

化肥减量增效下山东省农牧系统氮素流动特征和氮肥减施潜力分析

王欣雅, 赵彤彤, 黄少辉, 杨文方, 张晴雯, 贾良良

引用本文:

王欣雅, 赵彤彤, 黄少辉, 等. 化肥减量增效下山东省农牧系统氮素流动特征和氮肥减施潜力分析[J]. 农业环境科学学报, 2026, 415(1): 116–126.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2025-0078>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响

周平遥, 张震, 王华, 肖智华, 徐华勤, 汪久翔

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2683–2691 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0441>

农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评估研究 ——以淮河流域为例

宋大平, 左强, 刘本生, 邹国元, 刘东生

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1219–1231 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1374>

黄腐酸改性膨润土对氮素淋失和氮肥利用率的影响

孔柏舒, 焦树英, 李永强, 沈玉文, 李焯, 张子胥, 付春雨

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2371–2379 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0838>

沼液在稻田的精确施用及其环境效应研究

杨润, 孙钦平, 赵海燕, 邹国元, 刘本生, 李恋卿

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1566–1572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1617>

化肥减施下粪水替代对设施白菜氮利用与土壤氮盈余的影响

程娟, 付莉, 翟中葳, 肖能武, 杨柳, 刘福元, 杜会英, 杜连柱, 张克强

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2551–2558 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1033>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王欣雅, 赵彤彤, 黄少辉, 等. 化肥减量增效下山东省农牧系统氮素流动特征和氮肥减施潜力分析[J]. 农业环境科学学报, 2026, 45(1): 116–126.

WANG X Y, ZHAO T T, HUANG S H, et al. Nitrogen flow characteristics and fertilizer reduction potential of crop–livestock systems in Shandong Province under the policy of fertilizer reduction and efficiency increase[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2026, 45(1): 116–126.



开放科学 OSID

化肥减量增效下山东省农牧系统氮素流动特征和氮肥减施潜力分析

王欣雅^{1,2,3}, 赵彤彤¹, 黄少辉^{1*}, 杨文方¹, 张晴雯^{3*}, 贾良良¹

(1. 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 石家庄 050051; 2. 青岛农业大学资源与环境学院, 青岛 266109; 3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要:通过统计年鉴和文献收集数据,利用NUFER模型分析山东省2007年(氮肥用量达峰)、2015年(氮肥用量缓慢降低)和2022年(氮肥用量快速降低)3个典型年份农田–畜牧系统氮素养分流动特征,定量系统氮素利用率和环境损失率,评估化肥减量增效政策应用效果,并通过设置降低土壤盈余(S1)、提高畜禽粪便还田比例(S2)、优化动物饲料结构(S3)3种情景分析进一步明确山东省农牧系统氮肥减施增效潜力。结果表明:2007年、2015年、2022年山东省农牧系统氮素投入总量分别为371.6万、364.8万、299.4万t,氮素投入量呈下降趋势,其中以化肥占比最高,分别为69.9%、61.9%、55.6%,化肥用量逐渐降低。3年中,农田系统氮素利用率(NUEc)分别为36.3%、42.5%、54.7%,畜牧系统氮素利用率(NUEa)分别为27.9%、19.0%、22.8%,农牧系统氮素利用率(NUEc+a)呈现出逐步上升的趋势,从2007年的31.7%提升至2015年的33.4%,2022年时达到44.6%。2022年该地区土壤氮素累积量达到25.7万t,占总输入量的8.6%,而环境排放总量为127.0万t,占总输入量的42.4%。在环境排放的构成中,氨挥发(包括农田和畜禽粪便氨挥发)和畜禽粪便水体排放与堆置为占比最大的两种损失途径,3年中氨挥发占环境排放总量的比例为45.8%、49.0%、54.5%,畜禽粪便水体排放与堆置占比分别为16.8%、21.5%、25.6%。通过降低土壤中的氮素累积,该地区具备29.0%的氮肥减施潜力,此时,农牧系统氮素总投入量为251.1万t,农牧系统氮素利用率由44.6%增加到53.1%,食物氮代价由2.2 kg·kg⁻¹降至1.9 kg·kg⁻¹,环境排放量由127万t降至104.4万t;进一步提高畜禽粪便还田比例可减少化肥用量8.6%,农牧系统氮素利用率提高2.3个百分点,环境损失降低9.8%;持续优化管理并调整动物饲料结构后,该地区氮肥减施潜力可达34.3%,农牧系统氮素总投入进一步降至226.3万t,农牧系统氮素利用率增加至58.9%,食物氮代价和环境排放量分别为1.7 kg·kg⁻¹和79.6万t,较2022年分别降低22.7%和37.3%,显著降低了氮素向环境的排放。研究表明,山东省2007—2022年化肥用量呈下降趋势,农牧系统总体氮素投入量也逐渐下降,农牧系统氮素利用率呈上升趋势,环境排放量呈下降趋势,山东省化肥减量增效取得显著成效,对区域农业绿色发展提供了重要支撑。此外,可提倡分区布局,通过政策引导和技术支撑,协同推进S1、S2、S3技术路径,最终实现全省化肥减施潜力最大化。

关键词:农牧系统;NUFER模型;减量增效;氮素利用率;减施潜力

中图分类号:X71 文献标志码:A 文章编号:1672–2043(2026)01–0116–11 doi:10.11654/jaes.2025–0078

Nitrogen flow characteristics and fertilizer reduction potential of crop–livestock systems in Shandong Province under the policy of fertilizer reduction and efficiency increase

WANG Xinya^{1,2,3}, ZHAO Tongtong¹, HUANG Shaohui^{1*}, YANG Wenfang¹, ZHANG Qingwen^{3*}, JIA Liangliang¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051,

收稿日期:2025–01–22 录用日期:2025–04–15

作者简介:王欣雅(1993—),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究方向为养分管理与农牧循环。E-mail:wangxinya1993@163.com

*通信作者:黄少辉 E-mail:shaohui1988@sina.com;张晴雯 E-mail:zhangqingwen@caas.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1901001)

Project supported: National Key Research and Development Program of China(2021YFD1901001)

China; 2.College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 3.Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: By collecting data from statistical yearbooks and literature, the NUFER model was employed to analyze the nitrogen flow characteristics in the cropland–livestock systems of Shandong Province for three typical years: 2007 (the amount of nitrogen fertilizer had reached its peak), 2015 (the usage rate of nitrogen fertilizer was slow), and 2022 (the amount of nitrogen fertilizer was decreasing rapidly). We quantified the nitrogen utilization rate of the system and the environmental loss rate and evaluated the application effect of fertilizer reduction and efficiency increase policy, and further clarified the potential of fertilizer reduction and efficiency increase in the crop–livestock systems in Shandong Province through setting three scenario analyses of reducing soil surplus (S1), increasing the proportion of livestock and poultry manure returned to the field (S2), and optimizing the structure of animal feed (S3). In 2007, 2015 and 2022, the total nitrogen inputs of crop–livestock systems in Shandong Province were 3.716 million tons, 3.648 million tons and 2.994 million tons respectively, showing a downward trend. Chemical fertilizers accounted for the highest proportion, which were 69.9%, 61.9% and 55.6% respectively, and the usage of chemical fertilizers gradually decreased. In the three–year period, the nitrogen use efficiency in the cropping system (NUEc) was 36.3%, 42.5% and 54.7% respectively. The nitrogen use efficiency in the livestock system (NUEa) was 27.9%, 19.0% and 22.8% respectively. The nitrogen use efficiency in the crop–livestock systems (NUEc+a) was 31.7%, 33.4% and 44.6% respectively, gradually rising and reaching 44.6% in 2022. In 2022, the nitrogen accumulation in soil reached 0.257 million tons, accounting for 8.6% of the total input, while the total amount of nitrogen environmental loss was as high as 1.270 million tons, accounting for 42.4% of the total input. Among environmental loss, ammonia volatilization (including ammonia volatilization from crop and livestock manure) and the discharge and stacking of livestock manure in water bodies were the two loss pathways with the largest proportions. In the three years, the proportions of ammonia volatilization in the total environmental emissions were 45.8%, 49.0%, and 54.5% respectively, and the proportions of the discharge and stacking of livestock manure into water bodies were 16.8%, 21.5%, and 25.6% respectively. By reducing the nitrogen accumulation in the soil, this region has the potential to reduce the application of nitrogen fertilizer by 29.0%. At this time, the total nitrogen input in the crop–livestock systems was 2.511 million tons, the NUEc+a increased from 44.6% to 53.1%, the nitrogen cost of food decreased from $2.2 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $1.9 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the environmental loss decreased from 1.270 million tons to 1.044 million tons. Further increasing the proportion of livestock manure returned to the fields could reduce the usage of chemical fertilizers by 8.6%, increase the NUEc+a by 2.3 percentage points, and reduce environmental loss by 9.8%. Continuing to optimize management and adjust the structure of animal feed, there would be a 34.3% potential for reducing nitrogen fertilizer application in this region. Meanwhile, the total nitrogen input in the crop–livestock systems reduced to 2.263 million tons. The NUEc+a could increase to 58.9%. The nitrogen cost and environmental loss were $1.7 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and 0.796 million tons respectively, with a decrease of 22.7% and 37.3% compared with 2022. From 2007 to 2022, the chemical fertilizers application rate in Shandong Province showed a downward trend. The overall nitrogen input in the crop–livestock systems also gradually decreased. The NUEc+a showed an upward trend, while the environmental loss showed a downward trend. It has achieved remarkable results in fertilizer reduction and efficiency increase in Shandong Province, providing important support for the green development of regional agriculture. In addition, we highlights that the maximization of the potential for chemical fertilizer reduction can be realized across the province throughout the layout of different regions, policy guidance and technical support, as well as the coordinated advancement of the S1, S2 and S3 technical paths.

Keywords: crop–livestock systems; NUFER model; fertilizer reduction and efficiency increase; nitrogen use efficiency; fertilizer reduction potential

氮是动植物生产的必需营养元素^[1],对保障国家食品安全有重要作用。随着生活水平的不断提高,人们对于粮食和肉蛋奶类产品的需求增大,为了增产增收,化肥用量不断增加,畜禽养殖规模也不断增大,这虽然在一定程度上满足了人们的物质需求,但是化肥的不合理施用和农牧分离导致了一系列的环境问题^[2–4],如化肥、畜禽粪尿中的氮通过氨气(NH_3)、氧化亚氮(N_2O)等形态排放到空气,或通过淋洗、径流和土壤侵蚀等方式流失到水体^[5],造成温室效应、生态

系统富营养化、酸化和生物多样性丧失^[6–8]。因此减少化肥用量、提高化肥利用率、有效利用有机资源、实行农牧结合是我国氮肥减施增效的重要举措^[9]。2005年、2015年、2017年我国先后启动了“测土配方施肥”“化肥使用零增长”“畜禽粪污资源化利用”等一系列化肥减量增效行动,明确降低化肥用量,提高有机资源循环率,走农业绿色发展道路,并取得显著成效。在此背景下,定量分析不同阶段农牧系统氮素流动特征,明确政策行动对区域氮素转化的影响,解析

减氮增效潜力,是区域政策制定和农牧业进一步向绿色发展的关键。

发达国家在农牧结合规模化发展及农牧系统养分循环与环境排放研究领域起步较早,其针对“农田-畜牧”系统养分流动的综合评价体系已形成较为完整的分析框架,通过精准分析系统内养分流动特性,为降低氮素损失和防控环境污染提供了重要理论支撑。相比之下,我国相关研究虽起步较晚,但已在宏观尺度和典型区域层面取得突破性进展。王激清等^[10]基于物质流^[11]分析理论构建的国家尺度氮素模型具有典型意义,该模型通过量化不同区域农田生态系统氮素输入(包括化肥施用、有机肥还田等)、输出(包括作物吸收、环境流失等)的动态平衡关系,系统估算了氮素盈余空间分布特征,同时分析了氮养分所产生的环境效应,为构建农牧系统可持续养分管理模式提供了科学依据。Ma等^[12-13]建立了食物链养分流动模型(NUFER),该模型能够用于分析国家和区域尺度的氮素账户平衡、氮素流动、利用率和环境排放。余乐等^[14]、张晓萌等^[15]、黄少辉等^[9]利用NUFER模型,对江苏、东北、京津冀等地区农牧系统氮素流动特征进行了量化分析,充分证明了NUFER模型在我国区域尺度具有良好的适用性。由此可见,利用NUFER模型开展模拟研究,是探究我国区域农牧系统氮素流动特征的有效手段,但目前该模型仅在部分区域或省份得到应用,随着我国农业绿色发展的推进,其应用范围还需进一步扩大。

山东省是我国农业和畜牧业大省,是我国农牧系统集约化发展的地区,其农牧系统氮素利用和流动状况对农牧业绿色发展有巨大影响,明确山东省农牧系统氮素养分流动特征,并针对性地提出减排增效措施,将有效提升华北乃至全国农牧系统农业绿色发展水平。本研究以山东农牧系统为研究对象,利用NUFER模型,分析山东省2007年(氮肥用量达峰)、2015年(氮肥用量缓慢降低)和2022年(氮肥用量快速降低)3个典型年份农田-畜牧系统氮素养分流动特征与变化趋势,定量系统氮素利用率和环境损失率,评估化肥减量增效政策应用效果,并通过情景分析进一步明确山东省氮肥减施增效潜力,为区域绿色发展提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

山东省属于暖温带季风气候类型,气候独具特

点。其降水相对集中,且雨热同季,春秋两季较短,冬夏两季较长。该省年平均气温在11~14℃,全年无霜期呈现出由东北沿海向西南逐渐递增的趋势。此外,山东省光照资源十分充足,年均光照时数达2 290~2 890 h,热量条件能够满足农作物一年两熟的生长需求。2023年山东省的粮食播种面积为838.79万hm²,总产量为5 655.5万t。畜禽养殖规模的比重达到87%,高出全国平均水平15个百分点。全省肉蛋奶产量1 685.56万t,占全国的近1/10。

1.2 系统边界

以山东省“农田-畜牧”生产体系为研究区域,氮素为研究对象,计算山东省2007年(氮肥用量达峰)、2015年(氮肥用量缓慢降低)和2022年(氮肥用量快速降低)3个典型年份“农田-畜牧”体系氮素输入、输出和内部循环项(图1)。系统氮素输入项主要包括肥料、生物固氮、干湿沉降和外源饲料等;输出项主要包括作物主副产品、动物主副产品等带走的氮素和环境损失的氮素,环境损失的氮素包括氨挥发、反硝化、淋溶、径流和侵蚀。作物主副产品的本地饲用、作物副产品(秸秆)和畜禽粪便的还田作为系统内部循环项。

1.3 计算方法

采用NUFER模型计算氮素流动、利用率和环境排放。农田系统、畜牧系统和农牧系统氮素利用率的计算公式如下^[9,16-17]:

农田系统氮素总输入量=化肥+畜禽粪便还田+秸秆还田+沉降+生物固氮

农田系统氮素总输出量=作物主产品氮素携出量+秸秆氮携出量+氨挥发+氧化亚氮排放+淋溶氮+径流和侵蚀氮+反硝化氮气+土壤累积氮

畜牧系统氮素总输入量=作物主产品氮素投入量+秸秆氮素投入量+外源饲料氮素投入量

畜牧系统氮素总输出量=动物主产品氮素携出量+动物副产品氮素携出量+畜禽粪尿氮素携出量

农田系统氮素利用率(NUEc)=作物产品氮素输出量/农田系统氮素总输入量×100%

畜牧系统氮素利用率(NUEa)=动物产品氮素量/畜牧体系输入氮素量×100%

农牧系统氮素利用率(NUEc+a)=(植物产品氮素量+动物产品氮素量)/农牧系统总输入氮素量×100%

氮素养分循环再利用率(NRR)=(作物秸秆还田氮素量+作物秸秆作饲料氮素量+畜禽粪便还田氮素量)/(作物秸秆收获氮素量+畜禽粪便产生氮素量)×

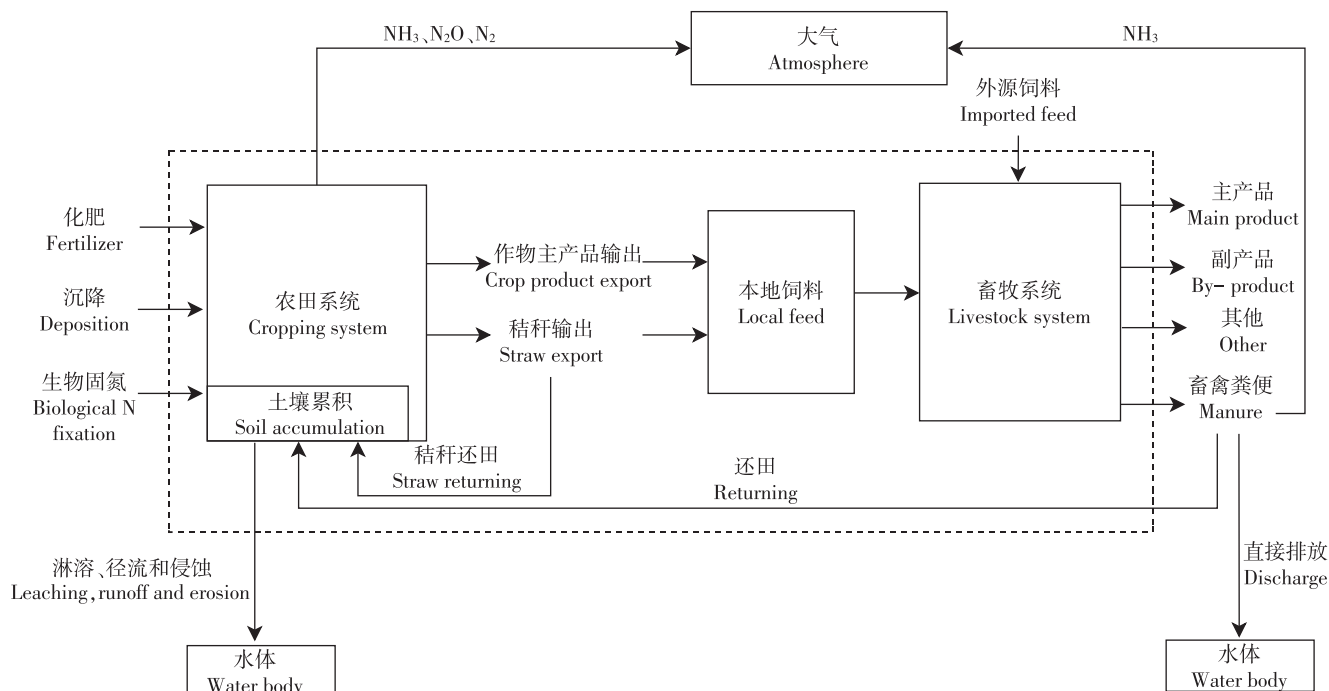


图1 山东省“农田-畜牧”系统氮素流动示意图

Figure 1 Schematic diagram of nitrogen flow in the “crop-livestock” systems in Shandong Province

100%

食物氮代价(NCf, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=农牧系统总输入氮素量/(植物产品氮素量+动物产品氮素量)

1.4 数据来源

数据来源包括统计数据和文献数据两部分。

统计数据:折纯计算后化肥施用量,农作物播种面积及产量、畜牧业各类动物存栏和出栏数量以及肉蛋奶产出量等皆来源于山东省2007年、2015年、2022年统计年鉴和国家统计局数据网站(<https://data.stats.gov.cn/>)。

文献数据:氮肥投入中复合肥的N:P₂O₅:K₂O比例^[18-19],氮素大气沉降数量^[20],谷物和豆科作物固氮量^[21],作物籽粒和秸秆含氮量^[22],作物秸秆谷草比^[23],秸秆利用比例^[24],化肥不同氮素损失系数^[8],粮食作物籽粒用途比例根据统计数据确定,各畜禽种类的产物系数和氮素含量^[25],畜禽粪便还田、生产、存储氮素损失系数^[26],畜禽粪便还田比例^[27]。其他所需参数均来自于NUFER模型^[12,22,28]。

1.5 情景设置

为进一步探究山东省农牧系统氮肥减施增效潜力,本研究从降低土壤盈余(直接减少氮肥过量施用)、提高畜禽粪便还田比例(提高农牧系统氮素循环率)、优化动物饲料结构(减少环境损失,提高农牧

系统氮素利用率)3个方面设置情景分析,探讨在3种情景下山东省农牧系统氮素流动特征以及化肥减施潜力。

当前(S0):山东省农牧系统当前(2022年)氮素流动现状。

情景一(S1):在S0基础上,减少化肥投入直至将土壤氮素累积量降为零^[9]。

情景二(S2):在S1的基础上,提高畜禽粪便还田量,将50%以上水体排放部分畜禽粪污还田,使畜禽粪便还田比例从当前的35%增长至50%,并重新降低化肥投入直至土壤氮素累积量再次降为零。

情景三(S3):在S2的基础上,优化动物饲料结构,以低蛋白物质替代浓缩饲料中的高蛋白组分,平均降低畜禽粪便总排放量15%^[29],同时维持50%的畜禽粪污还田比例和土壤氮素累积为零。

2 结果与分析

2.1 2000—2022年山东省化肥用量特征

2000—2022年山东省化肥用量(图2a)分为3个阶段。2000—2007年为第一个阶段(图2b),该阶段是化肥用量快速增长的时期,由2000年的423.19万t增加到2007年的500.34万t,化肥施用量年均增长11.49万t。2007—2015年为第二个阶段(图2c),该

阶段化肥用量缓慢下降,由2007年的500.34万t降到2015年的463.5万t,化肥施用量年均减少2.86万t。2015—2022年为第三阶段(图2d),该阶段化肥用量快速下降,由2015年463.5万t下降到2022年的362.09万t,化肥施用量年均减少15.94万t。

2.2 山东省农牧系统氮素输入与输出

2.2.1 农田系统氮素输入与输出

2007年、2015年和2022年山东省农田系统氮素输入量分别为361.7万、357.6万、295.7万t(表1),呈现出逐渐下降的趋势,在总输入量中,化肥氮素的占比最高,分别为71.9%、63.1%、56.3%。除化肥外,畜禽粪便和沉降也是重要的氮素输入源。畜禽粪便在输入总量中的占比分别为8.9%、12.6%、13.4%;沉降在输入总量中的占比分别为10.4%、11.6%、13.9%。在氮素输出项中,除籽粒和秸秆外,氨挥发和土壤累积是最主要的输出部分。氨挥发在输出总量中的占比分别达到13.0%、12.6%、11.8%,呈逐渐下降的趋势;而3个年度中土壤累积在输出总量中的占比分别为23.6%、18.4%、8.7%,下降趋势更为明显。其中2007年(氮肥用量达峰)氨挥发、氧化亚氮排放、淋溶、反硝化、土壤累积占氮输出总量的比例最高,分别为13.0%、1.3%、6.7%、5.3%、23.6%。2007年、2015年、

2022年农田系统氮素利用效率(NUE_c)分别为36.3%、42.5%、54.7%,呈现出显著的上升趋势。

2.2.2 畜牧系统氮素输入与输出

山东省畜牧系统氮素输入总量呈现出先增后降的趋势,2007年为125.8万t,2015年攀升至153.6万t,2022年回落至149.4万t(表2)。从系统输入结构分析,饲料外地输入占比处于主导地位,3个年度的贡献率分别为47.8%、52.7%、50.6%。籽粒饲料占氮素总输入量的占比保持稳定(38.5%、38.5%、41.6%),秸秆饲料的贡献率则呈现下降趋势(13.7%、8.7%、7.8%)。在输出端,畜禽粪便是最大的输出项,3个统计年度的输出量分别为84.6万、116.0万t和106.4万t,占当年总输出量的67.2%、75.5%、71.2%。按动物产品输出氮素占总输入量计算的畜牧系统氮素利用率呈现波动特征,2007年达到峰值27.9%,其次为2022年回落至22.8%。

2.2.3 山东省农牧系统氮素输入、输出与环境排放

根据山东省农牧系统氮输入、输出表可知(表3),氮素投入总量呈现出显著下降趋势,总投入量由2007年的371.6万t降至2022年的299.4万t,降幅达19.4%。化肥依赖度持续下降,由2007年的69.9%降至2022年的55.6%,饲料跨区域输入稳步提升,由

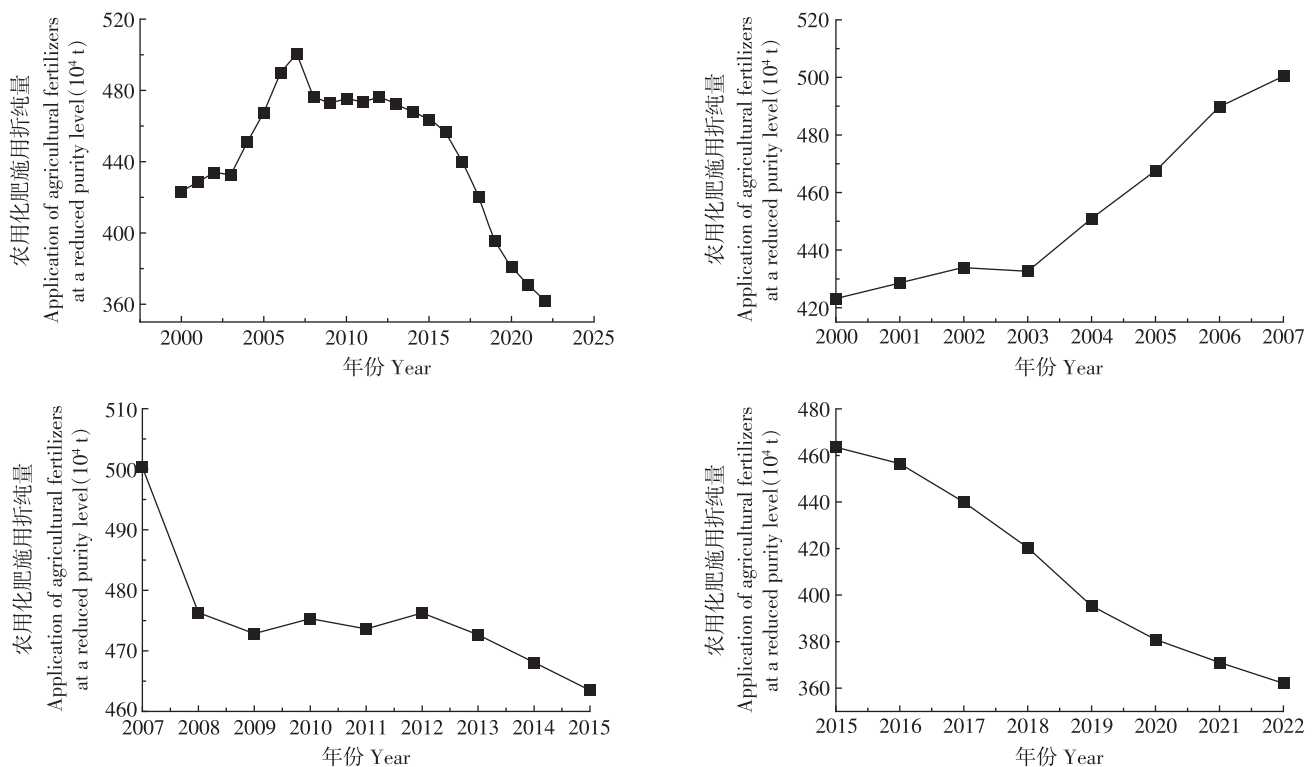


图2 2000—2022年山东省农用化肥用量

Figure 2 Amount of agricultural chemical fertilizers used in Shandong Province from 2000 to 2022

表1 山东省农田系统氮素输入与输出

Table 1 Nitrogen input and output in the cropping system of Shandong Province

项目 Item	2007	2015	2022
氮输入 N input			
化肥 Fertilizer/10 ⁴ t	259.9	225.7	166.6
畜禽粪便 Manure/10 ⁴ t	32.1	44.9	39.5
还田秸秆 Returned straw/10 ⁴ t	18.2	28.8	32.3
沉降 Deposition/10 ⁴ t	37.6	41.6	41.1
生物固氮 Biological N fixation/10 ⁴ t	13.9	16.6	16.2
合计 Total/10 ⁴ t	361.7	357.6	295.7
氮输出 N output			
籽粒 Grain/10 ⁴ t	131.2	151.8	161.6
秸秆 Straw/10 ⁴ t	38.8	46.4	48.3
氨挥发 NH ₃ volatilization/10 ³ t	47.0	45.1	34.8
氧化亚氮排放 N ₂ O emission/10 ⁴ t	4.9	4.4	3.3
淋溶 Leaching/10 ⁴ t	24.2	18.6	7.3
径流与侵蚀 Runoff and erosion/10 ⁴ t	10.9	10.7	8.9
反硝化 Denitrification/10 ⁴ t	19.3	14.9	5.8
土壤累积 Accumulation in soil/10 ⁴ t	85.4	65.7	25.7
合计 Total/10 ⁴ t	361.7	357.6	295.7
农田系统氮素利用率 NUE _c /%	36.3	42.5	54.7

表2 山东省畜牧系统氮素输入与输出

Table 2 Nitrogen input and output in the livestock system of Shandong Province

项目 Item	2007	2015	2022
氮输入 N input			
籽粒 Grain/10 ⁴ t	48.4	59.2	62.2
秸秆 Straw/10 ⁴ t	17.2	13.5	11.7
饲料外地输入 Feed import/10 ⁴ t	60.2	80.9	75.5
合计 Total/10 ⁴ t	125.8	153.6	149.4
氮输出 N output			
动物产品 Animal products/10 ⁴ t	35.1	29.2	34.0
其他部分 Other parts/10 ⁴ t	6.1	8.4	9.0
畜禽粪便总量 Total manure/10 ⁴ t	84.6	116.0	106.4
氨挥发 NH ₃ volatilization/10 ⁴ t	25.8	35.6	34.4
水体排放与粪便堆置 Water discharge and manure stacking/10 ⁴ t	26.7	35.5	32.5
还田 Returning to field/10 ⁴ t	32.1	44.9	39.5
合计 Total/10 ⁴ t	125.8	153.6	149.4
畜禽系统氮素利用率 NUE _a /%	27.9	19.0	22.8

2007年的16.2%增至25.2%。主要环境排放指标均呈下降趋势:土壤累积、农田氨挥发等在2022年达到历史最低值。其中农田氨挥发的降幅达26.0%(以2007年为基准),氧化亚氮排放减少32.7%。系统整体氮素利用率实现跨越式发展,2022年达44.6%,较

2007年提升12.9个百分点。氮素养分循环再利用保持稳高,15 a周期内波动幅度不足1个百分点,2022年维持在54.0%。食物氮代价显著优化,2022年单位食物氮代价较2007年降低31.3%。

表3 山东省农牧系统氮素输入与输出

Table 3 Nitrogen input and output in the crop-livestock systems of Shandong Province

项目 Item	2007	2015	2022
氮输入 N input			
化肥 Fertilizer/10 ⁴ t	259.9	225.7	166.6
沉降 Deposition/10 ⁴ t	37.6	41.6	41.1
生物固氮 Biological N fixation/10 ⁴ t	13.9	16.6	16.2
饲料外地输入 Feed import/10 ⁴ t	60.2	80.9	75.5
合计 Total/10 ⁴ t	371.6	364.8	299.4
氮输出 N output			
植物产品 Plant products/10 ⁴ t	82.8	92.6	99.4
动物产品 Animal products/10 ⁴ t	35.1	29.2	34.0
土壤累积 Accumulation in soil/10 ⁴ t	85.4	65.7	25.7
农田氨挥发 NH ₃ -farmland/10 ⁴ t	47.0	45.1	34.8
农田氧化亚氮 N ₂ O-farmland/10 ⁴ t	4.9	4.4	3.3
农田淋溶 Leaching-farmland/10 ⁴ t	24.2	18.6	7.3
农田径流和侵蚀 Runoff and erosion-farmland/10 ⁴ t	10.9	10.7	8.9
农田反硝化 Denitrification-farmland/10 ⁴ t	19.3	14.9	5.8
畜禽粪便氨挥发 NH ₃ -livestock manure/10 ⁴ t	25.8	35.6	34.4
水体排放与粪便堆置 Into water and stack-livestock manure/10 ⁴ t	26.7	35.5	32.5
其他部分 Other parts/10 ⁴ t	9.5	12.5	13.3
合计 Total/10 ⁴ t	371.6	364.8	299.4
农牧系统氮素利用率 NUE _{c+a} /%	31.7	33.4	44.6
氮素养分循环再利用率 NRR/%	54.7	53.7	54.0
食物氮代价 Ncf/(kg·kg ⁻¹)	3.2	3.0	2.2

从山东地区农牧系统环境排放量和百分比(表4)可知,2007年、2015年、2022年环境排放量分别达到了158.8万、164.8万、127.0万t。在各类排放损失量中,氨挥发(包括农田与畜牧氨挥发)损失量最大,2007年、2015年、2022年其占比分别为45.8%、49.0%、54.5%。其次为水体排放与粪便堆置,3年的占比分别为16.8%、21.5%、25.6%。

2.3 山东省农牧系统氮肥减施增效分析

如表5所示,与S0(当前)相比,S1(降低土壤盈余)可降低化肥投入29.0%,此时,土壤氮素累积量由当前的25.7万t降为零。随着化肥投入量的降低,农牧系统氮素投入总量也降低,农牧系统氮素利用率由44.6%增加到53.1%,食物氮代价由2.2 kg·kg⁻¹降至1.9 kg·kg⁻¹,环境排放量由127.0万t降至104.4万t。

表4 山东省农牧系统氮素环境排放量

Table 4 Nitrogen environmental emissions of crop-livestock systems

项目 Item	2007	2015	2022
农田 Farmland			
氨挥发 NH ₃ volatilization/10 ⁴ t	47.0	45.1	34.8
氧化亚氮排放 N ₂ O emission/10 ⁴ t	4.9	4.4	3.3
淋溶 Leaching/10 ⁴ t	24.2	18.6	7.3
径流和侵蚀 Runoff and erosion/10 ⁴ t	10.9	10.7	8.9
反硝化 Denitrification/10 ⁴ t	19.3	14.9	5.8
畜牧 Livestock			
氨挥发 NH ₃ volatilization/10 ⁴ t	25.8	35.6	34.4
水体排放与粪便堆置/10 ⁴ t Into water and stack-livestock	26.7	35.5	32.5
合计 Total/10 ⁴ t	158.8	164.8	127.0

表5 山东省农牧系统氮素流动情景分析

Table 5 Scenario analysis of nitrogen flow of crop-livestock systems in Shandong Province

项目 Item	S0	S1	S2	S3
化肥 Fertilizer/10 ⁴ t	166.6	118.3	108.1	109.4
畜禽粪便 Manure/10 ⁴ t	39.5	39.5	51.0	49.5
饲料外地输入 Feed import/10 ⁴ t	75.5	75.5	75.5	59.6
农牧系统总投入 Total input/10 ⁴ t	299.4	251.1	240.9	226.3
土壤累积 Soil accumulation/10 ⁴ t	25.7	0	0	0
农田系统氮素利用率 NUE _c /%	54.7	65.3	65.0	65.0
畜牧系统氮素利用率 NUE _a /%	22.8	22.8	22.8	25.5
农牧系统氮素利用率 NUE _{c+a} /%	44.6	53.1	55.4	58.9
氮素养分循环再利用率 NRR/%	54.0	54.0	61.4	67.4
食物氮代价 NCF/(kg·kg ⁻¹)	2.2	1.9	1.8	1.7
环境排放 N emission/10 ⁴ t	127.0	104.4	94.2	79.6
环境排放占投入总量比例 Percentage of N emission/%	42.4	41.6	39.1	35.2

在S1的基础上,S2(提高畜禽粪便还田比例)可继续减少化肥用量,由118.3万t减至108.1万t,农牧系统氮素投入总量由251.1万t减至240.9万t,农牧系统氮素利用率增加至55.4%。食物氮代价和环境排放量逐渐降低,分别由1.9 kg·kg⁻¹降至1.8 kg·kg⁻¹,104.4万t降至94.2万t。

在S2的基础上,S3(优化动物饲料结构)可继续增加农牧系统氮素利用率,但化肥施用量略有增加,由108.1万t增加到109.4万t,与S0相比化肥投入减少34.3%时,农田土壤氮素累积量为零,同时农牧系统氮素投入总量可由S2的240.9万t继续降至226.3万t,畜牧系统氮素利用率增至25.5%,农牧系统氮素利用率由55.4%增加到58.9%。食物氮代价和环境排放量分别为1.7 kg·kg⁻¹和79.6万t,分别较S0降低了22.7%和37.3%。

此外,由各环境排放途径排放量和占比(图3)可知,随化肥用量降低,各途径氮素排放量随之降低,S3与S0相比,降低量最高的为畜牧氨挥发(13.9万t),其次为水体排放与粪便堆置(12.0万t),降低量分别占其各自途径排放量的40.5%和37.0%,占环境排放总量的17.5%和15.1%。

3 讨论

3.1 山东省化肥用量

山东省化肥用量在2000—2022年间呈现出先升后降的动态特征,较全国提前8年于2007年达到峰值^[30]。这一现象产生的原因可归结为多重因素的叠加作用:一方面,高产导向的农业生产模式推动化肥

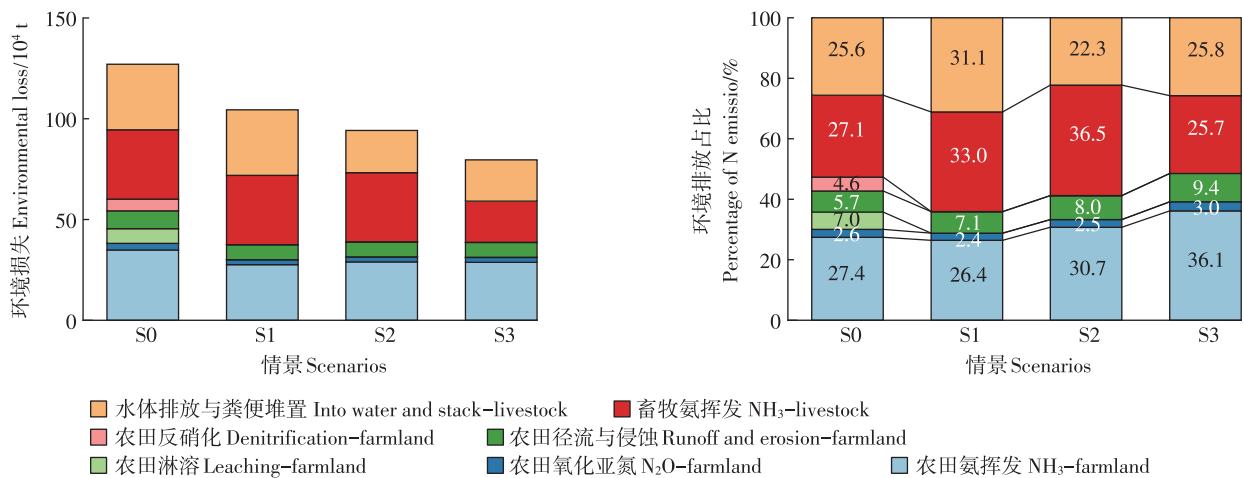


图3 不同情景下农牧系统环境排放与比例

Figure 3 Nitrogen emission rate and proportion of crop-livestock systems under different scenarios

投入持续增加,其中高效经济作物的化肥用量达到普通作物化肥用量的3倍以上,加之有机肥替代资源供给不足,对化肥形成刚性依赖^[31];另一方面,山东省为保护农民利益,稳定农业生产,出台了农资补贴政策和良种补贴政策,通过提供经济激励来促进农民增加化肥施用,致使山东省化肥用量较全国相比率先在2007年达到峰值。转折点出现在2007—2015年,《2007年全国测土配方施肥工作方案》^[32]落地并实施,这与全球化肥价格的暴涨(氮肥暴涨50%,钾肥翻倍,磷肥激增200%)形成双重约束,推动化肥用量进入降低阶段。2015年后,在化肥零增长行动和畜禽粪污资源化利用政策的强力推动下,山东省系统性推进“有机肥替代”工程,通过构建“秸秆还田+绿肥轮作+配方施肥”的生态种植体系,配合农药“双减”政策^[33],最终实现了化肥用量的显著下降。

3.2 农牧系统氮素利用与环境损失

2007年至2022年山东省农田系统氮素输入量呈下降趋势,由361.7万t降至295.7万t。农田系统氮素利用率增大,由2007年的36.3%增加至2022年的54.7%。畜牧系统氮素输入先增后减,由125.8万t增加为153.6万t,然后又降至149.4万t,畜牧系统氮素利用率先减后增,以2007年最高(27.9%)。农牧系统氮素投入总量呈下降趋势,由371.6万t降至299.4万t,农牧系统氮素利用率也逐渐增加,由2007年(氮肥用量达峰)的31.7%增长至2015年(氮肥用量缓慢降低)的33.4%,再到2022年(氮肥用量快速降低)的44.6%,但仍低于我国整体农牧体系利用率(41%)^[34]。氮肥利用率偏低的成因较为复杂。一方面,化肥施用量庞大,远超实际需求;同时,在畜禽养殖环节,对外源性饲料存在较高的依存度且畜禽粪便利用率较低,这些情况导致了农牧系统氮肥利用率处于较低水平^[35]。同时,这也与山东省人口氮需求总量大及养分投入量大有很大关系。化肥的大量施用以及低效率,造成了2007年、2015年、2022年氮素的环境排放量为158.8万、164.8万、127.0万t,分别占氮素投入总量的42.7%、45.2%、42.4%,均超出欧盟30%的排放标准^[5]。

氮损失的途径有很多种,其中农田氮素的累积和畜禽粪便水体排放与堆置是最容易调控的两个途径。有研究显示,农田氮素累计盈余和氮素损失之间存在显著的联系,具体表现为氮素盈余与活性氮排放呈现线性或者指数关系^[36]。因此降低土壤中氮素累积成为实现养分高效利用以及减少环境污染的必要措施。本研究应用输入输出平衡施氮原则,通过调节土壤累

积,将土壤累积降至最低。在不改变其他参数的情况下,只减少化肥投入量,当化肥用量减少29.0%时,土壤累积量最低,此时农牧系统氮素利用率由原来的44.6%提高到53.1%,提高了8.5个百分点。我国农牧产业长期处于分离状态,畜牧养殖管理模式较为粗放,清洗饲舍时,大量畜禽粪便未经有效处理,直接排入水体。还有部分畜禽粪便堆积于养殖场内,粪便中蕴含的各类养分随之流入周边环境^[37]。据统计,2000年流向渤海湾的养分中,来自于畜禽粪污的占60%~78%,尤其以规模化养殖场为主^[38],在降低土壤氮素盈余的基础上,通过减少水体排放和堆置等损失途径,进一步提高畜禽粪污有机养分还田率,实行种养结合,可进一步提升山东省农牧系统氮素利用率至55.4%。在农牧系统种养结合领域,欧美等发达国家积累了诸多前沿实践经验。以北美地区为例,其构建的农牧协同机制以“养分闭环管理”为核心,通过种植主体与畜牧企业签订长期供应协议,形成区域性种养联盟。以美国为例,美国玉米带80%的畜禽粪污通过定向输送系统转化为有机肥料,实现氮素资源化利用率达60%以上。相较而言,我国农业系统仍存在显著的种养分离现象。数据显示,这些发达国家畜禽粪污还田率普遍高于50%,与之形成鲜明对比的是,我国畜禽粪污还田率尚不足30%^[23]。大量有机资源因未能合理还田而流入环境,引发大气、水体等污染问题。可见,在我国合理整合农牧资源,推动种养结合,有助于提升氮素利用效能,减轻环境负担。

过度依赖饲料进口是我国养殖系统面临的主要问题,从联合国贸易数据库(UN Comtrade Database)2011—2020年的饲料进口数据能够看出,我国饲料粮进口规模显著扩张,在我国饲料粮的进口格局中,大豆和玉米作为两大主要来源,其进口量长期处于高位,且进口规模呈现出明显的扩大态势。据相关数据显示,2020年我大豆进口量突破1亿t,而玉米进口量也达到了1129万t,进口大豆首次超出了玉米的关税配额。并且,这些进口的大豆和玉米,大部分都被用作饲料^[39],在我国的饲料供应体系中扮演着至关重要的角色。而为追求高产,畜牧养殖过程中存在饲料蛋白饲喂过量的情况,一般情况下,饲料中仅20%~50%的氮素可被动物吸收利用,剩余均以粪尿形式排出体外,造成大量损失^[29]。以低蛋白物质取代浓缩饲料中高蛋白组分、降低饲料蛋白投入量、合理饲喂,可降低环境损失,提高农牧系统氮素利用率,降低系统氮素投入,实现农牧系统氮素利用率的进一步提高,并且

有利于解决饲料进口依赖等问题。本研究中,在S2的基础上,山东省通过优化动物饲料结构,农牧系统利用率可增加14.3个百分点,环境排放量降低37.3%,此时,化学氮肥可减施34.3%,食物氮代价降低22.7%,氮肥投入量虽未继续降低,但农牧系统绿色发展水平显著提高。

3.3 局限性与展望

本研究借助模型模拟手段,基于统计数据对农牧系统中的氮素流动展开分析,同时探究化肥减施的潜力,但是仍存在一定局限性。由于使用的是统计数据,难以实施统计检验,尽管如此,这些数据仍能在区域尺度上展现整体状况。模型中选用的参数已尽量参考文献中当地、当年数值,对于由于文献限制而无法获取的参数,参考华北区域参数(如氮沉降等),以此可能造成模型结果的微小偏差,还需进一步优化。此外,还应根据模型结果分区域布局,在粮食主产区(如聊城、菏泽)推广测土配方施肥技术和秸秆还田,减少化肥投入,降低土壤盈余量;在畜禽养殖密集区(如德州、泰安、临沂等)推广粪污资源化+有机肥替代,提高畜禽粪便还田量,减少化肥投入;在规模化养殖基地推广低氮饲料+种养循环模式,优化动物饲料结构,降低化肥使用量。通过分区施策、政策引导和技术支撑,协同推进S1、S2、S3技术路径,最终实现全省化肥减施潜力最大化。

本研究从降低土壤盈余、提高畜禽粪便还田比例、优化动物饲料结构三方面量化了山东省氮肥减施增效潜力,对区域农业绿色发展起到重要支撑作用,未来山东省还有很大的减施增效减排潜力。例如,在本研究中,山东省作为全国粮食主产区,农牧系统氮素利用率不足50%,环境排放中氨挥发(包括农田和畜禽粪便氨挥发)占比较高,远高于畜禽粪便水体排放与堆置,直接导致农业生产成本增加和资源浪费^[40]。减少氨挥发可使氮肥利用率提升至45%以上,降低单位面积肥料成本10%~15%^[41]。山东耕地面积占全国6%左右,但氨挥发导致的氮素流失威胁作物产量稳定性^[42]。后续既要聚焦肥料优化与土壤改良,降低农田氨挥发,又要依赖动物饲料调控与粪便处理技术,降低畜禽粪便氨挥发。通过种养结合,将二者形成闭环,以降低氨挥发损失。

4 结论

(1)2007年、2015年、2022年山东省农牧系统总体氮素投入量逐渐下降,农牧系统氮素利用率呈上升

趋势,环境排放量呈下降趋势。其中2007年为山东省氮肥用量达峰年,其农牧系统氮素投入总量为371.6万t,动植物产品输出量为117.9万t,农牧系统氮素环境排放量为158.8万t,农牧系统氮素利用率为31.7%;2015年处于氮肥用量缓慢降低阶段,其农牧系统氮素总投入量较2007年减少了1.8%,动植物产品输出量增长3.3%,氮素环境排放量增长3.8%,农牧系统氮素利用率提高1.7个百分点;2022年为氮素用量快速降低阶段,其农牧系统氮素投入总量较2015年降低17.9%,动植物产品输出量增长9.5%,农牧系统氮素环境排放量减少22.9%,农牧系统氮素利用率为44.6%,较2015年提高了11.2个百分点。

(2)通过情景模拟分析山东省农牧系统可知其仍具有较大节肥增效减排潜力,降低土壤盈余可减少化肥用量29.0%,提高农牧系统氮素利用率8.5个百分点,减少环境损失17.8%;进一步提高畜禽粪便还田比例,可减少化肥用量8.6%,提高农牧系统氮素利用率2.3个百分点,减少环境损失9.8%;继续优化动物饲料结构,可提高农牧系统氮肥利用率3.5个百分点,减少环境损失15.5%。

参考文献:

- [1] 焦智辉,陈桂平,范虹,等. 绿洲灌区密植减量施氮玉米的水分利用特征[J]. 中国农业科学, 2023, 56(16): 3088-3099. JIAO Z H, CHEN G P, FAN H, et al. Water use characteristics of increased plant density and reduced nitrogen application maize in oasis irrigated area [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(16):3088-3099.
- [2] GODFRAY H C J, BEDDINGTON J R, CRUTE I R, et al. Food security: the challenge of feeding 9 billion people[J]. *Science*, 2010, 327(5967):812-818.
- [3] ZHANG F S, CHEN X P, VITOUSEK P. Chinese agriculture: an experiment for the world[J]. *Nature*, 2013, 497(7447):33-35.
- [4] HERRERO M, THORNTON P K. Livestock and global change: emerging issues for sustainable food systems[J]. *PNAS*, 2013, 110(52): 20878-20881.
- [5] OENEMA O, OUDENDAG D, VELTHOF G. Nutrient losses from manure management in the European Union[J]. *Livestock Science*, 2007, 112(3):261-272.
- [6] 熊正琴, 张晓旭. 氮肥高效施用在低碳农业中的关键作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1433-1440. XIONG Z Q, ZHANG X X. Key role of efficient nitrogen application in low carbon agriculture [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1433-1440.
- [7] 薛利红, 何世颖, 段婧婧, 等. 基于养分回用-化肥替代的农业面源污染氮负荷削减策略及技术[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1226-1231. XUE L H, HE S Y, DUAN J J, et al. Agricultural non-point source pollution nitrogen load reduction strategy and technology

- of nutrient reusing in agricultural fields to replace fertilizer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(07):1226-1231.
- [8] 胡春胜, 张玉铭, 秦树平, 等. 华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(10):1501-1514. HU C S, ZHANG Y M, QIN S P, et al. Nitrogen processes and related environmental effects on agro-ecosystem in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(10):1501-1514.
- [9] 黄少辉, 杨云马, 侯亮, 等. 基于Nufer模型的京津冀农牧系统氮素平衡状况及化学氮肥减施潜力分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(1):12-23. HUANG S H, YANG Y M, HOU L, et al. Nitrogen balance and potential reduction of nitrogen fertilizer input in Beijing-Tianjin-Hebei crop-livestock system based on Nufer model[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(1):12-23.
- [10] 王激清, 马文奇, 江荣风, 等. 中国农田生态系统氮素平衡模型的建立及其应用[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(8):210-215. WANG J Q, MA W Q, JIANG R F, et al. Development and application of nitrogen balance model of agro-ecosystem in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(8):210-215.
- [11] SENTHILKUMAR K, NESME T, MOLLIER A, et al. Regional-scale phosphorus flows and budgets within France: the importance of agricultural production systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 92(2):145-159.
- [12] MA L, MA W Q, VELTHOF G L, et al. Modeling nutrient flows in the food chain of China[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4):1279-1289.
- [13] 马林, 魏静, 王方浩, 等. 中国食物链氮素资源流动特征分析[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(12):2104-2114. MA L, WEI J, WANG F H, et al. Analysis on the feature of nitrogen flow from food chain perspective in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(12):2104-2114.
- [14] 余乐, 焦阳涓, 丁尚, 等. 江苏省农牧系统氮素流动特征及环境效应评价[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(10):1658-1667. YU L, JIAO Y M, DING S, et al. Characteristics and environmental effects of nitrogen flows in the crop-livestock system of Jiangsu Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(10):1658-1667.
- [15] 张晓萌, 王寅, 焉莉, 等. 东北地区农牧系统氮、磷养分流动特征[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3):417-429. ZHANG X M, WANG Y, YAN L, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus nutrient flow in farming and animal husbandry system in northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3):417-429.
- [16] 陈轩敬. 长江流域农牧系统氮素向河流和近海的迁移特征[D]. 重庆:西南大学, 2020. CHEN X J. Characteristics of nitrogen inputs to rivers and the coastal water from the crop-livestock systems in the Yangtze River basin[D]. Chongqing:Southwest University, 2020.
- [17] 马思琪, 李浩, 刘晓彤, 等. 宁夏回族自治区农田-畜牧系统氮素流动与平衡时空变化特征[J]. *中国农业资源与区划*, 2024, 45(11):217-228. MA S Q, LI H, LIU X T, et al. Temporal and spatial variations of nitrogen flow and balance in crop-livestock production system in Ningxia Hui Autonomous Region[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2024, 45(11):217-228.
- [18] 张卫峰, 李亮科, 陈新平, 等. 我国复合肥发展现状及存在的问题[J]. *磷肥与复肥*, 2009, 24(2):14-16. ZHANG W F, LI L K, CHEN X P, et al. The present status and existing problems in China's compound fertilizer development[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2009, 24(2):14-16.
- [19] 苏泳松, 宋松, 陈叶, 等. 珠江三角洲人类活动净氮输入时空特征及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(8):1599-1609. SU Y S, SONG S, CHEN Y, et al. Temporal and spatial characteristics of net anthropogenic nitrogen input and its influencing factors in the Pearl River Delta[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(8):1599-1609.
- [20] 尹兴, 张丽娟, 刘学军, 等. 河北平原城市近郊农田大气氮沉降特征[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(4):698-710. YIN X, ZHANG L J, LIU X J, et al. Nitrogen deposition in suburban croplands of Hebei Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(4):698-710.
- [21] 李贞宇, 王旭, 高志岭, 等. 我国不同区域小麦施肥资源环境影响的生命周期评价[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(7):1417-1422. LI Z Y, WANG X, GAO Z L, et al. Life cycle assessment of wheat fertilization in different regions of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7):1417-1422.
- [22] 马林. 中国食物链氮素流动规律及调控策略[D]. 保定:河北农业大学, 2010. MA L. Mechanism and regulatory strategies of nitrogen flow in food chain of China[D]. Baoding: Hebei Agriculture University, 2010.
- [23] 牛新胜, 巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6):1462-1479. NIU X S, JU X T. Organic fertilizer resources and utilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6):1462-1479.
- [24] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7):173-179. GAO L W, MA L, ZHANG W F, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7):173-179.
- [25] 耿维, 孙义祥, 袁嫚嫚, 等. 安徽省畜牧业环境承载力及粪便替代化肥潜力评估[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(18):252-260. GENG W, SUN Y X, YUAN M M, et al. Evaluation of environmental carrying capacity and manure organic fertilizer instead chemical fertilizer potential of animal husbandry in Anhui[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(18):252-260.
- [26] 侯勇, 高志岭, 马文奇, 等. 京郊典型集约化“农田-畜牧”生产系统氮素流动特征[J]. *生态学报*, 2012, 32(4):24-32. HOU Y, GAO Z L, MA W Q, et al. Nitrogen flows in intensive “crop-livestock” production systems typically for the peri-urban area of Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4):24-32.
- [27] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国畜禽粪尿中养分资源数量及利用潜力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5):1131-1148. SONG D L, HOU S P, WANG X B, et al. Nutrient resource quantity of animal manure and its utilization potential in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5):1131-1148.

- [28] 马林, 马文奇, 张福锁, 等. 中国食物链养分流动与管理研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1494-1500. MA L, MA W Q, ZHANG F S, et al. Nutrient flow and management in the food chain in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(10): 1494-1500.
- [29] 曹玉博, 邢晓旭, 柏兆海, 等. 农牧系统氨挥发减排技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 566-580. CAO Y B, XING X X, BAI Z H, et al. Review on ammonia emission mitigation techniques of crop-livestock production system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 566-380.
- [30] 蔡荣, 陶素敏. 中国农业化肥投入效率空间差异及动态变迁[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2020(6): 57-66. CAI R, TAO S M. Spatial difference and dynamic change of agricultural fertilizer input efficiency in China[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University(Social Sciences Edition)*, 2020(6): 57-66.
- [31] 黄静. 山东省农业转型升级路径研究[J]. 农村实用技术, 2023(10): 1-3. HUANG J. Study on the path of agricultural transformation and upgrading in Shandong Province[J]. *Nongcun Shiyong Jishu*, 2023(10): 1-3.
- [32] 中华人民共和国农业部. 2007年全国测土配方施肥工作方案[J]. 中国农技推广, 2007, 23(4): 4-5. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. National soil testing and formula fertilization work plan for 2007[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2007, 23(4): 4-5.
- [33] 姜懿珊. 山东省农业生态效率评价及其影响因素研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2022. JIANG Y S. Evaluation of agricultural ecological efficiency and influencing factors in Shandong Province[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2022.
- [34] 刘晓利. 我国“农田-畜牧-营养-环境”体系氮素养分循环与平衡[D]. 保定: 河北农业大学, 2005. LIU X L. Nitrogen cycling and balance in “agriculture-livestock-nutrition-environment” system of China[D]. Baoding: Hebei Agriculture University, 2005.
- [35] 佟丙辛, 张华芳, 高肖贤, 等. 华北平原典型区域农牧系统氮素流动及其环境效应: 以河北省为例[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 442-455. TONG B X, ZHANG H F, GAO X X, et al. Nitrogen flow and environmental effects of crop-livestock system in typical area of North China Plain: a case study in Hebei Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 442-455.
- [36] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486-489.
- [37] 陈轩敬, 宫雅慧, 谢军, 等. 近20年重庆市农牧生产体系氮素流动特征及驱动力分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 468-4680. CHEN X J, GONG Y H, XIE J, et al. Nitrogen flow of crop-livestock production system and its driving forces in Chongqing over the past 20 years[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 468-4680.
- [38] 马林, 柏兆海, 王选, 等. 中国农牧系统养分管理研究的意义与重点[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 406-416. MA L, BAI Z H, WANG X, et al. Significance and research priority of nutrient management in soil-crop-animal production system in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 406-416.
- [39] 崔宁波, 王斯曼, 范月圆. “双循环”格局下中国饲料粮进口稳定性研究[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(3): 681-689. CUI N B, WANG S M, FAN Y Y. Study on import stability of feed grain in China under “dual circulation” pattern[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2024, 36(3): 681-689.
- [40] 谢梓豪, 樊品镐, 武华, 等. 基于氨挥发因子方法的中国农田氨排放量估算[J]. 环境科学学报, 2020, 40(11): 4180-4188. XIE Z H, FAN P H, WU H, et al. Deriving volatile factors and estimating direct ammonia emissions for crop cultivation in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(11): 4180-4188.
- [41] 肖其亮, 朱坚, 彭华, 等. 稻田氨挥发损失及减排技术研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 16-25. XIAO Q L, ZHU J, PENG H, et al. Ammonia volatilization loss and emission reduction measures in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1): 16-25.
- [42] 郭柯凡. 有机肥对滨海稻田氨挥发特征及氮素利用率的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2023. GUO K F. Effects of organic fertilizer on ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in coastal paddy field[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.

(责任编辑: 潘淑君)