

生物质资源收集过程成本、能耗及环境影响分析

邢爱华, 刘昱, 王垚, 魏飞, 金涌

(清华大学化学工程系绿色反应工程与工艺北京市重点实验室, 北京 100084)

摘要: 基于秸秆类生物质资源的岛式分布特点, 建立了描述秸秆收集过程成本、能耗和污染物排放的数学模型. 针对单资源岛秸秆收集过程, 讨论了压缩对秸秆收集成本、能耗及环境的影响, 建立了计算秸秆收集过程的临界收集量和临界运输距离的数学表达式, 并对收集成本和能耗进行了参数敏感性分析. 结果表明, 无论压缩与否, 秸秆单位收集成本与 $\alpha^{0.5}$ (α 为可利用资源密度)成反比, 与运输距离成正比. 不压缩时收集成本与 $Q^{0.5}$ (Q 为收集量)成正比, 压缩后再运输收集成本随收集量的增加呈先降低后增加的规律. 参数敏感性分析表明, 运输费率、收购价格、运输距离是对收集成本影响比较敏感的参数, 各参数变化 $\pm 50\%$ 均会引起收集成本变化 $\pm 17\%$ 以上. 运输油耗、运输距离对收集过程能耗的影响较大, 参数变化 $\pm 20\%$ 会导致能耗的变化在 $\pm 17\%$ 以上.

关键词: 生物质; 秸秆; 收集; 成本; 环境; 评价

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2008)02-0305-09

1 前言

能源和资源是现代经济发展的源头, 由于能源供应紧张及化石能源使用所引起的严重污染, 世界各国都把目光集中到可再生资源. 生物质能是清洁的可再生能源, 每年全球的生物能总量约 1400~1800 亿吨(干重), 相当于目前世界年总能耗的 10 倍^[1], 它的合理利用有助于缓解日益突出的资源与能源短缺、环境污染与经济发展的矛盾, 有利于人类社会的可持续发展.

与化石资源相比, 生物质资源分布分散、能量密度低, 收集运输成为限制生物质技术发展的突出环节. 国内外已有研究者对秸秆收集进行了有益的探讨. 杨柏成等^[2]用划分收集区域的方法对吉林省的玉米秸秆气化原料供应量和供应成本进行了分析, 表明秸秆单位运费随着秸秆供应总量的增大而增加, 导致秸秆供应成本上升. 王国才等^[3]用面积系数法对气化站所能获得的秸秆供应量进行评估, 建立了收集量与收集半径之间的关系式. Caputo 等^[4]对生物质发电厂经济性分析结果表明, 车辆运输价格增加、车容量下降、资源密度降低、生物质购买价格提高将增加运行成本, 导致经济效益降低. 已有文献^[5-8]对生物质收集过程的报道主要集中在对收集成本的分析方面, 有关收集过程能耗和污染物排放的报道很少. 对收集过程的经济性、能耗和污染物排放进行全面分析是考察生物质技术规模、发展方向的前提. 压缩是使秸秆致密化的重要手段, 将秸秆压缩后再运输是否会降低秸秆收集过程的成本及能耗的研究未见报道. 本

工作基于秸秆类生物质资源的岛式分布特点, 建立了反映收集过程成本、能耗和污染物排放的数学模型, 分析了压缩对成本、能耗及环境的影响, 并对影响收集成本和能耗的因素进行了敏感性分析.

2 秸秆收集模型的建立

秸秆类生物质资源的总体分布相对分散. 由于中国的农业现状, 许多耕地相互隔绝, 资源分布不均匀, 相对于非生物质资源产区, 部分地区的生物质资源相对富集, 称为生物质资源产区. 生物质资源产区的面积较小, 且往往相互孤立, 可视为资源岛式分布. 秸秆收集过程主要分为资源岛内的采集环节及将秸秆从资源岛中心运输到加工企业的运输环节. 实际生产时, 加工企业往往与资源产地相距一定的距离, 当生产规模较大时, 加工企业需要从多个资源产地收集秸秆. 秸秆资源产地的形状大多是不规则的, 为了简化处理, 将秸秆产地折算成等面积圆形. 秸秆资源的岛式分布和收集过程如图 1 所示.

2.1 收集成本模型

基于资源岛式分布, 对秸秆类生物质的收集过程做如下假设:

- (1) 秸秆资源的生产周期以年为单位;
- (2) 秸秆资源在同一资源岛内均匀分布, 忽略同种作物由于种植条件不同造成的产量差异, 将作物种植面积由原来只占整个资源岛面积的一部分扩展至与整个资源岛面积一致, 同时保持总产量不变;

收稿日期: 2007-06-12, 修回日期: 2007-11-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)基金资助项目(编号: 2004CB719706); 中国博士后科学基金资助项目(编号: 20060400068)

作者简介: 邢爱华(1970-), 女, 河北省三河市人, 博士后, 从事分离工程、生物质资源高值化利用等方面的研究; 王垚, 通讯联系人, Tel: 010-62788994, E-mail: wang_yao@mail.tsinghua.edu.cn.

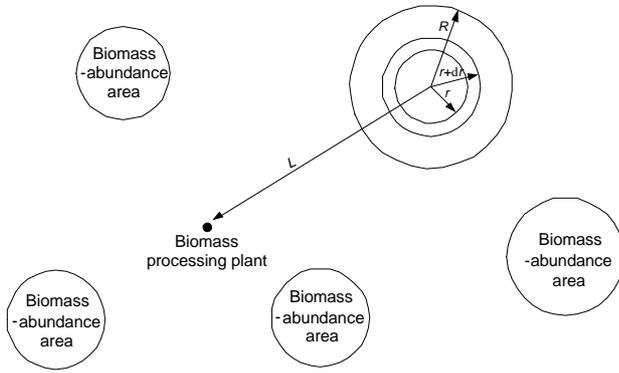


图1 资源岛式分布及收集过程示意图
Fig.1 Biomass resource island distribution model
and collection process illustration

(3) 忽略不同种类秸秆的收集运输及加工差异, 多种作物秸秆产量可以加和;

(4) 忽略不同资源岛之间的经济参数差异.

由上述假设得到收集成本的数学描述如下: 秸秆收集过程主要包括岛内采集和岛外运输环节. 如引入压缩环节, 则收集过程按秸秆采集到岛中心→在岛中心压缩→从岛中心运输到加工厂的顺序进行. 收集过程的成本包括: 收购成本 C_b 、压缩成本 C_p 、运输成本 C_t 、其他成本 C_o (包括装卸费用、存储费用等).

当收集区域存在 n 个资源岛, 各资源岛中心与生产企业的距离为 $L_i (i=1, 2, \dots, n)$, 从各岛收集的秸秆量为 $Q_i (i=1, 2, \dots, n)$, 则总的生物质利用规模 $Q = \sum_{i=1}^n Q_i$. 对于每个资源岛, 秸秆的收购成本 $C_{b,i}$ 、其他成本 $C_{o,i}$ 均与收集量 Q_i 成正比:

$$C_{b,i} = P_b Q_i, \quad (1)$$

$$C_{o,i} = P_o Q_i, \quad (2)$$

其中, P_b , P_o 分别为单位质量生物质的收购价格和其他收集费用.

运输费用 C_t 分为两部分: 资源岛内部运输费用 C_{t1} 和资源岛到加工厂运输费用 C_{t2} . C_{t1} 的计算用定积分微元分析法 (如图 1 所示). 考虑运输距离不为直线, 引入曲折因子 $\beta^{[9]}$ 进行校正, 则有

$$C_{t1,i} = \int_0^{R_i} 2\pi r \alpha_i' \beta r P_t dr = \frac{2\pi R_i^3}{3} P_t \beta \alpha_i' = \frac{2}{3} Q_i^{1.5} \beta P_t (\pi \alpha_i')^{-0.5}, \quad (3)$$

其中, $P_t = P_t' / \rho$ 为生物质的质量运输费率 [¥/(t·km)], P_t' 表示体积运输费率 [¥/(m³·km)], R_i 为 Q_i 对应的收集半径, $R_i = [Q_i / (\pi \alpha_i')]^{0.5}$, $\beta \geq 1$, 本研究取 $\beta = 1.5$, α_i' 为第 i 个岛的可利用资源密度, 其表达式为

$$\alpha_i' = k \alpha = k \varepsilon \sum_{j=1}^m B_j Y_j S_j, \quad (4)$$

式中, α 为资源密度, 指一个拟均匀化的资源岛在一定时间内单位面积所能提供的最大资源量, ε 为耕地覆盖率, B_j 表示第 j 种作物的种植比例, Y_j 为第 j 种作物的单位面积产量, S_j 为第 j 种作物的草谷比, m 为资源岛内的秸秆种类总数, k 为秸秆综合收集系数, 考虑到秸秆在收集过程中的损耗及秸秆在不同利用技术中所占的比例, 本研究中 $k = 0.6$.

C_{t2} 与秸秆收集量、运输费率和运输距离成正比, 从资源岛中心到加工企业的距离以 L_i 表示, 有

$$C_{t2,i} = Q_i \beta L_i P_t. \quad (5)$$

压缩成本: 压缩成本由压缩操作的固定投资 C_f 和压缩操作运行成本 C_{p0} 组成. 秸秆操作的固定投资 (包括建筑投资、设备投资、其他投资)、人力成本、维护成本等运行费用与生产规模呈指数变化关系, 根据参考装置的经济性数据, 按生产力指数法进行计算^[10]. 电力费用、其他运行成本与生产规模成正比关系.

$$C_{p,i} = C_{f,i} + C_{p0,i} = (Q_i / Q_c)^r (C_{f,c} + C_{p0,c}) + (Q_i / Q_c) C'_{p0,c}, \quad (6)$$

式中, Q_c 表示参考装置的处理能力, $C_{f,c}$ 为参考装置固定投资的年线性折旧成本, $C_{p0,c}$ 为参考装置中人力成本、维护成本等按生产力指数法计算的运行成本之和, $C'_{p0,c}$ 为参考装置中与生产规模成正比的运行成本之和, r 表示生产力指数, 本研究中取 0.9.

第 i 个资源岛的秸秆收集成本 C_i 表示为

$$C_i = C_{b,i} + C_{t1,i} + C_{p,i} + C_{o,i} = \frac{2}{3} Q_i^{1.5} P_t \beta (\pi \alpha_i')^{-0.5} + Q_i (P_b + P_o + \beta L_i P_t) + (Q_i / Q_c)^r (C_{f,c} + C_{p0,c}) + (Q_i / Q_c) C'_{p0,c}. \quad (7)$$

当从 n 个资源岛获取秸秆原料时, 总成本可表示为

$$C = \sum_{i=1}^n (C_{b,i} + C_{t1,i} + C_{p,i} + C_{o,i}) = \frac{2}{3} \sum_{i=1}^n Q_i^{1.5} P_t \beta (\pi \alpha_i')^{-0.5} + \sum_{i=1}^n [Q_i (P_b + P_o + \beta L_i P_t)] + \sum_{i=1}^n [(Q_i / Q_c)^r (C_{f,c} + C_{p0,c}) + (Q_i / Q_c) C'_{p0,c}]. \quad (8)$$

秸秆不经压缩直接运输的费用不包括最后一项.

2.2 收集能耗模型

通过对收集过程进行能耗分析, 可以清晰地了解收集过程总能耗及各环节的能耗在总能耗中所占比例. 收集过程的能耗主要包括运输环节能耗 E_t 和压缩产生的能耗 E_p .

运输能耗: 包括采集区域内部运输能耗和将秸秆由资源岛中心运输到加工企业所产生的能耗两部分.

采集区域内部运输的能耗:

$$E_{t1,i} = \text{FHV} \cdot \text{FC}_b (2/3) Q_i^{1.5} \beta (\pi \alpha_i)^{-0.5}, \quad (9)$$

式中, FHV 表示燃油热值, FC_b 为吨公里运输油耗 ($\text{FC}_b = \text{FC}_b' / \rho$, FC_b' 表示体积运输油耗).

秸秆由资源岛中心运输到加工企业的能耗:

$$E_{t2,i} = \text{FHV} \cdot \text{FC}_b Q_i \beta L_i. \quad (10)$$

压缩环节消耗电能, 与压缩密度有关, 将文献中单位质量秸秆的压缩电耗 P_p (kW·h/t) 与秸秆压缩密度 ρ (t/m³) 数据进行拟和^[11], 得到如下经验关联式:

$$P_p = 66.836\rho - 13.171. \quad (11)$$

假设电力由燃煤发电提供, 根据中国煤炭网 2006~2007 年电力行业发展及煤电需求状况分析提供的统计报告, 1~10 月全国累计供电标准煤耗为 0.364 kg/(kW·h), 标准煤的热值为 29260 kJ/kg, 电的实际能耗为 10650.6 kJ/(kW·h), 故某个资源岛的秸秆压缩到密度为 ρ 时的实际能耗为

$$E_{p,i} = 10650.6(66.836\rho - 13.171)Q_i. \quad (12)$$

从多资源岛收集秸秆过程的能耗为

$$E = \sum_{i=1}^n (E_{t1,i} + E_{p,i}) = \text{FHV} \cdot \text{FC}_b \sum_{i=1}^n \left[2/3 \beta Q_i^{1.5} (\pi \alpha_i)^{-0.5} + Q_i \beta L_i \right] + \sum_{i=1}^n [10650.6 (66.836\rho - 13.171) Q_i]. \quad (13)$$

秸秆不经压缩直接运输的能耗不包括最后一项.

能耗率 $\theta = (\text{运输能耗} + \text{压缩能耗}) / (\text{秸秆收集量} \times \text{秸秆热值})$, 即

$$\theta = E / (Q \cdot \text{SHV}) \times 100\%. \quad (14)$$

2.3 收集排放模型

收集过程对生态环境产生的影响由以下两方面引起: 运输环节燃油排放和压缩耗电引起的排放.

运输排放: 用燃油排放物产率计算运输环节引起的环境污染, 包括采集区域内部运输排放和从岛中心到加工企业的运输排放. 运输过程排放的温室气体的计算依据是联合国政府间气候变化专门委员会制定的 2006 IPCC 报告^[12].

CO_2 排放量的计算方法分为 2 个等级 (Tier 1 和 Tier 2), 计算公式均为

$$F_{\text{CO}_2} = \sum_a [\text{Fuel}_a \cdot \text{EF}_a], \quad (15)$$

式中, F_{CO_2} 表示 CO_2 的排放量, Fuel_a 表示消耗的燃料量 (TJ), EF_a 表示燃料产生的 CO_2 排放因子, a 表示燃料种类. Tier 1 与 Tier 2 的区别在于 Tier 1 的排放因子采用

2006 IPCC 提供的缺省值, Tier 2 的排放因子按照燃料中碳元素全部氧化计算得到. 实际应用时使用哪种方法计算 CO_2 排放根据 IPCC 的决定树来判断, 本研究采用 Tier 1 方法计算 CO_2 排放.

CH_4 和 N_2O 排放量的计算分为 3 个等级, Tier 1 的计算方法与 CO_2 排放方法类似, 采用缺省的排放因子, Tier 2 的计算方法如下:

$$F_g = \sum_{a,b,c} [\text{Fuel}_{a,b,c} \cdot \text{EF}_{a,b,c}], \quad (16)$$

式中, F_g 分别表示 CH_4 和 N_2O 排放量, $\text{Fuel}_{a,b,c}$ 表示给定车辆类型消耗的燃料量, a 表示燃料种类, b 表示车辆类型, c 表示排放控制技术 (如有无催化剂控制排放技术). Tier 3 是在 Tier 2 的基础上将生物质运输过程分为稳定运行阶段和冷启动阶段. 本研究采用 Tier 2 方法计算 CH_4 和 N_2O 排放量.

国际上通用的 NO_x , CO , VOC 和 PM_{10} 等污染物排放的计算方法是以大气排放资料库指南 (EMEP/CORINAIR) 为指导原则^[13], 排放量的计算根据车型、燃料种类和行驶速度的不同分别对应不同关系式. 由于我国目前还缺少这方面的基础数据, 上述污染物排放计算采用统计方法.

将秸秆从资源岛各处运输到岛中心引起的污染物排放:

$$F_{t1,i,m} = f_{o,m} \text{FC}_b (2/3) Q_i^{1.5} \beta (\pi \alpha_i)^{-0.5}. \quad (17)$$

将秸秆由资源岛中心运输到加工企业引起的污染物排放:

$$F_{t2,i,m} = f_{o,m} \text{FC}_b Q_i \beta L_i, \quad (18)$$

式中, $f_{o,m}$ 为运输消耗 1 L 燃油排放的各种污染物质量, 下标 o 表示燃油, m 分别表示 VOC , CO , SO_x , NO_x 和 PM_{10} , 根据燃油排放的统计结果^[14-19], 其值分别为 0.0271, 0.099, 0.585, 0.1445 及 0.01445 g.

压缩耗电引起的排放: 电力消耗引起的温室气体 CO_2 , N_2O 和 CH_4 排放量的计算依据为 2006 IPCC 报告: 可以采用 3 个等级的方法计算, 以 Tier 1 为例:

$$F_{\text{GHG,fuel}} = \text{Fuel}_{\text{cons}} \cdot \text{EF}_{\text{GHG,fuel}}, \quad (19)$$

式中, $F_{\text{GHG,fuel}}$ 表示某种燃料的温室气体排放量, $\text{Fuel}_{\text{cons}}$ 表示燃料的消耗量, $\text{EF}_{\text{GHG,fuel}}$ 表示某种燃料温室气体缺省的排放因子. Tier 2 与 Tier 1 的区别在于使用了国家特定的排放因子, Tier 3 中排放因子需根据燃料种类、燃烧技术、操作条件、控制技术、维护质量和设备使用年限等因素确定. 本研究采用 Tier 1 方法计算电力消耗引

起的温室气体排放. 由于我国的电力生产以煤为主要燃料, 参考 IPCC 中褐煤燃烧过程中 CO_2 , CH_4 和 N_2O 缺省的排放因子分别为 101000, 1 和 1.5 kg/TJ.

压缩过程由于电力消耗引起其他污染物的排放量根据国家环境保护局科技标准司《工业污染物产生和排放系数手册》提供的数据^[20]计算, 燃煤发电量为 1 kW·h 时的各种排放物量分别为烟尘 0.00821 kg, SO_2 0.0104 kg, 冲灰渣水稀浆 2.445 kg, 浓浆 0.697 kg. 因此, 压缩环节因燃煤电力消耗引起的污染物排放的计算公式为

$$F_{p,i} = f_{ce,l}(66.836\rho - 13.171)Q_i \quad (20)$$

式中, $f_{ce,l}$ 表示燃煤发电量为 1 kW·h 时排放的各种污染物的质量, 其中 ce 表示发电原料为煤炭, l 表示各种污染物.

3 单资源岛秸秆收集过程实例计算

以单资源岛为例, 从收集成本、能耗及污染物排放等角度考察秸秆收集过程. 秸秆加工企业从实际运输距离为 30 km 的资源岛收集秸秆, 收集量为 5000 t/a, 参考系统的基本数据如表 1 所示.

表 2 秸秆收集成本分析

Table 2 The cost analysis of straw collection process

| Cost | Non-compression | | | Compression | | |
|---|---------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|
| | Total collection cost (¥) | Collection cost (¥/t) | Cost proportion (%) | Total collection cost (¥) | Collection cost (¥/t) | Cost proportion (%) |
| Purchase cost | 400 000 | 80.0 | 36.99 | 400 000 | 80.0 | 37.52 |
| Transportation cost within resource island | 28 469 | 5.69 | 2.63 | 28 469 | 5.69 | 2.67 |
| Transportation cost from island center to processing enterprise | 375 000 | 75.00 | 34.68 | 112 500 | 22.50 | 10.55 |
| Other cost | 277 778 | 55.56 | 25.69 | 83 333 | 16.67 | 7.82 |
| Compression cost | — | — | — | 473 458 | 88.37 | 41.44 |
| Total cost | 1 081 247 | 216.25 | 100 | 1 097 761 | 213.23 | 100 |

根据式(7)可知, 在秸秆密度和收集量一定的情况下, 收集成本与运输距离成正比. 密度越低, 运输距离对收集成本的影响越大. 为了深入分析不同运输距离时压缩操作对收集成本的影响, 考察了秸秆收集量为 5000 t, 运输距离分别为 18, 30, 60 和 100 km 时的收集成本随压缩密度的变化规律, 结果如图 2 所示.

秸秆压缩后再运输是否能降低成本与运输距离有关. 图 2 的结果表明, 运输距离为 18 和 30 km 时, 压缩后秸秆的收集成本高于直接运输的收集成本. 运输距离为 60 和 100 km 时, 压缩后再运输有利于降低收集成本, 且收集成本起初随着压缩密度的增加迅速下降, 但当压缩密度达到 0.6 t/m³ 以后, 收集成本随压缩密度增加变化缓慢. 因此, 远距离运输时对秸秆适度压缩有利于降低收集成本.

表 1 秸秆收集参数

Table 1 Straw collection parameters

| Parameter | Value |
|--|----------|
| Resource density (t/km ²) | 1 357.86 |
| Cultivated area ratio (%) | 37.68 |
| Purchase price (¥/t) | 80 |
| Other collection cost (¥/m ³) | 10 |
| Collective collection coefficient | 0.6 |
| Volume transportation fee rate (¥/m ³) | 0.45 |
| Transportation fuel consumption [L/(t·km)] | 0.06 |
| Transportation fuel heat value (kJ/L) | 36 120 |
| Compressed equipment capital (¥) | 98 000 |
| Compressed equipment depreciation time (a) | 15 |

Note: Data source: the almanac of Shiheng town in Shandong province and other statistic information from literature and internet.

3.1 收集成本计算

表 2 列出了秸秆收集到资源岛中心后, 将其压缩到 0.6 t/m³ 再运输与不经压缩直接运输的收集成本分析结果. 可以看出, 无论压缩与否, 收购费用占总成本的 37% 左右. 不压缩运输, 运输成本为 80.69 ¥/t, 占收集成本的 37.31%. 压缩后再运输, 运输成本为 28.19 ¥/t, 运输费用只占总成本的 13.22%, 但增加了压缩费用(88.37 ¥/t). 在本例中, 与不压缩相比, 秸秆压缩后再运输的收集成本降低了 3.02 ¥/t.

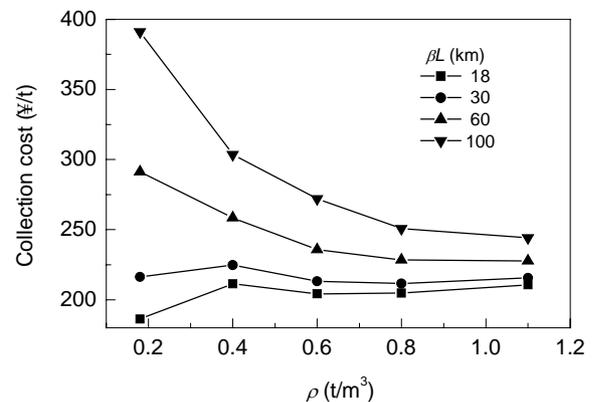


图 2 秸秆压缩密度对收集成本的影响

Fig. 2 The effect of compression density on collection cost

进一步考察了收集量对收集成本的影响. 图 3 的结果为不同运输距离(18, 30, 60, 100 km)下秸秆压缩到 0.6

t/m³ 后再运输与不压缩运输时收集成本随收集量的变化规律. 不压缩时单位质量秸秆收集成本与 $Q^{0.5}$ 成正比. 压缩后再运输时, 秸秆收集成本随收集量的增加呈先下降后增加的趋势. 运输距离较短时(18 km), 在考察的收集量范围内, 秸秆压缩后再运输的收集成本高于不压缩, 随着收集量的增加, 两者的差距逐渐减小, 收集规模增加到一定程度后, 压缩后再运输的收集成本将低于不压缩. 随着运输距离的增加(30 km), 运输量较小时, 压缩后再运输的收集成本高于不压缩, 当收集量 $Q > 2243$ t 后, 秸秆压缩后再运输有利于降低成本. 运输距离进一步增加, 压缩后再运输的收集成本低于不压缩, 收集量越大, 收集成本降低越显著; 相同收集量下, 运输距离越远, 收集成本降低越明显.

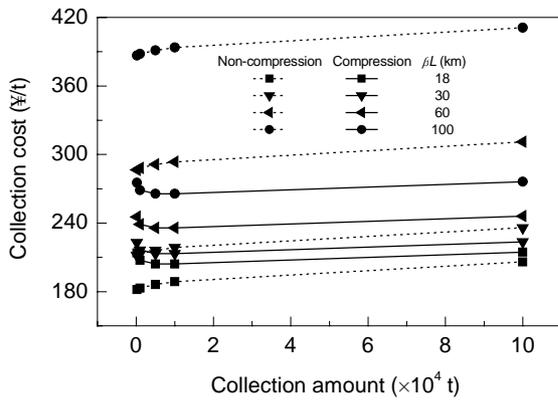


图 3 秸秆收集量对收集成本的影响
Fig.3 The effect of straw collection amount on collection cost

为定量分析压缩操作对收集成本的影响, 根据式(7), 分别建立了一定压缩密度和运输距离下的临界收集量、一定压缩密度和收集量下的临界运输距离的表达式, 如式(21)和(22). 临界收集量是指在一定压缩密度和运输距离下, 当实际收集量低于此值时, 压缩后再运输的收集成本高于不压缩运输的成本; 当实际收集量高于此值时, 压缩后再运输的收集成本低于不压缩运输的成本. 临界运输距离是指在一定的压缩密度和收集量下, 当实际运输距离低于此值时, 压缩后再运输的收集成本

高于不压缩运输的成本; 当实际运输距离高于此值时, 压缩后再运输的收集成本低于不压缩运输的成本.

$$Q_L = \left[\frac{(C_{f,c} + C_{po,c})/Q_c^{0.9}}{(\rho_1^{-1} - \rho_2^{-1})(\beta L P_t' + P_o') - C'_{po,c}/Q_c} \right]^{10}, \quad (21)$$

$$(\beta L)_L = \frac{(C_{f,c} + C_{po,c})/(Q_c^{0.9} Q_i^{0.1}) + C'_{po,c}/Q_c}{P_t'(\rho_1^{-1} - \rho_2^{-1})} - \frac{P_o'}{P_t'}, \quad (22)$$

式中, ρ_1 和 ρ_2 分别表示秸秆不压缩和压缩时的密度.

根据压缩操作参考装置的经济性数据^[21,22], 计算得到其固定投资年线性折旧费 $C_{f,c}$ 为 12533 元, 与生产规模成正比的运行费用 $C'_{po,c}$ 为 30000 ¥/t, 参考装置将 1000 t 秸秆压缩到密度为 0.4, 0.6, 0.8, 1.1 t/m³ 时的运行费用 $C_{po,c}$ 分别为 44138, 52158, 60179 和 72209 元. 由式(21)可以计算出秸秆不同压缩密度、不同运输距离时的临界收集量, 以秸秆的压缩密度为 0.6 t/m³ 为例, 运输距离分别为 18, 30, 60, 100 km 时的临界运输量分别为 4778234, 2243, 0.46, 0.002 t. 由式(22)可以计算出秸秆不同压缩密度、不同收集量时的临界运输距离, 以秸秆的压缩密度为 0.6 t/m³ 为例, 收集量分别为 180, 5000, 10000, 100000 t 的临界运输距离分别为 58.6, 50.5, 49.1, 45.1 km.

3.2 能耗计算

实例中秸秆收集过程的能耗分析如表 3 所示, 秸秆不压缩运输的能耗占秸秆总能量的 2.31%, 压缩后再运输的能耗占秸秆能量的 2.52%, 压缩后再运输的能耗略高于不压缩直接运输的能耗. 两者相差不大的原因是由于压缩环节产生的能耗与秸秆致密化后使运输环节能耗下降量大体相抵消.

为了对比分析秸秆压缩后再运输和不压缩运输的能耗情况, 考察了不同运输距离时秸秆收集过程的能耗率随收集量的变化规律, 结果如图 4 所示.

由图 4 可见, 收集能耗率随收集量的增加和运输距离的延长而增加. 相同运输距离下, 无论压缩与否, 秸秆收集量从 1 万 t 依次增加到 10, 100, 300, 500 万 t 时,

表 3 秸秆收集能耗分析
Table 3 The energy consumption analysis of straw collection process

| Energy consumption | Non-compression | | Compression | |
|---|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| | Total energy consumption (kJ) | Unit energy consumption (kJ/kg) | Total energy consumption (kJ) | Unit energy consumption (kJ/kg) |
| Island inner transportation energy consumption | 1.37×10 ⁸ | 27.41 | 1.37×10 ⁸ | 27.41 |
| Transportation energy from island center to processing enterprise | 1.81×10 ⁹ | 361.20 | 5.42×10 ⁸ | 108.36 |
| Compression energy consumption | - | - | 1.43×10 ⁹ | 286.83 |
| Sum of energy consumption | 1.94×10 ⁹ | 388.61 | 2.11×10 ⁹ | 422.60 |
| Straw energy | 8.40×10 ¹⁰ | 1.68×10 ⁴ | 8.40×10 ¹⁰ | 1.68×10 ⁴ |

运输的能耗率分别增加 0.5%, 2.08%, 3.76%, 4.93%, 收集能耗率与 $Q^{0.5}$ 成正比. 相同的收集量下, 运输距离从 18 km 依次增加到 30, 60, 100 km 后, 压缩后再运输的能耗率分别增加了 0.25%, 0.91%, 1.77%, 而不压缩运输的能耗率则分别增加了 0.86%, 3.01% 和 5.88%, 压缩后再运输的能耗对运输距离的敏感度远小于不压缩运输的情况. 因此, 降低秸秆收集规模和在远距离运输时增加压缩环节有利于降低能耗.

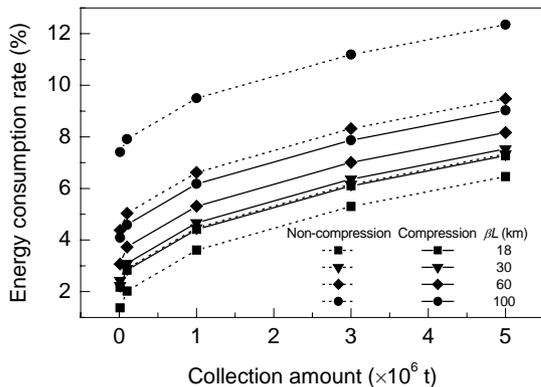


图4 不同运输距离下秸秆收集量对能耗率的影响
Fig.4 The effect of straw collection amount on the energy consumption rate under different transportation distances

3.3 污染物排放计算

对收集量为 5000 t、运输距离为 30 km 的秸秆收集过程进行污染物排放分析. 由于实际生物质运输过程中车辆类型、燃料种类和控制技术的不同, 为简化处理, 本研究假设生物质运输工具为以柴油为燃料的重型负载车辆. 不压缩运输时, 秸秆收集到资源岛中心所消耗的燃油为 3795 L, 由资源岛中心运输到加工厂的燃油消耗为 50000 L; 如将秸秆压缩到 0.6 t/m^3 后再运输, 岛内采集过程的燃油消耗量与不压缩方案相同, 岛外运输的燃油消耗则由于秸秆压缩降为 15000 L.

根据 2006 IPCC 中给出的 CO_2 缺省的排放因子为 74100 kg/TJ , 重型柴油车的 CH_4 和 N_2O 排放因子均为 3.9 kg/TJ . 其他污染物根据式(17)和(18)计算得到, 两种情况下由于燃油造成的污染物排放如表 4 所示.

表 4 的结果表明, 压缩后再运输时各种污染物排放均为不压缩运输时的 34.9%, 这是由于秸秆致密化后的燃油消耗量仅为不压缩运输时的 34.9%. 但增加压缩环节会引起电力消耗, 将 5000 t 秸秆压缩到密度为 0.6 t/m^3 , 共耗电 $134653 \text{ kW}\cdot\text{h}$. 假设电力由燃煤提供, 需要的煤量为 49 t, 则燃煤所致污染物排放量分别为烟尘 1105.50 kg , CO_2 48.96 t , CH_4 0.48 kg , N_2O 0.73 kg , SO_2 1401.06 kg , 冲灰渣水稀浆 329 t 及浓浆 93.9 t.

表 4 运输燃油消耗导致的污染物排放分析

Table 4 The discharge analysis of contaminants caused by the consumption of transportation fuel

| Contaminant | Non-compression | Compression |
|---------------------------|-----------------|-------------|
| CO_2 (t) | 144 | 50.3 |
| CH_4 (kg) | 7.58 | 2.65 |
| N_2O (kg) | 7.58 | 2.65 |
| VOC (kg) | 1.46 | 0.51 |
| CO (kg) | 5.33 | 1.86 |
| SO_x (kg) | 31.47 | 11.00 |
| NO_x (kg) | 7.77 | 2.72 |
| PM_{10} (kg) | 0.78 | 0.27 |

可见, 生物质等可再生能源并非纯粹的清洁能源, 仅收集过程就会由于化石能源的消耗对生态环境带来破坏. 由于燃煤发电造成的环境污染远大于运输燃油造成的污染, 因此, 尽管当实际运输距离高于临界运输距离时, 秸秆压缩后再运输可以降低收集成本和能耗, 但却大大增加了污染物排放. 如采用更洁净的供电方式(如水力发电等), 则可极大降低压缩过程对环境的影响.

4 参数敏感性分析

4.1 收集成本参数敏感性分析

基于实例中的数据, 对影响收集成本的主要参数进行了敏感性分析, 考察了各参数变化 $\pm 50\%$ 时对秸秆收集成本的影响, 结果如图 5 所示. 运输费率 P_t 、收购价格 P_b 、运输距离 βL 是对收集成本影响比较敏感的参数, 各参数变化 $\pm 50\%$ 均会引起收集成本变化 $\pm 17\%$ 以上, 其他价格(P_o)的敏感性次之, 所引起的收集成本变化在 $\pm 12\%$ 左右. 收集量 Q 和可利用资源密度 α 对秸秆收集成本影响较小, 在 $\pm 1\%$ 以下. α 与收集成本呈负相关性, 当 α 增加 50% 时, 收集成本降低 0.6%, α 减少 50%, 收集成本增加 0.97%. 秸秆收购价格 P_b 和运输费率 P_t 在一定时间和环境下是相对固定的, 因此秸秆利用企业应尽量建在资源产地和资源密集的地区以减少收集成本.

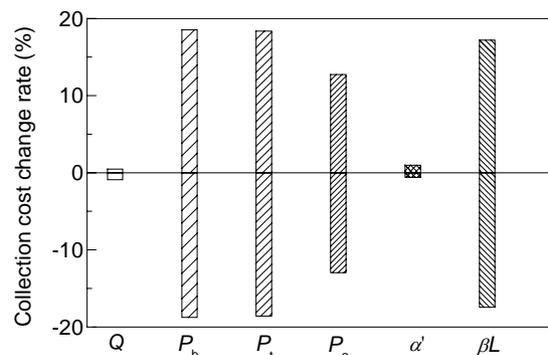


图5 收集成本参数敏感性分析
Fig.5 The parameter sensitivity analysis of collection cost

在秸秆收集量、资源密度固定的情况下($Q=5000$ t, $\alpha'=307$ t/km²), 收购成本和运输成本在总成本中所占比例较高, 这 2 个参数的变化对收集成本影响较大, 而收集量和资源可利用密度的影响不敏感. 为了深入分析 Q 和 α' 对收集成本的影响, 根据式(7)可知不压缩时单位质量秸秆的收集成本为

$$C/Q=2/3\beta Q^{0.5}P_t(\pi\alpha')^{-0.5}+P_t+P_b+\beta P_tL. \quad (23)$$

根据式(23), 考察了单位质量秸秆的运输费用和运输距离一定时 [$P_t=2.5$ ¥/(t·km), $\beta L=30$ km], 收集量 Q 和可利用资源密度 α' 对收集成本的影响, 结果如图 6 所示. 相同收集量下, 收集成本随着 α' 的减小而增加. 当收集量较小时, 收集成本对 α' 的变化不敏感, 但随着收集量的增加, 收集成本对 α' 的敏感性逐渐增强. 另一方面, 当可利用资源密度不变, 收集成本随着 Q 的增大而增加. 当 α' 较大时, 收集成本对 Q 的敏感性较小, 随着 α' 的降低, 收集成本对 Q 的敏感性逐渐增强. 因此, 为降低秸秆收集成本, 加工企业应该尽量建在资源密集的地区, 且对于生物质资源密度较小的地区适合就地分散利用, 不宜大规模收集利用.

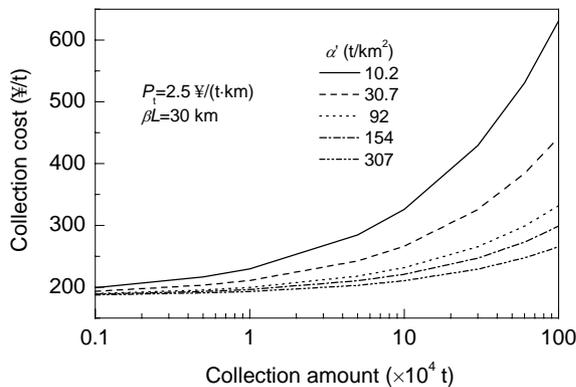


图 6 收集量和可利用资源密度对收集成本的影响
Fig.6 The effect of collection amount and utilized resource density on collection cost

进一步分析了在生物质资源较丰富的地区($\alpha'=307$ t/km²)不同收集量和运输费用对收集成本的影响, 结果如图 7 所示. 相同收集量下, 收集成本随着 P_t 的增加而增加; 相同 P_t 下, 收集成本随着 Q 的增大而增加. 收集量 Q 越大, 收集成本对 P_t 变化的敏感性越强. P_t 越大, 收集成本对收集量的敏感性增强. 由式(23)可知, 运输距离 βL 对收集成本的影响与运输费率 P_t 类似. P_t 主要与燃油价格相关, 随着石油资源的日益消耗, 燃油价格必然不断上涨, 由此会使大规模收集生物质资源的成本大幅度上升. 因此, 生物质加工企业应尽可能建在资源产地, 且当收集量较大时, 将秸秆压缩后再运输更合理.

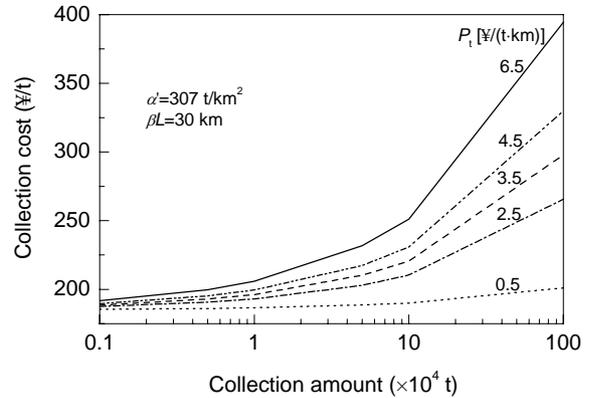


图 7 收集量和运输费率对收集成本的影响
Fig.7 The effect of collection amount and transportation fee rate on collection cost

4.2 收集能耗参数敏感性分析

影响秸秆收集过程能耗的参数有可利用资源密度 α' 、运输油耗 FC_b 、收集量 Q 和实际运输距离 βL . 图 8 为影响秸秆收集能耗率的参数敏感性分析结果, 运输油耗 FC_b 和运输距离 βL 对收集过程能耗率的影响较大, 变化 $\pm 20\%$ 会导致能耗率变化范围在 $\pm 17\%$ 以上. 收集能耗对 α' 和 Q 不敏感. 限于目前内燃机的效率和我国公路运输道路等现状, FC_b 可调节的余地不大. 因此, 降低收集过程能耗的有效途径是将收集企业尽量建在距离资源较近和交通发达的地方.

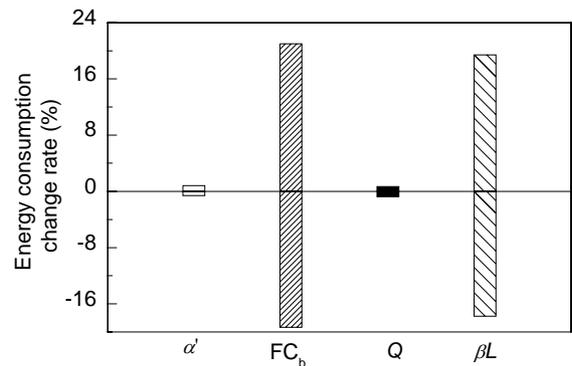


图 8 收集过程能耗参数敏感性分析
Fig.8 The parameter sensitivity analysis of energy consumption of collection process

5 结论

针对秸秆类生物质的收集问题, 建立了描述秸秆收集过程成本、能耗和污染物排放的数学模型, 讨论了压缩对秸秆收集成本、能耗及环境的影响, 并对收集过程的成本和能耗进行了敏感性分析, 得到了一些对秸秆收集利用具有指导意义的结果:

(1) 不压缩时秸秆收集成本与 $Q^{0.5}$ 成正比, 压缩后再运输时收集成本随着收集量的增加呈现先降低后增

加的趋势. 无论压缩与否, 秸秆的收集成本与运输距离成正比, 与 $\alpha^{0.5}$ 成反比. 为降低收集成本, 秸秆加工企业应该尽量建在资源密集的地区, 对于资源密度较小的地区适合就地分散利用, 不宜大规模收集集中利用.

(2) 分别建立了秸秆密度、运输距离固定时的临界收集量和秸秆密度、收集量固定时的临界运输距离的计算式, 确定了秸秆收集过程中增加压缩环节是否有利于降低成本.

(3) 秸秆收集能耗率分别与 $Q^{0.5}$ 和运输距离成正比. 相同的收集量下, 压缩后再运输的能耗对运输距离的敏感度远小于不压缩运输的情况. 降低秸秆收集规模和在大距离运输时增加压缩环节有利于降低能耗.

(4) 参数敏感性分析结果表明, 运输费率 P_t 、收购价格 P_b 、运输距离 βL 是对收集成本影响比较敏感的参数, 各参数变化 $\pm 50\%$ 均会引起收集成本变化 $\pm 17\%$ 以上. 吨公里运输油耗 FC_b 、运输距离 βL 对收集过程能耗率的影响较大, 变化 $\pm 20\%$ 会导致能耗率变化范围在 $\pm 17\%$ 以上.

(5) 收集过程对生态环境的影响主要是由运输过程燃油排放和压缩过程电力消耗的排放引起的. 由于燃煤发电造成的环境污染远大于运输燃油造成的污染, 如采用更洁净的供电方式(如水力发电等), 则可以极大降低收集过程对环境的影响.

符号表:

| | |
|-------------------|---------------------------------|
| B | 资源岛某种作物种植面积与所有作物种植面积之和的比 (%) |
| C_b | 收购费用 (¥) |
| C_f | 压缩操作的固定投资 (¥) |
| $C_{f,c}$ | 压缩操作参考装置固定投资的年线性折旧成本 (¥) |
| C_o | 其他费用 (¥) |
| C_p | 压缩费用 (¥) |
| $C_{p,o}$ | 压缩操作的运行成本 (¥) |
| $C_{p,o,c}$ | 压缩操作参考装置的运行费用 (¥) |
| $C_{p,o,c}$ | 参考装置中生产规模成正比的运行成本之和 (¥) |
| C_t | 运输费用 (¥) |
| C_{t1} | 资源岛内部的运输费用 (¥) |
| C_{t2} | 资源岛到加工厂的运输费用 (¥) |
| E | 秸秆收集过程总能耗 (kJ) |
| E_p | 秸秆压缩操作电耗 (kW·h/t) |
| E_t | 秸秆运输能耗 (kJ) |
| E_{t1} | 采集区域内部运输的能耗 (kJ) |
| E_{t2} | 由资源岛中心运输到加工企业的能耗 (kJ) |
| EF_a | 燃料产生的 CO_2 排放因子 (kg/TJ) |
| $EF_{GHG,fuel}$ | 发电过程某种燃料温室气体缺省的排放因子 (kg/TJ) |
| $f_{o,m}$ | 燃油排放的各种污染物的质量 (g/L) |
| $f_{c,l}$ | 燃煤发电排放的各种污染物质量 [kg/(kW·h)] |
| f_g | 燃油引起的 CH_4 和 N_2O 排放量 (kg) |
| F_{CO_2} | 燃油引起的 CO_2 排放量 (kg) |
| F_p | 压缩环节因燃煤电力消耗引起的污染物排放量 (kg) |
| $F_{GHG,fuel}$ | 发电过程燃料消耗引起的温室气体排放量 |
| FC_b | 吨公里运输油耗 [L/(t·km)] |
| FC_b' | 体积运输油耗 [L/(m ³ ·km)] |
| FHV | 燃油热值 (kJ/L) |
| $F_{t1,m}$ | 秸秆从资源岛各处运输到岛中心引起的污染物排放 (kg) |
| $F_{t2,m}$ | 秸秆从资源岛中心运输到加工企业引起的污染物排放 (kg) |
| Fuel _a | 运输引起的燃料消耗量 (TJ) |

| | |
|-----------------------|---------------------------------|
| Fuel _{cons.} | 发电消耗的燃料量 |
| k | 秸秆综合收集系数 |
| L | 资源岛中心与加工企业直线距离 (km) |
| m | 资源岛内的秸秆种类总数 |
| P_b | 秸秆收购价格 (¥/t) |
| P_o | 以质量计的其他费用 (¥/t) |
| P_o' | 以体积计的其他费用 (¥/m ³) |
| P_p | 单位质量秸秆压缩到一定密度时的电力消耗 (kW·h/t) |
| P_t | 质量运输费率 [¥/(t·km)] |
| P_t' | 体积运费 [¥/(m ³ ·km)] |
| Q_i | 各资源岛收集的秸秆量 (t/a) |
| Q_c | 压缩操作参考装置的处理量 (t/a) |
| Q_L | 临界收集量 (t) |
| r | 生产力指数 |
| R | 资源岛模型收集半径 (km) |
| S | 草谷比(作物的秸秆质量/作物的粮食产量, kg/kg) |
| SHV | 秸秆热值 (kJ/kg) |
| Y | 农作物的单位面积产量 (t/km ²) |
| α | 资源密度 (t/km ²) |
| α' | 可利用资源密度 (t/km ²) |
| β | 曲折因子 |
| βL | 实际运输距离 (km) |
| $(\beta L)_L$ | 临界运输距离 (km) |
| ε | 耕地覆盖率 (%) |
| θ | 能耗率 (%) |
| ρ_1 | 未压缩生物质密度 (t/m ³) |
| ρ_2 | 压缩后生物质密度 (t/m ³) |
| 上标 | |
| r | 生产力指数 |
| 下标 | |
| a | 燃料种类 |
| b | 车辆类型 |
| c | 压缩操作参考装置 |
| c' | 排放控制技术 |
| ce | 煤炭为发电原料 |
| i | 资源岛数 |
| j | 作物种类 |
| m | 燃油引起的污染物种类 |
| l | 煤电引起的污染物种类 |
| L | 临界 |
| p | 压缩操作 |
| t | 运输环节 |

参考文献:

- [1] 吴创之, 马隆龙. 生物质能现代化利用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 2.
- [2] 杨柏成, 吕铁彪, 刘国喜. 玉米秸秆气化原料供应量与供应成本分析 [J]. 农村能源, 1998, (4): 20-21.
- [3] 王国才, 赵力, 梁冬梅. 用面积系数法评估气化站的秸秆供应量 [J]. 农村能源, 2001, (6): 11-19.
- [4] Caputo A C, Palumbo M, Pelagagge P M, et al. Economics of Biomass Energy Utilization in Combustion and Gasification Plants: Effect of Logistic Variables [J]. Biomass and Bioenergy, 2005, 28(1): 35-51.
- [5] Wu C Z, Huang H, Zheng S P, et al. An Economic Analysis of Biomass Gasification and Power Generation in China [J]. Bioresource Technology, 2002, 83(1): 65-70.
- [6] 杨树华, 雷廷宙, 何晓峰, 等. 生物质致密冷成型原料最佳收集半径的研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(增 1): 132-134.
- [7] Sara T, Francis M E, Raymond L H, et al. Economics of a Coordinated Biorefinery Feedstock Harvest System: Lignocellulosic Biomass Harvest Cost [J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27(4): 327-337.
- [8] 刘岗, 郝德海, 董玉平. 生物质秸秆收集成本研究及实证分析 [J]. 技术经济, 2006, (2): 85-88.
- [9] Overend R P. The Average Haul Distance and Transportation Work Factors for Biomass Delivered to a Central Plant [J]. Biomass, 1982,

- (2): 75-79.
- [10] Nguyen M H, Prince R G H. A Simple Rule for Bioenergy Conversion Plant Size Optimization: Bioethanol from Sugar Cane and Sweet Sorghum [J]. *Biomass and Bioenergy*, 1996, 10(5/6): 361-365.
- [11] 南方. 秸秆的收集与储存 [J]. *中国建设动态(阳光能源)*, 2006, (4): 60-61.
- [12] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [R]. Japan: IGES, 2006-05-13.
- [13] EMEPCORINAIR Emission Inventory Guidebook-2006, 3rd edition [M]. Denmark: European Environment Agency, 2006. 8-45.
- [14] 任玉珑, 朱丽娜, 韩唯健, 等. 柴油车生命周期的 3E 评价 [J]. *生态经济*, 2005, (5): 82-86.
- [15] 楚丽明, 汤传毅. 汽车能源生命周期评价 [J]. *节能与环保*, 2003, (11): 27-29.
- [16] 黄志甲, 张旭. 汽车燃料的生命周期评价模型 [J]. *同济大学学报*, 2003, 31(12): 1472-1476.
- [17] 朱国朝, 王守美, 吴刚. 柴油添加剂降低燃油消耗率及排放的试验研究 [J]. *节能*, 2005, (7): 12-14.
- [18] 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法 [S]. GB 17691-2005.
- [19] 梅德清, 袁银南, 孙平, 等. 轻型车燃用生物柴油瞬态工况排放特性的研究 [J]. *汽车工程*, 2007, 29(2): 117-120.
- [20] 国家环境保护局科技标准司. 工业污染物产生和排放系数手册 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 102-103.
- [21] 康德孚, 孟庆兰. 生物质物料热压成型工艺参数的探讨 [J]. *农业工程学报*, 1994, 10(3): 121-126.
- [22] 刘俊红, 王革华, 张百良. 生物质成型燃料产业化的理性思考 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(增 1): 138-141.

Economic, Energy and Environment Analysis on Biomass Collection Process

XING Ai-hua, LIU Gang, WANG Yao, WEI Fei, JIN Yong

*(Beijing Key Laboratory of Green Chemical Reaction Engineering and Technology,
Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)*

Abstract: The mathematical models simulating the collection cost, energy consumption and environmental pollution of biomass collection process have been established based on the island distribution of straw. The effect of straw compression on collection cost, energy consumption and environmental discharge is discussed for single resource island collection process. The equations for calculating critical collection amount and critical transportation distance are established. The parameter sensitivity analysis for collection cost and energy consumption is investigated respectively. The result shows that collection cost of unit mass straw is proportional to transportation distance and the inverted square root of resource density whether the straw is compressed or not. The collection cost without compression is proportional to the square root of the collection amount, while it decreases first and then increases as the collection amount increases for straw transportation following the compression. The sensitivity analysis shows that transportation fee rate, purchase price and transportation distance are the sensitive parameters for collection cost, which will lead to over $\pm 17\%$ fluctuation of collection cost when these parameters change in $\pm 50\%$. The $\pm 20\%$ fluctuation of transportation oil consumption per tonne and kilometer and transportation distance will lead to $\pm 17\%$ change for energy consumption.

Key words: biomass; straw; collection; cost; environment; assessment