

安徽省畜禽养殖粪污土地承载力的时空分布特征

张靖雨^{1,2}, 汪邦稳^{1,2}, 夏小林^{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 合肥 230088; 2.水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: [目的] 探明畜禽粪便资源对农田土壤和环境造成的潜在污染风险, 为防治面源污染、畜禽粪污资源化利用提供科学依据。[方法] 以安徽省为研究区域, 依据 2009—2018 年畜禽养殖、作物产量等数据资料, 量化分析区域作物粪污养分需求量、畜禽粪污养分供应量, 并结合已有研究成果, 开展畜禽粪污土地承载力时空演化特征的分析研究。[结果] 安徽省粪、尿排放量由 2009 年的 6.19×10^7 t 上升至 2015 年的 7.09×10^7 t, 后下降至 2018 年的 5.00×10^7 t, 其中猪尿排放量最大, 牛尿排放量最小。全省畜禽粪污排放总量与氮磷养分供给量均呈现北高南低的特点, 不同畜禽粪尿在氮素的养分供给中所占比例均衡, 而在磷素中差异较大。全省农田畜禽污染风险主要集中在安徽中部和南部地区的合肥、黄山和宣城等地, 2018 年全省土地承载力指数有所下降, 农田对畜禽粪便仍具有一定的消纳空间。[结论] 安徽省农田畜禽养殖在局部地区存在着污染风险, 需加强重点地区的化肥施用规划和畜禽养殖结构调整, 推动农业可持续发展。

关键词: 畜禽粪污; 氮; 磷; 土地承载力; 时空分布

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)03-0357-08

中图分类号: X713

文献参数: 张靖雨, 汪邦稳, 夏小林, 等. 安徽省畜禽养殖粪污土地承载力的时空分布特征[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 357-364. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.046; Zhang Jingyu, Wang Bangwen, Xia Xiaolin, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of land carrying capacity of livestock and poultry manure in Anhui Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 357-364.

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Land Carrying Capacity of Livestock and Poultry Manure in Anhui Province

Zhang Jingyu^{1,2}, Wang Bangwen^{1,2}, Xia Xiaolin^{1,2}, Long Changyu^{1,2}

(1. *Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Bengbu, Anhui 230088, China;*

2. *Anhui Province Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources, Bengbu, Anhui 233000, China*)

Abstract: [Objective] The potential pollution risks from livestock and poultry manure on farmland soil and the environment were analyzed in order to provide a scientific basis for non-point source pollution control and resource utilization. [Methods] Livestock and poultry breeding data and crop yield from Anhui Province from 2009 to 2018 were quantitatively analyzed in conjunction with regional crop nutrient demand and nutrient supply from livestock and poultry manure. Combined with existing research results, the spatial and temporal evolution characteristics of the land carrying capacity of livestock and poultry were studied. [Results] The quantity of livestock manure increased from 6.19×10^7 tons in 2009 to 7.09×10^7 tons in 2015, and then decreased to 5.00×10^7 tons in 2018. Pig urine emissions were the largest and cattle urine emissions were the smallest. The discharge of livestock and poultry manure and the supply of nitrogen and phosphorus in the entire province were both higher in the north and lower in the south. The proportion of different livestock manure in the nitrogen supply was balanced, but there was a large difference in phosphorus. The risk of

收稿日期: 2021-02-24

修回日期: 2021-03-30

资助项目: 安徽省重点研发计划项目“农村规模化畜禽养殖水污染防治技术研究”(1804b06020346); 安徽省水利科技项目“乡村水生态综合治理关键技术研究”(slkj2021-02); 安徽省·水利部准委水科院科技创新资助项目(KY201908)

第一作者: 张靖雨(1988—), 男(汉族), 安徽省凤阳市人, 工程师, 硕士, 主要从事农田水利、水污染处理、水生态修复研究。Email: 148131175@qq.com.

通讯作者: 汪邦稳(1981—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 高级工程师, 博士, 主要从事水生态修复、土壤侵蚀与环境研究。Email: 357733852@qq.com.

livestock and poultry pollution over the entire province was mainly concentrated in Hefei, Huangshan, and Xuancheng cities located in the central and southern areas of Anhui Province. The land carrying capacity index of the entire province decreased in 2018, and there was still a certain accommodation space for livestock and poultry manure. [Conclusion] Due to pollution risks associated with livestock and poultry breeding in some areas in Anhui Province, it is necessary to strengthen fertilizer application planning and structure adjustment in key areas in order to promote sustainable agricultural development.

Keywords: livestock and poultry manure; nitrogen; phosphorus; land carrying capacity; spatiotemporal variability

随着农业产业结构的逐步调整,畜禽养殖业已成为农村经济的主导产业之一,规模化、集约化和产业化转变趋势愈加显著^[1-2]。畜禽粪污循环有效利用是农业可持续发展的重要组成部分,其粪便中含有丰富的有机物、水分和营养物质,能够为农作物生产提供大量的有机肥^[3]。但未经处理或处理不当的畜禽粪便在其收集、储存、运输、还田的过程中对环境产生较大污染,进而引起生态环境的严重破坏^[4-5]。据《第二次全国污染源普查公报》显示,畜禽养殖业总氮(TN)达 5.96×10^5 t,总磷(TP) 1.20×10^5 t,分别占全国主要污染物排放总量的 19.6% 和 37.9%。

安徽省农业生产在全国有着较高地位,拥有 44 个畜禽品种资源,2019 年肉蛋奶总产 6.03×10^6 t,较 2015 年增长 3.2%。常年农作物种植面积超 8.70×10^4 km²,其中粮食作物面积占 75% 以上,总产量 3.50×10^7 t,粮食作物主要有小麦、稻谷、玉米、大豆、薯类和其他旱粮作物,大宗经济作物主要有油菜、棉花、蔬菜等。全推行的“千区万场规模化推进工程”取得较好的成绩,但畜禽污染防治与周边省份相比仍有较大差距。

关于畜禽污染排放量估算、风险评价以及资源化利用等方面的问题已经引起了国内外学者的广泛关注。董红敏等^[6]首次提出了畜禽养殖业产污系数和定义、计算方法,刘亚琼等^[7]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。耿维等^[8]分析了 2010 年中国畜禽粪便的能源潜力。Keener 等^[9]基于氮平衡原理研究畜禽粪便中的氨氮的排放。Coelho 等^[10]则以磷负荷为对象研究了畜禽粪便对环境的影响程度。农田是畜禽粪便作为肥料还田处理的主要负载场所^[11-12],因此研究畜禽粪污的农田土地承载力问题对畜禽粪污还田具有重要的科学指导意义。畜禽粪污土地承载力是指在土地生态系统可持续运行的条件下,一定区域内耕地、林地和草地等所能承载的最大畜禽存栏量。李艳霞等^[13]基于 GIS 技术分析了东北农田对畜禽养殖粪便的适宜

性,Mishima 等^[14]估算了日本用于农田肥料的畜禽粪便含量。冯倩等^[15]估算了江西的畜禽排污量并进行了土地承载力分析。张建杰等^[16]从时空维度估算了山西耕地畜禽粪污养分资源承载量并评价了其环境风险。

目前安徽省关于畜禽粪污资源在区域尺度及历史时间上变化规律方面尚缺乏系统研究,而对区域畜禽粪污土地承载力的测算也多是采用单位面积耕地粪便最大承载量和氮磷养分施用限量的经验值或理论值。宋大平等^[17]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^[18]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总量,并通过特征解析得出 COD-Cr 与畜禽养殖密度之间有显著的空间关联性。阎波杰等^[19]利用 GIS 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。多数研究未考虑区域内农作物对粪肥的养分需求,难以充分反映畜禽粪污承载能力的空间差异,对基于种养结合的畜禽养殖区域布局优化的指导作用也就存在着一定的局限性。2018 年原农业部制定了《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》,为定量评估畜禽粪污土地承载力提供了计算标准。

本文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,采用土地承载力指数核算各地畜禽粪污养分供给量、养分需求量及土地承载能力,旨在为合理规划化肥施用、优化畜禽养殖结构、推动农业可持续发展提供科学的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 农作物养分需求量估算

$$\text{区域作物养分需求量} = \sum (\text{每种农作物年产量} \times \text{单位产量养分需求}) \quad (1)$$

$$\text{区域作物粪肥养分需求量} = \frac{\text{区域作物养分需求量} \times \text{施肥供给养分比例} \times \text{粪肥占施肥的比例}}{\text{粪肥当季利用率}} \quad (2)$$

其中,安徽省农作物种类、播种面积、产量等数据来源于 2010—2019 年《安徽省统计年鉴》^[20] 公布的安徽省及各地市农作物种植统计资料;每 100 kg 作物产量 N,P 养分的需求量参考《土地承载力测算技术指南》^[21] 中推荐数值。根据 2019 年安徽省耕地土壤养分特征(数据来源于 2019 年安徽省耕地质量监

测报告),确定土壤氮素养分分级为 I 级、施肥供给所占比例为 35%;土壤磷素养分分级蚌埠、阜阳市为 II 级,施肥供给所占比例为 45%;其他各市均为 III 级,施肥供给所占比例为 55%。粪污氮素磷素当季利用率参考《土地承载力测算技术指南》分别取 30%,35%。安徽省 2009—2018 年主要农作物种植面积见表 1。

表 1 安徽省 2009—2018 年主要农作物种植面积

| 年份 | 粮食作物播种面积 | | | | 油料 | | | 棉花 | 瓜果类 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|--------|---------|---------|
| | 稻谷 | 小麦 | 玉米 | 豆类 | 花生 | 油菜籽 | 芝麻 | | |
| 2009 | 2 246 850 | 2 355 267 | 730 750 | 1 050 343 | 180 847 | 721 788 | 59 356 | 327 672 | 160 608 |
| 2010 | 2 245 370 | 2 365 666 | 761 109 | 1 021 228 | 194 608 | 691 001 | 52 295 | 344 400 | 165 695 |
| 2011 | 2 230 820 | 2 383 000 | 818 820 | 969 010 | 188 899 | 640 412 | 48 040 | 350 400 | 171 126 |
| 2012 | 2 215 050 | 2 415 510 | 822 530 | 960 270 | 187 450 | 609 590 | 45 674 | 304 930 | 172 649 |
| 2013 | 2 214 100 | 2 432 850 | 845 100 | 937 600 | 187 260 | 568 126 | 46 056 | 285 130 | 176 461 |
| 2014 | 2 217 330 | 2 434 500 | 852 400 | 934 800 | 190 433 | 550 986 | 46 682 | 265 200 | 181 216 |
| 2015 | 2 234 920 | 2 457 000 | 881 550 | 893 600 | 191 116 | 532 447 | 48 218 | 232 500 | 191 553 |
| 2016 | 2 265 500 | 2 446 900 | 876 400 | 905 400 | 183 111 | 500 668 | 47 015 | 183 440 | 192 876 |
| 2017 | 2 326 020 | 2 391 990 | 844 700 | 935 570 | 183 381 | 472 396 | 42 199 | 147 010 | 194 975 |
| 2018 | 2 544 760 | 2 875 857 | 1 138 560 | 687 630 | 144 152 | 357 020 | 7 326 | 86 300 | 80 047 |

注:表中仅列举主要农作物,详细数据来源于 2009—2018 年《安徽省统计年鉴》。

1.2 畜禽粪污养分供给量估算

安徽省畜禽养殖量数据来源于《安徽省统计年鉴》公布的安徽省及各地市畜牧业统计资料,具体包括全省猪、牛、家禽等每年末的存栏数和出栏数。所用数据截止时间为 2018 年底。畜禽粪污区域养分收集量计算公式为:

$$\text{区域养分收集量} = \text{区域内各种畜禽养分产生量} \times \text{各种畜禽在不同清粪方式所占比例} \times \text{各种清粪方式养分收集率} \quad (3)$$

畜禽粪、尿产生量由畜禽养殖量、饲养周期、排泄系数、平均含量等参数计算得到^[22-24]。畜禽养殖粪便排泄系数指单个动物每天排出的粪便量,因品种、个体体重、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(HJ497-2009)》,并结合安徽省内实际养殖情况。畜禽粪便、尿液中主

要污染物平均含量通过参考国家生态环境部提供数据^[25],并查阅了近年来国内外多位学者的研究成果^[26-28],结合安徽省内畜牧业现状,最终整理得出。各项计算参数详细见表 2。结合目前安徽省各地推行的畜禽养殖废弃物资源化利用 3 a 行动计划,并参考其他学者的研究成果^[29],清粪比例采用干清粪 80%,水冲清粪 20%计算。此外,根据《土地承载力测算技术指南》分析数据,干清粪中氮磷收集率分别为 88%和 95%,水冲粪工艺中氮磷收集率分别为 87%和 95%。

$$\text{区域畜禽粪污养分总供给量} = \text{各种畜禽粪污养分收集量} \times \text{各种畜禽在不同处理方式所占比例} \times \text{不同处理方式养分留存率} \quad (4)$$

安徽省不同畜禽粪污处理方式所占比例依据省内已有文献资料成果统计^[30-31]确定,N,P 养分留存率参考《土地承载力测算技术指南》(详见表 3)确定。

表 2 安徽省不同畜禽养殖粪污排泄系数及平均含量

| 项目 | 牛粪 | 牛尿 | 猪粪 | 猪尿 | 羊粪 | 家禽粪便 |
|--------------------------------|------|-----|------|------|------|------|
| 排泄系数/[kg·(只·d) ⁻¹] | 20 | 10 | 2 | 3.3 | 2.6 | 0.12 |
| TN 平均含量/(kg·t ⁻¹) | 4.37 | 8 | 5.88 | 3.3 | 0.83 | 10.4 |
| TP 平均含量/(kg·t ⁻¹) | 1.18 | 0.4 | 3.41 | 0.52 | 0.18 | 5.8 |
| 饲养周期/d | 365 | 365 | 199 | 199 | 365 | 210 |

1.3 区域畜禽粪污土地承载力测算

为便于对畜禽粪便耕地污染的控制,国家环保部

生态司建议,由于农户对猪粪的农田施用量较容易掌握,宜将畜禽粪便换算成猪粪当量。按存栏量折算,

100 头猪相当于 15 头奶牛、30 头肉牛、250 只羊、2 500 只家禽。此外,需将计算得到的畜禽粪污总养分供给量折算成单位猪当量养分供给量,计算公式为:

单位猪当量粪污养分供给量 =

$$\frac{\text{区域内畜禽粪污总养分供给量} \times 1\ 000}{\text{区域内各类畜禽按猪当量换算系数}} \quad (5)$$

区域畜禽粪污土地承载力 =

$$\frac{\text{区域畜禽粪污养分总需水量}}{\text{区域内单位猪当量粪污养分供给量}} \quad (6)$$

表 3 不同畜禽粪污的处理方式比例及 N,P 养分留存率 %

| 处理方式 | 比例 | 氮留存率 | 磷留存率 |
|---------|----|------|------|
| 厌氧发酵 | 10 | 95 | 75 |
| 固体贮存 | 27 | 63.5 | 80 |
| 堆肥 | 40 | 68.5 | 76.5 |
| 沼气工程 | 10 | 65 | 65 |
| 污水氧化塘贮存 | 13 | 62 | 72 |

将安徽省各种畜禽实际存栏量(以猪当量计)除以区域最大养殖量(以猪当量计)得到区域畜禽粪污土地承载力指数 I,其值分别为 <0.4, 0.4~0.7, 0.7~1.0, 1.0~1.5, 1.5~2.5 和 >2.5 时,认为畜禽粪便对环境的影响程度分别为“无”、“稍有”、“有”、“较严重”、“严重”和“很严重”^[32],R 值越大,说明环境对畜禽粪便负荷量承受能力越低,畜禽粪便对环境造成的污染威胁性越大。计算公式为:

区域畜禽粪污土地承载力指数 I =

$$\frac{\text{区域各类畜禽实际存栏量,折算成猪当量}}{\text{区域内畜禽粪污承载力,即理论最大养殖量}} \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 畜禽养殖粪污排放量时间变化特征

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

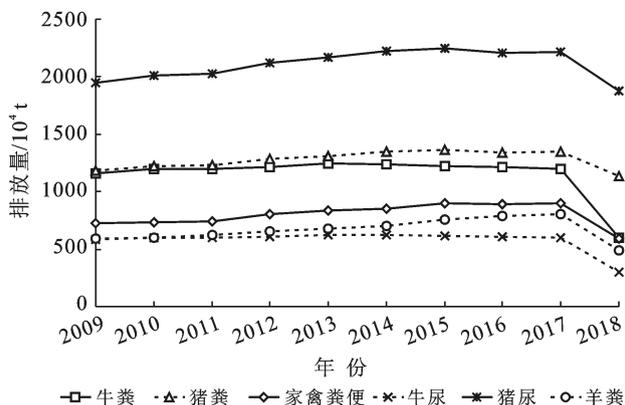


图 1 安徽省 2009—2018 年畜禽粪、尿排放量变化

2009—2018 年安徽省畜禽养殖粪、尿总排放量 6.57×10^8 t,粪便、尿液排放量在 2015 年分别达到 4.24×10^7 , 7.09×10^7 t,较 2009 年增长 13.5% 和 12.9%,2017 年后逐渐减少。其中牛尿排放量最低,猪尿排放量最大,平均年排放量 2.11×10^7 t,比例为 35.8%;牛粪排放量与猪粪较为接近,家禽类养殖量虽显著高于猪、牛,但粪便排放量平均仅占猪粪的 62.3% 及牛粪的 70.8%。2018 年经污染防治、禁养区划分等管控措施和非洲猪瘟等影响,总排放量较 2015 年减少 21.2%,其中牛粪、牛尿降幅最大为 50.9%,而猪粪、猪尿降幅最小仅 16.2%,一方面说明管控措施成效显著,另一方面应侧重加强对生猪养殖粪污控制的防治措施。

2.2 畜禽粪污氮磷养分供给量时间变化特征

2009—2018 年安徽省畜禽粪污氮磷养分供给量随时间呈先增大后降低的规律(图 2)。2015 年氮、磷分别达到最大值 2.24×10^5 , 1.00×10^5 t,2018 年末各类畜禽粪污氮磷供给量较 2015 年分别降低 34.0%, 30.0%,牛粪、牛尿降幅最显著。2009—2017 年家禽粪便、猪粪、牛粪、猪尿的氮素平均供给量均占全省 20% 以上,但 2018 年牛粪牛尿的氮素所占比例降至 10% 左右。不同类别粪污磷素供给量差异较大,其中猪粪、家禽粪便所占比例最高,平均分别达 34.3% 和 36.2%;羊粪所占比例最低。总的来说,全省畜禽粪污氮磷供给量在 2017 年前差别不大,2018 年后降幅明显,实施的畜禽污染防治措施成效显著。氮素养分供给较为均衡,但磷素差异显著,家禽粪污、猪场尿液的处理利用工作应是首要环节,且应依据粪便种类合理确定施肥用量,避免过量投入造成养分失衡。

2.3 畜禽养殖氮磷养分供给量、需求量时空分布特征

以 2011,2013,2016,2018 年 4 个不同年份为例,分析了安徽省粪污氮磷养分供给量的空间分布特征,结果如图 3—4 所示。总的来看,安徽全省粪污排放量的规律。2011,2013,2016 年全省氮磷养分供给量分别为 2.03×10^5 , 8.90×10^4 , 2.17×10^5 , 9.70×10^4 t, 2.21×10^5 , 9.90×10^4 t,2018 年降低至 1.48×10^5 , 7.00×10^4 t。阜阳市和宿州市的氮磷养分供给量最高,年平均氮磷养分供给量分别达 3.30×10^4 , 1.30×10^4 t 和 2.70×10^4 , 1.20×10^4 t;淮北、淮南以及皖南地区的铜陵、黄山等 8 市的氮磷养分供给总量较低,2011—2018 年分别占全省的 17.8%,19.0%,24.3% 和 16.9%。粪肥资源分布的时空特征差异,与各地区畜禽养殖规模和养殖结构和耕地面积等诸多因素有关。

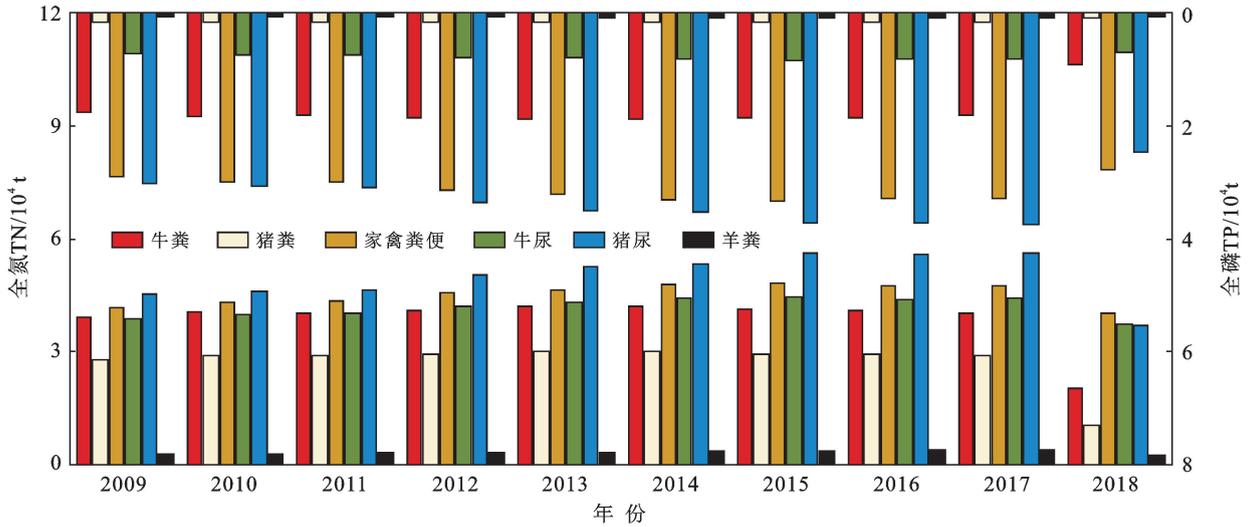


图 2 安徽省 2009—2018 年畜禽氮磷养分供给量变化

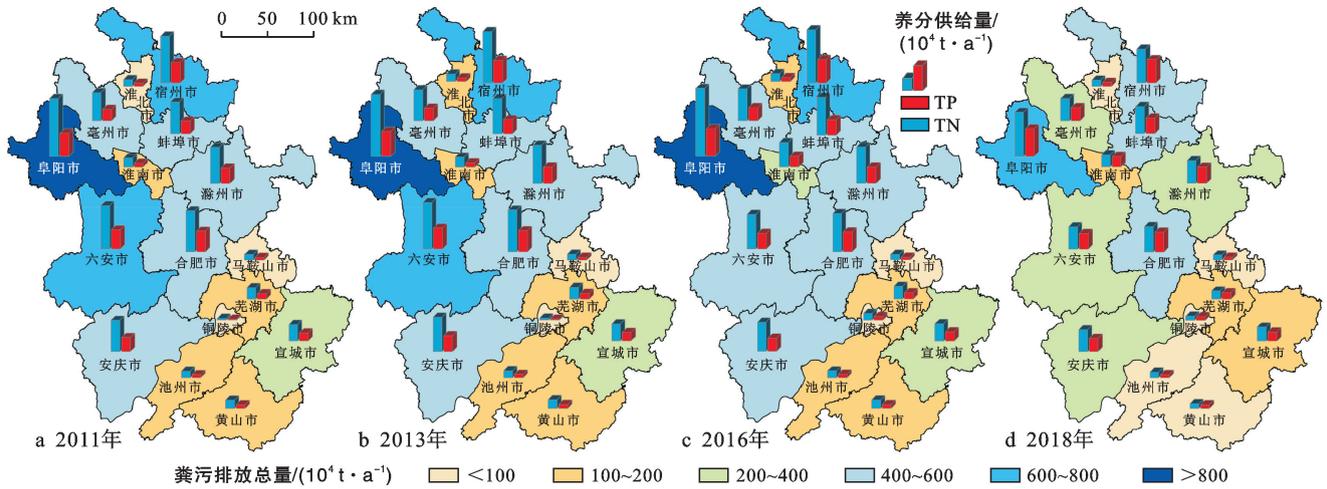


图 3 安徽省畜禽氮磷养分供给量时空分布

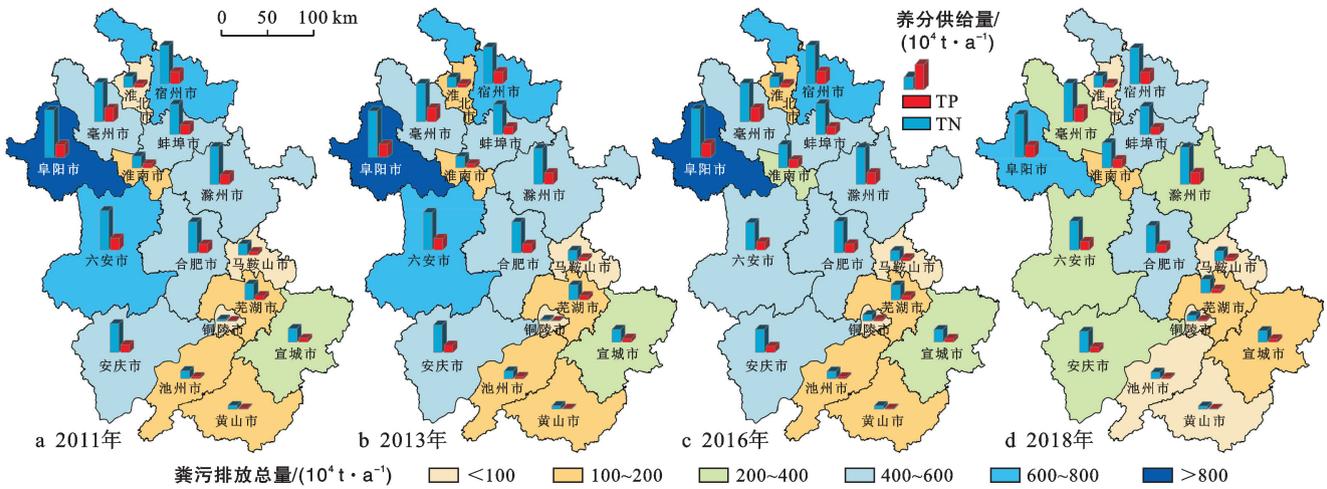


图 4 安徽省作物氮磷养分需求量时空分布

2009—2018 年全省农作物氮磷需求量分别为 1.48×10^6 , 3.45×10^5 t, 不同年份间差异仅在 $\pm 4.6\%$

和 $\pm 4.1\%$ 之间。结合安徽耕地土壤养分特征及施肥习惯, 估算得到全省农作物经畜禽粪肥方式利用的氮

磷养分平均需求量分别为 5.19×10^5 t 和 1.56×10^5 t, 2015 年全省需求量最大, 2018 年最低。氮磷需求量在空间分布上也具有一致性, 铜陵、黄山、马鞍山、池州 4 市的需求量平均仅占全省总量的 7.0%, 6.4%; 阜阳市氮素需求量依然最高, 亳州市磷素需求量最高。比较可知, 畜禽粪污的氮磷养分供给量未超过农作物种植的养分需求量, 说明在施用农田粪肥的同时也需要补充一部分化肥以保证作物的养分利用。

2.4 畜禽养殖土地承载力指数空间分布及变化特征

全省畜禽养殖规模较大区域主要集中在安徽北部和中部(图 5), 阜阳市、宿州市最高, 4 个年份猪当量养殖量年平均分别为 8.61×10^6 , 7.54×10^6 头, 分别占全省的 15.3% 和 13.4%; 铜陵市养殖规模最小, 年平均仅占全省的 1.0%。2011—2018 年以氮为基准时的全省畜禽粪污土地承载力指数(I 值)分别为 0.38, 0.42, 0.42, 0.30, 以磷为基准时的 I 值分别为 0.56, 0.61, 0.62, 0.46, 不同年份的氮磷基准 I 值均小

于 1, 认为安徽省内土地消纳畜禽粪污量均不超载。

2011, 2013, 2016 年 3 个年份中各市土地承载力指数分布较为一致(图 5), 以 N 为基准的 I 值在 0.4 以下的城市均为 9 个, 仅黄山市 I 值达到 0.81, 属于“存在污染风险”地区; 以 P 为基准的 I 值在 0.4 以下的城市均有 4 个, 合肥、铜陵、宣城 3 市 I 值均在 0.7~1 之间, 属于“存在污染风险”地区, 另外黄山市 I 值达 1.37, 属于“较严重污染风险”地区。2018 年由于全省畜禽养殖量和养分供给量的减少, 全省除黄山、宣城外, 以 N 为基准的 I 值均在 0.4 以下、以 P 为基准的 I 值均在 0.7 以下, 全省农田畜禽污染风险明显降低。与养殖规模以及畜禽粪尿排放量的分布趋势不同, 土地承载力指数 I 值较高的区域主要集中在安徽南部、中部地区, 皖北地区畜禽污染风险反而较低, 与当地耕地面积、播种面积以及农作物种植量较大有关; 磷素的土地承载力指数总体高于氮素, 可以认为磷素是限制安徽省畜禽养殖粪便农田施用的主要因素。

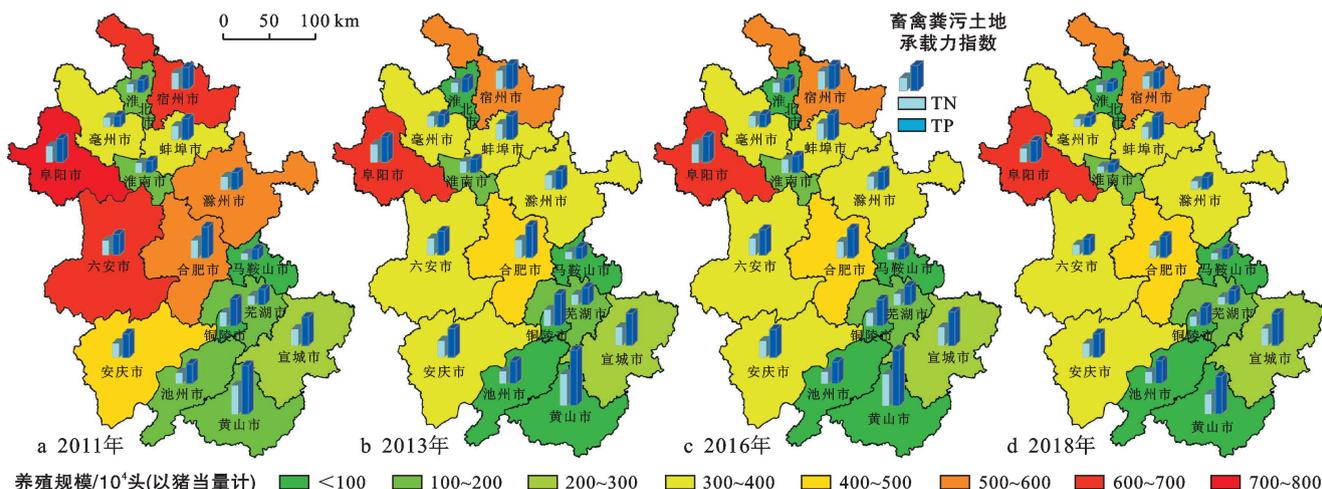


图 5 安徽省畜禽粪污土地承载力指数时空分布特征

3 讨论

自 2013 年国务院发布《畜禽规模养殖污染防治条例》以来, 2017—2018 年逐步实施的养区划分、搬迁或关闭工作, 安徽省对畜禽养殖污染防治的管控力度不断加大。政策措施不断强化与该时间段内全省畜禽粪、尿排放量先增高后降低的变化规律吻合。2018 年畜禽粪污氮磷供给量较 2009 年分别下降 25%, 19%, 其中牛粪、牛尿降幅最显著。TN 供给量在不同类别粪尿中分布较均衡, 而 TP 供给量主要来源于猪粪和家禽粪便。

安徽省内畜禽粪便供给的主要来源是生猪饲养, 畜禽污染防治措施对牛粪、牛尿中氮磷等养分负荷影

响效果最明显, 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。虽然家禽粪便排放量不高, 但氮磷养分含量突出, 究其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^[33]。

全省粪污排放量及氮磷养分供给量自北向南递减, 阜阳市、宿州市最高, 铜陵最低。安徽省着力推进阜阳、宿州、合肥、宣城等生猪优势区域发展, 力争 2020 年实现生猪出栏总量占全省的 80% 以上。结合安徽耕地土壤养分特征及施肥习惯, 铜陵、黄山、马鞍山、池州 4 市的需求量平均仅占全省总量的 7.0%, 6.4%; 阜阳市氮素需求量依然最高, 亳州市磷素需求量最高。皖北平原区地势平坦、耕地面积广阔, 阜阳

市、亳州市一直是全省粮食主产区,根据统计数据,两市小麦、玉米、大豆年产量平均占全省总量的40.4%,49.8%和45.9%,而这3类作物每100 kg氮需求量分别达到3.0,2.3,7.2 kg,远高于蔬菜、水果。此外,据历年环境质量公报数据显示,阜阳、宿州等地所处的淮河流域中,主要支流涡河和奎河的Ⅳ类及以下水质断面比例平均在60%~70%左右,因此,更需要对这些区域产业优化布局,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。

整体来看,安徽省内土地消纳畜禽粪污量未超过环境容量,畜禽养殖仍有一定的发展潜力。根据土地承载力指数分析结果,全省农田畜禽污染风险主要集中在皖南山区,这与阎波杰等^[34]、肖琴等^[35]的结果一致,但与王奇等^[36]的又有所差异。皖南地区的黄山等市耕地面积少、地形复杂,应对养殖场进行合理选址和设计,合理配置养殖规模与周边农田,保障足够的畜禽粪污消纳空间;同时减少化肥投入,科学粪肥施用。此外,同一年份畜禽粪污养分及土地承载力的测算与其他资料对比仍然有一定差异,主要原因在于采用的估算方法、计算参数(如日排泄系数、养分含量、收集率)等各不相同^[37-39],且不同统计年鉴或资料之间的数据也存在差异。因此迫切需要提出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。

4 结论

安徽省畜禽养殖粪尿排放在2011—2015年持续上升,2017年后逐渐减少。猪尿排放量最大,平均年排放量 2.11×10^7 t,占总量比例为35.8%,羊粪排放量最低。2018年后牛粪、牛尿降幅最大,而猪粪尿排放量降幅最小。

除羊粪外,各类粪、尿对氮素养分供给较为均衡,平均在全省比例20%以上,但磷素供给量差异显著。氮磷养分供给量与畜禽粪污排放的空间分布都呈现北高南低的特点,阜阳市和宿州市的年平均氮磷养分供给量占全省总量的28.4%和26.4%,淮北、淮南以及皖南地区普遍较低。

2011—2016年,以N为基准的土地承载力指数在0.4以下的城市均为9个,以P为基准的土地承载力指数在0.4以下的城市均为4个;2018年除黄山、宣城外,以N为基准的I值均在0.4以下,以P为基准的I值均在0.7以下。全省农田畜禽污染风险主要集中在安徽中部和南部地区,如合肥、宣城、黄山等,其中黄山市以N、P为基准的土地承载力指数均最高,应加强对畜禽粪污的综合利用处理。总体来看

安徽省土地消纳畜禽粪污量未超过环境容量,畜禽养殖粪污处理仍有一定的发展潜力。

[参考文献]

- [1] Zheng Chaohui, Liu Yi, Bluemling B, et al. Modeling the environmental behavior and performance of livestock farmers in China: An ABM approach [J]. *Agricultural Systems*, 2013,122(12):60-72.
- [2] 贾伟,李宇虹,陈清,等.京郊畜禽粪肥资源现状及其替代化肥潜力分析[J].*农业工程学报*,2014,30(8):156-167.
- [3] 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.
- [4] 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*, 2013,349(1):157-167.
- [5] Cambra-lópez M, Aarnink A J, Zhao Yang, et al. Air-borne particulate matter from livestock production systems: A review of an air pollution problem [J]. *Environmental Pollution*, 2010,158(1):1-17.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 耿维,胡林,崔建宇,等.中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J].*农业工程学报*,2013,29(1):171-179.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 王辉,董元华,张绪美,等.江苏省集约化养殖畜禽粪便盐分含量及分布特征分析[J].*农业工程学报*,2007,23(11):229-233.
- [12] Mallin M A, Cahoon L B. Industrialized animal production: A major source of nutrient and microbial pollution to aquatic ecosystems [J]. *Population & Environment*, 2003,24(5):369-385.
- [13] 李艳霞,李帷,韩伟,等.基于GIS的东北农田畜禽粪肥施用适宜性分析[J].*环境科学*,2010,31(4):1092-1100.
- [14] Mishima S I, Shirato Y. 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.
- [15] 冯倩, 刘聚涛, 付莎莎, 等. 江西省畜禽粪便污染物产生量及其耕地负荷分析[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(6): 316-319.
- [16] 张建杰, 郭彩霞, 覃伟, 等. 山西省畜牧业发展及粪尿养分时空变异[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 207-214.
- [17] 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, 35(1): 110-116.
- [18] 王雪蕾, 吴传庆, 冯爱萍, 等. 利用 DPeRS 模型估算巢湖流域氮磷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.
- [19] 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.
- [20] 安徽省统计局. 安徽省统计年鉴(2009—2018)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [21] 国家畜牧养殖废弃物资源化利用科技创新联盟. 土地承载力测算技术指南[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [22] 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.
- [23] Richard Arthur, Martina Baidoo. Harnessing methane generated from livestock manure in Ghana, Nigeria, Mali and Burkina Faso [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2011, 35(11): 4648-4656.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Choi Hong 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.
- [28] Cantrell K B, Hunt P G, Uchimiya M, et al. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physico-chemical characteristics of biochar [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 107: 419-428.
- [29] 宣梦, 许振成, 吴根义, 等. 我国规模化畜禽养殖粪污资源化利用分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(2): 126-132.
- [30] 贾伟. 我国粪污养分资源现状及其合理利用分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [31] 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]. 安徽 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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磷负荷估算及污染潜势研究[J]. *地球与环境*, 2016, 44(5): 566-571.
- [35] 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.
- [36] 王奇, 陈海丹, 王会. 基于土地氮磷承载力的区域畜禽养殖总量控制研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(3): 279-284.
- [37] 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.
- [38] Li Shutian, Liu Xiaoyong, Ding Wencheng. Estimation of organic nutrient sources and availability for land application [J]. *Better Crops with Plant Food*, 2016, 100(3): 4-6.
- [39] 易秀, 陈生婧, 田浩. 陕西省养殖业畜禽粪便氮磷耕地负荷的时空分布[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(3): 235-240.

(上接第 311 页)

- [31] 余明勇, 姚玲. 神农架大九湖保护涉水工程对湿地生态环境的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2013(12): 57-61, 64.
- [32] 王涵, 吴林, 薛丹, 等. 湖北省恩施市太山庙泥炭藓泥炭沼泽分布及其环境特征研究[J]. *湿地科学*, 2020, 18(3): 266-274.
- [33] 李文华. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008.
- [34] 刘彩娥. 把论文写在祖国大地上: 国内科研论文外流现象分析[J]. *北京工业大学学报(社会科学版)*, 2018, 18(2): 64-72.
- [35] 谢畅. 云南省湿地生态系统服务功能价值动态评估[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(17): 4619-4624.
- [36] 袁艺. 四川省湿地生态系统服务功能价值评估[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(4): 2177-2179, 2198.
- [37] 薛兰兰, 袁兴中, 王铁浩, 等. 重庆湿地生态系统服务功能价值评价与分析[J]. *四川林业科技*, 2015, 36(5): 7-10, 15.
- [38] 陈炜, 张雨珂, 炊雯, 等. 黄土高原湿地生态系统服务功能价值评估: 以陕西省千湖国家湿地公园为例[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(4): 270-274, 280.