第 54 卷第 1 期
2026 年 1 月

同济大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE)

Vol. 54 No. 1
Jan. 2026

文章编号：0253-374X(2026)01-0031-09　　**DOI**：10.11908/j.issn.0253-374x.24241

基于渗流理论的城市交通网络与供水管网级联失效分析

胡群芳[1,2,3]，张　昱[1]，宋朝阳[4]，赫　磊[2,3]，车德路[5]，苏　展[2]

(1. 同济大学 城市交通研究院，上海 200092；2. 同济大学 上海防灾救灾研究所，上海 200092；
3. 城市安全风险监测预警应急管理部重点实验室，上海 200092；
4. 上海城投水务(集团)有限公司，上海 200082；5. 同济大学 土木工程学院，上海 200092)

摘要：为解决交通网络与供水管网之间耦合关系所引发各类突发事件级联失效作用及其建模量化问题，以上海市中心城区为案例，利用出租车GPS数据及道路、供水管网GIS(Geographic Information System)数据，通过空间匹配和时间属性融合建立动态耦合网络，基于渗流理论提出网络影响力指数用于量化级联失效影响。结果表明，交通网络和供水管网之间存在显著的时空耦合效应，尤其在高峰时段供水管网的失效对交通网络的连通性和运行效率产生了直接影响。同时，通过构建解耦策略，提出管网规划和维护优化方案，可减少2个网络之间跨网络级联失效影响，可为提升城市关键基础设施韧性安全与运行可靠性提供参考。

关键词：供水管网；交通网络；耦合网络；复杂网络；渗流理论；级联失效

中图分类号：TU991　　**文献标志码**：A

Assessment of Cascading Failures in Transportation and Water Supply Networks Based on Percolation Theory

HU Qunfang[1,2,3], *ZHANG Yu*[1], *SONG Zhaoyang*[4], *HE Lei*[2,3], *CHE Delu*[5], *SU Zhan*[2]

(1. Urban Mobility Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Urban Safety Risk Monitoring and Early Warning of the Ministry of Emergency Management, Shanghai 200092, China; 4. Shanghai Chengtou Water Group Co., Ltd, Shanghai 200092, China; 5. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To address the modeling and quantitative assessment of cascading failures in emergency events induced by the coupling between transportation networks and water supply networks, this study takes the central urban area of Shanghai as a case study. Using Taxi GPS data, along with GIS (geographic information system) data for road and water supply networks, it constructs a dynamically coupled network through spatial matching and temporal attribute integration. Based on percolation theory, it proposes a network influence index to quantify the impacts of cascading failures. The results indicate that there are significant spatiotemporal coupling effects between the transportation network and the water supply network. In particular, during peak hours, failures in the water supply network have a direct impact on the connectivity and operational efficiency of the transportation network. Furthermore, by developing decoupling strategies, it proposes optimization schemes for network planning and maintenance, which can reduce cross-network cascading failure effects between the two networks. These findings provide a useful reference for enhancing the resilience, safety, and operational reliability of critical urban infrastructure systems.

Keywords: water supply network; transportation network; coupled network; complex network; percolation theory; cascading failure

近年来随着城市化进程的加快，城市基础设施日益复杂化，交通网络和供水管网作为2个独立运行维持城市正常运行和居民生活的关键基础设施，其敷设空间、运行时间和相互作用等方面存在复杂

收稿日期：2024-07-23
基金项目：国家重点研发计划(2022YFC3801000)；上海市2022年度“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(22dz1201200，22dz1200402)；上海城投水务(集团)有限公司科技项目(KY.WB.23.012)
第一作者：胡群芳，教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为城市市政管网运行安全与防灾、土木工程风险分析与评估。E-mail：huqunf@tongji.edu.cn
通信作者：张　昱，博士生，主要研究方向为城市生命线韧性。E-mail：2010798@tongji.edu.cn

论文拓展介绍

耦合特征[1]。一旦其中某一网络发生故障,往往会对另一网络产生影响并形成连锁反应,导致整个城市的正常运行受到严重破坏甚至瘫痪,尤其是在中心密集城区内交通网络和供水管网之间的耦合失效问题更为严重。根据《中国2023年全国地下管线事故统计分析报告》[2],2023年全国发生了1 406起管线相关事故,其中76.03%的事故发生在交通道路范围内,造成了重大人员伤亡和经济损失,而供水管网事故占总体事故数量的近60%,这些事故说明供水管网和交通网络在时空上存在耦合,凸显了对城市关键耦合基础设施级联失效效应研究的紧迫性和重要性。与此同时,上海市曾多次发生供水管网爆管事件影响交通网络运行,如2017年11月16日四平路—溧阳路爆管事件,造成四平路交通中断24h[3]。2024年5月24日中山北路交通道路维修临时改线运行引起普善路路口地下水管爆裂,造成严重道路积水,整个维抢修历时3天时间,对该区域附近交通造成严重影响[4]。

目前针对交通和供水管网耦合网络级联失效的研究大多集中在微观层面的试验和数值模拟,或是宏观层面的复杂网络模型研究。微观研究主要关注个体设施失效的物理响应机制[5-6]以及通过试验和数值模拟研究交通荷载循环、内部压力等对管道的影响[7-8]。然而上述研究仅考虑了局部设施情况,未能充分反映管网对路网交通在全局网络上的时空耦合关系及级联失效效应。2010年Buldyrev等[9]在《自然》发表关于依赖网络级联失效的研究,由此不同网络间级联失效问题引起了广泛重视,研究中通过构建耦合网络模型,用攻击指定区域或随机节点的方式探索网络元素失效对2个或多个依赖网络在时空尺度上的影响,并在各领域得到应用,如交通—能源[10-11]、能源—信息[12]、信息—能源—供水—交通[13]等。针对交通网络与城市供水、排水网络级联失效问题也有部分研究,如Dong等[14]通过渗流理论研究了道路—排水耦合网络的级联失效影响,文献[15]通过社会经济指标衡量交通—供水管网在随机失效和自然灾害下的级联失效影响以及社区韧性。但是现有研究大多是基于拓扑网络的硬依赖性假设,即节点或连接边的失效会直接触发级联失效,通过中心度、介数等网络指标对级联失效程度进行量化,缺乏对现实数据的验证和具体案例的支持[16],即使目前针对单一设施网络已有一些基于真实数据的复杂网络理论研究与失效影响评估方法[17-19],但这些方法尚未用在耦合网络当中。因此,目前针对交通和供水管网耦合网络的研究难以基于真实数据对级联失效从全局时空尺度上进行充分量化。

本研究旨在解决交通网络与供水管网之间因耦合关系所引发级联失效作用的建模量化问题,通过构建基于复杂网络渗流理论的动态耦合模型,量化分析供水网络中高风险管段失效后对交通网络产生的级联失效效应。研究中选择上海市中心城区作为具体对象,利用出租车GPS数据和供水管网、道路GIS数据,提出了结合网络流和拓扑结构的网络影响力指数的级联失效量化方法,揭示交通网络与供水管网之间的时空耦合关系,评估关键路段对整体网络连通性和运行效率的影响,量化评估供水管网管损事件对交通网络物理影响。

1 耦合网络级联失效模型

城区内的供水、排水、燃气及电力等多种地下管网,限于空间路由,一般都敷设在城市道路下方(图1)。以上海市为例,2023年全市城市道路约6 000km,道路下供水、排水和燃气管网近10万km[20],估算1km道路下有近15km各类地下管网。近5年来,地下管线破坏事故以及路面塌陷事故的平均增长率分别为40.84%和23.94%[2],一旦地下管网出现泄漏、爆管、爆炸或地面塌陷问题,将直接对道路交通网络造成影响。

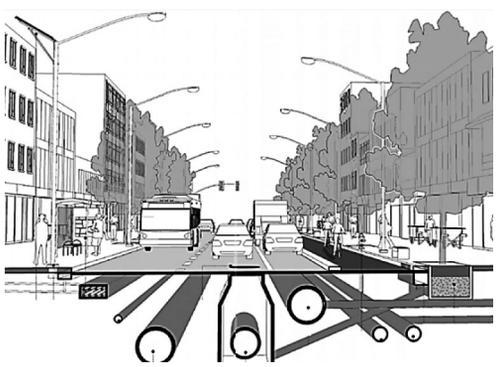


图1 城市道路和地下管网空间关系[21]

Fig. 1 Spatial relationship between urban roads and underground pipe networks[21]

结合历年管损事件分析,以占管损事件较大体量的供水管网为例进行研究,结合收集的上海市2004—2021年期间供水管网管损记录。为简化分析,假定某段管道失效后会直接导致所在道路交通中断,量化管网失效后对道路网络产生影响,具体研究步骤如图2所示。

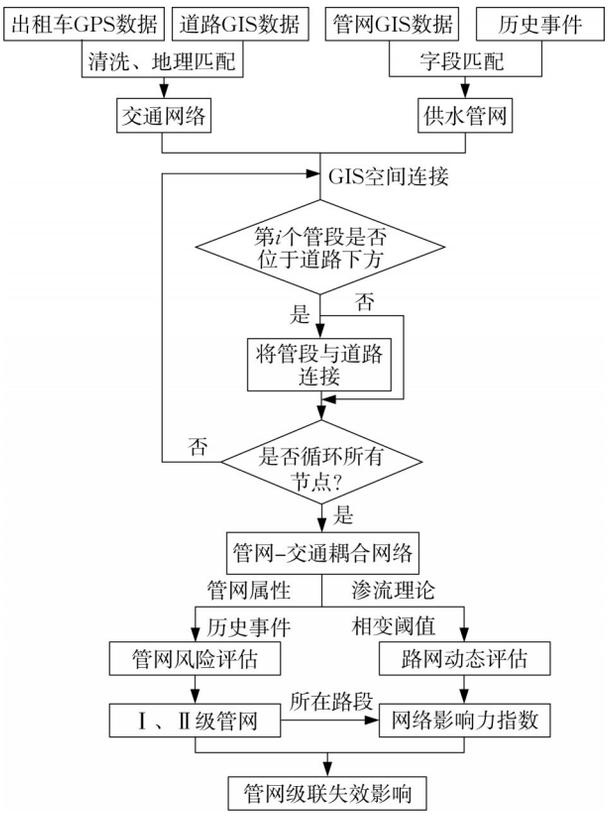


图 2　耦合网络级联失效研究流程

Fig. 2　Research framework for cascading failures in coupled network

首先，通过分别收集交通网络与供水管网的GIS数据以及相关属性数据，利用地理匹配、属性字段匹配等方式，将空间数据与属性数据融合，随后采用空间连接方法构建交通—管网的耦合网络，基于管网风险评估得到管网中具有高风险的管段，将上述管网时空位置动态映射到道路交通网络，考虑路网动态评估计算网络影响力指数，并由此得到供水管网高风险管段出现失效事件后对区域道路交通网络的影响。

1.1　数据来源与耦合网络构建

以上海市中心城区为例。如表1所示，收集上海市中心城区路网GIS数据与某出租车公司2015年4月6日至4月12日共7天的GPS轨迹数据，供水管网数据包含上海市中心城区DN300以上管网GIS数据和2004—2021年管网维修记录数据。

将路网GIS数据中交叉路口作为节点，与之相连的路段作为连边，构建路网拓扑结构模型。原始出租车GPS数据会存在一定比例的异常数据和缺失数据，目前有大量成熟的数据处理方法[22]。首先需要进行清洗，筛选并剔除异常值[23]，随后将出租车的平均速度进行空间统计，转换为每个路段不同时刻的平均速度[17]，为

$$V_T=\frac{1}{n}\sum_{a=1}^{n}V_a \tag{1}$$

$$V_s=V_T-\frac{\sigma_T^2}{V_T} \tag{2}$$

式中：V_T为出租车通过路段T的时间平均速度，km·h^{-1}；V_a为第a辆出租车的轨迹点速度，km·h^{-1}；n为单位时间内统计的车辆数；V_s为路段T的空间平均速度，km·h^{-1}；σ_T^2为时间平均速度的均方差。

对于没有GPS轨迹数据的路段，采用邻近路段的数据利用插值法补全缺失数据。由于每条路段的通行能力、交通组织不同，选择当日所有速度的第95百分位数作为该路段的自由流速度[17]。计算每条路段各小时段平均速度与自由流速度的比值，即可得到相对速度，为

$$P(t)=\frac{V_s(t)}{V(l)} \tag{3}$$

式中：$P(t)$为路段的相对速度；$V(l)$为路段l的自由流速度。

将计算得到的各小时段的$P(t)$链接至构建的路网拓扑结构模型，即可得到交通网络模型。将管网GIS数据中每个管段作为供水网络中的连边，连边之间相连的部分作为节点，构建供水管网的拓扑结构模型，同时将管段的管径、管材以及相应事故数据加载在拓扑结构模型中，以供后续管网风险评估使用。

根据生命线系统之间的耦合类型分类[1]，交通网络与供水网络主要存在空间耦合，所以在GIS软件中根据管网中每个管段所处的空间位置，将位于道路下方的管段与所敷设的上方道路用空间连接工具进行连接，即可得到供水管网与道路网络的空间

表 1　研究数据统计

Tab. 1　Statistics of research data

数据类型	数据名称	包含字段	数量/条
交通网络数据	路网GIS数据	名称、道路等级、长度等	13 846
	出租车GPS数据	时间戳、坐标、速度、载客信息等	7 240 000
供水管网数据	管网GIS数据	管段ID、管径、管材、长度、埋设日期等	138 813
	管网维修记录数据	管段ID、时间、坐标、管径、埋设日期等	5 537

耦合关系,形成交通—管网耦合网络。

1.2 供水管网安全风险评估

根据上海市地方标准《城市供水管网安全风险评估规范》(DB31/T1332—2021)[24]对上海市供水管网风险的评估方法[25-27],基于供水管网GIS数据信息,对DN300以上的供水管网进行基础风险评估,如表2所示,将供水管段风险评估等级划分为Ⅰ级(危险)、Ⅱ级(高风险)、Ⅲ级(中风险)、Ⅳ级(低风险)、Ⅴ级(安全)共计5个等级,以及给出对应各等级风险状况的建议处置对策。

表2 供水管网风险等级含义及处置对策[24]

Tab. 2 Meaning and countermeasures of water supply network risk levels[24]

等级	风险属性	风险状况描述	建议处置对策
Ⅰ级	危险	严重不符合国家现行标准规范安全要求,管网管道存在普遍病害与损坏现象,随时可能发生突发事件,直接影响安全和功能。	应立即采取维修或改造更新措施,并对该高危管道实施检测和监测。
Ⅱ级	高风险	不符合国家现行标准规范安全要求,管网管道已发生严重的劣化或病害,有可能发生风险事件,影响安全和功能。	重点区域应采取维修或改造更新措施,并对该危险管道实施检测和监测。
Ⅲ级	中风险	基本符合国家现行标准规范的安全要求,管网管道存有劣化及病害加剧迹象,偶尔发生风险事件,有可能影响安全和功能。	部分管道应采取维修措施,加强定期检测或监测。
Ⅳ级	低风险	符合国家现行标准规范的安全要求,极少管段存在结构安全隐患,基本处于安全可靠状态。	组织定期巡查维护,对重点区域管道可组织实施检测或监测。
Ⅴ级	安全	完全符合国家现行标准规范的安全要求,管网管道处于良好状态,处于安全功能可靠状态。	开展日常定期维护巡查,关注外部环境、邻近周边活动与天气状态等影响。

1.3 交通路网动态评估

根据复杂网络的渗流理论计算交通网络的相变阈值[28],计算式为

$$E_{\mu\eta}=\begin{cases}1,若P(t)\geqslant q_s\\0,若P(t)<q_s\end{cases} \tag{4}$$

式中:$E_{\mu\eta}$为拓扑网络中从节点μ到节点η的链路,“1”表示该链路服务功能正常,在拓扑网络中保留,“0”表示该链路失效,在拓扑网络中移除。基于此方法,可构建给定控制变量q_s状态下的动态拓扑网络,此时的拓扑网络是各时刻由各个运行状况良好的链路和节点组成的连通子团。

当$q_s=0$时,所有连线都是有效的,拓扑网络的结构与原始城市道路网络的结构一致,此时交通流在网络上呈现自由流状态;而当$q_s=1$时,所有连线都失效。根据渗流理论,在控制变量q_s在从0变化到1的过程中,存在一个特定的相变阈值。此时,网络中第二大连通子团的尺寸会达到最大值,表明网络已失去全局连通性,仅保留局部连通性,网络结构发生相变,对应的q_s值即为相变阈值,记为q_c,q_c从网络层面反映了交通流的运行效率[17-18]。

识别网络中的关键路段以及计算网络影响力指数方式如图3所示,参考Li[17]的方法,基于q_c值创建拓扑网络,识别前n个最大连通子团,对这n个连通子团找到所有关键路段(bridging links),即移除这些路段会导致子团断裂的路段。本文将网络影响力指数(Network Impact Index,NII)定义为移除每个关键路段后各子团的连边数量的变化值,为

$$N(e)=\sum_{i=1}^{k}(L_i-L_i') \tag{5}$$

其中:N为网络影响力指数;e为被移除的关键路段;L_i为移除路段e之前第i个连通子团中的连边数量;L_i'为移除路段e之后第i个连通子团中的连边数量;k为移除关键路段后形成的连通子团的数量。

如图3b所示,虚线连边即为关键路段,移除该路段后左下方子团与原图断裂,则该路段的$N=5$,即左下方子团规模。

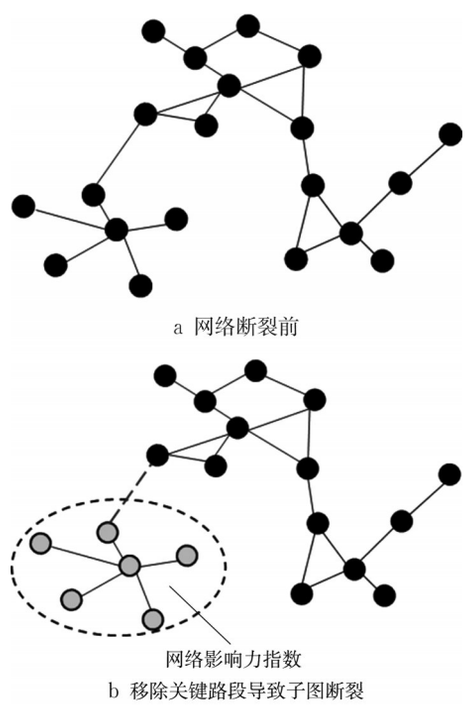


图3 网络影响力指数计算方法示意

Fig. 3 Calculation method for network impact index

1.4　耦合网络级联失效评估

如图 4 所示，考虑交通—管网耦合网络模型，提取出供水管网中风险等级为Ⅰ、Ⅱ级的管段（例如节点 a），这类管段不符合国家现行标准规范安全要求，管道已发生严重的劣化或病害，极有可能发生风险事件影响系统安全和整体功能，由此可找出上述管网对应的敷设路段（例如节点 a′），读取耦合网络中根据式（5）计算出来不同时刻的网络影响力指数，将其赋予节点 a，即可得到高风险管段对于交通网络的级联失效影响。

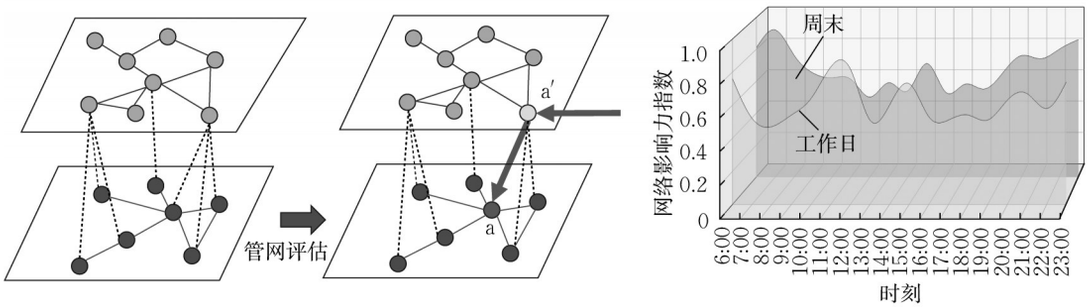


图 4　网络影响力指数计算方法示意

Fig. 4　Calculation method for network impact index

除了供水管网失效对交通网络的级联影响外，二者的耦合作用机制还包括交通网络对供水管网运行安全的影响，主要体现在交通荷载对管道结构的复杂作用机理上——高流量道路及交叉口区域的埋地管道长期受循环荷载作用，可能出现材料疲劳、结构损伤，甚至断裂[29-30]；异常交通工况（如超载车辆运行或道路施工）也可能引发交通荷载提高，加剧管道失效风险[7]。鉴于此，供水管网的评估标准已纳入部分道路交通相关指标，如《城市供水管网安全风险评估技术规范》（DB31/T1332—2021）明确将道路等级作为管网风险影响因素之一[24]。本文不进行展开研究，而将重点聚焦于供水管网事故对交通网络的级联影响。

2　上海城区级联失效模型应用

2.1　供水网络安全风险评估

针对上海市中心城区 4 367.5 km 供水管网，利用供水管网风险评估模型得到结果示意图如图 5 所示，管段风险被分为 5 级，其中，等级为Ⅰ级的管段总长度为 19.42 km，占总长度的 0.4%；等级为Ⅱ级的管段总长度为 928.02 km，占总长度的 21.2%；等级为Ⅲ级的管段总长度为 903.59 km，占总长度的 20.7%；等级为Ⅳ级和Ⅴ级的管段总长度为 2516.45 km，占总长度的 57.6%。

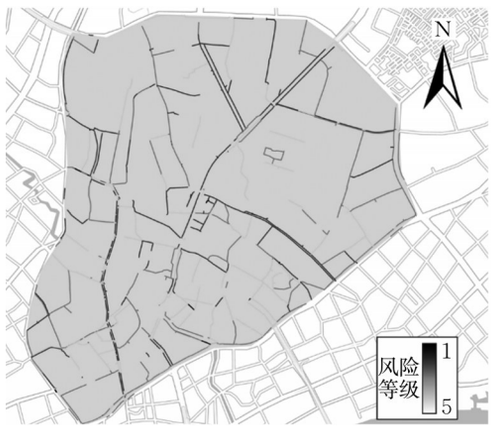


图 5　某区域供水管网风险评价结果示意

Fig. 5　Risk assessment results of the water supply network in a certain area

2.2　交通网络运行状态评估

研究区域路网不同时刻的相变阈值如图 6 所示，工作日与周末的路网 q_c 值呈现了不同趋势，其中工作日在 7:00—9:00、13:00—14:00、17:00—19:00 时段，q_c 值均显著小于其他时刻，说明工作日期间路网存在“早高峰”、“午高峰”以及“晚高峰”。周末期间则只有“午高峰”和“晚高峰”，且“午高峰”提前至 12:00，“晚高峰”则提前至 16:00—18:00。

结合交通网络分析结果如图 7 所示，其中图 7a 与图 7b 分别展示了晚高峰与早高峰 q_c 时刻的交通网络前五大子团分布，可看出晚高峰时期除了最大子团外，其余子团均处于城区外环区域，而早高峰时期城区中心的内环区域有较多的小型子团，由于早高峰时期主要由通勤出行组成，主要分布在交通走廊等区域，拥堵较为集中，因此城区内环区域仍有部分区域出现了小的子团。而晚高峰时期以购物、餐饮、娱乐为目的出行量激增，出行目的与出行时间较为分散[31]，所以城区中心有更多的拥堵路段，较小规模的

子团只能出现在城区边缘。图7c为早高峰q_s邻近q_c时刻的路网分布情况,当$q_s=q_c$时,移除了交通网络部分路段后,全局路网分解为不同子团(图7b所示),计算的路段网络影响力指数分布如图7d所示,可看出网络影响力较大的路段主要分布在内环区域,最大值为576,而中环和外环区域的路段网络影响力相对较小,其中影响力最大的路段分别为52和98。

2.3 供水和交通网络级联失效分析

结合供水管网评估提取风险等级为Ⅰ级、Ⅱ级管网,找出管网对应的敷设路段及其不同时刻的路段重要度,最后基于街道区划进行累计求和,结果如图8所示,图中各区域表示该区域一旦发生高风险供水管网失效导致的交通中断对于全局交通网络的影响大小,采用不同颜色表示,其中,深(黑)色表示影响范围较大,浅(白)色表示影响范围较小。

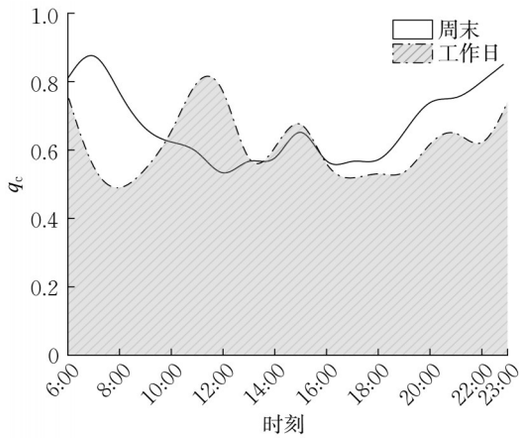
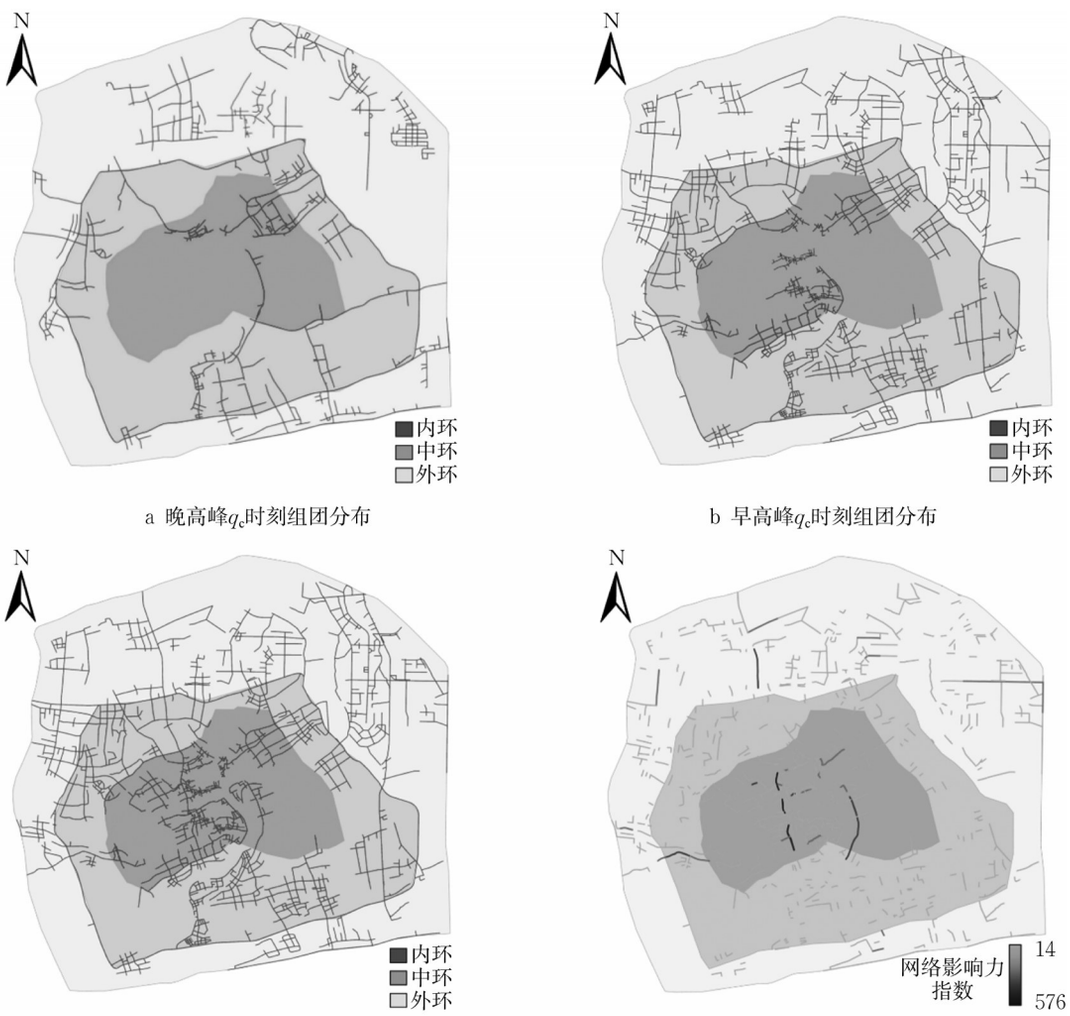


图6 不同时刻q_c值变化趋势

Fig. 6 Variation of q_c at different times



a 晚高峰q_c时刻组团分布

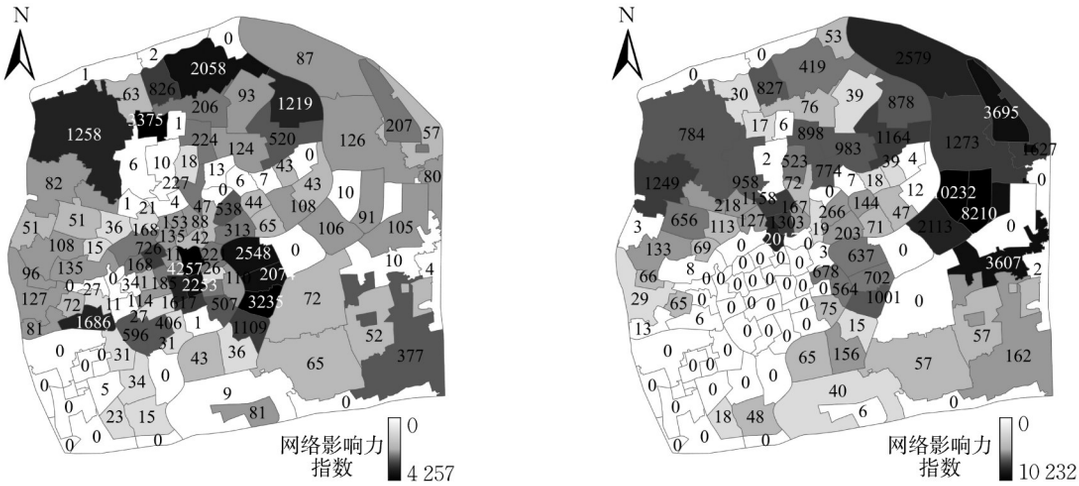
b 早高峰q_c时刻组团分布

c 早高峰邻近q_c时刻路网组团

d 早高峰路段网络影响力指数

图7 交通网络分析结果

Fig. 7 Analysis results of traffic network



a 早高峰管网级联失效影响　　b 晚高峰管网级联失效影响

图 8　供水管网级联失效影响

Fig. 8　Cascading failure impact of water supply network

图 8a 为早高峰的结果，对路网产生较大影响的供水管网主要集中在城区中心主要交通走廊，最大网络影响力指数为 4 257，并且还有少量高风险管网位于城区外围，最大网络影响力指数为 3 375。图 8b 为晚高峰的分析结果，晚高峰时期对交通网络产生较大影响的管网主要在城区外围，最大网络影响力指数为 10 232，而城区中心的管网对全局交通网络产生的影响相对较小，最大网络影响力指数为 2 017。对比图 8 中不同时段影响可见，随着交通网络的动态变化，供水管网产生的级联失效影响的程度大小与分布情况也会随之发生变化，在供水管网的日常运维中，需要不断根据外部以及管网内部的条件变化及时调整运维策略，将管网风险降至最低。同时，考虑城区内影响，城市管网与交通路网连接的居住空间有密切联系，部分路段级联失效后影响会更加显著。

3　结论

基于复杂网络渗流理论与交叉学科网络评估方法，构建了交通网络与供水管网的级联失效动态量化模型，基于上海市中心城区的实际数据，评估了耦合网络的级联失效影响。研究结果表明，交通网络和供水管网之间存在显著的耦合效应，特别是在高峰时段，供水管网的风险事件对交通网络的连通性和运行效率产生了明显的影响，具体结论如下：

(1)通过渗流理论计算得到的交通网络相变阈值表明，工作日和周末的高峰时段交通网络的相变阈值均显著降低，并且因高峰期的出现时刻与持续时间而表现出不同的时空特征，此时的交通网络更容易受到局部失效的影响而导致整体网络的断裂。

(2)提出网络影响力指数来衡量路网关键路段对于全局网络的影响程度，不同时间段的网络影响力指数分布存在显著动态差异，高风险管段主要分布在城区中心和一些关键交通节点下方。其中，早高峰时段高风险供水管段主要集中在城区中心，对交通网络的最大网络影响力指数为 4 257；晚高峰时段则更多分布在城区边缘，最大网络影响力指数为 10 232，说明晚高峰时段的耦合网络更为脆弱，即整体网络更容易产生断裂，高风险管段一旦发生失效事件，将对交通网络产生显著的级联失效影响。

(3)运用解耦方法可以减轻供水管网与城市交通网络之间的级联失效影响，在管网规划阶段，应避免在网络影响力指数较高的道路下敷设管网；在管网维修或更新阶段，需要尽早维修或更换可能产生较大级联失效影响的地下管网，同时应根据路段网络影响力指数的动态变化合理安排施工进程，避免在高峰时段对路网全局产生较大影响。

通过构建耦合网络模型，揭示了交通网络和供水管网之间的复杂耦合作用机制，并量化了高风险供水管段对交通网络的级联失效影响。这一研究不仅为城市生命线系统的风险管理提供了科学依据，也为提升城市基础设施的韧性和可靠性提供了重要参考。未来研究可以进一步扩展至其他类型的耦合网络，例如交通网络与地下排水、燃气等多种管网，探索更为复杂的耦合作用机制。此外，结合实际案

例研究,进一步验证模型的有效性和适用性,并提出更加精准的风险预警和应对策略。

作者贡献声明:

胡群芳:研究命题提出,论文审阅修改。
张　昱:模型建立,数据计算及绘制,论文撰写。
宋朝阳:模型建立与数据分析。
赫　磊:交通数据收集及数据分析。
车德路:管网数据收集及数据分析。
苏　展:数据分析及图表绘制。

参考文献:

[1] RINALDI S M, PEERENBOOM J P, KELLY T K. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(6): 11.

[2] 中国城市规划协会地下管网专业委员会. 2023年全国地下管线事故统计分析报告[R]. 北京:中国城市规划协会, 2023.
Underground Pipeline Professional Committee of China Association of Planning and Regulation. National underground pipeline accident analysis report in 2023[R]. Beijing: China Association of City Planning, 2023.

[3] 李欢,熊芳雨. 突发! 四平路、溧阳路路口水管爆裂[EB/OL]. (2017-11-16)[2025-12-08]. https://mt.sohu.com/20171116/n522593252.shtml.
Li Huan, Xiong Fangyu. Emergency! Water pipe burst at the intersection of Siping Road and Liyang Road[EB/OL]. (2017-11-16) [2025-12-08]. https://mt. sohu. com/20171116/n522593252.shtml.

[4] 徐驰. 中山北路普善路路口地下水管爆裂,周边道路一度积水严重[EB/OL]. (2024-05-24)[2025-12-08]. https://news.qq.com/rain/a/20240524A0B3FT00.
XU Chi. Underground water pipe burst at the intersection of Zhongshan North Road and Pushan Road, causing severe water accumulation on surrounding roads [EB/OL]. (2024-05-24) [2025-12-08]. https://news. qq. com/rain/a/20240524A0B3FT00.

[5] ZHANG Hong, WANG Baodong, ZHANG Dong, *et al*. An accurate and efficient fitness-for-service assessment method of pipes with defects under surface load[J]. Energies, 2021, 14: 5521.

[6] FANG Hongyuan, HE Hang, YANG Kangjian, *et al*. Numerical simulation and full-scale test on dynamic response of corroded concrete pipelines under multi-field coupling [J]. Construction and Building Materials, 2019, 200: 368.

[7] CHAN D, RAJEEV P, KODIKARA J, *et al*. Effects of operational loads on buried water pipes using field tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 124: 104463.

[8] GUO Xiaoxiang, FANG Hongyuan, REN Jingli, *et al*. Prediction equation for maximum stress of concrete drainage pipelines subjected to various damages and complex service conditions [J]. Construction and Building Materials, 2020, 264: 120238.

[9] BULDYREV S, PARSHANI R, PAUL G, *et al*. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 464: 1025.

[10] CHEN Suren, ZOU Qiling. Enhancing resilience of interdependent traffic - electric power system[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 191: 106557.

[11] DU Lili, YE Hongxing, GE Yinyin. Co-optimization approach to post-storm recovery for interdependent power and transportation systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7: 688.

[12] REED D A, KAPUR K C, CHRISTIE R D. Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure[J]. IEEE Systems Journal, 2009, 3: 174.

[13] SIMONOVIC S P, ZHANG Chao, KONG Jingjing. Resilience assessment of interdependent infrastructure systems: a case study based on different response strategies [J]. Sustainability, 2019, 11: 6552

[14] DONG Shangjia, WANG Haizhong, Mostafizi A, *et al*. A network-of-networks percolation analysis of cascading failures in spatially co-located road - sewer infrastructure networks[J]. Physica A, 2020, 538: 122971.

[15] RAHIMI-GOLKHANDAN A, ASLANI B, Mohebbi S. Predictive resilience of interdependent water and transportation infrastructures: a sociotechnical approach[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2022, 80: 101166.

[16] BARABÁSI A L, DANZIGER M M. Recovery coupling in multilayer networks [J]. Nature Communications, 2022, 13(1):955.

[17] LI Daqing, FU Bowen, WANG Yunpeng, *et al*. Percolation transition in dynamical traffic network with evolving critical bottlenecks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 112(3): 669.

[18] LI Daqing, ZHANG Qiong, ZIO E, *et al*. Network reliability analysis based on percolation theory[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 142: 556.

[19] ZENG Ziqiang, TAN Lei, CHEN Zhuo, *et al*. Lecture notes on data engineering and communications technologies [M]. Cham: Springer International Publishing, 2022.

[20] 中华人民共和国国家统计局. 国家数据—2023年度数据[EB/OL]. (2023-01-01)[2025-12-08]. https://data. stats. gov. cn/easyquery. htm? cn=E0103&zb=A0B06&reg=310000&sj=2023.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. National data—2023 annual data [EB/OL]. (2023-01-01) [2025-12-08]. https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm? cn=

E0103&zb=A0B06&reg=310000&sj=2023.

[21] DUNCAN S. Global designing cities initiative [M]. New York: National Association of City Transportation Officials, 2016.

[22] 高强,张凤荔,王瑞锦,等. 轨迹大数据:数据处理关键技术研究综述[J]. 软件学报, 2017, 28(4): 959.
GAO Qiang, ZHANG Fengli, WANG Ruijin, *et al*. Trajectory big data: Research review on key technologies for data processing[J]. Journal of Software, 2017, 28(4): 959.

[23] KAPLAN E, HEGARTY C. Understanding GPS/GNSS: principles and applications[M]. Boston: Artech House, 2017.

[24] 上海市市场监督管理局. 城市供水管网安全风险评估规范: DB31/T 1332—2021[S]. 上海: 中国标准出版社, 2021.
Shanghai Municipal Market Supervision Administration. Urban water supply network safety risk assessment specification: DB31/T 1332—2021 [S]. Shanghai: China Standard Press, 2021.

[25] 宋朝阳. 供水管网运行安全风险评价研究进展[J]. 净水技术, 2023, 42(1): 40.
SONG Chaoyang. Research progress on safety risk assessment of water supply network operation [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(1): 40.

[26] 白金超. 城市供水管网基础风险评估的若干问题 [J]. 中国市政工程, 2024(2): 58.
BAI Jinchao. Several issues in basic risk assessment of urban water supply network[J]. China Municipal Engineering, 2024 (2): 58.

[27] 王亚楠,汪瑞清,胡群芳,等. 城市供水管网管道结构稳定性风险评估模型 [J]. 净水技术, 2018, 37(8): 104.
WANG Yanan, WANG Ruiqing, HU Qunfang, *et al*. Risk assessment model of structural stability of urban water supply network pipelines [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(8): 104.

[28] SHEKHTMAN L, LA ROCCA C E, ZHANG X, *et al*. Cascading failures in complex networks[J]. Journal of Complex Networks, 2020, 8(2):13.

[29] LIU Jianping, ZHANG Hong, WANG Baodong, *et al*. An accurate and efficient fitness-for-service assessment method of pipes with defects under surface load [J]. Energies, 2021, 14 (17):5521.

[30] 胡群芳,苏航剑,方宏远,等. 供水管网大口径管道爆管事件形成机理与精细模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 153.
HU Qunfang, SU Hangjian, FANG Hongyuan, *et al*. Formation mechanism and fine simulation of large diameter pipe burst events in water supply networks [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2023, 51(2): 153.

[31] 陈恒瑞. 面向服务韧性的城市路网交通拥堵防控及修复策略研究[D]. 西安:长安大学, 2023.
CHEN Hengrui. Research on urban road network traffic congestion prevention and restoration strategies for service resilience[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.