

基于种养平衡的吉林省辽河流域农田畜禽粪便负荷研究

黄鑫, 赵兴敏, 苏伟, 郑玉昕, 王鸿斌, 王玉军

引用本文:

黄鑫, 赵兴敏, 苏伟, 等. 基于种养平衡的吉林省辽河流域农田畜禽粪便负荷研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 193-201.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0593>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

山东省畜禽粪污土地承载力时空分异特征分析

郑莉, 张晴雯, 张爱平, 刘杏认, 刘士清, 韩聪

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 882-891 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0863>

海南省畜禽养殖环境承载力及有机肥替代化肥潜力分析

杨旭, 黄艳艳, 刘海林, 茶正早, 罗微, 林清火

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

畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析

袁凯, 熊苏雅, 梁静, 李彦明, 乔玉辉, 李花粉, 陈清

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

农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评估研究 ——以淮河流域为例

宋大平, 左强, 刘本生, 邹国元, 刘东生

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1219-1231 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1374>

中国农田畜禽粪尿磷负荷量及环境风险分析

刘晓永, 王秀斌, 李书田

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄鑫, 赵兴敏, 苏伟, 等. 基于种养平衡的吉林省辽河流域农田畜禽粪便负荷研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 193-201.
HUANG X, ZHAO X M, SU W, et al. Farmland load of livestock manure in Liaohe River basin of Jilin Province based on the balance between planting and breeding[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(1): 193-201.



开放科学 OSID

基于种养平衡的吉林省辽河流域农田畜禽粪便负荷研究

黄鑫¹, 赵兴敏^{1*}, 苏伟², 郑玉昕¹, 王鸿斌¹, 王玉军¹

(1. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2. 吉林省环境科学研究院, 长春 130012)

摘要:为明确吉林省辽河流域畜禽养殖污染现状,优化调整产业养殖生产布局,结合国内外相关研究核算了畜禽粪便产生量和农田负荷量,并基于种养平衡理论进行畜禽养殖环境承载力分析。结果显示:2017年吉林省辽河流域畜禽粪便产生量达537.59万t,农田粪便平均负荷量为 $5.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中辽源市区的农田粪便负荷量最大,为 $12.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。畜禽养殖氮、磷环境承载力平均值分别为 $131.39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $20.65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中四平市区的氮环境承载力最小($78.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),辽源市区的磷环境污染风险值最大(1.08),东辽县的氮和磷污染风险等级均达到Ⅱ级。畜禽养殖环境承载力和粪便负荷风险评估表明,辽源市区畜禽粪便污染情况最为严重,该区域属于氮和磷污染中等风险区,已对农田环境产生了威胁,此外四平市区属于氮污染中等风险区和磷污染低风险区,东辽县属于氮和磷污染低风险区。流域内其余市县的畜禽养殖环境承载力和粪便负荷量则处于安全范围,对周围农田环境基本无影响。

关键词: 畜禽粪便; 种养平衡; 农田负荷; 污染风险; 土地承载力

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)01-0193-09 doi:10.11654/jaes.2021-0593

Farmland load of livestock manure in Liaohe River basin of Jilin Province based on the balance between planting and breeding

HUANG Xin¹, ZHAO Xingmin^{1*}, SU Wei², ZHENG Yuxin¹, WANG Hongbin¹, WANG Yujun¹

(1. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. Jilin Province Academy of Environmental Science, Changchun 130012, China)

Abstract: The livestock husbandry industry has become an important part of agricultural non-point source pollution. To prevent agricultural pollution, the amount of livestock manure and farmland load were investigated in the Liaohe River basin of Jilin Province. The land carrying capacity of livestock manure was evaluated based on the balance between planting and breeding. The results showed that the amount of livestock manure reached 5.375 9 million t, and the average manure load was $5.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in the Liaohe River basin of Jilin Province in 2017. The greatest manure load of farmland in Liaoyuan City was $12.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, while the average land carrying capacities of livestock husbandry were $131.39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (based on N) and $20.65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (based on P). Siping City had the lowest carrying capacity of land based on nitrogen ($78.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). Liaoyuan City had the largest index in the risk assessment of livestock manure. The study found that Liaoyuan City had low risk of livestock manure pollution, and it was the area with higher contamination risks from the release of nitrogen and phosphorus, which posed a threat to the farmland environment. In addition, Siping City was at medium risk (based on N) and

收稿日期: 2021-05-20 录用日期: 2021-08-16

作者简介: 黄鑫(1995—),男,江西赣州人,硕士研究生,从事农业畜禽污染研究。E-mail: huangjlau@163.com

*通信作者: 赵兴敏 E-mail: zhaoxingmin0704@163.com

基金项目: 吉林省辽河流域污染防治与生态修复重大科技专项(20200503004SF)

Project supported: Major Science and Technology Project for Pollution Prevention and Control and Ecological Restoration in Liaohe River Basin of Jilin Province(20200503004SF)

light risk (based on P), while Dongliao County was a low pollution risk area. The other cities were in a safe area, which had little effect on the farmland environment.

Keywords: livestock manure; balance between planting and breeding; farmland load; pollution risk; land carrying capacity

改革开放40多年来,我国经济迅猛发展,已经成为世界第二大经济体,但随着我国经济由高速增长阶段转向高质量发展阶段,农业现代化和可持续性发展成为国民经济高质量发展的重要组成部分^[1],绿色发展建设已成为当前我国亟待解决的重要问题^[2]。

东北地区是我国重要的粮食生产基地与畜牧业生产基地,根据《2018年中国统计年鉴》数据,东北粮食产量占全国总产量的21.0%,其中玉米产量占全国总产量的33.7%,大豆更是占比43.9%,这在保障国家粮食安全与农产品供需平衡中占有重要的战略地位^[3]。辽河平原作为东北三大平原之一,在当地农业生产中发挥着重要作用,而吉林省辽河流域作为辽河的上游地区,其生态环境形势却不容乐观^[4-5]。吉林省第二次全国污染源普查公报显示^[6],2017年吉林省各大类污染源中,畜禽养殖业带来的污染问题比较突出,其排放的化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)分别占总排放量的68.9%、47.3%、69.8%,远超工业污染源所带来的危害。随着我国工业现代化不断发展,逐步完善了工业减排管理体制,工业点源污染排放得到了有效控制^[7]。按照当前国内外农业面源污染排放的情况,畜禽粪便若处置不当将会给当地生态环境带来巨大风险^[8-11]。目前针对吉林省辽河流域的研究主要集中在水体环境和生态系统等方面^[12-13],但对农田畜禽粪便污染的研究鲜有报道^[4,14]。

为此,本研究以吉林省辽河流域(四平市区、双辽市、梨树县、公主岭市、伊通县、辽源市区及东辽县)为研究区域,通过各市县2017年畜禽养殖基础数据,结

合种植业年度统计数据,进行畜禽粪便负荷及环境风险分析研究,以为防治畜禽养殖污染,科学规划养殖业发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 畜禽粪便负荷核算数据

以吉林省辽河流域畜禽养殖业和种植业为研究对象,养殖业数据来源于各市县第二次全国污染源普查,具体情况如图1所示。

通过四平市和辽源市《统计年鉴》,获取2017年耕地面积。畜禽粪便的排泄系数是负荷核算的基础,考虑到不同地区饲养周期和养殖方式差异,根据前人研究的东北地区畜禽有关数据^[15-16],并结合调研资料确定了吉林省辽河流域畜禽粪便产生量核算相关参数,见表1。

表1 畜禽粪便产生量核算相关参数

Table 1 Parameters related to the accounting of livestock manure production

畜禽种类 Category	粪便排泄系数 Parameter of livestock excreta/(kg·d ⁻¹)	饲养周期 Feeding period/d	猪粪当量折算系数 Coefficient of pig manure equivalent
生猪 Pig	3.51	182	1.00
肉牛 Beef	22.67	365	0.69
奶牛 Cow	39.44	365	0.69
蛋鸡 Layer	0.09	365	2.11
肉鸡 Broiler	0.18	55	2.11

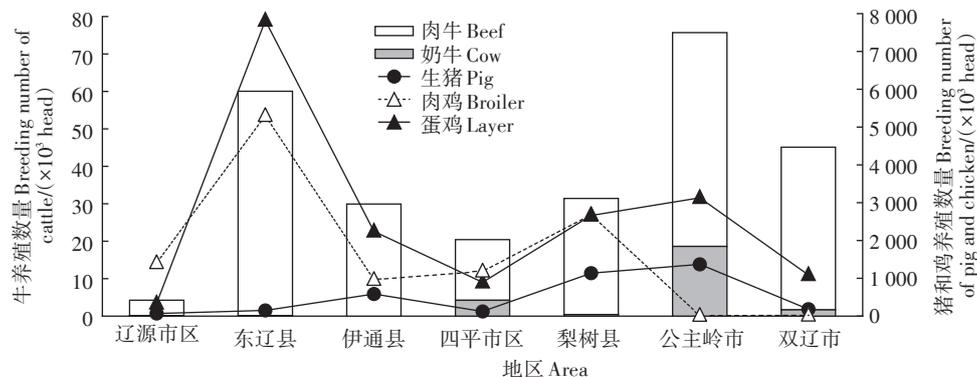


图1 2017年吉林省辽河流域畜禽养殖数量

Figure 1 Amount of livestock husbandry in Liaohu River basin of Jilin Province in 2017

1.1.2 畜禽养殖环境承载力数据

根据《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》及吉林省农田耕地土壤养分资料^[17],确定了不同作物生长的氮磷养分需求量(表2)。施肥供给氮养分占比为35%,磷占比为45%;粪肥占施肥比例为50%;粪肥当季氮养分利用率为27.5%,磷养分利用率为32.5%。各县农作物生产情况来源于当地统计年鉴数据(表3)。

1.2 核算方法

1.2.1 畜禽粪便产生量及耕地负荷核算

畜禽粪便产生量核算采用国家环保总局推荐的测算方法^[18],计算公式为:

$$X = N \times T \times G \times 1000^{-1} \quad (1)$$

式中: X 为各类畜禽粪便产生量, $t \cdot a^{-1}$; N 为出(存)栏量,头(羽); T 为饲养周期,d; G 为各类粪便日排泄系数, $kg \cdot 头(羽)^{-1} \cdot a^{-1}$ 。

先将各类畜禽粪便统一折算成猪粪当量,再进行畜禽粪便负荷量核算^[19],计算公式为:

$$q = \frac{Q}{S} = \sum \frac{X \times t}{S} \quad (2)$$

式中: q 为畜禽粪便负荷量, $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; Q 为各类畜禽粪便猪粪当量总量, $t \cdot a^{-1}$; S 为有效耕地面积, hm^2 ; X 为各类畜禽粪便总量, $t \cdot a^{-1}$; t 为猪粪当量折算系数。

为了更全面反映各地区畜禽粪便环境污染威胁程度,引用畜禽粪便污染警戒值概念^[20],具体警戒值分级情况见表4,其计算公式为:

$$r = \frac{q}{P} \quad (3)$$

式中: r 为畜禽粪便负荷量警戒值; P 为有机肥最大适宜施肥量, $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。由于各地区的地貌条件、土壤类型及气候等原因 P 值的选取不尽相同^[21-24],基于吉林省辽河流域种植业实际情况考虑,本研究选用 $30 t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。

1.2.2 畜禽养殖环境承载力计算

畜禽粪便的总量大、运输成本高,决定了其无法

表2 吉林省辽河流域主要农作物单位经济产量养分需求量($kg \cdot t^{-1}$)

Table 2 Demand nutrients per ton economic yield in Liaohe River basin of Jilin Province ($kg \cdot t^{-1}$)

养分 Nutrient	稻谷 Paddy	小麦 Wheat	玉米 Corn	谷子 Millet	高粱 Sorghum	大豆 Soybean	薯类 Tuber	油料 Oil crop	蔬菜 Vegetable	瓜果类 Melon	贮青饲料 Silage
N	22.0	30.0	23.0	38.0	23.0	72.0	5.0	71.9	2.4	4.2	25.0
P ₂ O ₅	8.0	10.0	3.0	4.4	3.0	7.5	0.9	8.9	0.5	1.6	8.0

表3 2017年吉林省辽河流域主要农作物生产情况(t)

Table 3 Production of main crops in Liaohe River basin of Jilin Province in 2017(t)

作物品种 Crop variety	辽源市区 Liaoyuan City	东辽县 Dongliao County	伊通县 Yitong County	四平市市区 Siping City	梨树县 Lishu County	公主岭市 Gongzhuling City	双辽市 Shuangliao City
稻谷 Paddy	1 800	24 949	39 600	1 013	101 680	94 643	202 036
小麦 Wheat	0	0	29	27	902	100	600
玉米 Corn	65 627	653 650	1 001 773	148 842	2 147 522	2 839 819	903 593
谷子 Millet	0	269	1 600	87	2 841	1 768	1 511
高粱 Sorghum	0	4 196	1 380	672	5 229	6 905	10 159
大豆 Soybean	80	6 071	4 020	1 557	28 956	7 953	23 450
薯类 Tuber	239	23 805	15 750	0	153 041	245 550	9 385
油料 Oil crop	0	91	5	0	20 731	74	49 440
蔬菜 Vegetable	11 668	51 392	28 249	70 606	576 628	465 760	101 700
瓜果类 Melon	51	835	1 078	1 920	84 519	118 976	69 085
贮青饲料 Silage	0	0	2 575	2 460	105	2 940	75

表4 畜禽粪便污染警戒值分级

Table 4 Classification of alarming values for loading amount of livestock feces

项目 Item	$r \leq 0.4$	$0.4 < r \leq 0.7$	$0.7 < r \leq 1.0$	$1.0 < r \leq 1.5$	$1.5 < r \leq 2.5$	$r > 2.5$
分级级数 Grade of classification	I	II	III	IV	V	VI
对环境构成污染的威胁性 Pollution level	无	稍有	有	较严重	严重	很严重

进行大范围、跨地区移动,因此畜禽粪便必须在一定区域内自我消化^[25]。本研究基于所有的畜禽粪便就地还田,通过种养平衡核算畜禽养殖环境承载力^[26]。首先计算流域内农作物生长对氮、磷养分的需求量,计算公式为:

$$D = \sum_{j=1}^n (G_j \times H_j) \quad (4)$$

式中: D 为农作物生长对氮、磷养分的需求量,kg; G_j 为第 j 类农产品的年总产量,t; H_j 为第 j 类农产品单位产量所需的氮、磷养分量,kg·t⁻¹。

农作物生长所需的养分主要由土壤、化肥和畜禽粪便还田等提供,粪肥养分按照理论推荐值为50%,所以农作物粪肥养分需求量计算公式为:

$$T = \frac{D \times F \times K}{U} \quad (5)$$

式中: T 为域农作物粪肥养分需求量,kg; D 为域农作物养分需求量,kg; F 为施肥供给养分占比,%; K 为粪肥占施肥比例,%; U 为粪肥当季利用率,%。

综合考虑畜禽粪便养分在收集、处理和贮存过程中的损失,单位猪当量的氮养分供给量为7 kg,磷为1.2 kg,计算氮(磷)畜禽养殖环境承载力公式为:

$$C = \frac{T}{e \times S} \quad (6)$$

式中: C 为氮(磷)畜禽养殖环境承载力,头猪当量·hm⁻²; T 为域农作物粪肥氮(磷)养分需求量,kg; e 为单位猪当量粪肥氮(磷)养分供给量,kg; S 为耕地面积,hm²。

为评估当前实际养殖产生量相较于理论环境承载力的饱和程度,研究各地畜禽粪便产生量是否会对农田带来环境污染风险,本研究引入畜禽粪便污染风险指数 Pl ^[27],并将其进行污染威胁程度分级(表5)。

$$Pl = \frac{L}{C} \quad (7)$$

式中: Pl 为畜禽粪便污染风险指数; L 为单位耕地面积实际承载畜禽数量,头猪当量·hm⁻²; C 为氮(磷)畜禽养殖环境承载力,头猪当量·hm⁻²。

表5 畜禽养殖环境污染风险分级

Table 5 Classification of environmental pollution risk for livestock husbandry

污染风险指数 Pollution risk index	污染风险 Pollution risk
$Pl < 0.5$	无污染风险
$0.5 \leq Pl < 1$	低污染风险
$1 \leq Pl < 1.5$	中污染风险
$1.5 \leq Pl < 3$	较高污染风险
$Pl \geq 3$	高污染风险

2 结果与分析

2.1 吉林省辽河流域畜禽粪便产生量

吉林省辽河流域2017年畜禽粪便构成比例和产生量如图2所示,粪便总量为537.59万t。总体来看,畜禽粪便产生量大小依次为生猪>肉牛>蛋鸡>奶牛>肉鸡,分别为229.52万、199.96万、60.26万、36.29万、11.56万t,占比依次为42.69%、37.20%、11.21%、6.75%、2.15%。畜禽粪便主要来源地也不尽相同,其中奶牛和肉牛粪便主要集中在公主岭市、东辽县、双辽市,这3个市县的奶牛和肉牛粪便占牛粪产生总量的68.63%;梨树县、伊通县、公主岭市的猪粪产生量均超过了当地畜禽粪便量的50%,同时这3个市县的猪粪产生量也占据了猪粪总量的65.42%;蛋鸡和肉鸡粪便主要分布在东辽县、梨树县、公主岭市,这3个市县的蛋鸡和肉鸡粪便占鸡粪产生总量的72.91%。

对市县畜禽粪便构成比例进行分析,双辽市、四平市区和东辽县的牛粪占当地畜禽粪便总量的比例分别为71.54%、61.95%和54.94%,梨树县、伊通县、公主岭市和辽源市区猪粪占比分别达到65.61%、52.84%、50.73%和41.62%。由此可以看出,2017年吉林省辽河流域最主要的粪便污染是由牛产生的,其次是猪,这两者的产生量占总量的86.65%。

从各市县的畜禽粪便的猪粪当量看,公主岭市的产生量最高,达159.91万t,占流域畜禽粪便总量的29.39%;其次是梨树县和东辽县,产生量分别为114.48万、109.81万t,各占比为21.04%、20.18%;再次是伊通县和双辽市,这两个市县的畜禽粪便产生量均达到了45万t;而产生量较小的是四平市区和辽源市区,分别为30.03万t和12.13万t。从各市县耕地面积进行分析,公主岭市的耕地面积最大为31.57万hm²,其次是梨树县,耕地面积为24.18万hm²,这两个市县的耕地面积占总耕地面积的55.69%。四平市区和辽源市区耕地面积少,仅有2.09万hm²和1.00万hm²,仅占比4.09%,其余市县耕地面积相差较小,但是均达到10万hm²以上。由此可以看出,畜禽粪便产生量大的市县往往耕地面积也更多,这为消纳畜禽粪便提供了足够的空间,从而减轻畜禽粪便对当地农田的污染风险。

2.2 吉林省辽河流域畜禽粪便负荷量

目前,吉林省畜禽粪便的主要处理方式是直接还田,将各市县的耕地作为畜禽粪便实际负载区域,核算出各地区的畜禽粪便负荷量,如图3所示。结果表

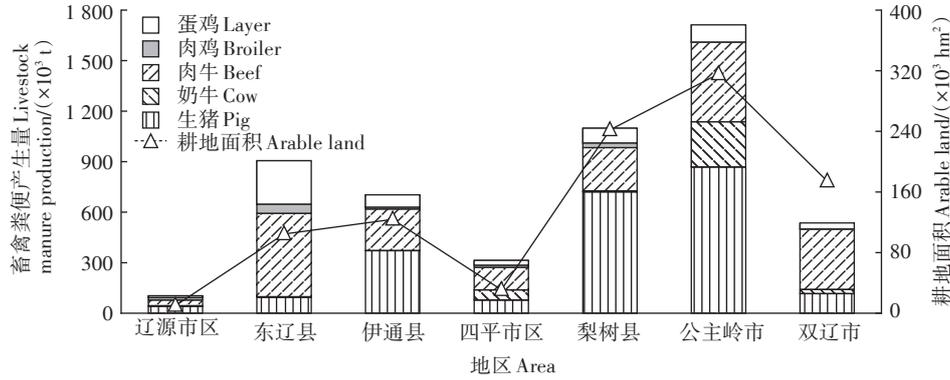


图2 2017年吉林省辽河流域畜禽粪便产生量与耕地面积

Figure 2 The production of livestock manure and area of farmland in Liaohe River basin of Jilin Province in 2017

明,该流域的平均畜禽粪便负荷量为 $5.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中辽源市区的负荷量最高,为 $12.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其次为东辽县、四平市市区,负荷量分别为 10.50 、 $9.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 另外伊通县也超过平均畜禽粪便负荷量,为 $5.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。而梨树县、公主岭市和双辽市位于流域中下游,农业种植面积相对较多,其负荷量均在平均值以下,故这些区域消纳畜禽粪便的潜能大,对周边环境影响小。

2.3 吉林省辽河流域畜禽粪便负荷预警分析

根据畜禽粪便负荷风险分级,吉林省辽河流域平均警戒值为 0.18 ,对环境暂无明显影响。但是按照县区划分进行核算发现,辽源市区的警戒值超过 0.4 ,对环境已经构成一定程度的威胁,东辽县、四平市市区的警戒值处于 II 级预警的边缘,如果畜禽粪便处置不当也会对周边农田产生威胁。其余市县的畜禽粪便污染警戒值较小,对当地环境基本无影响。结合 GIS 地理信息技术分析发现(图4),辽源市区、东辽县和四平市市区位于吉林省辽河流域的中上游,而畜禽养殖场大多靠近水体,这将会对流域水质环境产生较为严重

的威胁。

2.4 畜禽养殖环境承载力

基于种养平衡理念进行核算,环境承载力可以反映当地耕地对畜禽粪便的消纳能力,该数值在一定程

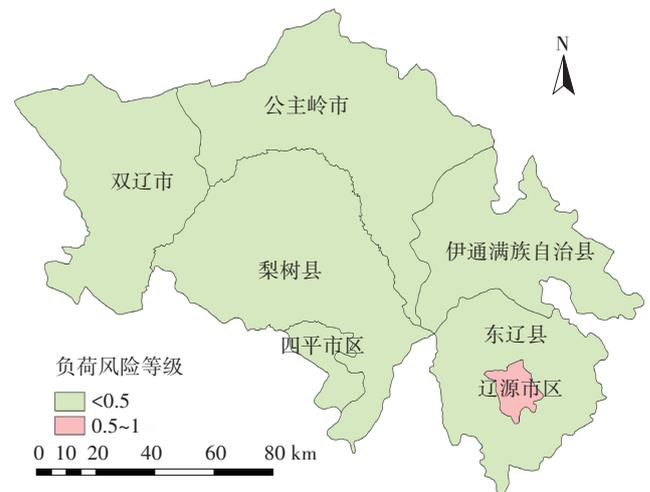


图4 吉林省辽河流域畜禽粪便负荷风险等级

Figure 4 The risk level of manure load for livestock in Liaohe River basin of Jilin Province

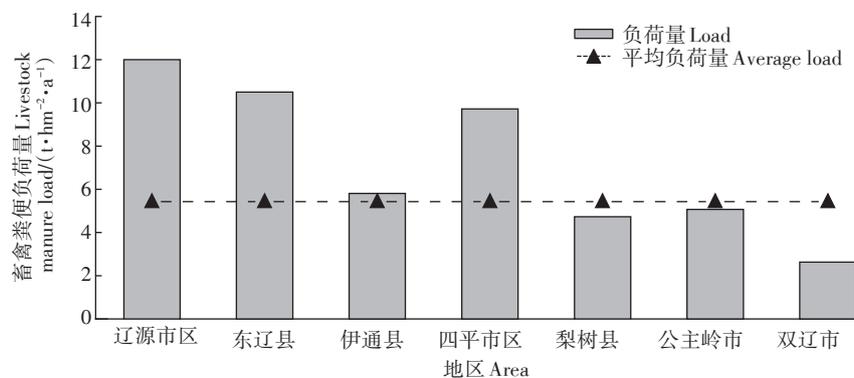


图3 吉林省辽河流域畜禽粪便负荷量

Figure 3 The manure load of livestock in Liaohe River basin of Jilin Province

度上决定了区域养殖发展的空间。结合欧盟国家耕地消纳粪肥限量值(以氮、磷计分别为 $170、35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 相当于 $24.29、29.17$ 头猪当量 $\cdot \text{hm}^{-2}$), 根据畜禽养殖环境承载力的高低(图5), 将吉林省辽河流域承载力分为3个层次: 梨树县和公主岭市属于高承载力区, 这两个市县基于氮的环境承载力分别为 $152.54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $143.36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 基于磷的环境承载力分别是 $23.63 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $21.99 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 伊通县和双辽市为一般承载力区, 基于氮的环境承载力处于负荷上限标准的 $65\% \sim 75\%$, 磷的环境承载力分别是 $19.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $20.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 辽源市区、东辽县、四平市为承载力偏低区, 畜禽养殖环境的氮、磷承载力均小于限量标准的 60% , 其中四平市最低, 仅有 $78.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $11.81 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。吉林省辽河流域平均氮、磷环境承载力分别为 $131.39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $20.65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 梨树

县和公主岭市超过平均值, 畜禽养殖发展潜力较大, 而四平市区和辽源市区的环境承载力相对较低, 具有畜禽养殖环境污染的风险。

2.5 畜禽养殖环境污染风险分析

根据畜禽养殖环境风险指数核算, 如图6所示, 四平市区和辽源市区的氮污染风险指数分别为 $1.25、1.07$, 说明这两个地区没有足够的耕地消纳禽畜粪便, 这将会对农田产生一定程度的危害。辽源市区的磷污染风险指数为 1.08 , 属于磷环境中等污染风险, 四平市区和东辽县的磷污染风险指数分别为 $0.97、0.63$, 属于磷畜禽养殖环境低污染风险。综合氮和磷畜禽养殖环境风险评估发现, 辽源市区、东辽县和四平市属于畜禽养殖风险区, 且具有污染地区成块分布、氮和磷养分同时失衡的特征, 而其余市县属于畜禽养殖环境安全区, 对现有的养殖规模具有一定的承

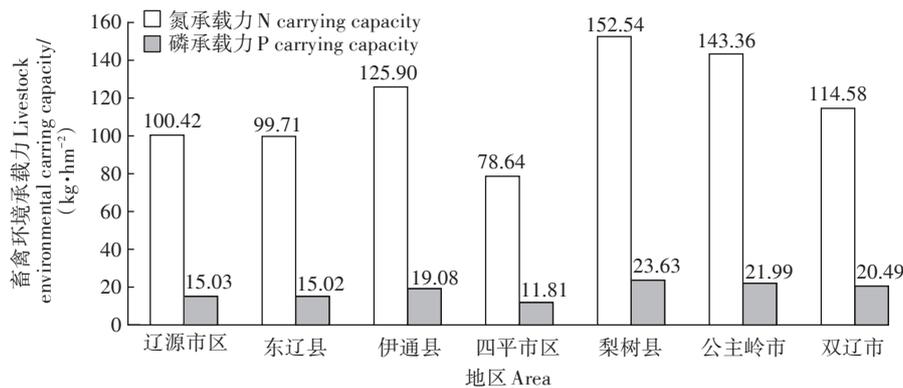


图5 吉林省辽河流域畜禽养殖环境承载力

Figure 5 The environmental carrying capacity of livestock husbandry in Liaohe River basin of Jilin Province

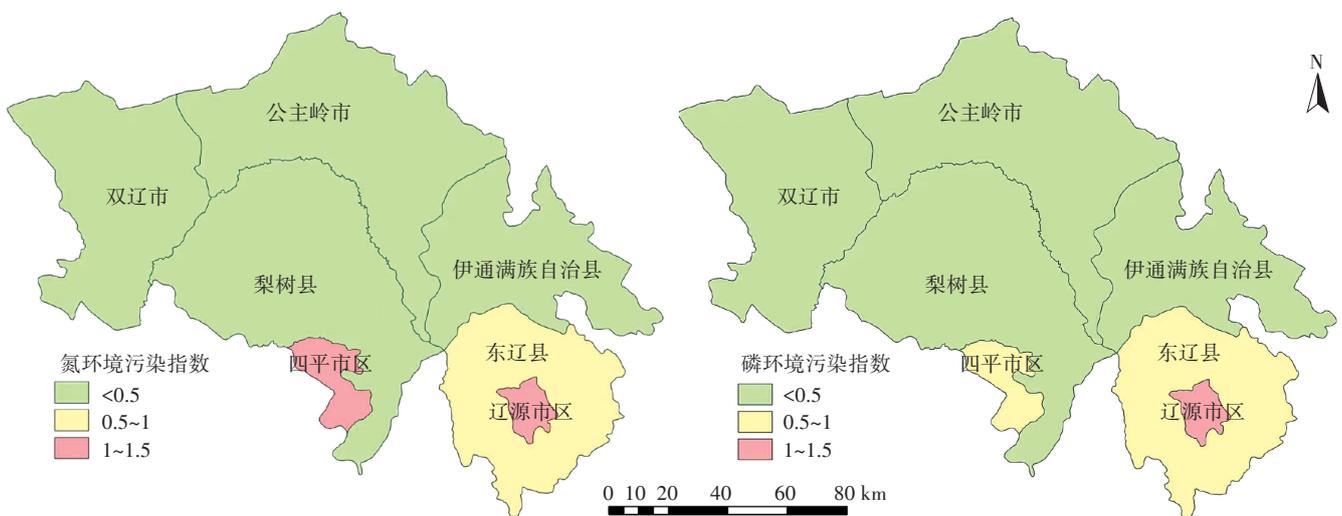


图6 吉林省辽河流域畜禽养殖环境污染风险评估

Figure 6 The risk assessment for pollution of livestock husbandry in Liaohe River basin of Jilin Province

载潜力。

3 讨论

3.1 关于畜禽粪便负荷量的核算

吉林省辽河流域近5年来养殖规模不断扩大,畜禽数量相较于2011年增加了近20%,但是畜禽养殖种类构成基本不变^[28-29]。目前流域内主要养殖种类是鸡,占养殖总量的88.45%,牛的养殖量最少,仅占总量的0.78%。不同畜禽粪便的排泄系数差异显著,以奶牛和蛋鸡为例,两者相差186倍。畜禽粪便排泄系数的差异,导致牛的养殖量虽然远不及鸡和生猪,但是前者的粪便产生量却大于后者。

公主岭市、梨树县和双辽市区虽然畜禽粪便量很高,猪粪当量分别是159.9万、114.5万、45.7万t,但是这3个市县的农田负荷风险属于安全等级,结合地区耕地面积进行分析发现,公主岭市、梨树县和双辽市区拥有吉林省辽河流域31.5%、24.2%和17.4%的耕地面积,这使得畜禽粪便拥有更多消纳的空间,从而降低了畜禽粪便污染风险;以四平市、辽源市为例,这两个区畜禽猪粪当量最低,但是由于这两个区的耕地面积小,仅占总耕地面积的3.08%和1.01%,从而导致了这两个区农田负荷量大,分别达到 $9.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 及 $12.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

为了进一步明确畜禽养殖环境风险范围,将辽源市区、四平市按照行政区域划分核算,结果如表6所示。研究表明龙山区和铁西区污染警戒值分别为0.43和0.52,而西安区和铁东区为0.36和0.22,说明龙山区和铁西区为畜禽粪便污染Ⅱ级风险区,而西安区和铁东区则属于安全区,这进一步缩小了畜禽污染风险范围,为划分畜禽养殖安全区提供了依据。

从整体上看,吉林省辽河流域大多数市县畜禽粪便负荷风险等级处于Ⅰ级,对周围环境暂无威胁,仅龙山区和铁西区对环境稍有威胁。通过对比流域畜禽粪便相关研究发现,畜禽粪便负荷风险区域划分结果与本文一致,但是负荷量核算结果却相差较大,其平均畜禽粪便负荷量达到了 $61.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[30],超出目前公认的 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的畜禽粪便还田限值,远高于同一时期吉林省平均畜禽粪便负荷量 $15 \sim 18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[31-32]。早期研究通常采用全国统一的畜禽产排污系数,核算数值较大,而不同省份和地区的养殖模式、密度和粪便处理方式等因素有很大的差异,本研究采用东北地区系数进行核算,结果则较小,造成了本研究畜禽粪便负荷量核算结果与其他学者存在

表6 2017年四平及辽源市区畜禽粪便污染警戒值与风险等级

Table 6 Warning values and risk levels of livestock manure pollution in Siping City and Liaoyuan City in 2017

地区 Area	警戒值r区域 r-range of alarming value	分级级数 Grade of classification
辽源市区(龙山区)	0.43	Ⅱ
辽源市区(西安区)	0.36	Ⅰ
四平市(铁西区)	0.52	Ⅱ
四平市(铁东区)	0.22	Ⅰ

一定的差异。

3.2 畜禽养殖环境污染及风险控制

对比吉林省辽河流域畜禽粪便负荷和环境承载力发现,虽然四平市和东辽县属于畜禽粪便负荷安全区,但是区域内的氮、磷畜禽养殖环境属于有污染风险状态,耕地土壤的氮磷含量有超标风险,这些市县需要加紧对畜禽粪便的资源化利用,控制对环境的污染影响。

从种养平衡角度进行分析^[33],辽源市区、四平市和东辽县的实际养殖数量超过或接近该地区环境承载能力的上限,可能引起氮磷供求失衡,造成较大的畜禽环境污染风险,需要减少畜禽养殖规模或者扩大高标准农田建设面积,以使地区种养保持平衡^[34]。从这3个市县的作物产量看,玉米产量最大,占区域作物总产量的81%,由于玉米单位产量养分需求量相较于大豆、油料作物要小很多,这些区域若要减少畜禽养殖环境风险,需要改变种植作物类型,进一步增加大豆、油料作物的播种面积,扩大种植业对氮、磷养分的需求量,力求作物养分供求平衡,避免种养结合的盲目性和环境污染问题。

4 结论

(1)2017年吉林省辽河流域畜禽粪便产生量达537.59万t,其中公主岭市产生量最多,为171.33万t,其次为梨树县,为109.84万t。

(2)吉林省辽河流域的畜禽粪便负荷量平均为 $5.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,畜禽粪便污染警戒平均值为0.18,辽源市区的粪便负荷量最大,为 $12.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,达到Ⅱ级环境污染风险,对当地农田环境产生了威胁。其余市县粪便负荷量都处于安全范围,对周围环境基本无影响。

(3)畜禽养殖氮、磷环境承载力平均值分别为 $131.39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $20.65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,四平市区的氮环境承载力最弱,为 $78.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,辽源市区的磷污染风

险指数最大为1.08。根据畜禽养殖环境风险划分,辽源市区属于氮和磷中等污染风险区,东辽县属于氮和磷低污染风险区,而四平市区分别是氮中等风险区和磷低风险区。其余市县对畜禽粪便具有一定的消纳潜力,属于畜禽养殖环境安全区域。

参考文献:

- [1] 孙江超. 我国农业高质量发展导向及政策建议[J]. 管理学报, 2019, 32(6): 28-35. SUN J C. The orientation and policy suggestions for the agricultural high-quality development[J]. *Journal of Management*, 2019, 32(6): 28-35.
- [2] 彭超, 刘合光. “十四五”时期的农业农村现代化: 形势、问题与对策[J]. 改革, 2020, 312(2): 20-29. PENG C, LIU H G. Agriculture and rural modernization during the 14th five-year plan period: The situation, problems and countermeasure[J]. *Reform*, 2020, 312(2): 20-29.
- [3] 袁浩博. 东北粮食主产区耕地质量保护与农业可持续发展研究[J]. 经济纵横, 2017(11): 112-117. YUAN H B. A study on cultivated land quality protection and agricultural sustainable development in the main grain producing areas of northeast China[J]. *Economic Review Journal*, 2017(11): 112-117.
- [4] 刘畅. 吉林省辽河流域生态环境因子时空变化及综合评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013. LIU C. The study on temporal and spatial variation characters of ecological environmental factors and evaluation of ecological environment in Liaohe River basin of Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [5] 汤洁, 黄璐思, 王博. 吉林省辽河流域生态系统服务价值对LUCC的响应分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2633-2640. TANG J, HUANG L S, WANG B. Analysis of ecosystem service value based on LUCC of Liao River basin of Jilin Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(8): 2633-2640.
- [6] 吉林省第二次全国污染源普查公报[N]. 吉林日报, 2020-09-09(6). Communique of the second national pollution source census in Jilin Province[N]. *Jilin Daily*, 2020-09-09(6).
- [7] 蒯鹏, 束克东, 成润禾. 我国工业部门环境污染排放变化的驱动因素——基于“十二五”工业排放数据的实证研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(6): 2392-2400. KUAI P, SHU K D, CHENG R H. Driving force for the variation of pollution discharge in the Chinese industrial department: An empirical study based on pollution data during the 12th five-year plan period[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(6): 2392-2400.
- [8] 朱康文, 陈玉成, 杨志敏, 等. 基于文献定量法的农业面源污染风险评估研究动态[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(4): 15-22. ZHU K W, CHEN Y C, YANG Z M, et al. Research trends of agricultural non-point source pollution risk assessment based on bibliometric method[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(4): 15-22.
- [9] 阎百兴, 欧洋, 祝惠. 东北黑土区农业面源污染特征及防治对策[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(2): 33-36. YAN B X, OU Y, ZHU H. Characteristics and prevention countermeasure of agricultural NPS in black soil region of northeast China[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2019, 44(2): 33-36.
- [10] ZERVAS G, TSIPLAKOU E. An assessment of GHG emissions from small ruminants in comparison with GHG emissions from large ruminants and monogastric livestock[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 49(1): 13-23.
- [11] YUAN Z, JI J, SHENG H, et al. Animal based diets and environment: Perspective from phosphorus flow quantifications of livestock and poultry raising in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 244: 199-207.
- [12] 朱悦. 基于“三水”内涵的水环境承载力指标体系构建——以辽河流域为例[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(6): 141-147. ZHU Y. Constitution of index system for water environmental carrying capacity based on "Three Waters" connotation: Taking Liaohe River basin as an example[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(6): 141-147.
- [13] 栗飞. 东辽河流域水环境问题及治理措施[J]. 农业工程, 2016, 6(3): 74-75. LI F. Problems and control measures of water environment in east Liaohe River basin[J]. *Agricultural Engineering*, 2016, 6(3): 74-75.
- [14] 王媛, 马继力, 吕川, 等. 吉林省辽河流域农业面源污染特征及趋势研究[J]. 吉林农业科学, 2012, 37(3): 61-64. WANG Y, MA J L, LÜ C, et al. Studies on characters and trends of agricultural non-point source pollution in Liaohe basin of Jilin Province[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2012, 37(3): 61-64.
- [15] 包维卿, 刘继军, 安捷, 等. 中国畜禽粪便资源量评估的排泄系数取值[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(5): 1-14. BAO W Q, LIU J J, AN J, et al. Value-taking of livestock and poultry excreta factor in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(5): 1-14.
- [16] 包维卿, 刘继军, 安捷, 等. 中国畜禽粪便资源量评估相关参数取值商榷[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 314-322. BAO W Q, LIU J J, AN J, et al. Discussion on value-taking of relative parameters for assessment of livestock and poultry excrement resource in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(24): 314-322.
- [17] 陈敏旺. 吉林省农田耕层土壤速效氮磷钾养分的时空变化特征[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018. CHEN M W. Temporal and spatial variability of available nitrogen, phosphorus and potassium status in cropland topsoil in Jilin Province[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2018.
- [18] 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): 179-187, 303. GENG W, HU L, CUI J Y, et al. Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal feeding in region level of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1): 179-187, 303.
- [19] 姚升, 王光宇. 基于分区视角的畜禽养殖粪便农田负荷量估算及预警分析[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2016(1): 72-84. YAO S, WANG G Y. Study on estimation and warning of farmland load of livestock and poultry: Based on zoning perspective[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2016

- (1):72-84.
- [20] 沈根祥,汪雅谷,袁大伟.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, YUAN D W. Loading amounts of animal feces and their alarming values and classification grades in Shanghai suburbs[J]. *Acta Agriculture Shanghai*, 1994, 10(Suppl):6-11.
- [21] 陈丽虹,李晔,程全国,等.葫芦岛市畜禽粪便排放量与农田负荷量分析[J].沈阳大学学报(自然科学版),2018,30(2):93-99. CHEN L H, LI Y, CHENG Q G, et al. Total amount of domestic animal excrement and load in farmland in Huludao City[J]. *Journal of Shenyang University(Natural Science)*, 2018, 30(2):93-99.
- [22] 张藤丽,焉莉,韦大明.基于全国耕地消纳的畜禽粪便特征分布与环境承载力预警分析[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(5):745-755. ZHANG T L, YAN L, WEI D M. Characteristic distribution of livestock manure and warning analysis of environmental carrying capacity based on the consumption of cultivated land in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(5):745-755.
- [23] 刘晓永,王秀斌,李书田.中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力[J].环境科学,2018,39(12):437-453. LIU X Y, WANG X B, LI S T. Livestock and poultry faeces nitrogen loading rate and its potential return to farmland in China[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(12):437-453.
- [24] WONG J, MA K K, FANG K M, et al. Utilization of a manure compost for organic farming in Hong Kong[J]. *Bioresource Technology*, 1999, 67(1):43-46.
- [25] 李巧巧.畜禽养殖环境承载力核定方法研究[D].长沙:湖南农业大学,2014. LI Q Q. The research of environmental of livestock and poultry capacity method[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014.
- [26] 王舫.基于环境承载力的黑龙江省畜禽产业布局优化研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2020. WANG F. Research on optimizing the layout of livestock and poultry industry in Heilongjiang Province based on environmental carrying capacity[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.
- [27] PENG L, BAI Y. Numerical study of regional environmental carrying capacity for livestock and poultry farming based on planting-breeding balance[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(9):1882-1889.
- [28] 李娜,魏鑫,韩维峥,等.吉林省畜禽养殖量区域差异及环境风险评估[J].环境工程,2020,38(2):166-170,146. LI N, WEI X, HAN W Z, et al. Regional disparity and environmental risk assessment of livestock and poultry breeding industry in Jilin Province[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(2):166-170, 146.
- [29] 郭瑞敏,花修艺,梁大鹏,等.辽河流域(吉林省部分)畜禽养殖污染负荷及环境效应[J].科学技术与工程,2014,14(11):91-95. GUO R M, HUA X Y, LIANG D P, et al. Pollution loads and environmental effects of livestock and poultry breeding of Liao River basin in Jilin Province[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(11):91-95.
- [30] 郭瑞敏.辽河流域吉林省部分畜禽养殖污染的负荷估算与好氧堆肥研究[D].长春:吉林大学,2014. GUO R M. Research on pollution loads and aerobic composting of livestock and poultry breeding of Liao River basin in Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [31] 刘文明.畜牧业发展对生态环境的影响研究——以吉林省为例[J].中国畜牧杂志,2014,50(8):33-36. LIU W M. A research of the impact of animal husbandry development on the ecological environment in Jilin Province[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2014, 50(8):33-36.
- [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. ZHU J C, ZHANG Z Q, FAN Z M, et al. Biogas potential, cropland load and total amount control of animal manure in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3):435-445.
- [33] LI J, LIU L. Determining the carrying capacity and environmental risks of livestock and poultry breeding in coastal areas of eastern China: An empirical model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(8):7984-7995.
- [34] 黄显雷.基于种养结合的畜禽养殖环境承载力评价研究——以舒兰市为例[D].北京:中国农业科学院,2018. HUANG X L. Study on environmental carrying capacity of livestock and poultry based on the combination of planting and breeding in Shulan City[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences 2018.