



安徽省畜禽养殖粪尿及养分含量时空分布特征

张靖雨, 汪邦稳, 袁先江, 龙昶宇

引用本文:

张靖雨, 汪邦稳, 袁先江, 等. 安徽省畜禽养殖粪尿及养分含量时空分布特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(2): 295-304.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0374>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

惠州市畜禽养殖污染耕地承载负荷估算及风险评价

宋江燕, 吴根义, 苏文幸, 余磊, 马晓蕊, 柳王荣, 袁俊杰

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 191-197 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0312>

山西省畜禽粪污年产生量估算及环境效应

李丹阳, 孙少泽, 马若男, 李国学, 李恕艳

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 480-486 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0193>

山东省农业源氨排放清单研究

杨新明, 庄涛, 周伟, 韩磊

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 568-574 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0111>

苏州市农业面源污染源强解析与评价

姜滢, 王子博, 尤悦文, 徐培杰, 陈重军

农业资源与环境学报. 2015(4): 363-369 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0012>

山西省种养废弃物构成及资源化利用潜力研究

杜艳玲, 周怀平, 程曼, 解文艳, 杨振兴, 郭晋, 吕倩倩, 王志伟

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 329-336 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0161>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张靖雨, 汪邦稳, 袁先江, 等. 安徽省畜禽养殖粪尿及养分含量时空分布特征[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 295-304.
ZHANG Jing-yu, WANG Bang-wen, YUAN Xian-Jiang, et al. Spatial and temporal distribution features of livestock and poultry manure and nutrient content in Anhui Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(2): 295-304.



开放科学 OSID

安徽省畜禽养殖粪尿及养分含量时空分布特征

张靖雨^{1,2}, 汪邦稳^{1,2*}, 袁先江^{1,2}, 龙昶宇^{1,2}

(1. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 安徽 蚌埠 230022; 2. 水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠 230022)

摘要:为探讨畜禽养殖业不断发展带来的粪便、尿液及养分排放问题,基于安徽省2009—2018年畜禽养殖数据,采用排泄系数法估算畜禽粪尿排放量及其主要污染物含量的变化,分析了安徽省不同种类畜禽养殖粪尿养分时空格局及演化特征。结果表明,安徽省粪尿排放量由2009年的5 597.1万t上升至2015年的6 337.5万t,后下降至2018年的4 511.0万t。家禽粪便、猪粪中TN、TP、COD_{Cr}、NH₃-N含量占全省比例较高,而牛尿中污染物含量最低,2018年猪粪中COD_{Cr}、NH₃-N含量占比较2011年有所升高。全省畜禽养殖污染物排放量在空间分布上总体呈由北向南递减的规律,阜阳市粪尿排放量全省最高,2011年达923.5万t。皖北地区猪粪中的TP、NH₃-N及COD_{Cr}含量较高,皖南地区各类污染物中家禽粪便占比较大,此外牛尿污染物含量显著低于其他粪尿。随着省内畜禽污染防治力度不断加大,2018年全省粪污排放量显著下降,在推进产业结构调整时应侧重生猪和家禽的粪污控制工作。

关键词: 畜禽粪污; 氮; 磷; 排放量; 时空分布

中图分类号: S19; X713

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2021)02-0295-10

doi: 10.13254/j.jare.2020.0374

Spatial and temporal distribution features of livestock and poultry manure and nutrient content in Anhui Province

ZHANG Jing-yu^{1,2}, WANG Bang-wen^{1,2*}, YUAN Xian-Jiang^{1,2}, LONG Chang-yu^{1,2}

(1. Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Bengbu 230022, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources, Bengbu 230022, China)

Abstract: This study was performed to explore the emission problems of livestock manure and nutrient caused by continuous development of livestock and poultry production. Based on the 2009—2018 statistics of livestock breeding in Anhui Province, an excretion coefficient was used to estimate the quantity of livestock manure and content of the main pollutants. In addition, time and spatial pattern and evolution characteristics of different types of manure were explored in the province. The results showed that the quantity of livestock manure increased from 55.97 million tons in 2009 to 63.38 million tons in 2015 and then decreased to 45.11 million tons in 2018. The contents of TN, TP, COD_{Cr}, and NH₃-N in poultry and pig manure accounted for a high proportion in the whole province, while the content of pollutants in cattle urine accounted for the lowest. After 2018, the contents of COD_{Cr} and NH₃-N in pig manure increased compared with those in 2011. Spatial distribution of livestock and poultry pollutant emissions in different cities showed a decreasing trend from north to south. The manure and urine discharge in Fuyang City accounted for the highest proportion in the whole area, reaching 9.235 million tons in 2011. The contents of TP, COD_{Cr}, and NH₃-N in pig manure in northern Anhui Province were higher than those in other areas, and the content of

收稿日期: 2020-07-15 录用日期: 2020-09-14

作者简介: 张靖雨(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为农田水利、水污染处理、水生态修复。E-mail: qingrelation@163.com

*通信作者: 汪邦稳 E-mail: bangwenbest@126.com

基金项目: 安徽省重点研发计划项目(1804b06020346); 安徽省水利科技项目(slkj2019-06); 安徽省·水利部淮委水科院科技创新基金项目(KY201908)

Project supported: The Key Research and Development Foundation of Anhui Province(1804b06020346); The Water Science and Technology Foundation of Anhui Province(slkj2019-06); The Scientific and Technical Innovation Project of Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research (KY201908)

various pollutants in poultry manure accounted for the largest proportion in southern Anhui Province. In addition, the pollutants content in cattle urine was significantly lower than those in other manure. Owing to the increasing efforts to prevent and control livestock and poultry pollution in the province, the discharge of fecal pollution in the whole province decreased significantly in 2018. Therefore, the control of pig and poultry manure should be paid additional emphasis, especially when promoting the adjustment of industrial structure.

Keywords: livestock and poultry manure; nitrogen; phosphorus; emissions; spatio-temporal distribution

随着规模化养殖的发展,畜禽养殖业成为农村经济的主导产业之一,区域生产格局已基本形成。畜禽粪便能够补充土壤中有有机物、水分和营养物质,提高土壤微生物活性^[1],因此,畜禽粪尿有效循环利用是农业可持续发展的重要组成。但畜禽粪尿排放量不断上升,一旦超出消纳容量便会造成水体和土壤的污染,进而严重破坏生态环境^[2]。《第二次全国污染源普查公报》显示,畜禽养殖业化学需氧量(COD)排放量达到1 000.5万t、总氮(TN)59.6万t、总磷(TP)12.0万t,分别占全国主要污染物排放总量的46.7%、19.6%和38.0%。安徽省是农业大省,拥有近万户规模化养殖场(小区)。因此,系统分析安徽省畜禽养殖污染变化时空分布规律,对畜禽养殖业及农业可持续发展意义重大。

国内外关于污染负荷估算、时空分布及预测等方面的研究已有诸多报道。畜禽污染负荷估算通常采用排放系数法^[3],董红敏等^[4]首次提出了畜禽养殖业产污系数定义和计算方法。刘亚琼等^[5]基于输出系数模型估算了北京市的畜禽养殖、土地利用等多种面源负荷。武淑霞^[6]采用实地调研与大时空尺度信息空间分析的方法,研究了我国农村畜禽养殖业发展及其氮磷排放特征时空演变规律。Keener等^[7]基于氮平衡原理研究畜禽粪便中氨氮的排放。Coelho等^[8]则以磷负荷为对象研究了畜禽粪便对环境的影响程度。阎波杰等^[9]利用GIS技术对安徽省耕地畜禽养殖废弃物氮养分污染潜势进行了评价分析,并利用德尔菲法和层次分析法确定了影响因素及权重。Mishima等^[10]估算了日本用于农田肥料的畜禽粪便含量。

目前针对安徽省内畜禽粪尿资源在区域尺度及历史时间上变化规律缺乏系统研究。宋大平等^[11]在畜禽粪便量估算基础上计算安徽省各地畜禽粪便耕地及水体污染负荷指数,并对各地区污染现状进行了风险评价。王雪蕾等^[12]基于遥感分布式面源污染模型(DPeRS)估算了巢湖流域各区域面源污染入河负荷量,并通过特征解析得出COD_{Cr}污染负荷与畜禽养殖密度之间具有显著的空间关联性。因此,有必要摸清安徽省各市不同时期畜禽粪尿及其养分资源量的

分布特征和变化规律。本研究利用统计年鉴数据分析安徽省2009—2018年的畜禽养殖情况及时空分布特征,采用生态环境部推荐的排放系数估算粪尿排放量,同时对安徽省畜禽养殖污染时空演变规律进行分析,以期对安徽省畜禽粪尿养分资源利用和畜禽养殖业科学发展提供数据参考。

1 数据来源与方法

1.1 数据获取及参数确定

数据来自2010—2019年《安徽统计年鉴》公布的安徽省及各地市畜牧业统计资料,具体包括全省及各地市猪、牛、家禽每年末的存栏数和出栏数,所用数据截止时间为2018年底。畜禽养殖粪便排泄系数指单个动物每日排出的粪便量,受品种、个体质量、饲养方式、饲料组成等因素的影响,不同种类之间差异较大。排泄系数、饲养周期等数据主要参考《畜禽养殖业污染治理工程技术规范》(HJ 497—2009),并结合安徽省实际养殖情况,详见表1。

表1 安徽省不同畜禽养殖粪污排泄系数
Table 1 The excretion coefficient of livestock manure in Anhui Province

项目 Items	牛 Cattle	猪 Pigs	家禽 Poultry
粪日排放/(kg·只 ⁻¹ ·d ⁻¹)	20.0	2.0	0.1
粪年排放/(kg·只 ⁻¹ ·a ⁻¹)	7 300.0	398.0	25.2
尿日排放/(kg·只 ⁻¹ ·d ⁻¹)	10.0	3.3	—
尿年排放/(kg·只 ⁻¹ ·a ⁻¹)	3 650.0	656.7	—
饲养周期/d	365.0	199.0	210.0

通过参考生态环境部数据^[13],并查阅了近年来国内外多位学者的研究成果^[14-17],结合安徽省畜牧业现状,最终整理得出畜禽粪污中主要污染物平均含量,详见表2。

1.2 计算方法

各类畜禽粪尿的年产生量由畜禽饲养量(年末存栏数、年内出栏数)、饲养周期、排泄系数、平均含量等参数计算得到^[18-20]。

(1)年畜禽粪便(尿)排放量(万t)=畜禽出栏量或

表2 畜禽粪尿中主要污染物平均含量(kg·t⁻¹)Table 2 Average content of main pollutants in manure and urine of livestock and poultry(kg·t⁻¹)

种类 Species	COD _{Cr}	NH ₃ -N	TN	TP
猪粪	52.00	3.08	5.88	3.41
猪尿	9.00	1.43	3.30	0.52
牛粪	31.00	1.71	4.37	1.18
牛尿	6.00	3.47	8.00	0.40
家禽粪	45.70	2.80	10.40	5.80

年末存栏量(只)×日排泄系数(kg·只⁻¹·d⁻¹)×饲养周期(d);本研究主要根据养殖用途来选择出栏量或存栏量,其中猪取年末出栏量,牛取年末存栏量,家禽取年末存栏只数计算。

(2)年粪便(尿)污染物含量(kg)=年畜禽粪便(尿)排放量(万t)×不同污染物含量系数

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 进行数据分析和绘图,采用 SPSS 22.0 进行数据统计。采用方差分析法检验畜禽粪污排放量在不同类别、区域间的差异,并利用最小显著性差异法(LSD法)分析组间差异。使用 ArcGIS 10.2 绘制省内不同年份主要畜禽粪尿及养分含量的空间分布图。

2 结果与分析

2.1 畜禽养殖粪尿排放量时间变化特征

安徽省不同畜禽 2009—2018 年粪便、尿液排放量变化情况如图 1 所示。

2009—2018 年粪尿排放总量达 59 036.6 万 t,整体趋势平稳,畜禽粪便、尿液排放总量在 2015 年分

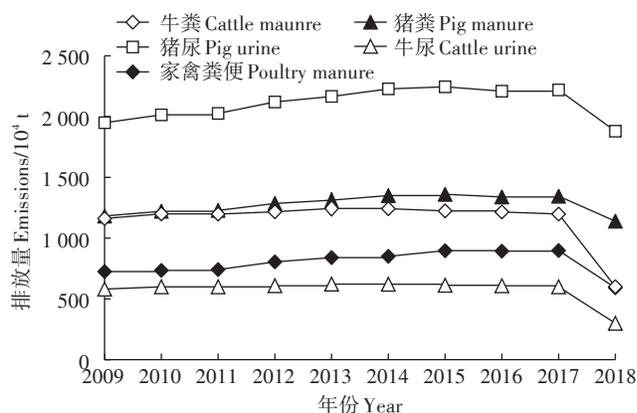


图1 安徽省 2009—2018 年畜禽粪尿排放量变化

Figure 1 The emissions changes of livestock and poultry in Anhui Province from 2009 to 2018

别达 3 480.8 万、2 856.7 万 t,较 2009 年增长 13.5%、12.9%,2017 年后逐渐减少。从图 1 可以看到,不同粪尿类别其排放量差异较大,猪尿排放量最大,平均年排放量 2 105.5 万 t,占比 35.8%;牛养殖量平均 157.5 万头,按猪当量(100 头猪相当于 20 头牛)计为 787.5 万头,而猪养殖量平均为 3 206.2 万头,牛养殖量仅占猪养殖量的 24.6%,但牛粪与猪粪的排放量却相差不多;家禽类养殖量虽高于猪、牛,但粪便平均排放量为猪粪的 62.3%、牛粪的 70.8%;2018 年污染防治、环境整治、禁养区划分等管控措施的落实,致使粪尿排放量较 2009 年减少 13.1%,其中牛粪、尿降幅最大,均为 49.9%,而猪粪、尿降幅最小,均为 15.3%。因此应侧重加强对生猪养殖粪污控制的防治措施。

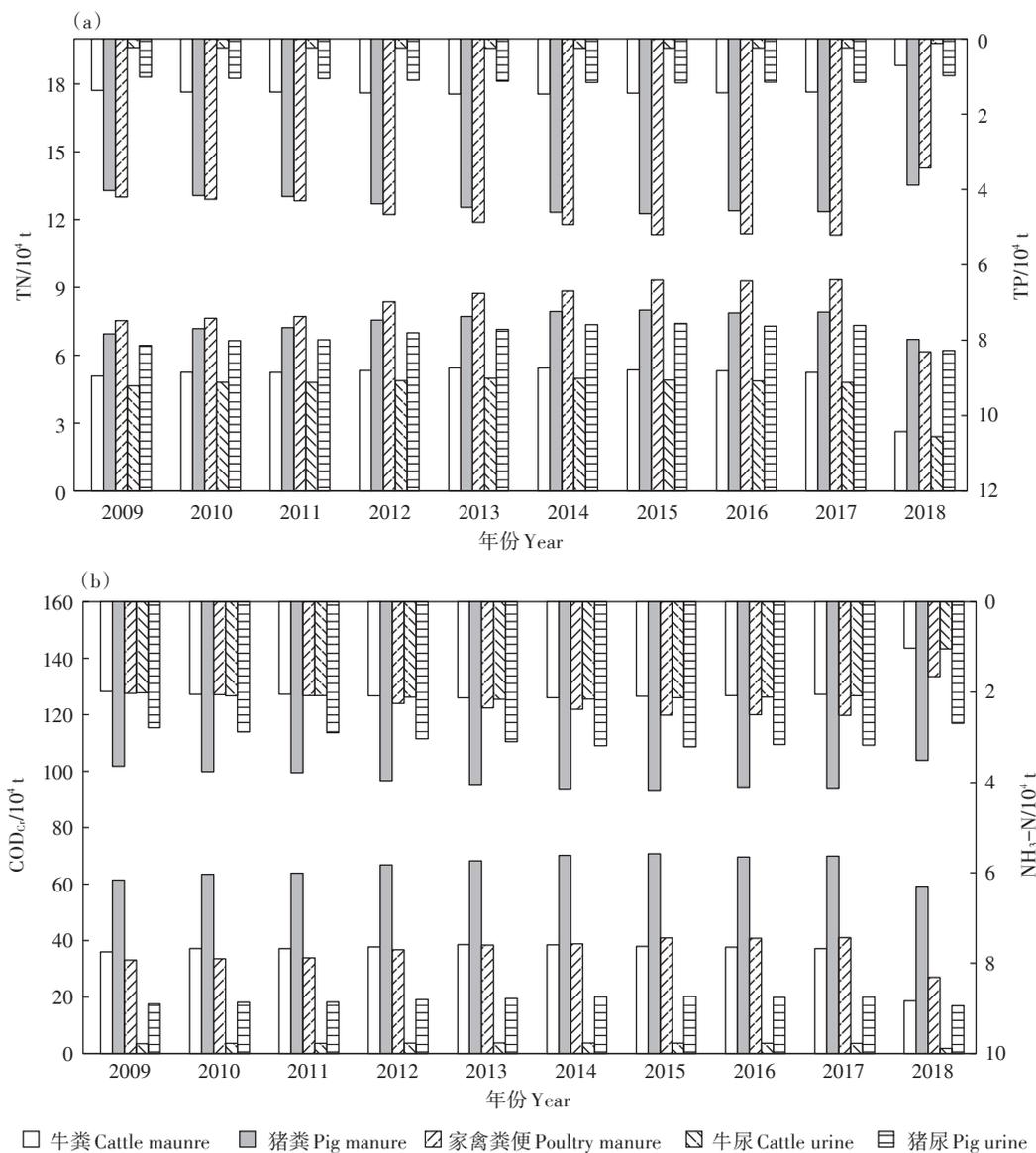
2.2 畜禽养殖粪尿养分含量时间变化特征

分析畜禽粪尿的污染排放特征,除了考虑粪尿排放量外,还应重点关注其粪尿中主要污染物含量的变化规律。安徽省 2009—2018 年畜禽养殖粪尿污染物含量年际变化情况见图 2。

由图 2 可知,全省畜禽粪尿中 COD_{Cr} 排放量最高,年平均排放量 160.8 万 t,占污染物排放总量的 73.8%;TP 排放量最低,平均仅占总量的 5.4%。粪污含量变化趋势与粪尿排放量基本一致,2009—2017 年增长缓慢。2018 年末 TN、TP、COD_{Cr}、NH₃-N 含量较 2017 年分别减少 10.5 万、2.9 万、48.1 万 t 和 4.0 万 t,牛尿中各类污染物含量降幅平均达到 49.9%。

从不同类别粪尿养分含量变化来看,2009—2018 年 TN 含量在各类粪尿中占比较稳定,家禽粪便、猪粪和猪尿均超过 20%,牛粪、牛尿在 15% 左右。TP 含量在家禽粪便、猪粪的占比较高,而在牛尿中仅占 2%;2018 年猪粪占比高于家禽,达到 42.6%。猪粪中 COD_{Cr}、NH₃-N 含量较高,2015—2017 年平均含量分别占其总量的 40.7%、29.5%,2018 年占比分别上升至 48.0%、35.4%;牛尿中 COD_{Cr} 含量最低,平均仅为总量的 2.1%,但其 NH₃-N 含量与牛粪、家禽相近。

总的来说,全省畜禽粪尿各污染物含量在 2009—2017 年差别不大,2018 年下降显著,说明污染防治措施以及 2017 年后逐渐细化的畜禽废弃物综合利用措施对全省畜禽污染防治具有显著成效。各类粪尿中 TN、NH₃-N 含量较为均衡,氮素养分普遍存在于各类畜禽中;猪粪、家禽粪便的养分占比较大,因此应首要抓好家禽粪污、猪场废弃物的处理利用工作;各类粪尿中 TP 和 COD_{Cr} 含量差异显著,施用时应依据粪便种类合理确定用量,避免过量投入而造成养分失衡。



不同小写字母表示不同年份之间差异显著,不同大写字母表示不同养殖类别之间差异显著($P < 0.05$)
The different lowercase letters indicate significant differences among years and the different uppercase letters indicate significant differences among breeding species at $P < 0.05$ levels

图2 安徽省2009—2018年畜禽粪污排放量变化

Figure 2 The discharge of livestock and poultry manure pollutants in Anhui Province from 2009 to 2018

2.3 畜禽养殖粪尿养分含量空间变化特征

由于不同区域畜禽养殖密度及类型分布不同,其畜禽粪便的产生和粪便中养分的排放也存在较大差异。对比安徽省2011年和2018年畜禽粪尿及污染物排放的空间分布图(图3),分析不同粪污及养分的时空分布特征。

2011年全省畜禽粪尿排放总量为5792.2万t,总体呈自北向南递减的规律。皖北地区粪尿排放量普遍较高,其中阜阳市达923.5万t,淮北、淮南2市较低,与所在地区的人口规模、耕地面积较少有关;皖南

地区的芜湖、铜陵、池州、黄山4市共占全省总量的6.0%;蚌埠、滁州、合肥、安庆4市排放量相当,在450万~560万t之间。2018年,全省粪污排放得到有效控制,图3中颜色分布多以黄色、绿色为主,绿色区域占比明显增多;粪尿排放量总量为4511.0万t,较2011年下降19.4%,其中六安市降幅最高,达到43.2%,而阜阳、宿州、蚌埠、合肥4市排放量仍超过400万t,合计占全省总量的46.5%。

畜禽中各类污染物排放分布与畜禽粪尿一致,由北向南递减趋势明显。2011年全省畜禽粪尿中TN、

TP、NH₃-N及COD_{Cr}含量分别为33.1万、12.3万、12.9万t和156.7万t,污染物排放总量排名前三的地市分别为阜阳市、宿州市和六安市,主要集中在安徽省北部和西部,分别占全省总量的15.0%、12.2%和

11.6%。该区域内各类粪尿的TN含量较为接近,但猪粪中的TP、NH₃-N及COD_{Cr}含量占比较高,2011年分别占各自总量的33.7%、28.7%和41.3%,2018年上升至46.3%、41.9%和49.1%,说明虽然粪污排放总量

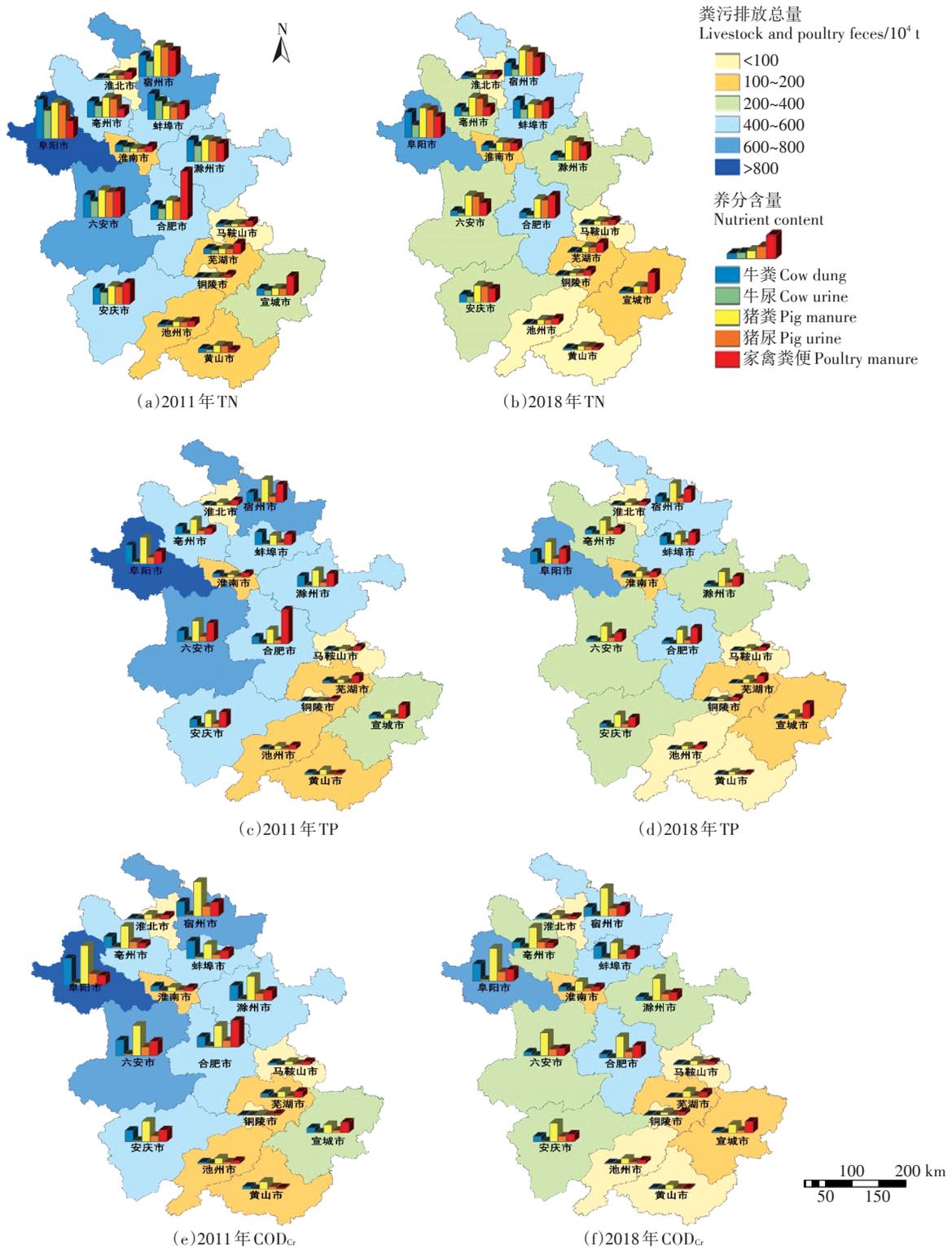
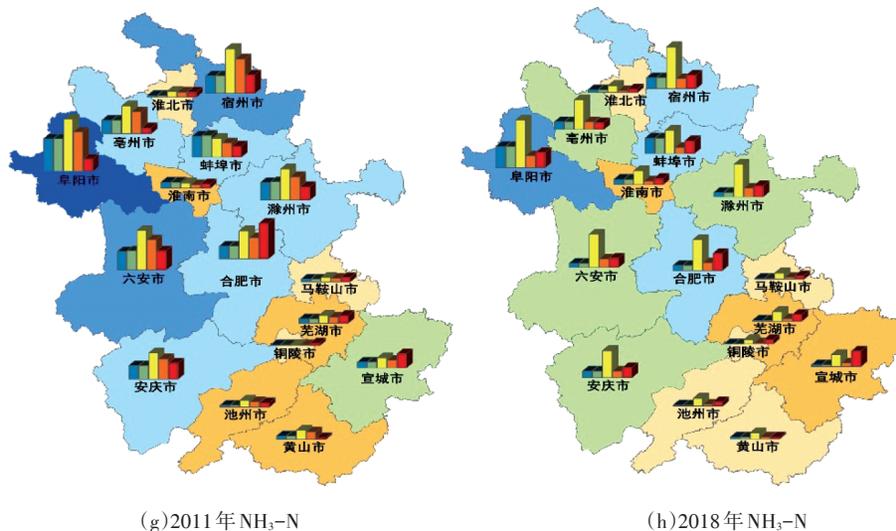


图3 安徽省各类畜禽粪尿污染物排放量时空分布

Figure 3 Spatial and temporal distribution of pollutants discharge from different livestock and poultry feces in Anhui Province



续图3 安徽省各类畜禽粪尿污染物排放量时空分布

Continued figure 3 Spatial and temporal distribution of pollutants discharge from different livestock and poultry feces in Anhui Province

有所下降,但猪粪中污染物排放问题尚需采取针对性措施加以管控。合肥市及皖南各地市家禽粪便中的TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及 COD_{Cr} 含量占比较高,其中铜陵市最高,2011年分别达到57.0%、69.6%、45.3%和54.0%。

2018年全省TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及 COD_{Cr} 含量较2011年分别下降27.2%、21.4%、33.3%和21.1%,其中氮素含量降低最多的是六安市和阜阳市, COD_{Cr} 含量降低最多的是芜湖市和黄山市,而合肥市的家禽粪便中的污染物含量降低最多。铜陵、淮南等市的猪粪、猪尿及家禽粪便中TP含量反而有所升高,两市畜禽粪尿中2018年TP含量较2011年总计增加0.22万t。说明畜禽污染防治措施在安徽北部和西部对畜禽粪尿中氮素排放起到了较好的控制效果,在皖南地区对畜禽粪尿中 COD_{Cr} 总量的削减影响较大,但同时局部地区的磷素排放回升也应引起相关部门的重点关注。

对2011、2018年安徽省皖北、皖南地区畜禽粪尿污染物平均排放量做方差分析,检验典型区域间畜禽粪污排放量的差异性,结果见表3。

由表3可知,2011年皖北地区各类粪尿中TN含量整体较高,平均在0.5万t左右,且不同粪尿间差异不显著;除家禽粪便外,其他各类粪尿中TN含量均显著高于皖南地区;皖南山区TN含量整体偏低,仅家禽粪便显著高于牛尿。2018年皖北地区猪粪中TN含量显著高于猪尿、牛尿,皖南地区牛粪、牛尿中TN含量显著低于其他类粪尿,两个区域间各类粪尿TN含量差异不大。2011年皖北地区畜禽粪便中TP含量显著高于尿液,且显著高于皖南地区的牛粪、牛尿和猪

尿中的TP含量;两个区域的牛尿中TP含量平均仅占当年总量的1.4%,显著低于其他类别粪污。2018年各类粪尿TP含量之间的差异特征较2011年变化不大。

2011年皖北地区各市猪粪中 COD_{Cr} 平均含量5.2万t,显著高于其他类别粪尿,此外猪粪、牛粪显著高于皖南地区各类别的 COD_{Cr} 含量,而皖南地区各类粪尿之间无显著差异。2018年皖北地区各市猪粪中 COD_{Cr} 平均含量仅降低0.3万t,仍显著高于其他粪尿。而2011年皖北地区猪粪中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量仅显著高于家禽粪便,但在2018年占比有所上升,猪粪中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量占全部粪尿的比例达到了17.6%,与其他类粪尿之间均存在显著差异($P<0.05$);除家禽粪便外,2011年皖北地区的牛粪、牛尿、猪粪及猪尿中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量均显著高于皖南地区,2018年两地区的猪尿中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量之间变化不显著。

综上所述,皖北地区猪粪、牛粪中污染物排放量显著高于皖南地区,其中猪粪中TN、 COD_{Cr} 含量较为突出,皖北地区猪尿和牛尿中TN、TP排放量也显著高于皖南地区,但 COD_{Cr} 排放量在两个区域间无显著差异。皖南地区家禽粪便中污染物排放量与皖北地区差异并不显著。因此,猪粪中氮素排放应作为首要控制因素加以重点监管,皖南地区应加强优化对粪污排放相对突出的家禽类养殖行业的规划布局。

3 讨论

自国务院发布《畜禽规模养殖污染防治条例》、安

表3 安徽省皖北、皖南地区各类畜禽粪尿污染物排放量(万t)

Table 3 Average emissions of pollutants from of livestock and poultry manure in the northern and southern of Anhui Province (10⁴ t)

污染物类别 Types	年份 Years	区域 Areas	牛粪 Cattle manure	牛尿 Cattle urine	猪粪 Pig manure	猪尿 Pig urine	家禽粪便 Poultry manure
TN	2011	皖北	0.597±0.440a	0.427±0.310ab	0.584±0.440a	0.541±0.410a	0.426±0.250ab
		皖南	0.115±0.080cd	0.082±0.050d	0.149±0.080bcd	0.138±0.070bcd	0.246±0.200abc
	2018	皖北	0.396±0.270abc	0.198±0.140cd	0.550±0.320a	0.509±0.300b	0.418±0.220ab
		皖南	0.038±0.020e	0.019±0.012e	0.150±0.060d	0.139±0.050d	0.261±0.210bcd
TP	2011	皖北	0.226±0.170ab	0.021±0.160d	0.339±0.260a	0.085±0.070bc	0.237±0.140a
		皖南	0.043±0.030cd	0.004±0.030e	0.087±0.050bc	0.022±0.010d	0.137±0.110ab
	2018	皖北	0.150±0.100bc	0.014±0.010d	0.319±0.190a	0.080±0.050c	0.233±0.120ab
		皖南	0.015±0.010d	0.001±0.000e	0.087±0.030c	0.022±0.010d	0.145±0.120bc
COD _{Cr}	2011	皖北	3.306±2.420b	0.320±0.230c	5.162±3.930a	1.474±1.120bc	1.870±1.870bc
		皖南	0.635±0.420c	0.061±0.040c	1.314±0.700c	0.375±0.200c	1.081±1.080c
	2018	皖北	2.190±1.510b	0.212±0.150cd	4.865±2.830a	1.389±0.810bc	1.837±0.970b
		皖南	0.213±0.130cd	0.021±0.010d	1.330±0.500bcd	0.380±0.140cd	1.146±0.940bcd
NH ₃ -N	2011	皖北	0.182±0.130abc	0.185±0.140abc	0.306±0.230a	0.234±0.180ab	0.115±0.070bcd
		皖南	0.035±0.020d	0.036±0.020d	0.078±0.420cd	0.060±0.030cd	0.066±0.050cd
	2018	皖北	0.121±0.080b	0.123±0.080b	0.319±0.190a	0.080±0.050bc	0.113±0.060b
		皖南	0.012±0.010c	0.012±0.010c	0.087±0.030bc	0.022±0.010c	0.070±0.060bc

注:不同小写字母表示同年份不同类别畜禽粪尿污染物之间差异显著($P<0.05$)。

Notes: The different lowercase letters indicate significant differences among different types of livestock and poultry manure pollutants at $P<0.05$ levels.

徽省发布《安徽省水污染防治工作方案》以来,畜禽粪污控制和利用工作已经取得了积极成效。2017年初实施禁养区划分、搬迁或关闭工作,2018年实施畜禽养殖废弃物资源化利用三年行动计划,省内对畜禽养殖污染防治的重视程度逐步提高,相关管控力度也在不断加大,而安徽省内畜禽粪尿以及养分含量一直较稳定,虽在2017年前持续增高,但增长趋势持续放缓,2018年粪尿及养分含量均有显著降低,其时间变化规律也与政策措施重视程度的趋势吻合,一定程度说明目前的畜禽污染防治措施成效显著。

安徽省不同粪尿排放量存在较大差异,由大到小依次为猪尿>猪粪>牛粪>家禽粪便>牛尿,省内粪便排放的主要来源是生猪饲养。2018年牛粪尿及污染物排放量降幅最显著,而猪粪尿、家禽粪便的降幅不显著。一方面说明畜禽污染防治措施对牛粪、牛尿中养分负荷影响效果明显,另一方面也反映了家禽、生猪规模化集约化养殖程度更高,虽然粪污易于集中收集处理,但控污减排任务依然艰巨。因此,在推进产业结构调整时应侧重生猪和家禽养殖的粪污控制工作。此外,从不同粪尿污染物排放数据对比来看,各类粪尿中TN、NH₃-N含量较为均衡,氮素养分普遍存在于各类畜禽中;虽然家禽粪便排放量不高,但氮磷养分含量突出,原因在于家禽食道短、干湿混合,养分

停留时间短,尚未完全吸收利用就已排出体外^[21]。

各地区畜禽养殖数量和养殖结构不同,因而产生的粪肥资源分布亦呈现出明显的区域特点,畜禽养殖场空间集聚所引发的直接后果是局部地区畜禽养殖污染负荷的增加。安徽省粪尿和污染物排放总体呈南低北高的特点,其中铜陵最低、阜阳最高,主要与所在地区的发展规模、耕地面积有关。安徽省是我国生猪生产大省,《安徽省人民政府办公厅关于推进生猪生产稳定健康发展的意见》指出到2020年着力推进由生猪生产大省向生产强省的新跨越。重点推进阜阳、宿州、合肥、宣城等10个生猪优势区域发展,力争实现年生猪出栏总量占全省的80%以上。此外,阜阳、宿州等地毗邻淮河,据历年环境质量公报数据显示,涡河、奎河等主要支流污染严重,Ⅳ类及以下水质断面比例平均60%~70%,因此,更亟需加强对这些重点区域的布局与调整,推动肥料化、饲料化和能源化利用进程,重点防治污染物渗流进入河湖。皖南地区耕地面积少、地形复杂的区域(如黄山市等),可考虑利用蚯蚓等微生物法来处理畜禽粪便^[22],既能生产有机肥又能产生优质的动物蛋白。

各市不同畜禽粪尿资源结构所占比例差异较大,较早前的研究成果^[23-24]显示安徽省内各地畜禽粪尿氮磷负荷分布不均,含量较高的主要在东南部及西部

的山地丘陵区,而本研究中,畜禽养殖污染负荷主要集中在皖北地区,由北向南递减,分布较为规律,说明畜禽养殖规模化集中程度正在逐步提高。此外,同一年份畜禽粪尿养分资源量与其他研究^[25-26]有一定差异,其原因主要与估算方法、计算参数(如日排泄系数、饲养周期、平均养分含量)不同有关,并且统计数据与真实的畜禽粪尿数量之间有时也存在较大差异^[27-28],因此迫切需要提出一套科学统一的估算标准,以便在不同类别养殖情况和不同土壤类型等复杂场景下得出更精准的统计测算数据。另一方面,粪尿回用农田后养分随降雨冲刷、渗流等途径流失量的估算以及对未来粪污排放趋势的预测等,也需要深入探讨。产污系数法在全国或各省份大尺度上具有较高的预测精度,而数学模型法则针对畜禽养殖场小尺度范围预测结果更加准确^[29]。Wnetrzak等^[30]、Tamburini等^[31]利用近红外光谱分析模型分别对猪粪和家禽粪便中有机质、总氮等含量进行了预测。张怀志等^[32]基于农田养分平衡理论构建了区域农田畜禽承载力预测模型,并认为基于氮的预测值可作为赤峰市新增生猪养殖量和承载量的依据。

近十年来,安徽省重点推进畜牧产业结构调整,畜禽集约化和规模化养殖程度不断发展,畜禽粪尿的收集、转运、资源化利用水平不断提高,粪污治理设备配套率达72%,粪污综合利用率近60%,规模化养殖粪污治理取得了长足进展。但目前我国畜禽养殖废弃物资源化利用生态综合治理模式研究尚处于起步阶段,还田利用依然是处理粪便的主要出路之一。畜禽养殖业要走向可持续发展的道路,遵循农牧结合、种养平衡、生态循环的原则发展生态养殖是必然要求^[33]。安徽省作为我国农业大省,推广种养结合的生态生产养殖模式对我国畜禽养殖废弃物资源化利用具有十分关键的示范意义。

4 结论

(1)安徽省畜禽养殖粪尿排放形势较为严峻,2009—2018年排放总量达59 036.6万t。猪尿排放量最高,平均年排放量2 105.5万t,占比35.8%,牛尿排放量最低。2017年之前各类粪污排放量整体变化趋势较稳定,2018年牛粪、牛尿中TN、TP、NH₃-N及COD_{Cr}含量均显著降低。

(2)对比各类别粪尿养分含量发现,家禽粪便、猪粪中TN、NH₃-N含量较高,占全省比例均超过20%,牛粪、牛尿中占比均在15%左右,结构基本稳定;家

禽粪便、猪粪TP含量占比较高,牛尿中TP、COD_{Cr}含量显著低于其他类粪尿(猪尿除外);各类粪尿中TP和COD_{Cr}含量差异显著,因此应依据粪便种类合理确定施肥用量,避免不合理的投入而造成养分失衡。

(3)区域分布上,全省畜禽养殖污染物排放量总体呈自北向南递减的规律,皖北地区粪污排放量显著高于皖南地区,芜湖、铜陵、池州、黄山4市合计排放量仅占全省的6.0%。皖北地区猪粪中的TP、NH₃-N及COD_{Cr}含量占比较高;合肥及皖南各市家禽粪便中的污染物含量与皖北差异不显著。2018年,畜禽污染防治措施在安徽北部和西部对畜禽粪尿中氮素排放有较好的控制效果,在皖南地区对畜禽粪尿中COD_{Cr}总量的削减作用较大,各类别粪尿TP含量差异不显著。

参考文献:

- [1] Whitehead T R, Cotta M A. Stored swine manure and swine feces as reservoirs of antibiotic resistance genes[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2013, 56(4):264-267.
- [2] Li H, Huang G, Meng Q, et al. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China: A review[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2):1011.
- [3] Cheng H G, Ouyang W, Hao F H, et al. The non-point source pollution in livestock-breeding areas of the Heihe River basin in Yellow River [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2007, 21(3):213-221.
- [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 Hong-min, ZHU Zhi-ping, HUANG Hong-kun, et al. Pollutant generation coefficient and discharge coefficient in animal production[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1):303-308.
- [5] 刘亚琼, 杨玉林, 李法虎. 基于输出系数模型的北京地区农业面源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7):7-12. LIU Ya-qiong, YANG Yu-lin, LI Fa-hu. Estimation of pollution loads from agricultural nonpoint sources in Beijing region based on export coefficient modeling approach[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(7):7-12.
- [6] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2005. WU Shu-xia. The spatial and temporal change of nitrogen and phosphorus produced by livestock and poultry & their effects on agricultural non-point pollution in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005.
- [7] Keener H M, Zhao L. A modified mass balance method for predicting NH₃ emissions from manure N for livestock and storage facilities[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 99(1):81-87.
- [8] Coelho B B, Murray R, Lapen D, et al. Phosphorus and sediment loading to surface waters from liquid swine manure application under different drainage and tillage practices[J]. *Agricultural Water Management*,

- 2012, 104(2):51-61.
- [9] 阎波杰, 潘瑜春, 闫静杰. 安徽省县域耕地畜禽养殖废弃物养分负荷时空演变特征[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(3):466-472. YAN Bo-jie, PAN Yu-chun, YAN Jing-jie. Spatio-temporal evolution of livestock manure nutrient load in farmland on a county scale: A case study of Anhui Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(3):466-472.
- [10] Mishima S I, Kimura S D, Eguchi S, et al. Estimation of the amounts of livestock manure, rice straw, and rice straw compost applied to crops in Japan: A bottom-up analysis based on national survey data and comparison with the results from a top-down approach[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 58(1):83-90.
- [11] 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 Da-ping, ZHUANG Da-fang, CHEN Wei. Risk assessment of the farmland and water contamination with the livestock manure in Anhui Province[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(1):110-116.
- [12] 王雪蕾, 吴传庆, 冯爱萍, 等. 利用DPeRS模型估算巢湖流域氨氮和化学需氧量的面源污染负荷[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9):2883-2891. WANG Xue-lei, WU Chuan-qing, FENG Ai-ping, et al. Application of DPeRS model on estimation of non-point source pollution load of ammonia nitrogen and chemical oxygen demand in Chao Lake basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(9):2883-2891.
- [13] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002:14-103. Department of Natural and Ecological Protection, State Environmental Protection of the People's Republic of China. The pollution investigation and prevention countermeasures on national large-scale livestock and poultry breeding[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:14-103.
- [14] 李书田, 刘荣乐, 陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1):179-184. LI Shu-tian, LIU Rong-le, SHAN Hong. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):179-184.
- [15] 刘雪刚. 安徽省畜禽养殖污染状况调查与治理技术适用性分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015. LIU Xue-gang. A study of applicable technique of pollution situation investigation and improvement from livestock and poultry farming for Anhui Province[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [16] Choi H L, Sudiarto S I A, Renggaman A. Prediction of livestock manure and mixture higher heating value based on fundamental analysis[J]. *Fuel*, 2014, 116:772-780.
- [17] Cantrell K B, Hunt P G, Uchimiya M, et al. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar[J]. *Bioresour Technol*, 2012, 107:419-428.
- [18] 王晓燕, 张雅帆, 欧洋. 北京密云水库上游太师屯镇非点源污染损失估算[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4):37-41. WANG Xiao-yan, ZHANG Ya-fan, OU Yang. Economic loss caused by non-point source pollution: A case study of Taishitun Town, upper catchment of Miyun reservoir, Beijing[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(4):37-41.
- [19] Arthur R, Baidoo M F. Harnessing methane generated from livestock manure in Ghana, Nigeria, Mali and Burkina Faso[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2011, 35(11):4648-4656.
- [20] 刘晓永, 李书田. 中国畜禽粪尿养分资源及其还田的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4):1-14, 316. LIU Xiao-yong, LI Shu-tian. Temporal and spatial distribution of nutrient resource from livestock and poultry feces and its returning to cropland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(4):1-14, 316.
- [21] Anjum R, Grohmann E, Krakat N. Anaerobic digestion of nitrogen rich poultry manure: Impact of thermophilic biogas process on metal release and microbial resistances[J]. *Chemosphere*, 2017, 168:1637-1647.
- [22] 曾悦, 洪华生, 田燕, 等. 南方山地丘陵区规模畜禽养殖对水环境影响及评价[J]. 水资源保护, 2010, 26(5):45-49. ZENG Yue, HONG Hua-sheng, TIAN Yan, et al. Assessment of impact of intensive livestock cultivation on water environment in mountain and hilly areas of south China[J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(5):45-49.
- [23] 阎波杰, 潘瑜春, 闫静杰. 基于GIS的安徽省耕地畜禽养殖废弃物氮负荷估算及污染潜势研究[J]. 地球与环境, 2016, 44(5):566-571. YAN Bo-jie, PAN Yu-chun, YAN Jing-jie. A study on livestock manure nitrogen load and pollution potential of farmland in Anhui Province, China based on GIS[J]. *Earth and Environment*, 2016, 44(5):566-571.
- [24] 肖琴, 周振亚, 罗其友. 长江中下游地区畜禽承载力评估与预警分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(9):2050-2058. XIAO Qin, ZHOU Zhen-ya, LUO Qi-you. Bearing capacity assessment and forecasting analysis of livestock and poultry breeding in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(9):2050-2058.
- [25] 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 Fei, YANG Shi-qi, ZHU Yun-qiang, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5):1-11.
- [26] 阎波杰, 潘瑜春. 基于网格的中国耕地畜禽养殖废弃物氮负荷估算[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5):133-137. YAN Bo-jie, PAN Yu-chun. Estimation of nitrogen pollution load of farmland from livestock manure in China based on grid[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(5):133-137.
- [27] 张建杰, 郭彩霞, 覃伟, 等. 山西省畜禽业发展及粪尿养分时空变异[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1):207-214. ZHANG Jian-jie, GUO Cai-xia, QIN Wei, et al. Temporal and spatial variability of livestock and poultry productions and manure nutrients in Shanxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1):207-214.
- [28] 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 Jian-chun, ZHANG Zeng-qiang, FAN Zhi-min, 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.
- [29] 渠清博, 杨鹏, 翟中葳, 等. 规模化畜禽养殖粪便主要污染物产生量预测方法研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(5):397-406. QU Qing-bo, YANG Peng, ZHAI Zhong-wei, et al. Prediction methods of major pollutants production in manure from large-scale livestock and poultry farms: A review[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(5):397-406.
- [30] Wnetrzak R, Hayes D J M, Jensen L S, et al. Determination of the higher heating value of pig manure[J]. *Waste & Biomass Valorization*, 2015, 6(3):327-333.
- [31] Tamburini E, Castaldelli G, Ferrari G, et al. Onsite and online FT-NIR spectroscopy for the estimation of total nitrogen and moisture content in poultry manure[J]. *Environmental Technology*, 2015, 36(18):1-20.
- [32] 张怀志, 李全新, 岳现录, 等. 区域农田畜禽承载力预测模型构建与应用:以赤峰市为例[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(5):576-580. ZHANG Huai-zhi, LI Quan-xin, YUE Xian-lu, et al. Development and application of model for prediction of regional farmland livestock and poultry carrying capacity: A case study of Chifeng City[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(5):576-580.
- [33] Ryschawy J, Disenhaus C, Bertrand S, et al. Assessing multiple goods and services derived from livestock farming on a nation-wide gradient [J]. *Animal*, 2017, 11(10):1861-1872.