



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

山东省畜禽粪便的环境污染现状及风险评价

于娜, 王晓茹, 李婷婷, 王倩, 翟胜, 李巧燕

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0590>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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>

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

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 295–304 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0374>

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

渠清博, 杨鹏, 翟中葳, 张克强

农业资源与环境学报. 2016, 33(5): 397–406 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0046>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.



开放科学 OSID

山东省畜禽粪便的环境污染现状及风险评价

于娜, 王晓茹, 李婷婷, 王倩, 翟胜, 李巧燕

(聊城大学地理与环境学院, 山东 聊城 252000)

摘要:以耕地和水环境保护为出发点,根据山东省各地市近五年来畜禽养殖量数据,采用排泄系数法估算畜禽粪便的产生量,在此基础上计算了畜禽粪便的耕地负荷和水体等标污染指数等指标,综合评价了各地市畜禽养殖业的发展对土壤和水环境产生的污染压力。研究发现:2014—2018年山东全省畜禽粪便的平均耕地污染风险指数为0.77~0.84,预警级别为Ⅲ级;全省平均水体等标污染指数由9.26逐渐降低为4.46,对应的预警级别由Ⅱ级降为Ⅰ级。表明畜禽污染已对土壤环境产生风险,潍坊市尤为突出;而畜禽污染对水体环境基本无污染风险,但不同地区间存在差异,聊城市的水体污染风险仍相对较高。此外,依据土壤养分平衡理论和山东省耕地面积估算,山东省2018年畜禽的最高承载数量(以猪当量计)为12 873万头。本研究为优化畜禽养殖结构、推动区域畜禽养殖业绿色发展、保护区域生态可持续发展提供了理论参考。

关键词:畜禽粪便;耕地负荷;水体污染负荷;预警级别;风险评价

中图分类号:X713;X820.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2021)05-0820-09

doi: 10.13254/j.jare.2020.0590

Risk assessment of farmland and water contamination with livestock manure in Shandong Province

YU Na, WANG Xiaoru, LI Tingting, WANG Qian, ZHAI Sheng, LI Qiaoyan

(School of Geography and Environment, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China)

Abstract: According to livestock data for Shandong Province in the last five years, the quantity of livestock manure was estimated utilizing the discharge rate of livestock manure. On this basis, the farmland pollution loading and water equal standard pollution loading of livestock manure were calculated. Moreover, the risk assessment was evaluated on the livestock pollution in farmland and water bodies in the province. The overall averaged risk constant of livestock manure loading on farmland was 0.77~0.84 and the corresponding risk level was Ⅲ in the recent five years, which suggested that livestock manure pollution had caused risks to the soil environment, especially in Weifang City. With regard to water bodies, the averaged equal standard pollution loading decreased from 9.26 to 4.46, and the corresponding risk level decreased from Ⅱ to Ⅰ, indicating approximately no pollution risk to the water environment. However, significant differences were observed for the water contamination with livestock manure in different areas of Shandong, such as Liaocheng, which still had a relatively high pollution risk. In addition, the maximum carrying quantity of livestock was estimated based on the soil nutrient balance theory and the cultivated land area of Shandong Province, which was 128.73 million head (in terms of pig equivalent) in 2018. The purpose of this study was to provide a theoretical reference for optimizing the structure of livestock, promoting the green development of regional farming industries, and protecting the sustainable development of the regional ecology.

Keywords: livestock manure; farmland loading; water pollution loading; risk level; risk assessment

随着现代农业经济的快速发展以及人民生活水平的日益提高,畜牧产品需求量不断增加。据联合国

粮食及农业组织(FAO)报道,1978—2013年全球肉类产量增加了143.4%^[1]。中国是肉类产品的生产和消

收稿日期:2020-10-13 录用日期:2020-12-09

作者简介:于娜(1987—),女,博士,讲师,从事有机废弃物资源化利用研究。E-mail:736725735@qq.com

基金项目:聊城大学博士基金(318051904)

Project supported: Doctoral Foundation of Liaocheng University, China(318051904)

<http://www.aed.org.cn>

费大国,统计数据显示,1983—2018年我国肉类产量由1 402万t增加至8 624万t^[2]。肉类产量的迅速增长,致使集约化、工厂化和规模化的养殖场迅猛发展。山东省作为我国畜禽养殖大省,畜牧产量多年来位居全国第一,2018年全省共出栏生猪5 082万头、家禽21.69亿只、山羊绵羊2 682万只、牛363万头、蛋鸡2.38亿只,占全国畜牧量的十分之一,其中肉鸡养殖数量占全国20%以上,居全国首位^[3]。畜牧业已然成为山东省主要的富民产业,然而由大量畜禽粪便所带来的环境问题也日益凸显^[4]。环保部门数据显示,2015年山东省化学需氧量(COD)和氨氮排放总量中,畜禽养殖的贡献分别占70%和38%。虽然畜禽粪便可作为有机肥直接施用,但由于畜禽粪便的运输距离有限,部分集约化养殖区粪便产生量已远远超过当地农田可承载的安全警戒值,这也意味着从区域角度来看,畜牧业的发展规模、饲养密度应该与该地区的耕地面积相匹配^[5]。如果超出农田消纳容量,将会造成水体和土壤的污染,引发严重的环境问题。据统计,在我国1 200多条主要河流中,有850多条不同程度地受到农业面源污染的影响,受污染的湖泊中农业面源污染负荷占总负荷的比例均超过50%^[6]。目前,畜禽粪便已成为农业面源污染的主要来源之一^[7-8],是制约养殖业持续良性发展的主要因素。

关于畜禽粪便对环境的影响,国内外已经开展了许多工作,目前的研究大多集中在对畜禽粪便产生量进行统计并将产量按农田面积分配,通过计算农田负荷量来评价污染风险^[4,9-10];也有学者通过对比山东省作物粪污养分需求量和畜禽粪污养分供应量,计算各市畜禽粪污土地承载力指数,进一步探明山东省畜禽粪污土地承载力的时空变化特征^[11]。此外还有学者根据畜禽粪便的产量估算其肥料化利用潜力和沼气潜力等^[12]。在前人研究的基础上,本研究以山东省17地市(莱芜市于2018年底并入济南市)为研究区域,以畜禽养殖结构中饲养量较高的猪、牛、羊、兔和家禽为研究对象,通过调查山东省各地市近年来的养殖量数据,根据排泄系数法估算畜禽粪便的产生量,在此基础上计算不同区域畜禽粪便的耕地负荷和水质等标污染指数等指标,对近年来畜禽粪便污染区域耕地和水环境现状进行综合污染评价,同时从环境承载力出发布局畜牧业生产,即从源头上控制畜禽养殖污染,以期当地生态环境的保护提供理论依据,为合理规划区域内畜禽饲养密度与空间布局提供科学的指导。

1 材料与方法

1.1 畜禽粪便排放量的估算

畜禽粪便的排放量依据不同种类畜禽的饲养量进行估算,畜禽饲养量数据来源于2005—2019年山东统计年鉴^[3,13],畜禽种类包括猪、牛、羊、兔和家禽。结合国内研究者计算畜禽粪便排放量的方法^[14-16],本研究根据各种畜禽的饲养周期选取不同的基础数据,计算方法如下:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{1000} = \frac{365 \times \sum_{i=1}^n N_i \times \alpha_i}{1000} \quad (1)$$

$$M_p = \sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n Q_i k_i \quad (2)$$

式中: Q 表示畜禽粪便排放量,万t; Q_i 表示第*i*类畜禽粪便的排放量,万t; N_i 为第*i*类畜禽的饲养量,万头(只)。其中牛、羊的饲养周期较长,当年出栏量很少,其饲养量以存栏量计算;猪的平均饲养期为199 d^[17],因此猪的年出栏数就可以代表当年饲养量;家禽分为肉禽和蛋禽,肉禽的生长期一般为55 d,蛋禽的饲养周期一般为210 d^[15],因此以家禽的出栏数代表家禽的当年饲养量。 α_i 表示第*i*类畜禽的日排泄系数, $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 或 $\text{kg} \cdot \text{只}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,是指每头(只)畜禽每日排出粪便的量,因动物的种类、品种、性别、生长期、喂养饲料甚至天气条件的不同而不同^[16],本研究中该值采用国家环境保护总局2002年公布的数据^[18],如表1所示。1 000表示千克转化为吨的换算系数; M_p 表示畜禽粪便的猪粪当量,万t,由于畜禽种类不同其粪便肥效、养分含量差异较大,故其农田消纳量也有较大差异,因此将各类畜禽粪便依据含氮量不同统一换算成猪粪当量。 M_i 表示第*i*类畜禽粪便的猪粪当量,万t; k_i 表示不同种类畜禽粪便的猪粪当量换算系数,本研究采用国家环境保护总局2002年公布的数据^[18],见表2。

1.2 流失负荷量的估算

流失负荷量的计算公式为:

$$M_R = \lambda \times Q = \lambda \times \frac{365 \times \sum_{i=1}^n \alpha_i \times N_i}{1000} \quad (3)$$

式中: M_R 表示该地区畜禽粪便流失污染负荷量,万t; λ 表示流失率。研究表明,畜禽粪便易于淋溶,其进入水体的流失量受当地降雨径流、畜禽污染物积累量、土壤特性以及技术措施等影响^[19],因此不同地区畜禽粪便的流失率不同。综合相关研究发现,畜禽粪便的流失率一般为25%~40%^[20-22],由于山东省畜禽粪

表1 各类畜禽粪便日排泄系数($\text{kg}\cdot\text{头}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 或 $\text{kg}\cdot\text{只}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)^[18]Table 1 Manure excretion coefficient of livestock manure($\text{kg}\cdot\text{head}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)^[18]

排泄物 Excrement	猪 Swine	牛 Cattle	羊 Sheep and goat	兔 Rabbit	家禽 Poultry
粪	2.0	20	2.6	0.15	0.1
尿	3.3	10	—	—	—

注:“—”表示无数据。

Notes: “—” indicates no data.

表2 各类畜禽粪便猪粪当量换算系数^[18]Table 2 Coefficient for equivalent amount of swine manure of livestock manure^[18]

项目 Item	猪粪 Dung of swine	猪尿 Urine of swine	牛粪 Dung of cattle	牛尿 Urine of cattle	禽粪 Droppings of poultry	兔粪 Droppings of rabbit	羊粪 Droppings of sheep and goat
含氮量/%	0.65	0.33	0.45	0.80	1.37	1.94	0.80
换算系数	1.00	0.57	0.69	1.23	2.10	2.98	1.23

便产生量大,河网密集且应用率低,因此本研究中流失率取30%^[6,23-24]。

1.3 农田养分供给负荷量的估算

不同的畜禽粪便利用方式对农田养分负荷量的贡献存在差异,从而导致农田对粪肥的消纳能力也不同。目前,山东省对畜禽粪便的利用方式主要有就地还田、生产沼气和堆肥处理三种,其中就地还田所占比例最大,约占76%^[9]。因此,本研究统一按照就地还田的利用方式进行农田养分供给负荷量的计算,公式为:

$$q=(M_P-M_R)/S \quad (4)$$

式中: q 表示畜禽粪便的农田负荷量(以猪粪当量计), $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$; S 表示有效耕地面积, hm^2 。

1.4 畜禽粪便猪粪当量的环境最适负荷量计算

以畜牧业与种植业间养分平衡为依据,进行环境最适负荷量的计算。在该体系中假设:①山东省的种植业以主要农作物小麦和玉米轮作为主要种植模式;②养分平衡仅以氮素计算;③耕地土壤的氮素输入全部来源于畜牧业提供的粪肥和人工施用的化肥;④氮素输出以农作物形式(小麦与玉米)为主。

根据土壤养分平衡理论,单位耕地面积对畜禽粪便消纳能力主要与以化肥形式养分的输入量和农作物目标产量的养分输出量有关,因此,单位耕地面积粪肥最适承载量(以猪粪当量计)计算公式如下:

$$T=\frac{a\times\sigma+b\times\omega+\theta-\chi}{\zeta} \quad (5)$$

式中: T 表示畜禽粪便猪粪当量的环境最适负荷, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; a 、 b 分别表示小麦、玉米平均产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,数据来源于2019年山东统计年鉴^[3]; σ 、 ω 为小麦、玉米中的含氮量, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,数据来源于畜禽粪污土地承

载力测算指南^[25]; θ 是氮素损失量,为减少环境污染,设其为0; χ 为单位耕地面积年施用的化肥量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,为防止氮肥过量施用造成环境污染,依照化肥使用环境安全技术导则(编制说明)将年施氮肥量的安全上限确定为 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; ζ 是每千克猪粪当量的氮含量,%。

1.5 耕地畜禽粪便负荷预警值

猪粪当量负荷预警值能够反映单位耕地畜禽粪便负荷对环境污染的风险,同时能够衡量一个地区畜禽养殖数量与环境承载力的适应性,其计算公式为:

$$r=q/T_{\max} \quad (6)$$

式中: r 为畜禽粪便负荷承受能力预警值,即污染风险指数; $T_{\max}$ 表示畜禽粪便猪粪当量的环境最大负荷, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

1.6 水体等标污染指数的计算

等标污染指数(I)是进行畜禽粪便污染负荷分析与评价的一个重要参数,可综合评价不同地区的畜禽粪便污染程度和风险等级,等标污染指数越大,污染程度越高。

$$P_i=C_i/C_0 \quad (7)$$

$$I=\sum_{i=1}^n P_i/A \quad (8)$$

$$D_i=C_i/A \quad (9)$$

式中: 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、总氮(TN)、总磷(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 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TP为 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TN为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 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 ; D_i 表示扩散浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 畜禽粪便排放的时空分布特征

2.1.1 畜禽粪便排放的时间分布

2004—2018年山东省畜禽养殖情况如图1所示,猪和家禽的养殖数量呈增长趋势,而兔的养殖数量自2016年出现大幅下降,牛和羊的养殖数量15年来较为稳定。2018年,山东省猪、牛、羊、兔和家禽的全年平均存栏量分别为5 082.26万头、380.6万头、1 801.41万只、3 162.43万只和217 200.22万只。将不同种类畜禽按照《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)中的换算系数统一换算为猪当量后,从养殖量占比来看,猪的养殖量占比最高,达37.54%;其次是家禽,为35.66%,兔养殖量所占比例最小,仅为0.39%。

由于粪便类型、肥效养分和农田消纳量的不同,直接将不同种类粪便排放量进行叠加,会与实际效果产生一定误差,因此,本研究将不同种类粪便按照氮含量统一换算为猪粪当量再进行叠加。由图1可知,畜禽粪便的排放量2007—2009年相对较低,2010—2012年逐渐增长,2013—2018年趋于稳定,2018年畜禽粪便的产生量约30 092.23万t,总氮的排放量约为19 559.95万t。主要原因在于2007—2009年受禽流感的影响,山东各地区畜禽养殖量显著下降,2010年山东省政府加大对现代畜牧业发展的扶持力度,出台了一系列鼓励畜牧业发展的优惠政策,使山东省畜禽养殖业得到快速发展,养殖规模在2010年以后呈迅速增加的趋势。

2.1.2 畜禽粪便排放的空间分布

由于各市养殖结构差异,其畜禽粪便的产生量和粪便中养分排放量也随空间分布出现差异性。根据山东省2019年统计年鉴中畜禽的养殖量数据,对17地市畜禽粪便的排放量及养分供应量进行估算,结果如图2所示。

2018年全省产生的畜禽粪便总量以猪粪当量计为26 864.24万t, N的排放量为17 461.75万t, 主要来源于猪、牛和家禽粪便的供给, 分别占14.78%、13.50%和61.97%。其中潍坊市畜禽粪便排放量最高, 为4 007.49万t, 占全省总排放量的14.92%, 其次为临沂、德州、菏泽和聊城。从各市的养殖规模来看, 规模大的地区主要分布在鲁中南和鲁西南地区, 这与畜禽粪便的排放量相符, 莱芜市的养殖规模最小, 畜禽粪便的排放量仅占全省总排放量的1.08%。

2.2 畜禽粪便的环境效应

2.2.1 畜禽粪便的耕地负荷

根据公式(4)计算出2014—2018年山东省及不同地市畜禽粪便耕地负荷量的变化情况, 如图3所示。全省耕地猪粪当量的平均负荷量较为稳定, 在23.17~25.20 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间浮动。其中济南、淄博、枣庄、济宁、泰安呈现明显下降趋势, 而烟台、莱芜、临沂、聊城和菏泽等地则呈现逐年上升趋势。不同地区畜禽粪便耕地负荷量存在较大差异, 潍坊市耕地负荷量最高, 均值为37.39 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 比山东省平均负荷量高50%; 威海市耕地负荷量最低, 为21.29 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。这与当地的自然条件和经济发展水平密切相关^[14]。

参考山东省2019年统计年鉴^[3]及畜禽粪污土地

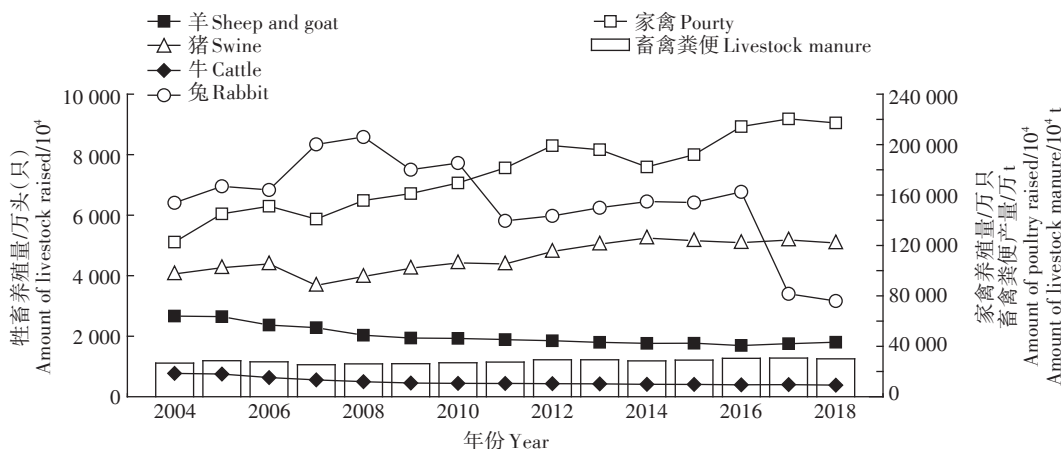


图1 2004—2018年山东省畜禽养殖量及畜禽粪便排放量(以猪粪当量计)

Figure 1 Amount of animals raised and the discharge amount of livestock manure (in terms of pig manure equivalent) in Shandong Province from 2004 to 2018

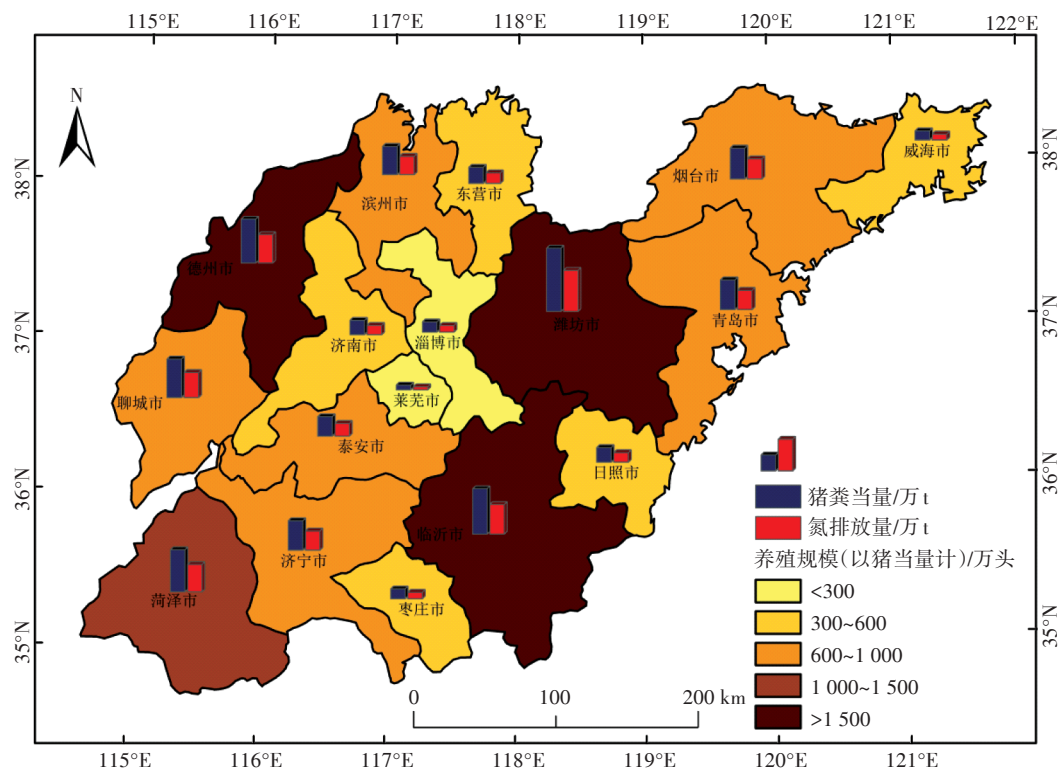


图2 2018年山东省各市畜禽粪便和氮的排放量

Figure 2 The discharge amount of livestock manure and nitrogen in Shandong Province in 2018

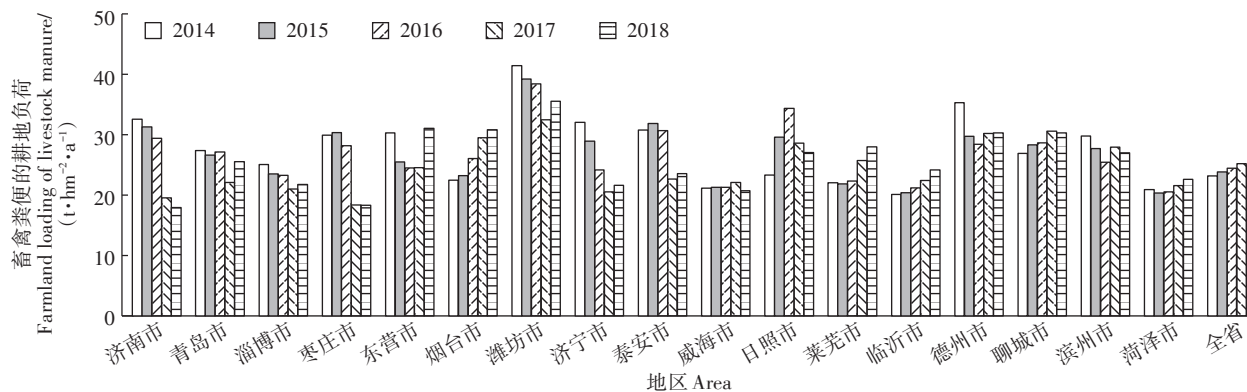


图3 2014—2018年山东省各地市猪粪当量负荷量的变化情况

Figure 3 The changes of equivalent loading amount of swine droppings in Shandong Province from 2014 to 2018

承载能力测算指南^[25],在仅考虑化肥形式的氮素输入和小麦、玉米轮作的种植结构条件下,根据公式(5)测算出山东省耕地猪粪当量最适负荷量为 $16.94 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,由于不同地区耕地差异性较大,种植结构和轮作制度也有较大差异,同时为了减少化肥的施用,将猪粪当量适宜施用范围以 $17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 为中心,减少 $1/3$ 为下限,增加 $1/3$ 为上限,故最适负荷量取值为 $11 \sim 23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。本研究结合前人的研究结果^[14],并考虑环境效益、经济效益和社会效益,将畜禽粪便作为肥料用于农田的最高施用量确定为 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

尽管不同地区畜禽养殖种类和区域条件存在差异,但从环境风险的角度出发,高于最高施用量可导致土壤养分过剩,产生环境污染风险。为了全面反映其土壤环境污染风险,采用风险指数(r)进行评价。根据预警分级标准^[4,6],当 $r \leq 0.4$ 时,表明该地区的畜禽粪便可以完全被农田环境所消纳和承载,对土壤环境没有威胁;随着 r 不断增大,畜禽粪便将会超过农田的可消纳量或承载程度,对土壤环境造成威胁的可能性就越大。由表3可知,2014—2018年全省的平均污染风险指数介于 $0.77 \sim 0.84$ 之间,预警级别为Ⅲ级,说

明这时段产生的畜禽粪便对耕地环境已经产生了一定的威胁。表3显示,截至2018年,仍有东营、烟台、潍坊、聊城和德州五个城市的预警级别为Ⅳ级,超过山东省平均水平。其中最为严重的是潍坊市,五年来的预警级别均达到Ⅳ级,远远超出山东省平均水平。综上,山东省畜禽粪便的耕地负荷总体处在Ⅲ级预警级别,说明畜禽粪便对山东省耕地产生了一定的污染风险,个别地区已经存在较严重的污染风险。

近些年来,山东省采取了一系列畜禽粪便综合利用措施,据2016年调查数据显示,73%的规模化养殖场采用干清粪的方式收集粪便,这为粪便的资源化利用创造了有利条件。全省对畜禽粪便的综合利用方式中,以就地还田、生产沼气和送往有机肥加工企业为主,其中就地还田占比最大,约为76%,有机肥生产企业加工处理约占5%,仍有约5%畜禽粪便未做任何处理^[9]。然而不论是经过堆肥处理、沼渣还田还是直接施用,畜禽粪便最终都需要一定的土地进行消纳。就目前各地市畜禽粪便产生量和耕地规模来看,东营、烟台、潍坊、聊城和德州五市依靠本市土地自行消

纳压力较大,可以考虑制成有机肥向外省市销售;此外,小型养殖场可依托本市畜禽养殖废弃物综合处置企业集中收集储存、运输和处理。然而,由于山东省畜禽粪便收集设施的不完善和资源化处置企业较少,畜禽粪便的收集能力与产生量相比缺口较大,资源化处理能力不足。因此,为保障山东省各地市畜禽粪便能够被安全消纳,最大限度地减少对生态环境的影响,需结合不同地市的实际情况进行畜禽养殖区域布局的调整优化,采取以地定畜、种养结合的养殖方式,建立种植和养殖的合理生态平衡。

2.2.2 畜禽粪便的水体污染负荷

等标污染负荷法通过计算将污染物全部稀释到水体中所需的介质质量即等标排放量来评价污染物对该地区水体的污染程度^[19]。

表4展示了2018年各地市畜禽粪便各污染物的排放量和等标排放量,由表4可知,潍坊市畜禽粪便中水体污染物排放量最高,COD、BOD、NH₃-N、TN、TP排放量分别为30.43万、27.78万、1.91万、6.17万t和3.30万t,排放量占全省总排放量的15.33%、

表3 2014—2018年山东省及各市农田负荷风险指数(*r*)和预警级别

Table 3 Environmental risk value(*r*) and risk level of livestock manure on farmland from 2014 to 2018

地区 Area	2014		2015		2016		2017		2018	
	<i>r</i>	预警级别 Risk level	<i>r</i>	预警级别 Risk level	<i>r</i>	预警级别 Risk level	<i>r</i>	预警级别 Risk level	<i>r</i>	预警级别 Risk level
济南市	1.08	Ⅳ	1.04	Ⅳ	0.98	Ⅲ	0.65	Ⅱ	0.60	Ⅱ
青岛市	0.91	Ⅲ	0.89	Ⅲ	0.90	Ⅲ	0.74	Ⅲ	0.85	Ⅲ
淄博市	0.83	Ⅲ	0.78	Ⅲ	0.78	Ⅲ	0.70	Ⅱ	0.72	Ⅲ
枣庄市	1.00	Ⅲ	1.01	Ⅳ	0.94	Ⅲ	0.61	Ⅱ	0.61	Ⅱ
东营市	1.01	Ⅳ	0.85	Ⅲ	0.82	Ⅲ	0.82	Ⅲ	1.04	Ⅳ
烟台市	0.75	Ⅲ	0.77	Ⅲ	0.87	Ⅲ	0.98	Ⅲ	1.03	Ⅳ
潍坊市	1.38	Ⅳ	1.31	Ⅳ	1.28	Ⅳ	1.08	Ⅳ	1.18	Ⅳ
济宁市	1.07	Ⅳ	0.96	Ⅲ	0.81	Ⅲ	0.68	Ⅱ	0.72	Ⅲ
泰安市	1.02	Ⅳ	1.06	Ⅳ	1.02	Ⅳ	0.76	Ⅲ	0.78	Ⅲ
威海市	0.70	Ⅱ	0.71	Ⅲ	0.71	Ⅲ	0.74	Ⅲ	0.69	Ⅲ
日照市	0.78	Ⅲ	0.99	Ⅲ	1.14	Ⅳ	0.95	Ⅲ	0.90	Ⅲ
莱芜市	0.73	Ⅲ	0.73	Ⅲ	0.74	Ⅲ	0.86	Ⅲ	0.93	Ⅲ
临沂市	0.67	Ⅱ	0.68	Ⅱ	0.71	Ⅲ	0.75	Ⅲ	0.81	Ⅲ
德州市	1.18	Ⅳ	0.99	Ⅲ	0.95	Ⅲ	1.01	Ⅳ	1.01	Ⅳ
聊城市	0.90	Ⅲ	0.94	Ⅲ	0.95	Ⅲ	1.02	Ⅳ	1.01	Ⅳ
滨州市	0.99	Ⅲ	0.92	Ⅲ	0.85	Ⅲ	0.93	Ⅲ	0.90	Ⅲ
菏泽市	0.70	Ⅱ	0.68	Ⅱ	0.68	Ⅱ	0.72	Ⅲ	0.75	Ⅲ
全省	0.77	Ⅲ	0.79	Ⅲ	0.81	Ⅲ	0.84	Ⅲ	0.83	Ⅲ

注:0<*r*≤0.4,为Ⅰ级,表示无污染风险;0.4<*r*≤0.7,为Ⅱ级,表示稍有污染风险;0.7<*r*≤1.0,为Ⅲ级,表示有污染风险;1.0<*r*≤1.5,为Ⅳ级,表示有较严重的污染风险;1.5<*r*≤2.5,为Ⅴ级,表示有严重的污染风险;*r*>2.5,为Ⅵ级,表示有很严重的污染风险。

Notes: 0<*r*≤0.4, Grade I, naught pollution; 0.4<*r*≤0.7, Grade II, a little pollution; 0.7<*r*≤1.0, Grade III, polluted area; 1.0<*r*≤1.5, Grade IV, relatively serious pollution; 1.5<*r*≤2.5, Grade V, serious pollution; *r*>2.5, Grade VI, extremely serious pollution.

15.36%、14.08%、14.50%和16.39%,对应的等标排放量也是全省最高,这与该地区的养殖情况相符;其次为临沂、德州、菏泽和聊城。然而,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总量密切相关。

2014—2018年山东省及各地市畜禽粪便污染对水体的等标污染指数和扩散浓度如图4所示。山东省畜禽粪便对水体的污染总体呈下降趋势,全省平均水体等标污染指数由9.26逐渐降低为4.46,其中青岛、东营、潍坊、德州和滨州市趋势最为明显。参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中相应水质分级标准,及宋大平等^[6]的研究中的预警分级标准,得出山东省总体水体污染负荷预警级别由Ⅱ级降为Ⅰ级,对水体基本无污染。2014年东营市水体等标污染指数最高,为38.37,扩散浓度为 $65.29\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其次为德州、潍坊和滨州,等标污染指数均高于25;2015—2017年情况逐渐好转,截至2018年,山东省及各地市水体的等标污染指数最高为11.08,出现在聊城市,扩散浓度为 $17.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,预警级别为Ⅲ级,其次为德州、菏泽,其他地市的等标污染指数均低于6。值得注意的是,在全省水体等标污染指数和扩散浓度呈降低走势时,聊城市污染指数却呈反复波动状态,其2018年等标污染指数和扩散浓度分别为全省平均

水平的2.5倍和2.3倍,应加强该地区养殖业,尤其是高污染、高负荷县域养殖业的管理。

2.3 单位耕地面积畜禽适宜承载量

尽管畜牧业生产规模的扩大一定程度上是当前中国畜牧业发展的必要条件,然而规模发展必须适度,以免引起严重的环境问题^[7]。种养结合是实现畜牧业规模有度扩大的最佳方式,种养结合的原则是根据农田有机肥的消纳量来决定当地畜禽的养殖量,且不会产生畜禽粪便的大量盈余,从而减少各种环境问题。本研究依据每头(只)畜禽每年产生的畜禽粪便量及猪粪当量的换算系数,估算每头(只)畜禽每年畜禽粪便产生量的猪粪当量,根据上文计算得到的山东省每公顷耕地猪粪当量的承载量不宜超过 $23\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 的结果,估算每公顷耕地每年各类畜禽的最高承载数量(表5)。统一换算为猪当量,每公顷耕地中每年畜禽的最高承载量为17头。根据山东省2018年的耕地面积,估算得出山东省2018年畜禽的最高承载数量为12 873万头。

3 结论

(1)按照畜禽粪便就地还田的利用方式进行农田负荷量的计算,发现2014—2018年山东省畜禽粪便猪粪当量的耕地负荷量较为稳定,在 $23.17\sim 25.20\text{ t}\cdot$

表4 2018年山东省畜禽粪便各污染物的排放量及等标排放量

Table 4 Pollutants and equal-standard discharge amounts in Shandong Province in 2018

地区 Area	排放量/万t Pollutant discharge amount/ 10^4 t					等标排放量/亿 m^3 Equal-standard discharge amount/ 10^8 m^3				
	COD	BOD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP	COD	BOD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP
济南市	6.87	6.21	0.52	1.53	0.62	3.43	15.52	5.16	15.30	30.91
青岛市	13.75	12.40	0.89	2.83	1.45	6.88	30.99	8.93	28.31	72.66
淄博市	4.45	3.92	0.32	1.00	0.45	2.22	9.81	3.17	10.04	22.48
枣庄市	4.33	4.02	0.29	0.95	0.47	2.16	10.06	2.85	9.48	23.56
东营市	7.00	6.19	0.47	1.61	0.78	3.50	15.49	4.73	16.07	39.17
烟台市	15.51	14.33	0.99	3.06	1.61	7.75	35.82	9.86	30.57	80.30
潍坊市	30.43	27.78	1.91	6.17	3.30	15.22	69.44	19.14	61.67	164.89
济宁市	13.32	12.42	0.91	2.82	1.33	6.66	31.06	9.08	28.18	66.36
泰安市	9.21	8.47	0.62	1.96	0.94	4.60	21.18	6.21	19.57	47.08
威海市	4.63	4.30	0.29	0.89	0.48	2.32	10.76	2.92	8.93	23.79
日照市	6.89	6.36	0.44	1.39	0.72	3.45	15.90	4.42	13.94	36.20
莱芜市	2.08	1.94	0.14	0.44	0.22	1.04	4.84	1.35	4.38	11.10
临沂市	22.37	21.15	1.46	4.45	2.23	11.19	52.87	14.60	44.51	111.69
德州市	21.92	19.64	1.65	4.67	1.88	10.96	49.10	16.45	46.75	93.82
聊城市	17.10	15.22	1.08	3.71	1.98	8.55	38.06	10.80	37.06	98.78
滨州市	12.77	11.09	0.92	2.86	1.27	6.38	27.72	9.20	28.65	63.37
菏泽市	18.37	17.00	1.28	4.34	2.01	9.18	42.49	12.76	43.39	100.31
全省总计	198.52	180.90	13.57	42.56	20.14	99.26	452.24	135.66	425.56	1 007.25

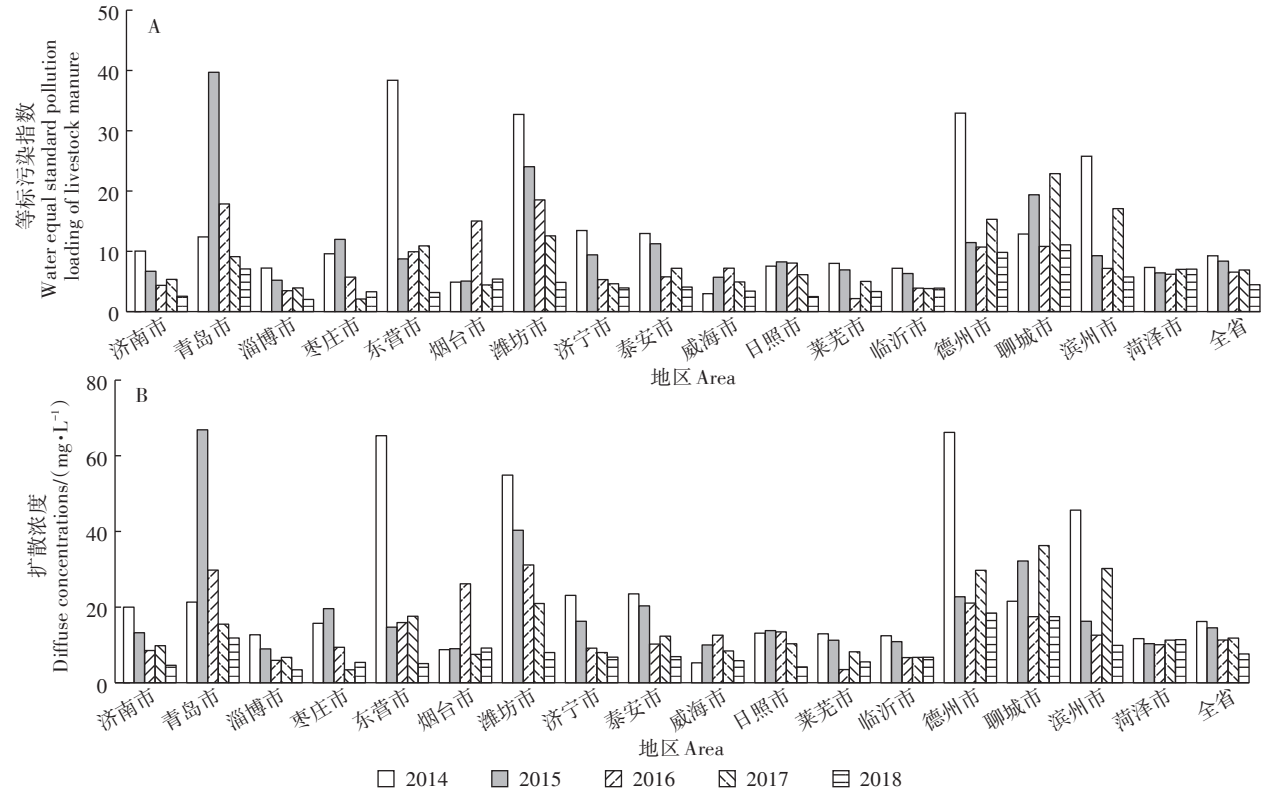


图4 2014—2018年山东省各地市水体的等标污染指数及扩散浓度

Figure 4 Water equal standard pollution loading of livestock manure and diffuse concentration in Shandong Province from 2014 to 2018

表5 每公顷耕地每年可承载的最高畜禽数量
Table 5 The maximum bearing capacity of livestock and poultry per hectare per year

猪/头 Swine/Head	牛/头 Cattle/Head	羊/只 Sheep and goat/Head	家禽/只 Poultry/Head	兔/只 Rabbit/Head
17	3	20	288	142

hm⁻²·a⁻¹之间浮动,对应的耕地污染风险指数介于0.77~0.84之间,预警级别为Ⅲ级。其中潍坊市的猪粪当量负荷量最高,均值为37.39 t·hm⁻²·a⁻¹,威海市最低,为21.29 t·hm⁻²·a⁻¹。截至2018年,东营、烟台、潍坊、聊城和德州五市的耕地污染预警级别为Ⅳ级,超过山东省平均水平,其中潍坊市的耕地污染风险指数最高。说明畜禽粪便对山东省不同地市的土壤环境均有不同程度的污染风险,需要采取措施加以控制。

(2)与耕地污染不同,2014—2018年山东省畜禽粪便对水体的污染风险总体呈下降趋势,其中青岛、东营、潍坊、德州和滨州市降幅最为明显,但仍有部分地区污染风险处于相对较高的水平,如聊城市2018年水体的等标污染指数全省最高,为11.08,预警级别为Ⅲ级,这需要引起高度重视,并采取强有力措施防控畜禽粪便污染,以防水体水质恶化。

(3)依据土壤养分平衡理论和山东省耕地面积,

估算得到2018年山东省畜禽的最高承载数量(以猪当量计)为12 873万头。

参考文献:

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAO statistical database[EB/OL] (2015). [2020-10-13]. <https://www.fao.org/statistics/zh/>.
[2] 国家统计局. 中国统计年鉴 1984—2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 1984—2019. National Bureau of Statistics. Statistics yearbook of China 1984—2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 1984—2019.
[3] 山东省统计局. 山东统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. Statistical Bureau of Shandong Province. Statistical yearbook of Shandong Province 2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
[4] 易秀, 叶凌枫, 刘意竹, 等. 陕西省畜禽粪便负荷量估算及环境承受程度风险评价[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 205-210. YI X, YE L F, LIU Y Z, et al. Estimations of livestock manure load and risk assessment of environmental tolerance in Shaanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 205-210.
[5] TAMMINGA S. Pollution due to nutrient losses and its control in Euro-

- pean animal production[J]. *Livestock Production Science*, 2003, 84(2): 101-111.
- [6] 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.
- [7] WANG X L, WU X, YAN P, et al. Integrated analysis on economic and environmental consequences of livestock husbandry on different scale in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 119: 1-12.
- [8] GERBER P, CHILONDA P, FRANCESCHINI G, et al. Geographical determinants and environmental implications of livestock production intensification in Asia[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(2): 263-276.
- [9] 孙晨曦, 彭岩波, 谢刚. 山东省畜禽养殖环境污染现状调查研究[J]. *山东农业科学*, 2017, 49(8): 155-159. SUN C X, PENG Y B, XIE G. Investigation and study on present status of livestock and poultry pollution in Shandong Province[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2017, 49(8): 155-159.
- [10] 侯世忠, 张淑二, 战汪涛, 等. 山东畜禽粪便产生量估算及其环境效应研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(S2): 78-81. HOU S Z, ZHANG S E, ZHAN W T, et al. Estimated yield and environment effect of dung produced by poultry and livestock in Shandong Province[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(S2): 78-81.
- [11] 郑莉, 张晴雯, 张爱平, 等. 山东省畜禽粪污土地承载力时空分异特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(4): 882-891. ZHENG L, ZHANG Q W, ZHANG A P, et al. The spatial and temporal distribution features of the land bearing capacity for livestock manure in Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 882-891.
- [12] 张羽飞, 邵蕾, 冷淞凝, 等. 山东省畜禽粪便资源评估及肥料化与能源化利用潜力分析[J]. *中国沼气*, 2019, 37(3): 93-99. ZHANG Y F, SHAO L, LENG S N, et al. Assessment of livestock and poultry excrement resources in Shandong and its fertilizer and energy utilization potential[J]. *China Biogas*, 2019, 37(3): 93-99.
- [13] 山东省统计局. 山东统计年鉴 2005—2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005—2018. Statistical Bureau of Shandong Province. Statistical yearbook of Shandong Province 2005—2018[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005—2018.
- [14] 张绪美, 董元华, 王辉, 等. 中国畜禽养殖结构及其粪便N污染负荷特征分析[J]. *环境科学*, 2007, 28(6): 1311-1318. ZHANG X M, DONG Y H, WANG H, et al. Structure of livestock and variation of fecal nitrogen pollution load in China[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(6): 1311-1318.
- [15] 刘培芳, 陈振楼, 许世远, 等. 长江三角洲城郊畜禽粪便的污染负荷及其防治对策[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(5): 456-460. LIU P F, CHEN Z L, XU S Y, et al. Waste loading and treatment strategies on the excreta of domestic animals in the Yangtze Delta[J]. *Resources and Environment in Yangtze Basin*, 2002, 11(5): 456-460.
- [16] 张敏, 刘庆玉, 陈东雨, 等. 沈阳地区畜禽养殖粪便污染物的环境压力及风险评价[J]. *沈阳农业大学学报*, 2009, 40(6): 698-702. ZHANG M, LIU Q Y, CHEN D Y, et al. Environmental pressure of contamination from livestock and poultry and its risk assessment in Shenyang[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2009, 40(6): 698-702.
- [17] 李庆康, 吴雷, 刘海琴, 等. 我国集约化畜禽养殖场粪便处理利用现状及展望[J]. *农业环境保护*, 2000, 19(4): 251-254. LI Q K, WU L, LIU H Q, et al. The status and outlook of treatment on excreta from intensive animal farming in China[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(4): 251-254.
- [18] 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. Department of Natural and Ecological Conservation, State Environmental Protection Administration. Investigation on pollution of large-scale livestock and poultry industries in China and countermeasures[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [19] 张从. 环境评价教程[M]. 北京: 环境科学出版社, 2008. ZHANG C. Environmental assessment course[M]. Beijing: Environmental Science Press, 2008.
- [20] 黄沈发, 陈长虹. 黄浦江上游汇水区禽畜业污染及其防治对策[J]. *上海环境科学*, 1994, 13(5): 4-8. HUANG S F, CHEN C H. Animal husbandry pollution and its harness countermeasure in upper catchment of Huangpu River[J]. *Shanghai Environmental Science*, 1994, 13(5): 4-8.
- [21] 马林, 王方浩, 马文奇, 等. 中国东北地区中长期畜禽粪尿资源与污染潜势估算[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 170-174. MA L, WANG F H, MA W Q, et al. Assessments of the production of animal manure and its contribution to eutrophication in northeast China for middle and long period[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(8): 170-174.
- [22] 沈根祥, 汪雅谷. 上海市郊农田畜禽粪便负荷量及其警报与分级[J]. *上海农业学报*, 1994, 10(增刊): 6-11. SHEN G X, WANG Y G. Loading amounts of animal feces and their alarming values and classification grades in Shanghai suburbs[J]. *Acta Agriculture Shanghai*, 1994, 10(Suppl): 6-11.
- [23] 杨国义, 夏钟文, 李芳柏, 等. 不同通风方式对猪粪高温堆肥氮素和碳素变化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(4): 463-467. YANG G Y, XIA Z W, LI F B, et al. Transformation of nitrogen and carbon during pig manure composting under different aeration modes at high-temperature[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(4): 463-467.
- [24] 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. JIA W. Studies on the evaluation of nutrient resources derived from manure and optimized utilization in arable land of China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [25] 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. National Association for Animal Husbandry Waste Utilization of Science and Technology Innovation. Technical guidelines for measuring land bearing capacity[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017.