



芜湖市秸秆资源利用与还田养分输入量空间差异特征分析

童童, 王翠婷, 常珺枫, 武升, 吴支行, 马友华

引用本文:

童童,王翠婷,常珺枫,武升,吴支行,马友华. 芜湖市秸秆资源利用与还田养分输入量空间差异特征分析[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1452–1461.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0724>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同形态氮素对玉米秸秆腐解与养分释放的影响

石琳, 金梦灿, 单旭东, 高敏, 陈曦, 郜红建

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 277–285 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0086>

黄淮海地区蔬菜废弃物污染风险及资源化潜力分析

徐子云, 李永强, 李洁, 王哲, 贾森

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 904–913 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0638>

有机物料还田和减施氮肥对麦-玉周年农田碳氮水足迹及经济效益的影响

李春喜, 刘晴, 邵云, 李斯斯, 李晓波, 翁正鹏

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 527–536 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0150>

山西省种养废弃物构成及资源化利用潜力研究

杜艳玲, 周怀平, 程曼, 解文艳, 杨振兴, 郭晋, 吕倩倩, 王志伟

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 329–336 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0161>

秸秆还田与氮肥管理对稻田杂草群落和水稻产量的影响

陈浩, 张秀英, 吴玉红, 李厚华, 郝兴顺, 王艳龙, 王薇, 张春辉

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 500–507 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0074>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

童童, 王翠婷, 常珺枫, 等. 芜湖市秸秆资源利用与还田养分输入量空间差异特征分析[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1452-1461.

TONG T, WANG C T, CHANG J F, et al. Utilization of straw resources and spatial difference characteristics of nutrient inputs from returning straw in Wuhu City[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(6): 1452-1461.

芜湖市秸秆资源利用与还田养分输入量空间差异特征分析

童童¹, 王翠婷¹, 常珺枫¹, 武升¹, 吴支行², 马友华^{1*}

(1. 安徽农业大学资源与环境学院/农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 合肥 230036; 2. 芜湖市农业农村局, 安徽 芜湖 241000)

摘要:了解研究区域秸秆资源现状和秸秆还田养分输入量及其空间分布特征, 能够为协调秸秆养分资源有效利用、促进农业化肥减量增效提供决策依据。本研究以芜湖市2019年主要秸秆(玉米、水稻、小麦、棉花和油菜)为研究对象, 通过作物种植面积和秸秆养分含量测算出单位面积秸秆全量还田下氮、磷、钾养分输入量及其加权变异系数, 明确芜湖市秸秆还田养分输入量的空间分布及差异特征。结果表明: 芜湖市主要秸秆氮、磷、钾养分资源总量分别为12 223、1 747、23 404 t, 各县(市、区)养分资源总量的分布表现为无为市>南陵县>鸠江区>湾沚区>繁昌区>弋江区>镜湖区; 芜湖市单位种植面积秸秆可收集量为5.63 t·hm⁻², 其中玉米最高, 达到了13.71 t·hm⁻²; 芜湖市玉米单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量分别为126.16、20.57、161.81 kg·hm⁻²; 芜湖市单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量的加权变异系数为0.137 5, 为中等程度变异, 其中鸠江区和南陵县与其他县(市、区)的空间差异较大, 空间分布差异最大的秸秆为玉米秸秆, 其加权变异系数显著高于其他作物秸秆。

关键词: 秸秆; 芜湖市; 秸秆还田; 养分输入; 空间分布; 加权变异系数

中图分类号: S141.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2023)06-1452-10

doi: 10.13254/j.jare.2022.0724

Utilization of straw resources and spatial difference characteristics of nutrient inputs from returning straw in Wuhu City

TONG Tong¹, WANG Cuiting¹, CHANG Junfeng¹, WU Sheng¹, WU Zhihang², MA Youhua^{1*}

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Farmland Ecology Conservation and Pollution Prevention and Control, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Wuhu Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Wuhu 241000, China)

Abstract: Under the current situation of comprehensive utilization of straw resources in Wuhu City, the nutrient inputs and their spatial distribution characteristics under straw returning can provide a decision-making basis for coordinating the effective utilization of straw nutrient resources and promoting the reduction and efficiency of agricultural chemical fertilizers. The main straws (maize, rice, wheat, cotton, and rape straw) in Wuhu City in 2019 were chosen as the research objects. According to the crop planting area and nutrient content of straw, the inputs of nitrogen, phosphorus, and potassium nutrients and their weighted coefficients of variation under straw returning per unit area, and the spatial difference characteristics and specific embodiment of nutrient inputs under straw returning in Wuhu City were determined. The results showed that the contents of N, P, and K were 12 223, 1 747 t, and 23 404 t, respectively, for the main straws in Wuhu City. Furthermore, the total amount of straw nutrient resources of counties were as follows: Wuwei>Nanling>Jiujiang>Wanzhi>Fanchang>Yijiang>Jinghu. The straw resources per unit planting area of crops in Wuhu City were 5.63 t·hm⁻², of which maize reached the highest 13.71 t·hm⁻². The inputs of N, P, and K of maize straw returning per unit planting area in Wuhu were 126.16, 20.57 kg·hm⁻², and

收稿日期: 2022-10-14 录用日期: 2022-11-21

作者简介: 童童(1999—), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 研究方向为农业资源与环境。E-mail: 2418099025@qq.com

*通信作者: 马友华 E-mail: yhma@ahau.edu.cn

基金项目: 长江生态环境保护修复联合研究项目(2019-LHYJ-01-0208-15)

Project supported: Joint Research Project on Ecological Environment Protection and Restoration of the Yangtze River(2019-LHYJ-01-0208-15)

161.81 kg·hm⁻², respectively. The weighted coefficient of variation of the inputs of N, P, and K of straw returning per unit planting area of the main straws in Wuhu City were 0.137 5, which indicated moderate variation. The spatial difference was great in Jiujiang and Nanling. The spatial difference of maize straw was the largest, and its weighted coefficient of variation was significantly higher than that of other crop straws in Wuhu City.

Keywords: straw; Wuhu City; straw returning; nutrient input; spatial distribution; weighted coefficient of variation

作物秸秆是农业生产中重要的产物,其富含大量的氮、磷、钾养分资源^[1],我国秸秆资源丰富、种类多样,作物秸秆资源主要来源于稻谷、小麦、玉米、棉花和油菜等农作物。国内外大量的研究表明,秸秆还田有利于改善土壤理化性质^[2]、高效利用农田养分^[3-4]和提高耕地质量^[5-7]。高利伟等^[8]采用秸秆草谷比法测算出我国秸秆养分资源量在空间上的分布。刘晓永等^[9]估算了我国秸秆资源量,并利用秸秆直接还田率和燃烧还田率测算出我国各地区秸秆直接还田与燃烧还田的养分还田量。柴如山等^[10]探讨了安徽省秸秆理论可收集量的空间分布特征,并测算了秸秆全量还田情景下氮、磷、钾养分的输入量。徐少奇等^[11]基于我国主要作物养分需求量,测算出包括秸秆在内的有机废弃物养分利用潜力。李一等^[12]基于我国氮、磷、钾肥施用折纯量,估算出我国各地区理论秸秆养分可替代化肥率。柴如山等^[13-15]和刘淑军等^[16]基于秸秆还田当季养分释放率,测算出我国主要秸秆还田替代化肥潜力。大多学者对秸秆资源的研究是基于我国统计年鉴中的农作物产量数据^[17-19],通过草谷比系数、秸秆养分含量、秸秆还田养分当季释放率和秸秆收集系数等参数,估算不同尺度下秸秆资源量及其养分资源量的时空分布。秸秆可收集量是指秸秆总量减去作物根茬与秸秆收集时的损失量后实际能够收集到的秸秆的量,少有研究直接获取到秸秆可收集量^[20],由于实际生产情况的差异,不同秸秆的可收集系数不同,仅用单一可收集系数^[10]难以精准计算秸秆可收集量,同时也无法了解到区域内单位面积秸秆资源及其养分资源的空间差异。本研究基于芜湖市2019年秸秆资源可收集量及作物种植面积,测算出芜湖市各县(市、区)单位种植面积秸秆可收集量,秆秸氮、磷、钾养分资源总量,以及单位种植面积秸秆全量还田情景下氮、磷、钾养分输入量,并引入加权变异系数概念,分析芜湖市单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾养分输入量的空间差异,并探讨其空间差异,以期了解芜湖市秸秆资源养分空间分布特征。研究结果为农田养分精准管理及再利用、化肥减量替代和农业种植结构调整提供科学参考,对全面提

高秸秆资源综合利用有重要的现实意义,该研究方法也能够为我国农业资源在时空分布上的研究提供参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

芜湖市地处我国华东地区,位于安徽省东南部,是长江下游平原的组成部分,属亚热带湿润季风气候。芜湖市东部和北部为冲积平原,间有洼地和少数丘陵,地势低平,西南高东北低。芜湖市位于青弋江、裕溪河与长江汇合处,流经芜湖市的河流以长江芜湖段为主干构成了一个较为完整的水系。截至2021年,芜湖市下辖5个区(湾沚区、繁昌区、鸠江区、弋江区、镜湖区)、1个县(南陵县),代管1个县级市(无为市)。

1.2 计算方法

为掌握芜湖市各县(市、区)秸秆资源收集量和秸秆还田养分输入量的区域特征,计算出各县(市、区)不同作物的单位种植面积秸秆可收集量、秸秆养分资源总量,以及单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾养分输入量,并且考虑到各秸秆作物种植面积的影响,利用加权变异系数来探讨单位种植面积秸秆还田养分输入量的空间差异。

单位种植面积秸秆可收集量(A_s)由已收集的芜湖市2019年秸秆可收集量(W_s)和种植面积(A)之比得出,计算公式如下:

$$A_s = \frac{W_s}{A} \quad (1)$$

式中: A_s 为单位种植面积秸秆可收集量,t·hm⁻²; W_s 为秸秆可收集量,t; A 为秸秆作物种植面积,hm²。

秸秆养分资源量(W_{SN})为秸秆可收集量(W_s)和秸秆养分含量(S_N)的乘积,计算公式如下:

$$W_{SN} = W_s \times S_N \quad (2)$$

式中: W_{SN} 为秸秆养分资源量,t; S_N 为秸秆养分含量,%。

秸秆作物单位种植面积秸秆还田养分输入量(A_{SN})为单位种植面积秸秆可收集量(A_s)和秸秆养分含量(S_N)的乘积,计算公式如下:

$$A_{SN} = A_s \times S_N \times 1\ 000 \quad (3)$$

式中： A_{SN} 为秸秆作物单位种植面积秸秆还田养分输入量， $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；1 000为单位t与kg的换算系数。

加权变异系数(CV_A)为单位种植面积秸秆可收集量的加权标准差与加权平均值(\bar{X})之比,计算公式如下:

$$CV_A = \frac{1}{\bar{X}} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \times \frac{P_i}{P}} \quad (4)$$

式中： CV_A 为加权变异系数； \bar{X} 为芜湖市单位种植面积秸秆可收集量(A_s)的加权平均值， $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ； n 为芜湖市县(市、区)个数； X_i 为*i*县(市、区)单位种植面积秸秆可收集量， hm^2 ； P_i 为*i*县(市、区)的秸秆作物种植面积， hm^2 ； P 为芜湖市秸秆作物种植面积， hm^2 。

1.3 数据来源

本研究中芜湖市2019年秸秆作物种植面积、秸秆可收集量和秸秆综合利用结构数据均来自芜湖市农业农村局(<http://nync.wuhu.gov.cn>)。不同作物秸秆氮、磷、钾养分含量参考《中国有机肥料养分志》^[21](表1)。

2 结果与分析

2.1 芜湖市秸秆作物种植面积与秸秆可收集量

本研究中秸秆作物是指农产品收获后,其秸秆能够有效收集并利用的农作物。芜湖市秸秆作物种植

面积在空间上以无为市为主,在秸秆作物类型上以水稻为主(表2)。芜湖市秸秆作物总种植面积为248 423 hm^2 ,其中无为市为101 176 hm^2 ,占全市的40.73%;南陵县秸秆作物种植面积为55 533 hm^2 ,占全市的22.35%;其余5个区(湾沚区、繁昌区、鸠江区、弋江区、镜湖区)秸秆作物种植面积共计91 713 hm^2 ,共占全市的36.92%。芜湖市秸秆作物中水稻种植面积为161 617 hm^2 ,占芜湖市秸秆作物总种植面积的65.06%;小麦、油菜、棉花和玉米的种植面积分别为42 754、20 074、9 528 hm^2 和8 831 hm^2 ,分别占芜湖秸秆作物总种植面积的17.21%、8.08%、3.84%和3.55%。

芜湖市秸秆可收集量与秸秆作物种植面积相关性较高,秸秆可收集量同样在空间上以无为市为主,在秸秆类型上以水稻秸秆为主(表3)。芜湖市秸秆可收集总量共计139.89万t,其中无为市57.54万t,占全市的41.13%;南陵县26.78万t,占全市的19.14%;其余5个区(湾沚区、繁昌区、鸠江区、弋江区、镜湖区)秸秆可收集量总计55.57万t,占全市的39.73%。芜湖市水稻秸秆可收集量为94.93万t,占芜湖市秸秆可收集总量的67.86%;其次为小麦、玉米、油菜和棉花秸秆,分别为18.87万、12.11万、8.40万t和4.13万t,分别占芜湖市秸秆可收集总量的13.49%、8.66%、6.00%和2.95%。

2.2 芜湖市秸秆利用结构

芜湖市2019年秸秆利用总量为125.54万t,全市秸秆利用率为89.74%,各县(市、区)秸秆利用率较为接近,为89.07%~90.27%(表4)。芜湖市秸秆利用方式以机械化还田为主,占秸秆可收集量的54.31%;其次是能源化和饲料化,分别占24.44%和7.49%。芜湖市弋江区和镜湖区秸秆利用方式全部为机械化还田,机械化还田率分别为89.07%和90.27%,并且镜湖区

表1 芜湖市主要秸秆氮、磷、钾含量(%)

Table 1 Nitrogen, phosphorus and potassium content of main straws in Wuhu City(%)

作物 Crop	氮 Nitrogen	磷 Phosphorus	钾 Potassium
玉米 Corn	0.92	0.15	1.18
水稻 Rice	0.91	0.13	1.89
小麦 Wheat	0.65	0.08	1.05
棉花 Cotton	1.24	0.15	1.02
油菜 Rape	0.87	0.14	1.94

表2 芜湖市各县(市、区)秸秆作物种植面积(hm^2)

Table 2 Straw crops planting area in each county of Wuhu City(hm^2)

县(市、区) County	玉米 Maize	水稻 Rice	小麦 Wheat	其他谷物 Other cereals	棉花 Cotton	油菜 Rape	花生 Peanut	豆类 Beans	薯类 Potato	总计 Total
无为市 Wuwei	3 050	57 380	19 580		9 055	8 978	490	823	1 820	101 176
南陵县 Nanling	960	49 333	1 183	980	47	1 200	270	523	1 040	55 533
湾沚区 Wanzhi	421	17 597	5 351		6	3 465		133		26 973
繁昌区 Fanchang	67	11 560	2 373		420	1 413		220		15 307
鸠江区 Jiujiang	4 333	13 200	10 200			2 000				29 733
弋江区 Yijiang		9 747	2 800			2 551				15 100
镜湖区 Jinghu		2 800	1 267			467				4 600
总计 Total	8 831	161 617	42 754	980	9 528	20 074	760	1 700	2 860	248 423

表3 芜湖市各县(市、区)秸秆可收集量(万t)

Table 3 Collectable straw resources in each county of Wuhu City(10⁴t)

县(市、区) County	玉米 Maize	水稻 Rice	小麦 Wheat	其他谷物 Other cereals	棉花 Cotton	油菜 Rape	花生 Peanut	豆类 Beans	薯类 Potato	总计 Total
无为市 Wuwei	2.22	38.37	8.52		3.86	4.02	0.20	0.22	0.13	57.54
南陵县 Nanling	0.76	24.32	0.39	0.16	0.03	0.48	0.07	0.07	0.50	26.78
湾沚区 Wanzhi	0.88	10.83	2.93		0.01	1.42		0.04		16.10
繁昌區 Fanchang	0.06	5.75	0.85		0.23	0.54		0.06		7.49
鳩江区 Jiujiang	8.20	8.70	4.40			0.70				22.00
弋江区 Yijiang		5.16	1.19			1.06				7.41
鏡湖区 Jinghu		1.80	0.59			0.18				2.57
总计 Total	12.11	94.93	18.87	0.16	4.13	8.40	0.27	0.40	0.63	139.89

表4 芜湖市各县(市、区)秸秆利用结构(%)

Table 4 Utilization structure of crop straw in each county of Wuhu City(%)

县(市、区) County	机械化还田 Mechanized field return	商品有机肥 Commercial organic fertilizer	基料化 Stroma	能源化 Energy and fuel	饲料化 Fodder	原料化 Feed stock	总计 Total
无为市 Wuwei	52.38	1.09	0.43	27.55	8.34		89.80
南陵县 Nanling	46.19	6.50	1.31	25.80	9.63		89.43
湾沚区 Wanzhi	54.84	0.81	1.24	24.84	8.39		90.12
繁昌區 Fanchang	54.86	0.80	3.34	27.77	2.00	1.20	89.97
鳩江区 Jiujiang	52.73	2.95	2.50	24.32	7.27		89.77
弋江区 Yijiang	89.07						89.07
鏡湖区 Jinghu	90.27						90.27
全市 Whole city	54.31	2.29	1.14	24.44	7.49	0.06	89.74

的还田率达到了全市最高;秸秆商品有机肥和饲料化利用率最高的是南陵县,分别为6.50%和9.63%;秸秆基料化和能源化利用率最高的是繁昌區,分别为3.34%和27.77%;开展秸秆原料化利用的地区只有繁昌區,且利用率仅1.20%。

芜湖市当地企业秸秆利用量为42.50万t,占芜湖市秸秆利用总量的33.85%,若不考虑芜湖市秸秆机械化还田利用量,芜湖市当地企业秸秆利用量占全市秸秆利用总量的85.74%(图1),说明芜湖市当地企业在秸秆资源多元化利用中占主导地位。芜湖市当地企业秸秆利用方式主要为能源化,秸秆能源化利用量为29.95万t,占当地企业秸秆利用量的70.46%;其次是饲料化、肥料化和基料化,分别占21.19%、6.32%和2.03%。若不考虑芜湖市秸秆机械化还田利用量,当地企业秸秆利用量在全市秸秆利用量中占比最高的秸秆利用方式为能源化,占比为87.60%,其次分别是饲料化、肥料化和基料化,占比分别为85.88%、83.80%和53.75%。

2.3 芜湖市主要秸秆作物单位面积秸秆可收集量

芜湖市2019年主要秸秆作物为玉米、水稻、小麦、

棉花和油菜,其他秸秆作物(其他谷类、花生、豆类、薯类)种植面积较小,水稻、小麦、玉米、棉花和油菜的种植面积之和占芜湖市秸秆作物种植面积的97.46%,其秸秆可收集量之和占芜湖市秸秆可收集总量的98.96%,因此本研究以芜湖市玉米、水稻、小麦、棉花和油菜5种秸秆作物为研究对象,测算芜湖市单位种植面积秸秆可收集量,并由此推算出单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量及其加权变异系数。

芜湖市2019年主要秸秆作物单位种植面积秸秆可收集量在各县(市、区)的分布如表5所示,2019年全市主要秸秆作物单位种植面积秸秆可收集量为5.63 t·hm⁻²。芜湖市各县(市、区)单位种植面积秸秆可收集量为4.82~7.40 t·hm⁻²,其中鳩江区最高,为7.40 t·hm⁻²,明显高于其他县(市、区)。芜湖市单位种植面积秸秆可收集量最高的秸秆作物为玉米,达到了13.71 t·hm⁻²,明显高于芜湖市其他秸秆作物,其中湾沚区和鳩江区玉米的单位种植面积秸秆可收集量高于其他县(市、区),分别达到了20.90 t·hm⁻²和18.92 t·hm⁻²。芜湖市水稻单位种植面积秸秆可收集量为5.87 t·hm⁻²,各县(市、区)水稻单位种植面积秸

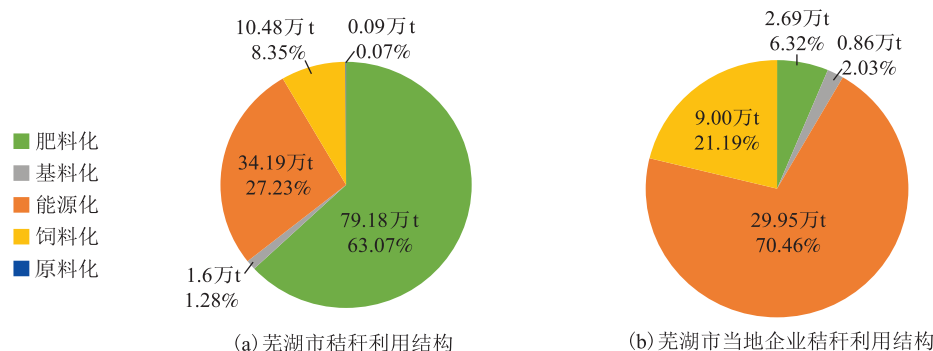


图1 芜湖市秸秆利用结构与当地企业秸秆利用结构(利用量及占比)

Figure 1 Straw utilization structure of Wuhu City and local enterprises (amount and proportion)

表5 芜湖市各县(市、区)单位种植面积秸秆可收集量($t \cdot hm^{-2}$)

Table 5 Collectable straw resources per unit of planting area in each county of Wuhu City ($t \cdot hm^{-2}$)

县(市、区) County	县平均 County average	玉米 Maize	水稻 Rice	小麦 Wheat	棉花 Cotton	油菜 Rape
无为市 Wuwei	5.69	7.28	6.69	4.35	4.26	4.48
南陵县 Nanling	4.82	7.92	4.93	3.30	6.38	4.00
湾沚区 Wanzhi	5.97	20.90	6.15	5.48	16.67	4.10
繁昌區 Fanchang	4.89	8.96	4.97	3.58	5.48	3.82
鸠江区 Jiujiang	7.40	18.92	6.59	4.31	0	3.50
弋江区 Yijiang	4.91	0	5.29	4.25	0	4.16
镜湖区 Jinghu	5.59	0	6.43	4.66	0	3.85
全市 Whole city	5.63	13.71	5.87	4.41	4.33	4.18

秆可收集量为 $4.93 \sim 6.69 t \cdot hm^{-2}$,其中无为市最高,为 $6.69 t \cdot hm^{-2}$ 。芜湖市的小麦、棉花和油菜单位种植面积秸秆可收集量较为接近,分别为 4.41 、 $4.33 t \cdot hm^{-2}$ 和 $4.18 t \cdot hm^{-2}$,各县(市、区)小麦、棉花和油菜的单位种植面积秸秆可收集量分别为 $3.30 \sim 5.48$ 、 $4.26 \sim 16.67 t \cdot hm^{-2}$ 和 $3.50 \sim 4.48 t \cdot hm^{-2}$,其中油菜单位种植面积秸秆可收集量最高的是无为市,为 $4.48 t \cdot hm^{-2}$,小麦和棉花单位种植面积秸秆可收集量最高的为湾沚区,分别为 $5.48 t \cdot hm^{-2}$ 和 $16.67 t \cdot hm^{-2}$,并且湾沚区的棉花单位种植面积秸秆可收集量明显高于其他县(市、区)。

2.4 芜湖市主要秸秆还田氮、磷、钾养分输入量

2.4.1 芜湖市主要秸秆氮、磷、钾养分资源总量分布

芜湖市主要秸秆氮、磷、钾资源总量分别为12 223、1 747、23 404 t(表6~表8),空间分布具有明显的区域特征,主要秸秆氮、磷、钾资源总量表现为无为市>南陵县>鸠江区>湾沚区>繁昌區>弋江区>镜湖区。芜湖市无为市主要秸秆氮、磷、钾养分资源总量分别为5 079、714、9 583 t,高于其他县(市、区)的218~2 354、

表6 芜湖市各县(市、区)主要秸秆氮素资源总量(t)

Table 6 Nitrogen resources of main straws in each county of Wuhu City (t)

县(市、区) County	玉米 Maize	水稻 Rice	小麦 Wheat	棉花 Cotton	油菜 Rape
无为市 Wuwei	204	3 492	554	479	350
南陵县 Nanling	70	2 213	25	4	42
湾沚区 Wanzhi	81	986	190	1	124
繁昌區 Fanchang	6	523	55	29	47
鸠江区 Jiujiang	754	792	286	0	61
弋江区 Yijiang	0	470	77	0	92
镜湖区 Jinghu	0	164	38	0	16
全市 Whole city	1 114	8 639	1 227	512	731

表7 芜湖市各县(市、区)主要秸秆磷素资源总量(t)

Table 7 Phosphorus resources of main straws in each county of Wuhu City (t)

县(市、区) County	玉米 Maize	水稻 Rice	小麦 Wheat	棉花 Cotton	油菜 Rape
无为市 Wuwei	33	499	68	58	56
南陵县 Nanling	11	316	3	0	7
湾沚区 Wanzhi	13	141	23	0	20
繁昌區 Fanchang	1	75	7	3	8
鸠江区 Jiujiang	123	113	35	0	10
弋江区 Yijiang	0	67	10	0	15
镜湖区 Jinghu	0	23	5	0	3
全市 Whole city	182	1 234	151	62	118

31~338、437~4 823 t。芜湖市主要秸秆氮、磷、钾资源总量均以水稻秸秆为主,分别占资源总量的70.68%、70.64%和76.66%。芜湖市除玉米秸秆外的其他主要秸秆(水稻、小麦、棉花和油菜)氮、磷、钾资源量都主要分布在无为市,而玉米秸秆氮、磷、钾资源量主要分布在鸠江区,分别占全市的67.68%、

表8 芜湖市各县(市、区)主要秸秆钾素资源总量(t)

Table 8 Potassium resources of main straws in each county of Wuhu City(t)

县(市、区) County	玉米 Maize	水稻 Rice	小麦 Wheat	棉花 Cotton	油菜 Rape
无为市 Wuwei	262	7 252	895	394	780
南陵县 Nanling	90	4 596	41	3	93
湾沚区 Wanzhi	104	2 047	308	1	275
繁昌區 Fanchang	7	1 087	89	23	105
鳩江区 Jiujiang	968	1 644	462	0	136
弋江区 Yijiang	0	975	125	0	206
鏡湖区 Jinghu	0	340	62	0	35
全市 Whole city	1 430	17 942	1 981	421	1 630

67.58%和67.69%。

2.4.2 芜湖市玉米单位面积秸秆还田氮、磷、钾输入量

在可收集秸秆就地全量还田的情景下,通过芜湖市单位种植面积秸秆可收集量计算出单位种植面积秸秆还田养分输入量,芜湖市及各县(市、区)主要秸秆单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量见表9~表11。

芜湖市2019年玉米单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量分别为126.16、20.57、161.81 kg·hm⁻²,且玉米单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量高于其他秸秆作物。芜湖市2019年弋江区和鏡湖区未种植玉米,其他县(市、区)玉米单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量分别为66.96~192.30、10.92~31.35、85.89~246.65 kg·hm⁻²。芜湖市湾沚区和鳩江区玉米单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量高于其他县(市、区),其中湾沚区分别为192.30、31.35、246.65 kg·hm⁻²,鳩江区分别为174.11、28.39、223.31 kg·hm⁻²。

表9 芜湖市各县(市、区)单位种植面积秸秆还田氮素输入量(kg·hm⁻²)

Table 9 Nitrogen input of straw returning per unit of planting area in each county of Wuhu City(kg·hm⁻²)

县(市、区) County	玉米 Maize	水稻 Rice	小麦 Wheat	棉花 Cotton	油菜 Rape
无为市 Wuwei	66.96	60.85	28.28	52.86	38.96
南陵县 Nanling	72.83	44.86	21.43	79.15	34.80
湾沚区 Wanzhi	192.30	56.01	35.59	206.67	35.65
繁昌區 Fanchang	82.39	45.26	23.28	67.90	33.25
鳩江区 Jiujiang	174.11	59.98	28.04	0	30.45
弋江区 Yijiang	0	48.17	27.63	0	36.15
鏡湖区 Jinghu	0	58.50	30.27	0	33.53
全市 Whole city	126.16	53.45	28.69	53.75	36.41

表10 芜湖市各县(市、区)单位种植面积秸秆还田磷素输入量(kg·hm⁻²)

Table 10 Phosphorus input of straw returning per unit of planting area in each county of Wuhu City(kg·hm⁻²)

县(市、区) County	玉米 Maize	水稻 Rice	小麦 Wheat	棉花 Cotton	油菜 Rape
无为市 Wuwei	10.92	8.69	3.48	6.39	6.27
南陵县 Nanling	11.88	6.41	2.64	9.57	5.60
湾沚区 Wanzhi	31.35	8.00	4.38	25.00	5.74
繁昌區 Fanchang	13.43	6.47	2.87	8.21	5.35
鳩江区 Jiujiang	28.39	8.57	3.45	0	4.90
弋江区 Yijiang	0	6.88	3.40	0	5.82
鏡湖区 Jinghu	0	8.36	3.73	0	5.40
全市 Whole city	20.57	7.64	3.53	6.50	5.86

表11 芜湖市各县(市、区)单位种植面积秸秆还田钾素输入量(kg·hm⁻²)

Table 11 Potassium input of straw returning per unit of planting area in each county of Wuhu City(kg·hm⁻²)

县(市、区) County	玉米 Maize	水稻 Rice	小麦 Wheat	棉花 Cotton	油菜 Rape
无为市 Wuwei	85.89	126.38	45.69	43.48	86.87
南陵县 Nanling	93.42	93.17	34.62	65.11	77.60
湾沚区 Wanzhi	246.65	116.32	57.49	170.00	79.50
繁昌區 Fanchang	105.67	94.01	37.61	55.86	74.14
鳩江区 Jiujiang	223.31	124.57	45.29	0	67.90
弋江区 Yijiang	0	100.06	44.63	0	80.61
鏡湖区 Jinghu	0	121.50	48.90	0	74.78
全市 Whole city	161.81	111.01	46.34	44.21	81.18

2.4.3 芜湖市水稻单位面积秸秆还田氮、磷、钾输入量

芜湖市2019年水稻单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量分别为53.45、7.64、111.01 kg·hm⁻²,芜湖市水稻单位种植面积秸秆还田钾输入量高于小麦、棉花和油菜。芜湖市各县(市、区)水稻单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量分别为44.86~60.85、6.41~8.69、93.17~126.38 kg·hm⁻²,最高的是无为市,分别为60.85、8.69、126.38 kg·hm⁻²。

2.4.4 芜湖市小麦单位面积秸秆还田氮、磷、钾输入量

芜湖市2019年小麦单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量分别为28.69、3.53、46.34 kg·hm⁻²,小麦单位种植面积秸秆还田磷输入量低于其他秸秆作物。芜湖市各县(市、区)小麦单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量分别为21.43~35.59、2.64~4.38、34.62~57.49 kg·hm⁻²,其中湾沚区高于其他县(市、区),分别为35.59、4.38、57.49 kg·hm⁻²。

2.4.5 芜湖市棉花单位面积秸秆还田氮、磷、钾输入量

芜湖市2019年棉花单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量分别为53.75、6.50、44.21 kg·hm⁻²,棉花单位种植面积秸秆还田钾输入量低于其他秸秆。芜湖市2019年鸠江区、弋江区和镜湖区未种植棉花,其他县(市、区)棉花单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量分别为52.86~206.67、6.39~25.00、43.48~170.00 kg·hm⁻²,且湾沚区高于其他县(市、区),分别为206.67、25.00、170.00 kg·hm⁻²。

2.4.6 芜湖市油菜单位面积秸秆还田氮、磷、钾输入量

芜湖市2019年油菜单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量分别为36.41、5.86、81.18 kg·hm⁻²。芜湖市各县(市、区)油菜单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量分别为30.45~38.96、4.90~6.27、67.90~86.87 kg·hm⁻²,最高的为无为市,分别为38.96、6.27、86.87 kg·hm⁻²。

2.5 芜湖市主要秸秆作物单位面积秸秆可收集量加权变异系数

由于单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量是单位种植面积秸秆可收集量分别乘以秸秆氮、磷、钾含量计算得出,因此两者间的加权变异系数一致,本研究以芜湖市单位种植面积秸秆可收集量的加权变异系数来探讨芜湖市单位种植面积秸秆还田养分输入量的空间差异程度。

参考变异系数划分标准^[22],芜湖市秸秆作物单位种植面积秸秆可收集量的加权变异系数为0.137 5(表12),为中等程度变异(0.1~0.9),各秸秆作物的加权变异系数从大到小依次为玉米>水稻>小麦>棉花>油菜,其中玉米、水稻和小麦为中等程度变异,棉花和油菜为低等程度变异,并且玉米秸秆的加权变异系数明显高于其他秸秆作物,说明玉米秸秆空间分布差异最大。各县(市、区)加权标准差的平方反映该县(市、

区)与全市之间的差异大小,该值越大,说明该县(市、区)与全市水平相差越大。其中鸠江区与南陵县加权标准差的平方显著高于其他县(市、区),表明鸠江区和南陵县与其他县(市、区)之间差异较大,主要是由于鸠江区单位种植面积秸秆可收集量明显高于其他县(市、区),南陵县单位种植面积秸秆可收集量最低的同时,其秸秆作物种植面积较大。芜湖市玉米单位种植面积秸秆可收集量的加权变异系数为0.424 7,明显高于其他主要秸秆作物,其中鸠江区加权标准差的平方最高,主要是由于鸠江区玉米种植面积全市最高,同时玉米单位种植面积秸秆可收集量明显高于全市平均水平;芜湖市水稻单位种植面积秸秆可收集量的加权变异系数为0.136 3,其中无为市和南陵县加权标准差的平方显著高于其他县(市、区),主要是由于无为市和南陵县的水稻种植面积明显高于其他县(市、区),同时无为市水稻单位种植面积秸秆可收集量为全市最高,但南陵县水稻单位种植面积秸秆可收集量为全市最低;芜湖市小麦和棉花单位种植面积秸秆可收集量的加权变异系数分别为0.106 7和0.097 6,其中湾沚区加权标准差的平方均最高,主要是由于湾沚区小麦和棉花单位种植面积秸秆可收集量明显高于全市平均水平;芜湖市油菜单位种植面积秸秆可收集量的加权变异系数为0.075 7,各县(市、区)之间油菜单位种植面积秸秆可收集量空间差异较小。

3 讨论

3.1 芜湖市秸秆资源利用结构

随着我国农业的迅速发展,作物秸秆资源量及其养分资源量持续增加^[17],如何有效利用秸秆资源,全面提高秸秆综合利用率,促进秸秆资源多元化发展成为我国农业日益关注的问题。安徽省作为农业大省,

表12 芜湖市单位种植面积秸秆可收集量的加权变异系数

Table 12 Weighted coefficient of variation of the collectable straw resources per unit planting area in Wuhu City

项目 Item	县(市、区) County	秸秆作物 Straw crop	玉米 Maize	水稻 Rice	小麦 Wheat	棉花 Cotton	油菜 Rape
加权标准差的平方	无为市 Wuwei	0.001 3	14.298 9	0.234 8	0.001 8	0.004 9	0.038 4
	南陵县 Nanling	0.146 2	3.652 4	0.272 0	0.034 5	0.020 7	0.002 0
	湾沚区 Wan zhi	0.012 4	2.464 2	0.008 6	0.141 2	0.095 8	0.001 3
	繁昌区 Fanchang	0.033 6	0.171 7	0.057 9	0.038 4	0.057 4	0.009 3
	鸠江区 Jiujiang	0.374 1	13.326 0	0.042 0	0.002 4	<0.000 1	0.046 7
	弋江区 Yijiang	0.031 8	<0.000 1	0.020 3	0.001 8	<0.000 1	0.000 1
	镜湖区 Jinghu	<0.000 1	<0.000 1	0.005 3	0.001 8	<0.000 1	0.002 5
	全市 Whole city	0.599 5	33.913 2	0.640 9	0.221 7	0.178 8	0.100 3
加权变异系数(CV _s)		0.137 5	0.424 7	0.136 3	0.106 7	0.097 6	0.075 7

其秸秆综合利用水平位于全国前列,芜湖市为安徽省第二大城市,从芜湖市统计年鉴中获取2018—2020年主要秸秆作物的产量和种植面积,了解到2018—2020年芜湖市的种植结构和单位面积产量整体变化较小,说明采用的2019年的数据能够在一定程度上反映芜湖市秸秆资源空间特征。考虑到可获取数据的整体性,本研究以芜湖市2019年数据为基础,分析其秸秆资源现状与秸秆还田单位种植面积氮、磷、钾养分输入量的空间差异特征。

本研究中芜湖市2019年秸秆综合利用率达到了89.74%,但在秸秆利用方式上较为单一,主要利用方式为机械化还田和能源化利用,其中秸秆机械化还田量占全市秸秆利用量的54.31%,而秸秆基料化和原料化占比较低。因此,规范芜湖市秸秆机械化还田技术显得尤为重要,可以通过加强水分管理^[23]、及时补充氮肥^[24-25]、施用秸秆快腐剂^[26]等手段减少秸秆还田的危害,全面提高秸秆机械化还田水平。考虑到芜湖市以种植水稻为主,结合本研究结果,在水稻秸秆全量还田下芜湖市可减少下茬作物钾肥施用量 $30\sim 40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,减少氮肥追施量 $20\sim 30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,且可在芜湖市中部和南部地区适当减少化肥替代量,而在其他地区适当增加。在稻麦轮作下,小麦秸秆还田可减少水稻钾肥施用量 $15\sim 25\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,减少氮肥追施量 $10\sim 15\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,且可在芜湖市南部地区适当减少化肥替代量,而在东部地区适当增加。在稻油轮作下,油菜秸秆还田可减少水稻钾肥施用量 $25\sim 35\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,减少氮肥追施量 $15\sim 20\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,芜湖市西部地区可适当增加化肥替代量,而在北部地区适当减少。

若不计算秸秆机械化还田量,芜湖市当地企业秸秆利用量占全市秸秆利用量的85.74%,表明芜湖市当地秸秆企业极大地影响了芜湖市除秸秆机械化还田外的秸秆综合利用。在芜湖市未来秸秆产业化发展中,应当促进当地秸秆利用企业发展,进一步提高当地企业秸秆利用量,并加大秸秆基料化和原料化的技术研发,鼓励秸秆资源多元化利用,全面提高秸秆综合利用率。

3.2 芜湖市主要秸秆资源空间分布特征

秸秆是农业生产中收获子实后的非食用性农作物副产品,作物单位面积产量和秸秆可收集率很大程度上影响了单位面积秸秆可收集量。安徽省秸秆作物以水稻和小麦为主^[27],而芜湖市则以水稻为主,其他秸秆作物较少。芜湖市水稻秸秆可收集量为94.93万t,占全市秸秆可收集量的67.86%,主要分布在水

稻种植面积较高的无为市和南陵县。无为市水稻单位种植面积秸秆可收集量为全市最高,达到 $6.69\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,从秸秆特性上分析,秸秆可收集量主要受秸秆作物种植面积和秸秆可收集率影响。结合芜湖市2019年统计年鉴资料中水稻产量,并与本研究数据对比得到,无为市单位面积水稻产量显著高于其他县(市、区),这可能是无为市单位面积秸秆可收集量较高的原因。而南陵县水稻单位种植面积秸秆可收集量全市最低,为 $4.93\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,可能是由于南陵县水稻单位面积产量和秸秆可收集率较低。从地形地貌上分析,无为市位于长江下游北端,地势平坦,而南陵县地处皖南山区与沿江平原的过渡地带,地形复杂多样,中西部以低山丘陵为主,致使其农业机械作业覆盖率较低,从而导致南陵县单位面积秸秆可收集量较低。芜湖市小麦、棉花和油菜秸秆可收集量主要分布在无为市,玉米秸秆主要分布在鸠江区,这可能都与其对应的种植面积较大有关。

3.3 芜湖市主要秸秆还田养分输入量的空间差异特征

本研究通过加权变异系数来探讨芜湖市主要秸秆作物单位种植面积养分资源输入量的空间差异程度。加权变异系数多用于衡量区域发展不平衡程度,许多学者通过加权变异系数研究经济差异的时空特征及其影响因素^[28-31],少有研究使用加权变异系数来研究农业资源的时空特征。在经济差异的研究中,加权变异系数的研究对象是人均GDP,与本研究中的单位种植面积秸秆可收集量概念类似,同时由于秸秆作物单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾养分输入量是由单位种植面积秸秆可收集量乘以秸秆氮、磷、钾养分含量得出,因此两者间的加权变异系数一致。综上所述,本研究基于单位种植面积秸秆可收集量的加权变异系数探讨芜湖市主要秸秆作物单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量的空间差异程度。研究结果表明,芜湖市单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾养分输入量在空间上差异较小,空间差异主要体现在鸠江区和南陵县,作物差异以玉米为主。重点研究空间差异较大的县(市、区),对指导整体秸秆资源利用具有重要的现实意义。同时,了解不同作物的差异程度能够为调整种植结构与完善作物种植生产水平提供理论基础。

4 结论

(1)芜湖市秸秆氮、磷、钾资源总量分别为12 223、1 747、23 404 t,主要分布在无为市(氮41.56%、磷

40.87%、钾 40.95%)，秸秆种类以水稻秸秆为主(氮 70.68%、磷 70.64%、钾 76.66%)。

(2)芜湖市单位种植面积秸秆可收集量为 5.63 t·hm⁻²。从县(市、区)来看,鸠江区最高,为 7.40 t·hm⁻²;从秸秆种类上看,玉米最高,为 13.71 t·hm⁻²。

(3)芜湖市玉米秸秆全量还田下单位种植面积氮、磷、钾输入量分别为 126.16、20.57、161.81 kg·hm⁻²,显著高于其他作物秸秆,其次为水稻秸秆,分别为 53.45、7.64、111.01 kg·hm⁻²。

(4)芜湖市秸秆作物单位种植面积秸秆还田氮、磷、钾输入量的加权变异系数为 0.137 5,为中等变异,其中玉米的加权变异系数(0.424 7)显著高于其他秸秆作物,鸠江区和南陵县与其他县(市、区)之间空间差异较大。

参考文献:

- [1] 杜为研,唐杉,汪洪.我国有机肥资源及产业发展现状[J].中国土壤与肥料,2020(3):210-219. DU W Y, TANG S, WANG H. The status of organic fertilizer industry and organic fertilizer resources in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(3):210-219.
- [2] WANG J H, WANG X J, XU M G, et al. Crop yield and soil organic matter after long-term straw return to soil in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 102(3):371-381.
- [3] 徐悦,陈翔,王擎运,等.小麦玉米秸秆长期还田对砂姜黑土磷库组成的影响[J].农业环境科学学报,2022,41(8):1768-1777. XU Y, CHEN X, WANG Q Y, et al. Effects of long-term wheat and maize straw incorporation on phosphorus fractions in lime concretion black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(8):1768-1777.
- [4] 朱远芄,史燕捷,管浩,等.小麦秸秆还田条件下钾肥减量对水稻产量及养分利用的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(11):2596-2605. ZHU Y P, SHI Y J, GUAN H, et al. Influence of potassium fertilizer reduction on rice yield and potassium utilization efficiency under wheat straw incorporation condition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(11):2596-2605.
- [5] ROLDAN A, CARAVACA F, HERNANDEZ M T, et al. No-tillage, crop residue additions, and legume cover cropping effects on soil quality characteristics under maize in Patzcuaro watershed (Mexico)[J]. *Soil & Tillage Research*, 2003, 72(1):65-73.
- [6] BECANSAN P, IMAZ M J, VIRTO I, et al. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 87(1):19-27.
- [7] SASAL M C, ANDRIULO A E, TABOADA M A. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 87(1):9-18.
- [8] 高利伟,马林,张卫峰,等.中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J].农业工程学报,2009,25(7):173-179. GAO L W, MA L, ZHANG W F, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7):173-179.
- [9] 刘晓永,李书田.中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征[J].农业工程学报,2017,33(21):1-19. LIU X Y, LI S T. Temporal and spatial distribution characteristics of crop straw nutrient resources and returning to farmland in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21):1-19.
- [10] 柴如山,程启鹏,陈翔,等.安徽省县域麦稻玉米秸秆时空分异特征与还田养分输入量测算[J].农业工程学报,2021,37(20):234-247. CHAI R S, CHENG Q P, CHEN X, et al. Spatio-temporal variations of wheat, rice and maize straw in major grain-producing counties of Anhui Province and utilization potential of straw nutrient returning to field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(20):234-247.
- [11] 徐少奇,陈文杰,解林奇,等.我国有机废弃物资源总量及养分利用潜力[J].植物营养与肥料学报,2022,28(8):1341-1352. XU S Q, CHEN W J, XIE L Q, et al. Organic waste resources and nutrient utilization potential in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(8):1341-1352.
- [12] 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.
- [13] 柴如山,王擎运,叶新新,等.我国主要粮食作物秸秆还田替代化学氮肥潜力[J].农业环境科学学报,2019,38(11):2583-2593. CHAI R S, WANG Q Y, YE X X, et al. Nitrogen resource quantity of main grain crop straw in China and the potential of synthetic nitrogen substitution under straw returning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11):2583-2593.
- [14] 柴如山,安之冬,马超,等.我国主要粮食作物秸秆钾养分资源量及还田替代钾肥潜力[J].植物营养与肥料学报,2020,26(2):201-211. CHAI R S, AN Z D, MA C, et al. Potassium resource quantity of main grain crop straw and potential for straw incorporation to substitute potassium fertilizer in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(2):201-211.
- [15] 柴如山,黄晶,罗来超,等.我国水稻秸秆磷分布及其还田对土壤磷输入的贡献[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(6):1095-1104. CHAI R S, HUANG J, LUO L C, et al. Distribution of rice straw phosphorus resources in China and its utilization potential under straw return[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(6):1095-1104.
- [16] 刘淑军,李冬初,黄晶,等.1988—2018年中国水稻秸秆资源时空分布特征及还田替代化肥潜力[J].农业工程学报,2021,37(11):151-161. LIU S J, LI D C, HUANG J, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of rice stalk resources and its potential of synthetic fertilizers substitution returning to farmland in China from 1988 to 2018[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(11):151-161.
- [17] 程文龙,韩上,李敏,等.主要农作物秸秆养分资源现状及其肥料替代潜力分析:以安徽省为例[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(11):1789-1798. CHENG W L, HAN S, LI M, et al. Cur-

- rent situation of the main crop straw nutrient resources and the substitute potential of crop straw for chemical fertilizer: a case study of Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(11): 1789-1798.
- [18] 黄巧义, 于俊红, 黄建凤, 等. 广东省主要农作物秸秆养分资源量及替代化肥潜力[J]. 生态环境学报, 2022, 31(2): 297-306. HUANG Q Y, YU J H, HUANG J F, et al. Nutrient resources of main crop straw and its potential of substituting for chemical fertilizer in Guangdong Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(2): 297-306.
- [19] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 1-21. SONG D L, HOU S P, WANG X B, et al. Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 1-21.
- [20] JOHNSON J M F, ALLMARAS R R, REICOSKY D C. Estimating source carbon from crop residue, roots and rhizodeposits using the national grain-yield database[J]. *Agronomy*, 2006, 98(3): 622-636.
- [21] 全国农业技术推广中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 53-81. National Agricultural Technology Extension and Service Centre. Records of nutrients in organic fertilizer in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 53-81.
- [22] ZHANG X Y, SUI Y Y, ZHANG X D, et al. Spatial variability of nutrient properties in black soil of the northeast China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17: 19-29.
- [23] 张宇杰, 王志强, 马鹏, 等. 麦秆还田下水氮耦合对水稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(4): 388-398. ZHANG Y J, WANG Z Q, MA P, et al. Effects of water-nitrogen coupling on nitrogen uptake, utilization and yield of rice under wheat straw returning[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36(4): 388-398.
- [24] 谢杰, 邵敬森, 苏宁, 等. 日本农作物秸秆综合利用经验借鉴[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(9): 116-125. XIE J, SHAO J M, SUN N, et al. Lessons from Japan's comprehensive utilization[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(9): 116-125.
- [25] 刘月月, 郑浣彤, 程兆伟, 等. 秸秆还田与氮肥运筹对东北粳稻产量及稻米品质的影响[J]. 中国稻米, 2021, 27(6): 20-27. LIU Y Y, ZHENG H T, CHENG Z W, et al. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management on the yield and quality of northeast Japonica rice[J]. *China Rice*, 2021, 27(6): 20-27.
- [26] 韩丽君, 谢昊, 薛张逸, 等. 秸秆快腐剂对水稻产量和土壤理化特性的影响[J]. 中国稻米, 2022, 28(3): 20-25. HAN L J, XIE H, XUE Z Y, et al. Effects of straw fast-rot agent on rice yield and soil physical and chemical properties[J]. *China Rice*, 2022, 28(3): 20-25.
- [27] 柴如山, 徐悦, 程启鹏, 等. 安徽省主要作物秸秆养分资源量及还田利用潜力[J]. 中国农业科学, 2021, 54(1): 95-109. CHAI R S, XU Y, CHENG Q P, et al. Nutrient resource quantity of main crop straw and utilization potential under straw returning in Anhui Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(1): 95-109.
- [28] 徐生霞, 刘强, 陆小莉. 中国区域发展不平衡的四维模式分解及影响因素研究: 基于门限回归模型的测度[J]. 经济问题探索, 2019(4): 13-26. XU S X, LIU Q, LU X L. Research on the four-dimensional model decomposition of China's regional development imbalance and its influencing factors: measure based threshold regression model[J]. *Inquiry into Economic Issues*, 2019(4): 13-26.
- [29] 管卫华, 林振山, 顾朝林. 中国区域经济发展差异及其原因的多尺度分析[J]. 经济研究, 2006(7): 117-125. GUAN W H, LIN Z S, GU C L. Multi-scale analysis on China's regional economical diversity and reasons[J]. *Economic Research Journal*, 2006(7): 117-125.
- [30] 覃成林, 张华, 张技辉. 中国区域发展不平衡的新趋势及成因: 基于人口加权变异系数的测度及其空间和产业二重分解[J]. 中国工业经济, 2011(10): 37-45. QIN C L, ZHANG H, ZHANG J H. New trend and causes of regional development disparity in China: measurement based on population weighted coefficient and spatial industrial decomposition[J]. *China Industrial Economics*, 2011(10): 37-45.
- [31] 赵宏波, 马延吉. 老工业基地区域经济发展差异时空演变及驱动机制研究: 以吉林省中部地区为例[J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(2): 187-197. ZHAO H B, MA Y J. Spatial-temporal evolution and driving mechanisms of regional economic disparities of old industrial base in northeast China: a case study of the central Jilin Province[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 31(2): 187-197.