

两淮地区农林固废资源量时空特征及利用潜力评价

苏永东, 周育智, 刘英, 张旭阳, 龙林丽, 陈孝杨* (安徽理工大学地球与环境学院, 安徽淮南 232001)

摘要 为了优化秸秆资源化利用结构, 提高农林固废综合利用效益, 以两淮地区农林固废数据为基础, 估算常见农作物秸秆和林业剩余物资源量和资源密度, 分析秸秆和林业剩余物时空分布特征, 明确秸秆在肥料化、饲料化和基料化基本需求量, 评估未被利用秸秆资源利用潜力。结果表明, 两淮地区常见秸秆可回收资源量约为 2 000 万 t, 主要以小麦秸秆为主, 林业剩余物资源量约为 69.05 万 t。秸秆资源量在空间分布上差异明显, 水稻秸秆主要分布在两淮地区南部, 油料秸秆主要分布在东北部, 其余秸秆主要分布在中部, 秸秆肥料化、饲料化和基料化基本需求量分别为 780 万、288 万和 15 万 t。未被利用秸秆约为 220 万 t, 直接还田理论上可节约 1.71 万 t 氮肥、0.49 万 t 磷肥和 2.88 万 t 钾肥, 相当于淮南市单元素肥料年使用量的 42.40%, 用于直燃发电和热裂解炭化可产生约 580 亿 kW·h 电能, 相当于淮南市社会用电量的 46.15%, 可减排约 190 万 t 当量的 CO₂ 排放, 相当于淮南市 CO₂ 年排放量的 16.46%, 用于制作秸秆草砖和人造板材可节省约 1.3 万 m³ 土方量或 340 万 m³ 的木材。两淮地区秸秆资源量满足肥料化、饲料化和基料化需求, 应进一步提升秸秆回收利用效率, 优化收储体系, 降低秸秆收集成本, 增加秸秆在能源化和原料化领域利用效益。

关键词 农林固废; 资源量; 秸秆; 时空特征; 利用潜力

中图分类号 X 705 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)21-0067-07

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.21.018



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Temporal and Spatial Characteristics and Utilization Potential Evaluation of Agricultural and Forestry Solid Waste Resources in Lianghuai Area

SU Yong-dong, ZHOU Yu-zhi, LIU Ying et al (School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001)

Abstract To optimize the structure of straw resource utilization and improve the benefit of comprehensive utilization of agricultural and forestry solid waste, the study estimated the resource amount and density of common crop straw and forestry residues, and analyzed the temporal and spatial distribution characteristics of straw and forestry residues, and clarified the basic demand of straw in fertilizer, fodder and raw material, and evaluated the utilization potential of unused straw resources based on the data of agricultural and forestry solid wastes in Lianghuai area. The results showed that the recoverable resources of common straw were about 20 million tons, and the main component of straw was wheat straw, the resources of forestry residues were about 690 500 tons. There were obvious differences in the spatial distribution of straw resources. Rice straw was mainly distributed in the south of Lianghuai area, oil crop straw was mainly distributed in the northeast, and the other straw was mainly distributed in the middle. The basic demand of straw fertilizer, fodder and raw material were 7.8 million, 2.88 million and 150 000 tons, respectively. The unused straw was about 2.2 million tons. The nutrient contained in the unused straw were estimated to be 17.1 kiloton N, 4.9 kiloton of P₂O₅ and 28.8 kiloton K₂O, which was equivalent to 42.40% of the annual use of single element fertilizer in Huainan City. If the unused straw was used for combustion power generation and biomass pyrolysis, it could produce 58 billion kW·h of electric energy (accounting for 46.15% of the annual power consumption of Huainan City), and reduced the 1.9 million tons CO₂ emission, which was equivalent to 16.46% of the annual CO₂ emission of Huainan City. When used to make straw bricks and artificial plates, the unused straw could save about 13 thousand cubic meters of earthwork or 3.4 million cubic meters of wood. The amount of straw resources in the Lianghuai region can meet the needs of fertilizer, feed and base material. It is necessary to further improve the efficiency of straw recycling, optimize the collection and storage system, reduce the cost of straw collection, and increase the utilization efficiency of straw in the fields of energy and raw materials.

Key words Agricultural and forestry solid waste; Resource amount; Straw; Spatiotemporal characteristics; Utilization potential

我国每年都会产生大量农林固体废弃物, 农作物秸秆和林业生产剩余物为农林固废的主体, 具有可循环再生和资源量丰富的特点。据统计, 每年我国各类农作物秸秆总量约为 8.29 亿 t, 其中作为生物质可资源化利用约为 6.94 亿 t; 林业剩余物总量达 3.5 亿 t, 可资源化利用约为 960.4 万 t^[1]。秸秆和林业剩余物资源化、能源化利用潜力巨大, 近年来得到国家高度重视, 2021 年 3 月份国家发展和改革委员会出台《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》明确指出, 应大力推进秸秆综合利用, 推动秸秆综合利用产业提质增效。“五化”是目前农林固废的资源化利用主要途径, 其中秸秆利用方式主要以肥料化为主, 饲料化和能源化为辅,

而基料化和原料化利用率较低^[2]。随着相关政策和综合利用技术的同步实施, 大量秸秆得到有效利用, 秸秆乱堆放及露天焚烧等现象也得到很大改善^[3]。林业剩余物是林木生物质资源的重要组成部分, 目前我国在林木生物质利用方面尚处于初级阶段, 具有广泛的应用前景^[4]。了解林业剩余物资源量及分布情况, 有利于生物质资源研发利用。

目前, 已经有很多学者对秸秆资源量进行估算, 利用统计部门发布的农作物产量等相关信息, 结合草谷比、可回收系数计算出秸秆资源量, 以及对区域遥感数据解析, 结合调研提高数据精度等方式是常用估算方法。例如, 冉继伟等^[5]依据国家统计局年鉴资料基于草谷比和秸秆可回收系数, 对近 20 年我国 31 个省份农作物播种面积和秸秆资源量的时空分布特征进行了研究, 结果表明, 我国秸秆资源量主体是由水稻、小麦、玉米和大豆构成, 占全国总量的 82.3%~88.3%, 不同作物秸秆存在地域差异, 长江中下游、华北和东北地区主要以水稻、小麦和大豆秸秆资源为主, 玉米秸秆资源主要分

基金项目 工程院战略咨询项目(2021-DFZ-15); 安徽省重点研究与开发计划项目(S202104a06020064)。

作者简介 苏永东(1995—), 男, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 研究方向: 农业资源利用。* 通信作者, 教授, 博士, 博士生导师, 从事矿山环境治理与场地污染修复研究。

收稿日期 2022-02-05

布在华北和东北地区;Scarlat等^[6]结合土地覆盖和作物分布的地理空间数据,对欧洲36个国家8种农作物秸秆进行估算,生成了精度较高的秸秆空间分布图,估算出欧洲每年秸秆资源量在2.09亿~3.65亿t。刘之榆等^[7]采用Sentinel-1 SAR影像和Sentinel-2光学影像相关遥感技术实现了对梨树县玉米秸秆覆盖度大范围快速提取,结合雷达与光学遥感指数提升反演精度;王雪等^[8]利用MODIS卫星遥感影像时间序列数据和天地图遥感影像数据,对车门乡农作物秸秆量和空间分布进行研究,得出研究区域水稻小麦秸秆可回收资源量分别为1.27万和2.78万t,通过现场调研修正并提高数据精度。林业剩余物资源量常用剩余折算系数进行估算,例如,张卫东等^[9]将林业剩余物分类汇总,按照林业面积和株数结合折算系数、剩余物可利用系数,得出2013年我国林业剩余物资源量约为9.24亿t。

秸秆在资源化利用过程中,除了还田外,其余利用方式还需要对秸秆进行集中处理,由于秸秆资源具有量大、分布范围广、堆积密度低等特点,给秸秆收集、运输、储藏等方面工作带来不便。为了提高秸秆收运效率,优化秸秆资源配置,对一定区域范围内的秸秆种类、数量和分布情况进行详细的调查和估算显得尤为重要^[10]。此外,明确秸秆基本需求量和利用潜力,结合不同区县秸秆常见利用方式,因地制宜,不仅可以高效利用秸秆资源,避免浪费,而且可以让秸秆资源效益最大化。两淮地区是安徽粮食和秸秆主要产地,秸秆资源丰富^[11],秸秆主要利用方式包括机械还田、高温堆

肥、直燃发电、制作青贮饲料和食用菌基质等^[12]。该研究基于2016—2020年两淮地区年鉴农林业信息,首先根据草谷比和秸秆可回收系数来估算水稻、小麦、玉米、豆类、油料秸秆可回收资源量,根据林木剩余物折算系数,估算林业剩余物资源量;其次从区域差异、时空变化、资源密度分析农林固废时空特征,最后分析秸秆综合利用潜力,以期政府部门合理利用秸秆资源和制定相关政策提供可靠依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

两淮地区位于皖北,属于温带半湿润季风气候,年平均气温为15.5~16.6℃,年降雨量在522.5~698.4mm,无霜期为200~250d,水热条件良好^[13]。研究区域包括淮南、淮北、蚌埠、阜阳、宿州和亳州6个市,地理坐标为31°54′~34°25′N,115°15′~117°54′E(图1)。选取水稻、小麦、玉米、豆类、油料农作物秸秆为主要研究对象,根据统计信息可知这5类农作物秸秆约占秸秆资源总量的88%。林业则主要以人工林,包括四旁植树和抚育林林业剩余物为研究对象。两淮地区一共34个区县,其中超过18个区县农作物种植面积在11万hm²之上。宿州市埇桥区和淮南市寿县农作物种植面积较大,都在30万hm²左右。农作物种植面积分布重心主要在两淮地区中部。有19个区县森林面积超过1.5万hm²,其中面积较大的2个区县分别是宿州市砀山县和萧县,分别达8.5万和6.8万hm²。根据当地政府信息,砀山县森林覆盖率达70%以上,林业资源丰富,故森林面积分布重心主要位于以宿州市为代表性的两淮北部地区。

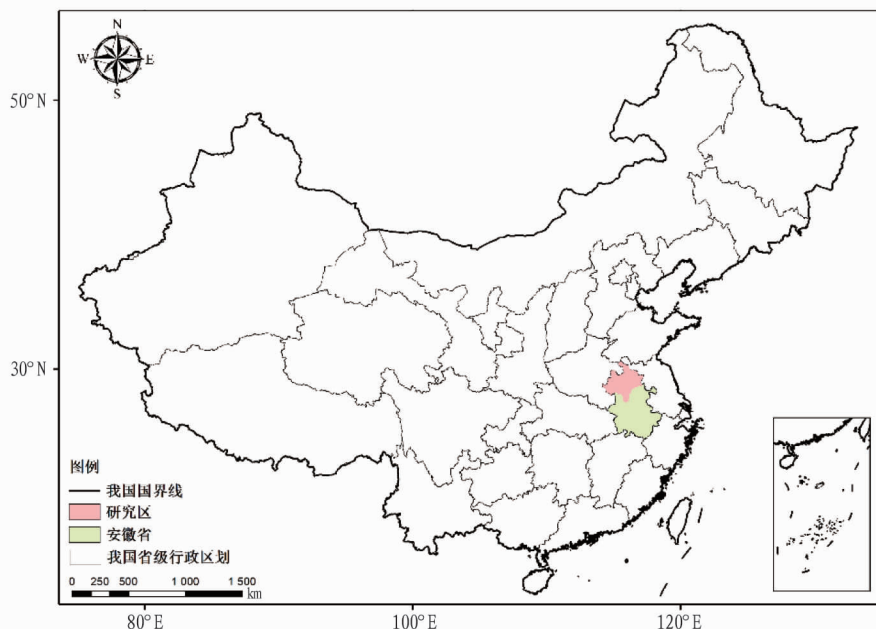


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

1.2 农林固废资源量估算方法

1.2.1 秸秆可回收资源量估算方法。

农作物秸秆是指农作物去掉根和籽粒后剩余部分,主要包括作物的茎和叶。秸秆可回收资源量通过农作物产量、草谷比和可回收系数来计算^[14]。现有农作物秸秆资源调查与评价技术规范(NY/T

1701—2009)中草谷比定义为某种农作物单位面积秸秆产量与籽粒产量的比值。由于农作物收割方式和留高度不同茬,考虑到秸秆损耗,利用可回收系数进行折减,更符合实际情况。统计了两淮地区常见农作物草谷比和可回收系数(表1),秸秆可回收资源量计算公式如下:

$$CS = \sum_{i=1}^n (Q_i \times R_i \times C_i) \quad (1)$$

式中,CS 为秸秆可回收资源量; Q_i 为第 i 种农作物产量; R_i 为第 i 种农作物草谷比; C_i 为第 i 种农作物可回收系数。

表 1 安徽省常见农作物草谷比与可回收系数^[15]

Table 1 Straw and grains ratios and collectivity coefficients of the common crops in Anhui Province

农作物种类 Crop type	草谷比 Straw and grains ratios	可回收系数 Collectivity coefficients
水稻 Rice	1.09	0.85
小麦 Wheat	1.12	0.73
玉米 Corn	1.00	0.92
豆类 Legume crops	1.52	0.77
油料 Oil crops	2.98	0.64

1.2.2 林业剩余物资源量计算方法。林业剩余物是指在森林经营过程中产生的林木剩余物,其中包括灌木平茬、经济林、四旁疏林、城市绿化抚育修枝等产生的林木剩余物。结合两淮地区实际林业剩余物收集情况,以四旁植树和成、幼抚育林为主要研究对象,结合林业剩余物折算系数、可利用系数对其资源量进行估算^[10]。林业剩余物资源量计算公式如下:

$$L = \sum_{i=1}^n (FR_i \times U_i \times V_i) \quad (2)$$

式中, L 为林业剩余物资源量; FR_i 为第 i 种林木资源量; U_i 为第 i 种林木剩余物折算系数; V_i 为第 i 种林木剩余物可利用系数。为了计算方便可利用系数都取 1,成林和幼林剩余物折算系数为 7.2 t/hm^2 ,四旁植树剩余折算系数为 2 kg/株 。

1.2.3 资源密度。现行农作物秸秆资源调查与评价技术规范(NY/T 1701—2009)中资源密度是指某一区域单位面积秸秆资源的数量,表明该地区秸秆资源的丰度。崔蜜蜜等^[16]用资源密度对 2012 年我国区域密度进行分析,得出东北地区秸秆资源密度最高,平均为 5 t/hm^2 ,高于全国平均水平。区域面积可以是各区县的版图面积、土地面积、农作物种植面积,该研究中区域面积取农作物种植面积和森林面积。

1.3 农林固废资源化潜力估算方法

1.3.1 肥料化利用潜力。根据《区域农作物秸秆全量处理利用技术导则》,为保持或提高两淮地区土壤生产力,秸秆最小还田量为 3 t/hm^2 ,计算出秸秆还田肥料化需求量。由两淮地区秸秆综合利用率,得出未被利用秸秆资源量,根据不同作物秸秆养分(包括 N、 P_2O_5 、 K_2O)含量(表 2),分析未被利用秸秆和林业剩余物代替肥料的能力。

1.3.2 饲料化利用潜力。根据两淮地区年存栏牲畜数量,按每头(或只)牲畜年秸秆消耗量,计算出秸秆饲料化需求量,分析未被利用秸秆资源量作为饲料利用的能力。

1.3.3 能源化利用潜力。热裂解是指在限氧条件下秸秆在 $250 \sim 750 \text{ }^\circ\text{C}$ 发生热裂解作用而得到生物质炭(表 2)、木醋液和生物质可燃气体的过程^[17],从节能减排的角度,分析未被利用秸秆资源量直燃发电和热裂解的能力。

1.3.4 基料化和原料化利用潜力。使用秸秆作为主要原材

料,结合辅料,根据生产配方制作成无土培养基,常用于食用菌的栽培。根据年鉴信息,两淮地区食用菌年总产量约为 12 万 t,计算出秸秆基料化需求量。以秸秆为原材料,可以用来造纸、制作人造板材和秸秆草砖等^[18]。根据相关工艺,分析未被利用秸秆资源量制作草砖和人造板材的能力。

表 2 安徽省秸秆养分含量及生物质炭

Table 2 Nutrient content of straw and biomass carbon in Anhui Province

秸秆种类 Straw type	养分含量 Nutrient content//g/kg ^[11]			生物质炭 Biomass carbon//g/kg ^[19]
	N	P_2O_5	K_2O	
水稻 Rice	8.3	2.7	20.6	517
小麦 Wheat	6.2	1.6	12.3	713
玉米 Corn	8.7	3.1	13.4	602
豆类 Legume crops	16.3	3.9	12.7	576
油料 Oil crops	16.6	3.4	11.9	497

2 结果与分析

2.1 两淮地区农林固废资源量估算 依据两淮地区各市统计年鉴信息,结合农作物草谷比和可回收系数对两淮地区主要农作物资源量进行估算,结果显示,2015—2019 年两淮地区主要农作物秸秆可回收资源量总和分别为 1 876.15 万、1 919.32 万、1 958.15 万、1 988.84 万和 2 035.78 万 t,资源量随时间变化整体呈平稳缓慢增长趋势。从 2019 年各市秸秆可回收资源量占比情况(图 2a)来看,阜阳市秸秆可回收资源量最大,占总资源量的 22.8%。2019 年水稻、小麦、玉米、豆类和油料秸秆可回收资源量分别为 275.15 万、1 027.24 万、511.72 万、90.67 万和 58.36 万 t,小麦秸秆是两淮地区最主要秸秆来源,占总资源量的 52.3%。豆类主要以大豆为主,油料以花生、油菜为主,芝麻为辅。由年鉴信息得出两淮地区四旁植树约为 1 082 万株,成、幼林抚育面积约为 9.3 万 hm^2 ,折合林业剩余物资源量约为 69.05 万 t,其中阜阳市和宿州市林业剩余物资源量较丰富,分别达到 17.69 万和 16.42 万 t,资源量较少的是蚌埠和亳州,分别为 6.09 万和 3.94 万 t。

秸秆可回收资源量信息按照市级来统计,结果显示,阜阳市年平均秸秆可回收资源量最大,为 468.54 万 t;其次是亳州和宿州,分别为 415.96 万和 392.36 万 t;再次是蚌埠和淮南,分别为 315.10 万和 274.84 万 t;淮北市年平均秸秆可回收资源量最小,只有 117.87 万 t。从 5 年变化趋势(图 3)可以看出,淮南、淮北和亳州秸秆可回收资源量整体平稳缓慢增长,其他市基本持平。

2.2 两淮地区农林固废资源量空间分布 从图 4 可以看出,两淮地区农林固废资源量分布不均匀,各区县秸秆可回收资源量在 0.63 万~160.01 万 t,区域差异明显。水稻秸秆资源量南多北少,具有由北到南逐渐增多的特征(图 4a);淮南市寿县资源量最丰富,水稻秸秆可回收资源量达到 105.52 万 t;其次是怀远县、凤台县、颖上县,水稻秸秆可回收资源量分别为 32.11 万、30.95 万、22.46 万 t。淮南市及周围接壤区县大都属于水旱轮作,是两淮地区水稻秸秆主要产地。

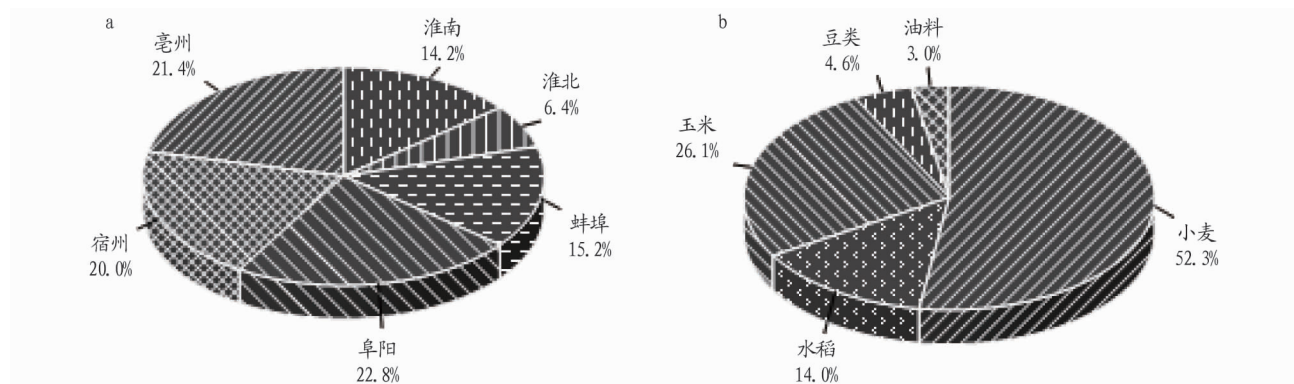


图2 2019年各市秸秆资源量占比(a)和不同种类秸秆资源量占比(b)

Fig. 2 Proportion of straw resources in each city (a) and different kinds of straw resources (b) in 2019

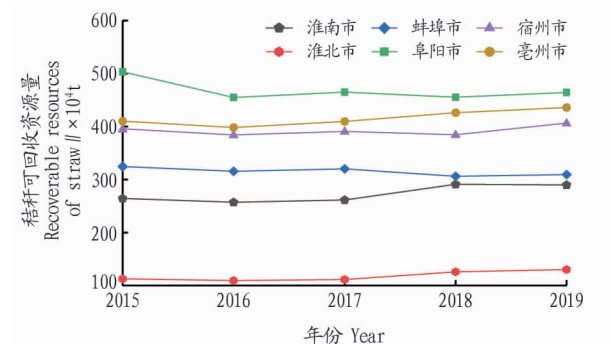


图3 2015—2019年两淮地区5类秸秆可回收资源量

Fig. 3 Recoverable resources of five types of straw in Lianghuai area from 2015 to 2019

小麦秸秆可回收资源量主要集中在两淮中部地区,以中部为重心向外呈辐射状分布(图4b),涡阳县、蒙城县、濉溪县和埇桥区处于重心位置,小麦秸秆可回收资源量分别为72.89万、70.81万、69.05万和68.71万t。结合水稻种植信息,可知这些区县以旱地轮作为主,是两淮地区小麦秸秆主要产地。

玉米秸秆可回收资源量分布较为分散,两淮地区的中部、东北部和西南部资源量较为丰富(图4c)。中部地区如蒙城县和利辛县玉米秸秆可回收资源量较大,分别为54.11万和46.07万t;其次是灵璧县、埇桥区和临泉县,玉米秸秆可回收资源量分别为38.67万、38.38万、33.30万t。结合水稻分布特征,发现玉米秸秆丰富的区县,水稻秸秆较为匮乏。原因是两类农作物在种植和生长周期存在冲突,夏秋时节通常只选择其中一类作物进行种植。

豆类秸秆可回收资源量丰富的地区主要集中在中部偏北的区县,呈条带状分布(图4d)。太和县和涡阳县豆类秸秆可回收资源量较多,分别为12.15万和11.81万t,其次是埇桥区和濉溪县,豆类秸秆可回收资源量分别为8.75万和7.81万t。豆类秸秆可回收资源量较少的区域主要集中在东南部。

油料秸秆可回收资源量分布情况与玉米秸秆相似,两淮地区东北部较为丰富(图4e),例如泗县和固镇县,油料秸秆可回收资源量分别为15.01万和6.77万t。中部只有蒙城县较丰富,油料秸秆可回收资源量为5.70万t。整体

来看,西北部和东南部区县油料秸秆可回收资源量较少。两淮地区常见油料包括花生、油菜和芝麻,油料种植存在区域差异,从北向南花生种植比例逐渐减小,而油菜种植比例逐渐增大。

林业剩余物资源量丰富地区主要集中在两淮北部和南部(图4f),北部地区包括濉溪县、砀山县和萧县,林业剩余物资源量分别为9.05万、6.70万和3.01万t,南部地区包括颍上县、临泉县和阜南县,林业剩余物资源量分别为5.47万、3.54万和3.41万t,与颍上县同一纬度其他区县林业剩余物资源量也较为丰富,平均值在3.00万t左右。

2.3 两淮地区农林固废资源密度 从表3可以看出,两淮地区秸秆资源密度平均值为 4.40 t/hm^2 ,其中淮南市秸秆资源密度最大,为 5.31 t/hm^2 ,原因可能是淮南市农作物种植密度较大,秸秆资源量较为集中,水稻秸秆可回收资源量尤为丰富。淮北市和亳州市秸秆资源密度分别为 4.73 和 4.25 t/hm^2 ,结合小麦秸秆可回收量分布情况,可知两市是两淮地区小麦秸秆可靠来源。因农作物种植密度、土地利用方式不同,宿州市秸秆资源密度不及两淮平均值,仅为 3.88 t/hm^2 。林业剩余物资源密度平均值为 0.99 t/hm^2 ,资源密度分布有较大的差异性,淮南市和淮北市资源密度约为平均值的2倍,分别为 2.05 和 1.79 t/hm^2 ,两市四旁植树和抚育林规模较大;亳州市资源密度低于平均值,仅为 0.24 t/hm^2 ,其森林面积和林业剩余物资源量较小。

表3 两淮地区秸秆和林业剩余物资源密度

Table 3 Resource density of straw and forestry residues in Lianghuai area

地区 Area	农作物种植面积 Crop planting area $\times 10^4 \text{ hm}^2$	森林面积 Forest coverage $\times 10^4 \text{ hm}^2$	秸秆资源密度 Straw resource density t/hm^2	林业资源密度 Forest resource density t/hm^2
淮南市 Huainan City	52.63	6.70	5.31	2.05
淮北市 Huaibei City	27.51	6.21	4.73	1.79
蚌埠市 Bengbu City	61.93	13.78	4.06	0.44
阜阳市 Fuyang City	111.76	20.56	4.15	0.86
宿州市 Suzhou City	103.54	29.53	3.88	0.56
亳州市 Bozhou City	102.61	16.48	4.25	0.24

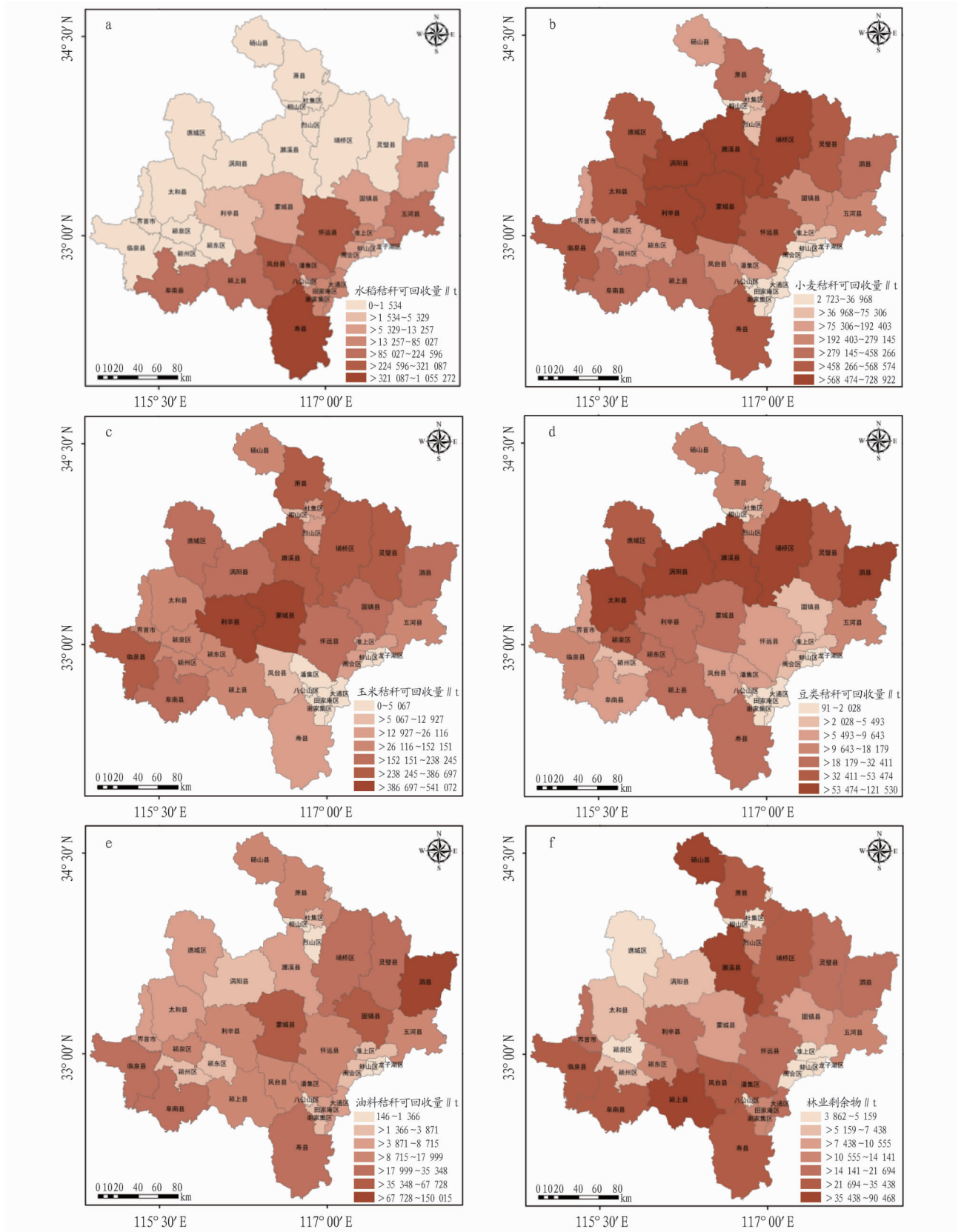


图 4 两淮地区农林固废资源量分布情况

Fig. 4 Distribution of agricultural and forestry solid waste resources in Lianghuai area

2.4 两淮地区农林固废利用潜力评价

2.4.1 肥料化利用潜力。两淮地区耕地总面积约为 460 万 hm^2 ,按照秸秆最小还田量 $3 \text{ t}/\text{hm}^2$ 计算,秸秆还田肥

料化需求量为 1 380 万 t,由可回收系数可知,约 600 万 t 的秸秆以留茬的方式还田,为了保持土壤肥力,则还需 780 万 t 的秸秆还田,占秸秆可收集资源量的 38%左右,表明两淮地区

秸秆还田有很大的需求量和潜力。两淮地区秸秆利用率按90%来计算^[20],则未被利用秸秆可回收资源量约为220万t。根据不同作物养分含量,得出两淮地区水稻、小麦、玉米、豆类和油料秸秆未被利用可回收资源量折算成氮肥(N)分别为0.25万、0.70万、0.49万、0.16万和0.11万t,折算成磷肥(P_2O_5)分别为0.08万、0.18万、0.17万、0.04万和0.02万t,折算成钾肥(K_2O)分别为0.62万、1.39万、0.75万、0.04万、0.08万t,未被利用秸秆全部还田,理论上可节约1.71万t氮肥、0.49万t磷肥和2.88万t钾肥,在不考虑复合肥使用的情况下,相当于淮南市单元素肥料年使用量的42.40%。林业剩余物资源量折算成肥料,按照成熟杉木枯枝叶和鲜枝叶平均氮、磷、钾养分含量分别为11.04、0.68和5.90 g/kg^[21]来计算,理论上可节约0.76万t氮肥、0.05万t磷肥和0.41万t钾肥。

2.4.2 饲料化利用潜力。根据年鉴信息得出,2019年两淮地区大型牲畜年末存栏总数约为57.40万头,主要以牛为主,还包括驴、马和骡,羊年末存栏总数约为558.60万只。大型牲畜和羊秸秆年消耗量分别按照1.70和0.34t来计算^[22],则两淮地区秸秆饲料化需求量约为287.50万t,占秸秆可回收资源量的14%。若将未被利用的224万t秸秆加工成饲料,还可以饲养牛131.76万头或羊658.82万只,远大于年末存栏数量,表明未被利用秸秆资源量可以满足饲料化需求。

2.4.3 能源化利用潜力。水稻、小麦、玉米、豆类和林业剩余物折煤系数分别为0.500、0.429、0.529、0.429和0.428 kg/kg^[23],不同生物质折煤系数差别不大,取平均值0.463 kg/kg。则未被利用的秸秆资源量相当于103.71万t标准煤,林业剩余物折合31.97万t标准煤。按照1 kW·h电能需要346 g标准煤来计算^[24],则未被利用秸秆理论上可发电35.88亿kW·h,是2019年淮南市社会用电量(77.75亿kW·h)的46%。相较于燃煤发电,秸秆直燃发电每1 kW·h可减少525.77 g当量CO₂排放^[25],则未利用秸秆代替燃煤发电可减少188.64万t当量的CO₂排放,相当于淮南市CO₂年排放量的16.46%^[26]。

秸秆热裂解炭化按每1t秸秆产生可燃气体发电250 kW·h、产生生物质炭0.35t来计算^[27],则未被利用秸秆热裂解可发电5.60亿kW·h,产生78.40万t生物质炭。发电量可抵消29.43万t当量CO₂排放,通过计算不同生物质炭中有机碳的含量,得出未被利用秸秆中热裂解有机碳为45.55万t,将这些有机碳当作肥料还田,可以减少166.79万t当量的CO₂排放。秸秆能源化利用既能发电,也能减少CO₂排放,表明秸秆有很大的能源化利用效益。

2.4.4 基料化和原料化利用潜力。两淮地区食用菌年总产量约为12万t,按照100 kg玉米秸秆制作成菌料可生产鲜菇等食用菌80 kg^[28]来计算,则两淮地区基料化需求量约为15万t,占可收集秸秆资源量的0.74%,可以得出秸秆基料化利用需求量很小。按照每块秸秆草砖重4.3 kg、秸秆组分占8%比例进行计算^[29],则未被利用秸秆可回收资源量可制作

6500多万块草砖,可节省土方量约1.3万m³。秸秆人造板(密度0.66 g/cm³,厚度15 mm)加工方式以秸秆粉碎添加异氰酸酯胶黏剂进行碾压成型为标准^[30-31],则未被利用秸秆可回收资源量可制作2亿m²的人造板材,代替树木板材使用,可节省340万m³的木材。秸秆原料化利用可以通过制作草砖代替普通烧结砖用在非承重墙,减少黏土的使用量,从而改善毁田取土现象,用秸秆人造板材代替树木板材使用,可以减少树木的砍伐,保护森林资源。

3 讨论

近年来两淮地区水稻、小麦、玉米、豆类、油料秸秆可回收资源量稳定在2000万t左右,约占安徽省秸秆可回收资源量的42%,人均秸秆资源占有量为0.76t,低于全国平均水平的1.47t^[32],得出两淮地区秸秆总量丰富,人均不足,因此,继续提高秸秆的回收力度、提升秸秆资源化利用率很有必要。两淮地区林业剩余物资源量约为70万t,主要是由四旁植树和成、幼林抚育过程中产生的枯枝落叶及人工修剪物组成,这些林业剩余物并不能代表一个区县林业固废资源总量,仅代表有人工管理且能够有效收集并利用起来的那部分。砀山县和萧县森林面积分别达8.5万和6.8万hm²,远大于其他区县,但其林业剩余物密度不是最大的,原因可能是森林面积较大的区县,林业用地逐渐达到饱和状态,其成、幼林抚育需求不大。秸秆可回收资源量随时间变化幅度很小,波动范围不超过上一年资源量的5%,但不同种类秸秆可回收资源量在空间上存在明显的差异,例如水稻秸秆资源主要集中在两淮南部地区,小麦秸秆主要集中在两淮中部地区,水稻秸秆丰富的地区其玉米秸秆和豆类秸秆资源较为匮乏。因此,对秸秆资源化利用时,需要综合考虑秸秆可回收资源量时间变化和空间分布情况,结合当地常见秸秆利用方式,因地制宜,需求秸秆利用最优解。

两淮地区秸秆利用方式以肥料化为主,占秸秆可回收资源量的60%左右,肥料化利用方式包括机械、过腹、腐熟和堆沤还田等方式^[14],其中将秸秆机械粉碎后直接还田是秸秆利用量最大,也是最简单的利用方式。但秸秆直接还田也存在一些问题,例如,土地耕种深度小于15 cm时,会出现秸秆与土壤混合不均匀,容易导致秸秆成团,进而影响玉米出苗率和出苗质量^[33];秸秆还田会加重作物病虫害的发生,加速土壤中病原菌的积累量,有研究表明连续多年秸秆还田且种植单一作物,会导致茎腐病致病菌积累,增加玉米茎腐病的发生概率和植株倒伏现象^[34]。因此,在秸秆还田时,一方面应该结合秸秆快速腐解技术,缩减秸秆腐解时间,加快秸秆养分融入土壤胶体,另一方面应该重视秸秆还田过程中病害的防控,适当使用药剂或者微生物防治技术,有效抑制秸秆中病原微生物和虫卵的生长^[35]。为了保持土壤基本肥力,秸秆还田量占可收集资源量的38%左右即可,远小于60%,故两淮地区秸秆还田满足肥料化需求,可以适当秸秆减少还田量,注重秸秆还田效率和土壤质量。

未被利用的秸秆资源量用于直燃发电和热裂解炭化可以减少接近200万t当量CO₂排放,2种利用方式具有良好

的环境生态效益。但秸秆直燃发电成本费用约为煤炭发电成本的 1.8 倍^[24],从全生命周期内的成本费用、发电成本和减排成本来看,秸秆直燃在经济成本方面不具有优势。秸秆热裂解炭化过程中产生的生物质气可用来发电,木醋液可当作液体肥使用,生物质炭还田可以改善土壤,起到固碳增汇的作用。热裂解炭化处理可充分利用秸秆中的能源、养分和有机质,是一项有很大发展潜力的秸秆高效利用技术,但该技术仅适用大规模秸秆热裂解炭化,还存在产能偏低的缺点^[36-37]。原料供应成本也是制约秸秆能源化利用的重要因素之一,田间收集打捆、农用车装载、收储点储存、能源化利用等相关流程需要投入大量的人力物力,以收集半径为 30 km、秸秆供应模式为田间收集、收储点固定式打捆储存为例,1 t 秸秆供应成本价在 270 元左右^[38]。因此,优化收储体系,降低秸秆收集成本,提升秸秆能源化利用的经济效益很有必要。两淮地区秸秆能源化利用量约占可回收资源量的 15%,该利用方式还有很大提升空间。未来可以继续扩大秸秆能源化利用规模,研发优化秸秆热裂解炭化技术,政府可以考虑在低碳发展宏观政策下,对这一产业实行碳补偿的政策激励机制。

4 结论

两淮地区农作物秸秆可回收资源量随时间变化幅度很小,整体呈稳定态势,2019 年水稻、小麦、玉米、豆类和油料 5 类秸秆可回收资源量分别为 275.15 万、1 027.24 万、511.72 万、90.67 万和 58.36 万 t,小麦秸秆是两淮地区最主要秸秆来源,占总资源量的 52.3%。林业剩余物主要来自四旁植树和成、幼林抚育,折合资源量约为 69.05 万 t。不同种类秸秆在空间分布上差异明显,如水稻秸秆资源量南多北少,主要集中在两淮南部(寿县、怀远县和凤台县);小麦秸秆资源量主要集中在两淮中部(涡阳县、蒙城县和濉溪县);玉米秸秆资源量主要分布在两淮中部、东北部和西南部(蒙城县、利辛县和灵璧县),豆类秸秆资源量主要集中在两淮中部偏北(太和县、涡阳县、埇桥区);油料秸秆资源量分布在两淮东北部和中部(泗县、固镇县和蒙城县)。林业剩余物资源量丰富地区主要集中在两淮北部和南部(濉溪县、砀山县和颍上县)。目前,两淮地区秸秆综合利用满足肥料化、饲料化和基料化需求,未来可以适当减少肥料化用量,提升能源化和原料化用量。依据秸秆资源量和分布情况,统筹规划秸秆区县的利用方式,因地制宜,进一步提高秸秆回收力度,降低收集成本,通过相关技术引进或研发,进一步提高秸秆在人造板材、直燃发电、热裂解炭化等高值化利用模式下的经济效益,结合政策激励机制,扩大秸秆在能源化和原料化利用规模,促进两淮地区秸秆综合高效利用。

参考文献

[1] 姚金楠. 我国生物质能源化利用潜力约 4.6 亿吨标煤[N]. 中国能源报, 2021-09-20(019).

[2] 张晓庆, 王梓凡, 参木友, 等. 中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(9): 30-41.

[3] 刘海英. 农作物秸秆综合利用技术[J]. 世界热带农业信息, 2021(7): 29-30.

[4] 何介南, 罗航, 陈红斌, 等. 湖南省林木生物质能资源现状及利用潜力研究[J]. 湖南林业科技, 2021, 48(1): 24-31.

[5] 冉继伟, 宋爱兰, 田彦芳, 等. 我国作物秸秆资源时空变化特征及其影响因素分析[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(3): 418-429.

[6] SCARLAT N, FAHL F, LUGATO E, et al. Integrated and spatially explicit assessment of sustainable crop residues potential in Europe[J]. Biomass and bioenergy, 2019, 122: 257-269.

[7] 刘之榆, 刘忠, 万炜, 等. SAR 与光学遥感影像的玉米秸秆覆盖度估算[J]. 遥感学报, 2021, 25(6): 1308-1323.

[8] 王雪, 常志州, 张恒政, 等. 基于 MODIS 和天地图遥感数据的区域作物秸秆产量估算方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 177-182.

[9] 张卫东, 张兰, 张彩虹, 等. 我国林木生物质能源资源分类及总量估算[J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2015, 14(2): 52-55.

[10] 张平, 郑小钢, 刘勇, 等. 江苏省农作物秸秆收运储现状分析[J]. 江苏农机化, 2017(6): 35-38.

[11] 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, 2020, 28(11): 1789-1798.

[12] 汤丽洁. 安徽农作物秸秆综合利用现状及对策研究[J]. 绿色科技, 2017(16): 215-216, 220.

[13] 安徽省统计局. 安徽统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.

[14] 樊琼. 安徽省基于秸秆综合利用的循环农业模式研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.

[15] 魏赛, 吕晶晶. 我国粮食主产区秸秆资源量估算与利用[J]. 中国畜牧业, 2013(19): 56-58.

[16] 崔蜜蜜, 蒋琳莉, 颜廷武. 基于资源密度的作物秸秆资源化利用潜力测算与市场评估[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(6): 117-131.

[17] HU X, GHOLIZADEH M. Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage[J]. Journal of energy chemistry, 2019, 39: 109-143.

[18] 刘世君. 秸秆原料化利用技术在滨海新区的应用前景分析[J]. 农机使用与维修, 2021(1): 131-132.

[19] YUAN J H, XU R K, ZHANG H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. Bioresource technology, 2011, 102(3): 3488-3497.

[20] 桂文斌, 叶春秀. 蚌埠市秸秆综合利用现状及对策[J]. 现代农业科技, 2020(20): 156-158.

[21] 周丽丽. 不同发育阶段杉木人工林养分内循环与周转利用效率的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.

[22] 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.

[23] 《中国电力年鉴》委员会. 2020 中国电力年鉴[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.

[24] 孙莉莉. 关于发电能源成本研究: 基于生命周期评价理论的分析[J]. 价格理论与实践, 2018(5): 151-154.

[25] 王火根, 王可奕. 基于生命周期评价的生物质与煤炭发电综合成本核算[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(6): 56-61.

[26] 黄静, 高良敏. 淮南市碳排放定量核算研究[C]//中国环境科学学会. 2011 中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷). 北京: 中国环境科学出版社, 2011: 376-381.

[27] 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.

[28] 杨晓东. 农作物秸秆基料化利用技术及效益分析[J]. 农业科技与装备, 2017(12): 41-43.

[29] 王晓峰, 曹宝珠. 秸秆草砖保温性能研究[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2013, 30(2): 9-11.

[30] 周定国. 农作物秸秆人造板的研究[J]. 中国工程科学, 2009, 11(10): 115-121.

[31] 肖力光, 丁艳波. 秸秆建筑材料的应用及研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(4): 1142-1146.

[32] 方放, 李想, 石祖梁, 等. 黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 228-234.

[33] 崔正果, 李秋祝, 张恩萍, 等. 玉米秸秆不同还田方式对土壤有机质及微生物数量的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(6): 104-109.

[34] 王振营, 王晓鸣. 我国玉米病虫害发生现状、趋势与防控对策[J]. 植物保护, 2019, 45(1): 1-11.

[35] 宋佳, 曾希柏, 王亚男, 等. 秸秆还田的效果、问题与对策[J]. 生态学杂志, 2020, 39(5): 1715-1722.

[36] 潘根兴, 李恋卿, 刘晓雨, 等. 热裂解生物质炭产业化: 秸秆禁烧与绿色农业新途径[J]. 科技导报, 2015, 33(13): 92-101.

[37] HOANG A T, ONG H C, FATTAH I R, et al. Progress on the lignocellulosic biomass pyrolysis for biofuel production toward environmental sustainability[J]. Fuel processing technology, 2021, 223: 1-27.

[38] 霍丽丽, 赵立欣, 姚宗路, 等. 秸秆能源化利用的供应模式研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(7): 1072-1078.