

农户秸秆处置及供生物质电厂成本分析

翟明岭, 张旭, 程飞, 苏醒

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 200092)

摘要: 为了分析农户秸秆就地焚烧造成面源污染而生物质电厂秸秆收购难的问题, 通过对七省 124 个农户进行调研, 结合家庭情况得到了农户秸秆处置的数据, 结果显示 59.3% 的农户焚烧过秸秆, 82.3% 的农户未出售过秸秆. 基于调研对农户秸秆供应进行场景设置, 并建立供应成本的数学模型. 以江苏省某生物质电厂秸秆供应为例, 对不同场景下水稻秸秆供应成本进行分析, 得到成本最高 250 元·t⁻¹、最低 186 元·t⁻¹. 该模型可为引导农户合理利用秸秆、生物质电厂制定秸秆收购价格提供参考依据.

关键词: 秸秆; 调研; 供应; 生物质电厂; 成本模型

中图分类号: TK6; X712

文献标志码: A

Analyses of Farmers' Straw-Disposal Condition and Biomass Supply Cost for Power

ZHAI Mingling, ZHANG Xu, CHENG Fei, SU Xing

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China)

Abstract: In order to analyze the problem of straw shortage from the perspective of farmers, an investigation was conducted. Among the respondents, 59.3% burned the straw, and 82.3% did not sell the straw to any enterprise. Four scenarios with three stubble heights are established. An mathematical model about straw harvesting, collection, transportation, and storage is established. Parameters are selected basing on one biomass power plant in Jiangsu Province. The results show that the cost of straw selling is 186-250 CNY·t⁻¹. The machinery collection reduces the total cost finitely. The relation between the labor price and the cost is examined. The labor price affects the manpower collection scenarios more obviously than the machinery collection scenarios. The cost model is made without considering the information problem.

Key words: straw; investigation; supply; biomass power

plant; cost model

中国秸秆资源可利用量达 6~8 亿 t^[1-2], 却常被农户就地焚烧, 导致严重的空气污染^[3]. 为改善该状况, 我国大力发展生物质发电, 但生物质电厂普遍反映秸秆收购困难^[4], 秸秆供应不足是一大原因. 如从农户角度出发, 分析其对秸秆处置的认知和秸秆供应成本构成, 可为解决秸秆收购困难的问题提供价格依据.

目前秸秆供应成本的相关研究^[5-12]以电厂秸秆需求量为出发点, 建模分析秸秆到厂价格、成本优化及最优收集范围等问题, 如邢爱华等^[5]建立秸秆岛式分布的收储运成本能耗模型, 刘华财等^[6]比较不同收储运模式成本, 徐亚云等^[7]则进行成本、能耗、人工、设备等投入的横向比较. 他们假设电厂可掌控秸秆供应链, 但该供应链环节众多, 每环节有独立的成本和收益, 若一环节出问题则不能保证秸秆供应. 农户作为源头, 其供应与否决定秸秆收购难易. 未反映农户供应成本的模型是静态模型, 不能反映供应成本随农户变化的动态性. 本文通过调研分析农户基本情况, 构建不同供应场景下的成本模型, 以某生物质电厂为例设置参数进行成本计算, 分析成本结构.

1 调研设计与调研结果

1.1 调研设计

调研采取问卷调查结合入户访谈, 问卷为两部分: ① 农户家庭、资源信息等情况; ② 农户秸秆处置现状及秸秆供应认识问题. 入户访谈针对临近某生物质电厂农户. 发放问卷 150 份, 有效问卷 124 份,

收稿日期: 2015-05-20

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2011BAJ08B09, 2011BAJ08B10)

第一作者: 翟明岭(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为生物质发电秸秆原料供应. E-mail: zmlqu2005@163.com

通讯作者: 张旭(1955—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为村镇低品位能源系统.

E-mail: zhangxu-hvac@tongji.edu.cn

有效率 82.7%,入户访谈 38 户。

1.2 调研结果

调研对象分布在两个建筑气候分区、7 个省份,具体见图 1。

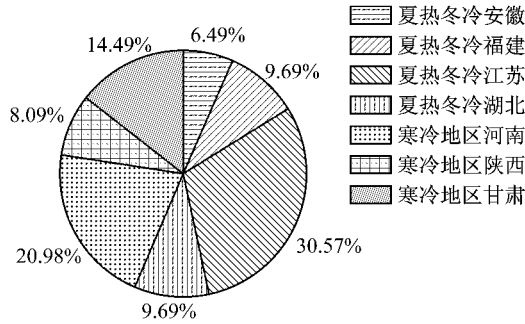


图 1 调研对象地区分布

Fig.1 Regional distribution of research objects

调研信息包括农户家庭信息、秸秆处置情况。

家庭人口情况见表 1,其决定农户秸秆供应的可用人工。常住人口以老年人和学龄人为主,基本反映我国城镇化进程的现象。95.2%的农户从事农业劳动。收入情况见表 2,农业收入与总收入的对比反映工作重心,打工收入水平决定农业工作的机会成本。土地及秸秆资源情况见表 3,农户土地分散,块均耕地面积、块均秸秆量反映土地的分散程度,其越高,供应成本越高。农户外出打工劳力不足导致部分地区土地闲置的情况。

表 1 家庭人口情况

Tab.1 Situation of the domestic population

	江苏	福建	湖北	安徽	陕西	河南	甘肃
家庭人口(平均值)/人	3.0	6.3	5.8	3.5	5.0	5.1	4.5
常住人口(平均值)/人	2.7	4.2	2.0	2.0	3.8	4.0	2.5
工作人口(平均值)/人	2.3	4.2	3.8	2.5	2.6	2.4	2.0

表 2 收入情况

Tab.2 Income situation

	江苏	福建	湖北	安徽	陕西	河南	甘肃
户均总收入/元	38 684	35 833	46 667	25 000	14 000	44 444	7 500
人均年收入/元	13 487	5 800	7 984	7 396	2 900	8 357	1 625
户均农业收入/元	10 057	6 449	7 000	7 500	6 160	16 000	2 250
农忙时打工收入/(元·d ⁻¹)	265	233	383	160	150	200	150

表 3 土地及秸秆资源情况

Tab.3 Situation of land and straw

	江苏	福建	湖北	安徽	陕西	河南	甘肃
户均耕地面积/m ²	2 040	1 886	2 220	4 000	4 000	1 666	3 333
块均面积/m ²	766	326	426	1 373	806	333	666
人均面积/m ²	713	306	386	1 133	813	360	716
户均秸秆总量/t	2.784	2.452	2.176	3.595	4.864	3.761	3.460
块均秸秆量/t	0.997	0.414	0.482	1.253	0.904	0.765	0.651
人均秸秆量/t	0.959	0.402	0.381	1.031	0.977	0.817	0.735

非农工作情况见图 2,大部分农户收入来源主要为打工,其中 45.3%打工人员放弃农业工作。对秸秆焚烧的认识见图 3,70.9%认为收集秸秆费时费力,22.9%认为收集成本高,16.7%认为秸秆无价值。对秸秆出售的认识见图 4,农户中 17.7%出售过秸秆,其中 27.3%为自送秸秆至收储站,96.8%在遇到收购时会出售秸秆,100%希望收购方到田收购。

调研得到农户做决策时综合比较秸秆供应成本、收益与从事其他工作的机会成本,人工成本是影响决策的重要因素。同时秸秆收集供应模式也是一个重要因素,第 2 节依据调研设立不同供应模式场景进行定量分析。

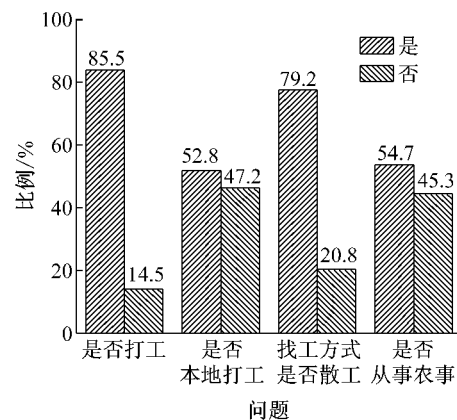


图 2 农户非农工作调研结果

Fig.2 Investigation results of non-farm work

基本假设:①秸秆产量密度无差别;②不考虑天气、地形等因素;③农户使用自有拖拉机运送秸秆,仅一辆;④机械收集租赁田间秸秆打捆机;⑤4种场

2 农户秸秆供应成本模型

2.1 假设与场景设置

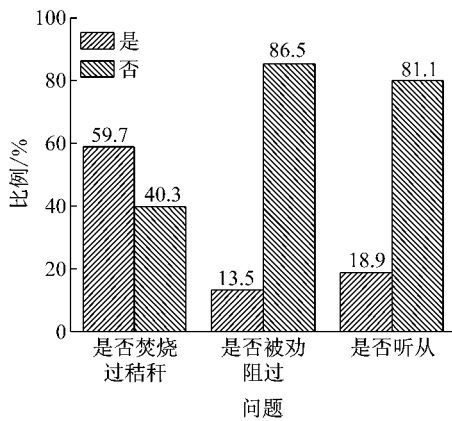


图 3 农户对秸秆焚烧的认识情况

Fig.3 Farmers' awareness of straw burning

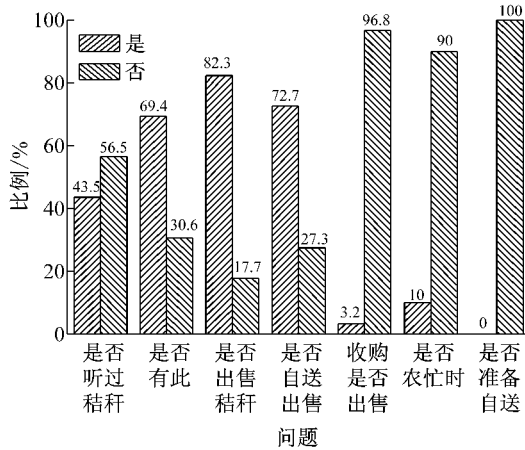


图 4 农户对秸秆出售的认识

Fig.4 Farmers' awareness of straw selling

景:人工收集并运输(A)、机械收集并运输(B)、人工收集等待收购(C)、机械收集等待收购(D),流程见图 5,每种场景计算 3 种不同留茬高度的成本,下标 1、2、3 代表 30、20、10 cm.

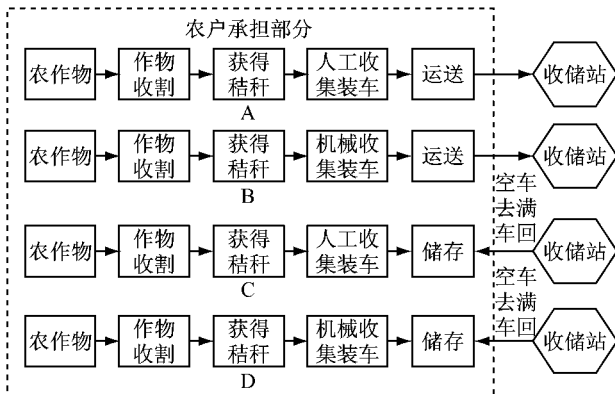


图 5 农户秸秆供应场景

Fig.5 Scenarios of farmer's straw supply

2.2 成本计算模型

农户秸秆供应成本为

$$c_{fs} = \Delta c_h + c_g + c_s + c_t \quad (1)$$

式中: Δc_h 为收割成本增量,元; c_g 为收集成本(C、D含堆垛成本),元; c_s 为储存成本(C、D),元; c_t 为运输成本(A、B),元.

农户秸秆出售收益为

$$R_f = Q_f p_s \quad (2)$$

式中: Q_f 为秸秆量,t; p_s 为收购价格,元·t⁻¹.

农户的决策机制是当 $R_f > c_{fs}$ 时农户选择供应秸秆.

2.2.1 秸秆收割成本

农户秸秆可供量为

$$Q_f = \alpha k_1 k_2 A \quad (3)$$

式中: α 为作物产量密度,t·m⁻²; k_1 为草谷比; k_2 为可收集系数; A 为土地面积,m².

其与作物类型、收割留茬高度等相关,而留茬高度不可忽略,低会增加秸秆产量,高则节省收割油耗和时间,参数见表 4.

表 4 不同留茬高度下相关参数^[13-14]

Tab.4 Parameters of different stubble height

	留茬高度/cm		
	10	20	30
柴油耗/(L·666.7 ⁻¹ ·m ⁻²)	3.6	3.1	2.5
耗时/(min·666.7 ⁻¹ ·m ⁻²)	24	20	15
水稻秸秆可收集系数	0.80	0.65	0.59

以留茬 30 cm 为基准,收割成本增量 ΔC_h 含油耗成本增量 ΔC_{hd} 和人工成本增量 ΔC_{hp} 为

$$\Delta c_h = \Delta c_{hd} + \Delta c_{hp} = \Delta q_d p_d + \Delta t_h p_{per} \quad (4)$$

式中: Δq_d 为柴油耗增量,L; p_d 为柴油价格,元·L⁻¹; Δt_h 为人工增量,h; p_{per} 为人工工资,元·h⁻¹.

2.2.2 秸秆收集成本

农户选择人工收集或机械收集.收集效率为人工 Q_{gp} 、机械 Q_{gm} .调研得打捆机租费按秸秆包数计算,每包 50 元,尺寸为 1.75 m×1.2 m×0.9 m,密度约为 170 kg·m⁻³.C、D 需堆垛储存,产生附加成本,设为收集成本的 10%.

人工收集成本为

$$c_g = p_{per} \cdot Q_f / Q_{gp} \quad (5)$$

机械收集成本为

$$c_g = 50Q_f / 321 + p_{per} \cdot Q_f / Q_{gm} \quad (6)$$

2.2.3 秸秆运输成本

完成一次运输,空载和满载的运程比 1:1,运至收储站,因质检、称重等耗费一个必须人工时间,设为 0.5 h.运输单位载重公里油耗^[15]为

$$q_{ud} = (g_e / v_1 + g_{eo} / v_o) N_{en} / 2m \quad (7)$$

式中: g_e 为满载耗油率,kg·(kWh)⁻¹; g_{eo} 为空载耗

油率, $\text{kg} \cdot (\text{kWh})^{-1}$; v_1 为满载车速, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; v_0 为
空载车速, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; N_{en}/m 为功载比, $\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$.

运输成本 C_t 为

$$c_t = Q_{\text{t}} q_{\text{uid}} \beta l_t + N_t (t_t + 0.5) p_{\text{per}} + c_{\text{dep}} + c_m \quad (8)$$

式中: t_t 为运输时间, h; c_{dep} 为折旧成本, 元; c_m 为维
护成本, 元; β 为道路曲折因子, 取 1.4; l_t 为运输距
离, km.

2.2.4 储存成本

C、D 需储存秸秆. 秸秆存于田间地头, 为确保秸
秆含水量, 以防帆布保存. 帆布使用年限 5 年, 残
值 0. 存储成本 c_s 为

$$c_s = p_c A_c / 5 \quad (9)$$

式中: p_c 为帆布价格, 元 $\cdot \text{m}^{-2}$; A_c 为帆布面积, m^2 .

3 实例分析参数设置

本文选取江苏省某生物质电厂周边农户为实例
设置参数, 其位于江苏省东南部, 是小麦、水稻、油菜
等农作物主产区, 以水稻小麦轮作为耕作模式. 本文
以水稻秸秆为分析对象, 秸秆参数见表 5, 车辆参数
见表 6, 其他参数见表 7.

表 5 水稻秸秆参数

Tab.5 Parameters of rice straw

	农户耕地面积 A/m^2	作物产量 $a/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	草谷比 k_1	秸秆收集系数 k_2	运送距离 l_t/km
取值	2 000	0.842 9	0.98	见表 4	3

表 6 农用拖拉机挂车参数^[6-7, 13]

Tab.6 Parameters of tractor trailer

满载车速 $v_1/$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	空载车速 $v_0/$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	满载耗油率 $g_e/(\text{kg} \cdot \text{h})$	空载耗油率 $g_{e0}/(\text{kg} \cdot \text{h})$	功载比 $N_{\text{en}}/$ $m/(\text{kW} \cdot \text{t}^{-1})$	价格/元	装载量(散秆; 秸秆包) m/t	柴油价格 $p_d/$ (元 $\cdot \text{kg}^{-1}$)
18	25	0.272	0.245	8.9	55 000	0.66; 2.8	7.14

表 7 其他相关参数

Tab.7 Other relative parameters

	取值	来源
机械收集效率 $Q_{\text{gm}}/(\text{t} \cdot \text{h}^{-1})$	2.5	文献[7]
人工收集效率 $Q_{\text{gp}}/(\text{t} \cdot \text{h}^{-1})$	0.08	文献[7]
人工费用 $p_{\text{per}}/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	12	假设
帆布价格 $p_c/(\text{元} \cdot \text{m}^{-2})$	8	调研

B_2 成本最低, B_1 次之, C_3 最高. 降低同样留茬高度的
成本增幅人工收集大于机械收集, 因为机械收集
提高收集效率、降低运输人工成本, 而人工费用高于
机械费用. 因为假设农户采取储存手段, 增加了堆垛
存储成本, C、D 供应成本相应地比 A、B 高. 以 C_3 为
例, 储存成本占总成本 32.6%. 若 C、D 下农户不采
取存储手段, 则成本会降低至 165、180.7、188.9、
176.5、168.6、190 元 $\cdot \text{t}^{-1}$.

4 结果及讨论

不同场景的秸秆供应成本计算结果见表 8. 可得

表 8 不同场景的供应成本

Tab.8 Supply cost under different scenarios

	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3	C_1	C_2	C_3	D_1	D_2	D_3
成本/(元 $\cdot \text{t}^{-1}$)	196	206	216	193.6	186	201	234	247	250	212.8	202.9	225

不同场景成本结构可见图 6, 最高成本部分 A、
C 中是人工收集成本, B、D 中是机械收集成本. 机械
收集相比人工收集未体现太多成本优势, 这和本文
设定条件中农户土地面积有关, 土地面积越小, 越难
以体现机械收集的优势.

据调研可知, 人工成本是农户决策中重要的因
素. 劳动力价格对秸秆供应成本的影响, 见图 7. 劳动
力价格的变化对人工收集模式的影响大于机械收集
模式. 基准价格为 12 元 $\cdot \text{h}^{-1}$, 劳动力价格增加
10%、20%、50% 时 A 分别增加 8.3%~8.8%、

16.9%~17.3%、42.5%~43.9%, C 分别增加
6.4%~6.8%、13.0%~13.4%、33.9%~34.3%,
而 B 增加 0.8%~0.9%、1.6%~1.8%、4.1%~
4.7%, D 增加 0.3%~0.5%、0.5%~0.9%、1.3%
~2.2%.

本文未考虑秸秆供应中存在的信息问题, 当众
多农户面对有限的收购方时, 信息交流可能出现困
难, 足量收购秸秆意味着信息交流需足够顺畅, 信息
交流产生信息成本, 因此本文后续研究会将信息问
题纳入成本分析当中.

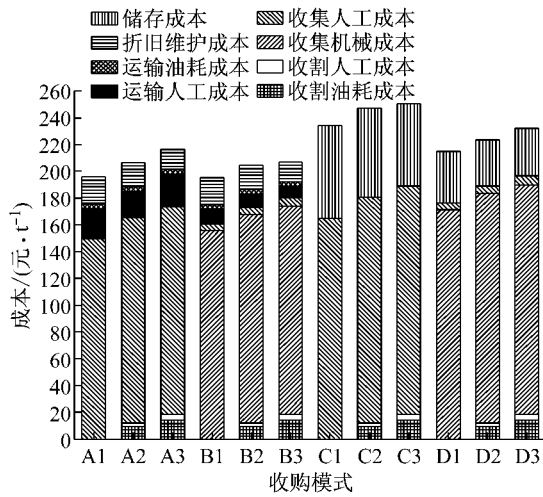


图 6 不同场景下的秸秆供应成本结构
Fig.6 Constructions of straw supply costs

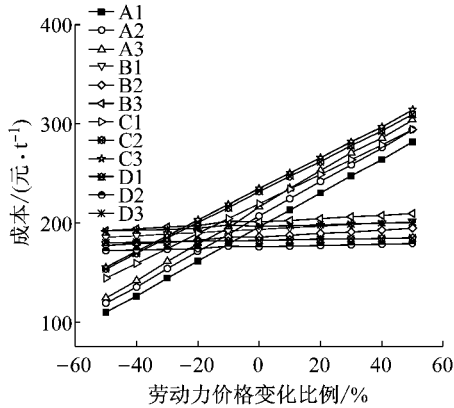


图 7 供应成本与劳动力价格之间的关系
Fig.7 Relation between supply cost and labor price

5 结论

(1) 调研发现农户 45.3% 打工人员不从事农工、59.7% 焚烧过秸秆、82.3% 未出售过秸秆, 农户基于秸秆供应的成本、预期收益与劳动力机会成本决策相关问题, 人工成本是影响农户决策的重要因素。

(2) 设置 4 种场景构建供应成本模型, 对收割、收集、运输、储存等环节建立数学模型, 可对一定情况的供应成本进行计算。

(3) 实例成本计算结果显示成本大小依次为 B、A、D、C, D、C 成本较高因为采取储存手段, 若不考虑它则将低于 A、B, 但难以保证秸秆质量。劳动力价格每增加 10%, A 成本增加 8.3%~8.8%, B 增加 0.8%~0.9%, C 增加 6.4%~6.8%, D 增加 0.3%~0.5%。

(4) 基于本文研究, 增加机械收集程度、降低机

械收集成本、增加土地面积等方式可降低成本中最多的收集成本, 政府加强收储商与农户的信息交流可降低 C、D 的储存成本。

参考文献:

[1] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 211.
BI Yuyun, GAO Chunyu, WANG Yajing, *et al.* Estimation of straw resources in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 211.

[2] 崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 291.
CUI Ming, ZHAO Lixin, TIAN Yishui, *et al.* Analysis and evaluation on energy utilization of main crop straw resources in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(12): 291.

[3] Qin Y, Xie S D. Historical estimation of carbonaceous aerosol emissions from biomass open burning in China for the period 1990—2005[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(12): 3316.

[4] 吴创之, 周肇秋, 阴秀丽, 等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 91.
WU Chuangzhi, ZHOU Zhaoqiu, YIN Xiuli, *et al.* Current status of biomass energy development in China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 91.

[5] 邢爱华, 刘罡, 王焱, 等. 生物质资源收集过程成本、能耗及环境影响分析[J]. 过程工程学报, 2008, 8(2): 305.
XING Aihua, LIU Gang, WANG Yao, *et al.* Economic, energy and environment analysis on biomass collection process [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(2): 305.

[6] 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.
LIU Huacai, YIN Xiuli, WU Chuangzhi. Cost analysis of crop residue supplies [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 106.

[7] 徐亚云, 田宜水, 赵立欣, 等. 不同农作物秸秆收储运模式成本和能耗比较[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 259.
XU Yayun, TIAN Yishui, ZHAO Lixin, *et al.* Comparison on cost and energy consumption with different straw's collection-store-transportation modes [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(20): 259.

[8] 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.
YU Xiaodong, FAN Fengming. Simulation analysis on fuel collection, processing, storage and transportation used in straw power plant in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 215.

[9] 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(1): 132.
YANG Shuhua, LEI Tingzhou, HE Xiaofeng, *et al.* Study on economical radius of collected straw in biomass fuel cold compression molding [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(1): 132.

- [10] 刘罡,邢爱华,王焱,等. 生物质利用优化生产规模分析[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2008,48(9):114.
LIU Gang, XING Aihua, WANG Yao, *et al.* Analysis of the optimum production scale for biomass utilization [J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2008, 48(9): 114.
- [11] Nguyen M H, Prince R G H. A simple rule for bioenergy conversion plant size optimisation: Bioethanol from sugarcane and sweet sorghum [J]. Biomass and Bioenergy, 1996, 10: 361.
- [12] Sokhansanj S, Kumar A, Turhollow A F. Development and implementation of integrated biomass supply analysis and logistics model (IBSAL) [J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(10): 838.
- [13] 顾克军, 杨四军, 张斯梅, 等. 不同生产条件下留茬高度对水稻秸秆可收集量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 831.
GU Kejun, YANG Sijun, ZHANG Simei, *et al.* Effect of stubble height on collectable amount of rice straw under different cultivation patterns [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 831.
- [14] 潘跃. 小麦留茬高度对联合收割机作业效能的影响[J]. 农业科学研究, 2011, 31(3): 31.
PANG Yue. Influence of wheat stubble height on operational efficiency of combine harvester [J]. Journal of Agricultural Sciences, 2011, 31(3): 31.
- [15] 陈丽能, 林鸿, 徐展峰, 等. 农村运输机械耗油量数学模型的研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2003, 29(2): 185.
CHEN Lineng, LIN Hong, XU Zhanfeng, *et al.* Research on the math models of the combustion oil consumption of the farm transport machineries [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Science, 2003, 29(2): 185.

~~~~~

(上接第 426 页)

- [48] Ioannidis P, Brooks P C, Barton D C, *et al.* Brake system noise and vibration-a review [C] // Braking 2002. From the driver to the road. Leeds: [s. n.], 2002: 53-73.
- [49] Yoon K W, Lee J C, Cho S S. The study of vehicle structural characteristics for creep groan noise [C] // SAE 2011 Annual Brake Colloquium and Engineering Display. Phoenix: [s. n.], 2011. 2011-01-2363.
- [50] Jung T, Chung S. Research for brake creep groan noise with dynamometer [C] // SAE 2012 Brake Colloquium & Exhibition-30th Annual. Detroit: SAE, 2012. 2012-01-1824.
- [51] Joo K H, Jeon H C, Sung W, *et al.* Transfer path analysis of brake creep noise [C] // SAE 2013 Brake Colloquium & Exhibition-31st Annual. Jacksonville: SAE, 2013. 2013-01-2036.
- [52] Woo J H, Kim J, Kim K Y, *et al.* A study on the transfer path analysis of brake creep groan noise [C] // SAE Brake Colloquium & Exhibition-32nd Annual. Burlingame: SAE, 2014. 2014-01-2510.
- [53] Rao M V, Frank J, Kohli M. Diagnosis and elimination of disc brake groan in a utility vehicle [C] // SAE 2014 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE, 2014. 2014-01-0043.
- [54] Behrendt J, Weiss C, Hoffmann N P. A numerical study on stick-slip motion of a brake pad in steady sliding [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(4): 636.
- [55] Kruse S, Stingl B, Hieke J, *et al.* The influence of loading conditions on the static coefficient of friction: a study on brake creep groan [M] // Topics in Modal Analysis I, Volume 7. [S. l.]: Springer International Publishing, 2014: 149-160.
- [56] Uchiyama K, Shishido Y. Study of creep groan simulation by implicit dynamic analysis method of FEA (Part2) [C] // SAE Brake Colloquium & Exhibition-32nd Annual. Burlingame: SAE, 2014. 2014-01-2516.
- [57] Tonazzi D, Massi F, Baillet L, *et al.* Experimental and numerical analysis of frictional contact scenarios: from macro stick-slip to continuous sliding [J]. Meccanica, 2015, 50(3): 649.
- [58] Xu J J. Disc brake low frequency creep groan simulation using ADAMS [C] // Proceedings of the 2000 ADAMS International User Conference. Orlando: [s. n.], 2000: 1-19.