

随机鲁棒区间-生物质电厂选址风险分析模型

陈 聪¹, 黄国和¹, 李永平¹, 李萌文²

(1. 华北电力大学资源与环境研究院, 北京 102206; 2. 北京节能环保中心, 北京 100029)

摘 要: 优化生物质发电厂厂址对于中国生物质发电行业意义重大。然而, 生物质发电厂选址系统中包含多重不确定性和复杂性。忽略这些, 将给生物质发电厂带来风险。因此, 充分考虑生物质发电厂系统中的多重不确定性, 将鲁棒随机规划 (robust optimization, RO) 与区间规划 (interval parameter programming, IPP) 融于两阶段规划 (two-stage programming, TSP) 框架中, 建立基于随机鲁棒区间风险分析模型 (stochastic robust interval model, SRIM) 的生物质发电厂选址模型。该模型可以处理表现为离散区间和随机性的不确定变量。并且对于随机过程产生的风险进行追索, 增强生物质发电系统的安全性。通过调节不同风险等级, 可以对系统进行风险分析, 利于决策者对系统安全性和经济性做出衡量。该文以装机容量为 15 MW 的生物质发电厂为案例。模型结果显示: 该规划区域拟建设生物质发电厂数量为 1, 优化厂址介于 (245, 242) km 至 (250, 247) km; 各个燃料收储站优化配送方案; 以及不同鲁棒等级下的系统风险和系统成本。通过模型得出的结果合理可行, 可以为生物质电长选址提供科学的依据及决策支持。

关键词: 生物质, 发电, 风险, 生物质发电厂, 选址, 鲁棒规划, 区间优化规划

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.20.027

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-20-0206-08

陈 聪, 黄国和, 李永平, 等. 随机鲁棒区间-生物质电厂选址风险分析模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 206-213.

Chen Cong, Huang Guohe, Li Yongping, et al. Model of risk analysis on site selection of biomass power plant based on stochastic robust interval method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(20): 206-213. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

中国作为农业大国, 生物质能资源丰富, 生物质发电前景广阔。利用生物质发电既可以缓解传统资源有限性带来的能源危机, 又可以减少传统能源引发的环境污染问题^[1-2]。但由于生物燃料呈现数量庞大、空间密度小、分布较为分散等特点, 导致生物质发电需要的燃料数量巨大, 这对于燃料资源的收集、储存和运输都是极大的考验^[3-7]。合理地生物质发电厂厂址进行规划, 可以降低运输能源的损耗和运输过程中的尾气排放, 减少由于交通运输而给环境带来的压力, 使其运行的总费用达到最优值, 具有重要意义。

近年来, 中国学者对于生物质发电的相关问题开展了一些研究。文献[3]对秸秆收储运输系统的运营模式、成本费用等问题提出政策和制度的相关建议; 文献[8]利用生物质能资源的经脉物流模型分析了生物质能资源的特殊性及其可供性, 并论述了资源

供应过程中存在的农民、价格以及成本等方面的问题; 文献[9]对于秸秆收集半径公式中的可获得系数和秸秆可供应系数取值提出修改建议, 提高了秸秆发电厂的运行稳定性和经济性。而对于生物质或垃圾发电厂选址方面的研究较少。文献[10]利用中心求解及非线性规划对生物质发电厂燃料收储站进行优化选址, 并求解得到了收储站的最优个数及地理位置; 文献[11]基于区间方法开发了生物质发电厂选址模型, 可以计算出优化厂址的具体地理位置、整个生物质发电系统的最小运行费用及区域内每个提供秸秆单位的具体的运输量。

但是以上研究忽略了生物质发电厂选址过程中的多重不确定性和复杂性。整个生物质发电系统包含发电系统、运输系统、存储系统等众多子系统, 各个子系统均包含了区间、随机等不确定性因素, 且各个子系统间相互影响, 这些导致了系统的多重不确定性^[11-15]。在优化选址过程中, 如果忽略整个优化系统的不确定性, 将导致运输能源耗损增大、环境污染增大、生物质发电厂不能正常运转等风险。因此, 本文将提出随机鲁棒区间模型 (SRIM), 并应用于生物质发电厂选址。模型将鲁棒规划 (RO) 与区间规划 (IPP) 融于两阶段规划

收稿日期: 2013-04-16 修订日期: 2013-09-22

基金项目: 教育部科学技术研究重大项目 (311013)

作者简介: 陈 聪 (1987-)。女, 博士生, 内蒙古赤峰市人。研究方向为环境系统分析、资源与环境系统规划。北京 华北电力大学资源与环境研究院, 102206。Email: chencong0420@126.com

(TSP) 框架中，充分考虑了生物质发电厂选址过程中各种信息的不确定性以及复杂性，实现了科学合理的选址优化。该模型利于决策者对系统经济性及系统安全性做出衡量，从而做出科学合理的规划决策。

1 生物质选址风险分析模型

1.1 方法阶段

生物质发电厂选址规划过程中，包含了大量的区间不确定性和随机不确定性。区间方法可以有效处理表现区间特性的不确定性；而随机方法可以处理表现为概率分布形式的随机不确定性。而随机规划在突发事件较多的情况会引起系统的风险，鲁棒算法可以有效追索由于随机过程而带来的风险。因此本文将基于 3 种方法开发了随机鲁棒区间模型 (SRIM)。模型方法的思路如图 1 所示：

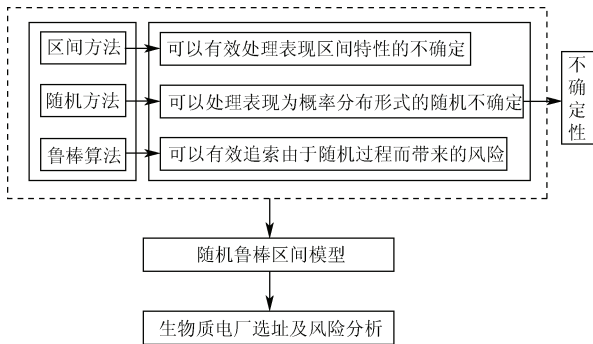


图 1 模型框架图

Fig.1 Framework of stochastic robust interval model

1.2 建模过程

生物质发电厂选址规划过程中，包含了大量的区间不确定性（生物质燃料收购成本、年发电量、收储站容量、生物质燃料需求量等）。这些参数往往不能表现为单一的数值^[11,16]。例如，生物质燃料收购价格将随季节的变化在 120 元/t 至 200 元/t 之间波动，即[120-200]元为区间不确定信息。结合 IPP 建立的生物选址模型可以有效处理区间不确定性^[11,13,15]，但却无法处理规划过程中表现为随机形式的不确定性。例如，秸秆需求量将随季节、经济和其他偶然因素等呈现出随机不确定性^[11,13,17]。例如，对生物质燃料需求量而言，根据公式“燃料年消耗量=燃料消耗率×发电机功率×机组年运行时间”进行推算，发现：在低水平需求模式下，需求为 45 000~51 000 t/年；中水平需求模式下，需求量为 47 000~53 000 t/年；高水平需求模式下，需求量为 49 000~55 000t/年。在生物质发电厂选址规划过程中呈现出大量的随机不确定性因素，不容忽视。

TSP 能够有效地处理决策过程中以概率密度函

数表示的随机不确定参数。其主要优势在于可以分析与决策相关的预设情景。其可以在随机事件发生以后，实施纠正错误的能^[13,17-19]。在 TSP 中，第 1 阶段的决策需要在不确定信息被揭示之前制定；而第 2 阶段的决策是对第一阶段决策的一个修订，其目的为使由于第一阶段的决策不可行而引起的“惩罚”最小化^[18]。但值得注意的是，TSP 忽略了期望值与不同情境条件下的值的偏差，不能评估模型中目标函数期望值、期望值与特定情境条件下的值的偏差和约束违反之间的妥协，不利于决策者根据实际情况制定决策^[14,20-23]。尤其在突发事件较多的情况下，将会引起系统的不稳定，成为一个高风险性的系统。

RO 可以有效捕捉 TSP 中期望值与不同情境条件下的偏差，降低系统规划中的风险。其结合目标规划和情境分析的方法来处理不确定参数，生成一系列稳定的解。鲁棒规划作为一种风险分析的手段，通过调节不同风险等级，利于决策者对系统安全性和经济性做出衡量，从而根据实际情况制定决策^[14,16]。

因此，本文充分考虑生物质发电厂选址过程中的复杂性和多重不确定性，改进过去开发的生物质发电厂选址模型，将 RO 与 IPP 融于 TSP 框架中，建立了基于随机鲁棒区间风险分析的生物质发电厂选址模型。模型以系统成本(f)最小化为目标，包括生物质发电厂选址基础模型成本(f_1)、第二阶段变量“惩罚”成本(f_2)以及风险追索成本(f_3)。模型涵盖了生物质燃料收购成本、生物质燃料运输成本、环境保护成本以及生物质发电厂运行成本等。具体模型如下：

$$\min f = f_1 + f_2 + f_3 \tag{1}$$

子目标 1: 生物质发电厂选址基础模型目标

$$f_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m L_{ij}^{\pm} (C_{ij}^{-} + \gamma \cdot \Delta C_{ij}) + \sum_{i=1}^n g_i^{\pm} C_i^{\pm} \sqrt{(x_j - a_i)^2 + (y_j - b_i)^2} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (C_{(i,j)}^{\pm} G_{ad}^{\pm} U_G + C_{(i,j)}^{\pm} S_c^{\pm} C_S^{\pm} + C_{(i,j)}^{\pm} N_c^{\pm} C_N^{\pm} + C_{(i,j)}^{\pm} W_c^{\pm} C_W^{\pm}) + \sum_{j=1}^m (Z_j^{\pm} K_j^{\pm} + WO_{ji}^{\pm} A_j^{\pm} + ZIE_j^{\pm} ED_j^{\pm} - WO_{ji}^{\pm} R^{\pm}) \tag{2}$$

该子目标为生物质发电厂选址基础模型成本，包含生物质燃料收购成本、生物质燃料运输成本、环境保护成本以及生物质发电厂运行成本、外购电量成本和发电补贴利润等。其中， i 代表收储站， $i=1,2,3$ ； j 代表生物质发电厂， $j=1, 2$ ； L_{ij} 代表秸秆收

购成本; C_{ij} 为第一决策变量, 代表原料收储站 i 向生物质发电厂 j 运送的秸秆数量, t ; γ 为决策变量, $\gamma \in [0, 1]$; 其中 $C_{ij}^{\pm} = C_{ij}^{-} + \gamma \cdot \Delta C_{ij}$, 且 $\Delta C_{ij}^{\pm} = C_{ij}^{+} - C_{ij}^{-}$; g_i 代表运输车辆载重单位质量的秸秆运输单位距离内的花费, 元/($t \cdot m$); $x_{(j)}, y_{(j)}$ 代表电厂地理位置的横纵坐标, km ; $a_{(j)}, b_{(j)}$ 分别为几个收储站的地理位置的横纵坐标; G_{ad} 代表单位生物质产生的底灰质量, t ; U_G^{\pm} 代表处理单位灰分的费用, 元/ t ; S_c^{\pm} 、 N_c^{\pm} 、 W_c^{\pm} 代表单位生物质发电产生的 SO_x 、 NO_x 及污水量, t ; C_s^{\pm} 、 C_N^{\pm} 、 C_w^{\pm} 代表处理单位 SO_2 、 NO_x 及污水所需费用, 元/ t ; Z_j^{\pm} 代表生物质发电厂装机容量, kW ; K^{\pm} 代表生物质电厂单位投资系数, 元/ $kW \cdot h$; WO_{jt}^{\pm} 代表生物质电厂年发电量, $kW \cdot h$; A^{\pm} 代表发电成本, 元/ $kW \cdot h$; ZIE_j^{\pm} 代表外购电量价格, 元/ $kW \cdot h$; ED^{\pm} 代表每年生物质发电厂外购电量, $kW \cdot h$; A_j^{\pm} 代表外购电量价格, 元/ $kW \cdot h$; R^{\pm} 代表生物质发电厂的国家补贴, 元/ $kW \cdot h$ 。

子目标 2: 第二阶段“惩罚”目标

$$f_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{h=1}^3 D_{ijh}^{\pm} YD_{ijh}^{\pm} \quad (3)$$

该子目标为第 2 阶段“惩罚”成本。其中, h 代表 3 种生物质燃料需求量水平, $h=1, 2, 3$ 。其中, $h=1$ 代表低水平需求量, $h=2$ 代表中水平需求量, $h=3$ 代表高水平需求量。 D_{ijh}^{\pm} 代表由于运送生物质燃料缺少而引发的惩罚, 元/ t 。 YD_{ijh}^{\pm} 代表各个原料收储站向发电厂运送生物质燃料的缺少量(t), 该变量可以识别未来的不确定性问题, 然后开始实施补救行为, 从而降低系统的损失。

子目标 3: 风险追索目标

$$f_3 = \rho \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{h=1}^3 p_{th} (D_{ijh}^{\pm} \cdot YD_{ijh}^{\pm} - \sum_{h=1}^3 p_{th} \cdot D_{ijh}^{\pm} \cdot YD_{ijh}^{\pm}) \quad (4)$$

该子目标为风险追索成本, 即量化由于随机不确定性而带来的风险。其中, $h=1, 2, 3$; $\sum p_h = 1$ 。

$$V_{ijh}^{\pm} = D_{ijh}^{\pm} \cdot YD_{ijh}^{\pm} - \sum_{p=1}^H p_{th} \cdot D_{ijh}^{\pm} \cdot YD_{ijh}^{\pm}, \quad \forall i, j, h$$

对于随机过程中产生风险的数量追索量。 $V_{ijh}^{\pm} \geq 0$;

如果 $V_{ijh}^{\pm} < 0$ 时, 则按照 $V_{ijh}^{\pm} = 0$ 处理。 ρ 为目标规划系数, 其位于 $[0, 1]$ 之间。可以表现出决策者对于系统经济性和风险性的一个态度。通过调节 ρ , 可以产生一系列不同情境下模型的风险追索量, 可以对系统的风险进行深入、全面的分析。 $\rho=0$, 随机

鲁棒模型即变为 TSP 模型, 代表决策者重视系统的经济性; 而当 $\rho=1$, 代表决策者是一个反风险者, 重视系统的安全性^[6-7]。

约束条件:

1) 生物质燃料供应、存储约束:

$$\sum_{i=1}^6 C_{i,j}^{\pm} \geq H_{jh}^{\pm}, \quad i=1, 2, \dots, 6; j=1, 2, \dots, j \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^6 C_{i,j}^{\pm} \leq H_{jh}^{\pm} + e_{jh}^{\pm}, \quad i=1, 2, \dots, 6; j=1, 2, \dots, j \quad (6)$$

2) 电力需求平衡约束:

$$\sum_{j=1}^J (WO_{jt}^{\pm} + ED_t^{\pm}) \geq DM_t^{\pm}, \quad \forall t \quad (7)$$

3) 环境约束:

$$(1 - \eta_s) \cdot \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{i,j}^{\pm} S_c^{\pm} \right) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{(i,j)}^{\pm} \leq S_{\max}^{\pm}, \quad \forall i, j \quad (8)$$

$$(1 - \eta_N) \cdot \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{i,j}^{\pm} N_c^{\pm} \right) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{(i,j)}^{\pm} \leq N_{\max}^{\pm}, \quad \forall i, j \quad (9)$$

$$(1 - \eta_w) \cdot \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{i,j}^{\pm} W_c^{\pm} \right) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{(i,j)}^{\pm} \leq W_{\max}^{\pm}, \quad \forall i, j \quad (10)$$

4) 两阶段规划约束:

$$C_{ij\max}^{\pm} \geq C_{ij}^{\pm} \geq YD_{ijh}^{\pm}, \quad \forall i, j, h \quad (11)$$

$$(C_{ij}^{-} + \gamma \cdot \Delta C_{ij}) + YD_{ijh}^{\pm} \geq H_{jh}^{\pm}, \quad \forall i, j, h \quad (12)$$

5) 风险追索约束:

$$V_{ijh}^{\pm} \geq D_{ijh}^{\pm} \cdot YD_{ijh}^{\pm} - \sum_{h=1}^3 p_{th} \cdot D_{ijh}^{\pm} \cdot YD_{ijh}^{\pm}, \quad \forall i, j, h \quad (13)$$

$$D_{ijh}^{\pm} \cdot YD_{ijh}^{\pm} - \sum_{h=1}^3 p_{th} \cdot D_{ijh}^{\pm} \cdot YD_{ijh}^{\pm} \geq 0, \quad \forall i, j, h \quad (14)$$

其中, H_{jh}^{\pm} 为电厂 j 在燃料需求水平为 h 时, 所需求的生物质燃料量, t ; e_{jh}^{\pm} 为松弛量, t ; DM_t^{\pm} 为需电量, $kW \cdot h$; S_{\max} 、 N_{\max} 、 W_{\max} 代表 SO_x 、 NO_x 及污水量的排放限值, t ; η_s 、 η_N 、 η_w 代表生物质发电厂的脱硫效率、脱氮效率及污水处理效率, %。

该模型的具体求解步骤为:

步骤 1: 将模型分解为 f^{-} 和 f^{+} 2 个子模型;

步骤 2: 对子模型 f^{-} 进行求解。计算得出 γ_{ij} ,

$$x_j^{-}, y_j^{-}, YD_{ijh}^{-}, V_{ijh}^{-};$$

步骤 3: 通过 γ_{ij} , 计算 $C_{ij}^{\pm} = C_{ij}^{-} + \gamma_{ij} \cdot \Delta C_{ij}$;

步骤 4: 对子模型 f^{+} 进行求解。计算得出 $x_j^{+}, y_j^{+}, YD_{ijh}^{+}, V_{ijh}^{+}$;

步骤 5：得出最终方案

$$(i) : x_j^\pm = [x_j^-, x_j^+], y_j^\pm = [y_j^-, y_j^+],$$

$$YD_{ijh}^\pm = [YD_{ijh}^-, YD_{ijh}^+], V_{ijh}^\pm = [V_{ijh}^-, V_{ijh}^+]$$

$$(ii) : \text{最终生物质配送量: } AC_{itopt}^\pm = C_{ijopt}^\pm + YD_{ijhopt}^\pm。$$

其中， AC_{itopt}^\pm 为最终优化量。 C_{ijopt}^\pm 代表 C_{ij} 的优化后值； YD_{ijhopt}^\pm 代表 YD_{ijh}^\pm 得优化值。

步骤 6：利用目标规划系数，对系统进行风险分析。

2 案例简介

中国生物质资源空间密度小、分布分散等特点，给收集和运输带来了困难。生物质运输费用和燃料收购占据很大比例，这严重制约了生物质发电行业的发展。生物质燃料收购费用受市场供需两方面的控制，很难对其进行优化。而运输费用则跟生物质发电厂厂址、收储站以及运输数量等息息相关，对生物质发电厂厂址规划，可以将运输费用大大降低，同时减少由于运输过程中带来的环境污染问题，研究意义重大。黄淮海区域是中国秸秆等生物质燃料密度最高的地区，地势平坦。本文中的部分数据（例如，秸秆收购价格和秸秆年需求量等）是通过该地区调研报告、统计年鉴以及相关论文得到^[11,24-26]。假设该区域内有 A、B、C、D、E、F 6 个城镇的原料收储站，目前规划要在这个区域内构建 n 个生物质发电厂。假设生物质发电厂发电机功率 15 MW，发电形式为直接混燃式，该种方式的燃料消耗率为 0.6223。生物质发电厂的生物质燃料需求量可以根据公式“燃料年消耗量=燃料消耗率×发电机功率×机组年运行时间”进行核算。6 个城镇的原料收储站的具体位置如表 1 所示。设置 3 个水平的生物质燃料需求量，分别为高水平需求量、中水平需求量和低水平需求量以及相应 3 种水平下的运行时间如表 2 所示。表 3 为部分生物质电厂选厂模型输入数据。

表 1 原料收储站的坐标值

Table 1 Coordinates of town straw collection stations

原料收储站 Straw collection station	坐标值 Coordinates/(km·km)
A	(0,0)
B	(375,175)
C	(253,185)
D	(255,285)
E	(327,295)
F	(175,249)

表 2 生物质燃料需求量

Table 2 Biomass fuel demand

需求水平 Demand level	概率 Probability	电厂运行时间 Operating time/a	燃料需求量 Demand amounts/(t·a ⁻¹)
低水平	0.2	[4820, 5645]	[45000, 51000]
中水平	0.6	[5035, 5678]	[47000, 53000]
高水平	0.2	[5250, 5892]	[49000, 55000]

表 3 生物质发电系统各因素数值

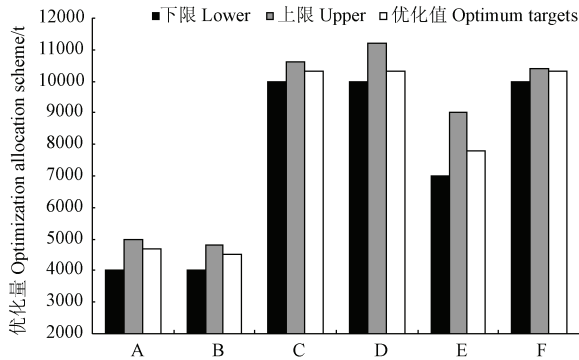
Table 3 Value of each factor in biomass power plant sit selection model

因素 Factor	单位 Unit	数值 Value
装机容量	MW	15
年发电量	kW·h	[26 000 000, 33 000 000]
仓库容量	t	[2000, 2400]
蒸汽机价格	元	[1500 000, 200 000]
电价补贴	元	[0.2, 0.3]
锅炉价格	元	[300 000, 350 000]
秸秆运输费用	元	[0.1, 0.15]
外购电量价格	元	[0.35, 0.40]
发电成本	元	[0.3, 0.35]
生物质发电电价	元	[0.55, 0.6]
秸秆收购费用	元	[120, 200]
秸秆年需求量	t	[45000, 47000]

3 结果与分析

经过计算得出原料收储站及拟要建立的生物质发电厂厂址。下限模型计算得出 $x_1=x_2=\dots=x_n=245$ km, $y_1=y_2=\dots=y_n=242$ km。即表明该地区只应建立一个生物质发电厂，且厂址为(245,242) km。上限模型推出该地区也只应该建立一个生物质发电厂，厂址为(250,247) km。结果表明，优化厂址在(245,242) km 至(250,247) km 之间，可以看出上限模型和下限模型的结果相差为(5,5) km，因此需建造生物质发电厂的数量为 1。该拟选厂址以及生物质发电厂数量可以使系统成本、运输费用达到最小，对环境的污染降至最低。

图 2 为各个原料收储站 i 向生物质发电厂运送秸秆等燃料的初始优化数量。其中，初始优化量为 $C_{ij}^\pm = C_{ij}^- + \gamma_{ij} \cdot \Delta C_{ij}$ 。例如， $\gamma_{11}=0.7$, $C_{11}^\pm=4\ 700$ t; $\gamma_{21}=0.625$, $C_{21}^\pm=4\ 500$ t。但此方案没有考虑由于系统随机性而带来的风险问题，不能作为最终配送方案。图 3 为各个原料收储站的运送缺失量（即第二阶段决策变量）。通过图 3 可以看出，随着生物质燃料需求水平的提高，运送缺失量也逐渐增大。低等需求水平下， $YD_{11hopt}^\pm=[0,0]$ t；中等需求水平下， $YD_{11hopt}^\pm=[200,250]$ t；高等需求水平下， $YD_{11hopt}^\pm=[400,450]$ t。通过结果，可以看出随着需求水平的



注: A,B,C,D,E,F 为各个城镇的原料收储站, 下同。
Note: Biomass resources collection and storage station of town A, B, C, D, E, F, the same as below.

图 2 生物质燃料优化配置方案

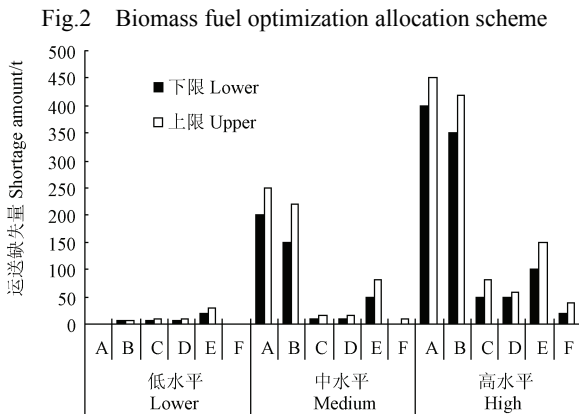


图 3 生物质燃料运送不足量
Fig.3 Shortage of biomass fuel

增高, 缺失量逐渐增高。最终优化运送数量应为 $AC_{itopt}^{\pm} = C_{ijopt}^{\pm} + YD_{ijhopt}^{\pm}$ 。例如, 中等需求水平下, 收储站 1 需要运送的优化秸秆量为 $AC_{11opt}^{\pm} = C_{11opt}^{\pm} + YD_{11opt}^{\pm} = 4\ 700\ t + [200, 250]\ t = [4\ 900, 4\ 950]\ t$ 。

图 4 为期望值与特定情景条件下的值的偏差, 也为模型的风险追索成本, 即 $\rho \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H p_{ih} V_{ih}^{\pm}$ 。本研究假设 $\rho \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H p_{ih} V_{ih}^{\pm} \geq 0$; 当 $\rho \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H p_{ih} V_{ih}^{\pm} < 0$ 时, $V_{ih}^{\pm} = 0$ 。如图 4 所示, 风险追索成本随 ρ 的增加而增加。例如, $\rho = 0.4$ 时, 风险追索成本为 $[91.62, 128.79] \times 10^3$ 元; $\rho = 0.7$ 时, 风险追索成本为 $[175.62, 204.23] \times 10^3$ 元; $\rho = 1$ 时, 风险追索成本为 $[194.69, 257.57] \times 10^3$ 元。这说明, 随着 ρ 的增加, 系统的追索成本增加, 系统的安全性增强。

图 5 为表征系统成本随鲁棒而变化情况。如图 5 所示, ρ 值代表系统的鲁棒等级, ρ 越大, 系统鲁棒等级越高, 系统风险性越低, 系统成本越大。例如, $\rho = 0.4$ 时, $f = [178.07, 259.13] \times 10^6$ 元; $\rho = 0.7$ 时, $f = [221.00, 276.00] \times 10^6$ 元; $\rho = 1$ 时, $f =$

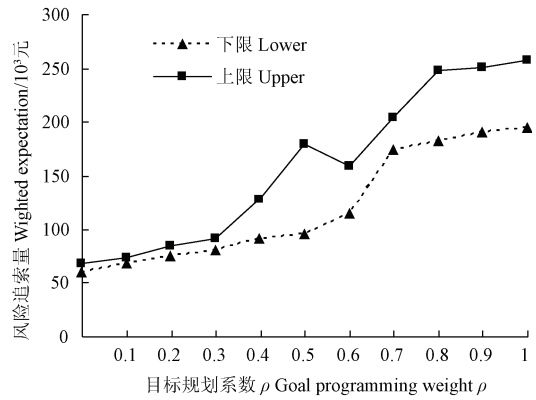


图 4 不同鲁棒等级下的风险追索成本
Fig.4 Recourse cost under different robust levels

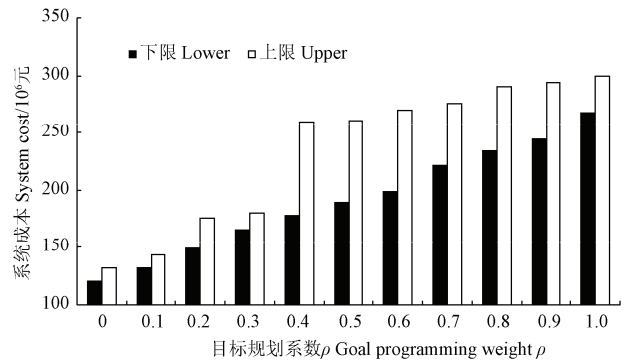


图 5 不同鲁棒等级下的系统成本
Fig.5 System cost under different robust levels

$[267.00, 300.00] \times 10^6$ 元。通过结果可以看出随着 ρ 的增加, 系统成本的区间值变小。说明系统鲁棒性越强, 系统越稳定。本文开发的随机鲁棒区间规划方法可以利于决策者对系统经济性及系统安全性做出全面衡量, 从而根据实际情况做出科学合理的规划决策。

4 结论

在中国, 生物质发电厂选址方面的研究还不多。以往的研究中往往忽略了整个选址系统的复杂性和不确定性, 或者只考虑单一的不确定性, 忽略了系统中多重不确定性。通过提出随机鲁棒线性规划-生物质发电厂选址模型, 既可处理模型左侧的区间不确定性, 又可以处理模型右侧表现为随机的不确定性, 而且还可以对随机过程产生的风险进行追索, 以确保系统安全性。通过模型结果可以得到:

- 1) 该规划区域拟建设一个生物质发电厂, 优化厂址介于(245,242) km 至 (250,247) km。
- 2) 各个收储站配送燃料配送方案。如: A、B、C、D、E、F 6 个收储站的燃料优化配送量分别为: 4 700、4 500、10 300、10 300、7 800 和 10 300 t。
- 3) 以及不同鲁棒等级下的风险值和系统成本。

模型结果显示系统鲁棒等级越高, 系统风险性越低, 系统成本越大。例如: $\rho=0.4$ 时, $f=[178.07, 259.13] \times 10^6$ 元; $\rho=1$ 时, $f=[267.00, 300.00] \times 10^6$ 元; 同时可以看出, 随着系统鲁棒性增强, 系统成本的区间值变小, 说明系统越稳定。该模型实现了科学合理的选址优化, 同时可以帮助决策者对系统安全性及经济性做出有效权衡, 从而根据实际情况做出科学合理的规划决策。

参 考 文 献

- [1] 毕淑娟. 秸秆收集难 生物质发电厂四面楚歌[N]. 中国联合商报, 2012.9.4 (D02)
- [2] 李艳芳, 岳小花. 我国生物质发电行业存在的问题及对策[J]. 中国地质大学学报: 社会科学版, 2009, 9(2): 37-41.
Li Yanfang, Yue Xiaohua. Analysis on China's biomass power generation industry: the current situation, problem and its legislation and policy recommendations[J]. Journal of China University of Geosciences: Social Sciences Edition, 2009, 9(2): 37-41. (in Chinese with English abstract)
- [3] 文科. 大型生物质电厂燃料收储运系统工程应用分析[J]. 广西电力, 2011, 34(6): 34-36.
Wen Ke. Application and analysis of fuel storage and transportation system in large biomass power plant[J]. Guangxi Electric Power, 2011, 34(6): 34-36. (in Chinese with English abstract)
- [4] 邢爱华, 刘罡, 王垚等. 生物质资源收集过程成本、能耗及环境影响分析[J]. 过程工程报, 2008, 8(2): 305-313.
Xing Aihua, Liu Gang, Liu Yao, et al. Economic, energy and environment analysis on biomass collection process[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(2): 305-313. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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(1): 1-5.
Tian Yishui, Zhao Lixin, Meng Haibo, et al. Technical-economic assessment on rural bio-energy utilization technologies in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [6] 周中仁, 吴文良. 生物质能研究现状及展望[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 12-15.
Zhou Zhongren, Wu Wenliang. Status quo and prospects of biomass energy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(12): 12-15. (in Chinese with English abstract)
- [7] 孙振钧. 中国生物质产业及发展取向[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 1-5.
Sun Zhenjun. Biomass industry and its developmental trends in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(5): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张铮. 生物质发电燃料可供性分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2008(8): 57-59.
Zhang Zheng. Analysis on supply feasibility of biomass energy resources[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2008(8): 57-59. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘刚, 黄明皎. 秸秆发电厂燃料收集半径与装机规模[J]. 电力建设, 2011, 32(3): 72-75.
Liu Gang, Huang Mingjiao. Fuel collecting radius and installed capacity of straw stalk power plant[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(3): 72-75. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈双, 李季, 迟瑞娟, 等. 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.
Chen Shuang, Li Ji, Chi Ruijuan, et al. Address selection and optimization of fuel storage location of biomass power plant[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2007, 19(7): 124-126. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈聪, 李薇, 李延峰, 等. 生物质电厂优化选址建模及决策研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 55-260.
Chen Cong, Li Wei, Li Yanfeng, et al. Biomass power plant site selection modeling and decision optimization [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 55-260. (in Chinese with English abstract)
- [12] Huang G H, Baetz B W, Patry G G. A grey linear programming approach for municipal solid waste management planning under uncertainty[J]. Civil Engineering Systems, 1992, 9(4): 319-335.
- [13] Li Y P, Huang G H. Interval-parameter robust optimization for environmental management under uncertainty[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2009, 36(4): 592-606.
- [14] Xu Y, Huang G H, Qin X S, et al. SRFILP: A stochastic robust fuzzy interval linear programming model for municipal solid waste management under uncertainty[J]. Journal of Environmental Informatics, 2009, 14(2): 72-78.
- [15] Huang G H, Loucks D P. An inexact two-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty[J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2000, 17(2): 95-118.
- [16] Chen C, Li Y P, Huang G H, et al. A robust optimization

- method for planning regional-scale electric power systems and managing carbon dioxide[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2012, 40(1): 70–84.
- [17] Chen C, Li Y P, Huang G H, et al. An inexact robust nonlinear optimization method for energy systems planning under uncertainty[J]. *Renewable Energy*, 2012, 47: 55–66.
- [18] Li Y P, Huang G H, Veawab A, et al. Two-stage fuzzy-stochastic robust programming: a hybrid model for regional air quality management[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, 56(8): 1070–1082.
- [19] Chen W T, Li Y P, Huang G H, et al. A two-stage inexact-stochastic programming model for planning carbon dioxide emission trading under uncertainty[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(3): 1033–1047.
- [20] Ahmed S, Sahinidis N V. Robust process planning under uncertainty[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1998, 37(5): 1883–1892.
- [21] Bai D, Carpenter T J, Mulvey J M. Making a case for robust models[J]. *Management Science*, 1997, 43(7): 895–907.
- [22] Mulvey J M, Vanderbei R J, Zenios S A. Robust optimization of large-scale systems[J]. *Operations Research*, 1995, 43(2): 264–281.
- [23] Watanabe T, Ellis H. Robustness in stochastic programming models[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 1993, 17(10): 547–554.
- [24] 王爱军, 张燕, 张小桃. 生物质发电燃料成本分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 17–20.
Wang Aijun, Zhang Yan, Zhang Xiaotao. Fuel cost analysis of biomass power generation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(1): 17–20. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王芳, 黎夏, 陈健飞, 等. 农田生物质能集约利用空间优化决策[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 232–236.
Wang Fang, Li Xia, Chen Jianfei, et al. Optimal spatial decision of cropland bio-energy intensive application[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(9): 232–236. (in Chinese with English abstract)
- [26] 俞宏德, 王勤辉, Klein I, 等. 生物质电厂燃料物理系统的优化和分析[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 293–297.
Yu Hongde, Wang Qinhui, Klein I, et al. Optimization and analysis of bio-fuel logistics for biomass power plant[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(12): 293–297. (in Chinese with English abstract)

Model of risk analysis on site selection of biomass power plant based on stochastic robust interval method

Chen Cong¹, Huang Guohe¹, Li Yongping¹, Li Mengwen²

(1. S&C Academy of Energy and Environmental Research, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Beijing Energy Conservation and Environmental Protection Center, Beijing 100029, China)

Abstract: The transport cost of biomass fuels accounts for a large proportion of the total cost of the operation of biomass power plant. Optimizing biomass power plant site can largely mitigate the transport cost and reduce the pollutant emissions from the transportation process of biomass fuels. Therefore, it is significant to optimize the biomass power plant sit. However, the biomass power system contains many uncertainties, because that many parameters can hardly be acquired as deterministic values but expressed as interval and/or stochastic formats. For example, the supply demand of biomass fuels can be expressed as probability distributions; also, interval values can describe the uncertain parameters such as the biomass fuels price, which fluctuates between lower and upper bounds. Energy systems would become insecurity and with a high risk without considering these uncertainties. Security is a priority in the operation of biomass power plant. In this study, a stochastic robust interval model (SRIM) was developed for the biomass power plant site selection under uncertainties, through incorporating interval-parameter programming (IPP) and robust optimization (RO) within two-stage programming (TSP) framework. In SRIM, decision variables were divided into two subsets: those that must be determined before the realizations of random variables were known, and those that were determined after the realized random variables

were available. The SRIM can deal with the uncertainties described in the terms of the interval values and probability distributions, moreover, it can also reflect economic penalties as corrective measures or recourse against any infeasibilities arising due to a particular realization of an uncertain event. In the SRIM modeling formulation, penalties were exercised with the recourse against any infeasibility, and robustness measures were introduced to examine the variability of the second stage costs that were above the expected levels. The SRIM was generally suitable for risk-averse planners under high-variability conditions. The SRIM method was applied to a hypothetical case of planning biomass power plant (with installed capacity of 15 MW) site selection with considering the uncertainties. A number of solutions under different robustness levels have been generated. The obtained results can help generate desired decision alternatives that will be able to enhance the safety of biomass power system with a low system-failure risk level and particularly useful for risk-averse decision makers in handling high-variability conditions. The results are beneficial for managers analyzing the results to gain insights into the tradeoff between system's safety and economic, and analyzing the risk of the system. The results of SRIM shows: 1) The construction number of biomass power plant is one; 2) The optimum biomass power plant is from (245, 242) km to (250, 247) km; 3) The optimum allocation scheme for each fuel purchase and storage station; 4) The system costs under different robust levels; 5) The notion of risk in stochastic programming under different robust levels. The modeling results from the RISO can help generate desired decision alternatives that will be able to not only enhance the safety of planning biomass power plant site selection with a low system-failure risk level, but also mitigate pollutant emissions from the transportation process of biomass fuels. The results are reasonable, and could provide a reference for the selection of the biomass power plant site.

Key words: biomass, electric power generation, risks, biomass power plant, site selection, RO, IPP

(责任编辑: 刘丽英)