

网络出版时间:2020-07-08 09:36 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2021.01.008
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20200707.1537.008.html

北京市首都功能核心区国槐健康评价及其影响因素研究

李佳慧¹, 彭祚登¹, 刘勇¹, 马红²

(1 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 2 北京市园林绿化国际合作项目管理办公室, 北京 100013)

[摘要] **【目的】**分析北京市首都功能核心区主要绿化树种国槐的健康状况及其影响因素,为管护技术措施的制定提供科学依据。**【方法】**基于树木健康一级和二级诊断法,对生长在北京首都功能核心区内主要街道、胡同、绿地区域的国槐进行每木调查,采用主成分分析、聚类分析、判别分析 3 种方法建立健康评价模型;在此基础上,从生长因素(胸径、冠幅)、管护措施(修剪方法、防踩铺装)、环境因子(与设施距离、遮荫情况)3 个方面,进行国槐单株的健康评价,分析不同因素对国槐林木健康状况的影响。**【结果】**在研究区内的 31 475 株国槐中,健康单株占 12.81%,亚健康单株占 82.03%,不健康单株占 5.16%。街道、胡同、绿地 3 个区域内的健康、亚健康、不健康 3 个等级的国槐数量均呈正态分布。生长在绿地区域的国槐健康状况较好;不健康国槐单株受害等级评价中,1 级占 29.51%,2 级占 36.97%,3 级占 23.66%,濒死占 9.86%。方差分析和多重比较表明,胸径、冠幅、防踩铺装、修剪方法、与设施距离对国槐健康的影响均达到显著水平($P < 0.05$),遮荫情况对国槐健康无显著影响。核心区内国槐的健康综合得分随胸径和冠幅增大而总体下降,在有机材料覆盖、修剪规范、与设施距离 $\geq 2 \sim < 4$ m、无遮荫条件下健康状况较好。**【结论】**北京首都功能核心区的国槐整体表现为健康和亚健康状态,具有良好保育养护潜力,但部分不健康国槐受害严重,亟需处理。在国槐树木基部覆盖有机材料、规范修枝技术、确保与设施的栽植距离 ≥ 2 m 和无遮荫,是国槐养护管理以促进其健康生长的重要措施。

[关键词] 国槐;首都功能核心区;树木健康二级诊断;树木健康评价;主成分分析

[中图分类号] S792.260.06

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2021)01-0064-10

Health evaluation and influencing factors of *Sophora japonica* in the capital functional core area of Beijing

LI Jiahui¹, PENG Zuodeng¹, LIU Yong¹, MA Hong²

(1 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2 Beijing Municipal Office of Landscaping International Cooperation Project Management, Beijing 100013, China)

Abstract: **【Objective】**This study analyzed the health status of main greening tree species *Sophora japonica* and influencing factors in the functional core area of Beijing to provide basis for management and protection technical measures. **【Method】**Based on the tree health primary and secondary diagnosis method, a tree-by-tree survey was conducted on *S. japonica* plants in the main streets, alleys, and green areas in the functional core area of Beijing. Principal component analysis, cluster analysis and discriminant analysis were adopted to establish health evaluation model. Then, the *S. japonica* health was evaluated based on growth factors (DBH and crown width), management and protection measures (pruning and anti-stepping pave-

[收稿日期] 2019-12-16

[基金项目] 北京市园林绿化局科技创新工程项目“北京 10 种主要园林绿化常见问题及增彩延绿”(CEG-2018-01)

[作者简介] 李佳慧(1995—),女,河北沧州人,在读硕士,主要从事北京市国槐健康评价及其影响因素研究。

E-mail:1805856826@qq.com

[通信作者] 彭祚登(1964—),男,重庆开州人,副教授,硕士生导师,主要从事森林培育理论与技术研究。E-mail:zuodeng@sina.com

ment), and environmental factors (distance from facilities and shading), and the influence of different factors was analyzed. 【Result】 Healthy *S. japonica* plants accounted for 12.81%, sub-healthy individual plants accounted for 82.03%, and unhealthy individual plants accounted for 5.16%. The number of *S. japonica* in the three levels in 3 regions was in normal distribution. The damage level of unhealthy plants was 29.51% at first level, 36.97% at second level, 23.66% at third level, and 9.86% at dying. Analysis of variance and multiple comparisons showed that DBH, crown width, anti-stepping pavement, pruning methods, and distance from facilities had significant effects on *S. japonica*'s health ($P < 0.05$). Shade cases had no significant effect. The health score of *S. japonica* in core area decreased with the increase of diameter at DBH and crown, and health condition was better under the conditions of organic material covering, pruning specifications, $\geq 2 - < 4$ m away from facilities and without shading. 【Conclusion】 The *S. japonica* plants in Beijing capital functional core area were healthy and sub-healthy with good conservation potential, but some unhealthy plants were severely damaged and needed to be treated urgently. Covering organic materials at the base, standardizing pruning techniques, ensuring planting ≥ 2 m away from facilities and no shading were important measures for *S. japonica*.

Key words: *Sophora japonica*; capital functional core area; tree health secondary diagnosis; tree health evaluation; principal component analysis

国槐(*Sophora japonica*)因其墨绿的叶色、浓密云团状的树冠、高大的树形而深受人们喜爱,再加上遮荫效果好、适应能力强、寿命长、药用食用价值广泛、历史文化内涵丰富等特征,被广泛应用于城市绿化、园林造景等^[1]。国槐也是北京市的市树,是城区内栽植量最多的树种,尤其是在行道树栽植中应用最为普遍。根据北京市最新城市规划,北京市东城区和西城区被规划为首都功能核心区(简称核心区^[2]),该区域内的公园、街道等绿化树种的健康状况受到全社会的广泛关注,其中国槐的栽植数量约占该区绿化树木总数的57.40%,因受环境和人为活动干扰较大,目前树木倒伏、枯枝垂落等问题给居民生活带来不少负面影响。

“树木健康”主要是指树木良好的生长状态,可用来反映树木的生长状况,当树木生长茁壮并具有良好结构时,其会具有更高的生态、景观和社会价值^[3]。树木健康评价方法以及不良树木的危害情况一直是国内外研究的重点之一^[4-5],其中森林健康评价的研究起步较早,在评价尺度和方法、评价对象等方面研究比较成熟^[6-8]。随着科技的发展,一些先进的技术手段,如应力波诊断法^[9]、声学激光技术^[10]等被应用于城市树木健康评估。这些先进方法虽然提高了评价结果的准确度,但所需技术要求过高,且对树木本身会造成一定程度的伤害,现多用于古树或干材质量的评估,并不适用于栽植广泛的城市树木的健康评价。城市树木的生长和营养状况以及潜在风险都可在树木的形态和外貌上表现出来^[11],对

树木健康与安全性的评价可通过观察或测量树木的各种外部表现直接诊断,或者依据数学模型等方法间接进行健康诊断^[12-13]。目前健康评价方法研究中应用最多的是层次分析法、主成分分析法、灰色关联分析法等^[14-16]。不同的评价方法各有其优缺点,评价结果精度也不同,目前健康评价越来越呈现出多种方法相结合的趋势。

当前城市树木健康评价的对象主要集中在城市公园、城郊片林、古树名木上^[17-19],且以城市树木结构特征^[20-21]的研究较多。国内部分学者依据树木养护标准,从树冠、树干和根区等部位的表现用量化树木健康等级^[22-23]来评价城市树木健康状况,但是除树木本身遭受病虫害、真菌生物等因素的影响外,修枝等防护措施、生境处土壤环境条件等其他潜在因素对树木生长造成的危害也不容忽视^[24-25]。据此本研究基于北京市国槐健康状况的实地调查,结合管护措施和环境因子等,建立国槐健康评价模型,及时、准确地评估北京核心区国槐的健康状况,并揭示影响该地区国槐健康生长的重要因素,为科学制定国槐养护管理计划提供重要依据,以最大限度地发挥国槐的生态和景观功能,为和谐美丽的首都功能核心区建设提供支持。

1 研究区概况

研究区位于新规划的首都功能核心区,地处北京中部核心地区,包括北京市的东城区42 km²和西城区51 km²,总面积为93 km²。核心区多年平均气

温 11.4℃; 年均降水量 545.9 mm; 气候为典型的北温带半湿润大陆性季风气候, 四季分明, 雨热同期, 冬季较长且寒冷干燥, 夏季短促且高温多雨; 土壤类型主要为壤土。有研究表明^[26], 至 2017 年底, 核心区绿地总面积 2 162.16 hm², 公园绿地面积 1 128.59 hm², 东城区和西城区的人均公园绿地面积分别为 7.38 和 4.1 m², 人均绿地面积分别为 12.94 和 8.7 m², 绿化率分别为 26.31% 和 20.99%。首都功能核心区的绿地总量十分有限, 而且分布在城市高密度环境下, 现有的绿地较零散地分布在核心区内。

2 研究方法

2.1 数据调查方法

调查于 2018 年 7—10 月在国槐生长期进行, 选取核心区范围内栽植树种为国槐的所有区域作为研究对象, 按照其生长地点的不同划分为主要街道、胡同、绿地 3 种区域类型, 并对区域内生长的 31 475 株国槐的生长指标以及所处的环境条件进行了每木调查, 主要街道、胡同区域内的绝大多数国槐单株的胸径在 20~50 cm, 但也有胸径特大的古树散生; 绿

地区域内的国槐单株胸径范围较大。不同区域国槐单株的分布特点如表 1 所示。

2.2 树木健康一级和二级诊断方法

通过调查树木枝、干、叶、根等的生长状态以及病虫害危害等, 进行一级健康诊断, 然后对一级诊断为不健康的单株进行精细诊断, 即二级诊断, 之后建立评价模型, 再进一步对其受害程度进行评判和分析。

一级诊断参照日本树木医生给树木进行健康检查的方法, 调查树木是否存在偏冠、叶色异常、落枝倒伏等危险性以及树皮损伤腐朽、木质部开裂、蛀干害虫、病害、树干异常音(木槌敲击声音呈现异常)、树基松动、根部腐朽、主干倾斜、阻碍交通、无防踩实措施、修枝不规范等 14 种不良状况。诊断结论分 3 个层次, 若所有调查项目全部无异常且树木干形挺拔、树冠浓密评为“优”(健康); 若所有调查项目无异常或 1 项轻微异常且树木长势一般评为“良”(亚健康); 若≥2 项调查项目有异常, 则评判为“差”(不健康)。按照上述方法, 依据研究区调查树木的实际生长状况进行树木单株健康等级判定。

表 1 北京市首都功能核心区国槐的分布特点

Table 1 Distribution characteristics of *S. japonica* in Beijing capital functional core area

首都功能核心区 Capital functional core area	区域名称 Name of region	区域数量 Number of regions	林木株数 Number of trees
东城区 Dongcheng area	主要街道 Main street	139	10 852
	胡同 Alley	42	1 144
	绿地 Green area	6	189
西城区 Xicheng area	主要街道 Main street	202	16 478
	胡同 Alley	114	2 787
	绿地 Green area	11	25
总计 Total		514	31 475

二级诊断是对一级诊断结果为“差”(不健康)的植株进行精细诊断, 调查树根部的裸露、松动、腐朽深度情况; 计算树干基部、树干部位和大枝部位的损伤开裂宽度所占周长比; 木槌敲击树体是否有异常音; 观测记录树木的病虫害、倾斜状况、树冠枯枝、留茬枝等情况; 记录植株生境处的遮荫、与设施距离、防踩铺装方式、修剪方法、栽植距离、栽培管护等情况, 筛选评价指标然后对指标进行赋值, 并利用主成分分析和聚类分析评估植株受害等级, 按照树木受害程度依次递增的顺序分为 1 级、2 级、3 级、濒死 4 个等级。

2.3 评价方法

2.3.1 筛选健康评价指标 树木生长受环境和人为因素的影响, 树木根、大枝、树干等部位的外部生长状况可直接反映树木受胁迫的迹象及其健康状

况。本研究参考翁殊斐等^[27]和汪瑛^[28]的评价指标体系和指标健康等级赋值原则, 共选取了二级诊断的 10 个影响程度较大的指标, 指标健康等级最高赋值为 5 并逐级递减。所选指标及其赋值原则如下:

基部完整率(X_1)。基部完整率=(1-损伤宽度/树干周长)×100%, 其中损伤宽度指树皮损伤、木质部开裂、腐朽等情况的最大宽度。

基部空洞程度(X_2)。目测无空洞且木槌敲击无异常音, 赋值 3; 异常音小, 赋值 2; 异常音大或目测有空洞, 赋值为 1。

树干完整率(X_3)。与基部完整率计算方法相同。

树干空洞程度(X_4)。与基部空洞程度赋值原则相同。

根部腐朽程度(X_5)。以钢棒倾斜 45°时的插入

深度为腐朽深度依据,目测无腐且钢棒不能插入赋值 5;腐朽深度 0~5 cm 赋值 4;腐朽深度≥5~<10 cm 赋值 3;腐朽深度≥10~<15 cm 赋值为 2;腐朽深度≥15 cm 赋值 1。

一级枝健康程度(X_6)。受害率=损伤宽度/周长,其中损伤宽度指树皮损伤、木质部开裂、腐朽等情况的最大宽度。受害率为 0,赋值 5;受害率≤1/4,赋值 4;受害率>1/4~≤1/3,赋值 3;受害率>1/3~≤2/3,赋值 2;受害率>2/3,赋值 1。

整体病虫害(X_7)。受害率=受害宽度/周长,其中受害宽度指寄生物危害、病害等致树皮损伤的最大宽度。受害率为 0,赋值 5;受害率≤1/4,赋值 4;受害率>1/4~≤1/3,赋值 3;受害率>1/3~≤2/3,赋值 2;受害率>2/3,赋值 1。

长势与枯枝(X_8)。冠形圆满、长势良好无枯枝,赋值 5;≤10% 树冠微缺和枝条枯死,赋值 4; >10%~≤20% 树冠缺损和枝条枯死,赋值 3; >20%~≤30% 树冠缺损和枝条枯死,赋值 2; >30% 树冠缺损、偏冠严重和枝条枯死,赋值 1。

留茬枝与修剪(X_9)。修枝规范无留茬枝,赋值 3;修剪不当的留茬枝直径<10 cm 或长度<20 cm,赋值 2;留茬过高的留茬枝直径≥10 cm 或长度≥20 cm,赋值 1。

环境影响(X_{10})。生长空间充足无遮荫、有防踩铺装,赋值 5;栽植密度较小无遮荫、有防踩铺装,赋值 4;树枝与公共设施近遮荫、无防踩铺装,赋值 3;阻碍交通、生长空间受限或<1/2 根部裸露,赋值 2;根基部可晃动或≥1/2 根部裸露,赋值 1。

2.3.2 健康评价模型的建立 采用主成分分析、聚类分析、判别分析 3 种方法对国槐的健康状况进行科学评价。首先对评价指标数据进行标准化处理,计算相关系数矩阵;提取累计方差贡献率 80% 以上的主成分,计算主成分的因子载荷矩阵、特征值和主成分载荷矩阵,得出主成分的表达式;然后根据主成分的方差贡献率计算权重,从而计算每株树木的健康综合得分;最后对健康综合得分进行聚类分析和判别分析,评定树木的受害等级。受害等级评价结论分为 1 级、2 级、3 级、濒死 4 个层次。

(1)原始指标数据标准化处理。采集 p 维随机向量 $x=(x_1, x_2, \cdots, x_p)^T$, n 个样品 $x_i=(x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{ip})^T, i=1, 2, \cdots, n$ 。 $n>p$, 构造样本距阵 $Z_j=\frac{x_{ij}-\bar{x}_j}{s_j}, i=1, 2, \cdots, n; j=1, 2, \cdots, p$, 其中 $\bar{x}_j=\frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n}, s_j^2=\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij}-\bar{x}_j)^2}{n-1}$, 得标准化矩阵 Z 。

(2)根据标准化矩阵 Z 求得其相关系数矩阵 R , $R=[r_{ij}]_{p \times p}=\frac{Z^T Z}{n-1}$, 其中 $r_{ij}=\frac{\sum Z_{kj} \cdot Z_{ki}}{n-1}, i, j=1, 2, \cdots, p$ 。

(3)计算样本相关系数矩阵 R 的特征方程 $|R-\lambda I_p|=0$, 得 p 个特征根,提取累计方差贡献率≥80% 的主成分,即 $\sum_{j=1}^m \lambda_j \geq 0.80$, 确定 m 的值,对每个 $\lambda_j, j=1, 2, \cdots, m$,解方程组 $Rb=\lambda_j b$,得到单位特征向量 b_j^0 。

(4)将标准化的指标变量转化为主成分综合得分的表达式 $U_{ij}=Z_{ij}^T b_j^0$, 其中 $j=1, 2, \cdots, m$ 。以 U_1 为第 1 主成分, U_2 为第 2 主成分,依次类推。

(5) m 个主成分的综合评价。先对 m 个主成分进行加权求和,权数一般采用公式 $w_i'=w_i/(w_1+w_2+\cdots+w_m)$ (其中 $i=1, 2, \cdots, m$) 进行归一化处理,即用每个主成分的方差贡献率 w_i 除以累计方差贡献率,得到主成分的得分值,然后对树木进行健康评价。

(6)计算每株树木的健康综合得分 Y 。公式为: $Y=(w_1 U_1+w_2 U_2+\cdots+w_m U_m)/$ 累计方差贡献率。

2.4 首都功能核心区国槐健康状况的主要影响因素分析

当前关于城市林木的研究内容多倾向于结构特征分析,林木的健康评价仅考虑林木本身生长状况,而忽视其他潜在因素的影响。所以本研究基于北京首都功能核心区 1 623 株国槐的二级诊断调查数据,参考专家意见,选择胸径、冠幅、修剪方法、防踩铺装、与设施距离、遮荫情况等 6 个影响程度较大的因素,并依据国槐的二级健康评价结果,从生长因素(胸径、冠幅)、管护措施(修剪方法、防踩铺装)、环境因子(与设施距离、遮荫情况)3 个方面探究国槐林木健康状况的影响因素。由于国槐为较速生树种,研究中以 10 cm 为梯度将胸径划分为 6 个水平,分别为≥20~<30, ≥30~<40, ≥40~<50, ≥50~<60, ≥60~<70, ≥70 cm; 以 5 m 为梯度,将冠幅划分为 5 个水平,分别为≥0~<5, ≥5~<10, ≥10~<15, ≥15~<20, ≥20 m; 修剪方法划分为 3 个水平,分别为留茬过高、修剪不当、修剪规范;防踩铺装划分为 6 个水平,分别为无铺装、网格铺装、透气砖铺装、砂石覆盖、有机材料覆盖、水泥铺装;参照城市林木的一般栽植株行距,以 2 m 为梯度,将树

木与设施的距离划分为 5 个水平,分别为 $\geq 0\sim <2$, $\geq 2\sim <4$, $\geq 4\sim <6$, $\geq 6\sim <8$, ≥ 8 m;遮荫情况划分为 2 个水平,分别为遮荫和无遮荫,采用 2.3 节建立的健康评价模型,计算每株树木的健康综合得分,评价不同因素对国槐健康状况的影响。

2.5 数据处理

本研究采用 SPSS 19.0 和 Excel 2010 进行数据统计与分析,利用单因素方差分析(One-way ANOVA)和邓肯多重比较(Duncan test),探究核心区内国槐的健康状况及其影响因素。

3 结果与分析

3.1 北京首都功能核心区国槐的一级健康评价

调查可知,北京首都功能核心区内国槐数量共 31 475 株,其中东城区共 12 185 株,占比 38.71 %;西城区共 19 290 株,占比 61.29 %,西城区国槐的总数量大于东城区。研究区国槐的一级健康评价结果见图 1。由图 1 可知,北京市核心区内 3 个健康等级的林木数量均呈正态分布,健康和亚健康状态的林木所占比例均较大,分别为 12.81% 和 82.03%;不健康等级林木所占比例最小,为 5.16%。从不同健康等级的变化特点看,3 个健康等级林木在西城区所占比例均较大,且东城区亚健康的国槐株数远小于西城区,而两个城区内健康和亚健康国槐数量的差距较小。

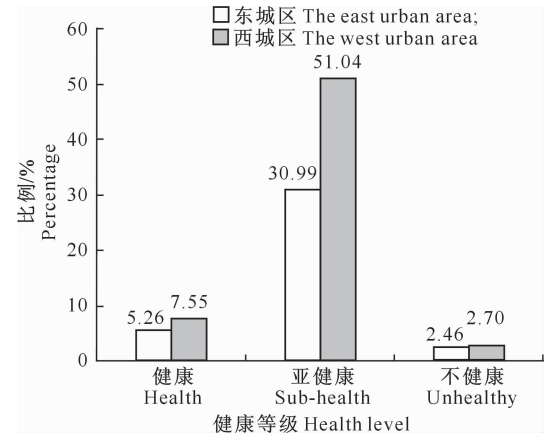


图 1 北京首都功能核心区国槐的一级健康评价结果
Fig.1 The first level health evaluation of *S. japonica* in the functional core area of Beijing

3.1.1 东城区不同区域国槐的一级健康评价 由图 2 可知,在北京市东城区主要街道、胡同 2 个区域内,3 个健康等级的国槐数量均呈正态分布规律,亚健康状态国槐所占比例大,健康和亚健康等级国槐所占比例较小。东城区有 10 852 株国槐分布在主

要街道,1 144 株分布在胡同,只有 189 株分布在绿地区域。从不同健康等级的变化特点看,健康等级国槐分布在绿地区域的比例大,在胡同的比例小;亚健康等级国槐分布在主要街道的比例大,在绿地区域的比例小;不健康等级国槐分布在胡同的比例大,在绿地区域的比例小。

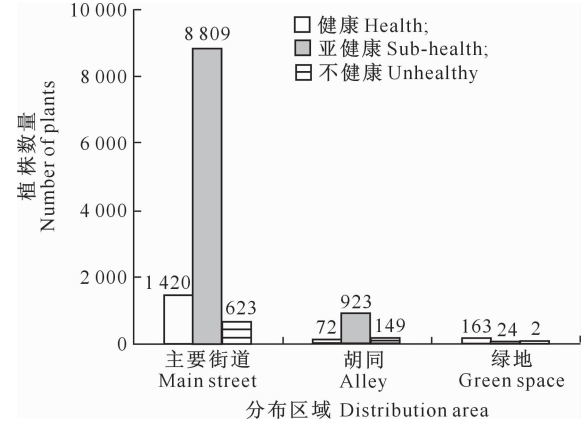


图 2 北京东城区国槐的一级健康评价结果
Fig.2 The first level health evaluation of *S. japonica* in the east urban areas of Beijing

3.1.2 西城区不同区域国槐的一级健康评价 由图 3 可知,北京市西城区主要街道、胡同、绿地 3 个区域内,3 个健康等级的国槐数量均呈正态分布规律,亚健康状态国槐所占比例大,健康和亚健康等级国槐所占比例小。西城区有 16 478 株国槐分布在主要街道,2 787 株分布在胡同,只有 25 株分布在绿地区域。从不同健康等级的变化特点看,健康等级国槐分布在绿地区域的比例大,在主要街道的比例小;亚健康与健康等级国槐的分布特点则相反;不健康等级国槐分布在主干街道、胡同两个区域的比例较为相近。

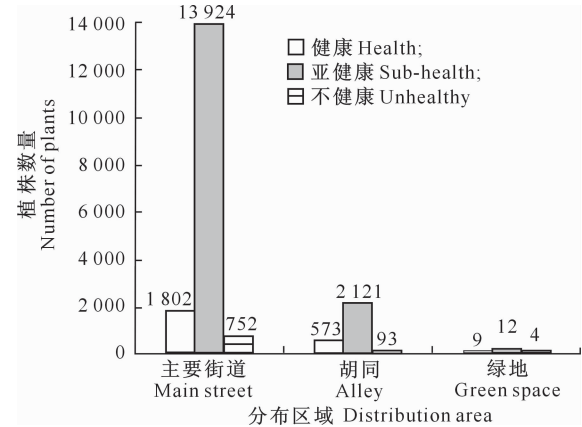


图 3 北京西城区国槐的一级健康评价结果
Fig.3 The first level health evaluation of *S. japonica* in the west urban areas of Beijing

3.2 北京首都功能核心区国槐的二级健康评价

3.2.1 健康评价指标分析 北京市首都功能核心区国槐的样本数据可以通过 KMO 和 Bartlett 球形检验,对数据进行因子分析发现,前 5 个特征根的值

表 2 北京市首都功能核心区国槐的主成分特征根和方差贡献率

Table 2 Principal component eigenvalue and variance contribution rate of *S. japonica* in Beijing capital functional core area

主成分 Main ingredient	特征根 Characteristic root	方差贡献率/% Variance contribution rate	累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate
F ₁	2.548	25.478	25.478
F ₂	1.771	17.711	43.189
F ₃	1.489	14.892	58.081
F ₄	1.288	12.878	70.959
F ₅	1.156	11.559	82.518

3.2.2 指标权重的确定 当某一指标在某一主成分上的因子载荷值的绝对值最大时,则该主成分包含了该指标的绝大部分信息,即该指标与该主成分相关程度最高。当某一主成分存在因子载荷绝对值较大的不同类型的多个因子时,则无法将该主成分

均大于 1,且累计方差贡献率达 82.518%(表 2),满足筛选要求,因此选取了能包含绝大多数信息的 5 个主成分,作为国槐健康评价的综合指标。

清晰地定义归属类型,这也验证了树木的健康状况是多个影响因素相互联系、共同作用的结果。本研究基于 10 个影响程度较大的指标构建北京市首都功能核心区国槐评价指标因子载荷矩阵,结果见表 3。

表 3 北京市首都功能核心区国槐的评价指标因子载荷矩阵

Table 3 Evaluation factor loading matrix of *S. japonica* in Beijing capital functional core area

评价指标 Evaluation index	主成分 Main ingredient				
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅
X ₁	-0.115	0.572	0.318	-0.585	0.082
X ₂	0.070	0.218	0.826	0.259	-0.038
X ₃	-0.112	0.409	0.040	-0.410	0.700
X ₄	0.101	-0.106	0.509	0.594	0.478
X ₅	-0.050	0.336	0.466	-0.146	-0.647
X ₆	0.363	0.717	-0.384	0.267	-0.077
X ₇	0.354	0.718	-0.249	0.413	0.000
X ₈	0.912	-0.194	0.067	-0.147	-0.023
X ₉	-0.753	0.056	-0.104	0.222	-0.062
X ₁₀	0.922	-0.186	0.046	-0.153	0.013

注: X₁ 为基部完整率, X₂ 为基部空洞程度, X₃ 为树干完整率, X₄ 为树干空洞程度, X₅ 为根部腐朽程度, X₆ 为一级枝健康程度, X₇ 为整体病虫害, X₈ 为长势与枯枝, X₉ 为留茬枝与修剪, X₁₀ 为环境影响。

Note: X₁ is the base integrity rate, X₂ is hollow base degree, X₃ is the trunk integrity rate, X₄ is hollow trunk degree, X₅ is the degree of root rot, X₆ is the first branch health, X₇ is the overall pest and disease, X₈ is growing and dead branches, X₉ is stubble branches and pruning, X₁₀ is environmental impact.

3.2.3 健康评价模型的建立 基于表 2 和表 3 的统计数据,按 $U_{ij}=Z_i^Tb_j^0, j=1,2,\cdots,m$,求得前 5 个主成分综合得分的表达式为:

$$U_1=-0.072ZX_1+0.044ZX_2-0.070ZX_3+0.063ZX_4-0.031ZX_5+0.227ZX_6+0.222ZX_7+0.571ZX_8-0.472ZX_9+0.578ZX_{10};$$
$$U_2=0.430ZX_1+0.164ZX_2+0.307ZX_3-0.08ZX_4+0.252ZX_5+0.539ZX_6+0.540ZX_7-0.146ZX_8+0.042ZX_9-0.140ZX_{10};$$
$$U_3=0.261ZX_1+0.677ZX_2+0.033ZX_3+0.417ZX_4+0.382ZX_5-0.315ZX_6-0.204ZX_7+0.055ZX_8-0.085ZX_9+0.038ZX_{10};$$

$$U_4=-0.515ZX_1+0.228ZX_2-0.361ZX_3+0.523ZX_4-0.129ZX_5+0.235ZX_6+0.364ZX_7-0.130ZX_8+0.196ZX_9-0.135ZX_{10};$$
$$U_5=0.076ZX_1-0.035ZX_2+0.651ZX_3+0.445ZX_4-0.602ZX_5-0.072ZX_6+0.000ZX_7-0.021ZX_8-0.058ZX_9+0.012ZX_{10}。$$

按公式 $Y=(w_1U_1+w_2U_2+\cdots+w_mU_m)/$ 累计方差贡献率,可得国槐树木健康评价模型为:

$$Y=(25.478U_1+17.711U_2+14.892U_3+12.878U_4+11.559U_5)/82.518。$$

3.2.4 国槐健康等级的判别分析 将国槐的健康综合得分按 K-均值聚类法处理,然后利用 Fisher 线

性判别分析检验 K -均值聚类结果的准确性,结果见表 4。由表 4 可知,按 K -均值聚类法,研究区国槐有 1 级受害植株 479 株,2 级受害植株 600 株,3 级受害植株 384 株,濒死植株 160 株;Fisher 线性判别检

验结果显示,仅有 1 级、2 级、濒死 3 个受害等级的 5 株的分类存在争议,可知 K -均值聚类法分类结果的正确率高达 99.69%,故采用此分类结果。

表 4 基于 K -均值聚类法的北京市首都功能核心区国槐的健康判别结果

Table 4 Health discrimination of *S. japonica* in Beijing capital functional core area based on K -means clustering

受害等级 Grade of injury	Fisher 线性判别分析 Fisher linear discriminant analysis				总计 Total
	1 级 First level	2 级 Second level	3 级 Third level	濒死 Dying	
1 级 First level	479	0	0	0	479
2 级 Second level	1	599	0	0	600
3 级 Third level	0	1	380	3	384
濒死 Dying	0	0	0	160	160
总计 Total	480	600	380	163	1 623

3.2.5 首都功能核心区国槐二级健康评价结果
依据国槐树木健康评价模型,对研究区内 1 623 株不健康国槐进行受害等级评价,结果发现,其中轻微受害的 1 级国槐为 479 株,占比 29.51%;较严重受害的 2 级国槐有 600 株,占比 36.97%;严重受害的 3 级国槐有 384 株,占比 23.66%;受害症状极严重的濒死国槐有 160 株,占比 9.86%,国槐的受害情况逐级递增,可知北京市首都功能核心区不健康国槐的大部分植株受害症状十分严重,亟需进行处理。

3.3 北京首都功能核心区国槐健康状况的影响因素

3.3.1 胸径和冠幅 由表 5 可知,胸径(D)对国槐的健康有显著影响($P<0.05$),整体来看随着胸径

的增大,树木健康综合得分呈现出递减趋势。当胸径 $\geq 20\sim <30$ cm 时,其健康综合得分最高;当胸径 $\geq 30\sim <40$, $\geq 40\sim <50$ cm 时健康状况差异不显著,且二者的健康综合得分显著高于其他 3 个胸径水平;当胸径 ≥ 70 cm 时国槐的健康综合得分最低。

由表 5 可知,冠幅(W)对国槐的健康有显著影响($P<0.05$),整体来看随着冠幅的增大,树木健康综合得分总体呈递减趋势。当冠幅 $\geq 5\sim <10$ m 时树木的健康综合得分最高;当冠幅 $\geq 15\sim <20$ m 时树木健康综合得分最低,且显著低于其他 4 个水平。当冠幅 ≥ 20 m 时,国槐大多为古树,可能是因为受到了良好的保护所以均比较健康。

表 5 胸径和冠幅对北京市首都功能核心区国槐健康的影响

Table 5 Effect of DBH and crown width on health of *S. japonica* in the functional core area of Beijing

指标 Index	因素范围 Factor range	样本量 Sample size	健康综合得分 Health scores			
			平均值 $\pm$ 标准差 Mean $\pm$ Standard deviation	极小值 Minimum	极大值 Maximum	标准误 Standard error
胸径(D)/cm Tree DBH	$\geq 20\sim <30$	604	2.62 $\pm$ 0.60 a	0.50	3.69	0.02
	$\geq 30\sim <40$	596	2.52 $\pm$ 0.62 ab	0.31	3.71	0.03
	$\geq 40\sim <50$	276	2.40 $\pm$ 0.67 b	0.36	3.62	0.04
	$\geq 50\sim <60$	85	2.17 $\pm$ 0.78 c	0.06	3.62	0.08
	$\geq 60\sim <70$	34	2.04 $\pm$ 0.79 c	0.31	3.54	0.14
	≥ 70	28	1.99 $\pm$ 0.70 c	0.72	3.23	0.13
冠幅(W)/m Grown width	$\geq 0\sim <5$	432	2.47 $\pm$ 0.67 a	0.38	3.64	0.03
	$\geq 5\sim <10$	1 009	2.55 $\pm$ 0.63 a	0.06	3.71	0.02
	$\geq 10\sim <15$	165	2.38 $\pm$ 0.67 a	0.13	3.62	0.05
	$\geq 15\sim <20$	14	1.73 $\pm$ 0.85 b	0.60	3.19	0.23
	≥ 20	3	2.30 $\pm$ 0.28 a	1.98	2.52	0.16

3.3.2 修枝及管护措施 由表 6 可知,修剪方法对国槐的健康有显著影响($P<0.05$),留茬过高、修剪不当、修剪规范 3 个水平下国槐健康综合得分具有显著性差异,其中修剪规范的国槐健康综合得分最高,国槐健康状况最好;留茬过高的国槐健康状况最差。3 种修剪方式下树木健康综合得分大小表现为

修剪规范 $>$ 修剪不当 $>$ 留茬过高。

由表 6 可知,不同防踩铺装措施对国槐的健康有显著影响($P<0.05$),有机材料覆盖的国槐健康综合得分最高,且健康综合得分显著高于其余几种防踩铺装,其余防踩铺装的国槐健康状况无显著差异。其中树木基部不透水不透气的水泥铺装的国槐

健康综合得分最低,树木健康状况最差。不同管护措施下,树木健康综合得分大小表现为有机材料覆盖>无铺装>透气砖铺装>砂石覆盖>网格铺装>水泥铺装。

表 6 修枝和管护措施对北京市首都功能核心区国槐健康的影响

Table 6 Effect of pruning and management measures on health of *S. japonica* in the functional core area of Beijing

指标 Index	管护措施 Management measure	样本量 Sample size	健康综合得分 Health scores			
			均值±标准差 Mean±Standard deviation	极小值 Minimum	极大值 Maximum	标准误 Standard error
修剪方法 Pruning method	留茬过高 Stubble too high	351	2.12±0.67 a	0.06	3.48	0.04
	修剪不当 Improperly trimmed	687	2.44±0.64 b	0.31	3.64	0.02
	修剪规范 Trim specifications	585	2.80±0.51 c	1.04	3.71	0.02
防踩铺装 Anti-step- ping pav- ing	无铺装 No paving	1 211	2.51±0.65 b	0.13	3.71	0.02
	网格铺装 Grid paving	173	2.44±0.72 b	0.06	3.69	0.05
	透气砖铺装 Breathable brick paving	67	2.48±0.64 b	0.78	3.55	0.08
	砂石覆盖 Sand and gravel cover	81	2.45±0.60 b	0.95	3.57	0.07
	有机材料覆盖 Machine material cover	30	2.91±0.44 a	1.86	3.71	0.08
	水泥铺装 Cement paving	61	2.31±0.65 b	0.72	3.58	0.08

3.3.3 环境因子 由表 7 可知,与设施距离(*L*)对国槐的健康有显著影响($P<0.05$),当树干与设施距离为 $\geq 0\sim <2$ m 时,树木健康状况较差;与设施距离 $\geq 2\sim <4$ m 时树木健康综合得分最高,且与设施距离 $\geq 4\sim <6$ m 树木的健康综合得分差异显著,这可能是由于与设施距离 ≥ 4 m 时,树木健康受其

他因素影响较大,所以其余距离水平下树木健康综合得分无显著差异。

由表 7 可知,是否遮荫对国槐的健康无显著影响($P>0.05$),树木健康综合得分大小表现为无遮荫>遮荫。

表 7 环境因子对北京市首都功能核心区国槐健康的影响

Table 7 Effect of environmental factors on health of *S. japonica* in the functional core area of Beijing

指标 Index	环境因子 Environmental factor	样本量 Sample size	健康综合得分 Health scores			
			平均值±标准差 Mean±Standard deviation	极小值 Minimum	极大值 Maximum	标准误 Standard error
与设施距离 (<i>L</i>)/m Distance from facilities	$\geq 0\sim <2$	553	2.46±0.66 ab	0.6	3.71	0.03
	$\geq 2\sim <4$	138	2.67±0.63 a	0.61	3.64	0.05
	$\geq 4\sim <6$	38	2.34±0.48 b	1.08	3.14	0.08
	$\geq 6\sim <8$	27	2.52±0.58 ab	1.27	3.62	0.11
	≥ 8	867	2.50±0.66 ab	0.06	3.71	0.02
遮荫情况 Shading	遮荫 Shaded	460	2.49±0.62 a	0.06	3.64	0.03
	无遮荫 Unshaded	1 163	2.50±0.66 a	0.13	3.71	0.02

4 讨 论

国内外学者在树木健康评价领域开展了大量研究,为树木的科学保护提供了可靠的技术支撑。不同的树木健康评价方法各有其优缺点,主成分分析法在林木健康评价中的指标选择和指标权重确定方面具备优势,能有效消除评价指标之间的相关影响,并能避免主观赋权法因主观随意性而造成的误差^[29]。张顺祥等^[15]、杨玲^[16]、郭琼^[30]、李梅^[31]都利用该方法对森林、生态系统以及人工林等进行了健康评价。本研究在主成分分析法的基础上,用健康综合得分来反映国槐的整体健康状况,用聚类分析法判定健康等级,用判别分析法^[32]进行检验,使评价结果的准确性较高。本研究结合了修枝管护以及环境因子建立的国槐健康评价体系,弥补了只根据

林木外部生长状况进行健康评价的不足,得到的健康、亚健康、不健康 3 级评价结果与张顺祥等^[15]和刘金良等^[33]对刺槐人工林健康评价、杨玲^[16]对古柏林健康评价、权俊花^[34]对城市国槐健康评价研究中的偏正态分布规律基本一致,且本研究得到的健康受害等级评价结果与国槐的实际生长状况一致,说明本研究所建立的评价模型在树木健康评价中具有良好的适用性。

林木的健康状况与其年龄大小紧密相关,随年龄的增加其胸径和冠幅也相应增大。本研究结果表明,当国槐的胸径(*D*) >20 cm 后,随着 *D* 的继续增大其健康综合得分呈降低趋势;随着冠幅的不断增大,国槐的健康程度呈先增强后减弱的趋势,当冠幅 $\geq 5\sim <10$ m 时树木健康综合得分最高,生命力强且健康,这与刘金良等^[33]刺槐林和高乾奉^[35]对国槐

林的评价结果基本一致。城市行道树个体受人为和环境因素影响较大,调查中发现,核心区内地国槐植株普遍存在枯枝、车辆剐蹭导致的树皮损伤、修枝处理不当造成的树皮撕裂腐朽等一个或多个受害症状,建议及时修剪枯枝、合理处理受损部位以及规范修枝技术,以改善核心区国槐的健康状况。

随着城镇化的发展,城市土壤硬化严重,其理化性质及生物组成都发生了很大改变,出现了土壤结构破坏、土壤紧实、含水量低、通气性差、温度较高、土壤养分的有效性降低等问题,严重影响了植物的生长和城市的生态环境^[36]。本研究结果表明,水泥铺装、网格铺装、砂石覆盖、无铺装和透气砖铺装的土壤条件较差,严重影响了国槐的健康生长,这与赵丹等^[37]的研究结论一致。本研究结果表明,有机材料覆盖优于其他措施,该措施下国槐健康状况最优,这是因为覆盖的有机材料作为土壤的保护层,能增强土壤保肥、保水性能及透气、渗水性能,从而对林木的健康生长起到良好的促进作用,这与王成等^[38]的研究结论相一致。有机材料覆盖同时还具有滞尘、防土壤板结、节能减耗等经济环保价值,但覆盖物的厚度、成分、病虫害状况、使用时间和范围等因子都对其实际应用效果产生不同的影响,还需继续深入探究,从而为促进城市林木的健康生长提供理论参考。

5 结 论

为了揭示北京市首都功能核心区的主要绿化树种国槐的健康状况及其影响因素,为管护技术措施的制定提供科学依据,本研究针对核心区国槐健康状况进行了评价,得出如下结论:

1)在北京首都功能核心区域内,现有国槐树木的生长状况总体上处于健康和亚健康的单株比例较高,占总数的 94.84%,其中东城区的占比为 36.25%;西城区的占比为 58.59%。核心区内国槐的生长健康状况总体上比较健康,具有继续保留培育养护的潜力。

2)北京首都功能核心区国槐的健康评价模型为 $Y = (25.478U_1 + 17.711U_2 + 14.892U_3 + 12.878U_4 + 11.559U_5)/82.518$ 。

3)核心区内占 5.16%的 1 623 株不健康国槐的单株健康状况较差。受害等级评价显示,其中 1 级占 29.51%,2 级占 36.97%,3 级占 23.66%,濒死占 9.86%,表明其中 70.49%的国槐受害症状十分严重,亟需进行管护和处理。

4)胸径、冠幅、防踩铺装、修剪方法、与设施距离是影响核心区国槐健康生长的重要因素。随着国槐胸径和冠幅的增加,树木的健康综合得分总体呈降低趋势;有机材料覆盖、修剪规范、与设施距离 $\geq 2 \sim < 4$ m、无遮荫条件下国槐的健康状况最好。由此可知,在树木基部覆盖有机材料,规范修枝技术,保障国槐的生长空间,新植株栽植时与设施距离 ≥ 2 m,避免树木被荫蔽,是国槐养护管理及促进其健康生长的重要措施。

志谢:外业调查得到北京市园林绿化局、北京林业大学增彩延绿课题组团队全体成员的协助,在此诚表谢忱!

[参考文献]

[1] 孙 昱,彭祚登. 国槐的历史文化价值研究 [J]. 北京林业大学学报(社会科学版),2018(2):23-31.
Sun Y, Peng Z D. Research on the history culture and value of *Sophora japonica* [J]. Journal of Beijing Forestry University (Social Science Edition), 2018(2):23-31.

[2] 付 娇,石枫华,王 磊,等. 北京城市总体规划(2016—2035 年) [M]. 北京:中国建筑工业出版社,2019:3-39.
Fu J, Shi F H, Wang L, et al. Beijing urban master plan (2016—2035) [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019: 3-39.

[3] Richard W H, James R C, Nelda P M. Arboriculture: integrated management of landscape trees shrubs and vines [M]. New Jersey, USA: Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999: 536-591.

[4] Michael S. Tree health management: evaluating trees for hazard [J]. Journal of Arboriculture, 1987, 13(12): 285-293.

[5] Hickman G W, Caprille J, Perry E. Oak tree hazard evaluation [J]. Journal of Arboriculture, 1989, 15(8): 177-184.

[6] 马克明,孔红梅,关文彬,等. 生态系统健康评价方法与方向 [J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2016-2116.
Ma K M, Kong H M, Guan W B, et al. Evaluation methods and directions of ecosystem health [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(12): 2016-2116.

[7] 马志林,陈丽华,于显威,等. 北京西山地区不同林分健康状况比较研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(3): 646-651.
Ma Z L, Chen L H, Yu X W, et al. Comparative study on the health status of different forests in Xishan district of Beijing [J]. Journal of Eco-Environment, 2010, 19(3): 646-651.

[8] 池 源,郭 振,石洪华,等. 北长山岛人工林健康状况评价 [J]. 生态科学, 2017, 36(1): 215-223.
Chi Y, Guo Z, Shi H H, et al. Evaluation of the health status of artificial forests in north Changshan island [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(1): 215-223.

[9] 刘颂颂,叶永昌,朱 纯,等. 东莞市古树名木健康状况初步研究 [J]. 广东园林, 2008, 30(1): 55-56.
Liu S S, Ye Y C, Zhu C, et al. Preliminary study on the health

- status of ancient and famous trees in Dongguan city [J]. Guangdong Garden, 2008, 30(1): 55-56.
- [10] Qin R Y, Qiu Q W, Lam J H M, et al. Health assessment of tree trunk by using acoustic? laser technique and sonic tomography [J]. Wood Science and Technology, 2018, 52(4): 1113-1132.
- [11] 黎彩敏, 翁殊斐, 林云, 等. 园林树木健康与安全性评价研究进展 [J]. 广东农业科学, 2009(7): 186-189.
- Li C M, Weng S F, Lin Y, et al. Research progress on health and safety evaluation of garden trees [J]. Guangdong Agricultural Science, 2009(7): 186-189.
- [12] 黎彩敏, 翁殊斐, 庞瑞君. 广州市 14 种常用园林树木健康评价 [J]. 西北林学院学报, 2010, 25(2): 203-207.
- Li C M, Weng S F, Pang R J. Health evaluation of 14 common garden trees in Guangzhou [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(2): 203-207.
- [13] 刘瑜, 徐程扬. 古树健康评价研究进展 [J]. 世界林业研究, 2013, 26(1): 37-42.
- Liu Y, Xu C Y. Research progress on the health evaluation of ancient trees [J]. World Forestry Research, 2013, 26(1): 37-42.
- [14] 黄帅帅, 曹哲源, 邱尔发, 等. 北京市居住区林木健康评价研究 [J]. 生态学报, 2019, 39(24): 1-11.
- Huang S S, Cao Z Y, Qiu E F, et al. Study on forest health evaluation in Beijing residential areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 1-11.
- [15] 张顺祥, 刘金良, 赵忠. 基于多元统计分析的永寿县刺槐人工林健康评价研究 [J]. 西北林学院学报, 2016, 31(2): 109-114.
- Zhang S X, Liu J L, Zhao Z. Health evaluation of *Robinia pseudoacacia* plantation in Yongshou county based on multivariate statistical analysis [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(2): 109-114.
- [16] 杨玲. 黄帝陵古柏健康评价与保护技术研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- Yang L. Health protection and evaluation research of *Platycladus orientalis* [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2014.
- [17] 金星, 孙宾, 聂立水, 等. 北京松山保护区油松健康标准评价体系研究 [J]. 广东农业科学, 2015, 42(17): 47-51.
- Jin X, Sun B, Nie L S, et al. Research on health standard evaluation system of *Pinus tabulaeformis* Carr in Beijing Songshan reserve [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(17): 47-51.
- [18] 王丽, 吉士东, 李珂. 南阳市区游园树木健康状况与植物多样性的相关分析 [J]. 科技创新与应用, 2017(3): 61.
- Wang L, Ji S D, Li K. Correlation analysis of tree health and plant diversity in Nanyang urban parks [J]. Science & Technology Innovation and Application, 2017(3): 61.
- [19] 梁善庆, 胡娜娜, 林兰英, 等. 古树名木健康状况应力波快速检测与评价 [J]. 木材工业, 2010, 24(3): 13-15.
- Liang S Q, Hu N N, Lin L Y, et al. Stress wave rapid detection and evaluation of the health of ancient and famous trees [J]. Timber Industry, 2010, 24(3): 13-15.
- [20] 李娟, 韩姣, 王晓娜, 等. 行道树树种结构及健康评价的研究 [J]. 吉林林业科技, 2015, 44(1): 16-20.
- Li J, Han Y, Wang X N, et al. Study on tree species structure and health evaluation of street trees [J]. Jilin Forestry Science and Technology, 2015, 44(1): 16-20.
- [21] 张楠, 董丽, 郝培尧, 等. 北京市中心城区行道树结构的研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(5): 101-106.
- Zhang N, Dong L, Hao P Y, et al. Study on the tree structure of streets in downtown Beijing [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2014, 34(5): 101-106.
- [22] 吴泽民, 黄成林, 白林波, 等. 合肥城市森林结构分析研究 [J]. 林业科学, 2002, 38(4): 7-13.
- Wu Z M, Huang C L, Bai L B, et al. Urban forest structure analysis and research in Hefei [J]. Forestry Science, 2002, 38(4): 7-13.
- [23] 刘常富, 何兴元, 陈玮, 等. 沈阳城市森林群落的树种组合选择 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2103-2107.
- Liu C F, He X Y, Chen W, et al. Combination selection of tree species in Shenyang urban forest community [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(12): 2103-2107.
- [24] 孟祥涛. 关于国槐行道树栽培技术研究 [J]. 农业与技术, 2018, 38(2): 198.
- Meng X T. Study on tree cultivation technology of *Sophora japonica* [J]. Agriculture and Technology, 2018, 38(2): 198.
- [25] 王德宏. 城市土壤对园林树木生长的影响探究 [J]. 城市建设理论研究, 2016(12): 95.
- Wang D H. Study on the influence of urban soil on the growth of garden trees [J]. Theoretical Research on Urban Construction, 2016(12): 95.
- [26] 张楠. “城市修补”理论下首都功能核心区微绿地规划设计研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
- Zhang N. Research on micro-greenbelt planning and design of capital functional core area under the ‘City Repair’ theory [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.
- [27] 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.
- Weng S F, Li C M, Pang R J. Using AHP to construct garden tree health evaluation system [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(1): 177-181.
- [28] 汪瑛. 北京市行道树结构分析与健康评价 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- Wang Y. Tree structure analysis and health evaluation of Beijing sidewalks [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.

- [25] 钱恒伟,徐鹏程,迟梦宇,等.尖孢镰刀菌与极细链格孢复合感染引起甘薯茎枯病[J].植物保护学报,2017,44(5):867-868.
Qian H W,Xu P C,Chi M Y,et al. Mixed infection by *Fusarium oxysporum* and *Alternaria tenuissima* on sweet potato *Fusarium* wilt [J]. Journal of Plant Protection,2017,44(5):867-868.
- [26] 康子腾,姜黎明,罗义勇,等.植物病原链格孢属真菌的致病机制研究进展[J].生命科学,2013,25(9):908-914.
Kang Z T,Jiang L M,Luo Y Y,et al. The research advances of mechanism of pathogenicity of *Alternaria* phytopathogenic fungi [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences,2013,25(9):908-914.
- [27] 王瀚,卓平清,王让军,等.甘肃陇南核桃黑斑病原菌的分离鉴定及其致病性研究[J].中国果树,2018(4):69-71.
Wang H,Zhuo P Q,Wang R J,et al. Isolation and identification of pathogen of bacterial black spot of walnut trees in Longnan,Gansu Province [J]. Chinese Fruits,2018(4):69-71.
- [28] 刘畅,卢宝慧,刘小畅,等.刺五加黑斑病的室内药剂筛选和田间药效试验[J].吉林农业大学学报,2015,37(3):281-286.
Liu C,Lu B H,Liu X C,et al. Indoor screening and field efficacy trails for fungicides to *Alternaria* leaf spot disease of *Acanthopanax senticosus* [J]. Journal of Jinlin Agricultural University,2015,37(3):281-286.
- [29] 史晓晶,周恩超,任璐,等.番茄早疫病菌对啮菌唑敏感基线建立及药剂作用方式初探[J].农药学报,2016,18(4):453-458.
Shi X J,Zhou E C,Ren L,et al. Sensitivity baseline of *Alternaria solani* to pyrisoxazole and the mode of action of pyrisoxazole [J]. Chinese Journal of Pesticide Science,2016,18(4):453-458.
- [30] 唐明,程智敏,陈叙生,等.烤烟赤星病的防治药剂及施药时期[J].天津农业科技,2017,23(7):80-83.
Tang M,Cheng Z M,Chen X S,et al. Fungicides of controlling *Alternaria alternata* and their applying time [J]. Tianjin Agricultural Sciences,2017,23(7):80-83.
- [31] 李仙兰,王冬梅.核桃 *Pestalotiopsis* sp. 真菌病害化学药剂防治[J].广西林业科技,2013,42(3):279-281.
Li X L,Wang D M. Using chemical agents to prevent diseases of *Juglans regia* caused by *Pestalotiopsis* sp. [J]. Guangxi Forestry Science,2013,42(3):279-281.
- [32] 杨紫红,喻国辉,陈远凤,等.棕榈科植物叶斑病原菌的生物学特性及药剂筛选试验[J].广东农业科学,2008(6):64-66.
Yang Z H,Yu G H,Chen Y F,et al. Biological characteristics and fungicide sensitivity of *Pestalotiopsis palmarum* causing leaf speckle of palm trees [J]. Guangdong Agricultural Sciences,2008(6):64-66.

(上接第 73 页)

- [29] 赵小亮,周国娜,高宝嘉,等.主成分分析法在承德县森林生态系统健康评价中的应用[J].中国农学通报,2008(6):400-403.
Zhao X L,Zhou G N,Gao B J,et al. Application of principal component analysis to the health evaluation of forest ecosystem in Chengde county [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2008(6):400-403.
- [30] 郭琼.基于SPSS软件的主成分分析法探析:榆次区土地生态系统健康评价[J].山西农业大学学报(自然科学版),2012,32(1):58-62.
Guo Q. Principal component analysis based on SPSS software: health evaluation of land ecosystem in Yuci district [J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition),2012,32(1):58-62.
- [31] 李梅.冀北山地华北落叶松人工林健康评价[D].河北保定:河北农业大学,2013.
Li M. Health evaluation of *Larix principis-rupprechtii* Mayr plantation in the northern Hebei province [D]. Baoding, Hebei: Hebei Agricultural University,2013.
- [32] 张润楚.多元统计分析[M].北京:科学出版社,2008:144-262.
Zhang R C. Multivariate statistical analysis [M]. Beijing: Science Press,2008:144-262.
- [33] 刘金良,于泽群,张顺祥,等.渭北黄土高原区刺槐人工林健康评价体系的构建[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(6):93-99.
Liu J L,Yu Z Q,Zhang S X,et al. Construction of health as-
- essment system for *Robinia pseudoacacia* plantation in the loess plateau of Weibei [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2014,42(6):93-99.
- [34] 权俊花.晋中市榆次区三种绿化树木健康评价[J].中国城市林业,2012,10(5):21-22.
Quan J H. Health evaluation of three green trees in Yuci district of Jinzhong City [J]. Urban Forestry of China,2012,10(5):21-22.
- [35] 高乾奉.国槐胸径生长模型研究[J].安徽农学通报,2010,16(15):37-39.
Gao Q F. Study on DBH growth model of *Sophora japonica* [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin,2010,16(15):37-39.
- [36] Mueller E C,Day T A. The effect of urban ground cover on microclimate growth and leaf gas exchange of oleander in Phoenix,Arizona [J]. International Journal of Biometeorology,2005,49(4):244-255.
- [37] 赵丹,李锋,王如松.城市地表硬化对植物生理生态的影响研究进展[J].生态学报,2010,30(14):3923-3932.
Zhao D,Li F,Wang R S. Research progress on the impact of urban surface hardening on plant physiology and ecology [J]. Acta Ecologica Sinica,2010,30(14):3923-3932.
- [38] 王成,郅光发,彭镇华.有机地表覆盖物在城市林业建设中的应用价值[J].应用生态学报,2005,16(11):2213-2217.
Wang C,Qie G F,Peng Z H. Application value of organic surface cover in urban forestry construction [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2005,16(11):2213-2217.