doi：10.3969/j.issn.1002－0268.2015.06.023

道路甩挂运输系统安全水平评价

赵鲁华[1]，曹庆贵[2]，李玉善[1]，任传祥[1]
（1. 山东科技大学 交通学院，山东 青岛 266590；
2. 山东科技大学 矿业与安全工程学院，山东 青岛 266590）

摘要：为了分析在我国目前的政策、技术等环境水平下甩挂运输系统的安全水平，在分析其发展风险因素的基础上，将甩挂运输系统划分为子系统。建立了各子系统与系统安全水平之间的因果关系模型，并分析了因果反馈环。绘制了系统动力学流图，并进行了仿真分析。结果表明：甩挂运输系统安全水平2013年为81.673 7，2015年为89.461 3，等级为良。这说明随着运输组织调度能力、安全技术水平的提高和政策环境的改善，系统安全水平偏低但会不断提高，在发展初期需要加强安全管理。通过子系统的灵敏性分析发现：甩挂运输政策环境和甩挂车辆安全技术水平是对系统安全水平影响较大的因素，因此应尽快完善相关政策法规，并提高对甩挂车辆的安全投入，以促进甩挂运输的安全、快速发展。

关键词：交通工程；甩挂运输系统；系统动力学；安全水平；模型；仿真
中图分类号：U492.8 **文献标识码**：A **文章编号**：1002－0268（2015）06－0148－06

Assessment of Safety Level of Highway Trailer Pick-up Transport System

ZHAO Lu-hua[1], CAO Qing-gui[2], LI Yu-shan[1], REN Chuan-xiang[1]
(1. School of Transportation, Shandong University of Science & Technology, Qingdao Shandong 266590, China;
2. School of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science & Technology, Qingdao Shandong 266590, China)

Abstract: In order to analyze the safety level of highway trailer pick-up transport system in the environment of Chinese current policy and technology, the trailer pick-up transport system is divided into subsystems according to the analyzed risk factors of development. The causal relationship model between each subsystem and system safety level is developed, and the causal feedback loop is analyzed. The system dynamics flow diagram is given, and the simulation analysis is made. The result shows that the safety level of trailer pick-up transport system is 81.673 7 in 2013 and 89.461 3 in 2015, the rank is good. It shows that with the improvement of organization scheduling ability, safety technical level and policy environment, the system safety level is relatively lower, but it would be improved continuously and the safety management needs to be strengthened in the early stage of development. Through the sensitivity analysis of subsystems, it is found that the policy environment and the vehicle safety technology level are the main factors that influence the overall system safety level of trailer pick-up transport. Therefore it should perfect the related policies and rules as soon as possible and increase the safety investment on trailer pick-up vehicles to promote the safety and rapid development of trailer pick-up transport.

Key words: traffic engineering; trailer pick-up transport system; system dynamics; safety level; model; simulation

收稿日期：2014－04－25
基金项目：国家自然科学基金项目（51474138）
作者简介：赵鲁华（1979－），女，山东潍坊人，博士．（luhuazhao@163.com）

0　引言

目前道路甩挂运输在我国处于试点运营时期。由于目前甩挂运输组织管理能力差，车辆安全技术水平差，在甩挂运输组织模式下牵引车使用强度增大[1-2]等因素，限制了甩挂运输的发展，使甩挂运输具有更大的风险隐患。道路甩挂运输安全系统中涉及车辆、场站、人员、环境、政府、企业等因素，各因素之间、各因素与系统及系统与外界环境之间存在各种复杂的反馈关系及很多不确定性，传统风险分析方法难以定量分析。对这些复杂的反馈关系，需要用系统的、动态的分析方法才能准确把握其系统安全水平的发展趋势，系统动力学能从宏观角度出发，动态地、全面地分析道路甩挂运输安全系统内部各影响因素的变化规律，并可分析单个要素的变化对整体安全的影响和作用[3-7]。因此采用系统动力学构建道路甩挂运输系统动力学仿真模型，以深入分析其系统内部的反馈结构、机制及动态变化规律，动态预测系统安全水平的发展趋势，并研究不同因素的影响程度，找到主要风险因素，为甩挂运输的安全发展指出工作重点。

1　道路甩挂运输系统安全水平因果关系模型

1.1　安全水平因果关系模型

通过对山东省甩挂试点企业调查发现，目前甩挂运输系统的风险主要为交通事故，因此把交通事故率作为衡量甩挂运输系统安全水平的指标，以分析各影响因素之间的相互关联性。根据调查，选取甩挂车辆系统安全水平、人员安全水平、基础设施安全水平、安全管理水平、政策法规安全监管、自然环境、安全科技水平作为道路甩挂运输系统安全水平的影响因素[8]。这些因素相互影响，组成了甩挂运输安全系统。自然环境是系统安全的外部影响因素，提高自然灾害的安全预警及风险防范能力、装备设施的安全水平等能降低自然灾害水平，可把自然环境归为安全管理因素方面。安全科技水平代表了一个时期内的科学技术水平，属于外部因素，可不作为深入分析的因素。根据调查分析，政策法规、安全监管在甩挂运输发展初期的影响是不可忽视的，因此作为重要分析因素。基于以上风险因素分析，采用 VENSIM 软件建立道路甩挂运输安全系统的因果关系模型，见图 1。

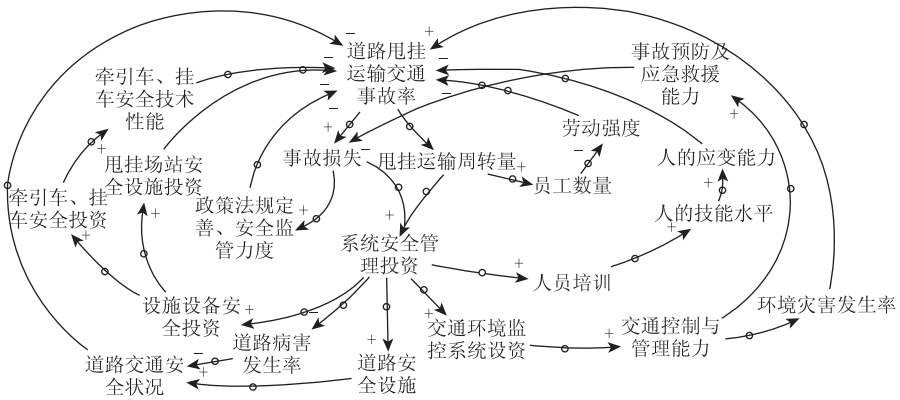

图 1　道路甩挂运输系统安全的因果关系图

Fig. 1　Causal relation of safety of trailer pick-up transport system

1.2　因果关系模型分析

由系统动力学可知，系统的性质和行为主要取决于系统中存在的反馈回路。该因果关系模型中的反馈回路主要有：

（1）道路甩挂运输交通事故率→ + 事故损失→ + 系统安全管理投资→ + 设施设备安全投资→ + 甩挂场站安全设施投资→ - 道路甩挂运输交通事故率

（2）道路甩挂运输交通事故率→ + 事故损失→ + 系统安全管理投资→ + 设施安全投资 + 牵引车、挂车安全投资→ + 牵引车、挂车安全性能→ - 道路甩挂运输交通事故率

（3）道路甩挂运输交通事故率→ + 事故损失→ + 系统安全管理投资→ + 道路及设施安全→ + 道路交通安全状况→ - 道路甩挂运输交通事故率

（4）道路甩挂运输交通事故率→ + 事故损失→ + 系统安全管理投资→ + 人员培训投资→ + 人的技能水平、应变能力→ - 道路甩挂运输交通事故率

（5）事故损失→ + 系统安全管理投资→ + 交通环境安全监控投资 + 交通控制管理能力 + 事故预防及应急救援能力 - 事故损失

（6）道路甩挂运输交通事故率→＋事故损失→＋系统安全管理投资→＋政策法规完善、安全监管力度→－道路甩挂运输交通事故率

（7）道路甩挂运输交通事故率→＋甩挂运输周转量→＋员工数量→－劳动强度→－道路甩挂运输交通事故率

（8）道路甩挂运输交通事故率→＋事故损失→＋系统安全管理投资→＋交通环境安全监控投资→＋交通控制管理能力→－环境灾害发生率→－道路甩挂运输交通事故率

在以上反馈回路中，回路（1）～（6）是负反馈回路。负反馈回路中某个变量增加后，通过其他各变量的依次作用，最终会使该变量减少，负反馈环可使系统趋于稳定[9－10]。甩挂运输事故率的上升会引起政府相关部门、运输企业对安全水平的重视，从而增加对甩挂运输系统的安全投资，以提高车辆、人员、基础设施等的安全水平。对相关政策法规进行完善、加强安全监管，可有效降低风险水平。（7）～（8）为正反馈回路，随着甩挂运输周转量的增大，从业员工数量逐渐增多，员工劳动强度降低，可降低事故率；提高对交通环境的控制管理能力，也会降低甩挂运输事故率。因此，在甩挂运输发展初期，重视甩挂运输安全问题，增加系统安全投资水平，可提高各生产要素的安全水平，有效降低事故率。

2 道路甩挂运输系统安全水平流图模型构建及仿真

2.1 流图建模

道路甩挂运输安全系统因果关系图清晰地表示了安全影响因素之间的相互关系及作用。在此基础上，运用 VENSIM 软件来构建系统安全水平的系统动力学流图模型，见图2。

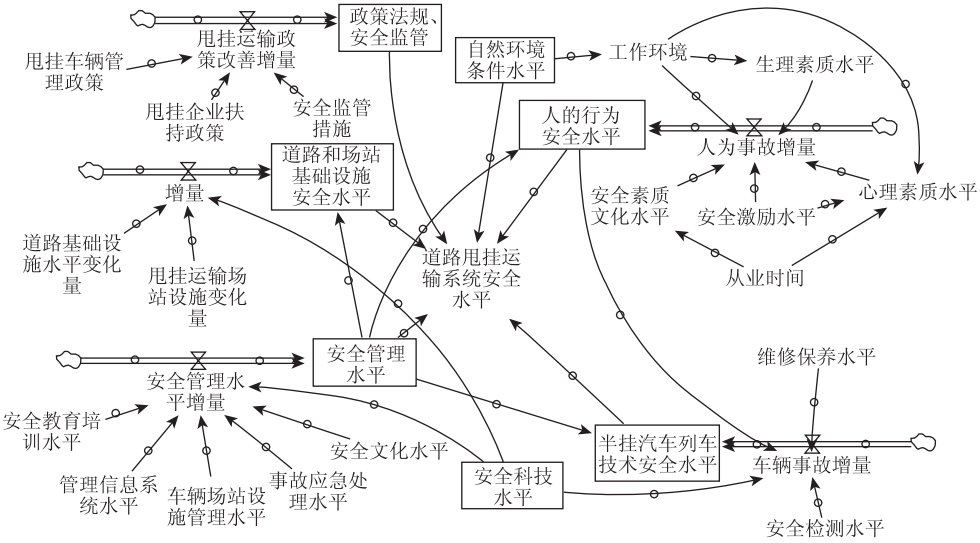

图2 甩挂运输系统安全水平的系统动力学流图

Fig. 2 System dynamical flow chart of safety level of trailer pick－up transport system

该流图模型可反映出道路甩挂运输安全系统的复杂性及各影响因素之间的相关性，不同的影响因素之间通过关联系数相连接，并且关联系数可反映各因素之间的关联强度。系统整体安全水平受制于政策法规、安全监管、基础设施、人员、甩挂车辆、安全管理、安全科技、自然环境各子系统的安全水平。而各子系统的安全水平又受制于其相关影响因素。例如人员的安全水平受制于安全文化素质、从业时间、心理素质、工作环境等因素。

2.2 流图模型仿真分析

（1）试验参数来源

系统动力学着重于信息的反馈结构，而不是参数的准确度。模型行为的模式与结果取决于模型结构而不是参数值的大小。因此，系统动力学方法对参数的准确度要求不高，模型参数只要能保证系统行为模式与系统最初参考模式一致即可[11－12]。这正适合分析发展初期基础数据资料缺乏的道路甩挂运输。基于对道路运输企业、试点甩挂运输企业的调查分析及对相关事故统计资料的分析，结合专家意见对模型中的参数进行合理的估计和检验，参数的选择能较好地反映实际系统。

（2）系统动力学变量方程

系统动力学方程见式（1）~式（7）。速率变量方程中，D_n 为速率变量 i 的第 n 个影响因素；

$CONST_n$为其影响程度；K 为现在时刻；J 为过去时刻；L 为未来时刻；JK，KL 分别为 JK 区间和 KL 区间；DT 为差分步长。其他各变量的含义见表 1。

表 1　变量

Tab. 1　Variables

类型	变量	含义	说明
辅助变量	*RDPTS*	道路甩挂运输系统安全	无量纲，表示道路甩挂运输系统安全水平高低的指标，值越大，越安全
状态变量	*HBS*	人的行为安全水平	无量纲，表示人的安全水平指标，值越大，风险越小
状态变量	*STS*	半挂汽车列车技术安全	无量纲，表示车辆的安全水平指标，值越大，风险越小
状态变量	*RSS*	道路场站基础设施安全	无量纲，表示基础设施的安全水平指标，值越大，风险越小
状态变量	*SMS*	安全管理水平	无量纲，表示安全管理水平指标，值越大，风险越小
状态变量	*PSS*	政策法规安全监管	无量纲，表示政策方面的安全水平指标，值越大，风险越小
状态变量	*ET*	自然环境	无量纲，表示自然环境条件水平，值越大，风险越小
状态变量	*ST*	安全科技	无量纲，表示安全科技水平，值越大，风险越小
常量	R_i	子系统对总系统的贡献	表示第 i 项因素的安全水平对总系统安全水平的影响权重，可由层次分析法获得
速率变量	$GYSZL_i$	速度变量	表示第 i 个单位时间增加量

辅助方程：

$$RDPTS.K = HBS.K \times R_1 + STS.K \times R_2 + RSS.K \times R_3 + SMS.K \times R_4 + PSS.K \times R_5 + ES.K \times R_6 + ST.K \times R_7。\quad (1)$$

状态变量方程：

$$HBS.K = HBS.J + DT \times (\text{入速率}.JK - \text{出速率}.JK), \quad (2)$$

$$STS.K = STS.J + DT \times (\text{入速率}.JK - \text{出速率}.JK), \quad (3)$$

$$RSS.K = RSS.J + DT \times (\text{入速率}.JK - \text{出速率}.JK), \quad (4)$$

$$SMS.K = SMS.J + DT \times (\text{入速率}.JK - \text{出速率}.JK), \quad (5)$$

$$PSS.K = PSS.J + DT \times (\text{入速率}.JK - \text{出速率}.JK)。\quad (6)$$

速率变量方程：

$$GYSZL_i.KL = \sum_{n=1}^{N} D_n.K \times CONST_n。\quad (7)$$

根据目前甩挂运输安全管理的实际情况调查，组织甩挂运输试点企业的甩挂运输负责人、国内重要牵引车生产厂家的研发人员、重点高校研究半挂牵引车的相关专家和甩挂运输推荐车型标准制订的有关专家，进行模拟参数分析。利用 VENSIM 公式编辑器构造量化的系统模拟模型，部分方程及参数输入值如下：

人为事故增量 = 安全激励水平 ×0.03 + 安全素质文化水平 ×0.07 + 工作环境 ×0.02 + 心理素质水平 ×0.09 + 生理素质水平 ×0。

人的行为安全水平 = INTEG（人为事故增量 + 安全管理水平 × 0.05，55），其中，INTEG 为 VENSIM 软件中的延迟函数，表示变量随着时间的累积。该公式表示人的安全行为水平为 t 时刻的安全管理水平乘以系数 0.05，加上从初始时刻到 t 时刻的增量累积量，初始值为 55，下同。

半挂汽车列车技术安全水平 = INTEG（车辆事故增量 + 安全管理水平 ×0.03，61）。

安全管理水平增量 = 事故应急处理水平 ×0.004 + 安全教育培训水平 × 0.007 + 安全文化水平 × 0.002 + 管理信息系统水平 ×0.005 + 车辆场站设施管理水平 ×0.004 + 安全科技水平 ×0.018。

甩挂运输政策改善增量 = 安全监管措施 ×0.006 + 甩挂企业运输政策 ×0.015 + 甩挂车辆管理政策 ×0.12。

道路和场站基础设施安全水平 = INTEG（增量 + 安全管理水平 ×0.055 1，50）。

道路甩挂运输系统安全水平 = 人的行为安全水平 ×0.22 + 安全管理水平 ×0.25 + 半挂汽车列车技术安全水平 ×0.2 + 道路和场站基础设施安全水平 × 0.12 + 自然环境条件水平 ×0.11 + 政策法规和安全监管 ×0.1。

（3）道路甩挂运输系统安全水平仿真

根据系统动力学方程和设定的各个参数输入值，应用 VENSIM 进行仿真，可得道路甩挂运输系统安全水平的发展变化数据如图 3 所示。

（4）子系统的灵敏性分析

在其他子系统不变时，增加其中一个子系统的安全投入或加强安全管理，以分析对系统安全水平影响较大的因素，从而抓住甩挂运输发展初期安全工作的重点。目前，甩挂试点企业从事的都是企业内部定点定线的甩挂运输，甩挂车辆及人员都属于企业内部，企业加强员工安全管理可有效提高人员

Table Time Down

Time(Year)	"道路甩挂运输系统安全水平" Runs:	
2007		59.9
2008		63.34
2009		66.8939
2010	0	70.4896
2011		74.1515
2012		77.8794
2013		81.6737
2014		85.5342
2015		89.4613

图3 甩挂运输系统安全水平仿真结果

Fig. 3 Simulation result of safety level of trailer pick-up transport system

的安全水平。在此，将人的因素视为安全管理因素，只对政策与安全监管、基础设施、车辆安全技术、安全管理水平4个方面进行仿真分析（图3）。在分别对各子系统增加相同幅度的安全投入时，可得到甩挂运输系统安全水平的发展变化趋势（图4）。方案1表示加强政策法规和安全监管方面的投入；方案2表示增加对基础设施的安全投入；方案3表示提高企业的安全管理水平；方案4表示提高甩挂车辆的安全技术水平。

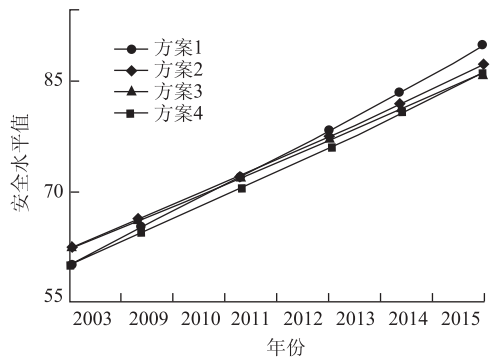

图4 提高子系统安全投入时的甩挂运输安全水平发展趋势

Fig. 4 Safety level trends of trailer pick-up when increasing safety investment on each subsystem

3 结论

根据系统动力学流图模型仿真可得以下结论：

（1）按照风险等级标准，2010年、2011年和2012年的风险等级均为中，2013年为81.673 7，2015年为89.461 3，风险等级为良。总体上，近年来甩挂运输系统的安全水平不断提高。这与甩挂运输在我国的实际发展历程一致。随着各种相关政策的完善和管理经验的积累，各种投资不断增大，甩挂运输系统安全水平会逐步提高。

（2）在目前我国甩挂运输发展阶段，甩挂运输系统的安全水平总体上不容乐观，只临近良的等级，尚达不到优等水平。这制约了目前甩挂运输的快速推广。政府主管部门在制订甩挂运输发展政策时，应同时制订相应的安全监管策略；企业在制订甩挂运输发展策略时，应同时更新安全管理制度，以适应甩挂运输发展的要求。

（3）提高任一因素的安全水平都可提高道路甩挂运输的整体安全水平。现阶段制订适合甩挂运输发展的政策措施，增加对甩挂车辆的安全投资，提高汽车列车的安全技术水平是推动甩挂运输发展的首要任务。

参考文献：

References：

[1] 张红卫，易振国，董金松，等. 甩挂运输推荐车型产品技术特点与推广应用［J］. 专用汽车，2012（2）：23－25.
ZHANG Hong-wei, YI Zhen-guo, DONG Jin-song, et al. Technology Characteristics and Popularization of Recommended Vehicle Type for Drop and Pull Transport［J］. Special Purpose Vehicle, 2012（2）: 23－25.

[2] 耿蕊，张世华. 甩挂运输最佳挂车配置数量计算方法［J］. 公路交通科技，2013，30（6）：127－128.
GENG Rui, ZHANG Shi-hua. A Method for Computing Optimal Trailer Number for Trailer Pick-up Transport［J］. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30（6）: 127－128.

[3] 沈斌. 基于系统动力学的安全生产监管有效性研究［J］. 中国安全科学学报，2012，22（5）：86－89.
SHEN Bin. Study on Safety Production Regulation Effectiveness Based on System Dynamics［J］. China Safety Science Journal, 2012, 22（5）: 86－89.

[4] KARNOPP D C, MARGOLIS D L, ROSENBERG R C. System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems［M］. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2012: 113－145.

[5] 武慧荣，崔淑华，张文会. 公路货物运输系统动力学模型及其应用［J］. 公路交通科技，2012，29（2）：150－154.
WU Hui-rong, CUI Shu-hua, ZHANG Wen-hui. System Dynamics Model of Road Freight Transport System and Its Application［J］. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29（2）: 150－154.

[6] HOMER J B, HIRSCH G B. System Dynamics Modeling for Public Health: Background and Opportunities［J］. American Journal of Public Health, 2006, 96（3）: 452－458.

[7] 程敏，朱前程，董大旻. 基于系统动力学的建筑安全监管博弈研究［J］. 中国安全科学学报，2011，21（12）：74－79.
CHENG Min，ZHU Qian-cheng，DONG Da-min. Game Study on Construction Safety Supervision Based on System Dynamics［J］. China Safety Science Journal，2011，21（12）：74－79.

[8] 虞明远，李世武，谢晓玲，等. 道路危险货物运输监管过程分析及对策研究［J］. 公路交通科技，2010，27（8）：156－157.
YU Ming-yuan，LI Shi-wu，XIE Xiao-ling，et al. Analysis of Supervising Process of Road Hazardous Freight Transport and Countermeasures［J］. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2010，27（8）：156－157.

[9] GOH Y M，LOVE P E D. Methodological Application of System Dynamics for Evaluating Traffic Safety Policy［J］. Safety Science，2012，50（7）：1594－1605.

[10] 唐磊. 基于系统动力学的道路危险品运输管理政策模拟研究［D］. 大连：大连海事大学，2010.
TANG Lei. Stimulating Management Policy for Road Hazardous Materials Transport Based on System Dynamics［D］. Dalian：Dalian Maritime University，2010.

[11] 贾璐，蔡建国. 基于系统动力学的多方安全监管博弈［J］. 土木工程与管理学报，2012，29（2）：69－73.
JIA Lu，CAI Jian-guo. Multi-person Safety Regulation Game Based on the System Dynamics［J］. Journal of Civil Engineering and Management，2012，29（2）：69－73.

[12] 蒋畅和，刘祖德，赵云胜. 基于系统动力学的安全经验仿真试验研究［J］. 安全与环境工程，2012，19（4）：98－101.
JIANG Chang-he，LIU Zu-de，ZHAO Yun-sheng. Simulation Study on Safety Experience Based on System Dynamics［J］. Safety and Environmental Engineering，2012，19（4）：98－101.

（上接第 147 页）

ZHOU Yin-xiang. The Studies on Urban Transportation Energy Consumption and Carbon Emissions Based on the View of System Dynamics：Take Hangzhou as the Example［J］. Urban Development Studies，2012，19（9）：99－105.

[12] 杨阳，贺德方，佟贺奉，等. 用于政策情景模拟的城市交通系统动力学模型构建－以北京市为例［J］. 中国科技论坛，2013（11）：28－34.
YANG Yang，HE De-fang，TONG He-feng，et al. A System Dynamic Model of Urban Transportation for Policy Simulation：A Case Study of Beijing［J］. Forum on Science and Technology in China，2013（11）：28－34.

[13] 李新兴，孙国金，田伟利，等. 杭州市“十二五”机动车 NO_x 减排对策研究［J］. 中国环境科学，2012，32（8）：1416－1421.
LI Xin-xing，SUN Guo-jin，TIAN Wei-li，et al. Study on Abatement Policy of NO_x Emission from Vehicles in Hangzhou during 12th Five-year Plan［J］. China Environmental Science，2012，32（8）：1416－1421.

[14] 环境保护部机动车排污监控中心. 环保部发布《2013年中国机动车污染防治年报》［J］. 环境与可持续发展，2014，39（11）：9－10.
Vehicle Emission Control Center of MEP.“China Vehicle Emission Control Annual Report in 2013”Has Been Issued by MEP［J］. Environment and Sustainable Development，2014，39（1）：9－10.

[15] 陆化普，王晶. 基于绿色交通理念的交通供求关系导向策略［J］. 综合运输，2013（6）：4－10.
LU Hua-pu，WANG Jing. Supply and Demand Relationship-oriented Strategies Based on Conception of Green Traffic［J］. Comprehensive Transportation，2013（6）：4－10.

[16] WANG J F，LU H P，PENG H. System Dynamics Model of Urban Transportation System and Its Application［J］. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2008，8（3）：83－89.