

城市绿地空间碳汇提质增效及减排工具箱构建研究

Research on the Development of a Toolbox for Enhancing Carbon Sequestration and Reducing Emissions in Urban Green Spaces

王晶懋^{1,2*} 王千格¹ 刘 晖^{1,2} 姚盈羽¹ 徐冰洁¹ 钱 磊³ 王雨欣¹
WANG Jingmao^{1,2*} WANG Qiang¹ LIU Hui^{1,2} YAO Yingyu¹ XU Bingjie¹ QIAN Lei³ WANG Yuxin¹

(1. 西安建筑科技大学建筑学院, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学交叉创新研究院, 西安 710055; 3. 西安科技大学艺术学院, 西安 710054)

(1. Department of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi, China, 710055; 2. Cross Innovation Research Institute, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi, China, 710055; 3. College of Art, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi, China, 710054)

文章编号: 1000-0283(2025)07-0004-10
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2025. 07. 0004. 001
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-04-02
修回日期: 2025-05-15

摘 要

城市绿地已经进入存量发展阶段, 如何在城市有限绿地空间条件下实现碳中和, 合理布局低碳绿地空间格局, 科学配置植物群落增加生物多样性, 成为目前城市绿地碳汇效益研究的重点和难点。与此同时, 在快速城市化背景下, 绿地系统的提质增效已成为推动城市绿色转型、实现可持续发展目标的核心战略。创新性地构建包含地形处理、水系规划、建筑小品设计、植物配置、道路组织和空间布局6大要素的低碳设计工具箱, 并针对各要素提出具体的设计策略, 以西咸新区秦汉新城渭河北岸的秦陌花塘为例, 系统探究城市绿地空间的碳汇功能提升与减排路径优化, 进一步提出低维护植物景观设计方法, 协同碳汇生态效益与景观功能效益并实现维护成本最小化, 为城市绿地空间提质增效和高固碳景观设计提供理论依据和实践指导。

关键词

城市绿地空间; 增汇减排; 提质增效工具箱; 低维护; 碳平衡

Abstract

Urban green space has reached the stage of stock development. Achieving carbon neutrality in cities with limited green space has become a focus and challenge in research on the carbon sink benefits of urban green space, particularly through the rational layout of low-carbon green space patterns and the scientific configuration of plant communities to increase biodiversity. Meanwhile, in the context of rapid urbanization, improving the quality and efficiency of the green space system has become a core strategy to promote the green transformation of cities and achieve the goal of sustainable development. This study innovatively constructs a low-carbon design toolbox containing six major elements: terrain treatment, water system planning, architectural vignette design, plant configuration, road organization and spatial layout, and proposes specific design strategies for each component. Taking the Qinmo Flower Pond, located on the north bank of the Weihe River in Qinhan New City, Xixian New District, as an example, this study systematically examines the enhancement of the city's green space carbon sink function and the optimization of emission reduction paths. Further, it proposes a low-maintenance plant It further proposes low-maintenance plants and landscape design methods to synergize the ecological benefits of carbon sinks with the functional benefits of landscape and minimize the maintenance costs, providing theoretical basis and practical guidance for the enhancement of the quality and efficiency of urban green space and the design of high carbon sequestration landscapes.

Keywords

urban green space; increase sink and reduce emission; quality and efficiency improvement toolbox; low maintenance; carbon neutrality

王晶懋

1988年生/女/内蒙古巴彦淖尔人/博士/副教授/研究方向为城乡绿色空间生态设计

王千格

2000年生/女/陕西咸阳人/在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划与设计

刘 晖

1968年生/女/辽宁沈阳人/博士/教授、博士生导师/西北地景研究所所长/研究方向为西北脆弱生态环境景观规划设计理论与方法、中国地景文化历史与理论

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 398004061@qq.com

基金项目:

国家自然科学基金项目“低碳导向的健康舒适室内环境控制理论与方法”(编号: 52394223); 陕西省自然科学基金项目“关中地区城市社区绿地碳汇提质增效与健康公平协同设计方法研究”(编号: 2023-JC-QN-0525); 陕西省自然科学基金项目“儿童友好城市视角下西安城市街区绿地评价方法及空间优化策略研究”(编号: 2024JC-YBQN-0602); 西安建筑科技大学研究生教育综合改革研究与实践项目“风景园林博士专业学位研究生教育五体联动机制建设”(编号: ZHGG202416)

1 城市绿地空间碳汇提质增效及减排的必要性

1.1 城市绿地空间碳汇提质增效及减排的途径

存量背景下绿色空间进入提质增效阶段,但目前处于散点式、碎片化的研究状态,需对城市绿地增效路径进行系统性思考^[1]。而城市绿地作为城市生态系统的重要组成部分,是固碳释氧的关键区域^[2],其CO₂吸收作用对人居环境的改善具有重要意义^[3]。绿地提质增效研究是指在绿地设计和使用中,通过优化绿地空间布局、提升绿地环境质量、增强绿地生态功能,实现城市绿地的高效利用和服务品质提升的相关理论。

目前国内外关于城市绿地提质增效的研究多从空间布局设计、竖向地形设计、道路组织设计、水系设计、建筑小品设计、植物设计这6个方面进行。宁卫杰^[4]在提高内部空间利用效率、贯彻绿色和谐原则的基础上,采用创新设计理念,综合考虑建成后多种功能使用需求。例如,在内部空间规划时思考动静分区,并充分考虑不同功能之间场地互借和交叉覆盖等因素,以实现更加合理高效的内部空间布局。廖连海^[5]提出地形设计与植被之间存在着一种关系,该关系受到地势高差、光照、风力、水分以及天际线等因素的综合影响,从而对植物配置方式产生重要影响。施春燕等^[6]在园林景观设计中,选择建筑小品材料时综合考虑能源消耗指标和使用寿命等因素,以确保选用符合低碳环保理念要求的景观建筑小品材料。胡尚万等^[7]认为在蓄滞洪区的景观设计中,水体位置的确定应充分依据地形的高程变化、坡度走向、坡面朝向以及雨水径流的汇集趋势等多重因素。张昊^[8]根据低碳渗透途径,建议通过植物配置、种植面积比例的合理优化,引入特种树种等途径来实现园林的低碳效应。贾艺

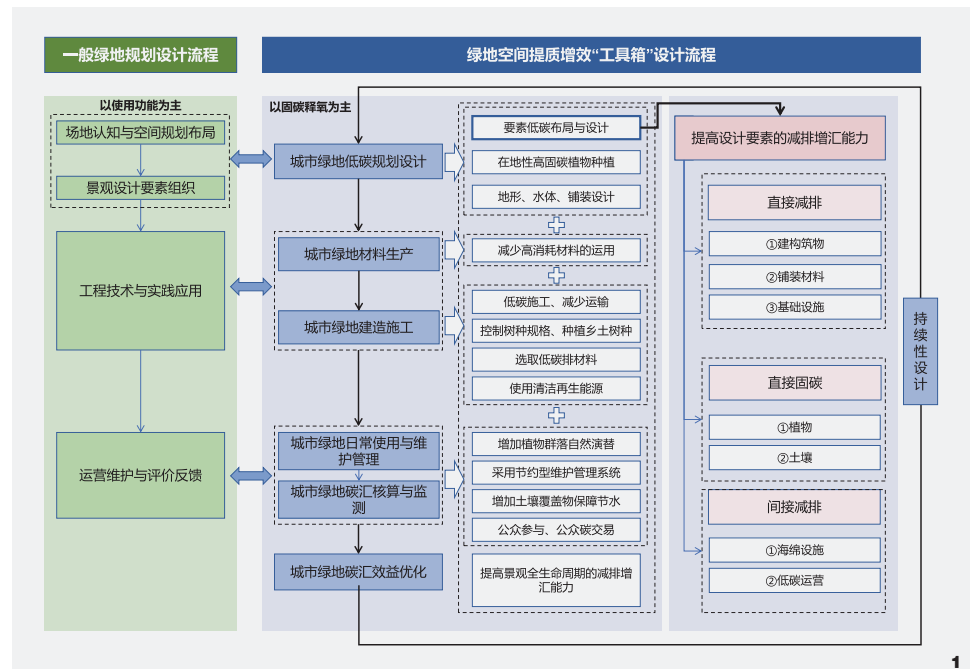


图1 绿地空间提质增效“工具箱”设计流程

Fig. 1 The design process of the “toolbox” for improving the quality and efficiency of green space

璇^[9]表明在道路规划时,应当考虑对雨水进行分级引流和储存。同时,在打造雨水花园的过程中,可以根据地形塑造多样化的水景效果。这不仅有助于解决村庄缺乏水资源的问题,还能够改善当地气候状况。

1.2 城市绿地碳汇存在的问题及工具箱构建的意义

当前绿地空间设计在提质增效方面的研究缺乏明确的量化设计方法。道路组织研究主观性强,仅侧重行人路径设计;地形设计侧重人对围合虚空间的感受及视线感知分析;小品与构筑物设计多强调文化呼应,对结构和材质要求关注不足;植物碳汇效益方面,相关研究多聚焦植物群落设计模式或乡土乔灌木搭配及高固碳种群组合,却未明确其不同绿地间的适用性。设计模式搭配中对植物碳汇考量较少。以位于西咸新区秦汉新城

渭河北岸的生态林地——秦陌花塘为研究对象,构建其提质增效与减排工具箱,提出针对性的绿地碳汇提质增效应用策略,探究城市绿地碳汇提质增效及减排路径(图1)。

1.3 低维护植物景观构建

植物要素是工具箱中重要的组成部分,而低维护植物景观是工具箱中的重要手段。目前植物设计过程中常出现过于追求单一目标功能,无法平衡低成本、低消耗、高景观效果的现象,盲目建设导致“浪费型园林”的现象^[10-11]。传统植物景观依赖频繁修剪与高耗水灌溉,不仅提高了碳排放与运营成本,还加剧了土壤退化与生物多样性丧失^[12-13]。植物景观的低维护设计通过优化植物群落结构与功能,以自然演替替代人工干预,是实现低维护高碳汇的重要方式。同时,基于乡土植物的低维护景观群落可通过减少机械作

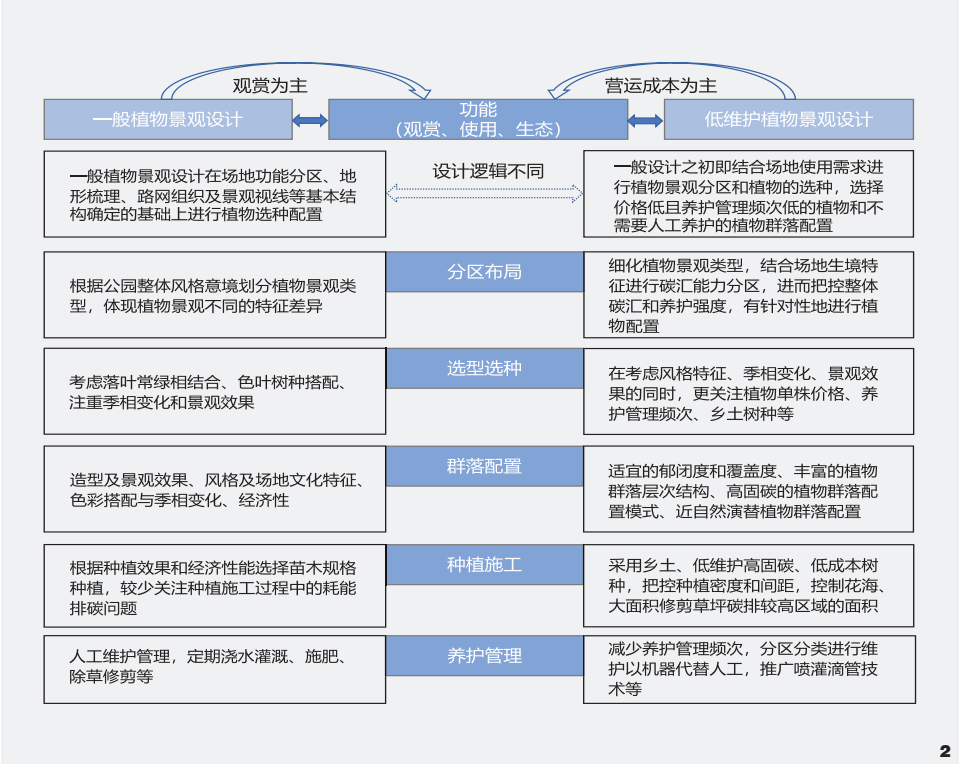


图2 一般植物景观设计与低维护植物景观设计的区别
Fig. 2 The difference between general plant landscape design and low-maintenance plant landscape design

业、化肥施用和灌溉频率，降低绿地全生命周期30% ~ 50%的碳排放^[14]。由此可见，高景观品质与高碳排放的营建模式之间并不存在必然的因果关系。因此，通过科学实施植物景观的低维护，可在实现景观美学价值的同时，显著降低营建与养护成本，从而实现绿地空间的提质增效（图2）。

2 碳汇与碳排放量化方法

碳汇及碳排放计算方法是对景观营建的各个阶段的碳排放和碳汇因素进行汇总，内容包括材料的种类及数量、运输方式、能源消耗、运营维护及植物碳汇等数据清单。通过计算，可以收集景观材料的应用种类及数量、运输方式、能源消耗、运营维护以及植物碳汇、土壤碳汇等多个方面的数据，从而

精准地估算出碳汇量及碳排放。并且基于此进行核算，计算出景观的碳收支平衡年限和应对策略。根据这些计算方法，可以得出景观营建全生命周期的碳排放总量、碳汇量及碳收支平衡年份，计算见公式（1）-（5）^[15]。

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \tag{1}$$

$$S = S_1 + S_2 \tag{2}$$

$$Y = \frac{C_g}{S - C_r} \tag{3}$$

$$C_g = C_1 + C_2 \tag{4}$$

$$C_r = C_3 + C_4 \tag{5}$$

式中，C为景观全生命周期碳排放总量，C₁为景观材料的生产阶段碳排放总量，C₂为景观建造阶段碳排放总量，C₃为景观日常使用碳排放总量，C₄为景观维护阶段碳排放总量，S为景观全生命周期碳汇总量，S₁为景观植物

碳汇总量，S₂为土壤固碳总量，Y为碳收支平衡年数，C_g为年固碳总量，C_r为日固碳总量。

3 碳汇提质增效及减排工具箱要素与设计策略

3.1 秦陌花塘项目概况及现状问题

西咸新区秦汉新城渭河北岸的大秦文明园秦陌花塘，作为“三河一山”绿色廊道关键交汇点，兼具生态与景观等多元价值。鉴于社会发展、生态文明建设及秦汉新城历史传承需求，现需全方位提升秦陌花塘的场地空间。该场地南北长约66 m、东西长约100 m，总面积6.6 hm²。原场地位有条东西向4 m宽铺装道路，将场地地势大致划分为南北两区。北区地势起伏小，南区高差近5 m，北区东部坡度最大3%，西区最大6%。场地南部为秦宫驿站，中部及西部有一处水泵房，东北部有一电力设备房，兼作环卫工人带卫生间的休息室。

基于对场地的分析发现，目前场地存在下凹绿地处雨水易汇集、建筑小品功能单一、缺乏区域特色性等问题。除此之外，场地最主要的问题是植物群落配置结构单一，多以乔一草、乔一灌结构、单一草本结构形式存在，植物种类较少，且物种多样性及丰富度较低，这导致公园整体固碳能力低。此外，大面积种植草坪虽建设初期投入较少，但后期维护管理成本较大（图3）。鉴于项目要求以低维护、低成本方式提升景观品质，故而通过构建提质增效工具箱，以实现成本效益最优与景观效果最佳的目标。

3.2 提质增效工具箱的要素与设计策略

本研究归纳出包含地形、水系、建筑小品、植物、道路组织及空间布局设计的提质增效设计工具箱（表1），从提质、增效及低

维护低碳排三个维度提出城市绿地提质增效策略：(1) 基于场地自然特征与使用需求，通过功能分区精细化与设施配套系统化实现空间高效利用；(2) 采用乡土植物与高固碳植物组合模式，结合汇水区地形差异配置净化植被，增强碳汇与水体净化功能；(3) 推行全生命周期低碳管理，优先选用本地材料与低维护植物，优化施工废弃物循环利用，减少运输与维护能耗(图4)。

3.3 提质增效工具箱中植物景观要素的设计策略

植物设计策略对于工具箱的应用是从保留原生植物、选取高固碳植物种或增加植物群落竖向层次(地被层+结构层+主题层)的角度来达到提升场地植物设计品质的作用，再通过利用每种植物的特性搭配来增加效能。

3.3.1 保留原生植物、增加植物群落竖向层次

本研究保留乡土树种，并补植部分关中传统树种。场地小径两侧以乡土乔木林带和疏林灌丛为主，适当点缀高大乔木与灌木；在人流密集区增植遮阴树种，设计特色花境，形成乔—灌—草复层结构。秦陌花塘特



图3 秦陌花塘植物景观现状问题
Fig. 3 The current situation of the plant landscape of Qinmo Flower Pond

色种植区选用多年生观赏花草，结合季相变化搭配不同色相的地被植物，既降低养护成本与碳排放，又突显地域特色。

3.3.2 高固碳乔+灌+草的选种与配置

在考虑植物的固碳释氧能力时，乔木类总体上具有显著的固碳释氧潜能，其中落叶

表1 绿地提质增效与低碳排6类设计要素工具箱
Tab. 1 Toolbox of six design elements for green space quality improvement, efficiency enhancement, and low-carbon emission

设计要素 Design element	提质 Improve quality	增效 Enhance efficiency	低维护低碳排 Low-maintenance and low-carbon emission
地形设计	高差处理、景观视觉设计、感官体验、土壤容重划分土质区	环境温湿度、绿视率提高、土壤土质涵养	土方平衡、土壤运输
建筑小品设计	便利性、感官舒适度、鉴赏美	能源利用、转化效率	环保材料、运输方式、回收利用
水体设计	灌溉布局、雨水花园、水景观赏	场地水源供给质量、场地水体涵养、降温增湿	防冻、防旱、废水处理、废水排放、管道维护
植物设计	原生植物设计、高固碳乔+灌+草搭配、观赏性和体验感	增加固碳效能、减少碳源排放、降温增湿、调节小气候	灌溉、施肥和病虫害管理需求，植物运输养护
道路设计	路网可达性、人群体验舒适感、观赏性	提升道路廊道连通性、增加排水能力、增强透水率	材料环保、施工运输低碳排、场地材料再利用
空间布局设计	空间可达性、动静分区、围合开敞体验感、汇水分区设计、观赏游憩体验感	结合场地植物、地形、竖向、道路，达到节能固碳、减少碳排	合理营造规划

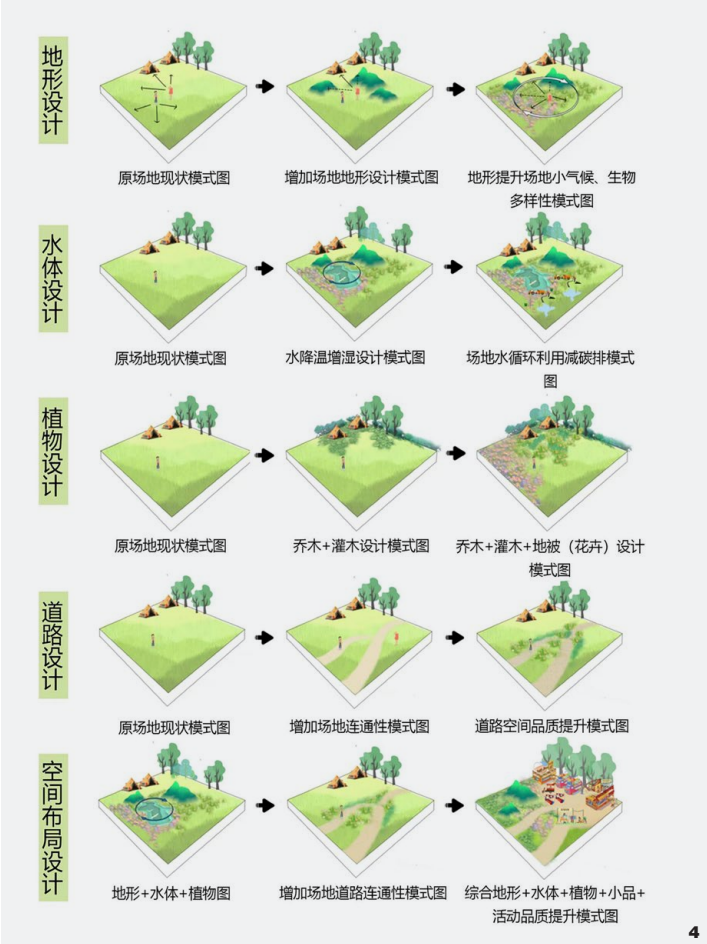


图4 绿地提质增效“工具箱”模式图
Fig. 4 Diagram of the “toolbox” model of green space to improve quality and efficiency

乔木展现出了相较于常绿乔木更高的固碳效率，且树种间固碳效益差异明显。因此，在场地植树时，应优先筛选植物种类，依据场地功能需求与植物固碳能力，选择适宜的季相树种。

由表2、表3可知，既为高固碳树种且适宜本地种植的乡土植物有广玉兰、栾树、垂柳。灌木中红叶石楠的固碳能力强，地被层优先保留高固碳场地原生植物，如皱叶酸模 (*Rumex crispus*)、艾蒿 (*Artemisia argyi*)、芦苇 (*Phragmites australis*) 等，再补植主题层。

3.3.3 高固碳乔+灌+草设计模式

本研究总结出适合本场地三种类型植物搭配设计，为场地设计应用提供策略。(1) 堤顶路植物样方搭配设计模式：常绿+落叶+地被层。(2) 生态林植物样方搭配设计模式：常绿+落叶。(3) 地被草甸

表2 关中乔木固碳效益分析
Tab. 2 Analysis of carbon sequestration benefits of woody plants in Guanzhong Region

常绿/落叶 Evergreen/ Defoliation	树种名称 The name of the tree species	拉丁学名 Latin name	年固碳量/kg Annual carbon sequestration
常绿乔木	广玉兰	<i>Magnolia grandiflora</i>	4.0
	紫叶李	<i>Prunus cerasifera</i>	4.4
	大叶女贞	<i>Ligustrum compactum</i>	3.6
	棕榈	<i>Trachycarpus fortunei</i>	15.8
	雪松	<i>Cedrus deodara</i>	10.7
	火棘	<i>Pyracantha fortuneana</i>	5.8
	桂花	<i>Osmanthus fragrans</i>	2.5
	臭椿	<i>Ailanthus altissima</i>	19.3
	侧柏	<i>Platycladus orientalis</i>	2.6
	白皮松	<i>Pinus bungeana</i>	1.6
落叶乔木	栾树	<i>Koelreuteria paniculata</i>	8.5
	黄栌	<i>Cotinus coggygria</i>	4.8
	蒙古栎	<i>Quercus mongolica</i>	8.8
	国槐	<i>Styphnolobium japonicum</i>	22.4
	垂柳	<i>Salix babylonica</i>	9.0
	紫薇	<i>Lagerstroemia indica</i>	2.8
	樱花	<i>Prunus serrulata</i>	3.1
	银杏	<i>Ginkgo biloba</i>	2.2
	杨树	<i>Populus</i>	11.9
	五角枫	<i>Acer pictum</i>	13.3
	无花果	<i>Ficus carica</i>	11.2
	石榴	<i>Punica granatum</i>	5.0
	山杏	<i>Prunus sibirica</i>	4.4
	山桃	<i>Prunus davidiana</i>	4.8
	七叶树	<i>Aesculus chinensis</i>	11.0

表3 调研场地乔木树种分析
Tab. 3 Analysis of the tree species of the research site

类型 Type	常绿乔木 Evergreen tree	落叶乔木 Deciduous tree
高固碳树种	广玉兰、棕榈、臭椿	国槐、无花果、杨树、五角枫、七叶树
中固碳树种	大叶女贞、雪松、火棘	栾树、蒙古栎、垂柳、石榴
低固碳树种	紫叶李、桂花、侧柏、白皮松	黄栌、紫薇、山杏、山桃、樱花、银杏

植物样方搭配设计模式分为两类，混播组合一为菊科+豆科+堇菜科+禾本科；混播组合二为菊科+豆科+蓼科+禾本科。

秦陌花塘市集应用较多的休闲空地，同时离堤顶路绿道较近，

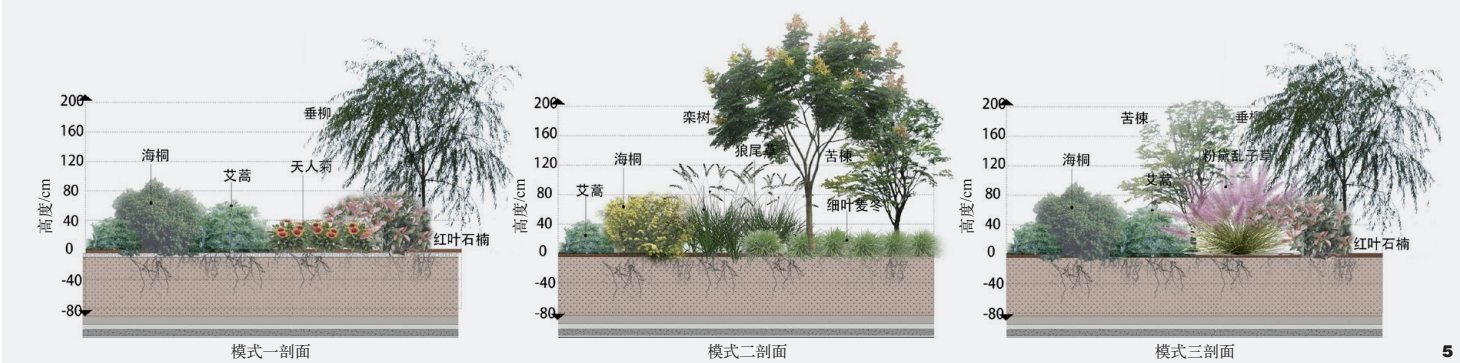


图5 堤顶路植物搭配模式图
Fig. 5 Levee crown road plant mix pattern diagram

交通较为便利，因此将堤顶路植物样方设计作为参考模式（图5，表4）。生态林植物样方在针叶树的基础上增加观花树（图6，表5）。以耐践踏为主的地被草甸样方（图7，表6）多用自生群落植物，加上观赏花卉点缀，为服务游客观赏。

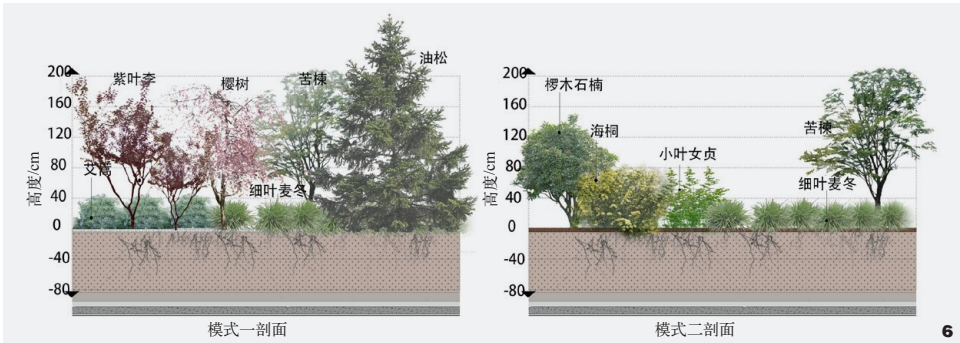


图6 生态林植物搭配模式图
Fig. 6 Ecological forest plant mix pattern diagram

表4 堤顶路植物样方搭配设计模式
Tab. 4 Levee crown road plant quadrat collocation design pattern

类型 Type	组合形式 Combined form	特点 Pecularity	适用条件 Conditions apply
模式一	常绿: 海桐 (<i>Pittosporum tobira</i>) / 红叶石楠 (<i>Photinia×fraseri</i> Dres) 落叶: 垂柳/樱树/栾树 地被层: 兰花鼠尾草 (<i>Salvia farinacea</i>) + 天人菊 (<i>Gaillardia pulchella</i>)		
模式二	常绿: 小叶黄杨 (<i>Buxus sinica</i>) / 黄刺玫 (<i>Rosa xanthina</i>) 落叶: 栾树/苦楝 (<i>Melia azedarach</i>) 地被层: 狼尾草 (<i>Pennisetum alo-pecuroides</i>) + 艾蒿 + 细叶麦冬 (<i>Ophiopogon japonicus</i>)	以落叶树为主的列植行道树，采用品字形种植方式，并在阔叶树的基础上增加观花树种和常绿灌木	在关中地区，对于城市建成区及河道堤顶路的行道树种植，建议采用交替种植的方式。每隔5 m间植
模式三	常绿: 海桐/红叶石楠 落叶: 苦楝/垂柳 地被层: 艾蒿 + 粉黛乱子草 (<i>Muhlenbergia capillaris</i>)		

表5 生态林植物样方搭配设计模式
Tab. 5 Ecological forest plant quadrat collocation design pattern

类型 Type	组合形式 Combined form	特点 Pecularity	适用条件 Conditions apply
模式一	常绿: 油松 (<i>Pinus tabulaeformis</i>) 落叶: 紫叶李、苦楝、樱树		
模式二	常绿: 小叶女贞 (<i>Ligustrum quihoui</i>)、黄刺玫、栾木石楠 (<i>Photinia davidsoniae</i>) 落叶: 栾树、苦楝	以常绿针叶树为主的阵列林带，造林密度依树种选择而定，在针叶树的基础上增加观花树，景观效果较好	西北地区河道、农田防护林等具有防护需求的林带

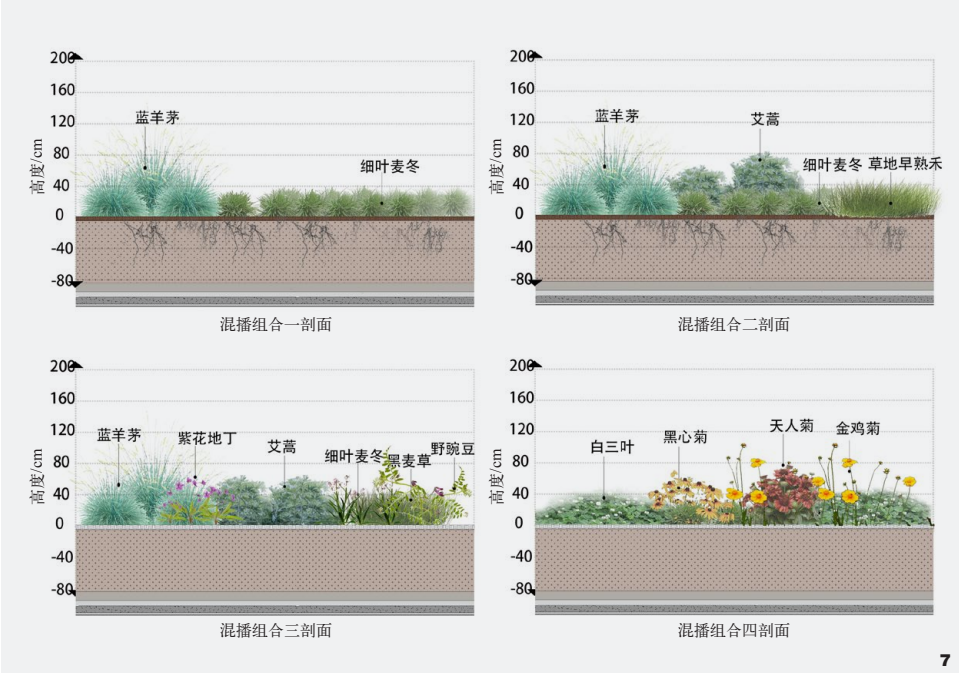


图7 地被草甸植物搭配模式图
Fig. 7 Ground cover meadow plant mix pattern diagram

秦陌花塘植物设计方案综合考虑植物的色相和季相变化，提出植物搭配模式（表7），构建“地被层”和“结构层”，同时以观花观叶地被的季相变化作为“主题层”设计依据。场地原生境以紫花为主，故秦陌花塘以紫、蓝色系花卉为核心，点缀白色系，呼应秦汉文化崇尚的“青、白”色调，强化景观与文化关联（图8，图9）。

3.4 提质增效工具箱中其他景观要素的设计策略

由于场地存在高差且地处渭河北岸，植物种植设计需要兼顾多重功能，不仅要在降雨时满足场地生境需求并服务客群，必要时还需着重应对百年一遇的渭河水泄洪。因此在场地汇水区，依据坡度差异制定了相应的植物配置方案以实现水体净化。于坡度

较缓的汇水区，靠近缓坡处选用根系深、耐水湿与耐践踏的二月兰、白三叶等植物，可满足60%的沉积和过滤要求。中间区域零星栽植茶条槭 (*Acer ginnala*)、枫杨 (*Pterocarya stanoptera*) 等小乔木，搭配二月兰、玉簪 (*Hosta plantaginea*) 等地被植物，实现30%的沉积和过滤作用。坡顶最后一层种植芦苇、香蒲 (*Typha orientalis*) 等耐水湿或喜阳开花植物，实现10%的沉积和过滤。针对坡度较陡 (>20%) 的区域，因雨水流速快、杂质多，紧邻陡坡处选用高羊茅 (*Festuca elata*)、细叶麦冬等植物，可达到20%的沉积和过滤的效果。其后区域种植芦苇、香蒲等湿生植物，达成45%的沉积和过滤。再通过艾蒿、狼尾草等植物实现25%的沉积和过滤。距离车道最近一层种植大花滨菊、矮花滨菊 (*Leucanthemum vulgare*) 等喜阳植物，实现10%的沉积和过滤，有效净化水体防范水患（图10）。

本研究构建的低碳设计工具箱虽基于温带半干湿气候区构建，但其方法论框架设计要素具有跨气候区域的适应性，需结合地域特征进行针对性优化：如在南方湿润地区，选用樟树 (*Cinnamomum camphora*)、楠木 (*Phoebe zhennan*) 等高固碳常绿树种，并强化雨水花园等海绵设施以应对内涝；北方寒冷地区则

表6 地被草甸植物样方搭配设计模式
Tab. 6 Ground cover meadow plant quadrat collocation design pattern

类型 Type	组合形式 Combined form	适用条件 Conditions apply
混播组合一	细叶麦冬+蓝羊茅 (<i>Festuca glauca</i>)	具备出色的耐践踏特性，不仅美观，更兼具保持水土与稳固土壤的双重功能
混播组合二	艾蒿+蓝羊茅+细叶麦冬+草地早熟禾 (<i>Poa pratensis</i>)	运动型草坪具备出色的耐践踏特性，同时拥有保持水土的重要功能
混播组合三	艾蒿+紫花地丁 (<i>Viola philippica</i>) +野豌豆 (<i>Vicia sepium</i>) +黑麦草 (<i>Lolium perenne</i>) +蓝羊茅	观赏性较高且能保持水土的混播草坪
混播组合四	天人菊 (<i>Gaillardia pulchella</i>) +金鸡菊 (<i>Coreopsis basalis</i>) +黑心菊 (<i>Rudbeckia hirta</i>) +白三叶 (<i>Trifolium repens</i>)	四季可观的高水土保持及高景观需求植物混播

表7 加入主题色相植物样方搭配设计模式
Tab. 7 Add theme color plant quadrat matching design pattern

类型 Type	组合形式 Combined form	适用条件 Conditions apply
混播组合一	观赏秦陌花塘 (紫色+白色) : 大花滨菊 (<i>Leucanthemum maximum</i>) + 鼠尾草 (<i>Salvia japonica</i>) 观赏草甸: 紫穗狼尾草 (<i>Pennisetum orientale</i>) + 粉黛乱子草 + 细叶芒 (<i>Miscanthus sinensis</i>)	混播、单一播种
混播组合二	观赏草甸: 细叶麦冬 + 紫花地丁 + 野豌豆 灌木层: 火棘 + 金叶女贞 (<i>Ligustrum×vicaryi</i>) + 红叶石楠	混播、单一播种
混播组合三	观赏草集群 (粉色) : 紫穗狼尾草 + 芦苇 + 细叶芒 + 粉黛乱子草 观赏花境 (紫色) : 金鸡菊、大滨菊、矢车菊 (<i>Centaurea cyanus</i>)、木春菊 (<i>Argyranthemum frutescens</i>)、鼠尾草、马鞭草 (<i>Verbena officinalis</i>)、金鱼草 (<i>Antirrhinum majus</i>)、常夏石竹 (<i>Dianthus plumarius</i>)、毛地黄 (<i>Digitalis purpurea</i>)、大花飞燕草 (<i>Consolida ajacis</i>)、大花葱 (<i>Allium giganteum</i>)、阿拉伯婆婆纳 (<i>Veronica persica</i>)、蓝蓟 (<i>Echium vulgare</i>)、常绿萱草 (<i>Hemerocallis fulva</i>)、著草 (<i>Achillea millefolium</i>)、紫色鸢尾 (<i>Iris tectorum</i>)	混播、单一播种
混播组合四	花草集群 (紫色+蓝色) : 常夏石竹、天人菊、松果菊 (<i>Echinacea purpurea</i>)、矢车菊、蓝蓟 观赏草集群: 小兔子狼尾草 (<i>Pennisetum alopecuroides</i>)、白茅 (<i>Imperata cylindrica</i>) 自生植被集群: 现状植被 (松果菊、天人菊、艾蒿、野豌豆、紫花地丁等) 灌木集群: 龙柏 (<i>Sabina chinensis</i>)、火棘	混播、栽植
疏林草地区	乔木: 垂柳、苦楝、元宝枫 (<i>Acer truncatum</i>)、榆树 (<i>Ulmus pumila</i>)、栎树 灌木层: 金叶女贞、红叶石楠、紫叶小檗 (<i>Berberis thunbergii</i>)	栽植、单一播种
林下缀花草地区	观赏花境 (紫色) : 细叶芒、松果菊、金鸡菊、矢车菊、马鞭草、大花飞燕草、金鱼草、毛地黄、苔草 (<i>Carex tristachya</i>) 五角枫 + 二月兰 (<i>Orychophragmus violaceus</i>) + 紫花地丁 + 葱兰 (<i>Zephyranthes candida</i>)	单一播、混播

采用白桦 (*Betula platyphylla*)、云杉 (*Picea asperata*) 等耐寒物种，并利用微地形防风以降低维护能耗。地形、空间等策略具有普适性，但需结合区域碳排放因子调整量化模型。

4 城市绿地空间提质增效与减排效益量化分析

4.1 全生命周期碳排碳汇量化分析

通过对秦陌花塘碳汇碳排进行计算得出场地碳排总量共为 473 539.58 kg，年碳储量约为 36 081.13 kg (表 8，表 9)，碳排放主要来自建植施工阶段和养护管理阶段，其中建植施工阶段的碳排放主要源自铺装材料的生产，而养护管理阶段的碳排放则主要来源于场地灌溉。数据可知景观全生命周期中，整体呈现为“碳排”，需 33 年左右 (2057 年) 的植物固碳与低维护管理可形成碳收支平衡。

4.2 全生命周期成本投入分析

秦陌花塘场地成本投入优化如下：主

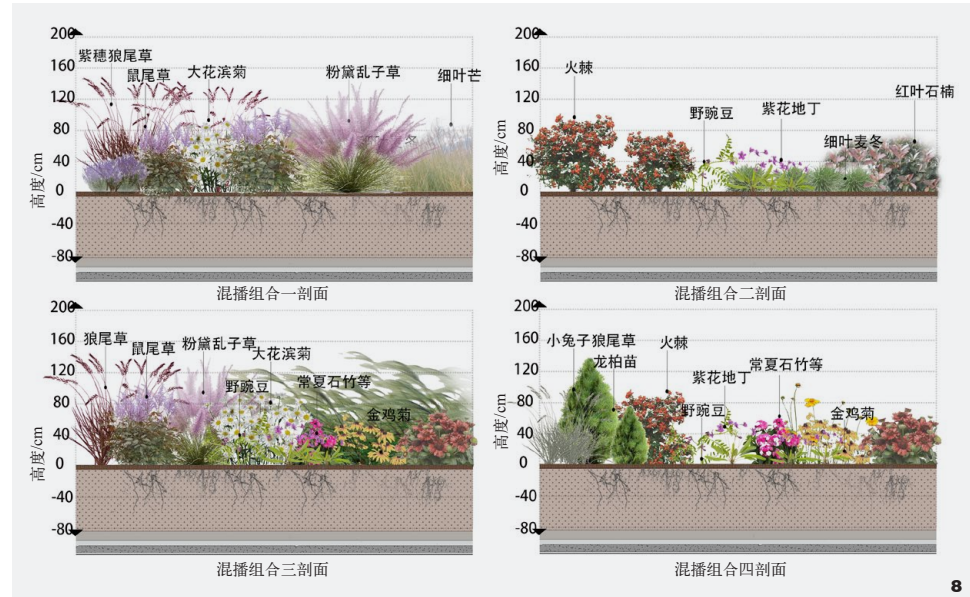
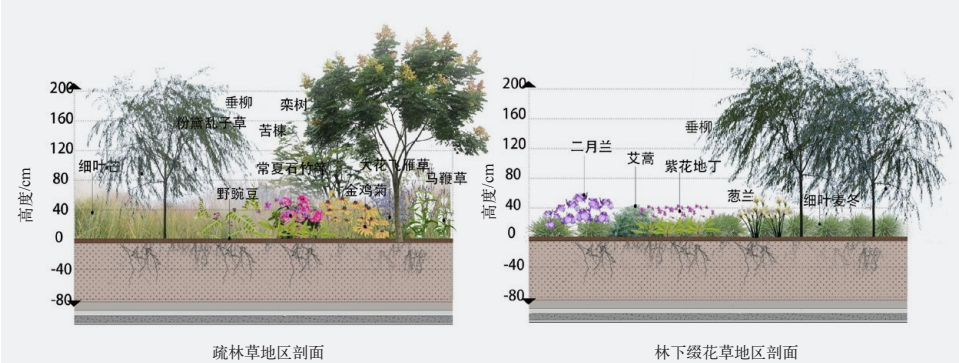


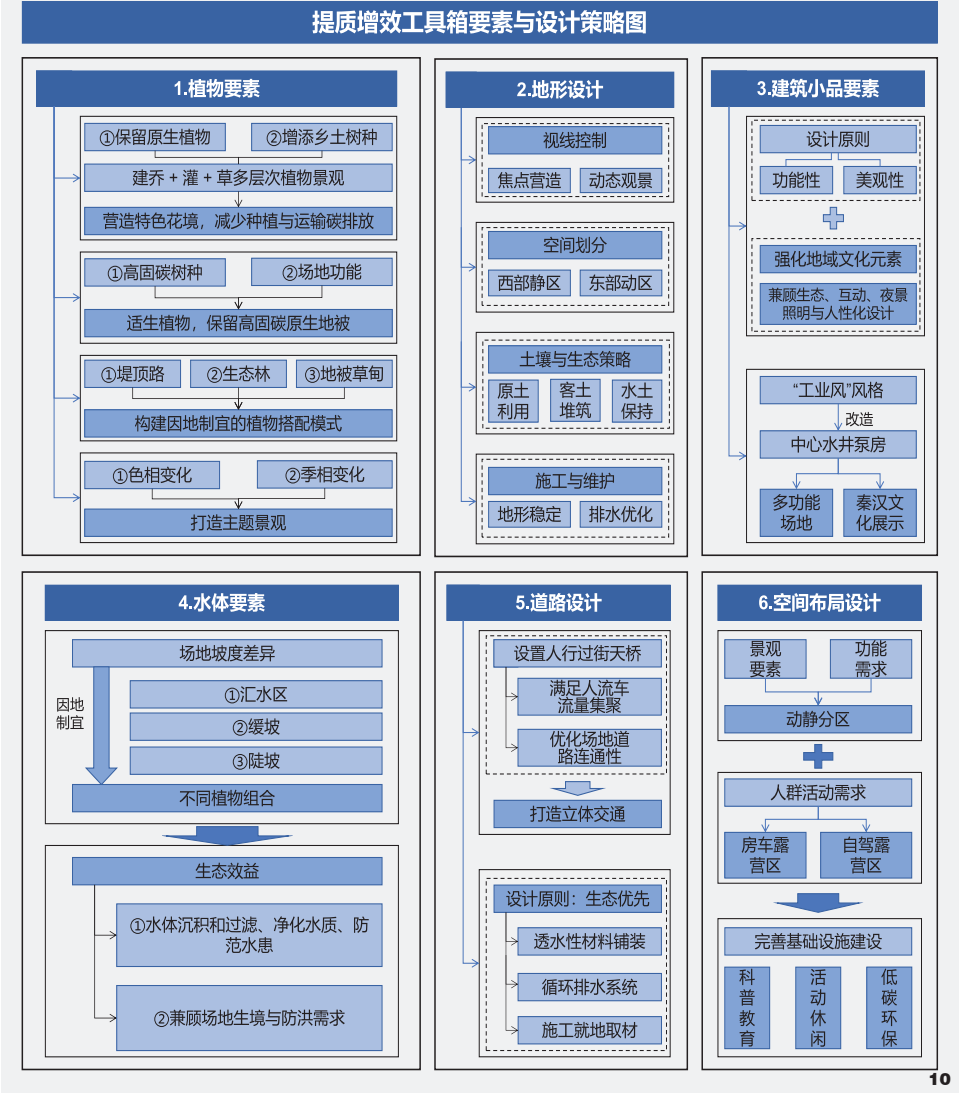
图8 混播组合植物搭配模式图
Fig. 8 Pattern diagram of plant mixes and combinations

园路铺装材料由混凝土砖更换为青砖，次园路由砂石浮铺改为碎石铺路，降低碳排与成本；保留塑木和不锈钢草施隔离带，因其已属低碳低成本材料。照明设施方面，将草坪

灯升级为太阳能款，虽采购成本增加，但可减少养护阶段电能消耗及碳排放，太阳能月球灯则维持原状。喷灌设施根据分区配置不同规格喷头，确保系统覆盖园区 90% 区域。



9



10

图9 疏林草地、林下缀花植物搭配模式图
Fig. 9 Sparse forest grassland, under forest floral plant collocation pattern
图10 提质增效工具箱要素与设计策略图
Fig. 10 Quality and efficiency toolbox elements and design strategy diagram

实现养护阶段零人工补充灌溉。优化后的成本投入见表10。

5 结论

在城市发展进程中，绿地提质增效不仅是生态所需，更是经济、社会实现可持续发展的关键之举。首先，本研究创新性地构建了包含地形处理、水系规划、建筑小品设计、植物配置、道路组织和空间布局6大维度的低碳设计工具箱，并针对各要素提出了具体的设计策略。其次，以西咸新区秦汉新城渭河北岸的秦陌花塘为实证案例，系统探究城市绿地空间的碳汇功能提升与减排路径优化。最后，进一步提出低维护植物景观设计方法，协同碳汇生态效益与景观功能效益并实现维护成本最小化。基于本研究，可依据低碳设计工具箱对城市绿地建设与提质增效提出相应依据与实践指导，推动城市绿地建设向低碳、高效、可持续方向发展。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] 赵彩君, 刘晓明. 城市绿地系统对于低碳城市的作用[J]. 中国园林, 2010(06): 23-26.
- [2] 王敏, 宋昊洋. 影响碳中和的城市绿地空间特征与精细化管理实施框架[J]. 风景园林, 2022, 29(05): 17-23.
- [3] 王晶慧, 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(02): 108-113.
- [4] 宁卫杰. 郑州新型公共阅读空间建设探索[J]. 合作经济与科技, 2023(23): 178-180.
- [5] 廖连海. 平坦地区地形设计的研究与应用——以河南省驻马店市小清河项目为例[J]. 福建建筑, 2023(07): 6-10.
- [6] 施春燕, 钟杭娣, 毛永成. 乡村振兴背景下乡镇庭院景观设计研究——以杭州市浦阳镇美丽庭院景观设计为例[J]. 居业, 2024(01): 91-93.
- [7] 胡尚万, 吴威. 基于韧性城市理念下的蓄滞洪区景观设计策略[J]. 山西建筑, 2024, 50(06): 37-40.
- [8] 张昊. 基于景观三元论的青岛市综合公园低碳景观设计方法研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.

表8 秦陌花塘碳排放计算
Tab. 8 Carbon emission calculation of Qinmo Flower Pond

种类 Class	材料 Material	数量 Quantity	碳排因子 Carbon emission factor	碳排量/ (kg/年) Carbon emission	总碳排量/ (kg/年) Total carbon
铺装	砂石	2 739.9 m ²	136.3 kg/m ²	373 448.37	384 975.98
	不锈钢草施隔离带	3 390.1 m	0.4 kg/m ²	1 356.04	
	PC仿石砖路面	269.16 m ²	10.02 kg/m ²	2 696.98	
	塑木铺装路面	619.27 m ²	12.07 kg/m ²	7 474.59	
植物	落叶乔木	336棵	—	4 200.00	4 200
小品	座椅	30个	75 kg/个	2 250.00	21 076.07
	垃圾桶	27个	488.81 kg/个	13 197.87	
	太阳能草坪灯	80个	2.74 kg/个	219.20	
	监控	20个	270.45 kg/个	5 409.00	
养护管理	灌溉	—	2~3次/月	34 563.83	63 286.53
	修剪	—	2次/月	17 397.00	
	施肥	—	2次/年 每次施肥设备耗油量为20 L	9 840.60	
	施农药	—	6次/年 每公顷施农药3.5 kg	1 446.14	
	透水铺装维护	—	1次/年	38.96	

表9 秦陌花塘碳储量计算
Tab. 9 Calculation of carbon storage in Qinmo Flower Pond

序号 Serial number	种类 Class	数量 Quantity	平均碳储量 Average carbon stock	碳储量/ (kg/年) Carbon storage	总碳储量/ (kg/年) Total carbon stock
1	落叶乔木	336株	11.16 kg/株	3 749.76	36 081.13
2	地被草本	40 719.61 m ²	0.794 kg/m ²	32 331.37	

表10 秦陌花塘优化后的成本投入
Tab. 10 The optimized cost input of Qinmo Flower Pond

施工阶段成本投入/元 Cost input in the construction stage of construction		养护管理阶段成本投入/（元/年） Cost input in the maintenance management stage		
秦陌花塘项目	铺装材料	867 635.30	灌溉	105 434.00
	照明设施	107 078.00	修剪	54 434.00
	喷灌设施	5 984.00	农药喷洒	8 114.25
	植物建植	471 795.32	照明	—
	总计	1 452 492.62	总计	167 982.25

[9] 贾艺璇. 安康市旬阳县湛家湾传统村落景观提升策略研究[J]. 城市建筑, 2021, 18(14): 63-65.

[10] 田丽萍, 沈玉玲, 曲付国. 提高我国城市园林绿化管理水平的途径浅析[J]. 中国科技纵横, 2010(17): 145-145.

[11] 董丽, 王向荣. 低干预·低消耗·低维护·低排放——低成本风景园林的设计策略研究[J]. 中国园林, 2013, 29(05): 61-65.

[12] DUNNETT N, CLAYDEN A. Rain Gardens: Sustainable Rainwater Management for the Garden and Designed Landscape[M]. Portland: Timber Press, 2007.

[13] GUI Z, WEN J, FU L, et al. Analysis on Mode and Benefit of Resource Utilization of Rural Sewage in a Typical Chinese City[J]. Water, 2023, 15(11): 2062.

[14] COLL C L. The Impact of Maintenance on Colour in Naturalistic Plantings[D]. Norway: Norwegian University of Life Sciences, 2024.

[15] 王晶懋, 齐佳乐, 韩都, 等. 基于全生命周期的城市小尺度绿地碳平衡[J]. 风景园林, 2022, 29(12): 100-105.