

江苏省4类主要秸秆和畜禽粪便空间分布及综合利用潜力研究

姜小三, 卢梦凡, 刘岩, 李晗泚, 袁诗睿, 林伯正

引用本文:

姜小三, 卢梦凡, 刘岩, 李晗泚, 袁诗睿, 林伯正. 江苏省4类主要秸秆和畜禽粪便空间分布及综合利用潜力研究[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 675-687.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0159>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国主要粮食作物秸秆还田替代化学氮肥潜力

柴如山, 王擎运, 叶新新, 江波, 赵强, 王强, 章力干, 郜红建

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2583-2593 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0751>

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>

云南省畜禽粪污土地消纳能力的评估及其肥料化发展前景

邓亚琴, 王宇蕴, 李兰, 赵兵, 张勇, 马丽婷, 徐智

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2419-2427 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1103>

畜禽粪便超高温好氧堆肥工程案例

邢睿智, 艾超凡, 王梦怡, 唐荣, 杨祖沐, 秦树平, 陈志, 周顺桂

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2405-2411 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1108>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

姜小三, 卢梦凡, 刘岩, 等. 江苏省4类主要秸秆和畜禽粪便空间分布及综合利用潜力研究[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 675-687.

JIANG X S, LU M F, LIU Y, et al. Spatial distribution and comprehensive utilization potential of four main types of straw and livestock manure in Jiangsu Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 675-687.



开放科学 OSID

江苏省4类主要秸秆和畜禽粪便空间分布及综合利用潜力研究

姜小三¹, 卢梦凡¹, 刘岩², 李晗泚², 袁诗睿², 林伯正¹

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095)

摘要:为明晰江苏省农业废弃物资源分布格局并进行利用潜力评估, 推进农业废弃物资源化利用, 助力农业全面绿色转型, 本研究借助GIS构建数据批处理模型, 测算各区县水稻、小麦、玉米和油菜4种作物的秸秆和猪、牛、羊、家禽4种畜禽的粪便产生量, 及其在肥料化、能源化方面的利用潜力理论值, 并结合热点分析结果为江苏省农业废弃物综合利用提供政策建议。结果表明: 2020年江苏省4种主要作物秸秆可收集总量高达3 972.00万t, 以水稻和小麦秸秆为主, 集中分布在江苏北部和中部。分析其肥料化利用潜力, 理论上相当于1 511.89万t有机碳、12.04万t N、1.59万t P、24.49万t K, 能源化理论上相当于1 617.52万t标准煤或 6.5×10^9 m³沼气; 江苏省4种主要畜禽粪便产生总量为4 560.77万t, 家禽粪便与猪粪最多, 主要分布在东部边界和西北部地区。分析其肥料化利用潜力, 理论计算相当于737.00万t有机碳、31.15万t N、29.86万t P和26.89万t K, 能源化利用可折算成1 036.95万t标准煤或 4.9×10^9 m³沼气; 99%置信度下, 江苏省有10个秸秆产生热点县、7个畜禽粪便产生热点县和5个秸秆-畜禽粪便双热点县。秸秆产生热点县应根据主要秸秆种类选择直接还田、制作饲料、生产农副产品和食用菌等合适的利用方向。畜禽粪便产生热点县适于开展以粪污处理为核心的循环利用模式。秸秆-畜禽粪便双热点县则具有利用种养结合构建多层次、多元化、综合化利用格局的重要优势。此外, 江苏省应根据资源聚集情况, 分层、分类布设资源收集处理中心, 并同步优化全省的收储运网络。

关键词:农业废弃物; 资源化利用; 秸秆; 畜禽粪便; 空间热点

中图分类号: X71 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)03-0675-13 doi:10.11654/jaes.2023-0159

Spatial distribution and comprehensive utilization potential of four main types of straw and livestock manure in Jiangsu Province

JIANG Xiaosan¹, LU Mengfan¹, LIU Yan², LI Hanci², YUAN Shirui², LIN Bozheng¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: To clarify the distribution pattern of agricultural waste resources in Jiangsu Province and evaluate their utilization potential, promote the resource utilization of agricultural waste, and assist in the comprehensive green transformation of agriculture, In this study, we used GIS to construct a data batch processing model, which was applied to calculate the production of straw from four crops, namely, rice, wheat, corn, and rapeseed, as well as manure derived from four livestock/poultry sources, including pigs, cows, sheep, and poultry, in different districts and counties. The theoretical values of the potential utilization of fertilizer and energy are also analyzed. On the basis of the findings of hotspot analyses, we proposed policy recommendations for the comprehensive utilization of agricultural waste in Jiangsu Province. The results revealed that in 2020, the total amount of straw collected from the four main crops in Jiangsu Province reached

收稿日期: 2023-03-04 录用日期: 2023-06-16

作者简介: 姜小三(1967—), 男, 江苏姜堰人, 博士, 教授, 主要研究方向为土壤资源与信息技术。E-mail: gis@njau.edu.cn

基金项目: 国家农业可持续发展试验示范区建设项目; “三新”技术转化与推广示范项目(tzyjy100035)

Project supported: National Agricultural Sustainable Development Pilot Demonstration Zone Construction Project; “New Variety, New Technology and New Agro-Machinery” Technology Transformation and Promotion Demonstration Project(tzyjy100035)

39.720 0 million tons, mainly rice and wheat straw, with production being concentrated in the northern and central parts of Jiangsu Province. Analyzing the potential of this straw for fertilizer utilization, we established that this straw was theoretically equivalent to 15.118 9 million tons of organic carbon, 120 400 tons of N, 15 900 tons of P, and 244 900 tons of K. In theory, the energy conversion of this material is equivalent to 16.175 2 million tons of standard coal or 6.5×10^9 m³ of biogas. The total amount of feces produced by the four main types of livestock and poultry in Jiangsu Province was 45.607 7 million tons, with poultry and pig manure being the most abundant, and production being mainly distributed along the eastern provincial border and in the northwest regions. Analyzing the potential of this manure for fertilizer utilization, we obtained theoretical values equivalent to 7.370 0 million tons of organic carbon, 311 500 tons of N, 298 600 tons of P, and 268 900 tons of K. In theory, the energy conversion of this material is equivalent to 10.369 5 million tons of standard coal or 4.9×10^9 m³ of biogas. At the 99% confidence level, we identified 10 hotspot counties for straw production, 7 for livestock and poultry manure production, and 5 for both straw and livestock/poultry manure production in Jiangsu Province. Hotspot counties for straw production should adopt suitable utilization measures based on the main types of straw, including direct return to the field, production of feed, production of agricultural and sideline products, and edible fungi. Hotspot counties for livestock and poultry manure production are suitable for implementing a recycling model centered on fecal treatment. Dual straw/livestock manure hotspot counties have important advantages in utilizing the combination of planting and breeding to establish a multi-level, diversified, and comprehensive utilization pattern. In addition, Jiangsu Province should establish resource collection and processing centers in a hierarchical and classified manner based on resource aggregation, and synchronously optimize the province's collection, storage, and transportation network.

Keywords: agricultural waste; resource utilization; straw; livestock manure; spatial hotspots

2022年中央一号文件中提到,为应对气候变化,全国需推进农业农村绿色发展,加强畜禽粪污与秸秆综合利用^[1]。现阶段农作物秸秆及畜禽粪污弃置排放等不合理的处理方式,不仅造成资源的浪费^[2],增加了温室气体的排放,也对人体健康和环境污染造成严重的影响^[3]。《第二次全国污染源普查公报》公布的数据显示^[4],2017年全国种植业秸秆可收集量为6.74亿t,秸秆利用量为5.85亿t,可回收资源利用率为86.8%,将其全部肥料化后,分别可替代当年约五分之一的氮肥和磷肥投入,可完全满足当年农业钾肥需求^[5-7];畜禽养殖业年产粪污约30.5亿t,是农业发展主要的污染源之一^[8]。因此,加强畜禽粪污与秸秆综合利用是协同推进农业农村高质量发展和生态环境高水平保护的重要途径,对于全面推进乡村振兴、加快农业农村现代化具有重要意义^[9]。

江苏省积极响应国家号召,相继出台了一系列政策文件^[10],以秸秆和畜禽粪便综合利用为抓手,推进农业固碳减排,充分发挥区域示范作用,不仅入选畜禽粪污资源化利用的省级试点区域,省内高邮市、太仓市、宜兴市等多地还入选了中央农作物秸秆综合利用重点县。江苏省农业废弃物利用虽取得一定成果,但仍面临新的挑战:一是农业废弃物总量大、分布广、运输与处理效率过低,收储运网络亟需优化^[11];二是未根据废弃物种类特性综合协调利用,资源化效率低。因而本文基于江苏省统计年鉴中4种主要的作物产量与畜禽饲养量,构建GIS批处理模型,推算各

区县农业废弃物产生量与资源化利用潜力,并制得资源分布图,明晰江苏省热点区县构成,分析不同种类农业废弃物的聚集情况,同时结合各区县特点,寻求秸秆与畜禽粪污资源化利用最优解,为深入研究江苏省农业废弃物资源化利用提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

江苏省农业废弃物来源多样,本研究仅选取农作物秸秆与畜禽粪便进行分析。2020年江苏省农业总播种面积为 7.48×10^6 hm²,其中水稻、小麦、玉米和油菜4种作物种植面积共 5.22×10^6 hm²,约占总播种面积的70%,所以主要选择这4种作物来推算江苏省秸秆产量。畜禽业肉类产量中猪、羊、牛和各类家禽的肉类产量之和占总量的98.9%,所以主要计算猪、羊、牛和各类家禽的粪便产生量。由于产排污系数差异,将牛分为奶牛与肉牛来计算。各区县作物产量与畜禽年出栏量或存栏量来源于2020年江苏省各市、区县的统计年鉴。

1.2 数据处理

1.2.1 秸秆可收集量计算

草谷比是评估秸秆产生量的重要参数^[12-13],但由于收割留茬和秸秆不会被全部回收,秸秆产生量需借助可收集系数法进行校正。作物草谷比及可收集系数采用农业农村部江苏省推荐取值,考虑到江苏省农业现代化发展趋势,作物均选取机械可收集系数。计

算方法如下:

$$M = \sum_{i=1}^n Q_i \times G_i \times R_i$$

式中: M 表示秸秆可收集总量, t ; i 表示作物种类; Q_i 表示第*i*种作物产量, t ; G_i 表示第*i*种作物草谷比; R_i 表示第*i*种作物可收集系数。具体数值见表1。

表1 主要农作物草谷比及秸秆可收集系数

Table 1 Grass-grain ratio and collectable coefficient of major crops in Jiangsu Province

项目 Item	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Maize	油菜 Rape seed
草谷比 Grass-grain ratio	1.28	1.38	2.05	2.05
可收集系数 Collectable coefficient	0.74	0.73	0.85	0.85

1.2.2 畜禽粪便产生量

粪便产排污系数与尿液产排污系数之和为粪尿的产排污系数,畜禽粪便量需采用产排污系数法计算^[14]。由于统计年鉴中无各种动物不同饲养阶段与类型的具体数值,参考耿维等^[15]的研究,根据各饲养阶段的时间对产排污系数进行适当选取和修正,修正后的产排污系数见表2。

表2 不同种类畜禽排泄系数($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)

Table 2 Excretion coefficient of different kinds of livestock and poultry ($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)

猪 Pig	肉牛 Beef cattle	奶牛 Dairy cattle	羊 Goat	家禽 Poultry
2.97	23.71	46.84	0.87	0.22

畜禽粪便产生量计算公式如下:

$$N = \sum_{i=1}^n S_i \times T_i \times L_i$$

式中: N 为畜禽粪便年产生总量, t ; i 表示畜禽种类; S_i 表示第*i*类畜禽饲养量,只或头; T_i 表示第*i*类畜禽饲养周期, d ; L_i 表示粪尿量排泄系数。

统计年鉴中仅记载了不同种类畜禽的年出栏量与存栏量,而无年饲养量,经过文献查询与多种方法对比,本文根据各种牲畜生长期来决定年饲养量的代替值^[15-18]。我国猪平均饲养期一般为199 d,年末存栏数包含在此年的出栏数中,因此猪的饲养量就是当年的出栏数。牛、羊生长期一般长于1 a,因此采用年末存栏量作为当年的饲养数量。家禽的饲养周期取210 d,饲养量计为禽类出栏量。

1.2.3 秸秆/畜禽粪便利用潜力计算

秸秆和畜禽粪便经过处理并循环利用可以减轻环境压力,有利于节约资源。秸秆还田与畜禽粪便堆肥可为土壤与农作物提供大量N、P、K等营养元素^[14, 18-23]。由此可见,循环利用农业废弃物的节能减排效益和潜力巨大,符合我国生态优先的农业绿色发展理念。利用潜力参数^[19-23]参考表3。

1.2.3.1 营养元素含量

$$A_j = \sum_{i=1}^n W_i \times F_{i,j}$$

式中: A_j 表示秸秆或畜禽粪便第*j*种营养元素含量, t ; i 表示秸秆/畜禽粪便种类; W_i 表示第*i*类秸秆或畜禽粪便产生量, t ; $F_{i,j}$ 表示第*i*类秸秆或畜禽粪便第*j*种元素含量, $\%$ 。

1.2.3.2 标准煤折算量

$$C = Z_i \times R_i \times D_i \times \alpha_i$$

式中: C 为秸秆或畜禽粪便折煤量, t ; Z_i 表示第*i*种秸秆或畜禽粪便量, t ; R_i 为第*i*种秸秆或畜禽粪便的可回收系数; D_i 为第*i*种秸秆或畜禽粪便的干物质比例, $\%$; α_i 为第*i*种秸秆或畜禽粪便的标准煤转化系数

表3 秸秆和畜禽粪便利用潜力参数

Table 3 Utilization potential parameters of straw and livestock manure

农业废弃物 Agri-waste	种类 Species	有机质 Organic matter/%	N/%	P/%	K/%	标准煤转化系数 Conversion coefficient of standard coal	单位产沼气量 Biogas production per unit/($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	可回收系数 Collectable coefficient	干物质比例 Ratio of dry matter/%
秸秆 Straw	水稻Rice	65.2	0.30	0.04	0.66	0.43	0.2		85
	小麦Wheat	64.2	0.31	0.04	0.65	0.50	0.3		85
	玉米Maize	70.3	0.30	0.04	0.38	0.53	0.3		94
	油菜Rapeseed	69.6	0.27	0.04	0.61	0.53	0.2		85
畜禽粪便 Livestock and poultry dung	肉牛Beef cattle	18.0	0.383	0.218	0.277	0.47	0.3	0.6	18
	奶牛Dairy cattle	18.0	0.383	0.218	0.277	0.47	0.3	0.6	18
	羊Sheep	32.5	1.014	0.495	0.638	0.53	0.3	0.6	40
	猪Pig	23.7	0.547	0.561	0.353	0.43	0.2	1.0	20
	家禽Poultry	28.5	0.761	0.757	0.715	0.64	0.3	0.6	80

(有机碳含量=有机质含量/1.724)^[14]。

1.2.3.3 沼气折算量

$$B = Z_i \times R_i \times D_i \times \beta_i$$

式中: B 为秸秆或畜禽粪便沼气折算量, m^3 ; β_i 为第 i 种秸秆或畜禽粪便的单位产沼气量, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.3 热点分析

热点分析是局部空间自相关中的一种判定模式,通过对数据集中的每一个要素计算来得到高值或低值要素在空间上发生聚类的位置,能够直观了解高低值在何处发生了聚类及其聚集的密集程度。

ArcMap 热点分析属于聚类分布制图的常用工具,对输入数据集中的每一个要素计算 G_i^* 指数,用以比较某个要素及其相邻要素的局部总和与所有要素总和。

Getis-Ord G_i^* 指数属于空间自相关分析,最早由英国数学家 Getis 和 Ord 于 1992 年提出^[24],计算公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2}$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n}$$

式中: x_j 是要素 j 的属性值; w_{ij} 是要素 i 与 j 之间的空间权重(相邻为1,不相邻为0); n 为要素总数; S 是标准差; \bar{X} 为要素 j 的平均值。

G_i^* 统计结果是 z 得分,表示标准差的倍数。统计学上正 z 得分表示热点, z 得分越高,颜色越趋于红色,表示热点聚集越紧密;负值表示冷点, z 得分越低,颜色越趋于蓝色,冷点的聚集越紧密。通过GIS图可以展现该属性值的空间位置,分析它们是否具有集聚效应。

1.4 模型构建

为进一步提高研究的应用性,借助GIS将上述计算过程构建模型,模型构建过程(图1)如下:①将农作物、畜禽产量等初始数据导入省县域属性表,添加待计算字段;②在模型构建器中利用“计算字段”工具输入公式,计算秸秆与畜粪产量;③利用“热点分析”工具输出上述结果对应的热点分析图;④通过公式计

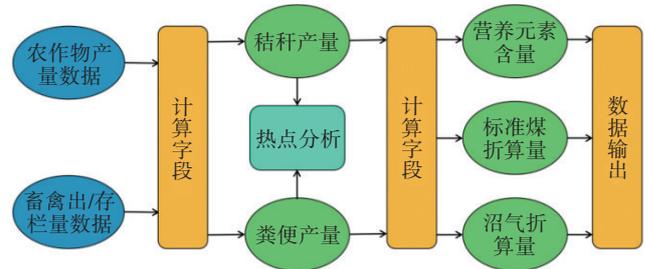


图1 批处理模型流程示意图

Figure 1 Data batch processing model flow

算出各种营养元素含量、标准煤折算量、沼气折算量,输出结果。

通过模型计算出江苏省各区县农业废弃物产生量与资源化利用潜力,进而通过符号系统制得资源分布图;通过将不同种类秸秆和畜禽粪便分布热点区叠加分析江苏省热点区县构成、不同种类农业废弃物的聚集情况及其聚集的密集程度。

秸秆可收集量及粪便可收集量分布图的分级方法均为相等间隔。相等间隔法会根据指定间隔数,将属性值的范围划分为若干个大小相等的子范围。此方法强调的是某个属性值相对于其他值的量,因而可使数量上的级差在图形上得以清晰显现。本文将秸秆、粪便可收集量均划分为0~4级5个等级:1~4级别分别是0级的1、2、3、4倍值。

该计算模型如推广至其他省份,只需修改模型中输入数据与公式的参数(例如草谷比、可收集系数等)即可,从而可增强本实验的实际应用性。

2 结果与分析

2.1 江苏省秸秆和畜禽粪便现状分布特征

2.1.1 秸秆分布及热点区域

秸秆总产量0级为0~26.29万t,水稻秸秆产量0级为0~14.69万t,小麦秸秆产量0级为0~14.75万t,玉米秸秆产量0级为0~8.26万t,油菜秸秆产量0级为0~1.43万t。

从可收集秸秆总量(图2)上看,江苏省作物秸秆集中分布在江北部和中部,呈现“北丰南贫”的特点,总量高达3 972.00万t,秸秆种类以小麦秸秆和水稻秸秆为主,玉米秸秆和油菜秸秆相对较少。

如图3所示,水稻秸秆可收集总量约1 895.00万t,占作物秸秆总量的47.7%,广泛分布于江苏中部江淮平原、东部滨海平原等地区。小麦秸秆占4种作物秸秆总量的36.3%,可收集总量约1 454.91万t,大部分位于黄淮平原区域、东北低山丘陵地带,其中连云

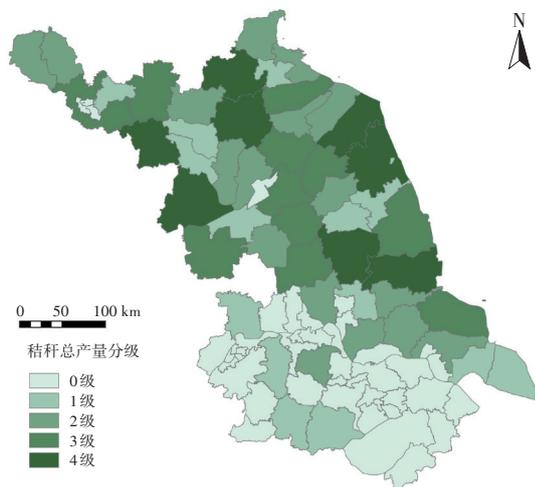


图2 可收集秸秆总量分布

Figure 2 Distribution of total collectable

区资源最丰富。玉米秸秆可收集量为550.46万t,占全省这4种作物秸秆总量的13.9%,主要分布在徐州地区和盐城。油菜秸秆可收集总量为71.71万t,可收集量最少,主要分布于长江三角洲地区。

4种作物秸秆量的热点分布具有明显差异(图4)。水稻秸秆热点分布较为集中,江苏中、东部水稻秸秆集聚现象明显。小麦秸秆热点集中分布在黄淮平原偏东地区。玉米秸秆和油菜秸秆热点分布地区相差较大,前者集中分布在徐州和宿迁西北部地区,后者分布在长江三角洲地区。秸秆可收集总量热点分布受水稻和小麦影响较大,主要分布在江苏省东北部(图5)。

2.1.2 畜禽粪便分布及热点区域

畜禽粪便总量0级为0~63.76万t,牛粪便量0级

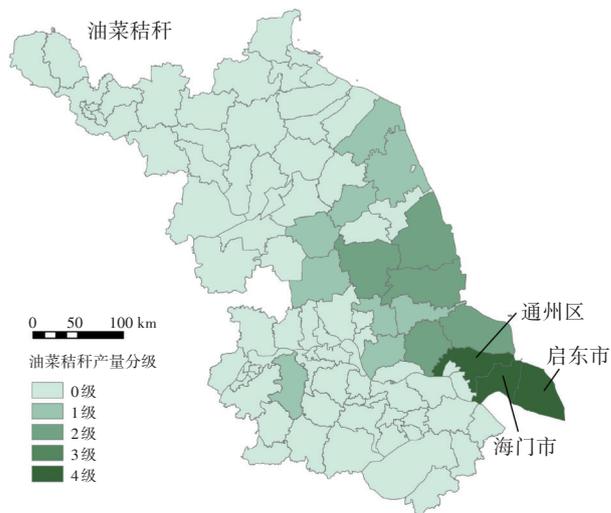
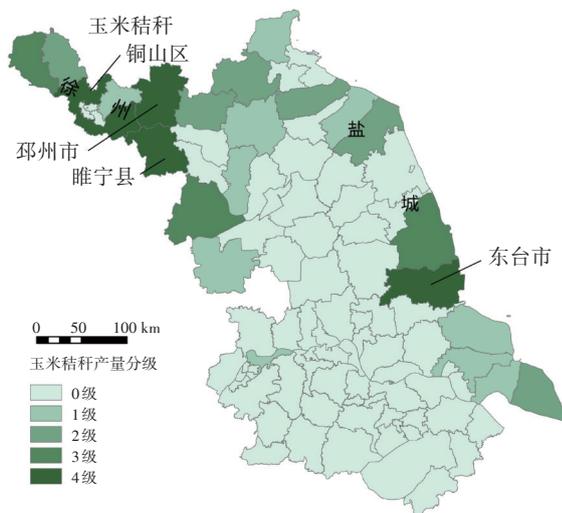
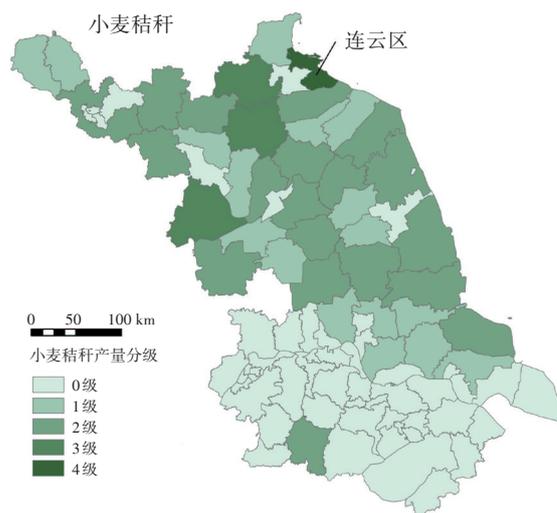
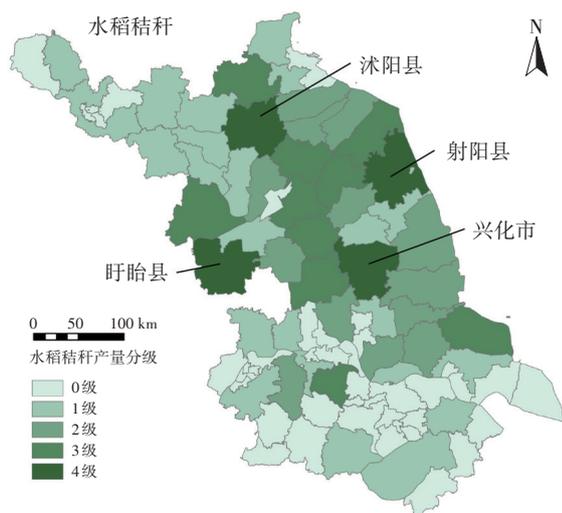


图3 4种作物秸秆可收集量分布

Figure 3 Distribution of collectable straws of four crops

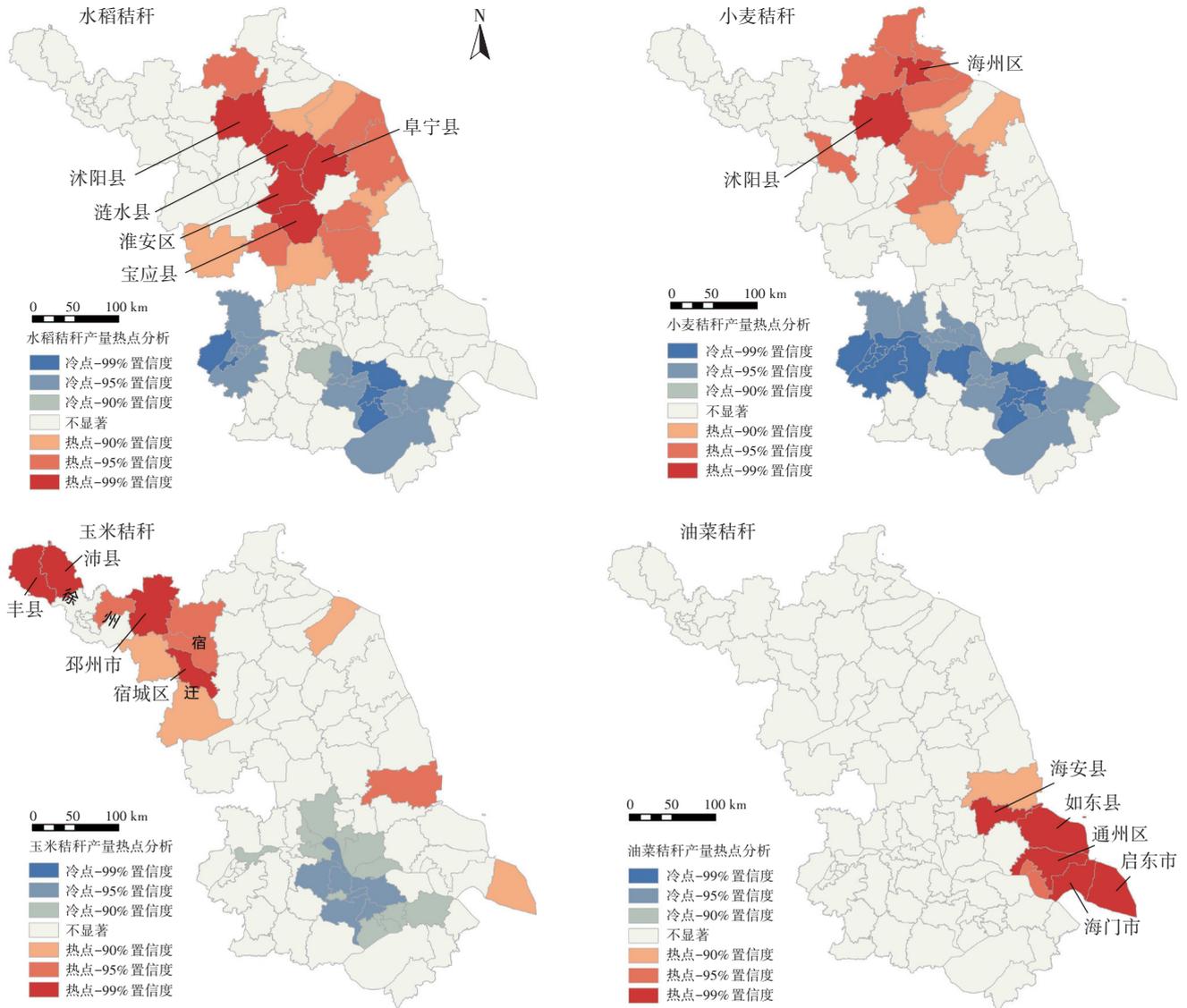


图4 4种作物秸秆可收集量热点分析

Figure 4 Hotspot analysis on the collectable amount of straw of four crops

为0~18.81万t,羊粪便量0级为0~4.61万t,猪粪便量0级为0~9.10万t,家禽粪便量0级为0~53.90万t。

江苏省2020年畜禽粪便总量为4 560.77万t,主要分布在东部边界、西北部地区,西部和南部畜禽粪便产生量较少(图6)。江苏省畜禽粪便总量超过100万t的县有17个,其中最丰富的为邳州市,畜禽粪便总量高达318.82万t,其次为东台市,畜禽粪便总量为213.00万t。

畜禽粪便以家禽粪便可收集量最高(图7),约2 959.23万t,占比超过50%,广泛分布于江苏省西北部与中部,其中邳州市可收集量最高,约270.00万t;牛粪便主要分布于江苏省西北部和东部,云龙区可收集量最多,占总量约22%;羊粪便主要分布于南通地

区;猪粪便广泛分布在江苏北部与中部地区。

4种畜禽粪便中,羊粪便热点分布最集中,主要在南通市与盐城东台市(图8)。牛和家禽粪便热点分布较为相似,主要在徐州、宿迁、盐城。猪粪便热点分布则较广泛地分布在江苏北部与东部。总畜禽粪便热点分布于徐州,盐城与南通交接区也有两个热点区(图9)。90%和95%置信度下,畜禽粪便热点市县有5个,99%置信度下,畜禽粪便热点市县有4个,分别为邳州、新沂、东台、海安。

2.2 江苏省秸秆和畜禽粪便利用潜力分析

2020年江苏省秸秆肥料化利用潜力,理论上相当于1 511.89万t有机碳、12.04万t N、1.59万t P、24.49万t K,能源化理论上相当于1 617.52万t标准煤

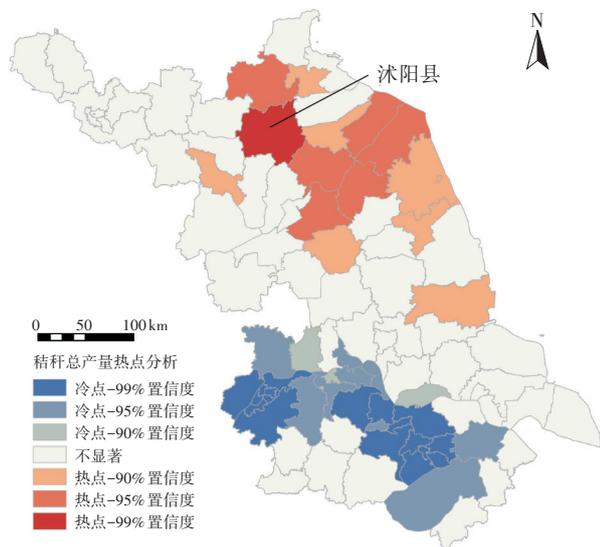


图5 秸秆可收集总量热点分析

Figure 5 Hotspot analysis of total collectable straw

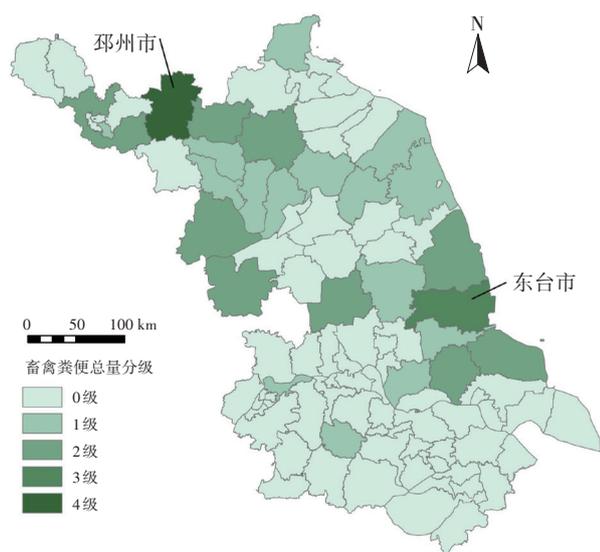


图6 粪便可收集总量分布

Figure 6 Distribution of total collectable feces

或 $6.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ 沼气,如果能够恰当利用,其能为江苏省节约大量能源。沭阳县秸秆肥料化和能源化潜力最高,秸秆折算N、P、K、标准煤和沼气分别高达0.40万、0.05万、0.82万、42.85万t和 $2.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

畜禽粪便肥料化利用潜力,理论计算相当于737.00万t有机碳、31.15万t N、29.86万t P和26.89万t K,能源化利用可折算成1 036.95万t标准煤或 $4.9 \times 10^9 \text{ m}^3$ 沼气。其中邳州市畜禽粪便产生量最高,折算N、P、K、标准煤和沼气分别为2.32万、2.30万、2.10万、87万t和 $4.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由此可见,农业废弃物的回

收再利用对于农业绿色可持续发展与固碳减排有着重要意义。

2.3 江苏省秸秆和畜禽粪便热点区类型结构

如图10所示,99%置信度下秸秆热点县以单一秸秆热点县为主,复合秸秆热点县较少。沭阳县位于宿迁市,紧邻徐州、连云港、淮安,秸秆构成最复杂,也是种植结构较复杂的区域。组成较复杂的畜禽粪便热点县较少,大多为单一畜禽粪便热点县。北部热点区县多但畜禽结构组成简单。盐城与南通交界处的两个市县——海安县、东台市畜禽粪便组成最复杂。

将江苏秸秆与粪便热点区县构成进行叠加分析,得出5个秸秆-粪便双热点区县,分别为邳州市、涟水县、海安县、海门市、启东市。

3 讨论与建议

3.1 江苏省秸秆和畜禽粪便分布分析

江苏全省呈现“北丰南贫”的资源分布特点,其与江苏种植和养殖结构密切相关,也受江苏立体气候、复杂多样的地形及农业生产效率、土壤自然条件等因素影响。苏北地区地势平坦,土壤及光热资源适中,适宜多数作物生长,乡村人口占比较高^[24],猪和家禽养殖适合该区条件,因而该区各种秸秆、猪粪及家禽粪便产量丰富;苏中地区种植面积少,但机械化程度较高,农业生产效率较高;苏南地区以第二产业为主导产业,其主要的土地利用类型也相应地从农用地逐步转为城镇建设用地等^[25]。

3.2 江苏省秸秆和畜禽粪便利用方向分析

3.2.1 理论分析

秸秆与畜禽粪便的资源种类决定着其最佳利用方向。小麦秸秆和水稻秸秆纤维素和木质素含量较高,做成粗饲料营养价值低,主要以机械还田与能源化为主^[22];玉米秸秆除碳水化合物含量高外,还富含蛋白质和脂肪,适合作为优质饲料的原料^[26]。干油菜秸秆本身具有很好的可燃性,此方式是目前油菜秸秆加工最主要的利用途径之一^[27]。

羊粪和家禽粪便蛋白质含量高,适合堆肥,羊粪沼气化还能使秸秆得到再利用。鸡粪可以直燃发电,也可以直接加工成饲料用于养牛和喂猪^[28-29]。猪粪质地较细,富含蛋白质、脂肪、纤维素等,容易分解、腐熟,但含水量较大,晾晒后方可用作有机肥原料^[14]。与其他动物相比,牛粪便营养物质含量较低,燃烧后会产生大量温室气体,不适合制成燃料,但可加工成肥料,用于改良土壤结构与养分^[29]。

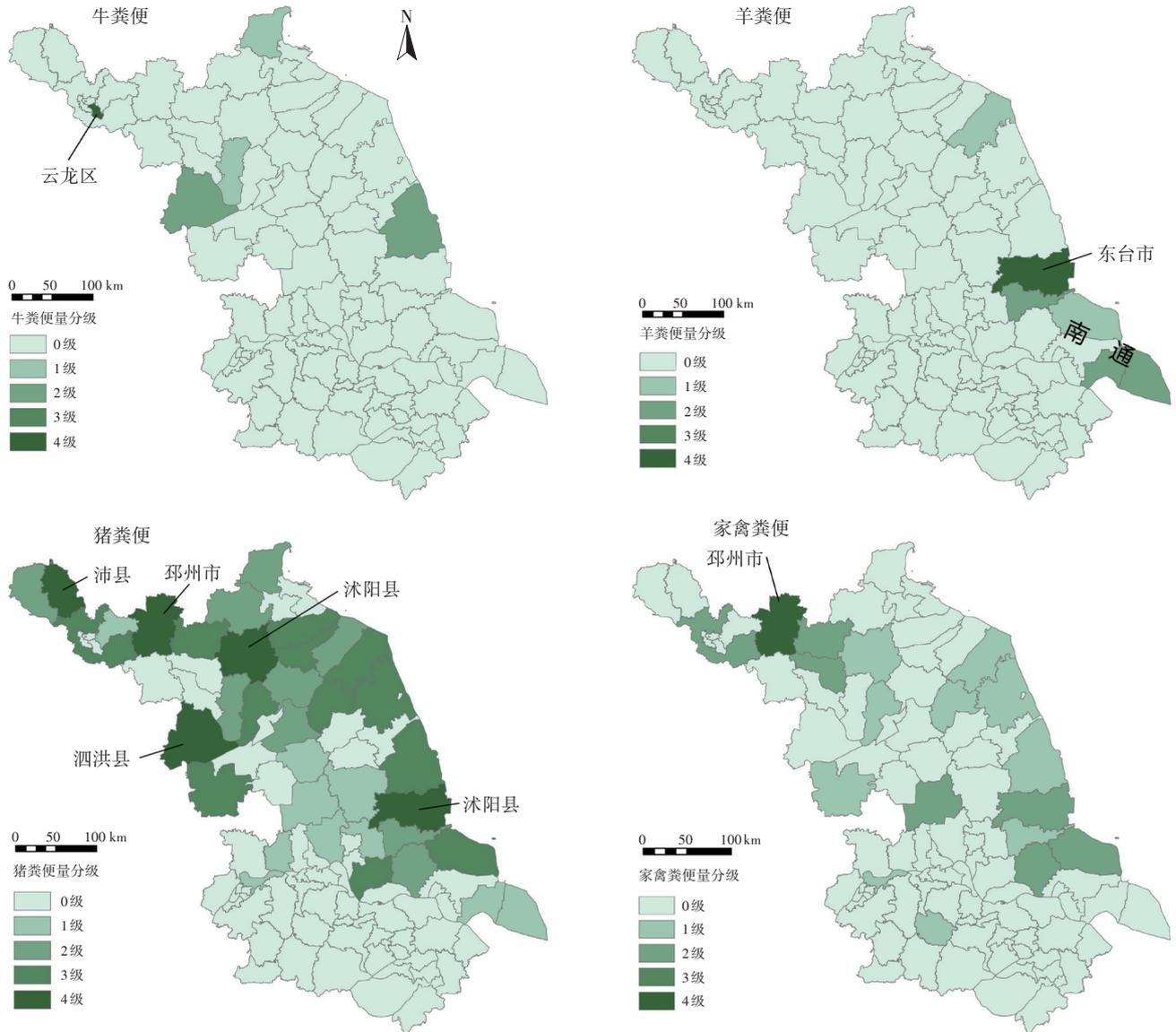


图7 4种畜禽粪便可收集分布
Figure 7 Collectable distribution of four kinds of faeces

3.2.2 热点区县资源化利用方向分析

江苏省在选择农业废弃物的利用方向时应综合考虑各县的资源种类、种养结构、交通可达性以及基础设施等条件。江苏省在99%置信度下的秸秆和畜禽粪便热点县结构组成差异较大,有5个秸秆-畜禽粪便热点县、10个秸秆产生热点县和7个畜禽粪便产生热点县,这些区县是全省秸秆和畜禽粪便回收利用的重点区域。

3.2.2.1 秸秆产生热点县

沭阳县作为秸秆产生热点县,2020年秸秆可收集总量高达131.44万t,以水稻秸秆和小麦秸秆为主。沭阳县可以通过完善收储体系推进全县秸秆综合利

用。被回收的秸秆,一部分运到附近发电厂当作燃料,另一部分会运到牛羊养殖场作为饲草,构建以秸秆还田为主的多元化秸秆综合利用模式^[30-33]。此外沭阳县还可以依托水稻、小麦秸秆优势大力发展农副资源利用循环模式,以农副产品为核心,对食用菌渣、经济林等农副废弃物加工处理,并资源化利用^[23]。

丰县、沛县、淮安区、阜宁县、宝应县的秸秆资源以玉米秸秆和水稻秸秆为主。结合我国优质饲草缺口大的现状,上述区县适合布局较大规模的企业,变秸秆直接还田为过腹还田,降低大型牲畜饲料缺口,提高饲料转化率,降低养殖成本。变废为宝,既解决了牲畜饲草问题,促进畜牧业发展,还可利用家畜排

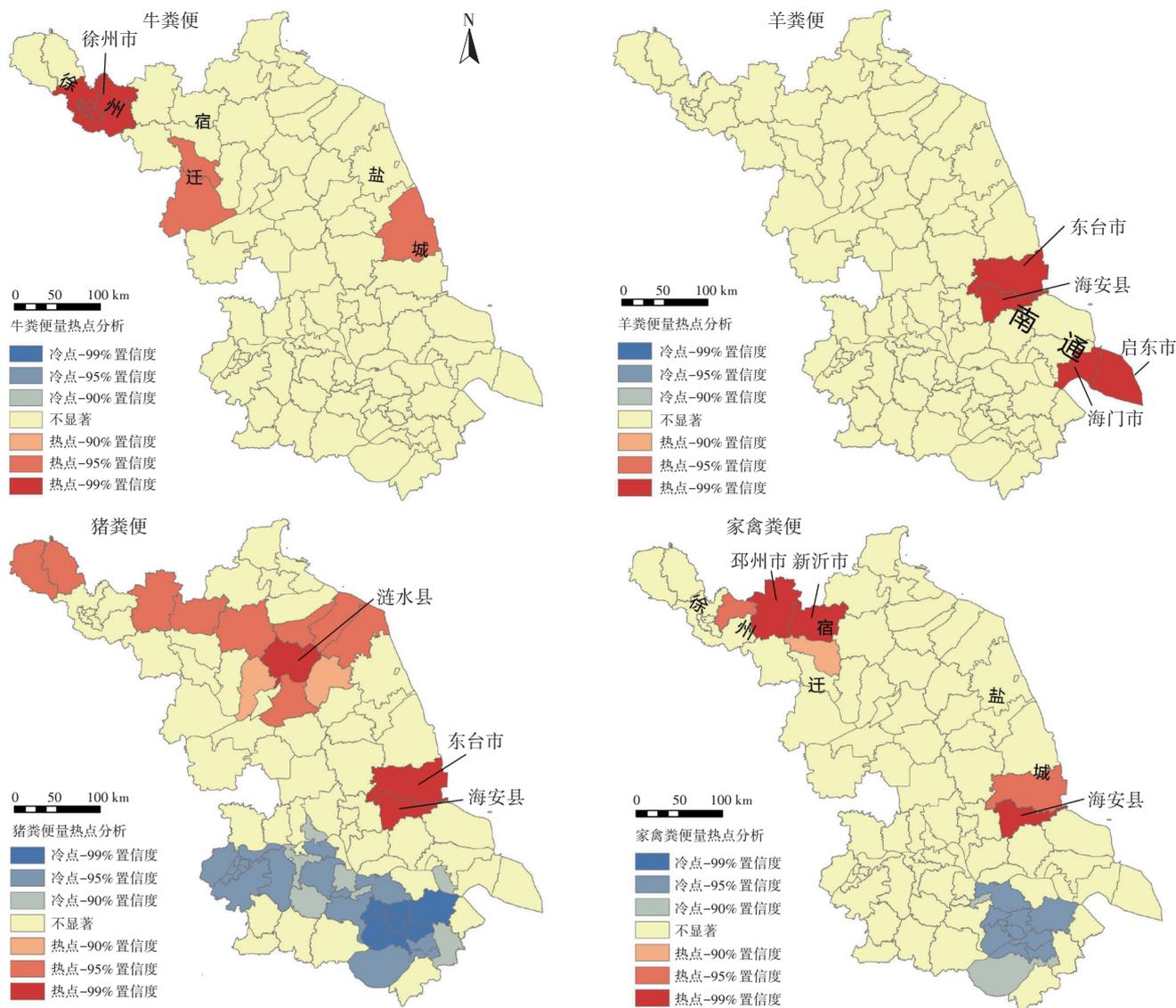


图8 4种畜禽粪便可收集量热点分析

Figure 8 Hotspot analysis of collectable amount of four kinds of livestock and poultry manure

出的粪便进一步进行秸秆堆沤还田^[34-35]。

如东县和通州区为油菜秸秆热点区县,油菜就地还田有利于培肥土壤,减少水稻种植过程中化肥用量,提高稻米的产量和品质^[27],因此可以开展油菜-水稻轮作秸秆还田技术模式。

3.2.2.2 畜禽粪便产生热点县

畜禽粪便产生热点县适于开展以粪污处理为核心的循环利用模式。以新沂市为例,2020年畜禽粪便可收集量为153.42万t,可以采用“畜粪发酵生产沼气、沼液沼渣还田”模式,建设有机废弃物处理中心,进行畜禽粪便无害化处理。

拥有多家大型养殖企业的区县如云龙区、铜山区、东台市,可以发展以大型养殖企业为主体的全产

业链综合处理利用模式。养殖企业饲料需求量大,可以充分收集周边农作物秸秆;粪便排泄量大,可依托大型企业构建以沼气或堆肥技术为主的粪污处理系统,提高处理效率;产业链长,利于实现农业废弃物多级产品的市场化;建立全产业链条,实现农业废弃物的多级循环及高效利用^[34-36]。

针对以中小型农户散养为主的区县,存在粪污结构单一、粪污处理率较低、抗风险程度较差的问题,可以采用以第三方处理中心为主体的专业化运营模式。建立第三方运营的粪污处理中心,配套建设粪污暂存设施及集中收集站,将粪污集中收集与处理。解决畜禽粪污造成的环境问题,减少养殖户粪污处理的成本;同时服务于第三方处理中心的上下游,可更好地

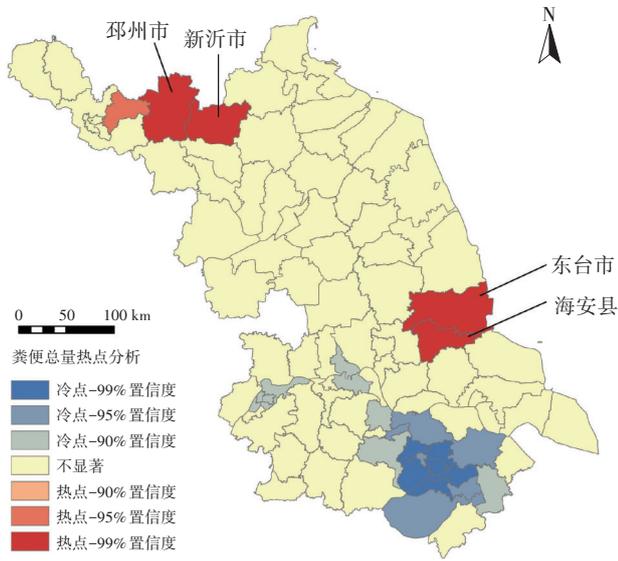


图9 畜禽粪便可收集总量热点分析

Figure 9 Hotspot analysis of total collectable livestock and poultry manure

将养殖和种植联合起来,助力乡村振兴^[37]。

此外,在畜牧业发达、种植业发展相对薄弱的地区,畜禽粪便全部还田可能超出该地区种植业消纳水平,因此可考虑同时采用“畜粪发酵生产沼气、沼液沼渣还田”模式^[34-35],这样不仅可缓解种养失衡问题,还可一定程度解决县域能源供应问题。

3.2.2.3 秸秆-畜禽粪便双热点区县

秸秆-畜禽粪便双热点县有发展种养结合的先天优势,可以打造多层次、多元化利用格局。以涟水县为例,该县可大力发展产业融合,积极筹备以中央畜禽粪污资源化利用集中处理为核心,建立粪污发酵、沼气发电、沼液还田等生态循环项目,将秸秆、粪便变废为宝^[38]。

海门市、启东市、海安县适宜发展以种养结合为核心的循环模式,如“秸秆-青饲-羊”循环模式,区域内种植的油菜等农作物秸秆,由养殖企业集中青贮作为草食牲畜的饲料,也可以将部分秸秆加工作为食用菌栽培基料,菌渣发酵后作为有机肥还田。畜禽粪污作为有机肥还田,减少化肥施用量,提高作物品质与产量^[38-39]。

邳州市秸秆种类以玉米秸秆为主,畜粪来源主要是家禽和牛,玉米秸秆饲料化有较高的营养价值^[26],可提高农作物秸秆利用效率,降低牛饲料缺口,降低养殖成本。另外还可利用家畜排出的粪便进行进一步秸秆堆沤还田,从而形成良性生态循环。

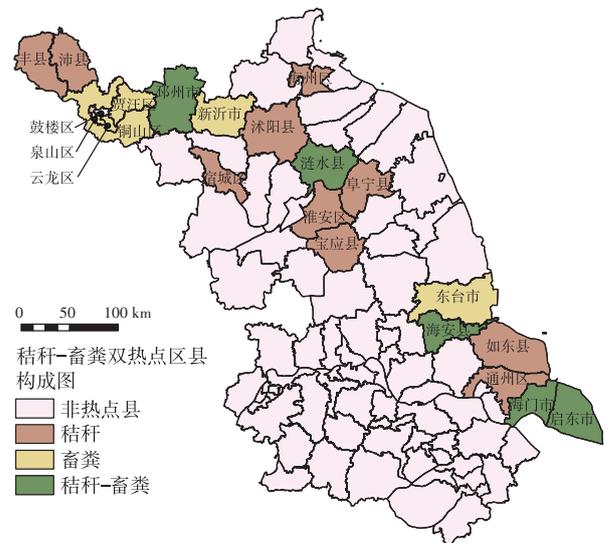
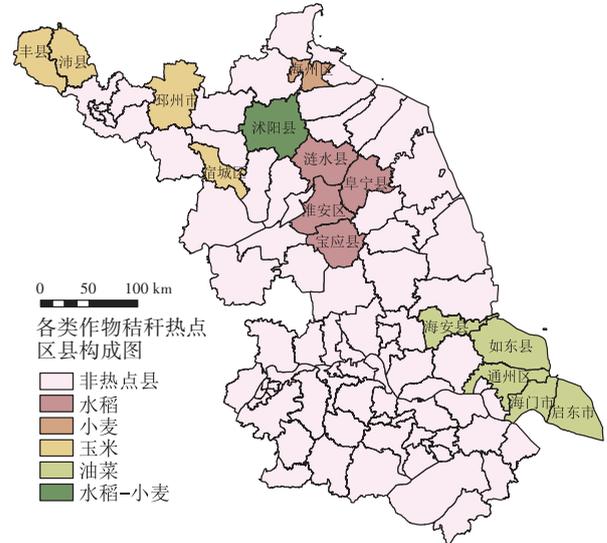
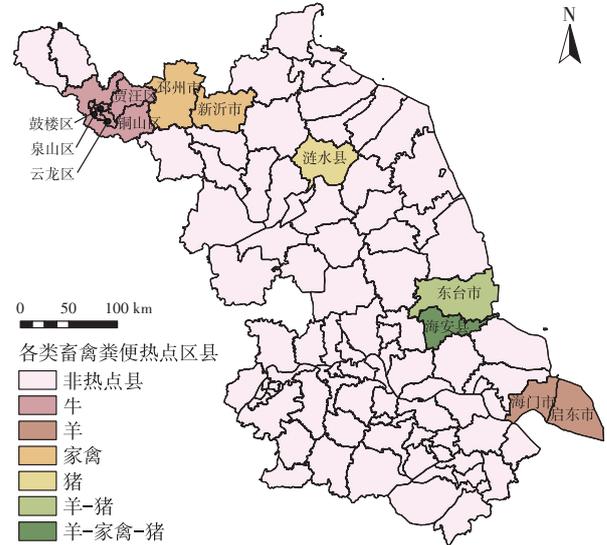


图10 江苏秸秆与畜禽粪便热点区县构成

Figure 10 Composition of hot counties with straw and livestock manure in Jiangsu

3.3 江苏省农业废弃物资源化利用格局优化

3.3.1 分级设置废弃物处理中心

本文结合《江苏省农作物秸秆综合利用规划》《江苏省畜禽养殖废弃物资源化利用工作方案》等现有利用方案,分级优化秸秆与畜禽粪便综合利用格局,助推全省农业废弃物的高效资源化利用。

秸秆和畜禽粪便的分布和聚集区域存在差异。分析秸秆、畜禽粪便热点区县构成图,根据当地废弃物收储运基本建设情况,选取地点建设一级大型处理中心。邳州市、涟水县和海门市作为秸秆-畜粪热点区县,可分别选取区域内的新河镇、大东镇、常乐镇,将原有的废弃物处理中心进行扩建、完善,建设大型秸秆和畜禽粪便综合处理中心;在沛县安国镇、沭阳南湖街道、宝应山阳镇、如东县袁庄镇可以建立作物秸秆收集处理中心;在铜山马坡镇和东台头灶镇建立粪便收集处理中心。考虑到各处理中心的消纳容量与运输成本问题,初定辐射半径为50 km。同时,依托科研机构 and 农业管理部门,研发高效运行的农业废弃物利用技术,并在其他地市设立分支机构,实现农业废弃物资源化利用的技术创新与突破。根据资源分布初步设置一级处理中心,待99%置信度下的秸秆和畜禽粪便热点县基础利用设施成熟,利用效率和质量均达标后,在总结经验教训的基础上依次建设95%和90%置信度下的处理中心,分级完善江苏省秸秆和畜禽粪便的收储运网络^[14]。

3.3.2 收储运体系优化

目前,根据主要参与团体不同,江苏省农业废弃物收储运类型主要分为:经纪人的分散型收储运模式、(商业)合作社的第三方收储运模式、规模化企业的自营型收储运模式^[11,37,40]。受价格波动、农户参与度与回收成本等问题的限制,现有的收储运网络体系无法解决江苏农业废弃物收购难、贮存难、运输难、成本高的难题,亟须进一步优化。

为健全优化农业废弃物收储运体系,政府应扶持建立以政府引导,企业、合作社等社会组织及个人参与市场化运作的农业废弃物收储运体系。各参与主体各司其职,农户的秸秆与畜禽粪便由合作社负责收集,并与农户签订购销协议,有力解决农户收集的秸秆与畜禽粪便无处可卖的难题,提高农户积极性,使收储运网络在源头得到基本保障。此外,商贩利用自身的收购渠道信息优势,对合作社收购秸秆与畜禽粪便给予补充。企业与处理中心只需按协议收购,供应平稳均衡,有利于生产安排。同时,通过良好的合作

和政府的促进,企业和合作社双方也能够更好地协商解决收储运中出现的一些问题,保证收储运体系的正常运行^[40]。另外,政府应加大秸秆收贮及禁烧的宣传教育力度,加强群众对畜禽粪便内涵价值教育,提高农户积极性与主动性^[41]。

4 结论

(1)本研究估算江苏省2020年秸秆(水稻、小麦、玉米、油菜)可收集总量为3 972.00万t,秸秆种类以水稻秸秆和小麦秸秆为主。2020年江苏省畜禽粪便总量为4 560.77万t,家禽粪便最多,羊粪最少。江苏省农业废弃物分布呈现“北丰南贫”的特点。

(2)农业废弃物资源化潜力巨大。2020年江苏省4种主要秸秆全部肥料化理论上可以节约当年全省9.4%的氮肥和5.1%的磷肥投入,基本能满足当年全省钾肥用量;秸秆能源化可替代1 617.52万t标准煤或 6.5×10^9 m³沼气。2020年江苏省畜禽粪便全部肥料化利用可节约当年全省23.7%的氮肥投入,96%的磷肥投入,全部钾肥投入;畜禽粪便能源化利用可折算成1 036.95万t标准煤或 4.9×10^9 m³沼气。

(3)针对秸秆产生热点县和畜禽粪便产生热点县选择循环利用模式时,需因地制宜地考虑各自的实际情况和发展侧重点。同时,探索基于主导产业种养结合的适度规模大小和经营机制,种养结合、就近消纳,形成良性的循环链条。

(4)秸秆和畜禽粪便的分布和聚集区域略有差异,可根据其聚集情况与原有的基础设施情况,先选取秸秆-畜禽粪便综合处理中心,围绕中心布设次一级的收集点,层层递进,分级建设,逐步完善江苏省的秸秆和畜禽粪便收储运网络,实现全省秸秆和畜禽粪便的高效资源化利用。

参考文献:

- [1] 杨春华. 聚焦“三农”重点工作 全面推进乡村振兴:深入学习贯彻2022年中央一号文件[J]. 农业发展与金融, 2022(4):9-12. YANG C H. Focusing on the key work of "agriculture, rural areas and farmers" and comprehensively promoting rural revitalization: in-depth study and implementation of the No.1 central document of 2022[J]. *The Agricultural Development and Finance*, 2022(4):9-12.
- [2] 姚刚. 农业固废污染物分析与资源化利用的研究[J]. 现代农业研究, 2022, 28(5):133-135. YAO G. Research on the pollutant analysis and resource utilization of agricultural solid waste[J]. *Modern Agriculture Research*, 2022, 28(5):133-135.
- [3] 刘一明, 牛宝俊. 新兴县农业废弃物资源化利用模式研究[J]. 农业环境保护, 2001(4):261-263. LIU Y M, NIU B J. Model of utiliza-

- tion of agricultural wastes as resources at Xinxing County, Guangdong [J]. *Agro-environmental Protection*, 2001(4):261-263.
- [4] 贾晓葵. 有机废弃物的农业利用[J]. 农业环境保护, 1991, 10(2): 94-96. JIA X K. Agricultural utilization of organic waste[J]. *Agro-environmental Protection*, 1991, 10(2):94-96.
- [5] 第二次全国污染源普查公报[J]. 环境保护, 2020, 48(18):8-10. The second national pollution source census bulletin[J]. *Environmental Protection*, 2020, 48(18):8-10.
- [6] 李一, 王秋兵. 我国秸秆资源养分还田利用潜力及技术分析[J]. 中国土壤与肥料, 2020(1):119-126. LI Y, WANG Q B. Study on potential of straw resource nutrient return to field and application technology in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(1):119-126.
- [7] 《全国农作物秸秆综合利用情况报告》发布[J]. 中国农技推广, 2022, 38(10):85. The National Report on the Comprehensive Utilization of Crop Straw was released[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2022, 38(10):85.
- [8] 郑微微, 沈贵银, 李冉. 畜禽粪便资源化利用现状、问题及对策:基于江苏省的调研[J]. 现代经济探讨, 2017(2):57-61. ZHENG W W, SHEN G Y, LI R. The current situation, problems and countermeasures of resource utilization of livestock and poultry manure: based on a survey in Jiangsu Province[J]. *Modern Economic Research*, 2017(2):57-61.
- [9] 农业农村部. 农业农村部关于贯彻实施《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》的意见[J]. 畜牧产业, 2021(10):29-31. Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Opinions of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on the Implementation of the Law of the People's Republic of China on the Prevention and Control of Environmental Pollution by Solid Waste[J]. *Animal Agriculture*, 2021(10):29-31.
- [10] 李洁. 江苏推进“无废城市”建设的方向和重点举措[J]. 江南论坛, 2022(4):8-12. LI J. The direction and key measures for promoting the construction of "Waste free Cities" in Jiangsu Province[J]. *Jiangnan Forum*, 2022(4):8-12.
- [11] 平英华. 江苏农作物秸秆收储运体系研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(5):326-330. PING Y H. Research on crop straw storage and transportation system in Jiangsu[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35(5):326-330.
- [12] 朱建春, 李荣华, 杨香云, 等. 近30年来中国农作物秸秆资源量的时空分布[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(4):139-145. ZHU J C, LI R H, YANG X Y, et al. Spatial and temporal distribution of crop straw resources in 30 years in China[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(4):139-145.
- [13] 姜灵伟, 陈锐, 崔建华, 等. 河套灌区农业废弃物资源量估算及综合利用分析[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2022, 34(1):21-26. JIANG L W, CHEN R, CUI J H, et al. Estimation and comprehensive utilization analysis of agricultural waste resources in Hetao Irrigation district[J]. *Agricultural Science and Engineering in China*, 2022, 34(1):21-26.
- [14] 王越, 李兰, 祝福虹. 四川省秸秆和畜禽粪便县域分布特征和资源化利用潜力[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2):455-467. WANG Y, LI L, KUANG F H. County distribution characteristics and resource utilization potential of straw and livestock manure in Sichuan Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(2):455-467.
- [15] 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 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.
- [16] 谢光辉, 包维卿, 刘继军, 等. 中国畜禽粪便资源研究现状述评[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(4):75-87. XIE G H, BAO W Q, LIU J J, et al. An overview of researches on livestock and poultry excreta resource in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(4):75-87.
- [17] 易秀, 叶凌枫, 刘意竹, 等. 陕西省畜禽粪便负荷量估算及环境承受程度风险评价[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3):205-210. YI X, YE L F, LIU Y Z, et al. Estimations of livestock manure load and risk assessment of environmental tolerance in Shaanxi Province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(3):205-210.
- [18] 刘忠, 段增强. 中国主要农区畜禽粪尿资源分布及其环境负荷[J]. 资源科学, 2010, 32(5):946-950. LIU Z, DUAN Z Q. Distribution of manure resources and environmental loads of agro-ecological regions in China[J]. *Resources Science*, 2010, 32(5):946-950.
- [19] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国畜禽粪尿中养分资源数量及利用潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5):1131-1148. SONG D L, HOU S P, WANG X B, et al. Nutrient resource quantity of animal manure and its utilization potential in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5):1131-1148.
- [20] 石元春. 中国生物质原料资源[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2):16-23. SHI Y C. China's resources of biomass feedstock[J]. *Strategic Study of CAE*, 2011, 13(2):16-23.
- [21] 曾锐. 成都市种养废弃物资源量调查及利用途径研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2013. ZENG R. Investigation on planting and breeding wastes amount and its utilization ways in Chengdu City[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013.
- [22] 高祥照, 马文奇, 马常宝, 等. 中国作物秸秆资源利用现状分析[J]. 华中农业大学学报, 2002(3):242-247. GAO X Z, MA W Q, MA C B, et al. Analysis on the current status of utilization of crop straw in China[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2002(3):242-247.
- [23] 霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 等. 中国农作物秸秆综合利用潜力研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13):218-224. HUO L L, ZHAO L X, MENG H B, et al. Study on comprehensive utilization potential of crop straw in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(13):218-224.
- [24] 王军霞, 徐菲, 刘瑞民, 等. 我国畜禽养殖总量空间热点分析及主要污染物核算[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7):1316-1322. WANG J X, XU F, LI R M, et al. Hotspot analysis and estimation of the main pollutants from livestock in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7):1316-1322.

- [25] 唐惠燕,包平.基于GIS江苏水稻种植面积与产量的空间重心变迁研究[J].南京农业大学学报(社会科学版),2014,14(1):118-124. TANG H Y, BAO P. Space gravity changes of Jiangsu rice acreage and yield based on GIS[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2014, 14(1):118-124.
- [26] 冯晓辉.玉米秸秆综合利用技术推广[J].世界热带农业信息,2023(5):25-27. FENG X H. Popularization of comprehensive utilization technology of corn straw[J]. *World Tropical Agriculture Information*, 2023(5):25-27.
- [27] 石子建,徐建祥,李韵,等.油菜秸秆还田和化肥配施对水稻产量、养分吸收及土壤肥力的影响[J].江苏农业科学,2022,50(22):100-106. SHI Z J, XU J X, LI Y, et al. Effects of rapeseed straw and chemical fertilizer on rice yield, nutrient uptake and soil fertility [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(22):100-106.
- [28] 朱云芬,李蓉,向极轩,等.羊粪资源化利用的研究进展[J].湖北农业科学,2021,60(11):12-15. ZHU Y F, LI R, XIANG J Q, et al. Research advances in resources utilization of sheep manure[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021, 60(11):12-15.
- [29] 周冰颖,雷海霞,先旭东.牛粪在肥料及改良基质中的资源化应用[J].农机市场,2022(12):48-50. ZHOU B Y, LEI H X, XIAN X D. Resource utilization of cow manure in fertilizers and improved substrates[J]. *Agricultural Machinery Market*, 2022(12):48-50.
- [30] 陈熙,张徐彬,朱旺,等.我国水稻秸秆利用现状和饲用加工技术研究进展[J].中国稻米,2023,29(2):24-27. CHEN X, ZHANG X B, ZHU W, et al. Utilization status of rice straw and research progress of feed processing technology in China[J]. *China Rice*, 2023, 29(2):24-27.
- [31] 唐海龙,徐玉新,蒋高明,等.化肥减施及秸秆过腹还田对土壤理化性质的影响:以弘毅生态农场为例[C]//中国环境科学学会.2011中国环境科学学会学术年会论文集(第二卷).中国环境科学出版社,2011:625-630. TANG H L, XU Y X, JIANG G M, et al. The effect of reducing fertilizer application and returning straw to the field after overfeeding on soil physical and chemical properties: taking Hongyi ecological farm as an example[C]//Chinese Society For Environmental Sciences. Proceedings of the 2011 Academic Annual Meeting of the Chinese Society of Environmental Sciences (Volume 2). China Environmental Science Press, 2011:625-630.
- [32] 陆刚.农作物秸秆饲料化的利用技术[J].浙江畜牧兽医,2022,47(5):26-27. LU G. Utilization technology of crop straw feed[J]. *Zhejiang Journal Animal Science and Veterinary*, 2022, 47(5):26-27.
- [33] 薛颖昊,王亚静,尹建锋,等.我国农作物秸秆利用生态补偿制度探索与实践[J/OL].中国农业资源与区划:1-7[2023-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20230303.1402.012.html>. XUE Y H, WANG Y J, YIN J F, et al. Research and practice in ecological compensation of crop straw utilization in China[J/OL]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*: 1-7[2023-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20230303.1402.012.html>.
- [34] 樊丽霞,杨智明,尹芳,等.畜禽粪便利用现状及发展建议[J].现代农业科技,2019,735(1):175-176. FAN L X, YANG Z M, YIN F, et al. Utilization status and development suggestion of livestock manure[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019, 735(1):175-176.
- [35] 许德甲.农村畜禽粪便的有效处理和利用[J].畜禽业,2018,29(5):54. XU D J. Effective treatment and utilization of livestock and poultry manure in rural areas[J]. *Livestock and Poultry Industry*, 2018, 29(5):54.
- [36] KOLEVA R, STANKULOV T, BOUKOURESHTLIEVA R, et al. Alternative biological process for livestock manure utilization and energy production using microbial fuel cells[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2022, 169(3):1-7.
- [37] 刘秋琳.畜禽粪污收储运网络模型及试点研究[D].北京:清华大学,2017. LIU Q L. Research on the collection-storage-transport network model for livestock manure and its demonstration[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [38] 王生兰.农作物秸秆及畜禽粪便资源化利用技术与推广[J].特种经济动植物,2023,26(2):180-182. WANG S L. Technology and promotion of resource utilization of crop straw and livestock manure [J]. *Special Economic Animals and Plants*, 2023, 26(2):180-182.
- [39] 郑盛华,陈尚洪,陈红琳,等.川东丘陵区生态循环农业发展路径研究:以四川省蓬溪县种养废弃物资源化利用模式为例[J].中国农学通报,2022,38(18):95-99. ZHENG S H, CHEN S H, CHEN H L, et al. The development path of ecological circular agriculture in eastern sichuan hilly areas: a case of the resource utilization model of farming and breeding waste in Pengxi County of Sichuan Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(18):95-99.
- [40] 金筱杰,瞿伟,陈静文,等.江苏农作物秸秆资源高效利用收储运系统的运营模式·存在问题及发展对策[J].安徽农业科学,2014,42(8):2487-2489. JIN X J, QU W, CHEN J W, et al. The operating model, existing problems and development strategies for straw storage and transportation system in Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(8):2487-2489.
- [41] 岳顺利.农户秸秆资源化利用意愿及影响因素研究:以河南省鲁山县为例[J].农村经济与科技,2022,33(22):11-13. YUE S L. A study on farmers' willingness to utilize straw resources and its influencing factors: taking Lushan County, Henan Province as an example [J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2022, 33(22):11-13.