

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 Li, ZHANG Qing-wen, ZHANG Ai-ping, 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.

山东省畜禽粪污土地承载力时空分异特征分析

郑莉¹, 张晴雯^{1*}, 张爱平¹, 刘杏认¹, 刘士清², 韩聪²

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 滨州市污染物排放总量控制办公室, 山东 滨州 256600)

摘要: 探明山东省畜禽粪污资源的空间分布以及近十年畜禽粪污土地承载力变化情况, 为合理利用畜禽粪污资源、优化畜禽养殖结构、推动种养结合的绿色农业发展提供参考。通过文献调研与相关数据资料收集, 量化分析山东省作物粪污养分需求量、畜禽粪污养分供应量, 将不同畜种产生的畜禽粪便量统一换算为猪粪当量, 计算各市畜禽粪污土地承载力指数(I), 分析山东省畜禽粪污土地承载力的时空变化特征。山东省畜禽养殖环境承载潜力存在明显的时空变异性。从空间上来看, 各市畜禽粪便污染风险存在明显差异, 其中青岛、淄博、聊城、菏泽以N、P为基准的 I 值均小于1, 土地消纳畜禽粪污不超载。济南、枣庄、烟台、泰安、威海、日照、莱芜、临沂、德州以N、P为基准的 I 值均大于1, 畜禽粪污量超过了农田的承受能力, 农田畜禽污染风险较大, 尤其是莱芜市以N、P为基准的土地承载力指数 I 分别为2.14和2.36, 农田畜禽污染风险较大, 养分的大量盈余可能会造成农田N、P污染。从时间上来看, 近十年山东省养殖规模总体呈上升趋势, 从7042万头增加到8401万头, 尤其在2009年至2012年间迅速增加, 增幅达13.3%。植物对粪污N、P养分的需求量呈逐年上升趋势, 分别增长了10.6%、13.1%。畜禽粪污N、P养分供应量呈现上升趋势, 增幅分别为8.9%、2.9%。2016年山东省畜禽养殖环境承载潜力以N、P为基准分别可达8576万、9809万头, 均高于实际养殖规模(8401万头)。山东省以N、P为基准的畜禽粪污土地承载力指数 I 均呈波动下降趋势。山东省畜禽养殖主要集中在鲁西南、鲁中南、以及德州、潍坊等区域, 其中济南、枣庄、烟台、泰安、威海、日照、莱芜、临沂、德州畜禽粪污量超过了农田的承受能力, 有潜在的N、P污染风险。从以N、P为基准的畜禽粪污土地承载力指数 I 来看, 山东省农田对畜禽粪便仍具有一定的消纳空间。

关键词: 畜禽粪污; 土地承载力; 时空分布; 山东

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)04-0882-10 doi:10.11654/jaes.2018-0863

The spatial and temporal distribution features of the land bearing capacity for livestock manure in Shandong Province, China

ZHENG Li¹, ZHANG Qing-wen^{1*}, ZHANG Ai-ping¹, LIU Xing-ren¹, LIU Shi-qing², HAN Cong²

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China; 2. The Office of Binzhou Pollutant Emission Control, Binzhou 256600, China)

Abstract: This research aims to investigate the spatial distribution of livestock and poultry manure resources and the changes in land bearing capacity for livestock and poultry manure over the past decade in Shandong Province. The objectives are to provide scientific information for rational utilization of livestock and poultry feces resources, optimize the structure of livestock breeding, and promote the development of green agriculture combined with planting and breeding. Based on a literature review and official statistical data collection, we quantified crop nutrient demands and nutrient supply from livestock manure. By converting the animal manure produced from different livestock species into pig equivalent to obtain an index of land bearing capacity for livestock and poultry manure, we analyzed the temporal and spatial characteristics of the land bearing capacity for livestock and poultry manure. The results showed that there were significant spatial and temporal variations in the distribution of land bearing capacity for livestock manure in Shandong Province. As for the spatial characteristics, the

收稿日期: 2018-07-06 录用日期: 2018-08-14

作者简介: 郑莉(1995—), 女, 四川眉山人, 硕士研究生, 从事土壤学研究。E-mail: zhengliswu@163.com

*通信作者: 张晴雯 E-mail: zhangqingwen@caas.cn

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07203-007)

Project supported: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China for Water Pollution Control and Treatment(2015ZX07203-007)

pollution risks of livestock and poultry manure in different districts were quite different; the values of I for N and P were all less than 1 in the cities of Qingdao, Zibo, Liaocheng, and Heze, thereby indicating that the land consumption of livestock and poultry manure was not overloaded in these cities. The values of I for N and P in the cities of Jinan, Zaozhuang, Yantai, Tai'an, Weihai, Rizhao, Laiwu, Linyi, and Dezhou were all greater than 1. The higher values of I for N and P in these areas revealed that the livestock and poultry manure exceeded the farmland's bearing capacity and that high risks of livestock and poultry manure pollution existed. In particular, the I values for N and P in Laiwu City were 2.14 and 2.36, respectively, thereby showing a high risk of pollution in farmlands. The large surplus of nutrients from livestock and poultry manure greatly exceeded the carrying capacity of agricultural land and would result in N and P pollution. From a time series perspective, the overall breeding scale had generally increased in Shandong Province in the past ten years, and had increased from 7.042×10^7 to 8.401×10^7 pigs. Especially from 2009 to 2012, the overall scale increased greatly by 13.3%. The crop demands of N and P nutrients from manure increased each year by an overall increment of 10.6% and 13.1%, respectively. The N and P nutrient supplies from livestock and poultry manure showed an increasing trend with increments of 8.9% and 2.9%, respectively. In 2016, the land bearing capacity for livestock and poultry manure in Shandong Province reached 8.58×10^7 and 9.81×10^7 pig equivalent for N and P, respectively, which were higher than the actual breeding scale of 8.40×10^7 pig equivalent. The I index of land bearing capacity based on the N and P contents of livestock and poultry manure in Shandong Province showed a decreasing trend. The livestock and poultry breeding industries in Shandong Province are mainly distributed in the regions of Dezhou and Weifang in the southwest and middle-south of Shandong Province. The livestock and poultry manure of the cities of Jinan, Zaozhuang, Yantai, Tai'an, Weihai, Rizhao, Laiwu, Linyi, and Dezhou all exceed the farmland's bearing capacity. These areas have a potential risk of N and P pollution. Based on the values of the index of land bearing capacity for livestock and poultry manure, there is still potential for farmland to dispose of livestock and poultry manure in some cities of Shandong Province.

Keywords: livestock and poultry manure; land bearing capacity; spatial and temporal distribution; Shandong Province

畜牧业是农业甚至整个国民经济的重要组成部分^[1]。然而,随着近年来畜牧业特别是规模化养殖业的迅猛发展,由畜禽养殖带来的环境污染问题日益显现^[2]。2010年国家统计局发布第一次全国污染源普查公报,其中对畜禽养殖业196万个对象进行普查,数据显示畜禽养殖业产生粪便约2.43亿t,尿液约1.63亿t。主要水污染物排放化学需氧量1268.26万t,总氮102.48万t,总磷16.04万t,占全国排放总量的37.90%、21.67%和41.87%^[3]。畜禽养殖业成为环境污染的主要来源之一^[4]。高投入、高消耗、高污染的畜牧业发展方式不仅严重影响了我国生态环境质量,还限制了畜牧业的可持续发展。种养结合模式将作物种植与畜禽养殖结合在一起,两者的协同效应可以促进农作物增产,提高畜禽粪污资源利用率,促进农业可持续发展^[5]。种养结合模式有望成为禽畜养殖业粪污处理未来的发展方向^[6],但畜禽粪污养分产生量与农田消纳量是否匹配影响了养殖业的可持续发展。分析评价畜禽粪污有效N、P养分量和作物N、P养分需求之间匹配关系对减少污染实现可持续农业具有重要意义^[7]。

山东省是我国农业大省,粮食主产区之一,其畜牧产业规模多年位居全国第一。孙晨曦等^[8]通过计算山东省各市畜禽养殖COD、氨氮的排放量,评价了山东省畜禽粪污环境污染现状,杨军香等^[9]以山东省

统计数据为例,确定了不同种植模式下的土地适宜载畜量,吴金欣等^[10]以资源利用最大化和环境影响最小化原则,分析了山东省种植与养殖结构优化配置量化关系,但是均未进行时空演变特征的比较和分析。由于养殖结构以及粪污收集处理方式的差异,不同区域和不同时期畜禽粪便的产生量不一致,对环境的污染存在差异,这也就产生了畜禽粪便的时间和空间分布差异^[11]。因此,有必要摸清不同时期山东省各市畜禽粪尿及其养分资源量的分布特征和变化规律,旨在为畜禽粪尿养分资源利用提供数据支撑。

目前国内对于畜禽养殖量较大区域的农田畜禽粪便环境承载力的评估已有较多研究,多采用负荷警报值分级^[12-14]、灰色预测模型对畜禽养殖环境承载力进行评估^[15-17]。为推进畜禽粪污资源化利用,优化调整畜牧业区域布局,促进农牧结合、种养循环农业发展,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。本文在结合前人研究的基础上,结合山东省的实际情况,时间分布选取近十年山东省年鉴数据,空间分布选取山东省2017年分市年鉴数据,对畜禽粪便养分供给量、植物粪污养分需求量进行核算,采用畜禽粪污土地承载力指数对各区域农田畜禽粪污负荷进行评估,分析山东省不同时间不同区域畜禽粪便年排放量及负荷的差异,并进行分析比较,揭示不同

区域的畜禽粪便负荷与污染特征及其动态变化规律,为优化畜禽养殖结构,推动区域畜禽养殖绿色发展,实现农业可持续发展提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 农作物粪污养分需求量

农作物种类、播种面积、产量来自于山东省2017年统计年鉴^[18]。每100 kg产量N、P养分的需求量参考《土地承载力测算技术指南》^[19](表1)。

山东省区域植物氮(磷)养分需求总量计算公式如下:

$$A_{n,i} = \sum (P_{r,i} \times Q_i \times 10^{-2}) + \sum (A_{t,j} \times Q_j \times 10^{-3}) \quad (1)$$

式中: $A_{n,i}$ 代表区域内植物氮(磷)养分需求总量, $t \cdot a^{-1}$; $P_{r,i}$ 代表区域内第*i*种作物总产量, $t \cdot a^{-1}$; Q_i 代表区域内第*i*种作物的100 kg收获物需氮(磷)量,kg; $A_{t,j}$ 代表区域内第*j*种人工林地总的种植面积, hm^2 ; Q_j 代表区域内第*j*种人工林地的单位面积年生长量需要吸收的氮(磷)养分量, $kg \cdot hm^{-2}$ 。

植物的粪污养分需求量按公式(2)计算。

$$A_{n,m} = \frac{A_{n,i} \times FP \times MP}{MR} \quad (2)$$

式中: $A_{n,m}$ 代表区域内植物粪污养分需求量, $t \cdot a^{-1}$; $A_{n,i}$ 代表区域内植物氮(磷)养分需求量, $t \cdot a^{-1}$; FP 代表作物总养分需求中施肥供给养分占比,%; MP 代表农田施肥管理中,畜禽粪污养分需求量占施肥养分总量的比例,%; MR 代表粪污当季利用率,%。粪污N素利用率25%~30%,P素当季利用率30%~35%。

根据山东土壤养分特征(表2)和表3,确定土壤N、P养分分级为I级,施肥供给占比为35%。有机肥与化肥配比按25%计算^[20]。粪污N、P素当季利用率参考《土地承载力测算技术指南》分别取30%、35%。

1.2 畜禽粪污总养分供给量

山东省畜禽数量数据来源于2017年山东省统计年鉴^[18]、中国统计年鉴(2008—2017)^[21]、中国畜牧业年鉴(2008—2017)^[22],畜禽种类主要包括猪、奶牛、肉

表1 山东省主要作物产量及形成100 kg产量吸收的氮、磷、钾养分量

Table 1 Main crop yields in Shandong Province and nitrogen, phosphorus and potassium nutrients absorbed by 100 kg production

作物种类		播种面积/ 万 hm^2	总产量/ 万 t	100 kg产量移走氮量/ $kg \cdot 100 kg^{-1}$	100 kg产量移走磷量/ $kg \cdot 100 kg^{-1}$	全年氮 移走量/t	全年磷 移走量/t
粮食作物	水稻	105 760	880 800	2.2	0.8	19 377.6	7 046.4
	小麦	3 830 270	23 445 900	3	1	703 377	234 459
	玉米	3 206 930	20 649 500	2.3	0.3	474 938.5	61 948.5
	谷子	17 950	57 100	3.8	0.44	2 169.8	251.2
	高粱	4 170	13 100	2.29	0.61	300	79.9
	大豆	132 680	357 200	7.2	0.748	25 718.4	2 671.9
	薯类	201 400	1 571 500	0.445	0.1	6 993.2	1 571.5
	其他	1 793	6 600	2.43	1.17	160.4	77.2
油料作物	花生	739 740	3 215 552	7.19	0.887	231 198.2	28 522
	油菜籽	8935	22 980	4.3	2.7	988.1	620.5
	其他油料作物	691	1 258	5.19	1.9	65.3	24
棉花		465 200	548 000	11.7	3.04	64 116	16 659.2
麻类		152	420	3.5	0.369	14.7	1.5
甜菜		13	182	0.48	0.062	0.9	0.1
烟叶		24 702	66 067	3.85	1.21	2 543.6	799.4
蔬菜及食用菌		1 869 266	103 270 481	0.432	0.142	446 128.5	146 644.1
瓜果类		286 716	15 268 916	0.495	0.295	75 581.1	45 043.3

表2 山东省耕地土壤养分特征

Table 2 Characteristics of soil nutrients of arable land in Shandong Province

有机质/ $g \cdot kg^{-1}$	全氮/ $g \cdot kg^{-1}$	全磷/ $g \cdot kg^{-1}$	全钾/ $g \cdot kg^{-1}$	碱解氮/ $mg \cdot kg^{-1}$	有效磷/ $mg \cdot kg^{-1}$	速效钾/ $mg \cdot kg^{-1}$	缓效钾/ $mg \cdot kg^{-1}$
15.00	1.02	0.64	13.30	121.90	49.80	152.00	682.00

注:数据来自于2016年山东省耕地质量监测报告。

Note: The data came from 2016 Shandong Province arable land quality monitoring report.

表3 土壤不同N、P养分水平下施肥供给养分占比推荐值

Table 3 The nutrient proportion of fertilizing under different nitrogen and phosphorus nutrient levels in soil

项目	土壤N、P分级		
	I	II	III
施肥供给占比/%	35	45	55
土壤全氮含量/g·kg ⁻¹			
旱地(大田作物)	> 1.0	0.8~1.0	< 0.8
水田	> 1.2	1.0~1.2	< 1.0
菜地	> 1.2	1.0~1.2	< 1.0
果园	> 1.0	0.8~1.0	< 0.8
土壤有效磷含量/mg·kg ⁻¹	> 40	20~40	< 20

注:表中数据来源于《土地承载力测算技术指南》^[19]。

Note: The data in the table refers to *The technical guide to land carrying capacity*^[19].

牛、山羊、绵羊、家禽、兔。不同畜禽的N、P日排泄量参考《土地承载力测算技术指南》(表4)。

畜禽粪便养分产量按公式(3)计算:

$$Q_{r,p} = \sum Q_{r,p,i} = \sum AP_{r,i} \times MP_{r,i} \times 365 \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中: $Q_{r,p}$ 代表区域内畜禽粪便养分产生量, $t \cdot a^{-1}$; $Q_{r,p,i}$ 代表区域内第 i 种畜禽粪便养分产生量, $t \cdot a^{-1}$; $AP_{r,i}$ 代表区域内第 i 种动物年均存栏量, 头(只); $MP_{r,i}$ 代表第 i 种动物粪便中N、P的日产生量, $g \cdot d^{-1} \cdot \text{头}^{-1}$ 。

畜禽粪污养分收集量按公式(4)计算:

$$Q_{r,c} = \sum Q_{r,c,i} = \sum \sum Q_{r,p,i} \times PC_{i,j} \times PL_j \quad (4)$$

式中: $Q_{r,c}$ 代表区域内畜禽粪污养分收集量, $t \cdot a^{-1}$; $Q_{r,c,i}$ 代表区域内第 i 种畜禽粪污养分收集量, $t \cdot a^{-1}$; $Q_{r,p,i}$ 代表区域内第 i 种畜禽粪污养分产生量, $t \cdot a^{-1}$;

$PC_{i,j}$ 代表区域内第 i 种动物在第 j 种清粪方式所占比例, %; PL_j 代表第 j 种清粪方式氮(磷)养分收集率, %, 见表5。

不同清粪比例按全国的干清粪占72%, 水冲清粪占28%^[24]。

不同畜禽粪污的处理方式N、P养分留存率参考《土地承载力测算技术指南》, 见表6。

畜禽粪污总养分供给量按公式(5)计算。

$$Q_{r,Tr} = \sum Q_{r,Tr,i} = \sum \sum Q_{r,c,i} \times PC_{i,k} \times PL_k \quad (5)$$

式中: $Q_{r,Tr}$ 代表区域内畜禽粪污处理后养分供给量, $t \cdot a^{-1}$; $Q_{r,Tr,i}$ 代表区域内第 i 种畜禽粪污处理后养分供给量, $t \cdot a^{-1}$; $PC_{i,k}$ 代表区域内第 i 种动物在第 k 种处理方式所占比例, %; PL_k 代表第 k 种处理方式氮(磷)养分留存率, %。

不同畜禽粪污处理方式按全国厌氧发酵占7%, 固体贮存占92%, 堆肥占1%计算^[25]。

1.3 区域畜禽粪污土地承载力

将山东省的总粪污养分供给量按公式(6)折算成单位猪当量养分供给量。

$$NS_{r,a} = \frac{Q_{r,Tr} \times 1000}{A} \quad (6)$$

式中: $NS_{r,a}$ 代表单位猪当量粪污养分供给量, $kg \cdot \text{猪当量}^{-1} \cdot a^{-1}$; $Q_{r,Tr}$ 代表区域内畜禽粪污总养分供给量, $t \cdot a^{-1}$; A 代表区域内饲养的各种动物根据猪当量换算系数, 折算成猪当量的饲养总量, 猪当量。

将不同的畜禽换算成猪当量, 1头猪按存栏量折算: 100头猪相当于15头奶牛、30头肉牛、250只羊、

表4 2016年山东省不同畜禽(不区分畜禽生长阶段)的

日排泄N、P量

Table 4 Daily excretion of nitrogen and phosphorus of different livestock and poultry in Shandong Province (Does not differentiate livestock and poultry growth stages)

动物	年存栏量/ 万头(只)	日排泄氮量/ g·头(只) ⁻¹ ·d ⁻¹	日排泄磷量/ g·头(只) ⁻¹ ·d ⁻¹
猪	2 764.09	30	4.5
奶牛	129.3	196	32
肉牛	366.3	109	14
山羊	1 173.85	11.3	2.35
绵羊	1 023.8	12.2	0.92
家禽	65 733.46	1.2	0.18
兔	2 741.8	9.45	1.87

注:兔的日排泄N、P量数据来源于文献[23]。

Note: The data on rabbits' daily excretion of nitrogen and phosphorus was taken from literature[23].

表5 不同畜禽粪污收集工艺的N、P收集率(%)

Table 5 Nitrogen and phosphorus collection rate of different livestock manure collection methods(%)

清粪方式	氮收集率	磷收集率
干清粪	88	95
水冲清粪	87	95

注:表中数据来源于《土地承载力测算技术指南》^[19]。

Note: The data in the table refers to *The technical guide to land carrying capacity*^[19].

表6 不同畜禽粪污的处理方式N、P养分留存率(%)

Table 6 Nitrogen and phosphorus retention rate of different livestock manure treatments(%)

处理方式	氮留存率	磷留存率
厌氧发酵	95	75
固体贮存	63.5	80
堆肥	68.5	76.5

2500只家禽^[26],1头猪相当于60只兔^[27]。

区域畜禽粪污土地承载力按公式(7)计算,得到山东省理论最大养殖量(以猪当量计)。

$$R = \frac{NU_{r,m}}{NS_{r,a}} \quad (7)$$

式中: R 代表区域畜禽以作物粪污养分需求为基础的最大养殖量,猪当量; $NU_{r,m}$ 代表区域内植物粪污养分需求量, $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$; $NS_{r,a}$ 代表猪当量粪污养分供给量, $\text{kg} \cdot \text{猪当量}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

将山东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,计算公式如下:

$$I = \frac{A}{R} \quad (8)$$

式中: I 代表区域畜禽粪污土地承载力指数; A 代表区域内饲养的各种动物根据猪当量换算系数,折算成猪当量的饲养总量,猪当量。

2 结果与分析

2.1 山东省畜禽粪污土地承载力空间分布特征

由于各市养殖结构差异,其畜禽粪便的产生和粪便中养分排放也随空间分布出现差异性。选取2016年数据,对山东省17个市的作物养分需求量、畜禽粪污养分供应量进行估算,将不同畜种产生的畜禽粪便量统一换算为猪粪当量,计算各市畜禽粪污土地承载力指数,分析山东省畜禽粪污土地承载力空间分布特征。

2.1.1 山东省畜禽粪污N、P养分供给量空间分布特征

2016年山东省畜禽粪便N、P养分总量分别为101.7万t和15.5万t,主要来源于猪、肉牛、家禽粪便的供给,分别占总养分量的29.7%、14.3%和28.3%。根据不同畜禽种类不同粪污收集方式下N、P养分的收集率,估算实际畜禽粪污N、P养分收集量分别为89.2万t和14.7万t。由于不同畜禽种类在不同粪污处理方式下N、P养分的留存率不同,估算山东省2016年畜禽粪污产生的可供植物利用的N、P养分量分别为58.7万t和11.7万t。山东省有机肥资源量巨大,降低化肥施用量的潜力大。

图1为各市畜禽粪便中N、P养分量的分布。从各市的畜禽养殖规模来看,规模大的地区主要分布在鲁西南、鲁中南区域。潍坊市、德州市和菏泽市达到了千万级别,分别为1 059.9万、1 078.9万头和1 034.2万头,是山东省养殖大市,分别占全省的11.3%、11.5%、11%。莱芜市养殖规模属山东最小,为101.2万头,仅占全省的1.1%。

由于不同区域养殖规模、养殖类型的分布不同,其畜禽粪便的产生以及粪污N、P养分供给量也存在差异。综合来看,畜禽粪尿养分资源量的空间分布与畜禽养殖规模空间分布相似。畜禽粪便N养分供应量排名前五的市与P养分供应量排名前五的市具有一致性,分别是:潍坊市、济宁市、临沂市、德州市、菏泽市,5个市的畜禽粪尿N、P养分总量约占全省总量

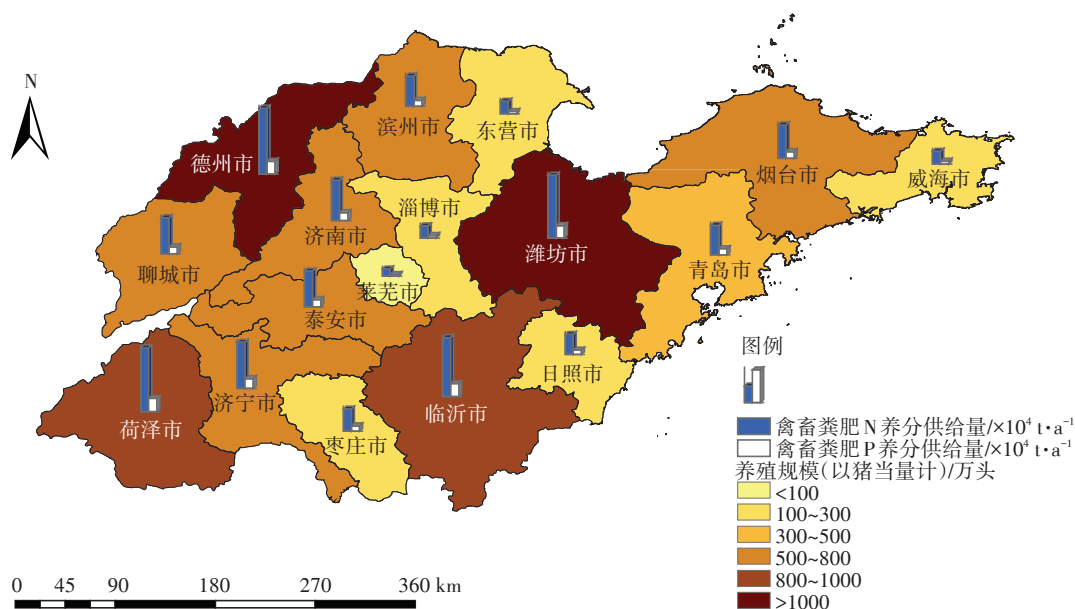


图1 山东省畜禽粪污养分供给量空间分布图

Figure 1 Spatial distribution of livestock manure nutrients in Shandong Province

的50.5%、50.9%。其中N养分供应量最高是德州市, P养分供应量最高是菏泽市,分别为 $7.2 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $1.5 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$, 占全省畜禽粪便N、P养分供应量的11.1%和11.2%。N、P养分供应量最低是莱芜市,分别为 $0.75 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.16 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$, 占全省畜禽粪便N、P养分供应量的1.2%、1.3%。畜禽粪便N、P养分在局部地区的集中产生和排放,给当地的水环境造成了很大的压力。

2.1.2 山东省各市农作物N、P养分需求量空间分布特征

根据2016年山东省各种作物播种面积和产量,以及中等肥力和中等产量下的粮食作物和蔬菜作物N、P养分需求量,估算山东省适宜N、P养分需求量分别为205.4万t和54.6万t。根据山东的施肥习惯,计算出区域内植物通过畜禽粪污途径的N、P养分需求量分别为59.9万t和13.7万t。在不考虑粮田秸秆还田的条件下,来自畜禽粪污的N、P养分供给量未超过植物粪污需求量,还需要施用化肥进行N、P素的补充。

山东省是农业大省,2016年农作物总播种面积约1 097.3万 hm^2 ,其中排名前五的城市分别为:菏泽市134.4万 hm^2 、潍坊市102.0万 hm^2 、临沂市100.9万 hm^2 、德州市100.3万 hm^2 、聊城市96.9万 hm^2 ,分别占总播种面积的12.2%、9.3%、9.2%、9.1%、8.8%。从山东省植物粪污N、P养分需求量空间分布图(图2)可以看出,植物粪污N养分需求量排名前五的市分别为:潍坊市、济宁市、临沂市、德州市、菏泽市;植物粪

污P养分需求量排名前五的市分别为:聊城市、济宁市、临沂市、德州市、菏泽市。其中植物粪污N、P养分需求量最高是菏泽市,分别为 $7.1 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $1.7 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$, 占全省植物粪污N、P养分需求量的12.7%和12.6%。

2.1.3 山东省农田畜禽粪污土地承载力空间分布特征

将山东省作物粪污养分需求量换算成以猪当量计的最大养殖量,来表示畜禽粪污土地承载力。2016年山东省以N、P养分为基准的土地承载力分别为8576万头和9809万头。计算区域畜禽粪污土地承载力指数 I ,以N养分为基准时 $I_N=0.98<1$,以P养分为基准时 $I_P=0.86<1$ 。分别以N、P养分为基准时,该区域内土地消纳畜禽粪污均不超载。对基于N和P测算的结果进行比较,取两种计算结果的较低值为该区域的承载量,即山东的最大承载量为8576万头。2016年山东省的养殖规模为8401万头,相较于最大畜禽承载量还有一定的发展空间。

分别对山东省17个市的土地承载力指数 I 进行估算,如图3。各市畜禽粪便污染风险差异较大,其中青岛、淄博、聊城、菏泽以N、P为基准的 I 值均小于1,土地不超载,还能容纳一定量的畜禽粪污。济南、枣庄、烟台、泰安、威海、日照、莱芜、临沂、德州以N、P为基准的 I 值均大于1,畜禽粪污量超过了农田的承受能力,农田畜禽污染风险较大。而莱芜市土地承载力指数 I 均超过2,分别为2.14和2.36,这说明莱芜市的畜牧业排放的粪污远远超过农田消纳的量,畜禽固

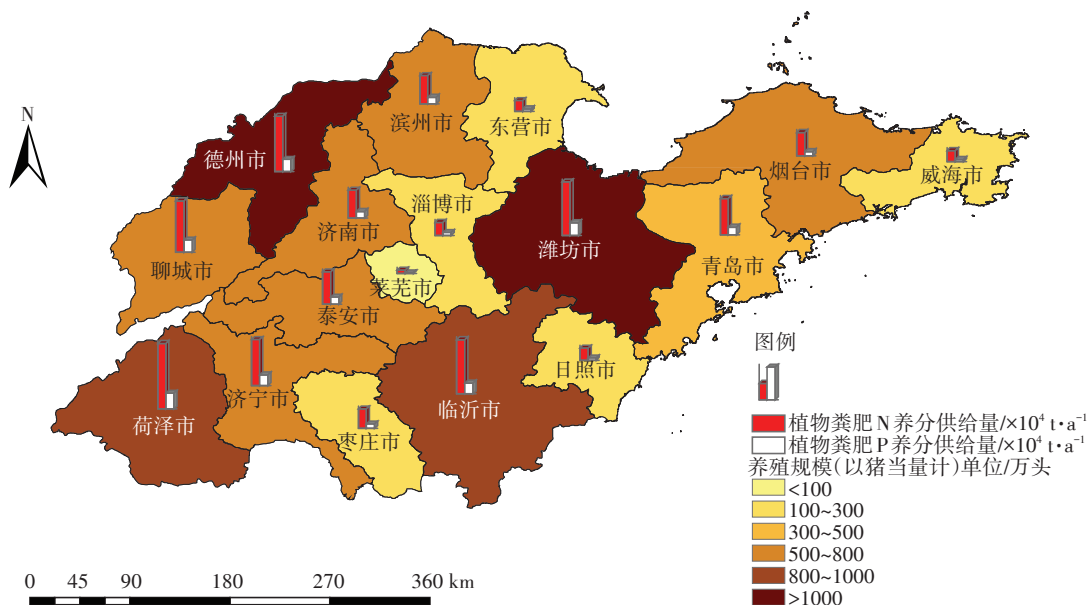


图2 山东省植物粪污养分需求量空间分布图

Figure 2 Spatial distribution of crop manure nutrients demand in Shandong Province

液粪便的N、P必须部分外输到其他有机肥缺乏的区域,才能解决莱芜市农田土壤N、P负荷过量问题。而东营、潍坊、济宁、滨州4市以N为基准的 I 值均大于1,以P为基准的 I 值均小于1,说明该市来自畜禽粪污的N素盈余明显,而P素的供给量低于农田作物P养分需求量,还需要来自于化肥的P素补充。

2.2 山东省畜禽粪污土地承载力时间分布特征

由于经济的发展以及产业结构的调整,近年来山东省养殖结构不断发生变化,山羊、兔养殖量逐年减少,猪、奶牛、肉牛、绵羊、家禽养殖量逐年增加,其中绵羊的养殖量从2007年的324.35万只增加到2016年的1 023.8万只,十年间增加了215.6%。总体来看,近十年山东省的畜禽养殖规模总体呈上升趋势,增幅达19.3%。选取2008—2017年山东省统计年鉴数据,对山东省作物粪污养分需求量、畜禽粪污养分供应量以及历年畜禽粪污土地承载力指数进行估算,分析山东省畜禽粪污土地承载力时间分布特征。

总体来看,分别以N、P养分为基准的各曲线变化趋势具有一致性。由于山东省种植业的发展,近年来全省种植面积呈小幅上升的趋势,从2007年的1 072.4万 hm^2 增加到2016年的1 097.3万 hm^2 ,增长了2.3%。植物对粪污养分的需求量也呈稳定上升趋势,从2007年到2016年,N养分的需求量从54.1万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 增加到了59.9万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,增长了10.6%;P养分的需求量从12.1万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 增加到了13.7万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,增长了13.1%。畜禽粪污N、P养分供应量在2008至2010年

间下降,在2010年存在一个最低值分别为54.2万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和11.16万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,在2010年至2012年间迅速增加,总体呈现上升趋势。由图4可以看出,畜禽粪污N、P养分供应量随时间变化特征曲线在2010年到2012年间均有上升趋势,这是由于在该段时间内山东省畜禽养殖规模大幅增加,导致畜禽粪便量增加,畜禽粪污N、P养分供应量急剧增加,其中N养分供应量增加8.4%,P养分供应量增加7.5%。从指数 I 随时间变化特征曲线来看,以N、P为基准的畜禽粪污土地承载力指数 I 均呈下降趋势,以N为基准的 I 值在1上下浮动,以P为基准的 I 值始终小于1,并且两者在2010年至2012年间均有小幅增加。

3 讨论

由于2007年至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。由于烟台、青岛、威海地处沿海,发展旅游业和渔业,畜牧业相对较弱。通过计算看出山东省畜禽养殖主要集中在鲁西南、鲁中南以及德州、潍坊等区域,而鲁东地区畜禽养殖规模整体较小,这与吴金欣等^[10]的结果一致。在2010至2012年期间以N、P为基准的山东省畜禽粪污土地承载力指数均缓慢增加,其原因可能与这一时期畜禽养殖规模大幅增加有关,根据计算得

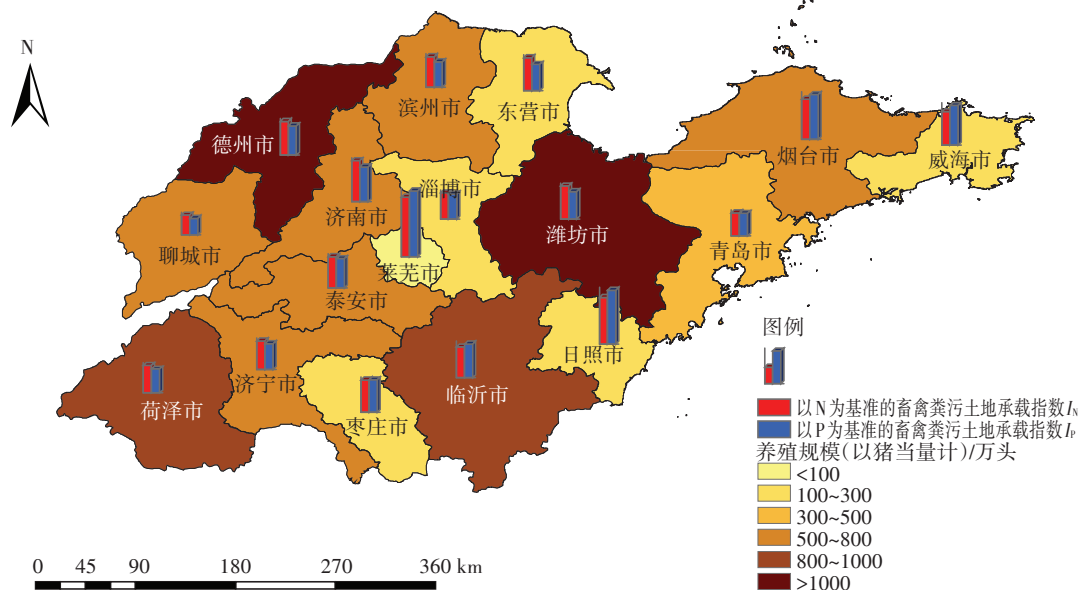
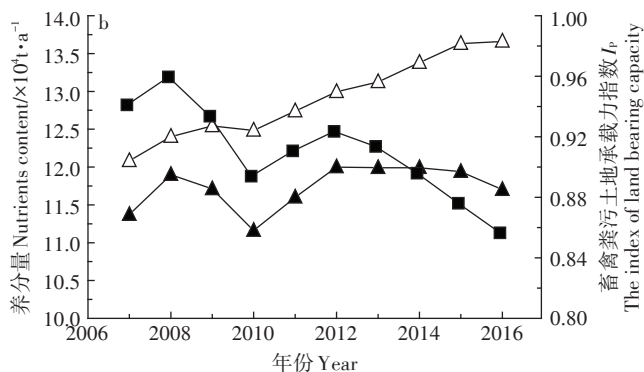


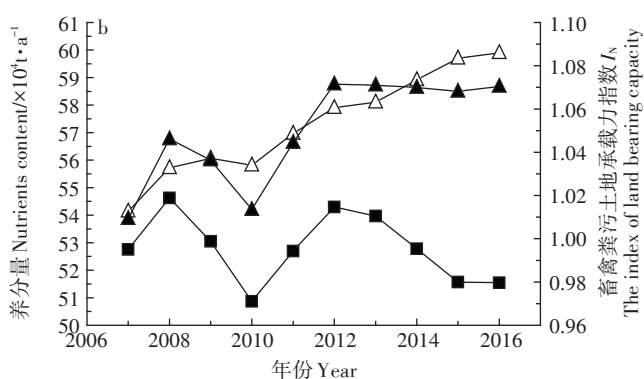
图3 山东省畜禽粪污土地承载力指数空间分布图

Figure 3 Spatial distribution of loading capacity of livestock manure in Shandong Province



(a) 以P养分为基准的粪污土地承载力时间变化特征

(a) Time variation characteristics of phosphorus-based loading capacity of livestock manure



(b) 以N养分为基准的粪污土地承载力时间变化特征

(b) Time variation characteristics of nitrogen-based loading capacity of livestock manure

- △- 植物粪肥养分需求量 Nutrients demand
- ▲- 畜禽粪肥养分供应量 Nutrients supply
- 畜禽粪污土地承载力指数 I The index of land bearing capacity

畜禽种类、畜禽养殖量、作物种类及产量等数据取自

《山东统计年鉴》(2008—2017)

Data on livestock and poultry species, production, crop types, and yields were taken from *Shandong Statistical Yearbooks* (2008—2017)

图4 山东省区域畜禽粪污土地承载力时间变化特征

Figure 4 Time variation characteristics of loading capacity of livestock manure in Shandong Province

出在此期间N、P养分供应量增幅均大于养分需求量增幅,导致土地需要消纳的畜禽粪污量增加,畜禽粪污土地承载力指数增大。整体来看,近十年山东省以N、P为基准的畜禽粪污土地承载力指数均呈下降趋势,说明山东省畜禽养殖排放的粪便资源中N、P没有超过土地的承载能力,仍具有一定的消纳空间,而植物所需的N、P养分不能由粪污提供的那部分,需要通过秸秆还田、化肥施用等方式进行额外的养分补充。

目前,中国畜牧业正处在由传统养殖业向畜禽废弃物资源化利用的现代生态养殖模式转型升级的关键时期^[28]。种养结合生产模式有利于保持生态平衡,缓解集约化、规模化养殖带来的环境问题,实现农业

可持续发展^[29]。以农牧结合、种养平衡、生态循环为原则,加快发展现代生态养殖,促进畜牧产业转型升级,推动养殖环境问题有效解决,是对实现畜禽养殖业可持续发展的要求^[30]。山东作为我国的养殖大省,推广种养结合生产模式对我国畜禽养殖废弃物资源化利用具有示范意义。

为保障山东省各市畜禽粪污被安全消纳,最大限度减少畜禽养殖对环境的影响,促进畜禽养殖业可持续发展,针对山东省畜禽养殖潜在环境风险状态,对各市发展养殖业以及养殖废弃物处理做出以下建议:

(1)调整优化畜禽养殖区域布局。近十年山东省畜禽粪污土地承载力逐渐提高,可容纳的畜禽养殖量增加,但根据估算山东省所产生的畜禽粪污已接近于土地所能承载的上限值,故不建议继续扩大养殖规模。其中淄博、济宁、聊城、菏泽等市农田土地对于畜禽粪污还具有一定的消纳空间;东营、潍坊、济宁、滨州等市养殖业产生的畜禽废物中N素超过了农田消纳能力,而P素不超载,应在维持畜禽养殖量不变的基础上增加化肥P素的投入;对于济南、枣庄、烟台、泰安、威海、日照、莱芜、临沂、德州等市,畜禽粪便的产生量超过了其农田系统消纳能力,在运用种养结合模式时,应对养殖场进行合理选址和设计,确定种养结合模式中养殖场养殖规模与周边农田的合理配置,以保障有足够的农田对产生的畜禽粪污进行安全消纳,多余的畜禽粪污可以采用异地消纳的方式扩大畜禽粪污的消纳半径,如将畜禽粪污运至淄博、济宁、聊城、菏泽等仍具有一定消纳空间的城市进行处理,同时科学管理和引导合理利用有机肥,控制有机肥施用比例,减少化肥的投入;对于青岛、威海、烟台等沿海旅游城市,应减小畜禽养殖业的规模,尽可能降低环境风险,减少养殖废弃物对大气、水环境的污染。

(2)严格控制对畜禽粪污的收集处理。常规养殖废弃物生化处理的运行费用较高,需要重建养殖系统,通过清洁生产减少粪污用水量,增加养分含量,提高肥效,恢复种植与养殖系统之间物流平衡,促进种植与养殖平衡发展,经济有效地解决养殖场粪污问题。对政府部门而言,可以在建立对畜禽养殖无害化处理扶持制度的同时,通过政府补贴的方式引导、鼓励畜禽养殖企业对畜禽粪污的处理,减少畜禽粪污的直接还田。对规模化养殖厂产生的大量畜禽粪污统一收集,经过畜禽粪污的预处理后,可以由专门的有机肥企业进一步加工为商品有机肥、有机无机复合肥或生物有机肥,这些产品转入市场后,即可打破地域

间畜禽养殖不平衡的问题;鼓励畜禽养殖企业在沼气发酵后对产生的沼气进行脱硫、除湿处理,进一步将沼气充分利用起来。

在计算过程中,我们假定将山东省年产生的所有畜禽粪便均匀分布到所有耕地面积上,且没有考虑畜禽粪污省外施用以及畜禽粪便运输条件的影响,而在实际农业生产过程中,畜禽养殖往往集中在某些区域,各地区实际的承载力将与本文计算得到的畜禽养殖承载力存在差别;并且在估算山东省植物粪污养分需求量时,没有考虑人工林对畜禽粪污的消纳。如果考虑将人工林地作为消纳畜禽粪污的对象,将提高土地对畜禽粪污的消纳量,进一步扩大山东省的畜禽养殖潜力。

4 结论

通过对2007—2016年山东省以及2016年各市的畜禽粪污养分供给量、植物粪污养分需求量以及畜禽粪污土地承载力进行估算,得到以下结论:

(1)近十年来,整体来看山东畜禽养殖规模呈现上升趋势。山东省畜禽养殖主要集中在鲁西南、鲁中南、以及德州、潍坊等区域,畜禽粪尿资源丰富,鲁东地区畜牧业不发达,畜禽养殖规模整体较小。

(2)山东省作物粪污N、P养分需求量呈逐年上升的趋势,这就需要越来越多的畜禽粪便以有机肥、沼渣沼液等形式施入农田,对畜禽粪便安全还田提出了考验。

(3)青岛、淄博、聊城、菏泽等市产生的畜禽粪污未超载,济南、枣庄、烟台、泰安、威海、日照、莱芜、临沂、德州的畜禽粪污量超过了农田的承受能力,有潜在的N、P污染风险,而莱芜市畜禽粪污土地承载力指数超过2,农田畜禽污染风险较大。但总体上看,山东省畜禽粪污土地承载力有增加的趋势,山东省农田消纳畜禽粪便仍然有一定消纳潜力。

参考文献:

- [1] 彭里. 重庆市畜禽粪便的土壤适宜负荷量及排放时空分布研究[D]. 重庆:西南大学, 2009.
PENG Li. A study on the suitable load and the temporal and spatial distribution of emissions of livestock and poultry manure in Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [2] 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.

- ety of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5): 1-11.
- [3] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部, 2010.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. The first national survey of pollution sources[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, 2010.
- [4] 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.
- [5] Costa M P, Schoeneboom J, Oliveira S, et al. A socio-eco-efficiency analysis of integrated and non-integrated crop-livestock-forestry systems in the Brazilian Cerrado based on LCA[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018(171): 1460-1471.
- [6] 赵立欣, 孟海波, 沈玉君, 等. 中国北方平原地区种养循环农业现状调研与发展分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 1-10.
ZHAO Li-xin, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, et al. Investigation and development analysis of planting-breeding circulating agriculture ecosystem in northern plains in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(18): 1-10.
- [7] Sims J, Ma L, Oenema O, et al. Advances and challenges for nutrient management in China in the 21st century[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 947-950.
- [8] 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 Chen-xi, PENG Yan-bo, XIE Gang. Investigation and study on present status of livestock and poultry pollution in Shandong Province[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2017, 49(8): 155-159.
- [9] 杨军香, 王合亮, 焦洪超, 等. 不同种植模式下的土地适宜载畜量[J]. 中国农业科学, 2016, 49(2): 339-347.
YANG Jun-xiang, WANG He-liang, JIAO Hong-chao, et al. Stock capacity in different cropping systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(2): 339-347.
- [10] 吴金欣, 刘兆辉, 李彦, 等. 山东省种植与养殖资源优化配置研究[J]. 农学学报, 2013, 3(2): 35-43.
WU Jin-xin, LIU Zhao-hui, LI Yan, et al. The study of optimized allocation for planting and breeding resources in Shandong Province[J]. *Journal of Agriculture*, 2013, 3(2): 35-43.
- [11] 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.
- [12] 吴永胜, 孙越鸿, 杨雪, 等. 基于种养平衡的成都市畜禽养殖环境效应分析[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(1): 195-203.
WU Yong-sheng, SUN Yue-hong, YANG Xue, et al. Analysis of environment effect of livestock and poultry breeding based on planting-

- breeding balance in Chengdu[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(1):195-203.
- [13] 汪开英, 刘健, 陈小霞, 等. 浙江省畜禽业排污测算与土地承载力分析[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(12):3043-3048.
- WANG Kai-ying, LIU Jian, CHEN Xiao-xia, et al. Pollution production and discharge from livestock and poultry industries and land bearing capacity in Zhejiang Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12):3043-3048.
- [14] 史瑞祥, 薛科社, 周振亚. 基于耕地消纳的畜禽粪便环境承载力分析: 以安康市为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(6):55-62.
- SHI Rui-xiang, XUE Ke-she, ZHOU Zhen-ya. Analysis on the environmental bearing capacity of livestock and poultry based on consumption of cultivated land: A case study of Ankang City[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(6):55-62.
- [15] 许翼, 孙莹, 张华, 等. 沈阳市畜禽养殖环境承载力分析及预测[J]. *环境保护科学*, 2017, 43(5):62-68.
- XU Yi, SUN Ying, ZHANG Hua, et al. Analysis and forecasting of the bearing capacity of livestock-breeding environment in Shenyang City[J]. *Environmental Protection Science*, 2017, 43(5):62-68.
- [16] 王洋, 李翠霞. 黑龙江省畜禽养殖环境承载能力分析及预测[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(1):187-191.
- WANG Yang, LI Cui-xia. Analysis and forecast of the bearing capacity of livestock-breeding environment in Heilongjiang Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(1):187-191.
- [17] 王延吉, 金爱芬, 赵春子, 等. 基于灰色理论的延边地区畜禽养殖环境承载力研究[J]. *中国畜牧杂志*, 2016, 52(20):24-28.
- WANG Yan-ji, JIN Ai-fen, ZHAO Chun-zi, et al. Study on environmental bearing capacity of livestock and poultry in Yanbian region based on grey theory[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2016, 52(20):24-28.
- [18] 山东省统计局. 山东省统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- Statistical Bureau of Shandong Province. Statistical yearbook of 2017 of Shandong Province[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [19] 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.
- [20] 李占, 丁娜, 郭立月, 等. 有机肥和化肥不同比例配施对冬小麦一夏玉米生长、产量和品质的影响[J]. *山东农业科学*, 2013, 45(7):71-77, 82.
- LI Zhan, DING Na, GUO Li-yue, et al. Effects of different ratios of organic manure and chemical fertilizer on growth, yield and quality of winter wheat and summer maize[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2013, 45(7):71-77, 82.
- [21] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2008—2017)[M]. 北京: 中国统计出版社.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook (2008—2017) [M]. Beijing: China Statistics Press.
- [22] 中华人民共和国国家统计局. 中国畜牧业年鉴(2008—2017)[M]. 北京: 中国农业出版社.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China animal husbandry yearbook (2008—2017) [M]. Beijing: China Agricultural Press.
- [23] 郭德杰, 吴华山, 马艳, 等. 集约化养殖场羊与兔粪尿产生量的监测[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(1):44-48.
- GUO De-jie, WU Hua-shan, MA Yan, et al. Study on the amount of manure urine excreted by sheep and rabbits in intensive pasture[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(1):44-48.
- [24] 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.
- XUAN Meng, XU Zhen-cheng, WU Gen-yi, et al. Analysis of utilization of fecal resources in large-scale livestock and poultry breeding in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(2):126-132.
- [25] 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 Wei. Studies on the evaluation of nutrient resources derived from manure and optimized utilization in arable land of China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [26] 中华人民共和国农业部. 农业部办公厅关于印发《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》的通知[EB/OL]. (2018-01-22)[2018-08-06]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tfw/201801/t20180122_6135486.htm.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Notice of printing and distributing the *Technical Guidelines for the Measurement of Carrying Capacity of Livestock and Poultry Manure* by the General Office of the Ministry of Agriculture of the People's Republic of China [EB/OL]. (2018-01-22)[2018-08-06]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tfw/201801/t20180122_6135486.htm.
- [27] 薛继春, 王承华, 胡源, 等. 畜禽规模养殖调查[J]. *畜牧市场*, 2006(8):39-43.
- XUE Ji-chun, WANG Cheng-hua, HU Yuan, et al. Livestock and poultry scale breeding survey[J]. *Stockbreeding Market*, 2006(8):39-43.
- [28] 吴信, 万丹, 印遇龙. 畜禽养殖废弃物资源化利用与现代生态养殖模式[J]. *农学学报*, 2018, 8(1):163-166.
- WU Xin, WAN Dan, YIN Yu-long. Modern ecological breeding mode and resource utilization of livestock wastes[J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(1):163-166.
- [29] 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, 11:1861-1872.
- [30] Herro M, Thornton P K, Notenbaert A M, et al. Smart investments in sustainable food production: Revising mixed crop-livestock systems[J]. *Science*, 2010, 327:822-825.