

基于 GIS 的高速公路交通事故时空分析系统<sup>\*</sup>朱芳琪<sup>1</sup>, 邱泽航<sup>1</sup>, 张泽旭<sup>2</sup>(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙理工大学 公路地质灾变  
预警空间信息技术湖南省工程实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 针对传统数理统计方法对交通事故的时空分析可视化效果差且多发路段识别等数据挖掘深度不足的问题, 提出并建立基于地理信息系统(GIS)的高速公路交通事故时空分析系统。为准确掌握交通事故时空分布特征和识别事故时空多发路段, 在传统数理统计方法的基础上, 结合 GIS 与改进的时空密度聚类方法对高速公路交通事故进行时空可视化统计分析与事故多发路段识别; 利用 2016—2018 年湖南省高速公路交通事故数据进行测试, 结果表明该系统可直观展示 2016—2018 年湖南省高速公路交通事故时空分布特征和事故多发路段。

**关键词:** 交通安全; 交通事故; 高速公路; 事故多发路段; 地理信息系统(GIS); 时空分析

**中图分类号:** U491.31

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2023)02-0025-07

近年来, 尽管人们的道路交通安全意识逐年提高, 但中国交通问题仍然异常严峻。统计数据显示, 2019 年机动车交通事故造成 221 309 人严重受伤、56 934 人丧生, 直接财产损失达 125 800.9 万元<sup>[1]</sup>。从总体趋势来看, 每年的交通事故数量虽然呈下降趋势, 但其造成的人员伤亡和财产损失仍在不断上升。交通事故时空分布是目前交通安全领域的研究热点, 也是提高道路交通安全系数、有针对性地提出交通安全措施的关键所在<sup>[2-3]</sup>。

现阶段对交通事故的时空分析方法主要有数理统计方法、空间统计方法和交通冲突法<sup>[4-9]</sup>。姚胜彪等统计单位路段发生的交通事故数, 对事故分布进行拟合, 分析突变点以确定事故多发点<sup>[10]</sup>。刘谷等提出考虑道路线形的单元法, 对累计频率法进行优化<sup>[11]</sup>。但基于数理统计方法的事故多发路段鉴别大多是从样本数据间相互独立的前提出发, 没有顾及交通事故之间的空间相关性。此外, 这类方法需要对路网进行分段处理, 容易得出“割裂分析”结果<sup>[12]</sup>。随着互联网和地理信息系统(GIS)的发展, 对时空数据处理方法的研究越来越多。时空数据是时空过程的产物, 时空数据分析是从时空数据出发, 研究其蕴藏的时空规律<sup>[13-14]</sup>。GIS 具有强大的空间分析功能, 可以对空间数据中蕴含的格局、关系和趋势进行可视化, 可用于描述非常复杂的数据信

息<sup>[15-16]</sup>, 因而被广泛应用于交通事故分析。Mandloi D.、郭晓魁等提出利用 GIS 鉴别事故多发路段, 对道路特征参数赋予权重, 对道路安全进行评价<sup>[17-18]</sup>。Yamada I.等提出在路网约束和最短路径距离影响下, 网络 K 函数更适用于分析事故点的聚类规律<sup>[19]</sup>。Okabe A.等利用 Voronoi 图、网络核密度估计、网络 Huff 模型等方法分析发生在道路上的事件<sup>[20]</sup>。目前, 大部分学者对交通事故多发路段的研究仅关注其在空间上的聚集, 而未考虑时间对交通事故的影响, 将时间和空间割裂来分析交通事故聚集并不全面, 无法掌握交通事故多发路段的时空分布特征。谢练等提出对道路进行不同基本单元长度划分会导致鉴别结果差异, 即会产生地理学上的可塑性面积单元问题(MAUP)<sup>[21]</sup>。本文综合高速公路交通现状及目前交通事故时空分析方法, 以湖南省高速公路为研究对象, 借助 GIS 的二次开发平台进行高速公路交通事故时空分析系统研发。

## 1 系统设计与主要功能模块

高速公路交通事故时空分析系统借助 Microsoft Visual Studio C# 与 ArcGIS Engine 二次开发平台进行设计开发。ArcGIS Engine 是用于构建定制应用的一个完整的嵌入式 GIS 组件库, 具有简洁、灵活、易用、可移植性强等特点, 利用 ArcGIS En-

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41971421; 41601495); 湖南省教育厅科学研究项目(18C0228)

gine,开发者能将 ArcGIS 功能集成到一些应用软件。该系统的主要功能模块包括数据预处理、事故

属性查询、概况简介、地图展示、事故时空统计、多发路段识别等,各模块的功能见图 1、表 1。

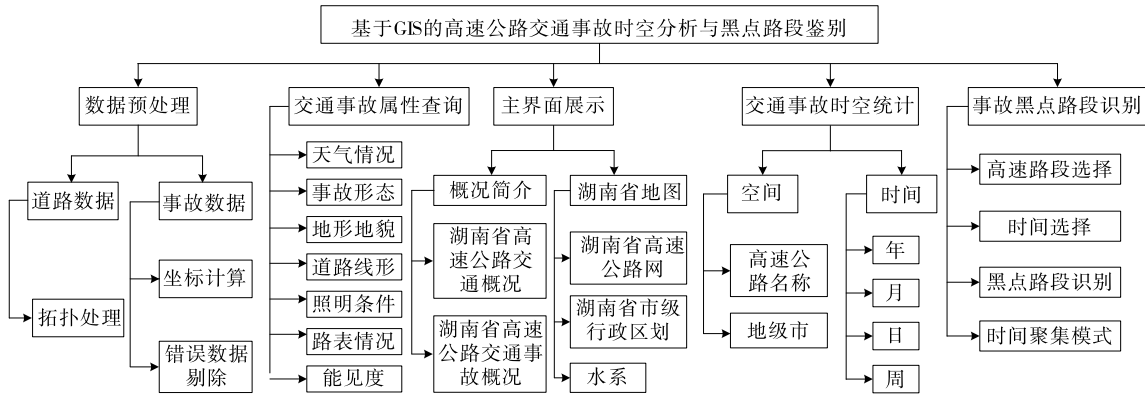


图1 高速公路交通事故时空分析系统的功能

表1 高速公路交通事故时空分析系统的功能模块说明

功能模块	功能名称	属性	功能描述
地图操作	打开地图文档	工具栏按钮	打开地图文档
	放大	工具栏按钮	通过鼠标点击或鼠标框选实现地图放大
	缩小	工具栏按钮	通过鼠标点击或鼠标框选实现地图缩小
	全图	工具栏按钮	将缩放后的地图展示界面恢复全图显示状态
	添加数据	工具栏按钮	添加各类型图层数据
属性查询	事故属性查询	组合框控件	通过点击下拉菜单分别实现不同天气情况、事故形态、地形地貌、道路线形、照明条件、路表情况、能见度下事故发生情况显示
时空统计	事故时空统计	工具栏按钮	通过点击相应空间按钮查看事故的空间分布,点击相应时间按钮查看事故的时间分布
路段识别	路段	组合框控件	点击下拉菜单选择需查询的高速公路名称
	时间	组合框控件	点击下拉菜单选择时间
	多发路段识别	工具栏按钮	点击该选项实现多发路段识别

### 1.1 数据预处理

由于交通事故点的位置信息是以里程桩号+道路名称的形式给出,无法直接确定其具体位置,先采用线性插值法解算每个事故点的坐标,计算原理见图2,然后将这些事故点匹配到高速公路网中。需要注意的是,事故点的里程桩号起点是从整个高速公路起点开始计算,而高速公路的起点不一定在研究区域内,需要整理研究区域内的高速公路数据,确定起始里程、通行方向等。

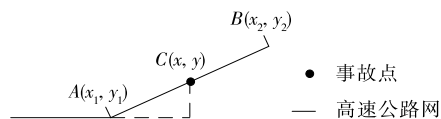


图2 事故点位置坐标计算原理示意图

### 1.2 交通事故属性查询

按照天气情况、事故形态、地形地貌、道路线形、

照明条件、路表情况、能见度等条件进行交通事故统计,将天气情况划分为晴、阴、雨、雪、雾、霾、大风等,事故形态划分为侧翻、刮撞行人、滚翻、碰撞运动车辆、碾压行人等,地形地貌划分为丘陵、山区、平原等,道路线形划分为平直、弯坡、连续下坡、陡坡等,照明条件划分为白天、黄昏、黎明、夜间有路灯照明与夜间无路灯照明等,路表情况划分为干燥、潮湿、冰雪、积水、漫水等,能见度分为 $\geq 200$  m、 $\geq 100 \sim 200$  m、 $\geq 50 \sim 100$  m、 $< 50$  m,基于各类情况展示交通事故属性查询饼状图,通过饼状图查看每个属性所占比例,以此判断何种情况为事故高发情况、何种情况有利于行车安全等。当用户点击每类属性下不同子类时,可在路网地图中查看相应的事故点,有助于进行事故分析与规避。

### 1.3 交通事故时空统计

在空间上,按高速公路名称或地级市(地区)统

计湖南省各高速公路路段或城市(地区)间高速公路在 2016—2018 年的交通事故量,得到高速公路交通事故发生量,进而比较各高速公路路段或城市(地区)间高速公路交通事故总量差异,分析最多高速公路交通事故量的路段或城市(地区)和最少高速公路交通事故量的路段或城市(地区),总结高速公路交通事故在空间上的分布特征。在时间上,按年、月、日、周统计 2016—2018 年湖南省高速公路事故发生量,比较不同时段高速公路交通事故数量,分析高速公路事故发生的高频时段与低频时段,得出其在时间上的分布特征。

1.4 事故多发路段识别

1.4.1 DBSCAN 密度聚类算法

DBSCAN(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)密度聚类算法适用于交通事故多发路段的识别<sup>[22-23]</sup>。它善于发现空间数据库中任意形状和大小的聚类,同时可以区分噪声点,通过用户设定的邻域半径值  $E_{ps}$  和邻域内最少点数,将具有足够高密度的区域划分为簇(见图 3)。

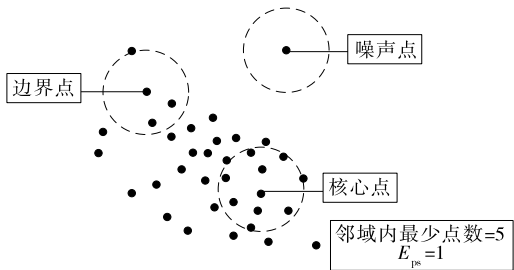


图 3 DBSCAN 密度聚类算法示意图

DBSCAN 密度聚类算法通过空间数据库中每个点的邻域来寻找聚类。当点  $p$  邻域内的点多于最少点数时,将  $p$  标记为核心点;往复查询核心点的密度可达的对象,将密度可达的簇合并;遍历所有点后没有点可以加入任何簇时,聚类结束<sup>[24]</sup>。

1.4.2 时空 DBSCAN 密度聚类

在传统密度聚类算法的基础上进行改进,将时间和空间距离作为约束条件,得到交通事故多发路段的时空分布特征。该系统首先对事件点的时间属性进行极坐标变换,以变换所得角度正弦值的差值作为时间距离;然后将  $E_{ps1}$  作为空间距离阈值,用来度量两点在地理空间上的相似程度,将  $E_{ps2}$  作为时间距离阈值,用于度量时间上的相似程度。计算公式如下:

$$E_{ps1} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$
 (1)

$$E_{ps2} = \sin \frac{1}{2} |\theta_{T2} - \theta_{T1}|$$
 (2)

式中:  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$  分别为两点坐标(m);  $\theta_{T1}$ 、 $\theta_{T2}$  分别为两点的角度(°)。

根据道路发生交通事故的数量及后果,将交通事故多发点按照《公安部关于修订道路交通事故等级划分标准的通知》划分为一类、二类、三类、四类和五类,不同等级的事故赋予不同权重重新定义时空 DBSCAN 算法中的邻域点数。其中:一类点的条件为事故未造成人员伤亡;二类点的条件为事故造成轻伤 1~2 人;三类点的条件为事故造成重伤 1~2 人、轻伤 3 人以上;四类点的条件为事故造成死亡 1~2 人、重伤 3 人以上 10 人以下;五类点的条件为事故造成死亡 3 人以上、重伤 11 人以上或死亡 1 人、重伤 8 人以上或死亡 2 人、重伤 5 人以上。

2 系统的实现与结果分析

该系统使用的试验数据为 2016—2018 年湖南省高速公路一般事故和简易事故数据。试验数据的收集遵循 GA 40—2008《道路交通事故案卷文书》,其中简易事故录入项目表中部分信息,一般事故录入项目表中全部内容。原始数据信息见表 2,基于 GIS 的高速公路交通事故时空分析系统设计界面见图 4。

表 2 湖南省高速公路部分交通事故原始数据

字段名称	示例
发生时间	01/01/2016 00:40:00
路名	沪昆(上海—昆明)高速公路
公里数/km	1 245.9
事故地点	沪昆高速公路湖南段西往东
天气情况	晴、阴、雨、雪、雾等
事故形态	撞运动车辆、刮撞行人等
地形地貌	平原、丘陵、山区
道路线形	平直、一般弯、急弯等
照明条件	白天、夜间无路灯照明等
路表情况	干燥、潮湿、积水、冰雪等
能见度/m	<50、50~100 等
道路物理隔离	无隔离、中心隔离等
中央隔离设施	绿化带、混凝土护栏等
路口路段类型	匝道口、桥梁、隧道等
单车事故	撞护栏、山体、桥墩等
道路横断面位置	机动车道、人行道等
7 d 内死亡人数/人	0、1、2、3 等
7 d 内受伤人数/人	0、1、2、3 等

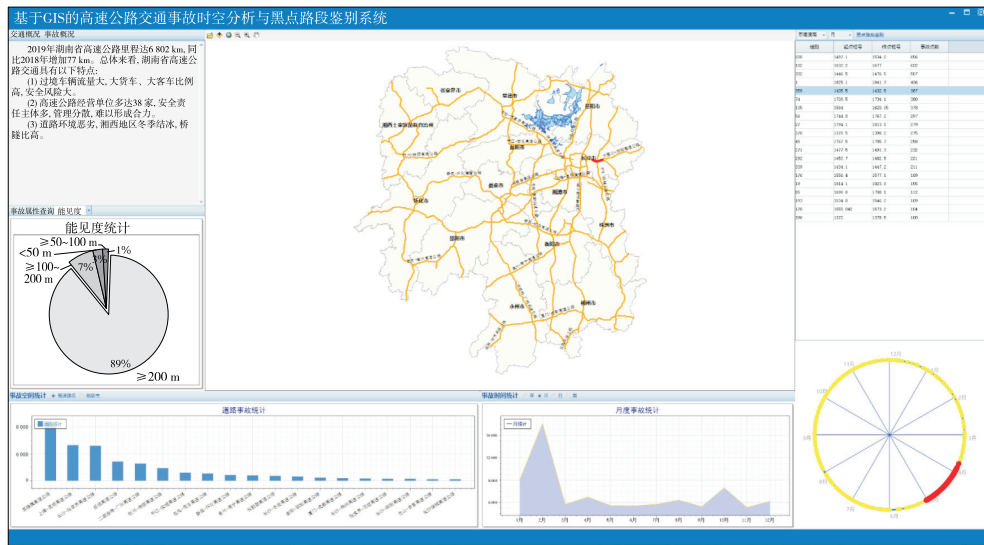


图4 基于GIS的高速公路交通事故时空分析系统的设计界面

## 2.1 交通事故属性查询功能的实现

属性查询功能模块可查询湖南省2016—2018年高速公路交通事故的天气情况、事故形态、地形地貌、道路线形、照明条件、路表情况、能见度等事故属性。以天气情况和事故形态为例,图5(a)为不同天气情况下交通事故发生占比,即在晴天、雨天、阴天、雪天、雾天等常见天气情况下发生的交通事故占全部交通事故的比例;图5(b)为不同事故形态的占比,即碰撞运动车辆、碰撞静止车辆、碰撞固定物等事故形态发生量所占比例。

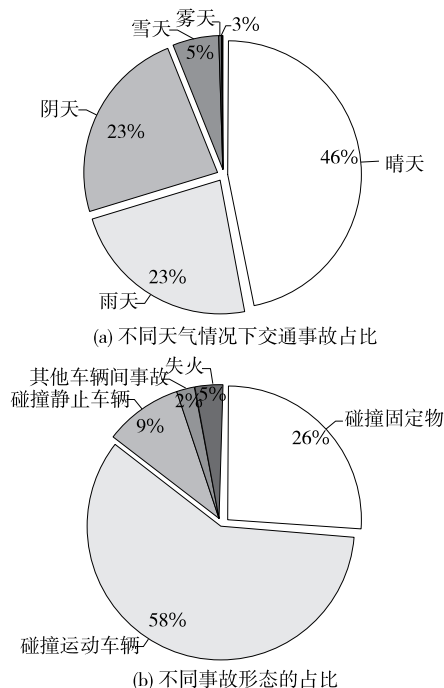


图5 受天气情况和事故形态影响的交通事故发生规律

从图5(a)可看出:晴天时交通事故发生量占46%,雨天占23%,阴天占23%,雪天占5%,雾天占3%。湖南省为大陆性亚热带季风湿润气候,全年晴天、雨天居多,雪天极少,天气情况以晴天为主,阴天和雨天各占一定比例;从总体天气情况来看,虽然雨、雪、雾天气持续时间不长,但对高速公路交通事故的影响较大,需重点关注雨、雪、雾等不利天气下交通安全防护与管理,驾驶员在遇到这类天气时需特别注意行车安全。

从图5(b)可看出:由碰撞运动车辆导致的交通事故占58%,由碰撞固定物导致的交通事故占26%,由碰撞静止车辆导致的交通事故占9%,由失火及其他车辆间事故导致的交通事故占7%,事故形态以碰撞运动车辆为主,碰撞固定物及碰撞静止车辆也占一定比例。说明在高速公路上,车辆碰撞护栏、路侧山体、防撞墩等固定物的比例也较高,少数情况下有车辆静止在原地等待(如互通立交出入口处有车辆驶入或驶离时),这是比较危险的驾驶行为。

## 2.2 交通事故时空统计功能的实现

### 2.2.1 空间统计

图6为按高速公路名称统计的交通事故量分级图,图中曲线代表各条高速公路,曲线宽窄代表事故发生量大小,曲线越宽表示该高速公路事故发生量越多。

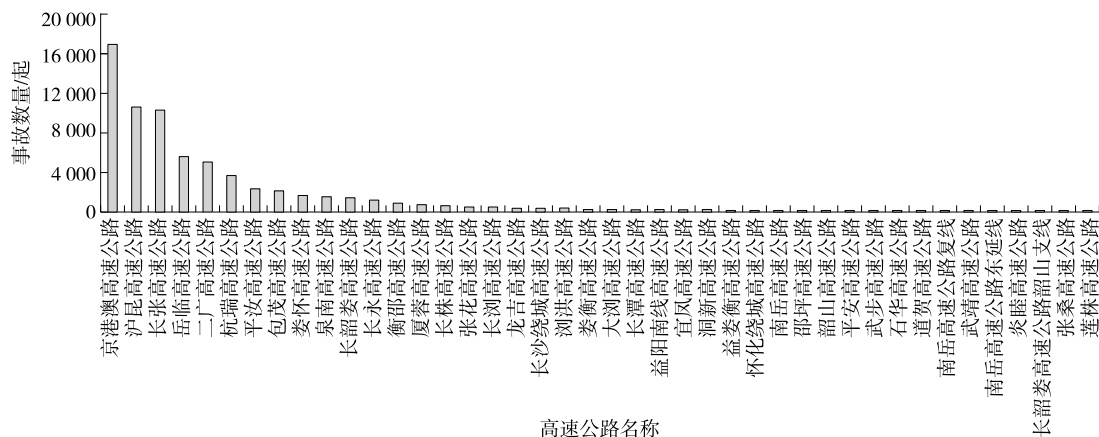
图7为2016—2018年湖南省各高速公路的交通事故发生量,图8为2016—2018年湖南省各地区高速公路的交通事故发生量。从图7可看出:京港澳高速公路事故发生量为16 957起,沪昆高速公路





杭瑞高速公路:杭州—瑞丽高速公路;长张高速公路:长沙—张家界高速公路;长韶娄高速公路:长沙—韶山—娄底高速公路;京港澳高速公路:北京—香港—澳门高速公路;衡邵高速公路:衡阳—邵阳高速公路;包茂高速公路:包头—茂名高速公路;泉南高速公路:泉州—南宁高速公路;平汝高速公路:平江—汝城高速公路;岳临高速公路:岳阳—临武高速公路;宜凤高速公路:宜章—凤头岭高速公路

图6 湖南省高速公路交通事故量分级图



二广高速公路:二连浩特—广州高速公路;娄怀高速公路:娄底—怀化高速公路;长永高速公路:长沙—永安高速公路;厦蓉高速公路:厦门—成都高速公路;长株高速公路:长沙—株洲高速公路;张花高速公路:张家界—花垣高速公路;长浏高速公路:长沙—浏阳高速公路;龙吉高速公路:龙山—吉首高速公路;浏洪高速公路:浏阳—洪口高速公路;娄衡高速公路:娄底—衡阳高速公路;大浏高速公路:大围山—浏阳高速公路;长潭高速公路:长沙—湘潭高速公路;洞新高速公路:洞口—新宁高速公路;益娄衡高速公路:益阳—娄底—衡阳高速公路;南岳高速公路:衡阳市南岳区—石鼓区高速公路;邵坪高速公路:邵阳—坪上高速公路;平安高速公路:平江—安化高速公路;武步高速公路:武冈—城步高速公路;石华高速公路:石首—华容高速公路;道贺高速公路:道州—贺州高速公路;武靖高速公路:武冈—靖州高速公路;炎陵高速公路:炎陵—井冈山睦村高速公路;张桑高速公路:张家界—桑植高速公路;莲株高速公路:莲花—株洲高速公路

图7 按高速公路名称统计的交通事故量

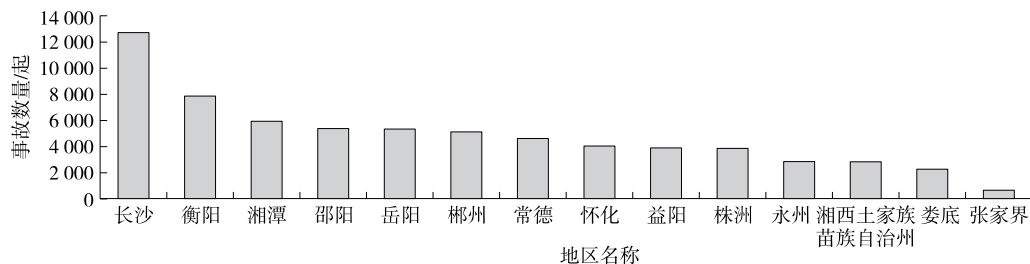


图8 按地区统计的交通事故量

事故发生量为10 412起,长张高速公路事故发生量为10 226起,这3条高速公路上事故发生量均过万,位居前三;岳临高速公路事故发生量为5 548起,二广高速公路事故发生量为4 922起,杭瑞高速公路事故发生量为3 555起,事故发生量也较多。从图8可看出:长沙市高速公路累计发生交通事故12 761起,衡阳市高速公路累计发生事故7 771起,湘潭市高速公路累计发生事故5 849起,张家界市高速公路累计发生事故555起,长沙为交通事故最为多发的城市,其次是衡阳和湘潭,张家界是发生高速公路交通事故最少的城市,总体来讲,交通事故数量呈东多西少的分布形态。造成上述分布特征的主要原因是湖南省各地区人口与经济差异较大引起人口流动及近年来城市化进程迅猛导致各地区间交流不断加深。

### 2.2.2 时间统计

图9为按地区统计的交通事故量分级图,图中各色块分别代表不同的地区,色块颜色深浅代表事故发生量大小,颜色越深表示该地区事故发生量越多。

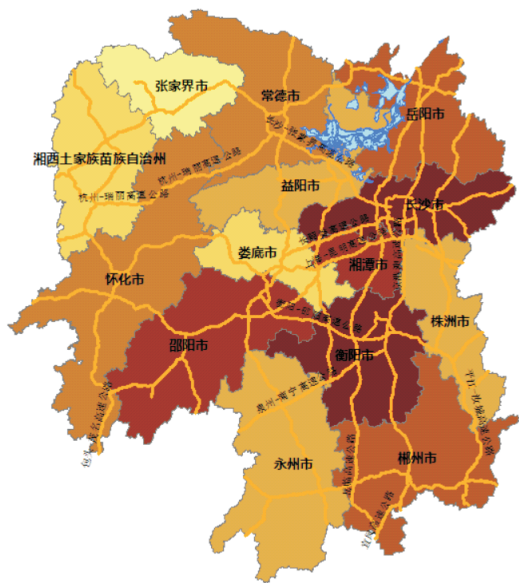
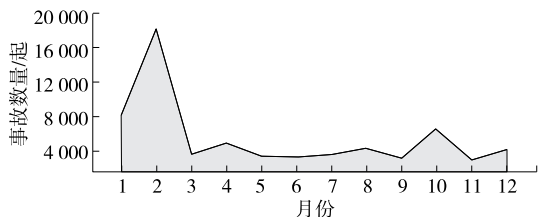
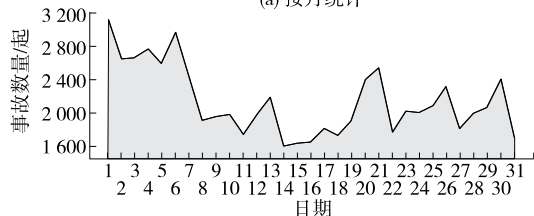


图9 湖南省各地区交通事故量分级图

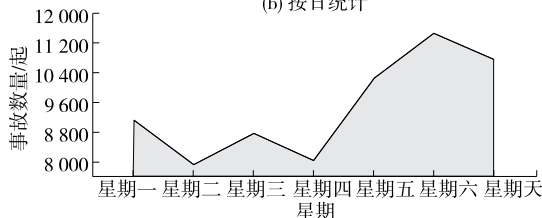
如图10(a)所示,2016—2018年,1月高速公路交通事故发生量共计8 011起,2月共计18 119起,4月共计4 898起,10月共计6 562起,事故发生数量排前三的月份分别为2月、1月和10月,事故数均超过5 000起;1—12月高速公路交通事故数量呈现由高到低再小幅增高的态势,其主要原因可能是春节和国庆节假期较长,人员流动范围大,交通出行量激增。



(a) 按月统计



(b) 按日统计



(c) 按周统计

图10 按月、日、周统计的交通事故量

如图10(b)所示,1号、6号、13号、20号、26号和30号的高速公路交通事故数量高,说明事故主要发生在每月上旬,下旬次之,中旬发生的事故较少。

如图10(c)所示,星期一交通事故发生量为9 129起,星期二为7 944起,星期三为8 770起,星期四为8 044起,星期五为10 245起,星期六为11 449起,星期天为10 760起,星期一到星期四高速公路事故数量分布较均衡,星期五、星期六和星期天发生的事故略高,均超过10 000起。其原因可能是假期人们的出行需求增多,高速公路上车流量较大。

### 2.3 交通事故时空统计功能的实现

横穿湖南省南北的京港澳高速公路是交通事故数量最多的高速公路,整条高速公路上的交通事故数量分布均匀。长张高速公路为交通事故较严重的高速公路,交通事故主要集中于其东侧。整体来说,湖南省高速公路交通事故主要集中在东北部地区,自西向东,高速公路交通事故数量的变化特征是先增加到一个最大值后减少;从南北方向看,高速公路交通事故分布较均匀,北部地区事故数量比南部地区略多。

将各路段按风险等级进行划分,一类风险路段和二类风险路段主要集中在京港澳和长张高速公路的长株潭段、杭瑞高速公路怀化段等,京港澳高速公路郴州段等也分布有部分二类风险路段;三类风险路段较多,分布较广,多集中在长株潭、怀化;四类风险路段在长株潭、怀化基本没有分布,包茂高速公路上四类风险路段比其他高速公路多,京港澳和二广高速公路上四类风险路段分布较少。图11为京港澳高速公路按月度进行交通事故多发路段识别的结果。

## 3 讨论与分析

基于GIS的高速公路交通事故时空分析系统具有交通事故属性查询、空间统计、时间统计、事故多发路段识别等功能,便于使用者进行不同条件下事故查询、事故高发路段识别、地图浏览与缩放等,进而了解湖南省高速公路交通事故的时空分布特征,精准判断事故高发时段与地区,更好地掌握高速公路交通事故发生机理,从而减少事故发生频率,降低事故伤害程度。

根据该系统的分析结果,湖南省高速公路交通事故总体空间分布特征为东北地区多、西部地区少,京港澳、沪昆和长张高速公路为事故量最多的3条

组别	起点桩号	终点桩号	事故点数
208	1497.1	1534.2	656
102	1632.2	1677.0	622
302	1446.5	1476.5	507
1	1825.1	1841.7	436
359	1405.5	1432.5	387
74	1708.5	1734.1	380
135	1584.0	1620.05	378
56	1744.8	1767.2	297
27	1794.1	1813.1	279
378	1378.5	1398.2	275
45	1767.5	1785.7	258
271	1477.5	1491.3	232
292	1452.7	1482.5	221
339	1434.1	1447.2	211
176	1556.4	1577.1	189
19	1814.1	1823.8	155
85	1696.8	1708.1	112
193	1534.8	1546.2	109
178	1555.042	1573.2	104
396	1372.0	1378.5	100

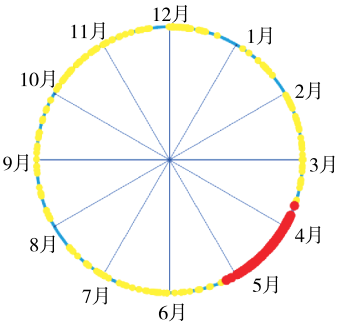


图 11 京港澳高速公路月度交通事故多发路段识别结果

高速公路,长沙为高速公路交通事故最为多发的城市,邻近长沙的长张高速公路的交通事故灾害最严重,事故发生数量从高到低排名前 5 位的依次为京港澳、沪昆、长张、岳临、二广高速公路;在时间方面,1 月和 2 月交通事故量最集中,2 月交通事故最多,11 月交通事故最少;星期一至星期四的事故量分布均匀,星期五、星期六事故量逐渐增加,星期天略有回落;一天中,中午和下午事故量集中,早晚事故量分布零散,多发时段为 10:00—11:00、15:00—16:00。

将传统数理统计方法和空间统计方法相结合进行事故多发区分析的方法依赖于所划分的单元尺度,存在可塑性面积单元问题,且可视化效果不佳。事故多发区具有空间和时间两方面的聚集模式,传统的交通事故分析模式通常将空间和时间割裂考虑,没有进行统一分析。基于 GIS 的高速公路交通事故时空分析系统采用改进的 DBSCAN 密度聚类方法,在时间、空间上分别使用时间和空间距离阈值,在时空上密度同时为高值的区域才能被识别为事故多发区,同时排除了可塑性面积单元问题的影

响,可准确、客观地反映高速公路事故多发区的时空分布特征,为交通安全整治提供依据。

4 结语

事故多发路段具有时空尺度不确定性,用统一的划分单元来度量事故发生频率存在一定局限,导致不同的划分单元鉴别结果不尽相同。基于 GIS 的高速公路交通事故时空分析系统通过改进的 DBSCAN 算法密度连接规则自适应识别各种尺度事故多发路段,并对其进行可视化分析,得到交通事故的空间分布特征和时间分布特征。该系统可解决传统数理统计方法对交通事故的时空分析可视化效果差且事故多发路段识别等数据挖掘深度不足的问题,有效提高交通管理部门的日常管理效率,帮助有关部门掌握高速公路交通事故发生机理,从而减少交通事故发生频率,降低交通事故伤害程度。该系统采用改进的时空密度聚类算法,能在时空角度对交通事故进行统一分析,且密度聚类算法能将密度足够高的区域划分为任意形状的簇,从而弥补传统方法的不足,为全面了解高速公路交通事故时空分布特征提供重要支持,为事故高发路段的精准判断提供有力依据。

参考文献:

[1] 中国统计年鉴编委会.2020 中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2020.

[2] 《中国公路学报》编辑部.中国交通工程学术研究综述·2016[J].中国公路学报,2016,29(6):1—161.

[3] 吴义虎,刘文军,肖旗梅.高速公路交通安全评价的层次分析法[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2006,3(2):7—11.

[4] 管满泉.交通事故多发点鉴别方法的比较研究[J].公路,2009(4):191—195.

[5] ERDOGAN S, YILMAZ I, BAYBURA T. Geographical information systems aided traffic accident analysis system case study: City of Afyonkarahisar [J]. Accident Analysis and Prevention, 2008, 40(1): 174—181.

[6] 范宝文, 向红艳. 山区高速公路路段危险度计算模型[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2013, 10(3): 39—43.

[7] 孟祥海. 道路交通安全管理技术与实践案例[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017: 44—59.

[8] 吴佩洁, 孟祥海, 曹梦迪. 城市交通事故多发点鉴别与时空模式挖掘[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(11): 127—133.

- 动系统二轮车测试场景研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(12):1435—1446+1453.
- [6] 周华,张巧玉,母尧尧,等.十字路口乘用车与二轮车典型危险场景聚类及推演[J].中国安全科学学报,2020, 30(4):100—107.
- [7] 上海机动车检测认证技术研究中心有限公司.摩托车和轻便摩托车术语 第 1 部分:车辆类型:GB/T 5359.1—2019[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [8] 徐向阳,周兆辉,胡文浩,等.基于事故数据挖掘的 AEB 路口测试场景[J].北京航空航天大学学报,2020, 46(10):1817—1825.
- [9] 周华,刘峰,李平飞,等.电动二轮车侧倾角对骑车人头部损伤影响研究[J].中国安全科学学报,2019,29(5): 79—84.
- [10] 章永来,周耀鉴.聚类算法综述[J].计算机应用,2019, 39(7):1869—1882.
- [11] 董琦璠.基于划分聚类算法的研究及其应用[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- [12] 田兵.系统聚类法及其应用研究[J].阴山学刊(自然科学版),2014,28(2):11—16.
- [13] 罗菲菲,刘贵全,安景琪,等.一种分层聚类方法及其应用研究[J].成都理工大学学报(自然科学版), 2005,32(6):649—652.
- [14] 马立平,张玉春.统计学原理[M].北京:电子工业出版社,2018:230—238.
- [15] 张巧玉.乘用车与二轮车典型危险场景改进聚类及推演[D].成都:西华大学,2021.
- [16] BO S, NILS L, JONAS B. A clustering approach to developing car-to-two-wheeler test scenarios for the assessment of Automated Emergency Braking in China using in-depth Chinese crash data[J]. Accident Analysis & Prevention, 2019, 132:105242.
- [17] 梁杰,陈嘉豪,张雪芹,等.基于独热编码和卷积神经网络的异常检测[J].清华大学学报(自然科学版), 2019,59(7):523—529.
- [18] 谢中华. MATLAB 统计分析与应用:40 个案例分析[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010:304—305.
- 收稿日期:2022—04—19

\*\*\*\*\*

(上接第 31 页)

- [9] 刘鹏飞,青伟,申绍君.道路交通事故黑点鉴别方法研究[J].公路与汽运,2022(6):41—43+59.
- [10] 姚胜彪,柳南高速公路事故多发路段鉴别分析及对策[J].西部交通科技,2017(5):93—97.
- [11] 刘谷,廖志高,马青娜.基于单元法的故事多发路段的鉴别分析[J].交通科技,2010(3):111—112+115.
- [12] THOMAS I. Spatial data aggregation: Exploratory analysis of road accidents[J]. Accident Analysis & Prevention, 1996, 28(2):251—264.
- [13] LI X, CHENG G D, LIU S M, et al. Heihe watershed allied telemetry experimental research (HiWATER): Scientific objectives and experimental design [J]. Bulletin of American Meteorological Society, 2013, 94(8):1145—1160.
- [14] 王劲峰,葛咏,李连发,等.地理学时空数据分析方法[J].地理学报,2014,69(9):1326—1345.
- [15] 杜敏,闻德保,周苏娅.基于 GIS 的公路边坡地质灾害危险性评价[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2018,15(4):59—65.
- [16] 朱庆.三维 GIS 及其在智慧城市中的应用[J].地球信息科学学报,2014,16(2):151—157.
- [17] MANDLOI D, GUPTA D. Evaluation of accident black spots on roads using geographical information system(GIS)[C]//Map India Conference, Transportation, 2003.
- [18] 郭晓魁,李瑞,陈罗刚,等.基于 GIS 的城郊公路交通事故时空分布研究[J].河北工业大学学报,2017, 46(5):62—67+73.
- [19] YAMADA I, THRILL J. Comparison of planar and network K function in traffic accident analysis[J]. Journal of Transport Geography, 2004, 12:149.
- [20] OKABE A, SUGIHARA K. Spatial analysis along networks: Statistical and computational methods[M]. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2012.
- [21] 谢练,吴超仲,吕能超,等.基于改进聚类算法的道路交通事故多发路段鉴别方法研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2014,38(4):904—908.
- [22] 黄钢,瞿伟斌,许卉莹.基于改进密度聚类算法的交通事故地点聚类研究[J].交通运输系统工程与信息, 2020,20(5):169—176.
- [23] 冯少荣,肖文俊.基于密度的 DBSCAN 聚类算法的研究及应用[J].计算机工程与应用,2007,43(20): 216—221.
- [24] 伍育红.聚类算法综述[J].计算机科学,2015,42(增刊 1):491—499+524.
- 收稿日期:2022—07—25