

出行韧性的理论与方法及实证

黄 洁¹, 王姣娥^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 居民出行具有空间依赖性、时空动态性等特征, 其与交通供给系统的动态耦合规律, 是城市科学、地理学等领域的重点与难点。尤其在经历外部扰动时, 居民出行表现出的韧性更具复杂性和时空波动性。本文借鉴生态学、交通工程、心理学等学科的基础理论, 基于交通供需动态均衡特性, 提出了出行韧性的概念及理论框架, 构建了适用于多维度的出行韧性评价方法体系。同时, 本文采用手机信令、地铁刷卡等多源大数据, 基于出行韧性的实证研究, 探讨了出行韧性的空间分异及群体差异。出行韧性研究可以为城市精细化管理与韧性城市建设提供科技支撑。

关键词: 韧性; 居民出行; 社会群体; 城市交通; 大数据

DOI: 10.11821/dlxb202310008

1 引言

韧性作为自然生态、社会经济等系统可持续发展的关键属性, 反映系统恢复力、保持功能及不断适应扰动的能力。韧性概念自提出以来便被生态学、环境工程、管理学、社会学、心理学等多学科广泛使用, 并构建了与平衡状态、反馈机制、自组织等探析系统物理状态的相关理论。国内外学者从不同角度解析了韧性概念: 基于空间地域/区域视角提出了区域韧性、城市韧性、乡村韧性等^[1-3]; 基于领域分类, 探讨了生态韧性、经济韧性、社会韧性、设施韧性和制度韧性等^[2, 4-5]。在地理学中韧性研究也逐渐成为研究热点, 在自然地理、经济地理、城市地理、乡村地理等领域中均有探讨^[3, 6-10], 包括地域系统资源环境承载力、防灾减灾备灾能力的动态适应能力^[11]; 贸易网络在金融危机、经济衰退等负向扰动时自组织、不断适应的能力^[12-14]; 由地区经济在经受外部冲击之后的恢复能力、转型能力和更新能力等反应的区域经济韧性^[15-18]; 从社会发展、生态环境、建成环境、管理体制等方面探讨城市系统的动态平衡性和抗干扰能力^[1, 19-22]; 从城市间社会、经济、工程与组织等各领域的协作和互补关系探讨城市网络韧性^[23-24]。整体来看, 韧性研究的新趋势是注重研究对象在经历扰动时的过程式变化, 并从多维度分析研究对象在系统中的适应能力。

收稿日期: 2022-06-14; 修订日期: 2023-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(42225106, 42121001); 中国科学院青年创新促进会会员人才专项(2021049)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42225106, No.42121001; Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences, No.2021049]

作者简介: 黄洁(1988-), 女, 广西桂林人, 副研究员, 研究方向为大数据与城市交通、交通地理。

E-mail: huangjie@igsnnr.ac.cn

通讯作者: 王姣娥(1981-), 女, 湖南涟源人, 研究员, 主要从事交通地理与区域发展、城市交通大数据等研究。

E-mail: wangjie@igsnnr.ac.cn

从功能一致性和系统性的视角来看,交通系统分为供给端和需求端,二者的供需平衡是系统达到稳定的基本条件。现有研究的网络鲁棒性和可靠性为交通供给端的韧性研究提供了理论与方法,有助于交通系统建设从“重建设”到“重养护、重质量”的转变^[8]。在交通强国建设背景之下,交通系统应重视现代化、高质量发展,提升交通系统韧性成为重要研究议题。但是,少有研究关注交通系统需求端(居民出行)在经历扰动时的适应能力,即出行韧性。出行韧性的研究对象应是出行主体(人或群体),量化方法应关注供给端和需求端的互动耦合过程中居民出行的变化,进而探讨出行在供需耦合过程中出行主体的恢复能力。综上所述,本文试图从供需动态耦合视角研究居民出行经历扰动时所表现出的韧性,基于居民出行群体(个体)出行差异,解析出行韧性的概念内涵并提出研究测度方法,并给出实证研究案例。出行韧性的理论构建有助于丰富韧性研究的内涵和领域,并且完善交通系统韧性研究的分析方法,进而促进交通系统建设从“重质量”到“以人为本”高质量发展。

2 理论构建

2.1 概念辨析:从韧性到出行韧性

“韧性”(Resilience)来自拉丁语“Resilio”,译为恢复至初始状态。心理学最早将韧性定义为个人特质之一,并提出“行为韧性”(Behavioural Resilience)概念,行为韧性指个体在社会经济危机、重大生活打击、社区危机及心理压力等负面影响下表现出积极的适应性^[25]。在最新研究中,行为韧性将关注焦点开始从个体韧性转移到社区空间尺度或社会群体^[26];国土空间规划中开始关注“以人为本”、精细化管理等需求导向下的地域功能韧性提升^[1, 10-11]。2020年新型冠状病毒感染疫情爆发以来,社会公共心理韧性研究再次成为关注热点,主要聚焦在“人”的韧性^[27]。

韧性研究在生态学研究中被广泛讨论,多聚焦生态系统理论、平衡状态等。Holling提出生态系统的韧性决定了系统持续性(Systematic Persistence),认为韧性是衡量系统吸收变化、接受驱动并保持不变的能力^[4]。Perrings在这一基础上提出了韧性的广义涵义,即衡量系统承受不确定冲击的能力^[28]。从研究对象来看,生态学、环境科学等领域关注自然生态系统的韧性,逐渐发展出生态韧性、工程韧性等理论^[27]。

城市是人与自然生态系统耦合的重要地域单元,面对自然生态环境和社会经济发展两方面的不确定性,城市发展中韧性能力提升显得尤为重要。韧性城市(部分学者称为“弹性城市”)理论内涵丰富,包括设施韧性、制度韧性、经济韧性、社会韧性等^[29-30]。韧性城市的研究主要探讨在环境变化或突发事件下如何提升城市恢复到正常状态下的功能与结构,从综合集成的角度评价并优化城市抵抗风险的能力^[31]。后疫情时代,韧性城市主要探讨经历公共卫生事件、重大社会扰动之后,城市恢复到负面打击之前、或再次调整到稳定状态的能力^[32]。

纵观韧性研究,无论研究对象是个体还是城市,其关键问题可以归纳为测度并提升研究对象应对负面打击时表现的正面适应和调整能力。从分析视角来看,韧性可以分为供给端、需求端的恢复能力。例如,社会韧性体现社会政策、社会治理等能够帮助社会民众在经受重大灾害、公共卫生事件等打击时度过危机的能力,属于供给端的韧性。而行为韧性反映了个体恢复能力对于社会政策、社会治理以及社区环境等的反馈。基于供需互动关系,交通韧性研究也可以分为供给端和需求端;而现有研究多关注供给端的交通系统韧性,即交通供给在经受重大扰动之后的恢复能力^[33]。研究发现交通系统韧性呈

现3个阶段，即瞬时下降、低值保持、线性恢复^[34]；需求端的交通恢复过程与供给系统在不断耦合中，表现出更为复杂的变化^[35]，即本文所指的出行韧性。

2.2 理论框架

出行作为居民生活、社会经济活动的派生需求，与社会经济发展水平密切相关，并伴随交通系统高速化、网络化发展而平稳上升^[36]。基于交通供需均衡博弈理论^[4, 37-38]，在没有任何外部影响的情况下，交通供给与需求到达供需均衡的平稳状态，若出现外部刺激（如新建交通设施、运营网络因故障而关闭），那么该均衡状态将被打破，在供给与需求同时调整之后，恢复到之前的均衡状态，或者形成新的均衡状态。其中，交通供给端的恢复过程与土木工程学提出的韧性三角形较为相似，呈现阶梯状、逐步递增的特征。因此，交通供给层面的韧性测度多遵循阶段式的韧性三角形测度方法^[39]。但是，居民出行需求的恢复过程更为复杂，呈现连续变化、波动性强的特征，与个体心理适应、出行活动限制逐步解除、社会氛围恢复、交通供给阶段式提升等因素不断耦合的过程紧密相连。因此，出行韧性的概念需要囊括出行强度波动变化、与交通供给动态耦合的过程，及如何恢复到原有均衡状态或达到新均衡状态的过程。

从系统外部扰动的方向来看，可以分为正、负两个类型（表1）。在正向扰动（如重大展览或者节假日）的影响下，居民出行会出现瞬时激增，在正向刺激结束之后迅速恢复到原有均衡状态，再持续平稳上升，并且正向扰动对居民出行意愿的影响多为柔性，且均为在扰动中促进居民出行自发增长。在承受负向扰动时，居民出行将出现显著下降的趋势，且保持下降的周期长短会由于负向扰动的变化而变化；在负向扰动停止之后，居民出行将缓慢恢复到原有均衡状态或形成新的均衡。因此，负向扰动之后的恢复过程比正向刺激的过程更为复杂，需要对交通供需均衡状态进行深入讨论，而且交通需求承受负向扰动的能力更能反应居民出行的反弹能力。

表1 扰动类型、具体实例及其对出行意愿的影响分类
Tab. 1 Categories and examples of disturbance and its influence on travel attitude

扰动特征			实例	出行意愿
方向	时长	属性		
负向	长期	硬性	私家车尾号限行、私家车牌照摇号	被动限制
		柔性	疫情期间倡导减少出行	自发减少
	短期	硬性	地震、泥石流等自然灾害，封控和居家隔离等防疫措施	被动限制
		柔性	暴雨天气预警倡导减少出行	自发减少
正向	长期	柔性	寒暑假	自发增长
	短期	柔性	大型体育赛事、娱乐活动等	波动影响
	周期	柔性	周末及节假日	自发增长

注：负向扰动均具有偶发性特征，少有周期性、规律性的负向扰动；正向扰动多为诱导刺激，较少产生硬性影响。

从负向扰动的特征来看（表1），可以分为物理冲击（硬性）和政策调整（柔性），硬性扰动包括地震、泥石流等自然灾害引发的交通设施中断、运营网络骤停等。柔性扰动包括暴风雨天气预警、疫情期间倡导减少出行等。依据扰动的影响时长来看，可以分为长期、短期、周期性。由于负向扰动均具有偶发性特征，少有周期性、规律性的负向扰动。以疫情期间的出行政策调整为例，新增病例出现时，倡导城市居民减少出行可以归为长期扰动；而封控区域的限制出行管理、居家隔离措施具有一定的时效性，属于短期扰动。并且，前者属于柔性扰动，促使居民自发降低出行意愿；后者属于硬性扰动，被动限制居民的出行意愿。另外，疫情期间的扰动属于长期和短期、硬性和柔性的叠

加,既引发了被动出行限制,也导致了居民主观出行意愿的降低以减少暴露风险,其影响会随事件的紧急程度、工作日/周末、心理意愿、出行目的等而改变,在此情况下出行需求的恢复过程将更为复杂,既存在空间分异,也存在群体差异(图1)。

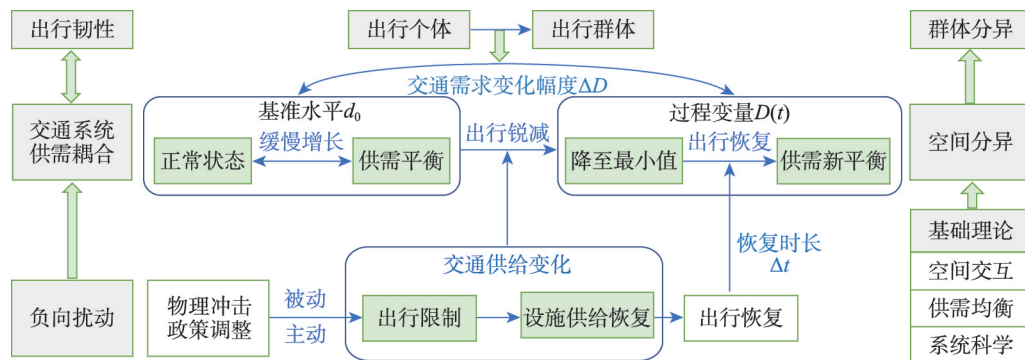


图1 出行韧性的理论框架

Fig. 1 A theoretical framework of travel behaviour resilience

参照生态学、心理学、城市科学、交通工程等的韧性研究^[4, 33, 35], 本文依据负向扰动的阶段特征和居民出行恢复的复杂性提出了“出行韧性”(Travel Behaviour Resilience)的概念。出行韧性由交通需求(居民出行)在负向扰动之前的出行偏好、扰动之中的体验、及扰动之后与城市系统恢复、交通供给恢复的实时耦合过程等共同决定, 即居民出行在经受负向扰动之后恢复到原有供需均衡状态或形成新均衡状态的过程。在此背景之下, 出行韧性的研究对象是出行主体(人或群体), 测度关键是研究对象的交通需求如何恢复到扰动之前的水平, 或在与扰动长期耦合的过程中形成稳定状态的能力。出行韧性的测度原则是: ① 供给扰动已经达到平稳, 再测度出行韧性。出行韧性测度的是面对交通供给扰动、资源输入达到稳定之后的出行恢复过程和恢复能力。② 相对需求比较原则, 出行韧性测度的是出行(交通需求)与扰动之前的基准水平进行比较研究。其中, 基准水平主要表示正常状态下出行者(群体)的出行量与时空特征。出行韧性测度中, 受损程度和恢复时长都是重要指标, 即同样受损程度, 恢复时间越长, 出行韧性越差。综上所述, 出行韧性能够过程性、连续性、动态性表征居民出行与扰动、城市空间、交通系统的相互作用关系。

3 测度方法

3.1 交通系统韧性测度: 从单一指标到韧性三角形

交通系统的韧性测度可归纳为两个流派: 一是“工程韧性”方法, 专注于系统抵抗和吸收扰动的影响, 以保持服务水平(鲁棒性, Robustness)、恢复到扰动前的功能(反弹能力, Bouncebackability)、转换到不同状态的能力(适应性, Adaptability)、能够承受最大扰动程度(脆弱性, Vulnerability)等指标进行刻画。二是“社会生态韧性”(Socio-ecological Resilience)方法, 主要考虑到系统持续适应过程中的灵活性(Flexibility)和敏捷性(Agility)^[37-38]。其中, 灵活性是指应对扰动表现出的预期变化, 而表现出的意外变化则是敏捷性的体现。对于任意交通系统, 其供给端的服务水平可以由 $S(x)$ 表示, 在经历负向扰动之前的正常服务水平由 S_0 表示, 在负向扰动之后的表现出的服务水平由 \bar{S} 表示, 上述指标的含义及判断依据如表2所示。以上指标也可以用于需求端的出行水平

表2 交通系统韧性研究常用指标
Tab. 2 Indictors in the study of transport network resilience

指标	含义	判断依据
鲁棒性	抵御负向扰动，以保持交通系统的基本服务水平 S_{\min}	$\bar{S}=S_{\min}$
反弹能力	反弹到负向扰动前的稳定状态，即扰动前交通系统的正常服务水平	$\bar{S}=S_0$
适应性	抵御负向扰动，调整到能够提供的最大服务水平 \bar{S}_{\max}	$\bar{S}=\bar{S}_{\max}$
灵活性	应对负向扰动，表现出预期的服务水平 S_{\exp}	$\bar{S}=S_{\exp}$
敏捷性	应对负向扰动，表现出预期以外的服务变化	$\bar{S}\neq S_{\exp}$
脆弱性	能够抵抗的最大扰动程度，及服务水平降到最低时的扰动程度	$\bar{S}=0$

注：交通系统在经历负向扰动之前的正常服务水平由 S_0 表示，在负向扰动之后的表现出的服务水平由 \bar{S} 表示。

表示，以脆弱性为例，出行需求的脆弱性应是出行能够抗击的最大扰动程度；而出行韧性关注的出行对应扰动的反馈和恢复能力。

交通韧性测度要解决的核心问题是量化扰动对交通系统的威胁水平^[37]，前提假设是研究对象通常处于正常状态，即系统内部要素循环稳定，达到一种均衡状态。交通供给与需求的耦合在经历重大干扰、转变与适应后，一般会进入新的均衡状态。在从正常状态到新的均衡状态过程中，交通系统的灵活性和敏捷性测度成为研究重点。灵活性和敏捷性的测度需要已知扰动的大小和影响，或潜在扰动的概率^[32]，是基于统计检验和概率论的测度方法。很多研究从交通供给视角出发，运用运输系统抗扰动能力、紧急关闭后的恢复时长等指标测度交通韧性^[32, 38]。以上研究与工程韧性测度有类似之处，运用灾害管理、运筹学、土木工程等领域的理论，重点测度交通系统供给在扰动时维持一定服务水平的能力以及恢复到正常服务水平的能力。总体上，交通韧性正逐步从单一、片面的指标转变到多指标、全面的量化测度，并且呈现过程性、连续的观测趋势。通过寻找交通供给能力的关键拐点（扰动点、能力低值、恢复点），Bevilacqua等提出了交通系统韧性三角形测度方法，该方法将过程化的复杂测度简化为关键拐点的测度，有较好的推广性，目前主要应用于供应链韧性测度^[40]。但是，对于交通供给与需求在经历扰动之后的动态耦合过程还缺乏理论研究。区别于单一供给端的扰动多为阶段分明、可度量的变化，需求端的韧性研究难点在于如何提出连续的测度方法且关注供需动态耦合过程，并能够解析交通需求多处于动态非均衡状态的特点。因此，本文引入社会生态韧性测度方法，采用过程式的量化手段提出需求端韧性的理论“出行韧性”，并构建相应的方法体系。

3.2 出行韧性测度

依据上文出行韧性的定义，出行韧性由经历扰动时交通供给变化过程 $S(st)$ 、交通需求恢复过程的时间长短 Δt 和交通需求变化幅度 $D(t)$ 共同决定。因此，出行韧性的函数可以表示为 $F_R(S(st), \Delta t, D(t))$ ，其中 R 表示出行韧性值的高低， $S(t)$ 和 $D(t)$ 是随时间变化的函数。

在经受负向扰动时，交通供给变化由于交通基础设施条件、运营组织管理模式、及供给主体等差异而产生不同的响应机制，主要分为两类：① 修复交通设施直至供给水平恢复。在交通设施损坏时，交通系统会修复、维护基础设施的物理网络。例如，公路交通出行具有自发性、自组织特性，在部分区域经受负向扰动时，区域限行、道路封闭等措施直至道路修复。类别①的供给变化 $S(st)$ 多为分阶段函数。② 运输组织与出行政策调整。运输组织的调整主要取决于供给主体。例如，铁路、公共交通等交通运输系统由

政府主导,在运输时刻表调整时仍然会保证最基本的供给水平,即 $\bar{S}=S_{\min}$ (表2)。而民航、网约车、共享单车等市场导向的供给主体在调整航班时刻表、车辆投入量时,多遵循 $\bar{S}=\bar{S}_{\max}$ 原则(表2),即兼顾服务市场的需求同时确保在负向扰动时降低运营成本。图2a中仅给出了更为复杂的分阶段函数示意图。整体来看,交通供给水平下降 st_1 的开始时刻 st_3 到供给水平恢复正常的时刻为交通供给的变化周期。供给水平下降到最低值 S_{\min} 的时刻为 st_2 ,交通供给的变化量 $\Delta S=S_{st_1}-S_{st_2}$,其中 $S_{st_2}=S_{\min}$ 。

依据出行韧性的函数,交通需求 $D(t)$ 的3个拐点识别是出行韧性的评价关键(图2b):①扰动发生时,交通出行显著下降的拐点,即下降点 D_{t_1} ;②扰动持续时,交通出行下降到的最低点,即最低点 $D_{t_2}=d_{\min}$;③扰动平稳或消除之后,交通出行不再出现显著增加的拐点,即稳定点 D_{t_3} 。并且,交通需求的拐点不应该先于交通供给拐点出现,以确保出行韧性的评价包括了供需耦合过程。因此,出行韧性评价的3个拐点识别方法可以归

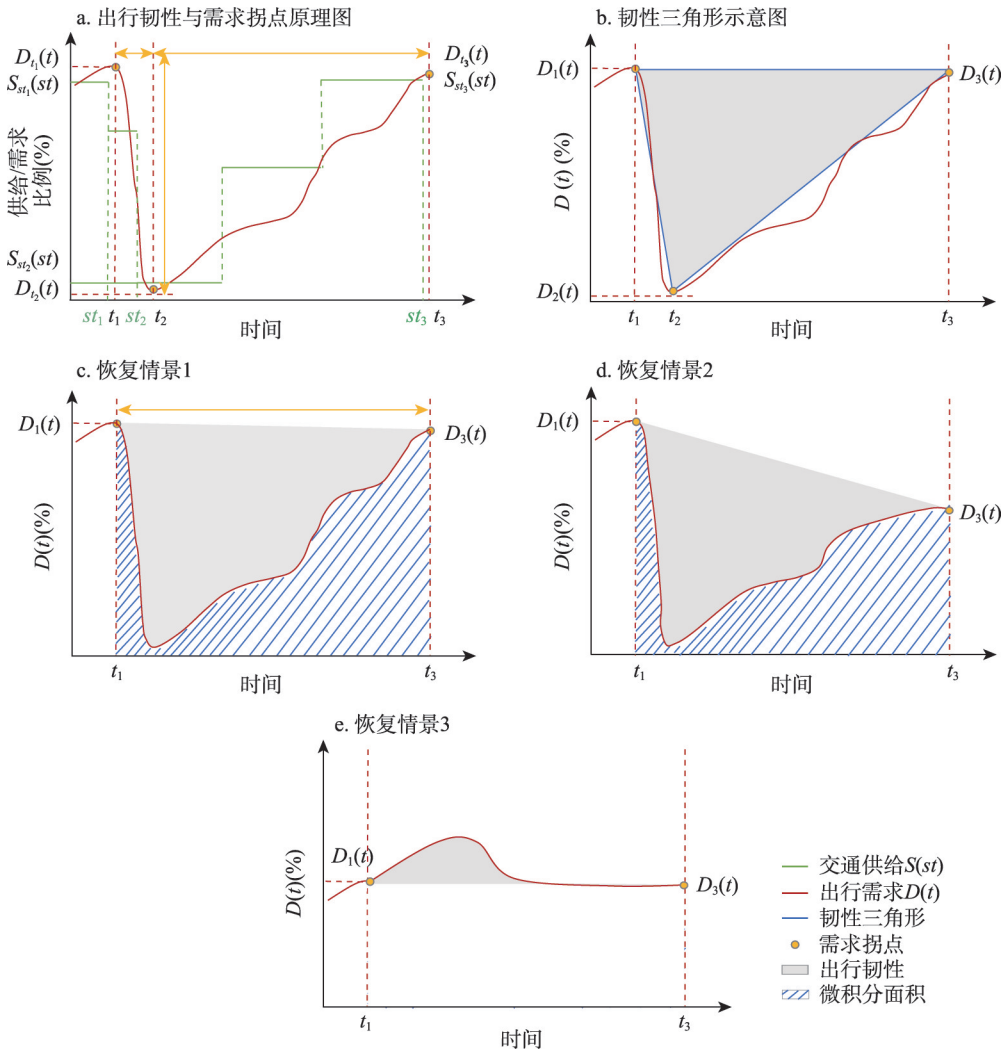


图2 出行韧性及需求拐点示意图

Fig. 2 Illustration of travel behaviour resilience calculation and inflection points

纳为:① t_1 的判断依据为出行需求函数 $D(t)$ 的导数,即 $dD/dt > 0$ 变为 $dD/dt < 0$ 的时刻,且满足 $t_1 \geq st_1$;② t_2 表示 $dD/dt < 0$ 变为 $dD/dt > 0$ 的时刻,且 $t_2 \geq st_2$;③ t_3 表示 $D_1 \approx D_3$ 的时刻,且 $t_3 \geq st_3$,表示交通需求基本恢复到正常水平(图2c);④若负向扰动长期存在, t_3 表示 $dD/dt > 0$ 变为 $dD/dt = 0$ (图2d),表示交通需求无法恢复到正常水平,或居民出行恢复过程中的阶段量;⑤图2e给出了交通需求经历正向扰动时变化的示意图。出行韧性的测度是相对于扰动之前 d_0 的交通出行水平,一般用当前出行量 $d(t)$ 与扰动前的同期的平均水平为主要指标,即 $D(t) = d(t)/d_0$ 。这一指标能够无量纲化地表达不同交通出行指标的恢复状态。

出行韧性表示长时序、动态的交通出行变化,是一个过程性变量。因此,可以借鉴微积分方法进行计算(图2c)。依据交通需求的拐点识别方法,从扰动开始、出行下降的时刻 t_1 开始,到扰动平稳、出行恢复的时刻 t_3 ,出行韧性 TS 的理论值可以定义为:

$$TS = \frac{1}{(D_1 + D_3)(t_3 - t_1)/2 - \int_{t_1}^{t_3} D(t)dt} \quad (1)$$

实际研究中,交通出行需求的连续曲线 $D(x)$ 对于数据的连续性要求高,较难实现理论值 $\int_{t_1}^{t_3} D(t)dt$ 的计算。并且公式(1)适用于上文所述交通需求恢复不到扰动之前水平的情况(图2d)。基于测度的3个关键点,出行韧性三角形(图2b)的计算如下:

$$TS_{tri} = (D_1 - D_2)(t_3 - t_1)/2 \quad (2)$$

出行韧性由韧性三角形测度推导,简化公式如下:

$$TS = 2/[(D_1 - D_2)(t_3 - t_1)] \quad (3)$$

由公式(3)可知,出行韧性值越小,交通出行恢复的能力越弱,需要更长的时间,受影响的幅度也越大;反之亦然。

对于正向扰动(图2e),出行韧性的理论值的计算公式为:

$$TS = \frac{1}{\int_{t_1}^{t_3} D(t)dt - (D_1 + D_3)(t_3 - t_1)/2} \quad (4)$$

依据出行需求函数 $D_i(x)$ 的研究粒度差异,出行韧性的评价单元可以是个体尺度、群体尺度等。数据采集的要求是保证数据周期的覆盖范围,以捕捉出行需求函数 $D_i(x)$ 的3个关键拐点。具备追溯个体长时序出行需求变化的数据均可以作为个体出行韧性研究的数据源,如地铁刷卡数据、手机支付二维码。群体的出行韧性测度需要依赖于学生公交卡、国航白金卡等包含社会经济属性的数据。对于没有明确包含社会经济属性的数据,群体的划分可以依据出行时空特征进行划分,例如通勤群体集中在早晚高峰出行^[41]。

4 实证案例

新型冠状病毒感染疫情是2000年以来城市交通遇到的持续时间长、影响规模大、时空动态变化复杂的负向扰动;疫情反复导致大多数交通出行都无法回归到疫情以前,形成了一个新的亚稳定状态^[37, 39]。出行韧性的研究有助于探讨经历负向扰动之后,交通系统恢复到负面打击之前、或再次调整到稳定状态的能力。依据韧性研究以人为本的新趋势和交通需求的空间异质性,本文基于两个实证研究论述出行韧性测度方法的应用,并剖析出行韧性的时空机理:①运用手机信令数据,以北京市“新发地疫情”之后的交通出行恢复过程为研究对象,解析出行韧性的空间分异。②基于地铁刷卡数据,已有研究

以昆明市第一波疫情爆发之后地铁出行恢复的过程为例, 阐明了出行韧性与出行行为的交互机制^[43]; 两个案例研究体现了出行韧性测度方法对于不同数据、不同研究粒度、不同城市规模的适应性。

4.1 空间维度的出行韧性分异: 以北京市为例

由于出行韧性的测度囊括了交通供给的实时耦合过程。因此, 基于群体的出行韧性分析应考虑群体所在空间地理单元, 并探讨土地利用、交通区位等供给端的影响^[45]。已有研究表明, 由于新型冠状病毒感染在密闭空间的传播性增加, 人们对于绿地开放空间的需求进一步增强^[42]; 距离疫情爆发地点越近的地理空间, 居民出行的恢复会由于自身出行意愿的变化和管控加强等因素变慢, 呈现较低的出行韧性^[43]。依据北京市“新发地疫情”的爆发时间和波动变化, 本文选取2020年2—9月的250 m×250 m格网手机信令数据, 数据包括每个月网格之间的出行OD总量。由图2b所示, 交通需求变化幅度 $\Delta D = D_3 - D_1$, 本案例中 D_3 表示2020年9月的出行OD总量, D_1 表示2020年2—9月中出行量最小月份的交通出行OD量。交通需求恢复时长 $\Delta t = t_3 - t_1$, 其中 t_3 是出行OD量达到 D_3 的那个月, 即 $\Delta D / \Delta t$ 和可以表示交通需求的恢复速度。依据交通需求变化幅度和恢复速度分为4类: 第一类是出行量变化小且恢复速度慢; 第二类是出行量变化小且恢复速度快; 第三类是出行量变化大且恢复速度慢; 第四类是出行量变化大且恢复速度快。依据这一分类方法, 以交通需求变化量、恢复速度作为阈值, 对研究区域内的空间单元分类, 在进行核密度聚类(图3)。

在经历“新发地疫情”爆发之后, 北京市出行韧性的空间分布规律如下: 第一类区域主要是出行量小、用地功能在居民生活中重要性不高、且辐射范围很有限的地点, 如小型街道公园、少数休闲娱乐场所。第二类区域主要是居民居住区, 代表了城市功能的核心区域, 具有较强的出行韧性和恢复力。第三类主要是交通路网密集区域、交通区位优势, 是联系城市其他区域的重要介质。第三类区域多分布在四环以内、沿交通网络向外延伸。第四类区域多为就业中心, 出行韧性较强, 反应了城市整体的复工复产情况。整体来看, 由于建成环境、土地利用、交通区位、疫情前的交通出行量、疫情爆发地点、管控因素等的影响, 出行韧性呈现出空间异质性。

4.2 时间维度的出行韧性群体差异: 以昆明市为例

依据出行韧性的基础理论, 扰动之前的居民出行时空特征对出行韧性有着重要的影响。在出行行为分析中, 居民出行的时间特征可以由平均出行时长、总出行时长、出行频次等刻画, 空间特征可以由出行总距离、活动空间、访问地点数量及位置等评价。其中, 再现比例表示观测出行个体在经历一波疫情之后再次出行的比例。图4展示了昆明市地铁出行群体在经历第一次疫情影响之后的出行恢复过程。可以发现, 居民出行在时间特征上的指标恢复要快于空间上的指标, 即居民出行时间上的出行韧性要高于空间上的韧性^[43], 而且公共交通出行的恢复是一个长周期的过程。直到2020年9月, 昆明市乘坐地铁出行人群的一周内的出行总距离、出行频次等指标均恢复到疫情前水平, 而活动空间仅恢复到94.72%^[43]。已有研究发现居民出行更加倾向于重复访问熟悉的地点, 而不是探索新地点^[44]。可以得到居民出行的规律, 即在经历负向扰动后, 居民出行对熟悉的地理空间有更强的依赖性, 并会有意识的缩小空间范围。

由于出行意愿是出行行为的内生要素, 出行韧性与扰动之后的出行意愿紧密相关^[36]。如图4所示, 在经受疫情时, 地铁乘客的再现比例降至疫情前的3.34%, 降低幅度最为明显; 在疫情平稳之后, 其恢复速度明显快于出行行为分析的其他指标。并且由于不同目

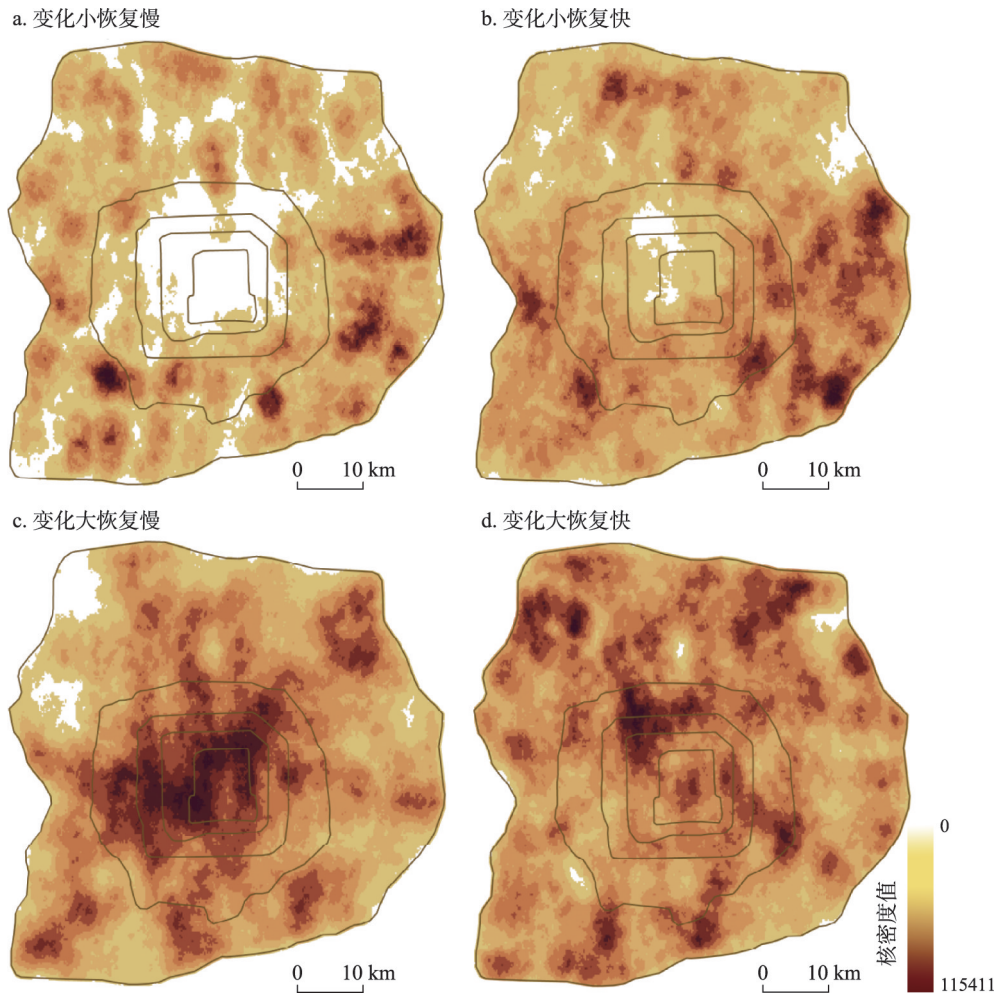


图3 北京市出行韧性空间分异的核密度分析结果

Fig. 3 Spatial differentiation of travel behaviour resilience according to kernel density analysis in Beijing

的的出行紧急程度、时刻固定性、个人需求等的差异，出行意愿的恢复会由于出行目的的不同而呈现不同的出行韧性。比如，以通勤为目的的出行韧性要显著高于休闲娱乐的出行^[45]。

个体社会经济背景、出行需求差异引致的出行偏好差异是出行韧性呈现群体时空分异的原因^[45]。依据图4的出行需求变化曲线和3.2小节出行韧性测度方法，群体的出行韧性值如表3所示。一般规律是出行韧性值越大，韧性三角形面积越小，出行韧性越强。已有研究表明，通勤群体出行的时空规律最强，并且具备出行的紧迫性，尤其是社会保障类的工作岗位，因此，通勤群体的出行韧性最强，表现在恢复到疫情前水平的出行指标数量最多。出行群体的纵向对比中，通勤群体的出行次数韧性也最大。学生群体在出行总距离和活动空间也表现较强的出行韧性，因为学生的出行活动受学校、家庭地址的约束程度较大；疫情平稳之后，学生需要继续按照以往规律上学，因此空间上的出行韧性更强。由恢复到疫情前的出行水平来看，老年群体的出行韧性最小，这类群体需要尽可能地减少暴露机会以降低传染风险。

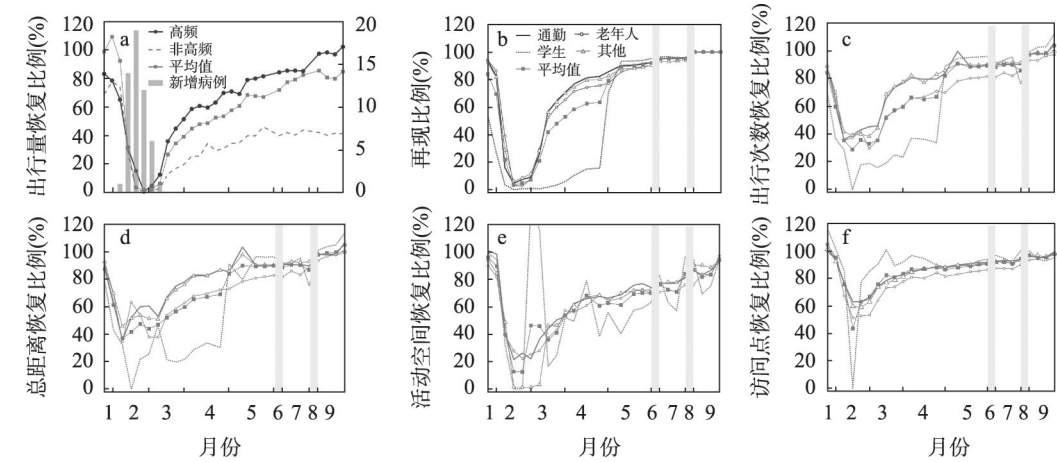


图4 出行群体样本分布及疫情期间的出行指标变化(2020年 vs.2019年月平均水平)

Fig. 4 Research samples and travel behaviour variations of mobility groups during the COVID-19 pandemic

表3 不同出行指标的出行韧性值(2020年2—9月)

Tab. 3 Travel behaviour resilience values by mobility groups between February and September

群体	出行次数	总距离	活动空间	站点数量
通勤	0.067	0.062	-(93%)	0.060
老年	-(97%)	0.061	-(97%)	-(97%)
学生	0.062	0.069	0.059	-(95%)
其他	0.060	0.061	-(94%)	-(89%)

注：对于已经恢复到疫情前水平的出行指标，即出行恢复比例为100%，计算出行韧性值；对于没有恢复到疫情前水平的出行指标，仅列出恢复比例(列在括号中)。

5 结论与讨论

本文结合生态学、心理学、系统工程理论等多学科的韧性研究，构建了出行韧性理论及评价方法。出行韧性理论基于交通供给端和需求端的动态耦合过程，创新数学模型并构建微积分方法判断关键拐点的识别条件。出行韧性的测度关键为交通供给变化、交通需求恢复时长、交通需求变化幅度。出行韧性的测度模型既适用于连续观测、复杂波动的情景，也适用于依据拐点的韧性三角形测度。出行韧性理论研究可以有效利用多源大数据，从供给与需求的动态交互过程测度后疫情时代居民出行的时空动态特征及变化规律，能够广泛运用到多种多样的定量研究，并为多学科的韧性研究提供理论基础和技术支持。基于本文的出行韧性研究案例，发现居民出行韧性时间维度上显现三阶段特征，且三阶段的时序波动特征由群体社会经济属性不同产生分异；出行韧性在城市空间上呈现空间异质性，与空间单元的功能属性高度相关。整体来说，在居民社会经济活动中越重要的地点，居民的出行韧性越强。

中国迈向高质量现代化发展阶段，韧性研究将为不同领域提供科学支撑。未来韧性研究应进一步融入地理学基础理论，在多尺度、多角度的韧性研究中提供丰富的理论方法。聚焦出行韧性方向，新的研究可以关注：① 运用回溯方法和模拟模型比较扰动之后的交通供需新平衡与扰动之前的供需平衡的时空差异，进一步探讨交通系统对于新平衡的响应机制；② 出行韧性的时空特征与精细尺度交通拥堵和碳排放的关联；③ 不同交通方式出行韧性的相互耦合机制，如公共交通与私家车出行韧性的相互影响；④ 不同地点或不同目的出行韧性的时空约束机制；⑤ 居民出行韧性对于城市空间结构变化的影响。

致谢: 真诚感谢匿名评审专家对本文提出的修改意见,使本文获益匪浅;并且感谢硕士生范文颖为案例研究做的基础数据分析。

参考文献(References)

- [1] Yang Xiuping, Wang Like, Li Yabing, et al. Review and prospects of resilient city theory. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, 37(6): 78-84. [杨秀平, 王里克, 李亚兵, 等. 韧性城市研究综述与展望. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(6): 78-84.]
- [2] Sun Yang, Zhang Luocheng, Yao Shimou. Evaluating resilience of prefecture cities in the Yangtze River Delta region from a socio-ecological perspective. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(8): 151-158. [孙阳, 张落成, 姚士谋. 基于社会生态系统视角的长三角地级城市韧性度评价. *中国人口资源与环境*, 2017, 27(8): 151-158.]
- [3] Li Yuheng, Huang Huiqian, Song Chuanyao. Rural economic resilience in poor areas and its enlightenment: case study of Yangyuan county, Hebei province. *Progress in Geography*, 2021, 40(11): 1839-1846. [李玉恒, 黄惠倩, 宋传彦. 贫困地区乡村经济韧性研究及其启示: 以河北省阳原县为例. *地理科学进展*, 2021, 40(11): 1839-1846.]
- [4] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23. DOI: 10.1146/annurev.es.04.110173.000245.
- [5] Zhou Yanju, Qiu Wanhua, Wang Zongrun. A review on supply chain risk management. *Systems Engineering*, 2006, 24(3): 1-7. [周艳菊, 邱莞华, 王宗润. 供应链风险管理研究进展的综述与分析. *系统工程*, 2006, 24(3): 1-7.]
- [6] Song Shuang, Wang Shuai, Fu Bojie, et al. Study on adaptive governance of social-ecological system: Progress and prospect. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2401-2410. [宋爽, 王帅, 傅伯杰, 等. 社会—生态系统适应性治理研究进展与展望. *地理学报*, 2019, 74(11): 2401-2410.]
- [7] Wu Hao, Jiang Zhimeng, Lin Anqi, et al. Analyzing spatial characteristics of urban resource and environment carrying capacity based on Covert-Resilient-Overt: A case study of Wuhan city. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(10): 2439-2457. [吴浩, 江志猛, 林安琪, 等. 基于隐性—韧性—显性的武汉城市资源环境承载力空间特征. *地理学报*, 2021, 76(10): 2439-2457.]
- [8] Chen Y, Wang J E, Jin F J. Robustness of China's air transport network from 1975 to 2017. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2020, 539: 122876. DOI: 10.1016/j.physa.2019.122876.
- [9] Wang Shaojian, Cui Zitian, Lin Jingjie, et al. The coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(4): 973-991. [王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究. *地理学报*, 2021, 76(4): 973-991.]
- [10] Xiu Chunliang, Wei Ye, Wang Qi. Evaluation of urban resilience of Dalian city based on the perspective of "Size-Density-Morphology". *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(12): 2315-2328. [修春亮, 魏冶, 王琦. 基于“规模—密度—形态”的大连市城市韧性评估. *地理学报*, 2018, 73(12): 2315-2328.]
- [11] Zhou Kan, Liu Baoyin, Fan Jie. Economic resilience and recovery efficiency in the severely affected area of Ms 8.0 Wenchuan earthquake. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(10): 2078-2091. [周侃, 刘宝印, 樊杰. 汶川 Ms 8.0 地震极重灾区的经济韧性测度及恢复效率. *地理学报*, 2019, 74(10): 2078-2091.]
- [12] Wang Wenyu, Ren Zhuoran, Li Wei, et al. Trade barriers, market related variety and export resilience of cities. *Geographical Research*, 2021, 40(12): 3287-3301. [王文宇, 任卓然, 李伟, 等. 贸易壁垒、市场相关多样化与城市出口韧性. *地理研究*, 2021, 40(12): 3287-3301.]
- [13] Zong Huiming, Zhang Jiamin, Liu Huimin. Spatial pattern and influencing factors of China's foreign trade resilience under the COVID-19 pandemic. *Geographical Research*, 2021, 40(12): 3349-3363. [宗会明, 张嘉敏, 刘绘敏. COVID-19 疫情冲击下的中国对外贸易韧性格局及影响因素. *地理研究*, 2021, 40(12): 3349-3363.]
- [14] Yu Guojun, He Canfei, Zhu Shengjun. Industrial cluster resilience: Technological innovation, relational governance, and market diversification. *Geographical Research*, 2020, 39(6): 1343-1356. [俞国军, 贺灿飞, 朱晟君. 产业集群韧性: 技术创新、关系治理与市场多元化. *地理研究*, 2020, 39(6): 1343-1356.]
- [15] Sun Jiuwen, Sun Xiangyu. Research progress of regional economic resilience and exploration of its application in China. *Economic Geography*, 2017, 37(10): 1-9. [孙久文, 孙翔宇. 区域经济韧性研究进展和在中国应用的探索. *经济地理*, 2017, 37(10): 1-9.]
- [16] Tan Juntao, Zhao Hongbo, Liu Wenxin, et al. Regional economic resilience and influential mechanism during economic crises in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(2): 173-181. [谭俊涛, 赵宏波, 刘文新, 等. 中国区域经济韧性特征与影响因素分析. *地理科学*, 2020, 40(2): 173-181.]
- [17] Chen Mengyuan. An international literature review of regional economic resilience: Theories and practices based on the evolutionary perspective. *Progress in Geography*, 2017, 36(11): 1435-1444. [陈梦远. 国际区域经济韧性研究进展: 基于演化论的理论分析框架介绍. *地理科学进展*, 2017, 36(11): 1435-1444.]

- [18] Hu Xiaohui, Dong Ke, Yang Yu. An analytical framework on regional economic resilience from the perspective of evolutionary strategic coupling. *Geographical Research*, 2021, 40(12): 3272-3286. [胡晓辉, 董柯, 杨宇. 战略耦合演化视角下的区域经济韧性分析框架. *地理研究*, 2021, 40(12): 3272-3286.]
- [19] Huang Xiaojun, Huang Xin. Resilient city and its planning framework. *City Planning Review*, 2015, 39(2): 50-56. [黄晓军, 黄馨. 弹性城市及其规划框架初探. *城市规划*, 2015, 39(2): 50-56.]
- [20] Qian Shaohua, Xu Guoqiang, Shen Yang, et al. An exploration about the path toward a resilient city for Shanghai. *Urban Planning Forum*, 2017(S1): 109-118. [钱少华, 徐国强, 沈阳, 等. 关于上海建设韧性城市的路径探索. *城市规划学刊*, 2017(S1): 109-118.]
- [21] Wang Hui, Ren Yilu, Lu Siqi, et al. Urban resilience under the guidance of ecological wisdom to deal with the threat and occurrence of flood disasters. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 4958-4960. [汪辉, 任懿璐, 卢思琪, 等. 以生态智慧引导下的城市韧性应对洪涝灾害的威胁与发生. *生态学报*, 2016, 36(16): 4958-4960.]
- [22] Sun Honghu, Zhen Feng. Evaluation of urban haze disaster resilience from the perspective of residents' activity: A case study of the main urban area of Nanjing city. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(5): 788-796. [孙鸿鹄, 甄峰. 居民活动视角的城市雾霾灾害韧性评估: 以南京市主城区为例. *地理科学*, 2019, 39(5): 788-796.]
- [23] Wei Ye, Xiu Chunliang. Study on the concept and analytical framework of city network resilience. *Progress in Geography*, 2020, 39(3): 488-502. [魏冶, 修春亮. 城市网络韧性的概念与分析框架探析. *地理科学进展*, 2020, 39(3): 488-502.]
- [24] Wei Shimei, Pan Jinghu. Network structure resilience of cities at the prefecture level and above in China. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(6): 1394-1407. [魏石梅, 潘竞虎. 中国地级及以上城市网络结构韧性测度. *地理学报*, 2021, 76(6): 1394-1407.]
- [25] Bonanno G A, Loss, trauma, and human resilience: Have we underestimated the human capacity to thrive after extremely aversive events? *The American Psychologist*. 2004, 59(1): 20-28.
- [26] Masten A S, Burt K B, Roisman G I, et al. Resources and resilience in the transition to adulthood: Continuity and change. *Development and Psychopathology*. 2004, 16(4): 1071-1094.
- [27] Olsson L, Jerneck A, Thoren H, et al. Why resilience is unappealing to social science: Theoretical and empirical investigations of the scientific use of resilience. *Science Advances*, 2015, 1(4): e1400217. DOI: 10.1126/sciadv.1400217.
- [28] Perrings C. Resilience and sustainable development. *Environment and Development Economics*, 2006, 11(4): 417-427.
- [29] Cai Jianming, Guo Hua, Wang Degen. Review on the resilient city research overseas. *Progress in Geography*, 2012, 31(10): 1245-1255. [蔡建明, 郭华, 汪德根. 国外弹性城市研究述评. *地理科学进展*, 2012, 31(10): 1245-1255.]
- [30] Jha A K, Miner T W, Stanton-Geddes Z. *Building Urban Resilience: Principles, Tools, and Practice*. Washington: World Bank Publications, 2013.
- [31] Li Tongyue, Niu Pinyi, Gu Chaolin. A review on research frameworks of resilient city. *Urban Planning Forum*, 2014(5): 23-31. [李彤玥, 牛品一, 顾朝林. 弹性城市研究框架综述. *城市规划学刊*, 2014(5): 23-31.]
- [32] Chester M, Underwood B S, Allenby B, et al. Infrastructure resilience to navigate increasingly uncertain and complex conditions in the Anthropocene. *NPJ Urban Sustainability*, 2021, 1: 4. DOI: 10.1038/s42949-021-00016-y.
- [33] Bešinović N. Resilience in railway transport systems: A literature review and research agenda. *Transport Reviews*. 2020, 40(4): 457-478.
- [34] Persson J, Parie J F, Feuerriegel S. Monitoring the COVID-19 epidemic with nationwide telecommunication data. *PNAS*, 2021, 118(26): e2100664118. DOI: 10.1073/pnas.2100664118.
- [35] Zhang J Y. People's responses to the COVID-19 pandemic during its early stages and factors affecting those responses. *Humanities and Social Sciences Communications*, 2021, 8: 37. DOI: 10.1057/s41599-021-00720-1.
- [36] Mokhtarian P L, Salomon I, Singer M E. What moves us? An interdisciplinary exploration of reasons for traveling. *Transport Reviews*, 2015, 35(3): 250-274.
- [37] Schwanen, T. ESCAP75: Enhancing the resilience of urban transport in asian cities after COVID-19: Synthesis of academic study results and general recommendations, 2021. [Enhancing_the_Resilience_of_Urban_Transport_0.pdf \(unescape.org\)](#).
- [38] Hayes S, Desha C, Burke M, et al. Leveraging socio-ecological resilience theory to build climate resilience in transport infrastructure. *Transport Reviews*, 2019, 39(5): 677-699.
- [39] Davoudi S, Brooks E, Mehmood A. Evolutionary resilience and strategies for climate adaptation. *Planning Practice and Research*, 2013, 28(3): 307-322.
- [40] Bevilacqua M, Ciarapica F E, Marcucci G. Supply chain resilience triangle: The study and development of a framework. *International Journal of Economics and Management Engineering*, 2017, 11(8): 2046-2053.
- [41] Huang J, Levinson D, Wang J E, et al. Tracking job and housing dynamics with smartcard data. *PNAS*, 2018, 115(50):

12710-12715.

- [42] Zhang J Y. Transport policymaking that accounts for COVID-19 and future public health threats: A PASS approach. *Transport Policy*, 2020, 99: 405-418.
- [43] Wang J E, Huang J, Yang H R, et al. Resilience and recovery of public transport use during COVID-19. *NPJ Urban Sustainability*, 2022, 2: 18. DOI: 10.1038/s42949-022-00061-1.
- [44] Ecoffet A, Huizinga J, Lehman J, et al. First return, then explore. *Nature*, 2021, 590(7847): 580-586.
- [45] Zhao Pengjun, Wan Jie. The key technologies of integrated urban transport- land use model: Theory base and development trends. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(1): 12-21. [赵鹏军, 万婕. 城市交通与土地利用一体化模型的理论基础与发展趋势. *地理科学*, 2020, 40(1): 12-21.]

Theory, method, and empirical studies of travel behavior resilience

HUANG Jie¹, WANG Jiaoe^{1,2}

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Resilience study has long been a focal point in various fields of geography, social science, urban studies, and psychology. Recently, resilience study from multiple disciplines has scrutinized at individual scale. As an important behavior in daily life of human beings, travel behavior is of spatial dependence, spatio-temporal dynamics, and individual heterogeneity. Moreover, how to understand interaction between travel behavior (demand) and traffic supply and their dynamics is a fundamental question in transport studies when transport systems encounter unexpected disturbance. Based on fundamental theories from multiple disciplines including ecology, traffic engineering, and psychology, this paper refines the definition of travel behavior resilience. Also, this paper proposes a conceptual theoretical framework of travel behavior resilience based on dynamic equilibrium characteristics of traffic supply and demand. In general, travel behavior presents three stages of variations, namely, dramatic reduction, rapid growth, and fluctuation recovery, which has been helpful to capture travel behavior resilience triangle. Then we construct a corresponding evaluation methodology, which is suitable for multi-scale and multi-dimensional perspectives. We emphasize that the evaluation of travel behavior resilience should be process-oriented with temporal continuity or capture inflection points of travel behavior. Using multi-source big data such as mobile phone signaling data and smart card data, this paper offers empirical studies on travel behavior resilience, and explores its spatial heterogeneity and group differences. With the location-based analysis, we confirm that people show the greater travel behavior resilience at places where people are engaged in various socio-economic activities. With the group-based analysis, we find that age, socio-economic attributes of mobility groups significantly affect travel behavior resilience. Overall, travel behavior resilience can be one pillar and also offer geographic perspectives to broaden resilience studies. In future, the study of travel behavior resilience on multiple scales and perspectives can explore spatial heterogeneity of traffic re-equilibrium, transport modal differences, and then contribute to urban spatial structure studies. Indeed, the study of travel behavior resilience can provide scientific and technological support for urban management and resilient city construction.

Keywords: resilience; residential travel; social groups; urban transportation; big data