

畜禽粪便资源现状及替代化肥潜力研究:以安徽省固镇县为例

孙超^{1,2,3,4}, 潘瑜春^{1,2,3,4}, 刘玉^{1,2,3,4}^① (1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 3. 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100097; 4. 北京市农业物联网工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 基于养殖业和种植业发展现状,综合考虑农作物种植面积、种植结构以及畜禽粪便处理技术等因素,估算固镇县分乡镇的固液粪便养分资源现状及其替代化肥的潜力。结果表明:(1)固镇县畜禽粪便中氮和磷养分分别为 11 456.93 和 2 954.09 t;在不施用化肥和不进行秸秆还田的情景下,各乡镇畜禽粪便的氮、磷供给量均未超过作物氮、磷养分需求量。(2)情景模拟表明,情景 C(固体粪便收集后尽快经堆肥加工为有机肥,液体粪便收集生成沼气后其废物本地还田利用)为最佳模式,氮和磷的有效供给量分别为 8 948.78 和 2 642.37 t,分别占作物氮、磷需求量的 34% 和 54%,表明固镇县有足够的农用地消纳畜禽粪便,亟需改进畜禽粪便处理工艺,提高粪肥替代化肥潜力。(3)在情景 C 下,畜禽粪便中氮、磷养分替代化肥潜力为 4 715.04 和 1 247.07 t,仲兴乡、任桥镇、刘集镇和杨庙乡替代化肥潜力最大。研究结果可为固镇畜禽养殖业发展规模的确定和畜禽粪便资源化利用提供决策支持。

关键词: 畜禽粪便; 替代化肥潜力; 氮(磷)养分; 固镇县

中图分类号: X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2017)04-0324-08

DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2017.04.005

Nutrient Resources in Livestock Manure and Its Potential of Substituting Fertilizers: A Case Study of Guzhen County, Anhui Province. SUN Chao^{1,2,3,4}, PAN Yu-chun^{1,2,3,4}, LIU Yu^{1,2,3,4} (1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China; 2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China; 3. Key Laboratory of Agri-Informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China; 4. Beijing Engineering Research Center of Agricultural Internet of Things, Beijing 100097, China)

Abstract: Based on the status of the development of the crop farming and livestock rearing of Guzhen County, Anhui Province and comprehensive consideration of factors like planting structure, planting area and technology of livestock manure disposal, status of nutrient resources in livestock manure and their potential of substituting chemical fertilizer in the region was assessed. Results show that the manure excreted by the livestock in the county contained a total of 11 456.93 t of N and 2 954.09 t of P, far from adequate to meet the demand of the crops in the region for N and P in the case of no fertilizers applied and no crop straw incorporated. Scenario simulation shows that Scenario C where solid manure is collected and composted into organic manure as soon as possible, and liquid waste is pooled into biogas digesters and turned into biogas slurry for application into the crop fields, is the best model, providing 8 948.78 and 2 642.37 t of available N and P, which may meet the demand of the crops by 34% and 54%, respectively. The findings indicate that Guzhen has enough agricultural land to digest the livestock manure it produces, but it is essential to improve its manure treatment technology so as to increase the potential of livestock manure substituting chemical fertilizer. In Scenario C, the livestock manure may substitute 4 715.04 t of N fertilizer and 1 247.07 t of P fertilizer. Zhongxing, Renqiao, Liuji and Yangmiao townships are the highest in potential. All the findings may provide the decision-makers with theoretical support to make plans for developing scale of livestock raising and utilizing livestock manure.

Key words: livestock manure; fertilizer substitution potential; N(P) nutrient; Guzhen County

随着农业规模化和产业化程度的不断提高,畜禽养殖已经逐渐从传统副业发展为农业主导产业,显著促进了农民收入增长和人民生活水平的改善^[1-2]。然而,畜禽养殖向大城市周边和养殖大县集中的趋势明显^[3],部分地区出现了养殖密度过

高、土地畜禽粪便污染物超载等问题,并引发了一

收稿日期: 2016-03-17

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0800904)

①通信作者 E-mail: Liuyu@nercita.org.cn

定的大气、水体和土壤污染^[4-5]。畜禽粪便中含有大量可利用的氮、磷资源,但受困于资金、技术的影响而得不到有效处理,养分损失较大^[6]。中央一号文件连续12 a 锁定“三农”问题,强调农业生产尽快从主要追求产量和依赖资源消耗的粗放经营转向数量质量效应并重,从根本上破解农业生态环境和资源条件的制约。此外,2015年农业部印发了《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》和《〈到2020年化肥使用量零增长行动方案〉推进落实方案》,强调到2020年实现化肥农药施用量零增长,到2030年养殖废弃物基本实现综合利用。因此,在社会经济“新常态”下,面对农业资源短缺、污染加重和生态环境约束趋紧等现实问题,评估畜禽粪便养分供给和作物养分需求之间的匹配关系,计算区域粪肥替代化肥潜力,逐步完善规模化养殖场粪便处理设施,是减少污染、实现农业可持续发展的前提。

当前,很多研究关注畜禽养殖高密度区域,通过构建模型估算畜禽粪便的环境污染风险^[7-10]。然而,现有研究多以耕地面积为消纳场所计算粪便氮、磷污染负荷,对地区复种指数考虑不足^[5,11],致使计算结果难以真实地反映局部地区畜禽粪便负荷。畜禽污染物处理方式一般包括直接还田、堆肥处理和沼气工程处理等,不同工艺条件下氮、磷的有效供给量及替代化肥利用潜力存在显著差异,但相关的对比研究较少。此外,国家、省市等宏观区域研究^[12]较多,县乡等微观尺度研究薄弱,难以反映微观尺度畜禽粪便潜力的空间差异。因此,笔者

以乡镇为基本单元,在实地调研的基础上,综合考虑作物种植面积、种植结构以及堆肥、沼气工程等因素,利用排污系数法计算畜禽粪便中氮、磷总量,定量评估不同情景下畜禽粪便的氮(磷)有效供给量及替代化肥潜力,以期为固镇县畜禽粪便资源化利用、农业循环经济链构建提供决策支持。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 总氮(总磷)产生量计算

总氮(总磷)产生量计算公式如下:

$$Q = \left(\sum_{i=1}^n N_i \times T_i \times E_i \right) / 10^6 \quad (1)$$

式(1)中, Q 为总氮(总磷)产生量,t; N_i 为第*i*种畜禽的饲养量,头或匹或只; T_i 为饲养期,d; E_i 为第*i*种畜禽的产排污系数, $g \cdot d^{-1} \cdot 头^{-1}$ 或 $g \cdot d^{-1} \cdot 匹^{-1}$ 或 $g \cdot d^{-1} \cdot 只^{-1}$; i 为畜禽种类, $i=1,2,\dots,n$ 。

固镇县畜禽养殖业以猪、肉牛、羊、肉鸡和蛋鸡为主,奶牛、鸭、马、驴骡和兔的数量极少。因此,在计算总氮(总磷)产生量时仅考虑猪、肉牛、羊、肉鸡和蛋鸡5种畜禽。畜禽的产排污系数在不同饲养期、不同地区不尽相同。为了得到接近实际的畜禽粪便资源量计算结果,依据《畜禽养殖业产排污系数手册》中的华东区畜禽产排污系数,并结合相关资料^[13-18]确定猪、肉牛、蛋鸡和肉鸡的产排污系数。其中,蛋鸡产排污系数以产蛋期产排污系数计,羊的产排污系数以相关资料^[10,19-20]中的产排污系数平均值计。固镇县主要畜禽粪便产排污系数见表1。

表1 固镇县主要畜禽粪便产排污系数

Table 1 Pollution discharge coefficient of livestock and poultry manure in Guzhen

畜禽种类	饲养期/ d	粪尿量/ ($kg \cdot d^{-1}$)	固体粪便		液体粪便	
			氮排放量/($g \cdot d^{-1}$)	磷排放量/($g \cdot d^{-1}$)	氮排放量/($g \cdot d^{-1}$)	磷排放量/($g \cdot d^{-1}$)
猪	199	4.36	15.89	6.42	20.67	1.46
肉牛	365	23.02	71.99	24.83	53.62	1.83
羊	365	0.87	3.02	0.70	2.61	0.01
肉鸡	55	0.06	0.53	0.23		
蛋鸡	365	0.12	1.35	0.60		

1.2 主要作物养分需求量计算

主要作物氮(磷)需求量计算公式如下:

$$D_{jk,t} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^h C_{jk} \times R_{jk} \quad (2)$$

式(2)中, $D_{jk,t}$ 为*j*地区第*k*种作物的氮(磷)总需求量,kg; C_{jk} 为*j*地区第*k*种作物的播种面积, hm^2 ; R_{jk} 为*j*地区第*k*种作物单位面积氮(磷)需求量, $kg \cdot hm^{-2}$; j 为乡镇数, $j=1,2,\dots,m$; k 为作物种类, $k=$

$1,2,\dots,h$ 。

固镇县的种植作物包括小麦、水稻、玉米、大豆、山芋、花生、棉花、药材、蔬菜和瓜类等,其中,小麦、玉米、大豆、花生、蔬菜和瓜类6种作物的播种面积占总播种面积的91%。由于部分作物的养分需求参数难以获取,因此选取上述6种作物作为消纳畜禽粪便的场所,参考相关资料^[3,21-24]确定单位面积作物养分需求量参数(表2)。

表2 固镇县主要作物播种面积及养分需求量

Table 2 Planting areas and nutrient demands of major crops grown in Guzhen

作物种类	播种面积/ hm ²	单位播种面积养分需求量/(kg·hm ⁻²)	
		氮	磷
小麦	50 214	207	35.00
玉米	34 000	161	30.00
大豆	4 740	216	26.40
花生	32 881	134	28.17
蔬菜	14 497	284	62.10
瓜类	7 744	108	22.50

1.3 畜禽粪便处理情景设置

结合已有研究成果获取氮(磷)损失参数,用于计算不同工艺处理后粪肥物料中的氮(磷)数量。堆肥是利用含有肥料成分的动植物遗体和排泄物,加上泥土和矿物质混合堆积,在高温、潮湿条件下经过发酵腐熟、微生物分解而制成的一种有机肥料,在堆肥过程中会造成一定量的养分损失^[25-28],但粪便经过堆肥处理可以减少体积、便于运输^[29]。沼气工程主要通过厌氧发酵及相关处理降低粪水有机质含量,达到或接近排放标准并获取沼气、沼渣和沼液,采用沼气工程处理可以产生能量并减少氮(磷)损失^[30-31],沼渣、沼液可制成有机肥,部分粪肥储藏、沼气处理过程中都涉及气体释放的研究,笔者只关注处理前后氮(磷)养分的损失比例^[32-34]。目前,在经济效益和技术水平的综合影响下^[35-36],以采用直接还田的方法居多。不同粪肥处理工艺中的氮(磷)养分损失比例见表3。

表3 不同粪肥处理工艺中的氮(磷)养分损失比例

Table 3 Proportions of N and P lost in manure treatment relative to technology

养分损失	氮损失比例/%		磷损失比例/%	
	平均值	范围	平均值	范围
堆肥	30.7	7.0~55.9	11.2	2.4~28.2
沼气	9.0	5.9~12.2	4.2	0~9.0
储藏	37.8	10.0~69.0	48.1	24.6~67.7

粪尿处理方式显著影响着可用于农田的养分数量。根据粪尿的处理工艺和去向,设置3种情景。情景A:固体粪便收集储藏堆放后在本地直接还田,液体粪便收集后直接排放,目前固镇县主要采用这种处理方法;情景B:收集的固体粪便经储藏堆放后利用,液体粪便经沼气处理后产生的废物在本地还田利用;情景C:收集后的固体粪便经堆肥加工为商品有机肥,在本地及周边地区利用,液体粪便经沼气处理后产生的废物在本地还田利用。

1.4 粪肥替代化肥氮(磷)养分的潜力分析

在情景分析的基础上,根据不同工艺技术条件下氮(磷)有效供给量的差异,计算固镇县各乡镇粪肥替代化肥潜力的计算公式为

$$P_{j,B} = S_{j,B} - S_{j,A}, \quad (3)$$

$$P_{j,C} = S_{j,C} - S_{j,A}。 \quad (4)$$

式(3)~(4)中, $P_{j,B}$ 、 $P_{j,C}$ 分别为情景B、C模拟下第j个乡镇粪肥替代化肥的有效潜力,t; $S_{j,A}$ 、 $S_{j,B}$ 、 $S_{j,C}$ 分别为情景A、B、C模拟下第j个乡镇粪肥供应氮(磷)的量,t。

1.5 研究区概况与数据来源

固镇县地处淮北平原区,是国家商品粮基地县、商品油料基地试点县和畜牧养殖基地,先后被评为“国家商品粮大县”、“全省畜牧十强县”、“全省油料第一大县”和“花生之乡”。近年来,固镇县畜禽养殖业迅速发展,已成为加快县域经济发展、增加农民收入的突破口。猪、肉鸡以年出栏量为饲养量,分别为77.40万头和2492万只;牛、羊和蛋鸡以年底存栏量为饲养量,分别为5.97万头、31.70万只和350万只。固镇县耕地面积为98730hm²,占土地总面积的72.56%;农作物总播种面积为168875hm²,主要种植小麦、玉米和花生等,为消纳畜禽粪便提供了基础条件。此外,固镇县地表水系发育,自北向南有沱河、浍河、濉河和怀洪新河4条过境河流,河道总长为153km,畜禽粪便处理不当将极易造成地表水污染,进而影响人畜的饮水安全。畜禽养殖数量、作物播种面积来自《固镇县统计年鉴2014》,耕地面积来自《2013年土地利用现状变更调查数据》,水资源数据来自《固镇县水资源综合规划水资源及开发利用调查评价》。

2 结果与分析

2.1 粪肥资源现状

由表4可知,2013年固镇县畜禽粪便总量为129.70万t,其中,仲兴乡、任桥镇和刘集镇分布较多,粪便产生量都在14万t以上,均约占固镇县总量的11.5%;石湖乡最少,只有7.53万t。固镇县畜禽粪便氮和磷产生量分别为11456.93和2954.09t,其中,连城镇、刘集镇、仲兴乡、任桥镇、湖沟乡和杨庙乡的氮产生量在1000t以上,仲兴乡、任桥镇、湖沟乡和杨庙乡的磷产生量在300t以上,这些乡镇是固镇县主要的畜禽粪便养分产生区域。

根据2013年固镇县主要作物的播种面积,以及在中等产量和中等肥力下各作物的养分需求量,计算固镇县及各乡镇氮(磷)需求量。由表4可知,固

镇县农作物氮和磷的需求量分别为 25 404.75 和 4 757.93 t; 其中, 刘集镇、杨庙乡、仲兴乡和任桥镇的氮(磷)需求量较高, 与畜禽粪便产生量基本一致。在不施用化肥和不进行秸秆还田的情况下, 各乡镇畜禽粪便的氮(磷)供给量均未超过作物的氮

(磷)需求量, 这说明固镇县畜禽养殖规模尚有可提升空间, 在固镇县种植业生产中, 还需要化肥和秸秆来补充氮(磷)养分。此外, 应逐步建设畜禽污染物处理设施, 提高粪肥施用效率, 在畜禽粪便资源化利用的同时减少环境污染。

表 4 固镇县各乡镇畜禽粪便总量及氮(磷)养分量 and 作物氮(磷)需求量

Table 4 Amount of manure and its N and P contents and crop demand for N and P in Guzhen

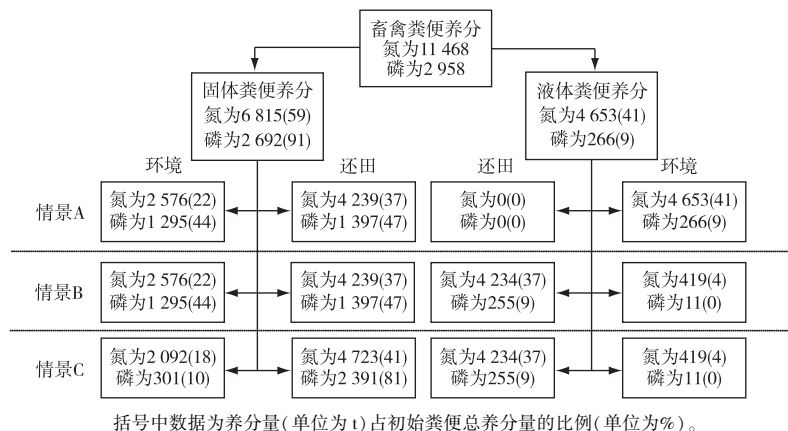
乡镇	粪便总量/ 万 t	粪便养分供给量/t		作物养分需求量/t	
		氮	磷	氮	磷
王庄镇	9.88	791.81(56.06)	190.14(89.80)	1 905.89	359.33
新马桥镇	10.78	887.21(56.10)	215.21(89.64)	2 338.35	440.97
连城镇	11.33	1 001.58(61.97)	266.02(92.22)	1 661.89	308.93
刘集镇	14.84	1 188.68(55.88)	286.15(89.65)	2 866.87	550.51
濠城镇	10.78	868.07(55.07)	206.71(89.20)	1 465.14	273.59
石湖乡	7.53	814.69(62.38)	228.35(91.51)	1 833.01	346.16
仲兴乡	15.18	1 323.79(59.60)	340.15(91.20)	2 833.79	527.78
任桥镇	14.94	1 229.75(56.75)	300.54(90.02)	2 770.66	516.79
湖沟乡	13.46	1 267.02(63.73)	346.30(92.82)	2 635.02	493.88
杨庙乡	12.24	1 291.12(67.57)	378.29(93.88)	2 861.26	523.16
城关镇	8.68	793.21(53.84)	196.23(87.75)	2 232.87	416.83
合计	129.64	11 456.93(59.43)	2 954.09(91.01)	25 404.75	4 757.93

括号中数据为固体粪便养分占粪便总养分比例, 单位为%。

2.2 合理施用粪肥情景分析

当前, 固镇县大多数养殖场采用固体粪便储藏后施用、液体粪便直接排放的处理方式(情景 A)。(1)按照情景 A, 全县粪便可提供氮和磷养分分别为 4 239 和 1 397 t, 63%的氮和 53%的磷进入环境。(2)考虑液体粪便农用(情景 B), 可供作物利用的氮和磷养分分别为 8 473 和 1 652 t, 液体粪便经过沼气工程处理减少了养分损失, 26%的氮和 44%的

磷进入环境, 与情景 A 相比氮的损失率明显减少。(3)为了畜禽粪便商业化, 采用堆肥处理方法和沼气发酵方法处理畜禽粪便(情景 C), 其氮和磷供给量分别为 8 957 和 2 646 t(图 1)。固体粪便经过堆肥处理, 保存了更多的磷元素, 氮和磷的损失率分别为 22%和 10%。从减少区域粪肥养分损失角度来看, 情景 C 优于情景 A 和 B, 因此, 应选择情景 C 作为畜禽粪便处理的优先模式。



括号中数据为养分量(单位为 t)占初始粪便总养分量的比例(单位为%)。

图 1 不同情景下的畜禽粪便可还田养分量

Fig. 1 Amount of nutrients returned into the field with manure relative to scenarios

按照情景 C, 确定了固镇县各乡镇粪肥氮(磷)有效供给量和化肥、秸秆养分补充量(表 5)。在情

景 C 模拟下, 固镇县粪肥占作物需求养分比例以氮和磷计分别为 34%和 54%, 化肥、秸秆补充量以氮

和磷计分别为 16 455.97 和 2 115.56 t,表明在现有养殖规模下,固镇县有足够农用地消纳畜禽粪便,亟需改进畜禽粪便处理工艺,提高粪肥替代化肥潜力。分乡镇来看,各乡镇粪肥占作物养分需求的比例差异较大,连城镇以氮(磷)计均最高,分别为 47%和 77%,城关镇最低,分别为 28%和 42%,应根据各乡镇具体情况实施差异化的畜禽粪便处理措施;各乡镇磷养分替代率均高于氮养分替代率,为

了预防畜禽规模扩大带来的粪便污染风险,应实施以磷养分投入为控制目标的粪肥利用对策;任桥镇和仲兴乡都已实现牛羊肉销售品牌化,特别是“任桥牛肉”已占据南京及周边地区 80%的市场份额,是当地名牌产品,而两个乡镇粪肥中磷有效供给量占作物需求养分比例为 52%和 58%,氮的比例更低,说明畜禽养殖数量仍低于当地环境限制容量,可增加牛羊饲养规模,带动周边地区农民增收。

表 5 粪肥还田养分量及需要补充化肥量

Table 5 Amount of nutrients returned into the field with manure and amount of chemical fertilizers to be amended

乡镇	粪肥有效还田养分量/t		化肥、秸秆补充养分量/t		粪肥占作物需求养分比例/%	
	氮	磷	氮	磷	氮	磷
王庄镇	624.22	170.24	1 281.67	189.09	33	47
新马桥镇	699.36	192.71	1 638.99	248.26	30	44
连城镇	776.75	237.71	885.14	71.22	47	77
刘集镇	937.55	256.24	1 929.32	294.27	33	47
濠城镇	686.20	185.17	778.94	88.42	47	68
石湖乡	631.09	204.17	1 201.92	141.99	34	59
仲兴乡	1 033.45	304.21	1 800.34	223.57	36	58
任桥镇	967.63	269.04	1 803.03	247.75	35	52
湖沟乡	977.78	309.31	1 657.24	184.57	37	63
杨庙乡	985.60	337.59	1 875.66	185.57	34	65
城关镇	629.15	175.98	1 603.72	240.85	28	42
合计	8 948.78	2 642.37	16 455.97	2 115.56	34	54

2.3 粪肥替代化肥氮(磷)养分潜力分析

相关研究^[37]表明,若用有机肥替代化肥,全球变暖潜力、富营养化潜力和环境酸化潜力将分别降低 17.54%、52.86%和 62.64%。农户调查研究^[38]表明,86.84%的农户使用过商品有机肥,其中,对肥料的认知、信息渠道和土地规模均对农户商品有机肥的使用具有正向影响作用。以上研究从多角度证明了有机肥具有替代化肥的潜力。

根据图 2 可知,相比现有处理工艺,情景 B 和 C

中粪肥养分替代化肥潜力均有较大提升。在情景 B 下,各乡镇畜禽粪便中氮和磷的有效供给量平均为 384.71 和 23.19 t;在情景 C 下,各乡镇畜禽粪便中氮和磷的有效供给潜力平均为 428.64 和 113.37 t,且氮和磷的提升潜力均大于情景 B,尤其是磷养分替代化肥潜力平均为情景 B 的约 5 倍。在情景 C 中,仲兴乡、任桥镇和刘集镇的氮养分潜力较大,均超过 500 t;杨庙乡、仲兴乡和湖沟镇的磷养分潜力较大,均超过 140 t。

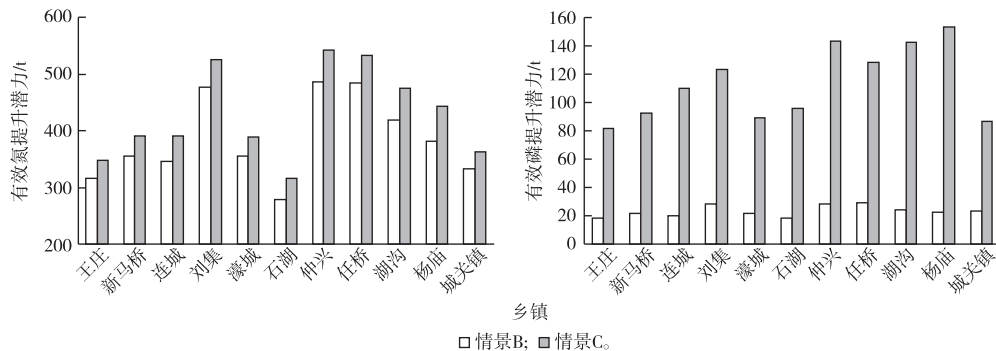


图 2 不同情景下氮和磷有效供给提升潜力

Fig. 2 Potential of raising the effective supply of nitrogen and phosphorus relative to scenarios

固镇县各乡镇粪肥替代化肥潜力巨大,但实地调研发现,在养殖场自身资金短缺、投资回报率低和污染处罚力度小等因素影响下,各养殖场粪便处理设施建设不到位,不仅不能用畜禽粪便养分替代化肥,而且易流入环境造成面源污染。2015年6月底,固镇县因农业面源污染造成大量鱼蟹死亡,渔民损失惨重,畜禽粪便无害化处理已经刻不容缓。为此,应采取政府引导、资金扶持等多种模式,集中有限资金优先解决粪肥替代化肥潜力大、环境约束力大的乡镇畜禽处理设施建设问题,再逐步分批解决其余乡镇沼气池等处理设施建设问题。

3 讨论

笔者研究的畜禽粪便养分产生量以及作物养分需求量都是基于统计数据和文献参数等,数据误差和所用参数的不确定性可能导致计算结果出现误差。真实动物数量与统计数据之间必然存在差别,笔者采用的畜禽存栏出栏数据来自《2014 固镇统计年鉴》,根据畜禽的生长周期对统计数据进行处理,一定程度上可减少误差,但这种处理并不能完全消除统计数据的不确定性。作物养分需求参数和排泄量参数主要来源于代表性文献和《畜禽养殖业产排污系数手册》。然而,由于畜禽种类、饲料、养殖模式以及技术因素、种植模式、作物种类和管理措施等诸多因素的影响,相应计算结果仍可能会存在误差。

农田养分来源包括化肥、粪肥和秸秆还田。由于数据限制,笔者只考虑粪肥替代化肥数量,没有计算秸秆还田数量。秸秆还田能够促使高氮输入的农田生态系统维持正常的碳氮比例,减少氮素淋洗损失,改善土壤结构板结和连作障碍等现象。与欧美国家高达90%多的秸秆还田率相比,目前我国农田秸秆还田率不足50%,还具有很大潜力^[36]。

结合固镇县实际情况和已有研究成果,为了实现资源优化配置,充分挖掘粪肥替代化肥潜力并减轻环境压力,亟需开展畜禽污染物处理设施建设时序分区研究。即综合考虑粪肥替代化肥潜力、河网密度、地力评级、畜牧业增加值比例和政策发展导向等评价指标,从自然、经济和社会多维度表征各乡镇畜禽处理设施建设优先级。此外,畜禽粪便不能替代化肥,不仅仅是由养分平衡决定,影响因素很复杂,涉及社会与经济因素。比如,输送距离、施用的方便性与人力成本,作物产量与品质等。后续还应围绕以上几个方面不断充实已有研究成果。

4 结论

2013年固镇县畜禽粪便中氮和磷养分产生量分别为11 456.93和2 954.09 t,其直接排放既污染环境又容易引起养分流失。固镇县农作物氮和磷需求量分别为25 404.75和4 757.93 t,是畜禽粪便养分产生量的约2倍。在考虑复种指数的情况下,现有耕地可以100%消纳畜禽产生的污染物。

从养分损失角度来看,情景C优于情景A和B。经堆肥和沼气处理(情景C)后,氮和磷的损失率分别为22%和10%,氮和磷的有效供给量分别为8 948.78和2 642.37 t,替代化肥率为34%和54%。从乡镇角度来看,各乡镇粪肥占作物养分需求的比例差异较大,需实施空间差异化的畜禽粪便处理措施。此外,各乡镇磷养分替代率均高于氮养分替代率,应实施以磷养分投入为控制目标的粪肥利用对策。

与现有畜禽粪便处理工艺相比,情景C氮、磷养分替代化肥的潜力较大,分别为4 715.04和1 247.07 t。仲兴乡、任桥镇和刘集镇的氮有效供给量较大,均超过500 t;杨庙乡、仲兴乡和湖沟镇的磷供给潜力较大,均超过140 t。建议结合固镇县实际情况和已有研究成果,尽快开展畜禽污染物处理设施建设时序分区研究,合理布设畜禽污染物处理设施,在有效利用畜禽粪便养分的同时减轻环境污染。

参考文献:

- [1] 高懋芳,邱建军,李长生,等.应用Manure-DNDC模型模拟畜禽养殖氮素污染[J].农业工程学报,2012,28(9):183-189. [GAO Mao-fang, QIU Jian-jun, LI Chang-sheng, et al. Modelling Nitrogen Pollution From Livestock Breeding Using Manure-DNDC Model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(9): 183-189.]
- [2] 王济民,谢双红,姚理.中国畜牧业发展阶段特征与制约因素及其对策[J].中国家禽,2006,28(8):6-11. [WANG Ji-min, XIE Shuang-hong, YAO Li. Characteristics and Limitations of China Husbandry in Development Stage and Its Countermeasures [J]. China Poultry, 2006, 28(8): 6-11.]
- [3] 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.]
- [4] 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 Fang-hao, MA Wen-qi, DOU Zheng-xia, 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.]
- [5] 张绪美,董元华,王辉,等.中国畜禽养殖结构及其粪便N污染负荷特征分析[J].环境科学,2007,28(6):1311-1318. [ZHANG Xu-mei,DONG Yuan-hua,WANG Hui, *et al.* Structure of Livestock and Variation of Fecal Nitrogen Pollution Load in China [J].Environmental Science,2007,28(6):1311-1318.]
- [6] 田宜水.中国规模化养殖场畜禽粪便资源沼气生产潜力评价[J].农业工程学报,2012,28(8):230-234. [TIAN Yi-shui. Potential Assessment on Biogas Production by Using Livestock Manure of Large-Scale Farm in China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(8):230-234.]
- [7] 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 Region Level of China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(1):171-179.]
- [8] 杨飞,吴根义,诸云强,等.中国各省区未来主要畜禽养殖量及耕地氮载荷的预测[J].水土保持研究,2013,20(3):289-294. [YANG Fei,WU Gen-yi,ZHU Yun-qiang, *et al.* Forecast of Livestock and Poultry Amount and Arable Land Nitrogen Load of Chinese Provinces [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013,20(3):289-294.]
- [9] 马林,王方浩,马文奇,等.中国东北地区中长期畜禽粪尿资源与污染潜势估算[J].农业工程学报,2006,22(8):170-174. [MA Lin,WANG Fang-hao,MA Wen-qi, *et al.* Assessments of the Production of Animal Manure and Its Contribution to Eutrophication in Northeast China for Middle and Long Period[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006,22(8):170-174.]
- [10] 彭里,王定勇.重庆市畜禽粪便年排放量的估算研究[J].农业工程学报,2004,20(1):288-292. [PENG Li,WANG Ding-yong. Estimation of Annual Quantity of Total Excretion From Livestock and Poultry in Chongqing Municipality[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2004,20(1):288-292.]
- [11] 孟岑,李裕元,许晓光,等.亚热带流域氮磷排放与养殖业环境承载力实例研究[J].环境科学学报,2013,33(2):635-643. [MENG Cen,LI Yu-yuan,XU Xiao-guang, *et al.* A Case Study on Non-Point Source Pollution and Environmental Carrying Capacity of Animal Raising Industry in Subtropical Watershed[J].Acta Scientiae Cricumstantiae,2013,33(2):635-643.]
- [12] 阎波杰,潘瑜春,闫静杰.安徽省县域耕地畜禽养殖废弃物养分负荷时空演变特征[J].生态与农村环境学报,2016,32(3):466-472. [YAN Bo-jie,PAN Yu-chun,YAN Jing-jie. Spatio-Temporal Evolution of Livestock Manure Nutrient Load in Farmland on a County Scale:A Case Study of Anhui Province[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2016,32(3):466-472.]
- [13] 杨增玲,韩鲁佳,刘依,等.基于摄入养分含量预测猪新鲜粪便肥料成分含量的试验研究[J].农业工程学报,2004,20(1):278-283. [YANG Zeng-ling,HAN Lu-jia,LIU Yi, *et al.* Experimental Study on Estimating Fertilizer Value of Raw Swine Slurries Based on Nutrients Intake[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2004,20(1):278-283.]
- [14] 全国农业技术推广服务中心.中国有机肥料养分数据集[M].北京:中国科学技术出版社,1999:1-15. [National Agricultural Technology Extension Service Center.China Organic Fertilizer Nutrient Data Set [M]. Beijing: Science and Technology of China Press,1999:1-15.]
- [15] 白明刚,马长海.河北省畜禽粪尿污染现状分析及对策[J].广东农业科学,2010,37(2):161-164. [BAI Ming-gang,MA Chang-hai. Analysis on Present Conditions and Strategies of Livestock Excrement and Urine Pollution in Hebei Province [J]. Guangdong Agricultural Sciences,2010,37(2):161-164.]
- [16] 谭美英,武深树,邓云波,等.湖南省畜禽粪便排放的时空分布特征[J].中国畜牧杂志,2011,47(14):43-48. [TAN Mei-ying,WU Shen-shu,DENG Yun-bo, *et al.* Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Livestock Manure Emission in Hunan [J]. Chinese Journal of Animal Science,2011,47(14):43-48.]
- [17] 庄犁,周慧平,张龙江.我国畜禽养殖业产排污系数研究进展[J].生态与农村环境学报,2015,31(5):633-639. [ZHUANG Li,ZHOU Hui-ping,ZHANG Long-jiang. Advancement in Research on Pollutants Producing and Discharging Coefficients of Livestock and Poultry Breeding Industry in China[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2015,31(5):633-639.]
- [18] 景栋林,陈希萍,于辉,等.佛山市畜禽粪便排放量与农田负荷量分析[J].生态与农村环境学报,2012,28(1):108-111. [JING Dong-lin,CHEN Xi-ping,YU Hui, *et al.* Analysis on the Total Amount of Domestic Animal Excrement and the Load in Farmland in Foshan [J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2012,28(1):108-111.]
- [19] 阎波杰,赵春江,潘瑜春,等.规模化养殖畜禽粪便量估算及环境影响研究[J].中国环境科学,2009,29(7):733-737. [YAN Bo-jie,ZHAO Chun-jiang,PAN Yu-chun, *et al.* Estimation of the Amount of Livestock Manure and Its Environmental Influence of Large-Scaled Culture Based on Spatial Information[J].China Environmental Science,2009,29(7):733-737.]
- [20] 邹德强,文勇立,李璐,等.简阳大耳山羊粪尿养分测定[J].西南民族大学学报(自然科学版),2013,39(1):8-11. [ZOU De-qiang,WEN Yong-li,LI Lu, *et al.* Nutrient Measurement of the Droppings and Urine of Jianyang Big-Eared Goats [J]. Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition), 2013,39(1):8-11.]
- [21] 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 Shu-tian,JIN Ji-yun. Characteristics of Nutrient Input/Output and Nutrient Balance in Different Regions of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011,44(20):4207-4229.]
- [22] 房增国,赵秀芬.胶东地区不同花生品种的养分吸收分配特性[J].植物营养与肥科学报,2015,21(1):241-250. [FANG Zeng-guo,ZHAO Xiu-fen. Nutrient Absorption and Distribution Characteristics of Different Peanut Varieties in Jiaodong Peninsula [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 241-250.]
- [23] 张福锁,陈新平,陈清.中国主要作物施肥指南[M].北京:中国农业大学出版社,2009:73-74. [ZHANG Fu-suo,CHEN Xin-ping,CHEN Qing. Guidelines for Fertilization of Major Crops in

- China [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009: 73-74.]
- [24] 沈根祥, 钱晓雍, 梁丹涛, 等. 基于氮磷养分管理的畜禽粪肥匹配农田面积 [J]. 农业工程学报, 2006, 22 (增刊 2): 268-271. [SHEN Gen-xiang, QIAN Xiao-yong, LIANG Dan-tao, *et al.* Research on Suitable Area for Cropland Application of Animal Manure Based on Nutrients Management of Nitrogen and Phosphorus [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22 (Suppl. 2): 268-271.]
- [25] 罗一鸣, 李国学, SCHUCHARDT F, 等. 过磷酸钙添加剂对猪粪堆肥温室气体和氨气减排的作用 [J]. 农业工程学报, 2012, 28 (22): 235-242. [LUO Yi-ming, LI Guo-xue, SCHUCHARDT F, *et al.* Effects of Additive Superphosphate on NH_3 , N_2O and CH_4 Emissions During Pig Manure Composting [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (22): 235-242.]
- [26] 魏宗强, 罗一鸣, 吴绍华, 等. 添加沸石对鸡粪高温堆肥磷钾径流及淋洗损失的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31 (12): 2486-2492. [WEI Zong-qiang, LUO Yi-ming, WU Shao-hua, *et al.* Effects of Zeolite Addition on the Loss of Phosphorus and Potassium Through Runoff and Leaching in Poultry Manure Composting [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31 (12): 2486-2492.]
- [27] 魏宗强, 李吉进, 吴绍华. 露天鸡粪好氧堆肥氮素的径流及淋洗损失 [J]. 水土保持学报, 2011, 25 (2): 44-47. [WEI Zong-qiang, LI Ji-jin, WU Shao-hua. Nitrogen Loss in Chicken Manure Compost Through Runoff and Leaching [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25 (2): 44-47.]
- [28] 杨宇, 魏源送, 刘俊新. 镁盐添加对猪粪堆肥过程中氮、磷养分保留的影响 [J]. 环境科学, 2008, 29 (9): 2672-2677. [YANG Yu, WEI Yuan-song, LIU Jun-xin. Effect of Magnesium Salt Addition on Nutrients Conservation During Swine Manure Composting [J]. Environmental Science, 2008, 29 (9): 2672-2677.]
- [29] 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 Zhi-zhou, JIN Hong-mei, HUANG Hong-ying, *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.]
- [30] 靳红梅, 付广青, 常志州, 等. 猪、牛粪厌氧发酵中氮素形态转化及其在沼液和沼渣中的分布 [J]. 农业工程学报, 2012, 28 (21): 208-214. [JIN Hong-mei, FU Guang-qing, CHANG Zhi-zhou, *et al.* Distribution of Nitrogen in Liquid and Solid Fraction of Pig and Dairy Manure in Anaerobic Digestion Reactor [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (21): 208-214.]
- [31] 付广青, 叶小梅, 靳红梅, 等. 厌氧发酵对猪与奶牛两种粪污固液相中磷含量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32 (1): 179-184. [FU Guang-qing, YE Xiao-mei, JIN Hong-mei, *et al.* Effect of Anaerobic Digestion on Phosphorus Transformation of Both Pig and Dairy Manure [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32 (1): 179-184.]
- [32] 纪术远. 不同处理对自然堆储牛粪腐熟及养分流失规律的影响 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2012, 26-27. [JI Shu-yuan. Effects of Different Treatments on Natural Storage and Nutrient Loss of Cow Dung Compost [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012.]
- [33] 李唯, 李艳霞, 杨明, 等. 北京市畜禽养殖的空间分布特征及其粪肥耕地施用的可达性 [J]. 自然资源学报, 2010, 25 (5): 746-755. [LI Wei, LI Yan-xia, YANG Ming, *et al.* Spatial Distribution of Livestock and Poultry Production and Land Application Accessibility of Animal Manure in Beijing [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25 (5): 746-755.]
- [34] 刘娟, 孙素芬, 谢莉娇. 耕地负荷视角下北京市畜禽废弃物资源空间转移可行性分析 [J]. 农业现代化研究, 2013, 34 (5): 627-630. [LIU Juan, SUN Su-fen, XIE Li-jiao. Feasibility Analysis of Livestock Waste Space Transfer in Beijing Based on Livestock Waste Load in Cultivated Land [J]. Research of Agricultural Modernization, 2013, 34 (5): 627-630.]
- [35] LIU Hai-tao, LI Jing, LI Xiao, *et al.* Mitigating Greenhouse Gas Emissions Through Replacement of Chemical Fertilizer With Organic Manure in a Temperate Farmland [J]. Science Bulletin, 2015, 60 (6): 598-606.
- [36] 籍春蕾, 丁美, 王彬鑫, 等. 基于生命周期分析方法的化肥与有机肥对比评价 [J]. 土壤通报, 2012, 43 (2): 412-417. [JI Chun-lei, DING Mei, WANG Bin-xin, *et al.* Comparative Evaluation of Chemical and Organic Fertilizer on the Base of Life Cycle Analysis Methods [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43 (2): 412-417.]
- [37] 杨泳冰, 胡浩, 王益文. 农户以商品有机肥替代化肥的行为分析: 基于江苏南通市 228 户调查数据 [J]. 湖南农业大学学报 (社会科学版), 2012, 13 (6): 1-6. [YANG Yong-bing, HU Hao, WANG Yi-wen. Behavior of Farmers' Using Merchandise Organic Fertilizer as the Substitution of Chemical Fertilizer: Based on the Survey Data of 228 Households in Nantong City, Jiangsu Province [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Social Sciences), 2012, 13 (6): 1-6.]
- [38] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2013, 21 (5): 526-535. [PAN Jian-ling, DAI Wan-an, SHANG Zhan-huan, *et al.* Review of Research Progress on the Influence and Mechanism of Field Straw Residue Incorporation on Soil Organic Matter and Nitrogen Availability [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21 (5): 526-535.]

作者简介: 孙超 (1989—), 男, 北京市人, 工程师, 硕士, 主要从事区域农业与乡村发展方面的研究。E-mail: 879858874@qq.com

(责任编辑: 李祥敏)