

引用本文格式 李翊宁, 黄梦婷, 王英, 等. 苹果树修剪枝条直燃发电系统生命周期评价[J]. 农业工程, 2023, 13(10): 49-55. DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2023.10.009. LI Yining, HUANG Mengting, WANG Ying, et al. Life cycle assessment of pruned apple tree branches direct combustion power generation system[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(10): 49-55.

苹果树修剪枝条直燃发电系统生命周期评价

李翊宁^{1,2}, 黄梦婷¹, 王英^{1,2}, 陈文强³, 王伟^{1,2}

(1. 陕西工业职业技术学院机械工程学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 咸阳市新能源及微电网系统重点实验室, 陕西 咸阳 712000; 3. 第一越南苏联职业技术学院电子工程学院, 福安 15910)

摘要: 建立了基于环境影响和资源消耗的苹果树修剪枝条直燃发电系统生命周期综合评价模型并进行了分析。结果表明, 苹果树修剪枝条直燃发电综合性能指标 $0.055 \sim 0.225$ (人·年)/(万 kW·h), 其环境影响对综合性能的作用远大于资源消耗, 并且呈现局地性>同等性>区域性>全球性的特征。苹果树修剪枝条直燃发电综合评价最大值仅为燃煤发电最小值的 57.25%, 表现出较好的优越性。苹果树修剪枝条直燃发电的综合性能对固体废弃物总量和原料消耗率最为敏感, 因此对固体废弃物的有效管理和处置, 以及对生物质锅炉和燃料品质的改进, 能进一步提升苹果树修剪枝条直燃发电的环境效益。该研究为基于果树修剪枝条的直燃发电系统研究提供理论依据和参考数据。

关键词: 修剪枝条; 直燃发电; 综合评价; 环境影响; 资源消耗

中图分类号: S216 文献标识码: A 文章编号: 2095-1795(2023)10-0049-07

DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2023.10.009

Life Cycle Assessment of Pruned Apple Tree Branches Direct Combustion Power Generation System

LI Yining^{1,2}, HUANG Mengting¹, WANG Ying^{1,2}, CHEN Wenqiang³, WANG Wei^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang Shaanxi 712000, China; 2. Xianyang Key Laboratory of New Power and Intelligent Microgrid System, Xianyang Shaanxi 712000, China; 3. College of Electronic Engineering, Vietnam Russia Vocational Training College No 1, Phuc Yen 15910, Viet Nam)

Abstract: Based on environmental impact and resource consumption, a comprehensive evaluation model for life cycle of direct combustion power generation system of pruned apple tree branches was established and analyzed. Results showed that comprehensive performance index of direct combustion power generation of pruned apple tree branches ranged from 0.055 to 0.225(person·year)/(10 000 kW·h), and effect of environmental impact on comprehensive performance was much greater than that of resource consumption, and characteristics were local > equal > regional > global. The maximum value of direct combustion power generation of pruned apple tree branches was only 57.25% of the minimum value of coal-fired power generation, showing a good advantage. Comprehensive performance of direct combustion power generation of pruned apple tree branches was most sensitive to total amount of solid waste and raw material consumption rate. Therefore, effective management and disposal of solid waste, as well as improvement of quality of biomass boilers and fuels, can further improve environmental benefits of direct combustion power generation of pruned apple tree branches. Results of this study could provide theoretical basis and reference data for research of direct combustion power generation system based on pruned fruit tree branches.

Keywords: pruned branches, direct combustion power generation, comprehensive assessment, environmental impact, resource consumption

收稿日期: 2023-02-10 修回日期: 2023-05-10

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目(22JK0263); 陕西工业职业技术学院自然科学类一般项目(2022YKYB-002)

作者简介: 李翊宁, 博士, 讲师, 主要从事生物质能源及其装备技术研究 E-mail: liyining@sxpi.edu.cn

王伟, 通信作者, 博士, 副教授, 主要从事光热发电技术研究 E-mail: wangwei05@sxpi.edu.cn

在线投稿
www.d1ae.com

0 引言

为实现 2030 年碳达峰、2060 年碳中和的发展目标，我国正在积极推动可再生能源的发展，以实现低碳转型和可持续发展目标^[1]。而生物质作为一种低排放、碳中性甚至负排放的可再生原料，近些年得到了迅速的发展。采用生物质直燃发电进行电力能源的生产，是较为普遍的一种做法^[2]。目前生物质直燃发电原料，基本上都来源于各类作物秸秆^[3]。我国是水果生产大国，其生产和种植面积位居世界前列^[4]。在果树的日常管理中，每年都会有大量的果树修剪枝条产生。此类生物质通常作为农林废弃物堆积在田埂上，造成资源浪费和环境污染。因此，为了能够将果树修剪枝条用于电力能源生产，本研究建立了基于环境影响和资源消耗的苹果树修剪枝条直燃发电系统的生命周期综合评价模型，对其进行了环境影响、资源消耗和综合性能评价，并与燃煤发电系统进行了对比分析。随后对苹果树修剪枝条直燃发电中的关键指标进行了敏感性分析。本研究的结果能够为基于果树修剪枝条的直燃发电系统研究提供相应的理论依据和参考数据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本研究以装机容量 2×1.5 万 kW 生物质直燃发电系统为研究对象，年发电时间 6 000 h，生物质直燃发电效率 18.7%。选取苹果树修剪枝条作为燃料，其主要特性如表 1 所示。

该系统采用 75 t/h 的循环流化床锅炉，年发电量 18 000 万 kW·h，苹果树修剪枝条消耗率 1.004 13 kg/（kW·h）。

表 1 苹果树修剪枝条工业分析和元素分析

Tab. 1 Proximate analysis and ultimate analysis of pruned apple tree branches

项目		数值
工业分析	水分/%	1.30
	挥发分/%	76.57
	灰分/%	3.30
	固定碳/%	18.83
元素分析	N/%	0.76
	C/%	47.53
	H/%	5.78
	O/%	41.25
	S/%	0.08
低热值/（MJ·kg ⁻¹ ）		16.52

1.2 生命周期评价综合模型

生命周期评价是一种用于评价产品从原料开采到产品处置整个生命周期内产生的环境影响和资源消耗的方法。用于直燃发电的苹果树修剪枝条，在其生长、

收集、运输及发电阶段中会产生一定的环境排放和资源消耗。

生命周期评价包括目标与范围确定、清单分析、影响评价和结果解释 4 个互相联系的有机组成部分。环境影响清单主要考虑各阶段产生的直接排放和间接排放，其中，间接排放主要为生命周期评价范围内各过程资源消耗所产生的环境影响。

针对环境影响评价，采用 EDIP 环境影响分类体系，综合考虑 6 种环境影响类型，包括全球变暖（GWP）、酸化（AP）、富营养化（EP）、光化学污染（POF）、人体毒性（HTP）和固体废弃物（SW），并将清单内容进行归类^[5]。针对资源消耗评价，主要考虑苹果树修剪枝条直燃发电在生命周期中的资源物质消耗，包括标煤、天然气、原油、脱硫石灰石、水和电力等，并未涉及厂房设备拆建等的资源物质消耗。

为了能够对环境影响类型和资源消耗类型进行对比分析，并构造综合评价指标，需要对清单数据进行特征化处理，得到标准化的环境影响潜值和资源消耗潜值，具体计算过程参见文献^[6]。

基于生命周期评价和层次分析法，建立了生命周期综合评价模型，提出了环境影响、资源消耗及综合性能等评价指标，并构件了层次结构图，如图 1 所示。对于环境影响，将 6 种环境影响类型的标准化环境影响潜值作为其二级指标层；对于资源消耗，将标准化资源消耗潜值作为其二级指标层；对于综合性能而言，环境影响和资源消耗为其一级指标层。

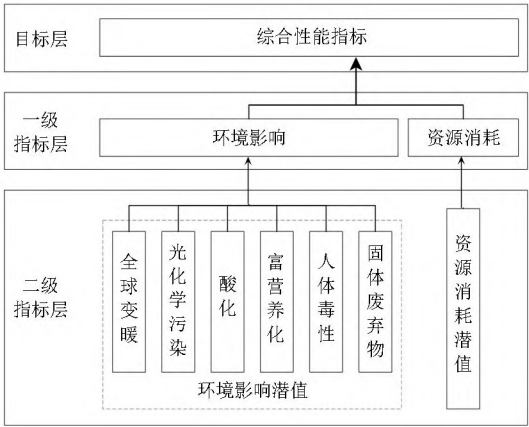


图 1 层次结构
Fig. 1 Hierarchical chart

针对环境影响中，6 种环境影响类型对总环境影响的作用不同，按照区域范围大小，选择了全球性、区域性、局地性和同等性 4 种情况，通过层次分析法确定 4 种视角下不同环境影响类型的权重，具体如表 2 所示^[7]。

如表 3 所示，针对综合性能，环境影响和资源消

表 2 环境影响类型权重
Tab. 2 Environmental impact type weight

视角	权重因子					
	GWP	AP	EP	POF	HTP	SW
全球性	0.381	0.252	0.160	0.101	0.064	0.042
区域性	0.057	0.320	0.320	0.132	0.132	0.039
局地性	0.044	0.102	0.102	0.173	0.290	0.290
同等性	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167

表 3 环境影响和资源消耗权重
Tab. 3 Environmental impact and resource consumption weights

关系	权重因子	
	环境影响 A	资源消耗 B
A=B	0.50	0.50
A>B	0.67	0.33
A<B	0.33	0.67

耗对其的作用也不相同，根据两个指标大小对比，通过层次分析法确定 3 种情况下各指标权重。

1.3 生命周期评价系统边界

生命周期评价系统边界从苹果树修剪枝条生长开始到直燃发电结束，分为生长、收集、运输和发电 4 个阶段。苹果树修剪枝条直燃发电环境影响考虑了各阶段产生的直接排放和因资源消耗而造成的间接排放。

对评价模型做了如下假设和简化：一是不包括各阶段所用设备因制造所造成的资源消耗和环境影响；二是电厂运行阶段所消耗的电由本系统自发电提供，除此之外所耗电均来自燃煤发电；三是发电阶段的烟气处理采用 SDS+SCR 超低排放工艺。

系统功能单位为 1 000 kW·h 电量所造成的污染物排放量和资源消耗量。生命周期系统边界和物质交换如图 2 所示。

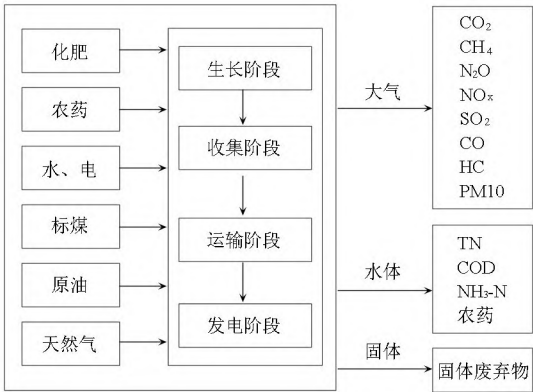


图 2 生命周期评价系统边界和物质交换

Fig. 2 Life cycle assessment system boundary and material exchange

1.4 环境影响和资源消耗分析

生长阶段中，环境影响和资源消耗需考虑 3 个方面。一是苹果树修剪枝条光合作用对 CO₂ 的吸收固定。

二是肥料生产及使用造成的环境影响，苹果树的氮肥、磷肥和钾肥施用量分别为 450、220 和 300 kg/hm²，总氮流失率 15%。三是考虑农药施用过程中因流失所造成的环境影响，农药施用量 1.67 kg/hm²，流失率 5%。另外，采用苹果和修剪枝条的经济价值进行苹果树修剪枝条的分配系数计算，其值 0.050 4。

收集阶段中，苹果树修剪枝条需要经过切割、打包、压块等处理，才可运输。所需耗电设备主要包括破碎机、打包机和抓斗起重机，总耗电量 18.20 kW·h/t 修剪枝条；所需油耗设备主要包括抓草机、铲车及叉车，总油耗 0.78 L 原油/t 修剪枝条。环境影响考虑了设备电耗及油耗所产生的污染物排放。

运输阶段中，苹果树修剪枝条来自果园，距离生物质发电厂较近。采用 8 t 中型柴油货车运输，能源消耗追溯到一次能源原油和标煤，环境影响为货车行驶过程污染物排放。货车运输距离为果树修剪枝条收集半径，收集半径模型来源于文献 [8]，计算值 28.31 km。

发电阶段中，所产生的环境影响主要由苹果树修剪枝条的燃烧引起。假设未完全燃烧产物 CO 在干烟气中的占比为 0.05%，而干烟气中未消耗的过量 O₂ 的占比 6%。采用 SDS+SCR 烟气超低排放改工艺时，NO_x、SO₂ 和 PM₁₀ 的最大排放量不超过 50、35 和 10 mg/Nm³，并且可以通过排烟温度回收提高 3% 的炉效。发电阶段产生的固废灰渣是灰分和未燃尽碳。

以上分析中，所需的化肥、电力、原油和货车运输的资源消耗和环境影响清单均来源于而中国生命周期基础数据库（CLCD）[7,9]。

1.5 生命周期清单

根据苹果树修剪枝条直燃发电的生命周期边界及物质交换情况，将上述各阶段的环境影响和资源消耗清单数据进行汇总，具体如表 4 所示。

为了研究苹果树修剪枝条直燃发电相对于燃煤发电的优劣，引入由超临界燃煤发电机组构成的燃煤发电系统的相关数据，给出了燃煤发电生命周期资源和环境清单[10]。该系统采用贫煤（含硫量 0.877%）作为燃料，机组容量 2×100 万 kW，年发电时间 5 000 h，发电效率 42%，年煤炭消耗量 362.80 万 t。该发电系统的具体计算结果如表 5 所示。

表 4 苹果树修剪枝条直燃发电生命周期清单

Tab. 4 Life cycle inventory of pruned apple tree branches direct combustion power generation system

环境影响与资源消耗		生长阶段	收集阶段	运输阶段	发电阶段	汇总
环境 污 染 物 排 放	CO ₂ /[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	-17 400	194	42.4	17 500	312
	CH ₄ /[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.289	0.499	0.236	0	1.02
	N ₂ O/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.004 17	0.002 68	0.002 84	0	0.009 70
	NO _x /[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.165	0.708	0.020 5	3.04	4.12
	SO ₂ /[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.308	0.614	0.062 5	2.13	3.12
	CO/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.063 7	0.162	0.196	38.1	38.5
	HC/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.003 97	0.042 8	0.105	0	0.152
	PM10/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.000 364	0.015 8	0	0.609	0.625
	COD/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.037 0	0.022 7	0.099 5	0	0.159
	固体废弃物/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	14.5	7.13	0.159	929	951
	TN/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	5.46	0	0	0	5.46
	NH ₃ -N/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.061 1	0.001 38	0.002 84	0	0.006 53
	农药/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.006 75	0	0	0	0.006 75
资 源 消 耗	电力/[(kW·h)·(万 kW·h) ⁻¹]	0	183	0	0	183
	原油/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.002 24	0	13.9	0	13.9
	标煤/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.025 5	0	0.733	0	0.759
	天然气/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.000 906	0	0	0	0.000 906
	脱硫石灰石/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0	0	0	348	348
	水/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0	0	0	31.0	31.0

表 5 燃煤发电系统生命周期清单

Tab. 5 Life cycle inventory of coal-fired power generation system

环境影响及资源消耗		开采阶段	运输阶段	发电阶段	汇总
环 境 污 染 物 排 放	CO ₂ /[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	10.1	2.38	11 800	11 800
	CH ₄ /[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	5.26	0.000 567	0.079 6	5.34
	N ₂ O/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.000 077 0	0.000 384	0.003 17	0.003 21
	NO _x /[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.024 0	0.067 0	6.44	6.53
	SO ₂ /[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.092 4	0.039 0	2.72	2.85
	CO/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.001 31	0.067 0	1.33	1.40
	HC/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0	0.015 6	0.159	0.175
	PM10/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.028 6	386	0.935	387
	COD/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	120	0	0.176	120
	固体废弃物/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	116	0	942	1 060
资 源 消 耗	NH ₃ -N/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0.009 37	0	0.089 4	0.098 8
	电力/[(kW·h)·(万 kW·h) ⁻¹]	97.3	0	504	602
	原油/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	2.41	13.5	0	15.9
	标煤/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	35.6	38.9	3 810	3 890
	天然气/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	0	00	44.7	44.7
	脱硫石灰石/[kg·(万 kW·h) ⁻¹]	6 440	0	31 000	37 500

2 结果和讨论

2.1 环境影响评价分析

2.1.1 不同发电系统环境影响类型分布

两种发电系统的环境影响潜值对比如图 3 所示，图中横坐标单位含义为每生产 1 万 kW·h 电量，每人每年对环境所产生影响的特征化潜值。与燃煤发电相比，苹果树修剪枝条直燃发电在 GWP、AP、EP、HTP 和 SW 这 5 种环境影响类型中具有较为明显的优势，其环境影响潜值分别仅占燃煤发电的 3.47%、81.05%、86.41%、1.83% 和 89.94%。而对于 POF，苹

果树修剪枝条直燃发电为燃煤发电的 183.85%，是唯一负面作用较大的指标。综合对比表明，采用苹果树修剪枝条直燃发电比燃煤发电对环境更加友好，尤其体现在 GWP、EP 和 HTP。

2.1.2 不同视角下各环境影响类型分布

图 4 为苹果树修剪枝条直燃发电在不同视角下的环境影响程度，其总环境影响潜值最低为全球性视角下的 0.138（人·年）/（万 kW·h），最高为局地性视角下的 0.329（人·年）/（万 kW·h），主要是因为 SW 对局地性的影响显著。综合 4 个视角，苹果树修剪枝条直燃发电对环境的主要影响总体为 SW>AP

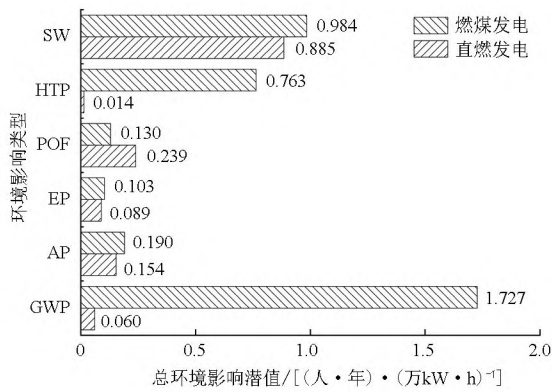


图3 两种发电系统环境影响潜值对比

Fig. 3 Comparison of environmental impact potential of two power generation systems

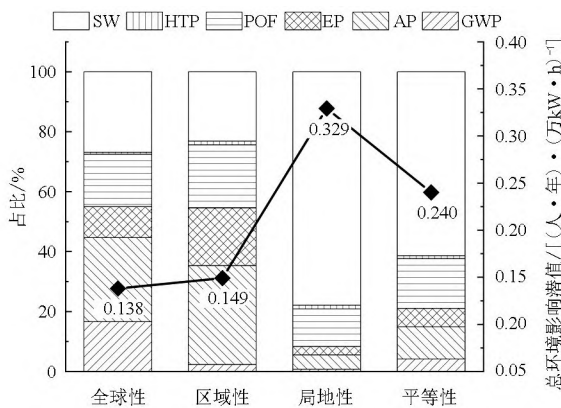


图4 不同视角下环境影响类型分布

Fig. 4 Distribution of environmental impact types from different perspectives

>POF。

2.1.3 不同阶段中各环境影响类型分布

图5给出了苹果树修剪枝条直燃发电生命周期内各阶段环境影响类型的分布情况，用以进一步分析污染物排放的作用大小及其产生的原因。

在GWP方面，苹果树修剪枝条直燃发电在发电阶

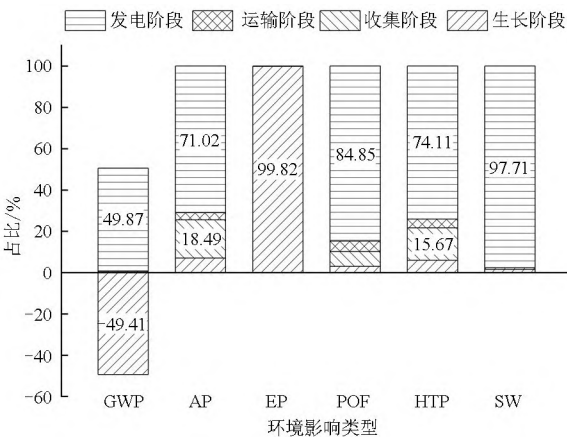


图5 不同环境影响类型在各阶段的分布

Fig. 5 Distribution of different environmental impact types at different stages

段因燃烧所排放的温室气体，几乎全部来源于苹果树生长阶段通过光合作用固定的碳量，其值 1.74 t CO₂/t 修剪枝条。相对于燃煤发电，苹果树修剪枝条直燃发电对 GWP 的影响可以忽略不计。作为唯一的可再生碳源，生物质可以成为煤炭的有效替代能源，用于火力发电系统。

在 EP 方面，苹果树修剪枝条直燃发电在生长阶段的占比高达 99.82%，其主要原因在于果树在生长阶段时氮肥施用后的总氮流失。过量的氮肥施用可能会导致向大气排放的 N₂O 增加，以及对地下水和地表水的潜在污染。因此，优化氮肥管理可以在尽可能减少环境问题的同时，提高水果产量。

在 AP、POF、HTP 和 SW 方面，苹果树修剪枝条直燃发电在发电阶段都占据了主导地位，其占比分别为 71.02%、84.85%、74.11% 和 97.71%。苹果树修剪枝条在燃烧过程中，除了大量温室气体的排放外，还会释放 NO_x、SO₂ 和 PM₁₀，这些都是引起 AP、POF 和 HTP 的主要因素。另外，发电阶段产生的 SW 主要为燃烧后留下的生物质灰和烟气处理后的烟气脱硫石膏。

发电阶段是苹果树修剪枝条直燃发电对环境造成负面影响的最主要阶段。苹果树修剪枝条的燃烧，不可避免的会引起污染物的排放。目前，我国在对大气污染物排放方面，已经拥有了较为完善的政策和实施方案。但是对于固体废弃物的处理，还需要进一步探索^[11-12]。

2.2 资源消耗评价分析

对苹果树修剪枝条直燃发电生命周期中的资源消耗数据进行了处理，其中不同类别和不同阶段的资源消耗占比分别如表6和表7所示。苹果树修剪枝条直燃发电的资源消耗潜值 0.0146 (人·年) / (万 kW·h)，仅为燃煤发电的 3.01%。由表5可知，在苹果树修剪枝条直燃发电中，脱硫石灰石占比最大 (47.00%)，其次是电力 (38.68%) 和原油 (13.66%)。由表6可知，对于苹果树修剪枝条直燃发电而言，资源消耗主要集中在收集阶段和发电阶段，占比分别为 38.68% 和 47.04%，在收集阶段主要为苹果

表6 不同类别资源消耗占比

Tab. 6 Proportion of resource consumption in different types

单位: %					
电力	原油	标煤	天然气	脱硫石灰石	水
38.68	13.66	0.61	0.000 885	47.00	0.04

表7 不同阶段资源消耗占比

Tab. 7 Proportion of resource consumption in different stages

单位: %			
生长阶段	收集阶段	运输阶段	发电阶段
0.02	38.68	14.25	47.04

树修剪枝条在果园处理和收集时机械设备的电耗和油耗，而在发电阶段主要为脱硫石灰石的消耗。

2.3 综合性能评价分析

采用层次分析法将环境影响和资源消耗加权合并，可以得到苹果树修剪枝条直燃发电和燃煤发电两种发电系统的各 12 种情况下的份额和综合性能指标，图 6 显示了两发电系统在其中的上下限。

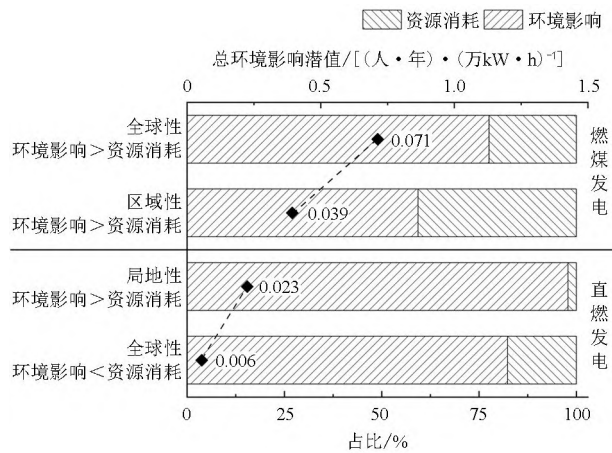


图 6 不同权重下占比分布及综合性能指标

Fig. 6 Proportion distribution and comprehensive performance index under different weights

由图 6 可知，对于苹果树修剪枝条直燃发电，不论资源消耗的权重值大小如何，环境影响都起到了主导作用，其最小占比 82.35%。如前所述，苹果树修剪枝条直燃发电因 SW 而对局地环境的影响较大。另外，苹果树修剪枝条直燃发电的综合性能指标最大值仅为燃煤发电最小值的 57.25%，说明苹果树修剪枝条这一类生物质，相对于不可再生的煤炭，在燃烧发电方面有较为明显的优势。

2.4 敏感性分析

为进一步分析苹果树修剪枝条直燃发电对环境影响、资源消耗和综合性能的影响因素，针对各指标进行了敏感性分析。

根据图 6 的数据，选择最不利的情况对综合性能指标进行分析（局地性，环境影响>资源消耗）。选取原料消耗率、固体废弃物总量、CO 排放、电力消耗、原油消耗和脱硫石灰石消耗等因素进行敏感性分析，具体如图 7 所示。

由图 7 可知，综合性能对固体废弃物总量和原料消耗率的敏感性较大，对 CO 排放的敏感性较小，而对脱硫石灰石、原油和电力的消耗基本不敏感。表明对 SW 的管理与再利用，是有效降低环境负荷的手段之一。另外，原料消耗率与生物质锅炉的效率和生物质原料的燃料品质直接正相关。目前，生物质锅炉的效率（18.7%）相对于成熟的超临界燃煤发电机组的效率

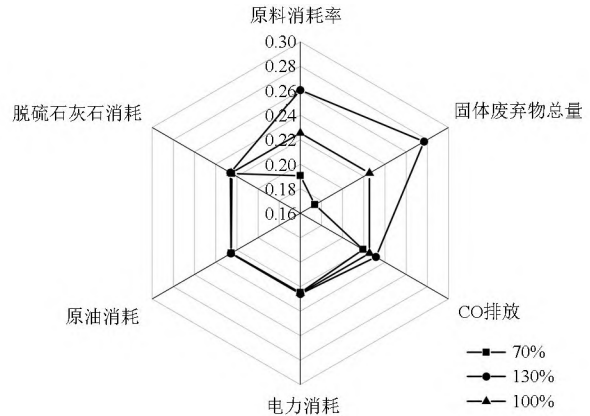


图 7 综合性能敏感性分析

Fig. 7 Sensitivity analysis of comprehensive performance

（42%），还有非常大的提升空间。同时，对生物质原料的多种预处理工艺也能提升其燃料品质。

3 结束语

将生命周期评价和层次分析法相结合，建立了基于环境影响和资源消耗的苹果树修剪枝条直燃发电的生命周期综合评价模型，对其进行了分析评价。同时，将评价结果与燃煤发电对比，并就其中的关键指标进行了敏感性分析。

（1）苹果树修剪枝条直燃发电的总环境影响潜值 0.013 8~0.032 9（人·年）/（万 kW·h），并呈现局地性>同等性>区域性>全球性的特征。SW 是苹果树修剪枝条直燃发电的主要环境影响类型，其次为 AP 和 POF。从生命周期各阶段来看，环境影响主要来自生长阶段和发电阶段。

（2）苹果树修剪枝条直燃发电的资源消耗潜值 0.014 6（人·年）/（万 kW·h）。从阶段和资源种类占比情况来看，苹果树修剪枝条直燃发电资源消耗主要来源于发电阶段的脱硫石灰石消耗；其次为收集阶段的电力消耗和原油消耗。

（3）苹果树修剪枝条直燃发电的综合评价指标 0.055~0.022 5（人·年）/（万 kW·h）。其环境影响对综合性能的作用要远大于资源消耗。另外，苹果树修剪枝条直燃发电的综合评价指标最大值仅为燃煤发电最小值的 57.25%，表现出较好的优越性。

（4）敏感性分析表明，苹果树修剪枝条直燃发电的综合性能对固体废弃物总量和原料消耗率最为敏感，资源消耗带来的影响可忽略不计。对固体废弃物的有效管理和处置，以及对生物质锅炉和燃料品质的改进，能进一步提升苹果树修剪枝条直燃发电的环境效益。

参考文献

[1] 吕俊复, 蒋苓, 柯希玮, 等. 碳中和背景下循环流化床燃烧技术

- 在中国的发展前景[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 514-522.
- LV Junfu, JIANG Ling, KE Xiwei, et al. Future of circulating fluidized bed combustion technology in China for carbon neutralization[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 514-522.
- [2] 胡南, 谭雪梅, 刘世杰, 等. 循环流化床生物质直燃发电技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 32-40.
- HU Nan, TAN Xuemei, LIU Shijie, et al. Research progress on power generation of biomass direct combustion in circulating fluidized bed[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 32-40.
- [3] 刘城宇, 贺正楚, 卢小龙. 可持续发展目标下农作物秸秆收集运输的碳减排优化分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 239-248.
- LIU Chengyu, HE Zhengchu, LU Xiaolong. Optimization analysis of carbon emission reduction from crop straw collection and transportation under the sustainable development goals[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(10): 239-248.
- [4] 邓秀新. 关于我国水果产业发展若干问题的思考[J]. 果树学报, 2021, 38(1): 121-127.
- DENG Xiuxin. Thoughts on the development of China's fruit industry[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(1): 121-127.
- [5] 谢明辉, 满贺诚, 段华波, 等. 生命周期影响评价方法及本地化研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(6): 2148-2156.
- XIE Minghui, MAN Hecheng, DUAN Huabo, et al. Research progress on the life cycle impact assessment methods and their localization in China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(6): 2148-2156.
- [6] 陶炜. 生物质制取航空煤油的生命周期综合评价及数据质量评估[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- TAO Wei. Integrated evaluation of biomass jet-fuel based on LCA and its data quality analysis[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [7] 袁言言. 生物质制取车用燃料的生命周期评价及数据质量评估[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- YUAN Yanyan. Life cycle assessment (LCA) and data quality analysis of vehicle fuel from biomass[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [8] 云慧敏, 代建军, 李辉, 等. 生物质耦合燃煤发电经济环境效益评估[J]. 化工学报, 2021, 72(12): 6311-6327.
- YUN Huimin, DAI Jianjun, LI Hui, et al. Economic and environmental assessment of biomass coupled coal-fired power generation[J]. CIESC Journal, 2021, 72(12): 6311-6327.
- [9] 刘建君, 陈红, 马晋宇. 基于环境库兹涅茨曲线模型的农作物产量与碳足迹关系研究: 以黑龙江省水稻生产为例[J]. 科技管理研究, 2020, 40(4): 248-253.
- LIU Jianjun, CHEN Hong, MA Jinyu. Study on the relationship between crop yield and carbon footprint based on environmental Kuznets curve model: taking rice production in Heilongjiang Province as an example[J]. Science and Technology Management Research, 2020, 40(4): 248-253.
- [10] 武民军. 燃煤发电的生命周期评价[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- WU Minjun. The life cycle assessment of coal-fired power generation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [11] LUO Y, WU Y, MA S, et al. Utilization of coal fly ash in China: a mini-review on challenges and future directions[J]. [Environmental Science and Pollution Research](#), 2021, 28(15): 18727-18740.
- [12] WANG J, WANG R, ZHU Y, et al. Life cycle assessment and environmental cost accounting of coal-fired power generation in China[J]. [Energy Policy](#), 2018, 115: 374-384.