

DOI: 10.20103/j.stxb.202401190169

钱璟, 廖莎, 范舒欣, 沈思栋, 李涵, 张梦园, 董丽. 北京市常用园林树种全生命周期碳收支. 生态学报, 2024, 44(17): 7490-7506.

Qian J, Liao S, Fan S X, Shen S D, Li H, Zhang M Y, Dong L. Carbon budget of common urban tree species in Beijing based on life cycle assessment. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7490-7506.

北京市常用园林树种全生命周期碳收支

钱 璟¹, 廖 莎², 范舒欣¹, 沈思栋¹, 李 涵¹, 张梦园¹, 董 丽^{1,*}

¹ 北京林业大学园林学院, 城乡生态环境北京实验室, 国家花卉工程技术研究中心, 北京 100083

² 中建壹品投资发展有限公司, 武汉 430074

摘要: 城市绿地中园林树木的光合固碳能力对中和城市温室气体排放、调节城市碳平衡具有重要意义, 但园林树木的栽植及养管等过程也会产生碳排放, 因此全面科学地评价园林树木的净固碳能力必须综合考虑全生命周期碳的收支两个方面。基于全生命周期理论, 通过生物量方程法和排放因子法核算了北京市 32 种常用园林树种全生命周期碳固定量和碳排放量。结果显示, 北京市一级养护管理标准下供试树种全生命周期碳固定量和碳排放量均值分别为 222.441 kg/株和 90.545 kg/株。不同生活型园林树种全生命周期碳固定量和碳排放量存在明显分级, 总体上均表现为落叶乔木>常绿乔木>小乔木>灌木。一球悬铃木、美国红栎、毛白杨、栾树等 21 种植物对城市绿地碳汇功能具正向效应。小叶黄杨、冬青卫矛、碧桃、紫叶李等 11 种植物对城市绿地碳汇功能具负向效应, 其原因除了在于自身生物学特征外, 也与为追求特定景观效果而采取的园林应用方式有关。结合研究结果从增汇与减排两方面提出了低碳植物景观营建策略。

关键词: 碳收支; 全生命周期理论; 园林树种; 碳汇

Carbon budget of common urban tree species in Beijing based on life cycle assessment

QIAN Jing¹, LIAO Sha², FAN Shuxin¹, SHEN Sidong¹, LI Han¹, ZHANG Mengyuan¹, DONG Li^{1,*}

¹ College of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, National Engineering Research Center for Floriculture, Beijing 100083, China

² China Construction YIPIN Investment & Development Co., Ltd., Wuhan 430074, China

Abstract: The carbon sequestration capacity of urban trees plays an important role in offsetting urban greenhouse gas emissions and regulating urban carbon balance. However, greenhouse gas will also be generated in the process of planting and maintenance of urban trees. From the perspective of carbon budget, the net carbon sequestration capacity of urban trees can be evaluated more comprehensively and scientifically. Based on life cycle assessment, the biomass equation method and emission factor method were used to calculate the life cycle carbon sequestration and carbon emission of 32 urban woody tree species in Beijing. The results showed that the average life cycle carbon sequestration and carbon emission of the tested tree species were 222.441 kg/plant and 90.545 kg/plant, respectively, under the Beijing primary conservation management standard. The carbon sequestration and carbon emission in the whole life cycle of different life types of urban tree species were obviously graded, and the overall performance was deciduous arbor > evergreen arbor > small arbor > shrub. Twenty-one species such as *Platanus acerifolia*, *Fraxinus pennsylvanica*, *Populus tomentosa* and *Koelreuteria paniculata* had positive effects on the carbon sink capacity of urban green space, while eleven species such as *Buxus sinica* var. *parvifolia*, *Euonymus japonicus*, *Prunus serrulata* var. *lannesiana* were the opposite. The reason is not only related to their biological

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3802602); 华北地区绿化固碳增汇系统研究项目(CSCEC3B-2022-26)

收稿日期: 2024-01-19; **网络出版日期:** 2024-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dongli@bjfu.edu.cn

characteristics, but also related to their application form in pursuit of specific ornamental effects. Based on the research results, low-carbon plant landscape construction strategies are proposed from the aspects of carbon sink increase and carbon emission reduction.

Key Words: carbon budget; life cycle assessment; woody tree species; carbon sink

全球 CO₂ 等温室气体浓度的增加导致气候变暖、冰川融化、生物多样性降低等各类问题,极大地威胁着人类存续与发展^[1]。植被在全球碳循环中发挥着重要作用,其能通过光合作用吸收空气中的二氧化碳,并将其转化为有机物固定,从而有效降低大气中温室气体浓度,减缓气候变化。城市植被是城市空间中的主要自然碳汇^[2],增强城市植被碳汇能力能更多地抵消城市碳排放量,有效助力城市“碳中和”目标的实现。园林植物是城市植被的主要组成部分,而植物的固碳能力因种而异,应用高碳汇功能的园林植物是提升有限城市空间内植被总体碳汇量的有效途径,因此近些年不同树种固碳能力的量化和比较已成为相关领域的研究热点。量化植物固碳能力的关键是测定方法的准确性,目前研究主要采用的有直接测量和间接核算的方法。其中,直接测量包括通过测定植物净光合速率和叶面积指数量化不同树种固碳能力^[3-4],以及通过生物量方程法核算不同树种单位时间内碳储量的变化^[5-6]。间接核算的方法包括通过 i-Tree、国家树木效益计算工具(National Tree Benefit Calculator, NTBC)等软件模拟不同树种单位时间内碳汇量^[7-8]。当前虽然相关研究报道在逐渐增多,但多在不同国家和地区,所处气候环境条件不同,不同学者采用的评价指标和评价方法不同,研究的植物种类不同,即便相同植物则因方法相异而导致结果差异较大,缺乏可比性,对于园林绿化中选择树种的实践指导价值仍十分不足。

与自然环境中生长的植物不同,人工建植的园林树种在发挥固碳能力的同时,在施工建植、养护管理和废弃处置等多个环节中会因机械、材料和人工等方面的消耗造成碳排放^[9-10]。植物固碳作用的实际贡献必须考虑扣除其碳排放后的净固碳能力^[11]。如果人为经营与管理措施造成的碳排放量高于植物自身碳汇量,那么园林植物非但不能发挥碳汇功能,反而可能成为净碳排放源,由此影响城市植被总体碳汇量乃至城市碳平衡。因此,园林树种净固碳能力的科学评价要求必须综合考虑自身光合固碳能力和因栽植、养管等措施产生的碳排放,即碳收支(Carbon budget),且在研究的时间维度上还应考虑园林植物自栽植至其寿命结束的全生命周期,即全生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)。国家标准《环境管理 全生命周期评价 原则与框架》(GB/T 24040—2008)中定义全生命周期评价为对一个产品系统的生命周期中输出、输入及其潜在环境影响的汇编和评价^[12]。当前学界在城市及绿地的尺度上已尝试开展全生命周期碳收支研究^[13-14],但作为绿地碳汇基础因子的园林树种尺度相关研究尚鲜少报道,仅个别学者对个别树种^[15]开展了评价,评价范围目前只针对苗圃生产或者养护管理等单一阶段^[16]。这些不仅严重制约了绿地尺度上碳核算的准确性,更难以指导绿环建设中有目标性的植物选择。

综上,“双碳”目标下城市绿地树种选配、建植、养管等过程中需要碳收支的综合考量,但园林树种尺度上的全生命周期碳收支研究存在基础数据收集全面性不足,缺乏成熟、统一的研究方法和参考标准等问题。对此,本研究以北京市 32 种常用园林树种为研究对象,尝试构建一套园林树种全生命周期碳收支核算框架,量化树种全生命周期碳固定量和碳排放量,分析不同生活型及不同树种全生命周期碳收支特征,并从增汇和减排方面提出低碳植物景观营建策略,以为低碳园林建设中植物材料的选择等提供科学的理论依据,助力国家“双碳”战略。

1 材料与方法

1.1 研究材料

通过前期对北京市城市绿地现有园林树种的实地调查和相关文献研究^[17-18],遵循适生性、广泛性、典型

性且乔灌兼顾的原则,选取北京市常用园林树种 32 种,覆盖了 19 科,31 属,如表 1。

1.2 北京市常用园林树种全生命周期碳收支核算框架

确定评价边界、制定评价清单和设定评价周期是构建园林树种全生命周期碳收支核算框架的主要步骤。本研究将园林树种全生命周期碳收支评价边界定义为园林树种从起苗运输至城市绿地到砍伐离场的全过程,进一步将其划分为施工建植、养护管理和废弃处置三个阶段。由于城市规划、养护管理等因素影响,园林树木不会在城市绿地中完成全部的生长发育过程,存在一定应用年限。本研究基于专家问卷调查,文献研究^[19–20]和实地调研,综合考虑了供试树种寿命、生长速度和在城市绿地中的更新频率等因素,最终设定不同园林树种在城市绿地中的一般应用年限为:灌木 10 年,小乔木 30 年,普通乔木 50 年,长寿乔木 80 年,各类包含的具体树种见表 1。长寿乔木根据北京市地方标准《古树名木评价规范》(DB11/T 478—2022)附录 A 中常见古树名录和《中国植物志》等文献专著判定^[21]。根据《园林绿化养护标准》(CJJ/T 287—2018)等相关标准^[22]研究制定北京市常用园林树木全生命周期碳收支评价清单如表 2,清单中所有单位均为碳当量。

表 1 供试树种基本信息
Table 1 Basic information of the tested tree species

中文名 Chinese name	生活型 Life form	科 Family	属 Genus	应用年限 Service time/a
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	常绿乔木	松科	松属	80
白皮松 <i>Pinus bungeana</i>	常绿乔木	松科	松属	80
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	常绿乔木	柏科	侧柏属	80
国槐 <i>Styphnolobium japonicum</i>	落叶乔木	豆科	槐属	80
银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	落叶乔木	银杏科	银杏属	80
元宝槭 <i>Acer truncatum</i>	落叶乔木	槭树科	槭属	80
栾树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	落叶乔木	无患子科	栾树属	80
美国红栎 <i>Fraxinus pennsylvanica</i>	落叶乔木	木犀科	栲属	80
毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	落叶乔木	杨柳科	杨属	50
绦柳 <i>Salix matsudana</i> 'Pendula'	落叶乔木	杨柳科	柳属	50
一球悬铃木 <i>Platanus acerifolia</i>	落叶乔木	悬铃木科	悬铃木属	50
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	落叶乔木	苦木科	臭椿属	50
玉兰 <i>Yulania denudata</i>	落叶乔木	木兰科	木兰属	50
西府海棠 <i>Malus × micromalus</i>	落叶小乔木	蔷薇科	苹果属	30
紫叶李 <i>Prunus cerasifera</i> 'Atropurpurea'	落叶小乔木	蔷薇科	李属	30
碧桃 <i>Prunus persica</i> 'Duplex'	落叶小乔木	蔷薇科	桃属	30
日本晚樱 <i>Prunus serrulata</i> var. <i>lannesiana</i>	落叶小乔木	蔷薇科	樱属	30
黄栌 <i>Cotinus coggygria</i> var. <i>cinereus</i>	落叶小乔木	漆树科	黄栌属	30
紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	落叶小乔木	木犀科	丁香属	30
紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>	落叶小乔木	千屈菜科	紫薇属	30
金银忍冬 <i>Lonicera maackii</i>	落叶小乔木	忍冬科	忍冬属	30
冬青卫矛 <i>Euonymus japonicus</i>	常绿灌木	卫矛科	卫矛属	10
小叶黄杨 <i>Buxus sinica</i> var. <i>parvifolia</i>	常绿灌木	黄杨科	黄杨属	10
叉子圆柏 <i>Juniperus sabina</i>	常绿灌木	柏科	刺柏属	10
锦带花 <i>Weigela florida</i>	落叶灌木	忍冬科	锦带花属	10
连翘 <i>Forsythia suspensa</i>	落叶灌木	木犀科	连翘属	10
金叶女贞 <i>Ligustrum × vicaryi</i>	落叶灌木	木犀科	女贞属	10
紫叶小檗 <i>Berberis thunbergii</i> 'Atropurpurea'	落叶灌木	小檗科	小檗属	10
棣棠 <i>Kerria japonica</i>	落叶灌木	蔷薇科	棣棠花属	10
珍珠梅 <i>Sorbaria sorbifolia</i>	落叶灌木	蔷薇科	珍珠梅属	10
月季'月月红' <i>Rosa chinensis</i> 'Slaters' Crimson China'	落叶灌木	蔷薇科	蔷薇属	10
红瑞木 <i>Cornus alba</i>	落叶灌木	山茱萸科	梾木属	10

表 2 北京市常用园林树种全生命周期碳收支评价清单

Table 2 Life cycle inventory of common urban tree species in Beijing

评价边界 Boundary	评价清单 Life cycle inventory	
	碳排放量	碳固定量
施工建植阶段 Construction stage	普坚土掘苗碳排放量	全生命周期累计碳固定量
	场外运苗碳排放量	
	普坚土种植碳排放量	
	后期管理碳排放量	
养护管理阶段 Maintenance and management stage	灌溉碳排放总量	
	施肥碳排放总量	
	病虫害防治碳排放总量	
	修剪碳排放总量	
废弃处置阶段 End-of-life stage	砍挖植物碳排放量	
	运输园林绿化废弃物碳排放量	

1.3 北京市常用园林树种全生命周期碳收支数据获取方法

1.3.1 碳固定参数

采用生物量方程法核算不同园林树种全生命周期碳固定量。生物量方程通过建立立木及其各分量生物量与观测因子的数学表达式,达到利用树木易测因子来估算生物量的目的^[23]。全株生物量乘以含碳率即为园林树种碳储量。通过北京市近十年来相关文献和标准研究,收集供试树种的生物量方程和含碳率。若供试树种生物量方程缺失,则选取北京市(华北地区、中国)生活型相同且株型相似的同属(科)树种生物量方程替代。

1.3.2 碳排放参数

采用排放因子法核算园林树种碳排放参数。排放因子法是联合国政府间气候变化专门委员会(International Panel on Climate Change, IPCC)提出的第一种碳排放估算方法,其总体思路是以活动数据(Activity Data, AD)和排放因子(Emission Factor, EF)的乘积作为各指标的碳排放量估算值。

(1) 实地调研

参考北京市园林绿化局发布的北京市公园名录(第一批),筛选养护管理等级为一级的综合公园。通过对公园实地踏查和北京市海淀区、东城等区级园林绿化局工作人员的电话访谈,选取能包含全部供试树种并能提供相关养护管理数据的 12 个公园作为研究样地,样地基本信息如表 3。

表 3 样地基本信息

Table 3 Basic information of sample area

样地名称 Sample site	绿地类型 Urban green space classification	建成时间 Completed year	面积 Area/hm ²	所在区 District	养护管理等级 Maintenance level
日坛公园 Ritan Park	综合公园	2010(修缮)	2.06	东城区	一级
南馆公园 Nanguan Park	综合公园	2002	2.62	东城区	一级
广阳谷城市森林公园 Guangyanggu Urban Forest Park	综合公园	2017	3.34	西城区	一级
玉蜓公园 Yuting Park	社区公园	2002	3.50	东城区	一级
巴沟山水园 Bagou Mountain and Water Park	综合公园	2010(一期)	6.24	海淀区	一级
长春健身园 Changchun Fitness Park	综合公园	2007	7.12	海淀区	一级
马甸公园 Madian Park	综合公园	2003	7.73	海淀区	一级
永定门公园 Yongdingmen Park	综合公园	2004	8.69	东城区	一级
龙潭西湖公园 Longtan West Lake Park	综合公园	2022(大规模改造)	10.02	东城区	一级
北小河公园 Beixiaohe Park	综合公园	2005	22.8	东城区	一级
海淀公园 Haidian Park	综合公园	2003	32.8	海淀区	一级
龙潭公园 Longtan Park	综合公园	2001(大规模改造)	49.2	东城区	一级

在此基础上开展了跟踪调查。于 2022 年 9 月—2023 年 9 月,以每月 2 次的频率在每个公园中开展养护管理调查,调查方式包括:记录供试树种灌溉、土壤管理、病虫害防治、修剪、除草和补植更新等主要养护管理措施频次、用工人数和工作时长等;深度访谈公园一线养护管理负责人和工人,细致问询上述养护管理措施中使用的机械、材料、人工使用情况,包括使用机械设备型号、单次肥料、农药施用量等,同时按季度向养护管理单位负责人获取公园养护管理日志,补充并检验实地调研与深度访谈获取的数据。

(2) 标准、定额研究

在园林植物的应用范畴中,与草本植物相比,木本植物应用年限长、更新频率低,这导致通过实地考察难以在有限的时间内收集齐所有园林树种在施工建植阶段和废弃物处置阶段的相关数据。因此针对这一问题,收集了北京市园林绿化工程施工及验收、园林绿化植物废弃物处置和应用相关标准、定额,梳理其中不同规格园林树种在不同阶段的机械、材料和人工消耗量作为数据来源。如果北京市目前缺乏相应地方标准,则采用相关国家标准。

1.4 北京市常用园林树种全生命周期碳收支数据处理方法

1.4.1 碳固定参数

北京市常用园林树种全生命周期碳固定量(CS):

$$CS=CS_{out}-CS_{inp}$$

式中,CS_{out}表示园林树种离场时期碳储量,CS_{inp}表示园林树种入场时期碳储量,均采用生物量方程法估算。北京市园林树种入场规格(胸径、株高、冠幅)按北京市标准《园林绿化用植物材料 木本苗》(DB11/T 211—2017)规定 I 级质量标准执行^[24];离场规格指的是不同树种到达应用年限时的对应规格,根据文献集成研究和专家经验值判定。供试树种生物量方程、含碳率、入场规格和离场规格如表 4。其中,部分树种含碳率未见文献记载,取均值 0.500^[38];部分树种缺乏地下生物量方程,按根冠比 0.240 计算地下生物量^[39]。来源于林业相关研究的生物量方程,最终生物量应乘以 0.800 作为调整系数^[40]。

表 4 北京市常用园林树种生物量方程及含碳率

Table 4 Biomass equations and the carbon content of common tree species in Beijing

名称 Chinese Name	生物量方程 Biomass equation	入场规格 Site entering specification	离场规格 Site leaving specification	含碳率 Carbon content	文献来源 References
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	$W_A = e^{[-2.552+0.8715 \times \ln(D^2 \times H)]}$ $W_R = e^{[-3.7421+0.8623 \times \ln(D^2 \times H)]}$	$D=10$ $H=4$	$D=40$ $H=7$	0.518	[25]
白皮松 <i>Pinus bungeana</i>	$W_T = 0.1023(D^2 H)^{0.8920}$	$D=10$ $H=4$	$D=40$ $H=7$	0.496	[26]
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	$W_T = 0.127(D^2 H)^{0.7978}$	$D=10$ $H=4.5$	$D=40$ $H=7.5$	0.510	[27]
叉子圆柏 <i>Juniperus sabina</i>		$D=3$ $H=0.65$	$D=15$ $H=1$	0.474	
毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	$W_S = 0.0551D^{2.4316}$	$D=11$	$D=60$	0.450	[28]
绦柳 <i>Salix matsudana</i> 'Pendula'	$W_B = 0.0059D^{2.7715}$ $W_L = 0.0116D^{1.9482}$ $W_R = 0.0209D^{2.3677}$	$D=11$	$D=55$	0.465	
美国红栎 <i>Fraxinus pennsylvanica</i>	$W_T = 10^{[-0.787+2.417 \times \lg(D)]}$	$D=11$	$D=55$	0.488	[29]
元宝槭 <i>Acer truncatum</i>	$W_T = 10^{[-0.753+2.381 \times \lg(D)]}$	$D=11$	$D=40$	0.500	
银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	$W_T = e^{[-2.29+2.41 \times \ln(D)]}$	$D=11$	$D=40$	0.450	[30]
一球悬铃木 <i>Platanus acerifolia</i>	$W_A = 0.046D^{2.641}$	$D=11$	$D=60$	0.500	[31]
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	$W_A = 0.241D^{2.046}$	$D=11$	$D=60$	0.502	
国槐 <i>Styphnolobium japonicum</i>	$W_A = 0.116D^{2.307}$	$D=11$	$D=55$	0.502	
栾树 <i>Koelreuteria paniculata</i>		$D=11$	$D=55$	0.477	
玉兰 <i>Yulania denudata</i>	$W_A = 1.086D^{1.224}$	$D=11$	$D=45$	0.500	

续表

名称 Chinese Name	生物量方程 Biomass equation	入场规格 Site entering specification	离场规格 Site leaving specification	含碳率 Carbon content	文献来源 References
西府海棠 <i>Malus × micromalus</i>	$W_A = 0.876D^{1.478}$	$D(8)$	$D=25$	0.450	
紫叶李 <i>Prunus cerasifera</i> ‘ <i>Atropurpurea</i> ’	$W_A = 0.073D^{1.989}$	$D=8$	$D=25$	0.460	
日本晚樱 <i>Prunus serrulata</i> var. <i>lannesiana</i>	$W_A = 0.206D^{1.565}$	$D=11$	$D=20$	0.500	
碧桃 <i>Prunus persica</i> ‘ <i>Duplex</i> ’	$W_A = 0.023D^{2.464}$	$D=4$	$D=20$	0.460	
紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	$W_A = 1.806D^{1.224}$	$D=5$	$D=20$	0.430	
紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>		$D=5$	$D=20$	0.430	
红瑞木 <i>Cornus alba</i>	$W_A = 0.206BD^{1.565}$	$BD=3$ $H=1.1$	$BD=15$ $H=4.5$	0.500	
连翘 <i>Forsythia suspensa</i>	$W_T = 0.716(BD^2H)^{0.989}$	$BD=5$ $H=1.35$	$BD=20$ $H=2.5$	0.500	[32]
黄栌 <i>Cotinus coggygia</i> var. <i>cinereus</i>	$W_A = 0.103(D^2H)^{0.8260}$	$D=8$	$D=25$	0.500	[33]
珍珠梅 <i>Sorbaria sorbifolia</i>	$W_T = 0.046(BD^2H)^{0.8930}$	$BD=3$ $H=1.2$	$BD=15$ $H=4.5$	0.500	
棣棠 <i>Kerria japonica</i>	$W_A = 0.816(BDH)^{0.904}$	$BD=3$ $H=0.9$	$BD=10$ $H=1.2$	0.500	
金银忍冬 <i>Lonicera maackii</i>	$W_T = 0.365(BD^2H)^{0.560}$	$BD=6$ $H=1.75$	$BD=25$ $H=3$	0.480	[34]
锦带花 <i>Weigela florida</i>	$W_T = 164.62(BD^2H)^{0.8871}$	$BD=3$ $H=1.1$	$BD=15$ $H=2$	0.500	[35]
冬青卫矛 <i>Euonymus japonicus</i>	$W_T = 0.036BD^{1.212}$	$BD=3$	$BD=10$	0.500	[36]
小叶黄杨 <i>Buxus sinica</i> var. <i>parvifolia</i>	$W_T = 0.756(CH)^{1.497}$	$C=0.25$ $H=0.7$	$C=1.5$ $H=1.2$	0.500	
紫叶小檗 <i>Berberis thunbergii</i> ‘ <i>Atropurpurea</i> ’	$W_T = 0.105A^{0.734}$	$C=0.6$	$C=1.5$	0.500	
金叶女贞 <i>Ligustrum × vicaryi</i>	$W_T = 0.052(CH)^{0.654}$	$C=0.4$ $H=0.8$	$C=1.5$ $H=1.2$	0.500	
月季‘月月红’ <i>Rosa chinensis</i> ‘ <i>Slater’s Crimson China</i> ’	$W_T = 0.97695V^{0.87}$	$C=0.35$ $H=0.5$	$C=1.0$ $H=1.5$	0.480	[37]

含碳率数据(除 0.500)均来源于北京市地方标准《林业碳汇计量监测技术规程》(DB11/T 953—2013); W_T : 全株生物量 Total tree weight; W_A : 地上生物量 Aboveground weight; W_S : 干生物量 Stem weight; W_B : 枝生物量 Branch weight; W_L : 叶生物量 Leaf weight; W_R : 地下生物量 Root weight; W_T 、 W_A 、 W_S 、 W_B 、 W_L 、 W_R 单位均为 kg; D : 胸径 Diameter at breast height; BD : 基径 Basal diameter; H : 株高 Total height; C : 冠幅直径 Circumference at breast height; A : 植冠面积 Canopy area; V : 体积 Volume; 除锦带花 BD 单位为 m 外, 其他树种 D 、 BD 单位均为 cm, H 、 C 单位 m, A 单位 m^2 ; V 单位 m^3 ; 由于缺乏相应模型可参考, 叉子圆柏采用同科侧柏 (*Platycladus orientalis*) 生物量方程替代; 绦柳采用同科杨属 (*Populus*) 生物量方程替代; 棣棠采用同科峨眉蔷薇 (*Rosa omeiensis*) 生物量方程替代; 金银忍冬采用同属金花忍冬 (*Lonicera chrysantha*) 生物量方程替代; 金叶女贞采用同属小叶女贞 (*Ligustrum quihoui*) 生物量方程替代; 月季‘月月红’采用同属黄刺玫 (*Rosa xanthina*) 生物量方程替代

1.4.2 碳排放参数

北京市常用园林树种全生命周期碳排放量:

$$CE = CE_{CON} + CE_{MAI} \times P + CE_{WAS}$$

式中, CE 为全生命周期碳排放量, CE_{CON} 为施工建植阶段碳排放量, CE_{MAI} 为年养护管理碳排放量, CE_{WAS} 为废弃处置阶段碳排放量, 单位均为 kg/株; P 为北京市常用园林树种应用年限(a)。

(1) 施工建植阶段碳排放量 (CE_{CON}):

$$CE_{CON} = CE_{Lif} + CE_{tra} + CE_{cul} + CE_{sur}$$

$$CE_{Lif}/CE_{tra}/CE_{cul}/CE_{sur} = C_m + C_L$$

$$C_m = Q \times M \times EF_f$$

$$C_L = T \times EF_l$$

式中, CE_{irf} 为普坚土掘苗碳排放量, CE_{ira} 为场外运苗碳排放量, CE_{cul} 为普坚土种植碳排放量, CE_{sur} 为成活期养护碳排放量, C_m 为机械设备碳排放量, C_L 为人工碳排放量, 单位均为 $\text{kg}/\text{株}$ 。 Q (机械台班消耗量, 台班)、 T (工人工时数, 工日) 根据《北京市建设工程计价依据——概算定额(园林绿化工程概算定额)》确定^[41]。 M (机械燃油消耗定额, kg) 取值如表 5, 机械台班按 8 小时工作制计算。 EF_f (燃油碳排放因子) 中柴油、机油和汽油碳排放因子取值分别为 0.859、0.805 和 0.829 kgC/kg ^[43]。 EF_l (人工碳排放因子) 取值 0.076 kgC/d , 1 工日按 8 小时计^[44]。

表 5 园林树种施工建植常用机械表

Table 5 Common machinery for the construction and planting of urban tree species

设备名称 Machinery name	规格 Specification	燃油类型 Fuel type	燃油消耗定额 ^[42] Fuel consumption quota/ kg
载重汽车 Truck	装载质量 5t	柴油	32.190
载重汽车 Truck	装载质量 8t	柴油	35.490
自卸汽车 Dump truck	装载质量 8t	柴油	40.930
汽车式起重机 Truck crane	提升质量 8t	柴油	14.215
汽车式起重机 Truck crane	提升质量 12t	柴油	15.275
汽车式起重机 Truck crane	提升质量 16t	柴油	17.925
汽车式高空作业车 Aerial platform truck	提升高度 18m	汽油	18.2000
洒水车 Watering cart	罐容量 3000L	汽油	29.960

(2) 年养护管理阶段碳排放量 (CE_{mai}):

$$CE_{\text{mai}} = CE_{\text{irr}} + CE_{\text{pes}} + CE_{\text{fer}} + CE_{\text{pru}}$$

式中, CE_{mai} 为年养护管理碳排放量 ($\text{kg 株}^{-1} \text{a}^{-1}$); CE_{irr} 为年灌溉用水碳排放量, CE_{pes} 为年病虫害防治碳排放量, CE_{fer} 为年肥料施用碳排放量, CE_{pru} 为年修剪碳排放量, 单位均为 $\text{kg 株}^{-1} \text{a}^{-1}$ 。

① 年灌溉用水碳排放量:

$$CE_{\text{irr}} = F_w \times Q_w \times EF_w$$

式中, F_w (年灌溉用水频度, 次/年)、 Q_w (单次灌溉用水量, $\text{t 次}^{-1} \text{株}^{-1}$) 取值根据北京市园林绿化局发布的《北京市城镇园林绿化养护预算定额》确定^[45]。 EF_w (城市用水碳排放因子) 取值 0.057 千克碳当量/吨^[42]。

② 年肥料施用碳排放量:

$$CE_{\text{fer}} = F_f \times Q_f \times AI_f \times EF_{\text{ai}}$$

式中, F_f (年肥料施用频度, 次/年)、 Q_f (单次肥料用量, $\text{kg 次}^{-1} \text{株}^{-1}$) 取值据实地调研。 AI_f (肥料有效成分含量, %)、 EF_{ai} (有效成分碳排放因子, kgC/kg 有效成分) 取值见表 6。

表 6 园林树种常用肥料信息表

Table 6 Common fertilizer for the maintenance and management of urban tree species

肥料名称 Fertilizer name	有效成分含量 ^[46—47] Active ingredient content/%	碳排放因子 ^[48] Emission Factor/(kgC/kg 有效成分)
复合肥 Compound fertilizer		0.674
尿素 Urea	总氮(N)的质量分数(优等品) $\geq 46\%$	2.041
磷酸二胺 Diammonium phosphate	有效磷(P_2O_5)的质量分数(优等品) $\geq 45\%$	1.109
有机肥 Organic fertilizer average		77.689

③ 年病虫害防治碳排放量 CE_{pes} :

$$CE_{\text{pes}} = F_{pe} \times Q_{pe} \times AI_{pe} \times EF_{\text{ai}} + F_{pe} \times Q_{pe} \times DR \times EF_{\text{ai}}$$

其中, F_{pe} (年化学农药施用频度, 次/年)、 Q_{pe} (单次化学农药用量, $\text{kg 次}^{-1} \text{株}^{-1}$) 取值根据实地调研确定。 AI_{pe}

(化学农药有效成分含量,%)、 EF_{ai} (有效成分碳排放因子,kgC/kg 有效成分)、 DR (化学农药稀释倍数,倍)取值见表 7。若未见文献记载某种农药有效成分碳排放因子,取化学农药(平均)3.682 kgC/kg 有效成分^[42]。

表 7 园林树种常用化学杀虫剂信息表

Table 7 Common chemical pesticide for the maintenance and management of urban tree species

名称 Pesticide name	剂型 Pesticide formulation	稀释倍数 Dilution ratio	有效成分含量 Active ingredient content/%	有效成分碳排放因子 ^[49] Carbon emission factor of active ingredient/ (kgC/kg 有效成分)
吡虫啉 Imidacloprid	可湿性粉剂	1500	17.5	20.600
哒螨灵 Pyridaben	乳油	3000	15.0	21.800
啉虫脒 Acetamiprid	乳油	2000	3.0	24.700
高效氯氰菊酯 Alpha-cypermethrin	乳油	1500	4.5	19.800
辛硫磷 Phoxim	乳油	2000	40.0	12.300
多菌灵 Carbendazim	可湿性粉剂	600	50.0	15.700
三唑酮 Triadimenol	乳油	1500	20.0	15.600
毒死蜱 Chlorpyrifos	悬浮剂	1000	18.0	12.400
灭幼脲 Hlorbenzuron	悬浮剂	1000	24.8	15.200
腈菌唑 Myclobutanil	乳油	3000	12.5	21.000
百菌清 Chlorthalonil	可湿性粉剂	800	75.0	12.000
噁霉灵 Hymexazol	水剂	600	2.5	12.700
噻嗪酮 Buprofezin	悬浮剂	1500	25.0	17.300
苦参碱 Matrine	可溶液剂	1000	1.0	3.682
除虫脲 Diflubenzuron	悬浮剂	4000	20.0	3.682
甲基硫菌灵 Thiophanate-methyl	可湿性粉剂	800	70.0	14.400

④年修剪碳排放量 CE_{pru} :

$$CE_{pru}=F_{pr}\times Q_p\times M\times EF_f+F_{pr}\times T_p\times EF_l$$

式中, F_{pr} (年修剪频度,次/年)、 Q_p (单次修剪机械台班消耗量,台班/次)、 T_p (单次修剪工人工时数,工日/次)取值根据实地调研确定。

(3)废弃处置阶段碳排放量(CE_{WAS})

$$CE_{WAS}=CE_{cut}+CE_{dig}+CE_{tra}$$

$$CE_{cut}/CE_{dig}=Q\times M\times EF_f+T\times EF_l$$

$$CE_{tra}=Q_T\times D\times M\times EF_f$$

式中, CE_{cut} 为砍伐树木碳排放量, CE_{dig} 为挖树木根系碳排放量, CE_{tra} 为园林绿化废弃物运输至处理厂碳排放量,单位均为 kg/株。 D 为运输距离(km),以海淀公园至六里屯垃圾填埋场的运输距离为例,取值 13。 Q_T (每千米运输机械设备台班消耗量,台班/km)、 T 根据《园林绿化工程消耗量定额(ZYA 2-31—2018)》确定^[50]。

1.4.3 全生命周期碳收支参数

北京市常用园林树种全生命周期碳收支 C 计算公式如下:

$$C=CS-CE$$

式中, CS 为全生命周期碳固定量, CE 为全生命周期碳排放量,单位均为 kg/株。

2 研究结果与分析

2.1 北京市常用园林树种全生命周期碳固定量

如表 8 所示,32 种供试树种的全生命周期累计碳固定量变化范围在 0.026—1400.549 kg/株,平均值 224.441 kg/株。供试树种中乔木全生命周期碳固定量平均值(530.251 kg/株)高于小乔木(24.956 kg/株)和灌木(2.289 kg/株)。乔木中,落叶乔木全生命周期碳固定量平均值(649.303 kg/株)约是常绿针叶乔木

(133.413 kg/株)的6倍。一球悬铃木、美国红栎和国槐3种落叶阔叶乔木全生命周期碳固定量在供试树种中位列前三。小乔木全生命周期碳固定量均低于乔木,高于灌木。灌木中,金叶女贞全生命周期碳固定量为供试树种中最低,不到0.100 kg/株。

表8 北京市常用园林树种全生命周期碳固定量

Table 8 Life cycle carbon sequestration of the tested tree species

名称 Chinese name	入场时碳储量 Site entry carbon sequestration/(kg/株)	离场时碳储量 Site leaving carbon sequestration/(kg/株)	全生命周期碳固定量 Life cycle carbon sequestration/(kg/株)
一球悬铃木 <i>Platanus acerifolia</i>	16.050	1416.599	1400.549
美国红栎 <i>Fraxinus pennsylvanica</i>	20.968	1025.573	1004.605
国槐 <i>Styphnolobium japonicum</i>	18.242	747.481	729.239
毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	11.041	732.588	721.548
栾树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	17.334	710.256	692.922
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	20.188	659.865	639.677
绦柳 <i>Salix matsudana</i> 'Pendula'	11.403	608.998	597.595
元宝槭 <i>Acer truncatum</i>	19.180	414.770	395.590
银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	11.790	264.687	252.897
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	10.383	171.689	161.305
白皮松 <i>Pinus bungeana</i>	8.506	166.193	157.686
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	6.774	88.022	81.247
玉兰 <i>Yulania denudata</i>	12.673	71.081	58.408
西府海棠 <i>Malus × micromalus</i>	10.566	56.924	46.358
紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>	7.016	38.284	31.268
紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	7.016	38.284	31.268
黄栌 <i>Cotinus coggygia</i> var. <i>cinereus</i>	1.818	32.929	31.111
紫叶李 <i>Prunus cerasifera</i> 'Atropurpurea'	2.605	25.119	22.515
碧桃 <i>Prunus persica</i> 'Duplex'	0.399	21.069	20.670
日本晚樱 <i>Prunus serrulata</i> var. <i>lannesiana</i>	5.533	13.879	8.346
金银忍冬 <i>Lonicera maackii</i>	1.426	9.539	8.113
红瑞木 <i>Cornus alba</i>	1.118	8.848	7.730
锦带花 <i>Weigela florida</i>	0.142	5.257	5.114
珍珠梅 <i>Sorbaria sorbifolia</i>	0.193	4.164	3.971
叉子圆柏 <i>Juniperus sabina</i>	0.197	3.621	3.424
棣棠 <i>Kerria japonica</i>	0.993	3.826	2.833
小叶黄杨 <i>Buxus sinica</i> var. <i>parvifolia</i>	0.028	0.911	0.883
月季 '月月红' <i>Rosa chinensis</i> 'Slater's Crimson China'	0.023	0.575	0.552
连翘 <i>Forsythia suspensa</i>	0.012	0.332	0.320
冬青卫矛 <i>Euonymus japonicus</i>	0.040	0.293	0.253
紫叶小檗 <i>Berberis thunbergii</i> 'Atropurpurea'	0.003	0.080	0.076
金叶女贞 <i>Ligustrum × vicaryi</i>	0.012	0.038	0.026

2.2 北京市常用园林树种全生命周期碳排放量

2.2.1 施工建植阶段碳排放量

施工建植阶段碳排放量计算结果如图1。乔木除玉兰外施工建植碳排放量均在10.000 kg/株以上。根据北京市地方标准《园林绿化用植物材料 木本苗》和《北京市建设工程计价依据——概算定额(园林绿化工程概算定额)》,Ⅰ级质量标准毛白杨土球苗入场规格达200 cm×120 cm,施工建植阶段碳排放量为供试树种中最高(32.419 kg/株),绦柳、臭椿、一球悬铃木3种园林树种其次(26.306 kg/株)。小乔木施工建植阶段碳排

放量变化范围为 0.972—6.548 kg/株, I 级质量标准日本晚樱土球苗入场规格达 100 cm×80 cm, 施工建植阶段碳排放量相应为小乔木中最高。灌木施工建植阶段碳排放量均在 2.100 kg/株以下。对所有供试树种, 成活期养护管理在施工建植阶段中产生碳排放量最少, 平均占比仅为 6.2%。对月季‘月月红’、冬青卫矛、小叶黄杨、紫叶小檗、棣棠、金叶女贞和叉子圆柏而言, 普坚土掘苗碳排放量在施工建植阶段碳排放量中占比最高。此外的供试树种, 场外运苗在施工建植阶段中产生碳排放量最多, 平均占比高达 63.5%。

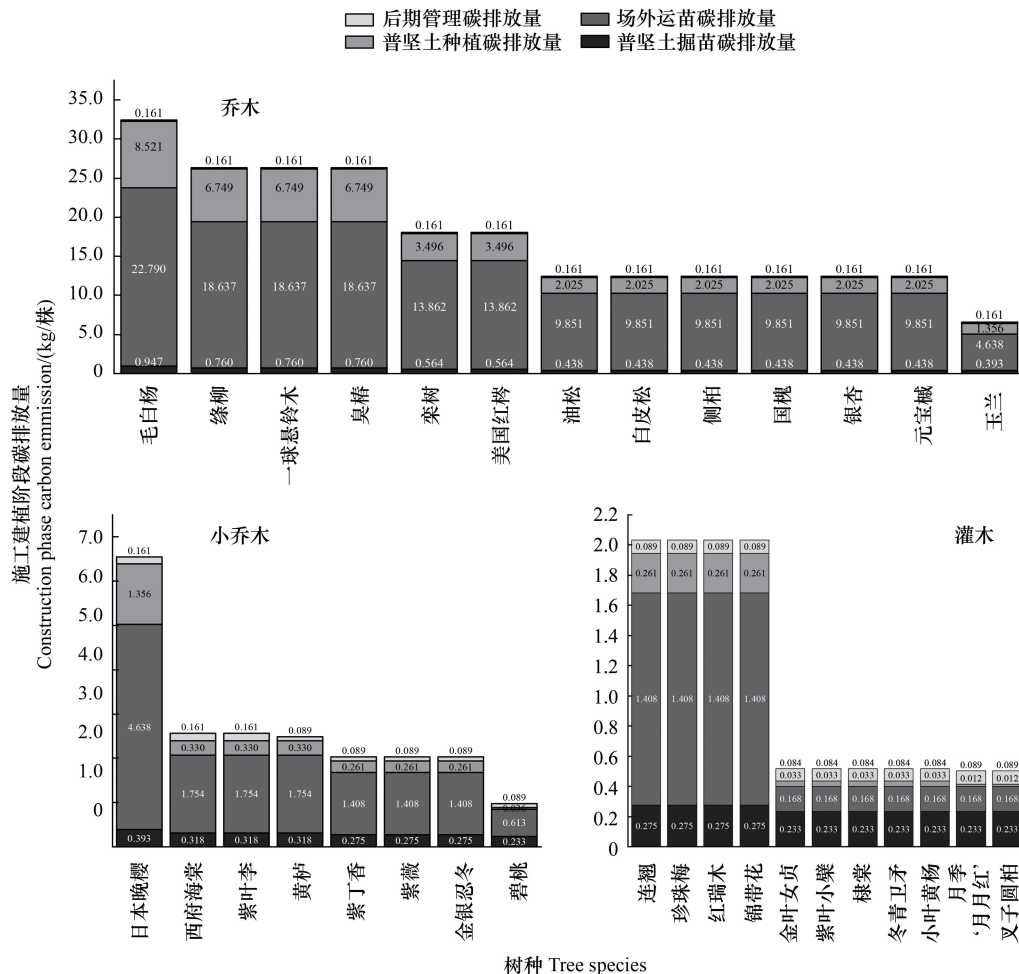


图 1 供试树种施工建植阶段碳排放量图

Fig.1 Carbon emissions of the construction period of the tested tree species

2.2.2 养护管理阶段碳排放量

如表 9, 供试树种养护管理总碳排放量变化范围为 0.822—420.824 kg/株, 平均值为 77.768 kg/株。其中, 灌溉用水碳排放量变化范围为 0.287—5.254 kg/株, 施肥碳排放量变化范围为 0.350—33.666 kg/株, 病虫害防治碳排放量变化范围 0.154—69.041 kg/株, 修剪碳排放量变化范围 0.000—366.758 kg/株。落叶乔木中除毛白杨和玉兰外, 修剪碳排放量占养护管理总碳排放量的比值均在 55%以上。常绿乔木施肥碳排放量平均占养护管理总碳排放量 50.8%, 修剪碳排放量仅占 0.01%。对于小乔木, 病虫害防治碳排放量占养护管理总碳排放量比例最高。其中, 碧桃占比为供试树种中最高(87.8%), 紫叶李其次(81.7%)。碧桃年病虫害防治碳排放量也是供试树种中最高(0.994 kg 株⁻¹ a⁻¹), 紫叶李(0.632 kg 株⁻¹ a⁻¹)位列第三。灌木中月季‘月月红’施肥碳排放量占养护管理总碳排放量比例最高(81.7%), 年施肥碳排放量也为所有供试树种中最高(0.636 kg 株⁻¹ a⁻¹)。

表 9 供试树种养护管理阶段碳排放量表

Table 9 Carbon emissions of the maintenance and management period of the tested tree species

名称 Chinese name	灌溉碳排放量 Carbon emission of irrigation /(kg/株)	病虫害防治碳 排放量 Carbon emission of pest control/ (kg/株)	修剪碳排放量 Carbon emission of pruning/ (kg/株)	施肥碳排放量 Carbon emission of Fertilizer/ (kg/株)	养护管理阶段 总碳排放量 Total carbon Emission/ (kg/株)
绦柳 <i>Salix matsudana</i> 'Pendula'	3.673	29.352±5.008	366.758±118.090	21.041±5.456	420.824
美国红栎 <i>Fraxinus pennsylvanica</i>	5.254	41.655±10.651	222.150±39.985	33.666±8.730	302.725
国槐 <i>Styphnolobium japonicum</i>	5.254	69.041±22.834	192.391±53.875	33.666±8.730	300.352
一球悬铃木 <i>Platanus acerifolia</i>	3.673	25.212±6.827	214.815±82.344	21.041±5.456	264.741
栾树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	5.254	40.689±10.393	150.895±21.78	33.666±8.730	230.504
银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	5.254	29.408±8.038	150.894±14.520	33.666±8.730	218.862
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	3.284	25.803±8.682	152.990±21.880	21.041±5.456	202.398
元宝槭 <i>Acer truncatum</i>	5.254	33.927±5.109	92.213±46.675	33.666±8.730	165.060
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	4.447	27.517±5.700	0.955±0.205	25.868±9.790	58.745
白皮松 <i>Pinus bungeana</i>	4.447	21.226±7.128	0.700±0.301	25.868±9.790	52.199
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	4.447	13.170±0.486	0.361±0.106	25.868±9.790	43.804
毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	3.673	12.867±3.565	0.000±0.000	21.041±5.456	37.581
碧桃 <i>Prunus persica</i> 'Duplex'	1.755	29.822±10.215	0.153±0.010	2.227±0.622	33.957
玉兰 <i>Yulania denudata</i>	2.925	24.842±3.751	0.676±0.173	3.711±1.037	32.154
紫叶李 <i>Prunus cerasifera</i> 'Atropurpurea'	1.755	18.964±4.406	0.255±0.032	2.227±0.622	23.201
日本晚樱 <i>Prunus serrulata</i> var. <i>lannesiana</i>	1.755	17.531±3.033	0.235±0.046	2.227±0.622	21.748
西府海棠 <i>Malus × micromalus</i>	1.755	16.845±2.804	0.302±0.136	2.227±0.622	21.129
黄栌 <i>Cotinus coggygria</i> var. <i>cinereus</i>	1.530	5.768±0.828	0.296±0.091	2.227±0.622	9.821
紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	1.346	4.915±1.706	0.197±0.045	2.227±0.622	8.685
紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>	1.346	4.722±1.616	0.302±0.136	2.227±0.622	8.597
月季 '月月红' <i>Rosa chinensis</i> 'Slater's Crimson China'	0.634	0.698±0.187	0.097±0.026	6.362±1.434	7.791
金银忍冬 <i>Lonicera maackii</i>	1.346	3.841±1.555	0.099±0.030	2.227±0.622	7.513
连翘 <i>Forsythia suspensa</i>	0.395	0.761±0.101	0.076±0.012	0.742±0.207	1.974
冬青卫矛 <i>Euonymus japonicus</i>	0.287	0.811±0.263	0.423±0.158	0.350±0.116	1.871
红瑞木 <i>Cornus alba</i>	0.395	0.586±0.213	0.053±0.005	0.742±0.207	1.776
锦带花 <i>Weigela florida</i>	0.395	0.536±0.124	0.055±0.004	0.742±0.207	1.728
紫叶小檗 <i>Berberis thunbergii</i> 'Atropurpurea'	0.431	0.291±0.117	0.616±0.352	0.350±0.116	1.688
棣棠 <i>Kerria japonica</i>	0.431	0.612±0.131	0.293±0.078	0.350±0.116	1.686
金叶女贞 <i>Ligustrum × vicaryi</i>	0.431	0.382±0.174	0.470±0.205	0.350±0.116	1.633
珍珠梅 <i>Sorbaria sorbifolia</i>	0.342	0.398±0.131	0.069±0.015	0.742±0.207	1.551
小叶黄杨 <i>Buxus sinica</i> var. <i>parvifolia</i>	0.287	0.426±0.037	0.407±0.160	0.350±0.116	1.470
叉子圆柏 <i>Juniperus sabina</i>	0.287	0.154±0.079	0.031±0.005	0.350±0.116	0.822

2.2.3 废弃处置阶段碳排放量

供试树种年养护管理阶段碳排放量如图 2 所示。根据实地调研,一球悬铃木、绦柳、毛白杨、国槐、栾树等 7 种乔木离场时胸径可达到 50 cm 以上,废弃处置阶段碳排放量最高(12.782 kg/株)。小乔木离场时胸径一般在 20—30cm 之间,废弃处置阶段碳排放量范围为 0.181—2.485 kg/株。金叶女贞、紫叶小檗、棣棠和月季 '月月红'等 7 种灌木离场时规格较小,砍挖树根碳排放量均小于 0.005 kg/株,基本可忽略不计。对所有供试树种,运输园林绿化废弃物碳排放量均高于砍挖树根碳排放量。

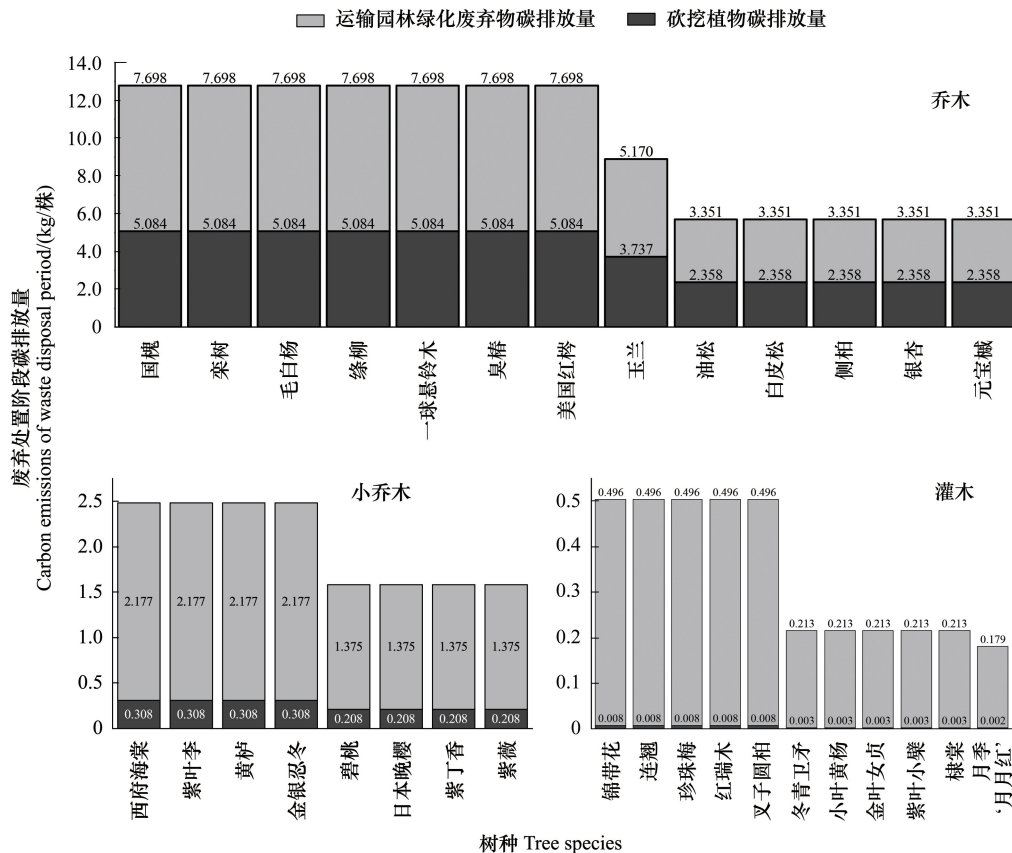


图2 供试树种废弃处置阶段碳排放量图

Fig.2 Carbon emissions of the waste disposal period of the tested tree species

2.2.4 全生命周期碳排放量

如图3所示,供试树种全生命周期碳排放量变化范围为1.828—459.912 kg/株,平均值为90.545 kg/株。落叶乔木全生命周期碳排放量均值(247.648 kg/株)高于常绿乔木(69.767 kg/株)、小乔木(21.520 kg/株)和灌木(3.564 kg/株)。绦柳是供试树种中全生命周期碳排放量最高的树种,其次为美国红栎(333.591 kg/株),第三为国槐(325.608 kg/株)。连翘、红瑞木、锦带花和珍珠梅4种园林树木施工建植碳排放量占全生命周期碳排放量比值最高,分别为45.1%、47.1%、47.7%和49.7%。除上述4种园林树木以外供试树种养护管理阶段碳排放量占比最高。

2.3 北京市常用园林树种全生命周期碳收支

如图4,供试树种全生命周期碳收支变化范围为-21.532—1096.719 kg/株,平均值为132.029 kg/株。乔木、小乔木和灌木全生命周期碳收支值存在明显分级,表现为乔木>小乔木>灌木。乔木全生命周期碳收支值均为正值,其中一球悬铃木、美国红栎、毛白杨位列供试树种前三。除银杏和玉兰外,落叶乔木全生命周期碳收支值均大于常绿乔木。小乔木中金银忍冬、紫叶李、碧桃和日本晚樱全生命周期碳收支值为负值,其中日本晚樱全生命周期碳收支值为供试树种中最低。除红瑞木、叉子圆柏、锦带花和榆叶梅外,灌木全生命周期碳收支值均为负值,但均在-10 kg/株以内。

3 讨论

3.1 北京市常见园林树种全生命周期碳固定特征

北京市不同生活型园林树种之间全生命周期碳固定量存在明显差异,总体上表现为落叶乔木>常绿乔木

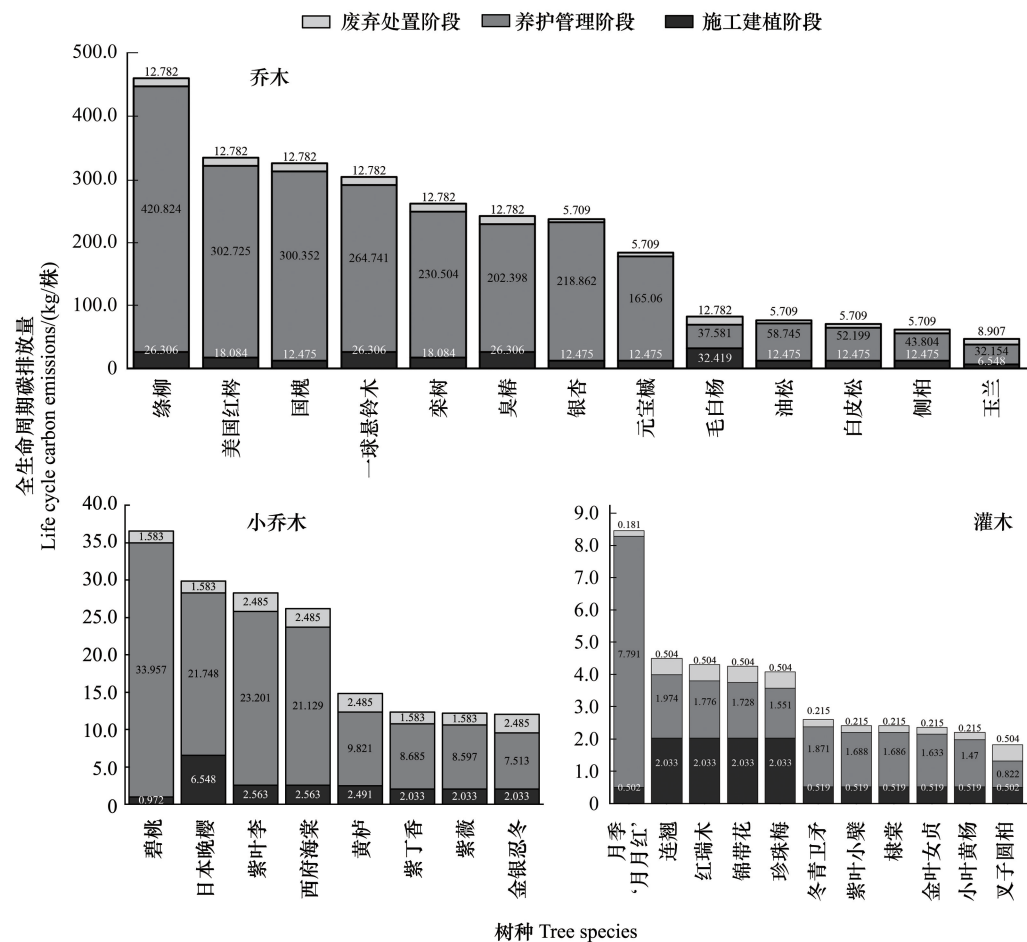


图3 供试树种全生命周期碳排放量图
Fig.3 Life cycle carbon emissions of the tested tree species

>小乔木>灌木。王迪生^[51]的研究采用平均标准木法和收获法计量了北京市城区园林植物生物量,按平均木单株生物量从大到小排序分别为落叶乔木、常绿乔木、落叶灌木、宿根花卉、竹子、绿篱色块和月季‘月月红’,与采用生物量方程法的研究结果基本一致。乔木根系发达,能有效进行光合作用的总叶量远高于小乔木和灌木,因此全生命周期碳固定量最高。本研究表明同一生活型中不同树种间全生命周期碳固定量存在一定差异,乔木中表现尤为明显。悬铃木、毛白杨和臭椿等速生树种能在短时间内积累大量生物量,全生命周期碳固定量在供试树种中较高,而白皮松、油松和圆柏属慢生树种,生物量积累速率较慢,所以全生命周期碳固定量低于相同或更低应用年限的速生树种。杨雪岩等^[52]的研究表明悬铃木、栾树等落叶阔叶乔木单位冠体日固碳量达到 600 g/m³以上,而油松、圆柏等常绿针叶乔木单位冠体日固碳量低于 100 g/m³,固碳能力弱,从同化量角度佐证了本研究。

3.2 北京市常见园林树种全生命周期碳排放特征

园林树种建植与养管等过程中环节繁多、计量过程复杂。本研究结果显示,养护管理阶段是北京市常见园林树种最主要产生碳排放的阶段,其次为施工建植阶段和废弃处置阶段。在养护管理阶段,除毛白杨、玉兰外的落叶阔叶乔木,修剪是造成碳排放的主要因子。这主要是因为这些乔木壮年期株高均在 10 m 以上,分枝点高,修剪需用到园林绿化高空作业车、手锯等机械设备,燃油消耗量高。玉兰相较于其他供试落叶乔木分枝点和树木高度偏低,园林中一般采用人工修剪的方式。毛白杨壮年期株高可达 30 m 以上,即便使用园林绿化高空作业车修剪难度也较大,因此除非毛白杨枝干有砸伤游人风险,一般反而很少修剪。这就导致修剪造成

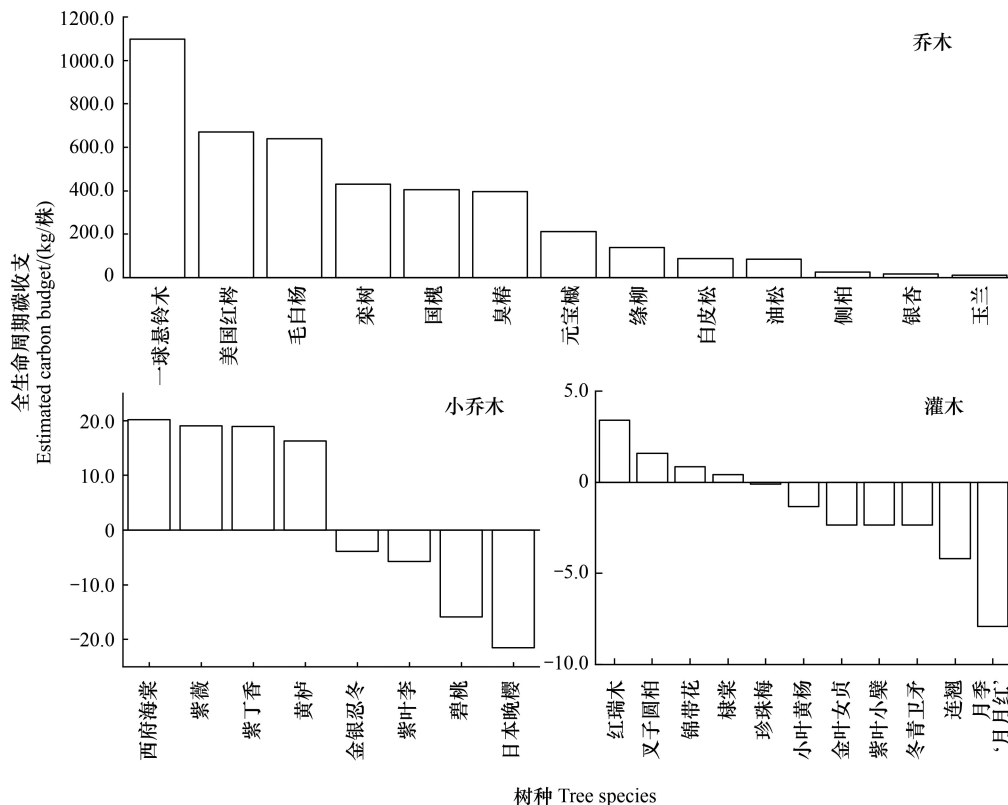


图4 供试树种全生命周期碳收支图

Fig.4 Estimated carbon budget of the tested species

的碳排放对玉兰和毛白杨而言反而不是最高的。北京市城市绿地中的油松、白皮松等常绿针叶乔木养护管理相对粗放,修剪频率低,且主要采用枝剪等工具人工疏枝、摘果,人工修剪碳排放量远低于机械设备,因此修剪碳排放量占比较低。对于研究涉及的小乔木而言,病虫害防治是造成碳排放的主要养护管理措施。我们在实地调研中发现,小乔木,尤其是碧桃和紫叶李等,频繁遭受红蜘蛛、蚜虫和球坚蚧等虫害,年施用农药量和频率在供试树种中排序最高。对于供试灌木而言,不同种类造成碳排放的养护管理的主要因子不同,如观花灌木月季‘月月红’为施肥,因规则式配置而需进行整形修剪的紫叶小檗等则为修剪。比较本研究涉及到的各项养管措施,灌溉为产生碳排放量最低的因子,这与部分前人研究结果有所差异。McPherson 等^[53]对美国加州悬铃木(*Platanu sracemosa*)在 50 年内碳排放核算及萧箫等^[54]对上海市 7 个区 49 个公园绿地绿化养护管理的碳排放核算结果均显示,灌溉用水碳排放量占养护管理阶段各因子中碳排放量比重最大,分析认为这与研究在评价边界界定、数据获取方法、碳排放因子取值、研究区域降水条件等方面不同有关,比如本研究中供试树种均采用中水或自来水灌溉,多数没有涉及水泵等耗油大型机械就地抽取河水或湖水灌溉而产生的排放。在施工建植和废弃处置阶段中造成碳排放的主要因子分别为场外运苗和园林绿化废弃物运输,因为运输需要消耗大量燃油而产生排放,且排放量随着运输距离增长而增大。

3.3 北京市常见园林树种全生命周期碳收支研究

在北京市一级养护管理标准下,北京市常用园林树种不同生活型之间碳收支水平存在较大差异,供试树种中乔木全生命周期碳收支值平均水平明显高于小乔木和灌木。在整个评价周期内,乔木均表现为碳汇,部分小乔木(日本晚樱、碧桃、紫叶李、金银忍冬)和灌木(珍珠梅、小叶黄杨、金叶女贞、紫叶小檗、冬青卫矛、连翘和月季‘月月红’)表现为碳源。乔木中一球悬铃木、美国红栎、毛白杨、栾树、国槐、臭椿全生命周期碳收支值为供试树种中最高。张颖^[55]对天津市 8 种乔木的研究结果也表明杨树、美国红栎等乔木在入场 50 年后全

生命周期碳收支水平最高。小乔木中,日本晚樱、碧桃、紫叶李和金银忍冬全生命周期碳固定量最低,但在养护管理阶段的碳排放量却较高,尤其是病虫害防治因子所产生的碳排放量,导致这些树种的碳收支结果为负值,因而表现为碳源。灌木中所有树种全生命周期碳固定量均在 5.500 kg/株以下,低于全部乔木和小乔木树种。同时,灌木在园林绿地中养护管理相对乔木而言精细,尤其是冬青卫矛、小叶黄叶、紫叶小檗和金叶女贞在北京市园林绿地中主要作整形植物材料应用,年修剪频率高,且多用单刃绿篱机等消耗燃油的机械设备,所以最终表现为碳源。

园林树种是城市绿地发挥碳汇功能的基本单元,其全生命周期碳收支研究成果不仅可比较树种间净固碳能力,在未来也可应用到绿地乃至市域尺度上的碳收支核算研究中。以永定门公园(东城)和玉蜓公园为例,我们根据永定门公园管理处提供的树种名录,评估了两个公园绿地全生命周期(80 年)净碳汇量。永定门公园(东城)木本植物全生命周期碳收支值为 222.924 t,单位面积全生命周期碳收支值为 25.653 t/hm²,其中常绿乔木(586 株)全生命周期碳收支值为 36.383 t,落叶乔木(1043 株)为 249.515 t,小乔木(716 株)为 17.500 t,灌木(3889 株,绿篱面积 1889 m²)为 -80.473 t。玉蜓公园木本植物全生命周期碳收支值为 172.472 t,单位面积全生命周期碳收支量为 49.278 t/hm²,其中常绿乔木(64 株)4.825 t,落叶乔木(376 株)181.588 t,小乔木(509 株)9.561 t,灌木(7324 株,绿篱面积 1326 m²) -23.502 t。上述两个公园木本植物全生命周期碳收支核算研究显示,总体上园林木本植物对增加城市碳汇、抵消城市碳排放具重要的正向作用。这已有较多研究成果论证,如 Vaccari 等的研究表明佛罗伦萨园林植物在生长期 4 月、5 月、6 月分别能抵消 23.3%、16.3%、26.3%城市人为碳排放量^[56]。在这两个公园中,落叶乔木是影响绿地碳汇功能的主要正效应因子,灌木是负效应因子。合理配置园林树种能有效提升城市绿地全生命周期单位面积碳收支量。玉蜓公园落叶乔木株数约为永定门公园(东城)的 1/3 倍,但单位面积全生命周期碳收支量却约为永定门公园(东城)的 2 倍,主要原因可能是玉蜓公园选用了较多净碳汇能力强的树种如悬铃木、加杨等,灌木中全生命周期碳收支为正值的株数更多,且无论乔木、小乔木和灌木都具更高的物种多样性。

3.4 低碳植物景观建设策略

上述研究结果充分证明植物景观碳效应必须从增汇和减排两个方面考虑,据此提出低碳园林植物景观建设策略。增汇方面,植物种类选择应根据场地功能定位和生境条件,在保证植物景观整体生态功能性和美观性的同时,尽量多选用乡土、固碳能力强的树种。乡土树种对当地环境的适应性强,一般成活期养护管理和整个养护管理阶段的碳排放量较外来树种低。在树龄方面,壮龄期苗木进场后能更快地发挥乔木遮阴、降温增湿等其他生态服务功能,同时也具有最佳的景观效果,但壮龄期苗木施工建植阶段碳排放量和经济成本较高;幼龄期苗木在园林绿地中更具固碳潜力、施工建植阶段碳排放量和经济成本较低,但营造景观效果需要一定的时间。在选择苗木树龄时,建议综合各方面因素,权衡绿地中不同树龄和规格苗木的比例。比如可考虑在场地视觉焦点、人流密集处选用壮龄期苗木以保证景观效果,在边缘区域或者较大尺度种植区域中以一定比例混植大规格苗木和小规格苗木。在植物群落结构方面,研究表明乔灌草复层型群落的固碳能力优于灌草型和草坪型^[57]。复杂的植物群落垂直结构具明显的碳汇增持作用,并有助于生态系统稳定性的提升^[58]。因此,在配置植物群落时在满足立地条件及综合功能需求的基础上可考虑丰富植物群落垂直结构,以乔木为主适当增加小乔木和灌木比例。同时,适当增加植物群落郁闭度和种植密度能提升群落碳汇能力,但过高的郁闭度和种植密度会加剧植物间竞争强度,导致植物生长不良,固碳能力下降,因此也必须进行权衡。

植物选择或者应用不当,都会导致栽植和养护过程中排放量增加,因此减排是低碳景观的核心。选用乡土植物、适应性和抗逆性强的植物以及就近选择苗木来源必然会降低运输、栽植及大量养护管理而导致的碳排放。除此之外,对养护管理中碳排放较高的因素也应充分考虑节能减排技术的应用,比如病虫害防治应优先采用生物防治和物理防治预防病虫害爆发;施肥优先考虑绿色、长效、卫生的有机肥料;尽量减少单纯为了景观造型而进行的修剪,修剪时建议避免大型燃油消耗的机械设备使用,多采用绿色清洁能源驱动机械设备。对于人工建植植物群落鼓励因地制宜的自我更新,合理保护和利用绿地中的自生植物,适当培育形成符合园

林绿地功能的独特景观。园林绿化废弃物建议就地处理和再利用,如合理保留倒木、枯落层或者采用堆肥等垃圾资源化处理措施。

4 结论

本研究以北京市 32 种园林树种为例,界定了园林树种全生命周期评价边界,制定了评价清单,并采用生物量方程法和排放因子法进行了碳收支核算。就本研究选取的供试树种而言,主要研究结论如下:(1)不同生活型园林树种全生命周期碳固定量差异较大,总体上表现为落叶乔木>常绿乔木>小乔木>灌木。(2)养护管理阶段一般是北京市常见园林树种生命周期中造成碳排放的主要阶段。对不同生活型的园林树种,养护管理阶段中主要造成碳排放的养护管理因子不同,如落叶乔木为修剪,小乔木为病虫害防治。(3)北京市城市绿地一级养护管理标准下,一球悬铃木、美国红栎、毛白杨等 21 种树种表现为碳汇,日本晚樱、紫叶李、碧桃等 11 种树种表现为碳源。

参考文献(References):

- [1] 朱新广,王佳伟,韩斌. 植物碳汇系统与中国碳中和之路. 科学通报, 2023, 68(1): 12-17.
- [2] 牛铜钢,刘为. 双碳战略背景下城市生态系统的碳汇功能与生物多样性可以兼得. 生物多样性, 2022, 30(8): 205-210.
- [3] 薛海丽,唐海萍,李延明,李新宇,郭佳,马骏. 北京常见绿化植物生态调节服务研究. 北京师范大学学报:自然科学版, 2018, 54(4): 517-524.
- [4] 李亚亮,刘玲,李长爱,王慧,刘海涛,缪国鹏. 10 种蔷薇科绿化植物固碳释氧特性及叶片气孔微形态分析. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(8): 102-112.
- [5] Zhao S Q, Tang Y J, Chen A P. Carbon storage and sequestration of urban street trees in Beijing, China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2016, 4: 53.
- [6] Jo H K, McPherson G E. Carbon storage and flux in urban residential greenspace. *Journal of Environmental Management*, 1995, 45(2): 109-133.
- [7] 宋思贤,王凯,张俊猛等. 应用 i-Tree 模型对校园行道树生态效益评价分析//中国风景园林学会.中国风景园林学会 2020 年论文集(下册). 中国建筑工业出版社, 2020: 5.
- [8] 熊金鑫,祁慧君,王倩茹,汪倩如,王少华,左文涛,孙圆. 基于 i-Tree 模型的城市小区行道树生态效益评价. 南京林业大学学报:自然科学版, 2019, 43(2): 128-136.
- [9] 员浩帆,张颖,徐文斌,孟伟庆,冯剑丰. 基于生命周期方法的城市绿地生态环境负面影响评估. 生态学杂志, 2023, 42(2): 493-503.
- [10] Kuittinen M, Hautamäki R, Tuhkanen E M, Riikonen A, Ariluoma M. Environmental Product Declarations for plants and soils: how to quantify carbon uptake in landscape design and construction? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2021, 26(6): 1100-1116.
- [11] 杨谦敏,袁丹萍,邓存宝,王延生,乔玲. 碳中和背景下植物净固碳能力研究进展. 生态学杂志, 2023, 42(6): 1484-1496.
- [12] 全国环境管理标准化技术委员会. GB/T 24040—2008 环境管理生命周期评价原则与框架. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13] Strohbach M W, Arnold E, Haase D. The carbon footprint of urban green space—a life cycle approach. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 104(2): 220-229.
- [14] Nicese F P, Colangelo G, Comolli R, Azzini L, Lucchetti S, Marziliano P A, Sanesi G. Estimating CO₂ balance through the Life Cycle Assessment prism: a case-Study in an urban park. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 57: 126869.
- [15] Ingram D L. Life cycle assessment to study the carbon footprint of system components for Colorado blue spruce field production and use. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2013, 138(1): 3-11.
- [16] Park H M, Jo H K, Kim J Y. Carbon footprint of landscape tree production in Korea. *Sustainability*, 2021, 13(11): 5915.
- [17] 郑瑞文,刘艳红. 北京市公园绿地植物多样性研究. 科学技术与工程, 2006, 6(15): 2309-2315.
- [18] 郎金顶,刘艳红,裴伟. 北京市建成区绿地植物物种来源分析. 植物学通报, 2008, 43(2): 195-202.
- [19] Park H M, Jo H K. Ecological design and construction strategies through life cycle assessment of carbon budget for urban parks in Korea. *Forests*, 2021, 12(10): 1399.
- [20] Petri A C, Koeser A K, Lovell S T, Ingram D. How green are trees? —using life cycle assessment methods to assess net environmental benefits. *Journal of Environmental Horticulture*, 2016, 34(4): 101-110.
- [21] 北京市园林绿化局. DB11/T 478—2022 古树名木评价规范. 北京: 北京市地方标准, 2022.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ/T 287—2018 园林绿化养护标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [23] 尹惠妍,张志伟,李海奎. 中国主要乔木树种生物量方程. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(5): 63-69.
- [24] 北京市园林绿化局. DB11/T 211—2017 园林绿化用植物材料木本苗. 北京: 北京市地方标准, 2017.
- [25] 马钦彦. 中国油松生物量的研究. 北京林业大学学报, 1989, 11(4): 1-10.

- [26] Li H, Li C Y, Zha T S, Liu J L, Jia X, Wang X P, Chen W J, He G M. Patterns of biomass allocation in an age-sequence of secondary *Pinus bungeana* forests in China. *The Forestry Chronicle*, 2014, 90(2): 169-176.
- [27] 陈灵芝, 陈清朗, 鲍显诚, 任继凯, 缪有贵, 胡肆慧. 北京山区的侧柏林 (*Platycladus orientalis*) 及其生物量研究. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1986, 10(1): 17-25.
- [28] 周国逸, 尹光彩, 唐旭利, 温达志, 刘昌平, 旷远文, 王万同. 中国森林生态系统碳储量-生物量方程. 北京: 科学出版社, 2018.
- [29] Wang C K. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 2006, 222(1/2/3): 9-16.
- [30] 刘坤, 曹林, 汪贵斌, 曹福亮. 银杏生物量分配格局及异速生长模型. *北京林业大学学报*, 2017, 39(4): 12-20.
- [31] 北京市园林绿化局. DB11/T 953—2013 林业碳汇计量监测技术规程. 北京: 北京市地方标准, 2013.
- [32] Yao Z Y, Liu J J, Zhao X W, Long D F, Wang L. Spatial dynamics of aboveground carbon stock in urban green space: a case study of Xi'an, China. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(3): 350-360.
- [33] 谢宗强, 王杨, 唐志尧, 徐文婷. 中国常见灌木生物量模型手册. 北京: 科学出版社, 2018.
- [34] 罗永开, 方精云, 胡会峰. 山西芦芽山 14 种常见灌木生物量模型及生物量分配. *植物生态学报*, 2017, 41(1): 115-125.
- [35] 万五星, 王效科, 李东义, 冯学全, 张千千, 于小红. 暖温带森林生态系统林下灌木生物量相对生长模型. *生态学报*, 2014, 34(23): 6985-6992.
- [36] 姚正阳, 刘建军. 西安市 4 种城市绿化灌木单株生物量估算模型. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 111-116.
- [37] 赵梦颖, 孙威, 罗永开, 梁存柱, 李智勇, 沈海花, 牛霞霞, 郑成洋, 胡会峰, 马文红. 内蒙古 26 种常见温带灌木的生物量模型. *干旱区研究*, 2019, 36(5): 1219-1228.
- [38] Nowak D, Stevens J, Sisinni S, Luley C. Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2002, 28(3): 113-122.
- [39] Gitsarskiy M L. The refinement to the 2006 ipcc guidelines for national greenhouse gas inventories. *Fundamental and Applied Climatology*, 2019, 2: 5-13.
- [40] Nowak DJ. Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest. *Chicago's urban forest ecosystem: Results of the Chicago urban forest climate project*, 1994: 83-94.
- [41] 北京市住房和城乡建设委员会. 北京市建设工程计价依据——概算定额-05-园林绿化工程概算定额, 绿化工程 庭园工程. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [42] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建设工程施工机械台班费用编制规则. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [43] 生态环境部环境规划院, 北京师范大学, 中山大学, 中国城市温室气体工作组. 中国产品全生命周期温室气体排放系数集 (2022), 北京: 2022.
- [44] 国家统计局. 中国统计年鉴—2022. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [45] 北京市园林绿化局. 北京市园林绿化局关于印发《北京市城镇园林绿化养护预算定额》的通知. (2019-11-19) [2023-1-17]. https://yllhj.beijing.gov.cn/zwgk/fgwj/qtwj/201911/t20191130_766878.shtml
- [46] 全国肥料和土壤调理剂标准化技术委员会. GB/T 2440—2017 尿素. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [47] 全国肥料和土壤调理剂标准化技术委员会. GB/T 10205—2009 磷酸一铵、磷酸二铵. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [48] 陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算. *生态学报*, 2015, 35(19): 6371-6383.
- [49] 胡永浩, 张昆扬, 胡南燕, 武拉平. 中国农业碳排放测算研究综述. *中国生态农业学报: 中英文*, 2023, 31(2): 163-176.
- [50] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 园林绿化工程消耗量定额 (ZYA 2-31—2018). 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [51] 王迪生. 北京城区园林植物生物量的计测研究. *林业资源管理*, 2009(4): 120-125.
- [52] 杨雪岩, 吴雪梅, 王冰, 杨京, 张禹, 谢晓君, 冯红莉, 刘增文. 基于综合服务功能评价的北方城市绿化树种筛选. *西北林学院学报*, 2022, 37(5): 251-257.
- [53] McPherson E G, Kendall A, Albers S. Life cycle assessment of carbon dioxide for different arboricultural practices in Los Angeles, CA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(2): 388-397.
- [54] 萧箫, 陈彤, 郑中华, 杨学军. 上海公园绿化养护碳排放量计算研究. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2013, 31(1): 67-71.
- [55] 张颖. 基于生命周期法的城市绿地优势种碳收支研究——以天津市为例[D]. 天津: 天津师范大学, 2022.
- [56] Vaccari FP, Gioli B, Toscano P, Perrone C. Carbon dioxide balance assessment of the city of Florence (Italy), and implications for urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 120: 138-146.
- [57] 李辉, 赵卫智, 古润泽, 李延明, 陈自新, 张新猷. 居住区不同类型绿地释氧固碳及降温增湿作用. *环境科学*, 1999, 20(6): 41-44.
- [58] Kunz M, Fichtner A, Härdtle W, Raunonen P, Bruehlheide H, von Oheimb G. Neighbour species richness and local structural variability modulate aboveground allocation patterns and crown morphology of individual trees. *Ecology Letters*, 2019, 22(12): 2130-2140.