

山西省畜禽粪污土地承载力及粪尿替代化肥潜力分析

郭彩霞, 杨子森, 马文奇, 焦光月, 张建杰

引用本文:

郭彩霞, 杨子森, 马文奇, 等. 山西省畜禽粪污土地承载力及粪尿替代化肥潜力分析[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(7): 1548-1557.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1431>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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>

中国畜牧业温室气体排放现状及峰值预测

郭娇, 齐德生, 张妮娅, 孙铝辉, 胡荣桂

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2106-2113 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0132>

我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析

吴浩玮, 孙小淇, 梁博文, 陈家斌, 周雪飞

农业环境科学学报. 2020, 39(6): 1168-1176 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0218>

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

郭彩霞, 杨子森, 马文奇, 等. 山西省畜禽粪污土地承载力及粪尿替代化肥潜力分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1548–1557.

GUO Cai-xia, YANG Zi-sen, MA Wen-qi, et al. Evaluation of arable land carrying capacity and potential of manure substitute for chemical fertilizer in Shanxi Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7): 1548–1557.



开放科学 OSID

山西省畜禽粪污土地承载力及粪尿替代化肥潜力分析

郭彩霞¹, 杨子森², 马文奇³, 焦光月², 张建杰^{1*}

(1. 山西省农业科学院农业环境与资源研究所/山西省土壤环境与养分资源重点实验室, 太原 030031; 2. 山西省生态畜牧产业工作站, 太原 030001; 3. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071001)

摘要:为明确山西省畜牧业的发展规模,优化畜牧业发展的空间格局,进一步为山西省农牧业实现绿色发展提供科学依据。研究基于农牧生产系统养分平衡的方法,测算了山西省县域尺度的畜禽粪污土地承载力。结果表明,山西省的种植业与畜牧业发展规模在空间上存在一定的错位,种植业发达的地区主要分布在省域南部和中部的区县,而畜牧业发达的地区则分布在省域北部、中部和东南部的区县;山西省当前的畜牧业发展规模折合为2 371.77万猪当量,以粪尿氮作为约束指标,山西畜牧业可发展规模为5 976.01万猪当量;以粪尿磷(纯磷,下同)作为约束指标,山西畜牧业可发展规模为7 212.27万猪当量。综合粪尿氮磷承载力指数结果分析,超载区域主要分布在省域北部种植业欠发达的区县和省城太原周边的区县;全省粪尿氮、磷的有效供给量分别为18.28万t和3.15万t,可以分别有效替代氮、磷肥39.79%和33.21%。无论以粪尿氮或磷作为约束指标,山西畜牧业整体上仍有较大的发展空间,可适度增加畜禽养殖规模,但需要关注城市近郊县区的畜禽粪尿氮磷的环境排放和大中型养殖企业的点源污染问题。在畜禽粪尿养分资源管理策略上,则应考虑优化农牧业生产布局 and 区域间协同管理。

关键词: 畜禽粪污; 养分; 有机肥; 畜牧业; 土地承载力; 山西省

中图分类号: S141; X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)07-1548-10 doi:10.11654/jaes.2019-1431

Evaluation of arable land carrying capacity and potential of manure substitute for chemical fertilizer in Shanxi Province, China

GUO Cai-xia¹, YANG Zi-sen², MA Wen-qi³, JIAO Guang-yue², ZHANG Jian-jie^{1*}

(1. Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences/Shanxi Province Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources, Taiyuan 030031, China; 2. Ecological Animal Husbandry work Station of Shanxi, Taiyuan 030031, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

Abstract: In the past decades, the rapid growth of population, economy, urbanization and per capita animal protein consumption in China have stimulated the development of intensive animal husbandry to meet its dietary demand. Intensive animal husbandry has become one of the primary industries adequately ensuring the animal food supply. However, a large amount of animal manure cannot be returned to the field in time, which is an important source of the nitrogen (N) atmospheric deposition and causes the water pollution and eutrophication by means of surface runoff and leaching into water bodies. Shanxi Province is the core region of the farming-pastoral transition zone of China, and its animal husbandry developed rapidly due to advantageous natural and social conditions including rich grazing resources, abundant feed supply, and timely policy support. Here the study reported on a systematic and quantitative analysis on the spatial variability of land environmental carrying capacity of manure, and the potential of manure organic fertilizer substitute for chemical fertilizer in Shanxi Prov-

收稿日期: 2019-12-29 录用日期: 2020-03-31

作者简介: 郭彩霞(1981—), 山西保德人, 副研究员, 主要从事养分资源管理研究。E-mail: sxplant@163.com

*通信作者: 张建杰 E-mail: zhangjianjie@yeah.net

基金项目: 山西省农业科学院科技创新研究课题(YCX2018213); 山西省农业科学院特色农业技术攻关项目(YGG17039)

Project supported: Scientific and Technological Innovation Research Project of Shanxi Academy of Agricultural Sciences(YCX2018213); Special Agricultural Technology Research Project of Shanxi Academy of Agricultural Sciences(YGG17039)

ince, China, based on the method of nutrient balance in crop-animal production systems with GIS after collecting and sorting of data from statistical yearbooks and literature. The results demonstrated that there was a certain dislocation in the development scale of the planting industry and animal husbandry in Shanxi Province. Well-developed crop farming was mainly distributed in the 36 counties located in the basins in the South and central areas, and well-developed animal husbandry was mainly distributed in several counties in the North, South-East and central parts of the province. The present scale of animal husbandry in Shanxi Province is $2.371\ 77 \times 10^7$ pigs equivalent; the bearable scale of animal husbandry in Shanxi is $5.976\ 01 \times 10^7$ pigs equivalent when nitrogen excretion is used as a constraint index and reaches $7.212\ 27 \times 10^7$ pigs equivalent when phosphorus excretion is used as a constraint index. The analysis on nitrogen and phosphorus bearing capacity index of feces and urine suggested that the less developed areas in the northern part of the province and the surrounding areas of Taiyuan City were mainly the overloaded areas; the effective supply of nitrogen and phosphorus from feces and urine were 1.828×10^5 t and 3.15×10^4 t, respectively, which could effectively replace 39.79% and 33.21% of nitrogen and phosphorus fertilizers, respectively. Regardless of nitrogen or phosphorus from feces and urine as the constraint indexes, Shanxi's animal husbandry has large development potentials, which means the scale of livestock and poultry breeding can be moderately increased. However, the environmental emissions of nitrogen and phosphorus from livestock and poultry feces and the point source pollution from the large and medium-sized animal farming enterprises in outskirts of cities still need to be noticed. In the management strategy of animal manure and urine nutrient resources, the crop and animal farming distribution need to be optimized, and inter-regional collaborative management should be regarded as the goal.

Keywords: manure; nutrients; organic fertilizers; animal husbandry; land carrying capacity; Shanxi Province

过去几十年,随着我国人口的持续增长、经济水平的不断提高、城镇的快速扩张,饮食结构中动物蛋白的消费比例和消费总量不断增加,拉动了畜牧业的养殖规模快速增长;此外,养殖技术的不断发展、农牧业各种补贴、宽松的环保政策,推动了畜牧业由传统养殖向集约化发展^[1]。一方面畜牧业成为国家经济的支柱产业,并极大地满足了国民饮食需求^[2];另一方面,中国畜牧业的蓬勃发展付出了极大的资源环境代价:畜牧业生产过程中的氨排放占整个农业源氨排放的50%^[3],促进了PM_{2.5}的形成^[4],是氮素大气沉降的重要来源^[5];畜禽粪污通过地表径流和淋溶进入水体,造成水体的污染和富营养化^[6];此外,畜禽粪污的处理不当还是影响农村人居环境的重要因素。因此,在国家实施乡村振兴战略、提倡农牧业绿色发展的大背景下,从环境友好的角度进行约束,确定区域范围内合理的畜禽规模和布局显得尤为必要。

承载力(Carrying capacity)概念起源于19世纪40年代的工程机械领域,之后在生态学、地理学、资源环境科学领域得以延续并发展。畜牧承载力的概念作为资源环境承载力的一个分支,在20世纪初期被有关学者提出^[7]。本研究基于农牧生产体系养分平衡的原理,以畜禽粪尿的氮、磷去向作为计算依据,通过计算畜禽粪污土地承载力来进一步确定区域的畜禽合理养殖数量。在20世纪90年代,欧盟就耕地畜禽粪尿的养分投入作了明确的规定:在欧盟硝酸盐脆弱区内农田氮的投入量不得超过 $170\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[8],磷的投入不得超过 $35\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[9],部分欧洲国家据此确定了

单位面积的家畜养殖数量。欧美国家的养殖体系大多以农场为单位,对于畜禽粪尿的养分限量主要目标在于控制养分的环境排放,而我国由于人口众多,面临着解决粮食安全和减少环境污染的双重压力,且养殖方式以集约化为主,大多没有配套足够的农田来消纳粪肥,更多需要着眼于从区域的尺度来考虑畜禽粪污土地承载力的问题,因此我国的畜禽粪污土地承载力不能简单套用欧美的标准。我国已有学者基于遥感技术,对黄河源区高山草地自然放牧条件下畜禽承载力的历史变化进行了研究,发现畜禽承载力的变化与坡度、近水距离和植被覆盖度有很强的相关性,大部分区县存在严重的过度放牧问题^[10],也有学者从农田消纳畜禽粪尿氮磷养分的角度,发现福建莆田市^[11]和北京都市圈城郊^[12]的畜禽养殖整体出现超载,主要表现为种植业与养殖业的严重脱节。潘瑜春等^[13]以畜禽粪便的产生量上限不超过 $35\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 作为限量依据,分析了北京平谷区的畜禽养殖承载力,但没有考虑畜禽粪尿的养分含量;耿维等^[14]以安徽省为案例,考虑了将耕地、园地、牧草地和林地作为消纳粪肥的场所,用欧盟的标准为依据,分析了县域尺度畜牧业环境承载力及粪便替代化肥的潜力,忽视了农作物生产能力高低对于粪尿养分的消纳能力;孙超等^[15]以河北省为研究案例,用农田氮肥投入 $150\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 作为限量标准,粪尿氮素投入50%作为限量依据,来判定县域尺度的农田畜禽承载量是否超载,未考虑种植结构对于粪尿消纳能力的影响。这些研究或只是考虑了畜禽粪便的产生量,忽视了不同类型畜禽粪便中的

养分含量差异;或只考虑消纳场所的面积,而忽视了作物产量对粪尿消纳能力的影响;或未考虑畜禽粪尿在养殖、粪尿存储以及处理过程中不可避免的损失,而这些是区域畜禽粪污承载力的关键影响因素。全国畜牧总站于2018年1月正式印发了畜禽粪污《土地承载力测算技术指南》^[16],基于养分平衡的思想,根据农作物养分需求规律,区别了不同农作物对于粪污的吸收能力,考虑了不同粪污处理过程中粪尿养分的损失情况,为计算区域尺度的畜禽粪污土地承载力提供了技术支撑,郑莉等^[17]依据该指南测算了山东省17个市的畜禽粪污土地承载力,但没有考虑粪尿氮磷养分资源的利用潜力。本研究以畜禽粪污《土地承载力测算技术指南》为主要计算依据构建了数学模型,分析了山西省县域尺度畜禽粪污土地承载力,并在此基础上估算了有机肥替代化肥的潜力。

山西作为全国13个牧区半牧区的省份之一^[18],同时也是中国农牧交错带的核心区域^[19],目前正处于农业供给侧结构改革的关键时期,迫切需要分析县域尺度的畜禽粪污土地承载力,为农牧业绿色发展、畜牧业发展规模和布局优化提供数据支撑和科学依据。此外,研究山西省的畜禽粪污土地承载力及有机肥替代化肥潜力,对于其他农牧交错带的区域也有一定的借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 统计数据

鉴于分县数据获取途径较为单一,本研究只获取了山西省2016年的分县统计数据。2016年山西省119个区(县)的耕地面积、粮食作物面积、蔬菜播种面积、水果种植面积、粮食作物产量、蔬菜产量、水果产量、化肥施用量、猪存栏量、牛存栏量、羊存栏量和家禽存栏量数据均来源于《山西省统计年鉴2017》^[20]。由于奶牛和肉牛的粪尿排泄系数差异较大,结合11地市的统计年鉴以及部分区县的县级统计年鉴进行了区分。

1.1.2 粪污排泄系数和养分含量

畜禽粪污的排泄系数和养分含量来源于全国畜牧总站编写的畜禽粪污《土地承载力测算技术指南》^[16]。

1.1.3 各区县土壤养分信息

各区县的土壤养分信息来源于全国农业技术推广服务中心编写的《测土配方施肥土壤基础养分数据

集(2005—2014)》^[21]。

1.2 计算方法

本文通过计算区域粮食作物、蔬菜和水果的卡路里产量,来反映区域农田系统的生产能力,各种作物的每100g产量的卡路里产生量分别为:小麦301.5 kcal,玉米290 kcal,水稻376 kcal,谷子256 kcal,高粱279 kcal,其他谷类作物256 kcal,豆类229 kcal,薯类71 kcal,花生517 kcal,菜籽885 kcal,甜菜7 kcal,蔬菜24 kcal,果树41 kcal,上述参数的依据来源于FAO数据库^[2]。

通过构建数学模型的方法来计算畜禽粪污氮(磷)土地承载力及承载力指数,具体方法如下:

猪当量的折算方法来源于畜禽粪污《土地承载力测算技术指南》^[16],按存栏量折算:100头猪相当于15头奶牛、30头肉牛、250只羊、2500只家禽。

$$Q = \sum_{i=1}^n A_i \times R_i \quad (1)$$

式中: Q 为区域内畜禽养殖实际存栏量,猪当量; A_i 为区域内第*i*种畜禽种类的存栏量; R_i 为区域内第*i*种畜禽种类折算猪当量的系数。

区域内作物氮(磷)养分需求总量的计算公式为:

$$NU_{N,P} = \sum_i P_i \times C_i \div 100 \quad (2)$$

式中: $NU_{N,P}$ 为区域内所有农作物的氮(磷)养分需求总量, $t \cdot a^{-1}$; P_i 为区域内第*i*种作物的产量, $t \cdot a^{-1}$; C_i 为区域内第*i*种作物形成100kg产量的养分需求量, $kg \cdot 100kg^{-1}$ 。

$$NU_{r,m} = \frac{NU_{N,P} \times FP \times MP}{MR} \quad (3)$$

式中: $NU_{r,m}$ 为区域内作物粪尿养分需求量, $t \cdot a^{-1}$; $NU_{N,P}$ 同公式(2),为区域内所有农作物的氮(磷)养分需求总量, $t \cdot a^{-1}$; FP 为施肥供给养分占作物总养分需求的比例,%; MP 为畜禽粪尿养分需求占施肥供给养分总量的比例,按50%计算; MR 为粪尿养分的当季利用效率,%。

$$M_{N,P} = \sum_{i=1}^n A_i \times E_i \times 365 \div 1000 \quad (4)$$

式中: $M_{N,P}$ 为区域内畜禽粪尿养分产生总量, $t \cdot a^{-1}$; A_i 同公式(1),为区域内第*i*种畜禽种类的存栏量; E_i 为区域内第*i*种畜禽种类氮(磷)日排泄量, $kg \cdot d^{-1}$;

$$M_s = M_{N,P} \times G_r \times S_r \quad (5)$$

式中: M_s 为区域内畜禽粪尿养分供给量,是考虑了收集和留存过程中损失后实际的粪尿氮、磷养分留存量, $t \cdot a^{-1}$; $M_{N,P}$ 同公式(4), $t \cdot a^{-1}$; G_r 为粪尿养分在收集

过程中的收集系数,与养殖方式有关,%; S_r 为粪尿养分在留存过程中的留存系数,与粪污处理措施有关,%;

用公式(5)除以公式(1):

$$NS_{r,a} = M_s \div Q \times 1000 \quad (6)$$

得到区域内单位猪当量的粪尿养分供给量 $NS_{r,a}$, kg。

用公式(3)除以公式(6):

$$R = \frac{NU_{r,m}}{NS_{r,a}} \times 1000 \quad (7)$$

得到区域畜禽以作物粪尿养分需求为基础的最大养殖量 R , 单位为猪当量。

区域畜禽粪污土地承载力指数的计算方法是区域内畜禽养殖实际存栏量与可容纳的最大畜禽养殖量之间的比值,用公式(1)除以公式(7):

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

式中: I 为区域畜禽粪污氮(磷)土地承载力指数, $I > 1.0$ 表明区域内畜禽养殖存栏量超载,需要调减养殖量; $I < 1.0$ 时表明区域内仍有一定的养殖空间,可以适当增加养殖规模。

用公式(5)除以公式(3),得到区域有机肥替代化肥的潜力 P (%):

$$P = \frac{M_s}{NU_{r,m}} \quad (8)$$

2 结果与分析

2.1 山西省种植业与畜禽养殖业分布特征

山西省种植业与养殖业在区域分布上存在一定的错位。将县域农作物、蔬菜和水果的卡路里产量作为反映区域种植业生产能力的指标,结果见图1。山西省种植大县主要分布在盆地区的区县,特别是省域南部运城芮城县、永济市、临猗县、临汾的襄汾县和洪洞县、中部晋中的寿阳县,卡路里产量达到了 1.2×10^{12} kcal;省域西北部的吕梁山区及沿黄流域是本省主要的生态脆弱区,受土壤类型、气候因素、水土流失等影响种植业生产能力普遍较低,省域东部的太行山区主要受地形地貌的限制,作物生产能力也较弱,3类作物的卡路里总产低于 3×10^{11} kcal。

山西省畜禽养殖分布特征见图2。全省的养殖大县零星分布在省域东南部的晋城、中部晋中市的部分区县和北部大同、朔州的部分区县,养殖规模达到了50万头猪当量以上。省域北部大同的阳高县、朔州的应县和山阴县,这些区域的养殖以奶牛和羊为主;省域中部晋中市的太谷、祁县和平遥县,以生猪养

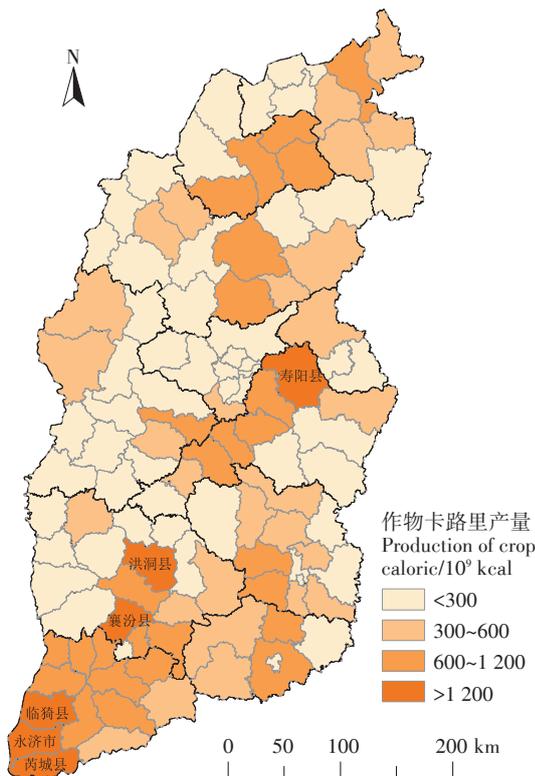


图1 山西省种植业空间分布特征

Figure 1 Spatial distribution of crop husbandry in Shanxi

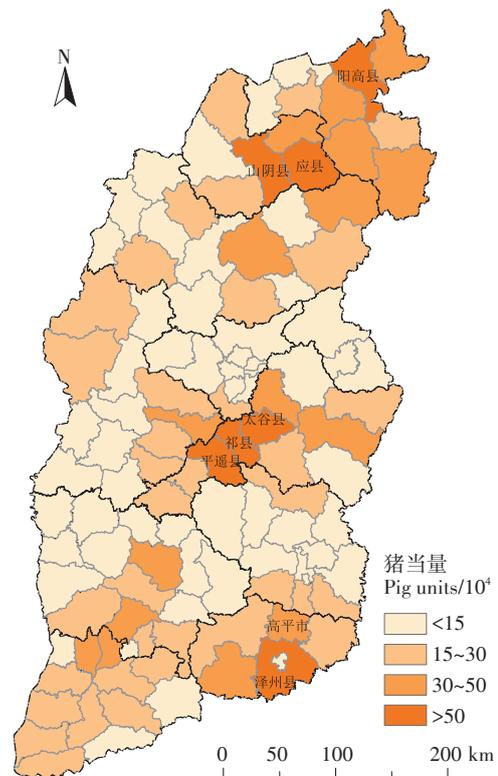


图2 山西省畜禽养殖空间分布特征

Figure 2 Spatial distribution of livestock husbandry in Shanxi

殖和肉牛养殖为主;省域东南部晋城市的泽州县和高平市,是国家级的生猪养殖大县。省域西北部的吕梁山区,大部分是贫困县,发展畜牧业的条件较差,畜牧业发展受到一定的制约。

2.2 粪尿养分产生量及其分布特征

从省域尺度来看(表1),2016年山西省化肥投入117.07万t,其中氮肥31.60万t,磷肥14.80万t,复合肥60.33万t,将复合肥按N:P₂O₅:K₂O养分1:1:1折算后,相当于化肥氮投入51.71万t,化肥磷投入34.91万t;畜禽粪尿氮素产生量为25.97万t,占化肥氮投入的50.22%,畜禽粪尿磷产生量为4.15万t(折合P₂O₅为9.50万t),相当于化肥磷投入的27.22%,由此可见,山西省畜禽粪尿中的氮、磷养分替代化肥施用量的潜力巨大。

从空间分布来看(图3a),有半数以上区县的粪尿氮年产生量低于2 000 t·a⁻¹,集中分布在省域中部,

粪尿氮年产生量在2 000~4 000 t·a⁻¹的相对集中分布在省域南部运城市和晋城市的大部分区县、临汾的部分区县、省域中部吕梁和晋中的部分区县、省域北部大同市的大部分区县和朔州市的部分区县;粪尿氮产生量较高的区域主要分布在省域北部的大同、朔州等地市的区县,其中大同的阳高县、朔州的应县和山阴县粪尿氮的年产生量在5 000 t·a⁻¹以上,省域中部晋中市和吕梁市的交界处区县粪尿氮产生量也较高,其中晋中市的太谷县、祁县、平遥县和吕梁的文水县粪尿氮的年产生量也在5 000 t·a⁻¹以上,省域南部的临汾、晋城和运城等地市的粪尿氮产生量较高,其中晋城市泽州县和晋城城区,临汾市的襄汾县粪尿氮的年产生量也在5 000 t·a⁻¹以上。

粪尿磷的分布格局与粪尿氮相似(图3b),低值区(年产生量低于400 t·a⁻¹)集中分布在省域中部;而高值区(年产生量高于400 t·a⁻¹)主要分布在省域北

表1 2016年山西省化肥投入量与粪尿氮、磷产生量(万t)

Table 1 Chemical fertilizer application and production of manure nitrogen(N) and phosphors(P) (10⁴ t)

化肥施用量 Chemical fertilizer	氮肥施用量 N fertilizer	磷肥施用量 P fertilizer(P ₂ O ₅)	复合肥施用量 Compound fertilizer	粪尿氮产生量 Manure N	粪尿磷产生量 Manure P
117.07	31.60	14.80	60.33	25.97	4.15

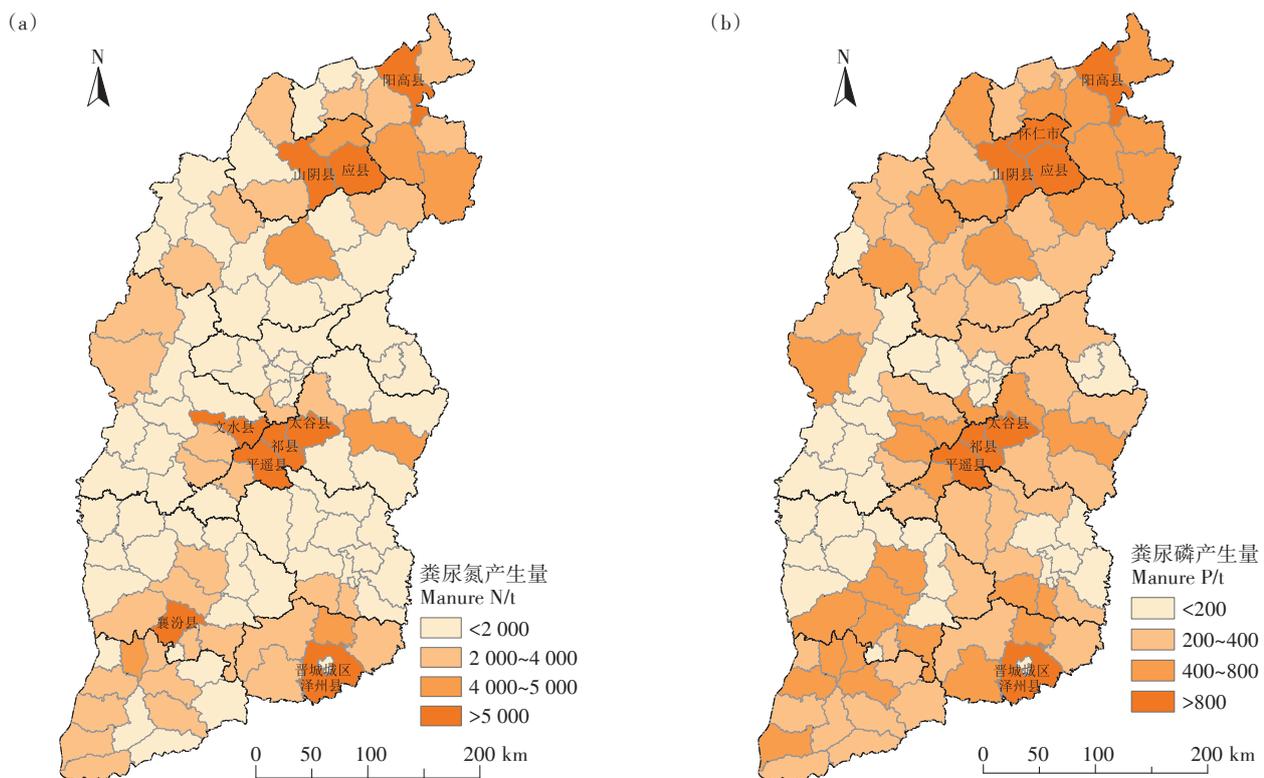


图3 山西省粪尿养分空间分布特征

Figure 3 Spatial distribution of production of manure nutrients in Shanxi

部大同市和朔州市的大多数区县、省域中部太原市和晋中市的部分区县、省域南部临汾和晋中市的大部分区县和运城市的部分区县,其中阳高县、应县、山阴县、怀仁市、太谷县、祁县、平遥县、晋城市城区和泽州县的粪尿磷年产生量在 $800\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上。

2.3 基于氮、磷的畜禽粪污土地承载力分布特征

山西省现有畜禽养殖规模为2 371.77万猪当量,以粪尿氮作为指标,山西省可容纳的畜禽养殖规模为5 969.01万猪当量,以粪尿磷作为指标,山西省可容纳的畜禽养殖规模为7 202.27万猪当量。从省域尺度来看,山西仍有很大的空间来发展畜禽养殖业。

用现有实际猪当量与可容纳猪当量之间的比值,作为畜禽粪污土地承载力的表征指数。可以看出(图4a),在用粪尿氮作为指标时,全省绝大多数的区县(101个)并未超载,有64个区县的粪尿氮承载力指数 <0.5 ,绝大多数分布在省域的中南部;氮素承载力指

数在 $0.5\sim 0.8$ 的有29个区县,大多数分布在省域的中部和北部;有8个区县接近超载;仅有15个区县超载,从北到南依次为大同市的南郊区、灵丘县,朔州市的右玉县,忻州市的繁峙县和宁武县,太原市的迎泽区、尖草坪区、万柏林区、杏花岭区和古交市,吕梁市的离石区、方山县和交城县,晋中市的和顺县,长治市的长治城区。

粪尿磷承载力指数的空间分布特征与粪尿氮相似(图4b),绝大多数区县(102个)未超载,有63个区县的粪尿磷承载力指数 <0.5 ,有31个区县的磷承载力指数在 $0.5\sim 0.8$,有8个区县接近超载,有14个区县超载,与氮素承载力超载情况分布高度相似,仅仅少了忻州市的宁武县。

结合图1和图2也可以看出,粪尿氮磷土地承载力超载的区县并不是养殖量较高的区县,一种情况是种植业生产能力较弱的区县没有能力消纳畜禽粪便,

表2 2016年山西省作物氮、磷需求量及粪尿氮、磷可供给量(万t)

Table 2 Crop N, P demand and manure N, P supply in Shanxi Province in 2016(10^4 t)

氮素需求总量 Crop N demand	磷素需求总量 Crop P demand	作物粪肥需氮量 Manure N demand	作物粪肥需磷量 Manure P demand	粪尿氮供给量 Manure N supply	粪尿磷供给量 Manure P supply
50.12	10.36	45.94	9.50	18.28	3.15

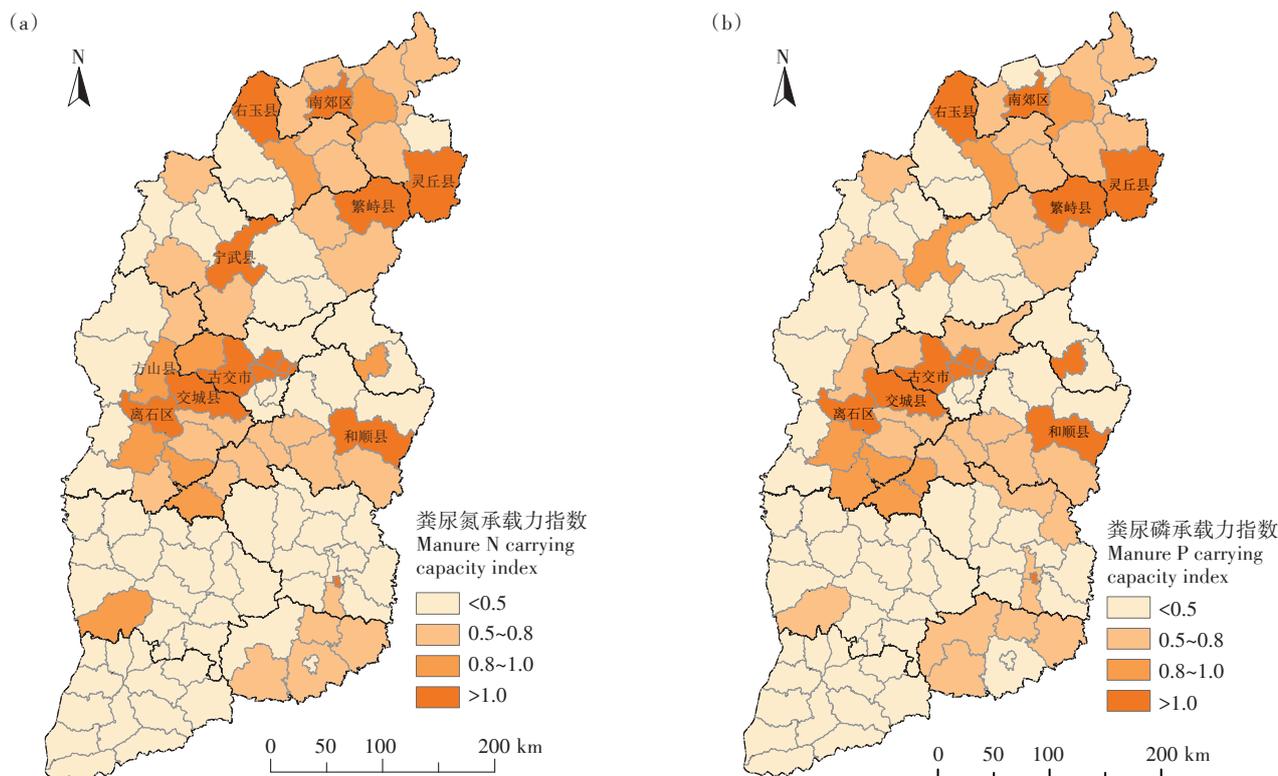


图4 山西省畜禽粪污土地承载力指数空间分布特征

Figure 4 Spatial distribution of manure land carrying capacity index in Shanxi

另外一种情况是城市周边的区县没有足够的农田来消纳畜禽粪便。

2.4 县域尺度畜禽粪尿养分替代化肥潜力分析

2016年全省作物生产氮素需求总量为50.12万t,磷素需求总量为10.36万t(表2)。在考虑了粪肥占养分投入的比例和粪肥当季利用效率后,计算出粪尿氮、磷的需求量分别为45.94万t和9.50万t,在综合畜禽粪便在饲舍、储存和处理环节的损失后,根据损失量计算出粪尿氮、磷的有效供给量分别为18.28万t和3.15万t,可以分别有效替代氮肥和磷肥39.79%和33.21%,替代潜力巨大。

粪尿养分替代化肥潜力在县域尺度上表现出较强的空间分布特征,粪尿氮和磷的化肥替代潜力表现出较强的一致性(图5)。总体上看,替代潜力高(>80%)的区县主要分布在大同的南郊区、大同县和灵丘县,朔州的右玉县和山阴县,忻州市的繁峙县和宁武县,太原、吕梁的大部分区县,晋中的和顺县和灵石县以及临汾的乡宁县;替代潜力在60%~80%的区县主要分布在大同市、朔州市、晋中市的大部分区域,忻州的偏关县、岢岚县、静乐县、五台县和代县等区县,晋城市的大部分区县;替代潜力在30%~50%的区县主要分布在省域西部沿黄流域和晋东南的大部分区

县;替代潜力不足30%的区县主要分布在运城和临汾一带,这些区域种植业发达,但畜禽养殖业发展规模相对较小,畜禽粪便的产生量不能满足种植业生产的需求,因此畜禽粪尿养分替代化肥的潜力较小。

3 讨论

(1)山西位于北纬38°黄金养殖带,牧坡资源丰富,草地面积达到400万 hm^2 ,为畜牧业的发展创造了得天独厚的自然条件;充足的玉米产量也推动了山西畜牧业的迅猛发展,2016年山西省玉米产量达到888.89万t,占全年粮食总产量1318.50万t的67.42%^[20],为山西畜牧业的发展提供了重要的饲料保障;此外,自2001年以来,山西省政府大力推进畜牧业的发展,雁门关生态畜牧经济区建设、畜牧振兴计划等省级重大战略政策的出台,特别是十八大以来把畜牧业作为振兴山西经济的非煤产业之一,作为发展特色现代农业的重中之重,为发展畜牧业提供了有力的政策支持。养殖数量增加到1978年的1.7倍,畜禽养殖的功能发生了重大改变,役用的牛马驴骡大幅减少,而用于生产动物蛋白的奶牛、肉牛、猪、羊和禽类则大幅增加,养殖方式则由传统养殖向集约化养殖快速转变,2014年山西省畜禽养殖集约化程度就达到

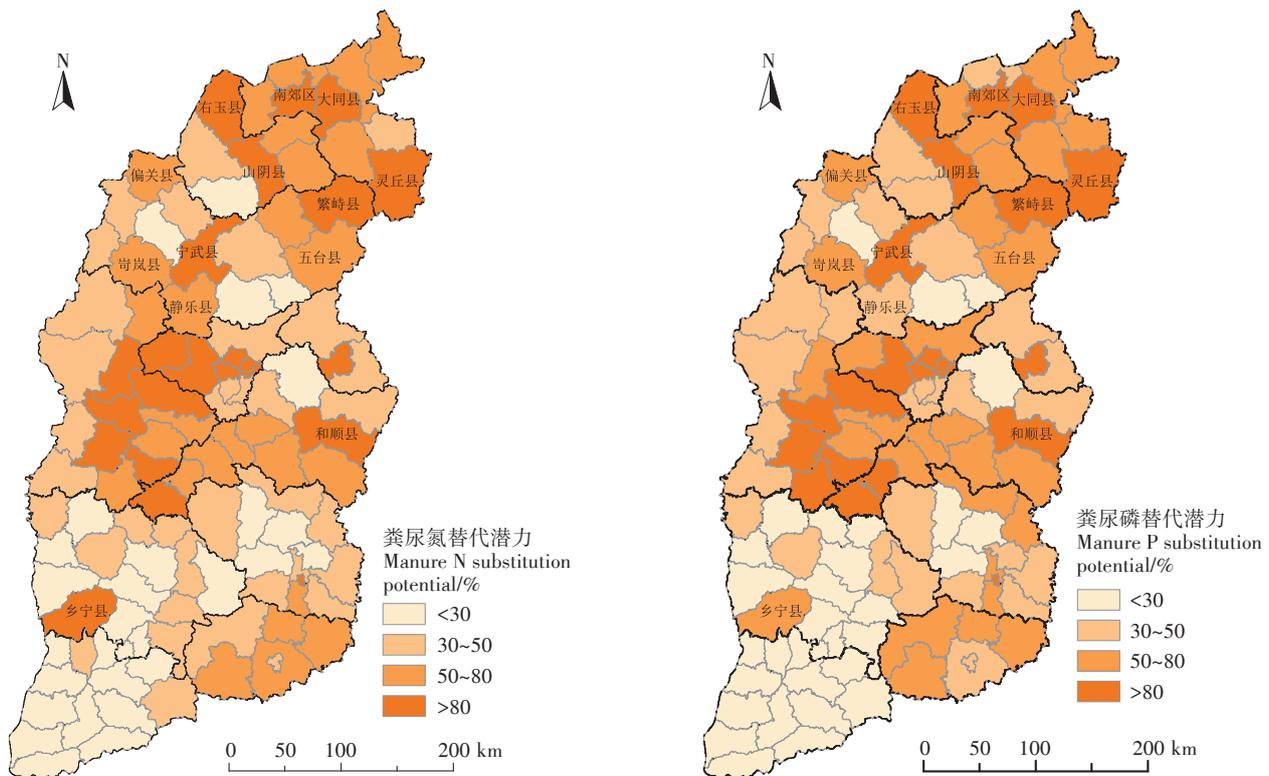


图5 山西省畜禽粪尿替代化肥空间分布特征

Figure 5 Spatial distribution of manure organic fertilizer substitute for potential in Shanxi

47%,比全国平均水平高出11%^[22]。山西省畜禽养殖总量不大,牛、猪、羊和家禽的存栏量分别仅占全国的0.93%、1.08%、0.17%和1.51%^[23],因此山西省的畜禽粪尿氮、磷的平均单位农地负荷较低,均明显低于欧盟的限量标准^[8-9](粪尿氮和粪尿磷的单位农田投入限量分别为 $170\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $35\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),略高于全国平均水平(粪尿氮和粪尿磷的平均农地负荷分别为 $48.73\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $9.16\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)^[24]。但由于集约化程度较高,养殖场的主要分布位于十几个养殖大县,因此除了关注县域尺度的粪尿养分资源的环境承载力之外,对大中型规模化养殖场引起的点源污染应当高度关注,采取合理、切实可行的污染消减措施。

(2)有机肥合理替代化肥,可以有效提高作物产量,减少活性氮损失,并可以增加土壤有机碳的储量^[25]。对于蔬菜作物,有机肥替代化肥可以明显减少蔬菜硝酸盐累积^[26],针对果树的研究表明^[27-28],施用有机肥可以显著促进苹果根系的生长和根系活力的提高,并对产量和品质有显著提高作用。原农业部于2017年印发了《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》^[29]的通知,提出要以果菜茶生产为重点,实施有机肥替代化肥,推进资源循环利用,实现节本增效、提质增效,探索出高效、产品安全、资源节约、环境友好的现代农业发展之路,并提供了政策保障和经费支持。另外受经济利益的驱动,农户在经济作物上施用有机肥的意愿要高于大田作物。结合蔬菜、水果等对于有机养分的需求规律、国家的政策导向以及农户意愿,经济作物的主要产区对于畜禽粪尿养分的消纳有较大的潜力。山西省种植业与养殖业在空间上不匹配,运城、临汾2个地市是山西省农业主产区,粮食作物、蔬菜和水果的总产量达到3 485.38万t,占全省总产的45.94%,具有较强的消纳畜禽粪尿养分的能力,尤其是果园面积为22.49万 hm^2 ,占全省的63.19%,更是消纳粪肥的重要场所。而这2个地市的养殖规模为551.06万猪当量,仅占全省养殖规模的23.23%,导致有机肥供不应求。在这些区域,可以考虑适度增加养殖规模,而在省域北部的一些区县则存在相反的情况,应该考虑限制养殖规模。因此,未来山西畜禽粪尿的养分管理策略:一方面根据种植业的生产能力与产业结构来优化农牧业的生产布局;另一方面进行区域间养分协同管理,在考虑合理的生产成本和运输距离的前提下,打破行政界线,以加工成商品有机肥的方式在空间上进行调配^[30]。

(3)统计数据与真实畜禽养殖数量的差异有时会

很大^[31],但同时又是进行宏观研究的唯一数据来源,可能会给研究带来一定的不确定性。关于区域尺度有机肥替代化肥的概念和计算方法,一直没有形成统一的标准。有学者^[14]用区域粪尿养分产生量与化肥施用量比值作为区域有机肥替代化肥的潜力,一方面没有考虑粪尿在饲舍、储存和处理过程中的损失,计算出的结果可能偏大,另一方面没有考虑现有施肥量的合理性;本研究基于各种作物的产量,考虑了作物的需肥特征,土壤的基础肥力,养分的当季供应能力,畜禽粪肥在饲舍、储藏和处理等环节的损失等因素,结合要实现高产的实际条件,确定化肥和有机肥的施用比例各占50%之后,推算出适宜粪肥需求量(公式3),用区域的粪肥养分供给量与需求量的比值作为有机肥替代化肥的潜力,来估算山西县域尺度的畜禽粪尿养分替代化肥的实际潜力,更能反映真实替代潜力。

(4)中国畜牧业向着集约化、规模化快速转变,导致养殖业逐步与种植业分离。这种分离使得我国农业系统内部种植业和养殖业之间的养分循环出现了脱节^[32],大量畜禽粪尿养分无法及时归还农田,流失于环境中,导致农业面源污染^[33]。通过调整养殖业的空间布局可以缓解畜禽养殖对于环境的负面影响,但是这种空间布局调控需要对环境的多重风险进行评估^[34]。本研究基于农牧生产系统的养分平衡思想,定量分析了山西省县域尺度的畜禽粪尿氮磷养分产生量,并以作物产量为消纳畜禽粪尿养分的主要依据,研究了县域尺度的畜禽粪污氮磷土地承载力,但由于缺乏实际的水系分布数据,一方面尚未考虑养分径流和淋溶对地表水和地下水的影响,另一方面没有获取养殖场的具体位置信息,无法分析畜禽粪尿养分向环境排放的热点区域,进而获取区域高分辨率的畜禽粪尿养分排放特征,这也是未来需要研究的重要内容之一。

4 结论

山西省种植业生产能力和产业结构与养殖业发展规模在空间上的不匹配,导致了畜禽粪尿产生与消纳场所的错位,是制约畜禽粪污资源化利用的重要因素。

山西省畜禽养殖有较大的发展空间,在运城、临汾等粮食与果业主产区可适度增加畜禽养殖规模。太原、吕梁、长治、大同等大城市近郊区县畜禽粪尿氮磷向环境排放的风险值得关注。省域北部部分养殖

规模较大的区县,无法消纳区域内的畜禽粪尿氮磷养分,需要通过有机肥外运或核减养殖规模来进行调控。畜禽养殖重点县大中型养殖场的点源污染问题不容忽视。

山西省县域尺度畜禽粪尿养分替代化肥潜力区域间差异很大,在畜禽粪尿养分资源管理策略上,应以优化农牧业生产布局和区域间协同管理为目标,进行宏观调控和管理,实现畜禽粪尿资源的高效利用和农牧产业的绿色发展。

参考文献:

- [1] Bai Z H, Ma W Q, Ma L, et al. China's livestock transition: Driving forces, impacts, and consequences[J]. *Science Advances*, 2018, 4: eaar8543.
- [2] Food and Agriculture Organization (FAO). FAOSTAT[EB/OL]. (2019-12-08)[2019-12-26] <http://faostat.fao.org/site/291/default.aspx>.
- [3] 曹玉博, 邢晓旭, 柏兆海, 等. 农牧系统氨挥发减排技术研究进展[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3):566-580.
CAO Yu-bo, XING Xiao-xu, BAI Zhao-hai, et al. Review on ammonia emission mitigation techniques of crop-livestock production system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3):566-580.
- [4] 钱晓雍, 郭小品, 林立, 等. 国内外农业源NH₃排放影响PM_{2.5}形成的研究方法[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(10):1908-1914.
QIAN Xiao-yong, GUO Xiao-pin, LIN Li, et al. Research methods for agriculturally emitted ammonia effects on formation of fine particulate matter (PM_{2.5}): A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(10):1908-1914.
- [5] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494, 459-462.
- [6] Stokral M, Ma L, Bai Z H, et al. Alarming nutrient pollution of Chinese rivers as a result of agricultural transitions[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(2):024014.
- [7] 封志明, 李鹏. 承载力概念的源起与发展: 基于资源环境视角的讨论[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(9):1475-1489.
FENG Zhi-ming, LI Peng. The genesis and evolution of the concept of carrying capacity: A view of natural resources and environment[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(9):1475-1489.
- [8] Oenema O. Governmental policies and measures regulating nitrogen and phosphorus from animal manure in European agriculture[J]. *Anim Sci*, 2004, 82(E, suppl):E196-E206.
- [9] Oenema O, Van Liere E, Plette S, et al. Environmental effects of manure policy options in the Netherlands[J]. *Water Sci Technol*, 2004, 49: 101-108.
- [10] Yu L, Zhou L, Liu W, et al. Using remote sensing and GIS technologies to estimate grass yield and livestock carrying capacity of alpine grasslands in Golog Prefecture, China[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(3): 342-351.
- [11] Peng L H, 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.
- [12] 盛巧玲. 基于氮平衡的北京地区畜禽环境承载力研究[D]. 西南大学, 2010.
SHENG Qiao-ling. Reaching on environmental carrying capacity of livestock and poultry based on nitrogen balance in Beijing[D]. Southwest University, 2010.
- [13] 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 Yu-chun, SUN Chao, LIU Yu, et al. Carrying capacity of livestock and poultry breeding based on faces disposal volume of land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4):232-239.
- [14] 耿维, 孙义祥, 袁嫚嫚, 等. 安徽省畜牧业环境承载力及粪便替代化肥潜力评估[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(18):252-260.
GENG Wei, SUN Yi-xiang, YUAN Man-man, et al. Evaluation of environmental carrying capacity and manure organic fertilizer instead chemical fertilizer potential of animal husbandry in Anhui[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(18):252-260.
- [15] 孙超, 刘玉, 潘瑜春. 河北省县域农田畜禽承载量与畜禽养殖量时空耦合[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(3):173-180, 187.
SUN Chao, LIU Yu, PAN Yu-chun. Spatio-temporal coupling between livestock carrying capacity of farmland and livestock breeding at county level in Hebei Province[J]. *Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3):173-180, 187.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 韩秀英, 赵劲松, 张建杰. 山西省粪尿氮、磷耕地符合空间分布特征研究[J]. *山西科技*, 2018, 33(1):38-41.
HAN Xiu-ying, ZHAO Jin-song, ZHANG Jian-jie. Study on spatial distribution characteristics of farmland loads of manure nitrogen and phosphorus in Shanxi Province[J]. *Shanxi Science & Technology*, 2018, 33(1):38-41.
- [19] 张建杰, 郭彩霞, 李莲芬, 等. 农牧交错带农牧系统氮素流动与环境效应: 以山西省为例[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3):456-467.
ZHANG Jian-jie, GUO Cai-xia, LI Lian-fen, et al. Nutrient flow and environmental effects on crop-livestock system in farming-pastoral transition zone: A case study in Shanxi Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3):456-467.
- [20] 山西省统计局, 国家统计局山西调查总队. 山西统计年鉴2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.

- Shanxi Provincial Bureau of Statistics, Shanxi Survey Team of National Bureau of Statistics. Shanxi statistical yearbook 2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [21] 全国农业技术推广服务中心. 测土配方施肥土壤基础养分数据集[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- National Agricultural Technology Extension Service Center. Data set of soil basic nutrients for soil testing and formula fertilization[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015.
- [22] 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 Jian-jie, GUO Cai-xia, QIN Wei, 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.
- [23] 中国畜牧兽医年鉴编辑委员会. 中国畜牧兽医年鉴 2016[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- Editorial committee of China animal husbandry and veterinary yearbook. China animal husbandry and veterinary yearbook 2016[M]. Beijing: China Agriculture press, 2016.
- [24] 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.
- GENG Wei, HU Lin, CUI Jian-yu, et al. Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal feeding in regional level of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1): 171-179.
- [25] Xia L L, Lam S K, Yan X Y, et al. How does recycling of livestock manure in agroecosystems affect crop productivity, reactive nitrogen losses, and soil carbon[J]. *Environment Science Technology*, 2017, 51(13): 7450-7457.
- [26] 李国学, 孙英, 丁雪梅, 等. 不同堆肥及其制成低浓度复混肥的环境和蔬菜效应的研究[J]. 农业环境保护, 2000, 19(4): 200-203.
- LI Guo-xue, SUN Ying, DING Xue-mei, et al. Effects of composting organic compound fertilizers on vegetables and soil environment[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(4): 200-203.
- [27] 刘永青, 李玉才, 李明军. 土壤局部施加不同种类有机肥对苹果园土壤理化性质和果树养分利用率的改善[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(1): 112-117.
- LIU Yong-qing, LI Yu-cai, LI Ming-jun. Improvement of soil physical and chemical properties and nutrient utilization rate of apple trees by localized application of different organic fertilizers[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(1): 112-117.
- [28] 王芬, 刘会, 冯敬涛, 等. 牛粪和生物炭不同配比对苹果根系生长、土壤特性和氮素利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1795-1801.
- WANG Fen, LIU Hui, FENG Jing-tao, et al. Effects of cow dung and biochar on root growth, soil properties and nitrogen utilization of apple[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(12): 1795-1801.
- [29] 中华人民共和国农业部. 农业部关于印发《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》的通知[EB/OL]. [2019-11-26]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201702/t20170210_5472878.htm.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Circular of the Ministry of agriculture on printing and distributing the action plan of replacing chemical fertilizer with organic fertilizer for fruit, vegetable and tea[EB/OL]. [2019-11-26]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201702/t20170210_5472878.htm.
- [30] 贾伟, 李宇虹, 陈清, 等. 京郊畜禽粪肥资源现状及其替代化肥潜力分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 156-167.
- JIA Wei, LI Yu-hong, CHEN Qing, et al. Analysis of nutrient resources in livestock manure excretion and its potential of fertilizers substitution in Beijing suburbs[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(8): 156-167.
- [31] Yamaji K, Ohara T, Akimoto H. A country-specific, high-resolution emission inventory for methane from livestock in Asia in 2000[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(3): 4393-4406.
- [32] 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 & Recycling*, 2019, 144: 65-73.
- [33] Stokral M, Kroeze C, Wang M R, et al. Reducing future river export of nutrients to coastal waters of China in optimistic scenarios[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 517-528.
- [34] Bai Z H, Jin S Q, Wu Y, et al. China's pig relocation in balance[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(10): 888.