

滑坡灾害影响下高速公路网络鲁棒性分析

李洁¹, 张欣宇¹, 朱全军², 肖向良², 周苏华^{1†}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南省交通科学研究院有限公司, 湖南 长沙 410015)

摘要:地质灾害的发生通常导致道路交通基础设施大面积故障,将对区域内的交通活动产生严重影响.为分析交通系统抵御灾害破坏的能力,本研究在考虑地质灾害对运输网络影响的基础上,提出了一种评估公路网络鲁棒性的方法.结合历史灾害数据,将灾害对道路交通的影响量化为网络中路段的受损概率,以路段受损概率和路段重要性指标定义了路段的脆弱性指标.运用渗流理论,通过模拟并比较网络在受到不同策略的攻击后鲁棒性指标的变化,从网络结构和性能两个方面评估了网络的鲁棒性.在结构方面,以通过网络连通子图规模找出渗流的临界阈值作为鲁棒性指标;在性能方面,以网络整体可达性评估渗流过程中网络整体性能变化.研究发现,网络在基于路段脆弱性指标的攻击下最为脆弱,结构和性能两个方面的评估结果均表明网络的主要组件占整体结构的40%~50%.同时,本研究以渗流的临界阈值和鲁棒性指标变化峰值识别出了可能的关键路段,提出通过对比不同路段对网络整体的影响,确定网络中有效关键路段的方法.本研究提出的从网络鲁棒性评估到网络关键路段识别的研究框架能够为评估和提升交通网络鲁棒性提供参考,并为交通运输网络的规划和管理提供理论支撑.

关键词:公路规划;鲁棒性;地质灾害;渗流理论;交通可达性

中图分类号:U491

文献标志码:A

Robustness Analysis of Expressway Network under Influence of Landslide Disasters

LI Jie¹, ZHANG Xinyu¹, ZHU Quanjun², XIAO Xiangliang², ZHOU Suhua^{1†}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Communications Research Institute Co. Ltd., Changsha 410015, China)

Abstract: The occurrence of geologic hazards often results in widespread failures of road transportation

* 收稿日期:2024-03-05

基金项目:湖南省科学技术厅重点研发项目(2022SK2096), Key Research and Development Project of Hunan Provincial Department of Science and Technology(2022SK2096);湖南省交通运输厅科技项目(202203,202322), The Science and Technology Program of Hunan Provincial Department of Transportation(202203,202322);福建省自然资源科技项目(KY-070000-04-2021-025), Natural Resources Science and Technology Project of Fujian Province (KY-070000-04-2021-025);贵州省交通运输厅科技计划项目(2023-312-030), The Science and Technology Program of Guizhou Provincial Department of Transportation(2023-312-030)

作者简介:李洁(1972—),女,湖南株洲人,湖南大学副教授,工学博士

† 通信联系人, E-mail: zhousuhua@hnu.edu.cn

infrastructures, significantly affecting regional transportation activities. To assess the transportation system's resilience to disasters, this study introduces a method for evaluating the robustness of road networks, considering the influence of geologic disasters. Utilizing historical disaster data, the impact of disasters on road transportation is quantified as the damage probability to network segments. The vulnerability index of road segments is defined based on the damage probability and indicators of the importance of road segments. Employing percolation theory, the study evaluates network robustness from structure and performance perspectives, simulating and comparing changes in robustness indicators under different attack strategies. Structurally, the critical percolation threshold is determined through the connectivity subgraph scale as the robustness index. Regarding performance, overall network accessibility is used to assess performance changes during the percolation process. Results show that the network is most vulnerable to attacks based on road segment vulnerability indicators, with both structural and performance assessments indicating that the primary network components constitute 40%~50% of the overall structure. Meanwhile, the study identifies potential critical road sections using the percolation threshold and the peak of robustness metric changes and proposes a method to distinguish effective critical road sections by comparing their impact on the overall network. The research framework, spanning from robustness assessment to critical section identification, offers insights for evaluating and enhancing the robustness of transportation networks, providing theoretical support for network planning and management.

Key words: highway planning; robustness; geological disasters; percolation theory; traffic accessibility

交通系统的高效和稳健运行为区域间的客货运输和地区的经济发展提供了保障. 交通运输网络往往容易受到来自极端天气、地质灾害、过饱和流量等多种情形的影响, 从而降低甚至丧失运输功能. 如何提升交通运输网络在面对冲击时维持网络功能以及抵抗破坏的能力是交通网络规划方面的重要问题.

网络的鲁棒性反映了网络在受到冲击后能够保持原有功能的能力. 为了评估网络的鲁棒性, 可以通过模拟攻击并计算鲁棒性指标的变化来进行研究. 已有的研究主要将网络受到攻击破坏的情形分为两类: 随机攻击和蓄意攻击. 其中, 蓄意攻击可以依据不同的指标产生不同的攻击策略, 包括基于复杂网络理论的拓扑指标和基于现实因素(如网络流量超限和地质灾害等极端条件等)的指标. 网络受到攻击的对象主要是网络连边和网络节点. 复杂网络理论将交通网络抽象为简单的拓扑结构, 通过计算网络的拓扑指标如聚类系数、中心性指标等, 可以对于拓扑网络中的节点或连边进行重要度排序, 从而确定网络的攻击策略. 部分研究通过对比随机攻击和基于拓扑指标蓄意攻击下网络的鲁棒性指标, 评估网络结构是鲁棒还是脆弱. 王直欢等^[1]采用基于节点

度值、中间性等不同的攻击和恢复模式, 选择以网络独立路径数、网络效率和网络连通度作为衡量港口群航运网络韧性的关键指标. 田晶等^[2]选择最大连通分支相对大小和孤立分支平均大小作为网络功能的评价指标, 对比连续删除和级联失效模型下城市道路网的鲁棒性. 张欣宇等^[3]通过对比随机攻击与蓄意攻击下网络的稳定性, 将网络拓扑分析与空间分析结合, 识别了网络中的关键节点. 李洁等^[4]选取结构熵等路网拓扑结构指标和行程时间指数等交通运行状态指标, 提出结合两种指标对路网韧性进行综合评价的方法.

在蓄意攻击时, 攻击顺序的选择将直接影响网络性能的变化趋势. 然而, 根据拓扑指标重要度排序的攻击顺序仅考虑了网络的拓扑特性, 忽视了网络结构在现实中受损的概率及其影响. 因此, 一些研究通过模拟路网在极端条件下的受损情况来决定蓄意攻击的顺序. 这一部分研究旨在解决量化路网在不同实际条件下的受损概率, 即路网的脆弱性量化问题. 目前的这些研究主要包括两类: 一类是考虑在极端条件影响下, 如路网的速度和流量超过了承载极限, 路段失效以及所导致的网络功能变化; 另一类是

分析在极端条件下,网络的受损敏感性和受损情况,进而定义网络的失效概率.Cats等^[5]分析网络中因容量局部降低所导致的全网流量重分布现象,提出采用链路关键性和降级速度两个指标来量化评估网络的鲁棒性.Dong等^[6]认为洪水可能导致网络结构故障(即道路淹没)和功能故障(即行驶速度降低),在网络故障建模中应同时考虑这两方面的影响,并提出以行驶速度和速度阈值的比值作为路段失效的量化指标,以便更准确地评估网络性能.对于网络受损敏感性分析,过去的研究通常基于地理信息技术来确定路网的脆弱性.Dong等^[7]使用历史的地震灾害数据得到道路的受损概率,从而确定蓄意攻击的顺序,并提出考虑网络中重要节点连通性的鲁棒组件来评估网络的鲁棒性.Postance等^[8]根据历史的滑坡数据确定了滑坡易发性的区域,从而将路网划分为不受影响、受影响、强烈影响三类.在考虑灾害场景的研究中,通常无法直接从历史数据中获取灾害易发性区域,常用的方法是基于灾害影响因素进行综合评估得到灾害的敏感性空间分布图,以此分析研究区域内的受灾敏感性.综合评估的方法包括层次分析法^[9-11]和确定性系数法^[12]等.

在网络的破坏分析方面,以往的部分研究通过将渗流理论(Percolation Theory)应用到交通领域进行了深入的分析.渗流理论的经典模型涉及一个无限方晶格,其中每条边(或交叉点)具有占有概率 φ .当 φ 较小时,大多数通道关闭;当 φ 增大时,更多通道打开,允许液体流过.因此,将渗流理论应用到网络破坏的分析中,实际上是通过研究逆渗流的过程来评估网络的鲁棒性.Dong等^[13]运用渗流理论模拟网络中的随机攻击和蓄意攻击,对比不同城市交通网络的渗透动态过程,并提出将临界渗流阈值和鲁棒性指数作为鲁棒性的评价指标.Li等^[14]基于渗流理论进行网络可靠性分析,将网络故障描述为渗流的相变过程,找出网络从连接到断开的临界阈值,将该阈值用作评估网络可靠性的指标.Mahabadi等^[15]介绍了如何应用渗流理论来评估由电力、交通、通信和水系统构成的多层基础设施系统的鲁棒性.已有的研究表明,渗流理论中发生相变的临界阈值在网络分析中具有重要意义.这一阈值分隔了交通网络的碎片化和连接状态.除了作为鲁棒性评估的指标之

外,临界阈值还可以用于识别网络中的关键路段,通过提高关键路段的连接质量,可以显著改善全局交通.在网络的动态渗流过程中,关键路段可以通过找出连接第一大集群和第二大集群的链路来识别^[16].Li等^[17]使用可变速度阈值来划分道路为功能性或非功能性,根据路网实时的速度变化来衡量路段失效.该研究通过研究网络的连通性,识别出临界阈值,找出了网络中的瓶颈链路.Hamedmoghadam等^[18]指出以往研究关注于临界阈值,而对临界阈值下网络的实际受影响情况缺乏考虑,提出通过计算在未受影响需求曲线下面积来表征网络的可靠性,并识别关键路段.

目前已有大量关于网络鲁棒性以及渗流理论的研究,然而,在基于地质灾害进行网络蓄意攻击方面,以往研究往往通过历史数据直接或通过综合评估影响因素确定路网所在区域的受损敏感性.对于如何依据地质灾害数据对网络连接的脆弱性指标进行量化,缺乏一个完善的研究框架.另外,在将渗流理论应用到网络分析的研究中,学者们更多的关注临界阈值,这一阈值代表的是网络的结构特性,但却缺乏对于交通运输网络实际功能的考虑.本研究使用历史的地质灾害数据,基于渗流理论构建了一个分析运输网络鲁棒性的框架,主要的贡献包括:

1) 基于灾害数据提出一个量化运输网络连接脆弱性的方法,同时考虑路段重要性指标,确定了路段的脆弱性指标.

2) 基于渗流理论,从网络的结构和功能两个角度分析网络的鲁棒性,识别出了网络的关键路段.

本文的其余部分组织如下:第1节基于地质灾害数据确定路段的脆弱性指标,并在第2节结合渗流理论进行网络鲁棒性分析,第3节根据渗流分析的结果进行关键路段识别,最后在第4节的讨论中对研究进行总结.

1 路段脆弱性指标确定

1.1 研究区域及数据准备

本研究的研究区域为湖南省,采用的数据包括湖南省的历史滑坡数据、高程等地理信息数据以及货运轨迹数据.

1.1.1 湖南省历史滑坡数据

湖南省东、西、南三面环山,中北部地势较低,且分布着湘江等主要河流,这一地形特点在很大程度上为湖南省带来了地质灾害的潜在风险.本研究使用的湖南省历史地质灾害数据是来自中国科学院资源环境科学数据平台^[19]的公开数据,该数据共统计历史发生的地质灾害8 180起.其中,滑坡灾害多达5 335起,为湖南省的主要地质灾害类型.因此,研究历史的滑坡灾害数据,对湖南省的应急管理具有重要意义.研究区域内历史滑坡数据分布图如图1所示.

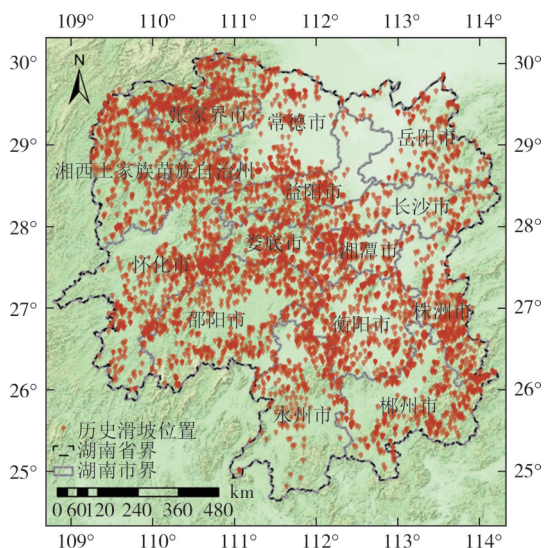


图1 湖南省历史滑坡数据分布图

Fig.1 Distribution of historical landslide data in Hunan Province

1.1.2 湖南省地理信息数据

从国家地球系统科学数据中心云平台^[20]收集了湖南省与滑坡发生相关的影响因素数据,主要包括地理因素和诱发因素两类.地理因素数据涵盖高程(DEM)、坡度、坡向、归一化植被覆盖指数、地形、土壤类型和地层岩性数据,诱发因素数据主要包括降水量数据.这两类因素均对滑坡灾害的发生具有显著影响,其具体的关系可以概述如下:

1)高程指的是地表相对于海平面的垂直高度.高程能直接影响水流的方向和速度,从而会间接影响土壤的稳定性.通常情况下,高程高的区域相比高程低的区域更容易发生滑坡.

2)坡度反映某位置地表的倾斜程度.坡度的大小将影响土壤的侵蚀过程以及土地的利用方式.较陡的地表坡度容易导致水土流失,从而诱发滑坡灾害.

3)坡向定义为地表朝向的特定方位.不同的坡向会直接影响该地点接收到的太阳辐射量以及风力作用的程度,进而导致植被分布、土壤湿度和类型的空间差异,最终可能影响滑坡灾害的发生频率.

4)归一化植被覆盖指数是衡量植被茂密程度的重要指标.由于植被能够增强土壤的抗冲性和稳定性的作用,因此,植被覆盖指数高的区域往往具有更稳定的土壤结构和更低的滑坡灾害发生概率.

5)地形指的是地表及其地理环境的空间特征.不同地形之间的差异主要体现在地貌的复杂性及稳定性上.地形较复杂的区域往往存在更高的发生滑坡及其他地质灾害的风险.

6)土壤类型涉及对地表不同位置的土壤按其特性进行分类.不同类型的土壤因其保水性和透水性的差异而展现出不同的稳定性,从而具有不同的滑坡灾害发生概率.

7)地层岩性反映的是不同的深度地层中的岩石类型及其分布情况.地层岩性的差异会影响地表土壤的稳定性和侵蚀程度,从而影响滑坡灾害的发生概率.

8)降水量衡量某一位置地表在一定时间内接收到的雨水总量.过量的降水会导致土壤水分过饱和,增加发生滑坡的风险,尤其是在排水条件比较差的区域.

本研究使用的地理因素数据统计时间均为2021年以前,降水量数据为2021年11月的平均数据.为了进行分析,本研究对所有影响因素数据进行了转换,将其转化为栅格数据格式.对于连续值的影响因素,采用了自然间断点分级法进行分类,而对于类别数据,直接按照类别进行划分.具体数据分布情况如图2所示.

1.1.3 湖南省货运轨迹数据

本研究使用全国道路货运车辆公共监管与服务平台所采集的货车数据,包括2021年11月1日湖南省境内的所有重型货车的轨迹数据,约有2.9亿条数据.每一条数据包含16个字段信息,可以分为GPS信息和平台信息两类.其中,GPS信息包含车辆ID编号(不包含个人信息)、海拔、经度、纬度、速度、行驶里程、时间、运行角度、车辆状态,部分示例见表1.平台信息则是包含平台接入码等信息编码.该数据的采样率大部分为30 s,也有少量数据采样率低于30 s.

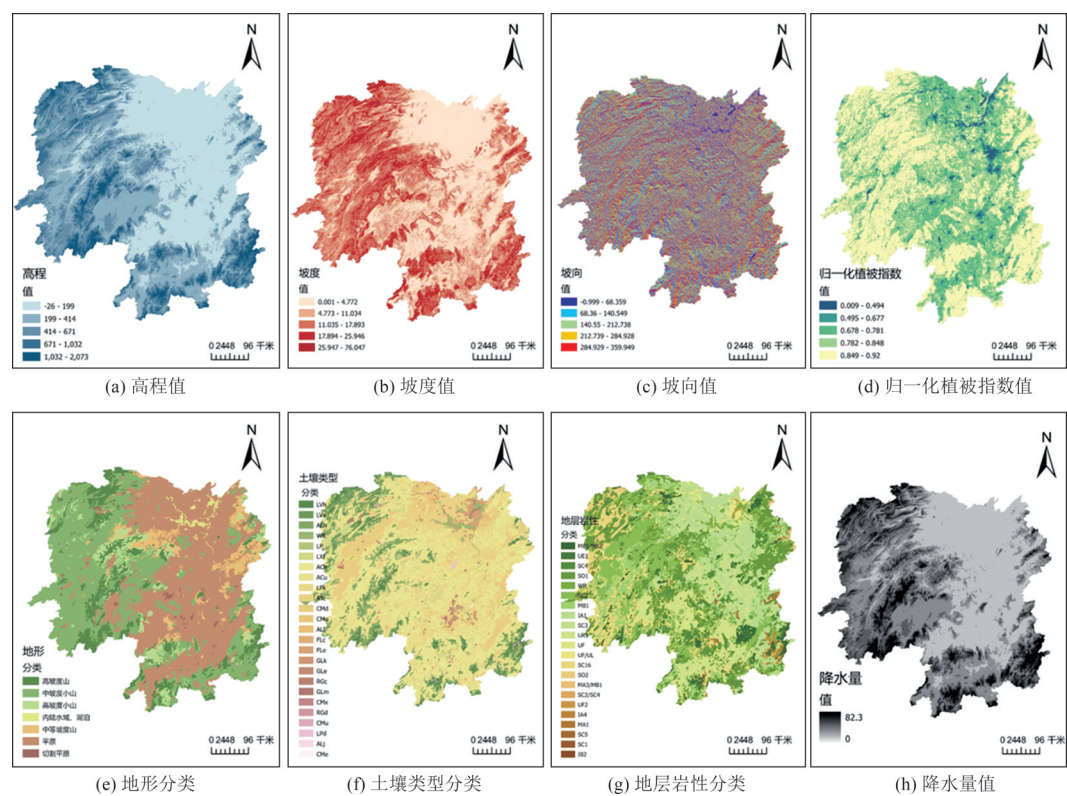


图2 滑坡影响因素空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of landslides influencing factors

表1 GPS数据字段信息示例

Tab.1 Example of GPS data field information

序号	ID	纬度	经度	速度/(km·h ⁻¹)	时间	运行角度/(°)
1	Id-1	112.263 409	27.323 748	0	2021-11-1 10:33:01	334
2	Id-1	112.153 834	27.323 453	45	2021-11-1 10:33:31	154
3	Id-1	112.264 284	27.323 267	53	2021-11-1 10:34:01	152
4	Id-1	112.264 738	27.323 236	45	2021-11-1 10:34:31	332
5	Id-1	112.264 973	27.322 983	64	2021-11-1 10:35:01	76

首先,对于初始获得的货运轨迹数据进行降噪和数据预处理后,将数据按车辆ID编号和时间顺序排列,得到有效的轨迹数据集;其次,通过时间和距离阈值法^[21]识别出货车出行的起点和终点;最后,将行程的起点、终点分别与研究区域进行匹配,确定货车行程的起点和终点所在位置,提取出城市间所有的行程信息,从而最终统计得到湖南省各市间的货运OD(Origin Destination)数据,如图3所示。

1.2 路段脆弱性指标确定

本研究提出基于历史滑坡数据确定路段脆弱性指标的方法,主要包含两个步骤:一是对研究区域进行滑坡敏感性分析;二是基于滑坡敏感性分析结果确定路段受损概率,同时结合从轨迹数据中提取的OD数据计算路段脆弱性指标。

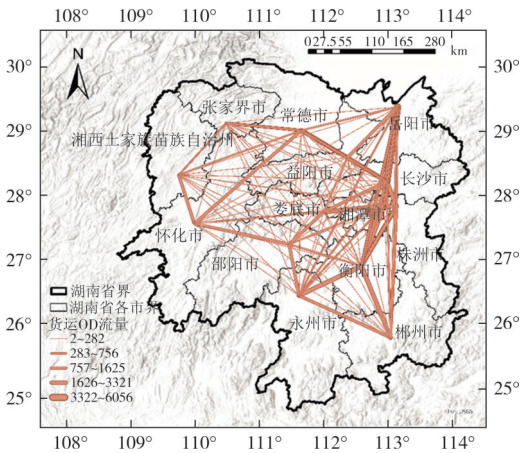


图3 湖南省货运流量分布图

Fig.3 Freight flow distribution map of Hunan Province

1.2.1 滑坡敏感性分析

研究区域的滑坡敏感性分析是基于历史滑坡数

据使用信息量法进行分级评估.信息量法是根据历史滑坡数据,将滑坡发生情况转化为评估影响因素等级的信息量值.影响因素的信息量值越大,与滑坡发生的关系越密切.计算过程如下:将研究区域划分为 P 个大小相同的栅格,作为评估单元;选取 m 个与滑坡相关的影响因素,每个影响因素划分有 n 个等级.在本研究中 m 为8,即为1.1.2节中介绍的地理因素和诱发因素两类的8个因素.第 i 个影响因素的第 j 级信息量为 M_{ij} ,可以通过式(1)计算得出:

$$M_{ij} = \ln \frac{Q_{ij}/Q}{P_{ij}/P} \quad (1)$$

式中: Q_{ij} 为历史滑坡灾害分布在第 i 个影响因素的第 j 级所在栅格的栅格数量; Q 为历史滑坡灾害分布所占的总栅格数量; P_{ij} 为第 i 个影响因素的第 j 级所占的栅格数量; P 为研究区域内栅格总数.

$$M_i = \sum_j M_{ij} \quad (2)$$

通过式(2)可以求得影响因素 i 的信息量 M_i ,然后将多个影响因素的信息量值叠加求和,得到研究区域内每个栅格的总信息量.将这些信息量值分布进行分级划分,划分为稳定、低敏感、中敏感、高敏感和极高敏感五类.最终,绘制出了研究区域的滑坡敏感性分布图,如图4所示.

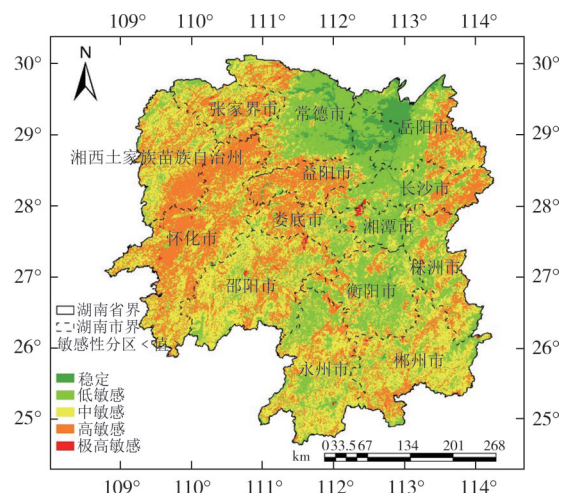


图4 滑坡敏感性分区分布图

Fig.4 Landslide sensitivity zoning distribution

1.2.2 路段脆弱性分析

本研究提出的路段脆弱性指标由路段受损概率和路段重要性指标两部分构成.在计算路段受损概率时,采用了GIS(地理信息系统)技术,将路网图层与滑坡敏感性分布图层进行栅格统计.通过这一方

法能够获取路网所在位置的滑坡敏感性数据,从而确保受损概率计算的准确性.进一步选取路段中所有位置敏感性的最高值作为该路段的受损概率,以体现路段在不同位置可能面临的重大风险.在评估路段重要性时,选择从货运轨迹数据中提取的流量数据作为关键指标.相较于以往研究中常用的出行时间指标^[22],货运流量数据更能全面、真实地反映路段的运输能力和在交通运输网络中的实际作用.考虑到一些滑坡灾害敏感区域位于相对偏僻的山区,这些地区的路段损坏对整体网络性能的影响可能有限,因此,通过引入货运流量数据,能够更加准确地评估这些路段的重要性,进而得出更为全面、合理的路段评估指标.路段受损概率分布如图5所示.

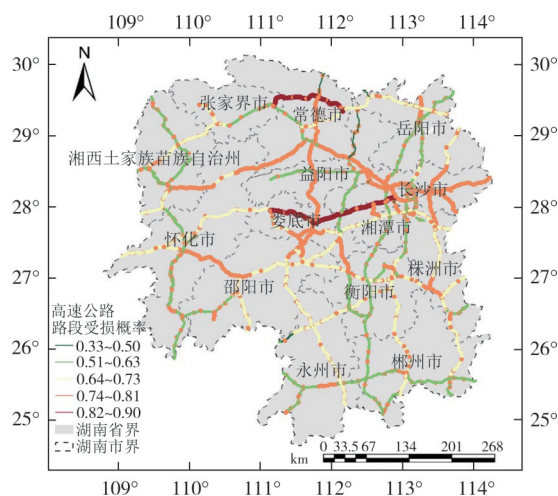


图5 路段受损概率分布图

Fig.5 Probability distribution of damage to road segments

以湖南省的高速公路为研究对象,通过将道路位置与滑坡敏感性分布图进行分区栅格统计,计算得到道路网络中各个路段的滑坡敏感性.为了便于网络性能分析,采用复杂网络理论中的Space P方法,将湖南省高速公路网络抽象为拓扑结构,以城市为节点,路段为连边,网络结构示意图如图6所示.Space P方法的构建原则是,同一条线路经过的所有节点之间均存在连边.图5展示了高速公路网中实际路段的受损概率,为了确定拓扑网络中各个连接的权重,提出了从实际路网到拓扑结构的权重指标量化方法.

首先,通过式(3)给出了脆弱性的定义:

$$V_{ij} = S_{ij} \times F_{ij} \quad (3)$$

式中: V_{ij} 为城市 i 和 j 间路段的脆弱性指标; S_{ij} 为该路

段的受损概率; F_{ij} 为路段的重要性指标,即城市*i*和*j*间的货运流量数据。

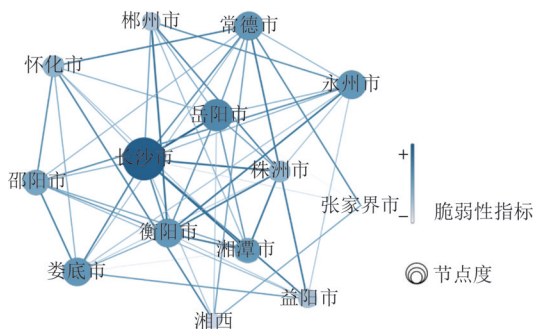


图6 湖南省高速公路网络拓扑结构图

Fig.6 Topology of highway network in Hunan Province

其次,由于Space P方法构建的网络与实际网络并不完全一致,一些城市之间的拓扑连接可能没有对应的实际路段.为解决这个问题,拓扑网络中的连接受损概率的确定遵循以下原则:对于实际相连的节点间路段,其受损概率可以直接确定;对于拓扑网络新增的连接,选择节点间所有路段的最低受损概率作为该连接的受损概率.这样处理后更能反映两个节点经过多条路段相连的实际情况.最终,在确定了拓扑结构所有连接的受损概率后,采用式(3)计算连接的脆弱性指标.对脆弱性指标进行归一化操作,将其作为连接权重构建拓扑网络.

2 网络鲁棒性分析

网络的鲁棒性作为网络抵抗破坏的性能体现,通常通过删除一个或多个连接或节点来模拟网络的破坏.通过渗流理论可以进行交通网络的动态破坏分析,从而进行网络鲁棒性评估的研究.在渗流分析的过程中需要注意的一点是,通常随着通过概率 φ 的增大,网络中有更多的可供渗流通过的通道,因此,在研究网络破坏时,分析破坏的过程是渗流的逆过程.

2.1 基于路段脆弱性指标的渗流分析

不同于渗流过程中的通过概率 φ ,在逆渗流的分析过程中,本研究使用阈值 p 来确定如何从已有网络中移除连接,且 $p = 1 - \varphi$.阈值 p 是一个从1逐渐降到0的变量,在动态渗流过程中,随着阈值降低,通过比较连接的权重 p_m 与 p 的大小,移除权重大于阈值的连接.同时,在本研究中使用 $\varphi, \varphi = 1 - p$,可

以正向地描述动态渗流的变化过程.

在进行动态破坏评估网络的鲁棒性的研究中,常用的评估指标包括网络最大连通子图规模、网络效率和网络最短路径长度等.在本研究中使用最大连通子图规模(GC)作为评估指标.为评估网络在不同受灾情况下的鲁棒性变化,除了根据路段脆弱性指标进行渗流分析之外,还将边介数指标进行渗流分析以及随机移除连接的渗流分析作为对照.其中,边介数指标是拓扑网络中的边在连接不同节点之间的最短路径上所起的中介作用的度量,可以反映连接在网络中的重要程度,计算方法见式(4).

$$E_{ij} = \sum_{s \neq t} \frac{\sigma_{st}(i, j)}{\sigma_{st}} \quad (4)$$

式中: E_{ij} 为边 (i, j) 的边介数; σ_{st} 为从节点*s*到节点*t*的最短路径数量; $\sigma_{st}(i, j)$ 为从节点*s*到节点*t*的最短路径中经过边 (i, j) 的路径数量.

渗流过程主要步骤的伪代码如下:

Algorithm 1 Calculate GC

Input: $p, Q_i, Q_j, e_{ij}, w_{ij}$
Output: GC

- 1: Network \leftarrow Roads $[e_{ij}](i, j=1, \dots, N)$
- 2: Graph \leftarrow Network $[w_{ij}](i, j=1, \dots, N)$
- 3: Link failure $[p_1, \dots, p_m](m=1, \dots, N)$
- 4: $p \leftarrow 1$
- 5: while $p_m \leq p$ do
- 6: $G_n = \text{Graph.remove_edges}(p_m)$
- 7: for $i, j \in G_n$ do
- 8: $\text{GC} = \text{max_connect_component}(G_n)$
- 9: end for
- 10: $p = 0.01$;
- 11: end while
- 12: return result

在三种不同攻击方式下,网络的最大连通子图规模的变化趋势如图7所示.通过观察图7,可以发现在移除较少连接的情况下,按照路段脆弱性指标的顺序进行连接移除,导致网络中剩余的最大连通子图规模降低得最多且速度最快.因此,在三种攻击方式中,这种连接移除方式对于网络结构的破坏是最显著的.相对而言,网络结构对于随机攻击和按边介数的攻击具有较高的鲁棒性,这表明按照路段脆弱性指标的连接移除方式更有效地破坏了网络的整体结构,从而对网络的鲁棒性产生了更大的影响.

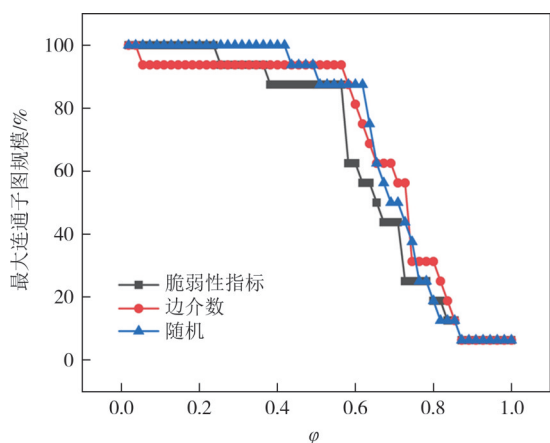


图7 不同攻击方式下网络最大连通子图规模变化趋势图
Fig.7 Evolution of the maximum connected subgraph scale of the network under various attack scenarios

2.2 路段失效后的网络性能分析

在对于交通网络的鲁棒性进行评估分析过程中,本研究已经在滑坡灾害的场景下分析网络结构的破坏对网络鲁棒性造成的影响.然而,仅仅从网络受灾的结构损坏角度分析网络性能还不够全面.因此,提出从网络功能受损的角度分析网络的性能变化.

对于交通网络,最重要的是其运输功能.交通可达性指标可以反映出运输活动到达目的地的难易程度,因此可以作为体现网络功能的指标.在本研究中,采用重力模型,综合考虑各个城市的经济指标和距离阻抗来计算交通可达性,各城市间的距离通过高德开放平台获得.可达性可以通过式(5)和式(6)计算得到:

$$A_i = \sum_j Q_i \cdot Q_j \cdot f(d_{ij}, \beta) \quad (5)$$

式中: A_i 为城市 i 的可达性; Q_i 和 Q_j 分别为城市 i 和 j 的经济指标; f 为阻抗函数; d_{ij} 为城市 i 和 j 之间的最短路径; β 为阻抗函数的参数.

$$A = \sum_i A_i \quad (6)$$

式中: A 为网络的整体可达性,用于反映网络的性能.

本研究主要分析在渗流过程中,随着阈值变化,逐步移除网络中连接后网络中整体可达性的变化.在网络的结变化的过程中,各个城市节点间的最短路径也发生变化,因此在每次移除连接后,重新使用Dijkstra算法寻找网络中各节点间的最短路径更新 d_{ij} ,结合渗流理论,计算网络整体可达性变化的伪代码如下:

Algorithm 2 Calculate Accessibility

Input: $p, Q_i, Q_j, e_{ij}, w_{ij}, \text{dist}, \beta$

Output: A

```

1: Network  $\leftarrow$  Roads[ $e_{ij}$ ]( $i, j=1, \dots, N$ )
2: Graph  $\leftarrow$  Network[ $w_{ij}$ ]( $i, j=1, \dots, N$ )
3: Link failure[ $p_1, \dots, p_m$ ]( $m=1, \dots, N$ )
4:  $p \leftarrow 1$ 
5:  $A \leftarrow [\infty, \dots, \infty]$ 
6: while  $p_m \leq p$  do
7:    $G_n = \text{Graph.remove\_edges}(p_m)$ 
8:   for  $i, j \in G_n$  do
9:      $G_n \leftarrow G_n[\text{dist}]$ 
10:     $d_{ij} = \text{shortest\_path}(G_n, i, j)$ 
11:     $A_i = \sum_j Q_i * Q_j * e - d_{ij} * \beta$ 
12:   $A \leftarrow \sum A_i$ 
13: end for
14:  $p = 0.01$ ;
15: end while
16: return A

```

图8展示了网络整体可达性随着渗流过程的变化趋势.观察图中的曲线可以发现,与结构指标变化趋势不同,在渗流过程中网络整体可达性的变化相对平滑.整体性能指标在整个渗流过程中持续变化,而不像结构指标变化曲线呈阶梯式降低,这说明网络中节点间的最短路径在不断调整,随着连接的移除而发生变化.在移除约50%的连接后,网络整体的性能降低趋势随着连接移除明显变得缓慢.

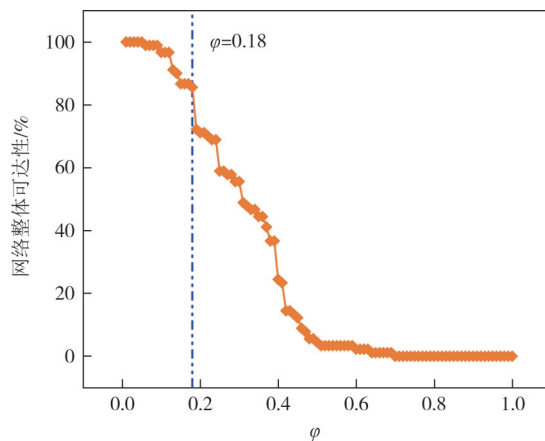


图8 渗流过程中网络整体可达性变化趋势图
Fig.8 Trend of the overall network accessibility during the percolation process

3 关键路段识别

在结合渗流理论从结构和功能两个方面对网络

进行鲁棒性分析后可以发现,在渗流过程中,移除网络中的某些连接会导致最大连通子图规模(GC)和网络整体可达性明显下降,这表明这些连接对网络功能具有重要影响,因此可视为网络中的关键路段.同时,对比不同连接移除顺序下的渗流分析结果,可以发现评估指标下降幅度最大时所移除的连接并不相同,因此需要对关键路段进行识别,并验证其可靠性.

渗流理论通过设置阈值并分析阈值变化的动态过程,从而找出网络结构从连通到不连通的相变过程.结合复杂网络理论,在网络的最大连通子图规模从最大到破坏后分裂为较小的连通子图时,即为渗流临界阈值 p_c ,可以识别出网络中关键路段.因此,本研究将最大连通子图规模(GC)与第二大连通子图规模(SC)结合,提出在GC和SC相同或二者大小发生交替时移除的路段为关键路段,即渗流阈值时的移除路段.基于路段脆弱性指标的渗流过程中GC和SC的变化如图9所示.

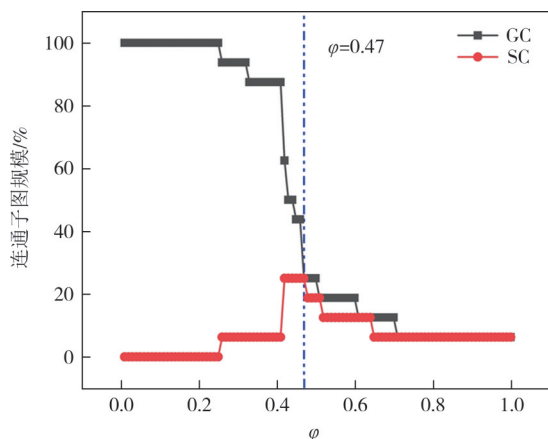


图9 基于路段脆弱性指标的渗流过程
Fig. 9 Percolation process based on segment vulnerability indicators

从图中可以看出,在 $\varphi=0.47$ 时GC和SC相等,此时为临界渗流阈值,移除的路段为株洲—永州.这个路段被识别为关键路段的原因可能是这两个城市分别位于湖南省东南和西南部,并且只有一条主要高速公路相连.当这个连接被移除后,网络会破碎成几个小部分.

为了对比不同的攻击方式下识别出的关键路段,本研究同时分析了随机移除路段情形下的渗流阈值.在随机移除情形下对于渗流过程进行了100次模拟,模拟结果综合分布如图10所示.从图中可

以得出,随机移除时的 $\varphi=0.49$,比按脆弱性指标移除时的阈值高,这也反映出网络对随机移除过程呈现出更高的鲁棒性.在渗流阈值时,移除的路段为株洲—娄底.

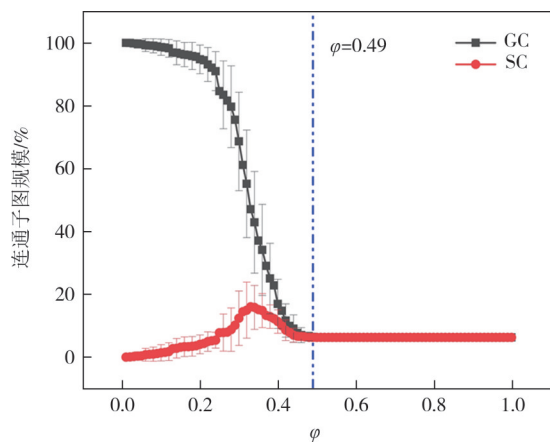


图10 随机移除连接的渗流过程
Fig. 10 Percolation process for randomly removed connections

通过对这两个渗流过程的分析,可以发现网络的渗流阈值出现在0.4~0.5之间,这与之前对网络整体可达性的分析结果相符,即当删除约50%的连接后,整体可达性的下降速度会减缓.对网络整体可达性变化图(图8)进一步分析,通过对比每次 φ 变化前后网络整体可达性值的变化量发现,在 $\varphi = 0.18$ 时,可达性下降的幅度最大,此时移除的路段为株洲—郴州.因此,可以将该路段视为对网络性能影响最大的关键路段.

综合以上分析,本研究通过不同方式确定了网络中几个可能的关键路段.为了进一步确定哪一种方式识别的关键路段更有效,本研究提出对于已经识别的关键路段进行路段质量提升.通过分析在路段质量提升后对网络整体的影响,可以确定哪些路段是有效的关键路段.对网络整体的影响将通过比较路段质量提升后网络的渗流阈值 p'_c 与原始网络的阈值 p_c 来评估.此外,路段的质量提升是通过将路段的权重乘 $(1-a)$ 来更新权重.路段的权重是路段的脆弱性指标,更新路段权重反映到实际的路网中意味着提升该路段抵抗破坏的能力,如路段加固等修复提升策略.

本研究基于路段脆弱性指标、网络整体可达性和随机移除在渗流阈值时移除的路段以及路段脆弱性指标最高的路段分别进行了路段的质量提升,每

次提升后重新计算网络的渗流阈值,最终结果如图11所示.从图11中可以看出,通过网络可达性渗流过程中的临界阈值识别出的关键路段在质量提升后对于网络的性能提升最为显著.相比之下,通过路段脆弱性指标渗流阈值识别的关键路段对网络性能提升较小,而对脆弱性指标最高的路段和随机移除在渗流的临界阈值路段进行质量提升后,网络性能没有变化.因此,可以认为通过网络整体可达性渗流过程识别出的关键路段更为有效.这将为网络优化和管理提供重要的参考依据,在有限的资源下实现网络性能的最大化.

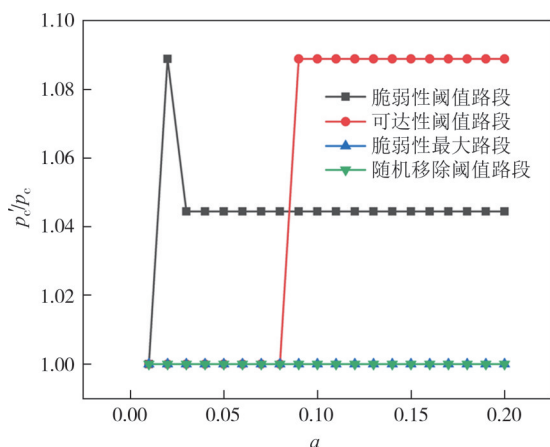


图11 不同关键路段的权重提升效果对比

Fig. 11 Comparison of weight enhancement effect of different key road segments

此外,通过对关键路段识别结果进一步分析,可以发现本研究得到的关键路段均集中在株洲市附近.这也表明在整个网络中,株洲市与其他城市的连接存在薄弱之处.因此,提升株洲市周围的路网质量或增加路网连接将有效地提高湖南省高速公路网络的运输效率和整体性能.

4 结论

本研究通过量化地质灾害对交通运输网络的影响,结合渗流理论对湖南省的高速公路网络进行分析,主要结论如下:

1)在地质灾害的场景下,结合渗流理论,以路段脆弱性指标、边介数和随机三种方式对网络进行模拟攻击,发现网络在基于路段脆弱性指标的攻击策略下最为脆弱.以网络整体可达性作为评估指标进行分析,发现网络在移除约50%的连接后整体可达性下降速度变缓,剩余连接对于网络性能的影响逐

渐减弱.这反映出高速公路网络在面对灾害时的脆弱性特点.

2)从结构指标和网络性能两个角度进行渗流分析,均可以识别出对网络影响最显著的路段.结果显示不同的方法都指出株洲市与其他城市的连接路段在网络性能中起到关键作用,这表明株洲市周围路段的脆弱性和重要性对于整个网络的性能具有重要影响.

3)提出了一种识别网络中有效关键路段的方法,对于不同方法识别出的关键路段分别进行质量提升.通过对比提升后网络性能提升,确定了通过网络整体性能变化识别出的路段为更有效的关键路段.该方法可以有效识别出网络中的关键路段,为网络的规划提供有价值的理论支撑.

本研究在考虑地质灾害影响的基础上分析了湖南省主要高速公路网络的结构和性能特性,并提出了确定网络中的关键路段的有效方法.在后续研究中,可以进一步研究不同类型灾害对高速公路网络的影响程度和传播机制,为应对自然灾害提供更加科学、合理的决策支持.同时,也可将本研究的方法应用到范围更小的区域,为具体的道路网络中关键路段识别提供参考.

参考文献

- [1] 王直欢,胡炜琴,王逸文. 基于复杂网络的长三角和粤港澳航运网络韧性评估[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(5): 184-193.
WANG Z H, HU W Q, WANG Y W. Resilience assessment of Yangtze River Delta and Guangdong-Hong Kong-Macao shipping networks based on complex network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(5): 184-193. (in Chinese)
- [2] 田晶,方华强,刘佳佳,等. 运用复杂网络方法分析城市道路网络的鲁棒性[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(5): 771-777.
TIAN J, FANG H Q, LIU J J, et al. Robustness analysis of urban street networks using complex network method [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(5): 771-777. (in Chinese)
- [3] 张欣宇,刘邱琪,张晶晶,等. 基于复杂网络的高速公路网络空间特性分析[J]. 公路, 2023, 68(6): 316-323.
ZHANG X Y, LIU Q Q, ZHANG J J, et al. Spatial characteristics analysis of expressway network based on complex network [J]. Highway, 2023, 68(6): 316-323. (in Chinese)
- [4] 李洁,刘邱琪,张欣宇,等. 基于组合赋权-云模型的高速公路网交通韧性评价[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023,

- 50(11):224–234.
- LI J, LIU Q Q, ZHANG X Y, et al. Evaluation of traffic resilience of freeway networks based on combined weighting–cloud model[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2023, 50(11): 224–234. (in Chinese)
- [5] CATS O, KOPPENOL G J, WARNIER M. Robustness assessment of link capacity reduction for complex networks: application for public transport systems [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 167: 544–553.
- [6] DONG S J, GAO X Y, MOSTAFAVI A, et al. Modest flooding can trigger catastrophic road network collapse due to compound failure[J]. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3: 38.
- [7] DONG S J, WANG H Z, MOSTAFAVI A, et al. Robust component: a robustness measure that incorporates access to critical facilities under disruptions [J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2019, 16(157): 20190149.
- [8] POSTANCE B, HILLIER J, DIJKSTRA T, et al. Extending natural hazard impacts: an assessment of landslide disruptions on a national road transportation network [J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(1): 014010.
- [9] MYRONIDIS D, PAPAGEORGIOU C, THEOPHANOUS S. Landslide susceptibility mapping based on landslide history and analytic hierarchy process (AHP) [J]. *Natural Hazards*, 2016, 81(1): 245–263.
- [10] EL-MAISSI A M, ARGYROUDIS S A, NAZRI F M. Seismic vulnerability assessment methodologies for roadway assets and networks: a state-of-the-art review [J]. *Sustainability*, 2020, 13(1): 61.
- [11] BANERJEE P, GHOSE M K, PRADHAN R. Analytic hierarchy process and information value method-based landslide susceptibility mapping and vehicle vulnerability assessment along a highway in Sikkim Himalaya [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(7): 139.
- [12] NAHAYO L, KALISA E, MANIRAGABA A, et al. Comparison of analytical hierarchy process and certain factor models in landslide susceptibility mapping in Rwanda [J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2019, 5(3): 885–895.
- [13] DONG S J, MOSTAFIZI A, WANG H Z, et al. Measuring the topological robustness of transportation networks to disaster-induced failures: a percolation approach [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2020, 26(2): 04020009.
- [14] LI D Q, ZHANG Q, ZIO E, et al. Network reliability analysis based on percolation theory [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 142: 556–562.
- [15] MAHABADI Z, VARGA L, DOLAN T. Network properties for robust multilayer infrastructure systems: a percolation theory review [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 135755–135773.
- [16] JIANG Y L, TIMMERMAN H J P, YU B. Relocation of manufacturing industry from the perspective of transport accessibility—An application of percolation theory [J]. *Transport Policy*, 2018, 63: 10–29.
- [17] LI D Q, FU B W, WANG Y P, et al. Percolation transition in dynamical traffic network with evolving critical bottlenecks [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(3): 669–672.
- [18] HAMEDMOGHADAM H, JALILI M, VU H L, et al. Percolation of heterogeneous flows uncovers the bottlenecks of infrastructure networks [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1254.
- [19] 资源环境科学数据平台 [EB/OL]. (2023–10–3) [2023–12–11]. <https://www.resdc.cn/>. Resource and Environmental Science Data Platform [EB/OL]. (2023–10–3) [2023–12–11]. <https://www.resdc.cn/>. (in Chinese)
- [20] 国家地球系统科学数据中心 [EB/OL]. (2023–9–8) [2023–12–11]. <https://www.geodata.cn/>. National Earth System Science Data Center [EB/OL]. (2023–9–8) [2023–12–11]. <https://www.geodata.cn/>. (in Chinese)
- [21] ZHENG V W, ZHENG Y, XIE X, et al. Collaborative location and activity recommendations with GPS history data [C]// *Proceedings of the 19th International Conference on World Wide Web*. Raleigh, North Carolina, USA: ACM, 2010: 1029–1038.
- [22] ZHANG Q, YU H, LI Z N, et al. Assessing potential likelihood and impacts of landslides on transportation network vulnerability [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 82: 102304.