



基于因子分析法与kmeans聚类的行道树安全风险评价

吴悠绿 肖鹏峰 刘豪 董元彪 秦

Safety Risk Assessment of Street Tree Based on Factor Analysis and k-means Clustering

Wu Youlv, Xiao Pengfeng, Liu Hao, Dong Yuanbiao, Qin Shen

引用本文:

吴悠绿, 肖鹏峰, 刘豪, 董元彪, 秦. 基于因子分析法与kmeans聚类的行道树安全风险评价[J]. 西南林业大学学报, 2023, 43(1):137–145. doi: 10.11929/j.swfu.202202012

Wu Youlv, Xiao Pengfeng, Liu Hao, Dong Yuanbiao, Qin Shen. Safety Risk Assessment of Street Tree Based on Factor Analysis and kmeans Clustering[J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Science)*, 2023, 43(1):137–145. doi: 10.11929/j.swfu.202202012

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202202012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

云南松林分蓄积量的影响因子分析

Analysis of the Influence Factors of *Pinus yunnanensis* Forest Volume

西南林业大学学报. 2019, 39(6): 116–122 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201903084>

基于PCA和系统聚类的西南地区森林火灾形势评价

Forest Fire Situation Assessment in Southwest China Based on PCA and System Clustering

西南林业大学学报. 2018, 38(4): 153–160 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2018.04.024>

基于DPSIR模型的云南省土地生态安全评价

A DPSIR Model Based Assessment of Land Ecological Security in Yunnan Province

西南林业大学学报. 2021, 41(3): 113–121 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202003044>

基于AHP-PCA模型的安宁市森林火灾社会脆弱性评价

Risk Assessment on Social Vulnerability of Forest Fire in Anning Based on AHP-PCA

西南林业大学学报. 2018, 38(2): 153–157 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2018.02.023>

基于层次分析法的广西金秀地区生态环境质量综合评价

Comprehensive Assessment of Ecological Environment Quality in Jinxiu Area Based on Analytic Hierarchy Process

西南林业大学学报. 2017, 37(3): 74–80 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2017.03.012>

基于信息熵与层次分析法的石漠化形成驱动因素分析

Analysis of Driving Factors of Rock Desertification Formation Based on Information Entropy and Analytic Hierarchy Process

西南林业大学学报. 2019, 39(5): 100–109 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201812035>

DOI: 10.11929/j.swfu.202202012

引文格式: 吴悠绿, 肖鹏峰, 刘豪, 等. 基于因子分析法与 k-means 聚类的行道树安全风险评价 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2023, 43(1): 137-145.

基于因子分析法与 k-means 聚类的行道树安全风险评价

吴悠绿 肖鹏峰 刘豪 董元彪 秦琴

(南京大学地理与海洋科学学院, 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, 江苏南京 210023)

摘要: 以南京市法国梧桐行道树为例, 通过分析行道树的生长状况、稳定性、健康状况、对交通的影响等各方面因素, 建立涵盖 8 个评价指标的行道树安全风险评价指标体系, 并基于因子分析法和 k-means 聚类对所有行道树进行安全风险评价。结果表明: 南京市 51.7% 的法国梧桐行道树存在高、中风险, 主要分布在秦淮区、玄武区和鼓楼区。其中莫愁路和三条巷为高风险路段, 但中风险路段上的高风险法国梧桐行道树占高风险行道树总量的 79.1%。因此, 除了密切监测高风险路段外, 还需要加强中风险路段的监测。本研究提出的行道树安全风险评价方法通过建立合理有效的行道树安全风险评价模型, 能得到科学准确的行道树安全风险评价结果, 反映行道树安全风险状况, 为管理部门提供决策支持, 且具有可迁移性, 能推广应用到其他行道树安全风险评价研究。

关键词: 法国梧桐; 行道树; 安全风险评价; 因子分析; k-means 聚类

中图分类号: S687.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2023)01-0137-09

Safety Risk Assessment of Street Tree Based on Factor Analysis and k-means Clustering

Wu Youlv, Xiao Pengfeng, Liu Hao, Dong Yuanbiao, Qin Shen

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

Abstract: Taking *Platanus orientalis* street trees in Nanjing as an example, the safety risk evaluation index system of street trees covering 8 evaluation indexes was established by analyzing the growth status, stability, health status, and influence on traffic of street trees, and the safety risk evaluation of all street trees was carried out based on factor analysis and k-means clustering. In Nanjing, 51.7% of the street trees with high or medium risk were located in Qinhuai, Xuanwu, and Gulou districts. Mochou Road and Three Lanes were high risk sections, and the number of high-risk street trees in middle risk sections accounted for 79.1% of the total number of high-risk street trees. Therefore, in addition to close monitoring of high-risk sections, it is also necessary to strengthen monitoring of medium-risk sections. The street tree safety risk evaluation method proposed in this study can obtain scientific and accurate street tree safety risk evaluation results by establishing a reasonable and effective street tree safety risk evaluation model, reflecting the street tree safety risk status, providing decision support for management departments, and is transferable and can be extended and applied to other street tree safety risk evaluation studies.

收稿日期: 2022-02-15; 修回日期: 2022-04-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41871235) 资助。

第 1 作者: 吴悠绿 (1998—), 女, 硕士研究生。研究方向: GIS 与遥感研究。Email: wwwyoulv@smail.nju.edu.cn。

通信作者: 肖鹏峰 (1979—), 男, 教授。研究方向: GIS 与遥感研究。Email: xiaopf@gmail.com。

Key words: *Platanus orientalis*; street tree; safety risk assessment; factor analysis; k-means clustering

城市绿化是城市重要的基础设施,是城市现代化建设的重要内容,是改善生态环境和提高广大人民群众生活质量的公益事业^[1-3]。行道树是城市绿化的骨架,对塑造城市形象、改善城市生态环境和景观环境具有不可替代的作用^[4-5]。但受复杂城市环境的影响,行道树也存在枝条坠落、树干断折、树体倒伏等潜在安全风险,会给市政设施、城市交通以及市民人身安全带来严重威胁^[6]。对行道树进行安全风险评价,能提前发现安全隐患,及时采取针对性养护措施消除或降低安全风险,对城市绿化精细化管理具有重要意义。国外城市树木风险评估研究已持续几十年^[7-14]。1967年, Paine 等^[15]最先基于树木种类、规格和结构性损坏制作出树木潜在风险评估表,再根据树木潜在故障概率、危害水平以及可能危及的目标,确定树木危险等级,为树木风险评估奠定了基础。1994年, Mattheck 等^[16]提出了目测树木评估法(Visual Tree Assessment, VTA),在不影响树木健康的前提下,通过观察树木外部表现、测量树木结构指标来评测树木内部缺陷程度,进而评估树木风险,建立了一套应用较为广泛的树木风险评估体系。

国内树木安全风险评价还处于发展阶段,相关研究较少。2015年,蔡园园等^[17]首次引入VTA法对福州市常用11种行道树进行潜在危险度调查与分析。2021年,贺坤等^[18]基于风险矩阵表法和GIS技术进行上海市行道树安全风险评估,为树木安全风险评价提供了新的参考。这些方法在评价过程中过于依赖于专家知识,具有一定主观性,会影响最终风险评价结果且耗时耗力。虽然国内还没有形成系统的树木安全风险评价体系,但树木健康评价体系相对成熟。现有研究多采用综合指标评价法,通过因子分析减少主观经验影响,建立兼具全面性与独立性的评价指标体系,结合聚类分析得到科学的分级评价结果^[19-24]。基于此,本研究以南京市法国梧桐(*Platanus orientalis*)(简称法桐)行道树为例,使用因子分析法和k-means聚类,综合各项评价指标信息,通过分析其生长状况、稳定性、健康状况、对交通的影响等因素,建立科学的法桐行道树安全风险评价指标体系,构建有效的安全风险评价模型,准确评估南京市法桐行道树安全风

险等级,并针对有效降低安全风险提供决策建议,以期为南京市法桐行道树的管理和有机更新提供科学依据,并为其他行道树安全风险评价研究提供参考。

1 研究区概况

南京市位于长江中下游平原地带,介于东经118°22'~119°14'、北纬31°14'~32°37'之间,是长江三角洲城市群的三大中心城市之一。南京市地处亚热带季风气候区,四季特征明显,常年雨水充足,年均降水1056.0 mm,气候温暖湿润,年均气温15.4℃,相对湿度76%^[25]。研究区域为南京市主城六区(玄武区、鼓楼区、秦淮区、建邺区、雨花台区和栖霞区),面积约为782.86 km²。作为南京市主要行道树种类,主城区共有8万多棵法桐^[26]。近年来主城区法桐行道树倒伏压车、影响交通或折枝伤人等事件的发生严重影响了市民的日常生活。

2 材料与方法

2.1 数据来源

根据南京市法桐行道树的路段分布情况,选取79条主要路段,在每条路段等距离抽取法桐行道树总数量约10%进行安全风险评价。通过南京市行道树普查数据库、危树险树数据库、行道树激光雷达点云和全景影像数据库和行道树养护记录共收集到2886棵法桐行道树的各项指标数据,对数据进行预处理后可用于行道树安全风险评价。

2.2 行道树安全风险评价指标体系建立

行道树的安全隐患与树木本身及环境因素密切相关,如树龄、树势、生长位置、立地条件等^[27]。其中,与树体结构是否正常直接相关,其安全风险因素主要包括树干、树冠和树根三部分的结构异常。

首先运用文献研究法收集行道树安全风险相关的资料,归纳整合后共得到25个安全风险评价候选指标,分为整体状况、树冠、树干及树根4类。其中整体状况包括树高、树势和倾斜3个指标,树冠包括冠幅、偏冠等8个指标,树干包括分支点高度、分支点开张角度等8个指标,而树根包括松动、损伤等6个指标。

按照科学性、可操作性原则，排除与行道树安全风险相关性较小或难获取的指标，如叶斑或变色、寄生等，共筛选得到 16 个指标。按照全面性及系统优化原则，去除 16 个指标中含义相似的冗余指标，最终得到由 8 个指标构成的法桐行道树安全风险评价指标体系 (表 1)。针对行道树对

市政设施、城市交通以及市民人身安全造成的威胁，建立的评价指标体系主要包含与安全风险有关的行道树生长状况、稳定性、健康状况、对交通的影响 4 个方面，能较为全面地评价行道树的安全风险。

表 1 法桐行道树安全风险评价指标体系

Table 1 Index system of safety risk of street tree of *Platanus orientalis*

类型	指标名称	指标定义及分级	选取理由
A 生长状况	树高A1	指树木地面上根茎到树梢之间的高度，单位为cm	树高与树龄的相关性较大，通常根据树高可判断出行道树的生长阶段。而且，树高与树龄相比更易于测量，数据获取方便
	树势A2	指树木生长状况，可分为5级。无记录的树木，记为0；整株生长茂盛、树冠完整丰满为较好情况，记为1；植株生长正常、树冠基本完整为一般情况，记为2；植株生长正常但树冠不完整或偏冠为较差情况，记为3；植株生长不正常，树冠极不完整为濒死情况，记为4	树势反映行道树整体生长状况，树势差的行道树发生死亡或倒伏等事故的可能性也大。因此，选取该指标评估行道树由于树势问题导致的安全风险的程度
B 稳定性	树冠偏冠状况B1	指树冠生长不均匀导致的树冠偏向一边的情况，可分为2级。存在偏冠的情况，记为1；不存在偏冠的情况，设为0	偏冠的行道树易发生树根外露或倒伏等情况。因此，选取该指标评估行道树由于偏冠而发生倒伏的安全风险的程度
	主干倾斜度B2	指树木主干与垂直方向的夹角，夹角越大，倾斜程度越大，单位为°	主干倾斜度越大的行道树，越容易在自身或外力作用下倒向倾斜的方向；加之主干长时间倾斜也会影响树木生长状况及树冠形状，加大树木倒伏的可能性。因此，选取该指标评估行道树发生倒伏、偏冠的安全风险程度
C 健康状况	枝干空腐程度C1	指树干断面的腐烂部分占截面积的比例，单位为%	行道树的断面易因雨蚀虫蛀而发生腐烂，当腐烂程度较深时，行道树可能会部分坏死或死亡。因此，选择该指标评估行道树因腐烂而发生倒伏等情况的可能性大小。同时，该指标可采用PICUS无损检测技术进行获取，数据获取方便
	病虫害危害C2	指树干的病虫害情况，可分为4级。无记录的树木，记为0；生长良好，树干叶面无病态表现，无明显的虫害，记为1；少许叶色表现较为反常，树干有少许腐朽，记为2；树干腐朽较为明显，枝叶长势欠佳，有较多虫害，记为3	病虫害是养护管理中最常遇见的问题，会对行道树的健康或者树木结构造成破坏，严重时威胁行道树群体的健康。因此，选取该指标评估行道树由于病虫害可能导致的安全风险程度
D 对交通的影响	分支点高度D1	从地面至树木第一层活分枝点的高度，单位为cm	行道树的分支点高度过低，会影响车行道及人行道的交通安全，造成车撞树等安全事故。因此，选取该指标评估行道树对交通安全的影响程度
	分支点开张角度D2	指分支点以上区域的枝条与垂直方向所构成的夹角，单位为°	行道树的分支点开张角度过大，在外力影响或是自身承重结构变化下，容易发生断枝，对行人、行车造成安全隐患。因此，选取该指标评估行道树对交通安全的影响程度

2.3 行道树安全风险评价模型构建

2.3.1 因子分析法

因子分析法是指从研究指标相关矩阵内部的依赖关系出发，把一些信息重叠、具有错综复杂关系的变量归结于少数几个不相关的综合因子的

一种多元统计分析方法。基本思想是根据相关性大小把变量分组，使得同组的变量之间相关性较高，但不同组的变量不相关或相关性较低，每组变量代表一个基本结构，即公共因子。它能够在保留大部分原始指标信息的前提下，消除原始指

标间的相关性, 重构出新的可解释性的公因子, 同时得到各项指标权重, 客观反映出各指标间的相对重要性^[28]。

因子分析法的数学模型假设观测系统(即评价总体)有 m 个评价指标, p 个观测单位, 因子分析的数学模型就是把 p 个观测单位分别表示为 $m < p$ 个公共因子和一个特殊因子的线性加权, 即:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1m} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{p1} & \alpha_{p2} & \dots & \alpha_{pm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_p \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: F_1, F_2, \dots, F_m 为公共因子, 是不可观测的变量。它是各个指标中共同出现的因子, 因子之间通常是彼此独立的; 系数 α_{pm} 是第 p 个变量在第 m 个公共因子上的系数, 称为因子载荷, 它揭示了第 p 个变量在第 m 个公共因子上的相对重要性; ε_i 是各对应变量 X_i 所特有的因子, 称为特殊因子, 是不能被前 m 个公共因子包含的部分。它们满足:

$$\text{cov}(F, \varepsilon) = 0 \quad (2)$$

$$D(F) = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 \end{bmatrix} = I \quad (3)$$

$$D(\varepsilon) = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_p^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: F, ε 不相关; F_1, F_2, \dots, F_m 互不相关, 方差为 1; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p$ 互不相关, 方差不一定相等, 通常假定 $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma_i^2)$ 。

2.3.2 k-means 聚类

k-means 聚类算法是一种应用十分广泛的基础的非监督迭代算法。它的基本思想为: 对于给定的数据集, 按照数据之间的距离大小, 将其按类内距离尽可能小而类间距离尽量大的原则划分为 K 个类别^[29]。

k-means 聚类算法具体步骤是预先确定划分类别数 K , 随机选择 K 个对象 $\{a_1, a_2, \dots, a_K\}$ 作为给定的 n 个数据 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的初始聚类中心。计算每个数据与各聚类中心之间的距离, 将其按距离最近原则分配给各聚类中心, 并重新计算各

类别中心, 最终使得每个数据点距最近聚类中心的距离平方和最小。此距离平方和为目标函数 W_n :

$$W_n = \sum_{i=1}^n \min_{1 \leq j \leq K} |x_i - a_j|^2 \quad (5)$$

2.3.3 行道树安全风险评价模型

基于法桐行道树安全风险评价指标体系, 借助 SPSS 软件首先对评价指标数据集进行检验, 然后采用因子分析法提取出具有实际意义的公因子, 客观确定各项指标权重, 加权计算得到行道树安全风险综合评分, 再根据 k-means 聚类将行道树划分为低、中、高三级风险。

1) 评价指标数据集检验。针对 2886 棵法桐行道树数据进行 KMO 和 Bartlett 检验, KMO 值为 0.528, Bartlett 球形检验在自由度为 45 时 Sig. < 0.001, 达到显著水平, 可对变量进行因子分析。

2) 公因子提取。利用主成分分析法提取累计贡献率达到 88.197% 的前 6 个公因子, 能够解释所有指标的绝大部分信息。

3) 因子载荷矩阵提取。运用方差最大化正交旋转法对原始因子载荷矩阵进行因子旋转, 重新分配个因子所解释的方差比例, 使公因子的意义更明确。旋转在 5 次迭代后已收敛, 得出旋转载荷平方和以及旋转后的因子载荷矩阵。

4) 安全风险评分计算。利用旋转后的因子载荷矩阵除以相应特征值的平方根得到公因子得分系数矩阵。根据公因子得分系数矩阵计算各公因子得分, 并以各公因子的方差贡献率作为指标权重进行加权求和, 得到每棵行道树安全风险评价综合评分 (F)。

5) 安全风险评级。参考《南京市行道树险树危树分级标准》^[30] 与《城市树木健康诊断技术规范》(DB11/T 1692—2019)^[31] 对树木健康的分级, 通过 k-means 聚类将行道树安全风险评价分为 3 个类别。通过分析 3 个类别具体情况, 根据安全风险分值和各项指标信息, 将 3 个类别分别确定为低风险、中风险和高风险 3 级。

3 结果分析

3.1 法桐行道树安全风险评分分布

基于安全风险评分公式(式 6)计算得到 2886 棵行道树的安全风险评分, 分值范围为 -1.41 ~ 2.13, 分值越高代表行道树的安全风险越大。

$$F = (23.421F_1 + 15.941F_2 + 15.018F_3 + 12.087F_4 + 11.552F_5 + 10.177F_6) / 88.197 \quad (6)$$

式中: F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 和 F_6 为各公因子得分。安全风险评分较高的路段位于秦淮区、鼓楼

区和玄武区（图 1）。其中秦淮区莫愁路的法桐行道树整体安全风险评分最高，该路段所有法桐行道树安全风险评分均值为 0.85。平均安全风险评分大于 0.5 的路段还有珠江路（玄武区）、三条巷（秦淮区）、中华路（秦淮区）、长江路（玄武区）和西康路（鼓楼区）。这些路段上的法桐行道树面临的安全风险整体较高。而安全风

险评分最低的路段是鼓楼区的幕府东路，该路段安全风险评分均值为-0.6。路段平均安全风险评分低于-0.4 的路段还有燕江路（鼓楼区）、幕府西路（鼓楼区）、共青团路（雨花台区）、建宁路（鼓楼区）、玄武大道（玄武区）和月苑南路（玄武区）。这些路段上的法桐行道树面临的安全风险较低。

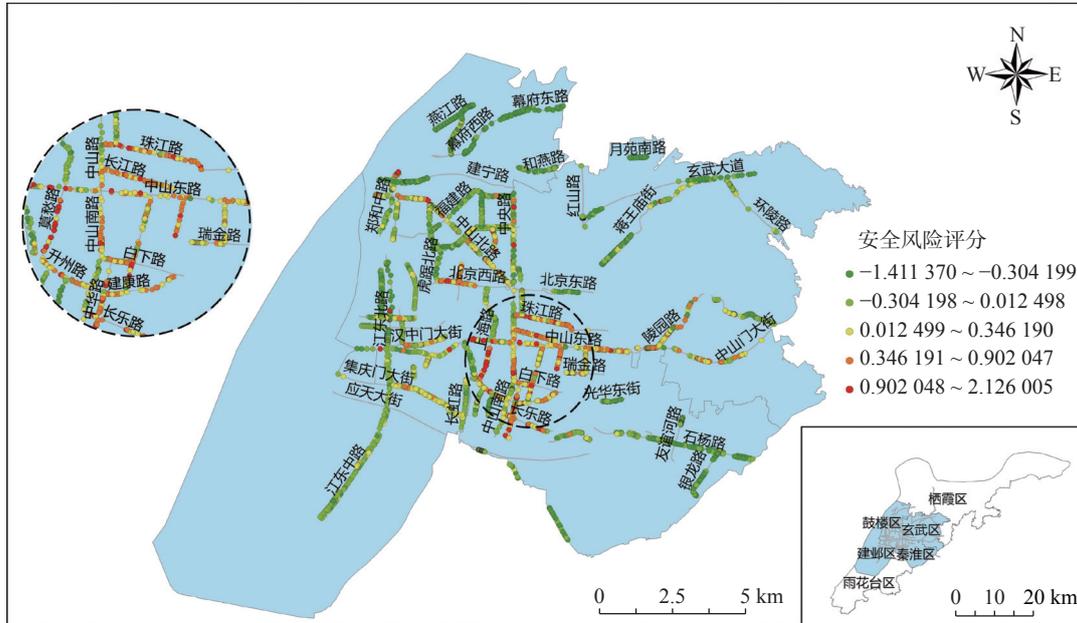


图 1 法桐行道树安全风险评分分布

Fig. 1 Safety risk score distribution of street tree of *platanus orientalis*

安全风险评分大于 2 的法桐行道树共有 2 棵，它们可能存在的风险最大。1 棵位于玄武区长江路，安全风险评分为 2.13。它的树势较差，受病虫害危害严重，枝干存在一定程度的空洞和腐烂，分支点高度较低且分支点开张角度大。这些因素一方面可能增加法桐断枝倒伏等风险，影响居民日常生活甚至危及人身安全，另一方面较低的分支点和较大的开张角度可能影响路段交通，从而产生较高风险。另一棵位于秦淮区汉中路，安全风险评分为 2.07。它的主干存在一定程度的倾斜，枝干中空洞和腐烂的程度较为严重，且面临较为严重的病虫害危害。这些情况可能影

响树体结构，增加树木断枝倒伏等风险，进而对路段交通、居民生活、人身安全等方面造成危害。而安全风险最低的法桐行道树位于雨花台区共青团路，安全风险评分为-1.41，树木树势良好，没有病虫害或偏冠，也没有枝干空腐情况，主干不倾斜且树高合适，整体长势好。

3.2 法桐行道树安全风险等级分布

安全风险评价模型将所有行道树划分为 3 个等级，其中高风险法桐行道树 215 棵，中风险法桐行道树 1277 棵，低风险法桐行道树 1394 棵，即高、中、低风险法桐行道树占比分别为 7.45%、44.25%、48.3%，评分均值为 1.00、0.18 和-0.32（表 2）。

表 2 法桐行道树安全风险评价分级结果

Table 2 Classification results of safety risk of street tree of *platanus orientalis*

安全风险等级	数量	比例/%	安全风险评分均值	安全风险评分范围
低风险	1394	48.30	-0.32	-1.41 ~ -0.07
中风险	1277	44.25	0.18	-0.07 ~ 0.58
高风险	215	7.45	1.00	0.58 ~ 2.13

低风险法桐行道树评分范围为-1.41 ~ 0.07, 树势、树冠偏冠、枝干空腐和病虫害状况良好, 分支点开张角度较小, 主干无明显倾斜。中风险法桐行道树评分范围为-0.07 ~ 0.58, 各项指标状况相比于低风险树木稍差, 病虫害危害较为严重。高风险法桐行道树评分范围为 0.58 ~ 2.13, 普遍枝干空腐严重, 树势较差, 偏冠明显, 其他指标状况整体较差。不同等级法桐行道树间各指标差异明显且分值范围不同, 而相同等级的法桐行道树具有类似特征且分值集中 (图 2), 说明安全风险等级划分合理, 能较好地反映出行道树真实安全风险状况。

法桐行道安全风险评级分布见图 3。共有 37 条路段上存在高风险法桐行道树, 其中中山北路的高风险法桐行道树最多 (25 棵), 拥有大于 10 棵高风险法桐行道树的路段还有中华路、莫愁路、珠江路和中山门大街。通过计算各条路段高风险法桐行道树的比例, 发现占比超过 30% 的路段为中华路、莫愁路、珠江路、长江路、长乐路、汉中路、建康路和三条巷。

统计发现, 共有 73 条路段存在中风险法桐行

道树, 其中中山北路的中风险法桐行道树最多 (151 棵), 拥有大于 40 棵中风险法桐行道树的路段还有中山门大街、陵园路、集庆门大街、中山南路和中山东路。中风险法桐行道树占比超过一半的路段有 31 条, 其中占比超过 80% 的路段有瑞金路、解放路、陵园路、中山门大街、中山东路、北圩路和集庆门大街, 瑞金路的中风险法桐行道树占比甚至达到 100%。

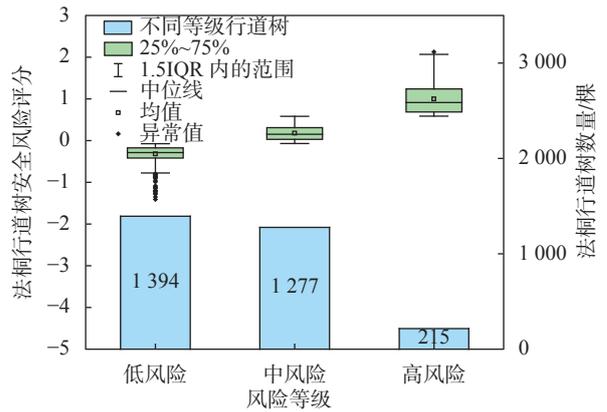


图 2 不同等级法桐行道树的统计特征

Fig. 2 Statistical characteristics of street tree of platanus orientalis in different level

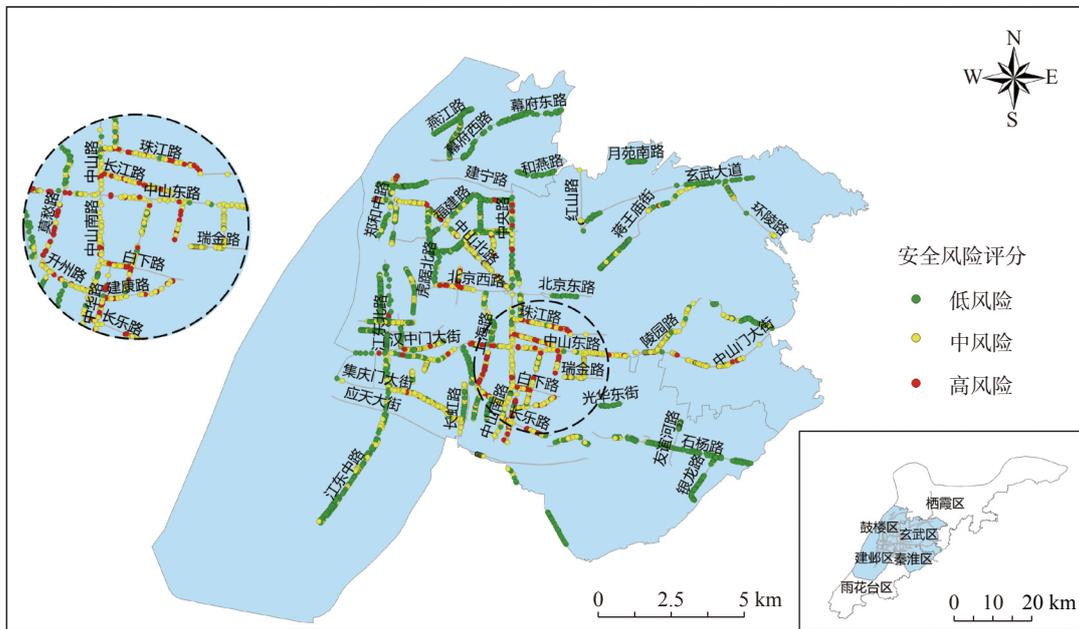


图 3 法桐行道树安全风险评级分布

Fig. 3 Safety risk level distribution of street tree of platanus orientalis

3.3 法桐行道树路段安全风险等级分布

基于法桐行道树安全风险评级结果, 统计每条路段 3 个风险等级的法桐行道树分布情况, 以

一条路段上法桐行道树数量最多的风险等级作为该条路段的安全风险等级, 得到法桐行道树路段安全风险等级分布情况 (图 4)。

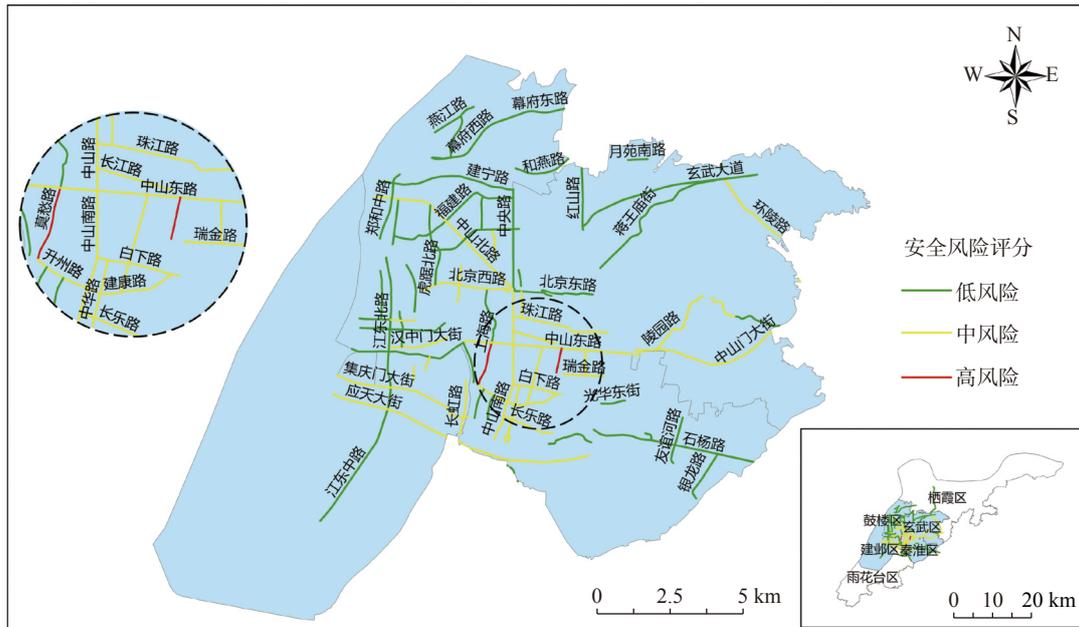


图 4 法桐行道树路段安全风险等级分布

Fig. 4 Road safety risk level distribution of street tree of platanus orientalis

总体来看，高风险路段有 2 条，中风险路段有 30 条，低风险路段有 47 条，其中高风险路段为莫愁路和三条巷。高、中风险路段主要集中在秦淮区、鼓楼区和玄武区，具体分布在秦淮区西北部、玄武区南部和鼓楼区东南部。此外，建邺区东北部的少量路段和栖霞区的尧新大道也属于中风险路段。而 47 条低风险路段具体分布在秦淮区东部、玄武区西北部和鼓楼区。另外雨花台区北部的少量路段也为低风险路段。

统计 3 个风险等级的路段数量发现，2 条高风险路段均位于秦淮区（图 5）。中风险路段在秦淮区最多，共有 10 条，同时玄武区、秦淮区和建邺区的中风险路段数量占比均超过 50%，而在栖霞区和雨花台区均不存在中风险路段。低风险路段在主城 6 区均有分布，最多分布在鼓楼区，总数量达到 24 条，占抽样路段总数的 30%，而在秦淮区和玄武区占比约为一半。整体来看，秦淮区和玄武区由于分布有较大比例的法桐行道树高风险路段，因而整体面临着较大的安全风险。建邺区虽然路段数量较少，但中风险路段占主导，因此也存在着较大的安全风险。而栖霞区和雨花台区均只存在低风险路段，可以认为这两个区整体存在较低的安全风险。鼓楼区路段数量较多，但低风险路段占比较大，因此其安全风险相对于秦淮区和玄武区来说较小。

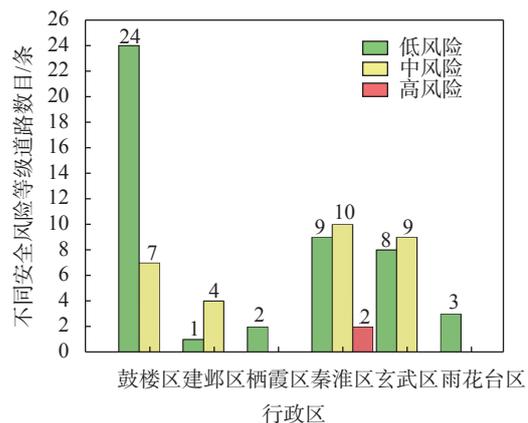


图 5 主城六区不同安全风险等级路段数量分布
Fig. 5 Number distribution of roads with different safety risk levels in 6 districts

3.4 高风险法桐行道树分布情况

根据安全风险评级结果，高风险法桐行道树共有 215 棵，占法桐行道树总数的 7.45%。高风险路段只有 2 条，但有大量中风险和低风险路段上存在一定数量的高风险法桐行道树。因此需要进一步统计分析所有高风险法桐行道树的具体状况，以便全面掌握高风险法桐行道树的分布状况，有利于后续对高风险法桐行道树采取针对性养护措施。

统计各路段的高风险法桐行道树占比发现，两条高风险路段即莫愁路和三条巷上的高风险法桐行道树占比最多，且都分布在秦淮区。而 30 条

中风险路段中有 23 条路段上分布有高风险法桐行道树, 即 76.7% 中风险路段上分布有一定数量的高风险法桐行道树, 其中中华路上高风险法桐占比达到 42.9%, 共计有 6 条中风险路段上的高风险法桐行道树占比超过 30%, 分别是中华路、长江路、珠江路、长乐路、汉中路和建康路。少数低风险路段 (12 条) 中也存在有零星的高风险法桐行道树, 其中来凤街高风险法桐行道树占比最大, 为 17.4%。

整体来看, 高风险法桐行道树占比排在前列

的路段均集中在秦淮区、鼓楼区和玄武区 (图 6)。虽然高风险路段上高风险法桐行道树占比最大, 但值得注意的是, 大多数中风险路段上也有较多数量的高风险法桐行道树存在。高风险路段上的高风险法桐行道树只占高风险法桐行道树总量的 9.3%, 而中风险路段上的高风险法桐行道树占高风险法桐行道树总量的 79.1%。因此除了高风险路段外, 还需要关注中风险路段上分布的高风险法桐行道树, 对路段上的高风险法桐行道树采取针对性的养护措施以降低安全风险。

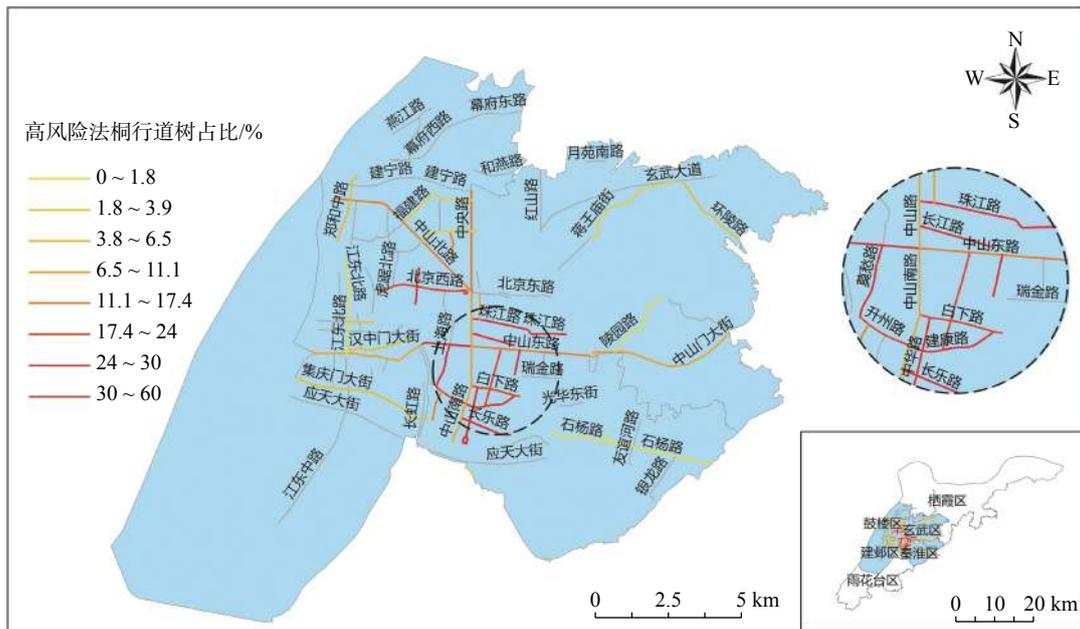


图 6 高风险道路占比分布

Fig. 6 Proportion distribution of high risk road

4 结论与讨论

本研究构建了城市行道树安全风险评价指标体系和评价模型, 以南京市法桐行道树为例, 基于 79 条路段的 2886 棵法桐行道树数据, 得到了准确的法桐行道树安全风险评价结果。南京市 51.7% 的法桐行道树存在高、中风险, 主要分布在秦淮区、玄武区和鼓楼区。高风险路段为莫愁路和三条巷, 中风险路段上的高风险法桐行道树占高风险法桐行道树总量的 79.1%。因此, 除了密切监测高风险路段外, 还需要加强中风险路段上的高风险法桐行道树的监测。

通过分析行道树的生长状况、稳定性、健康状况、对交通的影响等各方面因素, 建立科学的行道树安全风险评价指标体系, 是行道树安全风险评价的核心, 对其他行道树安全风险评价研究

具有参考意义。构建的基于因子分析法与 k-means 聚类的行道树安全风险评价模型能得到可靠的评价结果, 反映行道树安全风险状况, 适用于南京市法桐行道树安全风险评价, 且具有可迁移性, 能推广应用到其他行道树安全风险评价研究。充分考虑行道树生长环境有助于建立更加全面的指标体系, 但现阶段如土壤等立地条件、道路等级、大风日数、主要风向或受风面大小、人为工程影响等行道树生长环境相关数据难以大范围获取, 未来可以重点补充相关环境数据, 进一步改进当前研究。

[参 考 文 献]

- [1] 张利华, 邹波, 黄宝荣. 城市绿地生态功能综合评价体系研究的新视角 [J]. 中国人口·资源与环境, 2012,

- 22(4): 67-71.
- [2] 王进, 陈爽, 姚士谋. 城市规划建设的绿地功能应用研究新思路 [J]. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(6): 99-103.
- [3] Ponce-Donoso M, Vallejos-Barra O, Ingram B, et al. Urban trees and environmental variables: relationships in a city of central Chile [J]. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2020, 46(2): 84-95.
- [4] 杨乃琴. 行道树在城市园林绿地规划中的作用 [J]. *北京林业大学学报*, 2001, 23(S2): 106-107.
- [5] Berland A, Lange D A. Google Street View shows promise for virtual street tree surveys [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 21: 11-15.
- [6] Vogt J, Hauer R, Fischer B. The cost of not maintaining the urban forest [J]. *Arborist News*, 2015, 24: 12-17.
- [7] Hickman G W, Caprille J, Perry E. Oak tree hazard evaluation [J]. *Journal of Arboriculture*, 1989, 15(8): 177-184.
- [8] Mattheck C, Bethge K. Wind breakage of trees initiated by root delamination [J]. *Trees*, 1990, 4(4): 225-227.
- [9] Matheny N P, Clark J R. A photographic guide to the evaluation of hazard trees in urban areas[M]. Urbana, IL: International Society of Arboriculture, 1991: 72.
- [10] Mattheck C. Biomechanical optimum in woody stems[M]//Plant Stems. Amsterdam: Elsevier, 1995: 75-90.
- [11] Mattheck C, Bethge K. The structural optimization of trees [J]. *Naturwissenschaften*, 1998, 85(1): 1-10.
- [12] Ellison M. Quantified tree risk assessment used in the management of amenity trees [J]. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2005, 31(2): 57-65.
- [13] Rao K D, Gopika V, Sanyasi Rao V V S, et al. Dynamic fault tree analysis using Monte Carlo simulation in probabilistic safety assessment [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(4): 872-883.
- [14] 韩付家. 树木风险评估研究概况 [J]. *山东林业科技*, 2013, 43(5): 90-94, 80.
- [15] Paine L A. Tree hazard control on recreation sites: estimating local budgets[R]. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture, 1967.
- [16] Mattheck C, Breloer H. Field guide for visual tree assessment (vta) [J]. *Arboricultural Journal*, 1994, 18(1): 1-23.
- [17] 蔡园园, 闫淑君, 吴沙沙, 等. 11 种常用行道树危险度评估 [J]. *森林与环境学报*, 2015, 35(2): 169-174.
- [18] 贺坤, 宋平, 王本耀, 等. 上海城市行道树安全风险评估研究 [J]. *中国园林*, 2021, 37(9): 106-111.
- [19] 梁陈涛, 杨艳波, 田盼立, 等. 基于街景测量的南昌市行道树结构特征与健康状况研究 [J]. *生态学报*, 2022, 42(2): 549-560.
- [20] 李佳慧, 彭祚登, 刘勇, 等. 北京市首都功能核心区国槐健康评价及其影响因素研究 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2021, 49(1): 64-73, 84.
- [21] 刘晓农, 宋亚斌, 邢元军. 基于 SOM 神经网络的新化县森林健康评价 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(4): 21-26.
- [22] 周景斌, 韩东锋, 王彦平. 杨凌主城区行道树健康评价与分析 [J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(2): 278-282, 292.
- [23] 翁殊斐, 黎彩敏, 庞瑞君. 用层次分析法构建园林树木健康评价体系 [J]. *西北林学院学报*, 2009, 24(1): 177-181.
- [24] 姬文元, 邢韶华, 郭宁, 等. 川西米亚罗林区云冷杉林健康状况评价 [J]. *林业科学*, 2009, 45(3): 13-18.
- [25] 王晓莹, 杨丹, 邵银龙. 南京市近 60 年气候变化特征分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(4): 119-124.
- [26] Tong M, She J F, Tan J Z, et al. Evaluating street greenery by multiple indicators using street-level imagery and satellite images: a case study in Nanjing, China [J]. *Forests*, 2020, 11(12): 1347.
- [27] Coelho-Duarte A P, Daniluk-Mosquera G, Gravina V, et al. Tree Risk Assessment: component analysis of six visual methods applied in an urban park, Montevideo, Uruguay [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 59: 127005.
- [28] 刘瑜. 北京市古树健康外貌特征评价研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [29] Fahim A. K and starting means for k-means algorithm [J]. *Journal of Computational Science*, 2021, 55: 101445.
- [30] 南京市绿化园林局. 南京市行道树险树危树分级标准 [S]. 南京: 南京市绿化园林局, 2019.
- [31] 北京市园林绿化局. 北京市城市树木健康诊断技术规程: DB11/T 1692—2019 [S]. 北京: 北京市市场监督管理局, 2019.

(责任编辑 陆 驰)

