

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2020.0032

孙心雨, 田佳榕, 徐雁南, 等. 基于地基激光雷达的道路生态景观评价: 以黄海海滨国家森林公园为例[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(11): 1477-1484.

SUN Xin-yu, TIAN Jia-rong, XU Yan-nan, et al. Evaluation of Ecological Landscape of Road Based on Terrestrial Laser Scanning: A Case Study of Huanghai National Forest Park[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(11): 1477-1484.

基于地基激光雷达的道路生态景观评价： 以黄海海滨国家森林公园为例

孙心雨¹, 田佳榕¹, 徐雁南^{1①}, 徐昇^{1,2}, 李海东³ (1. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏南京 210037; 2. 南京林业大学信息科学技术学院, 江苏南京 210037; 3. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏南京 210042)

摘要: 道路生态景观建设是创建生态园林城市的重要内容,也是城市园林景观规划中必不可少的环节。以江苏省黄海海滨国家森林公园的阔叶道路和针阔混交道路为研究对象,基于地基激光雷达(terrestrial laser scanning, TLS)获取三维点云数据。考虑到生态和景观效益,选取固碳量、滞尘量、增湿量、植物美学效益、植物观赏效益和路旁景观融合度6个主要指标,通过均方差法为每个指标赋予权重,对道路生态景观进行综合评价。结果表明:(1)针阔混交道路评价值为2.44,阔叶道路为0.56,这表明对于黄海海滨国家森林公园而言,针阔混交道路具有更好的生态景观效益;(2)相比传统人工样地采集数据的方法,使用TLS扫描采集数据可大大减少时间和人力成本,且数据质量高。该研究可对行道树的生态防护功能做出定量评价,并为城市景观规划提供科学依据。

关键词: 行道树; 森林公园; 点云; 生态景观评价; 地基激光雷达

中图分类号: X826; U418.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2020)11-1477-08

Evaluation of Ecological Landscape of Road Based on Terrestrial Laser Scanning: A Case Study of Huanghai National Forest Park. SUN Xin-yu¹, TIAN Jia-rong¹, XU Yan-nan^{1①}, XU Sheng^{1,2}, LI Hai-dong³ (1. Centre of Co-Innovation for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. College of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China)

Abstract: The construction of road ecological landscape is an important part of building an ecological garden city, and it is also an indispensable link in landscape planning of urban garden. In this study, the roads with broad-leaved trees and the roads with coniferous and broad-leaved mixed trees in Huanghai National Forest Park in Jiangsu Province were taken as the research objects, and the three-dimensional point clouds data was obtained by the terrestrial laser scanning (TLS). Considering the ecological and landscape benefits, a total of six main indicators were selected, including carbon sequestration, dust retention, humidification, plant aesthetic benefits, plant ornamental benefits and roadside landscape integration. Then, the weight values to each indicator were calculated through the mean square error method, and the road ecological landscape was comprehensively evaluated. The results show that: (1) The evaluation value for the roads with coniferous and broad-leaved mixed trees is 2.44, and for the roads with broad-leaved trees is 0.56, which indicates that for the Huanghai National Forest Park, the roads with coniferous and broad-leaved mixed trees have better ecological landscape benefit. (2) Compared with the traditional methods of manually collecting data on the sample plot, the utilization of TLS can acquire high-quality data and greatly reduce time and labor costs. This study can make a quantitative evaluation of the ecological protection function of street trees, and provide a scientific basis for urban landscape planning.

Key words: street tree; forest park; point clouds; ecological landscape evaluation; terrestrial laser scanning

收稿日期: 2020-01-15

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD1100404)

① 通信作者 E-mail: nfuxyn@126.com

生态园林城市在促进健康环境的可持续发展、维持城市生态平衡中发挥着重要作用^[1]。构建生态园林城市的重点在于设计城市园林景观,优化城市生态环境。行道树不仅能美化道路景观,还具备降尘减噪、降温增湿的生态功能^[2],是城市生态景观系统的主要组成之一。通过监测行道树生长,评估城市生态景观效益,有利于城市管理者制定合理的城市生态景观规划,更好地建设生态园林城市。行道树信息的搜集方式多样,如人工实测^[3]、无人机拍摄^[2]和雷达扫描等。吴宾等^[4]基于车载激光雷达快速获取行道树三维点云数据,计算参数信息。然而使用车载激光雷达进行扫描时,数据质量受车速影响大,点云残缺率高,其中冠层数据缺失率可达 50%^[5],大面积的离散点云增加了行道树参数提取的难度。

地基激光雷达(terrestrial laser scanning, TLS)作为一种主动遥感工具,可快速采集高密度点云数据,稳定的采集平台确保了数据采集的精准性^[6],并在精准提取林分垂直结构中有较大优势^[7]。大量研究证明 TLS 在林木结构参数,尤其是树高、枝下高和冠幅的提取上精度高于 90%^[8-9]。在数据采集较完整的前提下,可将 TLS 数据目视解译提取的林木结构参数值视为真实值,用以估算植被生态景观效益并进行评价分析,可为实地调查减少大量人力资源^[9]。

目前,关于道路评价的研究还未形成一个统一的模型。陈芳^[10]、关磊等^[11]以及张良等^[12]基于已选取的评价指标,采用不同的权重计算模型,根据景观优化、生态影响和健康程度构建有关公路的评价体系,以此提出优化建议。林木结构参数的提取是建立评价指标模式的基础,可作为衡量生态景观差异的定量指标,使评价结果更具科学性和合理性。

以 TLS 为研究工具,通过处理分析点云数据、提取林木参数和构建评价体系,量化黄海海滨国家森林公园内两条道路的行道树生态景观效益,为建立生态园林城市、设计道路和评价行道树生态景观效益等提供方法指导和数据支撑。

1 研究区概况

黄海海滨国家森林公园于 2015 年创立,位于江苏东台市,地处北纬 32°33'~32°57',东经 120°07'~120°53',前身为 1965 年建立的东台林场。东台属亚热带季风性气候区,四季分明,雨量充沛,降水量为 1 061.2 mm。公园占地 0.45 万 hm²,地势平坦,土壤类型为砂质壤土,森林覆盖率达 90%,树种达

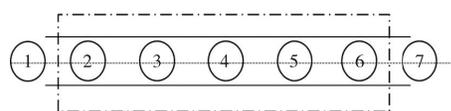
628 种,主要树种有 I-72 杨(*Populus euramericana* cv. I-72)、银杏(*Ginkgo biloba*)和水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)等,木材总蓄积量充足。

2 材料与方法

2.1 数据采集

于 2019 年 10 月采集研究数据,选取黄海海滨国家森林公园内两条不同树种的行道树道路,其中,针阔混交道路测量长度为 50 m,包含 13 棵圆柏(*Sabina chinensis*)和 12 棵黑杨(*Populus nigra*),圆柏与黑杨间种,株距为 5 m;阔叶道路测量长度为 100 m,包含 31 棵二球悬铃木(*Platanus acerifolia*),株距约为 10 m。

根据选取的研究道路两侧植被生长好、多为大乔木的特点,选用 RIEGL VZ-400i 地面三维激光扫描仪。RIEGL VZ-400i 具有 120 万点·s⁻¹ 超高激光发射频率和 50 万点·s⁻¹ 超高数据采集速度,可极大地减少在野外的扫描时间,测量相对精度为 5 mm,测距可达 80 m。扫描站点架设见图 1。



黑色点划线框为研究区域,黑色虚线为道路中轴线,扫描站点沿道路中央布设,站点间隔为 8~10 m,确保研究区域内每棵行道树在道路内侧的点云量充足。

图 1 地基激光雷达(TLS)站点架设示意
Fig. 1 Distribution of TLS stations

2.2 数据预处理

Riscan Pro 64 bit v 2.6.1 软件可对各站点的点云数据匹配对应的全景照片,并对点云进行 RGB 渲染,使点云着色。相邻站点间重叠的点云用于拼接,在设定拼接环境模式后,软件将根据模式内允许的误差范围进行数据自动拼接,对于站点距离间隔较远或重叠点云数量较少的情况,手动寻找参照物进行拼接。

在野外调查中,扫描仪可能因受到人为活动、飞鸟和设备本身等干扰,接收到很多错误的反射信号,在获取点云数据时不可避免地产生很多离群点,即噪点。这些噪点的存在会影响后期数据的处理,降低数据精度,甚至改变最终结果^[13]。因此,为提高数据精度,需要对点云数据进行去噪。目前,常见的去噪方法大多来自已有模型或数字图像去噪算法,如拉普拉斯算法、双边滤波等,笔者以点与点之间距离为主要衡量指标,根据多次实验经验,

以 10 个点为邻域, 计算域内各点间平均距离的中值和标准差, 并以相应计算公式限定距离的最大阈值, 大于阈值的点视为噪点, 保留阈值内的点进行后续计算。相关计算公式为

$$T_{\max} = M_{10} + 3 \times \sigma。 \quad (1)$$

式(1)中, T_{\max} 为 10 个点的阈值; M_{10} 为 10 个点的中值; σ 为 10 个点的标准差。

由于 TLS 穿透性强, 测距远, 扫描的点云数据中存在很多非研究对象, 如林下灌木、路边停靠车辆、道路指示牌、电线杆和道路两侧的其他绿化植物等, 可通过目视解译对非研究对象进行识别裁剪, 保留待研究的行道树点云数据。对裁剪后的数据采用改进的渐进加密三角网滤波算法, 做地面点分类, 并以分离出的地面点进行点云归一化, 消除地形对点云数据的影响。点云归一化公式为

$$Z_{\text{高度}} = Z_{\text{绝对}} - Z_{\text{地面}}。 \quad (2)$$

式(2)中, $Z_{\text{高度}}$ 为归一化后各点高程; $Z_{\text{绝对}}$ 为各点真实高程, 即绝对高程; $Z_{\text{地面}}$ 为各点临近的地面点高程。

2.3 单木分割

所选取的行道树呈等间距栽植, 冠层相互遮挡情况较少, 有利于植被的单木分割, 提升参数提取精度。对于阔叶道路, 根据阔叶树冠层结构分散的特性, 将初始种子点手动选在每棵树的树顶部分, 以相邻种子点间的水平距离作为阈值, 阈值内所有点云按照从树顶至树根的顺序进行聚类分割, 对比各点云分别到 2 个种子点的水平距离, 将点云分割给较小距离的种子点^[14]。这种分割方式的精度比 TLS 分割更高。对于针阔混交道路, 利用圆柏冠层结构特点, 选择常用的 TLS 点云分割方式, 将各棵树根部分选作初始种子点, 自下而上进行聚类分割。

2.4 参数提取

归一化后的点云数据可用于测量点云的相对距离, 单木分割后, 点云的归属关系也得到确定。单木分割存在一定误差, 即无法完全正确分割所有树木, 因此在提取单木参数时需区分处理。

对于分割正确的树木, 可根据单木分割中设定的初始种子点自动提取树高, 并依据先前经验测量枝下高。由于测量的站点集中在道路沿线, 行道树的三维点云普遍呈现道路内侧完整、道路外侧稀疏的现象, 冠层部分的点云缺失率低于 20%, 不影响冠幅自动提取。当处理分割有误的行道树时, 根据点云距离对树高、冠幅等参数进行人工提取。最终将所有统计参数汇总, 以便后续计算三维绿量。

2.5 评价体系构建

建立了定性与定量兼顾的评价方法, 结合实地考察及数据分析, 首先将指标体系划分为目标层、准则层和因子层 3 大部分, 采用常用园林植物的功能指标值^[15-17] (由于固碳与释氧、降温与增湿相关性较强, 未将释氧和降温作为评价指标) 从生态和景观 2 个方面筛选得到 6 个指标因子, 其中, $A_1 \sim A_3$ 、 B_1 为定量指标, B_2 、 B_3 为定性指标 (表 1)。

表 1 生态景观效益指标构建

Table 1 Assessment index system of ecological landscape benefits

目标层	准则层	因子层	数据获取方法
公园不同种行道树生态景观效益评价	生态效益(A)	固碳量(A_1)	统计计算
		滞尘量(A_2)	统计计算
		增湿量(A_3)	统计计算
景观效益(B)		植物美学效益(B_1)	统计计算
		植物观赏效益(B_2)	专家咨询打分
		路旁景观融合程度(B_3)	专家咨询打分

均方差法是一种权重赋值方法, 可将各指标作为随机变量, 经无量纲化后分别求取各指标均值和均方差, 并以此求出各指标权重。权重反映了信息量的权数, 指标的标准差越大, 其在综合评价中的作用就越大, 权重也随之增大。笔者研究中, 首先将数据无量纲化, 其计算公式为

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_j x_{ij}}, \quad i = 1, 2; j = 1, 2, 3。 \quad (3)$$

式(3)中, i 为准则层效益; j 为各效益下的 3 个指标; y_{ij} 为各指标无量纲化结果; x_{ij} 为各指标值。

均方差及权重计算公式为

$$\sigma(y_i) = \sqrt{\frac{\sum [y_{ij} - E(y_{ij})]^2}{2}}, \quad (4)$$

$$W_i = \frac{\sigma(y_i)}{\sum_j \sigma(y_i)}。 \quad (5)$$

式(4) ~ (5) 中, $\sigma(y_i)$ 为各效益的均方差; $E(y_{ij})$ 为各效益均值; W_i 为最终权重。

生态景观评价价值计算公式为

$$S = \sum_i [y_{ij} \times \sigma(y_i)]。 \quad (6)$$

式(6)中, S 为生态景观评价价值。

综上所述, 该研究设计思路分为点云数据的处理和生态景观评价体系的构建 2 个部分。针对点云数据, 主要步骤为数据的预处理、单木分割和参数提取。依据点云数据的参数提取结果构建评价体

系,选取合适的指标并统计,最终对不同行道树道路模式进行评价。

2.6 指标计算

2.6.1 三维绿量统计

三维绿量也称绿量,指树冠体积,即植物的茎、叶所占空间面积^[18]。目前,常用的三维绿量测量方法包括平面量模拟立体量法、立体摄影测量法和立体量模拟立体量法^[19]。采用平面量模拟立体量法,将行道树点云数据投影至 xy 水平坐标系平面,观察树冠部分,寻找近似几何结构,根据冠幅和冠高计算三维绿量。此种方法具有计算简单、误差小的特点。圆柏冠层贴近地面,计算绿量时以树高代替冠高。二球悬铃木冠层整体呈阔钟形,为了减小绿量计算的误差,可将冠层沿树高方向分割计算,分割后树冠可近似看作一个圆锥形和一个圆台,分段计算三维绿量。常用计算公式见表2。

表2 各行道树三维绿量计算公式

Table 2 Formulas for different street trees three-dimensional green volume

树种	树冠形状	三维绿量计算公式
圆柏	圆锥形	$\pi x^2 y / 12$
黑杨	卵形	$\pi x^2 y / 6$
二球悬铃木	圆锥形	$\pi x_1^2 y_1 / 12$
	圆台	$\pi(x_1^2 / 4 + x_2^2 / 4 + x_1 x_2) y_2 / 3$

x 为冠幅, y 为冠高; x_1 为圆锥底面直径; x_2 为圆台底面直径; y_1 为圆锥高; y_2 为圆台高。

2.6.2 生态效益换算

根据三维绿量计算结果,考虑到东台市与上海市地理环境的相似性,参考“上海市生态环境评价系统”的研究结果^[20](表3),将绿量换算为 CO_2 吸收量、滞尘量等生态效益,以此进行生态效益评价。

表3 每 $10^{-4} m^3$ 绿量换算的生态效益

Table 3 Per $10^{-4} m^3$ green volume's conversion of ecological benefit indexes $t \cdot a^{-1}$

植物类型	产氧量	CO_2 吸收量	SO_2 吸收量
常绿植物	35.2	48.5	0.030 3
落叶植物	19.0	26.2	0.030 3

针阔混生林滞尘量为 $11.0 t \cdot a^{-1}$,夏季蒸腾量为 $5.5 t \cdot d^{-1}$ 。

CO_2 是常见温室气体, CO_2 浓度增加会导致城市“热岛效应”加剧。植物通过光合作用吸收 CO_2 , 释放 O_2 , 达到固碳效果, 因此植物固碳量可用 CO_2 吸收量表示。

同理,植物的蒸腾作用体现了其降温增湿功能。植物经过蒸腾作用减少自身水分,并以汽态水

形式挥发至空气中,从而增加空气湿度,转为汽态水时大量吸热,可降低环境温度。植物的降温增湿功能在夏季尤为明显,能给人类提供更为舒适的生活环境^[16],因此植物增湿量可用夏季蒸腾量表示。

2.6.3 景观效益统计

选取植物美学效益、观赏效益和景观融合程度3个指标衡量行道树景观效益。其中,植物美学效益可用通过点云数据计算得到的道路剖面图像的绿视率衡量^[21]。选取道路中间位置,分别获取前后两个方向的点云图,将其转为栅格后通过目视解译结合最大似然法进行监督分类,区分植被与非植被,以此计算植被所占栅格数,对比总栅格数得到绿视率。具体计算公式为

$$I_{v,g} = S_g / S_t \times 100\% \quad (7)$$

式(7)中, $I_{v,g}$ 为绿视率; S_g 为植被栅格数; S_t 为图像栅格数。

植物的观赏效益及路旁景观融合程度由专家评分,分值设置见表4。

表4 景观效益指标评分

Table 4 The score of landscape benefit indexes

指标名称	分值	分值意义
植物观赏效益	1	植被群落色彩层次少,观赏性差
	2	植被群落略有色彩,观赏性较差
	3	植被群落色彩层次略丰富,观赏性一般
	4	植被群落色彩较为丰富,观赏性较好
	5	植被群落色彩丰富,观赏性好
路旁景观融合程度	1	植被景观与道路周围环境的融合度差
	2	植被景观与道路周围环境的融合度较差
	3	植被景观与道路周围环境的融合度一般
	4	植被景观与道路周围环境的融合度较好
	5	植被景观与道路周围环境的融合度好

3 结果与分析

3.1 单木分割

将已分割的点云按种子点顺序着色,遍历分割结果,在针阔混交道路的25棵树木中,冠层分割错误1棵,分割正确率为96.0%;在阔叶道路的31棵树木中,冠层分割错误1棵,冠层分割不全1棵,分割正确率为93.5%;两者分割正确率均高于90%,说明分割效果好。针阔混交道路因不同树种明显的形态特征,分割精度高于阔叶道路。

3.2 三维绿量计算

三维绿量统计结果见图2,每棵圆柏平均绿量为 $11.00 m^3$,每棵黑杨平均绿量为 $453.06 m^3$,每棵二球悬铃木平均绿量为 $29.01 m^3$ 。黑杨、二球悬铃木作为阔叶树种,具备宽大的冠层结构,在计算绿

量时优势显著。而黑杨的速生性使得其冠幅、冠高远超其他树种,各树种单株绿量由大到小依次为黑杨、二球悬铃木和圆柏。

以研究道路内现有株距为准,每 50 m 的针阔混交道路内共有 25 棵树,总绿量约为 5 579. 03 m³,每

50 m 长阔叶道路有 16 棵树,总绿量约为 899. 37 m³。对比针阔混交道路,阔叶道路树种单一,植株间距大。相同道路长度条件下,针阔混交道路株距小,行道树数量多,因此在 50 m 长道路内,针阔混交道路总绿量大于阔叶道路。

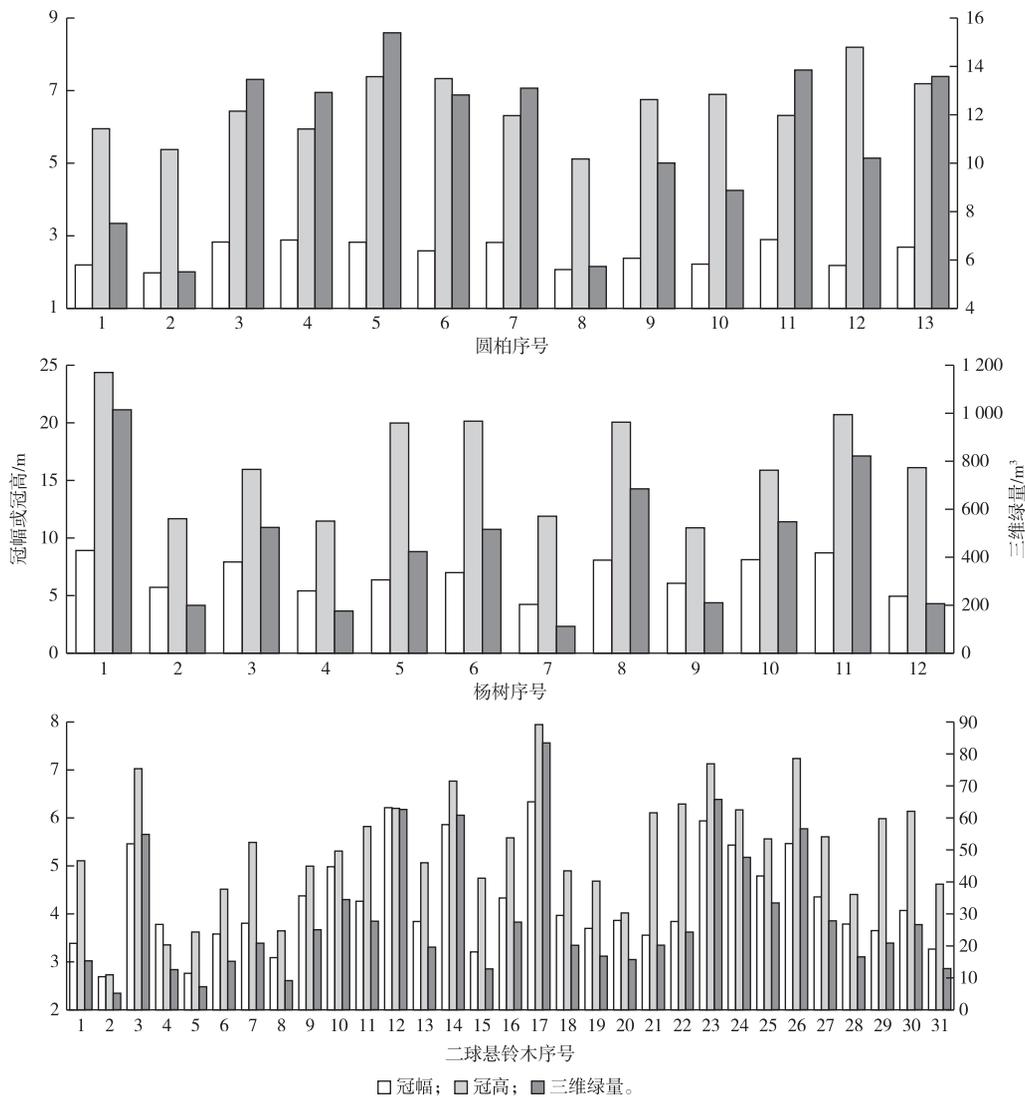


图 2 各棵行道树参数统计

Fig. 2 Statistics of street trees

3.3 生态效益估算

根据以上计算结果,参考上海浦江郊野公园的生态效益计算过程^[18],换算每 50 m 长的不同道路固碳量、滞尘量和增湿量等生态指标,结果见表 5~6。由表 5~6 可知,单株树木的固碳量、滞尘量和增湿量与其三维绿量呈正相关,树木冠幅越大,冠高越高,其三维绿量越大,单株树木的固碳量、滞尘量和增湿量就越高,生态效益越好。因此单株树木的生态效益由高到低依次为黑杨、二球悬铃木和圆

柏;从道路角度分析,每 50 m 内,针阔混交道路的固碳量、滞尘量和增湿量均高于阔叶道路,显然,针阔混交道路的生态效益更好。

3.4 景观效益计算

在美学效益上,计算得到针阔混交道路绿视率为 63.0%,阔叶道路绿视率为 40.1%,针阔混交道路的植物美学效益更好(表 7)。分析实际情况可知,所选取的阔叶道路路面宽,二球悬铃木尚未进入成熟期,冠层面积普遍较小;针阔混交道路路面

窄,两侧灌木层植被丰富,所以计算得出的绿视率偏高。

表 5 单株行道树生态效益

Table 5 Ecological benefits of each tree

树名	固碳量/ ($t \cdot a^{-1}$)	滞尘量/ ($t \cdot a^{-1}$)	增湿量/ ($t \cdot a^{-1}$)
圆柏	0.053	0.012	0.006
黑杨	1.187	0.498	0.249
二球悬铃木	0.076	0.031	0.016

表 6 每 50 m 不同行道树道路生态效益

Table 6 Per 50 meters ecological benefits of roads with different street trees

道路名称	固碳量/ ($t \cdot a^{-1}$)	滞尘量/ ($t \cdot a^{-1}$)	增湿量/ ($t \cdot a^{-1}$)
阔叶道路	2.356	0.989	0.495
针阔混交道路	14.617	6.137	3.068

就增湿量(夏季蒸腾量)日数而言,常绿植物按 365 d 计,落叶植物和针阔混交植物按 180 d 计。

表 7 不同行道树道路绿视率情况

Table 7 Results of visual green index in different roads

道路名称	植被所占栅格数	总栅格数	绿视率/%
阔叶道路	282 318	703 885	40.1
针阔混交道路	443 563	703 885	63.0

在观赏效益与景观融合度上,针阔混交道路与路旁的杨树林呼应,景观融合度高;高大的杨树与低矮的圆柏拉伸了道路垂直结构景观,层次分明;常绿针叶树种与落叶阔叶树种的相互搭配赋予了道路丰富的色彩,提升物种丰富度,道路观赏效益好。阔叶道路营造出道路整齐、路旁景观统一的景观效果。在景区内,阔叶道路因其树种单一难以体现道路垂直结构景观,观赏效益略低于针阔混交道路。

根据各项指标结果计算均方差,得到各项效益的权重。根据建立的评价模型,计算生态景观评价价值,得到针阔混交道路的生态景观评价价值为 2.44,阔叶道路为 0.56,针阔混交道路生态景观显著高于阔叶道路。统计各指标均方差可得,固碳量均方差为 0.36,在 6 个指标中最大,说明固碳量对评价模型影响最大。

4 讨论

道路及行道树的规划建设对建设生态园林城市具有重大意义,目前已公开发表的道路评价研究多以高速公路或城市干道为研究对象^[3,22-23],根据

研究道路的主要特征,主要围绕生态、景观和安全 3 个功能进行分析。与城市干道和高速公路相比,景区道路具有路面较窄、来往车辆少、道路安全性好的特点,游客对道路的要求集中在遮阴供氧和游玩观赏方面。笔者通过参考前人对道路的研究视角,立足研究区自身特点,综合考虑游客喜好,分析景区道路的生态效益和景观效益,筛选出 6 个评价指标构建评价体系。

在数据的采集与处理上,前人多采用问卷调查法和样地实测法。问卷调查法直观展现了居民感受^[23],注重人文因素,但缺少定量数据作为支撑,研究结果不具备普适性;样地实测法需以卷尺、测高仪等工具实地测量公路行道树^[3,24],获取的参数信息精准,但采集花费的时间较多,成本高。笔者采用地基激光雷达仪快速采集数据,通过对数据的处理提取参数信息,优化采集方法;考虑到游客感受,选取部分定性指标,并结合定量指标,使评价内容更全面。

分析评价结果,针阔混交道路生态景观评价得分分为 2.44,高于阔叶道路,反映了针阔混交道路在生态调节和游览观赏方面更好,原因在于针阔混交道路合理配置不同树种冠形与树高,不仅大幅减小行道树种植间距,而且拉伸了道路的垂直结构。定量生态指标为固碳量、增湿量和滞尘量,分别从植物光合作用、蒸腾作用及行道树对环境的影响方面,反映树木的生长状况与生态功能。3 个生态指标通过三维绿量计算得到,三维绿量是园林生态功能评价的重要部分^[18]。根据绿量统计结果,每 50 m 长的针阔混交道路总绿量为 5 579.03 m³,每 50 m 长的阔叶道路总绿量为 899.37 m³,针阔混交道路优于阔叶道路,进一步分析发现,黑杨树形巨大,显著提升了整条道路的总绿量,弥补了仅以圆柏作为行道树的不足,也证实了黑杨作为常见行道树种种的生态原因。对比 3 个指标可知,针阔混交道路在固碳量、增湿量和滞尘量上均优于阔叶道路。植物美学效益、植物观赏效益和路旁景观融合程度 3 个景观指标的选择,既涵盖了人类心理活动,又体现了景观生态学在生态园林城市中的重要地位,对景观效益指标进行评价可以更好地指导园内道路景观建设,并为公园的未来发展提供一种思路。黄海海滨国家森林公园未来可形成一个融合生态涵养与旅游经济的景观格局^[25],在确保用材林面积不减少的前提下,适当增加乡土树种的种植面积,优化群落结构,建立乡土树种生境系统;在旅游经济功能上,优化林木产业链,配备不同树种介绍,游客在

观光的同时还能得到知识的普及, 从而提升旅游的文化性。

5 结论

所构建的评价体系能够以数字形式对比显示当前不同道路绿化状况。评价结果表明, 选取的道路受行道树栽培时间不同、株距差异等影响, 在现阶段阔叶道路生态景观评价价值低于针阔混交道路, 具有一定合理性。随着行道树逐年生长, 道路生态景观随之改变, 未来的评价结果也将发生变化。笔者构建的生态景观评价体系可推广用于分析城市道路的综合绿化效果, 为道路生态监测及景观调整提供一种评价方法。结合研究结果, 针对生态园林城市建设提出以下建议: (1) 城市中不同功能道路可根据道路需求种植合适的行道树。非城市主要干道道路或景区内道路, 应着重考虑道路生态效益与景观效益。针阔混交道路能增加道路垂直空间结构, 提升道路观赏价值; (2) 选择行道树树种时应以适地适树为首要原则, 以乡土植物为主, 综合考虑树木花粉过敏、飞絮等生态问题, 加强后期养护管理, 提升道路整体舒适度。

评价体系的模型选择与调查数据的准确程度直接影响评价结果, 该研究在部分指标的选择和测量上还有进一步优化的空间, 未来数据采集可考虑采用将无人机影像数据与地基数据相结合的方式, 以解决行道树冠层点云数量缺失的问题, 提高参数提取精度。

参考文献:

- [1] 贾济红, 李广伟, 姜鑫林. 基于车载点云的园林绿化数据自动提取的研究与应用[J]. 现代测绘, 2019, 42(3): 49-51. [JIA Ji-hong, LI Guang-wei, QIANG Xin-lin. Research and Application of Automatic Extraction of Landscaping Data Based on Vehicle Point Cloud[J]. Modern Surveying and Mapping, 2019, 42(3): 49-51.]
- [2] AVAL J, DEMUYNCK J, ZENOU E, et al. Detection of Individual Trees in Urban Alignment From Airborne Data and Contextual Information: A Marked Point Process Approach[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 146: 197-210.
- [3] 殷明, 肖威, 纪易凡, 等. 高速公路生态景观质量评价指标体系和评价方法: 以江苏南通为例[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4128-4134. [YIN Ming, XIAO Wei, JI Yi-fan, et al. Index System and Method for the Evaluation of Highway Ecological Landscape Quality: A Case Study of Nantong City, Jiangsu Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(12): 4128-4134.]
- [4] 吴宾, 余柏菡, 岳文辉, 等. 一种基于车载激光扫描点云数据的单株行道树信息提取方法[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2013(2): 38-49. [WU Bin, YU Bai-lang, YUE Wen-hui, et al. Method for Identifying Individual Street Trees From the Cloud Data of the Vehicle-borne Laser Scanning Points[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2013(2): 38-49.]
- [5] 刘如飞, 马新江, 王鹏. 一种针对行道树残缺点云的三维绿量估计方法[J]. 遥感信息, 2018, 33(2): 53-57. [LIU Ru-fei, MA Xin-jiang, WANG Peng. A Three-dimensional Green Estimation Method for Incomplete Point Clouds of Street Trees[J]. Remote Sensing Information, 2018, 33(2): 53-57.]
- [6] 田佳榕, 代婷婷, 徐雁南, 等. 基于地基激光雷达的采矿废弃地生态修复的植被参数提取[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(8): 686-691. [TIAN Jia-rong, DAI Ting-ting, XU Yan-nan, et al. Extraction of Vegetation Parameters in Different Stages of Ecological Restoration on Abandoned Mine Area Based on T-LiDAR[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(8): 686-691.]
- [7] 吕国屏, 廖承锐, 高媛赞, 等. 激光雷达技术在矿山生态环境监测中的应用[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(7): 577-585. [LÜ Guo-ping, LIAO Cheng-rui, GAO Yuan-yun, et al. Application of LiDAR Techniques to Monitoring of Eco-environment in Mining Areas[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(7): 577-585.]
- [8] 刘鲁霞, 庞勇, 李增元, 等. 用地基激光雷达提取单木结构参数: 以白皮松为例[J]. 遥感学报, 2014, 18(2): 365-377. [LIU Lu-xia, PANG Yong, LI Zeng-yuan, et al. Retrieving Structural Parameters of Individual Tree Through Terrestrial Laser Scanning Data[J]. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(2): 365-377.]
- [9] TIAN J R, DAI T T, LI H D, et al. A Novel Tree Height Extraction Approach for Individual Trees by Combining TLS and UAV Image-Based Point Cloud Integration[J]. Forests, 2019, 10(7): 537.
- [10] 陈芳. 基于 AHP 和模糊数学的公路绿化景观评价方法[J]. 公路交通技术, 2019, 35(2): 154-160. [CHEN Fang. Evaluation Method for Highway Greening Landscape Based on AHP and Fuzzy Mathematical Method[J]. Technology of Highway and Transport, 2019, 35(2): 154-160.]
- [11] 关磊, 姜硕, 陶双成, 等. 公路可行性阶段选线的区域生态评价指标体系研究: 以海南省中线高速公路为例[J]. 公路工程, 2019, 44(5): 57-62, 86. [GUAN Lei, JIANG Shuo, TAO Shuang-cheng, et al. Research of Regional Ecological Evaluation Index System During Highway Planning Phase: Hainan Zhongxian Highway as the Case[J]. Highway Engineering, 2019, 44(5): 57-62, 86.]
- [12] 张良, 陈年来. 基于综合指数评价法的金武高速公路对生态环境的影响分析[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(3): 137-139. [ZHANG Liang, CHEN Nian-lai. Research on Effects of Jinwu Expressway on the Ecological Environment Based on the Comprehensive Evaluation Index Method[J]. Environment and Sustainable Development, 2019, 44(3): 137-139.]
- [13] 鲁冬冬, 邹进贵. 三维激光点云的降噪算法对比研究[J]. 测绘通报, 2019(增刊 2): 102-105. [LU Dong-dong, ZOU Jin-gui. Comparative Research on Denoising Algorithms of 3D Laser Point Cloud[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(Suppl. 2): 102-105.]
- [14] LI W K, GUO Q H, JAKUBOWSKI M K, et al. A New Method for

- Segmenting Individual Trees From the Lidar Point Cloud[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2012, 78 (1): 75-84.
- [15] 李想,李海梅,马颖,等.居住区绿化树种固碳释氧和降温增湿效应研究[J]. *北方园艺*, 2008(8): 99-102. [LI Xiang, LI Hai-mei, MA Ying, *et al.* Study on the Greening Tree Species of Residential Area's Cooling and Humidification and Carbon Fixation and Oxygen Release[J]. *Northern Horticulture*, 2008(8): 99-102.]
- [16] 肖玉,谢高地,甄霖,等.三北工程黄土高原丘陵沟壑区森林降温增湿效果研究[J]. *生态学报*, 2019, 39 (16): 5836-5846. [XIAO Yu, XIE Gao-di, ZHEN Lin, *et al.* The Cooling and Humidifying Effect by the Forest Ecosystem in the Hilly and Gully Area of Loess Plateau of the Three North Shelter Forest System Project Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16) : 5836-5846.]
- [17] 王巧良,晏海,杨凡,等.基于生态效益优化的城市行道树选择应用[J]. *北方园艺*, 2019(21): 122-129. [WANG Qiao-liang, YAN Hai, YANG Fan, *et al.* Urban Street Tree Selection and Application Based on Ecological Benefit Optimization[J]. *Northern Horticulture*, 2019(21) : 122-129.]
- [18] 董艳杰,万福绪.基于三维绿量的林分生态效益测算与分析:以上海浦江郊野公园为例[J]. *水土保持研究*, 2019, 26 (3): 347-352. [DONG Yan-jie, WAN Fu-xu. Ecological Benefits and Value Assessment of Forest Stands Based on Three-dimensional Green Volume: A Case Study of Pujiang Country Park of Shanghai [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26 (3): 347-352.]
- [19] 李伟,贾宝全,王成,等.城市森林三维绿量研究现状与展望[J]. *世界林业研究*, 2008, 21 (4): 31-34. [LI Wei, JIA Bao-quan, WANG Cheng, *et al.* Research Status and Prospect of 3D Green Quantity of Urban Forest [J]. *World Forestry Research*, 2008, 21(4) : 31-34.]
- [20] 周一凡,周坚华.基于绿化三维量的城市生态环境评价系统[J]. *中国园林*, 2001, 17(5) : 77-79. [ZHOU Yi-fan, ZHOU Jian-hua. The Urban Eco-environmental Estimating System Based on 3-dimension Vegetation Quantity [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2001, 17(5) : 77-79.]
- [21] 陈明,戴菲,李文佩,等.基于绿视率的城市绿化评估:以武汉江汉区为例[J]. *中国城市林业*, 2019, 17 (3): 1-6. [CHEN Ming, DAI Fei, LI Wen-pei, *et al.* A Study of Urban Greening Assessment Based on Visible Green Index: A Case Study of Jianghan District in Wuhan [J]. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2019, 17 (3): 1-6.]
- [22] 韦文娟.西安市三环道路绿化景观研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [23] 韩广志.广西南友高速公路生态景观评价[D].南宁:广西大学,2019.
- [24] 肖威.南通市干线公路绿地系统景观评价与优化提升对策研究[D].南京:南京农业大学,2017.
- [25] 赵岩,陈紫园.基于生态位适宜度评价的道路生态廊道景观格局优化研究:以 353 省道(仪征段)两侧生态廊道为例[J]. *现代城市研究*, 2019, 34(10) : 43-48. [ZHAO Yan, CHEN Zi-yuan. Optimizing Landscape Patterns of Ecological Corridors Along With Roads Based on Niche Suitability Evaluation: A Case Study of Ecological Corridors Along With Both Sides of 353 Provincial Highway (Yizheng Section) [J]. *Modern Urban Research*, 2019, 34 (10): 43-48.]

作者简介:孙心雨(1996—),女,江苏南京人,主要研究方向为生态环境遥感。E-mail: 365936972@qq.com

(责任编辑:李祥敏)