

广义出行费用下的冰雪条件路网容量可靠性

冷军强¹,冯雨芹^{2,3},张亚平³,祁松⁴

(1. 哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院,264209 山东 威海, lengjunq@tom.com;2. 黑龙江工程学院汽车与交通工程学院,150050 哈尔滨;3. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院,150090 哈尔滨;
4. 中国人民解放军驻沈阳铁路军事代表办事处,028000 通辽 内蒙古)

摘 要: 为体现冰雪条件下出行者路径选择行为,准确评价路网容量可靠性,采用行程时间、行程时间可靠性及安全性的加权和定义广义出行费用,引入坡道行驶安全系数量化安全性出行费用,建立基于广义出行费用的随机用户平衡分配模型.从路段角度定义容量可靠性的概念,建立基于广义出行费用的路网容量可靠性模型,给出 Monte Carlo 仿真和交通规划模型相结合的算法.并在小型测试路网上进行计算,仿真结果表明:出行费用权系数,对路段及路网的容量可靠性影响显著,冒险的路径选择行为,使路网容量可靠性下降.

关键词: 广义出行费用;容量可靠性;蒙特卡罗仿真;冰雪条件;安全性

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)02-0092-06

Road network capacity reliability based on generalized travel cost under ice and snowfall conditions

LENG Jun-qiang¹, FENG Yu-qin^{2,3}, ZHANG Ya-ping³, QI Song⁴

(1. School of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, Shandong, China, lengjunq@tom.com;
2. School of Automobile and Transportation Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, 150050 Harbin, China;
3. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
4. Representative Office of PLA in Shenyang Railway Administration, 028000 Tongliao, Inner Mongolia, China)

Abstract: To describe the characteristics of travelers' route choice and estimate capacity reliability of road network with ice and snowfall, the function of generalized travel cost was defined by using the weighted sum of travel time, travel time reliability and safety, and the safety coefficient of driving on ramp was introduced to quantify the safety cost index of driving under ice and snowfall conditions, so that a stochastic user equilibrium (SUE) assignment model was formulated on the assumption of minimization of generalized travel cost in choosing path. The capacity reliability was defined based on the viewpoint of links and its model of road network was set up. Moreover, an assessment method integrated Monte Carlo simulation and solution of traffic plan models was developed. The simulation results show that the weighted coefficients have conspicuous impacts on reliabilities of links and road network, and the adventure travelers' attitude decreases the road network reliability.

Key words: generalized travel cost; capacity reliability; Monte Carlo simulation; ice and snowfall conditions; safety

道路交通系统作为重要的生命线之一,运行

稳定性经常受各种随机因素(比如自然灾害、交通事故乃至日常的交通拥堵、道路改造维护等)影响.路网可靠性是衡量随机环境下的路网性能的重要指标,最初路网可靠性研究主要局限于连通可靠性与行程时间可靠性^[1-3],这两个指标主

收稿日期: 2009-11-10.

基金项目: 山东省科技发展计划项目(2009GG2008020);
威海市科技发展计划项目(2009-3-93).

作者简介: 冷军强(1974—),男,讲师,博士;
张亚平(1966—),男,教授,博士生导师.

要从单个用户的角度出发评价路网服务质量的稳定性。CHEN 等^[4]从系统管理者角度出发,提出了路网容量可靠性概念,建立了计算容量可靠性的双层规划模型,并采用灵敏度分析和 Monte Carlo 技术求解模型。LO 等^[5]研究在路段通行能力和行程时间可靠性约束下,路网所能承担的最大交通流量,并提出 PUE(概率用户平衡)模型以反映随机路网中出行者的路径选择行为,以此为基础计算路网的容量可靠性。

现有出行者路径选择模型研究,主要有随机用户平衡分配模型、弹性需求平衡分配模型等,但所构建模型并没有很好体现出行者在不同条件下路径选择中的不同需求,如冰雪条件和正常天气条件下出行者的出行需求有很大差别。另外,出行需求目标并非单一,往往是多目标且相互矛盾,如更短的行程时间、更高的行程时间可靠性及安全性等。路网容量可靠性研究,将路网作为整体,利用双层规划模型求出路网整体容量可靠性。但交通管理者通常关心的不仅仅是路网整体的容量可靠性水平,而更加关注路网中瓶颈路段,据此对其进行合理的改造维护。为此首先研究冰雪条件下出行者广义出行费用问题,然后从路段层面研究基于广义出行费用的路网容量可靠性。

1 冰雪条件下出行者广义出行费用

1.1 行程时间可靠性

行程时间可靠性是路网可靠性中非常重要的评价指标之一^[6]。1991 年 Asakura 和 Kashiwadani^[7]提出以行程时间波动性反映道路网络可靠性,即行程时间可靠性(Travel time reliability)的概念。行程时间可靠性是衡量一定路网服务水平下能在规定时间内完成出行的概率,是衡量行程时间稳定性的指标,反映路网在随机波动的交通状态下的应变性能。本文采用的路段行程时间可靠性定义式为

$$R_a = P[T_a \leq t_a(1 + \delta)]. \quad (1)$$

式中: T_a 为路段 a 上的行程时间; t_a 为路段 a 上的自由行程时间; δ 为出行者可接受的行程时间相对自由行程时间增加的比例,因人们对处于不同区位不同路段的交通拥堵容忍程度不同,所以 δ 应随路段的不同而不同,可以通过 SP 调查确定。

在计算行程时间可靠性中,本文采用 ISB-BPR^[8](Ice and Snowfall Based-Bureau of Public Roads)函数计算路段行程时间,具体形式为

$$T_a(I) = g_t(I)t_a \left[1 + \beta \left(\frac{x_a}{g_c(I)C_a} \right)^n \right]. \quad (2)$$

式中: I 为冰雪强度; $T_a(I)$ 为路段 a 在冰雪影响下的行程时间; $g_t(I)$ 为冰雪条件对自由行程时间的影响; $g_c(I)$ 冰雪条件对路段通行能力的影响; 其他参数意义同上。

将式(2)代入式(1)得

$$R_a = P \left[C_a \geq x_a \frac{1}{g_c} \left(\frac{1 + \delta - g_t}{g_t \beta} \right)^{-\frac{1}{n}} \right]. \quad (3)$$

路段通行能力 C_a 为随机变量,其分布函数 $F_{C_a}(x)$ 可通过实地调查拟合得到,则有

$$R_a = 1 - F_{C_a} \left(\frac{1}{g_c} \left(\frac{1 + \delta - g_t}{g_t \beta} \right)^{-\frac{1}{n}} x_a \right). \quad (4)$$

$$r_a = 1 - R_a = F_{C_a} \left(\frac{1}{g_c} \left(\frac{1 + \delta - g_t}{g_t \beta} \right)^{-\frac{1}{n}} x_a \right). \quad (5)$$

式中 r_a 表示路段 a 不满足可靠性要求的概率,也可以理解为出行者在路段 a 上与行程时间可靠性相关的负效用。

路径行程时间可靠性 R_k 可表示为

$$R_k = \prod_a R_a \delta_{ak}. \quad (6)$$

式中 δ_{ak} 为 0 - 1 变量,若路段 a 属于路径 k , $\delta_{ak} = 1$; 否则, $\delta_{ak} = 0$ 。

1.2 广义出行费用

本文研究背景为冰雪条件,出行者除考虑行程时间、行程时间波动外,还有冰雪条件下的行车安全性。减少行程时间、增加行程时间的可靠性以及提高出行的安全性是出行者的理想目标,但这些目标往往相互矛盾,并不能同时满足。因此,出行者需要在这 3 个目标间寻求折中方案,可用广义出行费用的概念对以上因素进行均衡考虑^[9-10]。广义出行费用定义为:出行者的行程时间和行程时间可靠性及出行安全性的加权综合。冰雪条件下路段的广义出行费用函数表示为

$$COST_a = w_1 T_a + w_2 \gamma_a + w_3 f_a(\alpha). \quad (7)$$

式中: $COST_a$ 为冰雪条件下路段 a 上的广义出行费用; $f_a(\alpha)$ 为表示坡度为 α 时的行车安全性出行费用; w_1 、 w_2 、 w_3 分别是行程时间、行程时间不可靠度、安全性出行费用在出行者广义出行费用中所占的权重,3 个权系数反映了出行者对待风险的态度。 w_1 越大, w_2 和 w_3 越小,则出行者趋向于以行程时间作为路径选择的标准,即趋于忽略风险;反之,出行者是趋于规避风险的。一般而言,不同区域路段、不同冰雪强度、不同出行者个体的权系数往往不同,如在 CBD 区域路段行程时间可靠性的权重较大,冰雪强度越大安全性的权重越大,上班族及学生行程时间可靠性的权重较大。各个

权重可以在 SP 交通调查的基础上确定。

由式(5)、(7)可知,路段广义出行费用是关于该路段交通流量及坡度的函数,与其他路段交通流量、坡度无关,是该路段交通流量及坡度的增函数。这 2 个性质可表达为

$$\frac{\partial \text{COST}_a}{\partial x_a} > 0, \quad \frac{\partial \text{COST}_a}{\partial \alpha_a} > 0.$$

$$\frac{\partial \text{COST}_a}{\partial x_b} = 0, a \neq b; \quad \frac{\partial \text{COST}_a}{\partial \alpha_b} = 0, a \neq b.$$

出行者的路径广义出行费用为

$$\text{COST}_k^w = \sum_{a \in A} \text{COST}_a \delta_{ak}^w.$$

式中: COST_k^w 为 OD 对 w 之间路径 k 的广义出行费用; δ_{ak}^w 为 0-1 变量, 如果 OD 对 w 之间的路径 k 使用路段 a 则为 1, 否则为 0。

1.2.1 安全性出行费用量化

在城市道路中冰雪条件对行车安全性的影响最主要是路面摩擦力的降低。尤其在坡路上, 当车辆的下滑力大于路面所能提供的摩擦力时, 车辆会出现上坡后溜、下坡无法制动加速下滑的险情。显然, 在坡路上路面所能够提供的摩擦力 $f_r G \cos \alpha$ 与下滑力 $G \sin \alpha$ 的差值越大, 行车安全性越高; 反之, 行车安全性越低。因此, 为量化冰雪条件下坡度因素对行车安全性的影响, 引入坡道行驶安全系数, 定义为: 路面可提供的单位质量车辆的摩擦力与单位质量车辆下滑力的差值。用参数 SAFE_a 表示, 其定义式为

$$\text{SAFE}_a = f_r g \cos \alpha - g \sin \alpha. \quad (8)$$

式中: SAFE_a 为路段 a 的坡道行驶安全系数; g 为重力加速度; f_r 为路面摩擦系数; α 为路段坡度。

由式(8)可见: 坡度越小, 单位质量车辆摩擦力 $f_r g \cos \alpha$ 越大, 同时单位质量车辆下滑力 $g \sin \alpha$ 越小, 从而坡道行驶安全系数 SAFE_a 越大, 即行车安全性越高, 相应的出行费用就越小; 反之, 坡度越大, SAFE_a 越小, 即安全性越低, 出行费用越大。因此, 安全性出行费用可以理解为安全性的负效用。将冰雪条件下安全性的出行费用定义为坡道行驶安全系数的倒数, 表示为

$$f_a(\alpha) = \frac{1}{\text{SAFE}_a} = \frac{1}{g} \cdot \frac{1}{f_r \cos \alpha - \sin \alpha}.$$

1.2.2 指标权重确定

采用相对比较法确定指标权重, 相对比较法是一种经验评分法, 将所有指标全列出来组成方阵, 对各指标两两比较打分; 然后对每一指标得分进行求和, 进行归一化处理。打分采用 $[0, 1]$ 打分法, 指标 i 的权重为

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}}.$$

式中 a_{ij} 为指标 i 相对指标 j 的重要性, n 为指标的数量。

1.2.3 指标无量纲化

拟采用比重法进行各指标的无量纲化处理, 计算式为

$$y_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i}.$$

式中 x_i 为样本值, y_i 为 x_i 无量纲化结果。

2 基于广义出行费用的 SUE 模型

2.1 模型建立

假定出行者以估计广义出行费用最小为路径选择标准。由于路网的复杂性和交通状况的随机性, 出行者并不完全知道路网的交通流状态, 他们对出行路径的选择往往是随机的, 因此可以用 SUE 模型来描述出行者的路径选择行为。基于广义出行费用的随机用户平衡就是指这样一种交通流分布状态: 任何出行者都不可能通过单方面改变出行路径而减少自己的估计出行费用。建立模型如下。

$$\begin{aligned} \min z(x) = & - \sum_w q_w E[\min_{k \in K_w} \text{COST}_k^w] + \sum_a x_a \text{COST}_a - \\ & \sum_a \int_0^{x_a} \text{COST}_a(w) dw. \\ \text{s. t. } & \sum_k f_k^w = q_w f_k^w \geq 0, \\ & x_a = \sum_w \sum_k f_k^w \delta_{ak}^w. \end{aligned}$$

式中: q_w 为 OD 对 w 间交通流量; K_w 为 OD 对 w 间路径集合; f_k^w 为 OD 对 w 间路径 k 上的交通流量; 其他参数意义同上。

2.2 模型算法

1) 初始化, 基于零流量的初始阻抗 $\{\text{COST}_a^0 = \text{COST}_a(0), \forall a\}$, 执行一次(阻抗不变)随机加载, 产生路段流量 $\{x_a^1, \forall a\}$, 并令 $k = 1$;

2) 更新各路段阻抗, 令

$$\text{COST}_a^k = \text{COST}_a(x_a^k), \forall a;$$

3) 在新的阻抗基础上, 执行一次流量随机加载, 得到新的路段流量 $\{y_a^k, \forall a\}$;

$$4) \text{ 令 } x_a^{k+1} = \left(1 - \frac{1}{k}\right) x_a^k + \frac{1}{k} y_a^k, \forall a;$$

5) 判别收敛条件, 如果满足式

$$\frac{\sqrt{\sum_a (\bar{x}_a^{k+1} - \bar{x}_a^k)^2}}{\sum_a \bar{x}_a^k} \leq \varepsilon$$

(ε 是预先确定的精度临界值), 则停止, $\{x_a^{k+1}, \forall a\}$ 为所求结果; 否则, 令 $k = k + 1$, 返回第二步^[11].

3 路网容量可靠性

容量可靠性从通行能力的角度出发研究路网的可靠性, 是指路网在可接受的服务水平下能够容纳一定交通量的概率, 它反映了路网在道路通行能力受随机因素影响下的应变能力, 能够明确反映和衡量道路运行情况的重要指标. 为更全面地掌握路网中各路段的可靠性, 探求路网的瓶颈, 本文从路段角度定义容量可靠性, 然后根据路网中路段的连接方式, 求出路网容量可靠性. 路段容量可靠性定义为: 路段上实际交通量不大于该路段通行能力 ε 倍的概率. 定义式为

$$R_a(x_a) = P(x_a \leq \varepsilon C_a).$$

式中: ε 反映了出行者对路段不同服务水平要求, 该值越小, 对服务水平要求越高, 可靠性就越低; 反之, 该值越大, 对服务水平要求越低, 可靠性就越高. $0 < \varepsilon \leq 1$, ε 的含义与路段饱和度相似, 对于不同服务水平要求下的取值, 可参照饱和度与服务水平的对应关系.

路网是由路段以不同的连接方式连接而成, 因此路网容量可靠性取决于其组成路段的可靠性及其相互连接方式. 总体上, 路网中路段的基本连接方式有 2 种, 分别是串联和并联, 然后由串联并联混联而成. 路段相互串联的可靠性可表示为

$$R(s) = \prod_{i=1}^m R_i.$$

式中 $R(s)$ 为串联的可靠性, m 为串联路段的数量. 路段相互并联的可靠性可表示为

$$R(s) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - R_i).$$

采用 Monte Carlo 模拟结合交通规划模型求解, 通过 Matlab 编程运算实现, 仿真流程见图 1.

4 算例分析

图 2 所示的虚设测试路网, 包括 4 个节点, 5 条路段和 1 个 OD (1, 4). OD 交通量为 34 veh/min. ISB-BPR 函数中参数 $\beta = 0.15$, $n = 4$. 正常条件下路段自由行程时间、通行能力如表 1 所示. 本文旨在研究冰雪条件下出行者路径选择行为对容量可靠性的影响, 而冰雪强度对可靠

性的影响在它处已作研究, 本算例仅针对某一特定的冰雪条件进行研究, 因此函数 $g_t(I)$ 、 $g_c(I)$ 可根据实际调查, 标定为某一具体的系数, 见表 1. 仿真采用 Matlab7.0 编程处理.

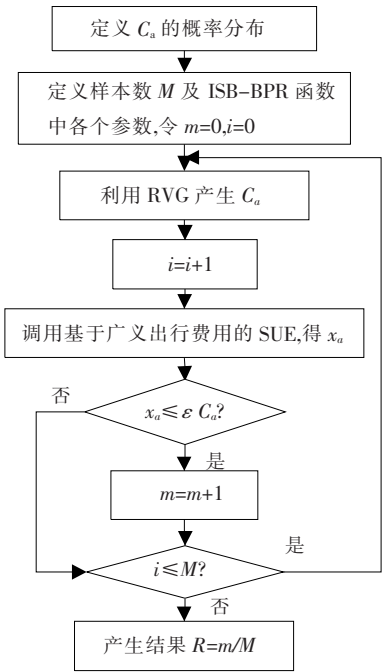


图 1 仿真流程

随机变量 C_a 的分布形式需通过调查确定, 在此假定服从正态分布. 通过 6 000 次 Monte Carlo 仿真, C_a 的估计值与理论值误差为 0.13%, 仿真次数满足精度要求.

本文研究重点是冰雪条件下出行者对待风险的不同态度对容量可靠性的影响. 此处仅令 $\varepsilon = 0.9$. 利用以上模型计算各路段容量可靠性, 结果如图 3 所示. 出行者对待风险的不同态度对路段容量可靠性有明显影响. 当 w_1 增加趋近于 1 时, 即逐渐增加行程时间在出行费用中的权重, 表示出行者趋向于以行程时间为路径选择准则, 这时出行者会优先选择行程时间短的路径, 而又由于路段 2 的行程时间最小, 仅接近其他路径的一半, 故出行者会逐渐集中于该路段上, 所以该路段容量可靠性会逐渐下降. 其他行程时间较长的路段 (1、3、4、5) 恰好相反, 路段上的交通量会逐步减少, 从而容量可靠性逐渐增大. 当 w_2 增大逐渐趋近于 1 时, 表示出行者趋向于以行程时间可靠性为路径选择准则, 这时出行者会优先选择容量大, 且波动性小的路径, 从而路段 3、5 流量增加, 容量可靠性降低, 而其他路段 (1、2、4) 可靠性反而会有所提高. 当 w_3 增大逐渐趋近于 1 时, 表示出行者趋向于以安全性为路径选择准则, 从而路段 2

出行费用变大,分配交通量减小,因此容量可靠性反而增加,这时出行者会选择安全性大的平坦路段,从而其他路段分担的交通量增加,引起路段(1、3、4、5)容量可靠性降低.由图3~4可见,路网容量可靠性随费用权值的不同有明显变化,冒险的路径选择行为会使路网整体容量可靠性下降.

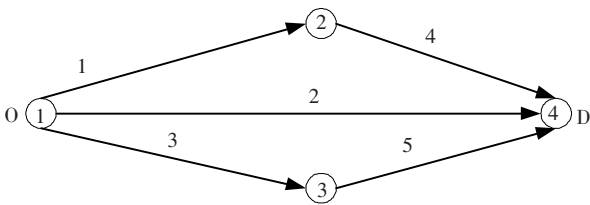
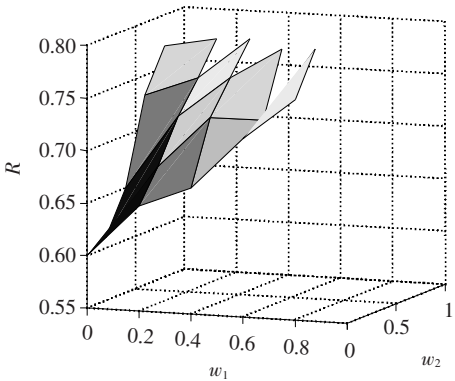


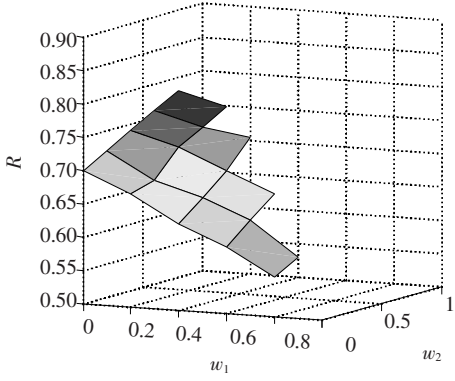
图 2 测试路网

表 1 路段属性

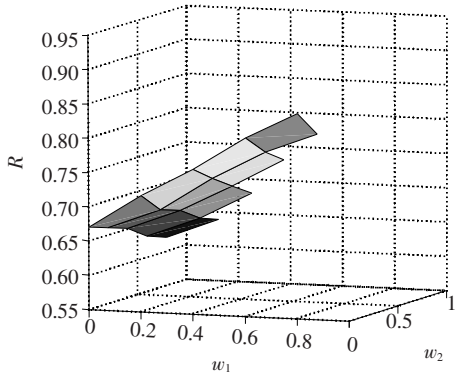
路段编号	自由行程时间 t_a/min	通行能力 $c_a/(\text{veh} \cdot \text{min}^{-1})$	自由行程时间修正 $g_t(I)$	通行能力修正 $g_c(I)$	坡度/ $(^\circ)$
1	7	N(13, 4)	1.13	0.91	0
2	9	N(9, 3)	1.19	0.87	5
3	9	N(17, 2)	1.13	0.91	0
4	7	N(13, 4)	1.13	0.91	0
5	9	N(17, 2)	1.13	0.91	0



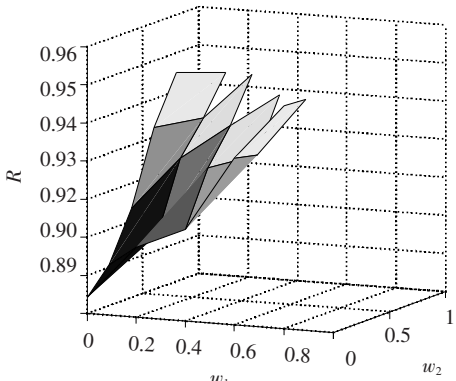
(a)路段 1、4 容量可靠性



(b)路段 2 容量可靠性



(c)路段 3、5 容量可靠性



(d)路网容量可靠性

图 3 费用指标权系数对路段及路网容量可靠性的影响

5 结 语

在均衡考虑行程时间、行程时间可靠性、安全性的前提下,定义了冰雪条件下出行者的广义出行费用函数,并以该函数为基础构建了基于广义出行费用的随机用户平衡分配模型.利用此模型

研究了冰雪条件下城市路网容量可靠性,分析了出行者对待风险的不同态度对容量可靠性的影响,过于冒险的路径选择行为将降低路网的容量可靠性.本文将行程时间可靠性作为出行费用函数中一个指标,对容量可靠性与行程时间可靠性的相互作用机理还需进一步研究.

参考文献:

- [1] 许良,高自友. 基于路段能力可靠性的城市交通网络设计[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 86-90.
- [2] VAN LINT J W C, VAN ZUYLEN H J, TU H. Travel time unreliability on freeways: why measures based on variance tell only half the story[J]. Transportation Research Part A, 2008, 42(1): 258-277.
- [3] BELL M G H. A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks[J]. Transportation Research Part B, 2000, 34(6): 533-551.
- [4] CHEN A, YANG H, LO H K, *et al.* A capacity related reliability for transportation networks[J]. Journal of Advanced Transportation, 1999, 33(2): 183-200.
- [5] LO H K, TUNG Y K. Network with degradable links: capacity analysis and design[J]. Transportation Research Part B, 2003, 37(4): 345-363.
- [6] CHEN A, YANG H, LO H K, *et al.* Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results[J]. Transportation Research, 2002, 36(3): 225-252.
- [7] ASAKURA Y, KASHIWADANI M. Road network reliability caused by daily fluctuation of traffic flow[C]//Proceedings of the 19th PTRC Summer Annual Meeting. Brighton:[s. n.], 1991: 73-84.
- [8] LENG Junqiang, ZHANG Yaping, LENG Yuquan. Assessment methodology for road network travel time reliability under ice and snowfall conditions[C]//Proceedings of the 9th International Conference of Chinese Transportation Professionals. Harbin, China; United States, American Society of Civil Engineers, 2009: 1124-1130.
- [9] 刘海旭,蒲云. 基于行程质量的随机用户平衡分配模型[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 48-50.
- [10] 刘海旭,蒲云. 基于路段走行时间可靠性的路网容量可靠性[J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(5): 573-576.
- [11] 邵春福. 交通规划原理[M]. 北京:中国铁道出版社, 2008: 198-208.

(编辑 赵丽莹)

(上接第59页)

- [14] YUNBO Z. Effects of metallic derivatives in adsorbent derived from sewage sludge on adsorption of sulfur dioxide[J]. J Cent South Univ Technol, 2004, 11(1): 55-58.
- [15] YU Lanlan, ZHONG Qin. Preparation of adsorbents made from sewage sludges for adsorption of organic materials from wastewater[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, B137: 359-366.
- [16] 任爱玲. 城市污水处理厂污泥质活性炭的研究[J]. 环境科学, 2004, 25(增刊): 48-51.
- [17] 张斌. 微波法污泥含碳吸附剂的制备与应用研究[D]. 昆明:昆明理工大学环境科学与工程学院, 2006: 63-64.
- [18] 杨丽君,蒋文举. 微波法污水厂污泥制备活性炭的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(11): 92-94.
- [19] CHEN L, ZHENG GUANG T, YAO C, *et al.* Characterization of mesoporous activated carbons prepared by pyrolysis of sewage sludge with pyrolusite[J]. Biore-source Technology, 2010, 101(3): 1097-1101.
- [20] SEREDYCH M, BANDOSZ T J. Sewage sludge as a single precursor for development of composite adsorbents/catalysts[J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 128(1): 59-67.
- [21] XIAODAN F, XIANGKAI Z. Adsorption properties of activated carbon from sewage sludge to alkaline-black[J]. Materials Letters, 2008, 62(10/11): 1704-1706.

(编辑 刘 彤)