

# 城市交通拥塞因子时空变化特征及源解析研究

赵雪亭, 胡立伟\*

(昆明理工大学, 交通工程学院, 昆明 650500)

**摘要:** 交通拥塞因子是造成“点-线-面”三级城市交通拥塞效应的重要源。为深入探究城市交通拥塞因子的时空变化特征和影响程度, 本文引入用于地质和生态风险评价的相关方法。首先, 基于“源-路径-目标”模型, 综合考虑城市交通拥塞多变综合复杂性, 深入剖析建立城市交通拥塞评价影响指标体系; 其次, 采用 Mann-Kendall 趋势检验法评估不同交通拥塞因子的时空变化趋势和突变点, 利用小波分析探究周期性变化规律; 改进内梅罗污染指数法对交通拥塞因子的特征及风险程度进行评估; 最后, 采用 person 相关性分析和正定矩阵因子分解(PMF)模型分析其主要来源, 评估结果的不确定性。结果表明: 超车、违反交通规则、随意变换车道、停车、违法违规占用道路、不良天气状况、突发交通事故这7个因子的大小变化较为明显, 变异系数均超过40%; 城市交通拥塞程度因子  $\sum_{i=1}^{18} B_i$  在1月份的早、午、晚高峰最大(11.23), 3月份达到最低(8.12)。城市交通拥塞整体呈现晚高峰, 早高峰, 中高峰依次降低的时间变化特征, 且存在 8a(第1主周期)和 4a(第2主周期)两个周期时间变化。内梅罗污染指数法得到的结果以中等及以上程度交通拥塞为主。研究结果可为城市交通拥塞节点治理提供科学依据。

**关键词:** 城市交通; 风险评价模型; 源解析; 城市交通拥塞; 时空变化特征; 不确定性分析

## Spatial and Temporal Variation Characteristics of Urban Traffic Congestion Factors and Source Analysis

ZHAO Xue-ting, HU Li-wei\*

(Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The traffic congestion factor is an important source of urban traffic congestion at the levels of points, lines, and networks. In order to investigate the spatial and temporal characteristics of urban traffic congestion factors and their influence, this paper introduces the relevant methods for geological and ecological risk evaluation. Firstly, based on the "source-path-target" model, the multivariate and comprehensive complexity of urban traffic congestion is considered, and the impact index system of urban traffic congestion evaluation is analyzed. Secondly, the Mann-Kendall trend test was used to assess the spatial and temporal trends and abrupt change points of different traffic congestion factors, and wavelet analysis was used to explore the cyclical change pattern; To explore the law of periodic changes, an improved the Nemero pollution index method is proposed to assess the characteristics and risk degree of traffic congestion factors. Finally, Person correlation analysis and positive definite matrix factor decomposition (PMF) model are used to analyze their main sources and to assess the uncertainty of the results. The results showed that the magnitude of seven factors, namely, overtaking, traffic rule violation, random lane change, parking, illegal and illegal road occupation, adverse weather conditions, and sudden traffic accidents, varied more significantly, with coefficients of variation exceeding 40%. The urban traffic congestion degree factor  $\sum_{i=1}^{18} B_i$  was the largest in the morning, afternoon, and evening peaks in January (which reaches 11.23) and was the lowest in March (which reaches 8.12). The overall urban traffic congestion shows a time-varying characteristic where evening peak > morning peak > mid-peak, and there

收稿日期: 2023-04-05

修回日期: 2023-04-25

录用日期: 2023-04-28

基金项目: 国家自然科学基金/ National Natural Science Foundation of China (42277476, 61863019)。

作者简介: 赵雪亭(1997-), 男, 山西忻州人, 博士生。

\*通信作者: liweihukm@kust.edu.cn

are 2 cycles of time variation of 8a (first main cycle) and 4a (second main cycle). The results obtained by the Nemero pollution index method are dominated by moderate and above traffic congestion. The results of the study can provide a scientific basis for urban traffic congestion management.

**Keywords:** urban traffic; risk assessment model; source analysis; urban traffic congestion; spatiotemporal variation characteristics; uncertainty analysis

0 引言

随着城市进程化的不断推动,城市道路交通拥塞矛盾也愈凸显。当常发性交通拥塞点尚未得到有效治理,偶发性交通拥塞点没有有效管控,通常会迅速发展扩散成区域性的城市路网交通拥塞,研究城市交通拥塞的各因子时空变化特征及主要源汇响应机制,对于明晰管控关键要素节点,掌握交通拥塞时空变化特征,促进交通资源合理有效分布,改善城市交通拥塞时间普遍性、空间聚集性等具有显著意义。

目前,国内外学者对城市交通拥塞影响因素及时空变化特征进行了大量研究,LIZBETIN等<sup>[1]</sup>通过交通流数据分析交通拥塞的行成规律,从驾驶人因素论证了对交通拥塞的影响。RAHMAN等<sup>[2]</sup>通过实证研究交通拥塞成因,基于SEM (Structural Equation Model)模型得出3个城市交通拥塞和25个经济社会影响因素。ZHOU等<sup>[3]</sup>基于详细的交通小时数据及交通拥堵指数,评估降雨对城市交通拥塞的影响程度。ZHANG等<sup>[4]</sup>利用百度交通拥堵指数数据和美国国家航空航天局(NASA)全球降水测量的降雨量数据,提出城市交通脆弱性指数、交通韧性指数以及相应的量化方法。SUN等<sup>[5]</sup>从宏观发展层面,利用残差趋势模型探讨了不同时间情景下的交通拥堵指数在治理政策变化和社会经济因素变化影响下的异质性特征,并确定最具破坏性的因素和最有效的治理政策组合。MOYANO等<sup>[6]</sup>主要基于交通拥堵的每日变化及其在两个时段之间的变化对马德里(西班牙)时空交通拥堵模式进行分析,得出在城市核心区和外围郊区的交通拥堵程度存在明显区别,但南北之间明显不同。胡立伟等<sup>[7]</sup>基于改进BP (Back Propagation)神经网络模型对城市交通拥塞因子进行识别。孙建平<sup>[8]</sup>基于城市交通事故和交通数据建立拥堵判定模型,并对时空范围进行量化。韦清波等<sup>[9]</sup>综合考虑多因素,基于K近邻建立不同时间的拥堵预测模型。王晓旭<sup>[10]</sup>提出基于交通数据的时空并置模糊拥堵模式挖掘方法。张光南等<sup>[11]</sup>提出综合多方面因素研究城市

交通违法行为的时空分布特征。

然而,以往城市交通拥塞影响的研究多集中于宏观影响因素,多存在忽略综合分析交通拥塞因子组成、量化各因子的大小,未准确刻画时空变化特征等问题,本文从影响交通拥塞微观层面的影响因子出发,基于“源-路径-目标”模型建立新的城市交通拥塞因子指标体系,利用M-K趋势检验城市交通拥塞因子的变化趋势及对显著突变点进行分析,通过小波分析实现城市交通拥塞因子的时间周期规律描述,引入环境影响评价的内梅罗污染指数法并进行适应性改进以此实现对城市交通拥塞程度的评价,最终通过PMF模型实现对城市交通拥塞因子的源解析,并基于不确定性分析方法对PMF源解析结果进行验证,模型精度较高,可以更好地解释城市交通拥塞内在性原因,以期为城市交通拥塞因子时空变化特征和主要源汇响应机制研究提供新的方法参考。

1 研究区域概况与数据采集

1.1 研究区域

本文利用贵阳市主城区内的交通数据对城市交通拥塞时空变化特征及主要源汇响应机制问题进行研究。近年来,贵阳市城镇化进程不断推动,根据数据显示,城镇化率达80%以上,机动车保有量达到500万辆以上,由此带来的是贵阳市交通拥堵不断加剧。2021年贵阳市在全国50个交通拥堵主要城市排在中位,且交通长期处于亚健康状态。以贵阳市的云岩区和南明区两个主要城区作为研究对象,标定贵阳市主城区早(8:30-9:30)、午(11:30-13:30)、晚(17:30-18:30)高峰时段内的主要城市路网交通拥塞点,研究区域主干道交通拥塞情况如图1所示。

1.2 数据采集

本文以贵阳市云岩区和南明区路网作为试验对象,采集三大类基础数据:①交通流数据,利用Python爬取贵阳市主城区2021年1月~12月数据,包括交通量、运行速度、车道数等。②城市路网数

据,基于OSM开源矢量数据。③实地调查数据,包括道路状况、信号配时等。④市级行政区划,来自国家地理信息公共服务平台。研究区域范围内的部分道路基本情况,如表1所示。

2 基于多种模型耦合的城市交通拥堵因子时空变化特征及源解析

2.1 基于“源-路径-目标”模型的交通拥堵因子指标体系

“源-路径-目标”模型,早先被应用于地下水资源评价<sup>[12]</sup>。“源”又可称为“风险源”,是指可以引起风险发生的污染源强度和位置等;“路径”是污染源的传播过程,也指从污染源的释放点(源)到保护点(目标)之间的全部路径;“目标”是指被防止遭受风险的具体的物质或者不可预见的损失等。

基于“源-路径-目标”模型,将城市交通拥堵时空变化主要源汇响应机制研究描述为:“源”是对某个或者多个交通拥堵因子耦合作用造成的危害,具体包括交通拥堵因子数量,与常发性交通拥堵点之间的距离,交通拥堵因子的时空特征;“路径”是某

个或者多个交通拥堵因子的迁移转化过程,包括常发性、偶发性交通拥堵“点-线-面”以及交通拥堵评价因子的迁移转化过程;“目标”是风险源的最终作用受体。本文主要考虑城市交通自身运行状况及突发性交通量两个要素,城市交通拥堵时空“源-路径-目标”概念模型如图2所示。

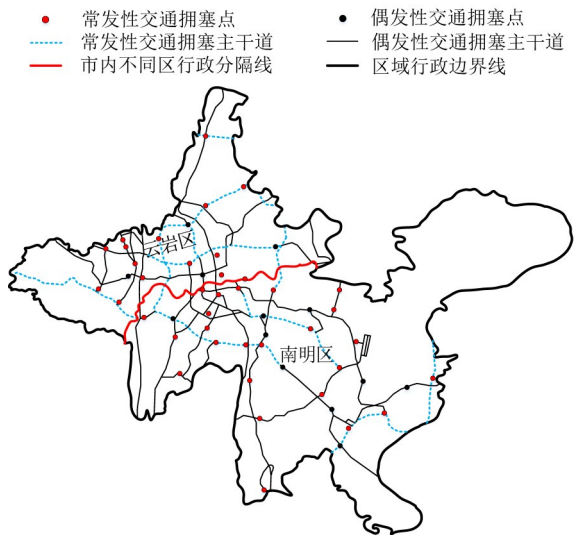


图1 研究区域主干道交通拥堵情况  
Fig. 1 Traffic congestion on study area's main roads

表1 研究区域内高峰小时道路基本情况  
Table 1 Basic conditions of roads during peak hours in study area

编号	道路名称	道路等级	车道数	交通量/ (pcu·h <sup>-1</sup> )	通行能力/ (pcu·h <sup>-1</sup> )	饱和度	平均行车速度/(km·h <sup>-1</sup> )
1	延安中路	主干路	双向8车道	3208	3718	0.863	29.87
2	延安东路	主干路	双向8车道	3250	3718	0.874	29.35
3	宝山北路	城市快速路	双向8车道+潮汐车道	3995	4837	0.826	41.23
4	宝山南路	城市快速路	双向8车道+潮汐车道	4019	4837	0.831	40.85
5	市南路	城市快速路	双向8车道	3902	4375	0.892	42.31
6	瑞金中路	主干路	双向6车道	2670	2990	0.893	28.06
7	瑞金南路	主干路	双向6车道	2727	2990	0.912	27.86
8	人民大道	主干路	双向6车道	2637	2990	0.882	28.15
9	中山西路	主干路	双向6车道	2450	2990	0.836	29.86
10	中山东路	主干路	双向6车道	2448	2990	0.819	30.34
11	中华中路	主干路	双向8车道	3093	3718	0.832	28.36
12	中华南路	主干路	双向8车道	3142	3718	0.845	29.12
13	都司高架桥路	主干路	双向6车道	2676	2990	0.895	29.43

注:饱和度为  $v/c$ , 其中,  $v$  为最大交通量,  $c$  为最大通行能力。

考虑到城市交通拥堵的多变综合复杂性,本文选取交通拥堵因子主要通过文献萃取法、实地调查法等实现。从驾驶人、道路、环境因素出发,通过综合分析城市交通的常发性、偶发性交通拥堵源,迁移路径,交通拥堵程度等影响因素,并基于“源-路径-目标”模型,将各个指标进行明确划分,贵阳市

城市交通拥堵风险性影响因素如表2所述。

2.2 基于M-K趋势检验法的城市交通拥堵因子变化趋势及突变点分析

本文利用 Mann-Kendall(M-K)趋势检验法对研究区域2021年1月~12月城市交通拥堵因子大小数据进行时间变化趋势和可能突变年份分析。M-K



趋势检验法是一种受异常值干扰较少、量化、精确化高的非参数检验方法<sup>[13]</sup>。对于样本个数为  $n$  的时间序列  $x$  ,定义统计量为

$$U_{F,k}=\frac{|S_k-E(S_k)|}{\sqrt{\text{var}(S_k)}},\quad k=1,2,\cdots,n$$

(1)

式中:  $S_k$  为秩序列,表示第  $i$  时刻数值大于  $j$  时刻数值个数的累计数;  $E(S_k)$  和  $\text{var}(S_k)$  为  $S_k$  的平均值

和方差;  $U_{F,k}$  为标准正态分布,是按照时间序列  $x_1,x_2,\cdots,x_n$  计算出来的统计量序列,  $U_{F,1}=0$  。给定显著性水平  $\alpha=0.05$  ,则  $U_\alpha=\pm 1.96$  ,如果  $|U_{F,k}|>|U_\alpha|$  ,则否定无趋势的零假设,表明序列存在明显的趋势变化。再按照时间逆序  $x_n,x_{n-1},\cdots,x_1$  ,重复上述过程,同时使  $U_{B,k}=-U_{F,k}$  ,  $k=n,n-1,\cdots,1$  ,  $U_{B,1}=0$  。

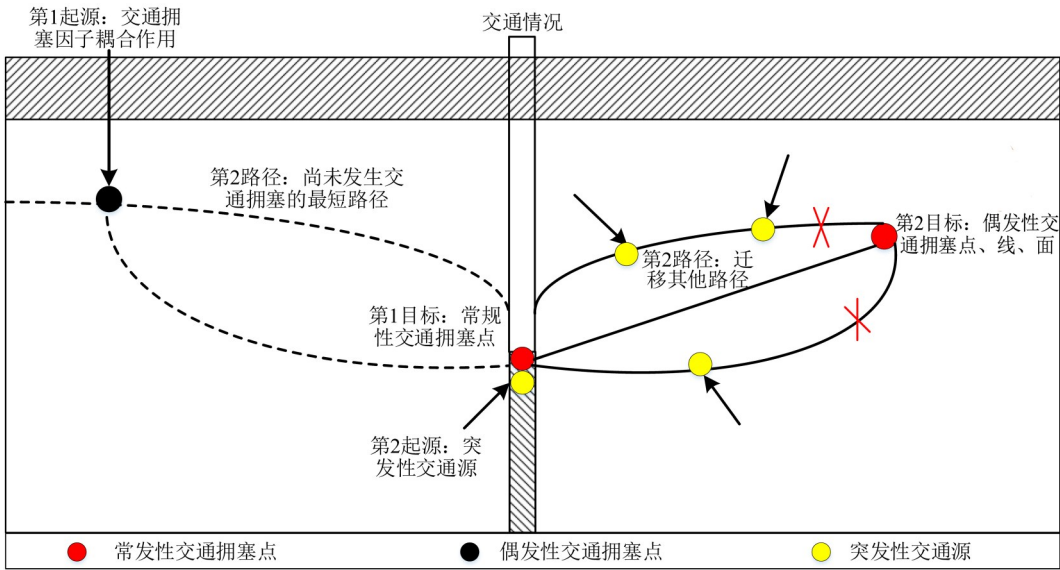


图2 城市交通拥堵时空“源-路径-目标”概念模型

Fig. 2 Spatial and temporal "source-path-goal" conceptual model of urban traffic congestion

表2 贵阳市城市交通拥堵风险性影响因素

Table 2 Risk influencing factors of urban traffic congestion in Guiyang city

因素分类	交通拥堵因子	因子符号	指标类别
人为因素	启动损失时间	$B_1$	源指标
	超车频率	$B_2$	路径指标
	随意变换车道频次	$B_3$	路径指标
	操作不当频次	$B_4$	源指标
	停车频次	$B_5$	路径指标
	违法违规占用道路	$B_6$	路径指标
自然因素	路面状况	$B_7$	路径指标
	道路宽度	$B_8$	路径指标
	车道数	$B_9$	路径指标
	次干道及以上	$B_{10}$	路径指标
	运行速度	$B_{11}$	目标指标
	交通量	$B_{12}$	目标指标
	公交站点密度	$B_{13}$	路径指标
	机非分离设置	$B_{14}$	路径指标
	信号灯设置	$B_{15}$	路径指标
	交通拥堵长度	$B_{16}$	目标指标
	天气状况	$B_{17}$	源指标
	突发交通事故	$B_{18}$	源指标

2.3 基于小波分析的城市交通拥堵因子时间周期演变规律

小波分析(Wavelet Analysis)可探究城市交通拥堵因子的周期演变规律,揭示多种变化周期并定位<sup>[14]</sup>。连续小波变换和小波方差公式<sup>[15]</sup>为

$$\begin{cases} W_t(a,b)=|a|^{-\frac{1}{2}}\int_{\mathbf{R}}f(t)\bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \\ \text{var}(a)=\int_{-\infty}^{+\infty}|W_t(a,b)|^2db \end{cases}$$

(2)

式中:  $W_t(a,b)$  为小波变换系数;  $f(t)$  为一个给定的能量有限信号或平方可积函数;  $\bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$  为  $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  的复共轭函数;  $\text{var}(a)$  为小波方差;  $a$  和  $b$  为伸缩尺度和平移参数;  $\mathbf{R}$  为实数;  $t$  为时间。

2.4 基于内梅罗污染指数法的城市交通拥堵程度评价

内梅罗污染指数法常用于环境污染因素评价,参照文献[16],改进后的评价公式为

$$P_l = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_l}{C_{0l}}\right)_{\max}^2 + \left(\frac{C_l}{C_{0l}}\right)_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (3)$$

式中:  $l$  为某个城市交通拥塞点;  $P_l$  为该点的城市交通拥塞因子综合拥塞指数;  $C_l$  为该点城市交通拥塞因子的实测值;  $C_{0l}$  为该城市交通拥塞因子的背景值(2021年1月~12月平均值)。当  $P_l \leq 0.7$  为很低,  $0.7 < P_l \leq 1.0$  达到低,  $1.0 < P_l \leq 2.0$  达到中等,  $2.0 < P_l \leq 3.0$  达到高,  $P_l > 3.0$  则为极高。

## 2.5 基于正定因子矩阵模型法(PMF)的城市交通拥塞因子源解析

PMF模型将城市交通拥塞数据矩阵分解成因子贡献( $G$ )和因子成分谱( $F$ )两个矩阵,迭代算法识别因子数量和贡献<sup>[17]</sup>。

$$X_{gh} = \sum_{k=1}^p G_{gk} F_{kh} + E_{gh} \quad (4)$$

式中:  $p$  为因子个数;  $g$  为第  $g$  个城市交通拥塞数据集;  $h$  为第  $h$  种城市交通拥塞因子;  $X_{gh}$  为  $g$  个城市交通拥塞数据集  $h$  种城市交通拥塞因子大小构成的  $g \times h$  矩阵;  $G_{gk}$  为因子  $k$  对每个城市交通拥塞数据集  $g$  的贡献;  $F_{kh}$  为对于每个来源的类别分布;  $E_{gh}$  为残差矩阵。

设计目标函数  $Q$ , 并将其最小化为

$$Q = \sum_{g=1}^m \sum_{h=1}^q \left( \frac{E_{gh}}{u_{gh}} \right)^2 \quad (5)$$

式中:  $m$  为城市交通拥塞数据集数量;  $q$  为城市交通拥塞因子大小数量;  $u_{gh}$  为不确定度。

## 2.6 基于不确定性分析方法的PMF模型结果检验

本文主要通过拟合优度、因子交换现象、运行重现性探讨结果的不确定性。在基础运行过程中,使用决定系数( $R^2$ )进行拟合优度分析<sup>[18]</sup>,计算公式为

$$R^2 = \frac{\sum_{r=1}^s (\hat{y}_s - \bar{y})^2}{\sum_{r=1}^s (y_s - \bar{y})^2} \quad (6)$$

式中:  $\hat{y}_s$  为城市交通拥塞数据集采集点  $r$  的预测值;  $y_s$  为城市交通拥塞数据集采集点  $r$  的测量值;  $\bar{y}$  为城市交通拥塞数据集采集点  $r$  的平均测量值;  $s$  为城市交通拥塞数据集采集点数量。

替换法(DISF)是通过扰动因子成分谱矩阵  $F$

的参数评估因子交换百分数和  $Q$  下降百分数,实现模型不确定估计<sup>[19]</sup>,计算公式为

$$dQ = Q(F_{kj} = d) - Q \quad (7)$$

式中:  $Q(F_{kj} = d)$  为限定  $F_{kj}$  为一个固定可行值,并最小化所有其他  $G$  和  $F$  矩阵因子元素时获得的最小平方和值;  $Q$  为最小化的目标函数。

采用拔靴法(BS)诊断PMF模型运行效果的可行性,通过重构城市交通拥塞数据集得到各因子匹配率,通过旋转模糊度随机误差实现不确定性估计。

## 3 研究结果与讨论

### 3.1 城市交通拥塞因子特征

研究区域内主要以次干道及以上等级道路为主,其中交通拥塞因子中超车、违反交通规则、随意变换车道、停车、违法违规占用道路、不良天气状况、突发交通事故这7个因素大小变化较为明显,变异系数均超过40%,属于中等偏强变异程度;路面状况、次干道及以上占比两个交通拥塞因子大小变化不明显,变异系数分别为6.78%、8.74%均低于10%,属于弱变异程度。城市交通拥塞因子的描述性统计如表3所示。

将研究区域内2021年1月~12月的数据进行标准归一化处理,得到描述城市交通拥塞程度因子  $\sum_{i=1}^{18} B_i$  的大小变化范围、月份变化趋势分别如图3(a)和图3(b)所示。将城市交通拥塞程度因子划分为3个部分:缓慢下降的“高值”(1月~2月),波动变化不明显的“中值”(3月~9月),波动变化显著的“中值”(10月~12月)。研究区域在1月份的早、午、晚高峰城市交通拥塞程度最大,达到11.23;3月份达到最低,为8.12。城市交通拥塞整体呈现晚高峰、早高峰、中高峰依次降低的时间变化特征。

根据图3(c)所示,在2021年2月~9月城市交通拥塞的  $U_{Fk}$  曲线均在95%置信区间范围内呈先上升后下降的变化趋势。2021年9月中旬以后  $U_{Fk}$  曲线超过5%显著水平后呈波动缓慢下降趋势。2021年2月和9月  $U_{Fk}$  和  $U_{Bk}$  两条曲线出现交点,且交点在5%显著水平以内,即城市交通拥塞程度在2月和9月显著突变,主要原因是2月份正值春运期间,9月份正处于开学、旅游等黄金时间。

表3 贵阳市城市交通拥塞因子大小描述性统计  
Table 3 Descriptive statistics of urban traffic congestion factor size in Guiyang city

交通拥塞因子	平均值	最小值	最大值	标准差	背景平均值	平均值/背景平均值	变异系数
$B_1$	4.98 s	2.8 s	7.4 s	1.18 s	3.45 s	1.44 s	23.77%
$B_2$	5.68 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	1 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	13 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	2.78 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	2.85 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	1.99 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	48.91%
$B_3$	32.13 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	8 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	68 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	13.13 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	15.86 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	2.03 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	40.87%
$B_4$	66.90 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	16 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	132 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	25.63 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	42.36 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	1.58 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	38.31%
$B_5$	51.61 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	15 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	98 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	23.40 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	26.85 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	1.92 次·km <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	45.33%
$B_6$	0.92%	0.05%	2.05%	0.56%	0.23%	3.98%	61.50%
$B_7$	90.72 PQI·km <sup>-1</sup>	75.9 PQI·km <sup>-1</sup>	98.9 PQI·km <sup>-1</sup>	6.15 PQI·km <sup>-1</sup>	88.89 PQI·km <sup>-1</sup>	1.02 PQI·km <sup>-1</sup>	6.78%
$B_8$	3.45 m	2.8 m	4 m	0.44 m	3.25 m	1.06 m	12.62%
$B_9$	7.81 个	4 个	12 个	2.19 个	6.5 个	1.20 个	28.13%
$B_{10}$	45.35%	37.56%	52.13%	3.96%	40.25%	1.13%	8.74%
$B_{11}$	25.56 km·h <sup>-1</sup>	17.58 km·h <sup>-1</sup>	32.78 km·h <sup>-1</sup>	2.42 km·h <sup>-1</sup>	23.87 km·h <sup>-1</sup>	1.07 km·h <sup>-1</sup>	16.88%
$B_{12}$	3116.20 pcu	2415 pcu	3845 pcu	464.86 pcu	2898.5 pcu	1.08 pcu	14.92%
$B_{13}$	4.48 个·km <sup>-2</sup>	2 个·km <sup>-2</sup>	8 个·km <sup>-2</sup>	1.47 个·km <sup>-2</sup>	3.08 个·km <sup>-2</sup>	1.46 个·km <sup>-2</sup>	32.82%
$B_{14}$	15.59%	3.9%	23.41%	4.76%	10.58%	1.47%	30.54%
$B_{15}$	3 个·km <sup>-2</sup>	1 个·km <sup>-2</sup>	5 个·km <sup>-2</sup>	1.12 个·km <sup>-2</sup>	2.13 个·km <sup>-2</sup>	1.41 个·km <sup>-2</sup>	37.45%
$B_{16}$	2.42 m	1.25 m	3.65 m	0.61 m	1.68 m	1.44 m	25.31%
$B_{17}$	56.72%	12.5%	98.8%	22.73%	41.47%	1.37%	40.07%
$B_{18}$	4.45 次·km <sup>-2</sup>	1 次·km <sup>-2</sup>	9 次·km <sup>-2</sup>	2.27 次·km <sup>-2</sup>	1.98 次·km <sup>-2</sup>	2.25 次·km <sup>-2</sup>	50.95%

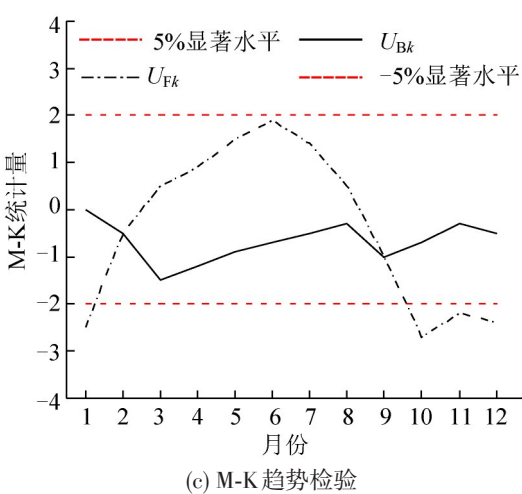
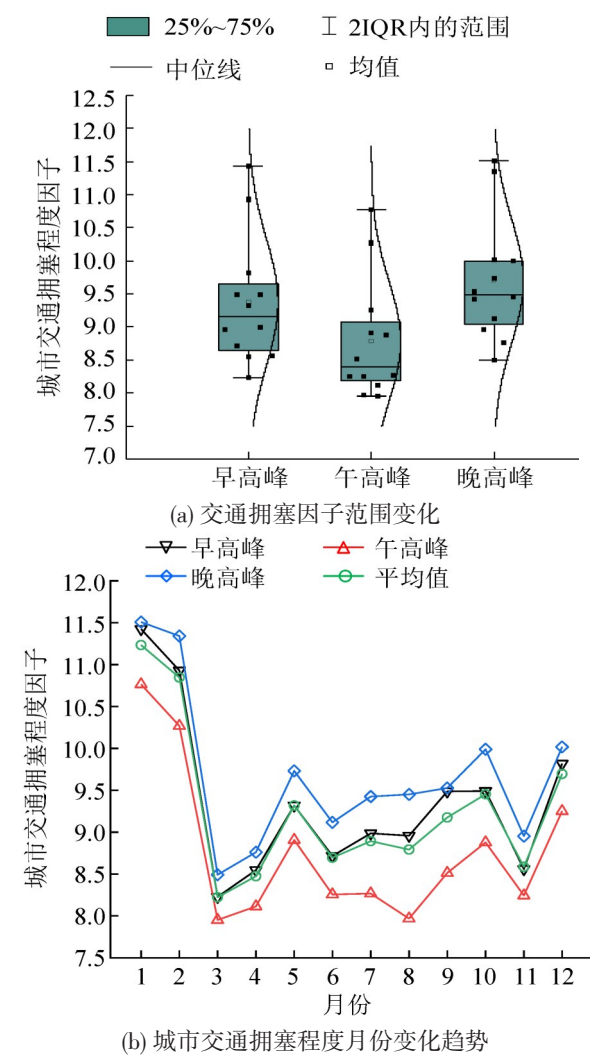


图3 2021年1月~12月研究区域城市交通拥塞变化趋势分析

Fig. 3 Trend analysis of urban traffic congestion changes in study area from January to December 2021

3.2 城市交通拥塞程度的周期规律

为揭示长时序城市交通拥塞程度因子 $\sum_{i=1}^{18} B_i$ 的动态特征,采用小波分析方法对2021年1月~12月城市交通拥塞因子进行处理,得到小波分析各参数的变化如图4所示。

从图4(a)可以看出,小波方差的变动存在两个较大的峰值,分别对应于8a(第1主周期)和4a(第2主周期)。从图4(b)可以看出,依据各主周期的小波系数实部变动趋势可以看出,在8a特征尺度上

$\sum_{i=1}^{18} B_i$  含量变化周期为2a左右,经历了5个周期;4a  
特征尺度上  $\sum_{i=1}^{18} B_i$  含量变化周期为1a左右,经历了  
11个周期。

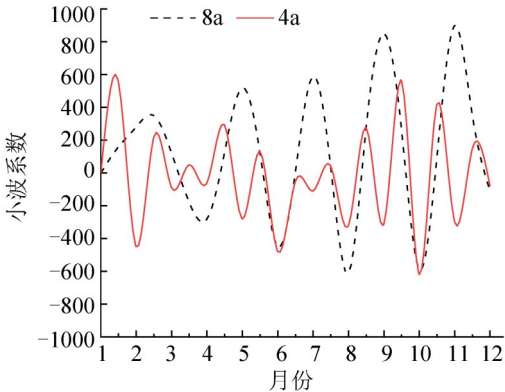
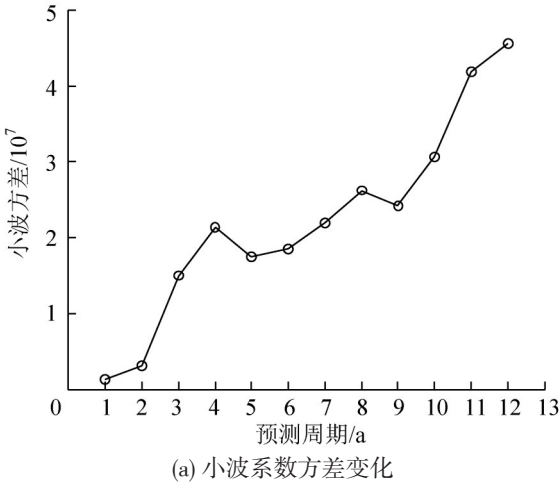


图4 研究区域2021年1月~12月城市交通拥堵

因子  $\sum_{i=1}^{18} B_i$  小波分析  
Fig. 4 Urban congestion factor  $\sum_{i=1}^{18} B_i$  wavelet analysis from  
January to December 2021 in the study area

3.3 城市交通拥堵程度评价

研究区域内梅罗污染指数法的交通拥堵因子  
评价结果如表4所示。

表4 内梅罗污染指数法交通拥堵因子对比结果  
Table 4 Comparison results of traffic congestion factors by Nemero pollution index method

交通拥堵因子	平均值	最大值	最小值	标准差
启动损失时间 $B_1/s$	4.50	2.90	6.10	0.89
超车 $B_2/(次 \cdot km^{-1} \cdot h^{-1})$	5.69	3.00	12.00	2.35
随意变换车道 $B_3/(次 \cdot km^{-1} \cdot h^{-1})$	37.31	19.00	59.00	10.09
操作不当 $B_4/(次 \cdot km^{-1} \cdot h^{-1})$	62.63	16.00	86.00	20.98
停车 $B_5/(次 \cdot km^{-1} \cdot h^{-1})$	52.94	18.00	85.00	22.81
违法违规占用道路 $B_6/\%$	0.78	0.05	1.58	0.51
路面状况 $B_7/(PQI \cdot km^{-1})$	90.20	75.90	97.60	6.51
道路宽度 $B_8/m$	3.45	2.80	4.00	0.45
车道数 $B_9/个$	7.13	4.00	10.00	1.61
次干道及以上占比 $B_{10}/\%$	44.78	39.58	49.58	3.31
运行速度 $B_{11}/(km \cdot h^{-1})$	25.15	18.45	31.78	3.56
交通量 $B_{12}/pcu$	3098.69	2415.00	3742.00	403.69
公交站点密度 $B_{13}/(个 \cdot km^{-2})$	4.31	2.00	7.00	1.20
机非分离设置 $B_{14}/\%$	16.51	7.35	22.69	4.81
信号灯设置 $B_{15}/(个 \cdot km^{-2})$	3.13	1.00	5.00	1.10
交通拥堵长度 $B_{16}/m$	2.30	1.49	3.56	0.56
不良天气状况 $B_{17}/\%$	65.24	12.60	98.8	22.25
突发交通事故 $B_{18}/(次 \cdot km^{-2})$	4.38	1.00	8.00	2.42

通过内梅罗污染指数法对研究区域城市交通  
拥堵情况进行评价。结果表明,研究区域城市交通  
拥堵因子的内梅罗污染指数在0.45~8.42之间,平  
均值为3.64,达到极高等级,有5.81%的交通拥堵点  
处于极低( $P_i \leq 0.7$ ),13.97%的交通拥堵点处于低等

级( $0.7 < P_i \leq 1.0$ ),23.15%的交通拥堵点处于中等交  
通拥堵程度( $1.0 < P_i \leq 2.0$ ),有27.98%交通拥堵点处  
于高等级( $2.0 < P_i \leq 3.0$ ),有29.09%交通拥堵点处于  
极高拥堵程度( $P_i > 3.0$ ),其中,不良天气状况、操作  
不当、随意变换车道等因子的贡献最大,主要受到



驾驶人 and 环境的影响。

综合考虑所有交通拥塞的风险,绘制内梅罗污染指数法城市交通拥塞程度评价结果,如图5所示。研究区综合生态风险指数介于38.25~621.85之间,平均值为403.51,达到高等级。极低、低、中等、高、极高交通拥塞的百分比分别为:4.19%、12.03%、22.15%、29.32%、32.31%,研究区域大部分处于中等及以上交通拥塞级别,总体危害程度较大。

3.4 城市交通拥塞因子源解析

(1) 城市交通拥塞因子相关性分析

不同城市交通拥塞因子之间的相关性是区分是否具有共同源的基础,具有显著正相关关系的因子可能会有共同来源。对研究区域城市交通拥塞因子进行相关性分析,结果如表5所示。从城市交通拥塞因子间的pearson相关系数可以看出,启动损失时间与操作不当、信号灯设置、不良天气状况、突发交通事故呈极显著正相关( $P<0.01$ ),相关系数分别为0.584、0.603、0.635、0.512,均大于0.5,表明

这4个因子可能存在共同的交通拥塞源。运行速度与交通量、机非分离设置、次干道及以上呈极显著正相关( $P<0.01$ ),运行速度与公交站点密度、信号灯设置、交通拥塞长度、不良天气状况、突发交通事故呈极显著负相关( $P<0.01$ )。

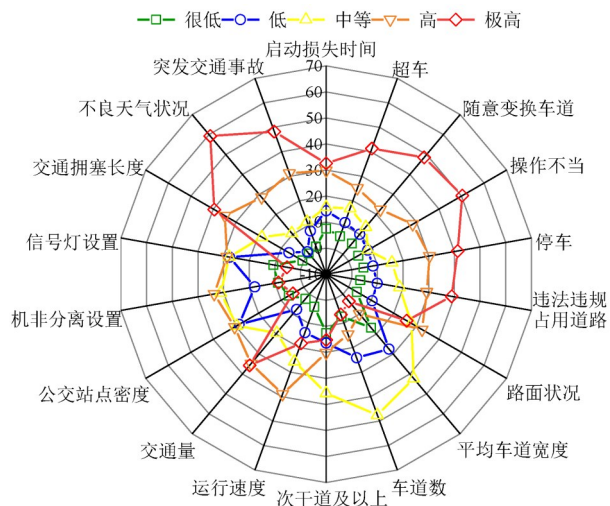


图5 内梅罗污染指数法城市交通拥塞程度评价结果  
Fig. 5 Evaluation results of urban traffic congestion level by Nemero pollution index method

表5 城市交通拥塞因子间的pearson相关性分析  
Table 5 Pearson correlation analysis among urban traffic congestion factors

因子	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$	$B_7$	$B_8$	$B_9$	$B_{10}$	$B_{11}$	$B_{12}$	$B_{13}$	$B_{14}$	$B_{15}$	$B_{16}$	$B_{17}$	$B_{18}$
$B_1$	1.000																	
$B_2$	0.012	1.000																
$B_3$	0.005	0.595#	1.000															
$B_4$	0.584#	0.234	0.178	1.000														
$B_5$	0.208*	0.121	0.165	0.345#	1.000													
$B_6$	0.251*	0.114	0.003	0.258*	0.354*	1.000												
$B_7$	0.145	0.013	0.012	0.003	0.001	0.005	1.000											
$B_8$	0.014	0.285*	0.136	0.012	0.012	0.136	0.129	1.000										
$B_9$	0.123	0.329#	0.325#	0.008	0.145	0.342#	0.216*	0.236	1.000									
$B_{10}$	0.108	0.345#	0.359#	0.106	0.003	0.009	0.526#	0.453#	0.498#	1.000								
$B_{11}$	0.164	0.403#	0.186	-0.009	0.108	-0.241*	0.385#	0.412#	0.318#	0.523#	1.000							
$B_{12}$	0.203*	0.236*	0.169	0.013	0.236*	0.198	0.459#	0.362#	0.512#	0.613#	0.723#	1.000						
$B_{13}$	0.214*	0.136	-0.158	-0.185	0.238*	0.374#	0.275*	0.136	0.186	0.124	-0.325#	-0.496#	1.000					
$B_{14}$	0.236*	-0.325#	-0.349#	0.006	0.021	0.212*	0.216*	0.271*	0.503#	0.485#	0.536#	0.547#	0.003	1.000				
$B_{15}$	0.603#	-0.183	-0.021	0.016	0.008	0.002	0.242*	0.214*	0.171	0.245*	-0.439#	-0.469#	0.052	0.009	1.000			
$B_{16}$	0.325#	0.427#	0.346#	0.425#	.0384#	0.212*	0.126	0.312#	0.258*	0.387#	-0.436#	-0.412#	0.463#	-0.429#	0.385#	1.000		
$B_{17}$	0.635#	-0.129	-0.312#	-0.237*	-0.236*	0.009	0.003	0.001	0.002	0.001	-0.519#	-0.493#	0.001	0.002	0.003	0.419#	1.000	
$B_{18}$	0.512#	0.356#	0.456#	0.521#	0.387#	0.126	0.258*	0.276*	0.359#	0.393#	-0.613#	-0.597#	0.358#	-0.348#	0.306#	0.507#	0.754#	1.000

注: \*在置信度(双侧)为0.05时,相关性是显著的; #在置信度(双侧)为0.01时,相关性是显著的。

(2) 城市交通拥塞因子分析

18个城市交通拥塞因子经检验,KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)为0.68,巴特利特球度检验(Bartlett)P值小于0.001,且由相关性分析表明,城市交通拥塞因子间有较好的相关性,适合做因子分析。城市交

通拥塞因子分析结果如表6所示,经Kaiser旋转后因子使用特征值大于1的因子,结果共有3个,其因子累积解释总体的71.75%。由此推断,研究区城市交通拥塞源主要有3个。



表 6 城市交通拥塞因子分析结果

Table 6 Results of urban traffic congestion factor analysis

交通拥塞因子	因子			Kaiser 旋转后因子		
	1	2	3	1	2	3
$B_1$	0.75	0.35	-0.25	0.64	0.67	-0.29
$B_2$	0.12	-0.15	0.43	0.09	-0.03	0.38
$B_3$	0.34	-0.32	0.82	0.34	0.19	0.78
$B_4$	0.51	-0.58	0.58	0.65	0.03	0.56
$B_5$	0.21	0.65	0.36	0.18	0.78	0.31
$B_6$	0.49	-0.63	0.65	0.51	-0.06	0.76
$B_7$	0.25	-0.39	0.09	0.32	0.12	0.09
$B_8$	0.43	-0.52	0.19	0.36	-0.09	0.28
$B_9$	0.24	-0.41	-0.01	0.27	-0.19	0.04
$B_{10}$	0.19	-0.31	-0.09	0.24	0.04	-0.03
$B_{11}$	0.55	-0.65	0.25	0.61	-0.21	0.29
$B_{12}$	0.63	-0.45	0.64	0.75	-0.03	0.56
$B_{13}$	0.35	-0.37	0.58	0.28	0.08	0.51
$B_{14}$	0.31	-0.21	0.67	0.42	0.26	0.69
$B_{15}$	0.45	-0.71	0.24	0.52	-0.13	0.31
$B_{16}$	0.33	0.53	0.13	0.37	0.85	0.19
$B_{17}$	0.13	-0.51	0.06	0.19	-0.12	0.18
$B_{18}$	0.85	-0.24	0.34	0.92	0.37	0.29
特征值	3.52	2.81	2.14	3.52	2.81	2.14
解释总方差/%	37.41	19.76	14.58	33.56	24.43	13.76

从 Kaiser 旋转后因子矩阵中各项系数大小来看,因子 1 解释了整体的 33.56%,在突发交通事故、交通量、操作不当、启动损失时间上有较大载荷,且载荷依次减小;因子 2 解释了整体的 24.43%,在交通拥塞长度、停车、启动损失时间有较大载荷,且载荷依次减小;因子 3 解释了整体的 13.76%,在随意变换车道、违法违规占用道路上有较大载荷,且载荷依次减小。在每个因子上具有较大载荷的元素,载荷系数都大于 0.6。

由图 6 可知:①研究期间城市交通拥塞中  $\sum_{i=1}^{18} B_i$  主要有 3 个来源,即源 1 为人为源,源 2 为环境源,源 3 为管理源。②2021 年 1 月~6 月期间,人为源贡献率为 30.11%,环境源贡献率为 33.99%,管理源贡献率为 35.90%。③2021 年 7 月~12 月期间,人为源贡献率为 29.71%,环境源贡献率为 34.71%,管理源贡献率为 35.58%。2021 年 7 月~12 月人为源、管理源贡献率较 2021 年 1 月~6 月有较小下降,可能是因贵阳市城市交通安全整治行动的持续推进,导致影响城市交通拥塞的主要源比例下降。

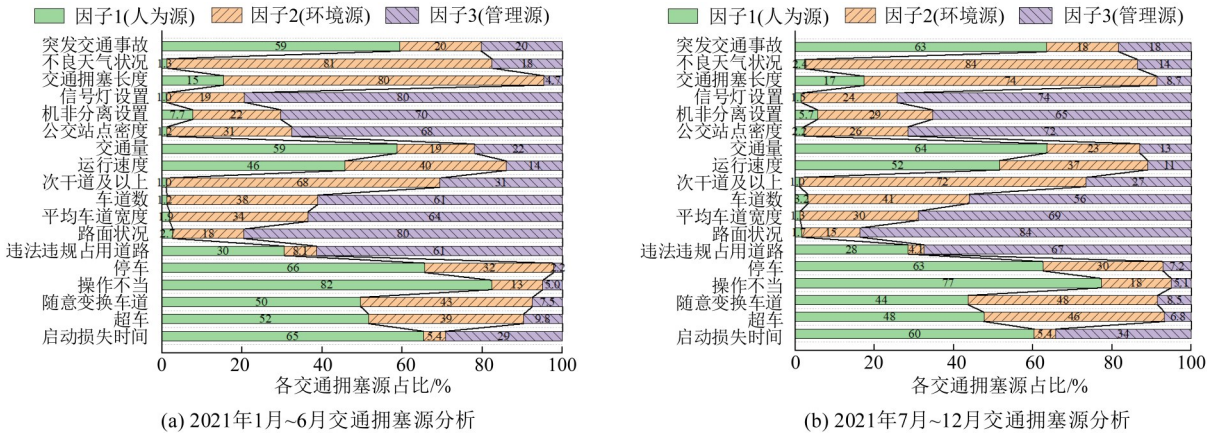


图 6 基于 PMF 模型的城市交通拥塞程度源解析

Fig. 6 Analysis of urban traffic congestion level sources based on PMF model

3.5 城市交通拥塞因子源解析的不确定性分析

使用模型预测值和实测值的决定系数( $R^2$ )评估模型可靠性。如表 7 所示,大多数交通拥塞因子决定系数( $R^2$ )高于 0.80,较高的  $R^2$  值表明 PMF 模型中预测值很好地解释了实测值的变化。

通过表 8 可以看出,利用 DISP 法对城市交通拥塞因子交换(swaps)现象和下降百分数(dQ)进行评估。本文研究区域的 dQ 值均低于 1.00%,且 swaps

值均为 0,因此,可以判定未发生因子交换现象。

采用 BS 对 PMF 模型基础运行的重现性进行验证,通过对不同的城市交通拥塞数据进行计算,得到城市交通拥塞因子的匹配率,评估每个因子的不确定性。一般匹配率越高,基础运行重现性越理想。BS 因子与各基本因子匹配率均为 80%以上,表明该方案下  $Q$  变化不显著,该情景方案较稳定。

表 7 城市交通拥塞因子实测值与PMF  
模型预测值之间的关系  
Table 7 Relationship between measured values of urban  
congestion factors and predicted values of PMF models

交通拥 塞因子	2021年1月~6月			2021年7月~12月		
	截距	斜率	$R^2$	截距	斜率	$R^2$
$B_1$	25.36	0.85	0.85	32.69	0.86	0.89
$B_2$	34.23	0.92	0.69	36.58	0.89	0.72
$B_3$	6.35	0.73	0.96	12.36	0.81	0.89
$B_4$	12.36	0.56	0.78	16.68	0.68	0.83
$B_5$	19.65	0.42	0.76	21.56	0.49	0.72
$B_6$	19.85	0.69	0.84	24.32	0.62	0.89
$B_7$	23.52	0.87	0.85	27.54	0.81	0.81
$B_8$	19.86	0.69	0.89	21.45	0.73	0.79
$B_9$	69.52	0.72	0.84	72.36	0.76	0.83
$B_{10}$	45.36	0.64	0.76	59.64	0.68	0.79
$B_{11}$	32.58	0.58	0.79	45.69	0.63	0.83
$B_{12}$	73.69	0.63	0.82	79.12	0.69	0.78
$B_{13}$	113.26	0.49	0.86	153.26	0.51	0.81
$B_{14}$	95.26	0.67	0.81	124.12	0.59	0.83
$B_{15}$	42.36	0.49	0.83	51.31	0.53	0.76
$B_{16}$	58.74	0.52	0.92	64.54	0.43	0.85
$B_{17}$	65.96	0.63	0.94	72.36	0.54	0.84
$B_{18}$	85.25	0.98	0.96	84.69	0.92	0.89

表 8 城市交通拥塞因子实测值与PMF  
模型预测值之间的关系  
Table 8 Relationship between measured values of urban  
congestion factors and predicted values of PMF models

诊断	2021年1月~6月	2021年7月~12月
错误代码	0	0
dQ/%	0.13	0.26
swaps/%	0	0
匹配率/%	82, 83, 100	86, 100, 84

4 结论

本文得到的主要结论如下：

(1) 城市交通拥塞单因子特征表明,超车、违反交通规则、随意变换车道、停车、违法违规占用道路、不良天气状况、突发交通事故这7个因子的变异性较强,路面状况、次干道及以上占比两个因子属弱变异程度,其余9个因子属于中低程度变异。

(2) 城市交通拥塞程度因子 $\sum_{i=1}^{18} B_i$ 大小呈先快速下降后波动不大的趋势,在2021年2月和9月发生显著突变。8a(第1主周期)和4a(第2主周期)是城市交通拥塞程度的特征时间尺度。

(3) 通过利用内梅罗污染指数法对交通拥塞因子进行评价,得到的结果大部分处于中等及以上交通拥塞级别,总体危害程度较大。城市交通拥塞源解析得到主要有为人源、环境源、管理源这3个来

源,2021年1月~6月和2021年7月~12月的各源贡献率变化不明显。

本文只考虑了单一方法对城市交通拥塞程度进行评价,后续工作重点结合多种方法进行评价比选,以期实现对城市交通拥塞程度的深度评价。

参考文献

[1] LIZBETIN J, BARTUSKA L. The influence of human factor on congestion formation on urban roads[J]. Procedia Engineering, 2017, 187: 206–211.

[2] RAHMAN M M, NAJAF P, FIELDS M G, et al. Traffic congestion and its urban scale factors: Empirical evidence from American urban areas[J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2022, 16(5): 406–421.

[3] ZHOU Y, MAO S, ZHAO H, et al. How rainfalls influence urban traffic congestion and its associated economic losses at present and in future: Taking cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China for example?[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2022, 150(1/2): 537–550.

[4] ZHANG M, LIU Y, XIAO Y, et al. Vulnerability and resilience of urban traffic to precipitation in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(23): 12342.

[5] SUN C, LU J. The relative roles of socioeconomic factors and governance policies in urban traffic congestion: A global perspective[J]. Land, 2022, 11(10): 1616.

[6] MOYANO A, STEPNIAK M, MOYA-GÓMEZ B, et al. Traffic congestion and economic context: Changes of spatiotemporal patterns of traffic travel times during crisis and post-crisis periods[J]. Transportation, 2021, 48 (6): 3301–3324.

[7] 胡立伟, 杨锦青, 何越人, 等. 基于改进 BP 神经网络的城市交通拥塞环境下车辆运行风险识别研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(10): 105–113. [HU L W, YANG J Q, HE Y R, et al. Study on vehicle operational risk identification in urban traffic congestion based on improved BP neural network[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36 (10): 105–113.]

[8] 孙建平, 郭继孚, 张溪, 等. 基于速度变化的偶发性交通拥堵时空分布特性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(2): 196–201. [SUN J P, GUO J F, ZHANG X, et al. Spatial and temporal distribution of occasional congestion based on speed variation[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(2): 196–201.]

[9] 韦清波, 何兆成, 郑喜双, 等. 考虑多因素的城市道路交通拥堵指数预测研究[J]. 交通运输系统工程与信息

- 息, 2017, 17(1): 74–81. [WEI Q B, HE Z C, ZHENG X S, et al. Prediction of urban traffic performance index considering multiple factors[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(1): 74–81.]
- [10] 王晓旭, 王丽珍, 王家龙. 交通数据的时空并置模糊拥堵模式挖掘[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(8): 683–692. [WANG X X, WANG L Z, WANG J L, et al. Mining spatio-temporal co-location fuzzy congestion patterns from traffic datasets[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(8): 683–692.]
- [11] 张光南, 钟俏婷, 杨清玄. 交通违法事故时空分布特征及其影响因素: 以广州市为例[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(3): 208–214. [ZHANG G N, ZHONG Q T, YANG Q X. Temporal-spatial characteristics and influencing factors of at-fault traffic crashes: A case study in Guangzhou[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(3): 208–214.]
- [12] ANDREO B, GOLDSCHIEDER N, VADILLO I, et al. Karst groundwater protection: First application of a pan-european approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Libar (Southern Spain) [J]. Science of the Total Environment, 2006, 357(1/3): 54–73.
- [13] WANG Z, HUA P, LI R, et al. Concentration decline in response to source shift of trace metals in Elbe River, Germany: A long-term trend analysis during 1998–2016 [J]. Environmental Pollution, 2019, 250: 511–519.
- [14] SU X Q, AN J L, ZHANG Y X, et al. Prediction of ozone hourly concentrations by support vector machine and kernel extreme learning machine using wavelet transformation and partial least squares methods[J]. Atmospheric Pollution Research, 2020, 11(6): 51–60.
- [15] YAO Y, HE C, LI S, et al. Properties of particulate matter and gaseous pollutants in Shandong, China: Daily fluctuation, influencing factors, and spatiotemporal distribution[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 384–394.
- [16] 陈佳木, 吴志华, 刘文浩, 等. 湖南水口山多金属矿区废石堆重金属污染评价及赋存形态分析[J]. 地球科学, 2021, 46(11): 4127–4139. [CHEN J M, WU Z H, LIU W H. Heavy metal pollution evaluation and species analysis of waste rock piles in Shuikoushan, Hunan Province[J]. Earth Science, 2021, 46(11): 4127–4139.]
- [17] WANG Z, SHEN Q, HUA P, et al. Characterizing the anthropogenic-induced trace elements in an urban aquatic environment: A source apportionment and risk assessment with uncertainty consideration[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 275: 111288.
- [18] DONG L, ZHANG J. Predicting polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water by a multiscale feature extraction-based deep learning approach[J]. Science of the Total Environment, 2021, 799: 149509.
- [19] BROWN S G, EBERLY S, PAATERO P, et al. Methods for estimating uncertainty in PMF solutions: Examples with ambient air and water quality data and guidance on reporting PMF results[J]. Science of the Total Environment, 2015, 518: 626–635.