

DOI: 10.12357/cjea.20230556

张建杰, 焦光月, 韩诗卉, 薛佳敏, 赵天翔, 杨晶. 集约化养殖粪尿氮磷分布特征及耕地消纳潜力分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(3): 468–475

ZHANG J J, JIAO G Y, HAN S H, XUE J M, ZHAO T X, YANG J. Distribution of manure-derived nitrogen and phosphorus from intensive livestock farming and their recycling potential[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(3): 468–475

集约化养殖粪尿氮磷分布特征及耕地消纳潜力分析*

张建杰¹, 焦光月², 韩诗卉¹, 薛佳敏¹, 赵天翔³, 杨晶⁴

(1. 山西农业大学资源环境学院 太原 030031; 2. 山西省畜牧技术推广服务中心 太原 030001; 3. 首都师范大学资源环境与旅游学院 北京 100048; 4. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022)

摘要: 分析集约化畜禽养殖场粪尿氮磷排放的空间分布特征, 并定量评估耕地对粪尿养分的消纳能力, 是促进粪尿养分资源合理利用的关键, 也是制定环境保护政策的重要依据。本研究收集了山西省朔州市 1576 个集约化畜禽养殖场的空间分布数据, 使用 NUFER-Animal 模型估算了养殖场的畜禽粪尿氮磷产生量; 结合 GIS 手段分析了粪尿养分的空间分布特征, 描述了粪尿氮磷产生的主要热点区域; 通过遥感手段与 GIS 空间分析方法分别计算了耕地对粪尿氮磷的消纳程度与消纳半径, 评估了各区县对于粪尿氮磷的消纳潜力。结果表明: 朔州市畜禽粪尿氮磷产生量呈现东高西低的分布特征, 主要集中在市域东部的 3 个区县, 氮、磷总产生量分别为 15.46 Gg、2.16 Gg, 各占总产生量的 80.93%、82.16%。全市耕地对于粪尿氮磷的消纳仍有较大潜力, 按就近消纳原则对全部粪尿氮进行消纳, 需要 9.94 万 hm^2 耕地满负荷承载, 占全市耕地总面积的 25.44%; 对粪尿磷而言, 则只需要 4.69 万 hm^2 耕地满负荷承载, 占比 12.00%; 且粪尿氮、磷满负荷承载的耕地主要分布在市域东部的 3 个区县(怀仁市、应县与山阴县), 分别为 8.21 万 hm^2 、3.93 万 hm^2 , 各占总量的 82.69%、83.92%。朔州全市粪尿氮磷绝大部分可以在半径 3 km 之内进行消纳。研究从畜禽养殖场规模和空间分布与耕地的空间位置关系出发, 构建了一个评价畜禽粪污消纳程度的方法, 能够更加客观地定量评价耕地对于养殖场粪尿氮磷的消纳程度, 可为今后畜牧业的空间布局优化和相关环境政策评价提供科学依据。

关键词: 集约化养殖场; 粪尿氮磷; 点源污染; 消纳潜力; 朔州市

中图分类号: S19; S158.5

Distribution of manure-derived nitrogen and phosphorus from intensive livestock farming and their recycling potential*

ZHANG Jianjie¹, JIAO Guangyue², HAN Shihui¹, XUE Jiamin¹, ZHAO Tianxiang³, YANG Jing⁴

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China; 2. Animal Husbandry Technology Extension Service Center of Shanxi Province, Taiyuan 030001, China; 3. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 4. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract: To promote the rational utilization of manure nutrient resources and provide a reference for environmental protection policies, it is imperative to analyze the spatial distribution characteristics of nitrogen (N) and phosphorus (P) discharged from the ma-

* 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项项目 (2016YFE0103100)、山西省科技重大专项计划 (202201140601028) 和山西省现代农业产业技术体系建设专项 (2023CYJSTX13) 资助

张建杰, 研究方向为养分资源管理。E-mail: zhangjianjie@yeah.net

收稿日期: 2023-09-27 接受日期: 2024-01-08

* This study was supported by the National Key R&D Program of China “Intergovernmental Cooperation in International Science and Technology Innovation” (2016YFE0103100), Shanxi Provincial Science and Technology Major Special Program (202201140601028) and the Earmarked Fund for Modern Agro-industry Technology Research System of Shanxi Province (2023CYJSTX13).

Corresponding author, ZHANG Jianjie, E-mail: zhangjianjie@yeah.net

Received Sep. 27, 2023; accepted Jan. 8, 2024

nure waste of intensive livestock and poultry farms, as well as quantitatively assess the recycling capacity of manure nutrients by farmland. In this study, the spatial data of 1576 intensive livestock and poultry farms in the area under the administration of Shuozhou City, Shanxi Province, were collected. NUFER (NUtrient flows in Food chain, Environment and Resources use) animal model was employed to estimate N and P production from livestock and poultry manure of these farms. The spatial distribution characteristics of manure nutrients were analyzed, and the main hotspots of manure-derived N and P production were delineated using GIS. The recycling levels and radius of manure-derived N and P in farmlands were calculated using remote sensing and GIS spatial analysis methods, and the recycling potential of manure-derived N and P in each district and county was evaluated. The production of manure-derived N and P production was high in the east and low in the west in Shuozhou City, predominantly in the three eastern districts/counties, where 15.46 Gg of N and 2.16 Gg of P were produced, accounting for 80.93% and 82.16% of the total production, respectively. Farmland in this area had great potential for recycling manure-derived N and P. According to the principle of “recycling in the neighborhood”, $9.94 \times 10^4 \text{ hm}^2$ of farmland was required for the recycling of the total manure-derived N, which constitutes 25.44% of Shuozhou’s total farmland. Regarding manure-derived P, only $4.69 \times 10^4 \text{ hm}^2$ of farmland was needed for its recycling, accounting for 12.00% of Shuozhou’s total farmland. The farmland with a full load of manure-derived N and P was mainly distributed in Huairan City, Yingxian County, and Shanyin County in the eastern part of Shuozhou, encompassing $8.21 \times 10^4 \text{ hm}^2$ and $3.93 \times 10^4 \text{ hm}^2$ in area and accounting for 82.69% of the total N production and 83.92% of the total P production, respectively. The majority of the manure-derived N and P in Shuozhou area can be consumed within a radius of 3 km. Based on the relationships between the scale and spatial distribution of livestock and poultry farms and the spatial location of farmland, this study developed a method to evaluate the recycling level of livestock and poultry manure for quantifying and assessing the recycling capability of manure-derived N and P from intensive livestock and poultry farms. These findings provide a scientific basis for the spatial arrangement optimization of livestock farms and the evaluation of relevant environmental policies in the future.

Keywords: Intensive livestock farm; Manure-derived nitrogen and phosphorus; Point source pollution; Recycling potential; Shuozhou City

过去几十年,随着中国社会与经济的快速发展,人们对动物蛋白消费需求的持续增加,拉动了畜牧业生产方式与养殖结构的迅速转型^[1]。一方面,蓬勃发展的畜牧业满足了中国饮食消费需求,同时也成为农业经济最具潜力的增长点;另一方面对土地利用、资源消耗、温室气体排放与氮磷等环境损失产生了非常重要的影响。动物粪尿氮磷养分利用效率低下与环境损失增加主要是由于“农牧分离”造成的^[2],重塑农牧系统是实现农牧业绿色发展的关键途径^[3],而实现这一途径的先决条件是准确评估农田与畜牧系统之间粪尿氮磷养分的供给关系。

欧盟很早就意识到畜禽粪尿氮磷不合理利用带来的环境问题,通过制定政策明确了施入农田粪尿氮磷的限量标准,明确指出单位耕地面积粪尿氮的施用量不超过 $170 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[4],而粪尿磷的施用量不超过 $35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[5];在丹麦等国家则进一步通过实施和谐规则 (Harmony Rules) 规定不同畜种的养殖密度,来限制农田粪尿养分的投入量^[6],以此落实欧盟的粪尿养分管理政策。国内学者评价了我国国家尺度^[7]、省域尺度^[8]的畜禽粪便资源总量与分布特征,定量分析了畜禽粪尿氮磷对环境的潜在影响^[9],为畜禽粪污的无害化处理与资源化利用在政府层面制定政策提供了依据。但上述研究仅仅停留在对粪尿养分量的估算与耕地负荷的分析^[9-10],没有考虑畜禽养殖场与

耕地的空间分布,而这恰恰是决定种养结合的关键因素。另外,畜禽养殖场的粪污在“饲舍-贮藏-处理”环节的损失不尽相同^[11],因此,在估算进入农田的粪尿资源量时,应该根据不同的收集工艺与处理模式评估养分损失进而来估计实际还田量,这也是前人研究尚少考虑的因素之一。

山西省朔州市是中国北方农牧交错带的核心区域,地处全国“镰刀弯”区域,土地肥沃,雨热同期,光照充足,为草业发展提供了优良的水热条件。另外也是山西省委省政府确定的雁门关农牧交错带核心区,是肉类生产的主要产区。通过研究这一区域规模化养殖场的粪尿氮磷分布特征,并结合养殖场与耕地的空间分布,分析局部的“动物-农田”粪尿氮磷承载力关系,对今后实现农牧业绿色发展具有重要的科学意义,同时也可农牧交错带其他区域农牧产业布局提供理论依据与方法借鉴。

1 研究方法

1.1 研究区概况

朔州市位于山西省北部 ($111^{\circ}53' \sim 113^{\circ}34' \text{E}$, $39^{\circ}5' \sim 40^{\circ}17' \text{N}$),地处大同盆地西南端,南邻忻州,北接大同,西北与内蒙古交界。东西宽 145 km,南北长 133 km,总面积 1.06 万 km^2 。朔州市整体是黄土覆盖的山地高原,自然条件复杂多样,过渡性质明显。朔

州市属温带大陆性季风气候,四季分明。春季雨水较少、风沙较大,常出现干旱天气;夏季雨量集中,有大雨、暴雨、冰雹等天气;秋季雨水较少;冬季雨雪少、大风天气较多。年平均气温 7.5 ℃,年均降雨量 402.4 mm,平均日照时数 2691.9 h,年霜日数 28~111 d。主要农作物有玉米 (*Zea mays*)、谷子 (*Panicum miliaceum*)、马铃薯 (*Solanum tuberosum*)、甜菜 (*Beta vulgaris*) 与豌豆 (*Pisum sativum*) 等。畜牧业以奶牛、肉羊和生猪为主。牧草资源丰富,2015 年被确定为全国唯一整市推进的草牧业试验试点市。

1.2 数据收集

本研究收集了朔州市 1576 个集约化畜禽养殖场的数据,包括养殖畜禽种类、养殖规模与养殖场位置等信息(图 1)。畜禽种类包括奶牛、肉牛、生猪、绵羊、山羊和蛋鸡等,数据来源于山西省畜牧技术推广服务中心;不同畜禽种类的日排泄氮磷含量采用《土地承载力测算技术指南》^[12],见表 1;收集了 ArcGIS shp 格式的朔州市行政区划数据,利用高分五号的高光谱影像数据解释土地利用类型,提取耕地图斑;通过实地调研,掌握了典型养殖场的粪污收集

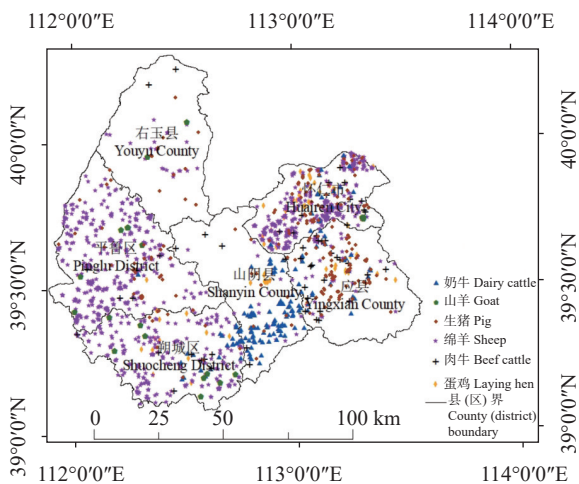


图 1 研究区域及其养殖场分布图

Fig. 1 Location and distribution of farm sites of the study area

表 1 不同畜禽的日排泄氮磷含量^[12]

Table 1 Daily excretion of nitrogen and phosphorus by different livestock and poultry^[12] g·d⁻¹

畜禽种类 Animal category	氮 Nitrogen	磷 Phosphorus
猪 Pig	30.00	4.50
奶牛 Dairy cattle	196.00	32.00
肉牛 Beef cattle	109.00	14.00
山羊 Goat	11.30	2.35
绵羊 Sheep	12.20	0.92
蛋鸡 Laying hen	1.20	0.18

工艺与处理模式。

1.3 数据处理

根据养殖场的位置信息使用 QGIS(3.30.0) 进行空间化,形成朔州市养殖场的空间分布数据库。在 QGIS 中对遥感影像进行解译,提取研究区的耕地图斑。

1.4 计算方法

NUFER (NUtrient flows in Food chains, Environment and Resources use) 模型能够在国家和区域尺度上,实现从食物链角度对养分平衡、养分利用效率、环境排放量及养分流动规律的定量分析和综合评价^[13]。在此基础上进一步发展了 NUFER-animal 模块,用于定量分析我国不同畜禽种类和养殖体系在饲料生产-圈舍管理-粪尿储藏-粪尿加工-粪尿施用-动物食品消费整个环节的养分流动特征^[14]。本研究使用 NUFER-animal 模型估算不同畜禽养殖种类养殖场的粪尿氮磷产生量。

由于粪污在“圈舍-贮存”过程均有不同程度的损失^[15],不同的粪污处理方式也会影响粪尿的氮磷损失^[16],直接使用粪尿氮磷养分产生量计算畜禽粪尿土地承载力会导致结果偏高。《土地承载力测算技术指南》^[12]考虑了畜禽粪污在收集与处理过程中的养分损失,故本研究采用这一方法,通过计算粪污处理后的养分留存量进行土地承载力的评估,从而最大程度保证计算结果的科学性与准确性。

养殖场粪尿氮磷产生量的计算方法:

$$N(P)_{\text{manure_production}} = \sum_{i=1}^n \text{Livestock_population}_i \times N(P)_{\text{excretion_factor}_i} \times 365 \div 1000 \quad (1)$$

式中: $N(P)_{\text{manure_production}}$ 为粪尿氮(磷)的产生量(kg); $\text{Livestock_population}_i$ 为第 i 种畜禽的存栏量; $N(P)_{\text{excretion_factor}_i}$ 为第 i 种畜禽每日的粪尿氮(磷)排泄量(g·d⁻¹),取自表 1。

养殖场粪尿氮磷留存量的计算方法:

$$N(P)_{\text{manure_stock}} = \sum_{i=1}^n N(P)_{\text{manure_production}_i} \times N(P)_{\text{collect_rate}_i} \times N(P)_{\text{retent_rate}_i} \quad (2)$$

式中: $N(P)_{\text{manure_stock}}$ 为畜禽粪尿氮(磷)的留存量; $N(P)_{\text{manure_production}_i}$ 为第 i 个养殖场的粪尿氮(磷)的产生量; $N(P)_{\text{collect_rate}_i}$ 与 $N(P)_{\text{retent_rate}_i}$ 分别为第 i 个养殖场的粪尿氮(磷)的收集率与留存率,根据对典型养殖场的粪污收集工艺与处理方式调研结果结合表 2 与表 3 确定。

基于就近消纳的原则,使用 QGIS 进行二次开发,

表2 不同畜禽粪污收集工艺的氮磷收集率^[12]

Table 2 Nitrogen and phosphorus collection rates of livestock and poultry manure under different collection methods

粪污收集工艺 Manure collection method	氮 Nitrogen	磷 Phosphorus
干清粪 Dry cleaning of manure	88.0	95.0
水冲清粪 Flush cleaning of manure	87.0	95.0
水泡粪 Blistered feces	89.0	95.0
垫料 Padding	84.5	95.0

表3 不同畜禽粪污处理方式的氮磷养分留存率^[12]

Table 3 Nitrogen and phosphorus retention rates of livestock and poultry manure under different treatment methods

粪污处理方式 Manure treatment method	氮 Nitrogen	磷 Phosphorus
厌氧发酵 Anaerobic fermentation	95.0	75.0
堆肥 Compost	68.5	76.5
氧化塘 Oxidation pond	75.0	75.0
固体贮存 Solid storage	63.5	80.0
沼液贮存 Biogas slurry storage	75.0	90.0

计算每个养殖场畜禽粪尿氮磷的消纳半径与耕地地块的消纳程度。

首先针对养殖场点位分布数据,使用 QGIS 的公式计算器,根据公式 (1)、(2) 计算每个养殖场的粪尿氮磷留存量,并分别将结果保存在相应字段,同时为养殖场点位数据设置未消纳粪尿氮磷留存量字段 $N(P)_{\text{manure_not_absorb}}$,默认与粪尿氮磷留存量相等,设置消纳半径字段,默认为 0。

对于耕地数据,首先使用公式计算器计算每个耕地图斑的粪尿氮磷消纳能力,并保存在相应字段。其计算如下:

$$N(P)_{\text{absorb}} = \sum_{i=1}^n \text{arable_area}_i \times N(P)_{\text{absorb_coefficient}} \div 10\,000 \quad (3)$$

式中: $N(P)_{\text{absorb}}$ 为耕地可消纳粪尿氮(磷)的数量(kg); arable_area_i 为每个耕地图斑的图斑面积(m^2); $N(P)_{\text{absorb_coefficient}}$ 为单位耕地面积所能消纳的粪尿氮(磷)量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),根据欧盟研究结果,粪尿氮和粪尿磷的消纳能力分别取 $170 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[4] 和 $35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[5]。

设置剩余可消纳粪尿氮(磷)排放量字段 $N(P)_{\text{absorb_available}}$,默认等于耕地可消纳粪尿氮磷的数量。消纳原则为就近消纳。

计算每一个耕地图斑消纳粪尿氮磷的程度。

$$N(P)_{\text{absorb_ratio}} = \frac{N(P)_{\text{absorb}} - N(P)_{\text{absorb_available}}}{N(P)_{\text{absorb}}} \times 100 \quad (4)$$

式中: $N(P)_{\text{absorb_ratio}}$ 为耕地图斑消纳粪尿氮(磷)的程度(%)。

具体计算过程为:

1) 首先遍历养殖场数据。

2) 根据每个养殖场与可消纳耕地图斑 $[N(P)_{\text{absorb_available}} > 0]$ 的质心距离,由近及远排序获取耕地图斑列表。

3) 取第 1 个耕地图斑,如果 $N(P)_{\text{manure_not_absorb}} > N(P)_{\text{absorb_available}}$,则设定耕地图斑的 $N(P)_{\text{absorb_available}} = 0$,同时将养殖场未消纳粪尿氮(磷)量更新为:

$$N(P)_{\text{manure_not_absorb}} = N(P)_{\text{manure_not_absorb}} - N(P)_{\text{absorb_available}} \quad (5)$$

如果 $N(P)_{\text{manure_not_absorb}} < N(P)_{\text{absorb_available}}$,则将耕地图斑的 $N(P)_{\text{absorb_available}}$ 更新为:

$$N(P)_{\text{absorb_available}} = N(P)_{\text{absorb_available}} - N(P)_{\text{manure_not_absorb}} \quad (6)$$

同时,将养殖场 $N(P)_{\text{manure_not_absorb}}$ 更新为 0,如此反复遍历,并根据公式 (4) 计算每一个耕地图斑消纳粪尿氮磷程度。将养殖场与最后一个耕地图斑质心的距离计为消纳半径,存放到字段 $N(P)_{\text{absorb_radius}}$ 中。

4) 根据步骤 3) 计算第 2 个耕地图斑,直到遍历结束。

2 结果与分析

2.1 朔州市养殖场粪尿氮产生量的空间分布特征

朔州市养殖场粪尿氮产生量为 19.10 Gg,粪尿磷产生量为 2.63 Gg;粪尿氮素收集量为 16.70 Gg,粪尿磷收集量为 2.50 Gg;粪尿氮素留存量为 11.47 Gg,粪尿磷留存量为 1.91 Gg。朔州市耕地面积为 39.61 万 hm^2 ,理论上可消纳粪尿氮和粪尿磷分别为 67.34 Gg 和 13.86 Gg。无论是以粪尿氮还是粪尿磷作为约束指标,整体上朔州市的畜禽粪污土地承载力均未超载。

在空间分布上,养殖场粪尿氮产生主要分布在市域东部的怀仁市、应县与山阴县,分别为 5.29 Gg、5.62 Gg 和 4.55 Gg,占朔州市粪尿氮总产生量的 80.93%;市域西部的朔城区、平鲁区与右玉县仅占全市的 19.07% (图 2a)。养殖场粪尿磷的分布格局与氮相近,市域东部的怀仁市、应县与山阴县的粪尿磷产生量分别为 0.59 Gg、0.86 Gg 和 0.72 Gg,占朔州市粪尿磷总产生量的 82.16%;市域西部朔城区、平鲁区与右玉县 3 个区县的粪尿磷产生量仅占全市粪尿磷总产生量的 17.84% (图 2b)。

2.2 畜禽粪尿氮、磷消纳程度空间分布特征

整体上讲,朔州市畜禽粪尿氮磷消纳程度的空间分布特征与粪尿氮磷产生量的空间分布格局相近。

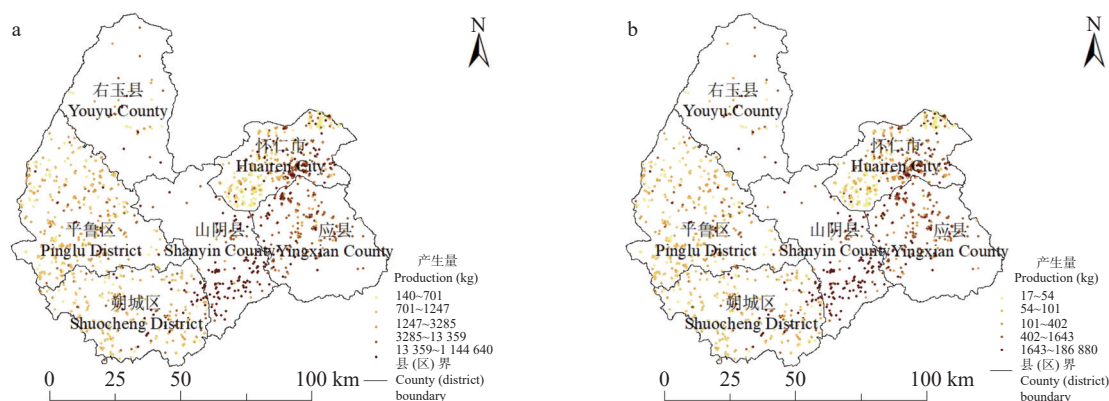


图 2 朔州市养殖场粪尿氮 (a)、磷 (b) 产生量空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of manure nitrogen (a) and phosphorus (b) production from livestock farms in Shuozhou City

按照就近消纳的原则, 将全市的畜禽粪尿氮留存量完全消纳, 需要 9.94 万 hm^2 的耕地满负荷承载 (耕地粪尿氮消纳能力为 $170 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 占全市耕地总面积的 25.44%; 其中市域东部的怀仁市 (县级市, 下同) 分布 2.73 万 hm^2 , 应县分布 2.92 万 hm^2 , 山阴县分布 2.56 万 hm^2 , 占全市粪尿氮满负荷承载耕地面积的 82.69%, 其余 3 个区县占比仅 17.31% (图 3a); 从各县情况来看, 市域东部怀仁市、应县和山阴县粪尿氮满负荷承载耕地面积占全县耕地面积比例分别为 53.88%、45.36% 和 35.59%, 而市域西部的朔城区、平鲁区和右玉县粪尿氮满负荷承载耕地面积占全县 (区) 耕地面积比例分别为 13.71%、7.57% 和 2.44%, 表明县域之间对于粪尿氮的消纳程度差异明显。

若按照就近消纳的原则, 将全市的畜禽粪尿磷留存量完全消纳, 需要 4.69 万 hm^2 的耕地满负荷承载 (耕地粪尿磷消纳能力为 $35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 仅占全市耕地总面积的 12.00%; 其中市域东部的怀仁市分布 1.05 万 hm^2 , 应县分布 1.50 万 hm^2 , 山阴县分布 1.38 万 hm^2 , 占全市粪尿磷满负荷承载耕地面积的 83.92%, 其余 3 个区县仅占 16.08% (图 3b); 从各县情况来看, 市域东部怀仁市、应县和山阴县粪尿磷满负荷承载耕地面积占全县耕地面积比例分别为 20.77%、23.37% 和 19.13%, 而市域西部的朔城区、平鲁区和右玉县粪尿磷满负荷承载耕地面积占全县 (区) 耕地面积比例分别为 6.55%、2.77% 和 1.17%, 满载耕地主要分布在市域东部的 3 个区县。

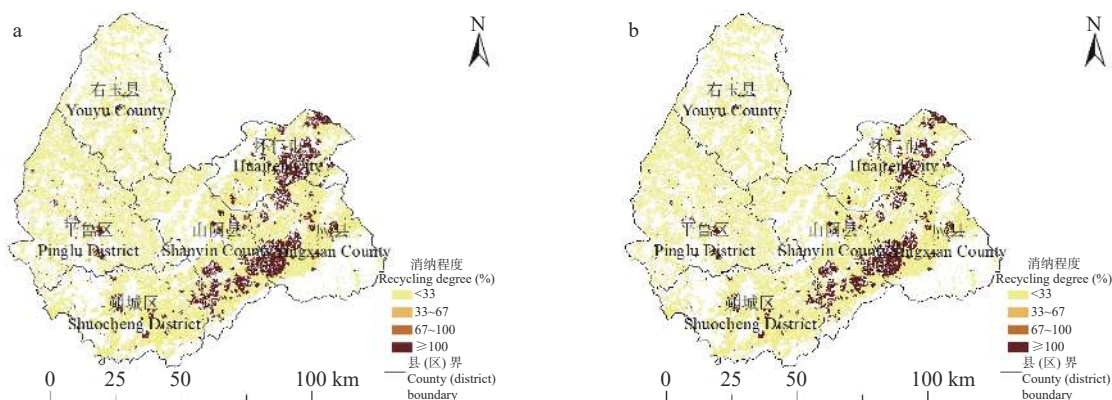


图 3 朔州市耕地养殖场粪尿氮 (a)、磷 (b) 的消纳程度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of recycling degrees of manure nitrogen (a) and phosphorus (b) from livestock farms by arable land in Shuozhou City

2.3 畜禽粪尿氮、磷消纳半径分析

本文对朔州市 1576 个养殖场的粪污氮消纳半径分析结果表明, 有 874 个养殖场的消纳半径小于 0.5 km, 占比 55.46%; 消纳半径在 0.5~1.0 km 之间的有 267 个, 占比 16.94%; 消纳半径在 1.0~3.0 km

之间的有 309 个, 占比 19.61%; 消纳半径大于 3.0 km 的有 126 个, 占比 7.99%, 且主要分布在市域东部, 怀仁 80 个, 应县 32 个, 山阴 13 个 (图 4a), 市域西部只有平鲁区的 1 个养殖场粪尿氮消纳半径超过了 3 km。

有 1135 个养殖场的粪污磷消纳半径小于 0.5 km, 占比 72.02%; 消纳半径在 0.5~1.0 km 之间的有 264 个, 占比 16.75%; 消纳半径在 1.0~3.0 km 之间的有

167 个, 占比 10.60%; 消纳半径大于 3.0 km 的仅有 10 个, 占比 0.63%, 均分布在市域东部, 其中应县分布 8 个, 山阴县与怀仁市各 1 个(图 4b)。

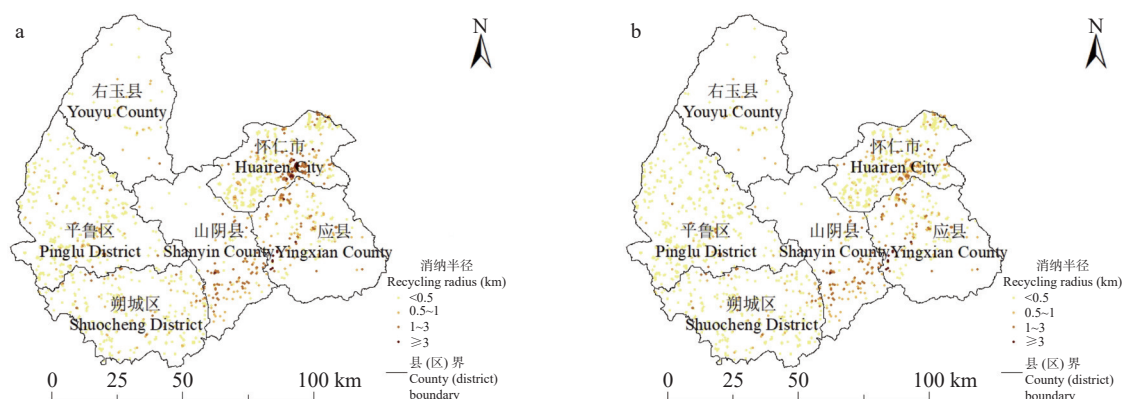


图 4 朔州市耕地消纳养殖场粪尿氮(a)、磷(b)的半径空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of recycling radii of manure nitrogen (a) and phosphorus (b) from livestock farms by arable land in Shuozhou City

3 讨论

3.1 养殖场粪尿氮磷产生量和消纳潜力特征分析

朔州东部的怀仁市、应县与山阴县地势平坦、种植业发达, 2018 年粮食产量为 80.08 万 t, 占全市粮食产量的 65.17%; 而西部的朔城区、平鲁区与右玉县丘陵与坡地面积较大, 种植业发展较为欠缺, 2018 年粮食产量为 42.79 万 t, 仅占全市粮食总产的 34.83%。东部发达的种植业为发展畜牧业提供了充裕的饲料来源, 加之便利的地形也为畜牧业的发展提供了更为广阔的发展空间, 因此畜牧业主要集中在市域的东部, 进而导致东部 3 个区县的畜禽粪污产生量较大。

尽管朔州市耕地对畜禽粪尿氮磷的消纳潜力较大, 消纳半径也较为合理, 但养殖场分布与耕地资源分布仍然存在空间错位的问题, 东部怀仁市、应县与山阴县的耕地面积为 18.71 万 hm^2 , 占全市耕地总面积的 47.89%, 而产生的粪尿氮为 15.46 Gg, 占粪尿氮产生量的 80.93%, 产生的粪尿磷为 2.16 Gg, 占粪尿磷产生量的 82.16%; 西部的朔城区、平鲁区与右玉县耕地面积与东部相当, 但产生的粪尿氮、磷相对很少, 分别仅占其总产生量的 19.07%、17.84%。从粪尿氮磷承载的角度出发, 未来发展畜牧业, 应优先考虑在市域西部的朔城区、右玉县和平鲁区布局。

从本研究结果也可以看出, 朔州对于粪尿氮磷的消纳程度是不一样的。若以粪尿磷为约束指标, 朔州市有更大的养殖潜力, 而以粪尿氮作为约束指标, 畜牧业发展空间相对较小。这可能是由于不同畜禽种类的粪便氮磷养分含量特征所决定^[8], 因此今

后发展畜牧业时在考虑经济效益的同时也要从兼顾环境效应的角度出发, 选择合适的畜禽种类。

3.2 研究特色之处

已有研究大多以行政区划为研究对象, 分析区域内畜禽粪尿氮磷空间分布特征^[17], 评价粪尿养分与耕地之间整体的供需关系^[10], 这对于缓解养殖造成的农业面源污染^[17]、合理利用畜禽粪尿养分资源、推动种养结合^[18]在区域层面提供了参考。但上述研究均是将研究区内的畜禽养殖与耕地分别作为一个整体进行定量分析^[19], 缺乏对于区域内养殖场与耕地空间关系的考量, 而集约化养殖场大多情况可以理解为一个点源排放源^[20], 因此消纳半径是实现粪尿养分还田的重要因素, 也是养殖场环境保护政策落地实现的关键^[21]。鉴于此, 本研究以山西省朔州市为例, 充分考虑了研究区内养殖场的规模、布局与耕地分布的空间位置关系, 以欧洲畜禽粪尿还田的限量标准^[4-5]作为安全阈值, 同时根据畜禽养殖种类、粪尿处理模式与收集工艺, 扣除了不可避免损失的粪尿氮磷养分, 构建了一个可以在农场尺度分析畜禽粪污土地承载力的数据模型, 并开发了简便的工具。该工具的推广应用有利于《土地承载力测算技术指南》^[12]的实施与相关环境保护政策的落地。

3.3 本研究局限性与未来研究方向

中国的农业是以小农户经营为主体, 农户间管理水平差异较大^[22], 加之中国幅员辽阔, 区域间资源禀赋、生态条件差异明显, 导致区域间土壤养分含量变幅较大^[23], 故单纯以欧盟单一的畜禽粪尿还田限

量标准来管理中国的畜禽粪尿养分是不合理的,需结合土壤的氮磷养分本底值进行畜禽粪尿承载力测算;而且不同作物对于氮磷养分的吸收规律也不尽相同^[24],针对不同作物的粪尿养分管理也要有所区别。本研究受数据获取途径限制,未能考虑上述影响因素。在今后的研究中,建议考虑土壤养分本底值、作物类型及其产量水平等影响因素,进而提升畜禽粪尿养分的管理水平。

此外,规模养殖场是重要的 NH_3 排放源,并且与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及大气质量密切相关^[25],直接影响人体健康。因此在未来可以从规模养殖场的点源效应出发,分析养殖场与农村居民点的空间关系,借鉴空气动力学的相关模型^[26],定量 NH_3 排放对人居环境与人体健康的影响。

4 结论

朔州市养殖场畜禽粪尿氮、磷产生量均呈现东高西低的分布特征,主要集中在市域东部的 3 个区县。全市耕地对粪尿氮、磷有较大的消纳潜力,对于粪尿氮而言,按照就近消纳的原则,需要 9.94 万 hm^2 的耕地满负荷承载,占耕地总面积的 25.44%;对于粪尿磷而言,则只需要 4.69 万 hm^2 的耕地满负荷承载,占比 12.00%。全市畜禽粪尿氮磷大部分可在半径 3 km 范围内消纳,畜牧业有较大的发展空间。研究从畜禽养殖场规模和空间分布与耕地的空间位置关系出发,构建了评价畜禽粪污消纳程度的方法,可为畜牧业空间布局优化和环境政策提供科学依据。

参考文献 References

- BAI Z H, MA W Q, MA L, et al. China's livestock transition: Driving forces, impacts, and consequences[J]. *Science Advances*, 2018, 4(7): eaar8534
- JIN S Q, ZHANG B, WU B, et al. Decoupling livestock and crop production at the household level in China[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(1): 48–55
- ZHANG C Z, LIU S, WU S X, et al. Rebuilding the linkage between livestock and cropland to mitigate agricultural pollution in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 144: 65–73
- OENEMA O. Governmental policies and measures regulating nitrogen and phosphorus from animal manure in European agriculture[J]. *Journal of Animal Science*, 2004, 82(suppl_13): E196–E206
- OENEMA O, VAN LIERE L, PLETTE S, et al. Environmental effects of manure policy options in the Netherlands[J]. *Water Science and Technology*, 2004, 49(3): 101–108
- 蒋伊童, 李婷玉, 马林, 等. 丹麦养分管理农业养分管理政策和机制的创新及启示[J]. *土壤通报*, 2020, 51(2): 381–390
- JIANG Y T, LI T Y, MA L, et al. Innovation and enlightenment of Danish nutrient management policies and mechanisms[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(2): 381–390
- 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 F, YANG S Q, ZHU Y Q, 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
- 张建杰, 郭彩霞, 覃伟, 等. 山西省畜禽业发展及粪尿养分时空变异[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 207–214
- ZHANG J J, GUO C X, QIN W, et al. Temporal and spatial variability of livestock and poultry productions and manure nutrients in Shanxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1): 207–214
- 耿维, 胡林, 崔建宇, 等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 171–179, 295
- 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): 171–179, 295
- 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 X Y, LI S T. 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
- 常志州, 靳红梅, 黄红英, 等. 畜禽养殖场粪便清扫、堆积及处理单元氮损失率研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(5): 1068–1077
- CHANG Z Z, JIN H M, HUANG H Y, et al. Nitrogen loss during cleaning, storage, compost and anaerobic digestion of animal manures in individual treatment unit[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 1068–1077
- 全国畜牧总站, 中国饲料工业协会, 国家畜禽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 Animal Husbandry Administration, China Feed Industry Association, National Association for Animal Husbandry Waste Utilization of Science and Technology Innovation. Technical Guidelines for Measuring Land Carrying Capacity[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017
- MA L, MA W Q, VELTHOF G L, et al. Modeling nutrient flows in the food chain of China[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1279–1289
- BAI Z H, MA L, JIN S Q, et al. Nitrogen, phosphorus, and potassium flows through the manure management chain in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(24): 13409–13418
- ZHAO Z Q, BAI Z H, WEI S, et al. Modeling farm nutrient flows in the North China Plain to reduce nutrient losses[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 108(2): 231–244
- 魏莎, 柏北海, 吴迪梅, 等. 都市圈“土壤-饲料-动物”系统养分流动与环境效应——以北京市为例[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 430–441

- WEI S, BAI Z H, WU D M, et al. Nutrient flow and environmental effects of “soil-feed-livestock” system in metropolis: a case study in Beijing[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 430–441
- [17] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005
- WU S X. The spatial and temporal change of nitrogen and phosphorus produced by livestock and poultry & their effects on agricultural non-point pollution in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005
- [18] 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
- [19] 许琴, 袁定波. 基于耕地消纳能力的畜禽粪便环境承载力研究——以泰和县为例[J]. *环境科学与管理*, 2022, 47(11): 76–81
- XU Q, YUAN D B. Analysis of environmental carrying capacity of livestock and poultry manure based on cultivated land consumption capacity — A case study of Taihe County[J]. *Environmental Science and Management*, 2022, 47(11): 76–81
- [20] CHEN X J, WANG M R, KROEZE C, et al. Nitrogen in the Yangtze River Basin: pollution reduction through coupling crop and livestock production[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(24): 17591–17603
- [21] CAI X H, QIN Y F, YAN B J, et al. Identification of livestock farms with potential risk of environmental pollution by using a model for returning livestock manure to cultivated land[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(46): 103062–103072
- [22] ZHANG W F, CAO G X, LI X L, et al. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers[J]. *Nature*, 2016, 537(7622): 671–674
- [23] HOU Y, GAO Z L, HEIMANN L, et al. Nitrogen balances of smallholder farms in major cropping systems in a peri-urban area of Beijing, China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 92(3): 347–361
- [24] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207–4229
- LI S T, JIN J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20): 4207–4229
- [25] WANG H D, ZHAO Z Q, WINIWARTER W, et al. Strategies to reduce ammonia emissions from livestock and their cost-benefit analysis: a case study of Sheyang County[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 290: 118045
- [26] VENDEL K J A, KRUIT R J W, BLOM M, et al. Dry deposition of ammonia in a coastal dune area: measurements and modeling[J]. *Atmospheric Environment*, 2023, 298: 119596