

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2023.02.002

基于 GIS 空间分析的城市行道树安全评估

董元彪, 肖鹏峰*, 刘 豪, 吴悠绿, 郭 瑞

(自然资源部国土卫星遥感应用重点实验室, 江苏省地理信息技术重点实验室,
南京大学地理与海洋科学学院, 南京, 210023)

摘 要:行道树安全性评估是城市树木安全防护的重要内容, 采用科学有效的方法评估行道树安全现状, 对城市安全精细化管理及行道树有机更新具有重要的现实意义. 以南京市主城区法桐行道树为例, 通过整合法桐行道树多种出险记录, 构建了南京市法桐行道树安全性调查数据库; 通过计算不同时空维度的出险频度来评价法桐行道树安全性; 利用 GIS 空间自相关分析方法, 探究了法桐行道树路段出险频度的空间分布特征. 结果显示, 玄武区、鼓楼区、秦淮区是南京市法桐行道树的高频出险行政区, 其中玄武区总出险频度最高, 达到 5.2%. 玄武区内北京东路-中山路-中山东路-太平北路所围街区是法桐行道树逐年高频出险路段集中区域. 法桐行道树出险路段在空间上存在显著热点, 其中鼓楼区的出险热点数量最多, 达到 23 条, 主要集中在中山路沿线路段. 法桐行道树出险的主要原因为断枝和车撞树, 分别占总出险事件的 38.34% 和 15.45%. 针对重点出险区域出险原因提出相应建议, 为未来行道树的城市管理提供参考.

关键词:法桐行道树, 出险频度, 安全状况, 空间自相关, 南京市

中图分类号:X

文献标志码:A

Safety assessment of urban street trees based on GIS spatial analysis

Dong Yuanbiao, Xiao Pengfeng*, Liu Hao, Wu Youlü, Guo Rui

(Key Laboratory for Land Satellite Remote Sensing Applications of Ministry of Natural Resources,
Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology,
School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing, 210023, China)

Abstract: Street tree safety assessment is an important part of urban tree safety protection. Using scientific and effective methods to assess the current status of street tree safety has important practical significance for the refined management of urban safety and the organic renewal of street trees. In this study, taking the *Platanus orientalis* street trees in the main districts of Nanjing city as an example, by integrating various accident records, the safety survey database of the street trees in Nanjing city was constructed. The accident frequency of different spatiotemporal dimensions in the main districts was calculated to evaluate the safety of *Platanus orientalis* street trees, the GIS autocorrelation analysis method was used to explore the spatial distribution characteristics of the accident frequency of the road sections of *Platanus orientalis*. The results show that Xuanwu District, Gulou District, and Qinhuai District are the areas with high-frequency of accident *Platanus orientalis* street trees, and Xuanwu District has the highest frequency of accidents, reaching 5.2%. The block surrounded by Beijing East Road-Zhongshan Road-Zhongshan East Road-Taiping North Road in Xuanwu District is a concentrated area of road sections with high-frequency accidents year by year. There are significant hot spots in space in the accident sections of *Platanus orientalis* street trees, among which Gulou District has the largest number of hot spots, reaching 23, and the highest hot spots are mainly concentrated in the sections along Zhongshan Road. The main reasons for the accident of *Platanus*

基金项目: 国家自然科学基金(41871235)

收稿日期: 2022-09-22

* 通讯联系人, E-mail: xiaopf@nju.edu.cn

orientalis street trees are broken branches and vehicles hitting trees, accounting for 38.34% and 15.45% of the total accidents, respectively. Corresponding suggestions are put forward for the reasons for the accidents in key areas, in order to provide reference for the urban management of *Platanus orientalis* street trees in the future.

Key words: *platanus orientalis* street trees, frequency of accident, safety status, spatial autocorrelation, Nanjing city

法桐(*Platanus orientalis*),学名悬铃木,原产于欧洲东南部及亚洲西部^[1-2],其树形高大,树干挺拔,寿命长,易养护管理,抗空气污染能力强^[3],是优良的城市绿化树种,有“行道树之王”的称号^[4-5]。法桐在南京有着悠久的栽培历史^[6-8],根据《南京市行道树树种规划(2014—2026)》,南京市现有行道树约 20 万株,其中法桐行道树约八万株,在南京行道树种类中占绝对优势,是南京的“城市名片”。

近年来,随着南京市主城区法桐行道树树龄增加,其长势逐渐衰弱,部分植株日益老化^[9];同时,由于生长环境的制约及病虫害影响,法桐行道树安全状况日益严峻,不断出现倒伏、断枝等险情,给广大市民的日常生活增加了安全风险,政府消险支出也不断增加。因此,掌握南京法桐行道树的安全现状已成为亟待解决的问题。

对南京市老城区行道树进行林分调查,发现法桐行道树树龄结构较稳定^[10]。分析南京市主干道行道树年轮中重金属元素的含量,发现行道树健康受城市环境污染的影响^[11]。还有研究从行道树安全生长的角度,调查了南京市行道树空腐树洞状况^[8]。调查南京市代表性行道树路段,运用层次分析法构建林荫道综合评价体系,分级评估行道树的景观质量^[12]。目前法桐行道树安全调查研究多侧重关注行道树自身生长态势,而通过收集行道树安全事故造成的出险记录,根据出险频度分析行道树安全状况的研究较少,园林绿化部门行道树出险记录对于行道树安全性分析的价值有待挖掘。同时,造成不同行政区或路段的法桐行道树出险原因各异,关于法桐出险事件是否存在空间集聚区域,也缺乏相应的数据分析。基于地理信息系统(GIS)的空间自相关与热点分析方法已经广泛应用于探究发病率、犯罪率、经济指标等数据的空间分布格局^[13-18],可利用该方法分析法桐行道树出险频度的空间分布特征。

本研究通过整合历年来南京市法桐行道树出险记录,构建法桐行道树安全性调查数据库,采用出险频度指标可视化主城各区和各路段法桐行道树出险特征和出险热点,并对法桐行道树出险原因进行分析,针对重点出险区域提出相应改进建议,为南京市主城区法桐行道树安全风险评估提供支撑,为南京市法桐行道树的管理和有机更新提供参考。

1 研究区域

南京市位于北纬 31°14′至 32°37′,东经 118°22′至 119°14′,地处中国东南部长江下游的宁镇扬丘陵地区^[19],属于北亚热带季风性气候,四季分明,雨水充沛^[20],其植被以常绿阔叶林和落叶阔叶林的混交林为主^[21-22]。主要行道树树种有法桐、东方杉、水杉、银杏、黄山栾树、榉树、雪松、国槐等^[23-24]。研究区域为南京市主城六区,分别是鼓楼区、玄武区、秦淮区、雨花台区、建邺区、栖霞区,共有 8.7591 万株法桐行道树,主要集中在主城区的中山东路、汉中路、中山北路、中央路、黄埔路等 20 多条林荫道。根据南京市法桐行道树的路段分布情况,研究对象为历年来 559 条法桐行道树分布路段中存在法桐行道树出险记录的路段。

2 研究方法

2.1 技术路线 法桐行道树安全性调查研究技术路线如图 1 所示。法桐行道树的出险记录从行道树出险记录、行道树养护记录和新闻媒体报道获取。通过整合三种途径获取的数据,做标准化处理,生成南京市法桐行道树安全性调查数据库。在此基础上,分别按行政区划和路段计算法桐行道树出险频度,并统计分析高频出险行政区和路段的出险原因。最后采用空间自相关方法,对路段法桐行道树出险频度进行热点分析。

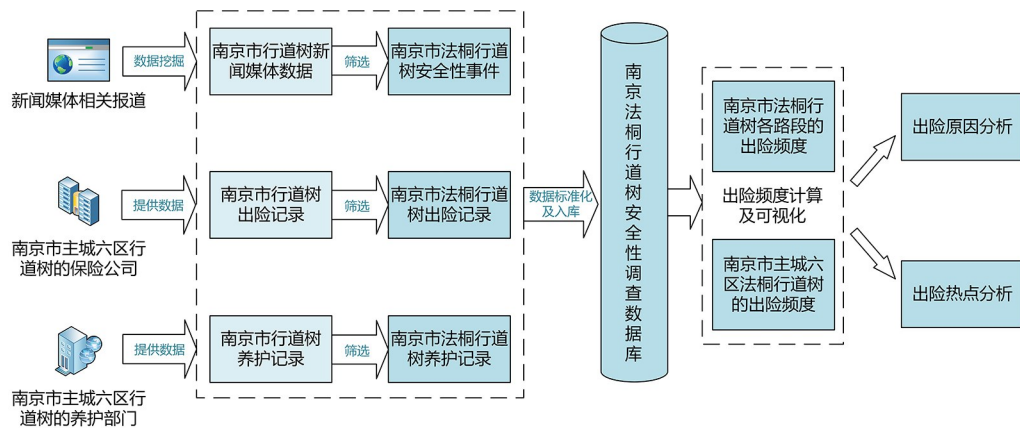


图1 南京市法桐行道树安全性调查技术路线图

Fig. 1 Technical flowchart for safety investigation of *Platanus orientalis* street trees in Nanjing

2.2 数据库构建 现有的南京市行道树出险数据记录形式不统一,且单一来源数据存在残缺,因此无法为行道树安全管理及养护提供准确、有效的数据支撑。本研究拟整合南京市历年法桐行道树出险数据,生成法桐行道树安全性调查数据库,为园林绿化部门监测、掌握法桐行道树的安全状况提供数据支持。

法桐行道树安全性调查数据库来自三方面数据整合。(1)通过行道树所投保的保险公司获得南京市主城六区行道树的出险清单。保险公司未专门记录出险行道树的树种信息,通过出险行道树所处的路段位置、事件描述等信息筛选出各路段法桐行道树的出险记录,作为主要数据来源。(2)对于出险记录无法涵盖的年份及街区,通过各区的行道树养护部门获得历年行道树的养护记录,作为补充数据。(3)通过网络爬虫技术,从网络平台抓取“南京市法桐行道树”的相关媒体报道数据,并进行关键词分析,筛选出法桐行道树的安全性事件记录作为补充。基于上述数据获取途径,得到2006—2020年的行道树出险记录,构建了法桐行道树安全性调查数据库。其中,鼓楼区、玄武区、秦淮区、雨花台区、栖霞区、建邺区的养护记录分别覆盖2011—2020年、2006—2020年、2012—2020年、2015—2020年、2017—2020年和2016—2020年。

根据行道树出险清单中的“出险地点”字段,结合法桐行道树分布情况,筛选出法桐行道树出险记录;根据行道树养护记录中的“树种”字段,筛

选出法桐行道树出险记录;根据网络爬虫技术获取的关键词信息,筛选出法桐行道树出险记录。将三部分来源的法桐行道树出险记录汇总,明确出险道路及所属区划,并删除重复记录数据。

原始记录对同一出险原因的描述不统一,为了便于统计分析各出险原因频率,对出险原因做标准化处理。将出险原因标准化表述为“断枝”“断膀”“倒伏”“车撞树”“风雨灾害”“外界物体坠落”“空腐/枯死”;对于出险具体原因缺失或表述不明确的,表述为“意外事故”。因此,标准化后出险原因共计八类。将筛选和标准化处理后的出险记录入库,建立了南京市法桐行道树安全性调查数据库,包含226条法桐行道树路段,共有1651条出险记录,包括“行政区划”“出险时间”“出险道路”“出险原因”“出险数量”五个字段。

2.3 出险频度计算 法桐行道树的出险频度指调查的某路段或行政区内出险的法桐行道树数目占该路段或行政区所有法桐行道树数目的百分比,它从出险发生频率的角度评价各行政区和各路段发生法桐行道树安全事故的相对频次。设法桐行道树每年在各路段的出险频度为 F ,在各行政区的出险频度为 D ; m 为路段序号,最小值为1,最大值为栽植法桐行道树的路段总数,设为 M ,则 m 的取值范围为1~ M 内的整数; y 为年份, y_1 为计算多年总出险频度时数据起始年份, y_2 为数据结束年份,取值为正整数; i 为主城六区的序号,取值为1~6的整数; j 为属于 i 行政区栽种法桐行道树的路段序号。可建立如下公式计算相关指标。

m 路段 y 年的出险频度 $F_{m,y}$, 为 y 年份 m 路段出险的法桐行道树数目 $N_{m,y}$ 与 m 路段法桐行道树在 y 年的总株数 $S_{m,y}$ 之比, 如式(1)所示:

$$F_{m,y} = \frac{N_{m,y}}{S_{m,y}} \quad (1)$$

i 行政区 y 年的出险频度 $D_{i,y}$, 为 i 行政区 y 年出险的法桐行道树数目 $N_{i,y}$ 与该行政区 y 年法桐行道树的总数目 $S_{i,y}$ 之比, 如式(2)所示:

$$D_{i,y} = \frac{N_{i,y}}{S_{i,y}} \quad (2)$$

$y_1 \sim y_2$ 年期间 m 路段的总出险频度 F_m , 为该期间该路段出险的法桐行道树数目与该期间该路段法桐行道树的数目 S_m 之比, 如式(3)所示:

$$F_m = \frac{\sum_{y=y_1}^{y=y_2} N_{m,y}}{S_m} \quad (3)$$

$y_1 \sim y_2$ 年期间 i 行政区的总出险频度 D_i , 为该期间该行政区出险的法桐行道树数目与该期间该行政区法桐行道树的数目 S_i 之比, 如式(4)所示:

$$D_i = \frac{\sum_{y=y_1}^{y=y_2} N_{i,y}}{S_i} \quad (4)$$

2.4 出险热点分析 Getis-Ord General G 统计是一种全局空间自相关分析方法, 用于度量空间单元属性值的聚集程度^[25-27]. 采用该方法可判定法桐行道树出险事件是否存在空间集聚现象. 具体指路段出险频度在空间分布上是否存在高值被低值包围、低值被高值包围、高值集聚或低值集聚, 明确路段出险频度在空间上的分布规律.

对所有法桐行道树路段出险频度进行 Getis-Ord General G 统计, 得到数据的总体观测 G 值、期望观测 G 值、 z 得分和 p 值. Getis-Ord General G 统计的零假设规定不存在要素值的空间聚类, 计算结果返回的 p 值较小且在统计学上显著, 则可以拒绝零假设, 即数据在空间上存在显著的聚类现象. z 得分为正且大于查找表中 z 阈值, 同时观测 G 值大于期望 G 值, 说明数据在高值区域发生聚类; z 得分为负且小于查找表中 z 阈值, 同时观测 G 值小于期望 G 值, 说明数据在低值区域发生聚类. Getis-Ord General G 的计算如下:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j}, \forall j \neq i \quad (5)$$

$$z_G = \frac{G - E[G]}{\sqrt{V[G]}} \quad (6)$$

$$E[G] = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{n(n-1)}, \forall j \neq i \quad (7)$$

$$V[G] = E[G^2] - E[G]^2 \quad (8)$$

其中, x_i, x_j 为路段 i, j 的总出险频度, $w_{i,j}$ 为路段 i, j 之间的距离权重, n 为出险路段总数量.

基于 Getis-Ord G_i^* 统计的热点分析方法是一种局部空间自相关分析方法, 可表明高值或低值要素在空间上发生聚类的位置^[28-30]. 该方法考虑每条路段出险频度属性权重对出险热点分布格局的影响, 得到法桐行道树高频出险路段中具有显著统计学意义的出险热点.

将每条法桐行道树出险路段的出险频度抽象为一个带有属性的空间点, 对每个点要素进行 Getis-Ord G_i^* 统计, 得到 z 得分和概率 p 值. 具有显著统计学意义的正 z 得分, z 得分越高, 高值(热点)的聚类就越紧密; 而具有显著统计学意义的负 z 得分, z 得分越低, 低值(冷点)的聚类就越紧密. 对计算结果进行空间可视化, 得到法桐行道树的路段出险热点图, 以此分析出险热点路段的空间分布特点. Getis-Ord G_i^* 的计算如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{i,j} \right)^2}{n-1}}} \quad (9)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (10)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (11)$$

其中, x_i, x_j 为路段 i, j 的总出险频度, $w_{i,j}$ 为路段 i, j 之间的距离权重, n 为出险路段总数量.

3 结果与分析

3.1 出险频度 为实现同一种出险频度数值的可比性, 将各区逐年出险频度、各区历年总出险频度、路段逐年出险频度、路段历年总出险频度的数值分为五级, 分别是低、较低、中、较高、高. 根据这四种出险频度计算结果的数据分布情况, 采用自然断点分级法, 确定基于不同评价时间及评价单元的出险频度分级阈值(表1).

表1 法桐行道树出险频度分级表

Table 1 Classification of accident frequency of *Platanus orientalis* street trees

等级	低	较低	中	较高	高
各区逐年出险频度	0~0.04%	0.04%~0.1%	0.1%~0.15%	0.15%~0.3%	>0.3%
路段逐年出险频度	0~0.4%	0.4%~1%	1%~2%	2%~5%	>5%
各区历年总出险频度	0~0.26%	0.26%~0.43%	0.43%~2.86%	2.86%~3.47%	>3.47%
路段历年总出险频度	0~1.2%	1.2%~8.7%	8.7%~14%	14%~27%	>27%

各区的法桐行道树逐年出险频度如图2所示。整体来看,主城六区的出险频度都呈上升趋势,其中秦淮区上升趋势最快。数据库中的出险原因记录表明,自2019年起车撞树事故显著增加;自2016年起断枝事件显著增加;因此,近年来车撞树和断枝事件增加是各区法桐行道树出险频度上升可能的原因。从单一年份分析,玄武区2018年和2020年出险频度最高,达到了0.7%,该区高频出险年份数量最多,有9年大于0.3%。此外,鼓楼区、秦淮区高频出险年份的数量也较多,分别有4年和6年。栖霞区2012,2017,2018

年出险频度最小,都小于0.01%,该区只有4年存在出险,且出险频度都较低。

玄武、鼓楼、秦淮三区是历年高频出险行政区,自2012年起逐年出险频度都超过了0.15%,2018年和2020年是三区的高频出险年份。上述三区的法桐行道树树龄普遍偏大,且较多位于窄旧路段,易发生法桐长势衰弱及车撞树等事件,因此出险频度相对较高。三区逐年出险频度变化趋势存在一定规律,自2017年以来都先升高后降低又升高。同一时期也存在差异性,玄武区2012—2015年出险频度逐年下降,而秦淮区逐年上升。

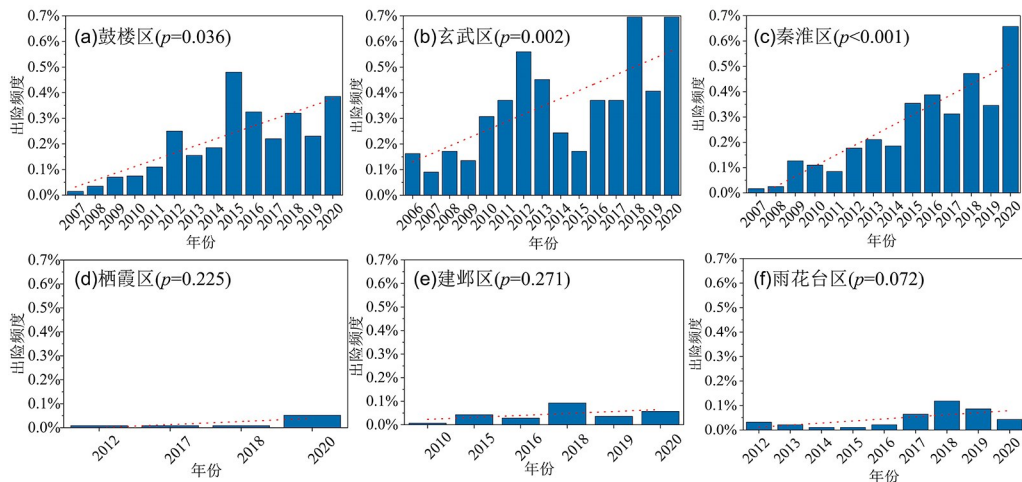


图2 南京市主城六区法桐行道树逐年出险频度

Fig. 2 Yearly accident frequency of *Platanus orientalis* street trees in six main districts of Nanjing city

法桐行道树路段逐年出险频度如图3所示。总体上看,中山路近10年来出险频度始终较高,该路段每年出险频度都大于2%,因而其安全状况面临较大隐患。玄武区内北京东路-中山路-中山东路-太平北路所围街区是法桐行道树历年高频出险区域,该区域路段历年出险频度一直较高。2015年起高频出险路段(>5%)显著增多,从2014年的3条增加到10条,该年法桐行道树高频

出险路段数量出现陡升。从变化较明显的路段来分析,应天大街2014年之前法桐行道树出险频度一直为零,自该年起一直到2017年,每年的出险频度一直较高,因此该路段安全状况转变需要引起关注。

从单一年份来看,2020年法桐行道树高频出险路段最多,有99条路段存在出险记录,该年出险频度大于5%的路段达到了16条,情况最为严

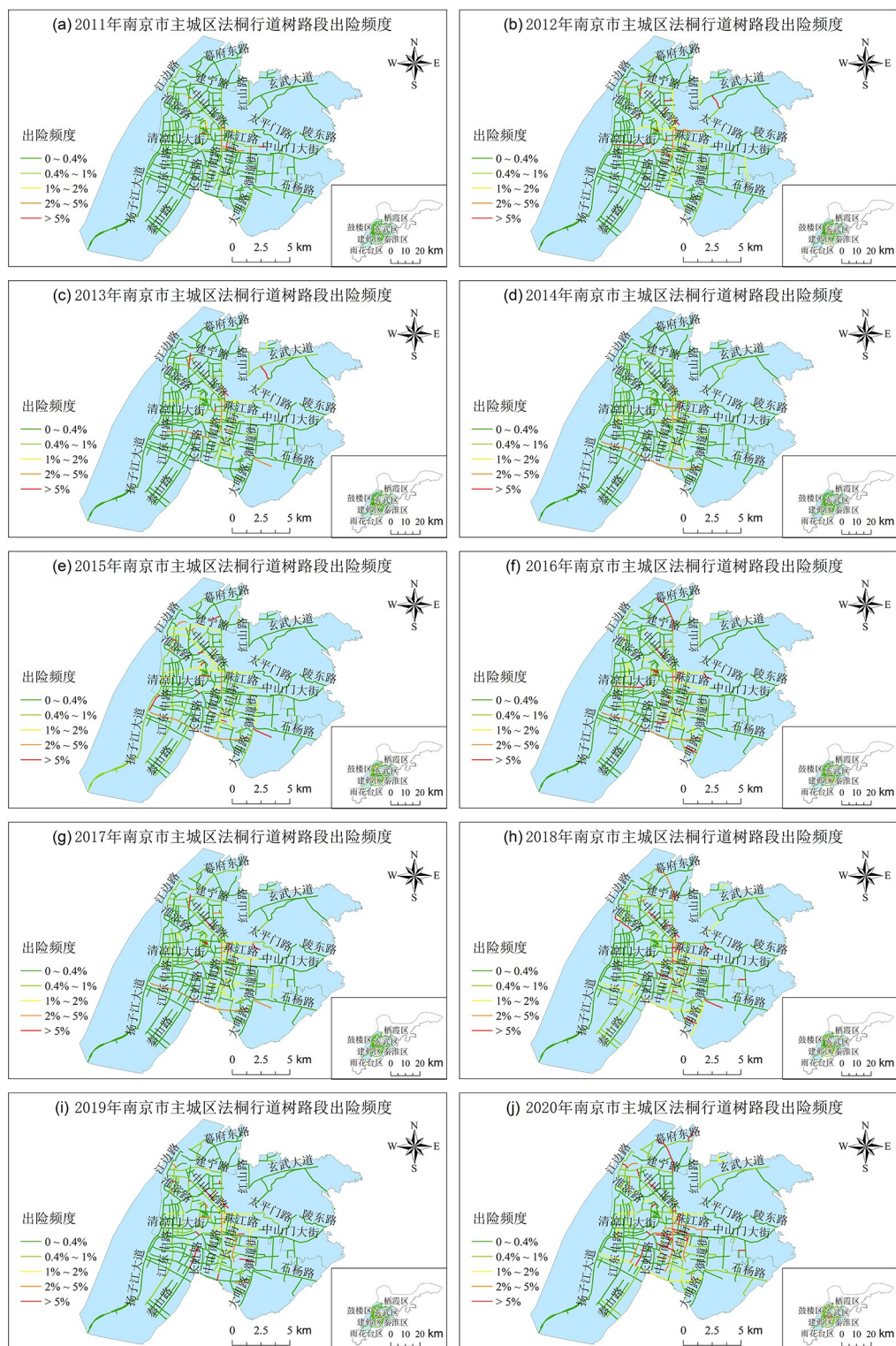


图3 南京市主城区法桐行道树路段逐年出险频度

Fig. 3 Yearly accident frequency of *Platanus orientalis* street trees in the road sections of the main districts of Nanjing city

重. 其中鼓楼区有6条(三牌楼大街、多伦路、龙江路、珞珈路、凤凰街、中央北路),秦淮区有6条(科巷、建邺路、石鼓路、新巷、丰富路、后标营路),玄武区有3条(进香河路、大钟亭、青石街),建邺区有1条(南湖路). 高频出险路段存在空间分布规律,主要集中在市中心区及老城区,新街口中心区和鼓楼老城区是两个高频出险路段较分布最集中的位置. 2011年是法桐行道树路段出险最少的一年,只有33条路段存在出险记录,为历年最少. 该年有5条路段出险频率大于5%,分别是洪武北

路、山阴路、后宰门路、大钟亭、双门楼.

各行政区总出险频率差异明显,玄武、鼓楼、秦淮三区是历年来出险高频行政区,总出险频率都大于2%,明显高于另外三区(图4). 玄武区总出险频率最高,达到了5.2%;栖霞区最低,仅为0.08%. 与各区逐年出险频率结果作对比,发现玄武、鼓楼、秦淮三区在逐年和多年计算尺度上的出险频率都较高,充分说明这三区是法桐高频出险行政区.

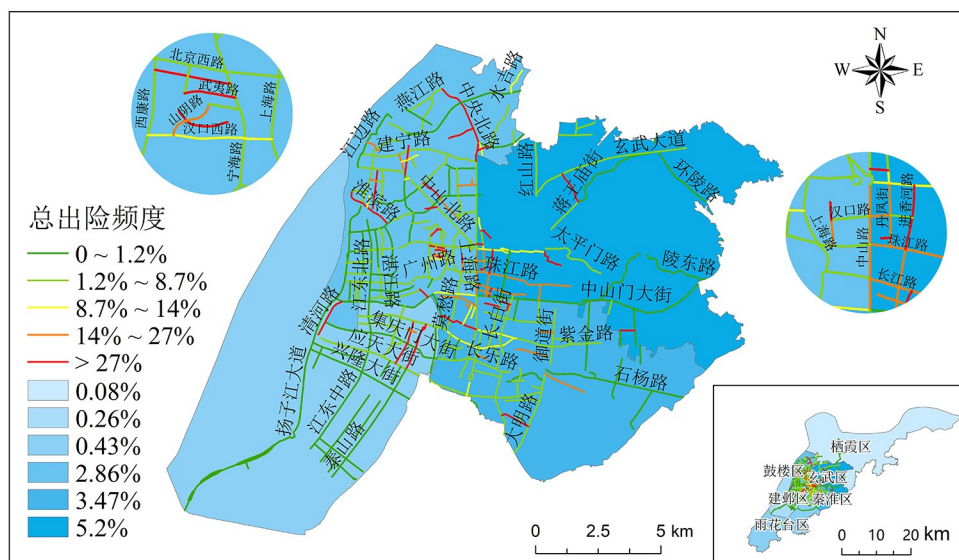


图4 南京市主城区法桐行道树总出险频率

Fig. 4 Total accident frequency of *Platanus orientalis* street trees in the main districts of Nanjing city

进一步对各路段的法桐行道树总出险频率进行分析. 从高频出险路段的数量来看,总出险频率大于27%的路段一共有29条,其中较高的路段主要有凤凰街、珠江路、长江路等;总出险频率大于14%的路段一共有54条,主要集中在鼓楼区、玄武区、秦淮区,分别有22条,16条,12条. 从高频出险路段的分布位置来看,高频出险路段主要集中在鼓楼区、玄武区、秦淮区的交界路段. 新街口中心区和鼓楼老城区路段是两个总出险频率高值集中区,这与2020年高频出险路段的分布格局较为一致. 从各区的最高频出险路段来看,鼓楼、玄武、秦淮三区最高频出险路段的出险频率数值明显较高,鼓楼区总出险频率最高的路段是凤凰街(40.5%),玄武区总出险频率最高的路段是

中山路(25.8%),秦淮区总出险频率最高的路段是瞻园路(22.4%). 因此,高频出险行政区内的最高出险频率路段安全状况较严重.

3.2 出险原因 根据南京市法桐行道树安全性调查数据库中的出险记录,统计分析各出险原因占比情况(图5). 结果显示,断枝、车撞树为法桐出险的两个主要原因,分别占38.34%和15.45%.

各区法桐行道树前三个出险原因如图6所示. 从总体上看,六区前三个出险原因中都不存在断枝和车撞树,说明它们是普遍的重要出险原因. 从各区首要出险原因来看,断枝是五个区(鼓楼区、秦淮区、建邺区、雨花台区、栖霞区)的首要出险原因,占比都达到30%以上,其中在建邺区

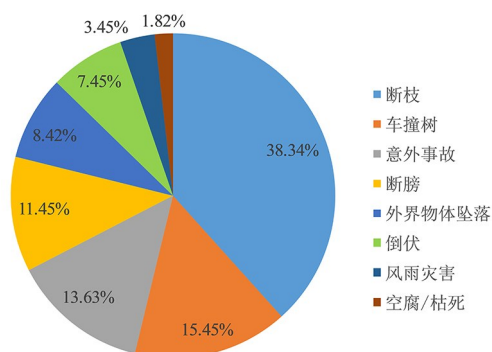


图 5 南京市主城区法桐行道树出险原因占比统计图

Fig. 5 Proportion of accident reasons of *Platanus orientalis* street trees in the main districts of Nanjing city

占比最高,达到 62.16%;玄武区首要出险原因为断膀,它仅存在于玄武区的前三个出险原因中,说明由于法桐断膀造成的行道树出险事件主要集中在该区。此外,倒伏为栖霞区法桐行道树并列的首要出险原因,达到了 33.33%。车撞树是各区出险的重要原因,在三个区(秦淮区、建邺区、雨花台区)为次要原因,其中在建邺区占比最高,达到 27.03%。

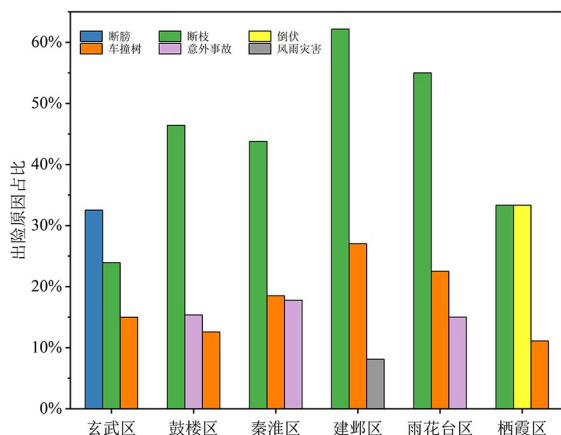


图 6 南京市主城六区法桐行道树前三个出险原因统计图

Fig. 6 Bar chart of the first three accident reasons of *Platanus orientalis* street trees in six main districts of Nanjing city

法桐行道树总出险频度最高的 10 条路段(各路段的法桐行道树大于 30 株)的前三个出险原因如图 7 所示。整体来看,断枝为各路段出险的主要原因,10 条路段前三出险原因中都存在断枝。其在瞻园路、中和桥路的占比都超过了 50%,说明

断枝占据了这 2 条路段出险事件的绝大部分。此外,断膀为高频出险路段发生险情的另一个重要原因,有 6 条路段前三出险原因都存在断膀,且其占比都达到了 25% 以上。从各路段首要出险原因来看,4 条路段(中山路、薛家巷、珠江路、丹凤街)的首要出险原因为断膀;断枝为 3 条路段(凤凰街、瞻园路、中和桥路)的首要出险原因。部分路段存在并列首要出险原因,其中断枝和断膀为黄埔路的并列首要出险原因,占比达 31.43%;倒伏和车撞树是长江路的并列首要出险原因,占比达到 28.57%;倒伏、断枝为热河南路的并列首要出险原因,占比达 31.82%。值得注意的是,倒伏仅为热河南路的首要出险原因,该路段由于法桐行道树倒伏引起的险情占比突出。

3.3 出险热点 根据路段总出险频度的 Getis-Ord General G 计算结果,数据期望总体 G 值为 0.197168,观测总体 G 值为 0.337451,观测总体 G 值大于期望总体 G 值,说明总出险频度数据并不是完全呈随机分布。一般而言, z 得分大于 2.58, p 值小于 0.01,表明数据存在显著高值聚类现象的可能性大于 99%。路段总出险频度的总体 z 得分为 3.69,且 p 值高度显著,存在大于 99% 的置信度认为南京市法桐行道树高频出险路段在空间上存在聚集分布。因此,法桐行道树出险事件在空间统计上具有显著热点。

Getis-Ord G_i^* 对代表每个路段总出险频度的空间属性点计算了相应的 z 得分和 p 值,得到法桐行道树路段出险热点(图 8)。对于具有显著统计学意义($p < 0.1$)正的 z 得分, z 得分越高,高值(热点)的聚类就越紧密。根据 z 得分和 p 值显著性,将计算结果分为四类显示。从整体分布格局来看,法桐行道树出险热点主要集中在鼓楼区、玄武区交界路段(中山路沿线)。从各区出险热点的分布数量来看,出险热点(置信度 $> 90\%$)分布在鼓楼区、玄武区、秦淮区,其中鼓楼区有 23 条,出险热点最多,此外玄武区有 14 条,秦淮区有 1 条;出险热点(置信度 $> 99\%$)共有 10 条路段,集中分布在玄武区和鼓楼区,其中玄武区为中山路、北京东路、丹凤街、太平北路、进香河路、薛家巷、大石桥街和同仁街,鼓楼区为新模范马路、中央路。出险热点($95\% < \text{置信度} < 99\%$)共有 17 条,其中鼓楼

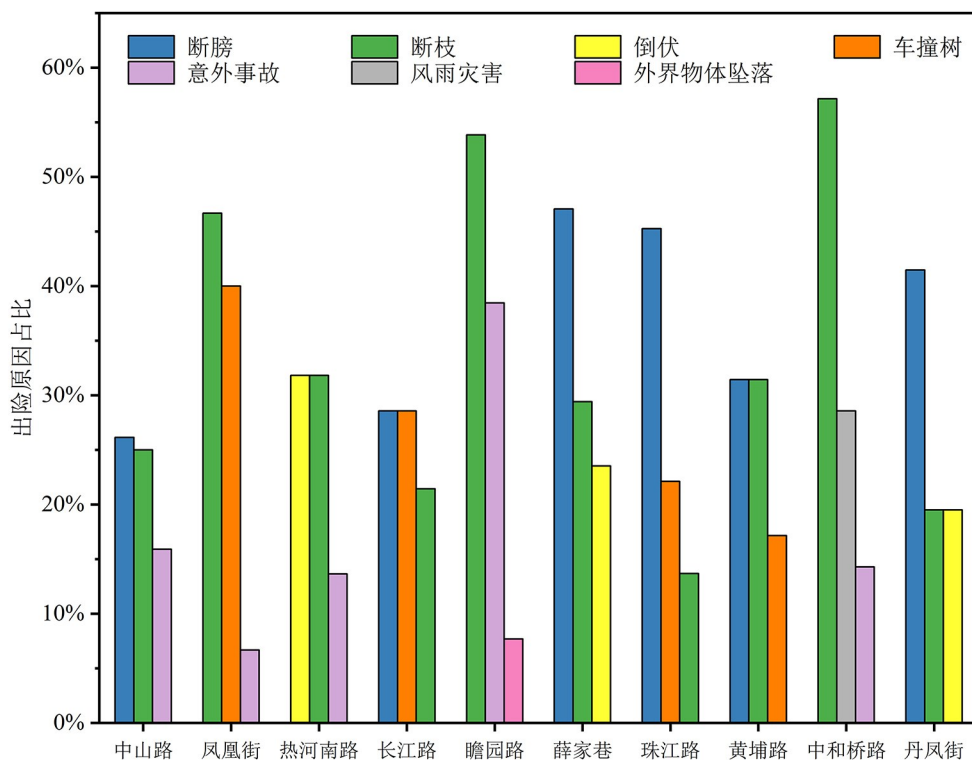


图7 法桐行道树高频出险路段前三个出险原因统计图

Fig. 7 Bar chart of the first three accident reasons of high-frequency accident road sections of *Platanus orientalis* street trees

区为建宁路、黑龙江路、丁家桥、上海路、钟阜路、马台街、江苏路、汉口路、紫竹林路、青岛路、平仑巷、江西路、童家巷,玄武区为高楼门、板仓街、安仁街、大钟亭;出险热点($90\% < \text{置信度} < 95\%$)共有11条,其中鼓楼区为南瑞路、云南路、宁海路、华侨路、南昌路、鼓楼街、苏州路,玄武区为百子亭、天山路、汉府街,秦淮区为石鼓路。

4 结论与展望

本文以南京法桐行道树安全状况为研究背景,通过收集整理历年来南京市法桐行道树出险记录,建立法桐行道树安全性调查数据库,经过深入的数据分析,得出以下主要结论:(1)玄武区、鼓楼区、秦淮区是南京市法桐行道树的逐年出险高频行政区,其中2012,2018,2020是三个区的高频出险年份,各区法桐行道树逐年出险频度都呈逐年上升趋势,其中秦淮区的上升趋势最快;(2)中山路每年法桐行道树出险频度都较高,历年出险较频繁,玄武区内北京东路-中山路-中山东路-太

平北路所围街区是法桐行道树逐年高频出险路段集中区;(3)玄武区法桐行道树总出险频度最高,情况最严重,新街口中心区和鼓楼老城区路段是历年来法桐行道树总出险频度高值集中区;(4)断枝和车撞树为法桐行道树出险的两个主要原因,其中断枝为鼓楼区、秦淮区、建邺区、雨花台区、栖霞区的首要出险原因,断枝和断膀是高频出险路段的主要出险原因;(5)鼓楼区法桐行道树出险热点数量最多,出险热点主要集中在中山路沿线路段。基于此,城市行道树管理部门应重点加强中山路沿线鼓楼区玄武区两区交界路段的安全监测及管理工作。

各路段法桐行道树主要出险原因存在差异。根据重点路段出险原因,提出针对性建议,以期促进南京市法桐行道树安全防护工作开展:(1)老城区法桐行道树栽植年限较久,与新城区按统一规划方案栽种的法桐行道树相比,枝干易老化、生长变形,其中凤凰街、瞻园路、黄埔路、中和桥路的法桐行道树易发生断枝,应加强对树枝的修剪工作;

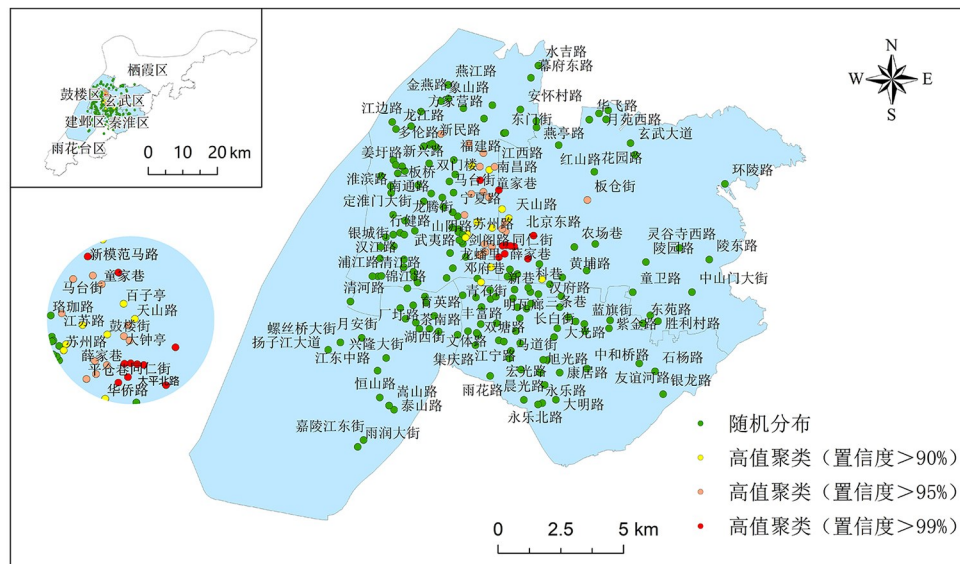


图 8 南京市主城区法桐行道树路段出险热点图

Fig. 8 Hot spot map of the accident road sections of *Platanus orientalis* street trees in the main districts of Nanjing city

(2)车撞树在建邺区占比最高,该区车流、人流量大,易发生车撞树事件,应增加湖西路等路段来往车流、人流的警示、疏导工作;(3)应重视玄武区中山路、薛家巷、珠江路、丹凤街的法桐行道树树龄的养护工作。

城市行道树的安全状况一直是行道树调查的重点内容,本文建立的南京市法桐行道树安全性调查数据库可作为数据源,为相关的安全监测及评估工作提供数据支撑。此外,本文的南京市法桐行道树安全性调查结果需要结合数据完备性来分析,这是因为越新的年份往往数据越完备,越老的年份往往数据越稀缺,所以可能会高估新的年份的出险频度,而低估老的年份的出险频度。因此,应持续更新南京市法桐行道树安全性调查数据库,以获取更长时间序列的、完备的法桐行道树出险记录和分析结果。

参考文献

- [1] 中国科学院中国植物志委员会,张宏达,颜素珠. 中国植物志:悬铃木科. 科学出版社,1979.
- [2] 杨华,吴丹,孙飞,等. 郑州市法桐行道树的调查研究. 现代园艺,2016(17):34—36. (Yang H, Wu D, Sun F, et al. Investigation and research on *Platanus Orientalis* street trees in Zhengzhou city. Modern

Gardening,2016(17):34—36.)

- [3] 李健,王大新. 南京悬铃木行道树存在问题和改进技术探讨. 江苏绿化,1994(2):15—16. (Li J, Wang D X. Discussion on problems and improvement techniques of *Platanus* street trees in Nanjing. Jiangsu Greening,1994(2):15—16.)
- [4] 郑代平,刘志芳,王延方,等. 郑州市大规格行道树悬铃木复壮技术应用综述. 河南林业科技,2015,35(2):46—48,56. (Zheng D P, Liu Z F, Wang Y F, et al. Summarization of the application of rejuvenation technology for large-scale *Platanus* street trees in Zhengzhou city. Henan Forestry Technology,2015,35(2):46—48,56.)
- [5] 孙毅宁,周小娟,刘杰. 郑州市城区悬铃木生长与健康状况调研. 林业调查规划,2020,45(1):120—126. (Sun Y N, Zhou X J, Liu J. Study on growth and health status of *Platanus* in Zhengzhou city. Forestry Survey Planning,2020,45(1):120—126.)
- [6] 宋少华. 南京“法国梧桐”与城市记忆研究. 硕士学位论文. 南京:南京农业大学,2015. (Song S H. Study on Nanjing *Platanus Acerifolia* wild and city memory. Master Dissertation. Nanjing, China: Nanjing Agricultural University,2015.)
- [7] 江玮. 南京梧桐的前世今生. 环境,2011(5):28—31. (Jiang W. The past and present life of *Platanus* in Nanjing. Environment,2011(5):28—31.)

- [8] 朱海琦,孙丽娟,曹绪峰.南京市行道树空腐树洞的现状与治理措施初步研究.金陵科技学院学报,2013,29(1):72—74. (Zhu H Q, Sun L J, Cao X F. A preliminary study on the status and control measures of empty rotten holes in shade trees in Nanjing city. Journal of Jinling Institute of Technology, 2013, 29(1):72—74.)
- [9] 唐晓岚,尤婷,吴雯,等.南京两种常见行道树致敏性及其控制措施.吉首大学学报(自然科学版),2014,35(3):69—73,96. (Tang X L, You T, Wu W, et al. Allergenic property and two kinds of common street trees in Nanjing and the control. Journal of Jishou University (Natural Sciences), 2014, 35(3):69—73,96.)
- [10] 窦逗,张明娟,郝日明,等.南京市老城区行道树的组成及结构分析.植物资源与环境学报,2007(3):53—57. (Dou D, Zhang M J, Hao R M, et al. Analysis on composition and structure of street trees in old urban district of Nanjing. Journal of Plant Resources and Environment, 2007(3):53—57.)
- [11] 栾以玲,阮宏华,姜志林.南京市不同环境树木年轮重金属元素含量对比分析.安徽农业科学,2009,37(35):17725—17729. (Luan Y L, Ruan H H, Jiang Z L. Comparative analysis of the content of the heavy metal in tree ring in different growth backgrounds in Nanjing city. Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(35):17725—17729.)
- [12] 曲丹,姜卫兵,魏家星,等.南京市典型林荫道景观综合评价.湖南农业科学,2014(7):66—69,73. (Qu D, Jiang W B, Wei J X, et al. Evaluation of comprehensive landscape effect for typical avenue in Nanjing city. Hunan Agricultural Science, 2014(7):66—69,73.)
- [13] 周银发,林淑芳,戴志松,等.2011—2020年福建省肺结核发病时空特征分析.中国防痨杂志,2021,43(8):853—856. (Zhou Y F, Lin S F, Dai Z S, et al. Temporal-spatial distribution of pulmonary tuberculosis in Fujian province during 2011—2020. Chinese Journal of Antituberculosis, 2021, 43(8):853—856.)
- [14] 朱勇,刘代强,梅兰英,等.基于地理信息系统的重庆地区COVID-19疫情空间分布格局演化.病毒学报,2021,37(2):292—299. (Zhu Y, Liu D Q, Mei L Y, et al. Evolution of the spatial distribution pattern of COVID-19 in Chongqing, China, based on geographic information. Chinese Journal of Virology, 2021, 37(2):292—299.)
- [15] 孟德友,陆玉麒.基于县域单元的江苏省农民收入区域格局时空演变.经济地理,2012,32(11):105—112. (Meng D Y, Lu Y L. The spatial-temporal evolution of spatial pattern of rural residents' income at county level in Jiangsu. Economic Geography, 2012, 32(11):105—112.)
- [16] 姜海宁,谷人旭,李广斌.中国制造业企业500强总部空间格局及区位选择.经济地理,2011,31(10):1666—1673. (Jiang H N, Gu R X, Li G B. Head-quarter spatial pattern and location choice of top 500 enterprises of Chinese manufacturing industries. Economic Geography, 2011, 31(10):1666—1673.)
- [17] Amrhein C, Reynolds H. Using the Getis statistic to explore aggregation effects in Metropolitan Toronto Census data. Canadian Geographer - Geographe Canadien, 1997, 41(2):137—49.
- [18] Malleson N, Andresen M A. The impact of using social media data in crime rate calculations: Shifting hot spots and changing spatial patterns. Cartography and Geographic Information Science, 2015, 42(2):112—21.
- [19] 程婷,魏晓奔,翟伶俐等.近50年南京雾霾的气候特征及影响因素分析.环境科学与技术,2014,37(S1):54—61. (Cheng T, Wei X Y, Zhai L Y, et al. An analysis of climatic characteristics and influence factors of fog and haze in Nanjing in recent 50 years. Environmental Science & Technology, 2014, 37(S1):54—61.)
- [20] 韦薇,王小德,张银龙.南京城市道路绿化带植物结构调查与分析.西南林学院学报,2009,29(5):59—63. (Wei W, Wang X D, Zhang Y L. Survey of plant community structure of greenspace along urban streets in Nanjing city. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2009, 29(5):59—63.)
- [21] 童丽丽.南京城市森林群落结构及优化模式研究.博士学位论文.南京:南京林业大学,2007. (Tong L L. Studies on community structure and optimized models of urban forest in Nanjing. Ph.D. Dissertation. Nanjing, China: Nanjing Forestry University, 2007.)
- [22] 阎传海,张绅,宋永昌.南京地区森林植被性质的初步研究.植物生态学报,1995(3):280—285. (Yan C H, Zhang S, Song Y C. A preliminary study on the nature of forest vegetation in Nanjing area. Chinese Journal of Plant Ecology, 1995(3):280—285.)

- [23] 童丽丽,许晓岗,汤庚国. 南京行道树及绿化带群落的结构分析. 金陵科技学院学报, 2009, 25(4): 57—60. (Tong L L, Xu X G, Tang G G. Structural analysis of street trees and green belt Communities in Nanjing. Journal of Jinling Institute of Technology, 2009, 25(4): 57—60.)
- [24] 王可,肖路,田盼立,等. 中国 35 个城市行道树树种组成特征研究. 植物研究, 2020, 40(4): 568—574. (Wang K, Xiao L, Tian P L, et al. Urban street tree species composition in 35 cities of China. Bulletin of Botanical Research, 2020, 40(4): 568—574.)
- [25] Getis A, Ord J.K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. Geographical Analysis, 1992(24): 189—206.
- [26] Kondo K. Hot and cold spot analysis using Stata. Stata Journal, 2016, 16(3): 613—31.
- [27] 张松林,张昆. 全局空间自相关 Moran 指数和 G 系数对比研究. 中山大学学报(自然科学版), 2007(4): 93—97. (Zhang S L, Zhang K. Comparison between general Moran's index and Getis-Ord General G of spatial autocorrelation. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007(4): 93—97.)
- [28] 王博远,岑应健,肖革新,等. 基于 Getis-Ord G_i^* 方法的中山市粮食及其制品食品安全空间分析. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(8): 2425—2428. (Wang B Y, Ceng Y J, Xiao G X, et al. Spatial analysis of food safety of grains and their products in Zhongshan city based on Getis-Ord G_i^* method. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(8): 2425—2428.)
- [29] Ord J K, Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: Distributional issues and an application. Geographical Analysis, 1995, 27(4): 286—306.
- [30] Choi H S, Sohn S Y, Yeom H J. Technological composition of US metropolitan statistical areas with high-impact patents. Technological Forecasting and Social Change, 2018(134): 72—83.

(责任编辑 杨贞)