资源科学
第47卷 第9期 2025年9月 2025,47(9):2019-2032
Resources Science
Vol. 47, No. 9 Sep., 2025

引用格式:柯文岚, 闫晶晶, 张国丰, 等. 基于多目标协同的农林生物质资源优化利用模拟与实施策略: 以福建省为例[J]. 资源科学, 2025, 47(9): 2019-2032. [Ke W L, Yan J J, Zhang G F, et al. Simulation and implementation strategies for optimal utilization of agricultural and forestry biomass resources based on multi-objective synergy: A case study of Fujian Province[J]. Resources Science, 2025, 47(9): 2019-2032.] DOI: 10.18402/resci.2025.09.14

基于多目标协同的农林生物质资源优化利用模拟与实施策略
——以福建省为例

柯文岚[1],闫晶晶[2],张国丰[3],沙景华[2]

(1. 福建江夏学院经济贸易学院,福州 350108;2. 中国地质大学(北京)经济管理学院,北京 100083;3. 河北地质大学经济学院,石家庄 050031)

摘 要:【目的】建立有效的多目标协同机制,发挥生物质资源利用的能源替代、碳减排和农村经济振兴多重功能,是中国生物质能产业发展亟待解决的现实问题。**【方法】**本文基于动态市场均衡模型与多目标规划方法,以福建省为例,构建了一个省域农林生物质资源利用与"经济-能源-环境"系统多主体多目标协同发展模型,旨在模拟求解2017—2030年的最优技术与政策实施策略。**【结果】**①生物质资源利用只有兼顾能耗双控约束和经济增长目标,才能实现碳排放与能源利用、经济增长的强脱钩状态。②模拟期内生物质能利用累计可替代化石能源81.56万t标煤,碳减排330.79万t,实现降碳效益2.28亿元,增加就业5.13万人,提高农民收入36.14亿元,实现污水减排效益4.15亿元、化肥节约效益16.63亿元。地方政府可通过新建补贴、电价补贴等措施推进生物质能产业向市场化过渡。③通过在全省分布式建设476个小型气化发电项目、83个沼气发电项目,将一定程度上解决生物质原料分散、收储运困难等问题,配合产业绿色转型可实现中长期生物质能利用、乡村振兴与降碳效益等多目标的协调发展。**【结论】**本文通过情景分析与动态模拟,证实了引入包含资源利用技术和政府规制的政策组合,能够实现生物质能利用、乡村振兴与降碳效益等多目标协调发展,为在中国普及生物质资源利用提供了政策启示。

关键词:生物质资源;动态市场均衡模型;多目标协同;实施策略;多重效益;福建省
DOI: 10.18402/resci.2025.09.14

1 引言

随着"双碳"目标的深入落实,中国迈向了以能源绿色低碳发展为关键,加快形成节约资源和保护环境的产业结构和空间格局的高质量发展道路[1],这对中国绿色低碳能源产业提出了更高要求。生物质能源是继煤、油、气后第四大能源库[2,3],且其本身兼具废弃物利用、化石能源替代、二氧化碳减排和农村经济振兴的多重功能[4],对生物质能源的研究和推广有助于尽早实现温室气体的净零排放[5]。中国是生物质潜在资源大国,但受制于原料分布分散、大规模收集储运困难、产品生产成本高、扶持政策不到位等问题,生物质能利用的综合效益尚未显现。以福建省为例,常规能源短缺,生物柴油和户用沼气发展全国领先,但总体仍处于起步阶段,生物质能开发利用潜力大[6]。因此,贴近省情实际,以产业为纽带,以原料可得性为基础,以技术可行性为条件,以经济合理性为目标,建立多目标协同机制[7],模拟生物质资源优化利用及其多重效应,提出最优实施策略,对于在其他地区普及生物质资源开发利用具有重要的现实意义与借鉴作用。

收稿日期:2024-08-17;**修订日期:**2024-11-08

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41971258);福建省社会科学基金重点项目(FJ2025A030);福建省自然科学基金面上项目(2021J011227)

作者简介:柯文岚,女,福建泉州人,副教授,研究方向为资源环境经济政策评价、生态产品价值实现。**E-mail:** kewenlan1988@hotmail.com

通讯作者:闫晶晶,女,山西太原人,教授,博导,研究方向为资源环境经济、区域可持续发展。**E-mail:** yanjingjing312@hotmail.com

生物质资源量及能源潜力评估已引起国内外学者的广泛关注。多家国际能源机构对生物质资源量、能源量进行了预测[8,9],结果表明生物质能利用将成为全球能源发展的重点领域。袁振宏等[10]、张蓓蓓[11]测算了各省秸秆和农业加工剩余物、畜禽粪便、薪柴等生物质资源量、可收集量和能源潜力,结果显示中国生物质资源的总能源潜力为7.56亿t标煤,但生物质能源产业规模尚不足农林剩余物生物质能源潜力的10%。现有对生物质能源潜力的评估多基于可收集资源量的直接转化,忽略了技术可行性、经济合理性条件下的实际应用潜力评估。

生物质资源的有效利用还具有碳减排和社会经济等多重效益。在碳减排方面,国内外学者测算了农作物秸秆[12,13]、农林废弃物[14]、能源作物[15]、木质颗粒燃料[16]利用的碳减排贡献,结果均显示生物质能利用对比传统化石燃料具有较明显的降碳效应。王斯一等[17]发现生物质发电经济成本高于燃煤发电,但考虑环境效益和低碳因素时,生物质发电更具潜力。在社会效益方面,王火根等[18]指出如果我国生物质能利用量达到5亿t标煤,每年将会减少近2500万t氮氧化物和烟尘排放,提供就业岗位400万个,增加农民收入200亿元。然而,现有研究多侧重于生物质发电项目的环境、社会、经济影响评价,难以系统、动态地评估生物质资源利用的多重效应及其协同关系。

虽然生物质能利用具有明显的社会经济环境效益,但实践过程中仍存在困难。①农作物秸秆、畜禽粪便等农业生物质原料分布较分散,收集、运输和储存困难,需要在资源评价和环境评估基础上,合理规划生物质发电的选址和规模[19];②目前,中国在制造成本、关键技术集成与产业化规模等方面与国际先进水平存在较大差距[20],但到2030年,生物质混燃发电、直燃发电、气化发电、畜禽粪便制取沼气等技术成本将陆续与燃煤、汽油成本相当[21],届时全国推广使用成为可能;③生物质能源价格难以充分体现其社会环境价值,生物质能源产品的政策补贴有逐步退坡趋势[22],应根据生物质能产业发展阶段,制定合理的电价补贴、生物质原料补贴以及顺价机制[23]。此类研究多以定性分析为主,缺乏对技术选择与政府补贴的定量化研究,难以提出切实可行的对策建议。

生物质资源化利用既以减少温室气体排放为目标约束,更以获得合理经济收益为必要条件[24],对生物质能有效利用与“经济-能源-环境”系统优化策略问题进行研究,需要借助系统研究工具。动态最优化综合模型运用里昂惕夫动态市场均衡模型与多目标最优化规划方法,将“自顶向下”的宏观“经济-能源-环境”评价模型与“自底向上”的技术经济评价模型有机结合[25]。其中,市场均衡模型描述区域内各生产部门与最终消费之间的价值流动关系[26],再通过“资源消耗或污染排放强度”向量来评估资源与环境影响[27]。动态市场均衡模型结合资源环境约束目标能够从跨期迭代的动态视角描述资本形成、产业生产活动与各部门间的物质、能源流动关系[28],通过调控不同策略组合观察其产生的宏观经济影响和资源环境效应[29],以此来确定最优的系统策略。该方法已经被广泛用来研究技术和政策干预下,社会经济增长、资源有效利用、环境改善等多目标均衡发展的系统优化策略[30,31]。

总之,关于生物质能利用与社会经济、能源、环境系统的关系研究已经引起国内外专家和学者的广泛关注,生物质利用存在问题也取得了丰富的成果。但针对生物质利用的潜能动态评价以及系统优化路径还存在进一步研究的空间:①基于社会经济发展、技术进步、政策变化综合作用下中国省域农林生物质资源利用潜力的时空演进评估机制有待进一步完善;②自上而下与自下而上相结合的农林生物质资源利用与减污、降碳、增长协同效应动态优化模型有待进一步扩展;③对中国农林生物质能利用存在的问题及对策研究缺乏涵盖多主体、综合多目标的定量实证模拟,难以提出具体的实施策略。

综上,本文以福建省为研究对象,构建农林生物质资源利用与“经济-能源-环境”多目标协同发展的省域中尺度实证模型,设计引入生物质多元化利用备选技术、政府规制措施、调控目标等系统要素,求解最优策略解集,提出定量化实施策略,以期为中国省域绿色低碳能源利用与社会经济高质量发展相关研究提供理论指导和应用范例。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

福建省(115° 50′E—120° 43′E、23° 31′N—28° 18′N)地处中国东南沿海,东北与浙江省毗邻,西北与江西省接界,西南与广东省相连。全省下辖福州、厦门、莆田、泉州、漳州、龙岩、三明、南平、宁德9个地级市和平潭综合实验区(平潭县)。全省地势西北高,东南低,呈依山傍海态势;境内山地、丘陵面积约占全省总面积的90%;常规化石能源短缺,但森林覆盖率为66.8%位居全国首位,蕴藏丰富的生物质资源[6]。根据2017年基期数据测算,农林生物质资源为生物质能产业发展的主要原料基础,故本文以秸秆、农业剩余物、林业剩余物、畜禽粪便作为重点研究对象(图1)。

首先,福建省虽在生物质资源利用方面有较成熟的技术和资源,但因生物质能占比小,在政策支持、资金扶持、落实方面都未引起足够重视;其次,社会各界对生物质能利用的降碳效应存在偏见,把粗放处理生物质资源所产生的二次污染问题等同于生物质能利用的环境效应,对加快发展生物质能有疑虑,生物质能源建设项目尚未规范地纳入各级财政预算和计划;再次,由于生物质能产业在发展初期为弱势产业,投资高、技术含量高,定价方面没有体现生物质能对环保的贡献,需要政府通过财税措施加以扶持;最后,福建省大部分生物质能相关企业生产规模偏小,集约化程度低,原料来源困难,生产成本较高,难以适应市场竞争要求[32]。《福建省

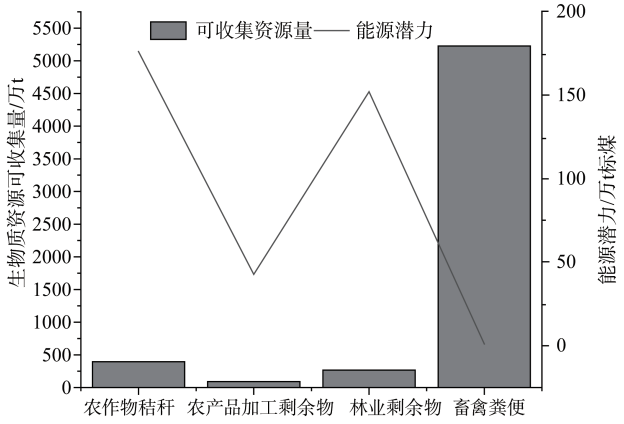


图1 2017年福建省生物质资源可收集量与能源潜力概况

Figure 1 Overview of collectable biomass resources and their energy potential in Fujian Province, 2017

“十四五”能源发展专项规划》特别指出,要有序发展生物质直燃发电,积极推进生物质气化及发电、生物质成型燃料、沼气等分布式生物质能的应用。为此,针对福建省生物质能利用存在的硬件设施及软件制度上的问题,从区域经济发展水平、技术经济性及生物质产业发展规划出发,构建农林生物质资源利用多主体多目标协同发展模型,从政府、企业和林农层面,为合理利用农林生物质资源引入切实可行的技术和政策策略集。

2.2 数据来源

数据来源于国家公布数据、实地调研数据和计算数据3部分。其中国家公布数据有《福建省投入产出表2017》《福建省统计年鉴2023》、福建省各市统计年鉴2023、中国碳核算数据库(CEADs)等;通过走访福建省政府、生态环境厅、自然资源厅获得《福建省国民经济和社会发展“十四五”规划》《福建省“十四五”生态环境保护专项规划》《福建省“十四五”能源发展专项规划》《“十四五”推进农业农村现代化重点工程》等规划文件,通过企业走访、行业调查获取生物质资源开发企业的财务报告、环评报告、技术参数等调研数据。根据上述数据,计算模型所需要的投入产出系数、各产业资本产出率、能源消耗系数、碳排放系数、生物质可收集资源量系数等外生变量,最终完成数据收集工作。

3 研究方法

3.1 模型框架与前提假设

3.1.1 农林生物质资源利用多主体多目标协同模型框架

基于价值、物质、能源“三平衡”理论,构建农林生物质资源利用多主体多目标协同发展中尺度模型,包括社会经济高质量发展模块、能源平衡模块、碳平衡模块,以及技术与政策方案模块(图2)。

首先,通过里昂惕夫市场均衡模型实现地区生产总值的跨期迭代,再使用与产出水平相关的“污染和消耗强度”向量实现生物质资源利用对能源与环境系统的传导作用。在目标设置上,将地区生产总值和降碳效益最大化作为目标函数,设定“能耗双控”“碳双控”、生物质资源利用限值等系统发展目标。同时,设计引入包含政府规制与生物质处理技术策略集,模拟不同情景下农林生物质资源利用

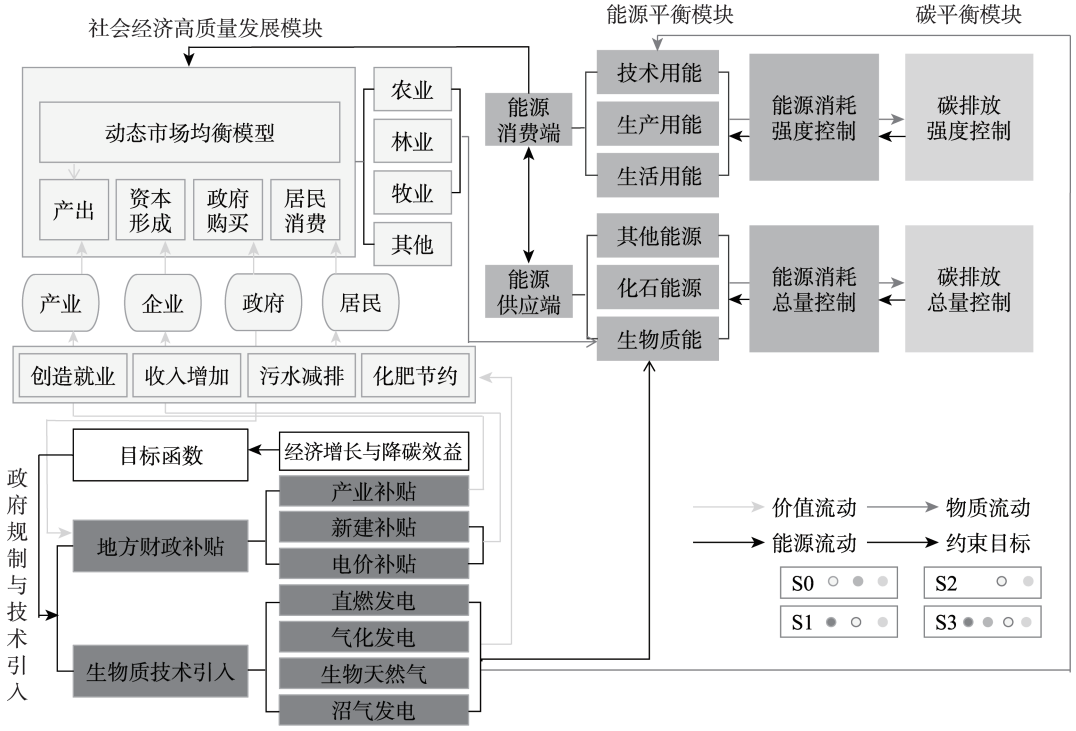


图2 省域农林生物质资源利用多主体多目标协同发展模型框架

Figure 2 Framework of multi-agent and multi-objective collaborative development model for provincial agricultural and forestry biomass resource utilization

与环境系统、社会经济活动间的传导效应。

3.1.2 政府规制与技术引入策略集

策略集包括政府规制和技术引入方案。其中，政府规制主要包括产业转型补贴、新建投资和运营补贴、生物质能电价补贴(图2)。首先，从能源消费端看，将产业发展与“双碳”目标衔接，以“碳双控”“能源双控”倒逼产业结构调整，通过产业转型补贴缩减高耗能高排放产业，纠正产业资源错配，释放碳源空间；其二，从能源供应端看，以福建省整体生物质发电和供热需求为导向，统筹布局生物质发电和生物质制气多元利用方式，地方政府为生物质直燃发电、气化发电、生物天然气、沼气发电等技术引入提供项目新建补贴；其三，通过设计电价补贴机制，激励企业进行技术创新，扶持生物质能产业向市场化过渡。

技术引入方面，重点考察直燃发电、气化发电、生物天然气[33]和沼气发电[18]技术，其中抽汽凝汽式汽轮发电、直燃汽轮机发电、气化发电、生物天然气4项技术以秸秆、农业剩余物、林业剩余物为原料，沼气发电技术以畜产废弃物为原料。表1列出了基于全生命周期方法计算的废弃物处理规模、发电量、能源产出效率、投资成本、碳减排系数等技术参数。

3.1.3 前提假设

本文从里昂惕夫市场均衡模型出发模拟社会经济各部门产值的跨期迭代，故假设各产业部门投入产出效率在模拟期内保持稳定；其次，各产业部门不存在过剩产能，通过投资来扩大生产规模，模拟期内，新建生物质能项目建设不受工期限制，直接投产；另外，为了便于模拟生物质资源利用的能源、环境影响，假设生物质资源的产出、能源消耗、污染物排放、技术引进、财政补贴与社会经济活动之间存在线性相关；此外，由于研究专注于区域内价值、物质、能源平衡，因此不考虑跨区域流动关系。

3.2 数学模型

运用多目标最优化规划方法将上述理论模型和策略集进行定量化处理，运用大型分析软件LINGO转化为计算机语言，录入基期面板数据和各规划年约束目标阈值，通过变量间线性、非线性关系实现模拟期内生变量的跨期迭代运算。模型共有10578变量，篇幅有限仅列出关键公式和重要变量。

表1 不同生物质能利用备选方案的技术参数

Table 1 Technical parameters of alternative biomass energy utilization options

技术参数	A:抽汽凝汽式汽轮发电/(24 MW)	B:直燃汽轮机发电/(25 MW)	C:气化发电/(2 MW)	D:生物天然气/m^3	E:沼气发电/(3 MW)
农林剩余物处理量/(万t/年)	22.000	19.770	1.950	0.023	–
畜产废弃物处理量/(万t/年)	–	–	–	–	30.000
发电量/(亿kWh/年)	1.560	1.425	0.108	0.006	0.180
能源产出系数/(万t标煤/万t)	0.087	0.089	0.068	0.307	0.007
单位处理投资额/(亿元/万t)	0.126	0.116	0.051	1.004	0.029
单位处理碳减排系数/(万t/万t)	0.373	0.379	0.291	1.311	0.024

3.2.1 目标函数与约束条件

为了实现福建省农林生物质能利用与“经济–能源–环境”系统的均衡发展,响应国家评估机制改革,将考虑社会折旧的经济增长和降碳效益最大化,以及“能耗双控”“碳双控”作为目标函数和主要约束条件。根据《福建省“十四五”节能减排综合工作实施方案》,到2030年能源消耗总量低于20400万t标煤,2025年单位GDP能源消耗较2020年下降14%,2030年碳排放总量控制在32900万t,单位GDP二氧化碳排放比2005年下降65%以上,具体公式如下:

$$\mathrm{MAX}\sum_{t}\frac{1}{(1+\rho)^{t-1}}\left(GRP_t+BCER_t\right) \quad (1)$$

$$TED_{14} \leqslant 20400 \quad (2)$$

$$EI_4 \times (1\% \sim 14\%) \geqslant EI_9 \quad (3)$$

$$TCE_{14} \leqslant 32900 \quad (4)$$

$$TCE_{14} \leqslant 1.28 \times GRP_{14} \quad (5)$$

式中:t为模拟期(2017年—2030年);GRP_t为第t期地区生产总值;$BCER_t$为第t期碳减排效益;EI_t为第t期能源利用强度;TED_t为第t期能源消耗总量;TCE_t为第t期二氧化碳排放量;ρ为社会折旧率,取值0.05。

3.2.2 社会经济高质量发展

由于生物质资源主要来源于农业、林业和牧业,因此根据福建省投入产出表分离出第一产业,并将全部产业重新划分为12部门①,据此构建考虑新建生物质项目影响的里昂惕夫市场均衡矩阵,即各产业产值要大于或等于中间投入和最终需求之和。地区生产总值GRP则由各产业产值加总。

$$\boldsymbol{X}_t^m \geqslant \boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{X}_t + \boldsymbol{C}_t + \boldsymbol{I}_t^m + \beta\cdot\boldsymbol{I}_t^{\mathrm{be}} + \boldsymbol{NE}_t \quad (6)$$

$$GRP_t = \sum\nolimits_m \delta_m\cdot\boldsymbol{X}_t^m \quad (7)$$

式中:$\boldsymbol{X}_t^m$为第t期产业m生产总值矩阵;$\boldsymbol{A}$为投入产出系数矩阵;$\boldsymbol{C}_t$为第t期产业消费矩阵;$\boldsymbol{I}_t^m$为第t期产业m投资矩阵;$\boldsymbol{I}_t^{\mathrm{be}}$为第$t$期新生物质能利用技术的总投资矩阵;$\boldsymbol{NE}_t$为第$t$期产业净出口矩阵;$GRP_t$为第$t$期地区生产总值;$\beta$为生物质项目的影响系数;$\delta_m$为产业$m$的附加价值率。

3.2.3 能源平衡与生物质能产出

(1)生物质能产出量

新增生物质能产出量由各市各类生物质利用技术能源产出系数与废弃物处理量决定,各类技术的投资总额由废弃物处理量和单位废弃物处理的投资额决定,各市不同生物质能利用技术的需求量由各市农林废弃物处理目标,即农作物秸秆综合利用率达到86%,畜禽粪污综合利用率达到93%,以及各技术的单位废弃物处理能力决定。

$$OBET_t=\sum_j\begin{pmatrix}\varepsilon\cdot NBET_{jt}^{\mathrm{A}}+\varphi\cdot NBET_{jt}^{\mathrm{B}}+\omega\cdot NBET_{jt}^{\mathrm{C}}\\+\tau\cdot NBET_{jt}^{\mathrm{D}}+\sigma\cdot NBET_{jt}^{\mathrm{E}}\end{pmatrix} \quad (8)$$

$$IBE_{jt}^s = q^s \times NBET_{jt}^s,\ \forall s \in S \quad (9)$$

$$CBE_{jt}^s \geqslant 1/w^s \times NBET_{jt}^s,\ \forall s \in S \quad (10)$$

式中:$OBET_t$为第t期新增生物质能产出量;$NBET_{jt}^s$为第t期区域j采用技术s($s=\{\mathrm{A,B,C,D,E}\}$)后新增的生物质废弃物处理量;IBE_{jt}^s为第t期区域j生物质能利用技术s的投资额;CBE_{jt}^s为第t期区域j生物质能利用技术s的引入数量;ε、φ、ω、τ、σ为生物质能利用技术s的能源产出系数;q^s为生物质能利用技术s

① X1:农业;X2:林业;X3:牧业;X4:渔业;X5:采矿业;X6:食品、烟草、纺织、木材及其他制造业;X7:石油化工及金属、非金属制品业;X8:装备制造业;X9:电力、热力、燃气、水的生产和供应业;X10:建筑业;X11:商贸、交通、仓储及餐饮业;X12:信息技术、金融、房产及其他服务业。

的单位生物质废弃物处理投资额；w^s为生物质能利用技术s的单位废弃物处理能力（表1）。

（2）能源需求

能源需求来自产业生产消耗、居民最终消费以及新增生物质能利用技术所增加的能耗，其中新增技术所需能耗由各技术生物质能产出量与能源消耗系数计算得出。

$$TED_t = IED_t + CED_t + BEUD_t \quad (11)$$

$$BEUD_t = \sum_j (\iota \times NBET_{jt}^{A} + \psi \times NBET_{jt}^{B} + \zeta \times NBET_{jt}^{C} + \varsigma \times NBET_{jt}^{D} + \upsilon \times NBET_{jt}^{E}) \quad (12)$$

式中：TED_t为第t期能源总需求；IED_t为第t期生产活动能源需求；CED_t为第t期居民最终消费能源需求；$BEUD_t$为第t期新增生物质能利用技术的能源需求；ι、ψ、ζ、ς、υ分别为生物质能利用技术s的能源消耗系数。

3.2.4 碳平衡与降碳效益

碳排放来源于产业生产活动与城乡居民活动两大部分，为重点考察生物质利用技术与政策组合实施前后的碳排放效果，在产业生产与居民生活两大排放源基础上考虑新增生物质能源量，按照气化发电、沼气发电及燃煤火电全生命周期碳排放量[18]测算其替代传统化石能源的碳减排量，再根据当期碳排放权交易市场价计算碳减排效益。

$$TEC_t = TECI_t + TCEH_t - SFEC_t \quad (13)$$

$$SFEC_t = \sum_j (\varpi \times NBET_{jt}^{A} \theta \times NBET_{jt}^{B} + \vartheta \times NBET_{jt}^{C} + \mu \times NBET_{jt}^{D} + \upsilon \times NBET_{jt}^{E}) \quad (14)$$

$$BCER_t = SFEC_t \times Pc \quad (15)$$

式中：TEC_t为第t期碳排放量；$TCEI_t$为第t期产业源碳排放量；$TCEH_t$为第t期居民生活源碳排放量；$SFEC_t$为第t期新增生物质能替代传统化石能源所减少的碳排放量；$BCER_t$为第t期碳减排效益；Pc为当期碳排放交易市场交易碳价[34]；ϖ、θ、ϑ、μ、υ分别为生物质能利用技术s的碳减排系数。

3.2.5 财政补贴

通过市场配置难以产生有效的污染物控制和再生资源节约，试图单方面控制污染和资源循环利用的企业处于竞争劣势，这部分额外的支出使得他们的生产成本比那些不负责任的竞争者高。因此为鼓励福建省生物质能产业发展，在初期需要政府在产业转型、新设施建设、过渡性电价方面给予财政补贴。其中，利用哈罗德-多马模型描述产业转型补贴后的资本产出关系[29]，用技术投资总额表示新设施建设补贴。过渡性电价补贴则是在现有生物质能上网电价基础上，综合考虑环境成本与减排效益，每千瓦时补贴0.25元[18]。

$$FB_t \geqslant S^m{}_t + IBE_t + SBEP_t \quad (16)$$

$$\boldsymbol{X}^m{}_t \leqslant \boldsymbol{\alpha}^m \cdot (\boldsymbol{K}^m{}_t - \boldsymbol{S}^m{}_t) \quad (17)$$

$$SBEP_t = \sum_j RTOE_{jt} \times 0.25 \quad (18)$$

式中：FB_t为第t期区域财政补贴总额；$\boldsymbol{\alpha}^m$为产业m的资本产出率；$\boldsymbol{K}^m{}_t$为第t期产业m的资本量；$\boldsymbol{S}^m{}_t$为第t期用于缩减产业m的补贴额；$SBEP_t$为第t期生物质能电价补贴；$RTOE_{jt}$为第t期第j区域生物质能发电量。

3.2.6 农村社会效益

根据生物质能利用技术全生命周期所需要的从业人员数计算引入技术和新建工程后增加的就业人数，按照所收购的农业剩余物平均收购价格计算每年可增加的农民收入。此外，每个沼气发电工程所产生的沼液肥可节约1万t无公害农产品生产用肥，实现污水减排效益0.05亿元，按每万t化肥0.2亿元计算化肥节约效益。

$$AE_t = \sum_j (a \times CBE_{jt}^{A} + b \times CBE_{jt}^{B} + c \times CBE_{jt}^{C} + d \times CBE_{jt}^{D} + e \times CBE_{jt}^{E}) \quad (19)$$

$$AIF_t = \sum_j (\alpha \times IBET_{jt}^{A} + \beta \times IBET_{jt}^{B} + \gamma \times IBET_{jt}^{C} + \eta \times IBET_{jt}^{D} + \xi \times IBET_{jt}^{E}) \quad (20)$$

$$BFS_t = CBE_{jt}^{D} \times 0.2 \quad (21)$$

$$BFW_t = CBE_{jt}^{D} \times 0.05 \quad (22)$$

式中：AE_t为第t期新增就业人数；a、b、c、d、e分别为生物质能利用技术s所需的从业人数。AIF_t为第t期可增加农民收入；α、β、γ、η、ξ分别为生物质能利用技术s所需农业废弃物投入的平均收购单价[19]；BFS_t为第t期化肥节约效益；BFW_t为第t期污水减排效益。

3.2.7 脱钩指数评价

借助Tapio脱钩模型[35]，观察不同情景下，碳排放与经济增长/能源消费间的脱钩指数e_t。当碳排放、经济增长/能源消耗下降，且$0 \leqslant e_t < 0.8$时，出现不理想的弱负脱钩状态，若$e_t > 1.2$时，为可允许的衰退脱钩状态，若$0.8 \leqslant e_t \leqslant 1.2$时，为可允许的衰退连接

状态;当碳排放增速小于经济增长/能源消耗,且0≤e_t<0.8时,表现为较理想的弱脱钩状态;当碳排放下降,经济增长/能源消耗上升,且$e<0$时,表现为理想的强脱钩状态,据此判断最优情景。

$$e_t = \frac{\Delta TEC_t}{\Delta GRP_t/\Delta TED_t} \quad (23)$$

式中:e_t为第t期碳排放与经济增长/能源消费间的脱钩指数;ΔTEC_t为碳排放量差值;ΔGRP_t为地区生产总值差值;ΔTED_t为能源消费差值。

3.3 情景设计与模型检验

3.3.1 情景设计

分别设计基准情景S0、以降碳效益为导向S1、以经济效益为导向S2、兼顾经济与降碳效益为导向S3的4类发展情景,并在4类发展模式中考虑不同的技术备选方案、能耗强度、碳排放强度约束。其中S0基于“十四五”规划提出的产业调整、能耗双控及碳双控规划目标;S1-1、S1-2、S1-3在生物质资源开发最大化,即降碳效益最大化目标下,重点考察农产品剩余物、林产品剩余物、畜禽废弃物原料的开发利用程度,同时配合产业调整和碳双控约束;S2不考虑生物质资源利用,仅通过产业结构调整追求“双碳”约束下的经济增长最大化;S3则综合考察产业结构调整、能耗双控和碳双控严格约束下,兼顾生物质资源利用的降碳效益和经济增长目标(表2)。

3.3.2 模型检验

通过系统的模型检验,本文所构建的模型在结构合理性、数据匹配度和政策适应性3个方面均表现出良好的性能。首先,通过对模型中的方程进行量纲一致性检验、极端条件测试,仔细核对数据和反复调试模型,所构建的模型已基本通过结构适应性测试;其次,通过对比福建省2017—2023年的现实数据与模拟数据,进行一致性检验、有效性测试及灵敏度测试。本文仅列出*GRP*、碳排放拟合度检验结果(图3),其中2020—2022年因受疫情影响扰乱*GRP*增长趋势,剔除后模拟结果与真实数值相对误差为0.06,碳排放相对误差为0.07。同理,其他关键变量结果也均通过拟合度检验;第三,通过变化模型系数、增加或减少技术引入和政策措施、增强或弱化约束强度等行为适应性测试,确定了碳排放总量、碳排放强度、农作物秸秆综合利用率、畜禽粪污综合利用率、生物质利用技术等调控变量。

表2 情景设计

Table 2 Scenario design

情景模式	能源规划目标				产业规划目标	“双碳”目标
	处理农产品剩余物	处理林产品剩余物	处理畜禽废弃物	能耗双控	产业结构调整	碳双控
S0	×	×	×	√	√	√
S1-1	√	×	×	×	√	√
S1-2	√	√	×	×	√	√
S1-3	√	√	√	×	√	√
S2	×	×	×	×	√	√
S3	√	√	√	√	√	√

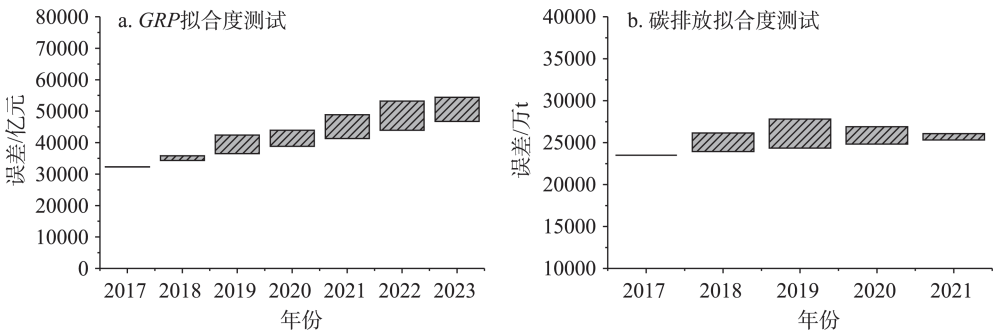


图3 拟合度检验

Figure 3 Goodness-of-fit test

4 结果与分析

4.1 最优情景判断

根据上述多情景进行模拟实验，比较分析在不同情景下财政投资效率、碳排放与能源利用脱钩弹性、碳排放与经济增长脱钩弹性综合指标，确定最优策略解集。

4.1.1 财政投资效率

首先，考察政府财政补贴及其投资效率情况。本文采用的财政补贴主要包括生物质资源处理技术补贴、过渡性电价补贴和产业转型补贴三大类。S0和S2财政补贴仅用于产业结构调整，补贴总额为64.55亿元，每1亿元产业补贴将撬动大于600亿元的总产值。对比S1−1、S1−2、S1−3可以看到，对生物质资源利用技术投入越多，投资效率越低，尤其是考虑畜禽废弃物处理时，仅115.49亿元，说明对生物质资源利用技术进行投资在短期内投入产出不经济，切实需要政府财政予以扶持。S3在S1−3的基础上加强了能耗双控，一定程度上优化了生物质资源利用规模，释放了低能耗产业空间，促进了经济增长，使得财政投资效率增加到193.17亿元(图4)。

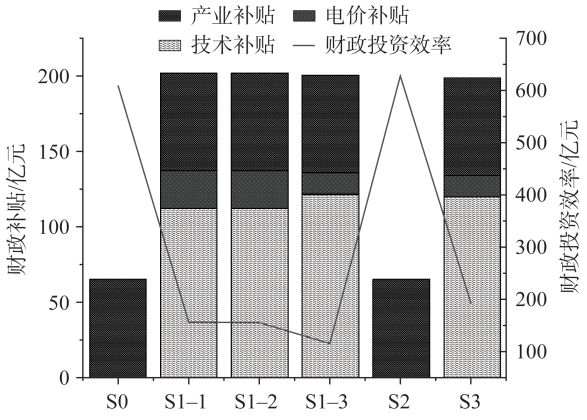


图4 福建省财政投资效率情景模拟结果

Figure 4 Scenario simulation results of fiscal investment efficiency in Fujian Province

4.1.2 碳排放与能源利用脱钩弹性

考察模拟期内能源利用强度、碳排放与能源利用脱钩指数的变化情况。在S0和S2情景下，模拟期内碳排放与能源利用脱钩指数没有发生明显变化，均表现为弱脱钩状态，但S2碳排放强度、能源利用强度高于S0，说明现阶段为了实现“双碳”目标，严格的能源约束仍十分必要。再比较S1−1、S1−2和S1−3情景，S1−3因综合考虑了农林剩余物和畜禽粪便的综合处理，其能源消耗量、碳排放量有明显的改善，在模拟期末期脱钩指数为1.04，表现出耦合状态，说明生物质技术利用引入在减少能源消耗的同时也减少了碳排放。S3情景的能源消耗总量满足规划目标，二氧化碳排放量高于S1−3但低于其他情景，碳排放与能源利用脱钩弹性从2017年的弱脱钩调整为2030年的强脱钩状态(图5a)，说明在严格的能耗约束下，通过开发低碳清洁能源替代传统化石能源，以及产业结构的绿色化转型，能够促进能源利用与碳排放关系向强脱钩转变。

4.1.3 碳排放与经济增长脱钩弹性

综合对比多情景下碳排放与经济增长的脱钩弹性发现S3最为理想。比较S1−1、S1−2、S1−3和S2，当放宽能耗双控约束时，S2表现出更多的二氧

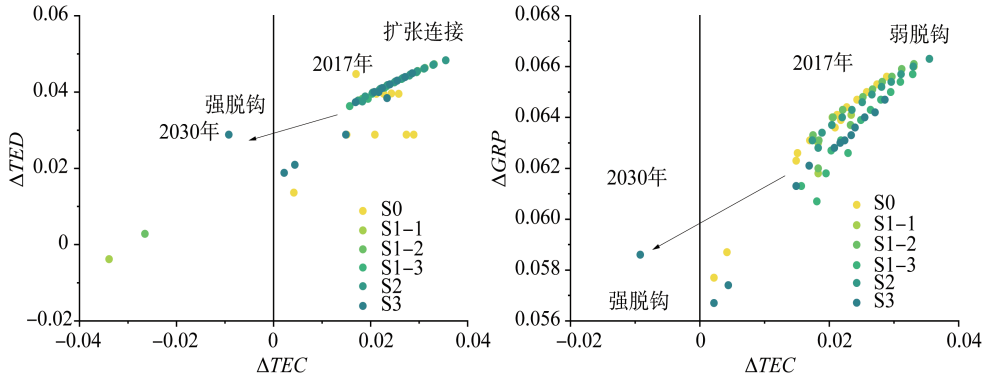


图5 2017—2030年福建省碳排放与能源利用脱钩弹性、碳排放与经济增长脱钩弹性模拟结果

Figure 5 Simulation results of decoupling elasticity between carbon emissions and energy utilization, and between carbon emissions and economic growth in Fujian Province, 2017-2030

化碳排放量和较低的排放强度,从侧面反映出高耗能高排放产业对经济的积极贡献。相应地,S1-1、S1-2、S1-3因增加了生物质资源处理技术投资,在模拟期末虽然减少了碳排放但也降低了*GRP*增速,且碳排放降幅小于*GRP*降幅,碳排放与经济增长表现为不理想的弱负脱钩状态,S2的碳排放与经济增长脱钩弹性有小幅上升,模拟期内始终呈现出弱脱钩状态。S3情景的碳排放减少而*GRP*保持增长,2030年碳排放与经济增长脱钩指数为-0.15,呈现出理想的强脱钩状态(图5b),说明生物质资源的有效利用应充分考虑能耗双控约束和经济增长目标。

综上,可以判定S3为最优情景,下文将以S3的模拟结果具体考察福建省9市2017—2030年生物质能源化利用潜力及其降碳效益和社会效益。

4.2 生物质资源利用及其效益

4.2.1 生物质资源利用潜力

由于引入生物质处理技术,到2030年,福建省各市农林剩余物和畜禽废弃物处理能力呈现显著的区域差异(图6)。模拟结果显示,三明市和南平市将成为农林剩余物处理的主要区域,分别达208.57万t和193.45万t,而南平市在畜禽废弃物处理方面表现突出,达到1024.55万t,占全省总量的41.1%。全省农林剩余物累计处理量将达到927.64万t,畜禽废弃物累计处理量为2495.28万t,可转化为生物质能源量达81.56万t标煤。其中,南平市生物质能源贡献最大,为20.72万t标煤,占全省总量的25.4%。这一技术推广预计可使生物质能在全省能源供给结构中的占比提升至0.3%,显著超过现有规划目标。

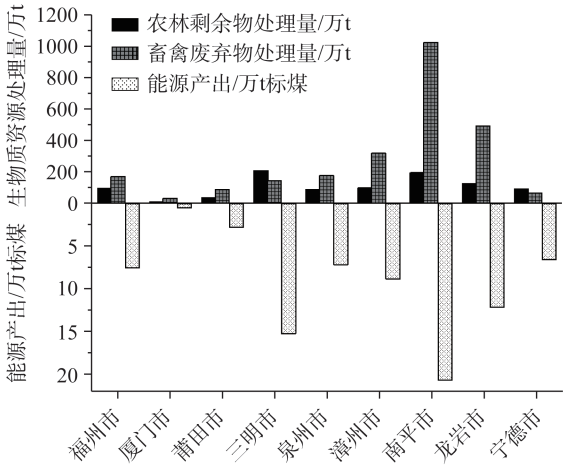


图6 2017—2030年福建省9市农林剩余物与畜产废弃物处理量与能源产出量

Figure 6 Processing volumes and energy output of agricultural and forestry residues and livestock wastes in 9 cities of Fujian Province, 2017-2030

4.2.2 生物质资源利用的降碳效益

到2030年,生物质发电技术的推广应用累计产生可再生能源81.56万t标煤,实现碳减排330.79万t,相当于创造2.28亿元碳汇经济价值(图7)。进一步,区域分析呈现显著的碳减排空间异质性:其中,南平市和三明市表现最为突出,分别贡献减排量81.23万t和64.18万t,合计占全省44%,对应碳汇价值为0.56亿元和0.44亿元;龙岩市、漳州市和福州市则构成第二梯队,减排量在31万~48万t区间;而

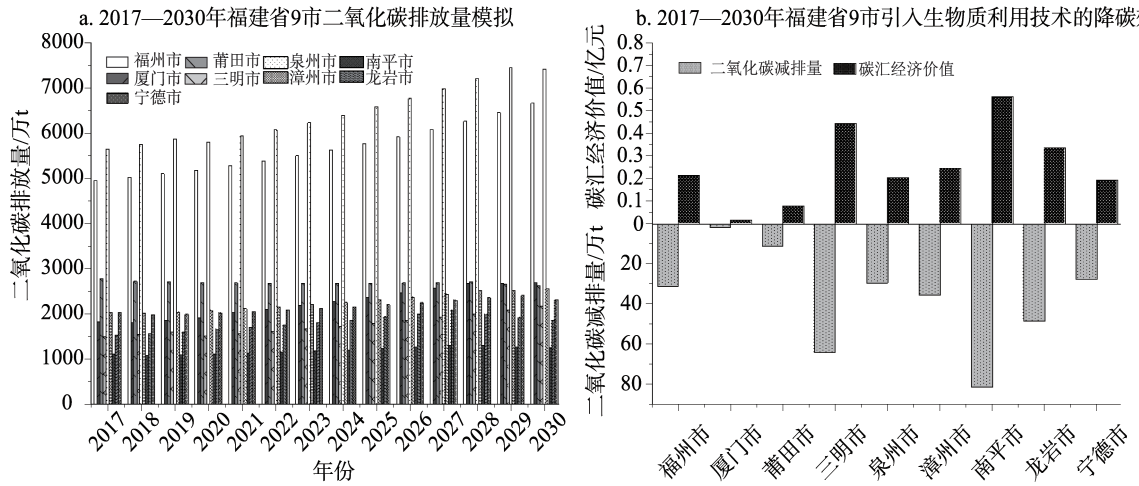


图7 2017—2030福建省生物质能替代传统能源的降碳效益

Figure 7 Carbon reduction benefits of biomass energy substituting conventional energy in Fujian Province, 2017-2030

厦门市因地域面积限制，减排效益最低，仅为1.99万t。值得注意的是，南平市和三明市在模拟期末表现出最显著的碳排放强度下降，这一现象印证了生物质能源替代对区域碳双控目标实现的杠杆效应。从减排效率来看，每万t标煤生物质能平均产生4.06万t碳减排量，展现出良好的环境正外部性。

4.2.3 生物质资源利用的社会效益

生物质发电项目运行过程中的原料采购、运输等环节需要大量劳动力，一定程度上能够解决农村就业问题，实现精准扶贫。2017—2030年福建省通过引入气化发电项目，可带动产业链就业4.75万人，三明市、南平市、龙岩市因农林生物质处理需求量较大，分别可带动就业10696人、9921人、6414人，按照农林废弃物回收价格，可累计提高农民收入6.26亿、5.80亿和3.75亿元（图8a）。生物质沼气发电项目在提供就业机会的同时，还可以减少污水排放和节约化肥，为乡村振兴和生态文明建设做出积极贡献。南平市和龙岩市因引入较多沼气发电项目，模拟期内可分别增加就业1537人、735人，累计可提高农民收入达3.42亿、1.63亿元，产生污水减排效益1.71亿、0.82亿元，化肥节约效益6.83亿、3.27亿元（图8b），对乡村振兴和生态文明建设做出积极贡献。

4.3 生物质资源优化利用实施策略

结合福建省9市生物质能利用的实际需求和时空分异特点，从农林生物质资源利用的技术优选与区域布局、产业结构优化调整、财政补贴分配3个方面提出具体实施策略。

4.3.1 技术优选与区域布局策略

由于福建省各市生物质资源较为分散，且规模较小，故优选出气化发电和沼气发电2种装机规模较小的发电技术。预计到2030年全省共需引入476个气化发电项目和83个沼气发电项目。从区域分配来看，农林产业占比较大的三明市、南平市、龙岩市对气化发电技术的需求较大，分别累计需要引进气化发电项目107个、99个、64个；畜牧业占比较大的南平市、龙岩市对畜产废弃物处理需求较多，分别累计需要引进沼气发电项目34个和16个。兼具山海地理区位的福州市、莆田市、泉州市、漳州市、宁德市，一方面要满足农林剩余物综合利用需求，另一方面，由于经济发展水平较高，重视生态文明建设，模拟期内也将积极发展生物质能产业，分别布局气化发电项目47个、16个、44个、49个和46个，沼气发电项目6个、3个、6个、11个、2个（表3）。

4.3.2 产业结构优化调整策略

由于在生物质产业发展初期，生物质资源化利

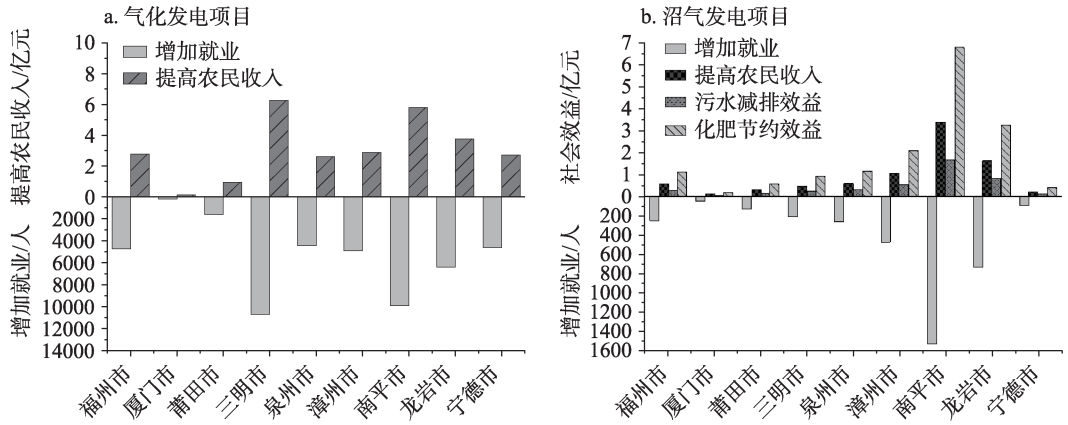


图8 2017—2030年福建省9市生物质能源化利用的社会效益

Figure 8 Social benefits of biomass energy utilization in 9 cities of Fujian Province, 2017-2030

表3 生物质能利用技术选择与区域布局

Table 3 Technology selection and regional layout of biomass energy utilization

技术选择	福州市	厦门市	莆田市	三明市	泉州市	漳州市	南平市	龙岩市	宁德市
气化发电项目数/个	47	2	16	107	44	49	99	64	46
沼气发电项目数/个	6	1	3	5	6	11	34	16	2

用技术普及程度较低,投资偏高、能源投入产出比不够合理,因此需要配合产业结构优化调整,从全社会层面反哺生物质能产业发展。从图9可以看出,经济总量位列第一梯队的福州市应大力发展信息技术、金融、房产及其他服务业(X12),泉州市保持食品、烟草、纺织、木材及其他制造业(X6),石油化工及金属、非金属制品业(X7),装备制造业(X8)等支柱产业的强劲发展;经济总量位于第二梯队的厦门市,应继续扩大装备制造业(X8)和第三产业(X11、X12)的规模优势;漳州市食品、烟草、纺织、木材及其他制造业(X6),装备制造业(X8)等传统制造业规模不断扩大;三明市、南平市、龙岩市第一产业(X1-X4)占比较大,制造业内部食品、烟草、纺织、木材及其他制造业(X6)和石油化工及金属、非金属制品业(X7)占比较高,第三产业(X11、X12)发展相对落后,受能源双控和碳双控政策影响较大,对应产值占比回缩,影响宏观经济增速。值得一提的是宁德市2017年经济总量排名最后,但因2020年前后新建大批新能源产业链项目,产业结构发生显著变化,经济总量已跃升到全省前5,因此对宁德市的模拟结果存在较大偏离。

4.3.3 地方财政补贴分配策略

为推动生物质能产业发展,应建立多层次的财政补贴政策体系。基于项目投资规模测算,全省需投入119.31亿元用于新建项目补贴,其中南平市、龙岩市、三明市因其较大的项目规模获得较高补贴额度,分别为39.33亿、20.47亿和14.76亿元。项目

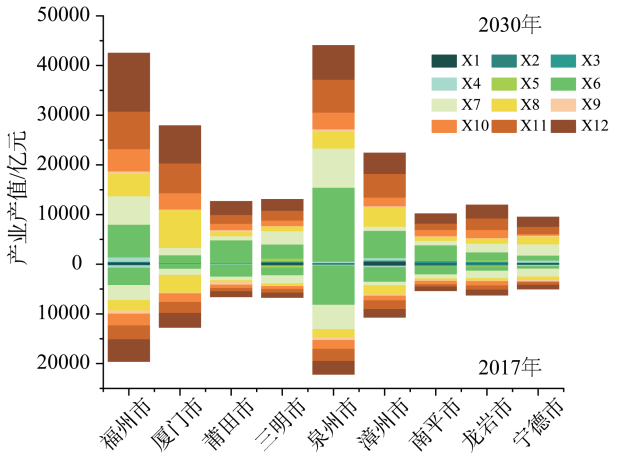


图9 2017—2030福建省9市产业结构优化调整方案

Figure 9 Optimization and adjustment of industrial structure in 9 cities of Fujian Province, 2017-2030

投运后,将由企业承担运营成本累计21.32亿元、管理费用57.35亿元,形成政府-企业协同投入机制。在电价补贴方面,参照《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》,建议实施0.25元/kWh的差异化补贴政策。模拟结果显示,政府需投入电价补贴16.59亿元,其中,南平市因其显著的碳减排效益应获得最高电价补贴4.22亿元,其次为三明市和龙岩市,分别补贴3.10亿和2.47亿元(图10)。这种基于环境正外部性的补贴分配机制,可有效补偿生物质能替代化石能源的社会环境价值。

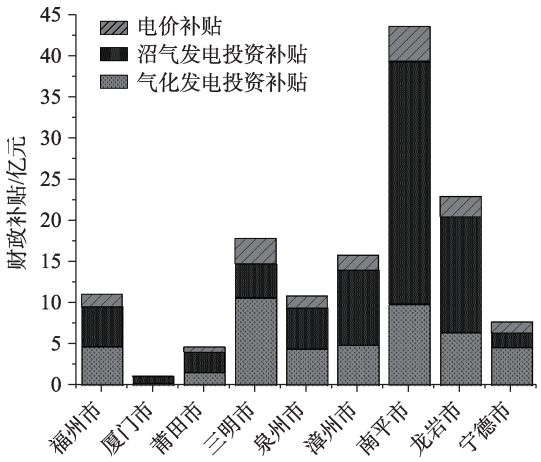


图10 2017—2030年福建省9市生物质发电项目财政补贴分配方案

Figure 10 Financial subsidy allocation schemes for biomass power generation projects in 9 cities of Fujian Province, 2017-2030

5 结论

本文建立了一套综合、科学、动态的农林生物质资源利用潜能及其综合效应的中尺度评估机制,厘清了产业间投入产出关系和资源、污染物流向、技术应用作用机制、政策措施响应机制;并以福建省为例,构建涵盖政府、企业、居民多主体的农林生物质资源利用与"经济-能源-环境"多目标协同发展的省域实证模型,通过设计引入生物质资源化处理、产业结构调整与节能降碳控制的技术与政策组合策略,模拟福建省2017—2030年农林生物质资源优化利用情景。主要结论如下:

(1)低碳清洁能源替代与产业结构绿色化转型间的协同显著推动能源利用与碳排放向强脱钩状态转变。福建省存在典型的"高碳锁定"现象,高耗能高排放产业仍对经济增长产生显著正向贡献,而生物质能技术的引入在短期会损害经济效益。因此,要

实现碳排放与经济增长的强脱钩，必须构建多目标协同机制，在确保能耗双控约束的前提下，通过动态调整生物质资源利用强度，权衡减排效益与经济增长的关系。

（2）生物质能利用累计可替代化石能源供能81.56万t标煤，减少碳排放330.79万t；产生降碳效益2.28亿元，增加就业5.13万人，实现农民增收36.14亿元、污水减排效益4.15亿元、化肥节约效益16.63亿元。模拟期后环境经济正外部性持续外溢。社会各界应关注生物质能利用对于广大农村地区在经济振兴、环境改善方面的积极作用。建议地方政府将生物质能源建设项目纳入各级财政预算和计划，通过新建补贴、电价补贴等财税措施推进生物质能产业向市场化顺利过渡。

（3）通过在全省9市分布式建设476个小型气化发电项目、83个沼气发电项目，一定程度上解决了生物质原料分散、大规模收储运困难等问题。虽然模拟期内需要政府提供新建补贴119.30亿元、电价补贴16.59亿元，但通过产业绿色转型足以反哺生物质能产业发展。随着生物质能产业市场化运作日益成熟、政府补贴逐步退坡，生物质能产业的中长期效益将凸显，实现生物质能利用、乡村振兴与降碳效益等多目标的协调发展。

参考文献(References):

[1] 高世楫. 绿色生产力与绿色低碳发展的创新路径[J]. 探索与争鸣, 2024, (3): 19-22, 177. [Gao S J. New quality productive forces and the restart of China's economic reform[J]. Exploration and Free Views, 2024, (3): 19-22, 177.]

[2] 邹才能, 何东博, 贾成业, 等. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 233-247. [Zou C N, He D B, Jia C Y, et al. Connotation and pathway of world energy transition and its significance for carbon neutral[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 233-247.]

[3] IRNEA. Global Renewables Outlook[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020.

[4] 石元春, 程序, 朱万斌. 当前中国生物质能源发展的若干战略思考[J]. 科技导报, 2019, 37(20): 6-11. [Shi Y C, Cheng X, Zhu W B. Strategic thinking about China's bioenergy development[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(20): 6-11.]

[5] 辛泊达, 吕连宏, 王斯一, 等. 基于文献计量分析的生物质能源领域研究进展[J]. 中国环境科学, 2024, 44(4): 1875-1884. [Xin B D, Lv L H, Wang S Y, et al. Research progress of biomass energy field based on bibliometric investigation[J]. China Environmental Science, 2024, 44(4): 1875-1884.]

[6] 许炜华, 谢如谦, 郑宗明, 等. 福建省生物质能学科发展报告[J]. 海峡科学, 2013, (1): 11-17. [Xu W H, Xie R Q, Zheng Z M, et al. Report on the development of biomass energy in Fujian Province [J]. Straits Science, 2013, (1): 11-17.]

[7] 钟兆真, 刘丽娜, 张亚鹏, 等. 中国生物质能政策变迁研究: 2000-2019年[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(1): 77-88. [Zhong Z Z, Liu L N, Zhang Y P, et al. Policy changes in biomass energy in China: 2000-2019[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(1): 77-88.]

[8] Errera M R, da C Dias T A, Maya D M Y, et al. Global bioenergy potentials projections for 2050[J]. Biomass and Bioenergy, 2023, DOI: 10.1016/j.biombioe.2023.106721.

[9] ETIP Bioenergy. Strategic Research and Innovation Agenda 2023 [EB/OL]. (2023-09-27) [2024-01-26]. https://www.etipbioenergy.eu/images/SRIA_2023.pdf.

[10] 袁振宏. 生物质能资源[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020. [Yuan Z H. Resource of Biomass Energy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.]

[11] 张蓓蓓. 我国生物质原料资源及能源潜力评估[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. [Zhang B B. Assessment of Raw Material Supply Capability and Energy Potential of Biomass Resources in China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.]

[12] 舒也, 刘雅暄, 刘苗苗, 等. 中国主要农作物可收集秸秆能源潜力与生物乙醇生产潜力研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2023, 25(5): 64-72. [Shu Y, Liu Y X, Liu M M, et al. Energy potential and bioethanol production potential from collectable major crop residue in China[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2023, 25(5): 64-72.]

[13] 任继勤. 秸秆生物质能利用对节能减排的贡献潜力研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2018, 17(4): 79-87. [Ren J Q. Simulation study on contribution potential of straws biomass energy to energy conservation and emission reduction[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2018, 17(4): 79-87.]

[14] 赵晴云, 马若婧, 周璐芸, 等. 北方农村清洁供暖先行区农业废弃物的生物质能潜力及减排效应评估[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 667-679, 745. [Zhao Q Y, Ma R J, Zhou L Y, et al. Evaluation of energy potential and emission reduction of agricultural waste biomass utilization for clean heating in rural areas of northern China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(3): 667-679, 745.]

[15] Qin Z, Zhuang Q, Cai X, et al. Biomass and biofuels in China: Toward bioenergy resource potentials and their impacts on the environment[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 82:

2387-2400.

[16] 耿爱欣, 潘文琦, 杨红强. 中国林木生物质能源替代煤炭的减排效益评估[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 536-547. [Geng A X, Pan W Q, Yang H Q. Quantifying the mitigating effects and benefits from substituting wood biomass for coal in energy production in China[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 536-547.]

[17] 王斯一, 张彩虹, 米锋. 资源价值流视角下发电企业碳足迹与经济成本评价: 燃煤发电与生物质发电比较研究[J]. 工业技术经济, 2018, 37(12): 78-85. [Wang S Y, Zhang C H, Mi F. Evaluation of carbon footprint and economic cost from the perspective of resource value flow of power generation enterprises[J]. Journal of Industrial Technology and Economy, 2018, 37(12): 78-85.]

[18] 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. [Wang H G, Wang K Y. Comparative study on comprehensive benefits of biomass and coal power generation project[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(6): 56-61.]

[19] 张晓东. 生物质发电技术[M]. 北京: 化工出版社, 2020. [Zhang X D. Power Generation Technology from Biomass[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.]

[20] 王兵, 肖睿, 张会岩. 生物油选择性温和加氢制备含氧液体燃料[J]. 生物产业技术, 2017, (3): 89-93. [Wang B, Xiao R, Zhang H Y. The selective and moderate hydrogenation of bio-oil to produce oxygenated liquid fuel[J]. Biotechnology & Business, 2017, (3): 89-93.]

[21] 马隆龙, 唐志华, 汪丛伟, 等. 生物质能研究现状及未来发展策略[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 434-440. [Ma L L, Tang Z H, Wang C W, et al. Research status and future development strategy of biomass energy[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 434-440.]

[22] 王斯一, 白梓函, 吕连宏, 等. 基于政策工具的中国生物质发电补贴政策评估[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(6): 1241-1249. [Wang S Y, Bai Z H, Lv L H, et al. Evaluation of China's biomass power generation subsidy policy based on policy tools[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(6): 1241-1249.]

[23] 朱孝成, 窦克军, 王振中, 等. 中国农林生物质发电项目经济性分析[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(2): 182-187. [Zhu X C, Dou K J, Wang Z Z, et al. Economic analysis of China's agricultural and forestry biomass power generation projects[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(2): 182-187.]

[24] Adekunle A, Adeleke, N P, Salihu A, et al. Nigerian biomass for bioenergy applications: A review on the potential and challenges [J]. Journal of Renewable Materials, 2023, 11(12): 4123-4141.

[25] Liu X M, Liu Y X, Bai C Q, et al. Pathways for decarbonizing China's iron and steel industry using cost-effective mitigation technologies: An integrated analysis with top-down and bottom-up models [J]. Renewable Energy, 2024, DOI: 10.1016/j.renene.2024.121506.

[26] Zhang Y, Jiang S, Lin X, Qi L, Sharp B. Income distribution effect of carbon pricing mechanism under China's carbon peak target: CGE-based assessments[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107149.

[27] Winz I, Brierley G, Trowsdale S. The use of system dynamics simulation in water resources management[J]. Water Resources Management, 2009, 23 (7): 1301-1323.

[28] Bekchanov M, Sood A, Pinto A, et al. Systematic review of water economy modeling applications[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2017, 143(8): 1-18.

[29] 柯文岚, 闫晶晶, 吴容容, 等. 基于动态最优化模型预测福建省污水污泥再利用和城市可持续发展[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 477-488. [Ke W L, Yan J J, Wu R R, et al. Reuse potential of wastewater and sludge in Fujian Province based on a dynamic optimization model and sustainable urban development[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 477-488.]

[30] Xiang N, Li S N, Shu C, et al. Heavy industrial aggregation area's green transformation optimisation pathways exploration with synergistic reduction pursue of CO_2 and gaseous pollutants[J]. Journal of Environmental Management, 2024, DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119649.

[31] 曾维康, 万伟, 马莉莉. 多重目标约束下中国省际产业能源协同的碳排放效应[J]. 资源科学, 2023, 45(3): 549-563. [Zeng W K, Wan W, Ma L L. The carbon emission effects of cross-regional cooperation under multiple objective constraints in China[J]. Resources Science, 2023, 45(3): 549-563.]

[32] 马晓红. 福建生物质能源产业发展的问题与对策[J]. 金融经济, 2013, (22): 21-23. [Ma X H. Problems and countermeasures of the development of biomass energy industry in Fujian[J]. Finance Economy, 2013, (22): 21-23.]

[33] Song J N, Yang W, Higano Y, et al. Dynamic integrated assessment of bioenergy technologies for energy production utilizing agricultural residues: An input – output approach[J]. Applied Energy, 2015, 158: 178-189.

[34] 柯文岚, 李泽伟, 罗世兴. 福建省林业碳汇项目价值评估及金融产品定价: 基于实物期权理论[J]. 中国国土资源经济, 2024, (1): 48-55. [Ke W L, Li Z W, Luo S X. Value assessment and financial product pricing of forestry carbon sink projects in Fujian Province: Based on real option theory[J]. Natural Resource Economics of China, 2024, (1): 48-55.]

[35] Zhang Z, Sharifi A. Analysis of decoupling between CO_2 emissions and economic growth in China's provincial capital cities: A Tapio model approach[J]. Urban Climate, 2024, DOI: 10.1016/J.UCLIM.2024.101885.

Simulation and implementation strategies for optimal utilization of agricultural and forestry biomass resources based on multi−objective synergy: A case study of Fujian Province

KE Wenlan[1], YAN Jingjing[2], ZHANG Guofeng[3], SHA Jinghua[2]

(1. School of Economics and Trade, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China; 2. School of Economics and Management, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. School of Economics, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: [Objective] Establishing an effective multi-objective synergy mechanism to leverage the multiple functions of biomass resource utilization, including energy substitution, carbon emission reduction, and rural economic revitalization, is an urgent practical issue that needs to be addressed in the development of China's biomass energy industry. **[Methods]** This study employed a dynamic market equilibrium model in combination with multi-objective programming methods and took Fujian Province as an example. A multi-agent and multi-objective collaborative development model for provincial agricultural and forestry biomass resource utilization within the economic-energy-environment system was constructed to simulate and solve the optimal technology and policy implementation strategies from 2017 to 2030. **[Results]** (1) Only by balancing energy consumption dual-control constraints and economic growth targets could biomass resource utilization achieve a strong decoupling state between carbon emissions and both energy utilization and economic growth. (2) During the simulation period, biomass energy utilization could cumulatively substitute 815600 tons of fossil energy, reduce carbon emissions by 3.3079 Mt, generate 228 million yuan in carbon reduction benefits, create 51300 new jobs, increase farmers' income by 3.614 billion yuan, achieve 415 million yuan in wastewater reduction benefits, yield 1.663 billion yuan in fertilizer savings. Local governments could promote the market-oriented transition of the biomass energy industry through measures such as new construction subsidies and electricity price subsidies. (3) By distributing 476 small-scale gasification power generation projects and 83 biogas power generation projects province-wide, problems such as the dispersion of biomass feedstock and difficulties in collection, storage, and transportation were partially solved. Combined with industrial green transformation, it could achieve the coordinated development of multiple objectives, including medium- to long-term biomass energy utilization, rural revitalization, and carbon reduction benefits. **[Conclusion]** Through scenario analysis and dynamic simulation, this paper confirms that the introduction of a set of policies including resource utilization technologies and government regulations can achieve the coordinated development of multiple objectives, such as biomass energy utilization, rural revitalization, and carbon reduction benefits, providing policy implications for popularizing biomass resource utilization in China.

Key words: biomass resources; dynamic market equilibrium model; multi-objective synergy; implementation strategy; multiple benefits; Fujian Province