引文格式：潘晓,克亚琳,徐金硕. 基于时空莫兰指数的石家庄二环路交通时空状态分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(5): 76-79. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.05.016

基于时空莫兰指数的石家庄二环路交通时空状态分析

潘　晓[1,2,3]，克亚琳[1]，徐金硕[1]
（1. 石家庄铁道大学，河北 石家庄 050043；2. 石家庄市人工智能重点实验室，河北 石家庄 050043；
3. 河北省电磁环境效应与信息处理重点实验室，河北 石家庄 050043）

摘　要：截至2022年底，石家庄汽车保有量超过300万辆，城市道路交通问题日益凸显。以石家庄二环路为例，利用时空莫兰指数分析了其交通状态的时空自相关特征。结果表明，石家庄二环路的道路交通状态整体呈时空聚集特征，但早高峰易出现时空异质特征；拥堵聚集特征在白天更明显；槐安路—东二环在缓解该路口西南方向通行和过境通行的道路交通压力方面具有一定作用。研究结果可为石家庄交通管制和交通拥堵治理提供理论参考。

关键词：莫兰指数；交通状态；时空自相关
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）05-0076-04

Spatio-temporal Analysis of Shijiazhuang Second Ring Road Traffic State Based on Spatio-temporal Moran's I

PAN Xiao[1,2,3], KE Yalin[1], XU Jinshuo[1]
(1. Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Shijiazhuang Key Laboratory for Artificial Intelligence, Shijiazhuang 050043, China;
3. Hebei Key Laboratory for Electromagnetic Environmental Effects and Information Processing, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: By the end of 2022, the number of cars has exceeded 3 million in Shijiazhuang, which has led to increasingly prominent urban road traffic problems. Taking the Shijiazhuang Second Ring Road as an example, we applied the spatio-temporal Moran's I to analyze the spatio-temporal autocorrelation characteristics of road traffic status. The results indicate that the road traffic status of Shijiazhuang Second Ring Road exhibits spatio-temporal aggregation characteristics as a whole, however the early peak hours are prone to spatio-temporal heterogeneity. The congestion aggregation characteristics are more obvious during the day. The Huai'an Road-East Second Ring Road plays a certain role in alleviating road traffic pressure. This study can provide a theoretical reference for the travel characteristic analysis of residents and the treatment of road congestion in Shijiazhuang.

Key words: Moran's I, traffic state, spatio-temporal autocorrelation

随着城市化、机动化进程的不断加快，道路交通拥堵成为城市发展进程中的一个重要挑战[1-2]。据公安部统计，2022年全国机动车保有量达4.17亿辆，全国机动车驾驶人数量达5.02亿人。机动车的广泛使用在一定程度上导致了车辆运行效率低、城市道路拥堵等城市问题[3]。针对这些问题，已有学者[4-7]进行了大量研究。石家庄是河北省省会，是国务院批复确定的京津冀地区重要的中心城市之一。截至2021年底，全市公路通车总里程为19 458.94 km（不含辛集），路网密度达到了每百平方公里143.4 km；市区包含京石、石太、石黄高速公路，二环、三环环路，和平路、槐安路等重要交通道路。石家庄二环路是市区重要的城市环线，对缓解市中心交通运输压力和满足市民出行需求具有重要作用。石家庄道路交通处于中度拥堵状态，交通运行状态有待改善。从本质上认识重要道路交通状态的变化规律，对缓解城市中心道路拥堵情况具有重要作用[8]。因此，本文选取石家庄二环路的重要路口，分析其道路交通时空状态相关性特征。研究结果将为石家庄市交通管制和交通拥堵治理提供理论基础。

1　研究范围和数据来源

石家庄是省辖地级市，I型大城市；截至2021年，总面积为14 530 km^2。随着城市道路的不断建设，市内路网形成了“四横八纵和二环路”的格局。二环路

项目来源：国家自然科学基金资助项目（61303017）；河北省教育厅青年拔尖资助项目（BJ2021085）；河北省自然科学基金资助项目（F2024210042）；石家庄铁道大学研究生创新资助项目（YC2022035）；省级大学生创新创业训练计划资助项目（S202210107090）。
第一作者简介：潘晓（1981—），博士，副教授，研究方向为大数据管理与挖掘、移动计算，E-mail：smallpx@stdu.edu.cn。

是石家庄重要的城市环线，全长约42 km，初步建成时间为1996年，改造完成时间为2010年。根据路口连接道路级别，本文选取25个二环路与“四横八纵”主干道重要交叉口以及二环路上典型路口（图1）作为研究对象进行分析，包括贯穿市区的建华大街、谈固大街等主要交通干道环线路口。分析的数据包括路口名称、所在道路名称、经纬度、车辆通过数量等路口信息以及2020年4月4—8日的车流量数据。



图1　石家庄二环线与研究路口示意图

2　研究方法

空间自相关分析方法包括莫兰指数、Geary邻接比和冷热点分析等[9-10]。莫兰指数具有明确界限，包括全局和局部指标，可进行细粒度分析，因此本文利用莫兰指数进行路口交通时空状态自相关分析。交通状态随时间变化会产生波动，而传统莫兰指数无法反映时间特性，因此本文引入时间维[11]，定义增加时间维度的空间对象为时空对象，构建时空莫兰指数。利用路口在时空上的邻接关系构建邻接矩阵，将路口车流量作为交通状态属性，分别计算全局时空莫兰指数和局部时空莫兰指数，通过前者分析不同时段石家庄二环路口（以下简称时空路口）的整体相关性，再通过后者绘制莫兰散点图和散点分布图，分析时空路口的聚集和异质状态。

2.1　全局时空莫兰指数

定义 $y_{(p,i)}$、$y_{(q,j)}$ 为路口 p、q 在时段 i、j 上的属性值，即车流量，若路口 p、q 为相邻路口且时段 i、j 为相邻时段，则称 p、q 为时段 i、j 上的相邻时空路口。全局时空莫兰指数的计算公式[11-12]为：

$$I=\frac{N\times T\sum_{p=0}^{N}\sum_{i=0}^{T}\sum_{q=0}^{N}\sum_{j=0}^{T}w_{(p,i)(q,j)}\left(y_{(p,i)}-\bar{y}\right)\left(y_{(q,j)}-\bar{y}\right)}{\sum_{p=0}^{N}\sum_{i=0}^{T}\left(y_{(p,i)}-\bar{y}\right)^{2}\times\sum_{p=0}^{N}\sum_{i=0}^{T}\sum_{q=0}^{N}\sum_{j=0}^{T}w_{(p,i)(q,j)}} \tag{1}$$

式中，N、T 为路口和时段数量；$w_{(p,i)(q,j)}$ 为路口 p、q 在时段 i、j 上的邻接关系，若两个路口为相邻时空路口，则 $w_{(p,i)(q,j)}=1$，否则为0；$\bar{y}$ 为所有时空路口 y 的平均值。

全局时空莫兰指数用于测度所有时空路口的平均自相关程度，取值范围为[−1,1]，$I>0$ 则表示两个时空路口的车流量在时空上具有正相关性，且数值越大相关性越强；$I<0$ 则表示具有负相关性，且数值越小相关性越强；$I=0$ 则表示呈随机分布。

2.2　局部时空莫兰指数

与全局关注平均自相关程度不同，局部时空莫兰指数用于分析特定时空路口 (p,i) 与其相邻时空路口 (q,j) y 属性值的自相关程度。定义 $I_{(p,i)}$ 为路口 p 时段 i 的局部时空莫兰指数，则具体计算公式[11,13]为：

$$I_{(p,i)}=Z_{(p,i)}W_{Z(p,i)} \tag{2}$$

$$W_{Z(p,i)}=\frac{\sum_{q=0}^{N}\sum_{j=0}^{T}w_{(p,i)(q,j)}Z_{(q,j)}}{\sum_{q=0}^{N}\sum_{j=0}^{T}w_{(p,i)(q,j)}} \tag{3}$$

$$Z_{(p,i)}=\frac{\left(y_{(p,i)}-\bar{y}\right)}{\sigma} \tag{4}$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{p=0}^{N}\sum_{j=0}^{T}\left(y_{(p,i)}-\bar{y}\right)^{2}}{N\times T-1}} \tag{5}$$

$I_{(p,i)}>0$ 表示时空路口与其相邻路口呈正相关，即呈现局部时空聚集特征；$I_{(p,i)}<0$ 则表示时空路口与其相邻时空路口呈负相关，即呈现局部时空异质特征；$I_{(p,i)}=0$ 表示相邻时空路口不相关。局部时空莫兰指数的绝对值越大，表示相关性越强。

莫兰散点图是衡量局部时空相关性的常用指标，能有效揭示时空对象或其属性值在局部区域的相关性是否显著[14]。本文中莫兰散点图的横坐标为时空路口标准化后的车流量，纵坐标为所有相邻时空路口标准化后车流量的加权值[11]，第一象限为HH聚集，即时空路口和相邻路口的车流量都高；第二象限为LH异质，时空路口低而相邻路口高；第三象限为LL聚集，即时空路口和相邻路口均较低；第四象限为HL异质，时空路口高而相邻路口低。其中第一、三象限表示时空路口为正相关，呈聚集特征；第二、四象限表示时空路口为负相关，呈异质特征。

3　路口时空相关性分析

3.1　全局时空莫兰指数结果分析

本文计算得到每天的全局时空莫兰指数，并统计连续5 d全局时空莫兰指数的变化情况，其中2020年4月4—5日为非工作日，2020年4月6—8日为工作

日。在研究时段内路口的全局时空莫兰指数均大于0.3，P值均小于0.01，说明在99%的置信度下，二环路道路交通状态整体呈时空聚集特征。环线构建的目的是连接城市中的不同区，形成快速通道。时空聚集特征说明环线上车流量相互影响程度较高，尤其是在工作日二环路的交通保护作用更显著。工作日的全局时空莫兰指数大于非工作日，说明居民工作日的出行需求比非工作日大，这是由于工作日有更多的通勤出行需求。

3.2 局部时空路口相关性结果分析

本文通过局部时空莫兰指数分析时空路口的聚集和异质特征及其明显程度；通过莫兰散点图分析HH和LL聚集特征、HL和LH异质特征。

1）局部时空莫兰指数结果分析。由于2020年4月7日的全局时空莫兰指数最大，因此本文以该日的道路交通车流量数据为例，计算局部时空莫兰指数，分析当日道路交通状态的局部自相关特征。结果见图2，可以看出，时空路口局部自相关特征呈现强异质、异质和聚集特征，除槐安路—东二环（10号）外，二环路在0：00—6：00的局部时空莫兰指数均大于0.76，说明二环路口在一定程度上呈时空局部聚集特征，由于石家庄市实行了一系列限行政策，微型、轻型载货汽车和专项作业车倾向于在凌晨通行，凌晨在二环路行驶的车辆较少，二环路将过境交通吸引到了环线上，呈现局部聚集的时空特征，起到了穿越截流的环线保护功能；除汇通路—南二环（16号）、塔通街—南二环（17号）和解放大街—南二环（18号）外，7：00—9：00的局部时空莫兰指数均小于0且平均值为–0.77，说明二环路口呈现时空异质特征，为方便广大市民在早晚高峰正常出行，限行政策规定在早晚高峰期间对外埠号牌机动车进行限行，而在工作日早高峰期间，市民出行大多是为满足通勤需求，因此易在特定路段产生拥堵，车流量易呈现HL或LH异质特征。特别的，10号路口在0：00—8：00呈现明显的时空异质特征，且车流量大于相邻路口。原因在于该路口具有环形匝道的道路性质、周围拥有较多的建

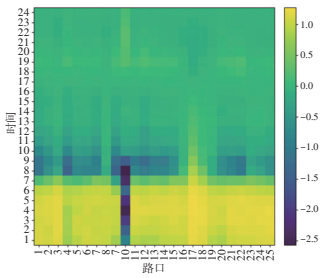
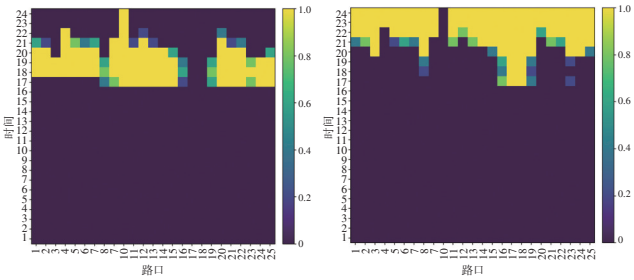


图2 局部时空莫兰指数热力图

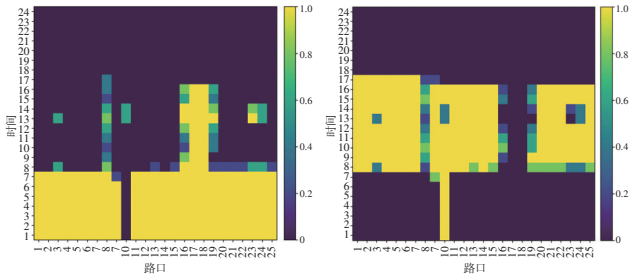
筑设施，作为市区东部交通的重要通道，在缓解西南方向通行和过境通行交通压力上具有一定作用，车流量易呈现HL异质特征。

2）莫兰散点分布图结果分析。本文计算得到2020年4月7日的局部时空莫兰指数，并绘制莫兰散点图，其中第二、四象限的区域为偏离全域的时空自相关区域，落在第二象限上的点较少，且全局莫兰指数大于0，说明时空路口的异质特征为非典型性。不同象限的分布情况见图3，可以看出，时空路口在0：00—7：00的LL聚集特征明显，在8：00—16：00的HL异质特征明显，在17：00—20：00的HH聚集特征明显，在21：00—24：00的LH异质特征明显；时空路口在凌晨和夜晚表现为交通量低值异质/聚集特征，而在其余时间表现为交通量高值异质/聚集特征，符合白天交通量大于晚上的客观规律。第一象限时空对象分布频率较高的时空域包括17：00—20：00的大部分路口（除17号路口和胜利大街—南二环）、16：00—17：00的和平路—东二环（9号）到建设大街—南二环（15号）以及工农路—西二环（20号）到天翼路—西二环（25号）、21：00—24：00的10号路口，其交通时空状态表现为HH聚集特征。17：00—20：00位于晚高峰时间附近，居民具有通勤、休闲等出行需求，因此整体交通量较高，呈现HH聚集特征。HH聚集易引起长时间交通拥堵，因此该时段应实时监测二环交通量和交通状态，避免发生严重拥堵。第二象限时空对象分布频率较高的时空域包括20：00—24：00的大部分路口（除10号路口）、16：00—20：00的16号路口到中华大街—南二环（19号）以及19：00—20：00的泰华街—北二环（3号）、谈固大街—北二环（8号）、新华路—西二环（23号）和合作路—西二环（24号），其交通时空状态表现为LH异质特征。20：00—24：00的道路交通量减少，但货车或专项作业车夜晚行驶，引起部分路口交通量增大，因此呈现LH异质特征。值得注意的是，17号和18号路口周围有石家庄高铁站，受高铁站影响，该路口以及周围的16号、19号路口呈现异质特征。对于20：00—24：00的LH异质路口，需要监测周围路口的交通状态，及时分流周围高流量路口，缓解周围路口交通压力。第三象限时空对象分布频率较高的时空域包括0：00—7：00的大部分路口（除10号路口），其交通时空状态表现为LL聚集特征，验证了局部时空莫兰指数分析的正确性。0：00—7：00的LL聚集路口由于其交通量小，且呈现低值聚集特征，引起交通拥堵概率极小，因此无需采

取预防措施。第四象限时空对象分布频率较高的时空域包括早高峰以及早晚高峰间的大部分路口（除17号、18号路口）、0：00—7：00的10号路口，其交通时空状态表现为HL异质特征，表明二环路交通HL异质特征主要分布在白天且时空特征表现为典型性。二环路主要负责分流进出市中心的交通和疏解市中心的内部交通。8：00—16：00的HL异质路口，交通量较大，易发生拥堵，应及时向周围的低流量路口进行交通分流。



a 第一象限分布　　b 第二象限分布



c 第三象限分布　　d 第四象限分布

图3　各象限莫兰散点图

根据路口莫兰指数时间变化，从整体上将路口分为高流量型、低流量型和混合型3类，其中10号路口为高流量型，在0：00—16：00表现为HL异质特征，在16：00—24：00表现为HH聚集特征，两个时段均为高流量；槐安路从西至东依次经过西三环、西二环、市区、东二环、新元高速和东三环，是连接市区内外的重要路线，因此交通量较大；17号、18号路口为低流量型，在0：00—16：00表现为LH异质特征，在16：00—24：00表现为LL聚集特征，两个时段均为低流量，这是由于路口位于石家庄站附近，主要服务于进出站人群，而受疫情影响，车站流量减少，导致车站周围交通量减少；其余路口为混合型路口，在0：00—7：00表现为LL聚集特征，在8：00—16：00表现为HL异质特征，在17：00—20：00表现为HH聚集特征，在21：00—24：00表现为LH异质特征。在0：00—7：00、21：00—24：00为低流量型路口，而在8：00—20：00为高流量型路口，是由于二环路为城市重要环线，对缓解市区交通具有关键作用，白天交通量较大，为高流量型路口，而在晚上居民出行减少，整体交通量减少，转为低流量路口。

4　结　语

从时空相关性出发，利用莫兰指数和莫兰散点图测度石家庄二环路的道路交通状态，结果表明：①二环路的道路交通状态整体呈时空聚集特征，且工作日的出行需求大于非工作日；②早高峰期间的局部时空莫兰指数均小于0且呈现较明显的时空异质特征，这与工作日早高峰居民的通勤需求有关，二环路上大部分路口在晚高峰期间的交通时空状态呈现聚集特征，这与石家庄实行的限行政策与疫情影响有关；③路口在0：00—7：00和16：00—20：00呈现时空聚集特征，在8：00—16：00和20：00—24：00呈现时空异质特征；④根据路口交通量大小，将路口分为高流量型、低流量型和混合型，其中10号为高流量型路口，17号、18号为低流量型路口；其余路口为混合型路口。

基于上述分析，对石家庄道路存在的问题提出以下建议：

1）针对车流量较大、具有时空聚集性的易拥堵路口，应加快周围道路规划建设，提高路网密度，优化路网结构，促进道路内部的微循环[15]；针对较拥堵的快速路路口，应及时对其出入口匝道进行调节，寻找可能的分流通道，均衡快速路和分流通道的流量分布[16]，实施交通疏导对策以缓解道路交通拥堵问题，提高城市交通效率。

2）针对具有明显时空异质性的路口，如早晚高峰易拥堵，平峰交通状态良好的路口，应实时监测交通状态，引导交通分流。根据各时段交通量，设计信号配时方案，如根据左转、直行和右转交通量，确定交通灯信号周期和绿灯时间，合理分配交通量，精细化交通管理；适当加长载货汽车、专项作业车在二环上的限行时间、早晚高峰限号，减少机动车出行数量或增加快速公交线路，鼓励市民绿色出行，促进轨道交通和道路交通的协调发展[17]。

3）完善交通监控系统，通过可视化管理实现对道路交通的动态调控，重点关注早晚高峰的道路拥堵情况，及时对高流量型路口和早晚高峰异质性和HH聚集性路口的机动车进行分流和疏导，缓解重要路口的交通压力。

参考文献

[1]　郭继孚，刘莹，余柳. 对中国大城市交通拥堵问题的认识[J]. 城市交通，2011，9(2)：8-14

[2]　彭海波，陈美华，陶珂，等. 城市交通多层网络社团结构探测[J]. 地理空间信息，2023，21(8)：1-4

（下转第89页）