基于 i-Tree 模型的行道树生态系统服务价值

徐 赛 李 松 丁茗童

华中农业大学 武汉 430000

摘要：行道树作为街道绿化系统的骨架，支撑着城市生态系统服务功能的正常运转。以武汉市临江大道中段为例，基于 i-Tree 构建行道树生态系统服务的综合评议模型，通过以货币值作为统一衡量标准分析演算研究地 27 种常见行道树及街道整体生态系统服务价值，旨在为行道树树种选择优化，以及街道景观与生态环境的提升提供参考。结果表明：1）在街道的植景搭配中，整体生态系统服务价值排序为：美学价值>能源节省价值>雨水截留价值>空气净化价值>生态固碳价值。2）研究地全部行道树年生态系统服务价值约 131.8 万元，平均 1 km 行道树年生态系统服务价值可达 28.65 万元，单株行道树年平均生态系统服务价值可达 307.23 元。3）行道树具有可观的生态系统服务价值，同时也存在明显种间差异，其中能源节省、美学价值和雨水截留价值在演算树种中价值量较高，空气净化和生态固碳价值量较低。因此，在街道行道树配置过程中，应将能源节省、美学价值和雨水截留价值作为首要参考因素，再结合街道属性综合考虑树种选择与应用，以构建功能全面的城市行道树生态系统服务结构，提高行道树整体的生态系统服务价值。

关键词：行道树；i-Tree 模型；生态系统服务价值评估；种间对比；武汉市

DOI：10.12169/zgcsly.2022.11.23.0001

Valuation of Street Tree Ecosystem Services Based on i-Tree Model

Xu Sai Li Song Ding Mingtong

(Huazhong Agricultural University, Wuhan 430000, China)

Abstract: As the skeleton of street greening framework, street trees support the operation of urban ecosystem services. Taking the middle section of Linjiang Avenue in Wuhan as an example, the paper constructs a comprehensive evaluation model for street tree ecosystem services based on i-Tree, and analyzes the ecosystem service value of both 27 common street trees and streets in the study area using monetary value as a unified measurement standard, aiming to provide a reference for the selection and optimization of street tree species and for the improvement of street landscape and ecological environment. The results show that: 1) In the plant-landscape configuration of streets, the ecosystem service values are ranked as aesthetic value > energy saving value > rainwater interception value > air purification value > ecological carbon sequestration value; 2) The annual ecosystem services of street trees in the study area are valued at about 1.32 million RMB, the ecosystem services of street trees per kilometer annually create a value at 290 000 RMB, and the average annual ecosystem service value of one individual street tree is 305.4 RMB; and 3) Street trees have considerable ecosystem service value, but there are also obvious interspecific differences, among which energy saving value, aesthetic value and rainwater interception value are higher with the tree species for calculation, and the value of air purification and ecological carbon sequestration is lower. Therefore, it is suggested that energy saving, aesthetic value and rainwater interception value should be taken as the primary factors for reference in the process of street tree configuration, and the selection and application of tree species should be comprehensively considered in

收稿日期：2022-11-23

第一作者：徐赛（1997-），男，硕士，研究方向为城市街道雨水管控技术与策略。E-mail：132156678@qq.com

通信作者：李松（1977-），男，硕士，副教授，研究方向为绿色风景园林工程营建技术。E-mail：lisong@mail.hzau.edu.cn

combination with street attributes, so as to construct a comprehensive ecosystem service structure of urban street tree and improve the comprehensive ecosystem service value of street trees.

Keywords: street tree; i-Tree model; valuation of ecosystem services; interspecific contrast; Wuhan City

随着城市化不断加深，持续扩张的城市用地压缩外部自然空间，城市生境高度破碎化[1]，从而导致城市生态环境恶化。对此，需要强化、提升和完善城市内部生态系统服务[2-3]。植被是城市生态系统服务的主要载体，在降温增湿、雨洪管理、固碳释氧等方面发挥了重要作用[4]，而行道树作为街道植被群落的骨架，是城市街道生态系统服务功能的重要提供者。因此，评估城市行道树的生态系统服务价值有利于改善街道生态环境质量，缓解城市化建设为人居环境带来的一系列负面影响[5-8]。

当前，国内外对于城市行道树生态系统服务价值的研究较为单一[9-14]，缺少综合性评估研究。对于生态系统服务价值评估的研究方法主要分为两类[15]，一类是基于相关价值进行生态成本分析[16-20]；另一类是基于供需关系的生态系统服务价值评估[17,21]。目前，用于测算的模型主要有 i-Tree 模型和 CITYgreen 模型，CITYgreen 模型是基于 GIS 开发的定量分析评估模型，主要基于林冠检测来分析城市绿地的不同生态效益，与场地联系不够紧密，缺乏场地环境数据来修正模型[22]；而 i-Tree 模型则是专门针对城市森林生态系统服务价值研究的模型，相较于同类模型而言，应用方向更为明确，操作更加简洁和准确，并能精确定位单一树种的单株生态服务价值，以经济作为衡量标准进行评估输出，具有极大的应用潜力。目前国内基于该模型开展研究的仅有北京、浙江、山东、合肥、沈阳等部分地区和城市[23-26]，武汉市作为重要的中部城市，九省通衢，城市街道环境复杂，生态问题多样，亟需针对武汉市街道行道树的生态系统服务开展相关方面的前沿研究。

因此，本文聚焦城市人居环境营建中关注的“能源节省”“雨水截留”“固碳”“空气净化”“城市美学”5 方面生态效益，基于实地调研与 i-tree 模型评议，对武汉市青山区临江大道行道树的生态系统服务价值进行综合评估，为武汉市街道生态系统服务价值评估与优化提供参考。

1 研究区概况

研究地（30° 63′ N—30° 65′ N，114° 37′ E—114°41′E）位于湖北省武汉市青山区临江大道中段，南起临江大道与建设一路交叉口，北至临江大道与建设十路交叉口，毗邻重工业区域和化工基地，是重要的市内外交通枢纽节点。研究地全长约4.6 km，红线宽度平均40 m，总面积达31.9 hm^2；街道整体结构为三板两带式，一侧为高起的 6～8 m 的防洪堤，另一侧主要为居住用地和商业用地，绿地形式主要包括两侧的绿化带和长江堤坡（图 1）。该街道是武汉市第一批海绵城市试点街道，绿地分期进行过不同程度的海绵城市改造，整体配植的乔灌草种类达 50 种以上，绿化覆盖率达 75%以上，群落结构多样，涵盖了武汉市街道绿化的主要种植形式。

2 研究方法

2.1 研究对象

研究对象为研究地内全部行道树，包括 27 个树种，共计 4 290 株（表 1）。



图 1 街道横断面

表 1　行道树树种统计

生活型	树种	拉丁学名	数量/株
落叶阔叶树（17 种）	复羽叶栾树	*Koelreuteria bipinnata*	680
	重阳木	*Bischofia polycarpa*	402
	日本晚樱	*Cerasus serrulata* var. *lannesiana*	322
	朴树	*Celtis sinensis*	167
	三球悬铃木	*Platanus orientalis*	165
	紫叶李	*Prunus cerasifera* ‘Atropurpurea’	142
	紫薇	*Lagerstroemia indica*	124
	垂丝海棠	*Malus halliana*	109
	合欢	*Albizia julibrissin*	100
	石榴	*Punica granatum*	79
	乌桕	*Triadica sebifera*	78
	玉兰	*Magnolia denudata*	75
	三角槭	*Acer buergerianum*	65
	梅	*Armeniaca mume*	62
	红枫	*Acer palmatum* ‘Atropurpureum’	59
	碧桃	*Prunus persica* ‘Duplex’	37
	构树	*Broussonetia papyrifera*	2
落叶针叶树（2 种）	水杉	*Metasequoia glyptostroboides*	7
	金钱松	*Pseudolarix amabilis*	1
常绿阔叶树（8 种）	石楠	*Photinia serrulata*	438
	樟	*Cinnamomum camphora*	389
	女贞	*Ligustrum lucidum*	302
	木樨	*Osmanthus fragrans*	258
	柚	*Citrus maxima*	146
	枇杷	*Eriobotrya japonica*	58
	棕榈	*Trachycarpus fortunei*	20
	杨梅	*Myrica rubra*	3
合计			4 290

2.2　数据采集

根据 i-Tree 模型演算需求对研究地基本城市信息、城市工业化生态成本、行道树周边环境和行道树生长状况 4 类数据进行采集[12,14]（图 2）。



图 2　数据采集内容

2.2.1　城市数据采集

城市数据采集包括研究地基本城市信息和城市工业化生态成本信息，基本城市信息通过武汉市青山区政府网站公开信息获得。能源价格根据武汉市能源局定价修正，树木二氧化碳固碳价格按照 2020 年中国碳价调查报告确定[27]。有害气体处理成本采用系统预设值（表 2）。

表 2 主要城市数据采集提取

输入项目		采集年份	具体数值
研究地基本城市信息	研究地涉及社区常住人口	2018	164 937 人
	研究地涉及区域 GDP	2016	8 285.57 万元
	研究地涉及的社区土地面积	2022	10.3 km^2
	街道人行道平均宽度	2022	3.23 m
	街道整体宽度	2022	40 m
	街道长度	2022	4.6 km
城市工业化生态成本	二氧化碳固碳	2020	49 元/t
	工业处理 SO_2、PM_{10}、NO_2挥发性有机物等气体的工业成本	系统预设	0.154、58.22、68.47、76.88 元/kg
	城市基本能源价格	2022	电:0.58 元/kW·h;气:2.53 元/m^3

2.2.2 行道树数据采集与处理

通过实地调研采集行道树周边环境信息和行道树生长状态信息后再量化处理调研数据：按照数据库中的条件代码为每一株乔木进行样本生长状况描述，主要包括树种信息、树叶和树干健康情况、冠幅、树高和当前维护情况等 16 项描述内容；根据 i-Tree 模型的自动梯度分级，对研究地乔木进行数据特征统计，并按照不同树龄、树高、胸径、冠幅、树叶树干健康状态进行分级统计，得到树种生长情况（包括现状树种配置情况及生长结构）。其中，树种信息是通过模型数据库进行自动匹配，未成功匹配的物种遵循同种同属同科同目的原则依次外扩进行手动匹配，补全树种信息[12]，最后建立临江大道行道树生态系统服务价值评估的完整普查数据库。

2.3 模型构建与分析原理

通过 i-Tree 模型对数据进行系统演算，得到研究地城市节能、生态固碳、空气质量改善、城市美学、雨水截留 5 方面的生态效益价值[14]，以经济作为统一衡量标准输出。其中，城市节能分析原理：根据因树木对环境的降温增湿效果，转换为城市减少消耗的能源量，并以货币值作为统一衡量标准[12]。生态固碳分析原理：通过树木自身属性及软件算法模型自动分析树木二氧化碳消纳情况，根据碳排放税征收标准计算城市森林碳吸收方面的经济效益。空气质量改善分析原理：树木净化效率取决于树木叶片对污染物清除的速率，它由空气中各种污染物的沉降速度和污染物在空气中的浓度决定。雨水截留分析原理：依据研究区域的自然环境及树木生长情况，估算出年雨水截留总量，计算得到截留雨水方面所产生的经济价值。美学分析原理：i-Tree 模型对美学价值的计算以支付意愿法为基础。

2.4 数据分析

利用 SPSS 软件对行道树树种进行系统聚类分析，得到各类树种的种间生态系统服务价值特征对比；同时，通过对数据整理分析得到街道整体的行道树生态系统服务价值及不同功能间生态价值的横向对比。

3 结果与分析

3.1 街道行道树生长状况

根据调研样本分析结果，研究地中落叶阔叶树、常绿阔叶树和落叶针叶树占比分别为 62.96%、29.63%和 7.41%。其中，复羽叶栾树、重阳木、日本晚樱、石楠、樟、女贞和木樨为优势树种。

由图 3 可知：所调研的行道树树龄主要分布在 3~12 年，以成龄树为主。根据株高判断，研究对象以小乔和中乔为主，具有较为丰富的垂直层次，其中，28.21%植株的株高为 1~5 m，31.96%株高为 5~10 m，27.99%株高为 10~15 m，11.82%株高为 15~20 m，还有少部分树高超过 20 m。大部分树种胸径分布在 7~30 cm，冠幅分布在 2~8 m。根据树种树干和树叶生长状态的调查结果显示，行道树整体健康状态良好。

3.2 各类树种生态系统服务价值的综合评估

基于 i-Tree 模型的模拟结果，对各树种的生态系统服务价值进行综合评估。结果发现，综合生态效益最高的前 10 个树种分别是：金钱松>朴树>构树>水杉>柚>香樟>复羽叶栾树>乌桕>三球悬铃木>三角槭（表 3）。其中，能源节省价值最高的树种为朴树，单株年节省电能 225 kW·h，节省天然气 0.000 86 m^3，合计一年节省约 338.83 元；雨水截留价值最高的树种为金钱松，单株年截留雨水约 11.24 t，合计一年节省约 536.9 元；

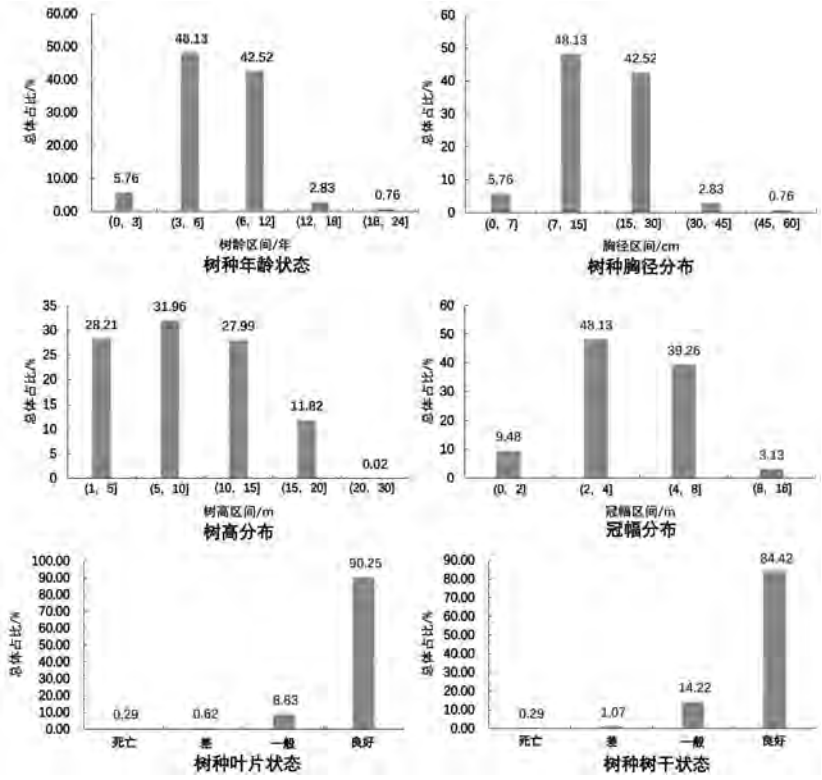


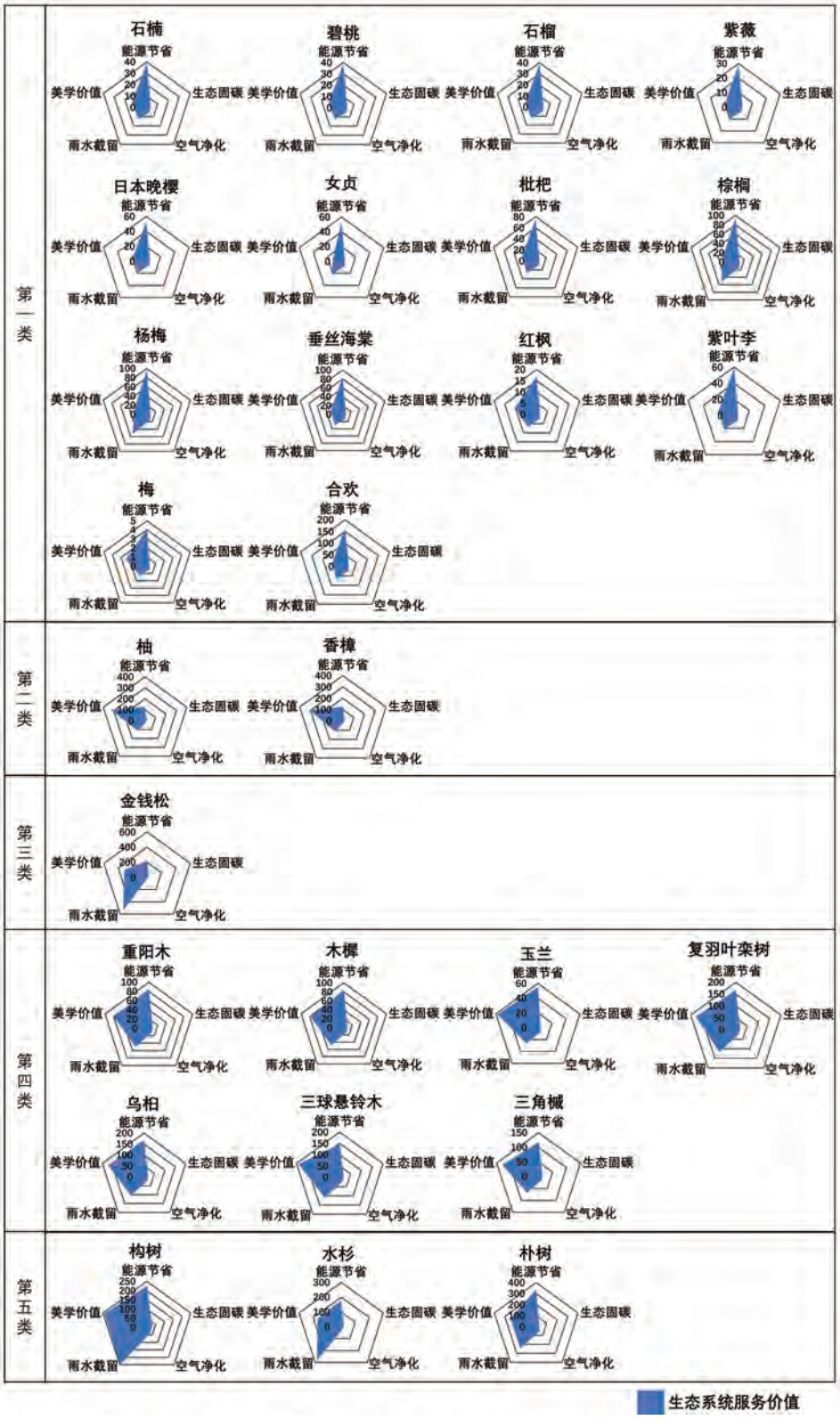
图 3　行道树生长现状

生态固碳价值最高的为构树，单株年固碳量为 0.27 t，合计一年节省 29.49 元；空气净化价值最高的树种为朴树，单株年净化量约 1.14 t，合计一年节省 49.98 元；美学效益价值最高的为柚，单株年价值约为 325.60 元（表 3）。

表 3　行道树树种年生态系统服务价值　　元/株

树种	综合效益	能源节省	生态固碳	空气净化	雨水截留	美学价值
金钱松	1 099.32	218.07	20.76	9.63	536.9	313.94
朴树	907.69	338.83	27.88	49.98	244.49	246.51
构树	779.88	225.24	29.49	34.05	249.68	241.42
水杉	657.79	176.28	14.82	19.27	279.15	168.27
柚	590.04	125.48	14.56	12.53	111.87	325.60
香樟	573.90	124.06	14.39	12.41	114.62	308.43
复羽叶栾树	501.67	166.18	18.44	22.35	117.35	177.37
乌桕	485.52	169.46	19.21	22.54	102.91	171.40
三球悬铃木	485.32	147.09	18.07	19.96	109.81	190.39
三角槭	343.49	117.79	13.68	15.47	66.99	129.57
合欢	324.71	163.32	15.55	23.39	65.23	57.22
重阳木	234.29	85.86	8.87	11.36	49.20	79.01
木樨	228.42	83.75	8.67	11.08	47.75	77.17
棕榈	199.04	95.21	8.68	13.73	52.22	29.21
杨梅	199.04	95.21	8.68	13.73	52.22	29.21
垂丝海棠	159.38	83.02	7.61	10.79	29.91	28.04
玉兰	149.70	55.11	3.49	6.67	26.57	57.85
枇杷	145.08	75.63	6.96	9.79	27.02	25.68
紫叶李	112.06	58.56	5.47	7.48	20.35	20.21
日本晚樱	100.31	52.48	4.93	6.66	17.98	18.27
女贞	99.97	53.04	4.51	7.12	23.22	12.07
石楠	73.07	38.44	3.69	4.78	12.58	13.57
石榴	72.58	38.14	3.67	4.72	12.37	13.67
碧桃	72.58	38.14	3.67	4.72	12.37	13.67
紫薇	53.63	28.58	2.79	3.53	9.08	9.66
红枫	37.42	17.13	1.36	2.20	6.71	10.04
梅	8.52	4.02	0.28	0.47	1.28	2.47

针对 5 类生态系统服务价值对 27 个树种进行系统聚类分析，再根据聚类分析结果对树种的生态系统服务价值特征进行比对，比对结果（图 4）可以将研究树种分为 5 类，各类都具有不同的生态系统服务特征：第一类具有突出的能源节省价值，主要树种有石楠、碧桃、石榴、紫薇、红枫、



注：图中所有服务价值的单位均为“元”。

图 4 各类树种生态系统服务价值特征比对

日本晚樱、女贞、枇杷、棕榈、杨梅、垂丝海棠、紫叶李、梅、合欢；第二类具有突出的美学价值，主要树种有柚和香樟；第三类具有突出的雨水截留价值，主要树种有金钱松；第四类具有突出的能源节省价值和美学价值，主要树种有重阳木、木樨、玉兰、复羽叶栾树、乌桕、三球悬铃木、三角槭；第五类具有突出的能源节省价值、美学价值和雨水截留价值，主要树种有构树、水杉和朴树。这说明各类行道树的生态系统服务功能存在种间差异。整体上，多方面生态服务特征突出的树种与单方面生态服务特征突出的树种的占比为 3∶4。

3.3　行道树生态系统服务价值综合评估

由表 4 可知，行道树所提供的各项生态系统服务功能中，美学价值>能源节省>雨水截留>空气净化>生态固碳。其中，能源节省、美学价值和雨水截留价值分别占比 33.8%、36.1% 和 22.2%，而空气净化价值和生态固碳价值分别仅占 4.4%和 3.5%。

该街道研究地全长 4.6 km，共计 4 290 株乔木，全部行道树一年产生的生态系统服务价值总量可达 131.8 万元人民币（表 4）。根据计算结果，平均 1 km 年生态系统服务价值可达 28.65 万元，每一株行道树的年平均生态系统服务价值可达 307.23 元。

表 4　街道年生态系统服务价值

街道行道树单项	生态系统服务价值/（万元/年）	价值占比/%
能源价值	44.6	33.8
雨水截留价值	29.2	22.2
生态固碳价值	4.6	3.5
空气净化价值	5.8	4.4
美学价值	47.6	36.1
合计	131.8	100

4　讨论

近年来，基于 i-Tree 模型的研究逐渐增多，如常郴和王思思[22]、郭树煌等[25]基于 i-Tree 模型对行道树雨水冠层截留作用的研究发现，叶面积与年雨水截留体积呈显著线性正相关关系。也有研究者对多方面的生态服务价值进行综合评估，如周贝宁等[27]基于 i-Tree 对宁波市“三江六岸核心区绿道树种的生态效益进行综合评估发现，美学效益>固碳效益>截留雨水效益>节约能源效益>改善空气质量效益，熊金鑫等[14]发现，在校园行道树体系中，各生态系统服务价值排序为美学价值>雨水截留价值>能源节省价值>生态固碳价值>空气净化价值。本研究结果表明，各生态系统服务价值排序为美学价值>能源节省>雨水截留价值>空气净化价值>生态固碳价值。对比结果发现，不同研究中的美学价值在行道树各生态服务价值中均最为突出，说明美学功能在不同地域的街道绿化中均得到充分关注和重视，而其他价值的排序则存在一定差异，这主要与树种及研究地不同有关，也说明城市树木的生态系统服务价值具有地域性特征。本研究发现，在武汉市青山区临江大道行道树的生态功能体系中，能源节省价值、美学价值和雨水截留价值占比较高，而空气净化价值和生态固碳价值的占比却远小于另外三方面价值，表明现有行道树对于街道的降温增湿、景观提升和径流管控起到了较为重要的作用，，而当前行道树的空气净化和固碳功能并未得到足够重视，因此在未来植被营建中应予以更多关注。

就武汉市而言，由于雨季集中雨量大和工业废气排放量较高的原因，雨洪内涝和空气污染一直都是较为棘手的生态环境问题，这是对城市生态系统服务需求的暴露，而城市森林在这两方面都发挥着无比重要的作用。研究结果同样也表明，城市森林在雨水截留方面作用十分显著，是乔木生态服务价值的主要来源之一，因此，通过合理增加城市街道的乔木覆盖率可以有效降低地表径流量，缓解城市排水系统压力；同时，城市森林对大气净化的突出表现，在一定程度上降低了呼吸道疾病的发病率，具有巨大的潜在价值。

由于行道树各方面生态系统服务价值存在种间差异，可通过合理的树种选择与搭配“取长补短”，提高植被整体的综合生态系统服务价值，构建功能全面的城市行道树生态系统服务结构。而对于不同类型的街道，应根据街道的具体功能导向有针对性地进行树种选择与应用。比如，对于景观型街道，应当首要考虑树种的美学价值，满足视觉需求；产业型街道和交通型街道则应当

首要考虑树种的空气净化价值和雨水截留价值，目的在于应对不确定性交通带来的大气环境污染，同时减少因降雨造成的非点源性污染；而对于商业型街道和生活型街道而言，行道树的目的更多是在于对微气候和大气环境的调节，应当首要考虑树种的能源节省价值和空气净化价值等（表5）。但在实际城市街道中，由于树木生长状况不一，且自然生长状态下会受到外部环境干扰和影响，同时由于不同物种间也存在相互抑制和协同作用，最终呈现的生态价值表现与理论预期存在一定的波动范围，这也是下一步研究需要关注的要点。

表 5 街道乔木配置顺序

街道类型	街道空间需求	乔木树种选择参考顺序	主干树种选择
生活型街道	休憩/景观	1-2-3-4-5	朴树、石楠、木樨、玉兰、重阳木等
商业型街道	划分空间/简洁	1-3-4-2-5	香樟、柚、朴树等
景观型街道	景观多样/休憩	1-4-3-2-5	三球悬铃木、红枫、三角槭等
产业型街道	简洁	4-3-2-1-5	合欢、乌桕、朴树等
交通型街道	阻隔引导	3-4-1-2-5	复羽叶栾树、水杉、朴树等

注：1. 美学价值；2. 能源节省；3. 雨水截留；4. 空气净化；5. 生态固碳。

前人对于生态系统服务价值的评估多是从研究对象整体或单一生态要素出发分析生态特征，而本研究从树种的尺度对武汉市代表性街道的行道树生态系统服务价值进行了综合评估，研究结果对于街道绿化的树种优化、景观改善及生态功能提升具有重要借鉴意义。同时，本研究也存在一定的局限性，即仅选取了单一街道进行研究，对武汉市整体街道绿化状况的代表性有限，未来将针对武汉市不同类型及地区的街道和树种开展研究，从而为武汉市道路绿化的树种选择和植景营造提供更为综合全面的指导和参考。

5 结论

行道树的生态系统服务存在明显种间差异，根据系统聚类分析可以将各调查树种分为 5 类。其中，第一类具有突出的能源节省价值，主要树种有石楠、碧桃、石榴、紫薇、红枫、日本晚樱等；第二类具有突出的美学价值，主要树种有柚和香樟；第三类具有突出的雨水截留价值，主要树种有金钱松；第四类具有突出的能源节省价值和美学价值，主要树种有重阳木、木樨、玉兰、复羽叶栾树等；第五类具有突出的能源节省价值、美学价值和雨水截留价值，主要树种有构树、水杉和朴树。

研究地行道树的年生态系统服务价值整体可达 131.8 万元人民币，平均 1 km 行道树的年生态系统服务价值可达 28.65 万元，单株行道树年平均生态系统服务价值可达 307.23 元。

研究地行道树各方面的生态系统服务价值整体排序为：美学价值>能源节省价值>雨水截留价值>空气净化价值>生态固碳价值。

参考文献

[1]张梦园,李坤,邢小艺,等.北京温榆河-北运河生态廊道自生植物多样性对城市化的响应[J].生态学报,2022,42(7):2582-2592.

[2]BOLUND P,HUNHAMMAR S.Ecosystem services in urbanareas[J].Ecological Economics,1999,29(2):293-301.

[3]欧阳志云,王如松,赵景柱.生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].应用生态学报,1999,10(5):635-640.

[4]韩宝龙,束承继,蔡文博,等.植被群落特征对城市生态系统服务的影响研究进展[J].生态学报,2021,41(24):9978-9989.

[5]丁金华,杨金花.基于生态系统服务供需的水网乡村生态安全格局构建[J].中国城市林业,2022,20(5):92-99.

[6]CORTINOVIS C,GENELETTI D.Ecosystem services in urban plans:What is there,and what is still needed for betterdecisions[J].Land Use Policy,2018,70:298-312.

[7]LANGEMEYER J,BARÓ F,ROEBELING P,et al.Contrasting values of cultural ecosystem services in urban areas:The case of Park Montjuïc in Barcelona[J].Ecosystem Services,2015,12:178-186.

[8]SIRAKAYA A,CLIQUET A,HARRIS J.Ecosystem services in cities:Towards the international legal protection of ecosystem services in urbanenvironments[J].Ecosystem Services,2018,29:205-212.

[9]ZHOU C W,HE X Y.Urban forests carbon storage and sequestration benefits in Changchun city,based oni-tree model[J].

Advanced Materials Research,2012,573/574:471-474.

[10] MORANI A, NOWAK D, HIRABAYASHI S, et al. Comparingi-Tree modeled ozone deposition with field measurements in a periurban Mediterranean forest [J]. Environmental Pollution, 2014,195:202-209.

[11] WU J S, WANG Y, QIU S J, et al. Using the modifiedi-Tree Eco model to quantify air pollution removal by urban vegetation[J]. Science of the Total Environment,2019,688:673-683.

[12] 刘朋朋.基于 i-Tree 模型杭州西湖景区行道树生态效益分析[D].杭州:浙江农林大学,2018.

[13] 赵东亮,赵宏宇.基于 i-Tree Eco 模型的城市森林生态效益评估:以长春水文化生态园为例[J].智能建筑与智慧城市,2022(2):146-148.

[14] 熊金鑫,祁慧君,王倩茹,等.基于 i-Tree 模型的城市小区行道树生态效益评价[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(2):128-136.

[15] 阎凯,陈晨,刘爽,等.人本需求视角下基于乡镇单元主导功能的特大城市半城市化地区生态系统服务优化研究:以上海为例[J].中国园林,2021,37(3):89-94.

[16] HOWARTH R B, FARBER S. Accounting for the value of ecosystemservices[J]. Ecological Economics, 2002, 41(3): 421-429.

[17] 许超,孟楠,王文静,等.澳门城市绿色基础设施生态系统服务供需匹配[J].中国城市林业,2022,20(1):29-35,95.

[18] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.

[19] 肖玉,王硕,李娜,等.北京城市绿地对大气 $PM_{2.5}$ 的削减作用[J].资源科学,2015,37(6):1149-1155.

[20] 韩依纹,戴菲.城市绿色空间的生态系统服务功能研究进展:指标、方法与评估框架[J].中国园林,2018,34(10):55-60.

[21] 张炜,刘晓明.武汉市蓝绿基础设施调节和支持服务价值评估研究[J].中国园林,2019,35(10):51-56.

[22] 常郴,王思思.基于 i-Tree Eco 模型的城市林冠雨水截留和径流削减效益研究:以北京建筑大学西城校区为例[J].干旱区资源与环境,2021,35(2):136-142.

[23] 张玉阳,周春玲,董运斋,等.基于 i-Tree 模型的青岛市南区行道树组成及生态效益分析[J].生态学杂志,2013,32(7):1739-1747.

[24] 马宁,何兴元,石险峰,等.基于 i-Tree 模型的城市森林经济效益评估[J].生态学杂志,2011,30(4):810-817.

[25] 郭树煌,李晓鹏,梁龙锋,等.基于 i-Tree 模型的湛江市行道树冠层截留雨水效益分析[J].西北林学院学报,2020,35(2):244-251.

[26] 王颖.基于 i-Tree 模型的临安钱王陵公园植物群落结构与生态效益研究[D].杭州:浙江农林大学,2020.

[27] 周贝宁,芦建国,花壮壮.基于 i-Tree 模型的城市绿道生态服务效益研究[J].浙江农业学报,2020,32(12):2201-2210.