西安城区道路绿化植物碳汇效益优化设计*

王晶懋[1,2] 卢春雨[1] 刘 晖[1,2] 徐冰洁[1] 鹿 琛[1] 苏睿博[1] 刘雨萌[3]

1 西安建筑科技大学建筑学院 西安 710055
2 西安建筑科技大学-西澳大学“城市生物多样性与设计国际联合实验室” 西安 710055
3 瓦格宁根大学风景园林规划 荷兰瓦格宁根市 6700HB

摘要:【目的】在全球气候变暖及“双碳”目标背景下,探究城市道路绿地空间的低碳优化策略,以提高其碳汇效益。【方法】通过分析道路绿地碳汇效益与植物特征、道路结构的关系,提出绿地形态布局优化策略(宽度、数量)及植物群落结构优化策略(水平、垂直层面),并选取西市南路进行实证应用。【结果】1)相同绿地面积下,植物群落的碳汇效益排序为:乔灌草>乔灌>乔草>乔木>灌草>灌木>草地;2)不同绿带的碳汇效率峰值:侧分绿带(1.5 m、3.5 m)、中分绿带(8 m)、路侧绿带(2 m、5 m、8 m);3)提出 3 种植物配置类型(固碳功能主导型、景观功能主导型、景观兼固碳型),并构建高固碳群落优化模式。【结论】道路绿带宽度和数量变化、道路绿地植物群落特征因子均对提升碳汇效益具有显著影响,研究提出的优化策略可为城市道路绿化提质增效提供科学依据,助力低碳城市建设。

关键词:道路绿化;植物群落;碳汇;高固碳;种植设计
DOI:10.12169/zgcsly.2024.04.17.0004

Road Greening Plants Designfor Optimal Carbon Sink Benefits in City Area of Xi'an

Wang Jingmao[1,2] Lu Chunyu[1] Liu Hui[1,2] Xu Bingjie[1] Lu Chen[1]
Su Ruibo[1] Liu Yumeng[3]

(1. College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an University of Architecture and Technology - The University of Western Australia "International Joint Laboratory for Urban Biodiversity and Design", Xi'an 710055, China 3. Wageningen University and Research, Wageningen 6700 HB, The Netherlands)

Abstract:【Objective】To explore optimization strategies for low-carbon urban road green spaces to enhance their carbon sequestration benefits under the context of global climate warming and the "dual carbon" goals.【Method】By analyzing the relationship between carbon sequestration benefits and plant characteristics/road structures in green spaces, the study proposes optimization strategies for green space morphology (width/quantity) and plant community structure (horizontal/vertical dimensions), and accordingly select South Xishi Road for an empirical application.【Result】1) When in the same green space area, the carbon sink benefits of plant communities are ranked as tree-shrub-grass> tree-shrub > tree-grass> tree > shrub-grass >shrub > grassland; 2) The peak carbon sink efficiency of different green belts is reflected as side green belt (1.5 m, 3.5 m), median green belt (8 m), roadside green belt

收稿日期:2024-04-17
* 基金项目:陕西省自然科学基金项目(2023-JC-QN-0525);西安建筑科技大学交叉研究培育专项(X20220079);陕西省教育厅专项科研项目(23JK0507);陕西省科技厅青年项目(2024JC-YBQN-0602)
第一作者:王晶懋(1988-),女,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为风景园林植物景观设计、低碳景观设计。E-mail:airainmail@126.com

(2 m, 5 m, 8 m); and 3) Three types of plant configuration (carbon sequestration function dominant, landscape function dominant, and landscape and carbon sequestration) are proposed, and an optimization model of high carbon sequestration community is constructed.【Conclusion】 Changes in road greenbelt width and quantity, as well as plant community characteristics within road green spaces, significantly influence carbon sequestration efficiency. The proposed optimization strategies provide a scientific foundation for enhancing the quality and effectiveness of urban road greening, thereby contributing to low-carbon city development.

Keywords: road greening; plant community; carbon sink; high carbon sequestration; planting design

党的二十大报告指出，坚持推动城市绿地空间建设的基础性研究，加快绿色低碳发展，提升生态系统质量和稳定性，是建设人与自然和谐共生的现代化的必然选择。近些年更多学者逐渐关注到城市绿地空间生态系统服务产生的经济价值，并对其进行估算与评价。研究表明，城市绿地发挥着固碳释氧、调节气候、涵养水源、保持土壤、净化空气和减弱噪声等生态服务价值[1-2]，尤其在减缓城市热岛效应和城市碳汇领域作用显著[3]。2020 年 9 月 22 日，我国政府在第 75 届联合国大会上提出将在 2030 年前达到 CO_2 排放峰值，在 2060 年前实现碳中和。“双碳”行动是应对全球气候变暖的重要举措[4-5]，截至 2022 年 10 月底，已有 139 个国家和地区拟议了“零碳”或“碳中和”愿景，并在城市区域展开相关减碳排、增碳汇行动。在推进“双碳”战略目标实现的宏观布局中，城市绿地建设是其中的关键环节，而具有生态景观功能等的城市道路绿地更是发挥着重要作用[6-8]。因此研究城区道路绿化碳汇效益对生态环境的改善具有重要意义。

道路绿地作为城市生态系统的重要组成部分，具有直接增汇、间接减排的双重生态效益，能有效维持碳平衡[9]，也是城市中天然的直接碳汇途径[10]。因此可以通过调整绿地空间布局和植物种植方式、增加植被面积、丰富层次结构、选择植被树种，构建高固碳型和高稳定性的植被群落，增加植物光合作用碳汇能力[11-13]。道路绿地优化设计的传统方法是通过提高绿地面积来提升城市绿地的生态效益，然而由于增绿空间有限，目前不可能无限制提高城市绿地的比重[14]。在各城市绿色空间碳储量基数相对固定的情况下，如何在存量绿色空间中通过提质增效，提高绿地碳汇效益和潜力是未来的研究重点[15-16]。

综上，在道路绿化设计中，需综合考量各因素对绿化设计的影响，否则会出现道路绿化影响交通、道路绿化与周围环境协调性较差以及绿化效果不明显等现象，将会大大降低绿化设计的实际效能[12]。绿化施工阶段往往在道路建设好之后，造成道路建设与道路绿化割裂，引起施工成本高和难度加大等现实问题[17]。本文以城市道路绿地为研究对象，以植物碳汇效能为出发点，以低碳城市、植物固碳等理论与实践研究作为理论基础，对不同道路的断面类型、绿带宽度和数量进行统计，测定道路绿地植物个体特征和群落特征，并对植物群落碳汇效益进行研究，得出道路绿带布局和植物配置模式对道路绿地植物群落碳汇效益的影响并对碳汇能力高的植物群落配置模式进行提取，最后分别为已建成道路和未建成道路提出优化策略，同时提出基于碳汇理论的道路绿化植物配置模式，最终指导道路绿化设计实践。

1　研究方法

1.1　研究区的选取

本文以西安市雁塔区、莲湖区、碑林区、新城区、高新区、曲江新区等作为研究区域。为减小样本误差，全面考虑不同的道路断面形式和植物配置，选择范围包括城市新建道路和老旧道路，共计 67 条道路，包括常见的道路板带类型，城市道路常见的宽度为 16~70 m。针对不同道路类型，分别关注行道树绿带、中央分车带、侧分绿带、路侧绿带 4 种道路绿地的植物种植。

1.2　植物配置情况

根据道路上的植物配置形式，确定不同绿带的标准段长度，以一个标准段为研究对象，对道路红线宽度、道路板型以及绿地设计中的绿带宽度、植物配置等进行统计。以 5 m 为一个层级划

分道路的总宽度，包括红线内车行道、人行道、道路绿带在内的总宽度。所调研的道路红线宽度有 11 个分类，其中 50 m、45 m、40 m 的道路分布较多，在 67 条道路中，三板四带道路占比最多。道路绿带总宽度最低为 3 m，最高可达 27 m。对 67 条道路绿地不同绿带的植物进行分类研究，共有 55 种植物。总的来说，西安城区道路存在板式布局不合理、植物配置待优化、后期管护不到位等问题。

1.3 设计流程

植物的碳汇碳排过程存在于景观全生命周期内，包括前期设计过程、建造施工过程以及后期的养护管理过程。在前期设计过程中选择合适的树种，可为后续建造及养护阶段规避大量碳排。针对板型既定道路和板型未定道路，形成基于碳汇理念的道路绿化设计流程（图 1），为后续的设计研究提供步骤参考。

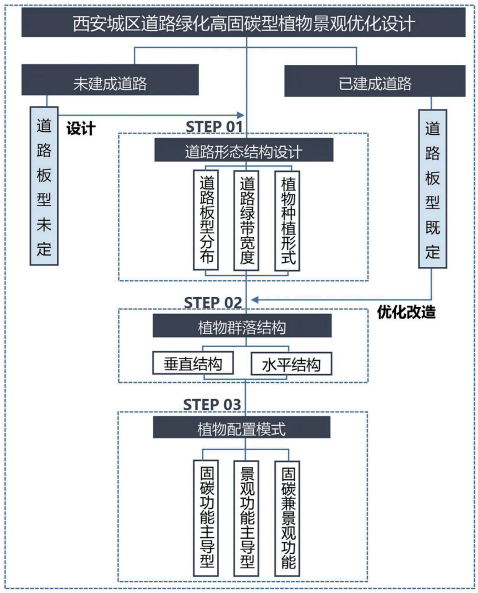


图 1 道路绿化高固碳型植物景观设计流程

1.4 植物碳汇效益量化方法

用仪器测算出植物不同时段的光合速率，并通过公式计算出单株植物的日固碳量，再根据选取的道路标准段统计其中的植物株数及面积，计算单位土地面积的植物碳汇效益。降雨天，植物气孔关闭光，合作用有效性不高，而天气晴朗时，植物进行光合作用，因此，统计植物光合作用的有效天数时，需要筛掉降雨天，以日降雨量超过 5 mm 作为降雨日[18]。通过在中国天气网上查到的数据，对西安市 1971—2000 年的气候数据进行分析，植物全年有效光合作用天数是剔除降雨天的天数，常绿植物全年有效光合作用为 274.7 天，落叶植物全年有效光合作用为 196.1 天。植物在春夏秋冬四季光合作用的有效天数分别为 67.8 天、63.9 天、64.4 天、78.6 天。

道路植物配置有常绿植物和落叶植物，其全年进行光合作用的有效天数不同。因此，对道路植物碳汇效益进行计算时，应按照春夏秋冬四季进行，最终计算出单株植物和植物群落的年固碳量。

1）假定光合有效辐射每天按 10 h 计算，则植物净同化量为：

$$P = \sum_{i=1}^{j}\left[\frac{(p_{i+1}-p_i)}{2} * (t_{i+1}-t_i) \times (3\,600/1\,000)\right] \quad (1)$$

2）通过测定日同化总量换算为日单位叶面积固碳量：

$$W_{CO_2} = P \times 44/1\,000 \quad (2)$$

3）计算单株植物单位土地叶面积的固碳量：

$$Q_{CO_2} = I_{LA} \cdot W_{CO_2} \quad (3)$$

式（1）～（3）中：P 为植物的同化总量（$mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）；$p_i$ 为初测点的瞬时光合作用速率，（$\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）；$P_{i+1}$ 为 i+1 时刻的瞬时光合作用速率；t_i 为初测点的瞬时时间 h；t_{i+1} 为 i+1 测点的时间 h；j 为测定次数；W_{CO_2} 为植物单位叶面积固碳量（$g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$）；44 为 CO_2 的摩尔质量；Q_{CO2} 为单株植物单位土地面积上的固碳量（$g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$）；$I_{LA}$ 为植物的叶面积指数。

2 道路板式未定形态结构设计

2.1 版型布局提升设计

道路的断面形式体现了道路绿化在空间上的布局模式，能够更明显地看出绿带对空间的隔离作用，以及植物配置所构成的空间形态。不同红线宽度的道路，其道路等级及定位不同，对道路绿化的需求也有所差异，影响绿带数量和宽度的布置，进而影响植物群落的碳汇效益。因此，首先以道路红线宽度为前提条件，然后确定道路绿带总宽度，最后对道路绿带进行空间布置（图 2）。

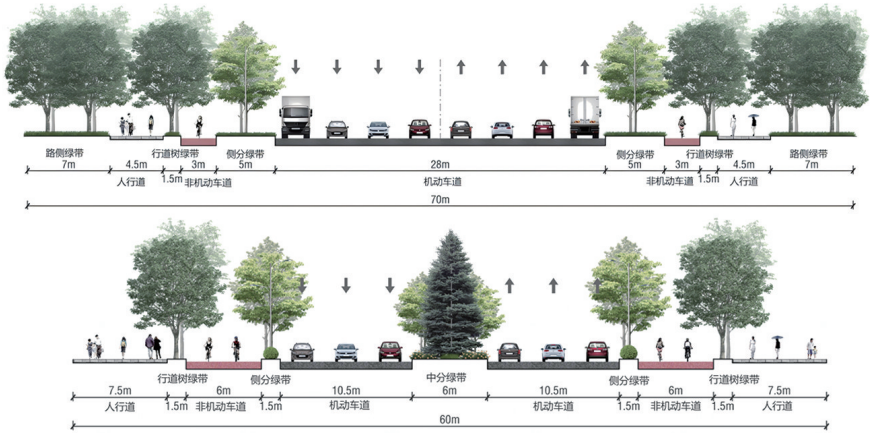


图 2　70 m、60 m 红线宽度道路板型推荐

2.2　绿带宽度提升设计

在不同道路红线宽度下，研究某一路段的道路绿化植物碳汇效益时，需要以相同的绿地总面积为限定条件，因此需要保证道路绿带总宽度相同。不同绿带总宽度构成的道路植物群落碳汇效益有所差别，同一绿带总宽度下绿带数量分布和各绿带宽度的变化均会对整段道路的植物碳汇效益产生影响（图 3~4）。

道路总绿带宽度为行道树绿带、侧分绿带、中分绿带、路侧绿带的宽度总和。随着绿带宽度的增加，植物碳汇效益呈波动变化，总体为不稳定上升趋势，当绿带宽度总量为 17 m 时，平均碳汇效益达到最高，之后又逐步下降（图 3）。植物群落年固碳量总体上随绿带宽度的增加而逐步上升，在局部呈短暂的下降趋势（图 4）。因此，当绿带总宽度在同一区间内，基本来说数量越多越好，但存在部分绿带数量多而碳汇效益低的情况，这与植物群落的树种组成、群落密度等有关。

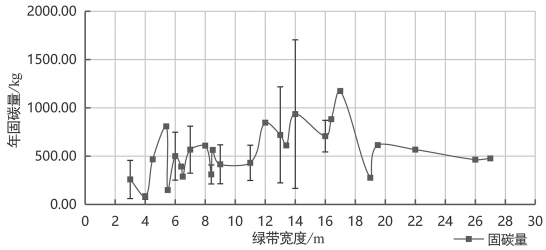


图 3　不同宽度绿带固碳量

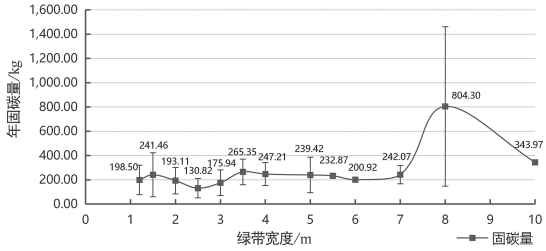


图 4　不同总宽度绿带固碳量

因此，本研究提出不同道路红线宽度下的绿带数量和各绿带宽度布置，以期指导道路绿化板型和绿带宽度布置（表 1）。

表 1　不同红线宽度下道路绿带宽度布置推荐

道路红线宽度/m	绿带宽度/m					平均固碳量/kg
	绿带总宽度	行道树绿带	侧分绿带	中分绿带	路侧绿带	
70	26~27	1. 5	5	—	6. 5~7	954. 79
60	12~14	1. 5	1. 5	6	—	1 494. 10
50	6~11	1. 5	1. 5	—	—	1 364. 88
		1. 5	1. 5~3	—	—	1 117. 33
	11~20	1. 5	—	2. 5	7	1 074. 31
		1. 5	1. 5	—	1. 5~7	1 122. 2
		1. 5	2. 5	—	1. 5~6	1 418. 29
40	6~9	1. 5	1. 5	—	—	1 240. 98
		—	1. 5	1. 5~3	—	1 202. 30
		—	2	2~5	—	1 157. 48
	9~16	1. 5	1. 5	—	1. 5~5	1 217. 19
		1. 5	1. 5	3~10	—	2 333. 86
		1. 5	—	—	3~6. 5	1 766. 63
	16~22	1. 5	1. 5	—	5~8	1 217. 19
30	6	1. 5	1. 5	—	—	1 065. 07
20	3	1. 5	—	—	—	1 417. 93

2.3 植物群落种植提升设计

不同植物在空间上的组合构成了植物群落，相比于单株植物的碳汇效益研究，植物群落涉及的因子更具复杂性，需将植物群落样方作为一个整体去研究，探讨不同群落特征因子对碳汇效益的影响，为后续植物群落配置提供参考。研究发现，植物群落内树种的种类、数量和种植密度、以及植物的不同搭配组合对植物群落的总叶面积和绿量有直接影响，导致整个群落的固碳量不同(图 5~8)。因此增加高固碳树种的数量有助于提高植物群落碳汇效益；选择合适的胸径大小有助于提高植物群落碳汇效益；丰富层次结构有助于提高植物群落碳汇效益；合理增加群落密度有助于提高植物群落碳汇效益。

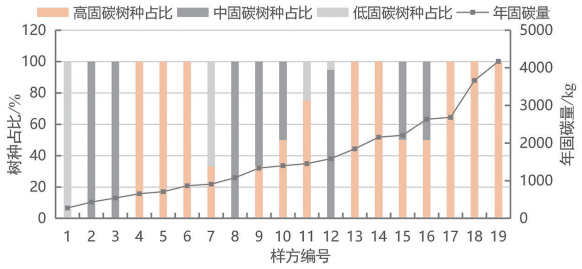


图 5 不同高固碳树种占比植物群落的年固碳量变化

3 道路板式既定植物群落优化设计

3.1 道路绿地群落平面结构优化

对于已建成道路，道路板型既定，改变道路板型耗费巨大且在施工建设中会增加大量碳排，因此，采取低碳排的方式，通过优化植物群落结构来提升整体的碳汇效益，具体包括植物在平面形态和立面结构的优化。对于平面形态有 5 种设计策略（图 9）。

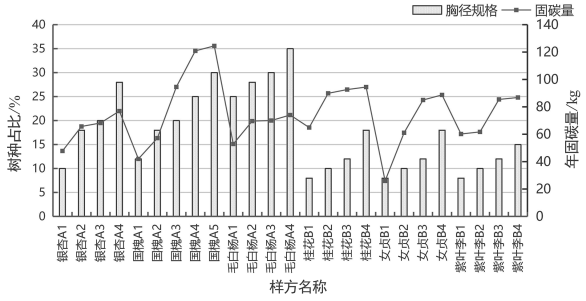


图 6 不同规格树种年固碳量比较

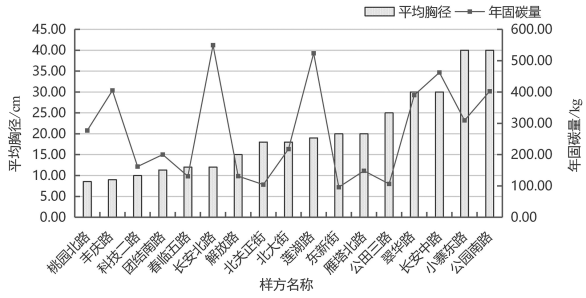


图 7 植物群落平均胸径的年固碳量变化

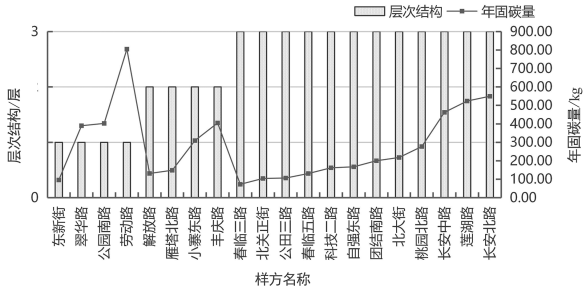


图 8 不同层次结构植物群落的年固碳量变化

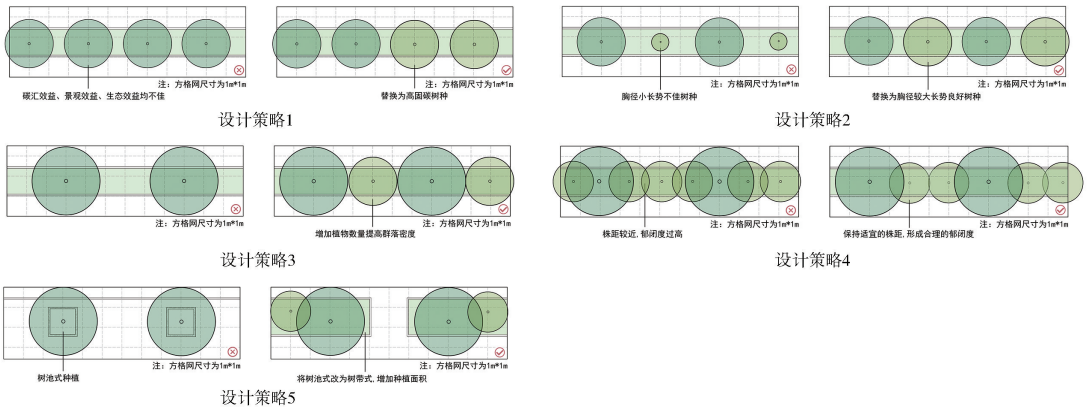


图 9 植物群落平面形态优化设计策略

3.2 道路绿地群落立面结构优化

在立面结构上丰富层次结构有助于提高植物群落碳汇效益。通过对行道树绿带植物碳汇效益研究，得出 9 种高固碳型植物配置模式，分为乔

木型、乔灌型和乔草型 3 种类型。主要搭配组合为高固碳乔木、高固碳乔木+绿篱（冠木球）、高固碳乔木+地被。按照碳汇效益的高低，植物群落搭配顺序为乔灌草>乔灌>乔草>乔木>灌草>灌木>草地（表 2）。

表 2　高固碳植物配置方式筛选

碳汇效益	层次结构	植物配置	单位土地面积固碳量/（$g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$）
高固碳型	乔木	法桐	26. 83
		银杏+紫叶李	26. 36
		柳树	24. 82
	乔灌	法桐+女贞+冬青卫矛绿篱	47. 26
		法桐+小叶女贞球+海桐绿篱	31. 52
		法桐+冬青卫矛绿篱	29. 80
		法桐+冬青卫矛球+小叶女贞绿篱	28. 88
		国槐+女贞+石楠绿篱	21. 57
	乔草	栾树+细叶麦冬	41. 70
中固碳型	乔木	栾树	13. 12
		鹅掌楸	10. 68
		广玉兰	19. 57
	乔灌	国槐+红叶石楠绿篱	12. 84
		毛白杨+女贞+蜡梅+小叶女贞绿篱	14. 53
	乔草	苦楝+细叶麦冬	14. 36
		国槐+桂花+混播草	17. 41
	乔灌草	桂花+石楠球+石楠绿篱	14. 13
低固碳型	乔木	国槐	6. 47
		樱花	4. 35
		银杏	7. 09
		毛白杨	8. 67
		楸树	8. 88
		女贞	8. 73
		桂花	7. 27
	乔灌	国槐+金森女贞绿篱	9. 01
		紫玉兰+小叶女贞绿篱	7. 33
		柿树+小叶女贞绿篱	3. 12
	乔草	国槐+混播草	6. 56
		樱花+小叶女贞绿篱	5. 24
		樱花+麦冬	4. 65
		红叶石楠树+混播草	3. 96
		油松+混播草	1. 62
	灌草	白皮松+红叶石楠球+细叶麦冬	1. 83
	乔灌草	柿树+丛生果石榴+海桐球+混播草	5. 41

当道路绿化选择的植物种类相同时，往往搭配灌木及草坪的植群落的碳汇效益要高于单一乔木类型的道路，当同为双层结构种植时，因灌木的碳汇能力优于草地，因此乔灌的碳汇能力高于乔草型。无乔木的搭配，仅以灌木为主的灌草型或灌木型种植少见，其碳汇效益也是最低。对于立面结构推荐 4 种设计策略（图 10）。

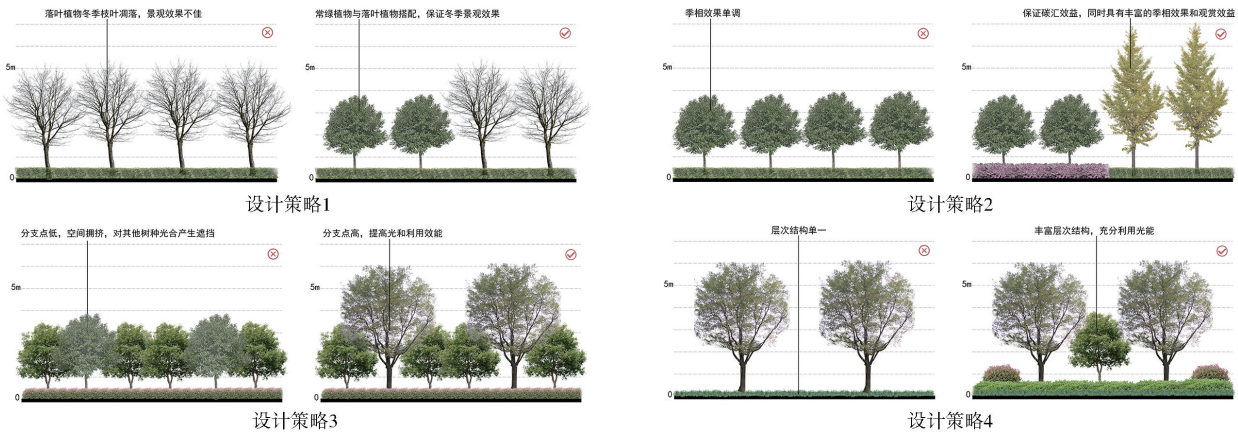


图 10　植物群落立面结构优化设计策略

4 西安城区道路绿化高固碳型植物群落优化配置模式

4.1 道路绿化高固碳型植物配置模式推荐

为兼顾碳汇效益与景观效益，将植物配置模式分为固碳功能主导型、景观功能主导型、景观兼固碳功能 3 种类型。从平面宽度与立面组构上考虑，根据不同道路绿带类型，提取相应的植物配置模式，为道路绿化实际应用中不同绿带类型的植物选种与配置提供参考。景观兼固碳功能植物群落配置模式为桂花+紫叶李+小叶女贞绿篱（2 m）及樱花+桂花+紫叶李+大叶黄杨绿篱+小叶女贞绿篱+细叶麦冬（1.5 m）。中分绿带的宽度在 1.5~8 m，考虑到中分绿带植物需满足防眩晕、分隔车流、形象展示等功能，植物群落层次结构多为乔木—灌木—草本形式。景观兼固碳功能植物群落配置模式为油松+石榴+树状月季+红叶石楠球+小叶女贞绿篱+红叶石楠绿篱+南天竹+金叶苔草配置平（左）立（右）面）等（图 11）。

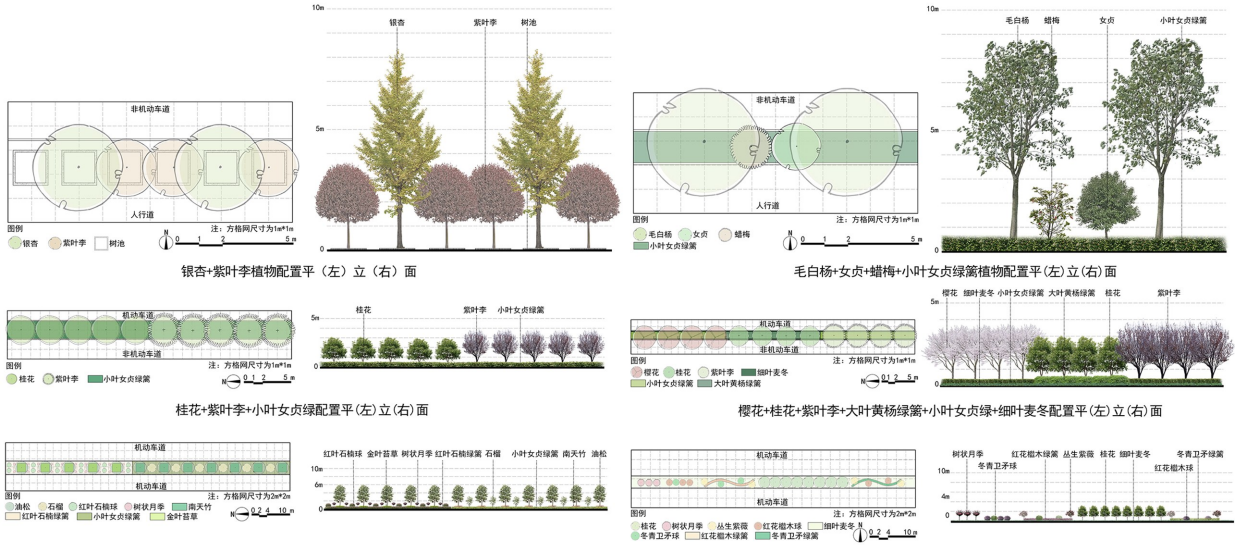


图 11 绿带景观兼固碳功能植物配置模式

4.2 道路绿化高固碳型植物配置模式优化方法

以西市南路为例，因其以交通为主，设计时更多考虑碳汇效益，保留原有树种，增加绿化面积。原有树池篦子离路牙石有 500 mm 宽距离，优化时将这段距离纳入到绿带中，单条绿带从 1.5 m 扩展为 2 m 宽，绿带总宽度为 5 m。对已建成场地，尽可能在优化时保留原有树种，通过增加绿地面积，丰富植物种类和空间层次结构，道路标准段的年固碳量从 628.56 kg 增至 764.24 kg（表 3），增加的灌木丰富了群落层次，但其固碳量远小于乔木，因此固碳量仅增加了 21.58%。优化策略总结为：保留原始高固碳树种；将树池式改造为树带式，保证通行功能情况下，增加绿地面积；不阻碍视线前提下，增加灌木绿篱，丰富空间层次。本优化主要为配置形式上的转变，为树池式绿化形式道路的碳汇效益优化提供参考。

表 3 两条绿带高固碳型植物群落模式优化

优化项目	优化前	优化后
功能类型	交通型	交通型兼高固碳型
特色	树池式、单一种植	树带式、视觉丰富、分隔空间
单条绿带宽度/m	1.5	2
绿化面积/m^2	18	80
树种	行道树绿带：大叶女贞	行道树绿带：大叶女贞+大叶黄杨绿篱
种植形式	行道树绿带：单排种植	行道树绿带：单排种植

表 3（续）

优化项目	优化前	优化后
层次结构	乔木	乔木+灌木
胸径/cm	18	18
群落密度/（株·m^{-2}）	18	18 株
碳汇效益/kg	628.56	764.24

5　结语

本文以道路绿地提升碳汇效益的需求出发，以植物的固碳作用作为研究基础，针对板型未定的未建成道路和板型既定的已建成道路，分别提出道路绿地在形态结构、群落结构、植物配置上的优化策略。首先，以西安城区道路绿地为研究对象，对道路红线宽度、绿带类型、绿带的数量及宽度、植物配置情况进行分析与统计，结果表明，道路绿带宽度和数量变化、道路绿地植物群落特征因子均对提升碳汇效益具有显著影响。其次，对单株植物的碳汇效益及样方内植物群落的碳汇效益进行计算，对影响道路绿化植物碳汇效益的因素进行分析，筛选出高固碳植物群落配置。最后，提出基于碳汇效益的道路绿地形态布局优化策略和群落结构优化策略，针对不同道路绿带类型提出相应的植物配置模式，为城市道路绿化提质增效提供科学依据，助力低碳城市建设。

参考文献

[1]张超，吴群，彭建超，等.城市绿地生态系统服务价值估算及功能评价：以南京市为例[J].生态科学，2019，38(4)：142-149.

[2] GRATANI L，VARONE L，BONITO A. Carbon sequestration of four urban parks in Rome[J].Urban Forestry & Urban Greening，2016，19：184-193.

[3]李春雨，张雨，施鹏，等.不同城市热岛梯度下公园冷岛效应和景观特征的关联机制[J].中国城市林业，2024，22(2)：17-25.

[4]刘泽淼，黄贤金，卢学鹤，等.共享社会经济路径下中国碳中和路径预测[J].地理学报，2022，77(9)：2189-2201.

[5]郭永飞，刘涛，杨雪，等.低碳背景下城市道路绿化的现状分析与建设探讨[J].交通节能与环保，2022，18(5)：35-39.

[6]佟阳，葛汶沁，化剑，等.基于“双碳”目标下城市道路绿地构建途径研究：以西安奥体中心周边配套市政道路绿地设计为例[J].中国园林，2023，39(增刊 2)：94-98.

[7]胡运骅.生态园林理论在上海城市绿化中的应用和成果[J].中国园林，2010，26(3)：32-35.

[8]胡鞍钢.中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J].北京工业大学学报(社会科学版)，2021，21(3)：1-15.

[9]王敏，朱雯.城市绿地影响碳中和的途径与空间特征：以上海市黄浦区为例[J].园林，2021，38(10)：11-18.

[10]王敏，石乔莎.城市高密度地区绿色碳汇效能评价指标体系及实证研究：以上海市黄浦区为例[J].中国园林，2016，32(8)：18-24.

[11]王晶懋，姚盈羽，刘晖，等.应对气候变化的城市公园绿地低碳景观提质增效方法：以西安白马河公园为例[J].中国城市林业，2023，21(2)：35-43.

[12]王晶懋，王一凡，张涛，等.城市街区单元绿地空间格局与植物群落碳汇效益优化研究[J].风景园林，2024，31(06)：37-45.

[13]王晶懋，范李一璇，韩都，等.“双碳”目标下的西安地区绿地植物碳汇矩阵量化与配置模式研究[J].中国园林，2023，39(2)：108-113.

[14]PACALA S W，HURTT G C，BAKER D，et al. Consistent land- and atmosphere-based U.S. carbon sinkestimates[J]. Science，2001，292(5525)：2316-2320.

[15]冯宏.市政道路设计理念和存在问题的解决方法及相关思路[J].运输经理世界，2021(17)：49-51.

[16]周新颖，刘双月.西安市城市道路绿化现状及建设对策探讨[J].陕西林业科技，2013，41(1)：47-49，55.

[17]王晶懋，高洁，孙婷，等.双碳目标导向下的绿色生态空间碳汇能力优化设计[J].中国城市林业，2023，21(4)：33-42.

[18]车生泉.城市绿地调查与低碳植物群落研究：以华东地区为例[M].上海：上海交通大学出版社，2015.