inoculant on the conversion and loss of carbon and nitrogen during rabbit manure composting [J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(11): 153-165. ◆