

北京市核心区洋白蜡行道树健康评价及影响因素

王 琰¹, 余 韵¹, 刘 勇¹, 王开勇², 周晓杰², 王 洋³

(1. 北京林业大学 林学院 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京市京彩燕园园林科技有限公司, 北京 101111; 3. 北京市大安山林场管理处, 北京 102419)

摘要: 【目的】针对城市树木健康评价的快速化、准确化及生产化, 调查并分析北京市首都功能核心区主要绿化树种洋白蜡 *Fraxinus pennsylvanica* 的生长、健康及管护现状, 为构建精炼、全面的洋白蜡行道树健康评价体系及管护技术措施提供科学依据。【方法】以北京市核心区 11 条主要街道的洋白蜡行道树为研究对象, 采用主成分分析、K-means 聚类构建健康评价模型, 采用判别分析进行结果验证, 将评价结果与评价指标结合建立洋白蜡 BP 神经网络健康预测模型; 同时从生长状况、管护措施以及环境因子 3 个方面, 分析胸径、树高、修枝留茬数量、防踩铺装等因素对洋白蜡行道树健康状况的影响。【结果】研究区域中, 健康、亚健康、不健康及濒死单株分别占总数的 39.20%、41.26%、16.78% 和 2.76%; 建立的 BP 神经网络健康预测模型中, 训练集、验证集、测试集与总集的期望值与预测值之间的相关系数分别为 0.999 7、0.972 0、0.997 6 及 0.995 3, 均大于 0.950 0, 表明此模型能准确地反映洋白蜡行道树 12 个评价指标与健康评价类别的关系, 可用于对同一地区其他白蜡行道树健康状况预测; 方差分析和多重比较表明: 胸径、修枝留茬、防踩铺装、株距、树池面积、车道数及车道走向均对洋白蜡行道树的健康状况存在显著影响 ($P < 0.05$), 树高影响较小。当洋白蜡胸径为 60~70 cm、树体无修枝留茬、树池铺装透水性好、株距为 5~10 m、树池面积为 1~2 m²、道路宽度适宜且为南北走向时, 洋白蜡健康状况最好。【结论】研究区域内, 洋白蜡行道树整体呈亚健康状态, 具有良好的保育保养潜力, 部分受害严重, 亟需处理。在洋白蜡行道树栽植及后期管护中, 确保其修剪规范、铺装材料透水强、株距 5~10 m、树池面积 1~2 m² 以及适宜的道路情况, 是保证洋白蜡行道树健康状况良好的重要措施。图 3 表 13 参 26

关键词: 洋白蜡; 首都功能核心区; 树木健康评价; 主成分分析; BP 神经网络

中图分类号: S731 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)06-1340-10

Health assessment and influencing factors of *Fraxinus pennsylvanica* in Beijing core area

WANG Yan¹, YU Yun¹, LIU Yong¹, WANG Kaiyong², ZHOU Xiaojie², WANG Yang³

(1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Jingcaiyuan Landscape Technology Co., Ltd, Beijing 101111, China; 3. Management Office, Beijing Da'an Forest Farm, Beijing 102419, China)

Abstract: [Objective] For the rapid, accurate, and productive assessment of urban tree health, this study aims to investigate and analyze the growth, health, and management status of *Fraxinus pennsylvanica* in Beijing core functional area, so as to provide a scientific basis for comprehensive health assessment and technical measures for management and protection. [Method] Taking street trees of 11 main streets in the core area of Beijing as the research object, the health assessment model of *F. pennsylvanica* was constructed by principal component analysis and K-means clustering. The results were verified by discriminant analysis, and the BP neural network health prediction model was established by combining the assessment results with the assessment indexes.

收稿日期: 2022-01-09; 修回日期: 2022-05-28

基金项目: 北京市园林绿化局项目 (CEG-2018-01)

作者简介: 王琰 (ORCID: 0000-0002-8636-8660), 从事森林培育学研究。E-mail: 369131843@qq.com。通信作者: 刘勇 (ORCID: 0000-0002-6958-0205), 教授, 博士生导师, 从事森林培育学研究。E-mail: lyong@bjfu.edu.cn

Meanwhile, the effects of DBH, tree height, the number of pruning stubble, anti-trampling pavement etc. on the health status of *F. pennsylvanica* were analyzed. [Result] The results indicated that healthy, sub-healthy, unhealthy, and dying plants accounted for 39.20%, 41.26%, 16.78%, and 2.76%, respectively. In the BP neural network health prediction model, the correlation coefficients between expected value and predicted value of the training set, verification set, test set, and total set were 0.9997, 0.9720, 0.9976 and 0.9953 respectively, all greater than 0.9500, indicating that the model could accurately reflect the relationship between 12 evaluation indexes and health assessment categories of *F. pennsylvanica* and could be used to predict the health status of other *F. pennsylvanica* in the same area. Variance analysis and multiple comparisons showed that DBH, pruning stubble, anti-trampling pavement, plant spacing, tree pool area, number of lanes and lane direction all had significant effects on the health status of *F. pennsylvanica* ($P < 0.05$), but tree height had little effect. The health condition of *F. pennsylvanica* was the best under the following conditions: 60–70 cm DBH, tree body without pruning stubble, tree pool pavement with good water permeability, 5–10 m tree spacing, 1–2 m² tree pool area, suitable road width, and north-south direction. [Conclusion] *F. pennsylvanica* street trees in the study area are in a sub-health state on the whole, with good conservation and maintenance potential. However, some of them are seriously damaged and need to be dealt with urgently. In planting and management process, important measures should be taken to ensure the good status of *F. pennsylvanica*, such as standard pruning, strong water permeability of pavement materials, 5–10 m plant spacing, 1–2 m² tree pool area, and suitable road conditions. [Ch, 3 fig. 13 tab. 26 ref.]

Key words: *Fraxinus pennsylvanica*; functional core area of the capital; tree health assessment; principal component analysis; BP neural network

洋白蜡 *Fraxinus pennsylvanica* 是中国重要的造林绿化树种，也是北京市使用频度最高的行道树种之一，其形体端正，枝叶繁茂而鲜绿，秋叶橙黄，不仅美观性强，还能捕获大量空气中的颗粒物，降低风速，改善城市空气质量^[1]。行道树是城市绿地系统的骨干，以“线”的形式联系着城市中分散的“点”和“面”的绿化，构成完整的城市森林生态系统^[2]。行道树在缓解城市热岛效应^[3]、净化空气^[4]、改善城市环境及维护城市内部生物多样性^[5]等方面均能起到显著作用，其健康状况不仅反映了城市绿化质量高低，同时也是景观效果及生态效益得以发挥的重要基础。行道树易受人为活动的干扰，生长空间受限及后期疏于管护，易出现树势衰弱、腐烂空洞及病虫害频发等问题，存在较高的安全隐患，限制其景观和生态效益的发挥^[6]。

近年来，层次分析法^[7-9]、主成分分析^[10-11]、综合打分法^[12]、树木活力度分级^[13]等方法广泛应用于树木健康评价中。不同评价方法各有优劣，评价结果精度也不尽相同，整体呈现出多方法相结合的发展趋势^[14-16]。针对行道树开展健康评价研究，尚未形成实用性强的评价体系。基于此，本研究在北京市核心区 11 条街道洋白蜡行道树调查结果基础上，结合行道树生境、管护措施等多方面因素，运用主成分分析及聚类分析建立洋白蜡行道树健康评价体系，采用判别分析进行结果验证，并基于验证结果建立 BP 神经网络预测模型，以期了解北京市核心区洋白蜡行道树健康状况，为行道树快速、准确的健康评价提供技术支撑。

1 研究区概况

北京市位于 39°56'N，116°20'E，地处华北平原北部，面积为 16 410.54 km²，下辖 16 个区。研究区位于新规划的首都功能核心区，地处北京城区中部，是全国政治、文化和国际交往中心的核心承载区，面积为 92.5 km²，共 32 个街道 183 个街区^[6,17]。核心区年平均降水量为 545.9 mm，年平均气温为 11.4 °C^[17]，气候为暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候，冬季寒冷干燥，夏季高温多雨，春秋短促，土壤类型主要是棕壤土。

2 研究方法

2.1 调查方法

调查于2018年夏季进行。选取分布于北京市核心区多个方位、包含多种道路类型的11条行道树为洋白蜡的街道。随机选取每条街道2侧各至少20株样树,对其生长状况、环境条件等指标进行每木调查,共计调查870株洋白蜡。道路概况见表1。

表1 研究区域道路概况

Table 1 Roads' profile in study area

道路名称	单向车道数	道路走向	道路类型	行政区划	道路名称	单向车道数	道路走向	道路类型	行政区划
南礼士路二条	1	东西	支路	西城	青年沟路	1	东西	次干路	东城
南纬路	2	东西	次干路	西城	先农坛西路	1	南北	支路	西城
燕京北街	1	东西	支路	西城	二七剧场路	1	南北	支路	西城
史家胡同	1	东西	支路	东城	南花市大街	2	南北	次干路	东城
西兴隆街	1	东西	支路	东城	德胜门内大街	2	南北	次干路	西城
崇文门西大街	3	东西	主干道	东城					

2.2 健康评价方法

2.2.1 筛选健康评价指标 将指标中定性数据量化后,与定量数据相结合,共同构建洋白蜡行道树健康评价指标体系。本研究参考汪瑛^[2]、邵鹏^[6]、余韵^[18]以及DB 11/T1692—2019《城市树木健康诊断技术规程》^[19]的指标选择和赋值原则,从行道树树冠、树干、根部的生长状况及病虫害、环境条件及管护等多个角度建立指标体系,共选取12个评价指标。所选指标及赋值原则如下:①长势与枯枝(x_1):冠形饱满、长势良好无枯枝,赋值为4;树冠缺损和枯枝率 $\leq 10\%$,为轻度,赋值为3;树冠缺损和枯枝率为 $10\% \sim \leq 30\%$,为中度,赋值为2;树冠缺损严重和枯枝率 $> 30\%$,为重度,赋值为1。②枝叶茂密程度(x_2):非常茂密赋值为3;茂密赋值为2;不茂密赋值为1。③树干异常音(x_3):木槌敲击树干,无异常音,赋值为3;轻微异常音,赋值为2;异常音较大,赋值为1。④树干完整度(x_4):树干表皮无腐朽损伤,赋值为4;损伤度 $\leq 1/3$,赋值为3;腐朽损伤度为 $1/3 \sim \leq 1/2$ 时,赋值为2;损伤度 $> 1/2$,赋值为1。其中,损伤度=树干表皮最大损伤宽度/树干周长。⑤基部空洞程度(x_5):树干基部空洞深度占树干基部直径的比例,用钢钎测量。目测无空洞,赋值为4;存在空洞情况,空洞程度 $\leq 1/3$,赋值为3;空洞程度为 $1/3 \sim \leq 1/2$ 时,赋值为2,损伤度 $> 1/2$,赋值为1。⑥根部腐朽程度(x_6):用钢钎测量。如钢钎无法插入,则无腐朽,赋值为4;插入深度 ≤ 5 cm,为轻度,赋值为3;插入深度为 $5 \sim \leq 20$ cm时,则为中度,赋值为2;深度 > 20 cm,则为重度腐朽,赋值为1。⑦修枝愈合率(x_7):伤口愈合良好的修枝数量占修枝总量的比例。⑧修枝留茬(x_8):无修枝留茬,赋值为4;留茬数为1个即为轻度,赋值为3;留茬数为2~3个即为中度,赋值为2;留茬数为3个以上即为重度,赋值为1。⑨病虫害情况(x_9):该指标结合叶片病虫害受害率、树干部病虫害受害率、异色叶比例3个方面进行考量。叶片病虫害受害率=受害叶片数量/叶总量;树干部病虫害受害率=受害宽度/周长;异色叶比例=异常叶色数量/叶总量,其中受害宽度指寄生物危害、病害及虫害等致树干部位受到损伤的最大宽度,周长指受害部位所在位置的枝干周长。无病虫害、无叶色异常、无羽化孔和排粪孔,赋值为4;存在排粪孔或1个羽化孔,叶色异常 $\leq 30\%$,叶片或树干部受害率 $\leq 1/3$,满足其中任意1项为轻度,赋值为3;存在2~5个羽化孔、叶色异常为 $30\% \sim \leq 50\%$ 、叶片或树干部受害率为 $1/3 \sim \leq 1/2$ 时,满足其中任意1项为中度,赋值为2;存在5个及以上羽化孔,叶色异常比例 $> 50\%$,叶片或树干部受害率 $> 1/2$,满足其中任意1项为重度,赋值为1。⑩环境影响(x_{10}):生长空间充足无遮荫,有防踩铺装且透水性良好,无根系裸露,赋值为4;生长空间稍狭,有防踩铺装但透水性差或存在轻微根系裸露现象,赋值为3;阻碍交通、生长空间受限、无防踩铺装或存在 $1/3 \sim \leq 1/2$ 根系裸露,赋值为2;生长空间严重受限(距离建筑物 ≤ 1 m)、基部晃动或 $> 1/2$ 根系裸露,赋值为1。⑪冠穴比(x_{11}):冠穴比 $= \pi \left(\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 W_{C_i} \right)^2 / A_{TP}$ 。⑫冠高比(x_{12}):冠高比 $= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 W_{C_i} / H$,其中: W_{C_i} 表示东、西、南、北4个方向的冠幅之和, A_{TP} 表示树池面积, H 表示树高。

2.2.2 评价模型的建立 本研究所选取的评价指标均为正向指标。将 12 个指标数据进行归一化处理^[20]；采用主成分分析法计算相关系数矩阵、特征值和方差贡献率，得到因子载荷矩阵，提取特征值大于 1 且累计方差贡献率 70% 以上 n 个主成分 F ，得出主成分的表达式 y_i ；再根据主成分的方差贡献率计算权重，从而得到主成分综合健康得分表达式 Z ；对健康综合得分进行 K -means 聚类分析，评定树木健康等级，结果共分为健康、亚健康、不健康及濒死 4 个层次；然后采用判别分析对评价结果进行验证。

2.2.3 神经网络预测模型 BP 神经网络是基于误差反向传播算法的多层前馈式神经网络 (multiple-layer feedforward network)，由输入层、隐藏层和输出层构成，其基本思想是学习过程由信号的正向传播与误差的反向传播 2 个过程组成，不断调整各层神经元的权值及阈值，进行误差校正，使训练的网络达到最优^[21]，具有较强的非线性适应性和多维函数映射能力^[20,22]。

基于 MATLAB R2019b 工具箱 nftool 环境设计了 1 个 3 层 BP 神经网络，将归一化后的指标数据及评价结果类别分别作为输入层及输出层。根据经验公式^[20]，计算隐含层单元数，后通过试错法^[21]对比，确定最终隐含层数量。采用均方误差 (E_{MS}) 与相关系数 (R) 对模型性能进行评估^[23]。

2.3 数据处理

采用 SPSS 26 和 MATLAB R2019b 分别进行数据统计分析及构建神经网络模型，利用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和 DUNCAN 进行多重比较。

3 结果分析

3.1 北京市首都功能核心区洋白蜡行道树健康评价

3.1.1 健康评价指标分析 样本数据通过 KMO ($K > 0.5$) 和 Bartlett ($P < 0.05$) 球形检验，对数据进行主成分分析，选择特征根值 > 1 的前 6 个主成分作为洋白蜡行道树健康评价的综合指标。结果如表 2。

表 2 主成分特征根及方差贡献率

Table 2 Principal component characteristic root and variance contribution rates

主成分	特征根	方差贡献率(w_i)/%	累计方差贡献率(W)/%	主成分	特征根	方差贡献率(w_i)/%	累计方差贡献率(W)/%
F_1	1.952	16.264	16.264	F_4	1.137	9.477	52.449
F_2	1.712	14.267	30.531	F_5	1.102	9.179	61.629
F_3	1.493	12.441	42.972	F_6	1.008	8.396	70.025

说明： $F_1 \sim F_6$ 为前 6 个主成分。 $i=1, 2, 3$

3.1.2 评价模型建立 根据表 3，构建前 6 个主成分与洋白蜡行道树综合指标之间的线性关系 y_i 。

$$y_1 = 0.352x_1 + 0.293x_2 + 0.235x_3 + 0.210x_4 + 0.115x_5 + 0.208x_6 + 0.559x_7 + 0.517x_8 + 0.195x_9 - 0.083x_{10} - 0.029x_{11} - 0.097x_{12};$$

$$y_2 = -0.238x_1 + 0.083x_2 + 0.407x_3 + 0.408x_4 + 0.046x_5 + 0.278x_6 - 0.119x_7 - 0.214x_8 + 0.244x_9 + 0.050x_{10} + 0.516x_{11} + 0.368x_{12};$$

$$y_3 = 0.173x_1 + 0.038x_2 + 0.302x_3 + 0.192x_4 + 0.276x_5 + 0.292x_6 - 0.326x_7 - 0.303x_8 + 0.090x_9 + 0.215x_{10} - 0.387x_{11} - 0.527x_{12};$$

$$y_4 = -0.158x_1 - 0.305x_2 - 0.193x_3 - 0.163x_4 + 0.653x_5 + 0.486x_6 + 0.085x_7 + 0.158x_8 - 0.300x_9 + 0.058x_{10} + 0.040x_{11} + 0.166x_{12};$$

$$y_5 = 0.334x_1 + 0.606x_2 - 0.286x_3 - 0.406x_4 + 0.246x_5 + 0.103x_6 - 0.171x_7 - 0.248x_8 + 0.211x_9 - 0.099x_{10} + 0.209x_{11} + 0.119x_{12};$$

$$y_6 = 0.290x_1 + 0.147x_2 + 0.031x_3 + 0.002x_4 - 0.163x_5 - 0.012x_6 + 0.019x_7 + 0.045x_8 - 0.399x_9 + 0.813x_{10} + 0.111x_{11} + 0.176x_{12}。$$

基于以上，按照公式 $Z = (w_1y_1 + w_2y_2 + w_3y_3 + \dots + w_ny_n)/W$ ，可得最终模型为： $Z = (16.264y_1 + 14.267y_2 + 12.441y_3 + 9.477y_4 + 9.179y_5 + 8.396y_6)/70.025$ 。

3.1.3 健康等级划分及验证 采用 K -means 聚类和判别分析分别进行分类和准确性检验，由表 4 可见：研究区域有洋白蜡健康树 341 株；亚健康树 359 株；不健康树 146 株；濒死树 24 株。线性判别结果可知： K -means 分类结果不存在任何分类争议，正确率达 100%。

3.1.4 健康评价结果 结果表明：健康的洋白蜡有 341 株，占比 39.20%，平均得分为 1.0222；亚健康的洋白蜡有 359 株，占比 41.26%，平均得分为 0.9374；不健康的洋白蜡有 146 株，占比 16.78%，平均得分为 0.8377；濒死的洋白蜡有 24 株，占比 2.76%，平均得分为 0.6064。每条道路的洋白蜡健康状况见表 5。洋白蜡行道树总体平均得分为 0.9448，在该评价系统中属于亚健康等级，核心区洋白蜡行道树健

表3 因子载荷矩阵

Table 3 Factor load matrix

指标	主成分						指标	主成分					
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6		F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
x_1	0.492	-0.312	0.211	-0.168	0.351	0.291	x_7	0.781	-0.156	-0.398	0.091	-0.180	0.019
x_2	0.409	0.109	0.047	-0.325	0.636	0.148	x_8	0.722	-0.280	-0.370	0.169	-0.260	0.045
x_3	0.328	0.533	0.369	-0.206	-0.300	0.031	x_9	0.272	0.319	0.110	-0.320	0.222	-0.401
x_4	0.294	0.534	0.234	-0.174	-0.426	0.002	x_{10}	-0.116	0.066	0.263	0.062	-0.104	0.816
x_5	0.161	0.060	0.337	0.696	0.258	-0.164	x_{11}	-0.041	0.675	-0.473	0.043	0.219	0.111
x_6	0.290	0.364	0.357	0.518	0.108	-0.012	x_{12}	-0.136	0.482	-0.644	0.177	0.125	0.177

健康状况整体呈中上等水平，约19%的树木健康状况较差，亟需进一步加强管理。

3.1.5 构建BP神经网络预测模型 将归一化后的12个指标数据作为输入层；将4个评价结果，即健康、亚健康、不健康和濒死，分别与(1, 0, 0, 0) (0, 1, 0, 0) (0, 0, 1, 0) (0, 0, 0, 1)一一对应，作为期望输出。隐含层通过试错法最终确定为10个。确定的网络拓扑结构为“12-10-4”(图1)。

训练及验证样本从样本数据中随机选取，且无交集。用于训练、验证及测试的样本数分别为608、131及131个。图2为神经网络 E_{MS} 的曲线图。由图2可知：当训练步数增加时，模型误差曲线逐渐逼近误差的最优值。当模型迭代18次时，验证误差达到0.0104，网络训练稳定且迅速收敛，说明该模型能够满足需求。

表4 基于K-means聚类分析的健康判别结果

Table 4 Health discrimination results based on K-means clustering analysis

健康等级	线性判别分析				
	健康/株	亚健康/株	不健康/株	濒死/株	总计/株
健康	341	0	0	0	341
亚健康	0	359	0	0	359
不健康	0	0	146	0	146
濒死	0	0	0	24	24
总计	341	359	146	24	870

表5 11条道路洋白蜡的健康状况

Table 5 Health condition of *F. pennsylvanica* in 11 roads

道路名称	健康树		亚健康树		不健康树		濒死树		总数/株
	数量/株	比例/%	数量/株	比例/%	数量/株	比例/%	数量/株	比例/%	
南礼士路二条	3	5.40	22	39.30	19	33.90	12	21.40	56
南纬路	21	47.70	18	40.90	5	11.40	0	0.00	44
燕京北街	51	63.00	26	32.10	4	4.90	0	0.00	81
史家胡同	10	16.70	34	56.70	13	21.70	3	5.00	60
西兴隆街	38	52.80	29	40.30	4	5.60	1	1.40	72
崇文门西大街	20	30.30	41	62.10	4	6.10	1	1.50	66
青年沟路	69	32.40	79	37.10	60	28.20	5	2.30	213
先农坛西路	18	41.90	22	51.20	3	7.00	0	0.00	43
二七剧场路	24	40.00	22	36.70	13	21.70	1	1.70	60
南花市大街	46	69.70	17	25.80	3	4.50	0	0.00	66
德胜门内大街	41	37.60	49	45.00	18	16.50	1	0.90	109
总数	341	39.20	359	41.26	146	16.78	24	2.76	870

图3表示4个数据集的期望值及预测值之间的比较情况。当验证误差为0.0104时，建立的神经网络模型中的训练集、验证集、测试集与总体数据的相关系数分别为0.9997、0.9720、0.9976及0.9953，均大于0.9500，表明建立的BP神经网络模型对于训练集、验证集、测试集和总体样本都有很好的逼近能力，能较好地反映洋白蜡行道树12个评价指标与健康评价等级之间关系，故BP神经网络预测模型在洋白蜡健康状况评价中有较好的适用性。

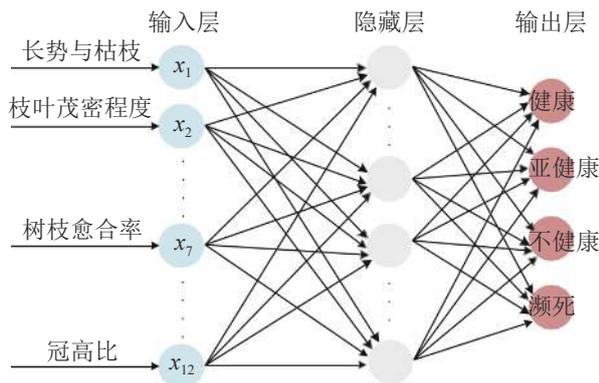


图 1 BP 神经网络模型的拓扑结构

Figure 1 Topological structure of BP neural network model

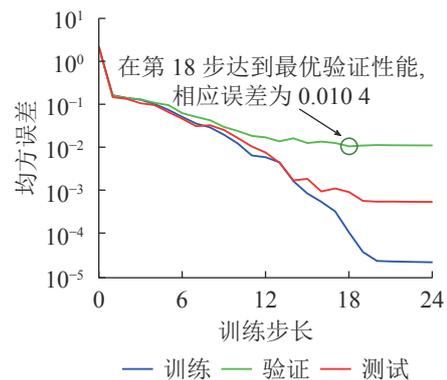


图 2 BP 神经网络模型的误差下降曲线图

Figure 2 Error decline curve of BP neural network model

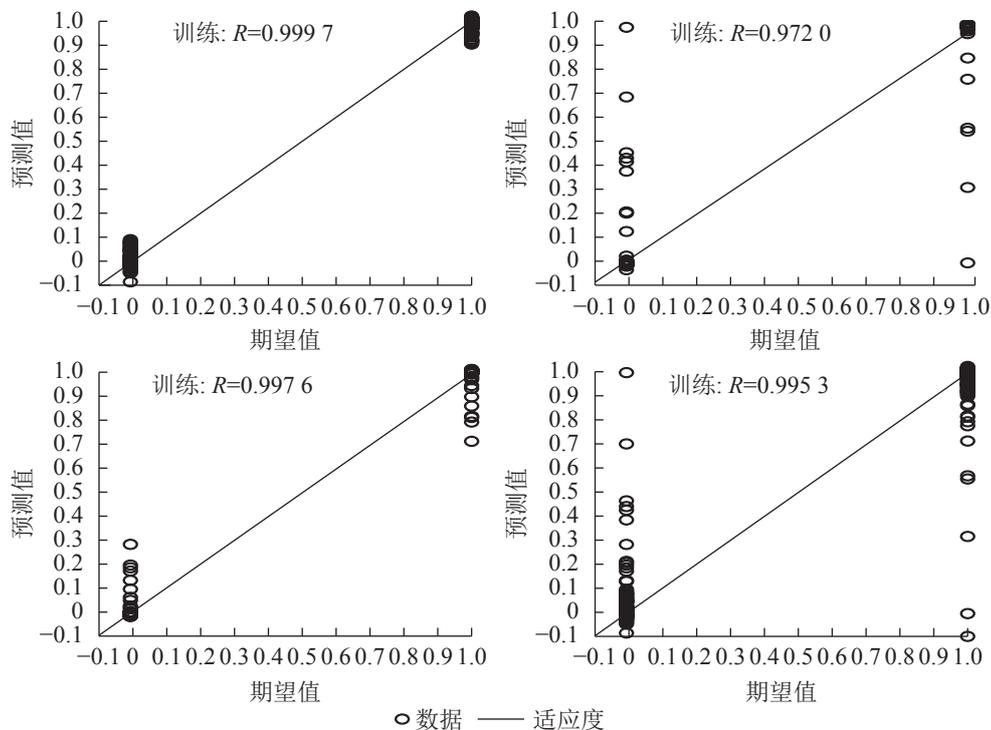


图 3 期望值和预测值的相关系数

Figure 3 Correlation coefficient between measured and predicted values

3.2 洋白蜡行道树健康状况影响因素

3.2.1 胸径及树高 研究区域洋白蜡行道树胸径平均值为 31.88 cm，约 68.20% 的洋白蜡树胸径集中分布在 20~40 cm，总体呈现左偏正态分布的趋势。单因素方差分析(表 6)可知：胸径对洋白蜡行道树的健康状况影响达显著水平 ($P < 0.05$)。当胸径 $\geq 10 \sim < 60$ cm 时，呈现随着胸径增加，综合健康评分随之下降的趋势，但在胸径 $\geq 60 \sim < 70$ cm 时，健康综合得分达最大值，且显著高于胸径 $\geq 30 \sim < 60$ cm 区间内的 3 个水平 ($P < 0.05$)。

调查区域内树高平均值为 11.78 m。由表 7 可知：洋白蜡树高大多数 $\geq 6 \sim < 18$ m，占比 95.75%，其他范围分布较少；洋白蜡健康综合得分与树高间的关系整体呈正相关，但并未达到显著水平。

3.2.2 管护措施 不规范的修枝方法会导致树体留茬，而留茬处往往易腐烂进而导致分枝处更大面积腐烂等，如不及时清除，腐烂可蔓延至主干木质部，威胁行道树的健康。由表 8 可知：存在修枝留茬的洋白蜡行道树占比 56.90%，留茬数多为 1~3 个，3 个以上的相对较少。修枝留茬现象对于健康综合得分影响显著 ($P < 0.05$)，无留茬的洋白蜡健康得分显著高于存在留茬的得分，但留茬数量对行道树健康综合得分无显著影响。

调查区域内, 88.16%的树池有防踩实措施, 主要包括毛毡子、梅花砖、塑料篦子+塑料+石子等模式。不同铺装材料的透水性差异较大, 影响土壤的水分、养分循环及树体的吸收, 从而影响树木健康状况。由表9可知: 防踩铺装的铺设及材料透水性显著影响洋白蜡健康状况 ($P<0.05$), 采用透水性强的铺装材料的洋白蜡行道树的健康综合得分最高, 显著高于无铺装和透水性差的铺装。

3.2.3 环境因子 株距限制着行道树生长范围, 过小会导致树木地上和地下生长空间压缩, 限制树木树冠及根系伸展, 加剧土壤营养资源的争夺, 进而导致生长所需矿质养分不足。调查区域内, 株距平均值为 5.38 m, 最大值 25.00 m, 最小值 1.50 m。株距对洋白蜡的健康状况存在显著影响 ($P<0.05$), 株距 $\geq 0\sim<5$ m 时, 洋白蜡健康得分为最低, 显著低于其他株距范围; 当株距 ≥ 5 m 时, 洋白蜡健康得分并不会随着株距增加而产生显著的变化 (表10)。

表7 树高对洋白蜡健康状况的影响

Table 7 Effects of tree height on the health status of *F. pennsylvanica*

树高/m	样本量	健康综合得分			
		平均值±标准差	极小值	极大值	标准误
$\geq 0\sim<6$	8	0.89±0.12 a	0.64	1.00	0.04
$\geq 6\sim<12$	494	0.94±0.10 a	0.45	1.15	0.00
$\geq 12\sim<18$	339	0.95±0.09 a	0.39	1.15	0.00
$\geq 18\sim<24$	29	0.95±0.05 a	0.84	1.05	0.01

说明: 不同字母表示不同树高间差异显著($P<0.05$)

行道树树池是城市道路绿化景观的节点。树池面积过小会导致土壤透水透气不良, 树木根系伸展和生长状况不佳; 过大的树池又会占用过多城市道路硬质地面, 对行人行车造成妨碍。表11可知: 调查区域内树池面积大多为 $\geq 1\sim<2$ m², 占比 88.74%, 且在此树池面积下生长的洋白蜡行道树具有最高的健康综合得分, 与其余树池面积下的洋白蜡健康得分差异显著 ($P<0.05$)。

车道数以及车道走向对于洋白蜡健康状况均有显著的影响 ($P<0.05$)。表12可知: 洋白蜡健康得分随车道数的增加呈先上升后下降的趋势, 当车道数为 2 条时, 洋白蜡的健康状况最佳, 显著高于车道数为 1 条时的健康得分, 而与车道数为 3 条时差异不大; 车道走向决定了行道树接受日照的情况, 车道为南北走向时, 洋白蜡健康状况显著优于东西走向 ($P<0.05$) (表13)。

表9 树池防踩铺装情况对洋白蜡健康状况的影响

Table 9 Effects of anti-stepping paving condition on the health status of *F. pennsylvanica*

防踩铺装	样本量	健康综合得分			
		平均值±标准差	极小值	极大值	标准误
无铺装	103	0.88±0.12 a	0.45	1.05	0.01
透水性强铺装	748	0.95±0.09 b	0.39	1.15	0.00
透水性差铺装	19	0.91±0.10 a	0.62	1.03	0.02

说明: 不同字母表示不同防踩铺装间差异显著($P<0.05$)

表6 胸径对洋白蜡健康状况的影响

Table 6 Effects of DBH on the health status of *F. pennsylvanica*

胸径/cm	样本量	健康综合得分			
		平均值±标准差	极小值	极大值	标准误
$\geq 10\sim<20$	82	0.96±0.07 ab	0.71	1.15	0.01
$\geq 20\sim<30$	354	0.96±0.08 ab	0.39	1.15	0.00
$\geq 30\sim<40$	241	0.93±0.11 a	0.45	1.10	0.01
$\geq 40\sim<50$	132	0.93±0.09 a	0.45	1.07	0.01
$\geq 50\sim<60$	54	0.92±0.10 a	0.47	1.08	0.01
$\geq 60\sim<70$	7	0.99±0.06 b	0.88	1.06	0.02

说明: 不同字母表示不同胸径间差异显著($P<0.05$)

表8 修枝留茬对洋白蜡健康状况的影响

Table 8 Effects of pruning stubble on the health status of *F. pennsylvanica*

修枝留茬/个	样本量	健康综合得分			
		平均值±标准差	极小值	极大值	标准误
0	375	0.97±0.08 b	0.58	1.15	0.00
1	215	0.94±0.10 a	0.39	1.08	0.01
2~3	180	0.92±0.11 a	0.45	1.10	0.01
>3	100	0.92±0.08 a	0.56	1.06	0.01

说明: 不同字母表示不同修枝留茬数间差异显著($P<0.05$)

表10 株距对洋白蜡健康状况的影响

Table 10 Effects of plant spacing on the health status of *F. pennsylvanica*

株距/m	样本量	健康综合得分			
		平均值±标准差	极小值	极大值	标准误
$\geq 0\sim<5$	68	0.90±0.11 a	0.45	1.09	0.01
$\geq 5\sim<10$	750	0.95±0.09 b	0.39	1.15	0.00
≥ 10	52	0.94±0.09 b	0.66	1.05	0.01

说明: 不同字母表示不同株距间差异显著($P<0.05$)

表 11 树池面积对洋白蜡健康状况的影响

Table 11 Effects of tree pool area on the health status of *F. pennsylvanica*

树池面积/m ²	样本量	健康综合得分			
		平均值±标准差	极小值	极大值	标准误
≥0~<1	9	0.90±0.10 a	0.64	0.99	0.03
≥1~<2	772	0.95±0.09 b	0.39	1.15	0.00
≥2	89	0.90±0.11 a	0.45	1.04	0.01

说明：不同字母表示不同树池面积间差异显著($P<0.05$)

表 12 单向车道数对洋白蜡健康状况的影响

Table 12 Effects of the number of unidirectional traffic lanes on the health status of *F. pennsylvanica*

单向车道数/条	样本量	健康综合得分			
		平均值±标准差	极小值	极大值	标准误
1	585	0.93±0.10 a	0.39	1.12	0.00
2	219	0.97±0.07 b	0.64	1.15	0.00
3	66	0.95±0.06 ab	0.70	1.07	0.01

说明：不同字母表示不同单向车道数间差异显著($P<0.05$)

4 结论与讨论

4.1 健康评价方法及指标

本研究采用主成分分析计算北京市核心区洋白蜡行道树的健康综合得分，采用聚类分析进行结果分类，采用判别分析法进行结果验证，分类结果与实际生长状况基本一致。将行道树健康状况评价指标和分类结果构建的拓扑结构为“12-10-4”的 BP 神经网络预测模型，结果表明：训练集和测试集均方误差均小于 0.0104，且训练集、测试集及总集相关系数均 >0.9900 ，说明 BP 神经网络模型能准确地反映洋白蜡行道树 12 个评价指标与健康评价类别的关系。与传统树木健康评价方法相比，该方法避免了庞杂的计算，从而实现对同一地区洋白蜡行道树健康状况的快速、准确评价。

本研究所选指标覆盖了行道树的树冠、树干及根部的健康状况以及行道树的生长环境条件及管护情况等因素，并引入“冠穴比”及“冠高比”2 个指标，将各定性指标进行分级、量化分析，研究结果表明：在所调查的 870 株洋白蜡中，健康、亚健康、不健康及濒死单株分别占 39.20%、41.26%、16.78% 及 2.76%。可以看出：多数洋白蜡生长状况良好，极少部分洋白蜡生长状况堪忧，处于濒死状态，亟需处理。这一结果与邵鹏^[6]、余韵^[18]的研究结果基本一致。同时，本研究得到的健康评价结果与洋白蜡实际生长状况一致，表明本研究建立的健康评价模型在北京市核心区洋白蜡行道树健康评价中有很好的适用性。

4.2 影响树木健康的主要因素

树木的健康状况与年龄紧密相关^[10]。本研究结果表明：洋白蜡胸径为 60~<70 cm 时，健康状况最好。这可能是由于胸径在此范围的洋白蜡树龄较大，栽植时间长，生长状况稳定的缘故；当胸径为 10~<60 cm，呈现随胸径增加，洋白蜡健康得分随之下降的趋势，这与李佳慧等^[10]对北京市核心区国槐 *Sophora japonica* 行道树的评价结果基本一致。城市行道树受人为活动影响较大。调查发现：约 87% 的洋白蜡存在不同程度的枯枝状况，约 27% 的洋白蜡存在由车辆剐蹭、修枝等造成的树皮损伤，约 57% 的洋白蜡存在由修枝不当造成的不同程度的修枝留茬。建议规范行道树修枝技术，及时去除枯枝并合理处理受损部位。行道树树池防踩铺装材料的不同影响着植物吸收水分及养分的过程。北京核心区树池铺装材料多采用透水砖、石子、毛毡子、铁篦子等。研究结果表明：在铺装材料透水性强树池中生长的洋白蜡，健康状况显著优于不铺装及铺装透水性差条件下的洋白蜡。这一结果与赵丹等^[24]、李佳慧等^[10]的研究结果基本一致。

行道树位于道路两侧。城市下垫面性质的改变，压缩了行道树生长的环境空间，阻碍了土壤水分的移动与循环，限制了行道树的生长^[25]。株距、树池面积一定程度上决定了行道树的生长及管护空间，而车道数及车道走向决定着道路宽度及树体生长位置，影响着树体接受日照情况^[6, 18]。本研究发现：株距、树池面积、车道数及走向都显著影响着行道树的健康状况，当保持洋白蜡行道树株距 ≥ 5 m、树池面积 $\geq 1\sim<2$ m²、车道数为 2 条且车道为南北走向时，洋白蜡健康状况较为理想。当株距 ≥ 5 m 时，随

表 13 车道走向对洋白蜡健康状况的影响

Table 13 Effects of directions of traffic lanes on the health status of *F. pennsylvanica*

车道走向	样本量	健康综合得分			
		平均值±标准差	极小值	极大值	标准误
东西	592	0.94±0.10 a	0.39	1.15	0.00
南北	278	0.96±0.07 b	0.64	1.15	0.00

说明：不同字母表示不同车道走向间差异显著($P<0.05$)

着距离继续增大,洋白蜡的健康状况不再发生显著的变化。随着树池面积和车道数增加,洋白蜡健康得分均呈现先上升后下降的趋势。这可能是随着生长范围及道路宽度的增加,生长空间及光照情况已不再是限制行道树健康的主要因素,而人为踩踏、车辆刚蹭等其他因素影响逐渐占据主导地位。当树池面积 $<2\text{ m}^2$ 时,树池的防踩铺装率为91.29%,树池面积 $\geq 2\text{ m}^2$ 时,防踩铺装率仅为60.67%。树池的防踩铺装率下降往往会导致人为踩踏的增加,导致土壤板结,影响行道树生长。这可能是导致树池面积增大但洋白蜡健康状况却显著下降的原因之一。本研究发现:车道走向对行道树健康状况影响显著,南北走向车道上的洋白蜡健康状况显著优于东西走向的洋白蜡。这是由于车道走向决定着树体的生长方位和接受日照情况。车道为东西走向时,南侧及北侧行道树受日照时间差异较大,北侧行道树接受日照时间相比南侧更长,而车道为南北走向时,东西两侧行道树接受日照角度及日照时间基本相同^[18,26],因此整体生长状况更好。道路状况往往还受到周边建筑物密度及高度、道路硬质铺装、车流量等多方面影响,因此仍需进一步探究。

5 参考文献

- [1] 周姝雯,高菲,马克明.基于ENVI-met模型的北京市典型道路行道树树种优化研究[J].中国园林,2020,36(6):141-144.
ZHOU Shuwen, GAO Fei, MA Keming. Research on species optimization of typical road trees in Beijing based on ENVI-met [J]. *Chin Landscape Archit*, 2020, 36(6): 141-144.
- [2] 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 Ying. *The Structural Analysis and Health Assessment of Roadside Trees in Beijing* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.
- [3] CHOW W T L, ROTH M. Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore [J]. *Int J Climatol*, 2006, 26(15): 2243-2260.
- [4] 潘辉,刘晓华,黄石德,等.城市行道树对道路空间CO浓度的影响[J].福建林学院学报,2008,28(4):356-360.
PAN Hui, LIU Xiaohua, HUANG Shide, et al. Effects of urban forest trees on CO concentration in street space [J]. *J Fujian Coll For*, 2008, 28(4): 356-360.
- [5] FERNÁNDEZ-JURICIC E. Avifaunal use of wooded streets in an urban landscape [J]. *Conserv Biol*, 2000, 14(2): 513-521.
- [6] 邵鹏.北京城市核心区国槐行道树健康评价研究[D].北京:北京林业大学,2020.
SHAO Peng. *A Study on Health Assessment of Sophora japonica Street Trees in Beijing Urban Core Area* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [7] 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 Shufei, LI Caimin, PANG Ruijun. Establishment of landscaping tree health assessment model using analytic hierarchy process [J]. *J Northwest For Univ*, 2009, 24(1): 177-181.
- [8] 游惠明,游秀花,陈笑玲,等.福州市行道树种综合评价与分级选择[J].中国城市林业,2009,7(1):15-17.
YOU Huiming, YOU Xiuhua, CHEN Xiaoling, et al. Integrated evaluation and selection of street trees species in Fuzhou City [J]. *J Chin Urban For*, 2009, 7(1): 15-17.
- [9] 罗贵斌.汉中市中心城区常绿行道树综合评价[J].西北林学院学报,2016,31(2):302-308.
LUO Guibin. Comprehensive evaluation of the evergreen streettrees planted in the downtown of Hanzhong city [J]. *J Northwest For Univ*, 2016, 31(2): 302-308.
- [10] 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.
LI Jiahui, PENG Zuodeng, LIU Yong, et al. Health evaluation and influencing factors of *Sophora japonica* in the capital functional core area of Beijing [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2021, 49(1): 64-73.
- [11] 杜甲宝,潘盼,杨芳绒.主成分分析法在郑州市行道树综合性能评价研究中的应用[J].西北林学院学报,2009,24(3):190-193.
DU Jiabao, PAN Pan, YANG Fangrong. Application of principal component analysis method in the comprehensive function assessment of the street trees in Zhengzhou [J]. *J Northwest For Univ*, 2009, 24(3): 190-193.

- [12] 郟光发, 彭镇华, 王成. 北京城区银杏行道树生长现状与健康状况研究[J]. *林业科学研究*, 2013, **26**(4): 511 – 515.
QIE Guangfa, PENG Zhenhua, WANG Cheng. Growth and health status of *Ginkgo biloba* in Beijing urban street area [J]. *Res For*, 2013, **26**(4): 511 – 515.
- [13] 莫训强, 闫维, 陈小奎, 等. 活力度分级法在天津空港经济区行道树健康评价中的应用[J]. *国土与自然资源研究*, 2012(1): 88 – 90.
MO Xunqiang, YAN Wei, CHEN Xiaokui, *et al.* Application of street trees' vigorous degree in greening management: a case of Tianjin airport economic area [J]. *Territ Nat Resour Study*, 2012(1): 88 – 90.
- [14] 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 Zhilin, CHEN Lihua, YU Xianwei, *et al.* Study on health assessment and comparison of different tree species in the west-mountains area, Beijing [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19**(3): 646 – 651.
- [15] 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.
JI Wenyuan, XING Shaohua, GUO Ning, *et al.* Health evaluation on spruce and fir forests in Miyaluo of the western Sichuan [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45**(3): 13 – 18.
- [16] 朱宇, 刘兆刚, 金光泽. 大兴安岭天然落叶松林单木健康评价[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(5): 1320 – 1328.
ZHU Yu, LIU Zhaogang, JIN Guangze. Health assessment of individual trees in natural *Larix gmelinii* forest in Great Xing'an mountains of China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(5): 1320 – 1328.
- [17] 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 Nan, DONG Li, HAO Peiyao, *et al.* Study on structure of street trees in central districts of Beijing [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2014, **34**(5): 101 – 106.
- [18] 余韵. 北京城市核心区白蜡行道树健康评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
YU Yun. *A Study on Health Assessment of Roadside Trees Fraxinus ssp. in Core Area of Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [19] 北京市市场监督管理局. 城市树木健康诊断技术规程: DB11/T 1692—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Beijing Municipal Bureau of Market Supervision and Administration. *Technical Regulations for Health Diagnosis of Urban Trees: DB11/T 1692—2019* [S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd.
- [20] HAN Xin, WEI Zheng, ZHANG Baozhong, *et al.* Crop evapotranspiration prediction by considering dynamic change of crop coefficient and the precipitation effect in back-propagation neural network model[J/OL]. *J Hydrol*, 2021, **596**(3/4): 126104[2021-12-10]. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126104.
- [21] 雷廷, 贾军元, 田福金, 等. 基于BP神经网络预测岩石导热系数[J]. *世界地质*, 2021, **40**(1): 131 – 139.
LEI Ting, JIA Junyuan, TIAN Fujin, *et al.* Prediction of rock thermal conductivity based on BP neural network [J]. *Glob Geol*, 2021, **40**(1): 131 – 139.
- [22] KUMAR M, RAGHUWANSHI N S, SINGH R. Artificial neural networks approach in evapotranspiration modeling: a review [J]. *Irrig Sci*, 2011, **29**(1): 11 – 25.
- [23] HUANG Xiaoqiao, LI Qiong, TAI Yonghang, *et al.* Hybrid deep neural model for hourly solar irradiance forecasting [J]. *Renewable Energy*, 2021, **171**: 1041 – 1060.
- [24] 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 Dan, LI Feng, WANG Rusong. Effects of ground surface hardening on plant eco-physiological progress in urban landscape [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(14): 3923 – 3932.
- [25] 李科科, 李延明, 丛日晨, 等. 模拟道路种植环境对银杏生长的影响[J]. *中国园林*, 2020, **36**(7): 117 – 122.
LI Keke, LI Yanming, CONG Richen, *et al.* Simulating the influence of road planting environment on the growth of *Ginkgo biloba* [J]. *Chin Landscape Archit*, 2020, **36**(7): 117 – 122.
- [26] 吴迪. 基于日照分析的郑州市行道树配置模式研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
WU Di. *Configuration Models Research of Avenue Trees Based on Sunlight Analysis in Zhengzhou City* [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018.