

高速公路弯坡组合路段载重车最小安全车距模型

雒应, 张飞, 张岩

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 为降低高速公路弯坡组合路段载重车追尾碰撞风险,通过研究不同平纵组合下高速公路弯坡类型,界定弯坡组合路段参数范围,选取具有较强代表性的车型,针对现有最小安全车距模型的缺陷,建立基于载重车制动减速系统且满足驾驶人驾驶行为特性的弯坡组合路段安全车距计算模型并对其参数进行标定;利用载重车仿真软件 TruckSim 2016 建立弯坡段双车跟驰模型,分析小半径平曲线下载重车爬坡与下坡行车状态时车辆滑移率、行驶速度、车间距等指标,验证该最小安全车距模型的有效性。

**关键词:** 公路交通;高速公路;弯坡组合;载重车;行驶速度;最小安全车距

**中图分类号:** U491.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2019)05-0039-05

中国山区地貌复杂、地势险峻,加之工程项目造价及当地社会经济发展水平等因素的限制,通常在山区高速公路设计中难以避免地存在较小平曲线半径与较大纵坡组合路段。据统计,弯坡组合路段事故约占高速公路事故总数的 53.9%,其中大部分事故车辆为载重车。载重车由于自身重量大,往往制动时间较长,负载行驶状态下制动更困难,在弯坡组合路段若不能保障安全行车间距,极易诱发追尾等交通事故。

目前对于高速公路行车间距及弯坡路段线形等的研究较多,如 Varunjikar T.以平曲线为切入点,确定了基于轮胎物理性能的车辆平曲线摩擦需求; Sarhan M.等将可靠度理论应用于弯坡组合路段及对应停车视距分析;陈富坚等提出了弯坡组合路段功能函数及可靠度求解算法;丁建友等建立高速公路行车间距模型,提出车距取值应处于绝对安全间距与相对安全间距之间;岳雷等提出基于运行车速的预测模型判别弯坡组合路段线形指标的协调性;蒋生珍等以轨迹偏移量为参数指标,研究山区弯坡

组合路段车辆行驶轨迹特征。上述对于弯坡组合路段的研究多集中于线形指标,未综合考虑交通环境特征、行驶速度及载重车制动减速特性等因素。鉴于此,该文通过分析载重车在弯坡组合路段常见工况下的行驶特性,建立载重车跟驰安全车距模型并标定模型相关参数,利用仿真软件对模型进行爬坡及下坡两类行车状态的仿真实验。

1 弯坡组合路段基本条件

1.1 弯坡组合路段参数范围界定

根据平曲线半径和纵坡坡度指标的不同组合,可将公路定性划分为平直路段、纵坡路段、平曲线路段、弯坡组合路段等。高速公路弯坡组合路段界定为平曲线半径 $\leq 1\,000\text{ m}$ 且纵坡 $\geq 3\%$ 的路段。

从平曲线半径、纵坡坡度和载重车运行速度着手研究弯坡组合路段参数范围,总结平曲线半径为 400、650、800、1 000 m,纵坡为 3%、4%、5%,且符合规范要求的超高值  $e$  及合成坡度  $i_h$  两项指标的高速公路弯坡路段参数组合范围,结果见表 1。

表 1 弯坡路段不同组合类型下超高值  $e$  及合成坡度  $i_h$

纵坡 $i/\%$	半径 $R/\text{m}$	不同设计速度(km/h)下的超高值 $e$ 及合成坡度 $i_h$															
		60				80				100				120			
		$e/\%$		$i_h/\%$		$e/\%$		$i_h/\%$		$e/\%$		$i_h/\%$		$e/\%$		$i_h/\%$	
3	400	3	4	5	4.2	5.0	5.8	6	6	6.7	6.7	6	8	6.7	8.5		
	650	2	3	3	3.6	4.2	4.2	4	5	5.0	5.8	5	7	5.8	7.6	8	8.5
	800	2	2	3	3.6	3.6	4.2	4	4	5.0	5.0	5	6	5.8	6.7	7	7.6
	1 000	2	2	2	3.6	3.6	3.6	3	3	4.2	4.2	4	5	5.0	5.8	6	6.7

续表 1

纵坡 $i/\%$	半径 $R/\text{m}$	不同设计速度(km/h)下的超高值 $e$ 及合成坡度 $i_h$															
		60				80				100				120			
		$e/\%$		$i_h/\%$		$e/\%$		$i_h/\%$		$e/\%$		$i_h/\%$		$e/\%$		$i_h/\%$	
4	400	3	4	5	5.0	5.7	6.4	6	6	7.2	7.2	6	8	7.2	8.9		
	650	2	3	3	4.5	5.0	5.0	4	5	5.7	6.4	5	7	6.4	8.1	8	8.9
	800	2	2	3	4.5	4.5	5.0	4	4	5.7	5.7	5	6	6.4	7.2	7	8.1
	1 000	2	2	2	4.5	4.5	4.5	3	3	5.0	5.0	4	5	5.7	6.4	6	7.2
5	400	3	4	5	5.8	6.4	7.1	6	6	7.8	7.8	6	8	7.8	9.4		
	650	2	3	3	5.4	5.8	5.8	4	5	6.4	7.1	5	7	7.1	8.6	8	9.4
	800	2	2	3	5.4	5.4	5.8	4	4	6.4	6.4	5	6	7.1	7.8	7	8.6
	1 000	2	2	2	5.4	5.4	5.4	3	3	5.8	5.8	4	5	6.4	7.1	6	7.8

## 1.2 代表车型选择

代表车型的确定需充分考虑不同载重车类型的实际市场份额,确保所选车型具有代表性。以实地调查包茂(包头—茂名)与西安绕城高速公路相交处曲江收费站来往载重车的车轴数(调查期间天气状况良好,道路交通条件正常,数据总样本量  $n \geq 500$ )为根据,整理出各车轴数车辆分布见图 1。调查中出现频率最高的为六轴半挂型载重车,故选取符合调查结果且适应市场主流的一汽解放 J6P 型重型载重车作为研究车型,其相关参数见表 2。

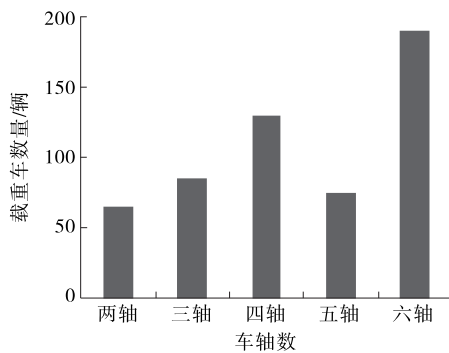


图 1 载重车不同车轴数车辆分布

表 2 一汽解放 J6P 型重型载重车的技术参数

车辆参数	参数值	车辆参数	参数值
车体自重/t	25	最大输出功率/kW	370
牵引总重量/t	40	扭矩/(N·m)	2 300
最高车速/(km·h <sup>-1</sup> )	120	驱动形式	6×4

## 2 最小安全车距模型建立

### 2.1 最小安全车距计算模型

在高速公路弯坡组合路段,设定前、后载重车于同一车道跟驰行驶,在前车遭遇突发紧急事件并采取制动减速时,后车驾驶过程为自后车驾驶人观察

到前车制动器尾灯亮起时立即制动减速以防相撞。图 2 为整个制动过程中两载重车间距变化情况,B 代表后车,A 代表前车。

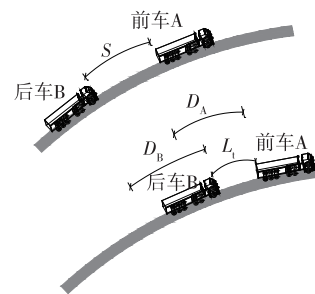


图 2 同车道前后两载重车爬坡制动过程示意图

后车运行总时间包括驾驶人反应时间  $t_{B1}$ 、车辆制动器控制反应时间  $t_{B2}$ 、制动加速度增加时间  $t_{B3}$ 、制动持续时间  $t_{B4}$ 。在  $t_{B1}$  和  $t_{B2}$  时间内后车 B 表征为匀速,而在  $t_{B4}$  时间内表征为匀减速,各时间段内后车所行驶的距离分别用  $L_{B1}$ 、 $L_{B2}$ 、 $L_{B3}$ 、 $L_{B4}$  表示,总距离为  $D_B$ 。

前车在整个行驶制动过程中的总时间包括制动加速度增加时间  $t_{A3}$  及制动持续时间  $t_{A4}$ ,在  $t_{A4}$  期间前车表征为匀减速。两时间段内前车所行驶的距离分别用  $L_{A3}$ 、 $L_{A4}$  表示,总距离为  $D_A$ 。

前、后两载重车在弯坡爬坡路段保持正常跟驰行驶时其车间距用  $S$  表示。为保证突发事件下两车爬坡行驶安全,当两车均处于静止状态时,车间距需大于停车安全距离  $L_t$  的要求。故弯坡组合路段同车道载重车跟驰行驶安全车距  $S$  计算模型为:

$$\begin{cases} D_B = \left( t_{B1} + t_{B2} + \frac{t_{B3}}{2} \right) v_B + \frac{v_B^2}{2a_{ZB}} - \frac{a_{ZB} t_{B3}^2}{24} \\ D_A = \frac{v_A t_{A3}}{2} + \frac{v_A^2}{2a_{ZA}} - \frac{a_{ZA} t_{A3}^2}{24} \\ S = D_B - D_A + L_t \end{cases} \quad (1)$$

式中: $v_B$ 、 $v_A$ 分别为后车B、前车A的初始行驶速度(m/s); $a_{ZB}$ 、 $a_{ZA}$ 分别为后车B、前车A的初始弯坡加速度(m/s<sup>2</sup>)。

根据式(1),最小安全车距模型参数由载重车制动性能和初始速度、驾驶人反应特性及停车安全距离等因素综合决定,故根据突发事件下驾驶人操作特性将最小安全车距分为以下3种工况进行分析:

(1) 一般安全行车间距  $S$ 。为方便建立该工况下安全车距模型,对车辆行驶状态作如下假设:1) 两载重车先后沿同一方向车道行驶,当前车突发减速时,后车沿当前车道采取制动措施,不采取换道操作等避让措施;2) 由于两车为同种车型,车辆参数一致,在以最大制动加速度  $a_i$  减速至静止状态后,两车所用制动加速度增加时间相等,即  $t_{A3} = t_{B3} = t_3$ ;3) 界定载重车制动加速度增加时间  $t_3$  为 0.1 s, 则  $(a_{ZA} - a_{ZB})t_3^2/24$  约为  $10^{-3}$  数量级,可忽略不计。式(1)可改写为:

$$S = \left( t_{B1} + t_{B2} + \frac{t_{B3}}{2} \right) v_B - \frac{v_A t_{A3}}{2} + \left( \frac{v_B^2}{2a_{ZB}} - \frac{v_A^2}{2a_{ZA}} \right) + L_t \quad (2)$$

(2) 极限安全行车间距  $S_{\min}$ 。该工况为前车遭遇撞击等突发事件下车辆瞬间急停,  $a_{ZA} = +\infty$  时, 为车辆跟驰最不利工况,该工况下后车所能缓冲利用的行车间距最小。高速公路弯坡组合路段尤其是下弯坡路段,载重车因频繁制动导致刹车温度急剧升高,极易失控撞至护栏。为防止这类突发事件对后车产生不利影响,极限安全行车间距  $S_{\min}$  应为:

$$S_{\min} = \left( t_{B1} + t_{B2} + \frac{t_{B3}}{2} \right) v_B - \frac{v_A t_{A3}}{2} + \frac{v_B^2}{2a_{ZB}} + L_t \quad (3)$$

(3) 充分安全行车间距  $S_{\max}$ 。该工况为前车速度低于后车速度,两车间距不断缩小,而前车未曾遭遇任何不利状况保持正常行驶,若后车持续该状态行驶则必然与前车相撞。后车以弯坡加速度  $a_{ZB}$  制动减速,当两车速度差降至零时,行车间距称为充分安全车距  $S_{\max}$ ,计算公式为:

$$S_{\max} = (t_{B1} + t_{B2} + t_{B3})(v_B - v_A) + \frac{v_B^2 - v_A^2}{2a_{ZB}} + L_t \quad (4)$$

## 2.2 模型参数标定

### 2.2.1 驾驶人反应时间 $t_1$

行车速度是影响驾驶人反应时间的重要因素。

根据3种高速公路行车速度区间对  $t_1$  作出界定,分别为低速区间( $60 \text{ km/h} \leq v < 80 \text{ km/h}$ )、中速区间( $80 \text{ km/h} \leq v < 100 \text{ km/h}$ )、高速区间( $100 \text{ km/h} \leq v \leq 120 \text{ km/h}$ ),3种速度区间下驾驶人反应时间分别取 0.82、0.98、1.21 s。

### 2.2.2 制动器控制反应时间 $t_2$

载重车通常装备防抱死气压制动系统,该系统制动器控制反应时间为 0.3~0.9 s,取平均值 0.6 s 作为制动器控制反应时间  $t_2$ 。

### 2.2.3 载重车最大制动加速度 $a_i$

研究所用车型为重型载重车,制动减速时应考虑主牵引车头与后半挂车厢两者的一致性问题。参考文献[9]对载重车制动差异性的研究,载重车突发状况下刹车制动强度服从正态分布  $N(3.0, 0.6)$ , 界定载重车最大制动加速度  $a_i$  为  $8.5 \text{ m/s}^2$ 。

### 2.2.4 停车安全距离 $L_t$

为保证停车后间距满足人们心理安全距离界限,载重车停车安全距离一般取 2~5 m。该文主要切入点为载重车弯坡爬坡及下坡两种行车状态,下坡由于刹车毂温度的影响导致事故风险系数大于爬坡,故界定爬坡停车安全距离  $L_t = 3 \text{ m}$ 、下坡停车安全距离  $L_t = 5 \text{ m}$ 。

### 2.2.5 弯坡加速度 $a_z$

弯坡加速度的取值由道路条件、车辆参数及环境特征等因素综合确定,当载重车滑移率为  $0 < \epsilon < 0.2$  时,道路表面的纵向附着系数  $\mu_z$  及横向附着系数  $\mu_x$  均能满足车辆制动减速要求和驾驶人操纵稳定性需求。

载重车在弯坡路段行驶过程中同时受到空气阻力、道路坡度阻力及摩擦阻力等多重制约,基于上述坡度—环境影响因素可得爬坡和下坡两种行车状态下纵向加速度  $a_i$  模型。爬坡时:

$$a_i = -g[\sin(\arctan i) + \mu \cos(\arctan i)] - \frac{KA\rho v_B^2}{2m} \quad (5)$$

下坡时:

$$a_i = g[\sin(\arctan i) - \mu \cos(\arctan i)] - \frac{KA\rho v_B^2}{2m} \quad (6)$$

式中: $\mu$  为地面附着系数,取 0.015; $K$  为空气阻力系数,取 0.81; $A$  为载重车正迎风面积,取  $6.82 \text{ m}^2$ ;  $\rho$  为空气密度,取  $1.22 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ ;  $m$  为载重车总牵引重,取 65 t。

将载重车最大弯坡加速度沿纵坡方向与横坡方向矢量分解,其中纵向为载重车自身最大制动加速度 $a_t$ 与道路坡度纵向加速度 $a_i$ 之和,横向为横向加速度 $a_x$ ,载重车最大弯坡加速度 $a_z$ 为:

$$\begin{cases} a_x = \frac{v_B^2}{R} \cos(\arctan e) - g \sin(\arctan e) \\ a_z = \sqrt{(a_i + a_t^2) + a_x^2} \end{cases} \quad (7)$$

### 3 仿真分析

仿真场景设定为天气状况良好且除所研究的前后跟驰两车外无其他干扰车辆。调取 TruckSim 2016 数据库中型号为 3A Cab Over 的重卡车,其车辆基本参数设定与前文定义的一汽重型载重车吻合。参照表 1 中界定的平曲线与纵坡组合模拟构建道路弯坡线形,通过调整道路中线及各横断面处高程,使其超高值 $e$ 及合成坡度 $i_h$ 符合表 1 中的设定。

#### 3.1 爬坡行车状态跟驰仿真

##### 3.1.1 纵坡 4‰、半径 650 m、前后车速度 70~80 km/h 时 $S$ 值仿真验证

跟驰仿真运行前,由待验证模型即式(2)计算得到 $S=62.9$  m。为减小速度误差,使两车先匀速跟驰行驶 4 s,反算得其 4 s 行程前的初始距离为 74.0 m。当两车间距达到模型值时,设定前车突然减速,后车自观察到前车制动器灯亮起时立即采取制动,最终两车均达静止状态(紧急制动加速度为 $-8.5$   $\text{m/s}^2$ ,前车速度为 70 km/h)。该验证工况仿真状态下前车滑移率及两车间距变化分别见图 3、图 4。

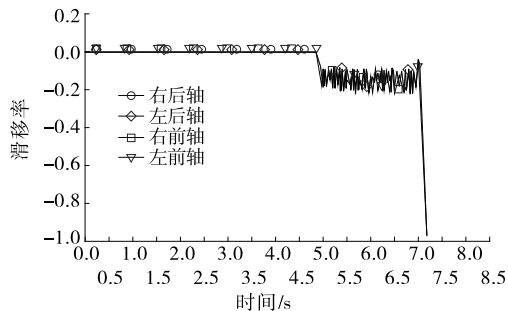


图3 前车滑移率分布曲线(爬坡行车状态)

由图 3、图 4 可知:两车间距变化曲线在前 4 s 呈直线下降趋势,符合该时间段内两车匀速行驶状态。此后前车制动减速,两车间距变化曲线斜率急剧增大,间距缩短的趋势愈加显著。当最终两车均静止时,停车间距逐渐稳定在 6.8 m 不再变化,满足前文界定的 3 m 爬坡停车安全距离,载重后车 4 个

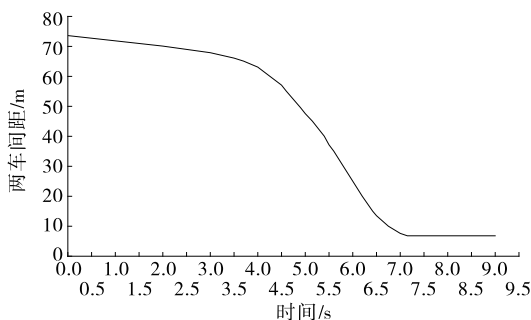


图4 两车间距变化曲线(爬坡行车状态)

车轮的滑移率均处于 $0 < \epsilon < 0.2$ 标准范围。

##### 3.1.2 纵坡 4‰、半径 800 m、前后车速度 90~90 km/h 时 $S_{\min}$ 值仿真验证

极限安全行车间距条件设定为前车瞬间急停,仿真中对应为前车处于静止状态。反算得该状态下两车初始距离为 221.6 m,4 s 匀速行驶后后车即认定前车突发静止,立即以最大制动加速度制动减速。该验证工况仿真下后车速度变化见图 5。

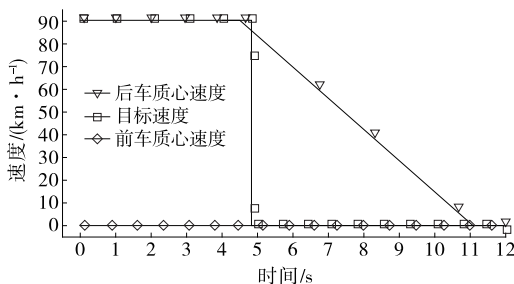


图5 后车速度变化曲线(爬坡行车状态)

由于两车速度不同,导致制动加速度存在差异,通过软件中目标速度策略功能对前车加速度加以控制,使其满足两车制动加速度相同的条件。由图 5 可知:前车全程假定为静止状态,速度保持为零;后车在 4 s 匀速行驶后以最大加速度减速,约 11 s 后达到停止状态。

#### 3.2 下坡行车状态跟驰仿真

对纵坡 3‰、半径 1 000 m、前后车速度 100~110 km/h 时  $S_{\max}$  值进行仿真验证,设定前车速度低于后车速度。跟驰仿真运行前,将两车距离设为 109.6 m,4 s 匀速行程后两车相距(模型值)98.5 m。此时前车保持原状态,后车为防止碰撞采取制动减速,当其速度降至与前车速度一致时,仿真结束。该验证工况仿真状态下两车间距变化见图 6。

由图 6 可知:两载重车停车间距稳定在 9.8 m,满足前文界定的 5 m 下坡停车安全距离。

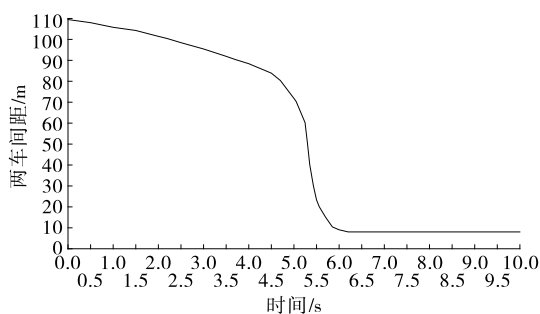


图6 两车间距变化曲线(下坡行车状态)

#### 4 结语

以界定弯坡组合路段定义为切入点,提出平曲线半径、纵坡、行驶速度、超高值及合成坡度等多重参数组合下弯坡路段范围,构建载重车坡度—环境因素下弯坡加速度模型,分别建立弯坡组合路段载重车3种常见制动工况下最小安全车距模型。相较于传统车距模型,该模型兼顾了“弯+坡”双重特征及环境阻力影响,更贴近载重车实际行驶状态。不同弯坡参数组合、不同行驶速度区间等条件下爬坡和下坡两种行车状态仿真结果表明,在界定的弯坡组合参数条件下计算所得模型最小安全车距均满足载重车安全停车距离要求,且整个跟驰过程中滑移率指标均处于规范标准范围。该最小安全车距模型

可为载重车弯坡路段安全富余停车间距选取及弯坡特殊路段处交通标志标线位置选定提供依据。

#### 参考文献:

- [1] Varunjikar T. Design of horizontal curves with downgrades using low-order vehicle dynamics models [D]. The Pennsylvania State University, 2011.
- [2] Sarhan M, Hassan Y. Three-dimensional, probabilistic highway design: sight distance application [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2060.
- [3] 陈富坚,邓伟建,徐培培,等.弯坡组合路段可靠性设计方法研究[J].公路工程,2017,42(3).
- [4] 丁建友,李铁柱,李文权.高速公路安全行车间距与追尾事故预防[A].第三届中国智能交通年会论文汇编[C].2007.
- [5] 岳雷,姚红云,王慧.山区公路弯坡组合路段设计指标研究[J].中国矿业大学学报,2019,48(3).
- [6] 蒋生珍,高建平.双车道公路弯坡组合路段行车轨迹特性研究[J].公路,2017(5).
- [7] JTG B05—2015,公路项目安全性评价规范[S].
- [8] 张伟宾.高速公路长大纵坡载重车最小安全行车间距研究[D].西安:长安大学,2018.

收稿日期:2019-04-20

(上接第38页)

$$R = \begin{bmatrix} 0.504 & 0.285 & 0.151 & 0.046 & 0.015 \\ 0.423 & 0.179 & 0.222 & 0.087 & 0.088 \\ 0.590 & 0.091 & 0.235 & 0.063 & 0.020 \end{bmatrix}$$

总体安全评价结果为:

$$S = AR = (0.497, 0.221, 0.186, 0.060, 0.036)$$

#### 3.6 结论

49.7%的专家认为重庆学府大道的安全性很高,22.1%的专家认为其安全性较高,18.6%的专家认为其安全性一般,6.0%的专家认为其安全性欠缺,3.6%的专家认为其安全性很欠缺。认为其安全性达到一般及以上的占90.4%,学府大道的交通安全性较高,满足要求。

#### 参考文献:

- [1] 唐铮铮,张铁军,何勇.道路交通安全评价[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [2] 王涛,陈峻.基于模糊综合评价法的城市道路交通安全

评价研究[J].交通世界,2014,29(10).

- [3] 罗强,胡三根,龚华炜,等.城市道路交通安全评价体系研究与模型构建[J].广西大学学报:自然科学版,2017,42(2).
- [4] 张坤,梅诗冬,景国勋.数据挖掘技术在我国道路交通安全评价中的应用[J].安全与环境工程,2018,25(1).
- [5] Dang X X, Wang Y Q, Wu Z H, et al. An improved generalized DEA evaluation model of regional road traffic safety [J]. Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology, 2016, 16(4).
- [6] Sun Chenshuo, Pei Xin, Hao Junheng, et al. Ole of road network features in the evaluation of incident impacts on urban traffic mobility [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 117.
- [7] Qiu J, Chen W. Traffic big data and its application in road traffic performance evaluation: illustrated by the case of Shenzhen [A]. Advances in Geographic Information Science [C]. 2018.

收稿日期:2018-12-19