

The Research of Hazardous Chemicals Transportation Risk Assessment Based on Classification

Liping Liu, Liangliang Yang, Jiandong Si

East China University of Science & Technology, Shanghai
Email: yangllwei881218@163.com

Received: Apr. 8th, 2013; revised: Apr. 18th, 2013; accepted: Apr. 29th, 2013

Copyright © 2013 Liping Liu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: With China's sustained and rapid economic development, the demand for hazardous chemicals is increasing. Due to the special nature of hazardous chemicals, the occurrence of an accident may lead to a more destructive result than the general transport accidents, so the transportation of hazardous materials needs special attention. Based on this background, this article analyses the risk of hazardous chemicals transportation through risk assessment model. First of all, this paper considers all kinds of cost in the transportation of hazardous chemicals, then classifies the transportation risk into different kinds, and by the ways of certain function forms this into cost, which will make hazardous chemicals transport cost and risk cost in the same objective function. This model can be used for the government to formulate policies to reduce the risk and help the enterprise choose a reasonable path lower the cost. This article considers more factors in the risk assessment model, thereby increasing the accuracy and practical significance.

Keywords: Hazardous Materials; Transportation Risk; Risk Assessment; Classification

基于分级的危险化学品运输风险 评价研究

刘丽萍, 杨亮靓, 斯剑栋

华东理工大学, 上海
Email: yangllwei881218@163.com

收稿日期: 2013年4月8日; 修回日期: 2013年4月18日; 录用日期: 2013年4月29日

摘要: 随着我国经济持续快速的发展, 对危险化学品需求快速增加。由于危险化学品其特殊的性质, 一旦发生事故将比一般的运输事故有更大的破坏性, 因此在运输中需要给予特别的关注。基于这样的背景, 本文通过风险评价模型对危险化学品运输中的风险进行了分析。首先本文考虑了危险化学品运输中会发生的各种成本, 然后将运输风险分级处理, 并通过一定的函数形式转化为成本, 从而将危险化学品的运输成本与风险成本在同一目标函数中表示, 该模型可为政府制定政策减少风险以及企业选择合理的路径降低成本提供依据。本文将更多的因素考虑到风险评价模型中, 从而增加了其准确性和实际意义。

关键词: 危险化学品; 运输风险; 风险评价; 分级

1. 前言

1.1. 背景

近年来,随着我国经济持续快速的发展,危险化学品在人们的生产生活中起着日益重要的作用,危化品货物运输需求快速增加,与之相伴的是运输风险的增加,而在我国危化品运输供给和运输质量没有得到很好的改善,运输安全事故不断发生,因此对危险化学品运输的管理进行研究,不断提高安全意识和管理水平,维护社会经济健康稳定发展,具有重要的现实意义。

我国目前有 7000 多种危险化学品,其中常用的有 2000 多种。这些物品从生产、储存领域向消费领域转移过程中,主要以车辆道路运输为主。由于危险化学品运输具有易燃、易爆、有毒和具有腐蚀性的特点,运输过程中任何小的状况,如受热、遇到明火、碰撞、振动、摩擦等,都会引起爆炸、火灾、中毒、辐射等重大事故风险。因此运输危险化学品的车辆仿佛“流动的定时炸弹”,稍有不慎,就可能引起灾难性后果。截至 2010 年底,全国共有危险化学品生产企业 2.2 万家,生产 7700 多个危险化学品品种。近年来,危险化学品安全生产状况虽然持续好转,但形势依然严峻,重大事故时有发生。如 2008 年广西河池维尼纶集团“8·26”爆炸事故造成 20 人死亡;2009 年山东临沂金兰物流“9·10”爆炸事故造成 18 人死亡;2010 年大连中石油国际储运有限公司“7·16”原油罐区输油管道爆炸事故,造成原油大量泄漏并引起火灾,周边海域受到严重污染。据统计,2006~2010 年全国共发生危险化学品事故 490 起,造成 879 人死亡,其中较大事故 70 起,死亡 310 人;重大事故 5 起,死亡 96 人^[1]。

由此可见,对于危险化学品运输风险的评估,以及有效的控制危化品运输中存在的危害,对于人民的生命财产安全有着极其重要的价值。

1.2. 文献综述

在危险化学品运输风险评价中,由于影响危险化学品道路运输风险因素很多,再加上随机性和不确定性的影响,定量风险评价比较复杂,至今没有统一的风险评估方法。张江华和赵来军^[2](2007)从事故率估计

和事故后果模拟分析两个维度来分析危险化学品运输风险;张超等^[3](2009)综合层次分析法和案例相结合的方法,考虑事故直接后果、次生衍生因素以及应急救援等因素,提出应急救援风险抵消的建模方法。为了更好的使得风险评价更加准确、有效,国内外学者提出过几个基本的模型来使得风险评价定量化,在之后的研究中也由许多人在此基础上做出了模型的优化。比如,Revelle et al.^[4](1991)提出用可能的暴露人数来度量危险化学品运输风险;Abkowitz et al.^[5](1992)提出了反映感知风险的度量模型;Erkut and Verter^[6](1995)在总结前人研究的基础上提出了用“期望损失”来表示风险,认为风险等于事件概率与事件所带来后果的乘积;Sivakumar et al.^[7](1995)针对该类问题提出了条件风险(事故发生后的风险值);Erkut and Ingolfsson^[8](2000)针对危险化学品运输事故的低概率高危害的特征,提出了 3 个基于大灾害规避的风险度量模型,分别用运输路径上的最大暴露人口、最小期望损失方差和最小期望效用来度量运输风险;Fabiano et al.^[9](2002)考虑了与路径独立和与路径相关的两种信息,综合了内在因素(隧道、弯曲半径、斜率、路的特征等)和与运输条件相联系的外在因素(运输车辆等),提出了一般危险化学品运输风险分析的框架;Erkut and Ingolfsson^[10](2005)又针对传统模型提出了三个改进的风险模型,通过改进事故率使得模型更加准确。

在路径选择中,Wijeratne et al.^[11](1993)在随机网络下对有害物品运输的路径选择进行了研究,给出了随机条件下路径的比较原则,并设计了求解的算法;Patell^[12](1994)对有泄漏危险的化学品的最优运输路径进行了研究;Kara et al.^[13](2004)先后使用了类似的危险品运输双层规划模型并使用库恩-塔克条件提出该模型的一个简单解法;邵辉等^[14](2010)将多目标优化问题与危险化学品运输紧密联系起来,建立基于多目标优化的危险化学品运输路径模式;Chang et al.^[15](2005)在时变随机条件下对有害物品运输的路径选择问题进行了研究,建立了运输时间、人口覆盖率和事故率的概率分布函数,然后给出了一种求解的算法;Bianco et al.^[16](2009)采用双层规划研究了道路路化学品运输网络的构建问题,将双层规划模型转化为单层混合整数规划问题,用商业软件进行求解;Rojee et al.^[17](2010)运用蚁群算法提出了一种后启发式算法

来解决多目标路径优化的问题；储庆中等^[18](2011)通过对危险品运输网络设计双重约束特性的分析，以及对不同危险品运输网络设计方法进行比较，建立起一个双层规划模型，兼顾政府与运输者双方不同的利益目标。

单纯考虑风险或是路径选择的危险化学品运输显然是不合理的，因此也有学者结合危险化学品运输风险分析对路径选择做了研究。List^[19](1991)等对危险品运输风险评估和选线进行了综合分析，概述了20世纪80年代的主要研究方法；John^[20](1995)将风险、运输平衡及费用情况建立危险化学品公路运输的多目标风险评估方法；吴宗之^[21](2007)等基于危险品道路运输过程风险分析，系统地研究了路径优化选线问题，提出了危险品道路运输路径优化的一般程序，构建了优化选线评价指标体系和决策框架；Verter and Kara^[22](2008)同时考虑了运输风险和成本，提出了一个一般的整数规划模型来寻找风险和成本的平衡来解决问题，之后又分别介绍了美国和加拿大的两个案例；张敏等^[23](2008)建立了基于路网危险度瓶颈限制是危险品的选线多目标模型，并给出了启发式的算法；Kazantzi et al.^[24](2011)在建立了风险已知条件下风险成本最小的多周期运输模型，为路径选择做出了依据。

在以上的文献中，学者们较多的从单方面研究危险化学品，较少的将更多的因素考虑到运输模型中，同时也没能很好的将风险与运输成本问题得到很好的结合。本文将针对这些方面，做出研究。

2. 问题描述

研究危险化学品运输风险并对其建立模型进行评价，首先需要了解其风险的来源。

根据已有的知识构成，在危险化学品运输的过程中，风险的来源可以从三个方面来归纳，即人、物和环境。具体来说，人主要指运输人员的素质和管理人员的管控能力；物主要指危险化学品的特性以及运输的条件；环境主要指环境的特点，包括环境的脆弱性，存在的不安全因素等。

在运输过程中，人是占很重要的因素之一。在危险化学品运输中的人具体可以分为两类人，即运输人员和管理人员。运输人员的年龄，对天气及道路情况

的经验，当时的情绪及心理素质，受培训程度、驾驶经验等都会对运输中风险产生较大的影响。管理人员的应急指挥能力、处理事故的经验，当地的应急救援能力及救援速度等同样会对运输中风险的程度产生较大影响。这些因素只要加以控制，建立合理的制度是可以避免的。

从物的方面来说，危化品的特性，是易燃易爆的还是有毒害的，抑或是腐蚀性的，放射性的等都会产生不同的风险。而运输的条件主要是指运输车辆的状况以及装载危化品的容器及包转等在运输过程中是否会产生反应而导致风险的产生。

环境主要包括沿途的生态环境，即人口密度、聚集程度；道路交通条件，即路面情况、道路线形的复杂性、通行的阻力、线路的事故率等；气候条件，即运输过程中的温度、湿度、风向、风力等对危化品产生的影响。

物和环境可以被看作是客观的因素，也即我们常说的外因。外因不可控的因素很多，是很难通过制度被避免的，因此对外因的研究更有意义和价值。因此本篇文章主要从危险化学品运输过程中物以及环境两个外因方面来进行分析。

3. 模型及检验

国内外很多学者针对危险化学品运输风险评估模型都做过研究，主要有8种常见的风险模型，都有一定的合理性及缺陷。最近几年又有很多学者提出了不少改进的模型并对其的合理性进行了论证。

Erkut等介绍了危险品道路运输风险评估模型的3个性质：1) 模型满足单调性，当现有路线上增加一个或多个路段时，总的运输风险不会减少，路段的距离、时间、成本等属性均满足这一性质，即

$P_1 \in P_2 \Rightarrow V(P_1) \leq V(P_2)$ ；2) 子路径最优性质，一条路径最优，它的路径的子集也是最优路径，即

$P \in P_1 \in P_2$ 时， $V(P_2) = \min V \Rightarrow V(P_1) = \min V(P)$ ；

3) 如果评价指标是多维的，也应该满足单调性定理。

3.1. 建立模型

危险化学品运输过程中存在很多影响因素，其随机性和不确定性很大，定性分析很难准确评价一条路径的优劣。但是，将各种可能存在的风险的因素通过

一定的标准进行分级并标准化,使得模型可以从定性研究转为定量研究,从而提高模型的实际可行性。

评价模型:

$$Z = k_i * \sum_i C_i^s + (1 - k_i) * \left[C_i^z + \sum_i P_i * C_i^j \right]$$

k_i ——介于 0 和 1 之间的风险偏好系数;

P_i ——第 i 条路上的事故率。

目标函数是一个关于运输成本、直接风险成本、间接风险成本以及考虑决策者偏好的函数,决策者可以根据自身的特殊条件选择风险大或者风险小的路径,当决策者偏好风险的时候, K 值将大于 0.5, 计算结果更多的反应运输成本带来的影响,而当决策者是风险规避型的时候,将选择较小的 K 值,这样将把风险的因素更多的考虑进去,最终目的是使这个成本函数值最小。

某路段的运输成本为

$$C_i^s = C_0 + d_i * (C_i^1 + C_i^2)$$

其中, C_i^s ——选择某路径第 i 段的运输总成本;

C_0 ——运输过程中所必须付出的固定成本,包括人、运输设备等固定的开支;

C_i^1 ——选择第 i 段的单位运输成本;

C_i^2 ——选择第 i 段的单位时间成本;

d_i ——第 i 段的距离。

此式表示决策者决定完成一次运输必须付出的成本。这个成本包括三个部分,即运输中的人员、运输车辆、过路费等固定的开支;一次运输的成本,与单位运输成本与运输距离两个变量有关;一次运输的时间成本,所选路段的路况决定其时间成本,主要是指该路段的限速所对应的单位成本和距离这两个变量。

某路段的运输直接风险成本

$$C_i^z = (p + a) * Q$$

其中, C_i^z ——运输的直接风险值;

p ——每单位危化品的价格;

a ——每单位危化品的利润;

Q ——运输危化品的总量。

此式即运输的直接风险成本,包括事故发生后所运输危化品的损失,与每单位危化品的价格和运量有关,除此之外还包括运输危化品应得的利润。

某路段的运输间接风险成本

$$R_i = I_i * F_q * F_d * F_i * V_i$$

$$C_i^j = f(R_i)$$

$$F_i = (F_{i1}^2 + F_{i2}^2 + F_{i3}^2) / (F_{i1} + F_{i2} + F_{i3})$$

$$V_i = (V_{i1}^2 + V_{i2}^2 + V_{i3}^2) / (V_{i1} + V_{i2} + V_{i3})$$

其中, R_{ij} ——运输的间接风险;

I_i ——道路级别,见表1;

F_q ——危化品运量因素,见表2;

F_d ——事故地点与居民区之间的距离因素,见表3;

F_i ——运输路线因素,包括路况、气象条件、影响的人口数量,见表4;

V_i ——危化品风险级别,见表5;

C_i^j ——运输的间接风险值,即关于间接风险的单调非减函数。

此式即为运输危化品的间接风险成本。先将间接风险的因素都分为5个等级,决策者可以根据自身的情况算出风险值,不同的风险值对应不同的成本,假设这种函数关系呈单调上升的趋势,从而将风险值量化为成本,可以与运输成本和直接风险成本同时进行运算分析。

Table 1. The road level

表1. 道路级别

等级	级别	宽度/m	车速km/h
4	支路	14~18	30
3	次干路	20~24	40
2	主干路	30~40	40~60
1	快速路		60~80
0	其他		

Table 2. The volume level

表2. 运输量级别

等级	危化品运输量/kg	运输的容器设备
4	>5000	大卡车、罐车,可能全部泄露
3	1000~5000	桶装,全部或部分泄露,与桶量有关
2	100~999	小车容器或瓶装
1	10~99	
0	<10	

Table 3. Distance from residential level
表3. 与居民区距离级别

等级	距离阈值/m
4	<500
3	500~1500
2	1501~5000
1	5001~10,000
0	>10,000

Table 4. Transport route
表4. 运输路线

等级	路况	气象	人口
4	高密度(重型车辆 > 125辆/天)	雷电天气	城市, 居民区
3	中高密度(>1250辆/时)	雨雪冰雹	城市周边, 人口较多
2	中密度(<1250辆/时)	雨雾天气	乡村, 分散居民区
1	中低密度(500, 1250辆/时)	天气状况良好	山区, 人迹罕至
0	低密度(<500辆/时)	其他	其他

Table 5. Level of dangerous chemicals
表5. 危化品级别

等级	健康危害	闪点温度	反应活性
4	致死	≤73 F	分解爆炸
3	极端危害	≤100 F	加热或冲击分解
2	危害	≤200 F	易剧烈反应
1	危害较轻	>200 F	加热不稳定
0	常规物质	不燃	稳定

3.2. 模型检验

模型建立对于评价危险化学品运输风险的评价有着至关重要的意义, 但是一个模型的好坏对于风险评价的准确性有着更为重要的价值, 以下将简单证明上述模型的可行性, 以使得风险评价能够真正发挥作用。

一个有效的风险模型应该满足三个条件, 即: 1) 模型满足单调性, 当现有路线上增加一个或多个路段时, 总的运输风险不会减少, 路段的距离、时间、成本等属性均满足这一性质, 即

$P_1 \in P_2 \Rightarrow V(P_1) \leq V(P_2)$; 2) 子路径最优性质, 一条路径最优, 那么它的路径的子集也是最优路径, 即 $P \in P_1 \in P_2$ 时, $V(P_2) = \min V \Rightarrow V(P_1) = \min V(P)$ 。

3) 如果评价指标是多维的, 也应该满足单调性定理。

因此此模型不涉及多维, 所以以下将证明前两条性质。

性质一: 单调性定理。

现有路线上增加一个或多个路段时, 总的运输风险不会减少, 根据已有模型, 即证 $Z(i) \leq Z(i+1)$ 。

证明:

$$\because k \in (0,1), 1-k \in (0,1);$$

\therefore 目标函数 Z 的取值与 k 值无关, 即只需判断 C_i^s , C_i^z 和 C_i^j 的单调性。

$$\because C_i^s = C_0 + d_i * (C_i^1 + C_i^2);$$

其中, C_0 为固定成本, 与路段增减无关;

$$\therefore \sum C_i^s \leq \sum C_i^s。$$

$\because C_i^z$ 是事故发生后的直接风险值, 包括货物损失和不能及时交货损失, 与路段无关; 而 C_i^j 是关于间接风险的单调非减函数。

$\therefore Z(i) \leq Z(i+1)$ 即此目标函数满足单调性的性质。

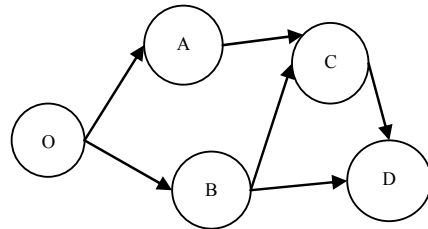
性质二: 子路径最优性质。

4. 算例分析

现要将危险品液化石油气从O点运输到D点, 具体数据(括号中的数据为 (P_i, d_i))如表6~9可见, 运输车辆为10 T罐车, 单批次运输总量大于5000, 已知固定成本为10,000, 单位运价为17, 单位利润为30, 天气状况良好, 风险值是关于风险的分段函数, 其函数形式为:

$$f = \begin{cases} C_i^s & R_i \leq 150 \\ 10C_i^s & 150 < R_i \leq 300 \\ 20C_i^s & R_i > 300 \end{cases}$$

设定该公司是成本偏好的, 偏好系数为 $k = 0.7$ 。路径如下图:



根据上述提供的条件, 可以得出:

1) O-A-C-D路径中 $Z_1 = 192554$;

Table 6. Probability and length
表6. 概率和长度

	A	B	C	D
O	(0.61000)	(0.51100)		
A			(0.8800)	
B			(0.4800)	(0.81500)
C				(0.71200)

Table 7. Transportation time and cost
表7. 运输成本时间成本

	A	B	C	D
O	(2, 1)	(2, 1)		
A			(4, 0.4)	
B			(3, 0.7)	(5, 0.1)
C				(3, 0.8)

Table 8. The distance of the road level and residential area
表8. 道路级别与居民区的距离

	A	B	C	D
O	(支路, 450)	(支路, 700)		
A			(主干路, 1100)	
B			(次干路, 900)	(快速路, 1800)
C				(主干路, 1250)

Table 9. Road conditions and population
表9. 路况和人口

	A	B	C	D
O	(中, 山区)	(中, 乡村)		
A			(中高, 郊区)	
B			(中高, 乡村)	(高, 城区)
C				(中高, 郊区)

2) O-B-C-D路径中 $Z_2 = 59100$;

3) O-B-D路径中 $Z_3 = 18261.9$ 。

通过计算比较可知, $Z_3 < Z_2 < Z_1$, 因此, 该企业会选择路径O-B-D。

5. 总结

5.1. 管理意义

危险化学品在现代社会有着不可替代的作用, 但是其危险性也让国家和众多企业为之头痛, 尤其是在运输过程中, 各地事故频发的事件报道也让我们不得

不高度重视这个问题, 因此对危险化学品运输风险的研究也是很多学者一直持续关注方向。

本文通过将运输过程中的成本因素和风险因素同时考虑到风险评价模型中, 使得企业在做决策的时候, 在考虑成本最低的同时也能兼顾考虑风险方面的因素, 从而选择最优的决策使得企业的成本最小, 风险最低, 减少因运输过程中的意外而导致的对人、对环境的破坏。而作为政策的制定者, 也可以通过加大惩罚力度, 以迫使企业更多的将风险的因素考虑路径选择中, 以降低意外事故的发生的概率, 减少人为灾害的发生, 最大可能的保护人民群众的生命财产安全。

5.2. 创新点

本文主要在之前研究危险化学品风险评价的八种常见模型的基础上加以扩展形成新的评价模型, 并对模型的可行性进行了分析, 通过证明和实例验证的方式对此模型的可行性进行了证明。

本文主要的创新点在于以下三点: 1) 将风险分级处理并进行量化。把不同类型的风险进行分级处理, 并将不同标准的风险等级通过函数的方式表达出来, 从而形成风险值, 再通过假设的函数形式使得风险值量化, 从而把运输成本和运输风险可以同时量化在一个目标风险值中; 2) 引入风险权重系数。决策者可以根据企业的特点和性质来选择风险系数的大小, 即决定了是冒险、规避风险, 还是选择风险中立。从而使得评价模型更加能够代表决策者自身的特点和要求; 3) 模型中考虑更多因素。模型中不仅考虑了运输成本, 还将时间成本也纳入考虑的范围。将风险分为直接风险和间接风险, 即包括了事故发生后所运输货物的损失、不能按时将交货的损失, 还将对周边环境、人口的影响考虑到了目标函数中。

5.3. 扩展及展望

本文应用较为简单的模型将不同的因素考虑到危险化学品运输风险的评价和路径的选择中去, 一些风险等级的划分有待进一步深入的研究, 其考虑因素也不够全面, 在今后的研究中需要继续深入探讨。

参考文献 (References)

[1] 任常兴, 吴宗之. 危险品道路运输风险分级指数法研究[J].

- 安全与环境学报, 2006, 6(4): 126-129.
- [2] 张江华, 赵来军. 危险化学品运输风险分析[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(12): 117-125.
- [3] 张超, 陈晓, 陈建国. 考虑应急救援的危化品泄露事故后果风险评估[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49: 1-5.
- [4] C. Revelle, J. Cohon and D. Shobrys. Simultaneous siting and routing in the disposal of hazardous wastes. *Transportation Science*, 1991, 25(2): 262-271.
- [5] M. Abkowitz, M. Lepofsky and P. Cheng. Selecting criteria for designating hazardous materials highway routes. *Transportation research*, 1992, 1333: 30-35.
- [6] E. Erkut. On the credibility of the conditional risk model for routing hazardous materials. *Operation Research Letters*, 1995, 18(1): 49-52.
- [7] R. A. Sivakumar, R. Batta and M. H. Karwan. A multiple route conditional risk model for transporting hazardous materials. *Information Systems and Operational Research*, 1995, 33(1): 20-33.
- [8] E. Erkut, A. Ingolfsson. Catastrophe avoidance models for hazardous materials route planning. *Transportation Science*, 2000, 34(2): 165-179.
- [9] B. Fabiano, F. Cmvò, E. Palazzi, et al. A framework for risk assessment and decision-making strategies in dangerous goods transportation. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, 93(1): 1-15.
- [10] E. Erkut, A. Ingolfsson. Transport risk models for hazardous materials: Revisited. *Operations Research Letters*, 2005, 33(1): 81-89.
- [11] A. B. Wijeratne, M. A. Turnquist and P. B. Mirchandani. Multi-objective routing of hazardous materials in stochastic networks. *European Journal of Operational Research*, 1993, 65(1): 33-43.
- [12] M. H. Patel, A. J. Horowitz. Optimal routing of hazardous materials considering risk of spill. *Transportation Research A*, 1994, 28(2): 119-132.
- [13] B. Y. Kara, V. Verter. Designing a road network for hazardous materials transportation. *Transportation Science*, 2004, 38(2): 188-196.
- [14] 邵辉, 李晶, 杨丽丹. 基于多目标优化的危险化学品运输模式探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(2): 51-55.
- [15] T. Chang, L. K. Nozick and M. A. Turnquist. Multi-objective path finding in stochastic dynamic networks with application to routing hazardous materials shipments. *Transportation Science*, 2005, 39(3): 383-399.
- [16] L. Bianco, C. Massimiliano and G. Stefano. A bilevel-flow model for hazmat transportation network design. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2009, 17(2): 175-196.
- [17] P. Rojee, E. Taniguchi and T. Yamada. Ant colony system based routing and scheduling for hazardous material transportation. *Procedia Social and Behavioral Science*, 2010, 2(3): 6097-6108.
- [18] 储庆中, 刘玉兵, 吴国君. 基于遗传算法求解的危险品道路运输线路优化双层规划模型[J]. 交通信息与安全, 2011, 29(2): 95-99.
- [19] G. List, P. B. Mirchandani. An integrated network/planner multiobjective model for routing and siting for hazardous materials and wastes. *Transportation Science*, 1991, 25(2): 146-156.
- [20] C. John. A model to assess risk, equity and efficiency in facility location and transportation of hazardous materials. *Location Science*, 1995, 3(3): 187-201.
- [21] 任常兴, 吴宗之. 危险品道路运输风险评估与优化选线的研究进展[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(3): 127-131.
- [22] V. Verter, B. Kara. A path-based approach for hazmat transport network design. *Management Science*, 2008, 54(1): 29-40.
- [23] 张敏, 杨超, 杨珺, 马云峰. 危险品集成物流管理系统选址-选线模型研究[J]. 管理科学学报, 2008, 11(1): 59-67.
- [24] V. Kazantzi, N. Kazantzis, C. Vassilis and G. Vasiliki. Gerogianis transportation model. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2011, 24(6): 1-7.