



海绵城市绿地系统碳减排效益分析—— 以乌鲁木齐市 3 种典型绿地系统为例

陈菊香^{1,✉}, 孟诗², 孙亮³, 热依娜·阿斯哈尔², 李国荣²

1. 新疆大学建筑工程学院, 乌鲁木齐 830000; 2. 新疆大学商学院, 乌鲁木齐 830000; 3. 乌鲁木齐市城市综合交通项目研究中心, 乌鲁木齐 830000

摘 要 城市绿地是海绵城市建设的主要内容之一, 在碳减排行动中发挥着重要作用。为量化海绵城市绿地系统的碳排放以及碳汇, 提升碳减排效益, 以 IPCC 指南、同化量法、叶面积模型为依据, 采用全生命周期法从城市绿地建设以及景观要素层面构建海绵城市绿地系统碳减排核算模型, 并以乌鲁木齐市 3 种典型绿地系统为例进行碳排放核算并分析碳减排效果。结果表明: 道路绿地、公园绿地和街旁绿地在全生命周期内碳汇量分别是碳排放量的 10.36、15.26 和 11.68 倍, 碳汇量远高于碳排放量; 碳汇组成中植物碳汇量相较于雨水利用以及径流削减产生的碳汇占比高达 95% 以上。城市绿地系统碳汇的优化从植物群落的树种组成以及层次结构两方面进行比较, 发现采用高固碳植物配置以及乔-灌-草复合层次结构可以使绿地碳汇量平均增加 12.8%~26.3%, 碳减排效益显著。

关键词 海绵城市; 绿地系统; 碳减排效益; 植物配置模式; 优化设计

温室气体的增加影响全球气候变化, 实现从高碳城市模式向低碳城市模式转变可以克服碳排放给全世界环境带来的严峻挑战^[1-2]。海绵城市践行了低碳城市发展理念, 在改善城市雨洪问题、缓解城市水资源缺乏、降低城市热岛效应、优化城市生态环境等方面, 能够直接或者间接减少能源消耗, 在城市碳减排行动中发挥着十分积极的作用^[3]。

目前国内外学者针对海绵城市的碳减排核算多侧重于单个^[4-6]或多个低影响开发设施^[7-11], 个别研究是针对区域尺度内的碳减排效益^[12-16], 缺乏针对海绵城市不同碳减排途径的系统性核算, 特别是海绵城市绿地系统的碳减排核算研究。城市绿地作为人为创造的生态环境, 具有有效滞留地表径流、调节城市气候、固碳释氧、降低碳排放等作用, 但是其作为海绵城市建设的重要内容, 是唯一具有直接增汇、间接减排的要素^[17], 同时根据国家统计局数据显示, 2022 中国城市建成区绿化覆盖率达 40% 以上, 在海绵城市的建设中占较大比重, 因此建立城市绿地系统碳减排的核算体系对于减少海绵城市的碳排放量、实现城市的碳中和具有重要意义。当前已有部分关于城市绿地的碳减排研究, 但关注于宏观层面城市森林碳汇能力、微观层面小部分树种的碳汇能力研究^[18-21]以及小尺度绿地碳平衡^[22-23], 缺乏系统性的针对中尺度不同绿地建设项目全生命周期内碳减排的核算体系。

鉴于此, 本研究选取乌鲁木齐市海绵城市绿化项目为研究范畴, 以 3 种典型绿地系统为研究对象, 从微观层面结合的角度建立碳排放和碳汇核算模型, 找出碳减排可优化的途径, 为海绵城市的碳减排研究奠定基础。

1 海绵城市绿地系统碳排放核算体系

1.1 核算边界

海绵城市绿地系统的碳减排核算, 应该考虑碳排放和碳汇(图 1)。碳排放包含材料生产、材料运输、建造施工、日常使用和日常维护 5 个阶段, 碳汇主要来自绿地固碳、雨水利用以及径流削减^[14]。

收稿日期: 2023-10-24; 录用日期: 2023-12-25

基金项目: 新疆乌鲁木齐市建设局资助项目 (2022042706)

第一作者: 陈菊香 (1978—), 女, 博士, 教授, chenju1816@126.com; ✉通信作者

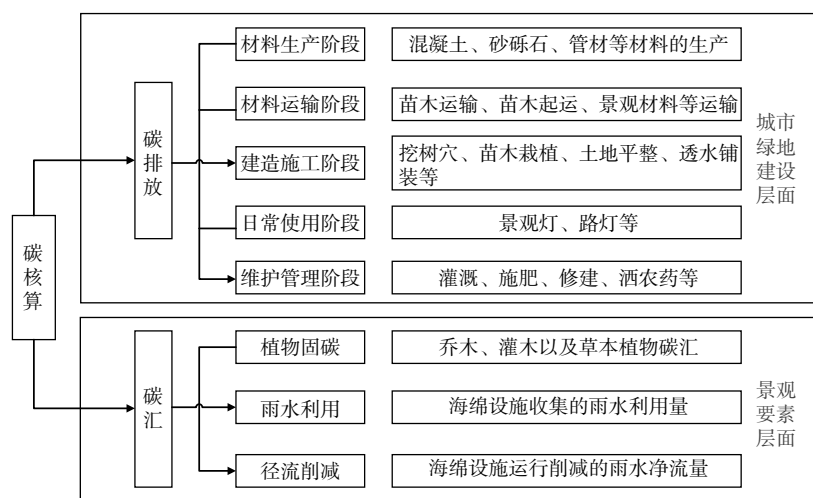


图 1 海绵城市绿地系统碳排放核算边界及内容示意图

Fig. 1 Schematic diagram of carbon emission accounting boundary and content of green space system in sponge cities

1.2 核算方法与数据来源

碳排放核算框架基于 IPCC 会发布的《IPCC 国家温室气体清单指南》(2019 修订版)，该指南的碳排放因子法是目前碳减排相关研究的主要依据，通过对城市绿地系统全生命周期不同阶段的碳源进行分析，同时辅以文献研究结果，从而确定不同过程的碳排放因子，最终对海绵城市绿地系统的碳排放情况进行求解。

植物碳汇核算采用叶面积-光合速率法，涉及的单株植物的单位叶面积日碳汇量采用其他学者根据同化量法计算得出的平均数据，不同树种的叶面积量采用树木叶面积回归模型进行估算^[24]，如式 (1) 所示。

$$Y = \exp(0.6031 + 0.2375H + 0.6906D - 0.0123S_1) + 0.1824 \quad (1)$$

式中：Y 为叶面积总量，m²；H 为树冠高度，m；D 为树冠直径，m； $S_1 = \pi D(H+D)/2$ 。

单株植物单位叶面积日碳汇量：单株植物单位叶面积日碳汇量的数据选用经同化量法测定的园林树木的单位叶面积固碳速率^[26-35]。如计算时缺少对应的树种数据，则选用同科属或相似树种进行替换。

2 核算模型构建

2.1 核算思路

绿地的碳排放为总碳排放量减去总碳汇量见式 (2)，碳排放核算模型见式 (3)，碳汇核算模型见式 (4)。

$$CE = CE_{\text{co}_2} - C_s \quad (2)$$

式中：CE 为净碳排放量，kg； CE_{co_2} 为全生命周期的碳排放，kg； C_s 为碳汇量，kg。

$$CE_{\text{co}_2} = E_m + E_y + E_j + E_s + E_p \quad (3)$$

式中： E_m 、 E_y 、 E_j 、 E_s 、 E_p 分别为材料生产、运输、建造施工、日常使用、维护管理阶段产生的碳排放量，单位 kg。

$$C_s = C_{sz} + C_{sy} + C_{sj} \quad (4)$$

式中： C_{sz} 代表绿地植物固碳碳汇，kg； C_{sy} 代表雨水利用产生的间接碳汇，kg； C_{sj} 代表径流削减产生的间接碳汇，kg。

2.2 碳排放核算

1) 材料生产阶段

主要涉及景观建筑材料生产、加工和装配过程产生的碳排放，见式 (5)。

$$E_m = \sum M_m \times EF_m \quad (5)$$

式中： M_m 表示建材的使用量，kg， EF_m 表示建材生产的碳排放因子，kg·kg⁻¹。

2) 材料运输阶段

主要包含景观中的各种植物和建造材料运输过程的碳排放, 见式 (6)。

$$E_y = \sum F_y \times B_y \times L_y \times EF_y \quad (6)$$

式中: F_y 表示运输机械的油耗, $L \cdot km^{-1}$; B_y 表示运输工作量, 次; L_y 表示表示材料从产地运输到施工现场的距离, km ; EF_y 表示运输机械对应的碳排放因子, $kg \cdot L^{-1}$ 。

3) 建造施工阶段

本阶段主要包括挖树穴、苗木栽植、土地平整等用到的机械设备产生的碳排放, 见式 (7)。

$$E_j = \sum X_j \times N_j \times EF_j \quad (7)$$

式中: X_j 表示使用机械设备的总工作量, 台班; N_j 表示机械设备的台班能耗, $L \cdot 台班^{-1}$; EF_j 表示施工机械设备的碳排放因子, $kg \cdot L^{-1}$ 。

4) 日常使用阶段

主要来自照明设备产生的能耗对应的碳排放, 见式 (8)。

$$E_s = \sum P_s \times T_s \times N \times EF_s \quad (8)$$

式中: P_s 表示设备的功率, kW ; T_s 表示设备的使用时长, h ; N 表示设备使用的个数; EF_s 表示能耗的碳排放因子, $kg \cdot (kW \cdot h)^{-1}$ 。

5) 维护管理阶段

维护管理阶段的碳排放主要来自于植物的养护和管理, 主要是日常植物生长过程的修剪、灌溉、土壤施肥和打药等方面产生的能耗, 见式 (9)。

$$E_p = \sum Q_p \times EF_p \quad (9)$$

式中: Q_p 表示材料设备的消耗量, L ; EF_p 表示材料的碳排放因子, $kg \cdot L^{-1}$ 。

2.3 碳汇核算

本研究主要对城市绿地系统的绿地固碳碳汇、雨水利用和径流削减进行碳汇分析。

1) 绿地固碳碳汇。通过对乔木、灌木及草本植物的碳汇能力进行研究, 可以得到绿地固碳的碳汇, 见式 (10)。

$$C_{sz} = \sum A_i \times C_i \quad (10)$$

式中: C_{sz} 是绿地植物的年碳汇量, $kg \cdot a^{-1}$; A_i 表示第 i 种植物的单株叶面积, m^2 ; C_i 表示第 i 种植物单位叶面积碳汇量, $g \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ 。

2) 雨水利用碳汇。来源于海绵设施所吸收的雨雪水产生的碳汇, 见式 (11)。

$$C_{sy} = \sum Q_y \times (EF_y - \beta) \quad (11)$$

式中: C_{sy} 是雨水利用产生的碳汇, $kg \cdot a^{-1}$; Q_y 为海绵设施雨水资源利用量, $m^3 \cdot a^{-1}$; EF_y 为自来水的碳排放因子, $kg \cdot m^{-3}$; β 为海绵设施处理和再分配单位雨水的碳排放因子, $kg \cdot m^{-3}$ 。

3) 径流削减碳汇。径流削减碳汇主要为海绵设施运行以后, 雨水径流量相应减少, 因此减小市政管网的运行负荷而减少碳排放, 相当于是将等量雨水排放产生的碳排放量与减少的径流量进行换算, 见式 (12)。

$$C_{sj} = \sum M_j \times EF_j \quad (12)$$

式中: C_{sj} 是径流量削减产生的碳汇, $kg \cdot a^{-1}$; M_j 为海绵设施削减的径流量, $m^3 \cdot a^{-1}$; EF_j 为城市雨水管网排放相应雨水所对应的碳排放因子, $kg \cdot m^{-3}$ 。

3 案例分析

根据《海绵城市建设技术指南》、《海绵城市建设评价标准》(GBT51345-2018) 等, 明确城市绿地是建设海绵城市的重要场地, 在城市绿地专项规划中包括公园绿地、附属绿地及防护绿地等。乌鲁木齐市

2021—2023 年海绵城市绿地建设项目共计 35 项，主要涉及道路绿地、公园绿地以及街旁绿地，属于城市绿地建设中的典型绿地类型。本研究选用乌鲁木齐市河马泉新区道路绿地、公园绿地以及街旁绿地 3 种典型绿地系统进行研究，建设内容主要为园路、场地以及绿地，其中下沉绿地低于园路和场地 10 cm。降水经绿地径流、人行道径流或者园路径流最终汇入下沉绿地中。研究区年平均降雨量 169.6 mm，根据《乌鲁木齐市中心城区海绵城市专项规划 (2016—2020 年) 》的规划目标，乌鲁木齐市海绵城市建设指标为：年径流控制率 90%，设计降雨量 15.66 mm，雨水资源利用率≥10%，案例项目概况见表 1。

3.1 碳排放核算

1) 材料生产阶段的碳排放。此阶段所涉及的建材主要为混凝土、砂、砾石、石材、管材等，碳排放量见表 2。

表 2 材料生产阶段的碳排放量

Table 2 Carbon emissions at the material production stage

建筑材料	碳排放因子	道路绿地		公园绿地		街旁绿地	
		数量	碳排放量/kg	数量	碳排放量/kg	数量	碳排放量/kg
石材	39.89 kg·m ⁻³	0.00 m ³	0.00	541.80 m ³	21 612.40	103.68 m ³	4 135.80
砂	2.80 kg·t ⁻¹	3 801.48 t	10 628.93	2 302.65 t	6 438.21	555.52 t	1 553.23
砾石	2.00 kg·t ⁻¹	15 205.91 t	30 411.81	9 210.60 t	18 421.20	2 222.07 t	4 444.14
管材	3.60 kg·kg ⁻¹	17 181.85 kg	61 854.66	92 515.20 kg	333 054.72	52 354.80 kg	188 477.28
混凝土	295.00 kg·m ⁻³	288.60 m ³	85 137.00	1 444.80 m ³	426 216.00	270.12 m ³	79 685.40
混凝土砖	336.00 kg·m ⁻³	1 843.14 m ³	619 295.04	35.16 m ³	11 813.76	23.16 m ³	7 781.76

2) 材料运输阶段的碳排放。从植物运输和建筑材料运输两方面进行核算。①植物运输产生的碳排放。本研究中植物平均运输距离 80 km，运输乔木和灌木的卡车油耗分别设置为 0.4 L·km⁻¹ 和 0.34 L·km⁻¹，另外，乔木胸径在 10 cm 左右，装卸车过程中使用汽车式起重机的平均油耗为 0.23 L·km⁻¹，运输车在返程过程中存在空车情况，空车油耗按照满载时的 2/3 计算，碳排放因子为 2.73 kg·L⁻¹[25]，计算结果见表 3。

②建筑材料运输产生的碳排放。本项目建设中主要涉及滴灌管、石材、砂、砾石、混凝土、种植土的运输，运送石材的卡车油耗为 0.4 L·km⁻¹，其余材料运输按 0.34 L·km⁻¹ 计算[25]。滴灌管运输距离为 80 km，种植土运输距离 8 km，其余运输距离按 50 km 计，碳排放因子为 2.73 kg·L⁻¹，计算结果见表 3。

3) 建造施工阶段碳排放。本阶段的碳排放来自机械设备，如大挖掘机、小挖掘机、推土机、起重机、振动碾，各机械台班柴油能耗分别为 63.0、33.7、41.0、63.5、42.0 L·台班⁻¹，碳排放因子为 2.73 kg·L⁻¹[25]，计算结果见表 4。

4) 日常使用阶段的碳排放。本项目在日常使用过程中的碳排放主要来自照明设备，采用中国区域电网西北地区的碳排放因子 0.667 1 kg·KW⁻¹ 进行核算。冬季和夏季照明时间不同，按平均照明时

表 1 案例项目概况

Table 1 Overview of case projects

绿地类型	用地面积/m ²	绿化面积/m ²	综合雨量径流系数
道路绿地	50 551	19 832	0.606
公园绿地	95 156	77 096	0.276
街旁绿地	49 810	43 629	0.24

表 3 材料运输阶段的碳排放量

Table 3 Carbon emissions at the material transport stage

名称	道路绿地 碳排放量/kg	公园绿地 碳排放量/kg	街旁绿地 碳排放量/kg
乔木运输	13 686.40	103 521.60	26 208.00
灌木运输	247.52	261 009.84	60 147.36
草本植物运输	16 212.56	13 242.32	9 777.04
大乔木装车 and 卸车	17 581.20	155 719.20	30 139.20
滴灌管	123.76	742.56	371.28
石材	0.00	1 643.46	314.50
砂	9 823.45	5 937.00	1 432.31
碎石	39 216.45	23 748.00	5 729.24
混凝土	1 160.25	5 587.76	1 044.69
混凝土砖	7 193.55	135.98	89.57
种植土	21 113.46	98 141.68	34 652.80

注：碳排放因子为2.73 kg·L⁻¹。

间 10 h 计算，道路绿地主要为道路照明灯，公园绿地和景观绿地主要为景观灯照明，经核算，道路绿地、公园绿地、街旁绿地的年碳排放量分别为 175 679.12、10 129.25、4 480.24 kg·a⁻¹。

5) 维护管理阶段的碳排放。维护管理阶段的碳排放主要来自于绿地的养护和管理，如植物的修剪、灌溉、施肥和杀虫等方面，计算结果见表 5。

3.2 碳汇核算

1) 绿地固碳碳汇。根据式 (10) 可以计算得到不同植物的年碳汇量，道路绿地总碳汇量为 2 235 037.82 kg，公园绿地为 1 375 977.59 kg，街旁绿地为 551 083.25 kg，具体见表 6。

2) 雨水利用碳汇。雨水利用的碳排放包含两部分，其一为雨水处理和再分配的碳排放，另一部分为雨水回用抵消的碳排放，碳汇量为雨水回用抵消量减去雨水处理和再分配的碳排放量。本研究道路绿地、公园绿地、街旁绿地三个绿地系统的雨水利用量分别为 3 768.08、7 917.9、3 733.12 m³·a⁻¹，供应自来水的碳排放因子为 1.07 kg·m⁻³，处理和再分配单位雨水的碳排放因子为 0.18 kg·m⁻³[14]，道路绿地、公园绿地、街旁绿地的雨水利用年碳汇

表 4 建造施工阶段的碳排放量

Table 4 Summary of case projects

名称	道路绿地 碳排放量/kg	公园绿地 碳排放量/kg	街旁绿地 碳排放量/kg
挖掘机大	20 638.80	123 832.80	51 597.00
挖掘机小	18 400.20	110 401.20	46 000.50
推土机	16 789.50	67 158.00	22 386.00
起重机	34 671.00	34 671.00	34 671.00
振动碾	8 954.40	27 518.40	13 759.20

注：碳排放因子为2.73 kg·L⁻¹。

表 5 维护管理阶段的碳排放量

Table 5 Carbon emissions during the construction phase

项目	碳排放 因子	道路绿地碳 排放量/ (kg·a ⁻¹)	公园绿地碳 排放量/ (kg·a ⁻¹)	街旁绿地碳 排放量/ (kg·a ⁻¹)
机械修建	0.89 kg·KW ⁻¹	192.24	2 050.56	1 281.60
灌溉用水	0.168 kg·L ⁻¹	3.28	12.63	7.15
施肥	260.28 kg·t ⁻¹	5 161.87	14 341.43	9 186.35
杀虫剂	7.73 kg·L ⁻¹	551.61	2 144.36	1 213.50

表 6 3 种典型绿地系统植物碳汇量

Table 6 Plant carbon sinks in three typical green space systems

绿地类型	序号	名称	单位	数量	单位叶面积日碳汇量/ (g·(m ² ·d) ⁻¹) ^[26-35]	总碳汇量/(kg·a ⁻¹)
道路绿地	1	大叶白蜡	株	1 400	20.03	89 079.49
	2	中接白榆球	株	123	25.44	2 720.10
	3	重瓣榆叶梅	株	104 112	26.36	1 554 365.8
	4	密枝红叶李	株	146 048	3.24	245 659.80
	5	紫穗槐	株	36 504	17.34	343 212.64
公园绿地	1	榆树	株	21	11.03	1 030.37
	2	樟子松	株	58	4.20	487.41
	3	青海云杉	株	33	6.96	316.90
	4	红榆	株	345	39.12	28 203.16
	5	大叶榆	株	129	9.44	2 548.77
	6	大叶白蜡	株	1 827	20.03	84 727.12
	7	山桃	株	777	13.00	16 185.82
	8	直立苹果	株	516	17.18	21 706.47
	9	沙枣	株	36	9.06	700.58
	10	红叶海棠	株	1 717	9.07	36 056.25
	11	丝棉木	株	622	11.03	10 886.96
	12	高接金叶榆	株	355	14.81	9 195.09

续表 6

绿地类型	序号	名称	单位	数量	单位叶面积日碳汇量/ ($\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$) ^[26-35]	总碳汇量/($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)
公园绿地	13	夏橡	株	368	11.03	6 378.74
	14	皂角	株	155	29.90	8 107.33
	15	梓树	株	1 147	32.03	60 615.66
	16	暴马丁香	株	391	46.15	26 233.87
	17	冬红海棠	株	506	10.46	7 999.96
	18	绚丽海棠	株	978	10.71	15 831.93
	19	紫叶稠李	株	342	11.73	6 365.97
	20	高接重瓣榆叶梅	株	338	26.36	17 771.65
	21	紫丁香球	株	203	4.96	839.31
	22	蓝叶忍冬球	株	179	7.65	1 141.45
	23	香茶藨子球	株	276	23.22	5 340.99
	24	南紫丁香球	株	134	4.96	577.76
	25	重瓣榆叶梅球	株	128	26.36	2 812.53
	26	四季丁香	株	20 127	4.96	51 826.78
	27	红瑞木	株	13 144	5.337 6	41 234.41
	28	忍冬	株	14 625	33.49	254 275.48
	29	密枝红叶李篱	株	31 239	3.24	50 316.52
	30	地接金叶榆篱	株	24 005	14.81	176 694.32
	31	锦鸡儿丛植	株	3 780	2.72	5 679.72
	32	紫穗槐	株	10 640	17.34	95 782.06
	33	四季玫瑰	株	19 092	15.81	150 055.45
	34	丛生火炬	株	4 576	9.49	25 523.40
	35	水蜡篱	株	26 320	9.82	128 482.43
	36	天山祥云	株	246	9.12	1 015.67
	37	红宝石萱草	m^2	414	7.69	573.06
	38	黄菖蒲	m^2	249	18.47	827.83
	39	松果菊	m^2	240	7.77	335.66
	40	金鸡菊	m^2	605	7.77	846.15
	41	假龙头	m^2	790	10.26	1 458.97
	42	德国鸢尾	m^2	203	13.43	490.73
	43	天人菊	m^2	129	7.77	180.42
	44	芍药	m^2	712	9.62	1 232.90
	45	八宝景天	m^2	368	12.64	837.27
	46	百脉根	m^2	8 797	10.26	16 246.30
街旁绿地	1	长枝榆	株	84	11.03	1 978.55
	2	大叶白蜡	株	178	20.03	6 657.07
	3	大叶榆	株	221	9.44	4 125.92
	4	小叶白蜡	株	195	16.61	7 157.49

续表 6						
绿地类型	序号	名称	单位	数量	单位叶面积日碳汇量/ (g·(m ² ·d) ⁻¹) ^[26-35]	总碳汇量/(kg·a ⁻¹)
街旁绿地	5	疣枝桦	株	105	11.03	2 809.49
	6	夏橡	株	8	11.03	184.39
	7	黄金树	株	69	9.851	1 502.06
	8	复叶槭	株	123	19.46	5 289.38
	9	红叶海棠	株	337	9.07	4 769.19
	10	山桃	株	236	13.00	4 378.37
	11	高接金叶榆	株	147	14.81	3 396.07
	12	直立苹果	株	37	17.18	1 052.71
	13	独杆火炬	株	107	9.49	1 507.72
	14	紫叶稠李	株	176	11.73	2 917.21
	15	大果沙枣	株	140	9.06	2 438.70
	16	茶条槭	株	214	19.46	6 183.39
	17	暴马丁香	株	140	46.15	8 352.13
	18	山杏	株	26	8.41	283.23
	19	樟子松	株	112	4.20	795.94
	20	青海云杉	株	28	6.96	268.89
	21	造型榆	株	7	11.03	138.45
	22	金叶榆球	株	6	14.81	87.12
	23	紫枝玫瑰	株	3 900	15.81	64 346.93
	24	紫穗槐	株	10 872	17.34	196 738.73
	25	紫丁香球	株	33	4.96	170.82
	26	重瓣榆叶梅	株	8 645	26.36	123 561.77
	27	密枝红叶李	株	3 040	3.24	5 340.63
	28	红瑞木	株	3 760	5.34	12 090.47
	29	东北连翘	株	47	6.53	166.41
	30	低接金叶榆	株	3 600	14.81	28 902.05
	31	丛生火炬	株	4 960	9.12	24 527.33
	32	金鸡菊	m ²	191	7.77	267.13
	33	福禄考	m ²	55	10.26	101.57
	34	德国鸢尾	m ²	230	13.43	556.00
	35	波斯菊	m ²	138	7.77	193.01
	36	野花组合	m ²	1 420	9.96	2 545.78
	37	百脉根	m ²	13 700	10.26	25 301.16

量分别为 3 353.59、7 046.93、3 322.48 kg·a⁻¹。

3) 径流削减碳汇。径流削减碳汇来源于海绵设施在运行期间削减的雨水净流量产生的碳汇，本研究年径流总量控制率为 90%，区域经海绵城市建设后下游雨水泵站强排流量减少，水泵扬程取 10 m，水泵效率为 80%，单位运行能耗为 0.034 kW·h·m⁻³，经计算，道路绿地、公园绿地、街旁绿地系统的径流削减所产生的碳汇分别为 262.35、493.84、258.50 kg·a⁻¹。

根据以上计算,道路绿地碳汇中的绿地固碳碳汇、雨水利用碳汇、径流削减碳汇所占比例为 99.84%、0.15% 和 0.01%,公园绿地比例为 99.45%、0.51% 和 0.04%,街旁绿地比例为 99.35%、0.60% 和 0.05%。

4 结果与讨论

4.1 不同绿地碳排放量

上文对乌鲁木齐市 3 种城市绿地系统各个阶段的碳排放量进行了计算,由于材料生产、运输和建造施工阶段的碳排放只发生在项目的建设期,而日常使用阶段和维护管理阶段每一年都会产生新的碳排放,所以取 30 年年限进行碳排放密度的计算,图 2 为各个阶段的碳排放密度排序。

1) 道路绿地: 每个阶段产生的碳排放为材料生产 $15.97 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 材料运输 $2.50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 建造施工 $1.97 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 日常使用 $104.26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 维护管理 $3.51 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 比较各阶段碳排放量,发现日常使用阶段较高。由于道路绿地照明设施的需求高于其他绿地且硬化面积比例高,所以在日常使用和材料生产阶段产生的碳排放较多。

2) 公园绿地: 每个阶段产生的碳排放为材料生产 $8.59 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 材料运输 $7.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 建造施工 $3.82 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 日常使用 $3.19 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 维护管理 $5.85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 材料生产和运输阶段碳排放较高。公园绿地为提升景观游园品质,所需的景观工程材料较多,为打造绿色宜居环境,植物种植的数量更丰富,因此在材料生产和运输中会产生更高的能耗和碳排放。

3) 街旁绿地: 每个阶段产生的碳排放为材料生产 $5.74 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 材料运输 $3.41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 建造施工 $3.38 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 日常使用 $2.70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 维护管理 $7.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 维护管理阶段和材料生产阶段产生较多的碳排放。因为街旁绿地具有一定的景观效果,但是主导功能和绿地面积等方面不如公园绿地,其草本植物数量较多,所以在维护管理和材料生产阶段会产生更多的碳排放。

4.2 不同绿地碳汇量

经过核算,道路绿地全生命周期(以 30 年计)的碳排放量和碳汇量分别为 6 480 783.43、67 159 612.84 kg,公园绿地全生命周期的碳排放量和碳汇量分别为 2 710 913.63、41 362 960.99 kg,街旁绿地全生命周期的碳排放量和碳汇量分别为 1 109 462.61、12 959 230.30 kg,折算到每平方米碳排放量如图 3,可以看出无论是道路绿地、公园绿地还是街旁绿地,碳汇量都大于碳排放量,这是由于材料生产、运输和施工只在建设期间产生碳排放,建设完成以后日常使用和维护管理产生少量碳排放,而碳汇每年都在产生。从“3.2 碳汇核算”结果可知,碳汇组成中绿地碳汇量相较于雨水利用以及径流削减产生的碳汇占较大比例,因此,在碳减排措施重点考虑绿色植物碳汇部分。

4.3 碳汇优化途径

城市绿地系统中单株植物和植物群落的碳汇能力对碳汇效益有着重要的影响,为了提高碳汇效益,本研究试图构建多样性乔灌木草层植物群落,以达到海绵城市碳减排目标。

1) 植被现状

根据乌鲁木齐市 3 种典型城市绿地系统数据,道路绿地、公园绿地及街旁绿地涉及植物种类分别为 5、46 和 37 种。根据不同绿地系统树种及植物占比,可得到植物应用频度如表 7。

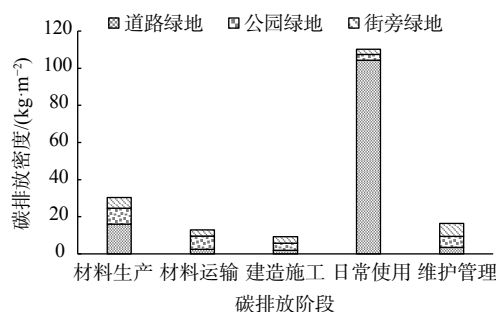


图2 城市绿地系统碳排放密度对比图

Fig. 2 Comparison of carbon emission density of urban green space systems

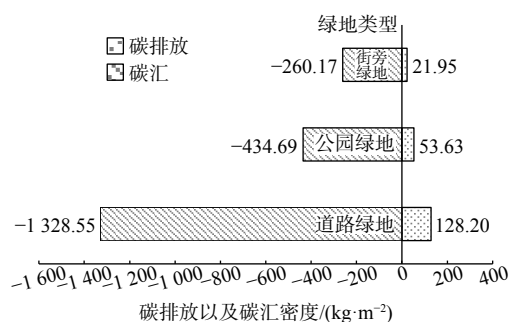


图3 城市绿地系统全生命周期内碳排放和碳汇量对比图

Fig. 3 Comparison of carbon emissions and sinks over the full life cycle of urban green space systems

表 7 植物应用频度统计表
Table 7 Frequency statistics of plant applications

频度/%	乔木	灌木	草本植物
m≥8	大叶白蜡、红叶海棠、梓树、绚丽海棠、 大叶榆和山桃	密枝红叶李、重瓣榆叶梅、紫穗槐、水蜡、 低接金叶榆、四季丁香、四季玫瑰、忍冬、 丛生火炬、紫枝玫瑰、红瑞木	百脉根
8>m≥3	丝棉木、直立苹果、冬红海棠、暴马丁香、 夏橡、高接金叶榆、红榆、紫叶稠李、重瓣 榆叶梅、茶条槭、小叶白蜡、紫叶稠李、大 果沙枣、复叶槭、樟子松、独杆火炬、疣枝 桦、长枝榆	红瑞木、紫穗槐、密枝红叶李	假龙头、芍药、金鸡菊、红宝 石萱草、野花组合
3>m≥0	皂角、沙枣、青海云杉、黄金树、青海云 杉、山杏、金叶榆球	白榆球、锦鸡儿、香茶藨子球、天山祥云、 紫丁香球、蓝叶忍冬球、南紫丁香球、 重瓣榆叶梅球、东北连翘	八宝景天、黄菖蒲、松果菊、 德国鸢尾、天人菊、 波斯菊、福禄考

2) 树种碳汇效益

根据项目数据，公园绿地碳汇效益较高的乔木树种有暴马丁香、红榆、梓树、皂角、高接重瓣榆叶梅、大叶白蜡等，灌木树种有忍冬、重瓣榆叶梅、香茶藨子、紫穗槐、四季玫瑰、金叶榆球等，街旁绿地碳汇效益较高的乔木树种有暴马丁香、大叶白蜡、复叶槭、茶条槭、直立苹果、小叶白蜡、高接金叶榆等，灌木树种有紫枝玫瑰、密枝红叶李、丛生火炬、低接金叶榆等，见图 4。

3) 不同类型绿地植物群落配置优化

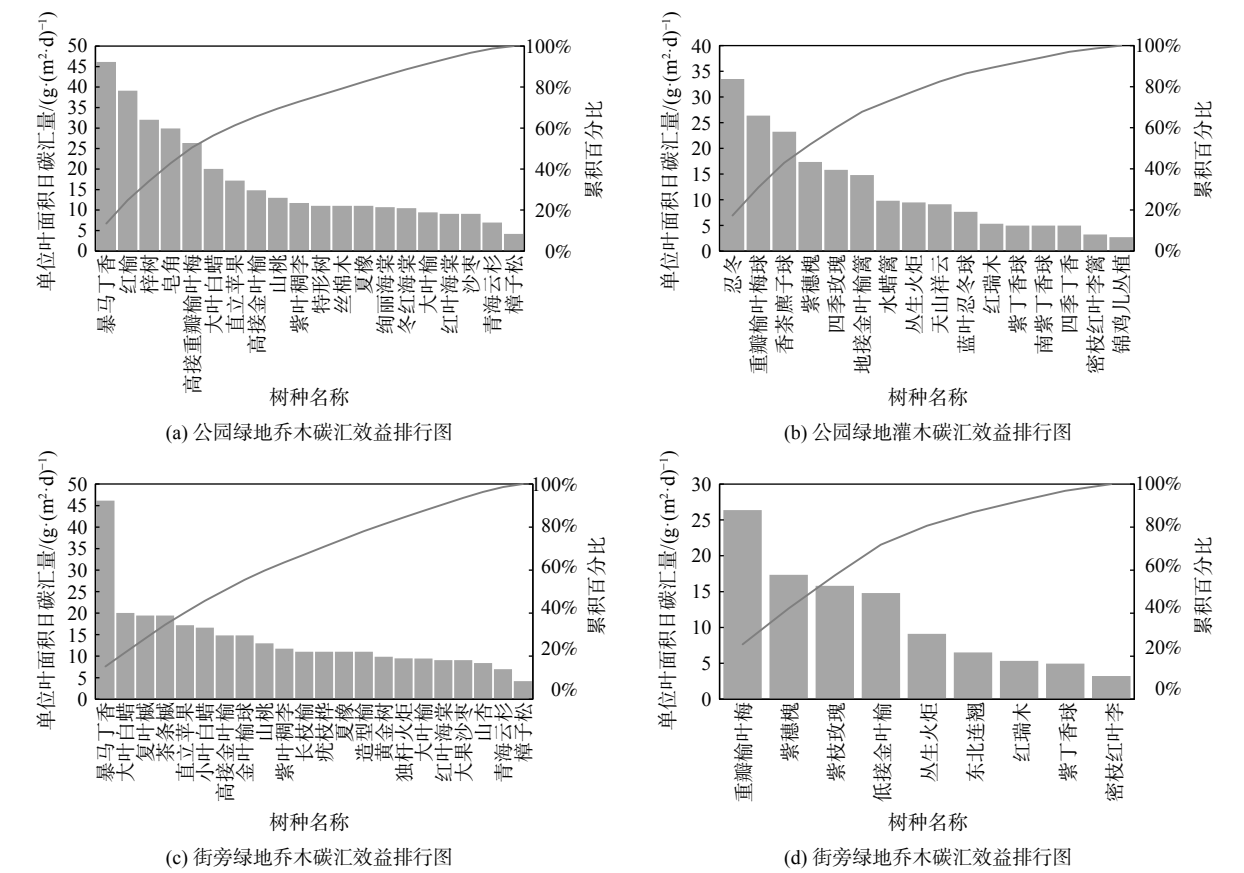


图 4 不同绿地类型植物碳汇效益排行图
Fig. 4 Ranking of plant carbon sink benefits of different green space types

针对乌鲁木齐地区三种绿地类型，通过改变树种组成，将碳汇较低的树种替换为高碳汇树种以及丰富植物群落层次来提高植物群落的碳汇。

①道路绿地。道路绿地的物种多样性比较低，丰富度不足，一般情况下，植物群落的碳汇效益复层结构大于单层结构，为了提高道路绿地的碳汇量，应适当增加物种，丰富植物结构层次。根据前文，选择应用频度较高的植物配置进行优化前后的碳汇量分析，优化前道路绿地的碳汇量为 3.12 kg·m⁻²，通过改进树种组成，将碳汇量低的密枝红叶李替换为忍冬，增加乔木圆冠榆；或者增加层次结构，以乔-灌-草复层结构来提升整体碳汇。优化后碳汇分别增加了 9.2% 和 16.3%，见表 8。

表 8 道路绿地高碳汇植物群落模式优化
Table 8 Optimization of high carbon sink plant community patterns in road green space

群落结构		配置模式	碳汇量/(kg·m ⁻²)	碳增汇率/%
优化前	乔木	大叶白蜡-密枝红叶李	3.12	—
	乔灌	大叶白蜡+圆冠榆-忍冬	3.41	9.2
优化后	乔灌草	大叶白蜡+圆冠榆-重瓣榆叶梅+紫穗槐+忍冬-德国鸢尾	3.63	16.3

②公园绿地。公园是人们休闲娱乐的场所，考虑到其承担着景观营造以及游憩场所的作用，公园绿地使用的植物种类更为丰富，但是场地的碳汇量还满足不了高碳汇需求，因此需要将使用频度比较高的低碳汇树种替换为高碳汇树种，把苹果树替换为暴马丁香，同时增加植物层次结构，由单层结构增加为乔-灌、乔-草双层结构或者乔-灌-草复层结构，优化前样地碳汇量为 2.88 kg·m⁻²，优化后乔草结构碳汇量增加 13.5%，乔灌结构碳汇量增加 21.2%，乔灌草结构碳汇量增加 26.7%，见表 9。

表 9 公园绿地高碳汇植物群落模式优化
Table 9 Optimization of high carbon sink plant community patterns in park green spaces

群落结构		配置模式	碳汇量/(kg·m ⁻²)	碳增汇率/%
优化前	乔木	大叶白蜡+苹果树+山桃	2.88	—
	乔灌	大叶白蜡+苹果树+暴马丁香+香茶藨子+重瓣榆叶梅	3.49	21.2
优化后	乔草	大叶白蜡+苹果树+暴马丁香+百脉根	3.27	13.5
	乔灌草	大叶白蜡+暴马丁香+苹果树+香茶藨子+重瓣榆叶梅+黄菖蒲+百脉根	3.65	26.7

③街旁绿地。街旁绿地在城市绿地中分布比较广泛，它承担着景观工程和生态功能，同时也能为人们提供休闲娱乐环境。现有植物中应用频度较高的多属于碳汇低的植物，而且单层结构配置模式占较大比例。优化时，把小叶白蜡和茶条槭替换为白榆和复叶槭，增加灌木层金叶榆球和紫枝玫瑰；或者优化为乔-草模式，地被植物增加八宝景天。若要最大程度的提升碳汇量，植物群落选用乔-灌-草高碳汇植物群落模式，优化前场地碳汇量为 2.19 kg·m⁻²，优化后乔草结构碳汇量增加 21.9%，乔灌结构碳汇量增加 26.0%，乔灌草结构碳汇量增加 31.1%，见表 10。

表 10 街旁绿地高碳汇植物群落模式优化
Table 10 Optimization of high carbon sink plant community patterns in street side green space

群落结构		配置模式	碳汇量/(kg·m ⁻²)	碳增汇率/%
优化前	乔木	红叶海棠+小叶白蜡+茶条槭	2.19	—
	乔灌	红叶海棠+白榆+复叶槭-金叶榆球+紫枝玫瑰	2.76	26.0
优化后	乔草	红叶海棠+白榆+复叶槭-八宝景天	2.67	21.9
	乔灌草	红叶海棠+白榆+复叶槭-金叶榆球+紫枝玫瑰-红宝石萱草+八宝景天	2.87	31.1

由以上三种绿地系统通过碳汇优化前后对比,碳汇量增加 9.2%~31.1%,把低碳汇树种替换为高碳汇树种以及增加植物群落层次结构皆可以达到提高碳汇的目的。为达到最优的碳汇效益,尽可能选用层次结构为乔灌草>乔灌>乔草>单层结构,把低碳汇植物替换为高碳汇植物,高碳汇植物的选择上可以参考李蕊^[36]等学者的植物碳汇量筛选标准,见表 11。

5 结论

- 1) 通过对乌鲁木齐市三种典型绿地 (道路绿地、公园绿地和街旁绿地) 在全生命周期内碳排放和碳汇量的核算,发现碳排放量仅为碳汇量的 6.5%~9.7%,提升碳汇效益更有助于海绵城市绿地系统碳减排效益的提高。
- 2) 在乌鲁木齐市海绵城市绿地系统 30 年全生命周期内,道路绿地碳汇量最高,其次是公园绿地,最后为街旁绿地;碳排放量道路绿地最高,公园绿地次之,街旁绿地最小。
- 3) 植物固碳是城市绿地系统碳汇的主要途径,通过把低碳汇植物替换为高碳汇植物 (暴马丁香、大叶白蜡、重瓣榆叶梅、白榆、梓树、紫穗槐等)、丰富植物群落垂直结构 (复层结构>双层结构>单层结构) 可以有效增加碳汇,提高碳减排效益。

参 考 文 献

[1] 刘强. 我国低碳经济发展模式研究[J]. 合作经济与科技, 2022(7): 50-51.

[2] LIU W J, LI Y Y, LIU T T, et al. How to promote low-carbon economic development? A comprehensive assessment of carbon tax policy in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(20): 10699.

[3] SONG C. Application of nature-based measures in China's sponge city initiative: Current trends and perspectives[J]. Nature-Based Solutions, 2022, 2: 100010.

[4] 邓倩倩, 黄明, 卢靖宇, 等. 基于 SWMM 模型探究 LID 对排水设施的碳排放量影响[J]. 兰州工业学院学报, 2022, 29(6): 13-17.

[5] 张崇洋. 郑州市屋顶绿化生态系统碳储存估算及影响因素研究[D]. 河南农业大学, 2020.

[6] 李俊奇, 王泓洁, 李惠民. 基于内容分析法的城镇雨水系统碳核算研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 33-43.

[7] FEI Y M, RENE E R, SHANG Q Y, et al. Comprehensive effect evaluation of LID facilities implemented in sponge campuses: A case study[J]. Ecological Indicators, 2023, 155: 110912.

[8] 马洁, 武小钢. 海绵城市典型措施碳排放研究[J]. 中国城市林业, 2018, 16(2): 27-32.

[9] 陈碧宜. 基于气候变化的低影响开发设施径流量和碳排放控制研究[D]. 广州大学, 2022.

[10] XU C Q, LIU Z J, CHEN Z X, et al. Environmental and economic benefit comparison between coupled grey-green infrastructure system and traditional grey one through a life cycle perspective[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 174: 105804.

[11] 谭清文. 上海市某高校节水及碳减排效益分析[J]. 净水技术, 2022, 41(S2): 142-147.

[12] 李俊奇, 张希, 李惠民. 北京某片区海绵城市建设和运行中的碳排放核算研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 86-93.

[13] 朱雨, 邵薇薇, 杨志勇. 海绵设施全生命周期碳减排效应评估——以迁安安顺家园为例[J/OL]. 水资源保护, 1-10.https://kns-cnki-net.webvpn.xju.edu.cn:8040/kcms/detail/32.1356.tv.20230529.1508.006.html.

[14] 郑涛. 居住社区海绵改造过程的碳排放核算研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(19): 112-119.

[15] SU X, SHAO W W, LIU J H, et al. How does sponge city construction affect carbon emission from integrated urban drainage system?[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 363: 132595.

[16] SHAO W W, LIU J H, YANG Z Y, et al. Carbon reduction effects of sponge city construction: A case study of the city of Xiamen[J]. Energy Procedia, 2018, 152: 1145-1151.

[17] 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, 26(6): 23-26.

[18] ZHANG Y, MENG W Q, YUN H F, et al. Is urban green space a carbon sink or source? - A case study of China based on LCA method[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 94: 106766.

[19] 张彪, 谢紫霞, 高吉喜. 上海城市森林植被固碳功能及其抵消能源碳排放效果评估[J]. 生态学报, 2021, 41(22): 8906-8920.

[20] 和晓彤. 面向总体规划阶段的的城市绿地碳汇量估算方法研究[D]. 西安建筑科技大学, 2021.

[21] BEHERA S K, MISHRA S, SAHU N, et al. Assessment of carbon sequestration potential of tropical tree species for urban forestry in India[J]. Ecological Engineering, 2022, 181: 106692.

[22] 黄柳菁, 张颖, 邓一荣, 等. 城市绿地的碳足迹核算和评估——以广州市为例[J]. 林业资源管理, 2017(2): 65-73.

[23] 王晶燃, 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.

表 11 植物碳汇量筛选标准

Table 11 Plant carbon sink screening criteria

程度等级	单位叶面积碳汇量/(g·(m ² ·d) ⁻¹)	植物碳汇能力评价
强	>15	高碳汇能力
较强	8~15	
中等	6~8	中等碳汇能力
较弱	4~6	
弱	<4	低碳汇能力

注：引自李蕊等学者的研究文献《我国高碳汇植物研究现状》。

- [24] 张艳丽, 费世民, 李智勇, 等. 成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3878-3887.
- [25] 冀媛媛, 罗杰威. 景观全生命周期日常使用和维护阶段碳排放影响因素研究[J]. 风景园林, 2016(9): 121-126.
- [26] 陈高路, 陈林, 庞丹波, 等. 贺兰山 10 种典型植物固碳释氧能力研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 206-213+220.
- [27] 周建华, 谭春华, 王立清, 等. 包头市园林绿化植物生态功能定量分析[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(20): 96-99+105.
- [28] 陈小丽, 姜卫兵, 魏家星, 等. 南京地区观赏海棠树种固碳释氧与降温增湿效益[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(24): 123-128.
- [29] 陈少鹏, 庄倩倩, 郭太君, 等. 长春市园林树木固碳释氧与增湿降温效应研究[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(4): 750-756.
- [30] 郭晖. 河南省郑州市公园绿地常见植物固碳释氧能力分析[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(15): 103-106.
- [31] 郝晴, 马锦义, 邵海燕, 等. 不同生活型园林植物固碳能力统计分析[J]. 江苏林业科技, 2020, 47(2): 44-47.
- [32] 余琳玉, 赵江, 吕豪轩, 等. 海绵设施内 16 种植物的固碳释氧和抗寒性比较[J]. 黑龙江农业科学, 2020(1): 107-112.
- [33] 岳莉然, 吴珊, 程贝贝. 白屈菜和八宝景天的光合蒸腾特性研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(8): 10-11+22.
- [34] 袁蕾. 乌鲁木齐市 3 种典型绿地系统生态效益评价[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(13): 124-126.
- [35] 王新. 乌鲁木齐市绿化植物的固碳释氧及蒸腾耗水率比较[J]. 湖南林业科技, 2018, 45(6): 1-8.
- [36] 李蕊, 姚曼卿, 李屹楠, 等. 我国高碳汇植物研究现状[J]. 山东林业科技, 2023, 53(3): 104-110+119.

(责任编辑: 金曙光)

Analysis of carbon emission reduction benefits of green space systems in sponge cities-Taking three typical green space systems in Urumqi as an example

CHEN Juxiang^{1,*}, MENG Shi², SUN Liang³, ASIHAER·Reyina², LI Guorong²

1. College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830000, China; 2. School of Business, Xinjiang University, Urumqi 830000, China; 3. Urumqi Urban Comprehensive Transportation Project Research Center, Urumqi 830000, China

*Corresponding author, Chenjuxiang, E-mail: chenju1816@126.com

Abstract Urban green space is one of the main components of sponge city construction and plays an important role in carbon reduction actions. In order to quantify the carbon emissions and sinks of sponge city green space system and enhance the carbon emission reduction benefit, based on the IPCC guidelines, assimilation amount method and leaf area model, the whole life cycle method is used to construct the carbon emission reduction accounting model of sponge city green space system from the level of urban green space construction and landscape elements, and the carbon emission reduction factors are analysed by taking three kinds of typical green space systems of Urumqi as research objects, and the results show that: The carbon sinks of roads, parks and streetside green space in the whole life cycle are 10.36, 15.26 and 11.68 times higher than the carbon emissions, and the carbon sinks are much higher than the carbon emissions; the composition of the carbon sinks in the plant carbon sinks compared to the carbon sinks generated by rainwater use and runoff reduction accounted for more than 95% of the carbon sinks; the optimisation of the carbon sinks of the urban green space system was compared from the aspects of the species composition of the plant community and the hierarchical structure, and it was found that the use of high carbon sequestering plant configuration was more important than the carbon emissions. The optimisation of carbon sinks in urban green space systems was compared in terms of plant species composition and hierarchical structure, and it was found that the use of high carbon sequestration plant configuration and tree-shrub-grass composite hierarchical structure could increase the carbon sink of green space by an average of 12.8%~26.3%, with a significant benefit in carbon emission reduction.

Keywords sponge city; green space system; carbon emission reduction benefits; plant configuration model; optimized design