

基于改进时空 Moran's I 指数的道路交通 状态特征分析*

陈绍宽[†] 韦伟 毛保华 关伟

(北京交通大学交通运输学院, 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044)

(2013年1月16日收到; 2013年3月24日收到修改稿)

定义时空对象代替空间对象作为基本研究单元, 改进传统 Moran's I 指数为时空 Moran's I 指数, 以便适于分析道路交通的时空特性; 通过 Moran 散点图给出时空自相关意义下的交通流时空状态特征分类: 拥堵聚集、畅通聚集、拥堵异质和畅通异质. 为说明改进时空 Moran's I 指数分析法的实际应用价值, 以北京市二环快速路外环方向的车流速度数据为例, 进行时空自相关指标计算, 并从全局与局部自相关两个方面分析时空自相关指标所反映的交通状态时空分布与演化规律.

关键词: 改进 Moran's I 指数, 交通状态, 时空自相关, 时空分布

PACS: 89.40.-a

DOI: 10.7498/aps.62.148901

1 引言

空间自相关是空间统计学的重要研究领域, 也是研究空间地理单元之间分布关联性的核心理论方法之一^[1]. Moran's I 指数由 Moran 于 1950 年首先提出^[1,2], 经过广大学者的努力^[3,4], 特别是 Anselin 提出空间局部自相关分析方法^[5] (包括局部 Moran's I 指数和 Moran 散点图), 使得 Moran's I 指数分析方法逐渐成熟, 目前已成为衡量空间自相关的一个最重要的测度^[1]. 近年来, 学科之间交叉和融合的趋势不断加强, 各领域的专家学者根据研究需要不断完善和丰富 Moran's I 指数的理论和实践, 对于 Moran's I 指数的应用研究已经渗透到经济学^[6,7]、环境学^[8,9]、生物学^[10,11]等众多领域, 其在交通事故空间特征分析上也得到一定应用^[12–14].

城市交通系统是一个复杂的巨系统, 由众多参与者、各种交通方式以及错综复杂的道路网组成, 各要素之间相互制约、相互作用, 因此分析城市交通系统运行机理异常困难. 现有的道路交通状态分

析的相关研究主要从复杂网络特征分析^[15]、交通仿真技术^[16]及动态预测分析^[17]等角度入手, 较好地刻画和描述了道路网络上的交通状态特征. 然而, 由于交通问题的复杂性, 这些研究多数基于假设的路网结构, 存在较多理想情况下的前提条件, 应用于实际交通网络时存在一定困难. 尽管实际中交通流状态特征复杂多变, 但其在时空演化方面存在一定规律, 主要表现为两个方面: 第一, 交通现象状态的时空分布具有聚集特性; 第二, 交通现象状态的时空演化过程具有连续性.

国内外学者应用 Moran's I 指数分析方法研究交通事故的空间分布特性^[12–14], 结果表明 Moran's I 指数对于交通事故点的识别与判断具有较好的效果. 但是, 对于一般的交通现象状态, 例如路网拥堵与畅通, 基于空间自相关方法的研究较少, 主要原因是道路交通状态的分布和演化是一种时空现象, 传统 Moran's I 指数分析法则适用于空间特征分析. 因此, 对空间分析方法进行时间维的拓展, 对于分析具有典型时空特性的道路交通状态特征十分必要.

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2011AA110303)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB725406)和国家自然科学基金(批准号: 71001006)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: shkchen@bjtu.edu.cn

本文以空间自相关理论为基础, 在传统 Moran's I 指数中引入时间维, 建立基于改进 Moran's I 指数的道路交通状态时空分析方法, 对交通状态的时空特征进行分类定义, 并以北京市二环快速路外环方向为例分析道路交通状态时空分布特性和演化规律.

2 时空 Moran's I 指数

空间自相关性是空间单元的某属性值与邻近空间单元的同一属性值相关联的特性. 对传统 Moran's I 指数分析中引入时间维, 定义某空间对象在某时刻的状态为时空对象. 对于空间编号为 p , 时间序号为 i 的时空对象, 记为 $ST_{(p,i)}$. 若两个时空对象在空间上具有邻接关系, 且在时间上位于相邻时段, 则认为两个时空对象相邻. 用时空邻接矩阵表示这种邻接关系, 两个时空对象 $ST_{(p,i)}$ 和 $ST_{(q,j)}$ 相邻时, 时空邻接矩阵中对应项 $w_{(p,i)(q,j)}$ 为 1, 否则为 0. 以时空对象代替空间对象为研究单元, 构造全局时空 Moran's I 指数、局部时空 Moran's I 指数和 Moran 散点图.

2.1 全局时空 Moran's I 指数

定义 $y_{(p,i)}$ 为时空对象 $ST_{(p,i)}$ 的某一属性值, 拓展全局空间 Moran's I 指数到时空领域, 则全局时空 Moran's I 指数计算公式如下:

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

其中, N, T 分别为空间序列和时间序列数目, $w_{(p,i)(q,j)}$ 为时空对象 $ST_{(p,i)}$ 和 $ST_{(q,j)}$ 之间的邻接关系; \bar{y} 为所有时空对象 y 属性值的平均值, 由(2)式计算:

$$\bar{y} = \frac{1}{NT} \sum_{p=0}^N \sum_{i=0}^T y_{(p,i)}. \quad (2)$$

全局时空 Moran's I 指数是全局时空自相关指标, 是对所有时空对象总体特性的测度, 取值范围为 $[-1, 1]$. 该指数大于 0 表示所有时空对象正相关, 越接近 1 则正相关性越大; 小于 0 表示负相关, 越接近 -1 则负相关性越大; 等于 0 表示不相关.

2.2 局部时空 Moran's I 指数和 Moran 散点图

时空自相关性因不同时空对象存在差异, 这种差异由局部时空自相关指标反映, 包括局部时空 Moran's I 指数和 Moran 散点图. 局部时空 Moran's I 指数由(3)式计算:

$$I_{(p,i)} = Z_{(p,i)} W z_{(p,i)}, \quad (3)$$

式中各符号意义同前

$$W z_{(p,i)} = \frac{\sum_{q=0}^N \sum_{j=0}^T w_{(p,i)(q,j)} Z_{(q,j)}}{\sum_{q=0}^N \sum_{j=0}^T w_{(p,i)(q,j)}}, \quad (4)$$

$$Z_{(p,i)} = \frac{(y_{(p,i)} - \bar{y})}{\sigma}, \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{p=0}^N \sum_{i=0}^T (y_{(p,i)} - \bar{y})^2}{NT - 1}}. \quad (6)$$

局部时空 Moran's I 指数的物理意义与全局时空 Moran's I 指数类似, 但取值不限于 $[-1, 1]$. $I_{(p,i)}$ 取正值时表示时空对象 $ST_{(p,i)}$ 与其相邻时空对象的属性值局部正相关, 绝对值越大局部正相关性越大; $I_{(p,i)}$ 取负值时表示与其相邻时空对象的属性值局部负相关, 绝对值越大局部负相关性越大; $I_{(p,i)}$ 取 0 时表示相邻对象时空不相关.

Moran 散点图直观反映时空对象的状态聚集特性与异质特性, 如图 1 所示, 其横坐标是时空对象 $ST_{(p,i)}$ 的标准化属性值 $Z_{(p,i)}$, 纵坐标是时空对象 $ST_{(p,i)}$ 的邻域中所有时空对象标准化属性值的加权值 $W z_{(p,i)}$. Moran 散点图中, 第一象限的点表示 $Z_{(p,i)}$ 和 $W z_{(p,i)}$ 都为正值, 即时空对象 $ST_{(p,i)}$ 与其相邻时空对象属性都趋于高值, 表现为高值与高值聚集, 第三象限的点表示 $Z_{(p,i)}$ 和 $W z_{(p,i)}$ 都为负值, 表现为低值与低值聚集, 因此第一、三象限时空对象的状态呈现聚集特性; 相似地, 第二象限的点表示 $Z_{(p,i)}$ 为正值和 $W z_{(p,i)}$ 为负值, 时空对象出现低值被高值包围的现象, 第四象限的点表示 $Z_{(p,i)}$ 为负值和 $W z_{(p,i)}$ 为正值, 时空对象出现高值被低值包围的现象, 第二、四象限时空对象的状态呈现异质特性. 聚集特性反映时空对象趋向相同特征的演

化规律,而异质特性则反映时空对象状态趋向不同特征的演化规律.

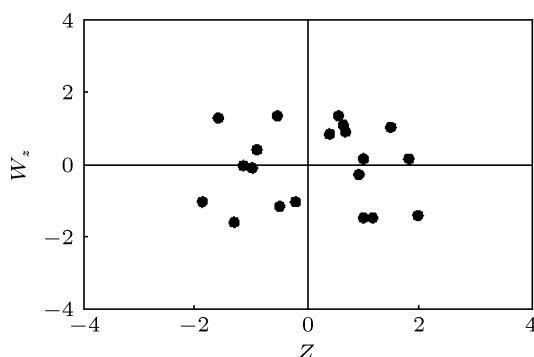


图 1 Moran 散点示意图

3 交通状态特征时空自相关性分析

城市道路交通状态通常可通过流量、密度、速度等指标反映.例如,以速度反映交通状态,表示道路交通畅通或拥堵程度,速度越高则道路越畅通,反之则相反.本文以速度为状态属性指标,研究时空 Moran's I 指数如何反映交通状态特征.

3.1 全局时空 Moran's I 指数的交通状态含义

全局时空 Moran's I 指数的正、负相关性反映了整个交通网络时空演化特征,具体交通状态含义如下:

- 1) 全局正相关性表现为拥堵或畅通状态的时空聚集特性,且正相关性越大聚集特性越显著,即交通网络某时段畅通(或拥堵),则其相邻时段也趋于畅通(或拥堵);
- 2) 全局负相关性表现为拥堵或畅通状态的时空异质特性,且负相关性越大异质特性越显著,即交通网络某时段畅通(或拥堵),则其相邻时段反而趋于拥堵(或畅通).

3.2 局部自相关指标交通状态含义

局部时空 Moran's I 指数的正、负相关性反映交通网络中某时空对象的演化特征,其具体交通状态含义如下:

- 1) 局部正相关性表现为某路段某时段的交通状态与其相邻路段在相邻时段的交通状态(拥堵或畅通)趋于相同,即局部时空聚集特性,局部正相关性越大,聚集特性越明显;
- 2) 局部负相关性表现为某路段某时段的交通状态与其相邻路段在相邻时段的交通状态(拥堵或畅通)趋于相反,即局部时空异质特性,局部负相关性越大,异质特性越明显.

Moran 散点图中某路段某时刻交通状态所对应时空对象位于不同象限,其表示的交通状态时空特性也不同.具体如下所述:

- 1) 第一象限表示该路段该时段畅通,且其相邻路段在相邻时段也趋于畅通,交通状态时空特征为畅通聚集;
- 2) 第二象限表示该路段该时段拥堵,但相邻路段在相邻时段畅通,交通状态时空特征为畅通异质,具体表现为该路段拥堵来临时率先拥堵,拥堵消散时滞后消散;
- 3) 第三象限表示该路段该时段拥堵,且其相邻路段在相邻时段也趋于拥堵,交通状态时空特征为拥堵聚集;
- 4) 第四象限表示该路段该时段畅通,但相邻路段在相邻时段拥堵,交通状态时空特征为拥堵异质,具体表现为该路段拥堵来临时滞后拥堵,拥堵消散时率先消散.

4 案例研究

本文选取北京市道路交通网络中二环快速路外环方向 18 条路段为研究对象(如表 1 所列),以交通流速度为交通状态属性,计算时空 Moran's I 指数,并分析其全局和局部时空自相关特性.

表 1 案例研究中的北京市二环路段划分情况

编号	名称	编号	名称	编号	名称	编号	名称
1	西直门桥至阜成门桥	6	右安门桥至永定门桥	11	广渠门桥至东便门桥	16	安定门桥至钟楼北桥
2	阜成门桥至复兴门桥	7	永定门桥至玉蜓桥	12	东便门桥至建国门桥	17	钟楼北桥至积水潭桥
3	复兴门桥至天宁寺桥	8	玉蜓桥至左安门桥	13	建国门桥至朝阳门桥	18	积水潭桥至西直门桥
4	天宁寺桥至菜户营桥	9	左安门桥至光明桥	14	朝阳门桥至东直门桥		
5	菜户营桥至右安门桥	10	光明桥至广渠门桥	15	东直门桥至安定门桥		

4.1 全局时空 Moran's I 指数分析

以 2009 年至 2012 年中每年各工作日和周末的路段交通流速度为基础, 分别计算全局时空 Moran's I 指数, 从周分布角度进行交通状态分析。此外, 通过分析 2010 年中秋节和国庆节所在周全局时空 Moran's I 指数与节前后正常周之间差异, 研究节假日对道路交通状态时空特征的影响。

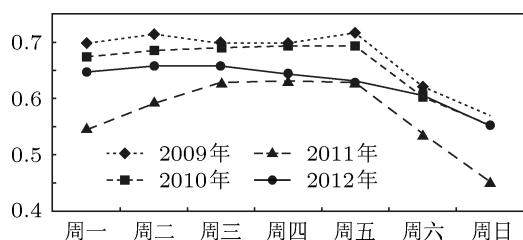


图 2 2009—2012 年全局 Moran's I 指数周变化趋势 (2012 统计至 11 月 1 日)

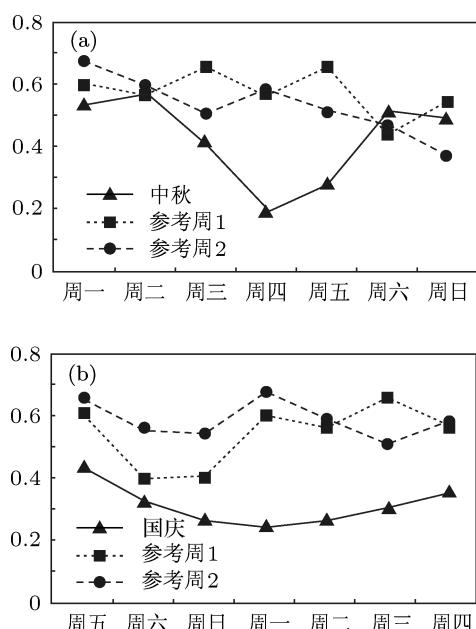


图 3 部分节假日全局 Moran's I 指数比较分析 (a) 2010 年中秋与节前后两周对比 (中秋为周三到周五, 为避开调休加班的周末, 参考周为 2010 年 9 月 13 日至 19 日与 2010 年 10 月 18 至 24 日); (b) 2010 年国庆与节前后两周对比 (国庆为周五到周四, 为避开调休加班的周末, 参考周为 2010 年 9 月 10 日至 16 日与 2010 年 10 月 15 至 21 日)

图 2 为 2009 年至 2012 年全局时空 Moran's I 指数周分布状况, 二环外环路段全局时空 Moran's I 指数均大于 0.4, 交通状态表现为时空聚集特性。具体全局时空 Moran's I 指数变化趋势为: 2009 年至 2011 年交通状态的聚集程度呈现降低趋势, 2012

年有所增加。四年的周分布数据具有一个明显规律: 各工作日全局时空 Moran's I 指数较高, 而周末全局时空 Moran's I 指数明显下降, 表明周末道路交通状态的时空聚集程度明显低于工作日。

由图 3 可知, 参考周全局时空 Moran's I 指数符合图 2 的周分布规律 (周末低于工作日)。受节假日的影响, 中秋节和国庆节与参考周的分布规律不同, 其全局时空 Moran's I 指数低于参考周, 呈现 V 型曲线趋势, 表明节假日道路交通状态时空聚集程度明显低于参考周。

节假日和周末道路交通状态时空聚集程度明显低于工作日的原因主要是刚性通勤通学出行大量减少, 出行行为在时空上呈现较强的分散性和随机性特征。

4.2 局部时空自相关指标分析

以 2010 年的周一为例, 计算道路网络交通状态局部自相关指标, 绘制时段与路段的局部自相关指标分布情况如图 4 所示, 分析交通状态局部时空演化规律。

4.2.1 局部时空 Moran's I 指数分析

图 4(a)—(c) 分别表示局部时空 Moran's I 指数小于 0, 介于 0 至 1 以及大于等于 1 时的时空对象分布状况, 图中 x 轴表示路段 (二环外环 18 个路段), y 轴表示时段 (24 h), z 轴表示分布频率。

由图 4(a) 可知, 局部时空 Moran's I 指数小于 0 的时空对象主要分布在 8:00 到 22:00, 表明道路交通状态的时空异质特征主要出现在白天; 图 4(b) 中局部 Moran's I 指数介于 0 至 1 (正的低值) 的时空对象占主要部分, 说明二环外环路段的交通状态整体上呈现弱时空聚集特征。

由图 4(c) 可知, 局部 Moran's I 指数大于等于 1 (正高值) 的道路交通时空状态分布具有明显的强聚集特征。从时间方面分析, 主要分布在凌晨 (畅通聚集) 和早、晚高峰 (拥堵聚集); 从空间方面分析, 凌晨 0:00 至 6:00 间二环路外环全部 18 个路段、上午 7:00 至 9:00 间钟楼北桥至阜成门桥 (路段 17 至 1)、上午 7:00 至 11:00 间左安门桥至建国门桥 (路段 9 至 12) 以及下午 14:00 至 20:00 间钟楼北桥至复兴门桥 (路段 17 至 2) 的交通状态呈现强聚集特征。

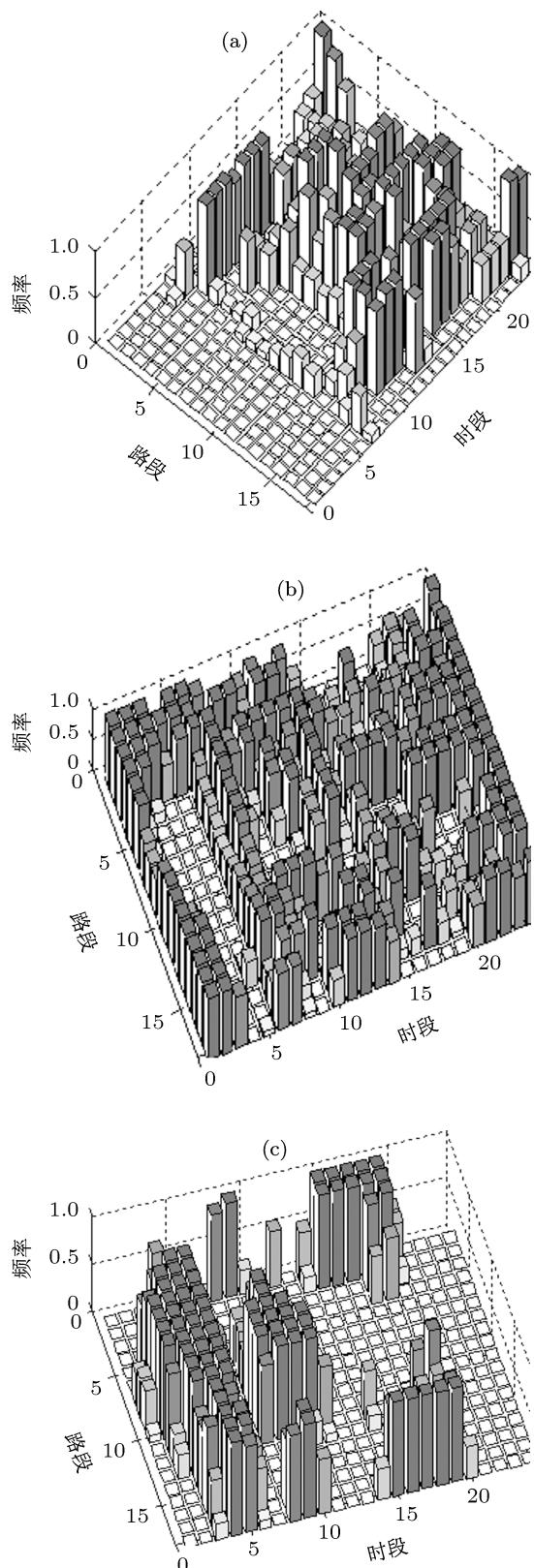


图 4 局部 Moran's I 指数时空分布 (a) 局部 Moran's $I < 0$; (b) 局部 Moran's I 位于 $[0, 1]$; (c) 局部 Moran's $I \geq 1$

4.2.2 Moran 散点图分析

二环路外环 18 个路段交通状态时空对象在

Moran 散点图不同象限的分布情况如图 5 所示, 其中图 5(a)–(d) 分别表示 Moran 散点图中位于第一、二、三、四象限的时空对象的分布状况, 坐标轴含义与图 4 相同.

图 5(a) 和 (c) 中, Moran 散点图第一象限和第三象限的时空对象分布呈现明显聚集特征. 由图 5(a) 可知, 第一象限时空对象分布频率较高的时空域主要包括凌晨 0:00 至 6:00 间的所有路段、中午 12:00 至 13:00 间的天宁寺桥至广渠门桥 7 条路段和朝阳门桥至钟楼北桥 3 条路段以及晚上 22:00 以后的几乎所有路段 (除 22:00 至 23:00 间钟楼北桥至复兴门桥 4 条路段), 其交通状态表现为畅通聚集特征. 值得注意的是, 天宁寺桥至菜户营桥 (路段 4) 早高峰期间呈现交通时空状态畅通聚集特征. 由图 5(c) 可知, 第三象限时空对象分布频率较高的时空域主要包括早上 7:00 至 11:00 间除复兴门桥至菜户营桥、朝阳门桥至安定门桥的 4 条路段以外的大部分路段以及下午 14:00 至 19:00 间除左安门桥至东便门桥和东直门桥至安定门桥的 4 条路段以外的大部分路段, 其交通时空状态表现拥堵聚集特征.

图 5(b) 和 (d) 中 Moran 散点图第二象限和第四象限的时空对象分布聚集特征不明显, 主要分布在早晚高峰之间及晚高峰以后, 表明二环道路交通状态时空异质特征主要分布在白天. 值得注意的是: 大多数路段 (除天宁寺桥至右安门桥 (路段 4, 5) 外) 的时空对象只分布在第二象限或第四象限, 且呈现两种状态间隔分布的特点. 阜成门桥至复兴门桥、永定门桥至左安门桥、光明桥至广渠门桥、东便门桥至建国门桥、朝阳门桥至东直门桥、钟楼北桥至西直门桥为畅通异质路段, 呈现率先拥堵、滞后消散的特征, 属于交通拥堵易频发路段; 西直门桥至阜成门桥、复兴门桥至天宁寺桥、右安门桥至永定门桥、左安门桥至光明桥、广渠门桥至东便门桥、建国门桥至朝阳门桥、东直门桥至钟楼北桥为拥堵异质路段, 呈现滞后拥堵、率先消散的特征, 属于交通拥堵易缓解的路段.

总体上二环路外环方向交通拥堵程度严重, 但通常情况下仍能通行、不易瘫痪, 主要原因是畅通异质与拥堵异质的路段相互间隔分布, 未出现长时间拥堵聚集的交通状态.

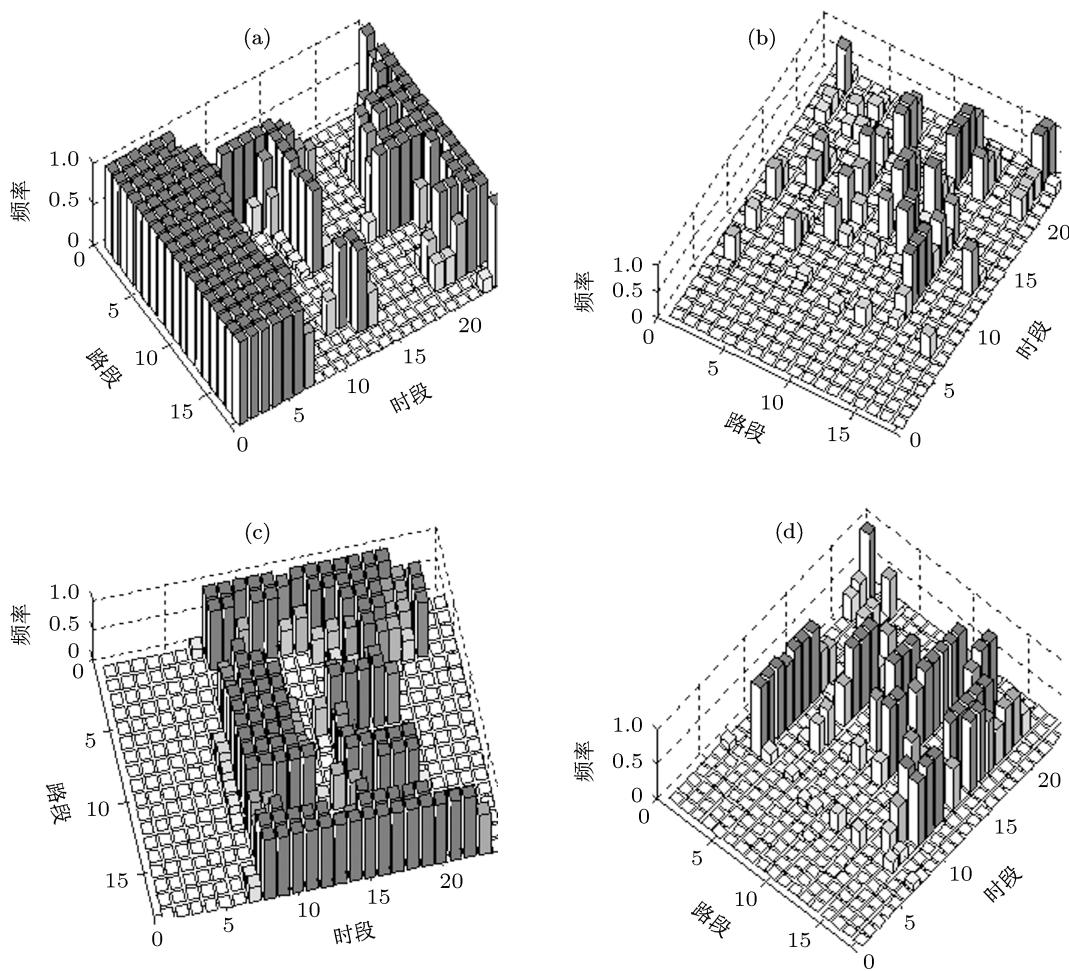


图 5 Moran 散点图时空分布 (a) 第一象限; (b) 第二象限; (c) 第三象限; (d) 第四象限

5 结 论

本文对传统 Moran's I 指数进行时间维拓展, 研究道路交通状态与 Moran's I 指数的关联关系, 建立基于时空 Moran's I 指数的分析模型, 使其能适用于道路交通状态时空特征分析。以实际交通网络的路段为例分析道路交通状态时空分布与演化规律, 通过全局时空 Moran's I 指数分析路网交通状态的整体时空特征, 应用局部时空 Moran's I 指数和 Moran 散点图进一步研究单个路段交通状态的时空特征。

1) 通过全局时空 Moran's I 指数分布研究发现: 研究路段的交通状态呈现时空聚集特征, 节假日与周末的聚集程度要明显低于工作日, 这与节假日及周末通勤出行大量减少、出行行为不确定性与随机性增大密切相关。

2) 通过局部时空 Moran's I 指数分布研究发现:

研究路段的交通状态整体呈现弱时空聚集特征, 交通状态的时空异质特性集中分布在白天, 交通状态的强聚集特征主要出现在凌晨时段与早、晚高峰的部分路段。

3) 通过时空对象的 Moran 散点分布研究发现: 研究路段的交通状态在夜间时段(22: 00 至 6: 00)呈现畅通聚集、早晚高峰时段呈现拥堵聚集的时空特征, 在早晚高峰间和晚高峰后时段(20: 00 至 22: 00)呈现畅通异质与拥堵异质相互间隔分布的特征。虽然研究路段的交通拥堵严重, 但由于交通状态的时空异质特征, 通常情况下仍能正常通行。

本质上, 交通状态的时空聚集特征和异质特征与网络结构、居民出行时空特征、交通设施水平以及交通管理与控制措施等因素密切相关, 可在深入研究的基础上将交通状态演化规律应用到实际工作中。

- [1] Moran P A P 1950 *Biometrika* **37** 17
- [2] Chen Y G 2009 *Geograph. Res.* **28** 1449 (in Chinese) [陈彦光 2009 地理研究 **28** 1449]
- [3] Cliff A D, Ord J K 1973 *Spatial Autocorrelation* (London: Pion Limited)
- [4] Cliff A D, Ord J K 1981 *Spatial Processes: Models and Applications* (London: Pion Limited)
- [5] Anselin L 1995 *Geograph. Anal.* **27** 93
- [6] Zhu K L, Hao C L, Wang X B 2009 *International Trade, Governmental Support and R&D Efficiency of Western Region in China* Qingdao, China, July 24–29, 2009 544
- [7] Yang Z S, Sliuzas R, Cai J M, Ottens H F L 2012 *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.* **19** 252
- [8] Zhang C S, Luo L, Xu W L, Ledwith V 2008 *Sci. Total Environ.* **398** 212
- [9] Huo X N, Li H, Sun D F, Zhou L D, Li B G 2012 *Int. J. Environ. Res. Public Health* **9** 995
- [10] Fuller M M, Enquist B J 2012 *Ecography* **35** 510
- [11] Trautwein C, Schinegger R, Schmutz S 2012 *Aquat. Sci.* **74** 329
- [12] Prasannakumar V, Vijith H, Charutha R, Geetha N 2011 *Procedia Soc. Behav. Sci.* **21** 317
- [13] Moons E, Brijs T, Wets G 2009 *Lecture Notes in Comput. Sci.* **5730** 288
- [14] Wen H Y, Xing K, Shen F 2008 *Comput. Commun.* **3** 31 (in Chinese) [温惠英, 邢康, 沈芬 2008 交通与计算机 **3** 31]
- [15] Li S B, Wu J J, Gao Z Y, Lin Y, Fu B B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 050701 (in Chinese) [李树彬, 吴建军, 高自友, 林永, 傅白自 2011 物理学报 **60** 050701]
- [16] He Z B, Ma S F, He G G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 171 (in Chinese) [贺正冰, 马寿峰, 贺国光 2010 物理学报 **59** 171]
- [17] Liu S X, Guan H Z, Yan H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 090506 (in Chinese) [刘诗序, 关宏志, 严海 2012 物理学报 **61** 090506]

Analysis on urban traffic status based on improved spatio-temporal Moran's I^*

Chen Shao-Kuan[†] Wei Wei Mao Bao-Hua Guan Wei

(MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 16 January 2013; revised manuscript received 24 March 2013)

Abstract

An improved Moran's I method is proposed to describe the spatio temporal features of road traffic flow based on the traditional Moran's I . The spatio temporal distribution classification of road traffic status including homogenous congested and uncongested traffic, heterogeneous congested and uncongested traffic is then given through Moran plotting graph. To verify the applicability of the proposed method, the traffic flow data along the second ring-shape urban expressway in Beijing is introduced for analysing the spatio temporal distribution and evolution of road traffic status from global and local autocorrelation through using the proposed method.

Keywords: improved Moran's I , traffic state, spatio-temporal autocorrelation, spatio-temporal distribution

PACS: 89.40.-a

DOI: 10.7498/aps.62.148901

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA110303), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB725406), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 71001006).

† Corresponding author. E-mail: shkchen@bjtu.edu.cn