

# 考虑动态定价的煤炭调运方案优化研究

张政, 韦伟, 史芮嘉, 许奇, 毛保华\*

(北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 煤炭坑口价格的变化与市场供求有重要联系. 本文在煤炭坑口价格动态定价的基础上, 以煤炭产地和消费地间的煤炭调运量为决策变量, 以煤炭流通过程中的总费用最小化为目标, 分别构建了煤炭调运系统优化模型和考虑消费者竞争的煤炭调运优化模型, 设计了遗传算法和Floyd算法相结合的求解算法. 以我国内地煤炭调运问题为案例, 分析了价格变化特性、可调出量与消费量比例等因素对煤炭调运方案的影响. 结果表明, 考虑消费者竞争时煤炭流通广义费用更低; 随着煤炭可调出量与消费量比的增加, 动态价格较固定价格的煤炭流通广义费用下降更快.

**关键词:** 综合交通运输; 煤炭调运方案; 遗传算法; 动态定价; 消费者竞争

## Optimization of Coal Allocation with Dynamic Price

ZHANG Zheng, WEI Wei, SHI Rui-jia, XU Qi, MAO Bao-hua

(MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The coal pit price is affected by the relationship of supply and demand. By considering the pricing mechanism of coal pit price, this paper takes the volume of coal allocation from one place to another as the decision variables, and aims at minimizing the total cost of coal circulation. Two models are constructed to optimize the coal allocation, which are from the perspective of managers and consumers respectively. Genetic algorithm and Floyd algorithm are used to optimize the coal allocation in China. Some factors influencing coal allocation are analyzed, which are the price mechanism, and the ratio of available coal and consumption coal. The result shows that the generalized cost of coal allocation is lower by considering consumer competition. With the increase of the ratio of available coal and consumption coal, the cost of coal circulation in the dynamic price goes down faster than in fixed price.

**Keywords:** integrated transportation; coal allocation; genetic algorithm; dynamic price; consumer competition

## 0 引言

我国煤炭资源总体呈现北多南少, 西多东少的分布特征, 产地主要集中在山西、陕西、内蒙古等中西部省区, 消费主要分布在河北、山东、江苏、浙江、广东等中东部省区. 受煤炭生产与消费的空

间错位影响, 我国形成了“北煤南运, 西煤东送”的煤炭调运格局. 煤炭调运是煤炭供需平衡的重要环节, 调运方案设置的合理与否关系到消费者的购买成本和时间成本、生产者的盈利程度及社会总成本; 研究煤炭调运方案优化问题具有重要现实

收稿日期: 2017-03-28

修回日期: 2017-05-19

录用日期: 2017-05-24

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(71390332, 71621001-3).

作者简介: 张政(1984-), 男, 山东青岛人, 博士生.

\*通信作者: bhmao@bjtu.edu.cn

意义.

煤炭调运问题包括运输通道竞争力分析<sup>[1]</sup>、构建调运方案<sup>[2]</sup>、调运路径选择<sup>[3]</sup>等.在煤炭调运方案优化的相关研究中,多为基于煤炭调运历史数据的定性分析.如刘敬青<sup>[4]</sup>在分析我国煤炭生产、消费、调运的空间分布及其演变的基础上,提出了我国煤炭产、销、运战略规划建议.张伟等<sup>[5]</sup>结合对煤炭省际输出/输入量历史数据的分析,提出了表征煤炭输入和输出不均匀程度的基尼系数.在煤炭调运方案优化问题的定量研究方面,李智<sup>[6]</sup>采用蚁群算法研究了带容量限制和考虑损耗的煤炭运输优化问题.Zhang等<sup>[7]</sup>运用产销平衡模型,以全国煤炭铁路运输成本最小为目标,以省际煤炭调运量为决策变量,构建了铁路煤炭调运优化模型.张华等<sup>[2]</sup>以煤炭运输成本最小为目标,以各供给地到需求地的运输量为变量,建立了铁路省际煤炭调运优化模型.

上述研究在优化煤炭调运方案时,通常设定煤炭坑口价格为定值.然而,煤炭作为一种能源产品,其消费量受电力、钢铁等行业的影响.市场需求量直接关联于其价格.因此,本文将在考虑煤炭动态定价的基础上,研究煤炭的调运组织方案.

## 1 问题描述

本文研究多式联运下的煤炭调运问题,即在需求已知的情况下,确定从生产地 $i$ 到消费地 $j$ 的煤炭调运量,以达到整个调运系统中煤炭流通广义费用最小的目的.本文考虑煤炭供求关系对煤炭坑口价格的影响,分别从系统优化和考虑消费者竞争两个方面优化煤炭调运方案.本文问题涉及以下几个关键点.

### (1) 煤炭调运方案.

在本文中,煤炭调运方案是指在多个产地及消费地的系统中,当各产地煤炭可调出量和各消费地煤炭消费量已知时,在满足一定的管理和组织目标下确定各产、销地之间煤炭调运流向和流量.其中,煤炭可调出量是指某个煤炭产地的煤炭生产量扣除煤炭消费量、煤炭存储量后,可调出供其他地区消费的煤炭量.

### (2) 煤炭动态定价.

在市场经济下,当煤炭需求下降时,煤炭生产

企业为卖出煤炭将降低煤炭价格;相反,煤炭需求上涨,企业则会上调价格,该过程称为煤炭生产企业的动态定价.由于煤炭价格影响因素较多,不同情景下煤炭价格与煤炭供求的关系或将呈现不同增长规律.

### (3) 系统优化和消费者竞争.

考虑到煤炭调运网络中有多个煤炭生产地和消费地,不同的调运方案将影响煤炭调运总成本,因此有必要从管理决策者角度进行煤炭调运方案优化.本文中,系统优化是指不考虑消费者自主选择行为,以系统中的总煤炭流通广义费用最少为目标进行煤炭调运优化.

在网络中,消费者有多个煤炭生产地可供选择,因此可结合煤炭的坑口价格和运输费用综合确定购煤来源.本文在煤炭调运方案中考虑消费者对煤炭产地的自主选择行为.本文中,消费者竞争是指动态价格下,所有煤炭消费者都准确掌握各生产地煤炭坑口价格,以使消费者自身煤炭调运的总费用最少为目标,在网络上动态选择煤炭产地的过程.

### (4) 问题假设.

本文煤炭调运方案优化问题基于以下假设:

- ① 各地煤炭消费需求已知且固定;
- ② 每个煤炭生产地和消费地间采用最短路径运输煤炭;
- ③ 不考虑各消费地对煤炭种类需求的差异.

## 2 考虑煤炭动态定价的煤炭调运组织优化模型

本文以煤炭各生产地和消费地间的煤炭调运量为决策变量,以煤炭流通过程中的总费用最小化为目标,构建煤炭调运运输组织优化模型.

### 2.1 煤炭坑口价格计算方法

设定3种煤炭坑口价格变化特征,分别为固定价格、线性动态价格和S型动态价格.3种价格特性下的煤炭价格与煤炭调运量的关系如下:

#### (1) 固定价格.

固定价格是指坑口价格为稳定、不随调运量变化而改变.煤炭坑口固定价格形式为

$$p_i(o_i) = C \quad (1)$$

式中: $o_i$ 为生产地 $i$ 的煤炭调出总量; $p_i(o_i)$ 为生产地 $i$ 的煤炭坑口价; $C$ 为煤炭坑口价格,为常数.

### (2) 线性动态价格.

线性动态价格是指煤炭坑口价格与煤炭销量占可调出量比例存在线性关系.煤炭消费量不变时,线性动态价格下煤炭坑口价格与煤炭调出量的关系为

$$p_i(o_i) = a_1(o_i/I_i) + C_0 \quad (2)$$

式中: $a_1$ 为价格上涨系数,用于衡量价格随调出量与可调出量比例波动的敏感性; $I_i$ 为煤炭生产地 $i$ 的煤炭可调出量; $C_0$ 为煤炭坑口基价,即未考虑市场波动时,生产成本所决定的基础价格,为常数.

### (3) S型动态价格.

S型动态价格是指煤炭坑口价格的增长特征符合 Logistic 增长曲线.煤炭坑口价格随销量与可调出量的比增加而不断增加,并表现出“平缓—快速增长—稳定”的特征.S型动态价格下,保持煤炭消费量不变,煤炭坑口价格与煤炭调出量的关系为

$$p_i(o_i) = \frac{K}{1 + a_2 e^{-a_3(o_i/I_i)}} + C_0 \quad (3)$$

式中: $a_2$ 、 $a_3$ 为S型动态价格曲线的形状系数,用以调整S型动态价格的突变过程; $K$ 为S型动态价格的最大价格增量.

## 2.2 动态坑口价格下的煤炭调运系统优化模型

从管理决策者角度优化煤炭调运方案,以使整个系统煤炭流通广义费用最小.

### (1) 目标函数.

基于煤炭流通生命周期,构建煤炭物流路径广义费用函数.煤炭流通过程广义费用目标函数定义为煤炭采购费用、煤炭物流成本、煤炭流通过程中外部性成本和运输时间成本之和,即

$$\min Z_1 = \sum_i^n (p_i(o_i)o_i + \sum_j^m r_{ij}T_{ij} + E_{ij} + \alpha t_{ij}) \quad (4)$$

式中:决策变量 $r_{ij}$ 为生产地 $i$ 和消费地 $j$ 间的调运量; $T_{ij}$ 为生产地 $i$ 和消费地 $j$ 间最短路径上流通过程费用; $E_{ij}$ 为从 $i$ 地到 $j$ 地间的煤炭流通过程中外部性成本,包括环保费、能源基金费和地方建设费等; $\alpha$ 为时间价值系数(VOT); $t_{ij}$ 为煤炭从 $i$ 地到 $j$ 地的运输时间; $n$ 为煤炭生产地的总数量; $m$ 为煤炭消费

地的总数量.

生产地 $i$ 和消费地 $j$ 之间最短路径上流通过程费用 $T_{ij}$ 由煤炭流通的政策性成本 $T_{ij}^{pl}$ 、煤炭运输费用 $T_{ij}^{rs}$ 、装卸费用 $T_{ij}^{hd}$ 、仓储费用 $T_{ij}^{st}$ 和损耗 $T_{ij}^{wa}$ 共5部分组成,其计算方法为

$$T_{ij} = T_{ij}^{pl} + T_{ij}^{rs} + T_{ij}^{hd} + T_{ij}^{st} + T_{ij}^{wa} \quad (5)$$

### (2) 约束条件.

该优化模型应服从以下约束条件:

#### ① 调运量 $r_{ij}$ 为非负整数.

$$r_{ij} \in \mathbf{N} \quad (6)$$

② 各生产地煤炭调出总和不大当地煤炭可调出量.

$$\sum_j^m r_{ij} \leq I_i \quad (7)$$

③ 生产地 $i$ 的煤炭调出总量为调往各地煤炭量之和.

$$o_i = \sum_j^m r_{ij} \quad (8)$$

#### ④ 各消费地煤炭总调入量等于当地煤炭需求.

$$\sum_i^n r_{ij} = D_j \quad (9)$$

式中: $D_j$ 为煤炭消费地 $j$ 的煤炭消费量.

## 2.3 考虑消费者竞争行为的煤炭调运优化模型

对消费者而言,调运中力求以最低的煤炭广义费用实现本地的煤炭消费需求,因此消费者在购买各产地煤炭时将产生一定的竞争行为,并最终形成煤炭调运方案.本节从消费者角度优化煤炭调运方案,以达到整个系统煤炭流通广义费用最小的目的.

煤炭流通过程广义费用仍定义为煤炭采购费用、煤炭物流成本、煤炭流通过程中外部性成本和运输时间成本之和.目标函数与 $Z_1$ 的差别在于煤炭采购费用.由于消费者选择煤炭产地为动态过程,各产地煤炭调出量发生变化时,消费者的煤炭采购费用将发生改变,因此煤炭采购费用应为煤炭坑口价随煤炭调出量变化的积分函数.目标函数表示为

$$\min Z_2 = \sum_i^n \left( \int_0^{o_i} p_i(o) do + \sum_j^m r_{ij}T_{ij} + E_{ij} + \alpha t_{ij} \right) \quad (10)$$

模型的约束条件设置同2.2节.

### 3 求解算法

上述模型中决策变量为各产销地间的煤炭调运量 $r_{ij}$ ,决策变量个数为 $mn$ ,各变量取值范围为 $[0, I_i]$ .由于煤炭调运方案优化问题不只是确定各生产地与各消费地间的煤炭调运量,还要涉及煤炭调运路径的选择问题,本文采用遗传算法与Floyd相结合的求解算法.求解步骤如下:

Step 1 随机生成初始种群.

Step 2 调整染色体种群为可行解.

Step 3 采用Floyd算法求解染色体中各产销地间的最短调运路径.

Step 4 计算染色体适应度值并记录最优解.

Step 5 判断是否达到最大进化代数,如是则计算结束,如否则进行下一步.

Step 6 对染色体进行选择、交叉和变异操作,并返回Step 2.

由于本文模型为最小化优化问题,需将目标函数转化为求最大值.表示为

$$\text{Fit}(X_k) = Z_{\max} - Z_k, \forall k = 1, 2, \dots, \text{popsize} \quad (11)$$

式中: $\text{Fit}(X_k)$ 为染色体 $X_k$ 对应的适应度函数值; $Z_{\max}$ 为煤炭流通广义费用的最大值.

由于本文模型的决策变量涉及多个起点和终点,因此采用Floyd算法求解煤炭调运最短路径.Floyd算法是利用动态规划的思想寻找给定加权图中多源点之间最短路径的算法.本文中,将各煤炭生产地和消费地都看作点,存在直达交通方式的两个城市认为相邻,相邻城市间有边,两个相邻节点间边的权重用运输距离表示.

### 4 多式联运组织下我国煤炭调运方案分析

以我国煤炭调运为例,研究价格特性、运输需求等因素对煤炭调运方案的影响.我国煤炭主要生产地和消费地分布如图1所示.本文采用对称S型曲线,调出量为0时,价格增量为0;调出量为50%时,价格增量为总增量的50%;煤炭全部调出时,价格增量为最大增量.结合2016年三西地区(山西,陕西,内蒙古西部地区,简称三西)煤炭坑口价格,设定模型主要参数取值如表1所示.

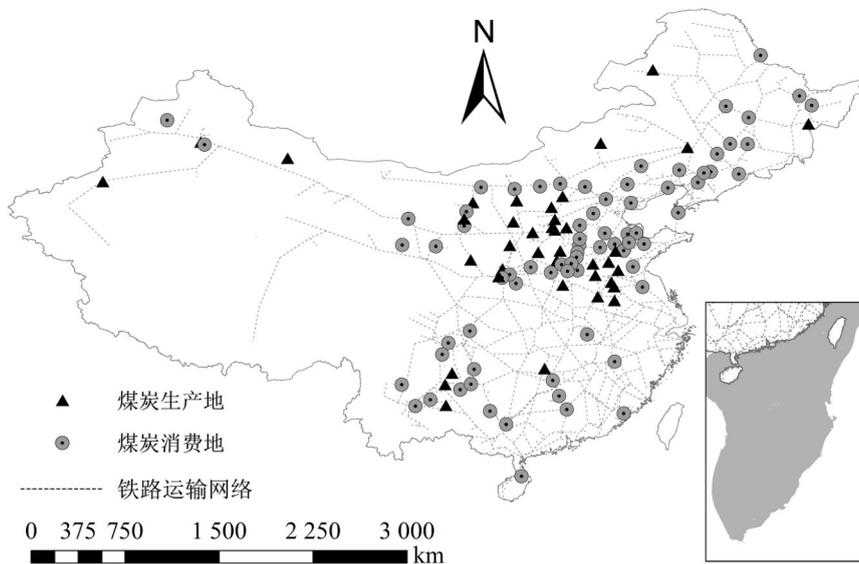


图1 煤炭生产地和消费地分布

Fig. 1 The distribution of coal production and consumption

#### 4.1 我国煤炭调运方案分析

采用前述构建的系统优化和消费者竞争两种模型,可分别获得3种价格特性下的煤炭调运优化方案.其中S型动态价格下考虑消费者竞争的煤炭调运方案如图2所示.不同价格特性下的平均费率

优化结果如表2所示.

由图2可以看出,从全国范围来看,煤炭调运较为分散,主要从三西地区将煤炭调运至全国.其中,内蒙古和陕西省的煤炭消费大多来自于本省,其他各省煤炭调运则以距离较近省份为主.将煤炭

流通生命周期的广义费用分为煤炭坑口价和煤炭流通费率两部分.由表2可以看出,固定价格下,煤炭坑口价不受煤炭调运量影响,因此系统优化和考虑消费者竞争两种情景下调运组织方案相同;采用系统优化时,动态价格与固定价格优化结果接近;考虑消费者竞争时,动态价格下的平均煤炭坑口价约为420万元/万t,低于固定价格,而流通费率则略高于固定价格.从消费地的煤炭平均供应产地数量也可以看出,动态价格下煤炭调运方案更为分散,且考虑消费者竞争较系统优化也更为分散.其原因在于,动态价格下消费者为得到最优方案,会少量牺牲煤炭流通过费用、追求更低的煤炭坑口价,从而造成流通费率占总费率的比要高于固定价格.

表1 模型参数取值

Table 1 Value of the parameters in the case study

参数	参数取值	单位
$C_0$	350	元/t
$C$	490	元/t
$a_1$	130	—
$a_2$	4.961 5×10 <sup>7</sup>	—
$a_3$	35.439 6	—
$K$	140	元/t
$E_{ij}$	100	元/t
$\alpha$	0.12	元/(t·天)
$T_{ij}^p$	80	元/t
一次装卸费用	11.2	元/t
仓储单价	2.5	元/(t·天)
运输损耗	0.7	元/t
仓储损耗	0.7	元/(t·天)

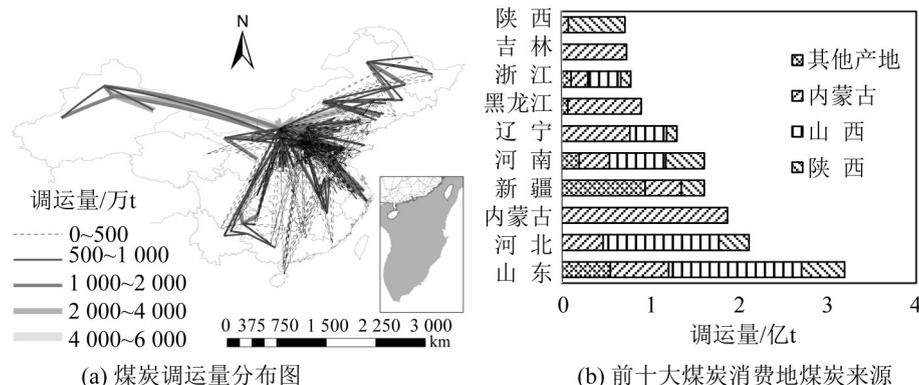


图2 S型动态价格下考虑消费者竞争的煤炭调运方案

Fig. 2 Optimization result of coal allocation with dynamic price by considering consumer competition

表2 固定价格和动态价格下煤炭调运优化结果

Table 2 Optimization result of coal allocation under fixed price and dynamic price

调运方案指标	固定价格	线性动态价格		S型动态价格	
		系统优化	消费者竞争	系统优化	消费者竞争
平均煤炭坑口价/(万元/万t)	490	490	420.09	490	420.09
煤炭坑口价占总费率比例/%	53.26	53.23	48.44	53.15	48.32
平均流通费率/(万元/万t)	429.97	430.49	447.13	431.97	449.36
流通费率占总费率比例/%	46.74	46.77	51.56	46.85	51.68
生命周期平均总费率/(万元/万t)	919.96	920.49	867.22	921.97	869.45
消费地平均供应产地数量	2.75	5.31	6.65	6.69	8.39

4.2 煤炭供销比灵敏度分析

保持各地区煤炭消费量不变,当全国煤炭可调出量与消费量的比从100%~250%变化时,3种价格特性下优化后的煤炭流通生命周期总费率如图3所示.

从图3可以看出,随着煤炭可调出量与消费量比例增加,总费率不断下降,且动态价格下总费率减少程度要高于固定价格.其原因在于,当煤炭坑

口价为固定价格时,随着煤炭可调出量增加,消费者可选择近距离煤炭资源的机会大大增加,从而减少煤炭流通成本;当煤炭坑口价为动态价格时,煤炭流通成本会随可调出量与消费比的增加而逐步下降,且当煤炭调出量占可调出量比例较低时,煤炭坑口价格也将少量下降.此外,考虑消费者的竞争行为时,煤炭流通总费率较系统优化更低,且随着煤炭可调出量与消费比的增加,考虑消费者

竞争较系统优化的成本减少幅度逐步降低.其原因在于,当可调出量更为富裕时,消费者可调用资源

更多,能够选择较低坑口价格的煤炭,因此竞争的优势不再明显.

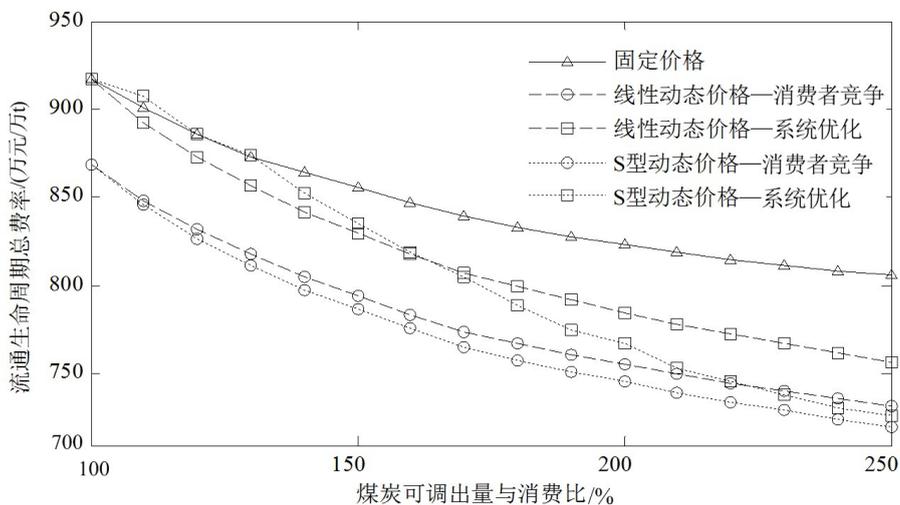


图3 不同价格特性下煤炭可调出量与消费比变化对流通总费率的影响

Fig. 3 Influence of the ratio of available coal and consumption coal on total circulation rate under different pricing

## 5 结论

通过上述模型及案例分析,可以得到如下结论:

(1) 动态价格下消费者的煤炭坑口价低于固定价格,且在考虑消费者竞争行为时的消费者煤炭坑口价明显低于系统优化后的结果,动态价格下的煤炭调运组织更为分散.

(2) 随着煤炭可调出量与消费量比的增加,动态价格较固定价格下的煤炭流通总费率下降更多,且考虑消费者的竞争行为的煤炭流通总费率较系统优化更低.

可见,在优化煤炭调运方案时,同时考虑煤炭坑口价格的动态变化特性和消费者的竞争行为,能使得到的调运方案更接近于实际,且优化后的煤炭坑口价格和煤炭流通过费用也更低.

### 参考文献:

[1] 唐继孟,孙全欣,赵欣苗,等. 枢纽延误对公铁联运竞争力的影响分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(6): 27-32. [TANG J M, SUN Q X, ZHAO X M, et al. Analysis of the impacts of hubs delay on rail-road intermodal transport[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(6): 27-32.]

[2] 侯振挺,李致中,李慰萱. 煤炭调运的数学方法[J]. 铁道运输与经济, 1979(1): 82-88. [HOU Z T, LI Z Z, LI W X. Mathematical modeling for coal input and output[J]. Railway Transport and Economy, 1979(1): 82-88.]

[3] ROBERT D MILES, KUMARES C SINHA. A regional railroad network optimization model for coal transportation[J]. Transportation Research Part B, 1981, 15(4): 227-238.

[4] 刘敬青. 我国煤炭产销运空间格局分析[J]. 综合运输, 2009(12): 61-65. [LIU J Q. Analysis on the spatial pattern of coal production and consumption in China[J]. Comprehensive Transportation, 2009(12): 61-65.]

[5] 赵媛,于鹏. 我国煤炭资源空间流动的基本格局与流运输通道[J]. 经济地理, 2007, 27(2): 196-200. [ZHAO Y, YU P. The spatial pattern of coal flow and transport channels in China[J]. Economic Geography, 2007, 27(2): 196-200.]

[6] 李智. 基于蚁群算法的煤炭运输优化方法[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(3): 126-129. [LI Z. Optimization model of coal transportation based on ant colony algorithm[J]. China Railway Science, 2004, 25(3): 126-129.]

[7] ZHANG YANZHI, LV TAO, FENG YING. An empirical study on China's inter-provincial coal distribution by railway[C]. The 3rd International Conference on Computational Intelligence and Industrial Application, 2010.