

# 北京市六环内出行韧性空间分异 250-m 格网数据集研发 (2020)

范文颖<sup>1,2</sup>, 王姣娥<sup>1,2\*</sup>, 黄洁<sup>1,2</sup>

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:** 出行韧性反映了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, 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。出行韧性的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。作者根据2020年2月至9月的北京市手机信令数据, 以北京市六环以内为研究区域, 采用K-means聚类方法, 计算了北京市六环内出行韧性空间分异数据集(2020)。该数据集内容包括:(1)基于点的聚类因子和计算结果数据, 包括聚类点的编号(GID)、疫情扰动下出行恢复的速度(25rate)和幅度(29rate), 以及聚类的类型结果(Kmeans\_clu)。(2)出行韧性的核密度值。该数据集存储为.shp和.tif格式, 由47个数据文件组成, 数据量为5.32 MB(压缩为1个文件, 1.01 MB)。

**关键词:** 出行; 新冠疫情; 手机信令数据; 韧性; 聚类分析

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2023.04.07>

**CSTR:** <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2023.04.07>

**数据可用性声明:**

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2023.10.04.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2023.10.04.V1>.

## 1 前言

韧性是反映系统恢复力的关键属性, 自提出以来便被生态学、心理学、经济学、工程学等多个学科广泛讨论和使用<sup>[1-4]</sup>。在地理学相关研究中, 韧性概念被用于分析地区防灾减灾备灾的动态适应能力<sup>[5,6]</sup>, 贸易网络在金融危机、经济衰退等负向扰动发生时的自适应过程<sup>[7-9]</sup>, 地区经济在外部冲击下的恢复、转型和更新<sup>[10-13]</sup>, 以及城市系统的动态平衡性和抗干扰能力<sup>[14-18]</sup>等。整体看来, 韧性是系统可持续发展的重要指征, 代表着复杂系统适应扰动并维持功能的能力, 具有动态性和阶段性。

收稿日期: 2023-09-01; 修订日期: 2023-12-10; 出版日期: 2023-12-24

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

\*通讯作者: 王姣娥 AAD-5237-2020, 中国科学院地理科学与资源研究所, wangje@igsrr.ac.cn

数据引用方式: [1] 范文颖, 黄洁, 王姣娥. 北京市六环内出行韧性空间分异 250-m 格网数据集研发(2020)[J]. 全球变化数据学报, 2023, 7(4): 391-398. <https://doi.org/10.3974/geodp.2023.04.07>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2023.04.07>.  
[2] 范文颖, 黄洁, 王姣娥. 北京市六环内出行韧性空间分异数据集(2020)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2023. <https://doi.org/10.3974/geodb.2023.10.04.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2023.10.04.V1>.

韧性概念在交通系统中的应用，有助于深入理解交通网络的鲁棒性和可靠性，推动交通体系的现代化与高质量发展。然而，现有对交通韧性的研究以基础设施供给网络的韧性为主<sup>[19-22]</sup>，缺乏对交通需求韧性的讨论，即居民出行在经历扰动时的恢复与适应过程。因此，本文利用连续 8 个月的手机信令数据，对新冠疫情初期北京市六环内的居民出行变化过程进行分析，通过构建出行韧性的概念内涵，提出测度方法，并结合疫情扰动情况，总结了北京市出行韧性格局与四类韧性模式。本文对出行韧性的测度有助于丰富韧性研究内涵，从需求端补充交通韧性理论，进而为交通系统可持续发展提供参考。

2 数据集元数据简介

《北京市六环内出行韧性空间分异数据集（2020）》<sup>[23]</sup>的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《北京市六环内出行韧性空间分异数据集（2020）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	北京市六环内出行韧性空间分异数据集（2020）
数据集短名	TravelResilienceBeijing2020
作者信息	范文颖 JFJ-3237-2023, 中国科学院地理科学与资源研究所, fanwenying21@mailsucas.ac.cn 王姣娥 AAD-5237-2020, 中国科学院地理科学与资源研究所, wangjie@igsrr.ac.cn 黄洁 CVH-4108-2022, 中国科学院地理科学与资源研究所, huangjie@igsrr.ac.cn
地理区域	中国北京市（六环内）
数据年代	2020 年
时间分辨率	月
空间分辨率	250 m × 250 m
数据格式	.shp、.tif
数据量	1.01 MB（压缩后）
数据集组成	出行韧性格局 250-m 网格矢量数据
基金项目	国家自然科学基金（42121001）；中国科学院青年创新促进会（2021049）
数据计算环境	ArcGIS 10.6、matlab（2020 a）
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[24]</sup>
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

3 数据研发方法

本数据集精度为 250 m × 250 m 网格，覆盖北京市六环内区域，所采用的数据包括：

- (1) 基于联通手机信令数据的格网间出行人数来源于智慧足迹公司<sup>1</sup>;
- (2) 北京市六环边界数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心<sup>2</sup>。

### 3.1 算法原理

在无监督学习的算法中, K-均值聚类应用场景广泛、算法相对成熟且可操作性强, 另外 K-均值聚类支持对聚类结果的类别数量的指定, 因此本文选择该算法对出行韧性区进行无监督分类。

K-均值聚类算法是在最小化误差函数的基础上, 将数据划分为预定的簇数  $k$ , 并采用距离作为相似程度的判断指标, 认为两个对象的距离越近, 其相似度越大。这里的“距离”并非对象在实体空间的距离, 而是数据点在坐标空间的距离, 其实际含义由数据内容确定。

K-均值聚类算法的主要过程如下:

- (1) 从  $n$  个样本数据中随机选取  $k$  个对象作为初始的聚类中心;
- (2) 分别计算每个样本到各个聚类中心的距离, 将对象分配到距离最近的簇中;
- (3) 所有对象分配完成后, 重新计算  $k$  个簇的中心;
- (4) 与前一次计算得到的  $k$  个簇的中心比较, 如果任何一个簇的聚类中心发生变化, 转至步骤 (2), 否则转至步骤 (5);
- (5) 算法终止并输出聚类结果。

执行 K-均值聚类算法的核心, 是给定数据集  $D = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ , 针对聚类所得簇划分  $\{E_l | l=1, 2, \dots, k\}$  最小化误差的平方和 SSE。SSE 计算公式为:

$$SSE = \sum_{l=1}^k \sum_{x \in E_l} dist(\mu_l, x)^2 \quad (1)$$

式中,  $k$  为聚类簇的个数;  $E_l$  为第  $l$  个簇;  $x$  为样本;  $\mu_l$  为簇  $E_l$  的聚类中心。

### 3.2 技术路线

本数据集研发技术路线示于图 1, 主要步骤如下:

- (1) 收集北京市行政边界和环线边界数据;
- (2) 对手机信令数据进行清洗, 删除六环以外的出行, 构建六环内的出行 OD 矩阵;
- (3) 计算出行恢复指标, 包括“恢复速度”和“变化幅度”, 在 matlab 中进行。

具体地, “恢复速度”按下式计算:

$$Sp_{ij} = \sum_{k=i}^{j-1} \frac{P_{k+1} - P_k}{P_{k+1}} / (j-i) \quad (2)$$

式中,  $Sp_{ij}$  表示从  $i$  月份至  $j$  月份间出行量的平均恢复速度,  $P_k$  表示  $k$  月份的出行总量。

“变化幅度”按下式计算:

<sup>1</sup> 智慧足迹公司. <http://www.smartsteps.com/>.

<sup>2</sup> 中国科学院资源环境科学与数据中心. <https://www.resdc.cn/>.

$$Sc_{ttl} = \frac{P_s - P_0}{P_s}$$

(3)

式中， $Sc_{ttl}$  表示从扰动初始至整体稳定时期出行量的总体变化程度， $P_s$  表示整体稳定月份的出行总量， $P_0$  表示扰动初始月份的出行总量。

- (4) 利用出行恢复指标对网格进行 K-means 聚类，得到出行韧性空间分异数据。
- (5) 对聚类结果进行核密度分析，以识别出行韧性空间格局。

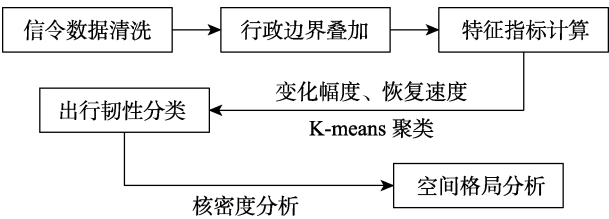


图 1 数据集研发技术路线图

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

《北京市六环内出行韧性空间分异数据集（2020）》包括 47 个数据文件：（1）四类韧性空间分布，以点要素格式存储（.shp）；（2）核密度分析结果，以.tif 格式存储。其中属性表中包括以下内容：（1）每个 250-m 格网的唯一标识 ID（字段名为 GID）；（2）疫情扰动下出行恢复的“恢复速度”（25rate）和“变化幅度”（29rate）；（3）出行韧性空间格局，即格网的聚类结果，共分四类，以数字 0–3 表示，数字大小无意义，仅用于区分类别（字段名为 kmeans\_clu）。栅格文件的值代表该聚类类型中的核密度值，共四个聚类类型，即 4 个栅格文件。

4.2 数据结果

基于 2020 年 2 月至 9 月的手机信令数据，六环内出行总量最少时有 433.9 万人次（2 月份），最多时达 2,000.8 万人次（9 月份），平均出行距离则在 7.74 km 到 8.49 km 间波动，距离分布不受出行量的影响。根据出行量总体变化幅度和恢复速度，将北京市出行韧性分为四个类型：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。数据集结果显示，第三类空间占比最大，达 36.1%，第一类最小，仅有 9.6%。

表 2 四类出行韧性空间占比

出行韧性类型	数据标签	出行量变化	恢复速度	占比（%）
一类	0	小	慢	9.6
二类	1	小	快	19.8
三类	2	大	慢	36.1
四类	3	大	快	34.5

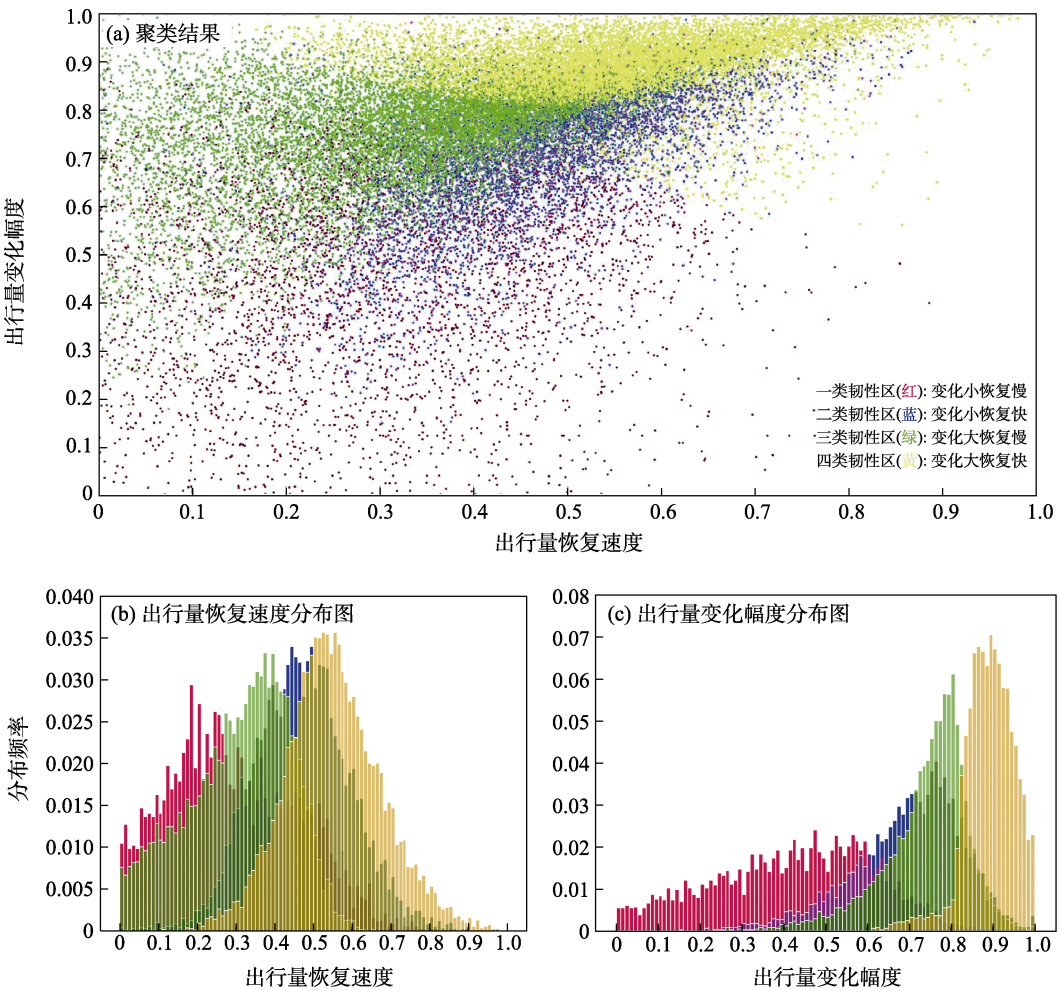


图 2 出行韧性聚类结果

将四类韧性区的空间分布表示在北京市环线地图上，并对韧性区进行核密度分析，能直观看到四类韧性区的空间分布差异及基本特征（图 2）<sup>[25]</sup>。（1）变化小恢复慢的一类韧性区，在五环至六环之间的南部和东部有局部聚集，多为公园绿地。（2）变化小恢复快的二类韧性区，主要在五环至六环之间的东部聚集，聚集地多为居住社区，且周边学校、商场、写字楼等配套用地丰富。（3）变化大恢复慢的三类韧性区，集中在四环以内，且沿放射状交通线向外延伸，此外首都国际机场附近也被划为三类韧性区。（4）变化大恢复快的四类韧性区多在大型的就业中心周边聚集，如中关村、上地、CBD 等地，与城市中心的距离并不影响该区的分布。

韧性区的组合模式在空间上的特征。四环内，以岳各庄桥——四元桥连线为界，北部以三类韧性区（变化大恢复慢）和四类韧性区（变化大恢复快）为主，南部表现为三类韧性区（变化大恢复慢）、四类韧性区（变化大恢复快）和二类韧性区（变化小恢复快）混合且二类韧性区（变化小恢复快）有局部集中，集中地区有较多公园绿地。通州地区以二类

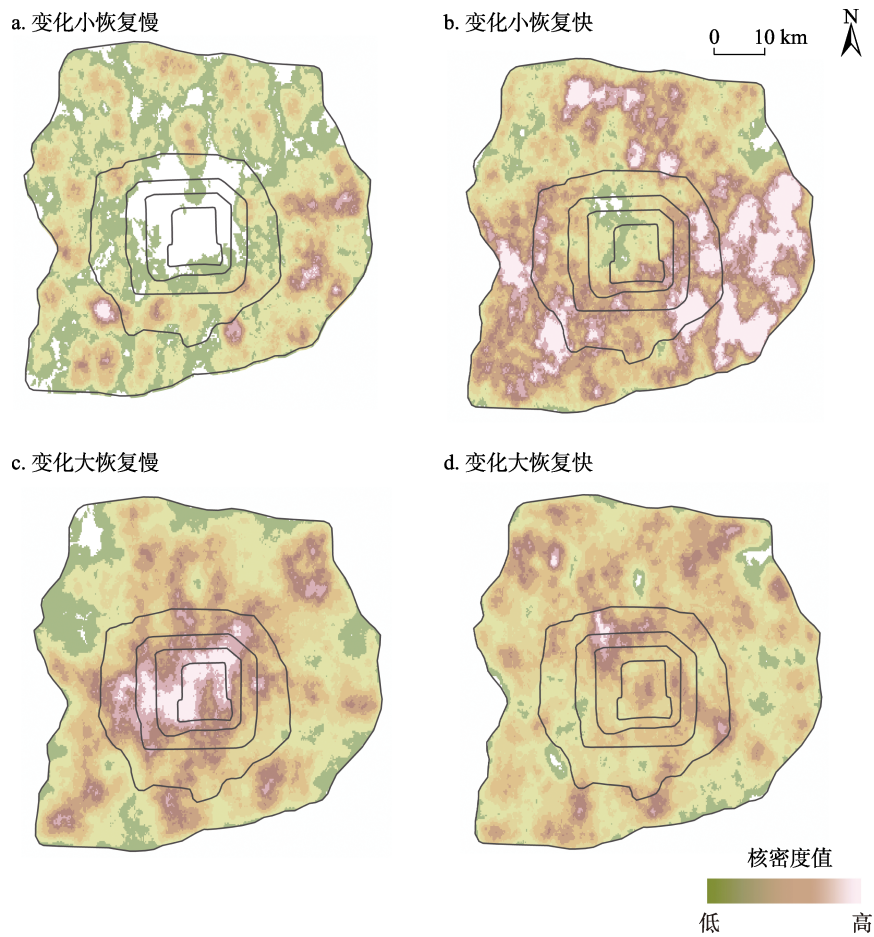


图 3 北京市出行韧性空间分异的核密度分析结果对比图

韧性区（变化小恢复快）和三类韧性区（变化大恢复慢）为主，四类韧性区（变化大恢复快）极少。在南部制造工厂集中的地方，四类韧性区（变化大恢复快）伴随二类韧性区（变化小恢复快）分布，而在北部信息产业集中的地区，四类韧性区（变化大恢复快）伴随三类韧性区（变化大恢复慢）分布。一类韧性区（变化小恢复慢）多与二类韧性区（变化小恢复快）相邻，主要分布在五环至六环之间。

5 讨论和总结

本文提出了一种出行韧性的测度方法，并基于连续 8 个月的手机信令数据，计算了北京市出行韧性特征指标，结合无监督机器学习和核密度法，分析了出行韧性的空间格局，为出行韧性相关研究提供了思路和参考。

进一步，根据出行韧性空间分布特征与差异，讨论四类韧性区的实际含义。（1）一类韧性区（变化小恢复慢）主要在四环以外，出行量相对较少，突发事件发生后，这类区域出行量总体变化不大，即人在空间中的活动受影响较小，但被影响的部分却恢复缓慢，人与空间的关系稳定却不紧密，包含的用地功能在居民生活中重要性不高，且功能的辐射范

围有限。(2) 二类韧性区(变化小恢复快)在东部和南部分布较多,四环内明显少于四环以外,多为出行量较少的区域,这类韧性区功能稳定,受突发事件影响较小,人与空间的关系稳定且紧密,居民生活依赖物理空间。(3) 三类韧性区(变化大恢复慢)在四环内集中,且沿放射状交通线路向外延伸,和九月份高出行量的分布特征相似,这类韧性区在突发事件中受到显著影响,并需要更长时间到达新的稳定状态,因此能够直接反映城市的整体恢复情况,是城市管理中需要重点监测的对象。(4) 四类韧性区(变化大恢复快)在北五环至北三环之间、东四环至东五环之间以及五环以外都有局部集中,其中分布有研究机构和配套居住区、各类批发市场和制造工厂,这类韧性区易接受集中管理,表现为变化幅度较大但能够快速恢复,其恢复速度的差异取决于管理者决策。

本文对韧性区的划分是以恢复速度和变化幅度为指标进行聚类的结果。无监督机器学习方法并不需要提前设定韧性的具体数值,因此对于韧性区划分结果的解释可以有多种角度,需要结合城市具体情况分析。然而其中也存在共性,即韧性区反映了城市中人与空间的联系模式,不同韧性区代表了不同的联系模式,这为理解城市提供了新的视角。

**作者分工:** 范文颖对数据集的开发做了总体设计,处理了手机信令数据,设计了算法模型,并撰写了数据论文初稿;王姣娥审核、指导了数据处理和论文写作;黄洁指导了方案设计,并审核、指导、修改与完善了数据论文。

**利益冲突声明:** 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

## 参考文献

- [1] Holling, C. S. Resilience and stability of ecological systems [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1–23.
- [2] Bonanno, G. A. Loss, trauma, and human resilience: have we underestimated the human capacity to thrive after extremely aversive events? [J]. *The American Psychologist*, 2004, 59(1): 20–28.
- [3] 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 [J]. *Science Advances*, 2015, 1(4): e1400217.
- [4] Perrings, C. Resilience and sustainable development [J]. *Environment and Development Economics*, 2006, 11(4): 417–427.
- [5] 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[J]. *地理学报*, 2019, 74(10): 2078–2091.
- [6] 魏石梅, 潘竞虎. 中国地级及以上城市网络结构韧性测度[J]. *地理学报*, 2021, 76(6): 1394–1407.
- [7] 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[J]. *地理研究*, 2021, 40(12): 3287–3301.
- [8] 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[J]. *地理研究*, 2021, 40(12): 3349–3363.
- [9] 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[J]. *地理研究*, 2020, 39(6): 1343–1356.
- [10] 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[J]. *经济地理*, 2017, 37(10): 1–9.
- [11] 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[J]. *地理科学*, 2020, 40(2):

- 173–181.
- [12] 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[J]. 地理科学进展, 2017, 36(11):1435–1444.
- [13] 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[J]. 地理研究, 2021, 40(12): 3272–3286.
- [14] 杨秀平, 王里克, 李亚兵等. 韧性城市研究综述与展望[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(6): 78–84.
- [15] 黄晓军, 黄馨. 弹性城市及其规划框架初探[J]. 城市规划, 2015, 39(2): 50–56.
- [16] 钱少华, 徐国强, 沈阳等. 关于上海建设韧性城市的路径探索[J]. 城市规划学刊, 2017(S1): 109–118.
- [17] 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[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 4958–4960.
- [18] 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[J]. 地理科学, 2019, 39(5): 788–796.
- [19] Chen, Y., Wang, J. E., Jin, F. J. Robustness of China's air transport network from 1975 to 2017 [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2020, 539: 122876.
- [20] Chester, M., Underwood, B. S., Allenby, B., *et al.* Infrastructure resilience to navigate increasingly uncertain and complex conditions in the Anthropocene [J]. *NPJ Urban Sustainability*, 2021, 1: 4.
- [21] Hayes, S., Desha, C., Burke, M., *et al.* Leveraging socio-ecological resilience theory to build climate resilience in transport infrastructure [J]. *Transport Reviews*, 2019, 39(5): 677–699.
- [22] Davoudi, S., Brooks, E., Mehmood, A. Evolutionary resilience and strategies for climate adaptation [J]. *Planning Practice and Research*, 2013, 28(3): 307–322.
- [23] 范文颖, 王姣娥, 黄洁. 北京市六环内出行韧性空间分异数据集 (2020) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2023. <https://doi.org/10.3974/geodb.2023.10.04.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2023.10.04.V1>.
- [24] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [25] 黄洁, 王姣娥. 出行韧性的理论与方法及实证[J]. 地理学报, 2023, 78(10): 2507–2519.