

华北地区城市绿地固碳能力测算研究

张青云¹, 吕伟娅¹, 徐炳乾²

(1. 南京工业大学城市建设学院, 江苏 南京 211816;
2. 北控水务(中国)投资有限公司, 北京 100102)

摘要: 文章通过对位于华北地区的 7 个案例的城市绿地植被固碳能力的研究, 形成一套系统的计算方法。结果表明: 适用于雄安新区的城市绿地单位面积固碳能力约为 $2.62 \text{ kg/a} \cdot \text{m}^2$; 各个植被群落的固碳能力从大到小依次为乔木 ($2.66 \text{ kg/a} \cdot \text{m}^2$)、灌木 ($2.59 \text{ kg/a} \cdot \text{m}^2$)、地被 ($2.01 \text{ kg/a} \cdot \text{m}^2$)。研究结果将为实现城市绿地空间的合理布局、推进低碳城市建设提供科学依据。

关键词: 城市绿地; 固碳能力; 雄安新区; 植被; 碳汇

中图分类号: X24

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021.01.007

Study on the Calculation of Carbon Sequestration Capacity of Urban Green Space in North China

ZHANG Qingyun¹, LYU Weiya¹, XU Bingqian²

(1. College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;
2. Beijing Enterprises Water Group (China) Investment Limited, Beijing 100102, China)

Abstract: Based on the study of the carbon sequestration capacity of the urban green space in 7 cases in North China, a systematic calculation method was proposed. The results showed that the carbon sequestration capacity per unit area of urban green space for Xiong'an New District was approximately $2.62 \text{ kg/a} \cdot \text{m}^2$. The carbon sequestration capacity of each vegetation community was in the descending order with arbor ($2.66 \text{ kg/a} \cdot \text{m}^2$), shrub ($2.59 \text{ kg/a} \cdot \text{m}^2$), and ground cover ($2.01 \text{ kg/a} \cdot \text{m}^2$). The research results will provide a scientific basis for realizing the rational layout of the urban green space and promoting the construction of the low-carbon cities.

Keywords: Urban Green Space; Carbon Sequestration Capacity; Xiong'an New District; Vegetation; Carbon Sink

CLC number: X24

城市作为人类生产和生活的中心, 容纳了当前世界过半的人口, 导致城市人均能耗是农村地区的 3.5 倍, 超过 75% 的温室气体是从城市中产生的^[1]。减少城市中排放的进入大气中的 CO_2 量主要有 2 条对策, 一是工业、建筑和交通等领域的节能减排, 二是碳汇。在城市碳汇方面, 绿地是城市中唯一具有自净功能及自动调节能力的子系统, 绿地中的植物通过光合作用将大气中的 CO_2 吸收并固定在植被与土壤当中, 在城市碳汇中发挥着重要作用^[2]。城市绿地系统中较常见的群落结构为乔—灌—草结合的复层结构, 具有加快蒸腾、吸收 CO_2 、释放氧气、调节气温、增加湿度以及调节小气候环境等生态效应^[3]。城市绿地与森林、草原相比, 受人

类活动的影响大, 但是目前对城市绿地的碳汇测算研究较少。

本研究旨在通过对华北地区具有代表性的城市绿地的固碳能力案例进行研究, 形成一套系统的计算方法, 进而实现对雄安新区的碳汇能力的初步评估。此外, 本研究通过对华北地区常见的树种的固碳量的研究, 期望能够初步建立雄安新区植被与碳汇之间的关系。

1 研究方法

1.1 案例分析

本研究的研究对象为雄安新区, 其规划面积起步区约为 100 km^2 , 中期发展区 200 km^2 , 远期控制

收稿日期: 2020-02-05

作者简介: 张青云(1995-), 女, 硕士研究生。研究方向: 海绵城市、绿色碳汇。E-mail: 2570483726@qq.com

引用格式: 张青云, 吕伟娅, 徐炳乾. 华北地区城市绿地固碳能力测算研究[J]. 环境保护科学, 2021, 47(1): 41-48.

区 2 000 km²。范围涉及河北省雄县、容城、安新 3 县及周边部分区域,地处北京、天津以及保定腹地。现有开发程度较低,发展空间充裕,具备高起

点、高标准开发建设的基本条件。现基于北京市和文安县的 7 个案例见表 1,对其进行了绿地固碳能力计算,分析了华北地区城市绿化植被的碳汇特点。

表 1 项目案例基本信息

序号	项目名称	总用地面积/m ²	绿地面积/m ²	绿地率/%
1	北京京西商务中心	106 152.7	15 820	30
2	北京用友产业园	13 609	10 045	—
3	北京万科天竺保税区	—	2 640	—
4	北京市房山区长阳西站六号地	29 630.38	10 030.64	33.85
5	中关村高端医疗器械产业园(一期)	167 083.92	25 229.67	15.10
6	北京市丰台区卢沟桥乡西局	—	11 418	30.01
7	文安鲁能生态区度假酒店	81 983	40 807	50.53

注:“—”,未能给出的数据;信息来源:项目的建筑总平面图。

1.2 固碳能力测定方法

根据研究对象北京京西商务中心西区、文安鲁能生态区、北京市房山区、北京市丰台区属于居住区加功能区,北京万科天竺保税区、北京用友产业园和中关村高端医疗器械产业园属于办公区,采用光合速率法对案例绿地植物的固碳量进行预测。光合速率法是先测定植物的光合速率、呼吸速率及叶面积,通过植物光合(呼吸)强度=植物光合(呼吸)速率×植物总叶面积来计算植物光合强度和呼吸强度,两者的差值即为植物的固碳量^[4]。一般而言,因光合速率法能描绘出绿地固碳能力的动态变化,测定公园、居住区绿地固碳量应优先选用;缺少相应统计数据时,也可采用这种方法进行近似估算。

1.3 植被固碳能力计算

1.3.1 叶面积指数 叶面积指数指植物的叶面积总和与植株所覆盖的土地面积总和之比^[5]。叶面积指数能反映出植物在单位土地面积上的叶片疏密程度和植物对光能的利用能力。

1.3.2 基本指标选取 研究发现乔木树种的冠幅及叶面积指数普遍高于灌木树种,乔木的冠幅多大于 4 m×4 m,叶面积指数多大于 2;灌木冠幅在 3 m×3 m 下,叶面积指数多小于 3^[5]。同时,在查阅相关文献^[4-7],对于案例地点所选择的树种的各项指标进行归纳汇总。同时,针对北京京西商务中心等 7 个案例中所选择栽种的各类树种,在经过多次查阅文献及园林类相关资料后,由于不同的研究学者所选择研究地、研究项目的不同,各个案例中的一些树种的多项指标无法落实。在此情况下,采用类

比法选择与未知指标的树种叶面积相似且指标已知的树种各类指标数值进行嵌套,以期得到较为准确的数据。在查阅《景观植物学》^[8]后可知樱花、西府海棠与紫薇的叶片面积近似;小叶黄杨叶片面积与金叶女贞近似;海棠、山杏的叶片面积与国槐近似;榆叶梅叶片面积与木槿近似;银杏的叶片面积与玉兰近似。

1.3.3 固碳量的计算 植被的固碳量(g/d)=植被单位面积固碳量(g/m²·d)×植被的种植面积(m²)。

2 结果与分析

2.1 研究案例绿地植被固碳能力计算指标汇总

本研究所选取的研究对象在绿地建设中考虑了北京市地理与气候等环境因素,选用不同种类的树种进行种植,同时随着城市建筑密度的增加,阴生植物环境不断扩大,在需满足城市绿化覆盖率要求的前提下,林下绿化应用越来越广泛,选择观赏性好、适应性强、繁育简单、低养护成本和耐阴地被植物,可弥补乔木生长缓慢、下层空隙过大的不足,又能短期内收到较好的景观效果,具有一定的推广意义,且能够达到良好的植物固碳效果^[8]。同时草坪作为地被的一大类型,由于应用时间较早,目前已形成独立的体系,在本研究的案例中没有明确指出种植的草坪品种,鉴于 7 个案例均处于华北地区,故认为种植的是适合生长于北方的冷季型草坪草。由于目前鲜有报道与文献涉及草坪的单位面积固碳量这一指标,因此略去对于草坪的固碳能力计算。具体案例植被固碳能力指标见表 2~4。

表2 乔木固碳能力

序号	名称	冠幅面积/m ²	叶面积指数	单位叶面积固碳量 /g·(m ² ·d) ⁻¹	单位面积固碳量 /g·(m ² ·d) ⁻¹
1	国槐	7×8.3	3.44	3.47	5.39
2	银杏	—	—	—	7.35
3	果海棠		3.44	3.47	5.39
4	白蜡	7×8	3.45	2.45	11.64
5	云杉	3×3	—	—	6.43
6	樱花	—	2.37	3.61	11.75
7	碧桃	2.5×2.5	1.89	3.20	8.31
8	丛生元宝枫	6×6	1.94	10.29	3.86
9	丛生蒙古栎	—	—	—	6.78
10	山楂	—	—	—	6.04
11	山杏	—	3.44	3.47	5.39
12	紫叶李	2×1.8	2.29	4.80	15.10
13	合欢	3.5×4	2.00	—	4.17
14	梓树	2×3	—	—	8.31
15	白皮松	3×3.5	—	—	5.58
16	油松	3×4	—	—	4.14
17	杏花	2.5×2.5	2.37	3.61	11.75
18	丛生五角枫	4.5×4.5	3.86	1.94	10.29
19	玉兰	—	—	—	7.35
20	丝棉木	3.5×3.5	5.74	—	8.59
21	馒头柳	4×4	5.74	—	8.59
22	垂柳	4×4	5.74	—	8.59
23	黄栌	3.5×4	—	—	4.27
24	丛生紫薇	2.5×2.5	2.37	3.61	11.75
25	高分枝山新杨	2×2.5	—	—	8.31
26	山桃	2.5×3	—	—	8.31
27	千头椿	3×3	3.00	—	7.09
28	栾树	4×4	3.00	—	7.09
29	法桐	4.5×4.5	—	—	7.35
30	洋槐	4×4	3.44	3.47	5.39
31	柿树	4×4.5	—	—	6.78
32	白毛杨	4.5×4.5	—	—	7.35
33	复叶槭	3×3	3.44	3.47	5.39
34	其他	4×4	2.00	—	4.17

注：“—”，表示不同的研究学者所选择研究地、研究项目的不同，各案例中的一些树种的某项指标无法落实，相关文献中也无相应数据记载。

表 3 灌木、小乔木固碳能力

序号	名称	冠幅面积/m ²	叶面积指数	单位叶面积固碳量 /g·(m ² ·d) ⁻¹	单位面积固碳量 /g·(m ² ·d) ⁻¹
1	紫叶李	2×1.8	2.29	4.80	15.10
2	山杏	—	3.44	3.47	5.39
3	西府海棠	—	3.44	3.47	5.39
4	辛夷玉兰	—	—	—	7.35
5	榆叶梅	—	1.89	3.19	8.29
6	丛生紫薇	0.7×0.5	2.37	3.61	11.75
7	丛生蒙古栎	—	—	—	6.78
8	龙柏	—	—	—	12.35
9	小叶黄杨	—	—	—	4.96
10	金叶女贞	—	—	—	4.96
11	小叶丁香	5×5	1.91	—	6.95
12	太平花	—	—	—	3.39
13	红瑞木	—	—	—	8.02
14	红黄子锦带	—	—	—	5.18
15	醉鱼草	—	—	—	3.39
16	蔷薇	—	—	—	4.96
17	棣棠	—	—	—	4.96
18	金银木	1.8×2.5	3.00	—	7.09
19	珍珠梅	1.8×1.8	1.89	3.19	8.29
20	其他	3×3	3.00	—	7.09

注：“—”，表示不同的研究学者所选择研究地、研究项目的不同，各案例中的一些树种的某项指标无法落实，相关文献中也无相应数据记载。

表 4 地被（不含草坪）固碳能力

序号	名称	单位面积固碳量/g·(m ² ·d) ⁻¹	序号	名称	单位面积固碳量/g·(m ² ·d) ⁻¹
1	小叶黄杨	4.96	11	千屈菜	4.42
2	大叶黄杨	3.39	12	白花山桃草	3.86
3	金叶女贞	4.96	13	婆婆纳	3.86
4	金娃娃萱草	4.96	14	狼尾草	8.50
5	麦冬	7.65	15	早园竹	4.96
6	胶东卫矛	4.96	16	萱草	4.96
7	拂子茅	6.91	17	玉簪	4.96
8	神香草	6.28	18	红王子锦带	5.18
9	金鸡菊	5.67	19	时令花卉	4.96
10	紫松果菊	3.53			

2.2 研究案例绿地植被固碳能力计算结果

通过对研究案例各类型植被的种植面积的计算汇总, 结合上文汇总的各植被的单位面积固碳量

指标, 可以得到各类型植被的固碳量, 从而计算出各研究案例的总固碳量, 见表 5。

表 5 研究案例的各植被种植面积及总固碳量

序号	项目名称	植被种植面积/m ²								总固碳量 /t·a ⁻¹
		乔木		灌木		地被（不含草坪）		草坪		
		植被名称	种植面积	植被名称	种植面积	植被名称	种植面积	植被名称	种植面积	
1	京西商务中心西区	银杏	1 077	山杏	302	小叶黄杨	2 467	冷季型 草	8 309	45.53
		国槐	5 767	西府海棠	496	大叶黄杨	1 314			
		果海棠	326	紫叶李	217					
		白蜡	1 502	辛夷玉兰	180	金叶女贞	1 196			
		云杉	498	榆叶梅	221					
		樱花	1 332	丛生紫薇	148	金娃娃萱草	174			
		碧桃	240	丛生蒙古栎	180					
		丛生元宝枫	415	其他	110					
		其他	60							
2	北京万科天竺保税区	红皮云杉	36	龙柏	45	其他	15	冷季型 草坪草	1 941	3.25
		丛生蒙古栎	56	小叶黄杨	202	麦冬	242			
		山楂	20	金叶女贞	55					
		山杏	45	小叶丁香	116					
		白蜡	202	其他	24	—	—			
		紫叶李	25	—	—					
		其他	112							
		3	北京用友产业园	合欢	420	—	—			
梓树	222									
国槐	3 370									
元宝枫	828									
4	文安鲁能生态区度假酒店	海棠	1 715	紫丁香	136	大叶黄杨	653	冷季型 草坪草	21 809	108.88
		白皮松	357	太平花	1 497	金叶女贞	391			
		云杉	1 476	红瑞木	1 985	胶东卫矛	1 075			
		油松	1 776	红黄子锦带	589	拂子茅	696			
		早樱	832	醉鱼草	634	神香草	410			
		杏花	582	蔷薇	669	金鸡菊	350			
		丛生五角枫	2 673	棣棠	1 539	紫松果菊	320			
		国槐	552	其他	1 998	千屈菜	1 818			
		银杏	1 596			白花山桃草	155			
		玉兰	1 347			婆婆纳	100			
		白蜡	1 837			小叶黄杨	2 164			
		丝棉木	387			其他	949			
		馒头柳	1 280			—				
		垂柳	1 888	—	—					
		黄栌	2 464							
		山楂	1 554							
		丛生紫薇	868							
		山桃	577							
		高分枝山新杨	365							
		其他	3 100							

续表 5

序号	项目名称	植被种植面积/m²						总固碳量 /t·a ⁻¹		
		乔木		灌木		地被（不含草坪）				草坪
		植被名称	种植面积	植被名称	种植面积	植被名称	种植面积	植被名称	种植面积	
5	五和万科长 阳西站6号 地园区	千头椿	729	紫叶李	257	大叶黄杨	171.1	冷季型 草坪草	5 876	27.31
		合欢	171	榆叶梅	157	其他	583.1			
		元宝枫	378	金银木	205					
		白蜡	496	丁香	569					
		栾树	352	珍珠梅	155					
		法桐	911	其他	1 918					
		洋槐	784							
		国槐	480			—	—			
		柿树	160							
		白毛杨	486	—	—					
		复叶槭	162							
		西府海棠	280							
		山桃	127							
		樱花	131							
		其他	576							
6	中关村高端 医疗器械产 业园	油松	240	金银木	255	拂子茅	677	冷季型 草坪草	16 709	54.96
		栾树	1 312	珍珠梅	104	狼尾草	698			
		元宝枫	420	紫丁香	113	早园竹	217			
		银杏	210	金叶女贞	649	千屈菜	170			
		国槐	3 536	大叶黄杨	530	萱草	247			
		千头椿	1 341	小叶黄杨	1 917	玉簪	221			
		山桃	1 057	其他	1 288	其他	645			
		山楂	570							
		西府海棠	3 910							
		碧桃	656	—	—	—	—			
		其他	1 040							
		7	北京市丰台 区卢沟桥乡 西局	国槐	1 520	紫叶李	270			
云杉	1 200			金银木	750	红王子锦带	150			
银杏	750			丁香	1 500	时令花卉	1 350			
山杏	1 000			天目琼花	750	其他	500			
丛生蒙古栎	300			其他	1 885					
丛生元宝枫	900									
山楂	200			—	—	—	—			
其他	200									

注：“—”，表示不同的研究学者所选择研究地、研究项目的不同，各案例中的一些树种的某项指标无法落实，相关文献中也无相应数据记载。

2.3 研究案例的城市绿地植被固碳能力结果分析

植被固碳能力结果见表 6。

估算汇总后可知，7 个案例单位用地面积固碳能力平均值为 2.62 kg/a·m²，通过表 6 的统计结果可得出其单位用地面积固碳能力的标准差为 0.28。鉴于 7 个案例所在城市均属于华北地区，各个案例所选取的植被、草坪均适宜生长于华北地区，属于

华北地区的本土特色植被，因此，2.62 kg/a·m² 可用于雄安新区城市绿地碳汇的计算。

在对 7 个案例中的乔木、灌木和地被的单位用地面积固碳能力分别进行估算汇总后得到表 7。

其中乔木单位用地面积固碳能力的平均值为 2.66 kg/a·m²，标准差为 0.24，离散程度较小。除北京用友产业园，其余的 6 个案例灌木单位用地

面积固碳能力平均值为 $2.59 \text{ kg/a}\cdot\text{m}^2$, 标准差为 0.53, 相较乔木而言, 差值较大, 初步推断是由于灌木长势较乔木而言矮小, 易被乔木的树冠遮挡, 因而对于灌木的单位叶面积固碳量及单位面积固碳量的测定容易产生误差。地被的单位用地面积固碳能力平均值为 $2.01 \text{ kg/a}\cdot\text{m}^2$, 标准差为 0.42, 相较乔木而言, 差值较大, 初步推断是由于地被生长在乔木及灌木的下层阴生环境中, 受光照影响较小, 因而光合速率法的测定会产生一定的误差。同时通过对表 5 中 7 个案例的植被种类的对比发现, 各个案例间乔木树种的选择具有一定的相似

性, 树种相对比较固定; 而灌木和地被植物的栽种更具多样化。例如北京用友产业园选择不种植地被, 而文安鲁能生态区度假酒店的地被植物种类却高达 10 种以上; 文安鲁能生态区度假酒店种植的灌木种类与北京京西商务中心种植的灌木种类基本不重合等。据此推测各个案例中灌木和地被的单位用地面积固碳能力相差较大可能与灌木、地被种类的选择有关。表 7 中可知, 在单位用地面积的固碳能力, 各群落从大到小依次为乔木、灌木和地被, 这与黄柳菁等^[9]的研究结论存在重合之处。

表 6 植被固碳能力结果汇总

序号	项目名称	绿地率/%	绿地面积/ m^2	单位用地面积固碳能力/ $\text{kg}\cdot(\text{a}\cdot\text{m}^2)^{-1}$
1	北京京西商务中心	30	15 820.00	2.88
2	北京用友产业园	—	10 045.00	2.28
3	北京万科天竺保税区	—	2 640.00	2.72
4	文安鲁能生态区度假酒店	50.53	40 807.00	2.67
5	北京市房山区长阳西站六号地	33.85	10 030.64	2.72
6	中关村高端医疗器械产业园（一期）	15.10	25 229.67	2.18
7	北京市丰台区卢沟桥乡西局	30.01	11 418.71	2.91
	平均值	31.90	16 570.15	2.62

注：“—”，表示项目所给资料完善度的不同，项目2和项目3的绿地率未能给出。

表 7 乔木、灌木及地被的固碳能力分类汇总

序号	项目名称	乔木种植 面积/ m^2	乔木单位用地面积 固碳能力 $\text{kg/a}\cdot\text{m}^2$	灌木种植 面积/ m^2	灌木单位用地面积 固碳能力 $\text{kg/a}\cdot\text{m}^2$	地被种植 面积/ m^2	地被单位用地面积 固碳能力 $\text{kg/a}\cdot\text{m}^2$
1	北京京西商务中心	11 217	2.72	1 854.00	3.47	5 153.89	1.66
2	北京用友产业园	4 840	2.28	—	—	—	—
3	北京万科天竺保税区	496	3.07	442.00	2.32	257.00	2.73
4	文安鲁能生态区度假酒店	27 226	2.68	9 047.00	2.11	9 081.00	1.87
5	北京市房山区长阳西站六号地	6 223	2.69	3 261.00	2.85	754.20	1.68
6	中关村高端医疗器械产业园（一期）	14 292	2.68	4 856.00	2.08	2 980.00	2.28
7	北京市丰台区卢沟桥乡西局	6 070	2.50	5 155.00	2.73	2 200.00	1.82
	平均值	10 052	2.66	4 102.50	2.59	3 404.35	2.01

注：“—”，表示由于项目所给资料完善度的不同，项目2缺少灌木和地被种植面积，无法进行相应的计算。

通过对表 6 和表 7 的进一步分析可知, 单位用地面积固碳能力的取值很大程度上取决于乔木及灌木的固碳能力。植被种植面积与总绿地面积存在差值表明, 由于绿地中乔木、灌木、地被(不含草坪)与草坪中存在重合面积, 导致了在乔木、灌木覆盖处存在较大比例的草坪被遮盖, 处于阴生环境

中, 并且由于地被、灌木的长势矮小, 其种植处一般不敷设草坪, 同时剩下一部分比例的裸露草坪由于目前鲜有报道与文献涉及草坪的单位面积固碳量这一指标, 因此对于这一部分的草坪的计算缺乏数据支撑。但是根据文献^[4, 6]的报道结合对表 7 的分析, 可以推测这部分草坪的固碳能力应该弱于灌木

或者乔木的固碳能力。同时结合文献^[7,9]的报道可以得知由于绿地中不同植被的固碳能力存在差异,因此在雄安新区的城市绿地规划中,建议针对不同区域的自然条件,加强景观植被的群落配置,优先考虑乔木群落以及乔-灌-草的立体种植。

3 结论与展望

综观城市绿地碳汇研究现状,主要集中于市域大面积城市绿地固碳量的估算及城市绿地空间布局优化,目前针对小范围、分散式的城市绿地或者具体的城市建设项目中的绿地碳汇计算指标的研究甚少。本研究通过针对北京京西商务中心等 7 个案例的研究与分析,初步得出了能够适用于雄安新区的城市绿地碳汇计算指标为 $2.62 \text{ kg/a} \cdot \text{m}^2$,可据此估算雄安新区城市绿地的固碳能力,在未来雄安新区的城市建设中对碳排放较大的城市功能区与城市绿地进行有针对性的规划布局,促使城市空间形成完整的低碳生态体系。在单位用地面积固碳能力方面,各种植群落固碳能力从大到小依次为乔木、灌木和地被。因此,在雄安新区城市绿地规划中应考虑各个植被群落的合理布局与种植,最大程度地发挥其固碳功能。建议:1)城市绿地树种的碳汇能力差异较大,其固碳能力也随着环境条件的变化而变化,本研究中的 7 个案例得出的数值也仅能用作粗略估算,很多树种的单位面积固碳量都未有相关文献记载,因此,现阶段我国需建立自己的植物固碳能力数据库。2)研究发现,土壤碳储量远大于地上植被,土壤有机碳库是大气碳库的 3 倍,

约是陆地生物量的 2.5 倍^[10]。同时,土壤作为城市绿地植物生长的基础,以有机和无机的形式存储碳,对碳循环起到很重要的作用。然而对于土壤碳储量的动态演变的研究却十分匮乏,较难综合考虑植物碳固定与土壤有机碳库的碳储量变化耦合所产生的碳收支值,也无法对城市绿地系统碳汇能力进行较为精准的评估。因此,城市绿地总固碳能力的精确计算还需要提过对土壤固碳量的大量研究成果予以支撑,这将成为今后研究的重点。

参考文献

- [1] 潘辉,史先念.京津冀都市圈低碳城市发展研究[J]. *合作经济与科技*, 2018(4): 4-8.
- [2] 尹沛卓,李端杰.基于碳汇理念的城市绿地布局优化-以日照市主城区为例[C]//中国风景园林学会 2018 年会论文集.贵阳:中国建筑工业出版社,2018: 389-394.
- [3] ARGIRO D, MARIALENA N. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits[J]. *Energy and Buildings*, 2003, 35(1): 69-76.
- [4] 李辉,赵卫智.北京 5 种草坪地被植物生态效益的研究[J]. *中国园林*, 1998, 14(4): 36-38.
- [5] 代巍. G101 北京段公路绿化的温湿度调节及固碳释氧研究[D].北京:北京林业大学,2009.
- [6] 刘路阳.北方几种城市绿化树种碳汇能力研究[D].天津:天津理工大学,2012.
- [7] 郭佳.基于碳平衡理念的沈阳建筑大学低碳校园规划研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2014.
- [8] 郭兆武.景观植物学[M].北京:中国农业出版社,2014.
- [9] 杨江.适宜北方林下种植的地被植物[J]. *新农业*, 2015(9): 32-33.
- [10] 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.