

内涝影响下路网畅通可靠度评估及 关键路段识别

吴文静¹, 邓淳淳¹, 贾洪飞¹, 孙舒航²

(1. 吉林大学交通学院, 长春 130022; 2. 吉林省交通运输综合行政执法局, 长春 130022)

摘要:为评估内涝对城市交通运行的影响,并量化城市中缺陷路段在内涝影响下的失效程度,本文综合考虑路段在内涝条件下通行能力的下降和路网的交通供需变化过程,首先,以路段畅通可靠度为指标定量表征路段的失效程度;其次,构建评估路网畅通可靠度的贝叶斯网络模型,并分析路段与路网间的影响关系;最后,结合路段畅通可靠度和对路网的影响程度,识别关键路段。选取深圳市某一区域路网及道路积水数据进行实例分析,对模型进行敏感性分析,验证了模型的可行性。研究结果为城市路网在内涝条件下关键路段的识别提供了新思路。

关键词:交通运输规划与管理;内涝;畅通可靠度;关键路段识别;贝叶斯网络

中图分类号:U491 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)04-1250-08

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230772

Evaluation of road network unblocked reliability and identification of critical sections under influence of flooding

WU Wen-jing¹, DENG Chun-chun¹, JIA Hong-fei¹, SUN Shu-hang²

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Jilin Provincial Transportation Comprehensive Administrative Law Enforcement Bureau, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to assess the impact of flooding on urban traffic operation and quantify the degree of failure of defective road sections in the city under the influence of flooding, this paper takes into account the decline in the capacity of road sections under the condition of flooding and the change process of traffic supply and demand in the road network, and quantitatively characterizes the degree of failure of road sections by taking road section smoothness and reliability as an indicator; we construct a Bayesian network model for assessing the degree of smoothness and reliability of the road network, and analyse the influence relationship between road sections and road networks; finally, identify the key road sections by combining the smoothness and reliability of road sections and their influence on road networks. The road network and flooding data of a certain area in Shenzhen are selected for example analysis, and the sensitivity analysis of the model verifies the feasibility of the model. The results of the study provide new ideas for the

收稿日期:2023-07-22.

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20230203127SF);吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20241297KJ);吉林大学研究生创新基金项目(2024CX216).

作者简介:吴文静(1980-),女,教授,博士.研究方向:运输系统规划.E-mail: wuwj@jlu.edu.cn

通信作者:贾洪飞(1969-),男,教授,博士.研究方向:交通系统规划.E-mail: jiahf@jlu.edu.cn

identification of critical road sections in urban road networks under flooding conditions.

Key words: transportation planning and management; flooding; unblocked reliability; identification of critical sections; Bayesian network

0 引言

内涝指在强降水或连续降水背景下,地面产生积水灾害的现象。由于城市人口增加、建筑物密集度增加和排水系统老化,城市发生内涝的频率和严重程度不断上升^[1]。内涝对道路交通运行的影响显而易见,积水使车辆的行驶速度下降甚至迫使部分道路限制交通流动,导致道路无法满足车辆畅通通行的需求,车辆行车延误增加,交通拥堵加剧。因此,评估内涝影响下的路网畅通可靠度并识别关键路段,对城市交通的畅通运行、紧急救援和灾害应对具有重要的作用和意义。

国内外关于内涝对道路交通运行状态的评价一般选取行驶速度和道路通行能力作为评价指标。杜磊等^[2]通过建立车速随积水深度衰减的数学模型量化表征积水深度与道路通行能力间的关系;Pregolato等^[3]建立了“淹没深度-车速”脆弱性曲线,反映车速随道路淹没深度的变化情况;Zhang等^[4]对强降雨影响下的交通流特征进行定量分析,发现道路通行能力、车流速度都有下降。然而,道路通行能力评估无法反映路段的拥堵情况和交通流的稳定性;行驶速度评估无法反映内涝条件下的路网交通供需平衡状态。在此,综合考虑内涝影响下道路通行能力下降及路网中的交通供需平衡态演化过程,提出路段及路网的畅通可靠度评估方法,从而能够更真实地反映内涝对路网的影响。

对畅通可靠度的研究,陈艳艳等^[5]提出了畅通可靠度的概念;唐夕茹等^[6]研究了路网供需及路网结构对路网畅通可靠度的影响,建立了路网畅通可靠度及其影响因素的多元关系模型;梁颖等^[7]开展了基于网络分析的研究,旨在建立城市交通网络畅通可靠度的衡量标准和评估方法,以及优化公路网建设中的畅通可靠度。本文借鉴已有的畅通可靠度评价方法,将其应用于内涝场景,提出一种内涝影响下路段畅通可靠度的计算方法。利用贝叶斯网络的推理能力,构建评估路网畅通可靠度的贝叶斯网络模型,并分析路段与路网间的影响关系;最后结合路段畅通可靠度和对

路网的影响程度,识别关键路段,为提升城市抗涝可靠性提供依据。

1 内涝影响下路段畅通可靠度

1.1 路段畅通可靠度模型构建

路段畅通可靠度指在各种运行条件下,包括高峰时段、紧急情况或受突发事件和不可预测的因素影响下,路段运营状态能满足畅通状态的概率^[5]。已有研究在路段畅通可靠度的评估方面相当成熟,但这些研究通常没有结合具体场景,考虑特定因素对路段的影响,给出针对性的路段畅通可靠度计算方法。内涝会对路段通行能力造成显著影响,且不同路段的通行能力衰退幅度并不相同,因此,本文结合内涝对路段的影响,提出了一种考虑内涝影响下路段畅通可靠度的计算方法。

内涝影响下的路段畅通可靠度定义为:在内涝影响下,路段通行能力仍能满足交通需求且运营达到畅通状态的概率。由交通供需关系可以得到路段单元的功能函数为:

$$Z = g(C', V) = kC' - V \quad (1)$$

式中: Z 为路段运行状态, $Z > 0$ 时路段畅通, $Z = 0$ 时路段饱和, $Z < 0$ 时路段阻塞; kC' 为路段在满足畅通状态时的最大服务交通量, C' 为内涝条件下路段的可能通行能力, k 为保证路段畅通的通行能力折减系数, $0 < k < 1$,其对于路段 k 一般取 $0.6 \sim 0.75$,本文取 $k = 0.75$; V 为路段交通需求量。

根据内涝影响下路段畅通可靠度的定义,路段畅通可靠度的计算公式为:

$$P = P\{Z > 0\} = \int_0^{+\infty} f_z(Z) dZ \quad (2)$$

内涝影响下的路段畅通可靠度反映了路段功能因外界干扰发生变化时,路段通行能力对交通需求的满足程度。计算路段的畅通可靠性之前,需要计算出内涝影响下路段的可能通行能力和交通需求量。

1.1.1 路段通行能力折减

由于城市道路具有高不透水性,加之排水管

网能力不足,在面对暴雨时很容易产生内涝积水,且持续时间长,车辆行驶速度会受到很大限制。道路积水是影响车辆行驶速度的主要因素,随着积水深度的增加,车辆行驶速度随之降低。车辆速度与积水深度之间的关系可以通过车速随积水深度衰减的数学模型来定量表示。衰减模型如式(3)所示:

$$v = \frac{v_0}{2} \tanh\left(\frac{-x+a}{b}\right) + \frac{v_0}{2} \quad (3)$$

式中: v 为车辆速度,km/h; v_0 为该地点的设计车速,km/h; x 为积水深度,cm; a 为使车辆停滞的临界积水深度的中值,由于积水深度超过30 cm,存在道路堵塞、人员车辆被困的风险,故本文设定 $a=15$; b 为衰减弹性系数,表示车速随水深衰减的速率,一般取3~5, b 的取值越小衰减速度越快,为体现各路段由于积水深度不同造成功能衰退的差异性,本文取 $b=5$ 。

内涝下各项因素对路段通行能力的综合影响可以等价为车速降低对路段通行能力的影响,路段在内涝条件下通行能力的受影响程度可以用内涝对通行能力的修正系数来衡量。内涝对通行能力的修正系数 η 计算公式为:

$$\eta = \frac{v_i}{v_0} \quad (4)$$

式中: v_i 为内涝下的车辆速度。

内涝条件下路段的可能通行能力的计算公式为:

$$C' = C \times \eta \quad (5)$$

$$C = C_0 \cdot N \cdot f_w \cdot f_{HV} \quad (6)$$

式中: C' 为路段在内涝条件下的可能通行能力; C 为路段正常状态下的可能通行能力; C_0 为某路段单车道基本通行能力,pcu/h,取值参照《城市道路设计规范》(GB 50137-2011); N 为某路段双向车道数; f_w 为车道宽度和侧向净空影响修正系数,本文按照美国AASHTO标准取 $f_w=0.8$; f_{HV} 为大型车混行影响修正系数,在对道路实际通行能力的计算过程中,由于无法获得实际车辆类型的组成情况,故本文取 $f_{HV}=0.8$ 。

1.1.2 路段交通量预测

本文采用“四阶段法”对交通需求进行预测,在交通规划软件TransCAD中以整个交通系统出行总成本最低为目标,选择系统最优分配方法,基于全局的交通数据和信息进行分配决策,得到各

个路段上的交通需求量。

1.2 路段畅通可靠度计算

由于人们对是否出行、出行时间、目的选择、出行方式选择及出行路径选择是随机的,交通系统的实际流量具有强烈的随机性,因此,本文将路段在内涝条件下的可能通行能力 C' 与交通需求 V 都近似为正态分布, kC' 均值和方差分别为:

$$\mu_{kC'} = k \times \mu_{C'}, \sigma_{kC'} = k \times \sigma_{C'}$$

因此,路段的畅通可靠度为:

$$P = P\{Z > 0\} = P\left\{\frac{Z - \mu_z}{\sigma_z} > \frac{-\mu_z}{\sigma_z}\right\} \quad (7)$$

$$\text{令 } \beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z}, Y = \frac{Z - \mu_z}{\sigma_z}, \text{ 即:}$$

$$\begin{cases} P = P\{Y > -\beta\} = P\{Y \leq \beta\} = \phi(\beta) \\ \beta = \frac{\mu_{kC'} - \mu_V}{\sqrt{\sigma_{kC'}^2 + \sigma_V^2}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: Y 服从标准正态分布; $\phi(\cdot)$ 为标准正态函数。

根据式(8)及 β 值查询标准正态分布表,可以得到路段畅通可靠度;路段畅通可靠度的值越小,说明路段越脆弱。

2 基于贝叶斯网络的路网畅通可靠度模型

2.1 贝叶斯网络理论基础

贝叶斯网络是一个有向无环图,它由节点与节点之间的有向边构成;节点表示变量,有向边表示变量之间的概率依赖关系。贝叶斯公式是贝叶斯网络的基础:

$$P(A|B) = P(B|A)P(A)/P(B) \quad (9)$$

式中: $P(A)$ 为先验概率,表示 B 事件发生前,对 A 事件概括的判断; $P(B|A)$ 为似然函数,表示 A 事件发生时, B 事件发生的概率; $P(A|B)$ 为后验概率,表示 B 事件发生后,对 A 事件的重新评估。

贝叶斯网络不仅可以正向推理,由先验概率计算得到后验概率,即由原因推导出结果;还可以反向推理,由后验概率推导出先验概率,即由结果导出原因。利用后验概率的结论有助于进行系统分析,判断系统中单个组件对系统的影响程度。

对不同问题贝叶斯网络的构造过程并不完全相同但一般都包括以下步骤:

(1)确定构成所研究问题领域的变量集,即形成网络中的根节点。

(2)根据节点之间的概率依赖关系或先验依赖关系确定网络结构。

(3)计算每个节点的概率分布,包括根据节点的先验概率分布和中间节点的条件概率分布。

2.2 基于贝叶斯网络的道路交通网络模型构建

基于贝叶斯网络的道路交通网络模型构建技术路线如图 1 所示。



图 1 基于贝叶斯网络的道路交通网络模型构建方法
Fig. 1 A method for constructing a road traffic network model based on Bayesian networks

2.2.1 变量集和网络结构

城市道路交通网络通常由多个 OD 对组成,每个 OD 对又由多条路径组成,每条路径又由多条路段连接而成。构建路网的贝叶斯模型可以从路段入手,通过路段、路径、OD 对、路网之间的结构关系,将路径视为由路段串联构成的子系统,将 OD 对视为由路径并联构成的子系统,而路网视为由 OD 对串联构成的系统。因此,可以根据路网的结构组成,构建贝叶斯网络模型。步骤如下:

(1)将路网中的每个路段按顺序编号作为贝叶斯网络的根节点,路段构成的集合就是要研究的节点变量集。

(2)根据路网中路段之间的连接关系确定路网的贝叶斯网络结构:贝叶斯网络由根节点到叶节点共 4 个层级,分别代表路段、路径、OD 对、路网。其中,路段与路径之间类似于逻辑中的与关系,只有路径中的所有路段畅通,才认为此路径畅通;路径与 OD 对之间类似于逻辑中的或关系,OD 对之间的任意一条最短路径畅通,即认为此 OD 对畅通;OD 对与路网之间类似于逻辑中的与关系,只有路网中的所有 OD 对畅通,才认为此路网畅通。

2.2.2 路网畅通可靠度

在本文构建的贝叶斯网络中,节点间的条件概率表由节点间的逻辑关系确定,根节点的先验概率由路段单元的畅通可靠度定量表示。在贝叶斯网络中输入根节点即路段节点的畅通可靠度作为先验概率,通过向前推理逐步计算路径节点、OD 对节点和路网节点的畅通可靠度。通过这种方式,可以量化路网的畅通可靠度,并根据其数值来评估路网的脆弱程度:路网畅通可靠度的值越小,说明路网越脆弱。贝叶斯网络结构如图 2 所示,内涝-路段之间的边代表路段畅通可靠度,其余各层级之间的边表示层级之间的逻辑关系。

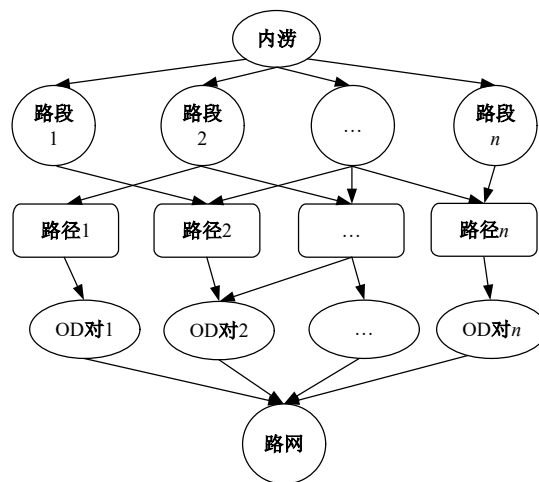


图 2 贝叶斯网络结构图

Fig. 2 Bayesian network structure diagram

2.3 路段畅通可靠度影响模型

路网可以抽象为由节点和边构成的复杂网络,站在网络拓扑结构的角度,各路段对路网整体的影响程度是不同的。故本文利用路段畅通可靠度影响模型分析各路段对路网的影响程度。

路段畅通可靠性影响模型的核心思想是:假定路网中的某条路段畅通可靠度为 1,路网中其余路段的畅通可靠度保持不变,利用贝叶斯网络的推理能力,求得此时的路网畅通可靠度,将路网畅通可靠度的变化率与路段畅通可靠度变化率做比值,根据相对变化率判断路段的重要程度,相对变化率越大,说明此路段越重要。公式如下:

$$\Delta_n = \frac{P'/P}{P'_n/P_n} \quad (10)$$

式中: Δ_n 为相对变化率; P' 为设定路段 n 畅通条件下的路网畅通可靠度; P 为路网畅通可靠度; P'_n 为设定路段 n 的畅通可靠度, $P'_n = 1$; P_n 为路段 n 的畅通可靠度。

3 基于贝叶斯网络模型的路网关键路段识别

关键路段是指对整个路网运行情况具有重要影响的路段,因此,识别路网中的关键路段对路网整体性能的提升至关重要。当前大量研究着眼于通过比较路段失效前后对路网性能的影响程度来识别关键路段,即影响程度等价于关键性。Tang 等^[8]利用中断概率对城市道路抗震脆弱性进行了定量分析,通过构建路网的贝叶斯网络计算后验概率识别关键环节;李飞燕^[9]考虑城市道路网在遭遇严重的干扰事件时,容易触发级联故障效应这一特性,评估由此导致的路网效率降低程度,识别关键路段;贾洪飞等^[10]基于 GPS 轨迹数据,识别城市路网中的关键路段。以上识别关键路段的方法未考虑路段本身在受到干扰后的功能变化。

本文对关键路段的识别综合考虑两个方面:一方面是路段单元的畅通可靠度;另一方面是路段单元对路网的影响程度,技术路线如图 3 所示。由于对路段畅通可靠度和路段单元对路网的影响程度量化求值后,求得的数值与路段关键性之间并非均为正相关:路段畅通可靠度与路段关键性呈负相关,路网畅通可靠度相对变化率与路段关键性呈正相关。故将两者结合对路段的关键性进行量化时,将路段畅通度的数值取补,路网畅通可靠度相对变化率保持不变,最后进行加和,得到的数值即路段的关键度,值越大,说明此路段越关键。计算公式如下:

$$K_n = (1 - P_n)' + (\Delta_n)' \quad (11)$$

式中: K_n 为路段 n 的关键度; $()'$ 为标准化处理。

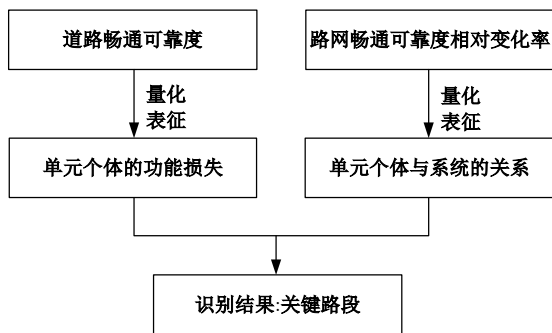


图 3 关键路段识别技术路线图

Fig. 3 Technology roadmap for identification of key sections

4 案例分析及验证

4.1 研究路网及数据采集

本文选取案例以深圳市为背景,运用上述介绍的方法进行实例分析。研究区域西起新洲路,东迄皇岗路,北至深南大道,南抵滨河大道,分析中仅考虑主干道和部分次干道构成的交通网络,共包含 11 个路段、9 个交叉口,如图 4 所示。

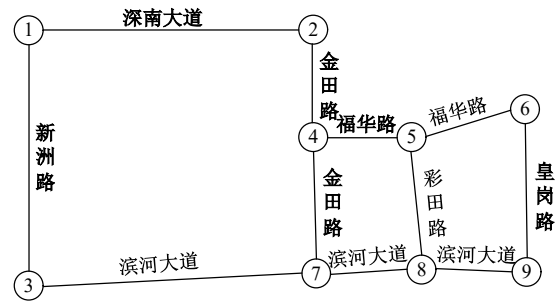


图 4 研究案例区域路网图

Fig. 4 Road network diagram of study case area

爬取深圳市数据开放平台的福田区-道路积水数据,得到福田区 18 个积水点由 2019 年 12 月 1 日到 2020 年 12 月 29 日的积水深度数据。该数据集共包含数据 535 076 条,每条数据有 5 个数据项,分别表示积水点名称、经度、纬度、积水深度和上报时间 5 类基本信息。

4.2 路段畅通可靠度评估

利用 Space-L 法提取路网的拓扑结构,如图 5 所示。路网中包含 3 个 OD 对,各 OD 对之间的最短路如表 1 所示,由此建立路网的贝叶斯网络如图 6 所示。

由于交通发生量和吸引量的计算不是本文研究的重点,故直接设定 OD 对之间的交通需求量,且假设 OD 对之间的起讫交通量相等,将 OD 矩阵导入交通规划软件 TransCAD 中,按照系统最优配流模型,将 O 点与 D 点之间的交通需求分配

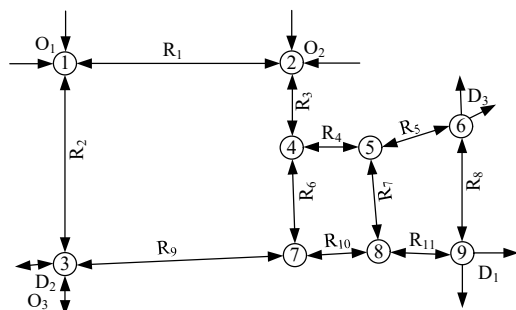


图 5 路网网络拓扑结构图

Fig. 5 Topological structure of road network

表 1 OD 对之间单向交通流量及最短路径
Table 1 Unidirectional traffic volume and shortest path between OD pairs

OD 对	单向交通流量/(pcu·h ⁻¹)	最短路径
1-9	2 500	(1,3,4,5,8), (2,9,10,11), (1,3,6,10,11), (1,3,4,7,11)
2-3	2 500	(1,2), (3,6,9)
3-6	2 500	(9,10,11,8), (9,10,7,5), (9,6,4,5), (2,1,3,4,5)

表 2 路段交通流分配结果及内涝条件下可能通行能力

Table 2 Traffic distribution results and possible traffic capacity for road sections under rainstorm conditions

	路段 1	路段 2	路段 3	路段 4	路段 5	路段 6	路段 7	路段 8	路段 9	路段 10	路段 11
交通流/(pcu·h ⁻¹)	8 290	3 370	6 671	1 356	4 372	5 865	5 136	628	6 710	8 644	5 628
路段正常状态下的可能通行能力/(pcu·h ⁻¹)	11 520	9 216	8 064	6 336	6 336	8 064	9 216	9 216	921 6	9 216	9 216
修正系数	0.878 9	0.880 8	1	0.878 2	1	1	1	0.880 8	0.880 8	1	0.880 8
内涝条件下可能通行能力/(pcu·h ⁻¹)	10 125	8 117	8 064	5 564	6 336	8 064	9 216	8 117	8 117	9 216	811 7

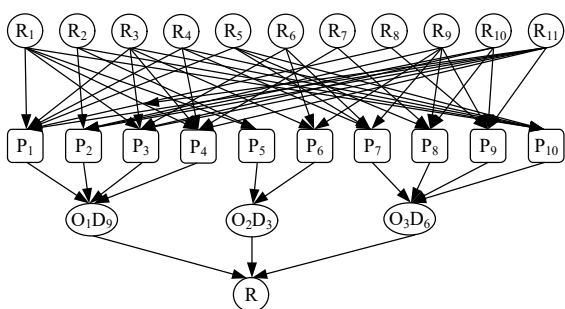


图 6 评价内涝影响下路网畅通可靠度的贝叶斯网络
Fig. 6 Bayesian network for evaluating unblocked reliability of road networks under influence of waterlogging

根据上文介绍的计算方法,求出路段在内涝条件下的可能通行能力以及交通需求的均值和方

到路网上,得到各路段的交通流量如表 2 所示。由于本文所研究的场景不聚焦于某一固定时间点,更关注的是路网中各个组成部分功能衰退最剧烈的情况,故本文不考虑网络中节点状态在时间上的一致性,而是将各积水点的最大积水深度作为积水点所在路段的积水深度,代入速度衰减模型中求得行车速度,进一步计算得到各路段在内涝条件下的可能通行能力,汇总结果如表 2 所示。

差,进一步求得路段畅通可靠度,结果如表 3 所示。可以看出路段 2、4、8 在内涝影响下仍然具有良好的运行效率和流动性;路段 1、3、9、10 在内涝影响下交通运行效率较低,可能会导致长时间的延误和交通拥堵。

4.3 路网畅通可靠度评估及关键路段识别

将路段的畅通可靠度作为路段单元的节点状态输入贝叶斯网络,由网络中各个层级之间的逻辑关系,确定贝叶斯网络中各个层级之间的条件概率表,通过 GeNIe 软件进行建模计算。对贝叶斯网络进行正向推理,得到路网的畅通可靠度为 0.052 986 132;由畅通可靠度影响模型,计算得到路网的相对变化率;由第 3 节介绍的方法,计算

表 3 路段单元的畅通可靠度

Table 3 Unblocked reliability of road section units

路段标号	μ_C	μ_{kC}	σ_C	σ_{kC}	μ_V	σ_V	β	P
1	10 125	7 594	1 012	759	8 290	829	-0.619 36	0.267 8
2	8 117	6 088	812	609	3 370	337	3.905 922	1
3	8 064	6 048	403	302	6 671	667	-0.771 8	0.220 1
4	5 564	4 173	278	209	1 356	90	12.389 64	1
5	6 336	4 752	317	238	4 372	291	1.011 66	0.844 1
6	8 064	6 048	403	302	5 865	587	0.246 514	0.597 4
7	9 216	6 912	922	691	5 136	514	2.062 057	0.980 4
8	8 117	6 088	812	609	628	63	8.920 42	1
9	8 117	6 088	812	609	6 710	671	-0.686 41	0.246 2
10	9 216	6 912	922	691	8 644	864	-1.565 04	0.058 8
11	8 117	6 088	812	609	5 628	563	0.554 426	0.710 4

得到路段的关键度。结果如表 4 所示,路段关键度分布如图 7 所示。可以看出,路段 1、3、5 对路网的影响程度较大,在路网的拓扑结构中具有重

要地位;路段 1、3、5、10 是路网在内涝条件下的关键路段,对于路网的整体运行起着至关重要的作用。

表 4 路网关键性衡量指标量化结果

Table 4 Quantitative results of key measurement indicators for road network

路段标号	路段畅通可靠度 P	设定路段畅通条件下的路网畅通可靠度 P'	路网畅通可靠度相对变化率 $\Delta_n/\%$	路段关键度 K_n
1	0.267 8	0.194 159 900	97.447 934	0.498 820 266
2	1	0.052 986 132	0.000 000	0
3	0.220 1	0.230 977 800	94.802 235	0.501 862 011
4	1	0.052 986 132	0.000 000	0
5	0.844 1	0.062 080 808	92.933 608	0.342 606 128
6	0.597 4	0.053 653 387	1.868 620	0.104 921 906
7	0.980 4	0.052 986 132	0.000 000	0.004 810 052
8	1	0.052 986 132	0.000 000	0
9	0.246 2	0.062 883 297	6.100 712	0.204 969 784
10	0.058 8	0.104 728 620	6.100 712	0.250 959 771
11	0.710 4	0.054 303 898	6.100 711	0.091 050 081

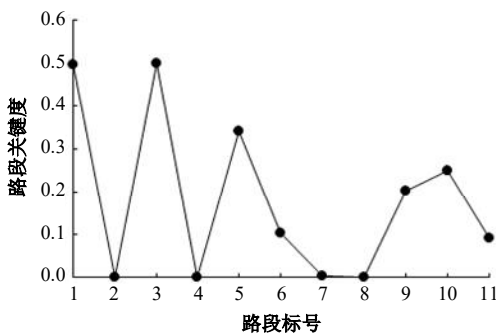


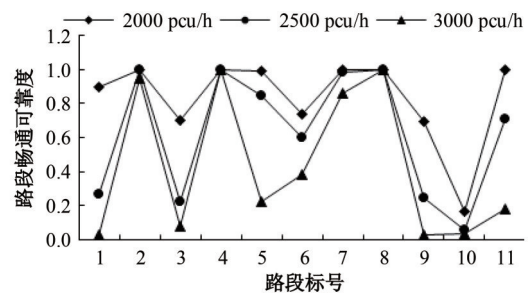
图 7 路段关键度分布

Fig. 7 Key degree distribution of road section

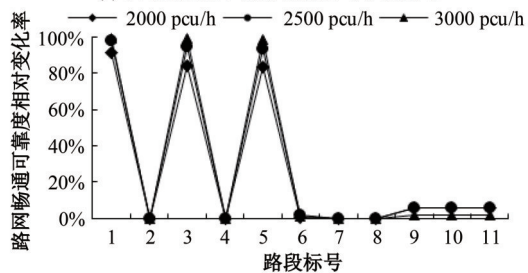
4.4 敏感性分析

在本文提出的关键路段识别模型中,交通需求是重要的影响因素,因此,需要对OD对之间的交通流进行敏感性分析,敏感性分析结果如图 8 所示。可以得出以下结论:

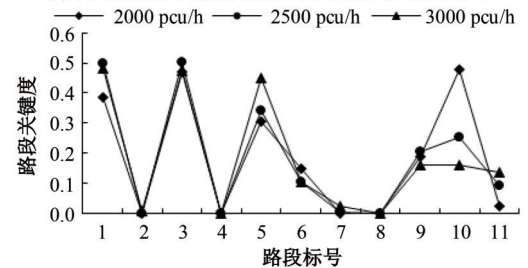
(1)随着OD间交通量的增大,路段的畅通可靠度均明显下降,这是由于随着OD间交通量的增加,各路段上分配的交通量随之增大,如果超过了道路的通行能力,容易出现拥堵和延误,路段的畅通可靠度会下降。道路通行能力对畅通可靠度具有重要影响,对畅通可靠度较差的路段可以通过改进排水系统以减轻内涝对路段通行能力的影响,或在路段设置警示进行路况信息发布,对车辆进行引导,避免车辆堆积。若不考虑内涝对积水的影响,仅考虑路段对路网的影响程度,由图 8 (a)可看出,关键路段应为路段 1、3、5,这与考虑



(a)不同交通流下的路段畅通可靠度分布



(b)不同交通流下的路网畅通可靠度相对变化率分布



(c)不同交通流下的路段关键度分布

图 8 敏感性分析折线图

Fig. 8 Sensitivity analysis line chart

内涝影响下的识别结果有一定区别,这是由于内涝导致某些道路通行能力下发生明显下降且路段

本身流量较大,若发生内涝,也应对这些路段格外关注。

(2)路段对路网畅通可靠性的相对变化率无明显波动,这是由于路段对路网的影响程度与路网拓扑结构相关联,路网拓扑结构没有变化,路段对路网畅通可靠性的相对变化率一般不会出现波动。

(3)路段的关键度只有个别路段发生变化。在3种不同大小交通流的场景下,识别出的关键路段结果相同,证实了该关键路段识别方法的可行性。

5 结 论

(1)由于内涝对路段的影响具有差异性,利用积水深度评估不同路段通行能力的折减;将通行能力和交通需求同时纳入考量,以路段畅通可靠度反映路段在内涝影响下的失效程度,这更切合内涝影响下的路网特性和实际情况。

(2)以路段畅通可靠度表征系统中个体的功能损失,路网畅通可靠度相对变化率表征单元与系统的关系,并结合两者识别路网中的关键路段。可以帮助交通管理部门采取相应的措施,保障公众和交通安全。

(3)内涝条件下的交通流状况会受到多种因素的影响,包括路面湿滑、能见度低等,本文只考虑了积水深度单个因素,由于贝叶斯网络具有动态更新功能,当后期获取更多有效数据时,该模型的识别效率和准确度将会更高。

参考文献:

- [1] Jiao S, Zhang X L, Xu Y. A review of Chinese land suitability assessment from the rainfall-waterlogging perspective: evidence from the Su Yu Yuan area[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 144: 100-106.
- [2] 杜磊, 杨晓宽. 不同道路积水情况对交通影响及造成损失的研究[C]//中国土木工程学会市政工程分会城市道路与交通学术委员会第十一次全国城市道路交通学术会议论文集, 北京, 中国, 2011: 389-393.
- [3] Pregolato M, Ford A, Wilkinson S M, et al. The impact of flooding on road transport: a depth-disruption function[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 55: 67-81.
- [4] Zhang W, Li R, Shang P, et al. Impact analysis of rainfall on traffic flow characteristics in Beijing[J]. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 2019, 17(2):150-160.
- [5] 陈艳艳, 梁颖, 杜华兵. 可靠度在路网运营状态评价中的应用[J]. *土木工程学报*, 2003(1): 36-40. Chen Yan-yan, Liang Ying, Du Hua-bing. Application of reliability in the evaluation of road network operation status[J]. *Journal of Civil Engineering*, 2003 (1): 36-40.
- [6] 唐夕茹, 陈艳艳, 段卫静. 城市路网畅通可靠度计算方法及其应用[J]. *城市交通*, 2011, 9(2): 40-46. Tang Xi-ru, Chen Yan-yan, Duan Wei-jing. Calculation method and application of urban road network smooth reliability[J]. *Urban Transportation*, 2011, 9(2): 40-46.
- [7] 梁颖, 陈艳艳, 任福田. 城市路网畅通可靠性分析[J]. *公路交通科技*, 2005, 22(12): 105-108. Liang Ying, Chen Yan-yan, Ren Fu-tian. Reliability analysis of urban road network smoothness[J]. *Highway Traffic Technology*, 2005, 22(12): 105-108.
- [8] Tang Y, Huang S. Assessing seismic vulnerability of urban road networks by a Bayesian network approach[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 77: 390-402.
- [9] 李飞燕. 城市道路网关键路段识别及路网鲁棒性优化研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2020. Li Fei-yan. Research on identification of critical links and robustness optimization of urban road networks [D]. Changchun: College of Transportation, Jilin University, 2020.
- [10] 贾洪飞, 郭明雪, 罗清玉, 等. GPS数据下的城市路网关键路段识别[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2020, 50(4): 1338-1343. Jia Hong-fei, Guo Ming-xue, Luo Qing-yu, et al. Identification of key road sections in urban road networks based on GPS data[J] *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2020, 50(4): 1338-1343.