

北方农村复合颗粒燃料取暖全生命周期评价研究

江靖宇, 刘予涵, 庞雨桐, 陈禹昕, 郭飞宏, 姜小祥

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏省物质循环与污染控制重点实验室, 南京 210023)

摘要: 以秸秆和煤为原料制备复合颗粒燃料, 利用全生命周期评价方法, 研究颗粒燃烧取暖全生命周期过程中的能源消耗和环境影响。结果表明: 颗粒燃料取暖全生命周期过程中能量投入为 908 MJ/t, 燃烧释放热量 15490 MJ/t, 能量产出投入比为 17.1, 能源转化效率较高。颗粒燃料的能量投入主要来自玉米种植, 种植过程中的氮肥使用消耗较多能量。对气候变化 (GWP) 和酸化 (AP) 贡献较大的清单数据为颗粒燃料的燃烧, 其中燃烧污染物排放的直接贡献最大, 贡献率分别为 53.22% 和 46.08%; 对水资源消耗 (WU) 贡献较大的清单数据为颗粒燃料的压制, 贡献率为 71.56%; 对富营养化潜值 (EP) 贡献较大的清单数据为颗粒燃料燃烧后的废渣排放, 贡献率为 43.40%。

关键词: 生物质能; 秸秆; 能源消耗; 环境影响; 颗粒燃料; 全生命周期评价

中图分类号: S216

文献标志码: A

0 引言

传统农业生产中, 农作物秸秆经济价值低、分布广泛, 导致秸秆利用率低、焚烧现象严重, 造成了一系列环境问题^[1]。除此之外, 北方冬季农村取暖往往采用散煤燃烧的形式, 散煤的大量使用也加剧了各类大气污染物的排放, 造成雾霾天气频发^[2]。2021年, 国家发展改革委印发《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》, 要求扩大秸秆生物质能的利用规模, 鼓励利用秸秆生物质能供热供气供暖。可见, “秸秆代煤”势在必行, 秸秆生物质能源的利用对污染物减排和改善大气质量至关重要。秸秆原料因其密度低、分布广、不便储存和运输的特点, 限制了其广泛利用。通过机械设备压制成颗粒燃料, 可提高秸秆原料热值、增加机械强度, 是一种较好的能源化利用形式^[3]。但与煤等化石能源相比, 秸秆颗粒燃料的热值偏低, 考虑到颗粒燃料热值等因素, 国内外研究多集中于木质型颗粒燃料, 缺乏对秸秆等农业废弃物颗粒燃料的研究^[4-5]。颗粒燃料替代农村散煤燃烧炉的节能减排研究也较少^[6]。

全生命周期评价 (whole-life cycle assessment, LCA), 考虑了生物质颗粒燃料从原料生产到燃烧使用的整个生命周期过程, 可全面分析其能源效率和环境影响^[7]。霍丽丽等^[8]分析了秸秆颗粒燃料全生命周期过程中的能源投入和温室气体排放, 结果表明: 与煤相比, 秸秆颗粒燃料具有较高的能源转化率、较少的温室气体排放量, 能源环境效益巨大; 林成先等^[9]对比了颗粒燃料和煤的能源消耗、环境影响和经济性, 指

出秸秆颗粒燃料的能源消耗和环境影响较小, 但生命周期成本较高; Morrison 等^[10]利用生命周期评价方法, 研究煤和木屑的混烧, 结果表明燃煤电厂中掺烧木屑可减少二氧化碳的排放。

以往的生命周期评价研究中, 中国学者往往关注秸秆颗粒燃料相对于煤的能源消耗、环境效益和经济成本^[11], 而国外研究则多以木质型颗粒燃料为主, 指出了混煤燃烧的可行性^[10, 12], 但缺乏对秸秆混煤等复合颗粒燃料的全生命周期评价研究。中国是农业大国, 秸秆产量丰富。秸秆混煤压制成复合颗粒燃料, 一方面可弥补秸秆燃烧的热值不足, 一方面可降低纯煤燃烧的污染物排放。基于此, 本研究选取秸秆和煤为原料制备复合颗粒燃料, 利用全生命周期评价方法, 对复合颗粒燃料替代农村散煤采暖进行全生命周期过程研究, 定量分析复合颗粒燃料的能源效率和环境影响, 探讨复合颗粒燃料替代农村散煤采暖的可行性。

1 生命周期评价方法

1.1 系统边界和功能单位

本研究的功能单位是 1 t 的秸秆与煤复合成型颗粒燃料。拟在北方农村地区进行“就地取材、现场加工、本地使用”, 区域运输带来的能源消耗和环境影响较小。生命周期模型建立需确定系统边界, 主要研究范围包含原料 (玉米) 种植、煤炭开采和收集、复合颗粒燃料压制、复合颗粒燃料燃烧等。

系统的能量输入、输出和内部流动如图 1 所示, 能量输

收稿日期: 2021-06-29

基金项目: 江苏省高等学校自然科学基金面上项目 (20KJB610007); 江苏省自然科学基金青年基金 (BK20200736)

通信作者: 郭飞宏 (1986—), 男, 博士、讲师, 主要从事生物质能源化、固废处置方面的研究。fhguo@njnu.edu.cn

人主要来源于原料玉米种植过程中种子、电力、化肥、农药、水等资源的投入,复合颗粒燃料压制和燃烧时的电力和水消耗,能量输出主要是复合颗粒燃烧释放出的热量。环境评价主要来源于原料种植过程能量投入所带来的环境影响,复合颗粒燃料燃烧产生的污染物排放等。本研究不考虑生产设备、厂房、生活设施等的能量投入。当原料质量小于产品质量的 1%时,忽略该物料的上游生产数据。

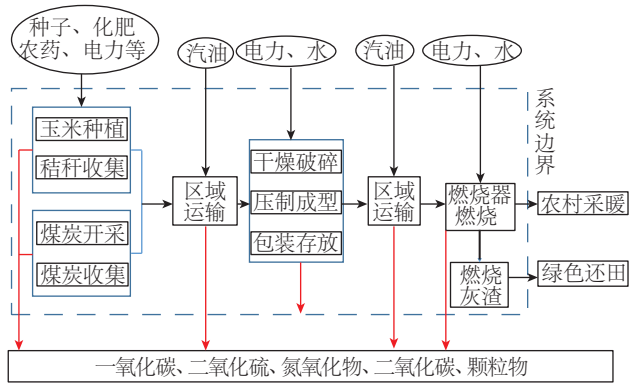


图1 复合颗粒燃料采暖的系统边界

Fig. 1 System boundary of composite pellet fuel for heating

1.2 软件与数据库

eFootprint 是一个分析生命周期评价数据的在线平台,嵌入了中国生命周期基础数据库(CLCD)、欧盟 ELCD 数据库和瑞士 Ecoinvent 数据库^[13],用于开展生命周期评价研究。本文采用 eFootprint 软件系统,建立复合颗粒燃料全生命周期模型,计算得到 LCA 结果。

2 评价指标

2.1 净能量与能量产出投入比

系统中的能耗可用净能量和能量产出投入比进行分析。净能量为复合颗粒燃烧释放的热能与复合颗粒消耗的总能量之差,能量产出投入比为复合颗粒燃烧释放的热能与复合颗粒消耗的总能量之比^[8]。

$$N_E = H_E - \sum C_{En} \quad (1)$$

$$\eta = H_E / \sum C_{En} \quad (2)$$

式中: N_E ——净能量; H_E ——复合颗粒燃烧释放的热能; C_{En} ——复合颗粒第 n 个单元流程消耗的能量; η ——能量产出投入比。

2.2 环境影响指标

本研究采用 CML2013(Centrumvoor Milieukunde Leiden)方法^[14],把复合颗粒燃料生命周期环境影响指标分为气候变化(GWP)、非生物资源消耗潜值(ADP)、水资源消耗(WU)、酸化(AP)、富营养化潜值(EP)、可吸入无机物(RI)、臭氧层消耗(ODP)、光化学臭氧合成(POFP)等 8 种,环境影响指标计算公式^[14]为:

$$I_E = \sum KE_i \quad (3)$$

式中: I_E ——某种环境影响指标; K ——该环境影响指标的环境影响当量系数(特征因子); E_i ——该环境影响指标在第 i 个单元流程中的输入或输出。

3 数据来源

3.1 原料种植和收集阶段

原料种植主要指玉米种植,输入能量主要有玉米种子、肥料(氮、磷、钾)、杀虫剂、除草剂、柴油等^[8]。煤炭采取市场购买的方式,煤炭上游开采清单采用 CLCD 数据库的结果。

驻马店地区采用“冬小麦、夏玉米”的轮作方式^[15],参考《2020 年河南统计年鉴》中驻马店农业种植数据,肥料来源于尿素,折合成氮、磷、钾肥的使用量分别为 143909、80470、61291 t;农用柴油消耗量为 99452 t;农药施用量为 7613 t (2019 年)。单位耕地面积农用资源消耗量分别为:氮肥 15.93 g/m²、磷肥 8.91 g/m²、钾肥 6.78 g/m²、农药 0.80 g/m²。柴油消耗主要用于农业机械,约为 11.0 mL/m²。灌溉采用水泵灌溉^[8],总用水量为 4.7 亿 m³,单位灌溉面积用水量为 0.225 m³/m²,耗电量约为 0.0367 kWh/m²。

考虑到种植产出包括玉米谷物和玉米秸秆,采用经济分配原则^[16],研究生命周期过程中的能量消耗和环境影响。单位面积上玉米秸秆和谷物的产量比为 1.2:1,目前市场玉米秸秆和谷物价格分别为 0.15 元/kg 和 1.6 元/kg^[16]。通过计算(玉米秸秆与谷物经济价值之比为=1:9),求得玉米秸秆种植阶段的能耗和排放占总量的 10%。

3.2 复合颗粒燃料压制阶段

复合颗粒燃料压制过程包括:1)原料烘干,选用 JTSG1415 型号秸秆烘干机,处理秸秆量 0.8 t/h,处理后水分含量小于 10%,总功率为 32.7 kW;2)原料破碎,选用恒裕秸秆破碎机(400 型),加工能力 1~2 t/h,电机功率 2.2~3 kW;3)颗粒压制,选用恒裕秸秆颗粒机(RGKJ560),利用齿轮传动,带动传动轴压轮碾压模具内表面完成压制过程。颗粒产量 1.0~1.5 t/h,环模内径 560 mm,功率 93.4 kW。

本阶段考虑区域运输,采取原料就地收集、附近加工的原则,运输距离较短(设为 3 km),运输车采用东风轻卡,空载率 50%,平均油消耗量约为 0.15 L/km(空载为 0.13 L/km,满载为 0.17 L/km)。

3.3 复合颗粒燃料燃烧阶段

考虑到农村地区投资成本,复合颗粒燃烧选用分散型的生物质颗粒取暖炉(80 型),复合颗粒消耗量 2~3 kg/h,功率 100~220 W,适用供暖面积 60~80 m²。复合颗粒主要由玉米秸秆和烟煤组成,秸秆来源于驻马店种植区,烟煤产于安徽淮南地区^[17]。相关元素分析和工业分析如表 1 所示,

其中氧含量利用差减法获得。颗粒完全燃烧产生的理论烟气体量^[18]为:

$$V = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \quad (4)$$

$$V_{\text{RO}_2} = 1.866(\omega_c + 0.375\omega_s)/100 \quad (5)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0.79V_o + 0.008\omega_N \quad (6)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0.111\omega_H + 0.0124M + 0.016V_o \quad (7)$$

式中: V ——理论总烟气体量; V_o ——理论空气量; V_{RO_2} ——氧化物的烟气体量; V_{N_2} ——烟气中氮气体量; $V_{\text{H}_2\text{O}}$ ——烟气中水蒸气量; ω_c 、 ω_s 、 ω_N 、 ω_H ——燃料中 C、S、N、H 的含量。

除此之外,复合颗粒燃烧后的灰渣富含氮磷等物质,可代替部分肥料还田使用,实现绿色循环。

表 1 秸秆和煤的工业分析与元素分析结果

Table 1 Industrial analysis and element analysis results of corn straw and coal

工业/元素分析(ar)	秸秆/%	烟煤/%
M	5.64	6.41
A	2.92	12.81
V	17.44	61.50
F	74.0	19.28
[N]	0.66	0.81
[C]	41.57	63.77
[H]	4.93	3.68
[S]	0.20	0.50
*[O]	52.64	31.24

注: M 、 A 、 V 、 F —水分、灰分、挥发分和固定碳的收到基; N 、 C 、 H 、 S 、 O —氮、碳、氢、硫和氧的收到基; $*\omega_o = 100 - \omega_c - \omega_H - \omega_s$ 。

基于农作物秸秆燃烧气态污染物排放研究^[19],玉米秸秆燃烧 CO 、 CO_2 、 NO_x 、 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 平均排放因子分别为 114.7、1261.5、1.28、0.44、11.7 g/kg。基于烟煤燃烧气态污染物排放研究^[20],烟煤燃烧 CO 、 CO_2 、 NO_x 、 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 平均排放因子分别为 64.1、2493、1.49、3.48、8.49 g/kg。则复合颗粒燃料的气态污染物理论排放因子 H_{total} 为:

$$H_{\text{total}} = H_{\text{straw}} \times X_{\text{straw}} + H_{\text{coal}} \times Y_{\text{coal}} \quad (8)$$

式中: H_{straw} ——玉米秸秆的排放因子; X_{straw} ——玉米秸秆的质量分数(0.8~0.9); H_{coal} ——煤的排放因子; Y_{coal} ——煤的质量分数(0.1~0.2)。

考虑到生物质与煤混合燃烧时,对气态污染物减排具有一定的协同作用,根据前期研究结果和相关实验数据^[21],对 H_{total} 进行修正:

$$H_{\text{total}}^* = K \times H_{\text{total}} \quad (9)$$

式中: K ——取值范围为 0.85~0.90(主要受不同燃烧温度和气态污染排放物种的影响)。

4 LCA 结果分析

4.1 净能量与能量产出投入分析

经过计算,玉米种植阶段的总能量投入为 2.248 MJ/m²,驻马店地区玉米产量为 0.562 kg/m²,则单位能量为 4000 MJ/t,按玉米秸秆占能量总投入的 10%,则玉米秸秆的单位能量投入为 400 MJ/t。混合颗粒燃料压制阶段,生产 1 t 混合颗粒燃料需能量 356.4 MJ,主要是原料烘干、破碎和压制过程中的电力消耗。因采取就地收集、附近加工的原则,颗粒燃料运输过程消耗能量较少,约为 6.84 MJ/t。颗粒燃料燃烧阶段,主要是电力消耗,约为 118 MJ/t。

如图 2 所示,烟煤的能量投入为 1149.9 MJ/t^[8],按烟煤与秸秆的掺混比例(1:9),复合颗粒燃料的能量总投入为 908 MJ/t,燃烧释放的热值为 15490 MJ/t,能量产出/投入比为 17.1。煤炭的总能量投入为 1149.9 MJ/t,燃烧释放的热值为 20908 MJ/t,能量产出投入比为 18.2。从能量产出投入角度分析,煤炭优于复合颗粒燃料。

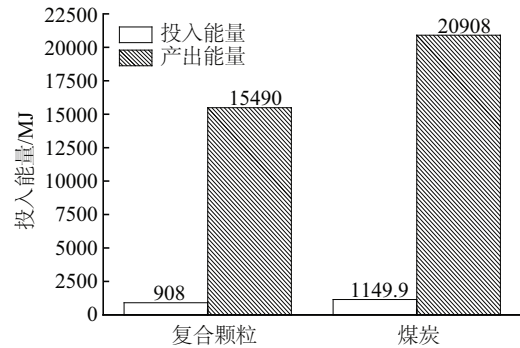
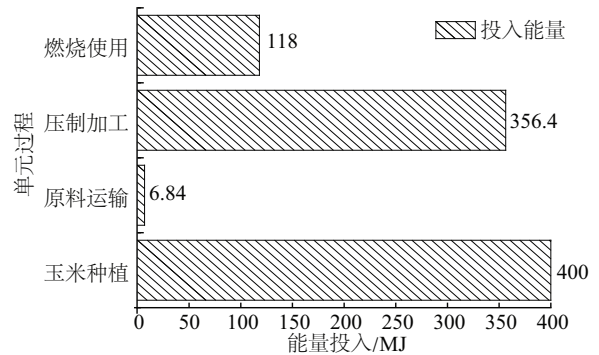


图 2 复合颗粒燃料与煤炭的能量投入与产出

Fig. 2 Energy input and output of composite pellet fuel and coal

复合颗粒燃料全生命周期过程能量投入如图 3a 所示,能量投入主要用于玉米种植,占比 44.05%;其次是复合颗粒燃料压制加工阶段,能量消耗 356.4 MJ,占比 36.2%;颗粒燃料燃烧过程主要是电力投入,需消耗 118 MJ 能量,占比 13.0%。对玉米种植阶段的能量投入进一步分析,如图 3b 所示,主要能量消耗排在前三位的依次为氮肥、灌溉电力、农机油耗,分别占 40.6%、19.3%、18.8%。氮肥使用量对种植阶段



a. 不同单元过程

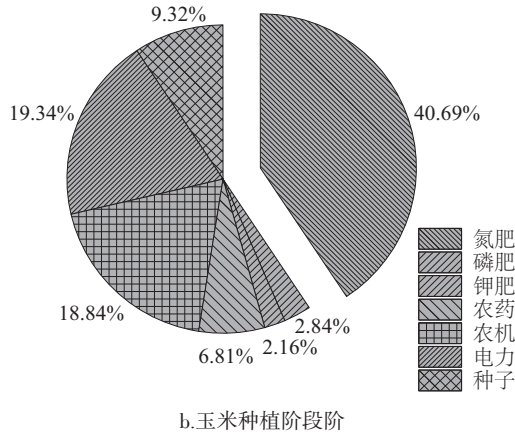


图3 复合颗粒燃料的能量投入分析

Fig. 3 Energy input analysis of composite pellet fuel

能量消耗影响巨大,在农业生产过程中可通过各种有机肥代替氮肥,尽可能降低氮肥使用量。除此之外,提高农机机械水平、优化灌溉均能在一定程度上降低玉米种植过程中的能量消耗。

4.2 环境影响指标分析

经过 LCA 计算得到环境影响指标(见表 2),其中 ADP、RI、ODP 和 POFP 较小(<1),本研究不予考虑。本文仅对气候变化(GWP)、水资源消耗(WU)、酸化(AP)、富营养化潜值(EP)进行分析。

表2 复合颗粒环境影响指标LCA计算结果

Table 2 LCA calculation results of composite pellet environmental impact

环境影响类型指标	影响类型指标单位	LCA 结果
GWP	kg CO ₂ eq	499.69
ADP	kg Sb eq	0.02
WU	kg	1112
AP	kg SO ₂ eq	2.73
EP	kg PO ₄ ³⁻ eq	2.44
RI	kg PM _{2.5} eq	0.49
ODP	kg CFC-11 eq	2.35×10 ⁻⁵
POFP	kg NMVOC eq	0.51

4.2.1 气候变化(GWP)

经计算得 GWP 当量值为 499.69 kg,即 1 t 复合颗粒燃烧释放温室气体(CO₂当量)为 499.69 kg,各单元流程排放的 CO₂当量如图 4 所示。复合颗粒燃烧排放的温室气体最多,占总排放的 70.41%。其中,直接燃烧贡献值最大,占比 53.22%,电力消耗产生的 CO₂占比 17.18%。生产阶段包括原料种植和压制加工两个单元流程,占温室气体总排放的

25.02%,其中玉米秸秆和煤炭消耗产生的 CO₂所占比例较大,分别为 14.81%和 4.16%。燃烧废弃阶段所产生的灰渣代替部分肥料进行绿色还田使用,该阶段排放的温室气体最少,主要是运输过程能量消耗和还田使用所带来的 CO₂排放,仅占 4.57%。为降低温室气体排放,一方面可通过燃烧条件优化和 CO₂捕集等方法,减少温室气体的直接贡献值;一方面可通过选用耗电量低的成型设备和燃烧设备,减少耗电量进而控制温室气体排放量。

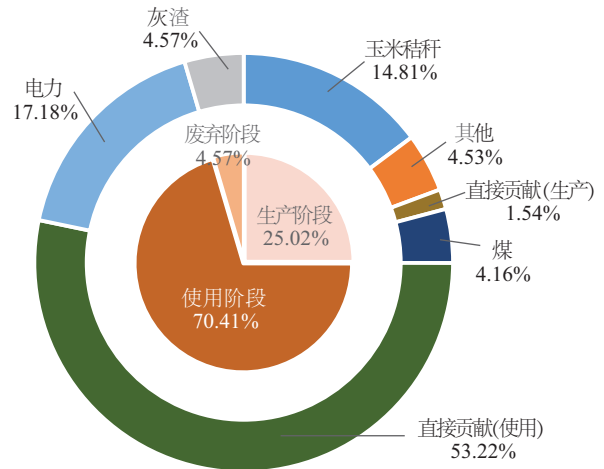


图4 不同单元流程对GWP的贡献占比

Fig. 4 Contribution ratio of different unit processes to GWP

4.2.2 水资源消耗(WU)

经计算得 WU 当量值为 1112 kg,即水资源消耗潜值为 1112 kg。各单元流程消耗的水资源如图 5 所示,其中生产阶段所消耗的水资源最多,占全部水资源消耗量的 71.56%,氮肥、磷肥生产需要的水资源较多,分别为 38.76%和 21.43%;燃烧使用阶段的水资源消耗,主要来源于电力消耗过程,占比 25.56%。氮肥和磷肥的使用是水资源消耗的主要影响因素,因此合理施用氮磷肥对控制水资源消耗至关重要。

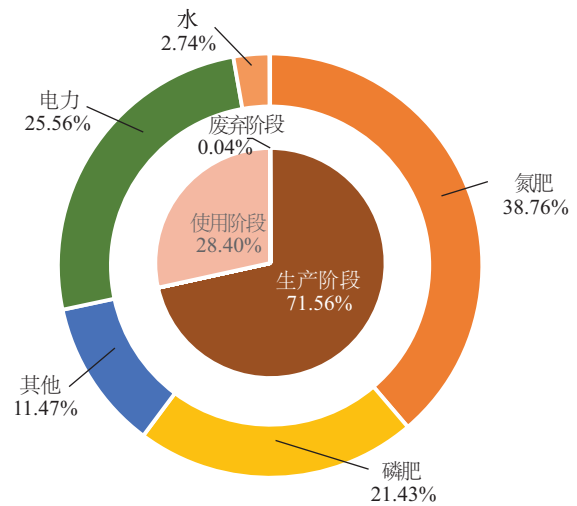


图5 不同单元流程对WU的贡献占比

Fig. 5 Contribution ratio of different unit processes to WU

4.2.3 酸化(AP)

经计算得 AP 当量值为 2.73 kg,即酸化潜值(SO₂当量)为 2.73 kg。如图 6 所示,复合颗粒燃烧使用阶段排放的酸性污染物最多,占比达到 62.76%,其中直接贡献燃烧污染物排放占比最高达到 46.08%,电力消耗带来的酸性污染物占比 16.53%;生产阶段排放的酸性污染物占比 32.87%,其中主要是玉米秸秆消耗占比 20.91%。减少酸性污染物排放,主要可通过燃烧过程中氮硫污染物的控制,减少硫氧化物和氮氧化物的排放量。

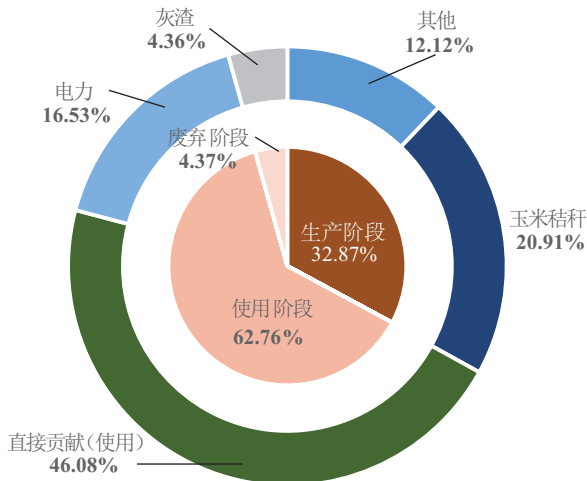


图6 不同单元流程对AP的贡献占比

Fig. 6 Contribution ratio of different unit processes to AP

4.2.4 富营养化潜值(EP)

经计算得 EP 当量值为 2.44 kg,即富营养化潜值(PO₄³⁻当量)为 2.44 kg。如图 7 所示,复合颗粒燃烧使用阶段所排放的植物营养物质最少,仅占总排放植物营养物质的 8.15%,且大部分属于直接燃烧排放;压制加工阶段排放的植物营养物质占比 48.45%,其中玉米秸秆消耗占比最大,为 46.16%;

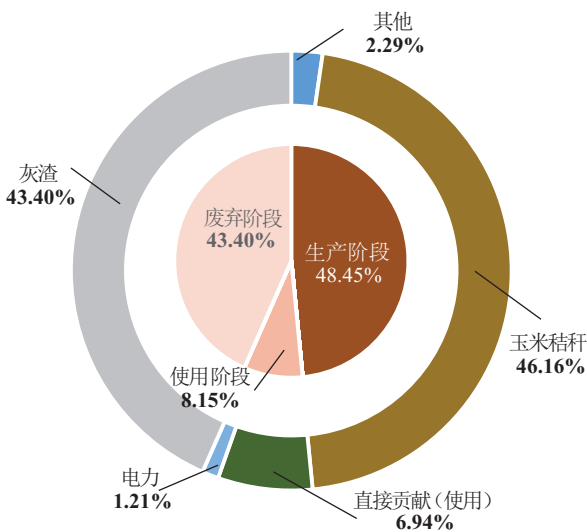


图7 不同单元流程对EP的贡献占比

Fig. 7 Contribution ratio of different unit processes to EP

废含较多氮磷等营养物质。对于燃烧废弃阶段产生的灰渣,应做好灰渣还田,使资源得到循环利用,同时注意尽量避免被雨水带入江河中,造成水体富营养化。

5 结论与展望

基于全生命周期评价,本文利用 eFootprint 软件定量分析了复合颗粒燃料从种植到燃烧完成整个生命周期的能量投入和环境影响。

1)对玉米秸秆和煤复合颗粒燃料进行能量平衡分析,复合颗粒燃料能量投入 908 MJ/t,燃烧释放热值 15490 MJ/t,能量产出投入比为 17.1,能源转化效率较高。复合颗粒燃料能量投入主要用于玉米种植,占总能量的 44.05%,氮肥使用量对玉米种植能量消耗影响巨大,应尽可能地通过各种有机肥代替氮肥,从而减少化肥使用量,降低能量消耗。

2)复合颗粒生产阶段,水资源消耗(WU)较大,消耗量占到总量的 71.56%。气候变化(GWP)和酸化(AP)主要受到复合颗粒燃烧的影响,其中直接燃烧污染物排放的贡献率分别为 53.22%和 46.08%。富营养化潜值(EP)与燃烧灰渣中氮磷等营养物质有关,燃烧废弃阶段植物营养物质排放占总量的 43.40%。

[参考文献]

- [1] 贾吉秀,赵立欣,姚宗路,等. 秸秆捆烧技术及其排放特性研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 222-230.
- [2] JIA J X, ZHAO L X, YAO Z L, et al. Research advance in straw bale combustion and emission characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(16): 222-230.
- [3] ZHANG L, WANG T, LYU M Y, et al. On the severe haze in Beijing during January 2013: unraveling the effects of meteorological anomalies with WRF-Chem [J]. Atmospheric environment, 2015, 104: 11-21.
- [4] 范方宇,李晗,邢献军. 温度对玉米秸秆成型颗粒烘焙制备生物炭及其特性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 220-226.
- [5] FAN F Y, LI H, XING X J. Effect of temperature on preparation and characteristics of corn straw pellets torrefaction biochar [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(1): 220-226.
- [6] BENETTO E, JURY C, KNEIP G, et al. Life cycle assessment of heat production from grape marc pellets [J]. Journal of cleaner production, 2015, 87: 149-158.
- [7] ADAMS P W R, SHIRLEY J E J, MCMANUS M C. Comparative cradle-to-gate life cycle assessment of wood

- pellet production with torrefaction[J]. *Applied energy*, 2015, 138: 367-380.
- [6] 张双奇, 邓梦思, 单明, 等. 基于秸秆露天焚烧量的北方农村地区秸秆成型燃料替代采暖散煤节能减排研究[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(12): 2506-2514. ZHANG S Q, DENG M S, SHAN M, et al. Study on the energy and environmental impacts of substituting molded straw fuels for heating coal in rural areas of northern China based on the amount of straw open burning[J]. *Journal of agro-environment science*, 2017, 36(12): 2506-2514.
- [7] 王红彦, 王亚静, 高春雨, 等. 基于LCA的秸秆沼气集中供气工程环境影响评价[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 237-243. WANG H Y, WANG Y J, GAO C L, et al. Environment impact evaluation of straw biogas project for central gas supply based on LCA [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21): 237-243.
- [8] 霍丽丽, 田宜水, 孟海波, 等. 生物质固体成型燃料全生命周期评价[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(12): 1875-1880. HUO L L, TIAN Y S, MENG H B, et al. Life cycle assessment analysis for densified biofuel[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2011, 32(12): 1875-1880.
- [9] 林成先, 杨尚宝, 陈景文, 等. 煤与秸秆成型燃料的复合生命周期对比评价[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(11): 2451-2457. LIN C X, YANG S B, CHEN J W, et al. Hybrid life cycle analysis for coal versus straw briquettes[J]. *Acta scientiae circumstantiae*, 2009, 29(11): 2451-2457.
- [10] MORRISON B, GOLDEN J S. Life cycle assessment of co-firing coal and wood pellets in the southeastern United States[J]. *Journal of cleaner production*, 2017, 150: 188-196.
- [11] 王长波, 陈永生, 张力小, 等. 秸秆压块与燃煤供热系统生命周期环境排放对比研究[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(11): 4418-4426. WANG C B, CHEN Y S, ZHANG L X, et al. Life cycle environmental emission comparison of straw briquette fuel and coal fired heat generation[J]. *Acta scientiae circumstantiae*, 2017, 37(11): 4418-4426.
- [12] MORRISON B, DAYSTAR J, GOLDEN J S. Substituting wood pellets for coal in large-scale power stations: a dynamic life cycle assessment examination[J]. *International journal of global energy*, 2018, 41(5-6): 272-288.
- [13] ZHAO H L, LIU F, LIU H Q, et al. Comparative life cycle assessment of two ceramsite production technologies for reusing municipal solid waste incinerator fly ash in China[J]. *Waste management*, 2020, 113: 447-455.
- [14] 王悦. 陇东地区现存草地农业与耕地农业的环境影响对比研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. WANG Y. Comparison on environmental impacts of existing grassland agriculture and cropland agriculture systems in Longdong area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [15] 刘金荣. 驻马店市现代农业发展研究[J]. *合作经济与科技*, 2013(4): 18-20. LIU J R. Study on the development of modern agriculture in Zhumadian City [J]. *Cooperative economy & science*, 2013(4): 18-20.
- [16] WANG Z W, LEI T Z, YANG M, et al. Life cycle environmental impacts of cornstalk briquette fuel in China [J]. *Applied energy*, 2017, 192: 83-94.
- [17] GUO F H, HE Y, HASSANPOUR A, et al. Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal [J]. *Energy*, 2020, 197: 11747.
- [18] SHAN M, XING Y J, DENG M S, et al. Discussion and suggestion on the value of baseline oxygen content for pollutant emissions of household biomass heating stove [J]. *Journal of ecology and rural environment*, 2021, 37(2): 265-271.
- [19] 张鹤丰. 中国农作物秸秆燃烧排放气态、颗粒态污染物排放特征的实验室模拟[D]. 上海: 复旦大学, 2009. ZHANG H F. A laboratory study on emission characteristics of gaseous and particulate pollutants emitted from agricultural crop residue burning in China [D]. Shanghai: Fudan University, 2009.
- [20] 刘君侠, 刘琼玉, 程晋俊, 等. 民用煤燃烧污染物排放因子研究[J]. *江汉大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(6): 514-520. LIU J X, LIU Q Y, CHENG J J, et al. Study on emission factors for pollutants from residential coal combustion [J]. *Journal of Jiangnan University (natural science edition)*, 2019, 47(6): 514-520.
- [21] 郭飞宏. 流化床中煤与成型生物质颗粒流动、传热和燃烧特性基础研究[D]. 南京: 东南大学, 2019. GUO F H. Basic research on particle flow, heat transfer and combustion of coal and biomass pellet in fluidized bed [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.

WHOLE-LIFE CYCLE ASSESSMENT OF COMPOSITE PELLET FUEL FOR HEATING IN NORTHERN RURAL AREAS

Jiang Jingyu, Liu Yuhan, Pang Yutong, Chen Yuxin, Guo Feihong, Jiang Xiaoxiang

(School of Energy and Mechanical Engineering, Jiangsu Provincial Key Laboratory of Materials Cycling and Pollution Control, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In this paper, straw and coal are used as raw materials to produce composite fuel pellets, and the energy consumption and environmental impact of fuel pellets for combustion heating are studied by using the whole-life cycle assessment method. The results show that the total energy input of fuel pellets is 908 MJ/t, the calorific value released by combustion is 15490 MJ/t, and the energy ratio of output to input is 17.1, indicating high energy conversion efficiency. The energy input of fuel pellets is mainly used for corn planting, in which the use of nitrogen fertilizer in the process of planting consumes more energy. The most significant contribution to climate change(GWP) and acidification(AP) is the combustion of fuel pellets, in which the direct contribution of combustion pollutants is the largest, accounting for 53.22% and 46.08% respectively; the most significant contribution to the water resources consumption(WU) is the production of fuel pellets, accounting for 71.56%; the most significant contribution to eutrophication potential(EP) is the discharge of waste residue from pellets combustion, with a contribution rate of 43.40%.

Keywords: biomass energy; straw; energy consumption; environmental impact; pellet fuel ; whole-life cycle assessment