

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.08.010

# 秸秆能源化工程原料运输半径经济和环境评价

马放, 张晓先, 王立

(城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 150090 哈尔滨)

**摘要:** 根据区域特点和工程类型提出秸秆能源化工程原料运输半径, 对推进工程的应用、原料稳定供应、提高经济收益以及改善生态环境具有重要意义。以秸秆能源化工程原料运输半径为核心, 提出秸秆能源转化密度、工程经济和环境效益评价模型, 评价指标包括单位经济效益、温室气体和 PM2.5 减排潜能。对哈尔滨地区发展秸秆能源化工程的运输半径进行了经济和环境评价, 结果表明: 哈尔滨地区是黑龙江省发展秸秆能源化工程的优势区域, 在发展秸秆沼气、乙醇、热电联产和成型燃料工程时, 经济效益最优原料运输半径分别为 37、35、22 和 4 km; 此时, 4 类能源化工程的环境效益从高到低依次为秸秆沼气、乙醇、热电联产和成型燃料工程。

**关键词:** 秸秆能源化工程; 运输半径; 经济评价; 环境评价; 黑龙江

中图分类号: X321

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)08-0048-06

## Economic and environmental evaluation of straw transportation radius for straw-energy engineering

MA Fang, ZHANG Xiaoxian, WANG Li

(State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment (Harbin Institute of Technology), 150090 Harbin, China)

**Abstract:** The concept of material transportation radius for straw-energy engineering, proposed in line with the regional characteristics and project types, is of great significance in promoting engineering economic efficiency and ecological environmental protection. Taking the concept as the core, straw energy conversion density and the evaluation model for engineering economy and environmental efficiency have been put forward, with the evaluation indicators including economic units and the reduction potentials in the emission of greenhouse gases and PM 2.5. An economic and environmental evaluation of the straw transportation radius in Harbin region has fully demonstrated that Harbin, the most advantageous region in Heilongjiang Province in developing straw-energy engineering, embraces the economically optimized straw transportation radiuses of 37, 35, 22 km, and 4 km respectively for the development of straw-gasification, -ethanol, -based heat and power cogeneration and -briquetting production projects. Meanwhile, in view of environmental benefits, the descending order of the 4 types of energy engineering are straw-gasification, -ethanol, -based heat and power cogeneration and -briquetting production projects.

**Keywords:** straw-energy engineering; transportation radius; economic benefits; environmental benefits; Heilongjiang Province

秸秆能源化<sup>[1]</sup>是促进农产品质量提高、推进农业可持续发展、缓解能源危机和改善生态环境的重要手段。随着资源和环境矛盾的加剧, 秸秆能源化已得到普遍重视, 我国已将秸秆能源化技术的研究列入 863、973 等科技支撑计划, 并在全国范围内开展

了试点工程<sup>[2]</sup>。

秸秆分布广、能量密度低及体积大的特点使得其收储运困难并且进厂费用高, 从而制约了其规模化应用。目前, 国内外学者已从收储运<sup>[3-4]</sup>、预处理、收集路线优化<sup>[5]</sup>和收集范围<sup>[6-14]</sup>等方面对秸秆能源化技术和工程的应用进行了有益的探讨。以上研究以秸秆能源化全流程的各个环节为研究和分析对象, 不适合不同类型能源化途径间的综合比较和分析。另外, 面对种类繁多的能源化技术, 如何有效地对其规模和选址做出决策也是目前的重要问题。为

收稿日期: 2014-10-13.

基金项目: 国家自然科学基金(51179041); 黑龙江省自然科学基金(E201206); 哈尔滨市科技创新人才研究专项基金(2012RFLXS026).

作者简介: 马放(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 王立, wli@hit.edu.cn.

此,提出了秸秆能源化工程运输半径的定量优化模型,包括秸秆能源化发展潜能评价、工程经济和环境效益分析模型.并对黑龙江省哈尔滨地区秸秆能源化工程的选址、原料收集半径规划进行了研究.为推进区域秸秆能源化工程的应用及综合效益的提高提供了理论指导.

## 1 区域秸秆能源化发展潜能评价

不同类型秸秆间成分的差异,导致相同预处理和生产条件下,不同秸秆的可更新能源转化率不同.以沼气发酵为例,相同条件下玉米秸产气率约  $390 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ,而稻秸和麦秸仅为  $345$  和  $320 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$  [15-20].因此,秸秆密度相同的区域其可更新能源的潜能未必一致.在估测区域秸秆能源化潜能时,现有的研究指标如秸秆总量、秸秆资源密度 [13,21] 无法精确反应秸秆类型不同造成的可更新能源产量差异.为完善区域秸秆能源化潜能评价指标,提出秸秆能源转化密度的概念,即在秸秆密度的基础上引入了秸秆能源密度指标,单位面积不同类型秸秆的可能源化量与其能源转化率乘积之和即区域的秸秆能源密度,公式为:

$$ED = \sum_{i=1}^n ED_i = \sum_{i=1}^n \frac{CY_i RPR_i CR_i (1 - WR_i) EDR_i ETR_{ij}}{A} \quad (1)$$

式中:  $ED$  为区域可更新能源密度 ( $\text{J} \cdot \text{km}^{-2}$ );  $ED_i$  为区域内  $i$  类秸秆转化为可更新能源的密度 ( $\text{J} \cdot \text{km}^{-1}$ );  $CY_i$  为第  $i$  种作物年产量 ( $\text{t}$ );  $RPR_i$  为第  $i$  种作物草谷比;  $CR_i$  为第  $i$  种秸秆可收集率 (%);  $WR_i$  为第  $i$  种秸秆的含水率 (%);  $EDR_i$  为第  $i$  种秸秆能源化利用量占可收集量的比例 (%);  $ETR_{ij}$  为  $i$  类秸秆转化为  $j$  类可更新能源的量 ( $\text{J} \cdot \text{t}^{-1}$  &  $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ) (文中秸秆质量均为干质量);  $A$  为区域面积 ( $\text{km}^2$ ).

## 2 原料收集半径经济评价模型

### 2.1 基本假设

研究基于如下假设: 1) 原料运输区域呈圆形, 工厂位于圆心位置 [3,11,22]; 2) 各种作物在区域内均匀分布, 忽略作物生长的季节性特点 [4]; 3) 秸秆呈资源岛式分布, 在岛内进行打捆处理后运输 [4,22]; 4) 研究范围按照资源岛采购秸秆→资源岛运输至工厂→工厂生产→产品销售的顺序进行; 5) 秸秆收集到资源岛并在岛中打包压缩, 资源岛到工厂的理论距离为工程原料收集半径.

### 2.2 模型推导

盈亏平衡分析 (cost-volume-profit analysis, CVP) 是一种重要的会计管理工具, 可揭示系统中影

响盈亏状况的变量及变量之间的依存关系, 其公式为: 净利润 = 销售收入 - (变动成本 + 固定成本) [23], 当变动和固定成本之和最小时, 工程净利润最大.

秸秆能源化工程可变成成本主要包括秸秆采购成本 (包括秸秆资源岛内收集及压缩费用 [11]). 运输成本即将秸秆运输至工厂的费用, 仅考虑资源岛到加工厂运费 [11]; 其与工程原料运输面积内总的秸秆质量 ( $\pi \cdot R^2 \cdot D$ )、秸秆质量运费 ( $P_i / \rho$ ) 和运输距离 ( $R \cdot \beta$ ) 相关, 其中

$$x = \sum_{i=1}^n \frac{CY_i \cdot RPR_i \cdot CR_i (1 - WR_i) EDR_i}{A},$$

表示区域单位面积秸秆产量. 采购成本即收购秸秆需付给农民的费用, 由收集区域内秸秆总量 ( $\pi \cdot R^2 \cdot D$ ) 和单位秸秆的收购价格 ( $P_s$ ) 决定. 固定成本即工程固定资产投资, 由设备、厂房、劳动力等投资构成. 销售收入主要由产品产量和其市场售价  $P_j$  的乘积决定. 依据此理论构建了秸秆能源化工程的净利润模型, 即

$$\text{运输成本} = \pi \cdot R^2 \cdot \beta \frac{P_i}{\rho} D, \quad (2)$$

$$\text{采购成本} = \pi \cdot R^2 \cdot P_s \cdot D, \quad (3)$$

$$\text{工程固定成本} = y/T = \varepsilon \cdot x^a / T. \quad (4)$$

式中:  $P_i$  为秸秆体积运输费率 ( $\text{元} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$ ), 取  $0.45 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $R$  为秸秆从资源岛至工厂的理论半径 ( $\text{km}$ );  $\rho$  为秸秆密度, 在  $0.7 \sim 1.3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\beta$  为道路曲折因子, 一般取  $1.5$ ;  $P_s$  为秸秆收购价格 ( $\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$ );  $x$  为工程生产规模, 即年产量;  $T$  为工程设计使用寿命 ( $\text{a}$ );  $y$  为工程总固定资产投资 ( $\text{元}$ ),  $y = \varepsilon x^a$  [13],  $a$  为工程的规模系数 ( $0 < a \leq 1$ ),  $\varepsilon$  为工程的规模因子; 秸秆能源化工程销售收入 ( $\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$ ), 表示产出可更新能源的经济收益, 由可更新能源产品的产出率和市场价格决定;  $P$  为单位可更新能源市场售价.

根据秸秆能源化工程可行性研究数据 [23-26], 拟合得到工程年产量和固定投资的关系公式, 即

$$y_{\text{乙醇}} = 7190.60 x_{\text{乙醇}}^{0.4915} R_{\text{乙醇}}^2 = 0.7179, \quad (5)$$

$$y_{\text{燃料}} = 105.77 x_{\text{燃料}}^{0.7792} R_{\text{燃料}}^2 = 0.7792, \quad (6)$$

$$y_{\text{沼气}} = 25.43 x_{\text{沼气}}^{0.7564} R_{\text{沼气}}^2 = 0.7564, \quad (7)$$

$$y_{\text{热电}} = 4.73 x_{\text{热电}}^{0.8802} R_{\text{热电}}^2 = 0.7163. \quad (8)$$

拟合公式的单位分别为:  $x_{\text{乙醇}}$  (万 t)、 $x_{\text{燃料}}$  (万 t)、 $x_{\text{沼气}}$  (万  $\text{m}^3$ ) 和  $x_{\text{热电}}$  (万  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ), 工程年利润 ( $y$ ) 单位均为万元. 秸秆能源化工程生产规模和工程固定资产投资呈指数关系. 规模因子表示随工程生产规模的增加对工程固定资产投资的影响 [13]. 4 类工程的规模因子从低到高依次为乙醇、沼气、成型燃料、热电联产工程, 均在  $0.4 \sim 0.9$ . 可知, 随运输半径

(即生产规模)的增加,工程的单位固定资产投资呈不同程度的降低。

$$\text{工程销售收入} = \pi \cdot R^2 \cdot ED \cdot P, \quad (9)$$

$$x = \pi \cdot R^2 \cdot D. \quad (10)$$

秸秆能源化工程年净利润 = 工程销售收入 - (运输成本 + 采购成本 + 工程固定资产) =

$$\pi R^2 ED \cdot P - \pi R^2 \cdot D \cdot R \cdot \beta \frac{P_t}{\rho} - \pi R^2 \cdot D \cdot P_s - \varepsilon \frac{(\pi R^2 \cdot D \cdot ETR_{ij})^a}{T}. \quad (11)$$

秸秆能源化工程单位净利润 =  $\frac{\text{工程年净利润}}{\text{工程生产规模}}$

$$P - R \cdot \beta \frac{P_t}{\rho \cdot ETR_{ij}} - \frac{P_s}{ETR_{ij}} - \varepsilon \frac{(\pi R^2 \cdot D \cdot ETR_{ij})^{a-1}}{T}. \quad (12)$$

在发展秸秆能源化工程时,随生产规模的增加,工程年产量及利润会相应增加,因此,工程的年利润无法反映不同规模工程经济效益的优劣.以工程单位净利润对原料运输半径求导,当导数等于零时,工程的单位收益最大,此时的运输半径对应的工程单位净利润最大,称此半径为最优半径,即

$$R_j = \sqrt[2a-3]{\frac{T \cdot \beta \cdot P_t}{2(1-a) \rho \cdot \varepsilon \cdot ETR_{ij} \left( \frac{\pi D \cdot ETR_{ij}}{10\,000} \right)^{a-1}}}. \quad (13)$$

### 3 原料收集半径的环境评价模型

#### 3.1 基本假设

针对我国面临的主要环境问题提出了包括温室气体和 PM2.5 两相指标的环境减排模型,以期对秸秆能源化途径的环境效益进行比较,从环保角度对秸秆能源化工程的决策提供理论参考.模型基于如下假设:1)对比不同秸秆能源化途径间的环境效益,忽略秸秆收集、压缩及储藏等相同或相似环节的污染排放差异;2)忽略工程生产规模对污染物排放因子的影响;3)可更新能源使用过程中污染物排放忽略不计。

#### 3.2 模型推导

秸秆能源化工程产业链较长,一般包括原料收储运、原料预处理和加工、产品配送及使用环节.对于不同秸秆能源化工程,其原料收储运环节基本一致,污染物主要来自原料生产加工以及产品使用环节.发展秸秆能源化工程,能避免秸秆焚烧带来的环境污染,也能通过减少对化石能源的需求量而降低其生产和使用中污染物的排放.综上,秸秆能源化工程环境污染主要来自秸秆收集、运输、生产环节的

排放以及减少秸秆焚烧、替代化石能源的污染物减排.单位环境减排量即工程的污染物排放量与其年可更新能源产量之比.公式如下:

$$W_{\text{收集}} = \pi \cdot R^2 ED_i \frac{f_{ck}}{x_j} = \frac{f_{ck}}{ETR_j}, \quad (14)$$

$$W_{\text{运输}} = R_j \cdot \pi \cdot R^2 \frac{ED_i}{w_l} \cdot \frac{f_{lk}}{x_j} = \frac{R_j}{w_l} \cdot \frac{f_{lk}}{ETR_j}, \quad (15)$$

$$W_{\text{生产}} = \pi \cdot R^2 \cdot ED_i \cdot \overline{ETR_j} \frac{f_{lk}}{x_j} = f_{jk}, \quad (16)$$

$$W_{\text{秸秆焚烧}} = \pi \cdot R^2 ED_i \frac{f_{sk}}{x_j} = \frac{f_{sk}}{ETR_j}, \quad (17)$$

$$W_{\text{替代化石能源}} = \pi \cdot R^2 ED_i \overline{ETR_j} \frac{e_j}{e_u} \frac{f_{uk}}{x_j} = \frac{e_j}{e_u} f_{uk}, \quad (18)$$

$$W = \frac{f_{sk}}{ETR} + f_{uk} \frac{e_j}{e_u} - \frac{f_{ck}}{ETR_j} - R_j \frac{f_{lk}}{w_l ETR_j} - f_{jk}. \quad (19)$$

式中:  $W$  为单位可更新能源的污染物排放量;  $f_{ck}$  为秸秆收集过程  $k$  种污染物排放因子 ( $\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$ );  $f_{lk}$  为  $l$  种机动车排放  $k$  种污染物排放因子 ( $\text{g} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{辆}^{-1}$ );  $w_l$  为  $l$  种机动车运输秸秆质量 ( $\text{t} \cdot \text{辆}^{-1}$ );  $\overline{ETR_j}$  为秸秆生产  $j$  类可更新能源的平均转化率 ( $\text{J} \cdot \text{t}^{-1}$  或  $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ );  $f_{jk}$  为单位秸秆生产  $j$  类可更新能源时  $k$  种污染物排放因子 ( $\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$  或  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $f_{sk}$  为秸秆露天焚烧时  $k$  种污染物排放因子 ( $\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$ );  $e_j$  为  $j$  类可更新能源的热值 ( $\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$  或  $\text{GJ} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $e_u$  为  $u$  类化石能源的热值 ( $\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$ );  $f_{uk}$  为  $u$  类化石能源生产及使用过程中  $k$  种污染物排放因子 ( $\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$ ).

### 4 哈尔滨地区秸秆能源化工程运输半径评价及建议

数据来源:作物年产量和耕作面积数据参考《黑龙江统计年鉴》<sup>[27]</sup>;草谷比<sup>[21]</sup>、可收集率<sup>[21]</sup>、能源化比例<sup>[21]</sup>、秸秆的沼气转化率<sup>[17-20]</sup>、能源化工程可行性研究数据<sup>[24-26]</sup>均参考已发表文献;温室气体和 PM2.5 排放因子参考美国<sup>[28]</sup>、欧盟<sup>[29]</sup>环境数据库数据以及我国的污染物排放系数手册<sup>[30]</sup>.其他数据以研究常用数据或经验值为依据。

#### 4.1 哈尔滨地区秸秆能源化潜能评价

对黑龙江省 13 个行政区域的秸秆沼气、乙醇、成型燃料和热电联产工程的单位发展潜能进行了分析(仅考虑水稻、小麦、玉米和大豆 4 类主要作物).依据沼气、乙醇、成型燃料和电能的热值,将 4 类能源物质统一单位后得到图 1.

黑龙江省不同行政区域间, 各类秸秆能源化工程的单位潜能发展趋势相同, 即从高到低依次为沼气、热电联产、成型燃料和乙醇工程。这主要受能源化工程工艺发展水平和可更新能源的热值影响。因此, 从能源利用最大化角度, 应优先发展秸秆沼气和热电联产工程。按照单位秸秆能源化发展潜能, 将黑龙江省分为: 1) 沼气高潜能区域, 包括绥化和哈尔滨地区, 其单位能源转化密度均在  $1.00E+12 \text{ J}\cdot\text{km}^{-2}$

以上; 2) 乙醇高潜能区域, 包括绥化、哈尔滨、齐齐哈尔和大庆地区, 其单位能源转化密度均在  $5.00E+05 \text{ J}\cdot\text{km}^{-2}$  以上; 3) 成型燃料高潜能区域, 包括绥化、哈尔滨、齐齐哈尔、佳木斯和大庆地区, 其单位能源转化密度均在  $1.00E+05 \text{ J}\cdot\text{km}^{-2}$  以上; 4) 热电高潜能区域, 包括绥化、哈尔滨、齐齐哈尔、佳木斯和大庆地区, 其单位能源转化密度均在  $2.00E+11 \text{ J}\cdot\text{km}^{-2}$  以上 (图 1)。

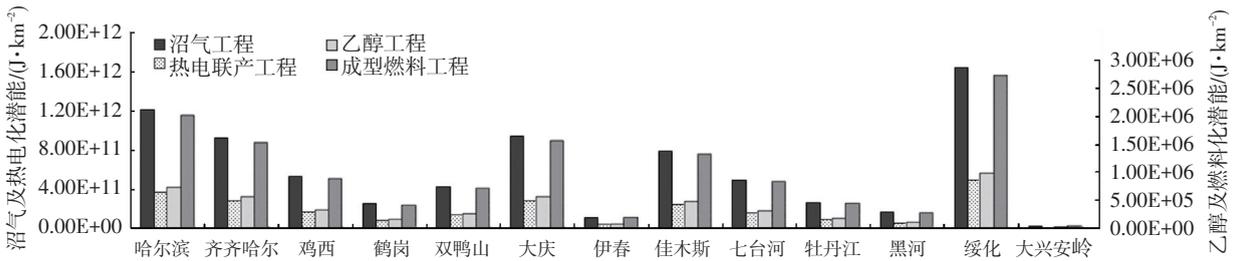


图 1 黑龙江省各行政区域秸秆能源化潜能

### 4.2 原料运输半径经济评价

利用式 (13), 并以文献中和生产实际的数据为参考 (见表 1), 对哈尔滨地区发展秸秆热电联产、乙醇、沼气和成型燃料工程的半径 ( $R_j$ ) 进行经济评价。4 类能源化工程的最优半径从大到小依次为沼气

(37 km)、乙醇 (35 km)、热电联产 (22 km) 和成型燃料 (4 km) (见图 2)。某区域在进行秸秆能源化工程决策时, 为实现单位产品的利润最大, 应综合区域的面积和运输路线等情况选择适合的工程类型。

表 1 哈尔滨地区秸秆能源化最优半径参数

	$\alpha^{[23-26]}$	$\rho^{[2]}$	$\varepsilon^{[23-26]}$	$ETR^{[23-26]}$	$\pi$	$ED^{[27]}$	$T^{[13]}$	$P_i^{[3]}$	$\beta^{[13]}$
沼气工程	0.756 4	0.825	25.43	450	3.14	142	15	0.45	1.5
乙醇工程	0.491 5	0.825	7 190.6	0.167	3.14	142	15	0.45	1.5
成型燃料工程	0.779 2	0.825	105.77	0.84	3.14	142	15	0.45	1.5
热电联产工程	0.880 2	0.825	4.73	700	3.14	142	15	0.45	1.5

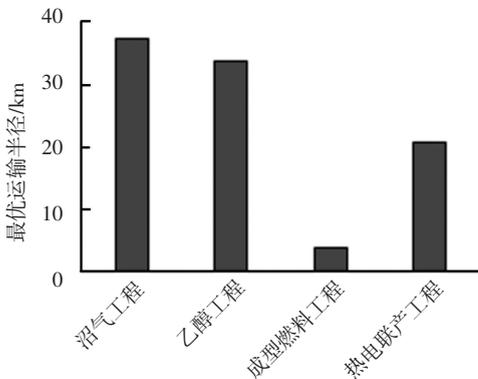


图 2 哈尔滨地区秸秆能源化工程最优半径

且道路交通、秸秆类型、农作物产量、技术水平等因素的变化, 必然导致秸秆能源化工程投资和生产效率的改变。自然和人为因素可对秸秆能源化工程的最优半径产生一定影响。由式 (5) ~ (8) 可知  $T$ 、 $\beta$ 、 $P_i$  和最优半径成反比,  $\rho$ 、 $\varepsilon$  与最优半径成正比;  $ETR$ 、 $D$ 、 $\alpha$  对最优半径的影响如图 3。  $ETR$  与最优半径成正比 (图 3(b)),  $D$  与最优半径成反比 (图 3(c)),

且在 4 类秸秆能源化工程中变化趋势均相同; 除成型燃料工程外最优半径随  $\alpha$  (在  $0 \sim 1^{[31]}$ ) 的增大呈显著增加后缓慢降低的变化趋势 (图 3(a)), 成型燃料工程的最优半径随工程规模系数的增加而逐渐降低。 $\alpha$  的变化对秸秆沼气工程最优半径的影响最大, 其次为乙醇、热电和成型燃料工程;  $ETR$  的变化对秸秆沼气工程最优半径的影响最大, 其次为热电、乙醇和成型燃料工程;  $D$  的变化对乙醇工程最优半径的影响最大, 其次为沼气、热电和成型燃料工程 (图 3)。在应用中需根据指标的变化适当调整工程的最优半径。

随着化石能源的减少和秸秆能源化工程应用的推广, 秸秆能源化将面临秸秆运费、工程单位投资、秸秆可能源化量、工程使用年限等因素的改变, 这些变化必然导致工程最优半径与最初规划的范围有出入。但是,  $ETR$ 、 $ED$  对最优半径不会造成实质性影响, 工程技术和生产工艺的提高是影响工程收集半径的主要因素。

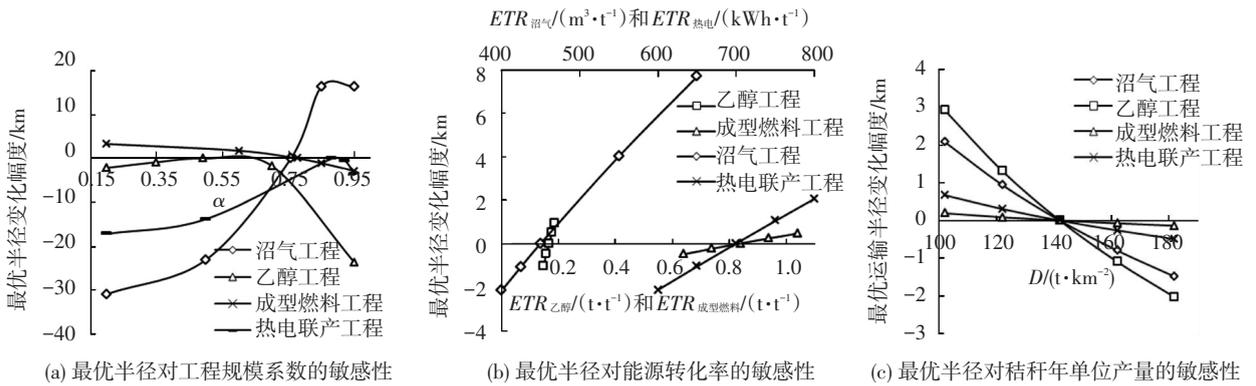


图 3 主要影响因素对秸秆能源化工程最优半径的影响

### 4.3 原料运输半径环境评价

哈尔滨地区秸秆能源化工程温室气体和 PM2.5 减排分析,重点探讨了秸秆能源化全流程中 3 类主要温室气体 (CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 NO<sub>2</sub>) 排放情况.CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 NO<sub>2</sub> 的全球增温潜能 (global warming potential, GWP) 分别为 1、21 和 310.由式 (19) 可知:相同秸秆能源化工程,其单位环境效益和运输半径成反比,随运输半径增加,单位产品运输过程中污染物的排放量增加.

表 2 为工程单位经济效益最优时 (即最优半径) 温室气体和 PM2.5 减排情况.乙醇和沼气发酵工程的温室气体和 PM2.5 减排效果明显优于热电联产和成型燃料工程,这是由于乙醇和沼气发酵工程的最优半径较其他两类工程大,其秸秆的年处理量也较高,而工程温室气体和 PM2.5 减排量的主要决定因素为可更新能源产量和秸秆利用量.

假设哈尔滨地区预期在 15 km 的收集半径内发展秸秆能源化工程,得到表 3 的温室气体和 PM2.5 排放数据.运输半径 (即原料供应量) 相同时,成型燃料工程的温室气体减排量最低,PM2.5 减排量最高;温室气体减排最高为乙醇工程,其次为沼气和热电联产工程 (表 3).由于 4 类能源化工程的 PM2.5 减排总量相差不大,建议实际应用中以温室气体减排为主要参考因素,即当区域面积固定时,以发展秸秆乙醇、沼气和热电联产工程为主.秸秆能源化过程中,原料收集环节的温室气体排放量最大,温室气体减排量主要来自节约的化石能源.综上,提高秸秆收集效率和能源转化率是提高工程温室气体减排潜能的重要途径.PM2.5 的减排量主要由减少秸秆焚烧提供,其他生产环节与此相比数量非常小,可忽略不计.秸秆焚烧是 PM2.5 的主要贡献源,只要对秸秆进行适当的能源化利用均会显著提高 PM2.5 的减排量.

表 2 哈尔滨地区秸秆能源化工程最优半径下温室气体和 PM2.5 减排分析

类别	能源化工程	R <sub>j</sub> /km	W <sub>收集</sub>	W <sub>运输</sub>	W <sub>生产</sub>	W <sub>焚烧</sub>	W <sub>替代化石能源</sub>	W
温室气体排放量/t	热电联产工程	22	5 876	27	695	1 778	7 539	2 717
	发酵乙醇工程	35	14 873	107	1 418	4 501	21 625	9 727
	沼气发酵工程	37	16 622	126	1 279	5 030	21 270	8 271
	成型燃料工程	4	194	0.16	28	58	220	56
PM2.5 排放量/kg	热电联产工程	22	255	216.51	243	545 143	1 022	545 451
	发酵乙醇工程	35	645	856.23	450	1 379 754	1 242	1 379 045
	沼气发酵工程	37	721	1 006.09	459	1 541 946	2 717	1 542 476
	成型燃料工程	4	8.4	1.3	10	18 021	48	18 050

表 3 哈尔滨地区秸秆能源化工程运输半径相同时温室气体和 PM2.5 减排分析

类别	能源化工程	R <sub>j</sub> /km	W <sub>收集</sub>	W <sub>运输</sub>	W <sub>生产</sub>	W <sub>焚烧</sub>	W <sub>替代化石能源</sub>	W
温室气体排放量/t	热电联产工程	15	2 732	21	324	826	3 504	1 255
	发酵乙醇工程		2 732	21	261	826	3 972	1 785
	沼气发酵工程		2 732	21	210	826	3 495	1 359
	成型燃料工程		2 732	21	404	826	3 100	770
PM2.5 排放量/kg			119	101	113	253 424	475	253 567
	发酵乙醇工程	15	119	101	82	253 424	228	253 350
	沼气发酵工程		119	101	75	253 424	446	253 576
	成型燃料工程		119	101	135	253 424	679	253 748

## 5 结 论

1)提出了秸秆能源转化密度的概念,构建了秸秆能源化工程原料运输半径的经济和环境评价模型,在保障工程原料高效供应的基础上,综合考察了不同原料运输半径间的经济和环境效益,为区域秸秆能源化工程的规划和决策提供了新的理论视角。

2)由黑龙江省哈尔滨地区的秸秆能源化工程运输半径经济和环境评价结果可知,哈尔滨地区秸秆沼气化潜能较高,位于黑龙江省第2位仅次于绥化地区,约为 $52\ 500\ \text{m}^3\cdot\text{km}^{-2}$ ;哈尔滨地区在建设沼气、乙醇、热电联产和成型燃料工程时,运输半径分别为37、35、22和4 km左右,此时工程的单位利润最大;秸秆能源化工程的温室气体和PM2.5减排的主要贡献均来自秸秆禁焚,秸秆沼气和乙醇发酵工程的温室气体减排效果最佳,成型燃料和热电联产工程PM2.5减排最佳。

3)工程生产技术提高是影响运输半径的主要因素,在实际应用中应根据技术和自然等环境的变化,对工程实施方案及时调整。

## 参考文献

- [1]王仲颖,任东明,高虎,等.原料运输半径与装机规模[J].电力建设,2011,32(3):72-75.
- [2]于晓东,樊峰鸣.秸秆发电燃料收加储运过程模拟分析[J].农业工程学报,2009,25(10):215-219.
- [3]刘华财,阴秀丽,吴创之.秸秆供应成本分析研究[J].农业机械学报,2011,42(1):106-112.
- [4]曹溢,沈辉.秸秆发电过程中原料收集的成本分析[J].电力与能源,2012,33(5):463-466.
- [5]张展,王利生,张培栋,等.区域秸秆资源最优化收集路径与运输成本分析[J].可再生能源,2009,27(3):102-106.
- [6]刘钢,黄明皎.秸秆发电厂燃料运输半径与装机规模[J].电力建设,2011,32(3):72-75.
- [7]张宝林.秸秆发电运输半径分析[D].新乡:河南科技学院,2009.
- [8]陈双,李季.生物质发电厂燃料收储站的选址与优化[J].江西农业学报,2007,19(7):124-126.
- [9]陈聪,李薇.生物质发电厂优化选址建模及决策研究[J].农业工程学报,2011,27(1):255-260.
- [10]赵琳.秸秆电厂规划选址方法研究[D].北京:华北电力大学,2011.
- [11]邢爱华,刘罡,王垚,等.生物质资源运输过程成本、能耗及环境影响分析[J].过程工程报,2008,8(2):305-313.
- [12]杨树华,雷廷宙,何晓峰,等.生物质致密冷成型原料最优运输半径的研究[J].农业工程学报,2006,22(1):132-134.

- [13]DIEP N Q, FUJIMOTO S, MINOWA T, et al. Estimation of the potential of rice straw for ethanol production and the optimum facility size for different regions in Vietnam[J]. Applied Energy, 2012,93:205-211.
- [14]MATT K, GRIFFIN W M, MATTHEWS S. Impacts of facility size and location decisions on ethanol production cost[J]. Energy Policy, 2011,39:47-56.
- [15]田宜水,赵立欣,孟海波,等.中国农村生物质能利用技术和经济评价[J].农业工程学报,2011,27(S1):1-5.
- [16]王德元,陈汉平,杨海平,等.生物质能利用技术综合评价研究[J].能源工程,2009(1):29-33.
- [17]杨立,张婷,王永泽,等.不同秸秆厌氧发酵产沼气效果的比较[J].可再生能源,2008,26(5):46-49.
- [18]覃文能,魏世清,李金怀.不同秸秆原料发酵产沼气试验研究[J].广西林业科学,2009,38(3):150-154.
- [19]刘德江,邱桃玉,饶晓娟,等.小麦、玉米秸秆不同预处理产沼气试验研究[J].中国沼气,2012,30(3):34-37.
- [20]宋明芝,缪则学,刘淑环,等.吉林省农村常用沼气发酵原料产气潜力及特性研究[J].吉林农业科学,1986,3:78-83.
- [21]蔡亚庆,仇焕广,徐志刚.中国各区域秸秆资源可能资源化利用的潜力分析[J].自然资源学报,2011,26(10):1637-1646.
- [22]赵希强,马春元,王涛,等.生物质秸秆预处理工艺及经济性分析[J].电站系统工程,2008,24(2):30-33.
- [23]熊飞龙,朱洪光,石惠娴,等.关于农村沼气集中供气工程沼气价格分析[J].中国沼气,2011,29(4):16-19.
- [24]齐天宇,张希良,欧训民,等.我国生物质直燃发电区域成本及发展潜力分析[J].可再生能源,2011,29(2):115-119.
- [25]李平,蔡鸣,陈正明,等.生物质固体成型燃料技术研究进展及应用效益分析[J].安徽农业科学,2012,40(14):8284-8286,8306.
- [26]DIEP N Q, FUJIMOTO S, YANAGIDA T, et al. Comparison of the potential for ethanol production from rice straw in Vietnam and Japan via techno-economic evaluation[J]. International Energy Journal, 2012,13:113-122.
- [27]黑龙江省统计局.黑龙江统计年鉴2012[R].哈尔滨:中国统计出版社,2012.
- [28]US Environmental Protection Agency. The US Environmental Protection Industry:the technical document(EPA 230-R-95-012)[EB/OL]. 1995. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>.
- [29]The Co-ordinated European Program on Particulate Matter Emission Inventories, Projections and Guidance(CEPMEIP). CEPMEIP Database-Emission Factors[EB/OL]. <http://www.air.sk/tno/cepmeip/>.
- [30]第一次全国污染源普查资料编纂委员会.第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册[M].北京:中国环境科学出版社,2011.
- [31]白洁瑞,贺春强,王虎琴,等.秸秆沼气集中供气工程温室气体减排效益分析[J].农业工程技术产业,2011(6):21-22.