池华聚,张韦柏,刘铮,等.中国农作物秸秆肥料化利用的碳减排潜力估算[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(5):100-111.
Chi H J, Zhang W B, Liu Z, et al. Estimation of carbon emission reduction potential from fertilized utilization of crop straw in China[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(5):100-111.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202501016

中国农作物秸秆肥料化利用的碳减排潜力估算

池华聚[1],张韦柏[2],刘铮[3],刘欣宇[3,4*]

(1.新疆理工学院"两山"理论与南疆高质量绿色发展研究中心,新疆 阿克苏 843100;2.西南财经大学 经济学院,四川 成都 611130;3.辽宁省农业科学院 农村经济研究所,辽宁 沈阳 110161;4.苏州市上辽现代农业发展有限公司,江苏 苏州 215335)

摘 要:[目的]秸秆肥料化利用是实现农业绿色发展和减碳目标的重要途径,其碳减排潜力对我国"双碳"目标具有重要意义。然而,不同地区的资源禀赋和利用水平存在明显差异,使得秸秆肥料化利用的碳减排潜力呈现复杂的空间格局。本研究旨在系统分析我国秸秆资源总量、养分资源总量及秸秆肥料化利用碳减排潜力的时空演变特征,并揭示其地区差异、不平衡性及空间相关性,为优化秸秆资源化利用政策和实现全国碳减排目标提供科学依据。[方法]基于2014—2023年31个省(自治区、直辖市)的农作物产量数据,结合草谷比系数及养分含量比例,测算秸秆资源及其养分总量;利用碳减排系数估算秸秆肥料化利用的碳减排潜力。同时,采用泰尔指数定量分析地区间及地区内的不平衡性;通过莫兰指数和局部空间自相关分析碳减排潜力的空间相关性和聚集模式,揭示地区差异特征和动态演变规律。[结果]我国秸秆资源总量在2014—2023年间总体稳定,东北和中部农业主产区的秸秆资源最为丰富,东部和部分西部地区相对较少。秸秆肥料化利用的碳减排潜力逐年增长,总量从2014年的1.81×10^7 t提升至2023年的2.00×10^7 t,其中氮素养分贡献率最高,约占总减排量的85%。泰尔指数分析显示,全国范围内的地区差异有所缩小,但东部地区的内部不平衡性依然显著。全局莫兰指数表明碳减排潜力具有显著的空间集聚性,且主要呈现"高—高"集聚和"低—低"集聚模式。东北和中部地区长期保持"高—高"集聚,黑龙江、吉林、江苏、山东等省份表现出强劲的碳减排潜力,而东部沿海及部分西部地区如北京市、上海市、青海省等则表现为"低—低"集聚,潜力较低。局部空间自相关分析进一步揭示了部分省份的动态变化,如辽宁省由"低—高"转变为"高—高",江西省则由"高—低"转变为"低—低"。[结论]本研究揭示了我国秸秆肥料化利用碳减排潜力的时空分布规律及地区差异,表明政策和技术推广对碳减排效益的地区提升具有重要作用。东北和中部地区的秸秆资源化利用水平需进一步巩固,而东部和西部低值区则需加大资源优化配置和技术支持力度,以缩小地区间差距,提升全国范围内碳减排潜力的均衡性。未来应通过强化地区协作与政策引导,推动全国秸秆资源化利用格局的优化,为实现农业绿色发展和"双碳"目标提供有力支持。

关键词:秸秆; 资源化利用; 碳减排; 泰尔指数; 空间自相关
中图分类号:S476 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-8151(2025)05-0100-12

Estimation of carbon emission reduction potential from fertilized utilization of crop straw in China

Chi Huaju[1], Zhang Weibo[2], Liu Zheng[3], Liu Xinyu[3,4*]

(*1. "Two Mountains" Theory and High-Quality Green Development Research Center, Xinjiang Institute of Technology, Aksu 843100, China; 2. College of Economics, Southwestern University of Finance and Economics, Chengdu 611130, China; 3. Institute of Rural Economics, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China; 4. Shangliao Modern Agricultural Development Co., Ltd., Suzhou 215335, China*)

Abstract:[Objective]Utilizing straw as fertilizer is an important approach for achieving green agricultural development and car-

收稿日期:2025-01-12 **修回日期**:2025-03-28
基金项目:新疆维吾尔自治区高校科研基本业务费科研项目(XJEDU2024J135)
作者简介:池华聚(ORCID:0009-0003-9096-5219),硕士,讲师,研究方向:农业绿色发展,E-mail:hjuchi@163.com
*通信作者:刘欣宇(ORCID:0009-0006-8032-5404),硕士,助理研究员,E-mail:liuxinyu@slass.cn

bon reduction goals. Its potential for carbon emission reduction plays a critical role in China's "dual carbon" targets. However, significant differences in regional resource endowments and utilization levels have led to a complex spatial distribution of this potential. This study aimed to systematically analyze the spatiotemporal evolution of China's total straw resources, nutrient resources, and associated carbon emission reduction potential from straw fertilizer utilization. Furthermore, it investigated regional disparities, imbalances, and spatial correlations to provide scientific support for optimizing straw resource utilization policies and achieving national carbon reduction targets. [Methods]Based on crop production data from 31 provinces in China from 2014 to 2023, total straw resources and nutrient content were calculated using straw-to-grain ratios and nutrient coefficients. Carbon emission reduction potential was estimated using established carbon reduction factors. The Theil index quantified inter- and intra-regional imbalances, while global and local Moran's I index analyzed spatial correlations and clustering patterns of carbon emission reduction potential. [Results]From 2014 to 2023, China's total straw resources remained stable, with the highest abundance observed in northeastern and central agricultural regions, while eastern coastal and some western regions showed relatively lower levels. The carbon emission reduction potential of straw fertilizer utilization increased annually, rising from 18.15 million tons in 2014 to 20.00 million tons in 2023. Nitrogen-based nutrients contributed the most significantly, accounting for approximately 85% of the total reduction. Theil index analysis indicated narrowed regional disparities nationwide, although imbalances within eastern regions remained significant. Global Moran's I index results revealed significant spatial clustering of carbon emission reduction potential, primarily characterized by "high-high" and "low-low" clustering patterns. Northeastern and central regions consistently demonstrated "high-high" clustering, with provinces such as Heilongjiang, Jilin, Jiangsu, and Shandong exhibiting strong carbon reduction potential. In contrast, eastern coastal and some western provinces, such as Beijing, Shanghai, and Qinghai, displayed "low-low" clustering with limited potential. Local spatial autocorrelation analysis further identified dynamic provincial transitions, such as Liaoning shifting from "low-high" to "high-high," and Jiangxi transitioning from "high-low" to "low-low". [Conclusion]This study revealed the spatiotemporal distribution and regional disparities in carbon emission reduction potential from straw fertilizer utilization in China, highlighting the importance of policies and technological promotion in enhancing regional carbon reduction efficiency. While straw resource utilization in northeastern and central regions required further consolidation, eastern and western low-potential areas need improved resource allocation and technical support to narrow regional gaps and achieve balanced national carbon reduction potential. Future efforts should prioritize regional collaboration and policy guidance to optimize straw resource utilization, thereby supporting China's green agricultural development and "dual carbon" goals.

Keywords: Straw, Resource utilization, Carbon emission reduction, Theil index, Spatial autocorrelation

农作物秸秆是农业生产过程中的主要副产物,同时也是一种重要的可再生生物质资源[1]。传统的秸秆处理方式主要包括直接焚烧和堆积腐烂,然而,直接焚烧会释放大量CO和苯并芘等强致癌物,导致区域性雾霾并增加温室气体排放,例如河北省2014年的秸秆焚烧对当地的$PM_{2.5}$日均浓度贡献占比高达21.0%[2]。同时,焚烧产生的高温会破坏土壤表层微生物群落结构,使得土壤有机质减少11.0%~22.1%[3]。堆积腐烂的方式也会占用一定的土地资源,其释放的甲烷等温室气体也会对环境造成不利的影响。因此,通过科学方法进行农作物秸秆资源化利用显得尤为必要。

随着农业集约化进程的加快,过量使用化肥和不合理的农业管理措施导致农业面源污染问题日益严重,关于各地区水体富营养化、土壤退化等相关报道屡见不鲜[4-5]。因此,我国于2015年正式提出了化肥农药的减施计划。自此我国的化肥使用量逐年下降,农业面源污染状况得到了有效的遏制[6]。至2022年,因使用化肥而造成的农业面源污染排放总量已经下降至5.59×10^5 t,相对于2012年下降了32.81%[7]。同时为了避免因化肥减施对农作物产量造成不良影响,各地区积极进行有机肥的推广。秸秆由于富含有机质和植物生长所需的多种营养元素,向来被认为是良好的有机肥原料。如能有效进行肥料化利用,不仅可以减少农业生产过程中化肥的使用强度,改善土壤结构,提高土壤肥力,对于减少农业面源污染物的排放也有着重要的意义[8-9]。

当前秸秆的肥料化利用方式主要包括直接还田、生物炭还田、制备堆肥、制备颗粒肥料和配制混合基质等,各种利用方式虽然在适用性、成本、技术复杂性和环境效益上存在差异,但均在不同

程度上实现了对化肥的部分替代[10-12]。除了减少农业面源污染排放之外,秸秆以肥料的形式回归土壤也有助于促进农业生产过程中的固碳减排。大量研究表明,有机肥与化肥配施相对于单施化肥能够更好地提升土壤有机碳的含量,这不仅是因为有机肥中的有机碳直接投入土壤,也是因为有机肥与化肥配施更好地促进了植物根系的发育,使得土壤中的残茬量大幅度提升[13]。同时,化肥的减施也将显著降低农业碳排放,2022年我国农业碳排放总量为8.99×10^7 t,其中因施用化肥而造成的碳排放便高达4.52×10^7 t,占农业碳排放总量的50.23%[14]。由此可见,农作物秸秆肥料化利用对于实现农业碳中和具有重要意义。因此,本研究利用31个省(自治区、直辖市)的统计数据对我国的农作物秸秆资源总量进行估算,进而测算农作物秸秆的养分利用能力,解析秸秆养分替代化学肥料的碳减排潜力,为实现农业高质量绿色发展提供理论支持。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究所收集的原始数据包括农作物产量、化肥施用量、农作物播种面积和园地面积,均来自《中国统计年鉴》(https://data.stats.gov.cn/index.htm)和《中国农村统计年鉴》(http://cnki.nbsti.net),数据时间跨度为2014年至2023年。

1.2 秸秆养分资源总量估算

利用草谷比系数和作物经济产量进行秸秆产量的测算,秸秆的养分资源量则根据秸秆产量与秸秆中所包含的养分含量关系得出,具体参数详见表1[15]。本研究主要测算秸秆中大量营养元素即氮、磷和钾的养分含量。计算公式为:

$$M_{t-dry}=\sum_{i}^{n}(C_i\times R_i) \tag{1}$$

$$M_{tN}=M_{t-dry}\times N_i \tag{2}$$

$$M_{tP_2O_5}=M_{t-dry}\times P_i\times 2.29 \tag{3}$$

$$M_{tK_2O}=M_{t-dry}\times K_i\times 1.20 \tag{4}$$

式中,M_{t-dry}、M_{tN}、$M_{tP_2O_5}$和M_{tK_2O}分别为秸秆产量、秸秆氮养分资源量、秸秆磷养分资源量和秸秆钾养分资源量;C_i为第i种作物的经济产量,R_i为第i种作物的秸秆系数;N_i、P_i和K_i分别为第i种作物秸秆中氮、磷和钾的干基养分含量占比;2.29和1.20分别为单质磷和单质钾换算为P_2O_5和K_2O的系数。

表1 不同农作物草谷比系数及干基养分含量占比

Table 1 Straw to grain ratio and dry-basis nutrient content proportions of different crops

作物 Crop	草谷比系数 Straw coefficient	氮/% N	磷/% P	钾/% K
水稻 Rice	1.01	0.91	0.13	1.89
小麦 Wheat	1.37	0.65	0.08	1.05
玉米 Maize	1.10	0.92	0.15	1.18
豆类 Soybean	1.44	1.81	0.20	1.17
薯类 Potato	0.77	1.25	0.15	1.42
棉花 Cotton	3.10	1.24	0.15	1.02
花生 Peanut	1.26	1.82	0.16	1.09
油菜 Rape	2.71	0.87	0.14	1.94
甘蔗 Sugarcane	0.10	1.10	0.14	1.10

1.3 秸秆替代化肥碳减排潜力测算

为量化秸秆肥料化利用替代化肥施用对种植业碳排放的减排潜力,本研究以31个省(区、市)的秸秆产量为基础,通过折算其养分资源总量,分析秸秆替代化肥施用后碳排放的变化。通过计算施用化肥导致的碳排放与被秸秆替代的化肥碳排放之间的差值,量化秸秆肥料化利用的减排效益,计算公式为:

$$C_{F-S}=C_F-C_S \tag{5}$$

$$C_F=\sum F_{ij}\times q_i \tag{6}$$

$$C_S=\sum C_{ij}\times q_i \tag{7}$$

式中,C_{F-S}代表秸秆肥料化利用的碳减排潜力,C_F代表施用化肥导致的总碳排放量,C_S代表秸秆替代化肥后所减少的碳排放量。F_{ij}代表j省(区、市)i类化肥的实际施用量,C_{ij}代表j地区秸秆中可代替i类化肥的养分资源总量,q_i代表i类化肥的碳排放系数。本研究中,氮、磷、钾肥的碳排放系数分别

设为2.116、0.636、0.180[16]。

1.4　秸秆肥料化利用碳减排时空演变特征

为量化31个省(区、市)秸秆肥料化利用碳减排潜力的地区差异,本研究采用泰尔指数进行分析。泰尔指数是一种基于信息熵的统计指标,用于衡量数据分布的不均衡性[17]。通过分解总差异,可以进一步分析地区间和地区内的差异来源,为理解秸秆肥料化利用碳减排潜力的空间分布特征提供理论依据。

总泰尔指数公式为:

$$T=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{y_i}{\bar{y}}\ln\frac{y_i}{\bar{y}}\right)=T_Q+T_D \tag{8}$$

式中,T表示总泰尔指数,反映所有省(区、市)秸秆肥料化利用碳减排潜力分布的不均衡性;N为省(区、市)总数;y_i为第i个省(区、市)的秸秆肥料化利用碳减排潜力;$\bar{y}$为所有省(区、市)秸秆肥料化利用碳减排潜力的平均值。泰尔指数越大,表示分布越不均衡。泰尔指数可进一步分解为地区间差异(T_Q)和地区内差异(T_D)2部分,用以分析差异来源。

地区间差异公式为:

$$T_Q=\sum_{r=1}^{R}\frac{N_r}{N}\frac{\overline{y_r}}{\bar{y}}\ln\frac{\overline{y_r}}{\bar{y}} \tag{9}$$

式中,T_Q表示地区间差异,反映不同地区平均秸秆肥料化利用碳减排之间的差异;R为地区数;N_r为第r个地区的省(区、市)数量;$\overline{y_r}$为第r个地区的平均秸秆肥料化利用碳减排值。

地区内差异公式为:

$$T_D=\sum_{r=1}^{R}\frac{N_r}{N}T_r \tag{10}$$

式中,T_D表示地区内差异,反映每个地区内秸秆肥料化利用碳减排分布的不均衡性;T_r为第r个地区的泰尔指数,计算方法与总泰尔指数相同。

1.5　空间自相关分析

为了探索秸秆肥料化利用碳减排潜力的空间分布特征及其地区聚集性,本研究采用空间自相关分析方法,包括全局空间自相关和局部空间自相关分析。空间自相关分析可通过定量测度秸秆肥料化利用碳减排潜力在空间上的相关性,揭示其空间分布规律及地区差异[18]。

1.5.1　全局空间自相关分析

全局空间自相关使用全局莫兰指数进行测算,评估秸秆肥料化利用碳减排潜力在全国范围内的整体空间分布模式。全局莫兰指数的计算公式为:

$$I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{11}$$

式中,I为全局莫兰指数;n为研究单元即省(区、市)的数量;Wij为空间权重矩阵,表示单元i和j之间的空间邻接关系;x_i和x_j分别为第i和j个单元的秸秆肥料化利用碳减排潜力;$\bar{x}$为所有单元秸秆肥料化利用碳减排潜力的平均值。I的取值范围为[-1,1]:当I>0时,表示秸秆肥料化利用碳减排潜力在空间上具有正相关性(即相似值在空间上聚集);当I<0时,表示空间上具有负相关性(即不同值聚集);当I=0时,表示随机分布。

1.5.2　局部空间自相关分析

为了进一步揭示空间异质性并识别特定地区的空间相关模式,本研究采用局部空间自相关分析,利用局部空间自相关指数评估地区内秸秆肥料化利用碳减排潜力的空间相关性。局部空间自相关指数的计算公式为:

$$I_i=\frac{n(x_i-\bar{x})\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{12}$$

其中,I_i为第i个单元的局部空间自相关指数。I_i>0时,表示该单元周围地区具有正空间相关性,包括“高-高”聚集(高碳减排潜力地区聚集)和“低-低”聚集(低碳减排潜力地区聚集);I_i<0时,表示负空间相关性,包括“高-低”聚集和“低-高”聚集,反映邻近地区之间存在显著的碳足迹差异。

1.6　研究区域划分

本文的研究范围为中国31个省(区、市),出于数据的可获得性,研究范围未包含澳门特别行政区、香港特别行政区和台湾地区。根据《国务院关

于促进区域协调发展的若干意见》(国发〔2018〕8号),本研究采用三级经济梯度划分框架,将31个省(区、市)划分为东部地区、中部地区和西部地区。其中东部地区包含京津冀(北京、天津、河北)、长三角(上海、江苏、浙江)、珠三角(广东)三大城市群,以及辽宁、福建、山东、海南共11个省级单元。该地区以不足全国12%的国土面积贡献了38.6%的农业产值,具有高度集约化、市场化的现代农业特征。中部地区涵盖山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南8省,是我国粮食安全战略核心区,承载全国31.7%的耕地资源和45.3%的粮食总产量。西部地区包含内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆12省区,拥有全国68%的森林面积和79%的草原面积。

1.7 数据处理

利用Excel 2020软件整理原始数据并进行运算,图片绘制通过Origin 2021 pro软件完成。

2 结果与分析

2.1 中国秸秆资源总量

从2014年至2023年,中国各省(区、市)秸秆总产量呈现明显的时空分布特征(图1)。总体来看,北方地区的黑龙江、河南、山东等农业大省的秸秆产量长期保持在较高水平,尤其是黑龙江和河南,其秸秆年产量在这10年间内均处于全国前列,年均产量均超过8.00×10^7 t。相比之下,东部沿海的上海、海南等地秸秆产量较低,年均产量不足5.00×10^6 t。这表明,中国秸秆产量的空间分布与农业种植面积密切相关,耕地资源丰富的地区秸秆产量更高。

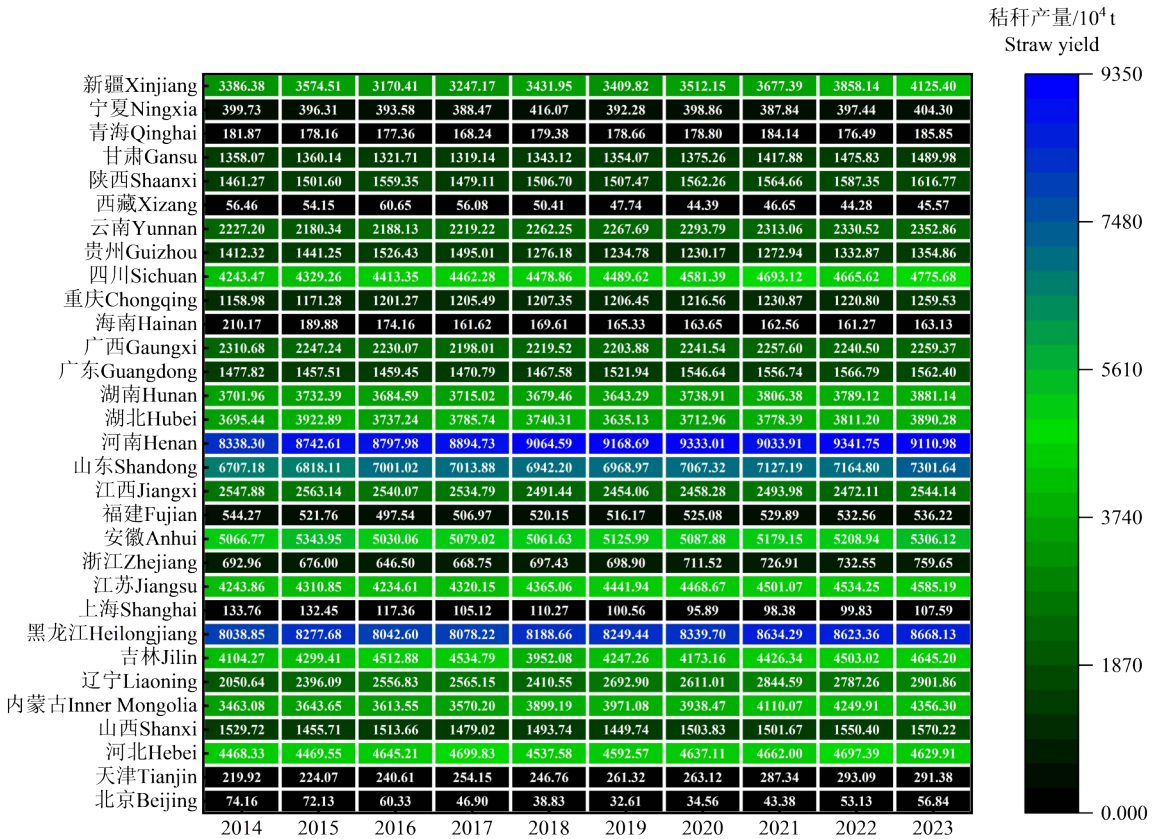


图1 2014-2023年中国31省份秸秆产量

Fig.1 Straw yield of 31 provinces in China (2014-2023)

从时间趋势来看,中国秸秆产量在2014年至2023年间总体呈现出波动变化的态势。部分地区如黑龙江、河南、山东等地,秸秆产量呈现小幅度增长趋势。例如,黑龙江的秸秆产量从2014年的8.04×10^7 t增长到2023年的8.67×10^7 t,年均增长0.8%。与此同时,河南的产量虽然在2021年出

现一定回落,但整体仍保持较高水平,2023年达到9.11×10^7 t。一些地区的秸秆产量呈下降趋势,如北京,其秸秆产量由2014年的7.42×10^5 t下降至2023年的5.68×10^5 t。这主要与城市化进程和耕地面积减少有关。新疆是增幅最大的地区之一,其秸秆产量由2014年的3.34×10^7 t增长至2023年的4.13×10^7 t,增幅达23.7%,这反映出新疆农业种植规模扩大。

东部地区如江苏、山东等地秸秆产量较高且相对稳定,2023年江苏和山东的秸秆产量分别为4.59×10^7 t和7.30×10^7 t,这些地区以小麦和稻米为主的粮食种植体系为秸秆产量提供了重要来源。中部地区如安徽、河南和湖北的秸秆产量也处于较高水平,整体保持稳定。以安徽为例,其秸秆产量从2014年的5.07×10^7 t增长至2023年的5.31×10^7 t,增幅为4.7%。西部地区如新疆和四川的秸秆产量逐年增长,新疆的年均增长尤为明显,这一趋势与西部农业种植结构调整和种植面积扩展密切相关。

2.2　中国秸秆养分资源总量

从2014年至2023年,中国秸秆养分资源总量呈现持续增长趋势,主要由氮、磷、钾3种养分构成,其总量从2014年的1.93×10^7 t增长至2023年的2.11×10^7 t,10年间增幅为9.05%(表2)。具体来看,氮养分从7.33×10^6 t增长至8.11×10^6 t,增幅为10.51%;磷养分从1.04×10^6 t增长至1.14×10^6 t,增幅为10.32%;钾养分从1.09×10^7 t增长至1.18×10^7 t,增幅为7.96%。3种养分的结构比例变化小,其中钾养分占总养分的56%~58%,氮养分占37%~39%,磷养分占比相对较小,仅5%左右。

从阶段性变化看,自2019年起,3种养分的增长速度加快,尤其是氮养分,从2019年的7.65×10^6 t增长至2023年的8.11×10^6 t,年均增长率达到1.44%。钾养分尽管增长幅度相对较小,但其绝对量仍明显提高。此外,变异系数分析表明,钾养分的年际波动最小,仅为2.36%,而磷养分为3.01%,氮养分为3.12%。

2.3　秸秆肥料化利用碳减排潜力

2014年至2023年,中国秸秆肥料化利用碳减排潜力逐年增长,由2014年的1.81×10^7 t增长至2023年的2.00×10^7 t,增幅为10.23%(图2)。从

表2　中国秸秆氮磷钾养分总量

Table 2　Total nutrient contents of N, P, and K in China's straw

项目 Items	氮养分总量/10^5 t Total N nutrients	磷养分总量/10^5 t Total P nutrients	钾养分总量/10^5 t Total K nutrients	总养分量/10^5 t Total nutrients
2014	73.35	10.36	109.34	193.05
2015	75.06	10.63	112.02	197.71
2016	74.90	10.59	111.41	196.90
2017	75.58	10.65	111.96	198.19
2018	75.63	10.64	111.63	197.91
2019	76.55	10.76	112.38	199.69
2020	77.54	10.88	113.63	202.05
2021	78.44	11.05	115.58	205.07
2022	79.77	11.22	116.52	207.52
2023	81.07	11.42	118.04	210.53
总计 Total	767.90	108.21	1132.50	2008.62
平均值 Average	76.79	10.81	113.25	200.86
增长率/% Growthrate	10.51	10.32	7.96	9.05
变异系数/% Variation coefficient	3.12	3.01	2.36%	2.68

秸秆养分资源来看,氮、磷、钾的碳减排贡献均有所提升,但不同养分的增幅和结构特点有所不同。从氮的碳减排量看,其由2014年的1.55×10^7 t增长至2023年的1.72×10^7 t,增幅为10.50%,占总碳减排量的比例始终保持在85%以上,是碳减排的主要贡献元素。磷的碳减排量由2014年的6.59×10^5 t增至2023年的7.27×10^5 t,增幅为10.33%,尽管其占比相对较小(约3%~4%),但对碳减排的稳定性起到了支撑作用。钾的碳减排量则由2014年的1.97×10^6 t增至2023年的2.12×10^6 t,增幅为7.96%,其占比在10%左右,展现了较强的补充作用。

从阶段性变化来看,2019年是一个重要的转折点,此后碳减排潜力的年均增长速度明显加快,尤其是氮的碳减排量,在2019年至2023年间的年均增长率达到1.44%,高于前5年的增长水平。这与近年来农业种植面积的扩大、秸秆资源化技术的普及以及政策支持力度的提升密切相关。与此同时,磷和钾的碳减排量也在此阶段表现出稳定增长趋势,进一步巩固了秸秆综合利用对碳减排

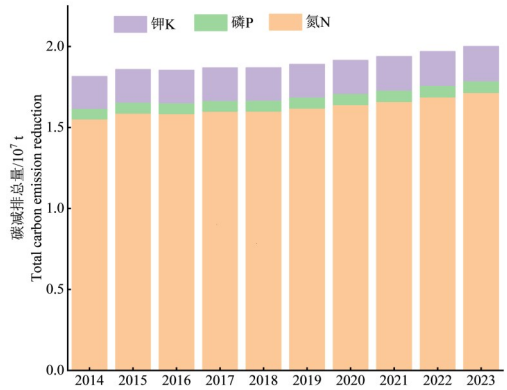


图2 2014-2023年中国秸秆肥料化利用碳减排潜力

Fig.2 Carbon emission reduction potential of fertilizer straw utilization in China (2014-2023)

的贡献。从结构上看,氮、磷、钾的碳减排量在总量中的比例长期保持稳定。这种稳定的比例结构表明,尽管不同元素的减排贡献率有所不同,但其整体协调性较高,为碳减排潜力的全面释放提供了有力支持。

2.4 秸秆肥料化利用碳减排潜力地区差异

从2014年至2023年,中国秸秆肥料化利用的碳减排潜力泰尔指数呈现小幅波动变化,总体稳定在3.84~3.90,表明各区域地区之间的碳减排潜力虽存在不平衡,但整体差异未明显扩大(表3)。2014年总泰尔指数为3.87,2023年为3.84,略有下降,表明秸秆肥料化利用带来的碳减排效益在全国范围内的分布更加均衡。

从地区视角来看,东部地区的泰尔指数始终保持在1.80以上,2023年为1.86,是全国最高的地区。东部地区内部碳减排的不平衡性较高可能与以下因素有关:一方面,东部地区工业化程度高、农业种植结构复杂,不同省份间的秸秆资源化利用率差异较大;另一方面,资源禀赋和政策支持力度的不同也导致了区域内碳减排效果的分化。中部地区泰尔指数长期维持在0.54~0.57,2023年为0.57,波动较小,表明中部地区秸秆肥料化利用的碳减排较为均衡,地区内部差异较小。西部地区的泰尔指数从2014年的1.48下降至2023年的1.41,降幅较大,是地区内碳减排不平衡性改善最为明显的地区。近年来,西部地区在农业绿色发展政策的推动下,大力推广秸秆资源化利用技术,提高了地区内碳减排的协调性[19]。

地区内泰尔指数始终维持在0.01,表明无论是东部、中部还是西部,地区内部秸秆肥料化利用的碳减排总量差异相对较小,地区内部的贡献对全国范围内的不平衡性影响较弱。全国范围内的不平衡性主要来源于地区间的差异,而这在很大程度上受到各地区农业资源禀赋、政策执行力度和经济发展水平的影响。

表3 中国秸秆肥料化利用碳减排潜力泰尔指数

Table 3 Theil index of carbon emission reduction potential of straw fertilizer utilization in China

年份 Year	东部地区 Eastern region	中部地区 Central region	西部地区 Western region	地区内 Intra region	总体 Total
2014	1.83	0.55	1.48	0.01	3.87
2015	1.86	0.54	1.50	0.01	3.90
2016	1.80	0.55	1.51	0.01	3.87
2017	1.80	0.54	1.52	0.01	3.88
2018	1.84	0.56	1.45	0.01	3.86
2019	1.80	0.56	1.47	0.01	3.85
2020	1.82	0.56	1.47	0.01	3.86
2021	1.81	0.56	1.45	0.01	3.83
2022	1.85	0.56	1.43	0.01	3.85
2023	1.86	0.57	1.41	0.01	3.84

从时间趋势来看,东部地区的泰尔指数总体略有上升,而西部地区则呈现显著下降,表明西部地区秸秆肥料化利用的碳减排效果在不断提高,地区内部协调性也在增强。这一变化与近年来西部地区秸秆综合利用项目的推广密切相关,如推广秸秆还田、堆肥等技术,以减少化肥使用量,实现碳减排效益的最大化[20]。

从全国范围来看,泰尔指数的下降反映了各地区间秸秆肥料化利用碳减排效益的分布更加均衡。2018年之后,总泰尔指数基本稳定在3.85左右,说明政策引导和技术推广效果逐步显现,各地区在秸秆资源化利用中的协同效应开始增强。

2.5 秸秆肥料化利用碳减排潜力全局空间自相关分析

根据2014-2023年的数据,秸秆肥料化利用碳减排潜力的莫兰指数总体呈现出稳定的正相关性,表明全国范围内的碳减排潜力存在一定程度的空间聚集特征(表4)。莫兰指数0.211~0.243,始终为正值,这说明在不同年份中,各省份的碳减排潜力呈现“高值集聚”或“低值集聚”的空间分布特征,并未表现出随机分布的特性。

表4　秸秆肥料化利用碳减排潜力全局莫兰指数

Table 4　Global Moran's I index of carbon emission reduction potential of straw fertilizer utilization

年份 Year	莫兰指数 Moran's I	标准差 Standard deviation	z	p
2014	0.218	0.116	2.119	0.017
2015	0.228	0.118	2.206	0.014
2016	0.243	0.124	2.331	0.01
2017	0.236	0.116	2.273	0.012
2018	0.211	0.12	2.066	0.019
2019	0.223	0.114	2.159	0.015
2020	0.211	0.115	2.065	0.019
2021	0.217	0.113	2.116	0.017
2022	0.218	0.115	2.118	0.017
2023	0.219	0.119	2.133	0.016

从莫兰指数的时间变化来看,2016年的莫兰指数最高,达到0.243,对应的z值为2.331,p值为0.01,显著性最高,表明这一年秸秆肥料化利用的碳减排潜力在空间上的集聚性最强。这可能与2016年全国范围内农业政策和秸秆综合利用技术推广的集中投入有关。2016年,中央一号文件专项部署秸秆综合利用技术研发,财政投入超10亿元推动143个试点县建设[21],农机购置补贴向秸秆粉碎还田设备倾斜(年度补贴4.57亿元),辽宁省盘锦市等地将秸秆腐熟剂纳入补贴范围。政策与技术推广的协同效应,导致东北等农业主产区形成"整县推进"的高效模式,显著强化了空间集聚特征。其后年份的莫兰指数有所回落,但仍保持在0.211~0.236内,说明碳减排潜力的空间聚集性特征具有较强的稳定性。标准差在分析期内保持相对稳定,波动范围为0.113~0.124,这表明莫兰指数的估计值可靠,且各年份的空间相关性差异较小。从z值和p值来看,所有年份的z值均在2.066~2.331之间,p值均小于0.05,达到统计学显著水平。

从空间分布特征的角度分析,莫兰指数的正值表明,高碳减排潜力的省份往往聚集在一起,而低碳减排潜力的省份也呈现空间集聚。这种空间相关性可能与农业生产模式、秸秆资源化利用率和政策支持力度的区域差异密切相关。例如,粮食主产区如东北地区和中部地区,得益于丰富的秸秆资源和政策扶持,其碳减排潜力较高,形成"高值集聚区";而部分西部和东部地区由于资源禀赋不足或利用率较低,可能成为"低值集聚区"。从趋势变化来看,2016-2023年,莫兰指数波动较小,表明碳减排潜力的空间格局相对稳定。然而,2018年和2020年的莫兰指数略低,为0.211,这可能与这些年份内农业种植面积和秸秆资源化利用效率的短期波动有关,但这种波动并未改变全国范围内总体的空间集聚特征。

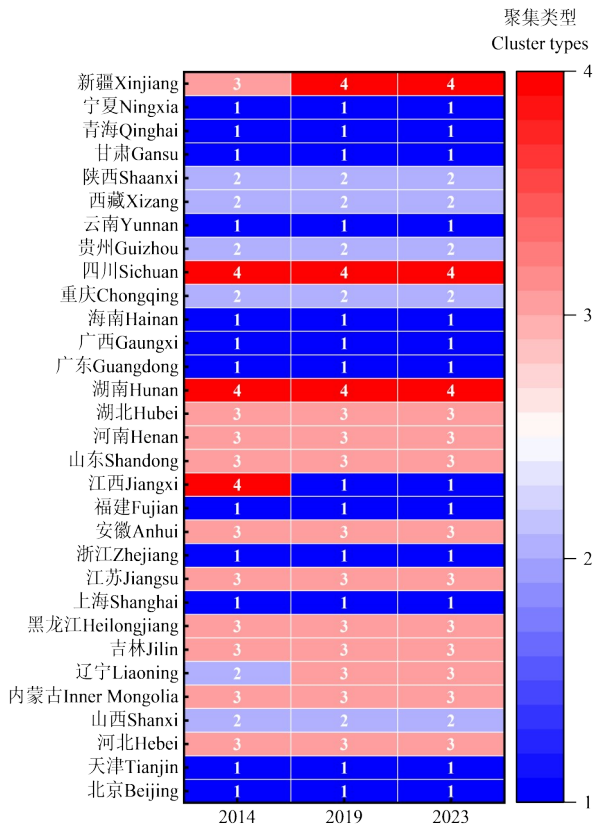
2.6　秸秆肥料化利用碳减排潜力局部空间自相关分析

局部空间自相关分析可揭示秸秆肥料化利用碳减排潜力在不同省份之间的空间关联模式及其演变规律。通过分析2014年、2019年和2023年的空间自相关类型,可观察到各省份碳减排潜力在"高-高"、"低-低"、"高-低"和"低-高"集聚模式中的分布特征(图3)。从2014年至2023年的局部空间自相关分析可见,全国秸秆肥料化利用碳减排潜力的空间格局相对稳定,但高-高集聚区域的范围更为集中,低-低集聚区域则保持扩散的特征。中部和东北地区(如河南、黑龙江、吉林)表现出较高的区域协调性,而东部发达地区和部分西部地区(如北京、青海)表现出较低的区域协同效应。

高-高集聚区域主要集中在农业资源丰富、秸秆资源化利用率较高的省份,包括河北、吉林、黑龙江、江苏、安徽、山东、河南、湖北等,在2014年、2019年和2023年均保持稳定的"高-高"集聚模式,表明这些地区秸秆资源化利用带来的碳减排潜力较高,且周边省份的碳减排潜力水平也相对较高。这种现象与这些地区农业种植规模大、政策支持力度强及技术推广水平高密切相关。例如,东北地区(如黑龙江、吉林)的粮食主产区特性决定了其秸秆资源丰富,同时技术推广也进一步提升了其资源利用率。

低-低集聚区域主要分布在经济发达但农业资源禀赋较弱的省份,如北京、天津、上海、浙江、福建、广东、广西、海南、宁夏、青海等。这些地区在2014年、2019年和2023年均表现出"低-低"集聚模式,反映出其秸秆肥料化利用的碳减排潜力较低,且周边地区的潜力水平也较低。这可能与这些区域农业种植面积有限、秸秆资源化利用率较低以及秸秆资源量本身较少有关。此外,这些地区可能更多关注工业领域的碳减排,农业领域的相关投入相对较少。

在局部空间模式演变中,部分地区的空间自相关类型发生了变化。例如,辽宁省从2014年的“低-高”转变为2019年和2023年的“高-高”模式。这可能与辽宁地区近年来农业绿色发展政策加强以及秸秆综合利用技术普及有关。江西省从2014年的“高-低”转变为2019年和2023年的“低-低”模式,表明其碳减排潜力下降,同时周边地区的潜力水平也较低。这可能与资源化利用技术推广不足或秸秆利用率下降有关。西部地区如重庆、贵州、西藏等长期维持“低-高”模式,这表明这些地区碳减排潜力较低,但周边地区潜力较高,可能与资源禀赋差异以及区域合作发展有关。新疆则长期处于“高-低”模式,这说明其秸秆资源化利用水平较高,但周边地区的利用率较低,表现出较大的区域差异性。



1~4分别代表“低-低”、“低-高”、“高-高”和“高-低”聚集。

The numbers of 1, 2, 3, and 4 represented "Low-Low" "Low-High" "High-High" and "High-Low" clustering, respectively.

图3 2014、2019和2023年秸秆肥料化利用碳减排潜力聚集类型

Fig.3 Cluster types of carbon emission reduction potential of straw fertilizer utilization in 2014, 2019, and 2023

3 讨论

作为农业生产过程中产生量最多的生物质废弃物,秸秆的资源化利用向来是农业科学领域的重要议题。当前业界关于秸秆的资源化利用相关研究中,肥料化利用始终为众多学者所青睐,具体的方式包括秸秆还田、秸秆覆盖、制备生物炭和有机肥等,均属将秸秆以有机的形式进行肥料化利用,使其重新参与农业生产和土壤循环[22-23]。例如刘阳等[24]通过全生命周期评价方法对生物炭在固碳封存过程中的固碳潜力和环境危害潜势进行了探讨与分析,研究表明每吨秸秆生物炭的制备及应用可减少二氧化碳当量排放5.50×10^{3} kg。秸秆资源化利用的碳减排效益具有多重环境正外部性,其一,通过替代传统焚烧处理,可规避露天焚烧产生的瞬时高密度碳排放;其二,长期秸秆还田可提升土壤固碳能力;其三,生物炭等稳定化利用方式形成的惰性碳库,其半衰期可达百年尺度,相较传统堆肥减排贡献程度更高。从碳中和战略视角,若将全国秸秆资源进行合理的肥料化利用,理论上可贡献我国农业部门碳减排目标的27.7%[25]。因此,精准核算秸秆资源总量不仅支撑碳减排潜力评估,更对优化农业减排路径具有决策参考价值。

关于秸秆资源总量的核算,不同的研究之间存在较大的差异,其主要原因是选取的农作物数量和草谷比系数不统一。杨传文等[26]采用分地区草谷比系数对1981-2020年13种农作物的秸秆资源总量进行了估算,得出2020年我国的农作物秸秆资源总量为7.72×10^{8} t。刘俊杰等[27]则采取全国统一草谷比系数对15种农作物进行估算,其估算的2020年农作物秸秆资源总量为8.00×10^{8} t。本研究出于秸秆可收集性选取9种主要农作物,并采用统一草谷比系数进行农作物秸秆资源总量的估算,结果显示2020-2023年的秸秆资源总量分别为8.30×10^{8}、8.46×10^{8}、8.55×10^{8}、8.67×10^{8} t。值得注意的是,秸秆资源总量的准确核算不仅是物质流分析的基础,更是评估其养分循环效能的前提条件。当前秸秆养分资源总量估算的研究大多聚焦于部分热点地区,如东北地区、黄河流域地区和长江中下游平原地区[28-30],或着重于某一类主要农作物的秸秆养分资源总量,如小麦、玉米和水稻等[31-33]。关于全国层面的秸秆养分资源总量大

多截止至2020年之前,难以反映当前我国秸秆养分资源总量现状。本研究结果显示,2023年我国农作物秸秆养分资源总量为2.11×10^7 t,其中钾元素占比最高,占秸秆养分资源总量的56.07%。根据国家统计局的资料,不计入复合肥的情况下,我国2023年农用化肥施用折纯量为2.62×10^7 t,其中氮肥1.60×10^7 t、磷肥0.54×10^7 t、钾肥0.48×10^7 t。可见,以我国当前农作物秸秆的养分总量,分别相当于2023年氮肥施用量的50.63%、磷肥施用量的20.37%和钾肥施用量的245.83%。其中秸秆钾养分含量尤为突出,已超过当年钾肥施用量的2.4倍。

化肥的施用是农业生产过程中碳排放的主要来源,秸秆肥料化利用可通过降低化肥的施用从而降低化肥的碳排放。当前学界普遍采用碳排放因子的方式进行化肥碳排放的核算,但涉及具体的氮肥、磷肥和钾肥则暂无明确的碳排放因子可供参考。因此,本研究参考陈舜等[16]的研究,以我国实际情况为出发点,核算氮肥、磷肥和钾肥制造过程中的碳排放,并以此推算秸秆肥料化利用的碳减排潜力。结果显示,秸秆肥料化利用碳减排潜力逐年提升,至2023年已达2.00×10^7 t。而经过我们的前期核算,2023年我国氮磷钾肥的总体碳排放为3.82×10^7 t(附表1)。从地区层面来看,如果将当地秸秆资源充分进行肥料化利用,则部分地区的碳减排潜力已经足以覆盖单一养分肥料的碳排放总量,最典型的便是黑龙江省。黑龙江省2023年施用氮肥所产生的1.61×10^7 t,该省秸秆如能完全肥料化利用则可实现1.94×10^7 t的碳减排(附表1)。此外,区域分布特点可能进一步影响碳减排总量的变化。例如,在氮肥需求较高的粮食主产区,秸秆肥料化利用可通过大幅减少化肥使用量,实现良好的碳减排效果。而钾、磷资源相对富集的地区,秸秆肥料化利用对碳减排的贡献可能更多体现在土壤养分平衡和农业生态环境改善方面。

通过泰尔指数分析可以发现,全国秸秆肥料化利用碳减排潜力的区域不平衡性在2014-2023年间略有下降,尤其是西部地区的不平衡性改善最为明显。然而,东部地区内部的不平衡性依然较高,这可能与该地区经济发展水平、农业结构多样性及资源分配不均有关。未来需在高值地区进一步提升资源利用效率,同时加强低值区域的技术推广和政策支持,以实现碳减排潜力的区域协调发展。全局和局部空间自相关分析结果表明,全国秸秆肥料化利用碳减排潜力具有显著的空间集聚特征。高值区主要集中在东北和中部的农业主产区,表现为"高-高"集聚模式,而低值区则主要分布在东部沿海和部分西部地区,呈现"低-低"集聚模式。局部空间自相关分析还揭示了一些动态变化特征,例如辽宁省由"低-高"模式逐步转变为"高-高"模式,说明政策和技术的实施对区域碳减排潜力提升具有明显促进作用。然而,一些地区如江西省由"高-低"模式转为"低-低"模式,显示了资源利用效率下降的潜在风险。未来在优化空间格局方面,需进一步加强地区间协作与联动,尤其是通过技术共享和政策协调,缩小不同地区间碳减排潜力差距,进而破解"公平-效率-排放"传导机制失衡,通过省际协作避免碳泄漏与产业转移风险,同时激活地区比较优势,构建东部技术赋能-西部资源支撑的协同减排网络。此外还可以维护生态产品价值实现的公平性,依托碳汇交易与生态补偿机制弥合城乡减排成本鸿沟[34]。未来空间格局优化需以"全国统筹"为原则,建立技术共享、配额置换、产业联动的地区减排共同体。

4　结论

本研究系统分析了我国秸秆资源总量、养分资源总量、秸秆肥料化利用碳减排潜力及其地区差异和空间分布特征。结果表明,我国秸秆资源量及其碳减排潜力在2014年至2023年间稳步提升,呈现出显著的地区差异和空间集聚特征。东北和中部地区作为农业主产区,碳减排潜力持续保持较高水平,表现为"高-高"集聚模式;而东部沿海及部分西部地区则受资源禀赋限制,碳减排潜力相对较低,呈现"低-低"集聚模式。泰尔指数分析显示,全国范围内区域差异有所缓解,但内部不平衡性依然存在。提升秸秆肥料化利用效率对我国农业绿色发展和碳中和目标的实现具有重要意义,未来需加强区域协作,优化资源配置,重点突破低值区技术瓶颈,以实现全国秸秆资源化利用效益的均衡提升,为农业领域的碳减排和生态可持续发展提供强有力的支持。

附加材料:附表1(2014-2023年秸秆肥料化利

用碳减排相关数据)见中国知网增强出版内容。

参 考 文 献

[1]Zhan Y H, Zhu J, Schrader L C, et al. Modeling and optimization of bioenergy production from co-digestion of poultry litter with wheat straw in anaerobic sequencing batch reactor: response surface methodology and artificial neural network[J].Applied Energy,2023,345:121373.

[2]周颖,张钰莹,邢晓帆,等.河北秸秆露天焚烧排放及其对京津冀地区空气质量影响[J].北京工业大学学报,2022,48(10):1056-1068.
Zhou Y, Zhang Y Y, Xing X F, et al. Impacts of emissions from crop residue open burning in Hebei on the air quality of the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Journal of Beijing University of Technology,2022,48(10):1056-1068.

[3]田国成,王钰,孙路,等.秸秆焚烧对土壤有机质和氮磷钾含量的影响[J].生态学报,2016,36(2):387-393.
Tian G C, Wang Y, Sun L, et al. Effects of wheat straw burning on content of soil organic matter, nitrogen, phosphorus, and potassium[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(2):387-393.

[4]Ma B , Karimi M S , Mohammed K S , et al. Nexus between climate change, agricultural output, fertilizer use, agriculture soil emissions: novel implications in the context of environmental management[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 450:141801.

[5]Zhu Y H,Shi Z M,Wang X Y, et al. Spatial-temporal evolution of ecological risks in a typical urban lake in Southwestern China [J].Journal of Cleaner Production, 2024,434:140273.

[6]崔元培,魏子鲲,王建忠,等."双减"背景下化肥、农药施用现状与发展路径[J].北方园艺, 2021(9):164-173.
Cui Y P, Wei Z K, Wang J Z, et al. Development status and path of application of chemical fertilizers and pesticides under the background of reduced[J]. Northern Horticulture, 2021(9): 164-173.

[7]田云,夏锐,张星琰.中国农业面源污染强度测算:时空分异、动态演进与空间集聚[J].环境科学,2025, 46(9): 5608-5618.
Tian Y, Xia R, Zhang X Y. Evaluation of China's agricultural non-point source pollution intensity: spatial and temporal differentiation, dynamic evolution and spatial agglomeration[J]. Environmental Science, 2025, 46(9): 5608-5618.

[8]Chen H Q,Hao Y N,Ma Y Q, et al. Maize straw-based organic amendments and nitrogen fertilizer effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen [J]. Geoderma, 2024, 443: 116820.

[9]Liu L, Cheng M, Jin J Y, et al. Effects of different nitrogen applications and straw return depth on straw microbial and carbon and nitrogen cycles in paddy fields in the cool zone[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1):6424.

[10]Huang Y Y, Yan Y Y, Ma Y, et al. The effect of low-temperature straw-degrading microbes on winter wheat growth and soil improvement under straw return [J]. Frontiers in Microbiology, 2024,15:1391632.

[11]Luo X X,Chen W J, Liu Q, et al. Corn straw biochar addition elevated phosphorus availability in a coastal salt-affected soil under the conditions of different halophyte litter input and moisture contents[J]. Science of the Total Environment,2024, 908:168355.

[12]Alixandre R D,Lima P M,Almeida T R,et al. Potential of coffee straw biochal as a substrate conditioner in seed lettuce and *Sorghum* germination and vigority[J]. Brazilian Journal of Biology,2024,83:e277437.

[13]刘欣宇,卢江,孟璇,等.不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析[J].环境科学,2023,44(8):4647-4654.
Liu X Y, Lu J, Meng X, et al. Analysis on change in soil organic carbon content of farmland in Yangtze River economic belt under different fertilizing measures [J]. Environmental Science,2023,44(8):4647-4654.

[14]Wu H, Yang Y, Shen Y. Agricultural carbon emissions in China: estimation, influencing factors, and projection of peak emissions[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2024, 33(4):4791-4806.

[15]Shao M Q. Straw biochar production and carbon emission reduction potential in the Yangtze River Economic Belt region [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2025, 34(3): 2349-2357.

[16]陈舜,逯非,王效科.中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J].生态学报,2015,35(19):6371-6383.
Chen S, Lu F, Wang X K. Estimation of greenhouse gases emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizers[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(19):6371-6383.

[17]刘铮,刘欣宇,潘荣光,等."双减"政策期间沈阳地区农药及化肥施用量与粮食产量的演变[J].辽宁农业科学,2023(1):8-12.
Liu Z, Liu X Y, Pan R G, et al. Evolution of pesticide and fertilizer application and grain yield in Shenyang during the 'double reduction' policy[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2023(1):8-12.

[18]Yang M, Chu J, Li Z Q, et al. An examination of regional variations in pesticide usage and grain yield in China before and after the double reduction policy's adoption[J].Polish Journal of Environmental Studies, 2023, 32(2):1887-1898.

[19]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.

[20]薛满峰,郑谦,杨静雯,等.我国农作物秸秆综合利用水平区域差异与动态演化分析[J].河北环境工程学院学报,2024,34(6):57-64.
Xue M F, Zheng Q, Yang J W, et al. Analysis regional differences and dynamic evolution of comprehensive utilization level of crop straw in China[J]. Journal of Hebei University of Environmental Engineering,2024,34(6):57-64.

[21]陈新建,付雨纯.中国农业绿色转型支持政策的演进轨迹、理

论逻辑——基于2004—2023年中央一号文件的文本分析[J].生态经济,2025,41(2):120-127.
Chen X J, Fu Y C. Evolutionary trajectory, theoretical logic and future directions of support policies for agricultural green transformation in China: a textual analysis of No. 1 central document from 2004 to 2023[J]. Ecological Economy, 2025, 41(2):120-127.

[22]Li L, Yang J K, Yu Y L, et al. Crop straw converted to biochar increases soil organic carbon but reduces available carbon[J]. European Journal of Agronomy, 2025, 164:127499.

[23]Ramírez D A, Hossain M M, Rahaman E H M S, et al. Potato production under zero tillage with rice straw mulching as a promissory technology to diversify rice-based systems in Southwest Coastal Bangladesh[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2025, 19:101603.

[24]刘阳,靳晨生,张海亚,等.秸秆生物炭的固碳减排潜力及其环境影响[J].中国环境科学,2024,44(1):396-403.
Liu Y, Jin C S, Zhang H Y, et al. Carbon sequestration and emission reduction potential of straw biochar and its environmental impacts [J]. China Environmental Science, 2024, 44(1):396-403.

[25]Lin B J, Cheng J, Duan H X, et al. Optimizing straw and nitrogen fertilizer resources for low-carbon sustainable agriculture[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2024, 209:107743.

[26]杨传文,邢帆,朱建春,等.中国秸秆资源的时空分布、利用现状与碳减排潜力[J].环境科学,2023,44(2):1149-1162.
Yang C W, Xing F, Zhu J C, et al. Temporal and spatial distribution, utilization status, and carbon emission reduction potential of straw resources in China [J]. Environmental Science, 2023, 44(2):1149-1162.

[27]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.

[28]魏玉杰,田俊影,蔡崇法.我国东北地区有机肥资源分布特征与养分利用潜力分析[J].农业资源与环境学报,2023,40(4):745-754.
Wei Y J, Tian J Y, Cai C F. Spatial distribution and nutrient utilization potential of organic fertilizer resources in the black soil region of northeast China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(4):745-754.

[29]李苏扬,匡远配.湖南省农作物秸秆资源量变化趋势及空间分布[J].湖南农业科学,2024(10):31-40.
Li S Y, Kuang Y P. Variation trends and spatial distribution of straw resources in Hunan Province [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2024(10):31-40.

[30]孙建飞,郑聚锋,程琨,等.基于可收集的秸秆资源量估算及利用潜力分析[J].植物营养与肥料学报,2018,24(2):404-413.
Sun J F, Zheng J F, Cheng K, et al. Estimate of the quantity of collectable straw resources and competitive utilization potential[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(2):404-413.

[31]武瑞娟,豆叶青.河南省主要农作物秸秆资源分布及资源化利用需求分析[J].可再生能源,2024,42(10):1289-1294.
Wu R J, Dou Y Q. Analysis of the distribution and resource utilization needs of main crop straw resources in Henan Province [J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(10): 1289-1294.

[32]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.

[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]张友国,白羽洁.区域协同低碳发展的基础与路径[J].China Economist, 2022, 17(2):69-92.
Zhang Y G, Bai Y J. Pathways of regionally coordinated low-carbon development in China [J]. China Economist, 2022, 17(2):69-92.

(编辑:郭玥微)