

吉林省主要作物秸秆养分资源量及其还田替代化肥潜力

刘 慧¹, 王雪怡^{1†}, 姜海洋¹, 杨丽娟^{1,2}, 刘玉凤^{1,2}, 张国显^{1,2*}

(1 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁沈阳 110866; 2 设施园艺教育部重点实验室, 辽宁沈阳 110866)

摘要:【目的】吉林省是全国第四大粮食主产区, 秸秆资源丰富, 估算吉林省主要作物秸秆养分资源量及其全量还田替代化肥潜力, 为全省秸秆资源高效利用、化肥减施增效、耕地质量提升以及绿色低碳农业提供科学参考。【方法】基于统计年鉴数据和文献资料, 利用草谷比法量化吉林省各市玉米、水稻、大豆和花生 4 种作物秸秆资源量, 估算秸秆氮磷钾养分资源量, 并对其替代化肥潜力和经济效益进行评估。【结果】2019—2023 年, 全省玉米、水稻、大豆和花生秸秆年平均资源量分别为 3225.68 万 t、585.08 万 t、70.36 万 t 和 103.89 万 t, 长春市、松原市、四平市、吉林市和白城市秸秆资源量较高, 分别占全省作物秸秆总量的 32.15%、19.30%、14.98%、10.69% 和 10.07%。全省主要作物秸秆氮 (N)、磷 (P_2O_5) 和钾 (K_2O) 理论资源量分别为 35.79 万 t、12.21 万 t 和 57.41 万 t, 玉米、水稻、大豆和花生作物养分资源量 ($N+P_2O_5+K_2O$) 分别占全省的 77.12%、17.54%、2.20% 和 3.14%。全省主要作物秸秆全量还田的 N、 P_2O_5 和 K_2O 当季有效资源量为 18.76 万 t、8.78 万 t 和 48.66 万 t, 玉米、水稻、大豆和花生 4 种作物秸秆全量还田的当季有效养分资源量 ($N+P_2O_5+K_2O$) 分别占全省的 77.37%、17.82%、1.97% 和 2.84%。按单位播种面积计, 水稻秸秆还田的 N、 P_2O_5 、 K_2O 养分替代潜力分别为 27.32、12.56 和 122.06 kg/hm², 玉米分别为 33.47、16.12、80.55 kg/hm², 大豆分别为 20.58、5.15、25.97 kg/hm²; 花生分别为 22.01、8.69、36.56 kg/hm²。基于最佳施肥量计算, 水稻秸秆全量还田对 N、 P_2O_5 和 K_2O 的平均替代比例分别为 15.16%、18.50% 和 11.06%, 玉米分别为 15.66%、19.42% 和 78.13%, 大豆分别为 27.26%、6.96% 和 43.35%, 花生分别为 17.66%、9.17% 和 30.85%。主要作物秸秆全量还田可节约氮肥投入 7.91 亿元、磷肥投入 6.22 亿元和钾肥投入 33.09 亿元, 全省合计可节约化肥投入 47.22 亿元。【结论】吉林省秸秆资源量丰富, 主要作物秸秆资源量为 3985.01 万 t, 其中玉米和水稻的秸秆资源量分别占 80.95% 和 14.68%。主要作物秸秆全量还田可释放的氮 (N)、磷 (P_2O_5) 和钾 (K_2O) 有效资源量分别为 18.76 万 t、8.78 万 t 和 48.66 万 t, 可替代约 65% 的化学钾肥投入及 13%~15% 的化学氮肥和磷肥投入, 节约化肥投入 47.22 亿元。在统筹秸秆还田利用时, 应考虑区域和作物种类差异, 以实现秸秆资源的高效利用和化肥减施增效, 从而获得显著的经济效益。

关键词: 作物秸秆; 养分资源量; 秸秆还田; 化肥替代; 吉林省

Nutrient resource quantities in major crop straws and their potential for replacing chemical fertilizers through complete return to soil in Jilin Province

LIU Hui¹, WANG Xue-yi^{1†}, JIANG Hai-yang¹, YANG Li-juan^{1,2}, LIU Yu-feng^{1,2}, ZHANG Guo-xian^{1,2*}

(1 College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866, China; 2 Key Laboratory of Protected Horticulture, Ministry of Education, Shenyang, Liaoning 110866, China)

Abstract: 【Objectives】As the fourth-largest grain-producing province in China, Jilin Province possesses abundant straw resources. Estimating the nutrient resource quantities of major crop straws and their utilization potential under straw return in Jilin Province can provide reference data for the efficient utilization of straw nutrient resources, chemical fertilizer reduction, and green and low-carbon agriculture. 【Methods】Based on statistical data and literature, using the straw-to-grain ratio method, the straw biomass, nutrient resource quantities,

收稿日期: 2025-08-05 接受日期: 2026-03-24

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFD2300703); 国家大宗蔬菜产业技术体系 (CARS-23)。

联系方式: 刘慧 E-mail: zsb010024@163.com; † 共同第一作者 王雪怡 E-mail: 2024240667@stu.syau.edu.cn

* 通信作者 张国显 E-mail: guoxianzhang@syau.edu.cn

potential for straw incorporation to substitute nutrient inputs, and economic benefits of four major crops were estimated across different cities of Jilin Province in this study. 【 **Results** 】 The average annual resources of maize, rice, soybean and peanut straw in 2019–2023 were 3225.68×10^4 t, 585.08×10^4 t, 70.36×10^4 t, and 103.89×10^4 t, respectively. Straw resources were mainly distributed in Changchun City, Songyuan City, Siping City, Jilin City and Baicheng City, accounting for 32.15%, 19.30%, 14.98%, 10.69%, and 10.07% of the total crop straw, respectively. The nitrogen (N), phosphorus (P_2O_5) and potassium (K_2O) resources from the main crop straw resources in the province were 35.79×10^4 t, 12.21×10^4 t, and 57.41×10^4 t. The nutrient resources of maize, rice, soybean and peanut (N+ P_2O_5 + K_2O) accounted for 77.12%, 17.54%, 2.20%, and 3.14%, respectively. The seasonally available nitrogen (N), phosphorus (P_2O_5) and potassium (K_2O) from the main crop straw resources in the province were 18.76×10^4 t, 8.78×10^4 t, and 48.66×10^4 t. The seasonally available resources from maize, rice, soybean and peanut (N+ P_2O_5 + K_2O) accounted for 77.37%, 17.82%, 1.97%, and 2.84%, respectively. In the main planting areas of the province, the substitution potential of chemical fertilizers by rice straw incorporation per unit sown area was N 27.32 kg/hm², P_2O_5 12.56 kg/hm², and K_2O 122.06 kg/hm², respectively. The substitution potential of chemical fertilizers by maize straw incorporation per unit sown area were N 33.47 kg/hm², P_2O_5 16.12 kg/hm², and K_2O 80.55 kg/hm², respectively. The substitution potential of chemical fertilizers by soybean straw incorporation per unit sown area were N 20.58 kg/hm², P_2O_5 5.15 kg/hm², and K_2O 25.97 kg/hm², respectively. The substitution potential of chemical fertilizers by peanut straw incorporation per unit sown area was N 22.01 kg/hm², P_2O_5 8.69 kg/hm², and K_2O 36.56 kg/hm², respectively. The average substitution percentage of chemical fertilizers by rice straw incorporation based on the optimal fertilization rate was 15.16%, 18.50%, and 11.06%, respectively. The average substitution percentage of chemical fertilizers by maize straw incorporation based on the optimal fertilization rate was 15.66%, 19.42%, and 78.13%, respectively. The average substitution percent of chemical fertilizers by soybean straw incorporation based on the optimal fertilization rate was 27.26%, 6.96%, and 43.35%, respectively. The average substitution percent of chemical fertilizers by peanut straw incorporation based on the optimal fertilization rate was 17.66%, 9.17%, and 30.85%, respectively. Complete straw return to the field could save about 7.91×10^8 yuan, 6.22×10^8 yuan, and 33.09×10^8 yuan based on the prices of urea, superphosphate, and potassium sulfate, respectively, equivalent to a total of 47.22×10^8 yuan in chemical fertilizer costs.

【 **Conclusions** 】 Jilin Province is abundant in straw resources, with the straw from major crops amounting to 3985.01×10^4 t, among which corn and rice account for 80.95% and 14.68%, respectively. Complete straw return from major crops to the fields can release available resources of N, P_2O_5 , and K_2O of 18.76×10^4 t, 8.78×10^4 t, and 48.66×10^4 t, respectively. Complete straw return can replace approximately 65% of chemical potassium fertilizer input and about 13%–15% of chemical nitrogen and phosphorus fertilizer inputs, saving 4.722 billion yuan in chemical fertilizer costs. Regional and crop-type differences should be taken into account when coordinating straw incorporation practices to achieve efficient utilization of straw resources, reduce chemical fertilizer application, improve efficiency, and achieve considerable economic benefits.

Keywords: crop straw; nutrient resource quantity; straw incorporation; chemical fertilizers substitution; Jilin Province

随着我国农业现代化进程快速推进,我国粮油作物产量大幅提升,同时作物秸秆也大幅增加,成为影响我国农村面源污染和人居环境的重要限制因素之一。作物秸秆富含氮、磷、钾等无机养分和有机质,秸秆还田可起到培肥土壤、增加作物产量、提高养分利用率的作用,从而实现秸秆资源化利用^[1-2]。科学量化农作物秸秆养分资源量及替代化肥

潜力,对推进农业投入品减量、化肥控量增效、加强秸秆综合利用和促进区域农业绿色发展具有重要意义。尽管施用化肥保障了国家粮食安全、实现粮食持续增产稳产^[3],然而,为追求高产,大量的化肥被施入土壤。据统计,2015年我国化肥施用量高达361 kg/hm²,远超主要发达国家225 kg/hm²的安全上限,主要农作物的化肥利用率仅为35.2%^[4]。长期大

量不合理的化肥施用导致土壤薄、瘦、馋、硬等问题日益严重,制约着我国农业的绿色转型与高质量发展^[5]。因此,自2015年农业农村部启动《到2020年化肥使用量零增长行动方案》以来,实现主要农作物化肥施用零增长便成为一项明确的政策目标。截止到2022年,我国化肥用量为298.8 kg/hm²,与2015年相比化肥用量减少了15.7%^[6]。但我国化肥的施用强度仍然较大,距2025年农业农村部发布《关于加快农业发展全面绿色转型促进乡村生态振兴的指导意见》中要求实现主粮化肥利用率达43%以上的重点目标,还有较大提升空间^[7]。秸秆中富含丰富的氮、磷、钾等养分和有机质,前人对我国不同生态类型区和省级尺度上秸秆资源量、氮磷钾养分资源量及替代化肥潜力进行了估算^[8-10],研究表明,2017年我国秸秆全量还田产生的氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)有效养分总量分别达758.66万t、238.84万t和1316.36万t,其养分替代潜力相当于当年化肥施用量的34.15%(N)、29.95%(P₂O₅)和212.40%(K₂O)^[11]。秸秆替代化肥的施用量和作用效果受环境条件、土壤条件、栽培作物、种植制度、秸秆种类等的影响不同,其替代化肥的潜力亦不同^[12]。研究发现,秸秆直接还田可减少烤烟-油菜轮作模式下烤烟季钾肥投入量约30%^[13]。玉米秸秆直接还田12 t/hm²,可替代氮肥36.80 t/hm²,达到较好的化肥减施效果^[14]。刘淑军等^[15]研究发现,中国水稻秸秆还田可替代氮(N)、磷(P₂O₅)和钾(K₂O)潜力分别为10.9%~12.5%、11.8%~17.1%和116.0%~123.0%。东北-黄淮海平原小麦、玉米和大豆秸秆当季替代化肥(N+P₂O₅+K₂O)潜力分别为188.88、138.71和38.51 kg/hm²^[16]。青藏高原玉米秸秆的钾肥替代潜力最大约为419.18%~6967.54%^[17]。江西省水稻秸秆替代氮(N)、磷(P₂O₅)和钾(K₂O)潜力分别为9.47%~133.56%、4.07%~52.25%和24.39%~437.16%^[18]。河北省主要作物秸秆当季全量还田替代氮(N)、磷(P₂O₅)和钾(K₂O)潜力分别为104.8%、15.54%和14.52%^[19]。辽宁省玉米和水稻秸秆还田后当季释放出的氮(N)、磷(P₂O₅)和钾(K₂O)可替代尿素、过磷酸钙和硫酸钾分别为26.42万t、40.41万t和69.58万t,可减少约21.21亿元的化肥投入^[20]。此外,秸秆还田替代化肥可降低来自肥料的氮投入,增加作物氮携出,在减少氮素损失的同时促进土壤无机氮向有机氮转化,增加土壤氮盈余,实现农田固氮减排^[21]。综上所述,农作物秸秆全量还田可为土壤提供大量的养分和有机质,替代大量的化肥,起到节约

化肥投入成本的作用。

吉林省是我国粮食大省,主要农作物产量位居全国第四,2023年主要农作物产量为4182.57万t,秸秆资源储量为4290.95万t,秸秆综合利用空间巨大^[22]。但目前吉林省不同农作物的秸秆养分资源量及替代化肥潜力不明,限制了秸秆肥料化利用的政策落地,亟需开展相关研究。本研究基于吉林省统计年鉴数据,利用草谷比法量化了吉林省各市玉米、水稻、大豆和花生4类作物秸秆资源量及其蕴含的氮、磷、钾养分资源量;在此基础上,结合秸秆还田当季有效养分释放率,进一步评估了基于单位面积播种量和最佳施肥推荐量的秸秆全量还田替代化肥潜力,并对其经济效益进行评估,以期吉林省秸秆资源化利用、化肥减施增效和土壤培肥提供数据支撑和决策参考。

1 研究方法数据来源

1.1 研究区概况

吉林省地处我国东北地区中部,毗邻辽宁省、内蒙古自治区和黑龙江省,并与俄罗斯、朝鲜两国接壤,位居东北亚地理中心,处于北纬40°50′~46°19′,东经121°38′~131°19′(图1),总面积达18.74万km²,下辖9个地级市。吉林省地势东南高,西北低,以大黑山为界,东部为山地,中西部为平原,松辽分水岭纵贯吉林省,其北侧为松嫩平原,南侧则属辽河平原。该省地处中纬度欧亚大陆东缘,属温带大陆性季风气候区,自东南向西北呈现出湿润、半湿润至半干旱的气候变化特征。全省全年平均气温为5.7℃,全年降水量618.4 mm,日照为2395 h^[23]。全省耕地面积为749.85万hm²,耕地面积位居全国第四。2019—2023年农作物播种面积平均为580.31万hm²,其中玉米、水稻、大豆和花生分别为432.81万hm²、81.22万hm²、31.02万hm²和24.58万hm²,各占全省作物播种面积的74.58%、14.00%、5.35%和4.24%,其他作物(薯类、马铃薯、甜菜、向日葵等)仅占1.84%,因此本研究主要量化玉米、水稻、大豆和花生秸秆养分资源量,并对其替代化肥潜力进行分析。

1.2 研究方法

本研究利用草谷比法,量化吉林省主要农作物的秸秆资源量,利用公式(1)将吉林省不同年限不同区域的主要农作物产量换算为秸秆资源^[19-20,24-25]。

吉林省主要农作物秸秆资源量计算公式:

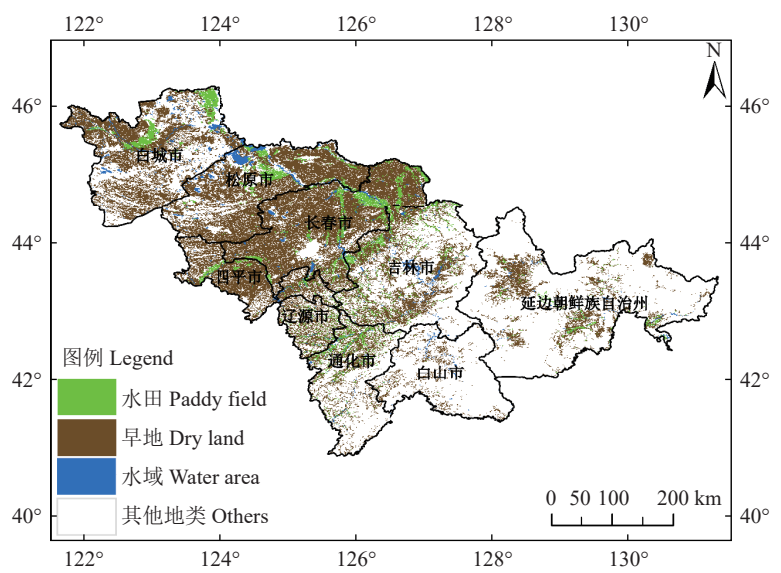


图 1 吉林省土地利用状况
Fig. 1 Land use of Jilin Province

$$W_i = Y_i \times R_i \tag{1}$$

式中， W_i 为吉林省第 i 种农作物理论秸秆量 (t)； Y_i 为吉林省第 i 种农作物产量 (t)； R_i 为吉林省第 i 种农作物的草谷比 (表 1)。

利用主要农作物秸秆平均养分含量，采用公式 (2) 估算吉林省主要农作物秸秆养分资源量^[26]。

吉林省主要农作物秸秆养分资源量计算公式：

$$S(N_i) = W_i \times N_i \tag{2}$$

式中， $S(N_i)$ 为第 i 种作物秸秆养分资源量 (t)； W_i 同上； N_i 为第 i 种作物秸秆养分含量 (%)。

利用秸秆养分资源量和秸秆当季养分释放率，采用公式 (3) 计算秸秆全量还田的有效养分资源量^[27]。

吉林省主要农作物秸秆全量还田的有效养分资源量计算公式：

$$E(N_i) = S(N_i) \times P_{N_i} \tag{3}$$

式中， $E(N_i)$ 为第 i 种作物秸秆全量还田的有效养

分资源量 (t)； P_{N_i} 为第 i 种作物秸秆养分当季释放率 (%) (表 1)。

利用单位播种面积、秸秆全量还田的有效资源量，采用公式 (4) 估算基于播种面积的吉林省作物秸秆还田的替代化肥潜力^[26]。

吉林省作物秸秆全量还田的替代化肥潜力计算公式：

$$R_{S_i} = E(N_i)/A_i \tag{4}$$

式中， R_{S_i} 为基于播种面积的第 i 种作物秸秆全量还田和直接还田的养分替代化肥的潜力 (kg/hm²)； A_i 为第 i 种作物的播种面积 (hm²)。

利用不同作物最佳施肥量、秸秆全量还田的有效资源量，采用公式 (5) 估算基于作物最佳施肥量的吉林省作物秸秆还田的替代化肥比例^[9-20]。

吉林省作物秸秆全量还田的替代化肥潜力计算公式：

表 1 主要作物草谷比、秸秆养分含量、秸秆还田养分当季释放率和最佳施肥量
Table 1 Straw-grain ratio, straw nutrient contents, seasonal nutrient release rates of straw, and optimum fertilizer rates of major crops

农作物 Crop	草谷比 Straw/grain ratio	秸秆养分含量 (%) Straw nutrient content			秸秆当季养分释放率 (%) Seasonal nutrient release rate of straw			最佳施肥量 (kg/hm ²) Optimum fertilizer rate		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
水稻 Rice	0.89	0.83	0.27	2.06	47.19	66.69	84.91	180.20	67.90	109.90
玉米 Maize	1.03	0.87	0.31	1.34	54.04	73.03	84.43	213.70	83.00	103.10
大豆 Soybean	1.06	1.63	0.39	1.27	52.06	54.41	84.30	75.50	74.00	59.90
花生 Peanut	1.24	1.66	0.34	1.19	41.00	79.00	95.00	124.60	94.70	118.50

$$R_{S_i} = \frac{E(N_i)}{n_i \times A_i} \quad (5)$$

式中, R_{S_i} 为基于最佳施肥量第 i 种作物秸秆全量还田的养分替代化肥的比例 (%); n_i 为第 i 种作物的最佳施肥量 (kg/hm^2) (表 1)。

将秸秆全量还田的氮 (N)、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 有效资源量折算为尿素、过磷酸钙和硫酸钾, 依据当前化肥市场价格, 采用公式 (6) 核算秸秆全量还田的经济效益^[20]。

吉林省主要农作物秸秆全量还田的经济效益计算公式:

$$V(N_i) = \frac{E(N_i) \times p}{k} \quad (6)$$

式中, $V(N_i)$ 为吉林省第 i 种作物秸秆全量还田的经济效益 (元); k 为肥料的有效养分含量 (%); p 为尿素、过磷酸钙和硫酸钾的市场价格 (元/t)。

1.3 数据来源

本研究采用的数据来源于《吉林省统计年鉴》, 为降低主要作物产量的年际变化波动, 在估算秸秆资源量及养分资源量及后续分析时采用 2019—2023 年的均值。本文吉林省主要作物的草谷比^[10, 22, 28-29]、秸秆养分含量^[9, 30-31]、秸秆当季养分释放率^[10, 32]以及不同作物最佳施肥量^[9]见表 1。尿素、过磷酸钙和硫酸钾中的氮 (N)、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 含量分别取 46%、12% 和 50%; 尿素、过磷酸钙和硫酸钾的市场价格, 分别取 1940、850 和 3400 元/t。

1.4 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行整理计算, 采用 SPSS 19.0 进行统计分析, 采用 Origin 2024b 及 ArcGIS Pro 作图。

2 结果与分析

2.1 吉林省主要作物秸秆资源量及空间分布

2019—2023 年, 吉林省主要作物秸秆年均资源量为 3985.01 万 t, 其中玉米、水稻、大豆和花生秸秆年均资源量为 3225.68 万 t、585.08 万 t、70.36 万 t 和 103.89 万 t, 分别占 4 种作物秸秆资源总量的 80.95%、14.68%、1.77% 和 2.61%。由图 2 可知, 吉林省主要农作物秸秆资源量分布存在着空间差异。玉米秸秆资源主要分布在长春市、松原市、四平市、吉林市和白城市, 各市资源量分别为 1037.03 万 t、622.42 万 t、483.28 万 t、344.80 万 t 和 324.89 万 t, 分别占全省玉米秸秆资源总量的

32.15%、19.30%、14.98%、10.69% 和 10.07%。白城市、长春市、松原市、吉林市的水稻秸秆资源量分别为 153.66 万 t、129.47 万 t、104.57 万 t 和 90.15 万 t, 分别占全省水稻秸秆资源总量的 26.31%、22.17%、17.90% 和 15.43%。大豆秸秆资源主要分布在延边朝鲜族自治州、松原市、吉林市、长春市、白城市和白山市, 各市资源量分别为 24.30 万 t、10.00 万 t、7.50 万 t、7.20 万 t、6.50 万 t 和 6.08 万 t, 分别占全省大豆秸秆资源总量的 34.54%、14.21%、10.66%、10.23%、9.23% 和 8.64%。松原市、白城市、四平市、长春市的花生秸秆资源量分别为 74.25 万 t、15.47 万 t、8.71 万 t 和 3.96 万 t, 分别占全省花生秸秆资源总量的 71.47%、14.90%、8.38% 和 3.81%。4 种作物秸秆资源总量居于前列的地区为长春市、松原市、四平市、白城市和吉林市, 年均秸秆资源量分别为 1177.66 万 t、811.25 万 t、529.41 万 t、500.52 万 t 和 442.91 万 t, 分别占全省主要作物秸秆年均资源总量的 29.55%、20.36%、13.29%、12.56% 和 11.11%。

2.2 吉林省主要作物秸秆还田养分资源量及空间分布

2.2.1 吉林省主要作物秸秆养分资源量及空间分布

由图 3 可知, 2019—2023 年吉林省 4 种主要作物秸秆氮 (N) 养分资源总量年均均为 35.79 万 t, 占比 33.96%, 水稻、玉米、大豆和花生秸秆可提供的年均氮养分资源量分别为 4.85 万 t (占比 13.57%)、28.06 万 t (占比 78.41%)、1.15 万 t (占比 3.20%) 和 1.72 万 t (占比 4.82%)。主要作物秸秆磷 (P_2O_5) 养分资源总量年均均为 12.21 万 t, 占比 11.58%, 其中水稻、玉米、大豆和花生秸秆的磷养分资源量分别为 1.58 万 t (占比 12.94%)、10.00 万 t (占比 81.90%)、0.27 万 t (占比 2.25%) 和 0.35 万 t (占比 2.89%)。4 种主要作物秸秆钾 (K_2O) 养分资源总量年均均为 57.41 万 t, 占比 54.46%, 来自水稻、玉米、大豆和花生秸秆的钾养分资源量分别为 12.05 万 t (占比 20.99%)、43.22 万 t (占比 75.29%)、0.89 万 t (占比 1.56%) 和 1.24 万 t (占比 2.15%)。总体来看, 水稻、玉米、大豆和花生秸秆总养分资源量 ($\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$) 分别为 18.49 万 t (占比 17.54%)、81.29 万 t (占比 77.12%)、2.31 万 t (占比 2.20%) 和 3.31 万 t (占比 3.14%)。

水稻秸秆养分资源量较高的地区有白城市 (N 1.28 万 t、 P_2O_5 0.41 万 t、 K_2O 3.16 万 t)、长春市 (N 1.07 万 t、 P_2O_5 0.35 万 t、 K_2O 2.67 万 t)、松原市 (N

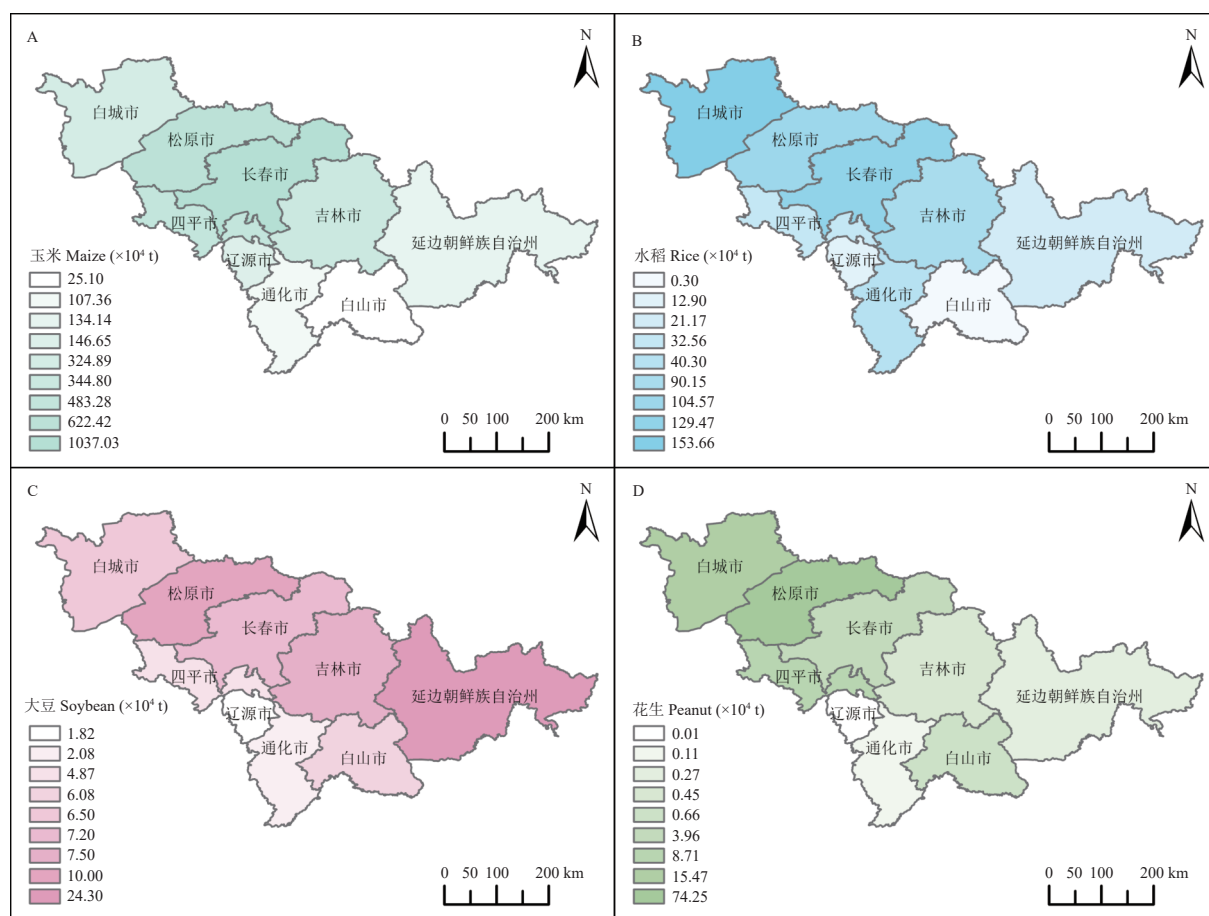


图 2 2019—2023 年吉林省各地区主要作物秸秆年均资源量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of annual average straw resources of major crops in various cities of Jilin Province during 2019–2023

0.87 万 t、 P_2O_5 0.28 万 t、 K_2O 2.15 万 t) 和吉林市 (N 0.75 万 t、 P_2O_5 0.24 万 t、 K_2O 1.86 万 t)，总养分资源量 (N+ P_2O_5 + K_2O) 分别为 4.86 万 t、4.09 万 t、3.30 万 t 和 2.85 万 t，各占 32.16%、27.09%、21.88% 和 18.87%。

玉米秸秆养分资源量较高的地区有长春市 (N 9.02 万 t、 P_2O_5 3.21 万 t、 K_2O 13.90 万 t)、松原市 (N 5.42 万 t、 P_2O_5 1.93 万 t、 K_2O 8.34 万 t)、四平市 (N 4.20 万 t、 P_2O_5 1.50 万 t、 K_2O 6.48 万 t)、吉林市 (N 3.00 万 t、 P_2O_5 1.07 万 t、 K_2O 4.62 万 t) 和白城市 (N 2.83 万 t、 P_2O_5 1.01 万 t、 K_2O 4.35 万 t)，总养分资源量 (N+ P_2O_5 + K_2O) 分别为 26.13 万 t、15.69 万 t、12.17 万 t、8.69 万 t 和 8.18 万 t，各占 36.87%、22.13%、17.18%、12.26% 和 11.55%。

大豆秸秆养分资源量较高的地区有延边朝鲜族自治州 (N 0.40 万 t、 P_2O_5 0.09 万 t、 K_2O 0.31 万 t)、松原市 (N 0.16 万 t、 P_2O_5 0.04 万 t、 K_2O 0.13 万 t)、吉林市 (N 0.12 万 t、 P_2O_5 0.03 万 t、 K_2O 0.10 万 t) 和长春市 (N 0.12 万 t、 P_2O_5 0.03 万 t、 K_2O 0.09 万 t)，

总养分资源量 (N+ P_2O_5 + K_2O) 分别为 0.80 万 t、0.32 万 t、0.25 万 t、0.24 万 t，各占 49.66%、20.43%、15.33% 和 14.71%。

花生秸秆养分资源量较高的地区有松原市 (N 1.24 万 t、 P_2O_5 0.25 万 t、 K_2O 0.88 万 t)、白城市 (N 0.26 万 t、 P_2O_5 0.05 万 t、 K_2O 0.18 万 t)、四平市 (N 0.14 万 t、 P_2O_5 0.03 万 t、 K_2O 0.10 万 t) 和长春市 (N 0.07 万 t、 P_2O_5 0.01 万 t、 K_2O 0.05 万 t)，总养分资源量 (N+ P_2O_5 + K_2O) 分别为 2.37 万 t、0.49 万 t、0.28 万 t 和 0.13 万 t，各占 72.43%、15.10%、8.49% 和 3.86%。

2.2.2 吉林省主要作物秸秆全量还田有效养分资源量及空间分布 由图 4 可知，2019—2023 年，吉林省主要作物秸秆全量还田氮 (N) 有效养分资源总量均为 18.76 万 t，占比 24.62%，水稻、玉米、大豆和花生秸秆全量还田氮有效养分资源量分别为 2.29 万 t (占比 12.20%)、15.17 万 t (占比 80.71%)、0.60 万 t (占比 3.18%) 和 0.71 万 t (占比 3.76%)。磷 (P_2O_5) 有效养分资源总量均为 8.78 万 t，占比

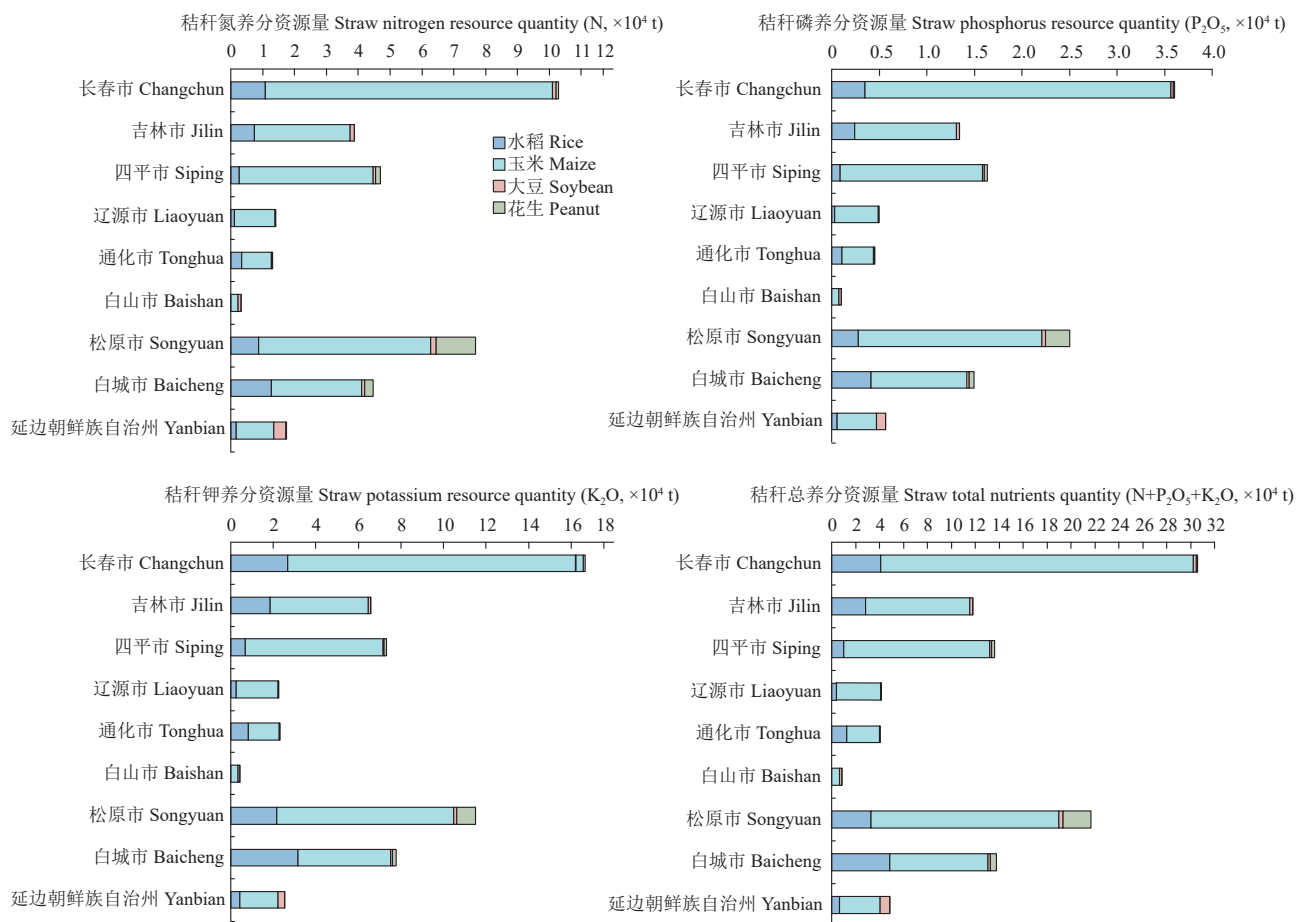


图3 2019—2023年吉林省各地区主要作物秸秆年均养分资源量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of annual average straw nutrient resources of major crops in various cities of Jilin Province during 2019–2023

11.53%, 其中来自水稻、玉米、大豆和花生秸秆全量还田的磷有效养分资源量分别为 1.05 万 t (占比 12.00%)、7.30 万 t (占比 83.17%)、0.15 万 t (占比 1.70%) 和 0.28 万 t (占比 3.18%)。4 种主要作物秸秆全量还田钾 (K_2O) 有效养分资源总量年均均为 48.66 万 t, 占比 63.85%, 其中来自水稻、玉米、大豆和花生秸秆全量还田的钾有效养分资源量分别为 10.24 万 t (占比 21.03%)、36.49 万 t (占比 75.00%)、0.75 万 t (占比 1.55%) 和 1.17 万 t (占比 2.41%)。综合来看, 水稻、玉米、大豆和花生秸秆全量还田总有效养分资源量 ($N+P_2O_5+K_2O$) 分别为 13.58 万 t (占比 17.82%)、58.96 万 t (占比 77.37%)、1.50 万 t (占比 1.97%) 和 2.16 万 t (占比 2.84%)。

水稻秸秆全量还田有效养分资源量较高的地区有白城市 (N 0.60 万 t、 P_2O_5 0.28 万 t、 K_2O 2.67 万 t)、长春市 (N 0.51 万 t、 P_2O_5 0.23 万 t、 K_2O 2.27 万 t)、松原市 (N 0.41 万 t、 P_2O_5 0.19 万 t、 K_2O 1.83 万 t) 和吉林市 (N 0.35 万 t、 P_2O_5 0.16 万 t、 K_2O 1.58 万 t),

总有效养分资源量 ($N+P_2O_5+K_2O$) 分别为 3.57 万 t、3.01 万 t、2.43 万 t 和 2.09 万 t, 各占 32.17%、27.10%、21.89% 和 18.87%。

玉米秸秆全量还田有效养分资源量较高的地区有长春市 (N 4.88 万 t、 P_2O_5 2.35 万 t、 K_2O 11.73 万 t)、松原市 (N 2.93 万 t、 P_2O_5 1.41 万 t、 K_2O 7.04 万 t)、四平市 (N 2.27 万 t、 P_2O_5 1.09 万 t、 K_2O 5.47 万 t)、吉林市 (N 1.62 万 t、 P_2O_5 0.78 万 t、 K_2O 3.90 万 t) 和白城市 (N 1.53 万 t、 P_2O_5 0.74 万 t、 K_2O 3.68 万 t), 总有效养分资源量 ($N+P_2O_5+K_2O$) 分别为 18.96 万 t、11.38 万 t、8.83 万 t、6.30 万 t 和 5.94 万 t, 各占 36.87%、22.13%、17.18%、12.26% 和 11.55%。

大豆秸秆全量还田有效养分资源量较高的地区有延边朝鲜族自治州 (N 0.21 万 t、 P_2O_5 0.053 万 t、 K_2O 0.26 万 t)、松原市 (N 0.08 万 t、 P_2O_5 0.02 万 t、 K_2O 0.11 万 t)、吉林市 (N 0.06 万 t、 P_2O_5 0.02 万 t、 K_2O 0.08 万 t) 和长春市 (N 0.06 万 t、 P_2O_5 0.02 万 t、 K_2O 0.08 万 t), 总有效养分资源量 ($N+P_2O_5+K_2O$) 分

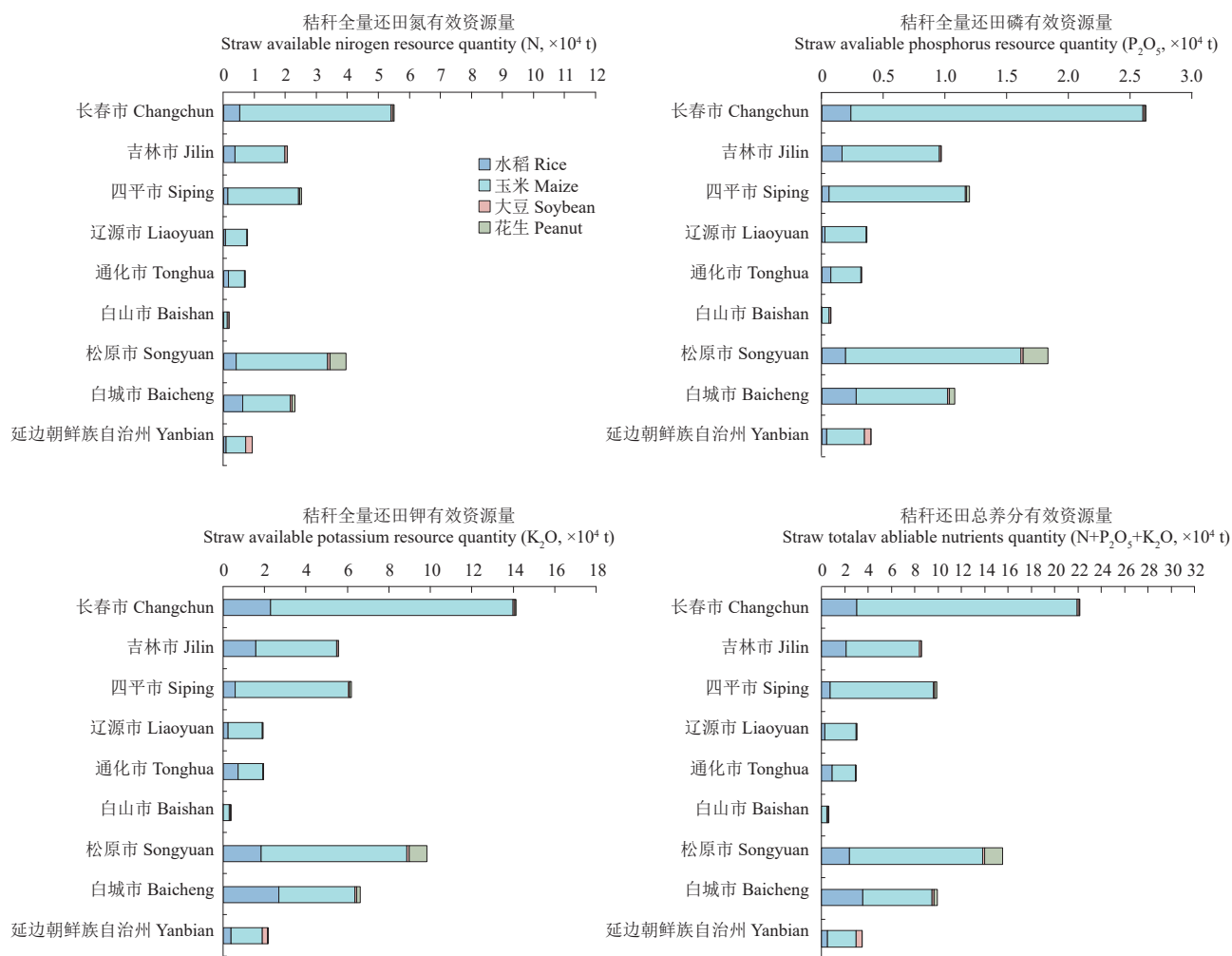


图 4 2019—2023 年吉林省各地区主要作物秸秆还田年均有效养分资源量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual average straw available nutrient resources of major crops straw incorporation in various cities of Jilin Province during 2019–2023

别为 0.52 万 t、0.21 万 t、0.16 万 t、0.15 万 t，各占 49.81%、20.50%、15.37% 和 14.76%。

花生秸秆全量还田有效养分资源量较高的地区有松原市 (N 0.51 万 t、 P_2O_5 0.20 万 t、 K_2O 0.84 万 t)、白城市 (N 0.11 万 t、 P_2O_5 0.04 万 t、 K_2O 0.17 万 t)、四平市 (N 0.06 万 t、 P_2O_5 0.02 万 t、 K_2O 0.10 万 t) 和长春市 (N 0.03 万 t、 P_2O_5 0.01 万 t、 K_2O 0.04 万 t)，总有效养分资源量 ($N+P_2O_5+K_2O$) 分别为 1.54 万 t、0.32 万 t、0.18 万 t 和 0.08 万 t，各占 72.50%、15.11%、8.50% 和 3.86%。

2.3 吉林省主要作物秸秆还田替代化肥潜力

2019—2023 年吉林省各市单位播种面积主要作物秸秆还田当季替代化肥的潜力如表 2 所示。主要作物秸秆全量还田当季可释放总养分 76.20 万 t，是作物秸秆理论总养分的 72.30%。吉林省主要作物秸秆还田氮 (N)、磷 (P_2O_5) 和钾 (K_2O) 的替代潜力分别

为 25.85、10.63 和 66.28 kg/hm²。水稻秸秆还田的氮肥 (N)、磷肥 (P_2O_5) 和钾肥 (K_2O) 的替代潜力分别为 22.72~30.73、10.44~14.13 和 101.49~137.29 kg/hm²；水稻主要种植区白城市、长春市、松原市和吉林市，播种面积约占 80.21%，全省水稻秸秆还田化肥替代潜力平均为 N 27.32 kg/hm²、 P_2O_5 12.56 kg/hm²、 K_2O 122.06 kg/hm²。玉米秸秆还田的氮肥 (N)、磷肥 (P_2O_5) 和钾肥 (K_2O) 的替代潜力分别为 27.71~39.69、13.34~19.11 和 66.68~95.51 kg/hm²；玉米主要种植区长春市、松原市、四平市、白城市和吉林市，播种面积约占 86.00%，全省玉米秸秆还田化肥替代潜力平均为 N 33.47 kg/hm²、 P_2O_5 16.12 kg/hm²、 K_2O 80.55 kg/hm²，玉米秸秆的氮肥替代潜力<钾肥的替代潜力，玉米秸秆当季替代化肥 ($N+P_2O_5+K_2O$) 潜力 130.14 kg/hm²。大豆秸秆还田的氮肥 (N)、磷肥 (P_2O_5) 和钾肥 (K_2O) 的替代潜力分别为 16.37~

表 2 2019—2023 年吉林省各市基于单位播种面积的主要作物秸秆全量还田的化肥替代潜力 (kg/hm²)

Table 2 Fertilizer substitution potential of major crop straw incorporation in different cities of Jilin Province based on sown area during 2019–2023

区域 Region	N				P ₂ O ₅				K ₂ O			
	水稻 Rice	玉米 Maize	大豆 Soybean	花生 Peanut	水稻 Rice	玉米 Maize	大豆 Soybean	花生 Peanut	水稻 Rice	玉米 Maize	大豆 Soybean	花生 Peanut
长春市 Changchun	28.84	37.79	23.19	24.10	13.26	18.20	5.80	9.51	128.85	90.94	29.26	40.03
吉林市 Jilin	26.96	32.68	21.51	14.47	12.39	15.74	5.38	5.71	120.43	78.64	27.14	24.04
四平市 Siping	29.66	39.69	22.52	33.81	13.64	19.11	5.63	13.34	132.51	95.51	28.42	56.17
辽源市 Liaoyuan	26.98	34.60	25.32	20.40	12.41	16.66	6.33	8.05	120.55	83.26	31.94	33.88
通化市 Tonghua	25.45	31.79	19.99	19.38	11.70	15.31	5.00	7.65	113.68	76.51	25.23	32.19
白山市 Baishan	26.09	30.90	19.10	18.75	11.99	14.88	4.78	7.40	116.55	74.35	24.10	31.14
松原市 Songyuan	30.73	36.03	19.61	29.72	14.13	17.35	4.90	11.73	137.29	86.70	24.74	49.36
白城市 Baicheng	28.47	27.71	16.37	26.00	13.09	13.34	4.09	10.26	127.17	66.68	20.65	43.20
延边朝鲜族自治州 Yanbian	22.72	30.07	17.62	11.45	10.44	14.48	4.41	4.52	101.49	72.35	22.23	19.03
平均值 Average	27.32	33.47	20.58	22.01	12.56	16.12	5.15	8.69	122.06	80.55	25.97	36.56

25.32、4.09~6.33 和 20.65~31.94 kg/hm²; 大豆主要种植区延边朝鲜族自治州、松原市、白城市、吉林市、白山市和长春市, 播种面积约占 89.27%, 全省大豆秸秆还田化肥替代潜力平均为 N 20.58 kg/hm²、P₂O₅ 5.15 kg/hm²、K₂O 25.97 kg/hm², 大豆秸秆当季替代化肥 (N+P₂O₅+K₂O) 潜力 51.70 kg/hm²。花生秸秆还田氮肥 (N)、磷肥 (P₂O₅) 和钾肥 (K₂O) 的替代潜力分别为 11.45~33.81、4.52~13.34 和 19.03~40.03 kg/hm²; 花生主要种植区松原市、白城市、四

平市和长春市, 播种面积约占 97.33%, 全省花生秸秆还田化肥替代潜力平均为 N 22.01 kg/hm²、P₂O₅ 8.69 kg/hm²、K₂O 36.56 kg/hm²。

2019—2023 年吉林省各市基于最佳施肥量的主要作物秸秆还田当季的化肥替代比例见表 3。全省水稻秸秆还田的氮肥替代比例为 12.61%~17.05%, 磷肥替代比例为 15.38%~20.81%, 钾肥替代比例为 92.35%~124.92%, 平均值分别为 15.16%、18.50% 和 111.06%, 松原市、四平市、长春市和

表 3 2019—2023 年吉林省各市基于最佳施肥量的主要作物秸秆全量还田的化肥替代比例 (%)

Table 3 Fertilizer substitution proportion of major crop straw incorporation in different cities of Jilin Province based on optimum fertilizer amounts during 2019–2023

区域 Region	N				P ₂ O ₅				K ₂ O			
	水稻 Rice	玉米 Maize	大豆 Soybean	花生 Peanut	水稻 Rice	玉米 Maize	大豆 Soybean	花生 Peanut	水稻 Rice	玉米 Maize	大豆 Soybean	花生 Peanut
长春市 Changchun	16.01	17.68	30.72	19.34	19.53	21.93	7.84	10.04	117.24	88.21	48.84	33.78
吉林市 Jilin	14.96	15.29	28.49	11.61	18.25	18.96	7.27	6.03	109.58	76.27	45.31	20.28
四平市 Siping	16.46	18.57	29.83	27.14	20.08	23.03	7.61	14.09	120.57	92.63	47.44	47.40
辽源市 Liaoyuan	14.97	16.19	33.54	16.37	18.27	20.07	8.56	8.50	109.69	80.76	53.33	28.59
通化市 Tonghua	14.12	14.88	26.48	15.55	17.23	18.45	6.76	8.08	103.44	74.21	42.11	27.17
白山市 Baishan	14.48	14.46	25.30	15.05	17.66	17.93	6.46	7.81	106.05	72.11	40.24	26.28
松原市 Songyuan	17.05	16.86	25.98	23.85	20.81	20.90	6.63	12.38	124.92	84.09	41.31	41.65
白城市 Baicheng	15.80	12.97	21.68	20.87	19.27	16.08	5.53	10.84	115.72	64.68	34.48	36.45
延边朝鲜族自治州 Yanbian	12.61	14.07	23.34	9.19	15.38	17.44	5.95	4.77	92.35	70.18	37.11	16.06
平均值 Average	15.16	15.66	27.26	17.66	18.50	19.42	6.96	9.17	111.06	78.13	43.35	30.85

白城市的替代化肥比例较大。全省玉米秸秆还田的氮肥替代比例为 12.97%~18.57%，磷肥替代比例为 16.08%~23.03%，钾肥替代比例为 64.68%~92.63%，平均值分别为 15.66%、19.42%和 78.13%，四平市、长春市、松原市和辽源市的替代比例较大。大豆秸秆还田的氮肥替代比例为 21.68%~33.54%，磷肥替代比例为 5.53%~8.56%，钾肥替代比例为 34.48%~53.55%，平均值分别为 27.26%、6.96% 和 43.35%，辽源市、长春市、四平市和吉林市的替代比例较大。花生秸秆还田的氮肥替代比例为 9.19%~27.14%，磷肥替代比例为 4.77%~14.09%，钾肥替代比例为 16.06%~47.40%，平均值分别为 17.66%、9.17% 和 30.85%，四平市、松原市、白城市和长春市的替代比例较大。吉林省主要作物秸秆全量还田的平均氮 (N)、磷 (P₂O₅) 和钾 (K₂O) 养分替代比例分别为 18.94%、13.51% 和 65.85%。

2019—2023 年吉林省各市主要作物秸秆还田替代化肥的经济效益分析 (表 4) 显示，全省主要作物秸秆全量还田可节约 7.91 亿元的氮肥 (占比约 15%)、6.22 亿元的磷肥 (占比约 13%) 和 33.09 亿元的钾肥 (占比约 65%) 投入，合计全省可节约 47.22 亿元。作物秸秆全量还田取得经济效益的排名为长春市>松原市>白城市>四平市>吉林市>延边朝鲜族自治州>通化市>辽源市>白山市。全省水稻秸秆还田可节约 0.97 亿元的氮肥投入、0.75 亿元的磷肥投入和 6.96 亿元的钾肥投入，合计可节约化肥投入 8.67 亿元。全省玉米秸秆还田可节约 6.40 亿元的氮

肥投入、5.17 亿元的磷肥投入和 24.82 亿元的钾肥投入，合计可节约化肥投入 36.38 亿元。全省大豆秸秆还田可节约 0.25 亿元的氮肥、0.11 亿元的磷肥和 0.51 亿元的钾肥投入，合计可节约化肥投入 0.87 亿元。全省花生秸秆还田可节约 0.30 亿元的氮肥投入、0.20 亿元的磷肥投入和 0.80 亿元的钾肥投入，合计可节约化肥投入 1.30 亿元。

3 讨论

3.1 吉林省主要作物秸秆资源量分析

吉林省主要作物秸秆资源量为 3985.01 万 t，秸秆资源丰富。从区域分布来看，吉林省秸秆资源量呈现西部平原农业区和中部平原农业区高、中东部半山农业区低的特征。作物播种面积是驱动秸秆资源空间分布格局的关键因素^[33]。吉林省中西部农业区 (长春市、松原市、白城市、吉林市和四平市) 主要为中部台地平原区和西部冲积平原区，约占全省面积的 60%，农作物播种面积约为 480.92 万 hm²，约占全省的 84.43%。中东部半山农业区 (延边朝鲜族自治州、白山市、辽源市、通化市) 面积约占全省面积的 40%，多为山地和丘陵，主要作物播种面积较小，占全省作物播种面积的 15.57%。作物的单位面积产量也是影响作物秸秆资源量的重要因素之一。而作物单产受种植水平、灌溉条件、土壤条件和作物品种等因素的制约^[34]。吉林省中西部农业区地处松辽平原，灌溉条件好，作物单产高，水稻和玉米的平均产量约为 8.30 和 7.18 t/hm²，分别比中东部

表 4 2019—2023 年吉林省各市主要作物秸秆全量还田替代化肥的年均经济效益 (×10⁸ yuan)

Table 4 Annual economic benefits of major crop straw incorporation in different cities of Jilin Province during 2019–2023												
区域 Region	N				P ₂ O ₅				K ₂ O			
	水稻 Rice	玉米 Maize	大豆 Soybean	花生 Peanut	水稻 Rice	玉米 Maize	大豆 Soybean	花生 Peanut	水稻 Rice	玉米 Maize	大豆 Soybean	花生 Peanut
长春市 Changchun	0.21	2.06	0.03	0.01	0.17	1.66	0.01	0.01	1.54	7.98	0.05	0.03
吉林市 Jilin	0.15	0.68	0.03	0.00	0.11	0.55	0.01	0.00	1.07	2.65	0.05	0.00
四平市 Siping	0.05	0.96	0.02	0.02	0.04	0.77	0.01	0.02	0.39	3.72	0.04	0.07
辽源市 Liaoyuan	0.02	0.29	0.01	0.00	0.02	0.24	0.00	0.00	0.15	1.13	0.01	0.00
通化市 Tonghua	0.07	0.21	0.01	0.00	0.05	0.17	0.00	0.00	0.48	0.83	0.02	0.00
白山市 Baishan	0.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.19	0.04	0.01
松原市 Songyuan	0.17	1.23	0.04	0.21	0.13	1.00	0.02	0.14	1.24	4.79	0.07	0.57
白城市 Baicheng	0.25	0.64	0.02	0.04	0.20	0.52	0.01	0.03	1.83	2.50	0.05	0.12
延边朝鲜族自治州 Yanbian	0.03	0.27	0.09	0.00	0.03	0.22	0.04	0.00	0.25	1.03	0.18	0.00
合计 Total	0.97	6.40	0.25	0.30	0.75	5.17	0.11	0.20	6.96	24.82	0.51	0.80

半山农业区的水稻和玉米平均产量高约 14.31% 和 9.24%。

草谷比的选择是作物秸秆资源量准确估算的关键因素^[9-10, 20, 35]。草谷比受作物种类、种植区域、农业气象条件、耕作制度、施肥管理措施等诸多农业生产条件的影响^[36]。前人对全国及不同地区的秸秆资源进行估算时采用了不同的草谷比。宋大利等^[9]研究中采用全国的玉米、水稻、大豆和花生的草谷比分别为 1.2、1.0、1.6 和 1.5。刘晓永等^[10]研究认为我国东北地区玉米、水稻、大豆和花生的草谷比分别为 1.11、0.91、1.29 和 1.24。姜思琦^[28]研究认为吉林省玉米、水稻、大豆、油料作物的草谷比分别在 1.04~2.00 (平均 1.44)、0.62~1.40 (平均 0.94)、1.29~1.7 (平均 1.51) 和 1.84~2.91 (平均 2.01)。本研究在估算吉林省玉米、水稻、大豆作物秸秆资源量时采用的是祝延立等^[29]关于吉林省主要作物草谷比实地测算结果 0.89、1.03 和 1.06, 花生的草谷比则选取刘晓永等^[10]研究中东北地区的数值 1.24, 在一定程度上保证了秸秆资源量估算的准确性。在作物产量一致的情况下, 本文估算的玉米和大豆秸秆资源量比采用姜思琦^[28]研究中的草谷比估算的玉米和大豆的秸秆资源量分别约低 38.19% 和 29.80%, 水稻秸秆资源量约高 8.74%; 与采用刘晓永等^[10]研究中的草谷比估算的秸秆资源量相比, 本研究中的玉米和大豆的秸秆资源量分别约低 24.55% 和 17.83%, 水稻的秸秆资源量则约高 13.18%。这主要是种质资源更新、农业气象条件变化、栽培管理技术升级等导致作物产能提升的结果。因此, 在未来政策制定和栽培技术推广时应根据当地最新的草谷比进行重新估算。

3.2 吉林省主要作物秸秆养分资源量

作物秸秆富含氮、磷、钾等无机养分和有机质, 是重要的农业生产资料。本研究结果表明, 吉林省主要作物秸秆的氮 (N)、磷 (P_2O_5) 和钾 (K_2O) 养分资源量分别为 35.79 万 t、12.21 万 t 和 57.41 万 t, 分别占主要秸秆总养分 ($N+P_2O_5+K_2O$) 资源量的 33.96%、11.58% 和 54.46%。这表明作物秸秆的钾含量高于氮和磷, 这和作物对钾的吸收高于氮磷, 且主要赋存于作物秸秆中的养分代谢规律是一致的^[37]。宋大利等研究发现, 中国主要农作物秸秆养分中氮 (N)、磷 (P_2O_5) 和钾 (K_2O) 养分资源量分别占总养分量的 31.50%、10.00% 和 58.50%^[9]; 李景等^[19]研究发现, 河北省秸秆养分资源量中钾 (K_2O) 最高, 其次为氮 (N) 和磷 (P_2O_5), 分别占总养分资源量的 55.30%、

33.22% 和 11.48%。本研究的结果与前人研究相似, 但养分占比有所差异, 这主要是由于研究的区域、作物种类、种植面积和结构以及采用的秸秆养分含量参数等不同导致的。不同作物秸秆的养分含量是估算作物秸秆养分资源量的重要依据, 其受作物类型、气候环境特点以及施肥习惯等多种因素的影响^[10]。与大多数研究一致, 本研究采用《中国有机肥料养分志》^[30]和《中国有机肥料资源》^[31]中各种作物的秸秆养分含量来量化秸秆养分资源量, 在一定程度上保证了秸秆养分资源量评估的准确性和一致性。

本研究发现, 吉林省主要作物秸秆全量还田后当季可提供氮 (N)、磷 (P_2O_5) 和钾 (K_2O) 有效养分资源量高达 18.76 万 t、8.78 万 t 和 48.66 万 t, 分别占总养分资源量的 24.62%、11.53% 和 63.85%。主要作物秸秆全量还田当季可释放总养分 76.20 万 t, 是作物秸秆理论总养分的 72.30%。作物秸秆还田后在微生物的作用下逐渐腐解, 并不断释放出氮、磷、钾等矿质养分, 同时合成有机物质, 增加土壤肥力, 为作物生长提供养分。因此, 秸秆腐解速率决定其为下一季作物提供有效养分的量。前人对秸秆还田腐解速率的研究发现, 秸秆当季养分释放率呈现为钾>磷>氮的特征^[38], 这主要是由于钾主要以离子的形态存在, 而氮、磷则以有机物的形态存在于作物的秸秆中, 分解的难易程度不同导致的^[39-40]。王玉龙等^[41]研究发现, 玉米秸秆的腐解速率 (56.79%)>油菜秸秆 (55.23%)>烟草秸秆 (43.44%); 赵庆雷等^[42]研究发现, 基施 69 kg/hm² 的氮肥结合泡田 15 天对黄淮稻麦轮作区水稻季小麦秸秆腐解速率提升幅度最大, 约为 65.84%, 比其他处理约提高了 27.09%; 李泽毅等^[43]研究发现, 中深翻还田处理的秸秆腐解率显著高于旋耕还田处理, 提高幅度为 4.36%~6.25%。大量研究表明, 秸秆的养分释放速率受作物类型^[39, 44-45]、土壤条件^[46-47]、水肥管理措施^[48]、气候类型^[44, 46, 49]、还田方式^[50]等因素的影响。本研究中玉米、水稻和大豆秸秆的养分释放率参照的是刘晓永等^[10]基于文献统计的结果, 而花生秸秆还田的养分释放率则参照了吕鹏超等^[32]的研究结果, 这在一定程度上提高了估算准确度。但吉林省不同地区的秸秆养分释放率存在差异, 未来需要更精细的测算和研究, 以提高秸秆还田有效养分资源量量化的精度。

3.3 吉林省主要作物秸秆替代化肥潜力分析

秸秆还田可替代部分化肥, 减少化肥的施用量,

达到减施增效, 提高土壤质量的作用^[26, 51-52]。本研究发现, 吉林省主要作物秸秆还田氮(N)、磷(P_2O_5)和钾(K_2O)的替代潜力分别为25.85、10.63和66.28 kg/hm², 玉米秸秆的氮肥(N)替代潜力<钾肥(K_2O)的替代潜力, 这与前人的研究结果^[17, 53]一致。本研究发现, 吉林省单位播种面积水稻和玉米秸秆的氮肥替代潜力分别为22.72~30.73和27.71~39.69 kg/hm², 与汪秋云等^[16]研究发现的东北平原玉米秸秆的替代潜力为20.39~39.85 kg/hm²及刘淑军等^[15]研究发现的东北地区水稻秸秆的替代潜力为26.38~32.61 kg/hm²相差不大。本研究发现, 吉林省玉米和大豆秸秆当季替代化肥(N+ P_2O_5 + K_2O)潜力分别为130.14和51.70 kg/hm², 与汪秋云等^[16]研究发现东北-黄淮海平原玉米和大豆秸秆当季替代化肥(N+ P_2O_5 + K_2O)潜力分别为138.71和38.51 kg/hm²相一致。秸秆替代化肥的施用量和作用效果受环境条件、土壤条件、栽培作物、种植制度、秸秆种类等的影响不同, 其替代化肥的潜力亦不同^[12]。李一等^[11]研究发现, 我国2017年主要作物(水稻、玉米、小麦、油料作物、薯类等)秸秆全量还田分别可替代当年氮(N)、磷(P_2O_5)和钾(K_2O)的肥料量平均约为19.38%、23.28%和166.81%。本研究发现, 吉林省主要作物秸秆全量还田的平均氮(N)、磷(P_2O_5)和钾(K_2O)养分替代比例分别为18.94%、13.51%和65.85%, 磷钾养分的替代比例低于全国平均值, 原因是吉林省大豆和花生的钾肥替代比例分别只有43.35%和30.85%, 水稻秸秆还田替代氮(N)、磷(P_2O_5)和钾(K_2O)比例分别为12.61%~17.05%、15.38%~20.81%和92.35%~124.92%, 也略低于前人研究提出的东北地区水稻秸秆还田可替代氮(N)、磷(P_2O_5)和钾(K_2O)潜力18.15%~22.72%、15.08%~21.25%和156.76%~248.30%^[15], 这可能与吉林省水稻产量高于东北地区水稻的平均产量有关^[54]。因此, 在全量还田条件下, 吉林省大豆、花生较全国其他区域更需注意补充钾肥, 水稻也应注意提高氮磷钾肥的用量。

在实际生产中, 秸秆还田替代化肥的潜力和效果还深受秸秆还田率^[9]、还田方式^[55-56]、秸秆养分释放速率与作物养分吸收^[57]、栽培管理技术^[58]等诸多因素的影响。因此, 在实际生产过程中, 应因地制宜, 选择适宜的秸秆资源化利用方式^[59]和还田方式^[55], 合理配施化肥^[60]、施用高效秸秆腐熟剂^[60-61]等, 以实现作物秸秆养分资源的高效利用, 集成适宜不同区域、不同作物类型、不同栽培制度的秸秆还田技术模式。

4 结论

吉林省秸秆资源丰富, 2019—2023年全省玉米、水稻、大豆和花生秸秆年平均资源量分别为3225.68万t、585.08万t、70.36万t和103.89万t, 其中玉米和水稻的秸秆资源量占比较大, 约占80.95%和14.68%, 是全省秸秆资源的主要组成部分。主要作物秸秆全量还田释放的氮(N)、磷(P_2O_5)和钾(K_2O)有效资源量分别为18.76万t、8.78万t和48.66万t; 基于种植面积和最佳施肥量, 替代N、 P_2O_5 和 K_2O 养分的潜力分别为20.58~33.47、5.15~16.12和25.97~122.06 kg/hm², 折合约相当于15.16%~27.26%的氮肥、6.96%~19.42%的磷肥和30.85%~111.06%的钾肥, 可节约氮肥投入7.91亿元、磷肥投入6.22亿元和钾肥投入33.09亿元。但在实际生产中, 还应针对作物提出具体的化肥替代比例。

参考文献:

- [1] Li H, Miao Z, Zhang B. Review and prospect of comprehensive straw utilization and government policy in China[J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2022, 20(4): 402-406.
- [2] Yin H, Zhao W, Li T, *et al.* Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: Role of straw nutrient resources[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 2695-2702.
- [3] 张福锁, 申建波, 危常州, 等. 绿色智能肥料: 从原理创新到产业化实现[J]. *土壤学报*, 2022, 59(4): 873-887.
Zhang F S, Shen J B, Wei C Z, *et al.* Green intelligent fertilizer: From interdisciplinary innovation to industrialization realization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(4): 873-887.
- [4] 李芳, 冯淑怡, 曲福田. 发达国家化肥减量政策的适用性分析及启示[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(1): 15-23.
Li F, Feng S Y, Qu F T. Fertilizer reduction policies in developed countries: Suitability and implications[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(1): 15-23.
- [5] 秦诗涵. 松嫩平原黑土地耕地土壤“变瘦、变硬、变薄”关键指标时空变化特征及影响因素[D]. 辽宁沈阳: 沈阳农业大学硕士学位论文, 2024.
Qin S H. Spatiotemporal variation characteristics of key indicators related to “leaning, hardening and thinning” in cultivated black soils and influencing factors in Songnen Plain[D]. Shenyang, Liaoning: MS Thesis of Shenyang Agricultural University, 2024.
- [6] 李娜, 田云龙, 张蕾, 等. 中国化肥减量增效行动与技术研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2025, 42(1): 1-10.
Li N, Tian Y L, Zhang L, *et al.* Research on action and technology for reducing fertilizer usage and enhancing efficiency in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(1): 1-10.
- [7] 张福锁. 推进农业投入品减量增效 加快农业发展全面绿色转型[J]. *农村工作通讯*, 2025, (3): 19-20.
Zhang F S. Promote the reduction and efficiency of agricultural

- inputs and accelerate the comprehensive green transformation of agricultural development[J]. Newsletter about Work in Rural Areas, 2025, (3): 19–20.
- [8] 刘俊杰, 严晓斌, 张美怡, 等. 中国农作物秸秆资源产量分布及利用分析[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(3): 751–760.
- Liu J J, Yan X B, Zhang M Y, *et al.* Analysis of yield distribution and utilization of crop straw resources in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2025, 42(3): 751–760.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Liu P, He J, Li H, *et al.* Effect of straw retention on crop yield, soil properties, water use efficiency and greenhouse gas emission in China: A meta-analysis[J]. *International Journal of Plant Production*, 2019, 13(4): 347–367.
- [13] 赵文军, 薛开政, 尹梅, 等. 油菜-烤烟轮作体系中油菜秸秆还田方式及钾肥减量对烤烟钾素利用效率的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 675–681.
- Zhao W J, Xue K Z, Yin M, *et al.* Effects of rape straw returning method and reduction of potassium fertilizer on potassium use efficiency of tobacco in tobacco-rape rotation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(3): 675–681.
- [14] 闫宇婷, 宋秋来, 闫超, 等. 连作秸秆还田下玉米氮素积累与氮肥替代效应研究[J]. 作物学报, 2022, 48(4): 962–974.
- Yan Y T, Song Q L, Yan C, *et al.* Nitrogen accumulation and nitrogen substitution effect of maize under straw returning with continuous cropping[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(4): 962–974.
- [15] 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.
- [16] 汪秋云, 李庆阳, 柴如山, 等. 东北-黄淮海平原旱作区作物秸秆养分资源量及还田替代化肥潜力[J]. 安徽农业大学学报, 2022, 49(4): 621–629.
- Wang Q Y, Li Q Y, Chai R S, *et al.* Nutrient resources of crop straw and its potential to replace chemical fertilizers in dryland farming region of the Northeast and Huanghuaihai Plain[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2022, 49(4): 621–629.
- [17] 宋大刚, 胡晗颖, 卢兰, 冯海军. 1988–2018年青藏高原玉米秸秆资源时空分布特征及还田替代化肥潜力[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(6): 1124–1132.
- Song D G, Hu H Y, Lu L, Feng H J. Characteristics of spatial and temporal distribution of maize straw resources and the potential of returning as chemical fertilizer in the Qinghai-Xizang Plateau, 1988–2018[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2024, 30(6): 1124–1132.
- [18] 车奇凤, 陈星月, 陈国雄, 等. 江西省水稻秸秆资源分布与替代化肥潜力分析[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(2): 446–458.
- Che Q F, Chen X Y, Chen G X, *et al.* Analysis of rice straw resource distribution and potential for fertilizer substitution in Jiangxi Province[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2026, 43(2): 446–458.
- [19] 李景, 赵贺, 李文琦, 等. 河北省主要作物秸秆养分资源量及替代化肥潜力的空间分布特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(8): 1389–1400.
- Li J, Zhao H, Li W Q, *et al.* Spatial distribution of nutrient resource of main crop straws and its potential to replace chemical fertilizer in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(8): 1389–1400.
- [20] 杨丽娟, 武立萍, 杨迪文, 等. 辽宁省农作物秸秆资源及其替代化肥潜力评估[J]. 沈阳农业大学学报, 2023, 54(5): 529–536.
- Yang L J, Wu L P, Yang D W, *et al.* Crop straw resources and its potential evaluation on replacing chemical fertilizers in Liaoning Province[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2023, 54(5): 529–536.
- [21] 王嘉豪. 秸秆还田替代化肥对黄土旱塬冬小麦产量及环境经济效益的影响[D]. 山西晋中: 山西农业大学硕士学位论文, 2022.
- Wang J H. Effects of straw incorporation replacing fertilizer on winter wheat yield and environmental and economic benefits in Loess Dryland[D]. Jinzhong, Shanxi: MS Thesis of Shanxi Agricultural University, 2022.
- [22] 吕智超, 孙日丹, 洪小丽, 等. 吉林省农作物秸秆资源现状及利用对策[J]. 东北农业科学, 2024, 49(4): 62–65.
- Lü Z C, Sun R D, Hong X L, *et al.* Present situation and utilization countermeasures of maize straw resources in Jilin Province[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2024, 49(4): 62–65.
- [23] 马云飞, 高枫亭, 吴玉洁, 等. 2000—2020年吉林省植被NPP时空演变及其与气温、降水的关系分析[J]. 气象与环境科学, 2024, 47(6): 65–74.
- Ma Y F, Gao C T, Wu Y J, *et al.* Spatial and temporal evolution of NPP and its relationship with temperature and precipitation in Jilin Province from 2000 to 2020[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2024, 47(6): 65–74.
- [24] 李胜男, 纪雄辉, 邓凯, 等. 区域秸秆资源分布及全量化利用潜力分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 221–228.
- Li S N, Ji X H, Deng K, *et al.* Analysis of regional distribution patterns and full utilization potential of crop straw resources[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(12): 221–228.
- [25] 张婷. 江西省秸秆资源总量与替代化肥潜力研究[D]. 辽宁沈阳: 沈

- 阳农业大学硕士学位论文, 2024.
- Zhang T. Nutrient resources of main crop straw and its potential of substituting for chemical fertilizer in Jiangxi[D]. Shenyang, Liaoning: MS Thesis of Shenyang Agricultural University, 2024.
- [26] 柴如山, 朱丽青, 刘梦阳, 等. 山东省小麦玉米秸秆资源分布与还田减肥潜力[J]. 中国农业科学, 2024, 57(11): 2202–2214.
- Chai R S, Zhu L Q, Liu M Y, *et al.* Distribution of wheat and maize straw resources in Shandong Province and fertilizer reduction potential under straw return[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(11): 2202–2214.
- [27] 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.
- [28] 姜思琦. 吉林省秸秆资源时空分布及产率变化分析[J]. 农业技术与装备, 2020, (8): 12–15.
- Jiang S Q. Analysis on temporal and spatial distribution and yield change of straw resources in Jilin Province[J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2020, (8): 12–15.
- [29] 祝延立, 那伟, 鄯登宝, 等. 吉林省主要农作物秸秆系数测定及资源评价[J]. 农业科技通讯, 2020, (7): 188–190.
- Zhu Y L, Na W, Xi D B, *et al.* Determination of straw coefficient and resource evaluation of major crops in Jilin Province[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2020, (7): 188–190.
- [30] 全国农业技术服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- China National Agricultural Technology Extension Service. Records of nutrients in organic fertilizer in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [31] 全国农业技术服务中心. 中国有机肥料资源[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- China National Agricultural Technology Extension Service. Data collection for organic fertilizer nutrients in China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [32] 吕鹏超, 梁斌, 隋方功, 等. 不同绿肥秸秆养分释放规律的研究[J]. 作物杂志, 2015, (4): 130–134.
- Lü P C, Liang B, Sui F G, *et al.* Research on the releasing law of nutrients in different green manure straws[J]. *Crops*, 2015, (4): 130–134.
- [33] 刘淑军, 李冬初, 黄晶, 等. 近30年来我国小麦和玉米秸秆资源时空变化特征及还田减肥潜力[J]. 中国农业科学, 2023, 56(16): 3140–3155.
- Liu S J, Li D C, Huang J, *et al.* Spatial-temporal variation characteristics of wheat and maize stalk resources and chemical fertilizer reduction potential of returning to farmland in recent 30 years in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(16): 3140–3155.
- [34] 李靖, 孙晓明. 省域粮食单产水平与波动状况研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(4): 76–80.
- Li J, Sun X M. Analysis on provincial grain unit yield and its fluctuation conditions[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(4): 76–80.
- [35] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 211–217.
- Bi Y Y, Gao C Y, Wang Y J, *et al.* Estimation of straw resources in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12): 211–217.
- [36] 彭春艳, 罗怀良, 孔静. 中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(3): 14–20.
- Peng C Y, Luo H L, Kong J. Advance in estimation and utilization of crop residues resources in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(3): 14–20.
- [37] 周加顺, 郑金伟, 池忠志, 等. 施用生物炭对作物产量和氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(5): 791–799.
- Zhou J S, Zheng J W, Chi Z Z, *et al.* Effects of biochar amendment on crop yield and the uptake of nitrogen, phosphorus and potassium[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(5): 791–799.
- [38] 李廷亮, 王宇峰, 王嘉豪, 等. 我国主要粮食作物秸秆还田养分资源量及其对小麦化肥减施的启示[J]. 中国农业科学, 2020, 53(23): 4835–4854.
- Li T L, Wang Y F, Wang J H, *et al.* Nutrient resource quantity from main grain crop straw incorporation and its enlightenment on chemical fertilizer reduction in wheat production in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(23): 4835–4854.
- [39] 田洪涛, 陈闯, 张越, 等. 玉米秸秆腐解及养分释放特性研究[J]. 农业与技术, 2025, 45(6): 50–53.
- Tian H T, Chen C, Zhang Y, *et al.* Research on the decomposition and nutrient release characteristics of corn straw[J]. *Agriculture and Technology*, 2025, 45(6): 50–53.
- [40] 李然, 徐明岗, 孙楠, 等. 不同碳氮比下秸秆腐解与养分释放的动力学特征[J]. 中国农业科学, 2023, 56(11): 2118–2128.
- Li R, Xu M G, Sun N, *et al.* Dynamics characteristic of straw decomposition and nutrient release under different C/N ratio[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(11): 2118–2128.
- [41] 王玉龙, 曾豫, 涂炜, 等. 不同作物秸秆还田腐解对土壤养分及微生物群落结构的影响[J/OL]. 中国农业科技导报(中英文). [2025-08-06]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3900.S.20250805.1556.006>.
- Wang Y L, Zeng Y, Tu W, *et al.* Impact of straw returning and decomposition from different crops on soil nutrients and microbial community structure[J/OL]. *Journal of Agricultural Science and Technology*. [2025-08-06]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3900.S.20250805.1556.006>.
- [42] 赵庆雷, 杨军, 王瑜, 等. 水肥调控对水稻季小麦秸秆腐解及养分释放的影响[J]. 山东农业科学, 2025, 57(9): 111–118.
- Zhao Q L, Yang J, Wang Y, *et al.* Effects of water and fertilizer regulation measures on decomposition and nutrient release of wheat straw in rice season[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2025, 57(9): 111–118.
- [43] 李泽毅, 马玉洁, 付鑫, 等. 秸秆还田方式配施氮肥对玉米秸秆腐解特征及土壤有机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024, (10): 95–104.
- Li Z Y, Ma Y J, Fu X, *et al.* Effects of straw returning methods combined with nitrogen fertilizer on decomposition characteristics of maize straw and soil organic carbon[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024, (10): 95–104.

- [44] 李小针, 牛毅恒, 孙艳稳, 等. 小麦秸秆腐解复合菌群的构建及其腐解特征[J]. 应用与环境生物学报, 2025, 31(9): 1351–1361.
Li X Z, Niu Y H, Sun Y W, *et al.* Construction and decomposition characteristics of wheat straw decomposition microbial consortium [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2025, 31(9): 1351–1361.
- [45] 尹英杰, 商建英. 农作物秸秆腐解规律及其可溶性有机质特征[J]. 土壤学报, 2025, 62(3): 692–704.
Yin Y J, Shang J Y. The decomposition characteristic of crop straws and their released dissolved organic matter properties[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(3): 692–704.
- [46] 李昌明, 王晓玥, 孙波. 不同气候和土壤条件下秸秆腐解过程中养分的释放特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1206–1217.
Li C M, Wang X Y, Sun B. Characteristics of nutrient release and its affecting factors during plant residue decomposition under different climate and soil conditions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(5): 1206–1217.
- [47] 陈曦. 淹水和好气条件下腐解秸秆的碳氮形态变化及其对土壤有机碳组成与微生物群落的影响[D]. 安徽合肥: 安徽农业大学博士学位论文, 2021.
Chen X. Transformation of carbon and nitrogen forms in decomposed crop straw under anaerobic and aerobic condition as well as its effect on SOC composition and microbial community[D]. Hefei, Anhui: PhD Dissertation of Anhui Agricultural University, 2021.
- [48] 李阳阳, 陈帅民, 徐铭鸿, 等. 腐解菌剂耦合尿素对水稻秸秆腐解率及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2025, 41(9): 18–24.
Li Y Y, Chen S M, Xu M H, *et al.* Effects of microbial product coupling urea on straw decomposition rate and yield of rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2025, 41(9): 18–24.
- [49] 严啟蕾. 不同气候区玉米秸秆腐解养分释放特性及土壤养分变化规律 [D]. 辽宁沈阳: 沈阳农业大学硕士学位论文, 2024.
Yan Q L. Nutrient release characteristics and soil nutrient variation of maize straw decay in different climatic regions[D]. Shenyang, Liaoning: MS Thesis of Shenyang Agricultural University, 2024.
- [50] 赵文山, 王莉杰, 蒋浩然, 等. 不同秸秆还田方式下复合菌剂M44对寒旱区秸秆的促腐机制及培肥效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(9): 1738–1751.
Zhao W S, Wang L J, Jiang H R X, *et al.* Mechanisms of microbial agent M44 for enhancing straw decomposition and soil fertility under different straw returning methods in a cold and arid region[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2025, 31(9): 1738–1751.
- [51] 贾瑞峰, 丛日环, 徐志宇, 等. 秸秆还田技术改善土壤理化性质提高作物产量的Meta分析[J]. 农业工程学报, 2025, 41(4): 80–89.
Jia R F, Cong R H, Xu Z Y, *et al.* Meta analysis of straw returning technology to improve soil physicochemical properties and increase the yield of main cereal and oil crop[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(4): 80–89.
- [52] 周影, 王琳, 魏启舜, 等. 紫云英联合稻秸还田下化肥减量对水稻生长、产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023, (1): 149–154.
Zhou Y, Wang L, Wei Q S, *et al.* Effects of chemical fertilizer reduction after milk vetch combined with rice straw returning on rice growth, yield and quality[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023, (1): 149–154.
- [53] 葛新成, 冯尚宗, 顾召帅, 等. 小麦和玉米秸秆全量还田替代化肥潜力测算[J]. 农业科学研究, 2024, 45(2): 43–50.
Ge X C, Feng S Z, Gu Z S, *et al.* Potential of replacing synthetic fertilizer under wheat and corn straw returning in Shandong Province [J]. Journal of Agricultural Sciences, 2024, 45(2): 43–50.
- [54] 郭莹莹. 东北地区水稻产量差及资源利用效率分析[D]. 辽宁沈阳: 沈阳农业大学硕士学位论文, 2023.
Guo Y Y. Analysis of rice yield gaps and resource utilization efficiency in northeast China[D]. Shenyang, Liaoning: MS Thesis of Shenyang Agricultural University, 2023.
- [55] 杨晓菲, 焦悦莹, 魏钰, 等. 不同还田模式下玉米秸秆的腐解特征及对土壤养分的影响[J]. 陕西农业科学, 2025, 71(4): 52–56.
Yang X F, Jiao Y Y, Wei Y, *et al.* Decomposition characteristics of maize stover and its effects on soil nutrients under different returning modes[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2025, 71(4): 52–56.
- [56] 张美薇, 韩天富, 柳开楼, 等. 秸秆还田条件下高氮低钾型复合肥配施钾肥对双季稻产量和养分积累量的影响[J]. 土壤, 2025, 57(3): 518–523.
Zhang M W, Han T F, Liu K L, *et al.* Effects of high-nitrogen and low-potassium compound fertilizer combined with potassium fertilizer on yield and nutrient accumulation of double-cropping rice under straw returning condition[J]. Soils, 2025, 57(3): 518–523.
- [57] 李心月, 王杰, 鞠梦倩, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对土壤速效钾和水稻产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2025, (3): 184–194.
Li X Y, Wang J, Ju M Q, *et al.* Effects of different tillage methods and straw returning treatments on soil available potassium and yield of rice[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2025, (3): 184–194.
- [58] 牛菁. 中国稻秸不同利用模式的碳足迹和经济效益研究[D]. 辽宁沈阳: 沈阳农业大学硕士学位论文, 2025.
Niu J. Carbon footprint and economic benefits of different utilization models of rice straw in China[D]. Shenyang, Liaoning: MS Thesis of Shenyang Agricultural University, 2025.
- [59] 宣泽鹏, 冯慧瑶, 陈美淇, 等. 秸秆还田配施化肥对土壤生态系统多功能性的影响[J]. 中国农业科学, 2025, 58(14): 2821–2837.
Xuan Z P, Feng H Y, Chen M Q, *et al.* Effects of straw returning combined with chemical fertilizer on soil ecosystem multifunctionality [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(14): 2821–2837.
- [60] 戴相林, 孙建平, 马瑞萍, 等. 滨海盐渍水稻田秸秆还田、氮肥减施及秸秆腐熟剂的优化组合研究. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(5): 956–971.
Dai X L, Sun J P, Ma R P, *et al.* Optimum combination of straw returning, nitrogen reduction and straw-decomposing inoculants in coastal saline paddy soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2025, 31(5): 956–971.
- [61] 杜光辉, 吕玉虎, 刘耀, 等. 高粱秸秆还田配施腐熟剂对秸秆腐解、小麦产量及土壤肥力的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(11): 255–260.
Du G H, Lü Y H, Liu Y, *et al.* Effects of sorghum straw returning with composting agents on straw decomposition, wheat yield, and soil fertility[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53(11): 255–260.