



DOI:10.14188/j.ajsh.20250716001

广东省南雄市农作物种植情况及能源转化潜力分析

刘 怡¹, 余艳鸽², 王珺婷^{1*}, 周丞栋¹, 赵文琪¹, 闵晨斯¹

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2. 中电建生态环境集团有限公司, 广东 深圳 518101)

摘要:在“双碳”战略目标指引下,中国农业生物质资源的高效开发及能源化利用已成为推动农业绿色低碳转型的重要路径,但在用能需求高的发达地区生物质能实际应用尚不充分,且对南方含水量高的生物质能源转化规律研究较少。基于此,立足于地处大湾区用能需求大的广东省,以省内农业发达的南雄市为主要研究对象,以期探索符合中国南方地区农业生物质资源能源转化潜力及其规律。依托南雄市国民经济和社会发展统计公报及实地调研数据,系统分析南雄市主要农作物种植情况及乡域分布特征,并开展了生物质资源转化潜力评估。研究得知,2018年到2022年南雄市粮食作物产量整体保持上升趋势,2023年南雄市主要农作物秸秆理论年产量达 2.69×10^5 t,且以稻谷秸秆为主,占全市秸秆总量的60.22%;其中乌迳镇是南雄市秸秆资源最丰富的乡级区域,粮食作物稻谷占全市总量的8.61%,经济作物占全市总量的10.31%;以南雄市的水稻秸秆作为原料进行生物质制气,其产气量可达 $(3.89 \sim 4.76) \times 10^7$ m³/a,不考虑秸秆种类差异,南雄市可利用的秸秆资源总产气量高达 $(4.11 \sim 5.09) \times 10^7$ m³/a,展现出巨大的产气潜力,且碳减排量能达到 $(7.81 \sim 9.67) \times 10^4$ t CO₂。在此基础上,提出生物质制气厂设置等相关建议,以实现更高效的秸秆资源化利用。该研究不仅可为地方生物质资源开发利用提供科学决策依据,也可作为南方农作物秸秆规模化、高效化利用探索提供可复制推广的实践路径。

关键词: 农作物秸秆;乡域分布;生物质资源;转化潜力

中图分类号: S51

文献标志码: A

文章编号: 2096-3491(2026)01-0049-10

Analysis of crop planting and energy conversion potential in Nanxiong City, Guangdong Province

LIU Yi¹, YU Yangge², WANG Junting^{1*}, ZHOU Chengdong¹, ZHAO Wenqi¹, MIN Chensi¹

(1. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, School of Resources and Environmental

Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;

2. Power China Eco-Environment Group Co., LTD., Shenzhen 518101, Guangdong, China)

Abstract: Under the strategic guidance of China's "dual carbon" goals, the efficient development and energy-oriented utilization of agricultural biomass resources have become a crucial pathway for promoting green and low-carbon transformation in agriculture. However, the practical application of bioenergy remains insufficient in developed areas with high energy demand, and research on the energy conversion patterns of biomass with high moisture content in the south is relatively scarce. Based on this, this study focuses on Guangdong Province, a major energy consumer within the Greater Bay Area, and on Nanxiong City, an agriculturally developed area within the province, aiming to explore the

收稿日期: 2025-07-09 修回日期: 2025-09-18 接受日期: 2026-02-11

作者简介: 刘怡(2000-),女,硕士生,主要研究方向为生态环境保护及环境功能材料,E-mail:15802398023@163.com

*通信作者: 王珺婷(1980-),女,副教授,主要研究方向为环境规划及污染控制、碳排放及节能环保评估,E-mail:Wjtgrace@whut.edu.cn

基金项目: 2025年国家大学生创新创业训练计划省级创新训练项目(S202510498163);中国电力建设股份有限公司研究中心定向资助计划(DJ-PTZX-2021-01)

引用格式: 刘怡,余艳鸽,王珺婷,等. 广东省南雄市农作物种植情况及能源转化潜力分析[J]. 生物资源, 2026, 48(1): 49-58.

Liu Y, Yu Y G, Wang J T, et al. Analysis of crop planting and energy conversion potential in Nanxiong City, Guangdong Province [J]. Biotic Resources, 2026, 48(1): 49-58.

energy conversion potential and underlying patterns of agricultural biomass resources in southern China. Utilizing data from Nanxiong City's National Economic and Social Development Statistical Bulletins and field surveys, this study systematically analyzes the cultivation status and spatial distribution characteristics of major crops in Nanxiong and assesses the conversion potential of its biomass resources. The findings reveal that Nanxiong's grain crop output exhibited an overall upward trend from 2018 to 2022. In 2023, the theoretical annual yield of major crop straws reached 2.69×10^5 t, dominated by rice straw which constituted 60.22% of the total in the city. Wujing Town emerged as the township with the richest straw resources, contributing 8.61% of the city's total grain crop (rice) output and 10.31% of its economic crop output. When using rice straw from Nanxiong City as feedstock for biomass gasification, the gas production can reach $(3.89 - 4.76) \times 10^7$ m³/a. Disregarding variations in straw types, the total gas production potential from utilizable straw resources in Nanxiong can reach $(4.11 - 5.09) \times 10^7$ m³/a, demonstrating substantial production capacity with an associated carbon reduction potential of $(7.81 - 9.67) \times 10^4$ t CO₂. Accordingly, recommendations for establishing biomass gasification plants are proposed to enhance resource utilization efficiency. This study can not only provide scientific basis for local decision-making regarding biomass resource development, but also offer replicable and practical approaches for exploring the large-scale, high-efficiency utilization of crop straw in southern China.

Keywords: crop straw; township-level distribution; biomass resources; conversion potential

0 引言

作为全球主要农作物生产国,中国每年产生巨量农业残留物,其中农作物秸秆凭借其广域分布性、低环境负外部性及强经济可获得性优势,已成为生物质能源体系的核心原料来源^[1-3]。农作物秸秆是指在农作物收获过程中产生的废弃物,通常包括水稻、玉米、油菜、小麦、薯类和其他农作物在收获籽实后的剩余部分,承载着农作物超过50%的光合固碳产物^[4-5]。其结构主体由纤维素-半纤维素-木质素三元网络构成,辅以微量蛋白质、矿物质等有机组分,共同形成地球上规模最大的可再生碳库,在资源循环型农业中占据战略性生态位^[6-8]。

在此背景下,国家发展改革委等九部门联合在《“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》(发改环资[2021]381号)中设定了阶段性目标:结合配套政策,2025年秸秆综合利用率需稳定在86%以上。该政策框架将秸秆定位为清洁能源载体,可应用于成型燃料、热电联产等,其资源化转化路径的工程化实施已成为助力双碳、推进农业绿色转型的紧迫任务。广东省发展改革委在《广东省循环经济发展实施方案(2022年—2025年)》中设定了秸秆综合利用率 $\geq 86\%$ 的刚性目标,同步规划大宗固废年消纳量 3.00×10^8 t,明确燃料化与饲料化为优先路径;2023年《全面推行清洁生产实施方案》提出“农业-能源系统耦合度”指标,要求县域新建 ≥ 100 兆瓦农光互补项目同步配置生物质处理设施,形成政策闭环。广东省以秸秆为原料的能源化利用是广东省构建废弃物循环利用体系的重要组成部分,对于提高资源利用效率、推动绿色低碳发展具有重要作用。

广东省还大力鼓励多部门协同,将秸秆、畜禽粪污等有机垃圾结合,建设沼气工程等生物质资源能源化项目,以及生物天然气接入城市燃气管网,设立生物质产气项目,从原材料来源到燃气商品的运输及应用提供政策支持,为秸秆的资源化利用提供了优越条件。

广东省南雄市位于该省北部,隶属于韶关市。韶关市北接湖南省郴州市、江西省赣州市,南连珠江三角洲,浈江、武江在市区汇合成北江,与农业丰富省份临近,可为广东省提供丰富秸秆资源,且可利用的秸秆资源数量可观,主要有稻谷、小麦、玉米、薯类、大豆、甘蔗、花生、油菜等作物,其中稻谷、玉米及薯类作物种植居多。由于南雄市秸秆量在韶关市所辖行政区域中排第一,本文以南雄市农作物秸秆为典型代表进行研究与分析。

实现秸秆资源化利用的前提在于精准把握其资源禀赋特征。然而,对南方生物质能源转化规律的探索仍不足,尤其是在具有三季轮作模式的农业区,其秸秆资源的时空分布特性(如集中产出季节性、地域聚集性)及其对规模化、连续性能源化利用的影响尚未被充分关注。与广东省内聚焦珠三角等发达区域或宏观尺度资源评估的前期研究重点相比^[9],本研究创新性地将精细化的实地调研(覆盖播种、收获模式及利用现状)与宏观地理信息系统(geographic information system, GIS)空间分析技术深度融合,在县域尺度上系统解析南雄市主要农作物秸秆的总量、种类构成及其在乡域维度的分布格局。这种方法组合不仅能克服单一统计数据或遥感解译的局限性,精准刻画资源空间异质性,而且能深入揭示三季轮作制度下秸秆资源供应的季节不连续性特征这一

关键制约因素。在此基础上,本研究将定量评估其生物质能转化为沼气的潜力,旨在为探索适应南方农作物特点的秸秆资源化路径提供兼具科学性和可操作性的决策依据,其方法学框架与实践发现亦可为类似区域提供可复制的参考范式。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

本研究选定南雄市地域为典型研究对象。其原因主要为南雄市是韶关市农业主导区域中全年农作物播种面积最大的行政区域,且其水稻种植面积最大,因此秸秆产量远高于其他区县,秸秆量占比亦居首位,十分具有典型意义。

结合南方湿热多雨的天气状况,不同季节耕种特色,在选择秸秆类型时,根据《2022年南雄市国民经济和社会发展统计公报》,选择长期规模化种植且种植产量较高的稻谷、玉米、豆类和薯类等粮食作物,以及油料作物、烟叶等经济作物为研究对象;其他作物因产量低,不纳入研究范畴。

基于选定的研究范围、农作物秸秆对象,本研究通过实地走访对南雄市农作物播种、收获、秸秆量及乡域分布进行收集和分析,并进行产气潜力评估。

1.2 方法

1.2.1 农作物秸秆系数的确定

针对处于南方地区的广东省,农作物以水稻、薯类为主。农作物废弃物的草谷比(指农作物单位面积地上部秸秆产量与籽粒产量的比值)和可收集利用系数如表1所示^[9]。此外,统计年鉴数据显示,广东的旱粮主要为玉米,因此主要以玉米的系数计算旱粮废弃物。

表1 农作物废弃物的草谷比和可收集利用系数^[9]
Table 1 Straw-to-grain ratio and collectible utilization coefficient of crop waste^[9]

产品	废弃物	草谷比	可收集利用系数
稻谷	秆、叶	0.76~1.19	0.80
	壳	0.19~0.23	0.95
玉米	秆、叶	0.72~1.69	0.95
薯类 (番薯和马铃薯)	芯	0.15~0.27	0.98
	茎、叶	0.16~1.60	0.73
大豆	茎、叶、荚	1.92~2.32	0.56
芝麻	叶稍	2.43~3.39	0.83
花生	茎、叶	0.85~1.91	0.83
	壳	0.23~0.29	0.70
烟叶	秆	1.60	0.95

1.2.2 秸秆理论资源量的估算方法

秸秆资源可收集利用量一般根据秸秆资源的总产量和其可收集利用系数来计算。秸秆资源可收集利用量,是指在现实耕作管理,尤其是农作物收获管理条件下,可以从田间收集、并可为人们利用的秸秆资源的最大数量^[10]。对秸秆资源可收集利用量的估算,一般不考虑秸秆综合利用的经济技术可行性、实际需求可达性、未来技术革新性的影响。对秸秆可收集利用量的估算,将可收集而未收集、可利用而未利用的农作物秸秆均估算在其中,如田间焚烧、田间地头堆弃的秸秆以及保护性耕作覆盖还田、留高茬还田的秸秆等^[11-12]。

因此,本研究中秸秆理论资源量的计算方法参考《中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价》^[13]的研究报告,如式(1)所示:

$$W_{GS} = W_s \times I_G \tag{1}$$

式中, W_{GS} 为秸秆资源可收集利用量; W_s 为秸秆总产量; I_G 为秸秆资源可收集利用系数,无量纲。

秸秆资源可收集利用系数是指可收集利用的秸秆重量占农作物茎秆总生物量即秸秆总产量的比重。农作物茎秆是指农作物主产品(又称经济产品)收获后剩余的农作物地表以上部分。秸秆资源可收集利用系数主要根据作物收割留茬高度占株高的比例和秸秆枝叶脱落率来估算^[9]。

1.2.3 生物质资源产气潜力估算方法

本文采用《沼气工程技术规范第1部分:工程设计》(NY/T1220.1—2019)给出的数据^[14],计算不同种类农作物秸秆厌氧发酵后的沼气产量,得到表2。在计算中,为充分体现发酵潜力,在区间范围内选用最大值进行估算。

$$q = W \times S \times Y_p \tag{2}$$

式中, q 为沼气产量(m^3); W 为发酵原料量(kg); S 为发酵原料总固体(TS)含量(%); Y_p 为发酵原料产气率(m^3/kg)。

表2 秸秆沼气产量
Table 2 Straw biogas production

原料种类	总固体含量/%	原料产气率/($mL \cdot g^{-1}$ VS)
水稻秸秆	83~95	0.29~0.31
玉米秸秆	80~95	0.40~0.50

根据估算的沼气产量可进一步计算碳减排量,参考《省级温室气体清单编制指南(修订版)》(2025年)中燃料替代减排方法,替代煤炭的 CO_2 减排量计算公式为:

$$ER_{CO_2} = q \times \beta \times EF_{CO_2/标准煤} \tag{3}$$

式中, ER_{CO_2} 为 CO_2 排放量; β 为标煤的折算系数, 为 $0.714\ 3\ kgce/m^3$; $EF_{CO_2/标煤}$ 为标煤燃烧的 CO_2 排放因子, 为 $2.66\ kg\ CO_2/kgce$ 。

2 结果与分析

2.1 粮食种植结构与分布

2.1.1 粮食种植情况及其变化趋势

据南雄市统计局发布的《2022年南雄市国民经济和社会发展统计公报》可知, 南雄市2018年—2022年粮食种植情况及其变化趋势如图1所示。从图1看出, 2018年—2022年南雄市粮食种植面积及总产量整体呈现上升趋势。其中, 粮食种植面积由2018年 $334.13\ km^2$ 增加至2022年 $351.07\ km^2$; 粮食总产量由2018年的 $1.85 \times 10^5\ t$ 增加至2022年的 $2.10 \times 10^5\ t$ 。相比于2021年, 粮食种植面积及总产量分别同比增长 0.75% 和 1.16% , 年均粮食种植面积和产量分别为 $343.62\ km^2$ 和 $2.02 \times 10^5\ t$ 。可见, 南雄市农作物种植行业前景良好, 每年南雄市产出的秸秆量十分可观, 这一显著优势为秸秆资源化利用的发展带来了重要机遇。

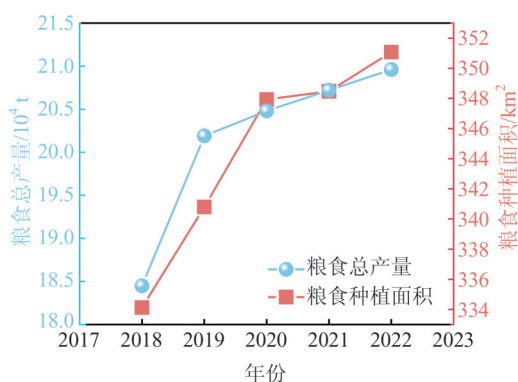


图1 2018年—2022年南雄市粮食种植情况及其变化趋势

Figure 1 Grain planting and its change trend in Nanyang City from 2018 to 2022

2.1.2 主要农作物种植情况及其变化趋势

通过分析2018年—2022年南雄市粮食种植情况的历史数据, 可得知南雄市粮食作物种植面积及其产量趋势。此外, 笔者进行实地调查, 通过走访当地农业农村局, 收集到2022年和2023年南雄市主要粮食作物数据如图2所示、经济作物的数据如图3所示。

(1) 粮食作物。图2(a)和图2(b)分别为2023年南雄市主要粮食作物播种面积和产量情况, 可见2023年南雄市粮食作物播种面积为 $350.28\ km^2$, 全年总产量为 $2.10 \times 10^5\ t$ 。从图2可知, 南雄市的粮

食作物以稻谷为主, 其全年播种面积为 $316.02\ km^2$, 占粮食作物总播种面积的 90.22% ; 稻谷全年总产量为 $1.96 \times 10^5\ t$, 占粮食作物总产量的 94.40% 。玉米、豆类和薯类作物的播种面积分别为 13.52 、 16.00 和 $18.26\ km^2$, 分别占比 3.86% 、 4.57% 和 5.21% , 且产量分别为 5.53×10^3 、 4.07×10^3 和 $3.78 \times 10^4\ t$ 。可见, 南雄市粮食作物产量多, 且以稻谷为主。因此, 稻谷秸秆也是南雄市最主要的粮食作物秸秆资源。

南雄市农业种植模式以三收为主, 即冬种春收、春种夏收和夏种秋收, 形成了较为稳定的季节性生产格局。其中, 秋收是南雄粮食作物的主要产出季节, 全年农作物超 60% 产于秋收, 2023年秋收产量为 $1.29 \times 10^5\ t$; 秋收产量比夏收产量高出一个数量级, 夏收产量为 $7.64 \times 10^4\ t$; 同时夏收又比春收产量多出一个数量级, 春收产量为 $2.54 \times 10^3\ t$ 。这种产量分布特点反映了南雄市农业生产的季节性特征。通过分析南雄市各季粮食作物的产量可知, 南雄市秸秆季节连续性不强, 不利于秸秆的连续利用。

与图2(c)和图2(d)中2022年南雄市各季主要粮食作物情况相比, 2023年粮食总产量为 2.10×10^5 万 t , 与2022年基本持平。

(2) 经济作物。图3为2022年和2023年南雄市主要经济作物播种面积情况。由图3可知, 2023年南雄市经济作物全年播种面积 $276.2\ km^2$, 是粮食作物的 0.79 倍。其中, 蔬菜、油料作物和烟叶占比最多, 播种面积分别为 106.08 、 86.70 和 $56.02\ km^2$, 占比分别为 38.41% 、 31.39% 和 20.28% 。然而, 蔬菜、油料作物和烟叶生产过程中所能收集的秸秆量较少, 且播种面积也远小于稻谷播种面积。由此可见, 南雄市农作物秸秆资源以粮食作物稻谷秸秆为主, 经济作物秸秆较少。

通过对比2022年与2023年南雄市主要经济作物播种面积的数据可知, 2023年南雄市经济作物总播种面积呈现 2.40% 的增长, 且大多数经济作物播种面积均呈现出增加的趋势, 这表明南雄市的经济作物生产正在稳步扩大; 其中, 蔬菜和油料作物播种面积最大。基于这一趋势, 预测在未来几年内, 南雄市经济作物的播种面积增长率大概率将继续保持正值, 显示出该市经济作物市场的积极发展态势。

2.2 主要农作物播种的乡域分布特征

了解农作物播种的乡域分布可为南雄市生物质能源转化项目地点选择提供实际指导。南雄市下辖1个街道(雄州街道)、17个镇(乌迳镇、界址镇、坪田镇、黄坑镇、邓坊镇、油山镇、南亩镇、水口镇、江头

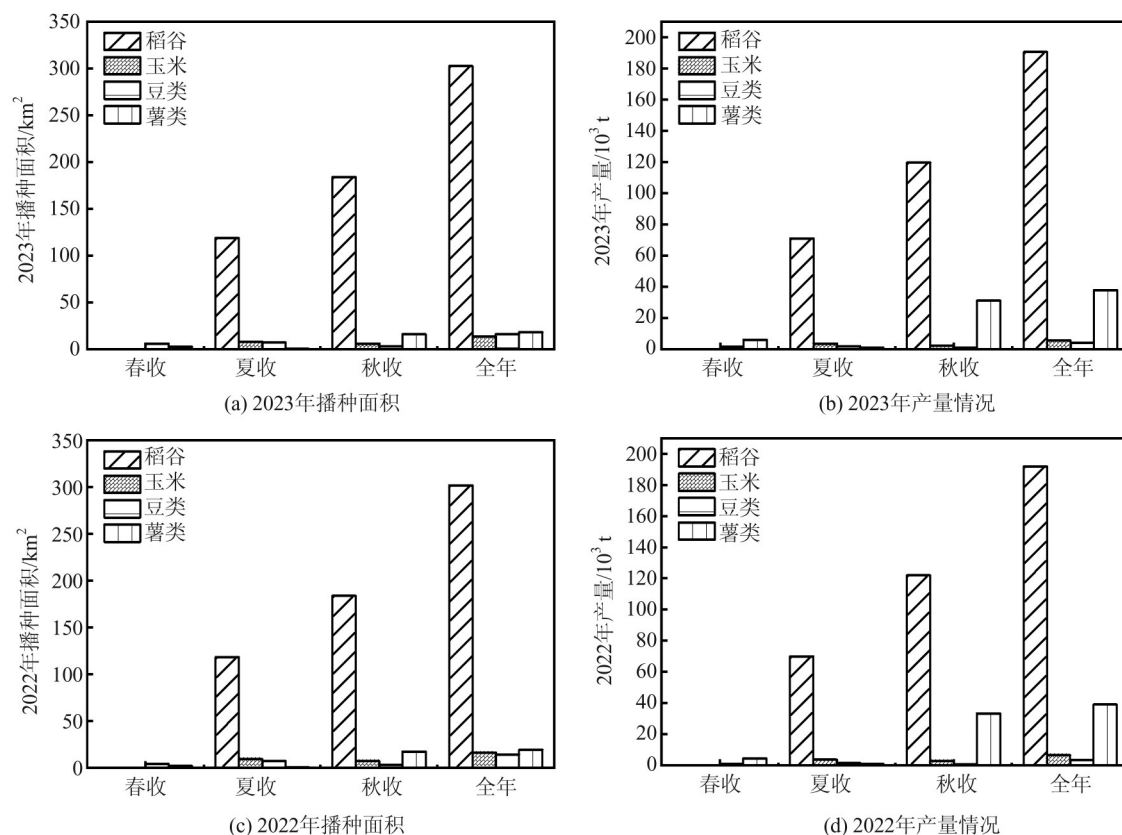


图2 2023年和2022年南雄市各季主要粮食作物播种面积及产量情况

Figure 2 Sowing area and yield of main grain crops in each season of Nanxiong City in 2023 and 2022

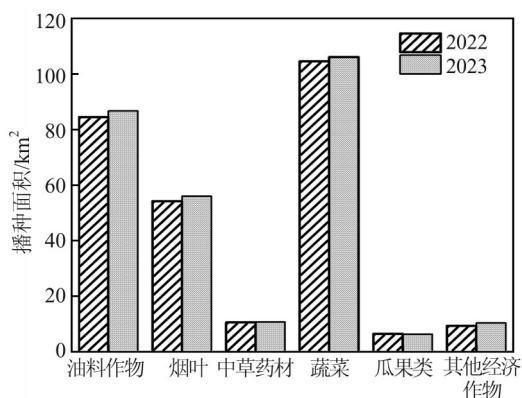


图3 2022年、2023年南雄市主要经济作物播种面积情况

Figure 3 Sown area of major cash crops in Nanxiong City in 2022 and 2023

镇、湖口镇、珠玑镇、主田镇、古市镇、全安镇、百顺镇、澜河镇、帽子峰镇),因播种情况可在一定程度上反映生产过程中产生的秸秆量,所以笔者将通过对比各镇(街道)的播种面积来反映各镇(街道)秸秆的分布情况。

比较图5南雄市下辖的18个镇(街道)的经济作物播种情况,可知乌迳镇和湖口镇的经济作物播种面积最大,分别为28.49和28.24 km^2 ,分别占比10.31%和10.22%,均超过了28 km^2 。可见,乌迳

镇和湖口镇是南雄市经济作物种植最为集中的地区。综合上述分析可知,乌迳镇是南雄市秸秆资源最丰富的乡级区域,珠玑镇、全安镇和湖口镇等均有一定的开发潜力。

2.3 主要农作物秸秆资源产量及其已利用量

2.3.1 主要农作物秸秆资源产量

鉴于南雄市属于南方地区,因此农作物秸秆的草谷比数据将参照《农业农村部办公厅关于做好农作物秸秆资源台账建设工作的通知》(农办科[2019]3号)选择。秸秆理论资源量根据公式1计算,结果如表3所示,可知南雄市秸秆资源丰富,其主要农作物秸秆理论资源量高达 $2.69 \times 10^5 \text{ t}$ 。其中,稻谷秸秆的产量尤为突出,将早稻和晚稻的秸秆产量相加,每年产生的稻谷秸秆量可达到 $1.62 \times 10^5 \text{ t}$,占秸秆总理论资源量的60.22%。可见,稻谷作为南雄市的主要农作物之一,其秸秆产量大且稳定,为秸秆的资源化利用提供了可靠的保障。

2.3.2 主要农作物秸秆处理方式

通过与南雄市农业农村局沟通和现场调研,笔者获得了2023年南雄市秸秆利用的实际情况,如表4所示。

从南雄市秸秆处理的实际情况来看,当前主要

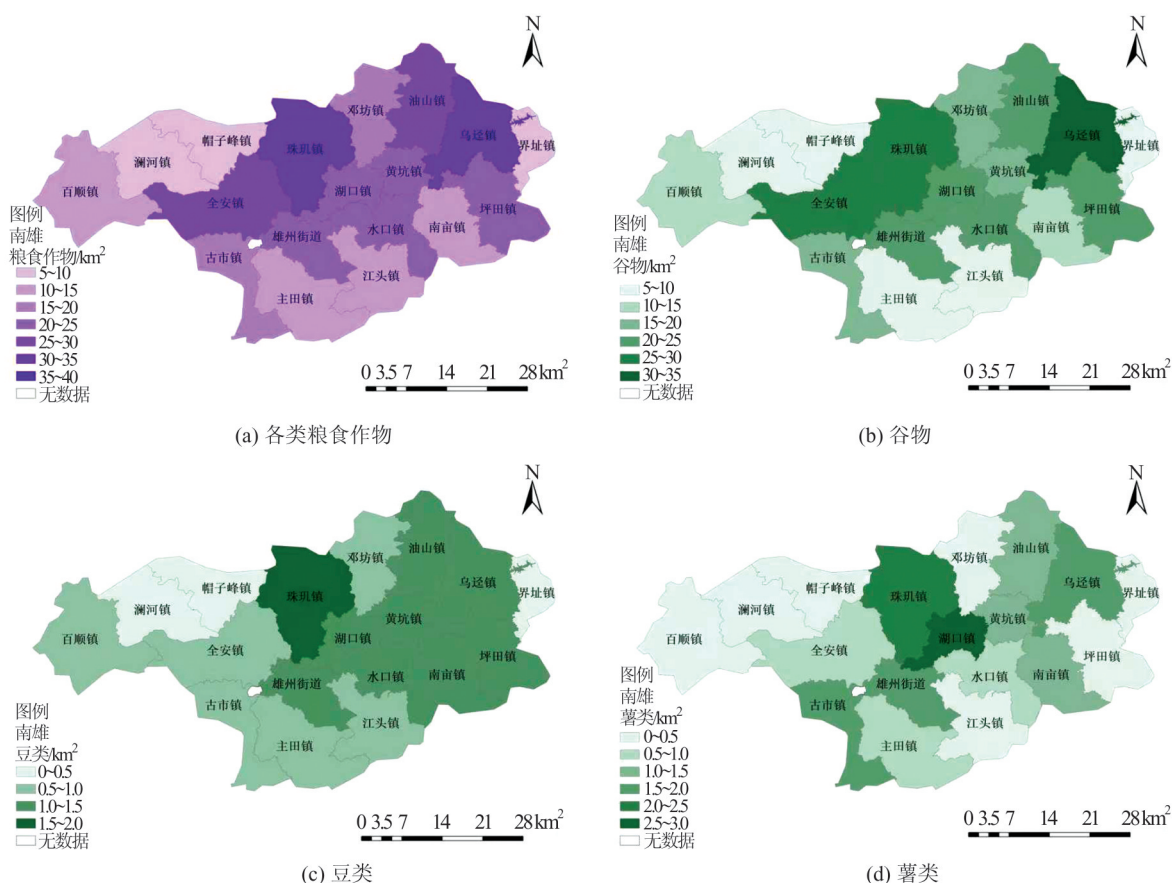


图4 2023年南雄市各镇主要粮食作物播种情况 GIS图

Figure 4 GIS map of sowing situation of main grain crops in each town of Nanxiong City in 2023

审图号:GS(2024)0650号的标准地图制作,底图无修改

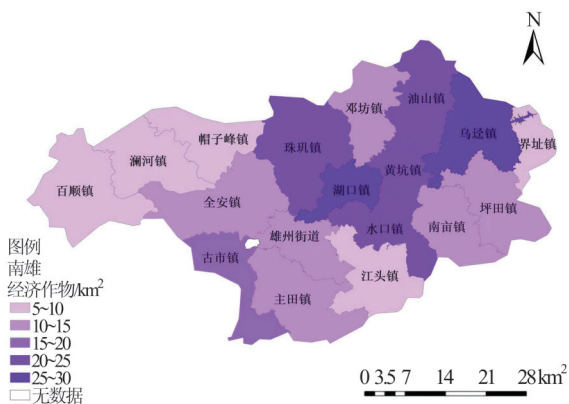


图5 2023年南雄市各镇主要经济作物播种面积情况 GIS图

Figure 5 GIS map of sowing area of main cash crops in each town of Nanxiong City in 2023

审图号:GS(2024)0650号的标准地图制作,底图无修改

采用直接还田的方式,农户分散离田利用次之,而市场化主体的参与度较低,其利用量几乎可以忽略不计。依据表4数据显示,直接还田处理的秸秆总量每年达 1.38×10^5 t,占已利用秸秆理论资源量的 65.72%。其中,稻谷秸秆的直接还田量较为突出,

早稻和晚稻的秸秆直接还田量合计达 9.72×10^4 t,占已利用秸秆理论资源量的 64.55%。

然而,直接还田的处理方式对于南雄市的实际种植情况来说,并非最佳选择。秸秆经过粉碎后还田,由于时间不足而无法充分腐熟,这可能导致土壤结块板结,影响土壤含水率,进而不利于第三季黄烟的种植^[15]。南雄市农业农村局2023年的监测结果分析表明,连续将秸秆粉碎还田,导致土壤容重增加 $0.15\text{g}/\text{cm}^3$,孔隙度下降了12%。这与已有研究中未腐熟秸秆造成土壤团聚体减少的结论一致^[16];在油菜与水稻轮作的研究中也发现^[17],土壤孔隙度若降低10%,磷素的利用效率就会随之下降17%,作物减产也由此产生。这一情况凸显了土壤孔隙构造对于养分利用效能的关键意义。这种土壤状况的变化直接降低了土壤的持水性,当土壤含水率下降到一定程度时,就会引发水分胁迫。有研究表明,当土壤含水率低于19.5%时,作物根系的吸水阻力会增加37%^[18]。

土壤质量的下降将直接影响农作物的产量,而对南雄市的农业经济造成不利影响。同时,因为

表3 南雄市2023年主要农作物秸秆理论资源产生量
Table 3 Theoretical resource production of crop straw in Nanxiong City in 2023

产品	农作物产量/(t·a ⁻¹)	草谷比	可收集利用系数	秸秆理论资源量/(t·a ⁻¹)
稻谷	190 536	1.06	0.80	161 574.5
玉米	5 527	1.32	0.95	6 930.86
薯类(番薯和马铃薯)	37 815	1.41	0.73	38 922.98
大豆	2 554.2	1.08	0.56	1 544.78
花生	28 143	1.65	0.83	38 541.84
烟叶	13 892	1.60	0.95	21 115.84
合计	—	—	—	268 630.8

表4 2023年南雄市秸秆已利用量
Table 4 Utilized amount of straw in Nanxiong City in 2023

作物种类	直接还田量/t	直接还田率/%	离田利用量			
			农户分散离田利用量	市场化主体利用量	调出量	合计
稻谷	97 241.53	64.55	41 439.87	0	0	41 439.87
玉米	4 261.57	76.88	220.03	25	0	245.03
马铃薯	943.49	80.65	0	0	0	0
甘薯	5 335.69	36.83	8 152.31	0	0	8 152.31
花生	26 481.87	59.64	17 457.88	0	0	17 457.88
油菜	970.22	69.69	304.94	0	0	304.94
大豆	1 280.62	35.67	1 870.94	0	0	1 870.94
其他	1 925.92	37.93	2 750.4	0	0	2 750.4

(表4秸秆量为实际情况统计,表3秸秆量为理论最大值,两者有出入属于正常现象)

南方地区雨季原因导致收割机器往往无法下田,秸秆留田较多。较高的秸秆留茬(32.6±4.2 cm)进一步加剧了秸秆腐熟的障碍。研究表明,30 cm高的留茬秸秆完全腐解需要的时间远远超过了三季轮作的间隔时间(60 d),从而易形成“还田-板结-减产”的恶性循环^[19-20]。另有研究指出,秸秆未经腐熟就还田,会打破土壤固相、液相、气相这三相结构的平衡^[21]。土壤通气性能变差,作物根系的呼吸就会受到限制,进而影响作物对养分的主动吸收,最终使农作物的产量受到不良影响。土壤质量下滑不仅会影响当季黄烟的产量,从长远来看,还可能打破农田生态系统的平衡,对南雄市农业的可持续发展构成威胁。

因此,南雄市秸秆资源化十分迫切,尽管南雄市本地有部分秸秆利用企业,如利用竹林秸秆造纸的企业,但目前尚无以稻谷秸秆为主的农作物秸秆利用企业。由此可见,南雄市农作物秸秆在资源化利用方面尚有较大的潜力,大量的秸秆资源有待被合理开发利用。此外,南雄市由于地域特点,实行特有的三季种植模式,农作物秸秆主要在秋收时产生,这使得秸秆资源的供应连续性不强。因此,在对秸秆进行资源化利用的过程中,必须考虑到秸秆资源供

应的连续性问题,在必要的情况下,需要建设秸秆保存仓库。南雄市多为山丘地形,这会增加秸秆运输和保存的额外费用。综合考虑当地作物秸秆的产量,建议在乌迳镇建设秸秆资源利用场所,这样有利于秸秆原料的持续收集和利用。

综上所述,南雄市拥有大量亟待利用的秸秆资源,目前迫切需要引入稳定可靠的收割方式来收集秸秆,并引进秸秆资源综合利用项目对这些秸秆进行合理处理。

2.4 生物质资源转化潜力分析

大多数秸秆都可以作为生物质转化的原料,农作物的秸秆中含有丰富的有机质,可以通过生物质转化技术转化为生物能源,如生物气、生物柴油等。由于南雄市的水稻秸秆及玉米秸秆多于其他秸秆产量,考虑秸秆收集及运输等原因,推荐使用水稻和玉米秸秆为原材料,因此只计算水稻秸秆和玉米秸秆的转化潜力来粗略估计南雄市的秸秆资源产气潜力。

根据表2,选用系数范围,得出表5南雄市秸秆年产气量。可见,若以南雄市丰富的水稻秸秆作为原料进行生物质制气,其产气量可达到(3.89~4.76)×10⁷ m³/a。相比之下,以玉米秸秆为原料的

表5 南雄市秸秆年产气量

Table 5 Annual gas production of straw in Nanxiong City

原料种类	总固体含量/%	原料产气率/ ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	沼气产量/ (10^7 m^3)
水稻秸秆	83~95	0.29~0.31	3.89~4.76
玉米秸秆	80~95	0.40~0.50	0.22~0.33

产气量为 $(2.2 \sim 3.3) \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 。在不考虑秸秆种类差异的情况下,南雄市可利用的秸秆资源总产气量高达 $(4.11 \sim 5.09) \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$,体现出巨大的产气潜力。根据沼气产量进一步计算碳减排量为 $(7.81 \sim 9.67) \times 10^4 \text{ t CO}_2$,可见其优异的碳减排潜力。

通过比较不同秸秆原料的产气量,可以明显看出水稻秸秆的年产气量比玉米秸秆高出一个数量级。这一结果不仅体现了水稻秸秆在生物质制气方面的优势,也进一步证实了南雄市水稻秸秆资源的丰富性和利用价值。

因此,若计划在南雄市建设生物质制气厂,推荐使用水稻秸秆作为原材料。这不仅能够充分利用当地丰富的秸秆资源,实现资源的有效利用和循环发展,还能为工厂提供稳定且高效的原料来源,促进南雄市农业废弃物的资源化利用和农业经济的可持续发展。

3 结 论

本研究对南雄市农作物秸秆资源的产量、分布、利用现状及转化潜力进行了系统分析,主要结论与建议如下。

(1)南雄市秸秆产量的时间分布规律。南雄市农作物种植呈现稳定发展态势,2018年至2022年粮食种植面积与总产量持续增长,由2018年 $1.85 \times 10^5 \text{ t}$ 增加至2022年的 $2.10 \times 10^5 \text{ t}$,年均种植面积达 343.62 km^2 ,年均总产量达 $2.02 \times 10^5 \text{ t}$ 。2023年虽受雨季影响,粮食作物产量略有波动,但仍保持较高水平,表明区域农业生产基础稳固,为秸秆资源提供了持续产出保障。2023年秸秆理论年产量达 $2.69 \times 10^5 \text{ t}$,其中稻谷秸秆 $1.62 \times 10^5 \text{ t}$,占比60.22%,是最主要的秸秆类型,这与当地粮食作物以稻谷为主的种植结构高度一致。

(2)南雄市秸秆地域分布规律及秸秆资源利用项目选址建议。从乡级秸秆资源潜力上看,各镇(街道)分布特征明显,粮食作物主要分布于乌迳镇、珠玑镇和全安镇,经济作物主要分布于乌迳镇和湖口镇。结合资源分布与地形特点,建议优先考虑在乌迳镇布局秸秆资源利用设施,以降低运输与收集成

本,以水稻秸秆(占比60.22%)为主要原材料,进行生物质制气,实现高效的资源化利用,尽可能减少直接还田的秸秆量,并且能够符合《广东省循环经济发展实施方案(2022年—2025年)》设定秸秆综合利用率 $\geq 86\%$ 的刚性目标,实现以燃料化与饲料化的优先路径;针对季节性供应波动,需规划建设秸秆储存仓库,保障原料持续供应。同时,应积极引进适宜的秸秆收割方式,并大力扶持秸秆资源化综合利用项目,减少直接还田带来的负面影响,提升资源利用效率。

(3)南雄市生物质资源利用的现状与趋势分析。当前南雄市直接还田处理的秸秆总量达到了 $1.38 \times 10^5 \text{ t/a}$,占已利用秸秆理论资源量的65.72%,其他为农户分散离田利用,市场化主体利用量较低,资源化利用程度有待提升。秸秆能源转化潜力显著,以水稻秸秆为原料的生物质制气量可达 $(3.89 \sim 4.76) \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$,玉米秸秆制气量为 $(2.2 \sim 3.3) \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,合计产气潜力为 $(4.11 \sim 5.09) \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$,其中水稻秸秆贡献占比超95%,是生物质能源化利用的优选原料,而且碳减排量能达到 $(7.81 \sim 9.67) \times 10^4 \text{ t CO}_2$,为实现绿色低碳转型具有重要意义。

总体而言,本研究分析了南雄市秸秆资源的开发潜力与制约因素,可为广东省乃至南方类似农业区域的秸秆资源统计、规模化利用及相关政策制定提供参考依据。未来研究可进一步细化秸秆收集成本核算与不同利用模式的经济性评估,为推动秸秆资源化产业化提供更精准的支撑。

参考文献

- [1] 朱开伟,刘贞,吕指臣,等.中国主要农作物生物质能生态潜力及时空分析[J].中国农业科学,2015,48(21):4285-4301.
Zhu K W, Liu Z, Lü Z C, et al. The ecological development potential and time-space analysis of Chinese main agricultural crop biomass energy [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(21): 4285-4301.
- [2] 陈永松.黔西南州主要农作物秸秆理论资源潜力及县域分布特征[J].贵州农业科学,2018,46(7):91-94.
Chen Y S. Theoretical resources potential and county-level distribution characteristics of major crops straw in Qianxinan prefecture [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2018, 46(7): 91-94.
- [3] 周彦名,王娇月,王诗云,等.我国生物质资源能源开发利用潜力评估[J].生态学杂志,2024,43(9):2702-2713.
Zhou Y M, Wang J Y, Wang S Y, et al. Assessment

- of biomass resources for energy use potential in China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(9): 2702-2713.
- [4] 许轶冰, 刘志, 顾惠玲, 等. 农作物秸秆资源化利用问题及发展策略研究[J]. *安徽农业科学*, 2024, 52(7): 248-250.
- Xu Y B, Liu Z, Gu H L, et al. Research on the problems and development strategies of resource utilization of crop straw [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2024, 52(7): 248-250.
- [5] 熊冰洋, 王胜权. 安顺市农作物秸秆综合利用现状及发展对策[J]. *农技服务*, 2024, 41(4): 81-84.
- Xiong B Y, Wang S Q. Present situation and development countermeasures of comprehensive utilization of crop straw in Anshun city [J]. *Agricultural Technology Service*, 2024, 41(4): 81-84.
- [6] 龚娜, 刘国丽, 陈珣, 等. 辽宁省农作物秸秆基料化利用现状与对策[J]. *农业与技术*, 2024, 44(5): 98-100.
- Gong N, Liu G L, Chen X, et al. Present situation and countermeasures of crop straw utilization in Liaoning Province [J]. *Agriculture and Technology*, 2024, 44(5): 98-100.
- [7] 厉龙, 虎雪姣, 施安, 等. 农作物秸秆饲料化利用技术的研究进展[J]. *中国畜牧业*, 2024(5): 21-22.
- Li L, Hu X J, Shi A, et al. Research progress in utilization of crop straw as feed [J]. *China Animal Industry*, 2024(5): 21-22.
- [8] 秦凯, 陈芳清, 张行, 等. 碳氮比对模拟水稻秸秆田间厌氧发酵系统甲烷生产和秸秆降解的影响[J]. *生物资源*, 2020, 42(3): 342-348.
- Qin K, Chen F Q, Zhang H, et al. Effects of carbon nitrogen ratio on methane production and straw degradation in a simulated field anaerobic fermentation system of rice straw [J]. *Biotic Resources*, 2020, 42(3): 342-348.
- [9] 王闻, 陈小燕, 朱顺妮, 等. 广东省生物质能资源潜力评估及分布特点[J]. *可再生能源*, 2023, 41(2): 152-159.
- Wang W, Chen X Y, Zhu S N, et al. Potential estimation and distribution of biomass energy resources in Guangdong Province [J]. *Renewable Energy Resources*, 2023, 41(2): 152-159.
- [10] 张成昊, 李政, 王昌梅, 等. 吉林省主要农作物秸秆空间分布特征及沼气潜力分析[J]. *现代农业科技*, 2023(24): 122-127.
- Zhang C H, Li Z, Wang C M, et al. Spatial distribution characteristics and biogas potential analysis of main crop straws in Jilin Province [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2023(24): 122-127.
- [11] 宋波, 包海军, 詹偶如, 等. 规模化秸秆厌氧发酵预处理技术研究及工程实践[J]. *环境工程*, 2023, 41(S1): 415-419.
- Song B, Bao H J, Zhan O R, et al. Study on pretreatment technology of large-scale anaerobic fermentation of straw and its engineering practice [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(S1): 415-419.
- [12] 彭立群, 张强, 贺克斌. 基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(8): 1109-1118.
- Peng L Q, Zhang Q, He K B. Emissions inventory of atmospheric pollutants from open burning of crop residues in China based on a national questionnaire [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(8): 1109-1118.
- [13] 王亚静, 毕于运, 高春雨. 中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(9): 1852-1859.
- Wang Y J, Bi Y Y, Gao C Y. Collectable amounts and suitability evaluation of straw resource in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(9): 1852-1859.
- [14] 中华人民共和国农业农村部. 沼气工程技术规范 第1部分: 工程设计: NY/T 1220.1—2019[S]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- Technical Specifications for Biogas Engineering Part 1: Engineering Design: NY/T 1220.1—2019 [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2019.
- [15] 庞秀芬, 王浩菊, 段若依, 等. 混合菌群发酵秸秆成菌体蛋白及其动力学分析[J]. *生物资源*, 2017, 39(3): 217-222.
- Pang X F, Wang H J, Duan R Y, et al. Synthesis and dynamics analysis of mycoprotein by fermentation of straw using mixed microbes [J]. *Biotic Resources*, 2017, 39(3): 217-222.
- [16] 李祥, 柯希恒, 王树星, 等. 小麦秸秆还田模式对秸秆腐解及土壤性质的影响[J]. *贵州农业科学*, 2022, 50(1): 23-29.
- Li X, Ke X H, Wang S X, et al. Effects of wheat straw returning modes on straw decomposition and soil properties [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2022, 50(1): 23-29.
- [17] 王昆昆, 廖世鹏, 任涛, 等. 连续秸秆还田对油菜水稻轮作土壤磷素有效性及作物磷素利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(1): 94-104.
- Wang K K, Liao S P, Ren T, et al. Effect of continuous straw returning on soil phosphorus availability and crop phosphorus utilization efficiency of oilseed rape-rice rotation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53

- (1): 94-104.
- [18] 张明伟, 杨恒山, 邵继承, 等. 秸秆还田与浅埋滴灌对玉米耕层土壤水稳性团聚体及其碳含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(5): 999-1008.
- Zhang M W, Yang H S, Tai J C, et al. Effects of straw return and shallow drip irrigation on topsoil water-stable aggregates and carbon content in maize field [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41 (5): 999-1008.
- [19] 张银平, 迟岩杰, 王振伟, 等. 秸秆混土还田对两熟区玉米秸秆腐解速度的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(19): 245-249.
- Zhang Y P, Chi Y J, Wang Z W, et al. Effect of straw mixed with soil returning on decomposition rate of corn straw in double cropping area [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(19): 245-249.
- [20] 谭可菲, 王麒, 刘传增, 等. 黑龙江西部地区水稻秸秆腐解特征研究[J]. 中国稻米, 2018, 24(4): 96-98.
- Tan K F, Wang Q, Liu C Z, et al. Decomposition characteristics of rice straw in western Heilongjiang [J]. China Rice, 2018, 24(4): 96-98.
- [21] 陈云峰, 夏贤格, 杨利, 等. 秸秆还田是秸秆资源化利用的现实途径[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 299-307.
- Chen Y F, Xia X G, Yang L, et al. Straw return is the realistic way of straw resource utilization [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(6): 299-307.