

基于渗流理论的港城交通网络特征分析

孙 晓^{1,2}, 白东轩¹, 姚宝珍¹, 白子建²

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 天津市政工程设计研究总院有限公司, 天津 300051)

摘 要: 为了识别港城交通网络瓶颈路段、厘清城区与港区的物理边界, 基于渗流理论对港城交通网络特征进行分析。首先, 首次将土壤渗透模型 Van-Genuchten 应用于交通领域研究, 建立适用于港城交通网络的路段渗流概率模型。其次, 基于实际港城交通网络和渗透模型参数, 分析网络的瓶颈路段和周期特征, 将路网划分为城区、港区和融合区 3 个特征区域。最后, 建立基于分区网络特性的港城交通网络优化策略。实验结果显示: 相比于整体的路网瓶颈路段识别优化策略, 分区优化策略在将瓶颈路段通行能力提升 5%~30% 的过程中, 平均临界阈值始终高于整体优化策略; 此外, 分区优化策略在通行能力仅提升 5% 时, 改善效果便十分明显, 而整体优化策略在通行能力提升 15% 时, 改善效果才逐渐显现。本文对缓解港城区域交通网络拥堵问题, 以及分区域制定交通改善方案提供了理论指导。

关键词: 交通运输规划与管理; 渗流理论; 港城交通网络; 瓶颈识别; 分区优化策略

中图分类号: U491.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)01-0199-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240712

Characteristics analysis of port and city transportation network based on percolation theory

SUN Yao^{1,2}, BAI Dong-xuan¹, YAO Bao-zhen¹, BAI Zi-jian²

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300051, China)

Abstract: To pinpoint bottleneck sections in the port-city transportation network and delineate the physical boundaries between urban zones and port zones, this paper analyzes the characteristics of the port-city transportation network based on percolation theory. Firstly, the Van-Genuchten soil permeability model was applied to transportation research for the first time, formulating a road section seepage probability model tailored for port-city transportation networks. Secondly, based on actual port-city transportation network data and penetration model parameters, the bottleneck roads and periodic characteristics of the network were analyzed, which categorized the road network into three characteristic regions: urban, port, and fusion areas. Finally, an optimization strategy for the port-city transportation network based on the characteristics of zonal network is established. Results revealed that the partition optimization strategy

收稿日期: 2024-06-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52472320, 52372313); 天津市科技支撑计划项目(20YFZCSN01110); 天津市人社局“131”创新团队项目.

作者简介: 孙晓(1993-), 男, 高级工程师, 博士研究生. 研究方向: 智能交通. E-mail: sunyao@mail.dlut.edu.cn

通信作者: 姚宝珍(1976-), 女, 教授, 博士. 研究方向: 智能交通. E-mail: yaobaozhen@dlut.edu.cn

consistently surpassed the overall optimization strategy, achieving a higher average critical threshold when enhancing bottleneck capacity by 5%-30%. Notably, the partition strategy demonstrated remarkable improvements even with a 5% capacity boost, whereas the overall strategy's benefits became evident only at a 15% increase. This paper offers theoretical guidance for alleviating traffic congestion in port-city regions and shaping effective regional traffic enhancement plans.

Key words: transportation planning and management; percolation theory; port and city transportation network; bottleneck identification; regional optimization strategy

0 引言

港口是港城的核心资源和比较优势。作为港口城市发展的重要基础设施,港城交通网络的运行状态直接影响城市经济发展和居民生活质量。然而,随着港口吞吐量的逐年增长,港口边界不断向城市方向扩张,导致港城交通问题日益突出^[1]。港口与城市无论在性质还是功能上都具有明显差异,两者间的冲突和矛盾亦长期存在,因此港城交通网络比传统城市交通网络更加复杂,单一的交通流组织和管理手段往往难以有效解决港城交通网络的安全和效率问题。如何科学划分港城区域边界,挖掘港城交通网络的异质性特征,进而分区域提出有针对性的瓶颈路段识别优化策略,是解决港城交通问题的核心关键。

交通网络特征分析在交通规划和管理中起着至关重要的作用,可以更好地理解交通网络的拓扑结构、瓶颈识别、运作方式,预测未来交通状况,从而制定出更加有效的交通政策和策略^[2-5]。作为交通网络特征分析最经典的理论之一,复杂网络理论在交通网络中的应用研究可以追溯到二十年前^[6]。Latora等^[7]分析了波士顿地铁网络的拓扑结构。Sen等^[8]揭示了印度铁路网的小世界特性。近十年来,国内外学者围绕区域综合交通网络、城市道路交通网络、城市公共交通网络开展了大量的研究工作。吴样平等^[9]基于复杂网络理论,结合高速公路、国省道路、铁路、水运等5个交通网络的拓扑特征,提出了区域综合交通网络优化设计方案。中南大学王国明博士^[10]开展了城市群道路网络特性及演化研究,分析了城市群道路网络的特性、层次结构、组团结构与演化机理,揭示了城市群道路网络演化过程中,第一阶段、第二阶段均不存在小世界性,不属于小世界网络,第三阶段存在小世界性,属于小世界网络。Zou等^[11]引入回归克里格模型,结合路网结构和城市

交通状态的空间特征,解释交通状态的变化。胡垚等^[12]运用图论思想对全球184个城市的地铁网络特征进行实证研究,运用因子分析、聚类分析等方法对城市地铁网络进行分类,并提出了各类地铁交通网络的优化策略。

近年来,复杂网络的演化机理和动力学过程成为研究热点和难点。作为从渗流现象中抽象出来的泛化数学模型,渗流理论旨在研究渗流及其转变过程,目前已成为研究复杂网络动力学过程的重要模型之一^[13]。渗流理论最早可追溯到20世纪40年代,在数学和统计物理等领域得到了广泛研究^[14-16],并已应用于计算机网络、社交网络、流行病传播网络、脑神经网络等领域的实证研究^[17-21],但应用于交通网络的研究较少。Li等^[22]以渗流临界点处的速度阈值大小衡量网络可靠性,通过计算渗流理论中的团簇尺寸挖掘瓶颈路段,解析交通动力学与渗流的关联关系;Zeng等^[23]基于北京和深圳的实时路况数据,通过渗流理论对高峰、平峰等不同时段的路网交通资源时空配置进行分析,发现了城市交通流的时空模式切换行为;Chen等^[24]采用渗流理论捕捉交通网络级联故障的动态过程,进而发现了隐藏的瓶颈。

微观层面的复杂网络研究一直是交通领域的难题,传统的微观交通流分析主要基于经典的交通流理论,即 $q = \rho v$ ^[25]。传统的交通流理论仅用道路的车辆流速和密度推算交通流量,并假设两个参数独立不相关,然而速度与密度具有相互联系。广义的速度-密度模型定义为:在车流密度适中情况下,速度-密度呈线性关系;当车流密度很大时,速度-密度呈对数关系;当车流密度很小时,速度-密度呈指数关系。由此衍生出线性速度-密度模型(格林希尔治模型)、对数速度-密度模型(格林伯模型)、指数速度-密度模型(安德伍德模型),最终整合出广义模型(派普斯模型)^[26]:即 $v = v_{\max} \left(1 - \rho/\rho_{\max}\right)^s$,其中: $v_{\max}$ 和 $\rho_{\max}$ 分别为最大

交通流速度和密度值; s 为 >0 的实数,当 $s=1$ 时,为线性关系。然而,基于渗流理论的基本思想,上述广义模型仍有缺陷,模型在关注微观车辆速度本身的同时,却忽略了相邻路段间的交通流状况,即下游路段的交通流状况可能影响上游路段的渗流能力。此外,Chen等^[27]对可靠性最短路的研究成果表明,相邻路段间并非独立不相关的,而是具有协相关关系的。

综上所述,当前鲜有以港城交通网络为实证对象、挖掘港城融合区域交通网络异质性特征的研究。考虑到港城交通客货混行的特征,单一的速度指标难以刻画渗流临界值,本文基于渗流理论,综合考虑交通量、车辆速度和路段饱和度水平,从微观交通流视角,探究港城交通网络特征,并提出分区域瓶颈路段识别优化策略。主要贡献点总结如下:

(1)港城交通与城市交通在出行目的、车型构成、道路属性等方面具有明显差异,道路长期处于客货混行状态,交通状况复杂,是交通拥堵的高发区,由此导致交通安全问题突出。基于此,本文首次基于渗流理论,识别港城交通网络特征。

(2)传统渗流模型仅简单地考虑路段的车辆平均通行速度,将其与道路临界概率下的临界速度进行比较,以确定路网处于连通状态(functional)或非连通状态(dysfunctional)。然而,港城交通中小客车与大货车在车辆运行速度上存在显著差异,使得传统渗流模型失效。因此,本文综合考虑交通量、车辆速度、路段饱和度水平,以及相邻

路段的关联关系,采用改进的土壤渗透模型(Van-Genuchten模型)^[28],确定各路段的渗流概率。

(3)考虑到港城交通网络兼具港口物流作业和城市通勤交通功能,通过分析港城交通网络特征,挖掘港城交通网络的时空异质性特征,进而分区域提出有针对性的瓶颈路段识别优化策略,从系统性角度提高区域路网通行效率。

1 渗流过程

渗流的基础网格既可以是一般的网格,如正方形网格、三角形网格、六边形网格、蜂巢状网格、立方体网格、高维超立方体网格、Bethe网格、纽结型网格、分形结构网格、多重分形网格等,也可以是复杂的网络,如多层复杂网络、相互依赖网络、爱尔特希-雷尼(Erdős-Rényi, ER)随机网络等^[13]。下面以二维正方形网络为例,介绍渗流理论。

如图1所示,每个网格与4个相邻的网格相连,系统网络大小为 10×10 ,渗透方向由上至下。其中,蓝色网格表示渗透网格(彩图参见电子版,下同),黑色网格表示不渗透网格,白色网格表示未渗透网格(由不渗透网格封闭所致)。若相邻两个网格间的边为非连通状态,则会发生渗透,每个网格可能的渗透网格为邻近的左侧、右侧和下方网格;反之,若相邻两个网格间的边为非连通状态,则不会发生渗透。

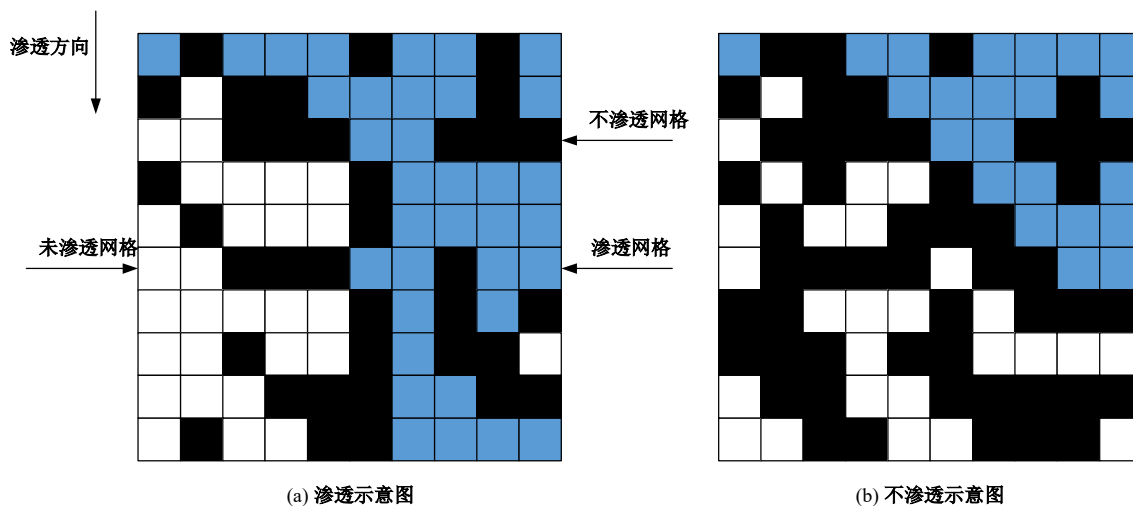


图1 渗流过程示意图

Fig. 1 Diagram of the seepage process

图1(a)(b)网络的渗流侵占概率 P 分别为0.64和0.5。其中,图1(a)为渗透系统,即从系统

网络顶部到底部至少有一条完整的不间断通路;图1(b)为非渗透系统,即从系统网络顶部到底部

不存在不间断通路。需要补充说明的是,若将图 1 中每一个网格抽象成一个“点”,则可得系统网络的节点渗流过程。在此系统中,若节点为连通状态,则可分别向左、右、下 3 个方向渗透,这与边渗流过程一致,由此实现节点渗流与边渗流的概念转换。

2 模型建立

(1) 渗流侵占概率 P

渗流侵占概率表示网络边(或节点)被侵占的概率,是渗流的重要参数。渗流侵占概率越小,表示路网系统发生渗流的概率越小,路网系统的渗透概率越小;反之亦然。当 $P=0$ 时,路网系统不发生渗透,即渗透概率为 0;当 $P=1$ 时,路网系统发生渗透,即渗透概率为 1。

(2) 渗流临界概率 P_c

当 $P < P_c$ 时,路网系统中不存在渗透组团,只有少数分散组团;当 $P > P_c$ 时,路网系统中会出现联通网络全局的渗透组团。当 $|P - P_c| < \epsilon$ 时,会发生渗流相变过程,此时路网系统中存在一个或多个临界点,使得最大渗流团簇开始分裂或形成,临界点附近的团簇数量会有显著的变化。

(3) 渗流团簇 C 、渗流团簇尺寸 S 和渗流团簇集合 C_s

在渗流过程中,路网系统会形成不同尺寸、由被渗流边构成的连通子集,定义为渗流团簇,记为 C 。需说明的是,当边与边之间发生渗流时,默认两边相连的节点也发生了渗流。渗流团簇中被渗流侵占的边数定义为渗流团簇尺寸,记为 S ;所有渗流团簇尺寸为 s 的渗流团簇集合记为 C_s ($s=1, 2, \dots$)。当渗流团簇中的边可以从路网一端到达另一端,称为渗透团簇,渗透团簇集合用 C_∞ 表示。当路网处于亚临界区域时($P < P_c$),路网系统不存在渗透团簇集合,即 $C_\infty = \emptyset$ 。

(4) 路段 ij 渗流属性 x_{ij}

给定路网渗流侵占概率 P ,对于任意路段 ij 间的渗流属性,可以分为两类:当 $P_{ij} \geq P$ 时,路段 ij 与下游路段是连通的,此时 $x_{ij} = 1$;反之,当 $P_{ij} < P$ 时,路段 ij 与下游路段是非连通的,此时 $x_{ij} = 0$ 。具体表达式为:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & P_{ij} \geq P \\ 0, & P_{ij} < P \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{ij} 为路段 ij 向下游路段的渗流概率。其计算公式为:

$$P_{ij} = \frac{\sum_K P_{ij,jk}}{N_j} \quad (2)$$

式中: $P_{ij,jk}$ 为路段 ij 向下游路段 jk 的渗流概率,是与路段交通量 q 、路段平均车速 v 和路段道路密度 r 有关的函数; K 为与节点 j 相邻的边集合, $k \in K$; N_j 为与节点 j 相邻的边数。

本文首次将土壤渗透模型 Van-Genuchten 应用于交通领域,建立了路段渗流概率模型,用于港城交通网络特征分析,具体如式(3)~(6)所示:

$$q_{ij}^{\max,t} = q_{ij}^t + \frac{q_{ij}^{\max} - q_{ij}^t}{\left[1 + (\alpha h_{ij}^t)^{1/(1-m)}\right]^m} \quad (3)$$

$$h_{ij}^t = \frac{\sum_K v_{jk}^t}{N_j \times v_{ij}^t} \quad (4)$$

$$0 < m < 1 \quad (5)$$

$$\alpha \geq 0 \quad (6)$$

式中: $q_{ij}^{\max,t}$ 为路段 ij 在 t 时段的最大交通量; q_{ij}^t 为路段 ij 在 t 时段的交通量; $q_{ij}^{\max}$ 为路段 ij 的饱和交通量; h_{ij}^t 为路段 ij 在 t 时段向下游路段的渗流强度, h_{ij}^t 越大,渗流概率越大; v_{ij}^t 和 v_{jk}^t 分别为 t 时段路段 ij 和 jk 上的车辆平均运行速度; m 、 α 为待定参数, α 为路段车流压力参数, m 为曲线形状参数。

将式(3)变形,易得:

$$r_{ij}^t = \frac{q_{ij}^{\max,t} - q_{ij}^t}{q_{ij}^{\max} - q_{ij}^t} = \frac{1}{[1 + (\alpha h_{ij}^t)^{1/(1-m)}]^m} \quad (7)$$

式中: r_{ij}^t 为路段 ij 在 t 时段的饱和度水平,由式(7)可知, $0 < r_{ij}^t \leq 1$ 。

参考非饱和土渗透系数的经验关系式^[28],得到路段 ij 向路段 jk 的渗流概率为:

$$P_{ij,jk} = P(q_{ij}^{\max}) \sqrt{r_{ij}^t} [1 - (1 - \sqrt{r_{ij}^t})^m]^2 \quad (8)$$

式中: $P(q_{ij}^{\max})$ 为路段 ij 饱和交通量下的渗流概率,由单位时间内路段任意截面的饱和交通量通过车辆数与理论通行能力比值确定,为一常值。显然,当 $r_{ij}^t = 1$ 时,有 $P_{ij,jk} = P(q_{ij}^{\max})$,即当饱和度水平为 1 时,路段 ij 拥堵发生的渗流概率等于路段 ij 饱和交通流量下拥堵的渗流概率。

3 实证分析

本文以天津港城道路交通网络为实证研究对象,如图 2 所示。图 2 为一个有向道路拓朴交通网络,共包含 339 个节点,541 条边,1 071 条有向

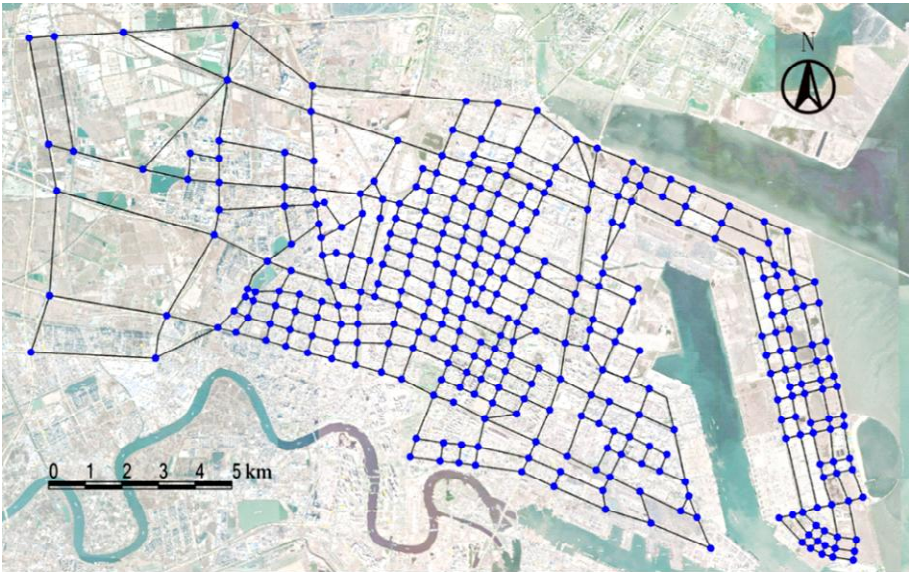


图 2 天津港城道路交通网络

Fig. 2 Tianjin port-city road transportation network

路段;定义西向东、北向南为上行方向,东向西、南向北为下行方向。数据类型包括区域视频监控数据、手机信令数据、导航数据、交调数据等,统计分

3.1 参数标定

参考土壤渗透模型 Van-Genuchten 的实测值^[29], 本文设定 $\alpha=0.48, m=0.25$ 。由于港城区域大型货运车辆较多,因此统计的自然车交通流量 q 需要折算为标准车(pcu),各车型折算系数见表 1。

表 1 各车型折算系数

Table 1 Conversion coefficient of each vehicle type	
车型	折算系数
小型客车	1
小型货车	1
中型货车	1.5
大型客车	1.5
大型货车	3
集卡	4
其他	2

注:小型客车:额定座位 ≤ 19 座;小型货车:载质量 ≤ 2 t;中型货车: $2\text{ t}<\text{载质量}\leq 7\text{ t}$;大型客车:额定座位 >19 座;大型货车: $7\text{ t}<\text{载质量}\leq 14\text{ t}$;其他:特大型载货汽车、拖挂车、摩托车、拖拉机等。

参考《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012)^[30], 计算得到不同道路属性下多车道的饱和和交通量,见表 2。

3.2 基本特征分析

选取 2023 年 10 月 16 日 9:00 am 上行方向交通数据,得到路网上行方向的渗流概率分布,如图

析内容包括道路属性、分时段路段平均交通量和平均车速,数据时间跨度为 2023 年 10 月 16 日至 2023 年 10 月 30 日连续两周(非节假日)。

表 2 不同道路属性下多车道饱和和交通量

Table 2 Multi-lane saturation traffic volume with different road attributes				pcu/h
道路属性	单车道	双车道	三车道	四车道
高/快速路	1 318	2 491	3 519	4 375
主干道	1 120	2 116	2 990	3 718
次干道	770	1 455	2 055	2 556
支路	504	952	1 345	1 673

3 所示。其中路段分为 3 类,渗流概率 ≤ 0.5 的路段用红色表示,在 $0.5\sim 0.75$ 之间的用橙色表示, $P_g\geq 0.75$ 的用绿色表示。渗流概率越大,表示路网的渗透性越好。

进一步分析不同渗流侵占概率下渗流团簇的

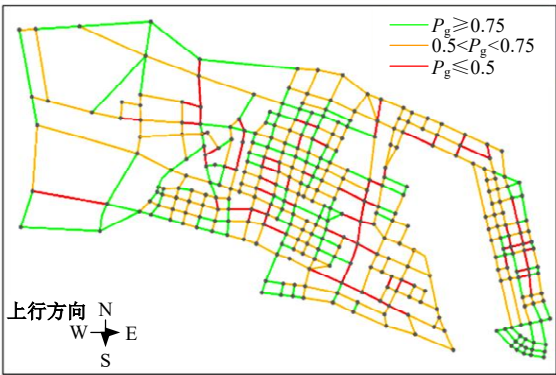


图 3 路网上行方向的渗流概率分布

Fig. 3 Seepage probability distribution in uplink direction of road network

分布和尺寸特征,结果如图 4 和图 5 所示。可见,当 $P=0.43, 0.65, 0.81$ 时,网络中 3 大团簇尺寸发生显著变化;渗流侵占概率取值不同,渗流团簇的分布不同。当 $P<0.43$ 时,路网中存在连通的渗透团簇,此时最大簇占据主导,其他团簇尺寸较小;随着 P 增大至 0.65,最大簇发生瓦解,网络中形成多个团簇,渗流团簇消失,团簇内部发生渗流,但团簇间不发生渗流;当 P 增大至 0.81 时,网络中团簇的尺寸进一步减少,达到临界值时,网络中只有若干小尺寸团簇,团簇分布表明网络的区域局部连通特性。需说明的是,渗流侵占概率的数值大小可以反映港城网络局部路网的通行能力和运行状态。

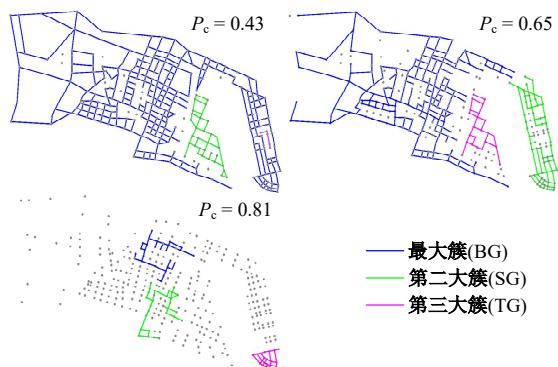


图 4 不同渗流侵占概率下的渗流团簇分布

Fig. 4 Seepage cluster distribution under different seepage occupation probability

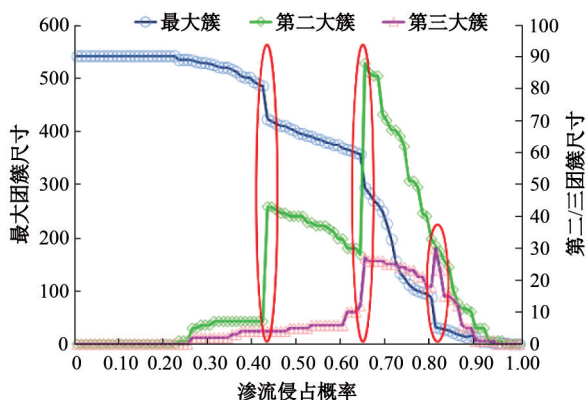


图 5 不同渗流侵占概率下的渗流团簇尺寸

Fig. 5 Seepage cluster sizes under different seepage occupation probabilities

本文中,使网络团簇尺寸发生显著波动的 3 个渗流侵占概率即网络的临界概率值。在临界概率值下,网络中的团簇发生瓦解,而令团簇瓦解的路段即路网的瓶颈路段,如图 6 圆圈所示。

3.3 交通出行特征分析

港城区域交通网络主要由通勤和物流两种交

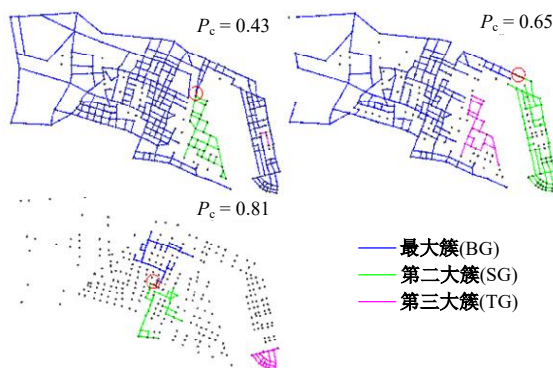


图 6 研究路网瓶颈路段识别

Fig. 6 Bottleneck section identification of road network is studied

通出行需求构成,其中通勤交通往往表现出一定的潮汐特性,物流交通则表现出周期性特征。因此,研究港城交通网络的潮汐性和周期性特征规律,有助于识别港城区域路网交通出行特性。在图 3 所示场景下,得到同时段下行方向的路网渗流概率,图 7 为路网上下行方向的渗流概率分布对比。经计算,上行方向路网平均渗流概率为 0.57,下行方向路网平均渗流概率为 0.66。可见,相同时间段上行方向与下行方向的渗流概率差异明显,上行方向的交通拥堵水平高于下行方向。这也进一步佐证了研究区域的交通网络可能存在潮汐性特征。

基于上述分析,按照 3.2 节的分析方法,得到不同时间段各路段的渗流概率。本文将路网数据的时间切片划定为 30 min(如 7:00~8:00 am 可划分为 2 个时间段)。选取工作日通勤早高峰 7:30~8:30 am 和晚高峰 16:30~17:30 pm,共得到 40 组对比数据,用于判断路网的潮汐性特征;选取每日平峰时段 9:00~10:00 am 和 19:00~20:00 pm,共计 56 组对比数据,用于判断路网的周期性特征。

应用 SPSS 19.0 软件对数据的一致性进行分析。本文采用 Kappa 一致性检验方法,当 $Kappa > 0.6$ 时认为两组数据一致性程度较强。通过判断各路段早高峰上行方向和晚高峰下行方向的渗流概率是否具有 consistency 特征,以检验路段是否具有潮汐性特征;通过判断各路段平峰时段每天同一时段、同方向的渗流概率是否具有 consistency 特征,以检验路段是否具有周期性特征,统计分析结果如图 8 所示。

图 8 中,红线表示潮汐性路段,蓝线表示周期性路段,绿线表示兼顾潮汐性和周期性的路段。

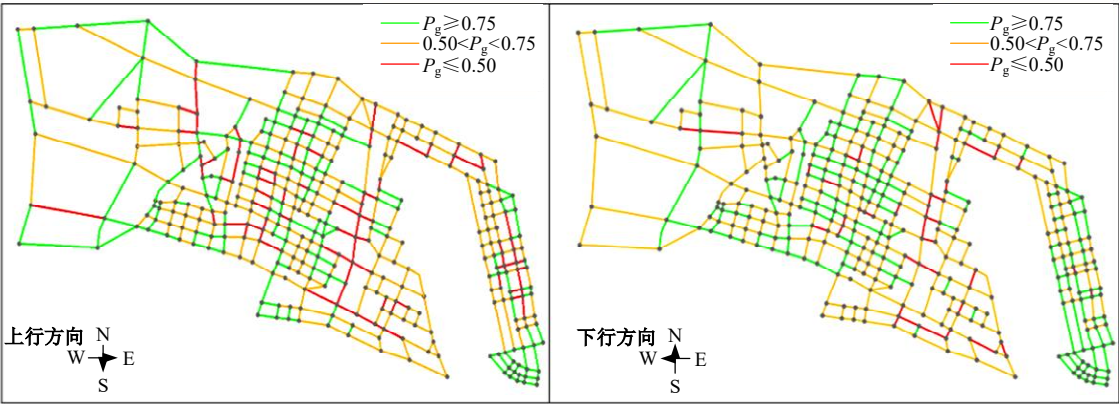


图 7 路网上下行方向的渗流概率分布对比

Fig. 7 Comparison of seepage probability distributions in upstream and downstream directions of road network

对不同的特征路段进行空间集聚划分,共划分出 3 个特征区域。由潮汐性路段组成的特征区域可划分为城区,以城市通勤交通功能为主;由周期性路段组成的特征区域可划分为港区,以港口物流运输功能为主;由兼顾潮汐性和周期性路段组成的特征区域可划分为融合区,既承担了港口物流运输作业,又承载了城市通勤交通的出行需求。

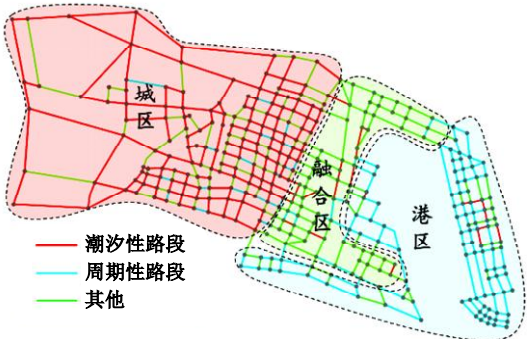


图 8 区域网络交通出行特征结果分析

Fig. 8 Analysis of regional network traffic travel characteristics results

3.4 分区特征分析

为了进一步分析港城交通网络中不同区域的空间异质性特征,本文对不同时段各区域的临界阈值变化进行分析。参考文献[22],将最大团簇

瓦解、第二大团簇尺寸达到最大值时的 P 值作为网络的临界阈值,即渗流临界概率 P_c 。由定义可知,图 3 场景下区域路网渗流临界概率为 0.65。表 3 为工作日和休息日不同时段各区域典型临界阈值。

由表 3 可见,最大的最大临界阈值为 0.82,出现在 03:30 am 的城区工作日场景;最小的最大临界阈值为 0.69,出现在 02:00 am 的港区休息日场景。最大的最小临界阈值为 0.58,出现在 15:30 pm 的城区休息日场景;最小的最小临界阈值为 0.29,出现在 17:30 pm 的融合区工作日场景。最小临界阈值侧面反映了各区域在饱和和交通流条件下的路网交通水平。结果表明,需要重点关注融合区工作日晚高峰的交通拥堵问题。

路网最大临界阈值的发生时间集中分布在 02:00~04:00 am,而最小临界阈值的发生时间却呈现分散特点。城区工作日和港区休息日的最小临界阈值出现在早高峰 7:30~08:00 am;港区工作日、融合区工作日和融合区休息日的最小临界阈值出现在 17:30~19:30 pm;比较特殊的是,城区休息日的最小临界阈值出现在 15:30 pm,这说明城区休息日场景下更应该关注此时段的路网交通状况,而非早晚高峰时段。

表 3 工作日和休息日分区典型临界阈值

Table 3 Typical critical thresholds for workdays and rest days subregions

临界阈值 P_c	城区工作日	城区休息日	港区工作日	港区休息日	融合区工作日	融合区休息日
最大临界阈值	0.82	0.80	0.74	0.69	0.71	0.72
时间段	03:30 am	04:00 am	03:30 am	02:00 am	03:00 am	03:30 am
最小临界阈值	0.37	0.58	0.36	0.33	0.29	0.35
时间段	08:00 am	15:30 pm	19:00 pm	7:30 am	17:30 pm	19:30 pm
最大、最小临界阈值差值	0.45	0.22	0.38	0.36	0.42	0.37
平均临界阈值	0.62	0.67	0.58	0.57	0.50	0.55

此外,城区工作日场景的最大、最小临界阈值差值最大,达到了 0.45,城区休息日场景的差值最小,为 0.22。最大、最小临界阈值差值反映了不同区域交通状况变化程度,差值越大说明交通波动程度越大,差值越小说明路网交通状态相对稳定。根据结果,路网的波动水平由大到小排序为城区工作日>融合区工作日>港区工作日>融合区休息日>港区休息日>城区休息日,各区域工作日的路网波动水平均大于休息日。

最后,计算各区域的平均临界阈值,探讨路网整体通达性。平均临界阈值越大,说明路网整体的通达性越好。整体来看,城区的通达性优于港区,港区的通达性优于融合区。城区休息日路网整体通达性最好,融合区工作日通达性最差。城区和融合区休息日的路网整体通达性优于工作日;值得注意的是,港区工作日的路网整体通达性却优于休息日,这说明港区休息日的交通状况相比于工作日更差。比较合理的解释是,港区休息日的物流作业更加繁忙,导致路网交通量更大,使得路网的整体通达性下降。

4 港城交通网络优化策略

基于港城交通网络的特征分析,将实证路网划分为城区、港区和融合区 3 个部分,基于本文渗流模型,识别各时段下分区域的瓶颈路段,以提出分区域瓶颈路段识别优化策略。图 9 为分区域和整体的路网瓶颈路段识别结果,其中图 9(a)为考虑分区域的瓶颈路段,图 9(b)为考虑整体的瓶颈路段。由图 9 可见,相比于考虑整体的瓶颈路段识别结果,考虑分区域的瓶颈路段识别可以较好地挖掘区域内部的瓶颈路段(如图 9(a)中圈画路段)。进一步分析,由于港区、城区和融合区的交通出行特征不同,导致各区域的路段渗流概率差异显著,因此整体的网络瓶颈路段识别更易将分区域连接处的瓶颈路段找到,而无法识别区域内的瓶颈路段,而本文提出的分区域路网瓶颈路段识别方法,既兼顾了区域的整体性,又考虑了分区域的差异性,对系统进行了“二次”瓶颈识别,最终的识别效果也会更好。

为了进一步验证两种策略的优化效果,在基本特征分析的场景下,将识别出的瓶颈路段通行能力统一提升 5%~30%,计算优化后的路网平均临界阈值,结果见表 4。

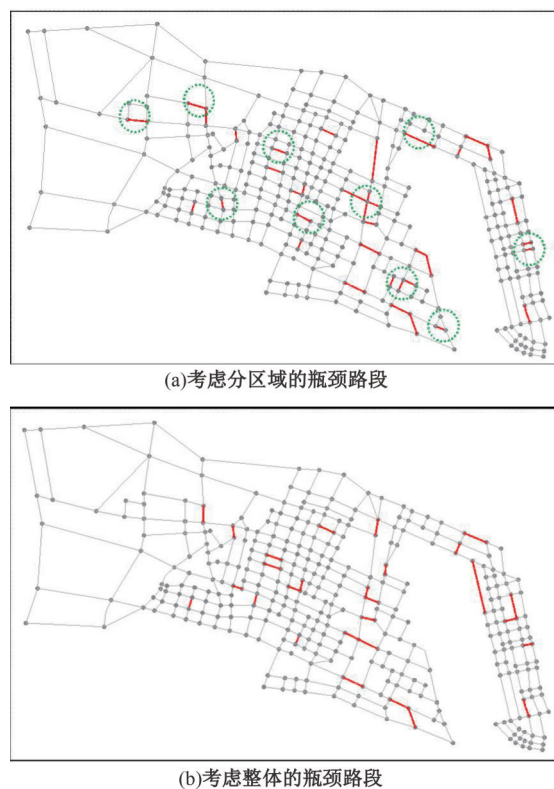


图 9 分区域和整体的路网瓶颈路段识别结果
Fig. 9 Sub-regional and overall bottleneck road section identification results of the road network

表 4 不同通行能力提升下的路网平均临界阈值变化
Table 4 Changes of average critical threshold of road network under different traffic capacity enhancements

通行能力提升比例/%	策略一(分区域)	策略二(整体)
0	0.57	0.57
5	0.61	0.58
10	0.63	0.59
15	0.65	0.63
20	0.66	0.64
25	0.66	0.65
30	0.66	0.65

策略一的路网平均临界阈值在瓶颈路段通行能力提升 20% 时达到最大值 0.66,而策略二在通行能力提升 25% 时达到最大值 0.65。横向比较可知,随着瓶颈路段通行能力的提升,策略一的平均临界阈值始终高于策略二,说明策略一对应的路网整体通达性更好。在通行能力仅提升 5% 时,策略一的改善效果便十分明显;而在通行能力提升 15% 时,策略二的改善效果才显现出来。整体看来,策略一的优化效果优于策略二,也验证了本文分区域港城交通网络优化策略的先进性。

5 结 论

(1)参考土壤渗透模型 Van-Genuchten 建立的港城交通网络渗流模型,综合考虑了路网交通量、车辆速度、路段饱和度水平等多维指标,可以有效地识别路网交通瓶颈,进而改善路网通达性和通行效率。

(2)针对港城交通网络兼具通勤和物流运输两种交通出行需求的特点,通过分析路段的潮汐性和周期性特征,将路网划分为城区、港区和融合区。对最小临界阈值分析发现:需要重点关注融合区工作日晚高峰的交通拥堵问题,城区休息日应该关注此时段的路网交通状况,而非早晚高峰时段。对最大、最小临界阈值差值分析发现:各区域工作日的路网波动水平均大于休息日。对平均临界阈值分析发现:城区的通达性优于港区,港区的通达性优于融合区;港区工作日的路网整体通达性优于休息日,说明港区休息日的交通状况比工作日更差。

(3)基于渗流理论,提出了一种分区域的路网瓶颈路段识别优化策略(策略一)。相比于整体的路网瓶颈路段识别优化策略(策略二),在瓶颈路段通行能力提升5%~30%的过程中,策略一的平均临界阈值始终高于策略二,说明策略一对应的路网整体通达性更好。此外,策略一在通行能力仅提升5%时,改善效果便十分明显,而策略二在通行能力提升15%时,改善效果才显现出来。

参考文献:

- [1] 李勋高,李乃强,刘淑永,等. 青岛董家口港城公共交通安全规划探索与实践[J]. 城市公共交通, 2021(8): 46-50.
Li Xun-gao, Li Nai-qiang, Liu Shu-yong, et al. Exploration and practice of public transport safety planning in Dongjiakou port city of Qingdao[J]. Urban Public Transport, 2021(8): 46-50.
- [2] 郑长江,陶童统,陈志超. 基于流量可调重分配的级联失效模型[J]. 吉林大学学报:工学版, 2024, 54(9): 2441-2450.
Zheng Chang-jiang, Tao Tong-tong, Chen Zhi-chao. Cascading failure model based on adjustable redistribution of traffic flow[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2024, 54(9): 2441-2450.
- [3] 温晓岳,钱国敏,孔桦桦,等. TrafficPro:一种针对城市信控路网的路段速度预测框架[J]. 吉林大学学报:工学版, 2024, 54(8): 2214-2222.
Wen Xiao-yue, Qian Guo-min, Kong Hua-hua, et al. TrafficPro: a framework to predict link speeds on signalized urban traffic network[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(8): 2214-2222.
- [4] 袁韵,徐戈,贾建民. 网约车流动行为的时空特征及网络分析[J]. 系统管理学报, 2021, 30(1): 28-39.
Yuan Yun, Xu Ge, Jia Jian-min. Spatiotemporal characteristics and network analysis of car-hailing mobility behavior[J]. Journal of Systems & Management, 2021, 30(1): 28-39.
- [5] 丁祥颖,胡尧,刘智权. 基于交通数据分解和时空特征提取的车辆平均车速预测模型[J]. 运筹与模糊学, 2023, 13(2): 415-430.
Ding Xiang-ying, Hu Yao, Liu Zhi-quan. Vehicle average speed prediction model based on traffic data decomposition and spatio-temporal feature extraction[J]. Operations Research and Fuzziology, 2023, 13(2): 415-430.
- [6] Zhang M Y, Huang T, Guo Z X, et al. Complex-network-based traffic network analysis and dynamics: A comprehensive review[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2022, 607: No. 128063.
- [7] Latora V, Marchiori M. Is the Boston subway a small-world network?[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2002, 314(1-4): 109-113.
- [8] Sen P, Dasgupta S, Chatterjee A, et al. Small-world properties of the Indian railway network[J]. Physical Review E, 2003, 67(3): No. 036106.
- [9] 吴样平,郭飞,曾明华. 基于复杂网络的城市综合交通网络特征分析与优化研究[J]. 江西师范大学学报:自然科学版, 2015, 39(3): 326-330.
Wu Yang-ping, Guo Fei, Zeng Ming-hua. The characteristic analyses and optimization of urban integrated transport network based on complex network[J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science Edition), 2015, 39(3): 326-330.
- [10] 王国明. 城市群道路网络特性及演化研究[D]. 长沙:中南大学交通运输工程学院, 2012.
Wang Guo-ming. A study on property and evolution of road network of urban agglomeration[D]. Changsha: School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, 2012.
- [11] Zou H, Yue Y, Li Q. Urban traffic state explained by road networks and spatial variance approach using floating car data[J]. Transportation Research Record, 2014(2467): 40-48.
- [12] 胡垚,吕斌. 城市地铁网络特征分析及类型划分

- [J]. 规划师, 2013, 29(5): 96-101.
- Hu Yao, Lv Bin. Metro system character analysis and categorization[J]. Planners, 2013, 29(5): 96-101.
- [13] 张李盈, 任景莉. 渗流理论、方法、进展及存在问题[J]. 自然杂志, 2019, 41(2): 119-131.
- Zhang Li-ying, Ren Jing-li. Percolation theory, method, progress, and existing problems[J]. Chinese Journal of Nature, 2019, 41(2): 119-131.
- [14] Flory P J. Molecular size distribution in three dimensional polymers. I. gelation[J]. Journal of the American Chemical Society, 1941, 63(11): 3083-3090.
- [15] Broadbent S R, Hammersley J M. Percolation processes[J]. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1957, 53(3): 629-641.
- [16] Werner W, Schramm O, Lawler G F. Conformal invariance of planar loop-erased random walks and uniform spanning trees[J]. The Annals of Probability, 2004, 32(1B): 939-995.
- [17] 于少波, 吴玲达, 张喜涛, 等. 面向空间信息网络的多特征可视化方法综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(2): 201-208.
- Yu Shao-bo, Wu Ling-da, Zhang Xi-tao, et al. Survey of multi-feature visualization for space information network[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2018, 13(2): 201-208.
- [18] Sander L M, Warren C P, Sokolov I M, et al. Percolation on heterogeneous networks as a model for epidemics[J]. Mathematical Biosciences, 2002, 180(1/2): 293-305.
- [19] Guo C, Zhao Y D, David J H, et al. Attack structural vulnerability of power grids: a hybrid approach based on complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2010, 389(3): 595-603.
- [20] Glauche I, Krause W, Sollacher R, et al. Continuum percolation of wireless ad hoc communication networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2003, 325(3/4): 577-600.
- [21] Ferraro G D, Moreno A, Min B, et al. Finding influential nodes for integration in brain networks using optimal percolation theory[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): No. 2274.
- [22] 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, 2015, 112(3): 669-672.
- [23] Zeng G W, Li D Q, Guo S M, et al. Switch between critical percolation modes in city traffic dynamics[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116: 23-28.
- [24] Chen Z, Yang C, Qian J H, et al. Recursive traffic percolation on urban transportation systems[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2023, 33(3): No. 033132.
- [25] 傅裕寿. 交通流理论[J]. 力学与实践, 1989(4): 5-16, 25.
- Fu Yu-shou. Traffic flow theory[J]. Mechanics in Engineering, 1989(4): 5-16, 25.
- [26] 林豪, 江竹, 李树彬. 基于机器学习的城市快速路速度-密度关系模型[J]. 西安科技大学学报, 2020, 40(6): 1109-1116.
- Lin Hao, Jiang Zhu, Li Shu-bin. Speed-density relationship model of urban expressway based on machine learning[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(6): 1109-1116.
- [27] Chen B Y, Lam W H K, Sumalee A, et al. Reliable shortest path finding in stochastic networks with spatial correlated link travel times[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2012, 26(2): 365-386.
- [28] 张平, 王聪, 谢长青, 等. 关于非饱和渗透理论中的几项基本问题的剖析[J]. 沈阳大学学报: 自然科学版, 2014, 26(5): 386-390.
- Zhang Ping, Wang Cong, Xie Chang-qing, et al. Basic issues in unsaturated hydraulic theory[J]. Journal of Shenyang University(Natural Science), 2014, 26(5): 386-390.
- [29] 彬楠, 樊贵盛. 土壤水分特征曲线 Van-Genuchten 模型参数的土壤传输函数比选[J]. 农村水利水电, 2018(5): 33-36.
- Bin nan, Fan Gui-sheng. Van-Genuchten model parameters of soil water characteristics curve are compared with the soil transfer[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(5): 33-36.
- [30] CJJ 37—2012 城市道路工程设计规范. [S].