

湖南省畜禽养殖粪污的耕地负荷与土地承载力评价

李丽, 夏卫生, 周浩

(湖南师范大学 地理科学学院, 湖南 长沙 410081)

摘要: [目的] 测算和分析畜禽养殖粪污耕地负荷和土地承载力, 为防治农业面源污染, 促进农牧协调发展提供科学依据。[方法] 根据湖南省畜禽养殖、作物产量等数据资料, 在考虑粪污综合利用率的前提下, 采用产排污系数法、养分平衡法分别计算 2020 年各地市州畜禽养殖耕地污染负荷和土地承载力, 分析畜禽养殖空间布局以及粪污消纳分配。[结果] 湖南省 2020 年共养殖猪当量 4.27×10^7 头, 各区域养殖量差异很大; 畜禽粪便和 TN, TP 耕地负荷分别为 19.04 t/hm^2 , 94.85 , 24.99 kg/hm^2 , 耕地负荷警报级别均在 II 级以上, 对耕地环境稍有威胁, 其中永州市、娄底市、怀化市、郴州市至少有两项耕地负荷警报级别达到了 III 级及以上, 耕地环境风险较高; 畜禽养殖土地最大承载量为 1.23×10^8 头猪当量, 已养殖猪当量仅占其 37.18%。各地市州的可增加养殖量也非常可观, 常德市、益阳市、岳阳市、邵阳市、长沙市、永州市、衡阳市 7 个市的可养殖猪当量在 5.00×10^6 头以上。在确认区域内畜禽养殖未超载的基础上, 永州市、娄底市、怀化市、郴州市要鼓励林地、园地的作物管理者增加有机肥的施用比例, 加大粪污消纳量, 才能降低耕地环境污染风险。[结论] 湖南省畜禽养殖耕地环境风险整体上较低, 畜禽养殖业发展空间很大, 但是部分地市州存在耕地污染风险, 必须调整粪污消纳去向, 才能缓解耕地的粪污消纳压力, 推动农业可持续发展。

关键词: 畜禽养殖; 耕地负荷; 土地承载力; 湖南省

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)01-0118-09

中图分类号: S811.5

文献参数: 李丽, 夏卫生, 周浩. 湖南省畜禽养殖粪污的耕地负荷与土地承载力评价[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 118-126. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.013; Li Li, Xia Weisheng, Zhou Hao. Evaluation of farmland load and land carrying capacity of livestock and poultry manure in Hunan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 118-126.

Evaluation of Farmland Load and Land Carrying Capacity of Livestock and Poultry Manure in Hunan Province

Li Li, Xia Weisheng, Zhou Hao

(College of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China)

Abstract: [Objective] The purposes of this study were to provide a scientific foundation for the prevention and control of agricultural non-point source pollution, and to promote coordinated development between agriculture and animal husbandry by calculating and analyzing livestock manure load of farmland and land carrying capacity. [Methods] We considered the comprehensive utilization rate of livestock and poultry waste, and employed the method of the pollution generation and discharge coefficient and the method of the nutrient-balance to separately calculate livestock manure load of farmland and land carrying capacity in different regions of Hunan Province in 2020. The spatial layout of livestock and poultry breeding and the distribution of manure pollution were analyzed by utilizing data regarding livestock manure and crop yield in Hunan Province. [Results] A total of 4.27×10^7 pigs were bred in Hunan Province in 2020, with significant variation across regions. The loads of livestock and poultry manure, TN, and TP on farmland in Hunan Province were 19.04 t/hm^2 , 94.85 kg/hm^2 , and 24.99 kg/hm^2 , respectively, and the cultivated land load alert levels all exceeded level II, posing a slight threat to the farmland environment. At least two farmland

收稿日期: 2023-06-07

修回日期: 2023-08-06

资助项目: 湖南省自然资源厅项目“湖南省矿产资源有偿使用权益框架构建及责权分配研究”(2020-05); 农业部长江中游平原农业环境重点实验室开放资助项目“水稻土旱化种植过程中镉迁移特征研究”(531220-1291)

第一作者: 李丽(1997—), 女(汉族), 湖南省郴州市人, 硕士研究生, 研究方向为国土资源利用与管理。Email: lilyzmf@163.com.

通信作者: 夏卫生(1966—), 男(汉族), 湖南省安化县人, 博士, 教授, 主要从事土地资源管理方面研究。Email: xws@hunnu.edu.cn.

load warning levels in Yongzhou, Loudi, Huaihua, and Chenzhou City reached level III or above, indicating a heightened environmental risk. The maximum land carrying capacity of livestock and poultry breeding land was 1.23×10^8 pig equivalents, but the currently raised pig equivalents only accounted for 37.18% of this value. This result indicated that there was significant potential for increasing the livestock breeding capacity in various cities, with seven cities (Changde, Yiyang, Yueyang, Shaoyang, Changsha, Yongzhou, and Hengyang City) capable of breeding more than 5.00×10^6 pig equivalents. Given the absence of breeding overload within these regions, crop managers in woodland and orchards in Yongzhou, Loudi, Huaihua, and Chenzhou City were encouraged to increase their application of organic fertilizers and manure absorption to lower the risk of farmland pollution. [Conclusion] Overall, the risk posed by livestock and poultry breeding to the farmland environment in Hunan Province remains relatively low, suggesting substantial potential for future industry expansion. However, certain regions are facing farmland pollution risks, thus necessitating a redirection in manure disposal to lessen the pressure of manure absorption on farmland, thereby promoting sustainable agricultural development.

Keywords: livestock and poultry manure; farmland load; land carrying capacity; Hunan Province

农业面源污染防治是生态环境保护的重要内容,事关国家粮食安全和农业绿色发展,而畜禽养殖是农业面源污染的主要污染源^[1]。2020年公布的《湖南省第二次全国污染源普查公报》显示,畜禽养殖业的水污染物排放量中生化需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)3项主要污染物分别占农业源的95.09%、38.71%和61.81%。畜禽养殖尤其是规模性畜禽养殖粪污排放量大且集中,若处理不当会造成严重的水体、土壤和气体等环境污染^[2]。近年来,湖南省不仅大力推进畜禽粪污资源化利用,而且极其重视各地畜禽养殖总量控制,以免超过当地土地承载能力,造成农作物减产、生态环境破坏。

中国的畜禽养殖污染问题早已引起相关学者的关注。红霞^[3]的研究发现畜牧业发达的内蒙古因种养结合不紧密、粪污资源供求失衡、政策法规缺乏可操作性等造成了畜禽养殖污染。为加强各地畜禽养殖数量管控、优化农牧产业空间布局,学者们主要从耕地负荷预警与环境承载力两个方面估算研究区域各地的畜禽养殖粪污消纳能力。部分学者先通过产排污系数法^[4-6]或者粪便养分含量系数^[7-9]计算畜禽养殖粪便及氮、磷产生总量,然后用欧盟氮磷养分施用标准计算畜禽粪污耕地负荷以判断各地耕地是否超负荷而存在环境风险。其中,宋江燕等^[10]在考虑粪污综合利用率的前提下,较精准地对惠州市各区、县耕地承载负荷值进行了估算,而周芳等^[11]、郝守宁等^[12]、张晓莉等^[13]在此之前还估算并分析了畜禽养殖粪污产排的时空演变特征,为制定畜牧业发展规划提供了可靠的理论依据。但是中国的耕作制度、作物类型等与欧盟差异较大,仅用欧盟氮磷养分施用标准计算畜禽粪污耕地负荷,其结果可能存在一定误

差^[14]。而根据区域内农作物生长对氮(磷)养分的吸收量与单位猪当量粪肥供给量计算各地区畜禽养殖土地承载力,更符合各地的实际情况^[15-17]。于是,郇兴亮等^[18]通过估算农田畜禽粪便养分负荷量和畜禽养殖承载力研究新疆畜牧业发展空间;陈广银等^[19]还测算了畜禽养殖环境风险指数以及畜禽发展潜力,并据此提出了黄淮海地区畜禽养殖优化发展布局。学术界对畜禽养殖粪污消纳研究得愈加深入,有助于推动农牧业的可持续发展。

湖南省是全国闻名的养殖大省,2020年生猪出栏量居全国第二位,但是其庞大的养殖量产生的粪污也对生态环境造成了威胁。刘诚^[20]通过计算湖南省2015年单位面积耕地畜禽粪污年负荷量,分析各地级市畜禽粪便对环境的影响;杜红梅等^[21]基于2016—2018年的相关数据估算了畜禽养殖土地承载力,并为各区域畜禽养殖制定了差异化策略。但是这些研究只关注了畜禽养殖粪污是否超过耕地负荷、畜禽养殖量是否超载,并未对养殖量不超载时如何通过引导粪污消纳去向分配来化解耕地环境风险进行研究。本文将在考虑畜禽粪污综合利用率的前提下,计算并分析各市、州畜禽粪污耕地负荷值及土地承载能力,以此作为规划畜禽养殖量和调整粪污消纳去向的依据,旨在推进湖南省农业面源污染防治及耕地保护工作。

1 研究区概况与材料方法

1.1 研究区概况

湖南省位于中国中部、长江中游,下辖长沙、株洲、湘潭等13个地级市以及湘西土家族苗族自治州。湖南属亚热带季风湿润气候,四季分明、降水丰沛,地形以山地、丘陵为主,河网密布、水系发达,给种植业和畜禽养殖业提供了绝佳的发展环境。2020年,湖

南省全年粮食种植面积 $4.76 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 总产量达 $3.07 \times 10^7 \text{ t}$, 养殖猪当量 4.57×10^7 头, 猪、牛、羊、禽肉类总产量达 $5.60 \times 10^6 \text{ t}$, 农林牧渔业总产值为 7.66×10^{11} 元。农业作为湖南省的基础产业, 种养规模必将进一步扩大。然而, 2022 年发布的《湖南省畜禽规模养殖污染防治规定》提出畜禽养殖品种、规模及总量的确定必须考虑环境承载力, 并与经济社会发展规划、生态环境保护规划等相衔接。因此, 保证畜禽养殖产生的粪污被种植业消纳、减少农业面源污染是湖南省必须解决的问题。

1.2 数据来源

以湖南省辖区内的生猪、肉牛、羊、蛋鸡、肉鸡养殖为研究对象, 根据其出栏量或存栏量计算并分析各市耕地畜禽养殖粪污负荷以及土地承载力。养殖数量考虑畜禽饲养周期, 生猪、肉鸡的养殖量以当年出栏量计, 蛋鸡、牛、羊以存栏量计。由于牛、羊的妊娠期较长, 本文 2020 年的牛、羊养殖量排除了当年出生的幼崽, 以 2019 年的年末存栏量为准。湖南省各地生猪、牛、羊养殖数量以及作物产量来自 2020—2021 年《湖南农村统计年鉴》, 蛋鸡、肉鸡的养殖量来自于彭紫薇等^[22]收集的数据; 耕地面积来源于湖南省公布的第三次国土调查主要数据成果公报。

表 1 各类畜禽粪便排泄系数及 TN, TP 产排系数

养殖种类	生猪	肉牛	蛋鸡	肉鸡	羊
粪便排泄系数	1.606 0	10.014 1	0.043 8	0.021 9	0.868 7
TN 产生系数	4.161 6	33.693 8	0.472 3	0.087 4	1.664 6
TP 产生系数	1.197 5	7.452 8	0.106 3	0.017 5	0.479 0
TN 排放系数	0.676 6	5.569 4	0.077 5	0.013 4	0.270 6
TP 排放系数	0.164 0	0.774 4	0.016 6	0.002 7	0.065 6

1.3.2 畜禽养殖 TN, TP 产生量和排放量估算 依据畜禽年存栏量、畜禽养殖 TN, TP 产排系数计算 TN, TP 产生量及排放量。由于《农业污染源产排污系数手册》中将畜禽饲养期主要污染物 (COD_{Cr}, NH₃-N, TN, TP) 产排污系数分为规模化和非规模化, 因此所采用的畜禽养殖 TN, TP 产排系数分别根据湖南省畜禽规模化与非规模化养殖量占比进行折算。从《湖南省畜禽养殖污染防治规划(2021—2025 年)》(湘环发〔2022〕21 号) 中可知, 2020 年畜禽规模化养殖占比为 63.00%, 则非规模化养殖占比为 37.00%。另外, 羊的产排污系数按照 100 头猪等于 250 只羊的比例折算。畜禽养殖 TN, TP 产生量和排放量估算公式为:

$$W_g = \sum N_i \times C_{gi} \quad (3)$$

1.3 计算方法

1.3.1 畜禽粪便、TN, TP 产生量和排放量估算

(1) 畜禽粪便产生量、排放量估算。依据湖南省畜禽年存栏量、粪便排泄系数计算畜禽粪便产生量及排放量。不同文献采用的畜禽粪便排泄系数不同, 经过筛选, 生猪、肉牛、蛋鸡和肉鸡的粪便排泄系数参照周天墨等^[23]对 2002—2010 年湖南省的产污量计算结果, 而羊粪便排泄系数参照王方浩等^[24]的取值。畜禽粪便产生量计算公式为:

$$Q = \sum N_i \times P_i \quad (1)$$

式中: Q 为区域内畜禽粪便产生总量(t); N_i 为湖南省主要养殖的各种畜禽年存栏量(头或羽); P_i 为各种畜禽的粪便排泄系数{t/[头(羽)·a]}(见表 1)。

实际生产过程中, 部分畜禽粪污未被资源化利用经处理设施消减或未经处理利用而直接排放到环境中, 不计入耕地负荷范围内。湖南省农业农村厅公布的数据显示, 湖南省 2017 年畜禽粪污资源化利用率为 67.87%, 2022 年达到 83.00%, 用插值法算出 2020 年湖南省的畜禽粪污资源化利用率约为 77.00%。畜禽粪便排放量计算公式为:

$$E = Q \times (1 - 77.00\%) \quad (2)$$

式中: E 为区域内畜禽粪便排放总量(t)。

$$W_d = \sum N_i \times C_{di} \quad (4)$$

式中: W_g 为区域内畜禽养殖 TN, TP 的产生总量(kg); W_d 为区域内畜禽养殖 TN, TP 的排放总量(kg); C_{gi} 为湖南省主要养殖的各种畜禽的 TN 或 TP 的产生系数(表 1){kg/[头(羽)·a]}; C_{di} 为各种畜禽的 TN 或 TP 排放系数(表 1){kg/[头(羽)·a]}。

1.3.3 畜禽养殖粪污耕地负荷评价 为了科学评估湖南省畜禽养殖粪污对耕地环境造成的影响, 本研究估算了 2020 年湖南省各市州畜禽粪便、TN, TP 的耕地负荷, 估算公式为:

$$L = \frac{Q - E}{S} \text{ 或 } L = \frac{W_g - W_d}{S} \quad (5)$$

式中: L 为畜禽粪便, TN, TP 的耕地负荷(t/hm² 或 kg/hm²); S 为耕地面积(hm²)。

采用畜禽养殖污染负荷警报值评估研究区域内畜禽养殖粪污对环境的威胁性以及潜在环境风险,估算公式为:

$$R = L / M_{\max} \quad (6)$$

式中: R 为耕地负荷警报值,分级方法参考文献[25],具体见表2; M_{\max} 为各类畜禽养殖污染最大理论承载量,参考文献[24],本研究以30,170,35 kg/hm²作为畜禽养殖粪便,TN,TP在耕地上的最大施用限度。

表 2 畜禽粪便及氮(磷)耕地负荷警报值分级

Table 2 classification of warning values for livestock and poultry manure and nitrogen(phosphorus) farmland load

负荷预警值	(0,0.4]	(0.4,0.7]	(0.7,1.0]	(1.0,1.5]	(1.5,2.5]	(2.5,+∞)
负荷预警级别	I	II	III	IV	V	VI
对环境的威胁性	无	稍有	有	较严重	严重	很严重
潜在环境风险评价	无	低	中等	较高	高	极高

1.3.4 区域畜禽粪便土地承载力测算 参照《畜禽粪便土地承载力测算方法》(NY/T3877—2021)中的计算方法和系数,从《湖南农村统计年鉴》中选取2020年稻谷、玉米、小麦、大豆、薯类、花生、油菜籽、棉花、麻类、甘蔗、烟叶、蔬菜、西瓜、茶叶、柑橘、桃子、梨、葡萄等18类主要作物的产量来测算各地市州作物氮(磷)养分需求量,进而计算区域作物粪便养分可施用量。为使计算结果更加接近实际情况,单位猪当量粪便养分可供量用表3中生猪产排污系数之差乘以生猪年出栏批次代替,最后计算出区域畜禽粪便土地承载力。

区域作物粪便养分可施用量计算公式为:

$$M = \frac{\sum(Y \times \alpha \times \beta \times \gamma \times 10)}{\theta} \quad (7)$$

式中: M 为区域作物粪便养分可施用量(kg/a); Y 为边界内作物总产量(t/a); α 为边界内各种作物形成100 kg产量所需要吸收的氮(磷)养分量的数值(kg/100 kg); β 为作物总养分需求中施肥供给养分所占比例(%),氮、磷施肥供给养分占比分别取50%,40%^[21]; γ 为给作物施肥时,粪肥占施肥总量的比例(%),取50%^[26]; θ 为粪便当季利用率(%),粪肥中氮素当季利用率取30%,磷素当季利用率取35%^[27];10为换算系数,将作物形成100 kg产量所需吸收的氮(磷)养分量的数值换算为以kg/t为单位。

区域畜禽粪便土地承载力计算公式为:

$$R = \frac{M}{(C_{g1} - C_{d1}) \times 2} \quad (8)$$

式中: R 为区域畜禽粪便土地承载力(猪当量); C_{g1} 为生猪粪污中氮、磷的产生系数(kg/头或kg/羽); C_{d1} 为生猪粪污中氮、磷的排放系数(kg/头或kg/羽);2为生猪年出栏批次。

2 结果与分析

2.1 畜禽养殖数量及空间分布特征

湖南省畜禽养殖主要种类为生猪、肉牛、蛋鸡、肉

鸡、羊,养殖总量庞大。根据统计数据(表3)可知,2020年全省年出栏生猪4.67×10⁷头,年出栏肉鸡3.17×10⁸羽,年存栏肉牛4.10×10⁶头,年存栏蛋鸡8.37×10⁷羽,年存栏羊7.12×10⁶头。通过换算,湖南省2020年共养殖猪当量4.27×10⁷头,各种畜禽的贡献率有所不同,生猪的贡献率最大、肉牛次之,两者的贡献率分别为50.97%,29.93%。

湖南省畜禽养殖量空间分布不均匀,与各地自然资源禀赋、经济发展方向密切相关。其中,永州市、常德市、衡阳市、邵阳市的平原、丘陵、盆地3种海拔较低的地形所占面积较大,水资源丰富,并且重视农业的发展,其养殖猪当量在4.00×10⁶头以上,永州市养殖猪当量最大,达6.30×10⁶头;怀化市、郴州市、娄底市海拔较高、多山地,畜禽养殖条件略差,而岳阳市、益阳市辖区内含洞庭湖水域,为防止水体污染,湖滨地区畜禽养殖规模受到严格控制,长沙市的发展重点为二、三产业,上述6个地级市养殖猪当量范围为2.00×10⁶~4.00×10⁶头;株洲市、湘潭市、湘西州、张家界市的养殖量在2.00×10⁶头以下,株洲市、湘潭市作为长沙市的发展“搭档”,大力发展高新技术产业,湘西自治州、张家界市山地所占面积均超过75%,尤其是张家界市属于砂岩地貌,不利于发展农业,其养殖量最小,为9.27×10⁵头。

2.2 畜禽养殖粪污耕地负荷评价

根据估算结果,湖南省2020年畜禽粪便和TN,TP的产生量分别为8.97×10⁷,4.11×10⁵,1.04×10⁵ t,各市粪便产生量差异大(表4)。其中永州市、常德市、衡阳市、邵阳市的粪便排放总量较大,湘西州、湘潭市、张家界市的粪便排放总量较小。由此可知,控制畜禽养殖总量是防治畜禽养殖粪污环境污染的重要途径。

根据湖南省畜禽粪便,TN,TP的单位耕地负荷测算结果,可知全省以及各市州畜禽养殖产生的粪污是否对耕地环境造成威胁。2020年,全省畜禽粪便

耕地负荷为 19.04 t/hm^2 , 警报级别为 II 级, 对环境稍有威胁, 潜在环境风险低; TN 的耕地负荷值为 94.85 kg/hm^2 , 属于 II 级, 对环境稍有威胁, 潜在环境风险低; TP 的耕地负荷值为 24.99 kg/hm^2 , 属于 III 级, 对周围环境有威胁, 有中等的潜在环境风险。从各个地级市来看, 永州市的畜禽养殖量最大、粪便产生量也最大, 粪便, TN, TP 的警报级别都处于 III 级及以上;

娄底市耕地面积有限, 而 5 个县(市、区)中有 4 个是生猪调出大县, 粪便, TN, TP 的耕地负荷警报级别皆达到了 III 级; 与养殖量更大的常德市、衡阳市、邵阳市相比, 怀化市与郴州市的耕地面积偏小, 导致粪便, TP 的耕地负荷警报值偏高; 湘潭市、衡阳市仅 TP 的耕地负荷警报级别达到了 III 级; 其余各市州粪便、TN, TP 的耕地负荷值较低, 但是仍有轻微的环境风险。

表 3 2020 年湖南省畜禽养殖量及耕地面积

Table 3 Livestock and poultry production in Hunan Province and cultivated area in 2020

市州	生猪出栏量/ 10^4 头	肉鸡出栏量/ 10^4 羽	牛存栏量/ 10^4 头	羊存栏量/ 10^4 头	蛋鸡存栏量/ 10^4 羽	猪当量/ 10^4 头	耕地面积/ 10^4 hm^2
长沙市	275.34	921.86	11.00	48.10	261.43	235.41	20.24
株洲市	241.21	916.45	10.10	49.00	423.44	198.14	17.32
湘潭市	235.17	1 544.19	6.00	14.10	265.34	166.19	12.90
衡阳市	526.54	7 331.79	27.60	54.40	1 587.13	499.17	35.46
邵阳市	523.73	937.43	51.40	56.50	188.07	470.82	39.70
岳阳市	351.46	2 076.30	27.10	42.20	578.91	322.71	34.89
常德市	384.79	5 639.98	40.40	129.60	1 967.57	502.72	43.52
张家界	73.12	247.25	12.80	20.40	82.61	92.67	10.33
益阳市	294.21	655.51	18.50	39.20	1 250.44	279.71	27.49
郴州市	431.94	1 394.46	30.10	40.60	308.38	356.03	24.37
永州市	602.42	2 947.06	72.90	70.80	852.81	630.22	33.55
怀化市	307.48	1 683.15	49.70	58.60	293.34	368.05	28.56
娄底市	305.63	2 135.71	30.30	45.30	233.89	298.38	16.84
湘西州	105.86	232.04	22.50	43.40	76.64	150.21	17.71
总计	4 658.90	31 663.18	410.40	712.20	8 370.01	4 570.44	362.88

注: 根据《排污许可证申请与核发技术规范畜禽养殖行业》(HJ1029—2019), 按年出栏 2 头猪等于常年存栏 1 头猪, 年出栏 5 羽肉鸡等于常年存栏 1 羽肉鸡比例将以出栏量统计的畜种折算成存栏量; 根据《畜禽粪污土地承载力测算指南》(农办牧〔2018〕1 号), 按存栏量折算猪当量: 100 头猪相当于 15 头奶牛, 30 头肉牛, 2 500 羽家禽。

表 4 2020 年湖南省各市州畜禽养殖粪污产生量及耕地负荷情况

Table 4 Production of livestock and poultry farming manure and farmland load in various cities and prefectures of Hunan Province in 2020

市州	粪便			TN			TP		
	产生量/ 10^4 t	耕地负荷/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	耕地负荷 警报级别	产生量/ 10^4 t	耕地负荷/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	耕地负荷 警报级别	产生量/ 10^4 t	耕地负荷/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	耕地负荷 警报级别
长沙市	401.67	15.28	II	2.06	85.44	II	0.53	22.70	II
株洲市	359.96	16.00	II	1.71	82.46	II	0.45	22.44	II
湘潭市	279.56	16.69	II	1.46	95.15	II	0.39	26.03	III
衡阳市	848.09	18.41	II	4.60	108.74	II	1.16	28.25	III
邵阳市	996.71	19.33	II	4.18	87.98	II	1.07	23.64	II
岳阳市	624.72	13.79	II	2.90	69.59	II	0.74	18.47	II
常德市	937.02	16.58	II	4.60	88.50	II	1.13	22.54	II
张家界	209.32	15.61	II	0.83	67.22	I	0.21	17.48	II
益阳市	513.21	14.37	II	2.56	77.93	II	0.65	20.58	II
郴州市	703.16	22.22	III	3.15	108.06	II	0.82	29.24	III
永州市	1 325.54	30.42	IV	5.74	143.14	III	1.44	37.52	IV
怀化市	815.74	21.99	III	3.34	97.74	II	0.83	25.39	III
娄底市	607.80	27.79	III	2.67	132.47	III	0.68	35.01	III
湘西州	352.40	15.32	II	1.33	62.66	I	0.33	16.26	II
湖南省	8 974.88	19.04	II	41.12	94.85	II	10.42	24.99	III

在中国,农田氮素利用效率偏低,多余的氮会残留在土壤中或流失在环境中,引发水体污染、土壤酸化、生物多样性下降等典型环境问题^[28];而磷含量超过土壤的保持能力,也会通过地表径流和地下淋溶造成水体污染^[29]。湖南省 2020 年畜禽粪便, TN, TP 的产生量较大, 畜禽粪便, TN, TP 的耕地负荷值较高, 有潜在的环境风险; 尤其是永州市、娄底市、郴州市、怀化市耕地负荷警报级别整体较高, 农业氮磷面源污染加重的可能性较大。《湖南省“十四五”长江经济带农业面源污染综合治理实施方案》中提出探索建立粪肥运输、使用激励机制, 鼓励第三方企业、社会化服务组织对养殖场(户)无法就地消纳的畜禽粪污进行集中处理。因此, 对于湖南省内粪便, TN, TP 耕地负荷值偏高的永州、娄底等地级市, 可将粪肥制成有机肥外销, 给有需要的耕地、园地、林地培肥, 提高产量。

2.3 畜禽养殖粪污土地承载力评价

随着种植业的多元化发展, 湖南省的园地、林地消纳粪污的能力在不断增强, 单位面积耕地畜禽粪便最大适宜承载量、氮(磷)养分施用限量的经验值或理论值已经不能作为判断区域内畜禽养殖粪污土地承载能力的标准。从种养结合的角度, 根据种植的作物需要的氮(磷)养分需求量、土壤氮(磷)养分等级以及单位猪当量粪污资源化利用的氮(磷)养分量计算畜禽粪污土地承载力, 能够更加准确地估算涵盖耕地、园地、林地等多种土地利用类型的综合性畜禽粪污消纳能力。

为了降低污染环境的风险, 取基于氮、磷养分计算结果中较小的氮养分土地最大承载量作为区域适宜发展畜禽养殖的最大理论规模。因此, 2020 年湖南省畜禽养殖土地最大承载量为 1.23×10^8 头猪当量, 已养殖猪当量仅占其 37.18%, 还可养殖猪当量 7.77×10^7 头, 全省的畜禽养殖业还有很大的发展空间。从图 1a 可以看出, 常德市、永州市、邵阳市、衡阳市、岳阳市、益阳市的养分需求量较大, 土地最大承载量超过了 1.00×10^7 头猪当量。并且, 各市州的畜禽养殖量都没有超过土地最大承载量, 但是娄底市、永州市、怀化市、衡阳市、郴州市、湘西州已有养殖量占最大承载量比例超过 40.00%, 其中永州市、娄底市所占比例分别为 47.28% 和 53.06%, 为避免引起环境风险, 在增加养殖量的同时需扩大作物种植面积, 强化种养结合。而岳阳市、益阳市、长沙市已有养殖量占最大承载量比例在 30.00% 以下, 环境剩余容量较大, 可在适养区内适当地扩大养殖规模。从图 1b 来看, 常德市、益阳市、岳阳市、邵阳市、长沙市、永州市、衡阳市等 7 个市的可养殖猪当量在 5.00×10^6 头以上, 而湘潭市、娄底市、湘西州、张家界市的可养殖猪当量在 3.00×10^6 头以下, 必须在严格控制畜禽养殖量、监督畜禽粪污去向的基础上, 新增或者扩建有机肥加工厂, 避免造成农业面源污染。总之, 湖南省畜禽养殖业的发展潜力主要集中在自然条件占优势的湘南和湘北地区, 而湘西和湘中地区畜禽养殖业要积极探索畜禽粪污多元化利用途径, 才能突破区域壁垒。

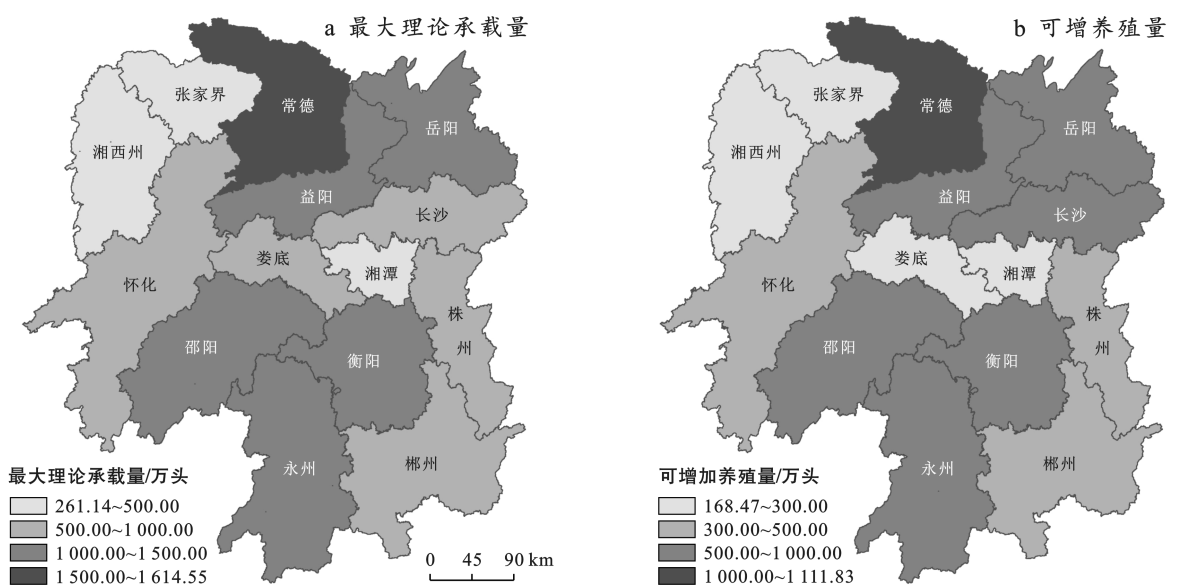


图 1 湖南省各市州畜禽养殖最大理论承载量、可增养殖量分布

Fig.1 Distribution of maximum theoretical carrying capacity and increased breeding capacity of livestock and poultry farming in various cities of Hunan Province

3 讨论

(1) 在计算粪便产生量时,大多数学者们的注意力都在畜禽粪便排泄系数上。畜禽粪便排泄系数取决于畜禽品种、个体大小、饲料成分、气候环境和管理水平等诸多因素,至今尚未有统一的标准,因此研究结果与实际情况难免会有差异。然而只有部分学者^[10]考虑到了粪污留存率或者综合利用率,导致许多研究成果^[11,30]中的耕地粪便负荷值偏高。

(2) 现有研究中,畜禽养殖 TN, TP 产生量有 2 种计算方式。①是以新鲜粪便样品的养分含量系数计算畜禽粪便中的 TN, TP 产生量。但是,就目前的畜禽粪污处理方式、技术以及设备而言,粪污资源化利用率远远达不到 100%,以粪便中养分含量系数计算出来的 N, P 产生量除以耕地面积得出的耕地负荷值明显偏大。②直接采用《农业污染源产排污系数手册》中与研究区域、研究对象相对应的产排污系数计算畜禽粪污中 TN, TP 的产排量,既考虑了畜禽养殖的区域性差异,又排除了畜禽产生的原始污染物未资源化利用的部分经处理设施消减或未经处理利用而直接排放到环境中的污染物质,其结果更具科学性,因此,耕地 TN, TP 负荷值会比肖琴等^[14]、刘诚^[20]的研究结果小。同理,在区域畜禽粪污土地承载力的计算中,本研究以《农业污染源产排污系数手册》中湖南省生猪的产排系数之差乘以年出栏数得出单位猪当量粪便氮(磷)养分年可供量,由此计算出来的湖南省畜禽粪污土地最大承载量为 1.23×10^8 头存栏猪当量,高于杜红梅^[21]折算后约为 9.63×10^7 头存栏猪当量的最大承载量,更符合湖南省的实际情况。

(3) 结合畜禽养殖粪污耕地负荷及土地承载力评价结果可知,湖南省 2020 年畜禽养殖耕地潜在环境风险较低,并且省内园地、林地等种植的作物对畜禽粪污氮(磷)养分的需求量较高,全省畜禽养殖量还有很大的增长空间。永州市的粪便、TN, TP 耕地负荷警报级别都达到了Ⅲ级以上,存在较严重的耕地潜在环境风险,但是其园地、林地等其他土地利用类型可消纳的粪污量比较大,所以永州市还可增加 7.02×10^6 头养殖量。娄底市、怀化市、郴州市亦是如此,今后增加的畜禽养殖量产生的粪污主要由耕地以外种植的作物消纳。其余地级市的粪便、TN, TP 耕地负荷警报级别普遍为在Ⅱ级,说明在一定时间内耕地尚有充足的粪污消纳能力。

(4) 不容忽视的是,此研究结果是在假设湖南省各地市的耕地污染负荷与畜禽粪便土地承载力是均匀分布的基础上得出的。而湖南省各地市区域面积

很大,区域内部畜禽养殖空间分布不均衡,不排除畜禽粪便在局部地区已经造成严重环境风险的情况。因此,管理者应该在掌握区域整体情况的前提下,结合各地实际,调整畜禽养殖粪污去向,优化种养布局。

4 结论

(1) 湖南省以养殖生猪为主,2020 年共养殖猪当量 4.27×10^7 头。因各市州的自然资源禀赋、经济发展方向差异较大,省内畜禽养殖量空间分布不均匀,其中永州市、常德市、衡阳市等地级市的养殖量较大,湘潭市、湘西州、张家界市的养殖量较小。

(2) 2020 年湖南省畜禽粪便和 TN, TP 的产生量分别为 8.97×10^7 t, 4.11×10^5 t, 1.04×10^5 t, 耕地负荷值分别为 19.04 t/hm², 94.85 kg/hm², 24.99 kg/hm², 耕地负荷警报级别分别为Ⅱ级、Ⅱ级、Ⅲ级,对耕地环境稍有威胁。在各地市州中,怀化市、郴州市有两项耕地负荷警报级别达到了Ⅲ级,永州市、娄底市各项耕地负荷警报值均达到了Ⅲ级甚至Ⅲ级以上,耕地环境风险较高。

(3) 根据种植的作物产量需要的氮、磷养分总量以及单位猪当量粪污资源化利用的氮、磷养分量计算,2020 年湖南省畜禽养殖土地最大承载量为 1.23×10^8 头猪当量,还可养殖猪当量 7.77×10^7 头,湖南省的畜禽养殖业还有很大的增长空间。各地市州中,常德市、益阳市、岳阳市、邵阳市、长沙市、永州市、衡阳市 7 个市的可养殖猪当量在 5.00×10^6 头以上。

(4) 湖南省目前畜禽养殖耕地潜在环境风险较低,可增加养殖量较大,除了永州市、娄底市、怀化市、郴州市需要增加林地、园地等土地利用类型的粪污消纳量,其余地级市的耕地在一定时间内尚有充足的粪污消纳能力。

[参 考 文 献]

- [1] 王建华, 钊露露, 王缘. 环境规制政策情境下农业市场化对畜禽养殖废弃物资源化处理行为的影响分析[J]. 中国农村经济, 2022(1): 93-111.
Wang Jianhua, Tou Lulu, Wang Yuan. The impact of agricultural marketization on livestock waste resource utilization in the context of environmental regulation policy [J]. Chinese Rural Economy, 2022(1): 93-111.
- [2] 高程, 王荣, 王敏, 等. 畜禽养殖污染现状与防治措施研究进展[J]. 家畜生态学报, 2022, 43(8): 8-12.
Gao Cheng, Wang Rong, Wang Min, et al. Advances on pollution status and control measures of livestock industry [J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2022, 43(8): 8-12.
- [3] 红霞. 内蒙古畜禽养殖污染基本特征、综合成因与治理途

- 径[J].家畜生态学报,2020,41(10):73-77.
- Hong Xia. Basic characteristics, comprehensive causes and control approaches of pollution from livestock and poultry breeding in inner Mongolia [J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2020,41(10):73-77.
- [4] 李丹阳,孙少泽,马若男,等.山西省畜禽粪污年产生量估算及环境效应[J].农业资源与环境学报,2019,36(4):480-486.
- Li Danyang, Sun Shaoze, Ma Ruonan, et al. Estimation of annual production amount of livestock and poultry manure and its environmental effect in Shanxi Province, China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019,36(4):480-486.
- [5] 郭珊珊,张涵,杨汝馨.基于耕地承载力的畜禽养殖污染负荷及环境风险研究:以四川省为例[J].水土保持通报,2019,39(1):226-232.
- Guo Shanshan, Zhang Han, Yang Ruxin. Pollutant loads and environmental risks of livestock production based on arable land carrying capacity: A case study in Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(1):226-232.
- [6] 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 Tengli, Yan Li, Wei Daming. 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.
- [7] 丁尚,付阳,郭浩浩,等.海南岛 1988—2018 年畜禽粪尿氮磷负荷量及环境效应[J].中国农业科学,2020,53(18):3752-3763.
- Ding Shang, Fu Yang, Guo Haohao, et al. Nitrogen and phosphorus loads and their environmental effects of animal manure in Hainan Island from 1988 to 2018 [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020,53(18):3752-3763.
- [8] 吴晓楠,尤佳,杜德来,等.辽宁省畜禽粪便产污系数测算与环境承载力预警分析[J].土壤通报,2023,54(2):424-431.
- Wu Xiaonan, You Jia, Du Delai, et al. Estimation of livestock manure production and environmental bearing capacity in Liaoning Province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023,54(2):424-431.
- [9] 熊蓓,王瑞梅.禁养区政策下的畜禽养殖结构调整及环境效应[J].中国农业大学学报,2022,27(11):291-304.
- Xiong Bei, Wang Ruimei. Structural adjustment and environmental effect of livestock and poultry breeding under policy of prohibiting livestock and poultry production [J]. Journal of China Agricultural University, 2022,27(11):291-304.
- [10] 宋江燕,吴根义,苏文幸,等.惠州市畜禽养殖污染耕地承载负荷估算及风险评价[J].农业资源与环境学报,2021,38(2):191-197.
- Song Jiangyan, Wu Genyi, Su Wenxing, et al. Carrying load estimation and risk assessment of cultivated land contaminated by livestock and poultry breeding in Huizhou [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021,38(2):191-197.
- [11] 周芳,琼达,金书秦.西藏畜禽养殖污染现状与环境风险预测[J].干旱区资源与环境,2021,35(9):82-88.
- Zhou Fang, Qiong Da, Jin Shuqin. Pollution status and environmental risk prediction of livestock breeding in Tibet [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021,35(9):82-88.
- [12] 郝守宁,普布次仁,董飞.林芝畜禽养殖粪便排放时空演变及耕地污染负荷分析[J].农业工程学报,2019,35(16):225-232.
- Hao Shouning, Pubuciren, Dong Fei. Analysis on spatial-temporal evolution of livestock manure emission and pollution load of cultivated land in Nyingchi [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(16):225-232.
- [13] 张晓莉,夏衣热·肖开提.新疆畜禽粪污排放时空演变特征及预警分析:基于 85 个县市数据[J].中国农业资源与区划,2022,43(2):240-249.
- Zhang Xiaoli, Xiayire Xiaokaiti. Analysis on the temporal and spatial evolution and early warning of livestock and poultry depress discharge in Xinjiang: Based on 85 counties and cities data [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022,43(2):240-249.
- [14] 肖琴,周振亚,罗其友.长江中下游地区畜禽承载力评估与预警分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(9):2050-2058.
- Xiao Qin, Zhou Zhenya, Luo Qiyu. Bearing capacity assessment and forewarning analysis of livestock and poultry breeding in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019,28(9):2050-2058.
- [15] 郭薇仪,崔建宇,张望,等.泛种养结合视角下北京市养殖业土地承载力评估[J].农业工程学报,2021,37(17):242-250.
- Guo Weiyi, Cui Jianyu, Zhang Wang, et al. Assessment of land carrying capacity of animal production in Beijing from a wider perspective of combination of planting and animal breeding [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(17):242-250.
- [16] 林宁,查向浩,蔡吉祥,等.喀什地区畜禽养殖粪污土地承载力时空分布[J].四川农业大学学报,2023,41(5):

- 935-944,960.
- Lin Ning, Zha Xianghao, Cai Jixiang, et al. Spatial and temporal distribution of land carrying capacity of livestock and poultry manure in Kashi [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2023,41(5):935-944,960.
- [17] 黄柏云,李铮,黄容,等.基于氮养分平衡法的畜禽粪污土地承载力研究:以重庆市为例[J].*西南大学学报(自然科学版)*,2022,44(12):145-155.
- Huang Boyun, Li Zheng, Huang Rong, et al. Study on the land carrying capacity of livestock and poultry manure basing on the method of nitrogen nutrient balance: Take Chongqing as an example [J]. *Journal of Southwest University (natural science edition)*, 2022, 44(12):145-155.
- [18] 郜兴亮,刘福元,翟中葳,等.新疆生产建设兵团畜禽粪便耕地负荷及土地承载力研究[J].*家畜生态学报*, 2022,43(7):70-74.
- Gao Xingliang, Liu Fuyuan, Zhai Zhongwei, et al. Livestock manure production and land carrying capacity in Xinjiang production and construction corps [J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2022,43(7):70-74.
- [19] 陈广银,曹海南,丁同刚,等.基于氮磷农田利用的黄淮海地区畜禽粪尿土地承载力研究[J].*生态与农村环境学报*,2021,37(6):714-723.
- Chen Guangyin, Cao Hainan, Ding Tonggang, et al. Bearing capacity of livestock and poultry manure in Huang-Huai-Hai region based on nitrogen and phosphorus farmland utilization [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021,37(6):714-723.
- [20] 刘诚.湖南省畜禽粪便产生量估算及对环境的影响评价[J].*黑龙江畜牧兽医*,2018(13):72-74.
- Liu Cheng. Estimation of livestock manure production in Hunan Province and its environmental impact assessment [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2018(13):72-74.
- [21] 杜红梅,陈思畅.种养平衡视域下湖南省县域畜禽养殖适度规模研究[J].*湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2021,47(3):317-325.
- Du Hongmei, Chen Sichang. The appropriate scale of livestock and poultry breeding based on balanced breeding in Hunan Province [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2021,47(3):317-325.
- [22] 彭紫微,吴根义,黄杰,等.区域畜禽环境承载力核算方法研究与应用[J].*农业环境科学学报*,2023,42(4):769-777.
- Peng Ziwei, Wu Genyi, Huang Jie, et al. Research and application of the accounting method of regional livestock and poultry environmental carrying capacity [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(4):769-777.
- [23] 周天墨,付强,诸云强,等.中国分省畜禽产污系数优化及污染物构成时空特征分析[J].*地理研究*,2014,33(4):762-776.
- Zhou Tianmo, Fu Qiang, Zhu Yunqiang, et al. Optimizing pollutant generation coefficients of livestock industry and mapping patterns of the pollutant constitution in China [J]. *Geographical Research*, 2014,33(4):762-776.
- [24] 王方浩,马文奇,窦争霞,等.中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J].*中国环境科学*,2006,26(5):614-617.
- Wang Fanghao, Ma Wenqi, Dou Zhengxia, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China [J]. *China Environmental Science*, 2006,26(5):614-617.
- [25] 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1):6-11.
- Shen Genxiang, Wang Yagu, Yuan Dawei. Loading amounts of animal feces and their alarming values and classification grades in Shanghai suburbs [J]. *Acta Agricul Turae Shanghai*, 1994,10(Suppl.1):6-11.
- [26] 潘瑜春,孙超,刘玉,等.基于土地消纳粪便能力的畜禽养殖承载力[J].*农业工程学报*,2015,31(4):232-239.
- Pan Yuchun, Sun Chao, Liu Yu, et al. Carrying capacity of livestock and poultry breeding based on feces disposal volume of land [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015,31(4):232-239.
- [27] 贺博.提高肥料利用率几点建议[J].*农业开发与装备*, 2013(3):115.
- He Bo. Some suggestion on improving fertilize utilization rate [J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2013(3):115.
- [28] Liu Xuejun, Cui Zhenling, Hao Tianxiang, et al. A new approach to holistic nitrogen management in China [J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2022:490-510.
- [29] 魏猛,张爱君,李洪民,等.长期施肥条件下黄潮土有效磷对磷盈亏的响应[J].*华北农学报*,2015,30(6):226-232.
- Wei Meng, Zhang Aijun, Li Hongmin, et al. Response of olsen-P to P balance in yellow fluvo-aquic soil under long-term fertilization [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015,30(6):226-232.
- [30] 易秀,陈生婧,田浩.陕西省养殖业畜禽粪氮磷耕地负荷的时空分布[J].*水土保持通报*,2016,36(3):235-240.
- Yi Xiu, Chen Shengjing, Tian Hao. Temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus cropland load of livestock manure in breeding industry of Shaanxi Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016,36(3):235-240.