

江苏省规模化肉鸭早养全饲养周期污染物产生量及其环境效应

曹云, 吴华山, 梁忠, 孙倩, 戴有礼, 徐跃定, 黄红英

引用本文:

曹云, 吴华山, 梁忠, 孙倩, 戴有礼, 徐跃定, 黄红英. 江苏省规模化肉鸭早养全饲养周期污染物产生量及其环境效应[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 2086–2095.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1220>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海南省畜禽养殖环境承载力及有机肥替代化肥潜力分析

杨旭, 黄艳艳, 刘海林, 茶正早, 罗微, 林清火

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0669>

中国农田畜禽粪尿磷负荷量及环境风险分析

刘晓永, 王秀斌, 李书田

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2594–2608 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0626>

河北省规模肉鸭场粪污重金属和抗生素调查分析

马金智, 朱志平, 卢连水, 张万钦, 薛鹏英, 江旭东

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 421–427 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0979>

畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析

袁凯, 熊苏雅, 梁静, 李彦明, 乔玉辉, 李花粉, 陈清

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1837–1842 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0142>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曹云, 吴华山, 梁忠, 等. 江苏省规模化肉鸭旱养全饲养周期污染物产生量及其环境效应[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 2086–2095.

CAO Y, WU H S, LIANG Z, et al. Manure excretion coefficient based on the complete process of duck production and estimation of environmental effects of duck breeding in Jiangsu, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(9): 2086–2095.

江苏省规模化肉鸭旱养全饲养周期 污染物产生量及其环境效应

曹云^{1,2}, 吴华山¹, 梁忠³, 孙倩^{1,2}, 戴有礼³, 徐跃定^{1,2}, 黄红英^{1,2*}

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部种养结合重点实验室, 南京 210014; 2. 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心/南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 3. 江苏省家禽科学研究所, 江苏 扬州 225125)

摘要: 为完善肉鸭养殖排泄系数体系, 准确计算肉鸭养殖粪尿产生量与氮磷排泄量并评估其环境效应, 本研究通过对高架养殖模式下, 肉鸭全饲养周期(育雏-生长-育肥)持续开展42 d的粪尿全量收集试验, 获得了肉鸭育雏期、生长期和育肥期产排污系数, 并基于江苏省各市畜禽养殖量和耕地面积估算了2021年江苏省畜禽粪尿产生量及区域分布情况, 评估了肉鸭养殖对耕地、水体污染负荷贡献。结果表明: 肉鸭不同生长阶段粪尿产生量及氮磷排泄量差异显著, 其中育雏期、生长期、育肥期粪尿产生量分别为56.3、311.5、474.9 g·只⁻¹·d⁻¹, 化学需氧量(COD)产污系数分别为4.48、20.82、30.22 g·只⁻¹·d⁻¹, 总氮(TN)产污系数分别为0.31、2.03、3.75 g·只⁻¹·d⁻¹, 总磷(TP)产污系数分别为0.19、0.85、1.41 g·只⁻¹·d⁻¹。徐州、宿迁、南通、淮安、盐城是江苏肉鸭养殖粪尿排泄总量最大的5个市, 其总量占全省肉鸭粪尿排泄量的92.9%。2021年, 江苏肉鸭粪尿中COD、TN、TP产生量分别为13.47万、1.19万、0.57万t。单位耕地面积肉鸭养殖氮、磷负荷最大的市为徐州, 占比分别为23.31%、28.53%。南通市、盐城市畜禽粪便耕地磷污染负荷高于欧盟磷限量标准, 水体污染预警等级为Ⅳ级。研究表明, 在肉鸭生产中应根据群体结构和相应的产排污系数科学核算其污染物排放量, 盐城、南通在产业发展规划时要充分考虑畜种配置与环境承载力, 适当减小肉鸭养殖规模, 防止局部养殖污染风险的出现。

关键词: 产污系数; 排污系数; 肉鸭养殖; 畜禽养殖环境污染; 粪便氮含量

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)09-2086-10 doi:10.11654/jaes.2022-1220

Manure excretion coefficient based on the complete process of duck production and estimation of environmental effects of duck breeding in Jiangsu, China

CAO Yun^{1,2}, WU Huashan¹, LIANG Zhong³, SUN Qian^{1,2}, DAI Youli³, XU Yueding^{1,2}, HUANG Hongying^{1,2*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop and Livestock Integrated Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization / College of Resources and Environment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Jiangsu Institute of Poultry Sciences, Yangzhou 225125, China)

Abstract: The present study aimed to improve the manure production and excretion parameter system applied to duck breeding to accurately calculate related manure total nitrogen (TN) and total phosphorous (TP) excretions. A manure collection experiment was

收稿日期: 2022-11-28 录用日期: 2023-03-17

作者简介: 曹云(1981—), 女, 江苏丹阳人, 博士, 研究员, 主要从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail: yun.cao@jaas.ac.cn

吴华山与曹云同等贡献

*通信作者: 黄红英 E-mail: sfmicrolab@163.com

基金项目: 江苏现代农业(水禽)产业技术体系项目(JATS(2022)431, JATS(2022)403); 国家自然科学基金项目(420771100); 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(21)3072)

Project supported: Jiangsu Agricultural Technological System Fund (JATS(2022)431, JATS(2022)403); The National Natural Science Foundation of China(420771100); Jiangsu Agricultural Science and Technology Innovation Fund(CX(21)3072)

performed during an entire 42 d breeding period of duck production using an elevated net bed breeding system in Jiangsu. Based on the number of livestock and poultry breeding, and the area of cultivated land in each city in 2021 in Jiangsu Province, the amount and regional distribution of TN and TP from livestock breeding and the contribution of duck breeding to environmental pollution by livestock manure were calculated. The results indicated that ducks had significantly different manure production and pollutant excretion rates at different growth stages, with 56.3, 311.5 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$, and 474.9 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ for manure excretion; 4.48, 20.82 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$, and 30.22 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ for COD excretion; 0.31, 2.03 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ and 3.75 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ for TN excretion, and 0.19, 0.85 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$, and 1.41 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ for TP excretion at the weaning, quick growth, and fattening stages, respectively. Xuzhou, Suqian, Nantong, Huai'an, and Yancheng represented the five cities with the largest total manure excretion of duck breeding in Jiangsu, accounting for 92.9% of total manure excretion of duck breeding. In 2021, the production rates of COD, TN, and TP in duck manure in Jiangsu Province were 134.7, 11.9 kilotons, and 5.7 kilotons, respectively. Xuzhou showed the largest TN and TP loads per unit cultivated area for duck breeding, accounting for 23.31% and 28.53% of the TN and TP emissions from the animal breeding industry. The TP pollution loads of livestock and poultry manure on farmland was higher than the TP standard in EU, and the water pollution warning level was fourth in Nantong and Yancheng. Therefore, the emissions of pollutants should be calculated accurately according to the population structure, and the corresponding production and excretion coefficient for duck breeding and the environmental carrying capacity should be fully considered in the breeding industry development planning in Yancheng and Nantong. The scale of the duck industry should be reduced to prevent local environmental pollution risks.

Keywords: pollutant production coefficient; pollutant excretion coefficient; duck breeding; livestock environmental pollution; manure total nitrogen

肉鸭是重要水禽之一,2021年我国肉鸭出栏量41亿只,位列世界第一^[1]。江苏地处中国东部沿海,水系资源较为丰富,是中国肉鸭生产与消费大省,2021年江苏商品肉鸭出栏量达1.9亿只,肉鸭养殖量占水禽总养殖量的85%以上。随着养殖污染治理工作的逐步推进,肉鸭早养已成为规模化养殖的主流,形式有地面平养、高架养殖、发酵床养殖、立体笼养,其中高架养殖模式占比达62.4%^[2]。

相对于生猪、奶牛等,肉鸭单位畜种粪污排放量小,但从粪污性质来看,由于饮水量大、粪尿合排,肉鸭粪污含水率高,集约化养殖下粪便含水率高达85%以上,氮磷等污染物浓度高,粪便<0.15 mm颗粒物含量占比55%,高于猪粪、奶牛粪,肉鸭粪污固液分离困难,粪污处理成本与难度最大^[3]。因此,规模化肉鸭养殖在带来经济效益的同时,也成为重要的农业面源污染源。产排污系数是核算养殖业污染状况的基础,能为畜禽养殖污染防治策略制定和环控设备设计提供重要参考依据^[4-6]。

国内外关于肉鸭产排污系数测定的研究较少,单英杰等^[7]调查了浙江省18家规模化养殖场和养殖户肉鸭粪便污染物含量情况,得出肉鸭粪便总氮(TN)、总磷(TP)含量均值分别为28.95、26.41 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。刘嘉莉^[8]对白洋淀鸭养殖粪便排放规律进行了研究,得出鸭粪产生量为0.13 $\text{kg} \cdot \text{只}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。晏婷等^[9]研究了不同季节笼养肉鸭污染物排放特征,得出肉鸭四季粪便的产生量为275.9~338.3 $\text{g} \cdot \text{只}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。可见由于采样方

法、计算方法的不同,不同研究者得到的肉鸭产排污核算结果差异较大,且无法完全反映不同生长阶段粪尿及其污染物产排系数。2009年发布的《第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》^[10]给出了以地域为单位的主要畜种猪、牛、鸡养殖业产排污系数。2022年生态环境部公布了不同省域、不同养殖规模的《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》(“二污普”)^[11],是近年来中国养殖业污染物排放核算的重要参考依据,但“一污普”“二污普”产排污系数手册中均未提供肉鸭的产排污系数。同时,由于气候条件、畜禽品种、饲养管理等限制性因素,跨时间、跨地域套用别的国家或地区的畜禽产排污系数会造成核算结果与实际情况差距较大^[12]。此外,经典的产排污系数采集方法往往需要代谢笼进行饲养试验,操作步骤繁琐、复杂。本研究基于江苏省肉鸭规模化养殖的实际饲养与管理条件,通过简易粪污收集箱的方法,连续测定高架养殖模式下肉鸭全饲养期采食量和粪尿产生量,并监测粪尿中污染物含量,对肉鸭全生长阶段粪尿产排污系数进行了测算,形成了符合江苏省实际的肉鸭产排污系数,其是现有肉鸭产排污系数研究的有力补充,对掌握我国肉鸭养殖业污染物的产排规律,制定肉鸭养殖的环境污染控制策略具有重要意义。在此基础上,本研究估算了2021年江苏省肉鸭养殖污染现状与耕地氮磷及水体污染负荷占比,为肉鸭粪污处理和资源化利用以及江苏省畜禽养殖产业发展规划提供技术参数。

1 材料与方法

1.1 养殖场基本情况

试验于2018年春季在江苏省句容市天王镇某养殖场进行。肉鸭品种为樱桃谷鸭,养殖模式为高架养殖,饮水由自动化水线提供,饲料由饲料盘供应。白天日光照,夜间供给弱光照,定期打疫苗和消毒。粪污通过机械自动刮粪板收集。养殖场拥有养殖舍8栋,单个养殖舍面积为304 m²,养殖密度为7~8只·m⁻²,养殖鸭子2 280只。年出栏7批,出栏量约1.5万只。肉鸭每批饲养周期42 d左右,按照生长阶段,分为育雏期(0~14日龄)、生长期(15~35日龄)和育肥期(36日龄~出栏)。试验期间,采用的饲料为市售普通玉米豆粕型全价配合饲料,营养成分为实测值,其中含水率10.13%,TN、TP含量分别为2.78%、1.13%。

1.2 产污系数试验

利用高架养殖的特点,在网床下面放置若干个收集箱,收集箱尺寸为40 cm×60 cm×20 cm,每10~20 m²放置1个收集箱,确定网床养殖面积和数量后,从雏鸭到出栏,鸭子粪便全部落入网床下收集箱内。根据收集箱收集的量和面积比例,推算整个网床下面粪便的量。试验期间每天记录每组肉鸭的饮水量、采食量。采用全粪收集法测定每组试验肉鸭的每日粪便产生量,即每天早上8:00取出粪便收集箱,称质量,并将同一天每个收集箱的粪尿分别混合均匀,粪样按照总质量的20%取样后均分为2份,1份按照100 g新鲜粪便加入5 mL 4.5 mol·L⁻¹ H₂SO₄,冷藏保存,用于TN、TP、化学需氧量(COD)的测定。另1份不做任何处理用于测定粪便含水率,样品混匀后装入塑料瓶密封,标记后置于-20℃冷冻保存。TN、TP采用有机肥料测定方法(NY/T 525—2021)测定;COD采用重铬酸盐法(GB 11914—1989)测定。

1.3 产排污系数的计算方法

参考董红敏等^[4]对畜禽养殖产排污系数的计算方法,结合肉鸭粪尿合排的特性,对公式进行优化。产污系数指在正常饲养和管理条件下,每只肉鸭每日产生的污染物质。计算公式为:

$$P_{i,j,k} = Q_{i,j,k} \times C_{i,j,k} \quad (1)$$

式中: P 代表每只肉鸭产污系数, $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$; Q 为粪尿产生量, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$; C 为粪尿中污染物含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 i, j, k 分别为动物种类、生长阶段、污染物种类。

排污系数指在正常饲养和管理条件下,每只肉鸭每日产生的污染物排放到外部环境的量,计算公式为:

$$D_{i,j,k} = Q_{i,j,k} \times C_{i,j,k} \times (1 - \delta_F) + Q_{i,j,k} \times C_{i,j,k} \times \delta_F \times (1 - \delta_U) \quad (2)$$

式中: D 代表每只排污系数, $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$; δ_F 为粪便收集率,本研究取76.4%; δ_U 为粪便利用率,本研究取95.4%。

1.4 粪尿产生量及其养分储量的估算

畜禽粪尿产生量计算公式:

$$Q = N \times T \times P \quad (3)$$

式中: Q 为粪尿产生量, kg ; N 为饲养量,万只; T 为饲养周期, d ; P 为粪尿日产排污系数, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

畜禽粪尿中养分储量的计算公式:

$$W = M \times C \quad (4)$$

式中: W 为畜禽粪尿中养分储量, kg ; M 为畜禽粪尿产生量, t ; C 为单位质量畜禽粪尿养分含量, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

1.5 畜禽粪便耕地负荷及环境影响评估

畜禽粪便农田负荷值(R)的计算公式为:

$$R = \frac{Q}{P_{\max}} \quad (5)$$

式中: Q 为畜禽粪便猪粪当量负荷, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; $P_{\max}$ 为当地农田以猪粪当量计的有机肥理论最大适宜施肥量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$,本研究中采用国家环境保护总局自然生态保护司提出的畜禽粪便耕地污染负荷最大理论适宜量 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,且该标准值为多数研究所应用^[13-14]。依据 R 值的大小可分为6个报警区间,即: $R \leq 0.4$,对环境无影响; $0.4 < R \leq 0.7$,对环境稍有影响; $0.7 < R \leq 1.0$,对环境有影响; $1.0 < R \leq 1.5$,对环境有较严重影响; $1.5 < R \leq 2.5$,对环境有严重影响; $R > 2.5$,对环境有极严重影响^[15]。

1.6 单位耕地面积畜禽养殖氮磷承载负荷

单位耕地面积畜禽养殖氮磷承载负荷计算公式:

$$L_{N(P)} = Q_{N(P)} \times 10^3 / S \quad (6)$$

式中: $L_{N(P)}$ 为单位耕地面积畜禽养殖氮(磷)承载负荷, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $Q_{N(P)}$ 为畜禽粪尿总氮(磷)产生量, t ; S 为有效耕地面积, hm^2 。

1.7 畜禽粪便水体污染负荷及环境影响评估

采用等标污染指数评价畜禽粪便污染物对水体环境的影响。

$$M_R = \lambda \times Q \quad (7)$$

$$P_i = C_i / C_0 \quad (8)$$

$$I = \sum_{i=1}^n P_i / A \quad (9)$$

式中: M_R 为该地区畜禽粪便流失量, 万 t ; λ 为流失率,综合相关研究^[16-17],江苏省畜禽粪便流失率取30%; P_i 为该地区第 i 类污染物的等标排放量, m^3 ; C_i 为第 i 类污染物的流失量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$,本研究选取的评价因子为COD、

TN、TP、 C_0 为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中规定的该污染物Ⅲ类标准系列的阈浓度,COD为 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TN为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TP为 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;I表示该地区水体的等标污染指数;A为该地区水资源总量, m^3 。

2 结果与讨论

2.1 产污系数

2.1.1 肉鸭体质量变化、进食饮水量与粪尿产生量

生长发育周期内,鸭的体质量整体呈波动增加的趋势(图1A)。雏鸭进场时,体质量最轻,仅为 61 g 。生长周期的第22天至第36天,为鸭生长速度最快的阶段,鸭体质量增长幅度最明显,平均日增 105 g 。此后肉鸭体质量增速放缓,生长周期的第42日龄体质量达 3.37 kg ,与立体网养模式下肉鸭体质量相近^[18]。

肉鸭前7 d饮水增幅较小,至7日龄饮水量为 52 mL ,7日龄后饮水量增幅加大,至35日龄单日饮水量最大,达 570 mL (图1B),42 d养殖周期内单只肉鸭总饮水 $10\,647\text{ mL}$ 。试验观测的肉鸭饮水量低于立体网养模式^[18],可能的原因是试验条件下肉鸭水线排布、饮水乳头和饮水杯设置不同,导致饮水量统计方式不一所致。

肉鸭42 d养殖周期内单日采食量见图1B,42 d养殖周期内单只肉鸭总采食量为 6.27 kg ,每日饲料用量平均为 149 g 。首日采食量为 10 g ,此后日均采食量呈逐步增长趋势,至21日龄肉鸭单日采食量达 132 g ,21日后,肉鸭采食量增长放缓,42日龄肉鸭料肉比为 1.86 。本试验条件下,肉鸭料肉比低于立体网养模式,这可能与饲料品种、养殖密度、管理方式有关。

肉鸭生长周期内粪尿排泄量随着日龄、体质量的增加呈增长趋势,并在生长的第38天达到峰值,为

$511\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ 。0~14日龄雏鸭日均排粪量为 56 g ,15~35日龄生长期单只肉鸭平均排泄量为 $311\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$,育肥期肉鸭排泄物总量为 $475\text{ g}\cdot\text{只}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。本试验条件下肉鸭的日均排泄量略高于白洋淀樱桃谷肉鸭($130\text{ g}\cdot\text{只}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)^[8],而略低于北京Z型肉鸭($275.9\sim 327.0\text{ g}\cdot\text{只}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)^[9],这与饲养模式、外界环境等对肉鸭消化吸收影响较大有关,因而粪便产生量存在差异。此外现场试验条件、取样方法对粪污采集量影响也较大。肉鸭单日采食量与粪便产生量具有极显著正相关关系($P<0.01$),这与晏婷等^[9]的研究结果一致。

2.1.2 粪尿污染物含量

全生育期间内,鸭粪中TN、TP、COD、含水率等指标见图2。随着日龄增加,鸭粪含水率、TN、TP均呈增加趋势。鸭粪平均含水率从育雏期的 72.35% 增加到育肥期的 78.09% ,略低于笼养北京Z型鸭^[9]。育雏期肉鸭粪尿中TN、TP平均含量分别为 20.2 、 $12.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,育肥期分别增加到 36.1 、 $13.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,整个饲养期肉鸭粪尿中TN、TP含量平均为 30.6 、 $12.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,略高于丁君辉等^[19]的试验结果,而与单英杰等^[7]对浙江省18家规模化鸭场鸭粪调研数据接近。不同学者所测的肉鸭粪便的污染物含量有所差异,这是因为畜禽粪污理化性质受动物品种、饲料类型、饲养阶段、养殖方式、管理条件等影响较大^[19]。

2.1.3 日产污系数

动物不同生长阶段的排泄量及其污染物含量差异较大,不同饲养阶段的比例构成即畜禽种群结构是产污系数取值应考虑的重要因素。目前只有少数研究指明其所取值的动物生长阶段。肉鸭不同饲养阶段的产污系数见表1。不同生长生理阶段肉鸭日产污系数差异较大。随着生育进程推进,肉鸭鲜粪产生

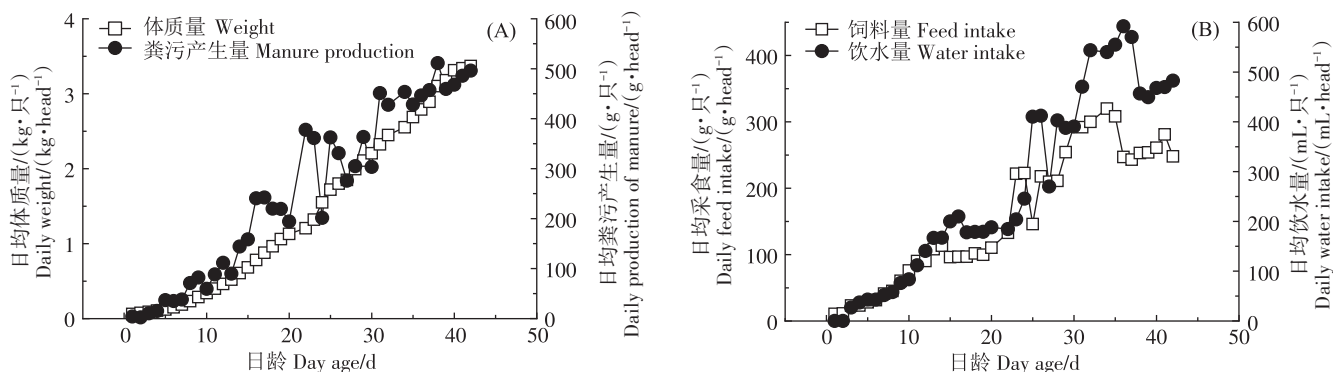
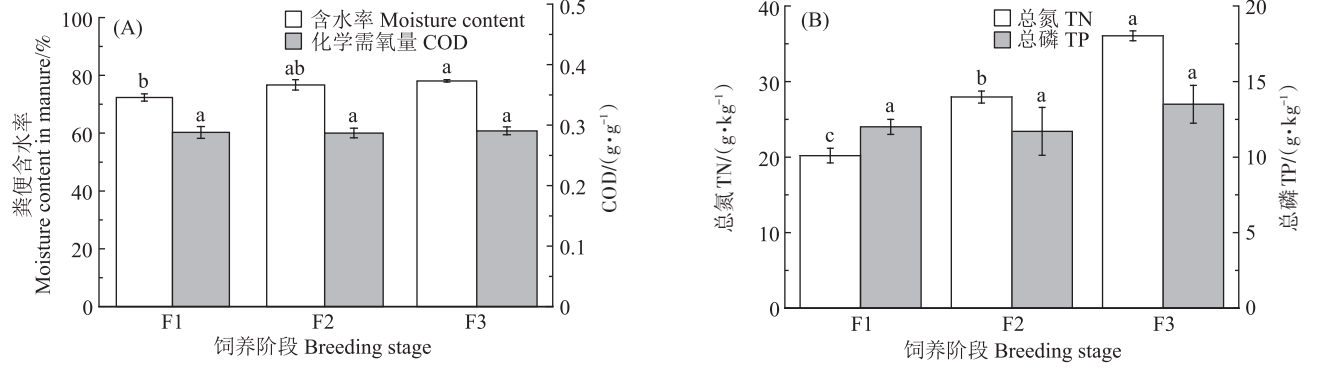


图1 肉鸭饲养周期内体质量与产粪量、日均采食量与饮水量变化

Figure 1 Variation in the weight, daily feed intake, water intake and manure production during the process of duck breeding



F1、F2、F3 表示肉鸭不同饲养阶段,分别为育雏期(0~14 日龄)、生长期(15~35 日龄)和育肥期(36 日龄~出栏)。同一指标不同饲养阶段不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

F1, F2 and F3 represent different feeding stages, including brooding period, rapid growth period and fattening period. Different lowercase letters of the same index represent significant differences among different growth stages ($P<0.05$).

图2 肉鸭不同饲养阶段粪尿含水率、COD、TN、TP 含量

Figure 2 Contents of moisture, COD, TN and TP in the manure during different growth stages of duck breeding

量快速增加,育肥肉鸭日均鲜粪产生量分别是育雏期、生长期的7.43、1.52倍。粪尿COD、TN、TP日污系数也随日龄增长而增加,这与生猪^[10,20]、鸡^[10,21]等的产污系数变化规律一致。本试验条件下,肉鸭全生育期平均日产粪尿量为250.8 g·只⁻¹,略高于第一次污染普查畜禽养殖业源产排污系数手册中的肉鸡日产污系数(220 g·只⁻¹·d⁻¹)^[10],远高于原国家环保总局发布的畜禽养殖排污系数表中鸭产污系数(130 g·只⁻¹)^[22],也低于晏婷等^[9]研究的北京Z型肉鸭笼养模式产污系数(275.9~338.3 g·只⁻¹·d⁻¹)。育肥期肉鸭粪尿COD、TN、TP日污系数分别是育雏期的6.74、11.93、7.52倍,是生长期的1.45、1.84、1.65倍。育肥期肉鸭的进食、饮水量均较大,消化代谢能力强,故产污系数较高^[18]。全生育期平均粪尿COD、TN、TP产污系数分别为16.75、1.73、0.71 g·只⁻¹·d⁻¹,其中COD产污系数低于第一次^[10]、第二次污染普查畜禽养殖业源产排污系数手册中肉鸡产污系数^[11],TN、TP产污系数

高于第一次污染普查肉鸡产污系数^[10]而低于笼养肉鸭产污系数^[9]。根据饲料进食量及饲料TN、TP含量,出栏1只肉鸭需要消耗饲料6.27 kg,需要摄入氮、磷量分别为156.65、63.67 g,排泄氮、磷量分别为69.22、28.59 g。肉鸭平均TN、TP的排泄量占比分别为44.2%、44.9%,说明肉鸭对饲料氮、磷的利用率在56%左右。陈娴^[23]研究发现,肉鸭对玉米、豆粕等6种常用植物性饲料TP的利用率为40%~66%,与本研究接近。

2.2 排污系数

养殖舍采用自动刮粪工艺定期对粪污进行清理,根据前期调研与试验结果^[2],粪污收集率为76.4%。清理出的粪污被临时贮存于集粪池,粪污临时贮存半年后由槽罐车集中运送至周边农田还田利用,符合《畜禽粪便安全使用准则》(NY/T 1334—2007)。如果粪污在还田利用过程中,严格遵守《畜禽粪便还田技术规范》(GB/T 25246—2010),可认为粪污全部还田

表1 单只肉鸭不同生长阶段产污系数

Table 1 Pollutant production efficient during different growth stage of duck breeding per unit duck

饲养阶段 Growth stage	鲜粪产生量/(g·只 ⁻¹ ·d ⁻¹) Manure production/ (g·head ⁻¹ ·d ⁻¹)	鲜粪含水率 Moisture content/%	COD 产污系数/(g·只 ⁻¹ ·d ⁻¹) COD production coefficient/ (g·head ⁻¹ ·d ⁻¹)	TN 产污系数/(g·只 ⁻¹ ·d ⁻¹) TN production coefficient/ (g·head ⁻¹ ·d ⁻¹)	TP 产污系数/(g·只 ⁻¹ ·d ⁻¹) TP production coefficient/ (g·head ⁻¹ ·d ⁻¹)
育雏期 Weaning	56.3±23.6	75.3±3.3	4.48±1.46	0.31±0.10	0.19±0.06
生长期 Quick growth	311.5±51.8	80.3±3.6	20.82±1.96	2.03±0.21	0.85±0.08
育肥期 Fatten	474.9±33.0	81.9±2.7	30.22±2.46	3.75±0.31	1.41±0.11
全饲养期平均 Mean for the whole breeding process	250.8±93.2	78.9±4.2	16.75±4.73	1.48±0.59	0.71±0.21

注:数据为均值±SD(下同);全饲养期粪尿及其污染物平均日产生量由各生育期加权平均所得。

Note: The data in the table is presented in the form of mean±SD (the same below). The mean value of daily production of feces and urine and its pollutants during the whole feeding period is obtained by the weighted average of each growth period.

利用,但由于在粪污贮存、运输、利用过程中通过渗漏、挥发等途径产生部分损失^[24-25],本研究中粪便利用率取值为95.4%^[26]。对此,测算出不同饲养阶段肉鸭的排污系数。与产污系数相似,肉鸭粪尿COD、TN、TP日排污系数也随着日龄的增加而增长,育肥期粪尿COD、TN、TP日排污系数分别是育雏期的6.76、12.14、7.31倍,是生长期的1.45、1.85、1.65倍(表2)。

表2 单只肉鸭不同生长阶段排污系数($\text{g}\cdot\text{只}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)

Table 2 Pollutant excretion efficient during different growth stage of duck breeding per unit duck ($\text{g}\cdot\text{head}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)

饲养阶段 Growth stage	COD 排污系数 COD excretion coefficient	TN 排污系数 TN excretion coefficient	TP 排污系数 TP excretion coefficient
育雏期 Weaning	1.21±0.39	0.08±0.03	0.05±0.02
生长期 Quick growth	5.64±0.53	0.55±0.06	0.23±0.02
育肥期 Fatten	8.19±0.67	1.02±0.08	0.38±0.03
全饲养期平均 Mean for the whole breeding process	4.54±1.23	0.40±0.16	0.19±0.06

2.3 江苏省肉鸭粪便的环境效应

2.3.1 江苏省肉鸭粪污及其污染物产生量

如图3所示,江苏省肉鸭生产主要集中在里下河地区、黄淮海地区,这与肉鸭的生活习性、生长特点和畜牧业区域布局有关^[27]。2019—2021年江苏肉鸭养殖量变化不大,年出栏量1.7亿~1.9亿只。徐州、宿迁、南通、淮安、盐城是江苏主要肉鸭养殖产区,近3年肉鸭平均出栏量分别为12 769万、1 549万、1 024万、710万、497万只,五大产区总量占全省肉鸭养殖量的93%,其中徐州肉鸭养殖量占全省的71%以上(图3)。苏州、无锡、常州等苏南环太湖地区自2017年“两减六治三提升”专项行动以来,实施了禁限养区养殖户关停搬迁工作^[28],同时受劳动力、饲料成本不断上升的影响,肉鸭养殖大幅度缩减,年出栏量在50万只以下^[27]。

根据江苏各市肉鸭养殖量、饲养期及产排污系数,估算江苏省2021年各市肉鸭粪尿产生量。江苏省2021年全年肉鸭粪尿总产生量为201.74万t。受养殖规模影响,各市肉鸭粪尿产生量差异较大,产生量较多的区域主要为养殖主产区徐州(141.22万t)、宿迁(21.55万t)、南通(11.07万t)、淮安(7.87万t)、盐城(5.62万t),其总量占全省肉鸭粪尿排泄量的92.9%。其次,连云港、南京、泰州、镇江肉鸭粪尿产生量在1万~4万t之间,其他地区产生量为1万t以下,主要为苏南各市,苏州产生量最少(0.18万t)。肉

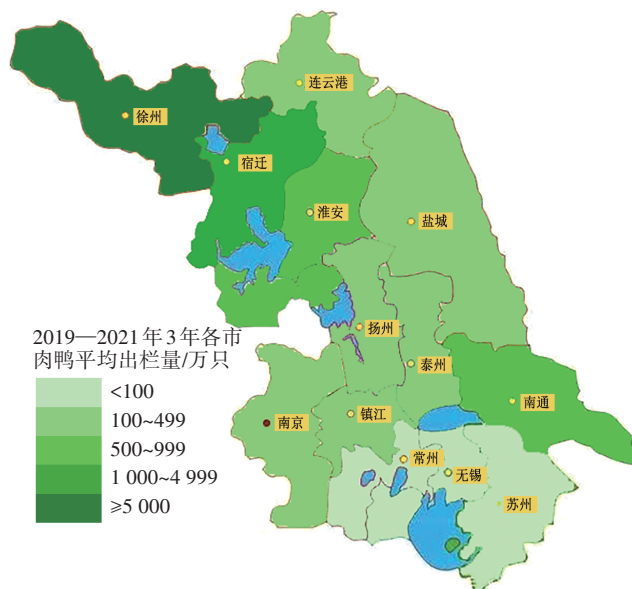


图3 江苏省2019—2021年肉鸭养殖地区分布图

Figure 3 Distribution of duck breeding in Jiangsu Province from 2019 to 2021

鸭粪尿产生量大市顺序与畜牧业生产大市顺序不完全一致,江苏畜牧业产值前5位分别是徐州、盐城、南通、淮安、连云港,这主要是因为盐城、连云港生猪、奶牛、蛋鸡等其他畜禽养殖量占比较高^[29-30]。

2021年江苏各市肉鸭粪尿中COD、TN、TP产生量如表3所示。全省肉鸭粪尿COD、TN、TP总产生量分别为13.47万、1.19万、0.57万t。徐州肉鸭粪尿COD、TN、TP产生量最高,占全省肉鸭污染物排放量的70%,占徐州市内全部畜禽粪便源TN、TP的18.1%、22.9%。

2.3.2 肉鸭及畜禽粪污耕地负荷

为了评估肉鸭养殖对畜禽污染负荷的贡献,根据江苏省农业统计年鉴及各市统计年鉴,并参照李丹阳等^[26]对主要畜禽饲养周期的核算方法,估算了2021年江苏省主要畜禽粪尿及其污染物产生量。2021年,江苏省畜禽粪尿总排放量达4 581.6万t,其中猪粪尿排放量最高,为2 330.8万t,占总量的50.9%,其次为家禽粪。肉鸭粪尿的产生量占总畜禽粪的5.1%。从粪污管理方面,江苏省应以猪粪、禽粪为主,兼顾牛、羊粪。相对于鸡粪、猪粪,鸭粪颗粒更细,含水率更高,无害化处理与资源化利用难度较大^[3],应关注鸭粪污染防治政策支持和技术开发。

江苏省2021年畜禽粪便耕地负荷量介于1.60~13.69 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,平均负荷为6.53 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,不同地区差距较大。南通市畜禽粪污耕地负荷量最高,比全省平均

表3 2021年江苏省各市肉鸭粪尿及其污染物产生量
Table 3 The production of duck manure and pollutants in each city in Jiangsu in 2021

地区 Region	粪尿产生量 Manure production/ (万 t·a ⁻¹)	COD产生量 COD production/ (万 t·a ⁻¹)	TN产生量 TN production/ (t·a ⁻¹)	TP产生量 TP production/ (t·a ⁻¹)
南京 Nanjing	3.80	0.25	224	108
无锡 Wuxi	0.22	0.01	13	6
徐州 Xuzhou	141.23	9.43	8 334	3 998
常州 Changzhou	0.44	0.03	26	12
苏州 Suzhou	0.18	0.01	11	5
南通 Nantong	11.07	0.74	653	313
连云港 Lianyungang	3.94	0.26	232	111
淮安 Huai'an	7.87	0.53	464	223
盐城 Yancheng	5.62	0.38	332	159
扬州 Yangzhou	1.02	0.07	60	29
镇江 Zhenjiang	2.55	0.17	150	72
泰州 Taizhou	2.25	0.15	133	64
宿迁 Suqian	21.55	1.44	1 272	610

负荷高出110%，苏州、无锡耕地负荷最小。肉鸭主产区徐州、宿迁、南通畜禽粪污耕地负荷均在全省平均值之上，分别为9.36、9.60、13.69 t·hm⁻²，这些地市肉鸭养殖对总耕地氮磷负荷的贡献率分别为24.69%、5.51%、1.82%。采用风险指数(R值)对畜禽粪污可能造成的农田环境污染风险进行评价^[31]。结果表明，江苏省畜禽粪便污染风险指数介于0.05~0.46之间，整体对农田环境影响较小，说明江苏省“十三五”期间的畜禽养殖污染整治取得了较为明显的成效。南通(R=0.46)、盐城(R=0.44)畜禽粪便对耕地产生了一定的污染风险，依靠本地消纳压力较大，可考虑将粪污制成有机肥向外省市销售，小型养殖场可依托本市第三方粪污处理中心集中收集储存、运输和处理。

2.3.3 肉鸭及畜禽粪污纯氮、磷养分耕地负荷

单位耕地面积的畜禽粪便氮磷负荷是环境风险评估的重要指标。欧盟粪肥年施氮和年施磷限量标准分别为170 kg·hm⁻²和35 kg·hm⁻²^[13,32]。单位耕地面积总氮(磷)负荷超过这个极限值将会带来硝酸盐的淋洗^[33-34]。2021年江苏省平均单位耕地面积畜禽粪便TN、TP负荷量分别为44.0 kg·hm⁻²和19.4 kg·hm⁻²，均未超过欧盟粪肥年施氮量、施磷量限量标准。南通、盐城两地区的单位面积磷污染负荷高于欧盟磷限量标准，这主要与两地市家禽养殖量大、粪便含磷量高，以及近年城市建设发展速度加快、有效耕地面积减小有关。

江苏省各地市单位耕地鸭粪TN、TP负荷均未超过欧盟限量标准(表4)。单位耕地肉鸭养殖氮、磷负荷占比最高的为徐州，分别为23.31%、28.53%，其次为宿迁、南京，占比分别为5.41%~5.61%、5.47%~6.09%。总体而言，肉鸭养殖对江苏省单位耕地面积总氮(磷)负荷贡献占比较小，但肉鸭粪便磷含量高，部分市区畜禽粪便中磷素负荷已超过标准上限，这些重点区域在产业发展规划时要充分考虑畜种配置与环境承载力。尽管徐州市肉鸭粪污TN、TP占比最高，但由于总畜禽粪污耕地TN、TP负荷较小，因此仍然有一定的肉鸭产业发展空间。南通、盐城等地市可适当缩小肉鸭养殖规模，降低污染风险。

表4 2021年江苏省各市鸭粪污染物单位耕地面积总氮、总磷负荷
Table 4 TN and TP load from livestock manure per unit cultivable land area in Jiangsu in 2021

地区 Region	鸭粪污 Duck manure/(kg·hm ⁻²)		畜禽粪污/(kg·hm ⁻²)		鸭粪污占比/%	
	TN负荷 TN load	TP负荷 TP load	TN负荷 TN load	TP负荷 TP load	TN	TP
南京 Nanjing	1.55	0.74	27.63	13.52	5.61	5.47
无锡 Wuxi	0.09	0.04	8.54	4.00	1.05	1.00
徐州 Xuzhou	13.64	6.54	58.52	22.92	23.31	28.53
常州 Changzhou	0.17	0.08	16.06	7.60	1.06	1.05
苏州 Suzhou	0.06	0.03	10.02	3.44	0.60	0.87
南通 Nantong	1.47	0.70	105.76	46.25	1.39	1.51
连云港 Lianyungang	0.61	0.29	38.92	14.52	1.57	2.00
淮安 Huai'an	0.97	0.47	34.59	13.80	2.80	3.41
盐城 Yancheng	0.40	0.19	100.42	47.79	0.40	0.40
扬州 Yangzhou	0.18	0.09	33.25	14.98	0.54	0.60
镇江 Zhenjiang	0.92	0.44	34.03	16.53	2.70	2.66
泰州 Taizhou	0.30	0.14	47.45	22.36	0.63	0.63
宿迁 Suqian	3.12	1.50	57.27	24.62	5.45	6.09

2.3.4 肉鸭及畜禽粪污水体污染负荷

肉鸭作为水禽，虽然普遍进行旱养，但仍需要大量饮用水和清洁用水，因此肉鸭养殖主要汇集于水源丰富的地区，若粪污防控不到位，则极易造成水体污染，需要对肉鸭养殖水体污染负荷予以评估^[35]。与耕地污染不同，畜禽粪便对水体的污染不仅受污染物总量的影响，还与当地水资源量有关^[36]。表5展示了江苏省总畜禽粪便等标污染指数及各地市鸭粪污染物等标排放量与等标污染指数贡献率。江苏省畜禽粪污对水体的等标污染指数介于0.40~19.37，根据宋大平等^[13]提出的预警分级标准，预警等级为Ⅳ级的有南

表5 2021年江苏省各市鸭粪的水体等标污染物排放量与畜禽粪便等标污染指数

Table 5 Equivalent standards of pollutants from duck breeding and equivalent pollution index of livestock and poultry manure pollution in Jiangsu in 2021

地区 Region	鸭粪 COD 等标排放量 Equivalent standard COD discharge from duck manure/(10 ⁸ m ³)	鸭粪 TN 等标排放量 Equivalent standard TN discharge from duck manure/ (10 ⁸ m ³)	鸭粪 TP 等标排放量 Equivalent standard TP discharge from duck manure/ (10 ⁸ m ³)	鸭粪对水体等标 污染指数的贡献 Contribution of duck manure to equivalent standard pollution index/%	畜禽粪污水体等标 污染指数 Equivalent standard pollution index to water from livestock manure	畜禽粪污水体污染 预警等级 Water contamination risk level from livestock manure
南京 Nanjing	1.27	2.24	5.38	6.06	1.64	I
无锡 Wuxi	0.07	0.13	0.31	1.16	0.53	I
徐州 Xuzhou	47.16	83.34	199.90	23.19	8.13	II
常州 Changzhou	0.15	0.26	0.62	1.14	0.99	I
苏州 Suzhou	0.06	0.11	0.26	0.84	0.40	I
南通 Nantong	3.70	6.53	15.67	1.39	19.37	IV
连云港 Lianyungang	1.31	2.32	5.57	1.75	3.86	I
淮安 Huai'an	2.63	4.64	11.14	3.02	4.61	I
盐城 Yancheng	1.88	3.32	7.96	0.40	16.64	IV
扬州 Yangzhou	0.34	0.60	1.44	0.61	4.90	I
镇江 Zhenjiang	0.85	1.50	3.60	2.89	3.72	I
泰州 Taizhou	0.75	1.33	3.19	0.67	11.68	III
宿迁 Suqian	7.20	12.72	30.51	6.06	5.85	II

通、盐城,其次为泰州,等标污染指数预警等级为Ⅲ级,徐州、宿迁预警级别为Ⅱ级,其余地市的等标污染指数均低于6。

江苏省鸭粪水体 COD、TN、TP 排放量分别介于 0.07 亿~47.16 亿、0.13 亿~83.34 亿、0.26 亿~199.90 亿 m³。徐州市鸭粪水体污染物排放量最高,COD、TN、TP 排放量分别为 47.16 亿、83.34 亿、199.90 亿 m³,占全省鸭粪污染物等标排放量的 70% 以上,其次为宿迁市,占全省 10% 以上的排放量。徐州、宿迁鸭粪对水体等标污染指数的贡献率位居全省第一、二位;徐州、宿迁应加强养鸭企业特别是配备嬉水池的养殖场的粪污管理,提高养殖场畜禽粪污资源化处理能力,加强粪便、污水贮存、处理、利用设施建设。与耕地污染负荷结果相一致,南通、盐城等地有必要进一步调整养殖产业布局,适当减少畜禽(含肉鸭)的养殖量,防止局部养殖水体污染风险的出现。

3 结论

(1)肉鸭不同生长生理阶段氮磷的摄入和排泄量差异显著,本试验条件下,网床模式下粪便全生育期平均鲜粪产生量、COD、TN、TP 日产污系数分别为 250.8、16.75、1.48、0.71 g·只⁻¹·d⁻¹,与原国家环保总局给出的畜禽养殖排污系数较为接近,低于立体笼养肉

鸭产污系数以及第二次污染普查《农业源产排污系数手册》中肉鸡产污系数。

(2)2021 年,江苏省畜禽粪便耕地负荷量介于 1.60~13.69 t·hm⁻²,畜禽粪便污染风险指数介于 0.05~0.46,整体对农田环境影响较小。全省平均单位耕地面积畜禽粪便 TN、TP 负荷量分别为 44.0 kg·hm⁻²和 19.4 kg·hm⁻²,均未超过欧盟粪肥限量标准。肉鸭最大产区徐州鸭粪对耕地氮、磷负荷的贡献率分别为 23.31%、28.53%。南通、盐城单位耕地磷污染负荷高于欧盟标准,在产业发展规划时应重点考虑畜种配置与环境承载力,适当减小肉鸭养殖规模。

(3)2021 年江苏省畜禽粪污水体等标污染指数介于 0.40~19.37,南通、盐城水体等标污染指数最高,预警等级为Ⅳ级。徐州、宿迁预警级别为Ⅱ级,但鸭粪对水体等标污染指数的贡献率分别居全省第一、二位,徐州、宿迁应加强养鸭企业特别是配备嬉水池的养殖场的粪污管理,提高养殖场畜禽粪污资源化处理能力,加强粪便和污水的贮存、处理及利用设施建设。

参考文献:

- [1] 侯水生,刘灵芝. 2021 年水禽产业现状、未来发展趋势与建议[J]. 中国畜牧杂志, 2022, 58(3): 227-238. HOU S S, LIU L Z. Current situation, future development trend and suggestions of waterfowl industry in 2021[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2022, 58(3): 227-

- 238.
- [2] 吴华山, 黄红英, 徐跃定. 江苏省规模水禽养殖粪污处理模式分析[J]. 中国家禽, 2019, 41(14): 76–80. WU H S, HUANG H Y, XU Y D. Analysis on the manure treatment mods for large-scale waterfowl breeding farms in Jiangsu[J]. *China Poultry*, 2019, 41(14): 76–80.
- [3] 王佳. 畜禽粪便理化性质分析及固液分离脱氮除磷工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020. WANG J. Analysis of physical and chemical properties of animal excrement and study on the technology of nitrogen and phosphorous removal by solid-liquid separation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [4] 董红敏, 朱志平, 黄宏坤, 等. 畜禽养殖业产污系数和排污系数计算方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 303–308. DONG H M, ZHU Z P, HUANG H K, et al. Pollutant generation coefficient and discharge coefficient in animal production[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 303–308.
- [5] 朱建春, 张增强, 樊志民, 等. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 435–445. ZHU J C, ZHANG Z Q, FAN Z M, et al. Biogas potential, cropland load and total amount control of animal manure in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 435–445.
- [6] 杨飞, 杨世琦, 诸云强, 等. 中国近30年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 1–11. YANG F, YANG S Q, ZHU Y Q, et al. Analysis on livestock and poultry production and nitrogen pollution load of cultivated land during last 30 years in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(5): 1–11.
- [7] 单英杰, 章明奎. 不同来源畜禽粪的养分和污染物[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 80–86. SHAN Y J, ZHANG M K. Contents of nutrient elements and pollutants in different sources of animal manures[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(1): 80–86.
- [8] 刘嘉莉. 白洋淀鸭养殖粪便排放规律及源头减排效果研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011. LIU J L. Study on the law of manure emissions and the effect of reduction by duck farm controlled into the Baiyangdian from the source[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2011.
- [9] 晏婷, 朱志平, 高理福, 等. 肉鸭粪便排放特征的季节性变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 115–123. YAN T, ZHU Z P, GAO L F, et al. Seasonal variation of meat duck manure production characteristics[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(1): 115–123.
- [10] 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 生态环境部南京环境科学研究所. 第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册[EB/OL]. (2010-02-06)[2022-11-12] https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201002/t20100210_185698.htm. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Nanjing Institute of Environmental Sciences, MEE. Handbook of the first national pollution source survey on the source production and emission coefficient of livestock and poultry breeding industry[EB/OL]. (2010-02-06)[2022-11-12] https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201002/t20100210_185698.htm.
- [11] 生态环境部. 关于发布《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》的公告, 2021年第24号. 索引号 000014672/2021-00486.[EB/OL]. (2021-06-11)[2022-11-12]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk01/202106/t20210618_839512.html. Ministry of Ecology and Environment. Announcement on the release of the Handbook of accounting methods and coefficients for pollutant discharge from statistical investigation of emission sources, 24#, 2021. Index No. 000014672/2021-00486[EB/OL]. (2021-06-11)[2022-11-12]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk01/202106/t20210618_839512.html.
- [12] LIU R, XU F, LIU Y, et al. Spatial-temporal characteristics of live-stock and their effects on pollution in China based on geographic information system[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 24(14): 14183–14195.
- [13] 宋大平, 庄大方, 陈巍. 安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 110–116. SONG D P, ZHUANG D F, CHEN W. Risk assessment of the farmland and water contamination with the livestock manure in Anhui Province[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(1): 110–116.
- [14] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 614–617. WANG F H, MA W Q, DOU Z X, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 614–617.
- [15] 沈根祥, 钱晓雍, 梁丹涛, 等. 基于氮磷养分管理的畜禽场粪便匹配农田面积[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增刊2): 268–271. SHEN G X, QIAN X Y, LIANG D T, et al. Research on suitable area for cropland application of animal manure based on nutrients management of nitrogen and phosphorus[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(Suppl 2): 268–271.
- [16] 武兰芳, 欧阳竹, 谢小立. 不同种养结合区农田系统氮磷平衡分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(6): 943–954. WU L F, OUYANG Z, XIE X L. Nitrogen and phosphorus balance of cropland at regional scale for integrated crop livestock farming system in two different areas[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(6): 943–954.
- [17] 武淑霞, 刘宏斌, 黄宏坤, 等. 我国畜禽养殖粪污产生量及其资源化分析[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 103–111. WU S X, LIU H B, HUANG H K, et al. Analysis on the amount and utilization of manure in livestock and poultry breeding in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(5): 103–111.
- [18] 王冲, 肖大勇, 王洪磊, 等. 立体网养模式下樱桃谷肉鸭养殖周期内体况、采食量与饮水量的变化[J]. 中国家禽, 2020, 42(8): 10–15. WANG C, XIAO D Y, WANG H L, et al. Changes of body condition, feed and water intake of Cherry Valley meat duck during the whole breeding cycle under three-dimensional net culture mode[J]. *China Poultry*, 2020, 42(8): 10–15.
- [19] 丁君辉, 邱俊, 李翔宏, 等. 不同饲养方式对肉鸭粪污化学成分的影响[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2013, 2: 14–16. DING J H, QIU J, LI X H, et al. Effects of different feeding methods on chemical composition of duck feces[J]. *Jiangxi Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2013, 2: 14–16.
- [20] 付敏, 蒋小松, 何志平, 等. 生猪养殖全生产周期氮排泄参数及全国生猪粪尿氮排泄研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28

- (11):1799-1810. FU M, JIANG X S, HE Z P, et al. Excretion coefficient based on the whole process of pig production and manure N excretion in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(11):1799-1810.
- [21] 包维卿, 刘继军, 安捷, 等. 中国畜禽粪便资源量评估的排泄系数取值[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(5):1-14. BAO W Q, LIU J J, AN J, et al. Value-taking of livestock and poultry excreta factor in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(5):1-14.
- [22] 国家环保总局. “关于减免家禽业排污费等有关问题的通知”环发[2004] 43 号, 索引号 000014672/2004-00103.[EB/OL]. (2004-03-15)[2022-11-12] https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172271.htm. Ministry of Ecology and Environment. Circular of the People's Republic of China on the reduction and exemption of pollutant discharge fees in poultry industry, 43#, 2004. Index No.000014672/2004-00103.[EB/OL]. (2004-03-15)[2022-11-12] https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172271.htm.
- [23] 陈娴. 肉鸭常用植物性饲料原料中磷利用率的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010. CHEN X. Evaluating availability of phosphorous in feedstuffs of plant origin for Pekin ducks[D]. *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, 2010.
- [24] BAI M, FLESH T, TROUVE R, et al. Gas emissions during cattle manure composting and stockpiling[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2020, 49:228-235.
- [25] 徐鹏翔, 沈玉君, 丁京涛, 等. 规模化养猪场粪污全量收集及贮存工艺设计[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9):255-262. XU P X, SHEN Y J, DING J T, et al. Slurry manure collection and design of storage system on scaled pig farms[J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(9):255-262.
- [26] 李丹阳, 孙少泽, 马若男, 等. 山西省畜禽粪污年产生量估算及环境效应[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4):480-486. LI D Y, SUN S Z, MA R N, et al. Estimation of annual production amount of livestock and poultry manure and its environmental effect in Shanxi Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4):480-486.
- [27] 戴有礼, 梁忠, 王晓峰, 等. 江苏水禽产业发展优势因素分析[J]. 中国家禽, 2018, 40(12):69-72. DAI Y L, LIANG Z, WANG X F, et al. Analysis of the advantages and disadvantages of Jinagsu waterfowl industry development[J]. *China Poultry*, 2018, 40(12):69-72.
- [28] 屈浩然, 胡浩, 梁宇亮, 等. 生猪价格波动与应对策略研究:以江苏省为例[J]. 畜牧与兽医, 2022, 54(11):129-137. QU H R, HU H, LIANG Y L, et al. Study on fluctuation of pig price and countermeasures:taking Jiangsu Province as an example[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2022, 54(11):129-137.
- [29] 顾向阳, 赵万余, 杨兴明, 等. 江苏蛋鸡养殖废弃物资源化利用存在的问题及建议[J]. 中国畜牧业, 2021(4):25-28. GU X Y, ZHAO W Y, YANG X M, et al. Problems and suggestions on the resource utilization of waste from laying hens in Jiangsu Province[J]. *China Animal Industry*, 2021(4):25-28.
- [30] 张应鹏, 叶小梅, 杜静, 等. 江苏省规模奶牛场粪污处理利用现状调研分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(4):466-471. ZHANG Y P, YE X M, DU J, et al. Research analysis on current situation of manure treatment and utilization of large scale dairy farms in Jiangsu Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(4):466-471.
- [31] 熊蓓, 王瑞梅. 禁养区政策下的畜禽养殖结构调整及环境效应[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(11):291-304. XIONG B, WANG R M. Structure adjustment and environmental effect of livestock and poultry breeding under policy of prohibiting livestock and poultry production[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(11):291-304.
- [32] 张藤丽. 我国畜禽粪便负荷预警及空间布局适宜性分析[D]. 长春: 吉林农业大学, 2021. ZHANG T L. Early warning of livestock manure load and suitability analysis of spatial layout in China[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2021.
- [33] HENKENS P L C M, VAN KEULEN H. Mineral policy in the Netherlands and nitrate policy within the European Community[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 2001, 49(2/3):117-134.
- [34] OENEMA O, VAN LIERE E, PLETTE S, et al. Environmental effects of manure policy options in the Netherlands[J]. *Water Science Technology*, 2004, 49(3):101-108.
- [35] 董金朋, 刘灵芝. 水禽养殖业地理集聚的影响因素及空间效应分析[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(2):89-98. DONG J P, LIU L Z. Analysis of influencing factors and spatial effects of geographical agglomeration of waterfowl industry[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(2):89-98.
- [36] 于娜, 王晓茹, 李婷婷, 等. 山东省畜禽粪便的环境污染现状及风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5):820-828. YU N, WANG X R, LI T T, et al. Risk assessment of farmland and water contamination with livestock manure in Shandong Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5):820-828.