花境植物固碳能力及碳收支评估

王一祎[1] 张秦英[1] 张 勇[2] 董 超[2]

1 天津大学建筑学院 天津 300072

2 天津市园林花圃 天津 300112

摘要：花境在城市绿地中的应用越来越广泛，但花境的碳汇效益仍然存在争议。为评价和预测花境的碳收支效益提供科学依据，基于对植物固碳量和群落碳收支的测算，以天津市常见的 50 种花境植物和 5 个花境样地为例，构建花境群落碳收支评估模型，评估并模拟花境的碳收支情况，分析花境碳收支与碳排放活动、群落特征之间的关系。结果表明：1）一年生植物与多年生植物的年固碳量平均值近似，高固碳植物有硫华菊、柳枝稷、月季等 15 种；2）由于运输碳排放较高等原因，大部分实际营造的花境仍是碳源；3）花境的碳汇效益受植物固碳能力、植物生活型比例、花境面积、运输距离、更新频率等多重因素影响。3）合理配置的花境能够在 3~5 年内实现碳平衡。最后针对研究存在的不足提出展望，即还需更多样本来验证结论，花境的长期碳收支预测应考虑更多的影响因素，以及生态效益评估应与经济效益、美学价值相结合。

关键词：低碳；植物；花境；碳收支

DOI：10.12169/zgcsly.2023.03.27.0002

Assessments of Carbon Sequestration Capacity and Carbon Budget of Flower Borders

Wang Yiyi[1] Zhang Qinying[1] Zhang Yong[2] Dong Chao[2]

(1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Flower & Gardening Nursery, Tianjin 300112, China)

Abstract: Flower border has been increasingly applied, but currently people have few scientific understandings of their carbon sequestration capacity. Based on the calculation of vegetation's carbon sequestration and plant community's carbon budget, this paper constructs a simple model to evaluate flower border carbon budget using 50 plants commonly used in flower borders and 5 flower borders in Tianjin, and analyzes the relationship between carbon budget of flower borders and carbon emission activities as well as community characteristics. It aims to provide the science base for evaluate and forecast the benefits brought in by the carbon budget of flower border. The results indicate: 1) Annual and perennial plants have similar average carbon sink, while there are significant differences in carbon sequestration capacity between plants of the same life form. And there are 15 species of high carbon-storage plants, such as *Cosmos sulphureus*, *Panicum virgatum* and *Rosa chinensis*; 2) Due to high carbon emissions of transportation, small areas of flower border, and unreasonable living facilities configuration, the majority of flower borders created are still carbon sources; and 3) To achieve a carbon-balanced flower border within 3-5 years, the following conditions should be usually met: the area exceeds 150 square meters, the distance to transportation area is within 82 kilometers, the renewal model is adopted that the annual plants are replaced by perennial herbaceous plants and shrubs, the proportion of annual herbaceous plants is less

收稿日期：2023-03-27

第一作者：王一祎（1998-），女，硕士，研究方向为园林植物景观应用，E-mail：13133590720@163.com

通信作者：张秦英（1977-），女，博士，风景园林系副主任、副教授、博士生导师，研究方向为园林植物资源与景观应用。E-mail：qinying_ zhang@163.com

than or equal to 50% in area, the proportion of perennial herbaceous plants is less than or equal to 60% or greater than 80% in area, and the area of shrubs is not limited.

Keywords: low carbon; plant; flower border; carbon budget

花境起源于 18 世纪的英国，在发展过程中，其经济功能逐渐转化为观赏功能，“混合花境”的提出使花境的生态功能逐渐受到关注[1]。在花境设计与应用、植物材料、园林应用评价这 3 个研究热点上，花境的生态效益是研究与讨论的重要主题[2]。近年，花境面积在城市绿地中的占比不断扩大，在绿地生态效益中的影响也逐渐增加，花境的碳汇效益也开始被广泛讨论。部分学者对花境的碳汇效益持怀疑态度，认为花境是持续的碳源，对城市绿地碳汇毫无贡献。然而，对花境碳汇能力的讨论还缺乏实证支持。

研究表明，不同尺度的绿地需要在长期的、持续的景观维持中才能够实现碳平衡。例如，武汉光谷路二段景观和天津仕林苑居住区景观需要超过 30 年的管理养护才能实现全生命周期的碳收支平衡[3-4]，Park 和 Jo[5]评估的 30 个韩国中小型公园也大多需要 20~30 年实现碳平衡，而硬质铺装的生产碳排放和营建阶段的碳排放占景观全生命周期碳足迹中的主体[6]。

在植物群落碳汇测算中，通常以木本植物为主，草本植物的固碳能力往往被忽视。部分学者完成了 90 余种园林观赏草和野生地被植物的研究，总结出芦苇（*Phragmites australis*）、火红萼距花（*Cuphea ignea*）、芍药（*Paeonia lactiflora*）、黄花鸢尾（*Iris wilsonii*）、松果菊（*Echinacea purpurea*）、圆叶风铃草（*Campanula rotundifolia*）、狼尾草（*Pennisetum alopecuroides*）、水蓼（*Polygonum hydropiper*）、香蒲（*Typha orientalis*）等固碳能力较强的草本植物[7-12]，为低碳景观营造提供了支持。然而，目前的研究成果仍不能满足应用需求。

花境的一年和多年碳收支可以贡献持续的碳汇效益还是实现碳平衡的负担？花境通常需要多少年才能够实现碳平衡？影响花境碳汇效益的重要因素有哪些？本研究通过实测和模拟方法，评估花境植物固碳与花境群落碳收支的现状，提出一种简单的花境碳收支评估模型，探讨花境碳收支的影响因素和提升花境碳汇效益的具体方法，为今后高碳汇花境的设计、营造提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试样本

调查天津市 2021—2022 年花境植物的组成，筛选出 50 种常用花境植物（表 1），包括 8 种一年生草本植物、34 种多年生草本植物、8 种灌木。为降低环境差异造成的试验数据误差，在天津大学水利馆四号楼东侧的风景园林综合试验基地栽植苗木，进行试验数据收集。

选择水上公园花境 A、水上公园花境 B、文化中心花境、天津大学青年湖南岸花境、文洁路花境 5 处实际建造的花境作为整体碳收支评测样本（图 1）。不同类型的花境有着不同的观赏效果，为避免研究对象和研究结果的单一化，5 处样地既有单一的一年生花境或宿根花境，也包括混合花境。

1.2 植物固碳量测定

植物的光合同化过程受环境因子影响，会出现“光合午休”和“高温胁迫”现象，而不同的植物在两种现象上的表现存在差异，“光合午休”现象常出现在 12：00，“高温胁迫”则往往出现在 7 月左右[11, 13-14]。因此，仅测量 7—8 月的植物光合速率可能会使被测植物的固碳释氧量低于实际数值。为获取更加全面、准确的光合数据，植物试验从 8：00 持续到 16：00，从 6 月持续到



图 1 花境样地照片（从左至右分别为水上公园花境 A、水上公园花境 B、文化中心花境、天津大学青年湖南岸花境、文洁路花境）

表 1　天津市常用花境植物名录

生活型	序号	种名	拉丁学名	科属	观赏期/月
一年生	1	大花马齿苋	*Portulaca grandiflora*	马齿苋科马齿苋属	6—9
	2	硫华菊	*Cosmos sulphureus*	菊科秋英属	6—8
	3	孔雀草	*Tagetes patula*	菊科万寿菊属	7—9
	4	夏堇	*Torenia fournieri*	玄参科蝴蝶草属	7—10
	5	鸡冠花	*Celosia cristata*	苋科青葙属	7—9
	6	鼠尾草	*Salvia japonica*	唇形科鼠尾草属	6—9
	7	五星花	*Pentas lanceolata*	旋花科茜萝属	7—9
	8	波斯菊	*Cosmos bipinnatus*	菊科秋英属	6—8
多年生	9	彩叶草	*Coleus scutellarioides*	唇形科鞘蕊花属	全年
	10	天人菊	*Gaillardia pulchella*	菊科天人菊属	5—10
	11	金叶佛甲草	*Sedum lineare*	景天科景天属	全年
	12	四季秋海棠	*Begonia cucullata*	秋海棠科秋海棠属	全年
	13	虎克四季秋海棠	*Begonia cucullata* var. hookeri	秋海棠科秋海棠属	全年
	14	天门冬	*Asparagus cochinchinensis*	百合科天门冬属	全年
	15	长春花	*Catharanthus roseus*	夹竹桃科长春花属	4—10
	16	蓝羊茅	*Festuca glauca*	禾本科羊茅属	全年
	17	花叶玉簪	*Hosta undulata*	百合科玉簪属	7—8
	18	马蔺	*Iris lactea*	鸢尾科鸢尾属	5—6
	19	玉带草	*Phalarisarundinacea* var. picta	禾本科虉草属	全年
	20	木贼	*Equisetum hyemale*	木贼科木贼属	全年
	21	紫娇花	*Tulbaghia violacea*	石蒜科紫娇花属	5—7
	22	荆芥	*Nepeta cataria*	唇形科荆芥属	全年
	23	八宝景天	*Hylotelephium spectabile*	景天科八宝属	7—10
	24	鸢尾	*Iris tectorum*	鸢尾科鸢尾属	4—6
	25	细茎针茅	*Nassella tenuissima*	禾本科针茅属	全年
	26	荷兰菊	*Symphyotrichum novi-belgii*	菊科紫菀属	9—10
	27	千屈菜	*Lythrum salicaria*	千屈菜科千屈菜属	7—9
	28	银叶菊	*Jacobaea maritima*	菊科千里光属	6—9
	29	马鞭草	*Verbena officinalis*	马鞭草科马鞭草属	6—8
	30	假龙头	*Physostegia virginiana*	唇形科假龙头花属	8—10
	31	玉簪	*Hosta plantaginea*	百合科玉簪属	7—9
	32	蒲棒菊	*Rudbeckia maxima*	菊科金光菊属	5—7
	33	狼尾草	*Pennisetum alopecuroides*	禾本科狼尾草属	全年
	34	黄菖蒲	*Iris pseudacorus*	鸢尾科鸢尾属	全年
	35	松果菊	*Echinacea purpurea*	菊科松果菊属	6—7
	36	拂子茅	*Calamagrostis epigeios*	禾本科拂子茅属	全年
	37	斑叶芒	*Miscanthus sinensis* ‘Zebrinus’	禾本科芒属	全年
	38	蓝雾花	*Conoclinium coelestinum*	菊科锥托泽兰属	6—11
	39	晨光芒	*Miscanthus sinensis* ‘Morning Light’	禾本科芒属	全年
	40	柳枝稷	*Panicum virgatum*	禾本科黍属	全年
	41	芦竹	*Arundo donax*	禾本科芦竹属	全年
	42	花叶芦竹	*Arundo donax* ‘Versicolor’	禾本科芦竹属多	全年
灌木	43	三角梅	*Bougainvillea spectabilis*	紫茉莉科叶子花属	11—6
	44	蓝花丹	*Plumbago auriculata*	白花丹科白花丹属	6—9
	45	鹅掌柴	*Heptapleurum heptaphyllum*	五加科鹅掌柴属	全年
	46	变叶木	*Codiaeum variegatum*	大戟科变叶木属	全年
	47	木春菊	*Argyranthemum frutescens*	菊科木茼蒿属	2—10
	48	月季	*Rosa chinensis*	蔷薇科蔷薇属	全年
	49	绣球	*Hydrangea macrophylla*	虎耳草科绣球属	6—8
	50	红车木	*Syzygium campanulatum*	桃金娘科蒲桃属	全年

10 月，每种植物取 125 个瞬时光合速率计算固碳量的平均值，植物的全年生长期从能够露地栽植开始计算，直至在试验场地内自然枯亡，并减去试验期间的降雨天数。

2022 年 6—10 月，每月的中、下旬选择晴朗无风或微风的天气，各测定 1 期，测定时间为 8：00—16：00，每隔 2 小时测量 1 次。选择生长状况良好的 3 株植物为待测植物，测量阳面大小相似、生长良好的叶片，每次从每株植物上选取 1 片离体测量，每片叶子选择光合速率值趋于稳定时的 5 个值，求平均值，记录一天中 5 个检测时段（8：00、10：00、12：00、14：00、16：00）的净光合速率[10]。植物的瞬时光合速率采用 FS-3080H 便携式光合测定仪进行测量，植物的叶面

积指数使用 LAI-2200C 植物冠层分析仪测得。试验植物的净同化量、植物光合作用反应方程、植物单位叶面积及单位土地面积固碳量等计算公式不赘述[15-16]。

1.3 碳收支核算

城市绿地中的碳汇基本由植物产生，碳排放需考虑“生产-建设-养护-更新”全过程，景观碳收支的计算公式如下：

$$碳收支 = 碳汇 - 碳源 \quad (1)$$

植物群落碳汇以群落中的植物固碳量为基础，对每株植物平均标准下的固碳量进行求和[17]。平均标准取群落中同种植物株高、冠幅的平均值。以群落的年固碳量为例，公式如下：

$$Q_{年} = Q_1 + Q_2 + \cdots + Q_i \quad (2)$$

式（2）中：$Q_{年}$是植物群落的全年碳汇量（$g \cdot m^{-2}$）；Q_i是第 i 株植物的年固碳量（$g \cdot m^{-2}$）。

花境各阶段的碳排放包括养护材料的生产碳排放、营造阶段的交通运输碳排放和机械碳排放等[3,18-19]（表 2）。

表 2 花境群落全生命周期各阶段碳排放系数

项目	型号	工作量	碳排放系数	备注
苗木运输	4.2 m 厢式货车（满载 5 t）	12.4 L/100 km	2.73	运输车返程空车的油耗按照满载的 2/3 计算，各型号货车油耗参考 JT719《营运货车燃料消耗量限值及测量方法》
	5.2 m 厢式货车（满载 7 t）	15.4 L/100 km		
	6.8 m 厢式货车（满载 11 t）	22.7 L/100 km		
	8.5 m 厢式货车（满载 15 t）	25.4 L/100 km		
景观营造	柴油款旋耕翻土机	1 500 $L \cdot km^{-2}$	2.73	
管理养护	自来水灌溉	0.3 $t \cdot m^{-2}$	0.91	修剪、除草由人工完成，不计入碳排放
	缓释复合肥（无机肥）	0.11 $kg \cdot m^{-2}$	0.26	
	修剪/除草	无	无	
苗木更新	2.8 m 厢式货车（满载 2 t）	10 L/100 km	2.73	同“苗木运输”

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 和 SPSS 26 软件处理，包括植物个体的固碳量和花境群落的碳收支计算，以及花境碳收支与碳排放活动和群落特征的 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 花境植物固碳能力评估

以单位土地面积固碳量为衡量植物固碳能力的指标，该指标被证明比仅仅考虑光合速率更为科学、准确[20]。由表 4 可知，50 种花境植物单位土地面积的日固碳量排序为：柳枝稷>狼尾草>硫华菊>拂子茅>蓝雾花>松果菊>五星花>波斯菊>鼠尾草>月季>千屈菜>晨光芒>荷兰菊>斑叶芒，且日固碳量均大于 10 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$；根据年固碳量对花境植物进行排序为：狼尾草>柳枝稷>拂子茅>蓝雾花>松果菊>鼠尾草>月季>五星花>晨光芒>千屈菜>蒲棒菊>荷兰菊，且年固碳量均大于 2 $kg \cdot m^{-2}$。通过对单位土地面积日固碳量和年固碳量进行排序，从 50 种实验植物中筛选出了碳汇能力较强的种类，共 15 种，一年生草本植物中的高固碳种类有硫华菊、五星花、波斯菊、鼠尾草，多年生草本植物中的高固碳种类有柳枝稷、狼尾草、拂子茅、蓝雾花、松果菊、千屈菜、晨光芒、荷兰菊、斑叶芒、蒲棒菊，灌木中的高固碳种类有月季。

由表 3 还可知，一年生植物日固碳量的平均值高于多年生植物和灌木，一年生植物年固碳量的平均值与多年生植物的平均值差异较小且远高于灌木。实际上，中小型植物的固碳效益通常被忽视[21-22]，尽管每年的更新维持会造成高额的运输碳排放，但无可否认的是，一年生草本植物在 1 年的生长期内有着不逊色于多年生草本植物和灌木的固碳效益。因此，在花境设计中可以适量使用固碳能力较强的一年生草本植物。

2.2 花境群落碳收支量化分析与影响因子相关性

2.2.1 花境群落全生命周期碳收支评估

假设所有样地在第 2 年到第 5 年仍维持第 1 年的观赏效果（包括植物种类、数量等），花境每年的固碳量与第 1 年相同（表 4）。如表 5 所示，在全生命周期的各阶段中，交通运输碳排放在所有样地中占比为 70.8%～92.5%，是最主要的碳排放来源。如图 2 所示，所有花境样地在第

1 年未能实现碳固存和碳排放的平衡，在第 3 年和第 5 年，也只有样地 3 的碳收支>0，且呈现逐年正增长的态势。这表明多年生植物占比为 100% 的宿根花境能够在 3 年内实现碳平衡；仅维持 1 年的花境难以实现碳平衡，但长期维护的花境有机会获得较好的碳汇效益。

表 3　花境植物单位土地面积固碳量

序号	种名	LAI	日固碳量/（$g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$）	年固碳量/（$g \cdot m^{-2}$）	生长期/d
1	大花马齿苋	2. 13	4. 15	818. 46	197
2	硫华菊	3. 21	15. 69	1 820. 06	116
3	孔雀草	1. 75	9. 62	1 991. 20	207
4	夏堇	5. 12	9. 38	1 209. 83	129
5	鸡冠花	1. 51	3. 32	544. 12	164
6	鼠尾草	3. 35	11. 60	2 401. 24	207
7	五星花	4. 10	12. 38	2 289. 48	185
8	波斯菊	2. 08	12. 07	1 400. 35	116
一年生草本植物平均值		9. 78	1 559. 34	165. 13	
1	彩叶草	3. 34	5. 27	1 070. 73	203
2	天人菊	4. 42	7. 84	1 591. 04	203
3	金叶佛甲草	4. 16	4. 64	960. 01	207
4	四季秋海棠	3. 12	3. 13	648. 01	207
5	虎克四季秋海棠	4. 33	5. 73	1 088. 01	190
6	天门冬	2. 86	3. 38	700. 38	207
7	长春花	2. 38	6. 78	1 377. 20	203
8	蓝羊茅	2. 89	8. 93	1 849. 41	207
9	花叶玉簪	2. 87	6. 01	1 111. 33	185
10	马蔺	2. 53	5. 45	1 073. 54	197
11	玉带草	3. 74	5. 57	1 153. 35	207
12	木贼	3. 08	4. 20	869. 38	207
13	紫娇花	3. 39	4. 22	857. 54	203
14	荆介	2. 64	4. 90	931. 20	190
15	八宝景天	1. 30	0. 89	176. 03	197
16	鸢尾	4. 09	9. 62	1 952. 06	203
17	细茎针茅	3. 30	7. 10	1 469. 88	207
18	荷兰菊	3. 70	10. 29	2 027. 25	197
19	千屈菜	4. 10	11. 39	2 039. 35	179
20	银叶菊	2. 40	2. 84	587. 30	207
21	马鞭草	3. 24	7. 69	1 591. 93	207
22	假龙头	3. 83	8. 61	1 635. 45	190
23	玉簪	2. 56	5. 15	890. 48	173
24	蒲棒菊	3. 15	9. 83	2 034. 45	207
25	狼尾草	4. 63	17. 43	3 695. 11	212
26	黄菖蒲	2. 77	3. 01	637. 59	212
27	松果菊	4. 23	13. 94	2 648. 89	190
28	拂子茅	4. 23	14. 96	2 917. 75	195
29	斑叶芒	3. 76	10. 07	1 882. 40	187
30	蓝雾花	4. 37	14. 11	2 864. 69	203
31	晨光芒	3. 75	10. 50	2 131. 11	203
32	柳枝稷	4. 48	20. 11	3 659. 53	182
33	芦竹	4. 05	6. 88	1 424. 49	207
34	花叶芦竹	3. 84	7. 59	1 571. 82	207
多年生草本植物平均值		7. 88	1 562. 32	199. 44	
1	蓝花丹	2. 19	4. 72	977. 27	207
2	鹅掌柴	4. 72	8. 06	1 635. 73	203
3	变叶木	3. 71	3. 37	684. 47	203
4	绣球	3. 38	5. 47	1 110. 92	203
5	三角梅	2. 01	3. 05	619. 72	203
6	月季	4. 09	11. 40	2 314. 28	203
7	红车木	3. 79	5. 14	1 063. 61	207
8	木春菊	1. 73	7. 81	1 617. 52	207
灌木平均值		6. 13	1 252. 94	204. 50	

注：LAI 为植物叶面积指数。

表 4 花境样地植物种类及生活型比例概况

序号	样地名称	花境面积/m^2	花境类型	植物种类	一年生		多年生		灌木		年固碳量/kg
					面积/m^2	面积占比/%	面积/m^2	面积占比/%	面积/m^2	面积占比/%	
1	文化中心花境	49.3	一年生花境	12	25.6	51.9	21.4	43.4	2.3	4.7	61.49
2	天津大学青年湖南岸花境	65.3	一年生花境	22	35.4	54.2	28.1	43.0	1.8	2.8	96.04
3	文洁路花境	83.8	宿根花境	9	0	0	9	100	0	0	127.90
4	水上公园花境 A	48.6	宿根花境	17	10.9	22.4	35.45	72.9	2.25	4.7	82.97
5	水上公园花境 B	60.6	混合花境	19	28.88	47.7	22.35	36.9	9.4	15.4	92.93

表 5 全生命周期各阶段碳排放及总碳排放量 kg

序号	样地名称	运输碳排放	机械碳排放	灌溉碳排放	施肥碳排放	更新碳排放	总碳排放	3 年碳排放	5 年碳排放
1	文化中心花境	62.99	0.20	13.46	4.02	55.74	136.41	408.84	681.26
2	天津大学青年湖南岸花境	84.95	0.27	5.46	5.33	52.12	148.12	391.71	635.31
3	文洁路花境	127.77	0.34	22.88	6.84	0	157.83	217.26	276.70
4	水上公园花境 A	60.94	0.20	26.54	3.97	53.93	145.57	436.31	727.05
5	水上公园花境 B	79.27	0.36	47.39	7.08	53.93	171.50	510.19	848.88

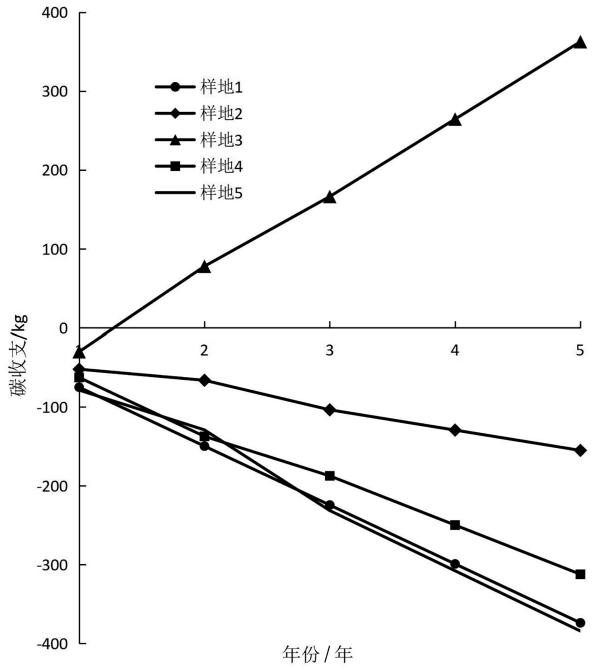


图 2 花境样地多年碳收支趋势图

2.2.2 花境样地群落碳收支与影响因子相关性

根据花境样地碳收支与各阶段碳排放的相关性分析，花境群落的更新碳排放与第 3 年的碳收支（$r=-0.977^{**}$，$P<0.01$）和第 5 年的碳收支（$r=-0.975^{**}$，$P<0.01$）呈极显著负相关关系，说明花境在更新过程中产生的运输碳排放越少，持续性碳收支越高。这一结果可以解释样地 3 的碳收支情况（表 4）：样地 3（宿根花境）的维持几乎不需要进行苗木更新，或容易实现就地取材更新，但其余样地会造成 1 年 1~2 次的更新碳排放，使碳收支逐年负增长。由此可知，植物更新模式会极大地影响花境的碳收支。其他碳排放活动与碳收支没有显著相关性，而运输碳排放与碳收支没有显著相关性，推测是由于样本的运输距离差异较小所导致的。在样本数据中，花境群落的植物数量、密度、平均冠幅、物种丰富度与年固碳量没有显著相关性。

2.3 花境群落碳收支评估模型与影响因子相关性

2.3.1 花境群落碳收支评估模型

根据植物群落碳汇及碳收支测算方法建立花境群落全生命周期碳收支评估模型（全年）：

$$B_{年}=S\times\sum_{i=1}^{3}(Q_i\times X_i)-[(C\times 9.1182)+(S\times 0.4287)] \quad (3)$$

式（3）中：$B_{年}$为花境的全年碳收支（kg）；S 是花境总面积（m^2）；Q_i是植物的单位土地面积年固碳量（$kg\cdot m^{-2}$）；X_i 是植物的面积占比（%）；C 是花境植物单次运输的油耗（L）。

根据模型建立花境长期碳收支预测运算程序（图 3）：$B_{(n-1)年}$是方案不变情况下的 n−1 年的碳收支，$n\geq 2$；$b_{(n-2)年}$是方案变化情况下的第 3 年及以上的碳收支。花境设计方案应至少保证长期碳收支 B 在第 5 年实现碳平衡。如果提出的花境设计方案不能实现碳平衡，就需要对方案输入的参数（包括花境总面积 S、植物单位土地面积年固碳量 Q_i、植物面积占比 X_i、年份 n）进行调整，

以确保其碳汇价值。

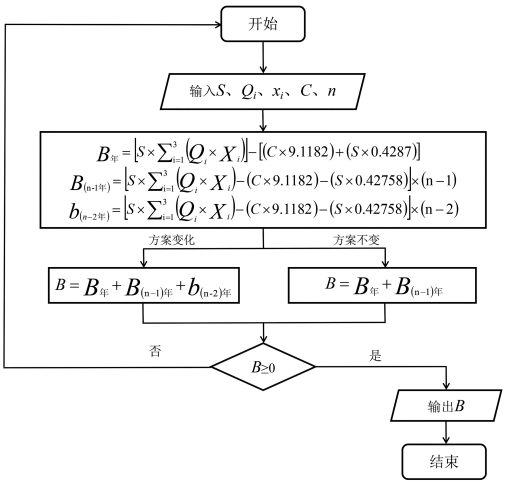


图 3　花境长期碳收支预测程序框图

2.3.2　花境模拟样本碳收支与影响因子相关性

1）运输距离。以花境碳收支评估模型为基础，苗木运输距离为变量，从 50～500 km 划分出 10 个花境样本，不同生活型比例均为 1/3，花境面积假设为 100 m^2。在相关性分析（图 4）中，运输距离与总碳排放呈极显著正相关（$P<0.01$），与碳收支呈现极显著负相关（$P<0.01$）。说明随着运输距离的增长，单程油耗增加，全年碳收支呈直线下降趋势。经计算，单程运输距离在82 km 时，最接近实现碳平衡。因此，为降低苗木运输碳排放，保证花境较好的碳汇效益，应尽量将苗木运输的单程距离控制在 82 km 以内。

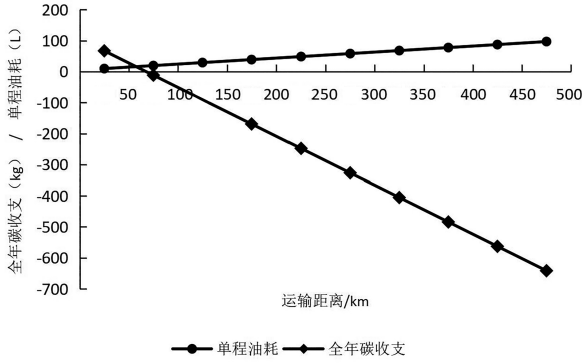


图 4　花境碳收支变化趋势

2）花境植物生活型比例。如图 5 所示，多年养护的花境更新模式假设为方案不变与方案变化两种情况。

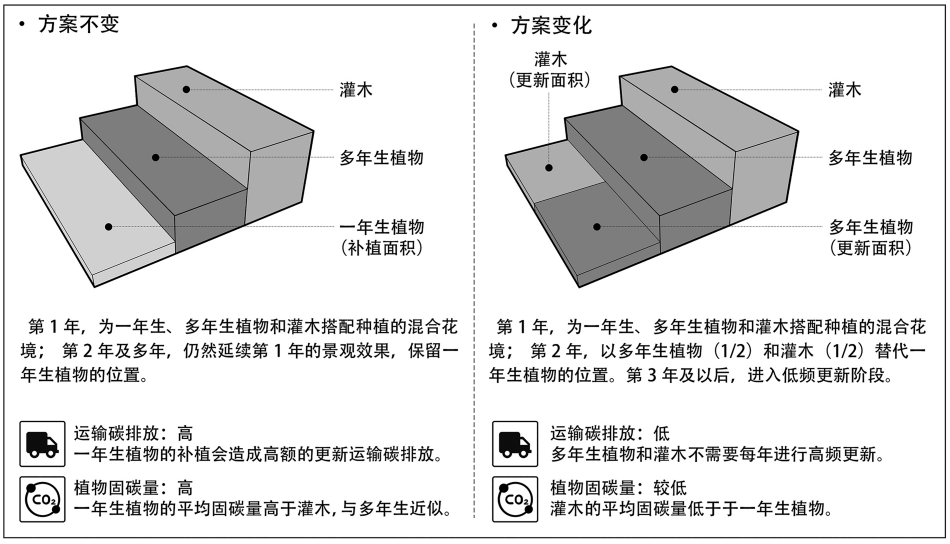


图 5　花境更新模式图示

以一年生植物面积占比为变量，从 10%～100%划分出 10 个花境样本，各花境中多年生植物和灌木的面积占比相等，花境面积假设为 100 m^2。花境群落碳收支与一年生植物面积占比的相关性分析见表 6 所示，一年生植物面积占比与 1 年碳收支、3 年碳收支（不变）和 5 年碳收支（不变）呈极显著正相关（$P<0.01$），与 3 年碳收支（变化）和 5 年碳收支（变化）呈极显著负相关（$P<0.01$）。这说明一年生植物面积占比越高，1 年的碳收支越高，方案不变的情况下，长期碳收支越高；一年生植物面积占比越低，方案变化的情况下，长期碳收支越高。花境群落碳收支的具体变化趋势如图 6 所示：在控制其他变量的情况下，只有一年生植物面积占比小于 50%

的情况下，进行方案变化的花境样本可以在第 5 年实现碳平衡；当一年生植物面积占比小于 40%，方案变化情况下的 3 年碳收支高于方案不变的情况；当一年生植物面积占比小于 70%时，方案变化情况下的 5 年碳收支高于方案不变的情况。

表 6 花境群落碳收支与一年生植物面积占比相关性分析

	一年生面积占比	1 年碳收支	3 年碳收支（不变）	5 年碳收支（不变）	3 年碳收支（变化）	5 年碳收支（变化）
一年生面积占比	1					
1 年碳收支	0.937**	1				
3 年碳收支（不变）	0.882**	0.979**	1			
5 年碳收支（不变）	0.817**	0.937**	0.989**	1		
3 年碳收支（变化）	−0.907**	−0.761*	−0.674*	−0.592	1	
5 年碳收支（变化）	−0.907**	−0.761*	−0.674*	−0.591	1.000**	1

注：** 表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关；* 表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关；下同。

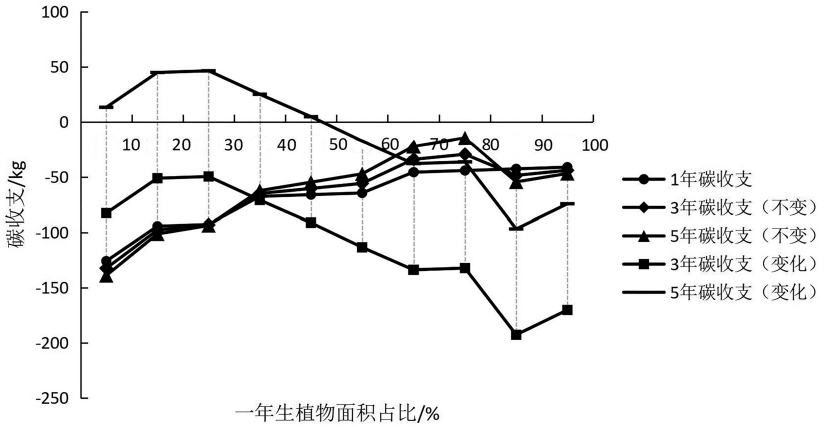


图 6 花境碳收支变化趋势（变量为一年生植物面积占比）

分别以多年生植物、灌木面积占比为变量，花境群落碳收支与多年生植物、灌木面积占比的相关性分析如表 7~8 所示，多年生植物、灌木面积占比与 1 年碳收支呈极显著负相关（$P<0.01$），说明多年生植物、灌木的面积占比越高，第 1 年的花境碳收支越低。花境群落碳收支的具体变化趋势如图 7~8 所示：在控制其他变量的情况下，多年生植物面积占比小于 60%或大于 80%的情况下，进行方案变化的花境样本可以在第 5 年实现碳平衡；无论灌木面积占比如何，进行方案变化的花境样本可以在 5 年内实现碳平衡，并且灌木面积占比为 100%时，方案变化与方案不变更新频率相同，可以在第 5 年获得最高的碳汇效益。此外，多年生植物面积占比为 100%时，方案变化与方案不变更新频率相同，可以在第 5 年获得最高的碳汇效益。除了多年生植物面积占比为 100%的特殊结果，无论花境中多年生植物、灌木面积占比如何，方案变化情况下的多年碳收支均大于方案不变的情况。

表 7 花境群落碳收支与多年生植物面积占比相关性分析

	多年生面积占比	1 年碳收支	3 年碳收支（不变）	5 年碳收支（不变）	3 年碳收支（变化）	年碳收支（变化）
多年生面积占比	1					
1 年碳收支	−0.908**	1				
3 年碳收支（不变）	−0.372	0.665*	1			
5 年碳收支（不变）	0.136	0.185	0.857**	1		
3 年碳收支（变化）	−0.081	0.423	0.932**	0.935**	1	

表 8　花境群落碳收支与灌木面积占比相关性分析

	灌木面积占比	1 年碳收支	3 年碳收支（不变）	5 年碳收支（不变）	3 年碳收支（变化）	5 年碳收支（变化）
灌木面积占比	1					
1 年碳收支	0.784**	1				
3 年碳收支（不变）	0.402	0.223	1			
5 年碳收支（不变）	0.174	−0.074	0.956**	1		
3 年碳收支（变化）	0.406	0.815**	0.008	−0.238	1	
5 年碳收支（变化）	−0.371	0.214	−0.306	−0.378	0.698*	1

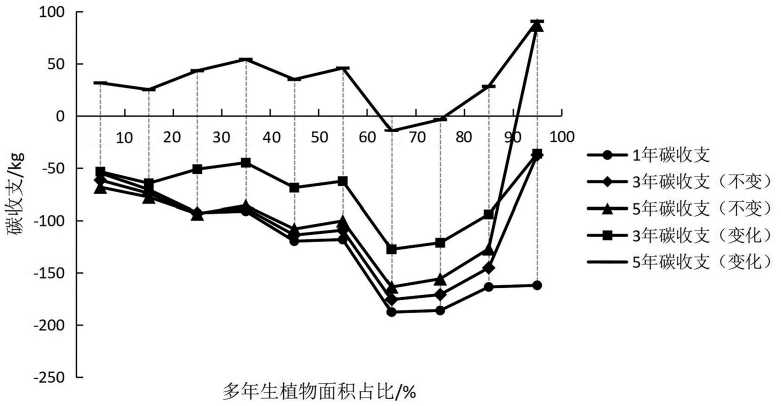


图 7　花境碳收支变化趋势（变量为多年生植物面积占比）

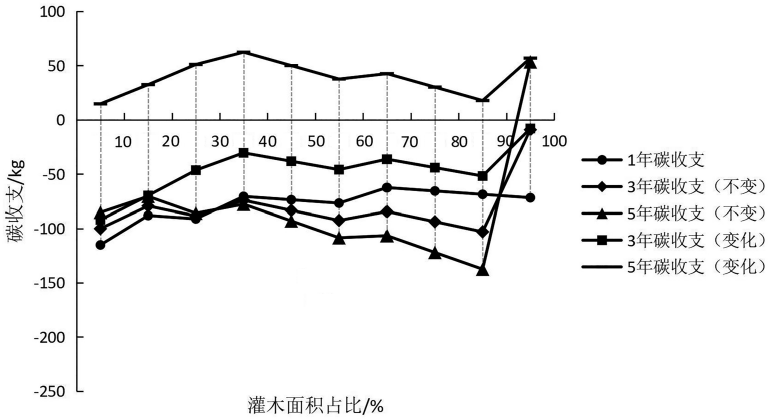


图 8　花境碳收支变化趋势（变量为灌木面积占比）

总之，不同生活型植物在花境群落中的面积比例会影响花境的碳收支。无论如何进行植物配置，均无法在第 1 年实现碳平衡；如表 9 所示，为使花境贡献出更高的碳汇效益，需要参考方案不变和方案变化这两种更新方案下的碳平衡比例，并做到长期维持（至少 5 年）。

表 9　5 年内实现碳平衡的花境群落生活型面积比例

方案更新模式	植物生活型	碳平衡比例	花境类型
方案不变	一年生植物	无	一年生花境
	多年生植物	仅 100%	宿根花境
	灌木	仅 100%	灌木花境
方案变化	一年生植物	x≤50%	混合花境或宿根花境或灌木花境
	多年生植物	x≤60%或 x>80%	混合花境或宿根花境
	灌木	0~100%	混合花境或灌木花境

注：多年碳收支假设为两种情况：1）方案不变，即从第 2 年开始，一年生植物的面积占比不变，保持一年两次的运输与更新频率；2）方案变化，即从第 2 年开始，一年生植物的面积占比由多年生植物（1/2）和灌木（1/2）替代，从第 3 年开始仅进行一年一次的苗木更新。

3）花境面积。以花境面积为变量，从 50～500 m^2 划分出 10 个花境样本，不同生活型比例均为 1/3，运输距离假设为 100 km。相关性分析如表 10 所示：花境面积与 1 年碳收支呈现极显著负相关（$P<0.01$），即在花境营造的第 1 年，花境面积越大，碳收支越低；花境面积与多年碳收支，无论是方案不变还是变化情况，均呈现极显著正相关关系，即在多年维持与养护的情况下，花境面积越大，碳收支越高。碳收支变化趋势如图 9 所示：随着面积的增长，全年碳收支总体上呈下降趋势；在多年碳收支上，无论方案不变或变化情况，花境面积在 150～200 m^2 时，3 年营造养护可以实现碳平衡；花境面积≥150 m^2 时，在花境维持养护的第 3 年，方案不变情况下的碳收支大于方案变化的碳收支，花境面积<150 m^2，则相反；无论面积大小，在花境营造的第 5 年，方案变化情况下的碳收支均大于方案不变的碳收支。因此，从长远来看，方案变化的更新模式可以获得更高的碳汇效益。

表 10 花境群落碳收支与花境面积相关性分析

	面积 S	1 年碳收支	3 年碳收支（不变）	5 年碳收支（不变）	3 年碳收支（变化）	5 年碳收支（变化）
面积 S	1					
1 年碳收支	−0.889**	1				
3 年碳收支（不变）	0.998**	−0.873**	1			
5 年碳收支（不变）	0.998**	−0.893**	0.999**	1		
3 年碳收支（变化）	0.979**	−0.813**	0.977**	0.973**	1	
5 年碳收支（变化）	0.997**	−0.867**	0.995**	0.994**	0.991**	1

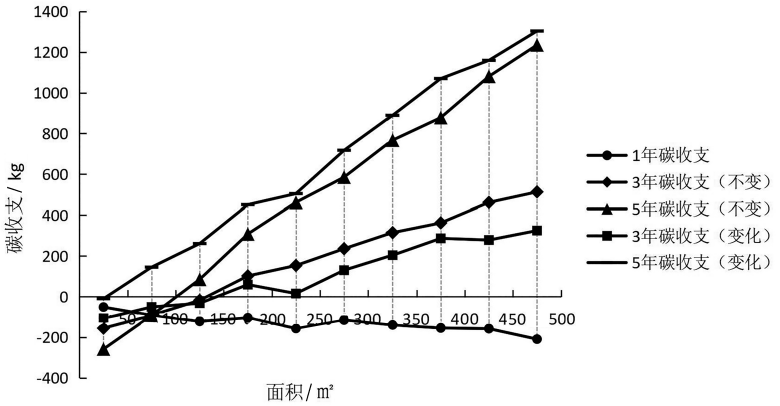


图 9 花境碳收支变化趋势（变量为花境面积 S）

3 结论与展望

通过实验法和模拟分析，筛选出了 15 种具有高固碳能力的花境植物，揭示了花境碳收支的现状，并分析了影响花境碳收支的主要影响因素，主要结论如下：1）大多数花境难以在第 1 年实现碳平衡，实现碳贡献有赖于长期的、稳定的维持与养护。合理配置的花境通常可以在 3～5 年内实现碳平衡。2）在城市碳循环过程中，花境的碳汇效益受植物固碳能力、植物生活型比例、花境面积、运输距离、更新频率等多重因素影响。3）合理配置的花境能够在 3～5 年内实现碳平衡。

尽管本研究具有较高的理论价值和实践价值，但仍存在不足之处：1）花境样本较少；2）花境碳收支预测模型以试验植物的平均固碳量为基础，以特级养护为标准计算碳排放，可能导致预测结果的偏差；3）预测模型没有考虑草本植物和灌木生物量的逐年增长趋势，长期碳收支的预测结果与实际结果相比可能偏低；4）只针对花境的直接碳汇效益进行评估，缺乏对间接碳汇效益、经济效益等的评价；5）未对低碳花境和审美偏好的相关性进行调查。因此，未来研究还需更多的实际样本来验证，花境碳收支的长期预测还需考虑植物生物量的变化趋势，碳汇效益评价还要

考虑间接碳汇效益和经济效益的评估，花境的生态效益评估还应该与其美学价值相结合。

参考文献

[1]王美仙,刘燕.花境及其在国外的研究应用[J].北方园艺,2006(4):135-136.

[2]王一祎,张秦英,李炅.基于 CiteSpace 的国内花境研究综述[J].园林,2023,40(2):109-115.

[3]冀媛媛,罗杰威,王婷,等.基于低碳理念的景观全生命周期碳源和碳汇量化探究:以天津仕林苑居住区为例[J].中国园林,2020,36(8):68-72.

[4]TANG F Y. Carbon footprint research of landscape engineering based on life cycle analysis—take the unoccupied space landscape engineering of Wuhan optics valley road (optics valley road one—Liufang road section) for example[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,584/585/586:695-704.

[5]PARK H M,JO H K.Ecological design and construction strategies through life cycle assessment of carbon budget for urban parks in Korea[J].Forests,2021,12(10):1399.

[6]KUITTINEN M,MOINEL C,ADALGEIRSDOTTIR K.Carbon sequestration through urban ecosystem services A case study from Finland[J].Science of the Total Environment,2016,563:623-632.

[7]宋亮平,楚新正,杨晶.艾比湖湿地边缘带典型植物固碳能力研究[J].干旱区地理,2016,39(1):136-143.

[8]CHAROENKIT S,YIEMWATTANA S.Role of specific plant characteristics on thermal and carbon sequestration properties of living walls in tropical climate[J].Building and Environment,2017,115:67-79.

[9]SEYEDABADI M R,KARRABI M,NABATI J.Investigating green roofs' CO_2 sequestration with cold-and drought-tolerant plants (a short- and long-term carbon footprint view)[J].Environmental Science and Pollution Research International,2022,29(10):14121-14130.

[10]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.

[11]郝鑫杰,李素英,王继伟,等.呼和浩特市 13 种绿化植物固碳释氧效率的比较研究[J].西北植物学报,2017,37(6):1196-1204.

[12]陈月华,廖建华,覃事妮.长沙地区 19 种园林植物光合特性及固碳释氧测定[J].中南林业科技大学学报,2012,32(10):116-120.

[13]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(04):34-36.

[14]韩焕金.哈尔滨市主要植物生理生态功能研究[J].江苏林业科技,2005,32(4):5-10.

[15]谭庆,童俊,戢小梅,等.武汉 31 种野生地被植物的固碳释氧和降温增湿研究[J].中国园林,2010,26(8):93-95.

[16]赵艳玲,阚丽艳,车生泉.上海社区常见园林植物固碳释氧效应及优化配置对策[J].上海交通大学学报(农业科学版),2014,32(4):45-53.

[17]汤红丽.高校校园绿地植物碳收支量化及优化研究:以天津大学校园绿地为例[D].天津:天津大学,2021.

[18]萧箫,陈彤,郑中华,等.上海公园绿化养护碳排放量计算研究[J].上海交通大学学报(农业科学版),2013,31(1):67-71.

[19]刘洪涛,陈同斌,郑国砥,等.有机肥与化肥的生产能耗、投入成本和环境效益比较分析:以污泥堆肥生产有机肥为例[J].生态环境学报,2010,19(4):1000-1003.

[20]徐玮玮,李晓储,汪成忠,等.扬州古运河风光带绿地树种固碳释氧效应初步研究[J].浙江林学院学报,2007,24(5):575-580.

[21]WANG Y N,CHANG Q,LI X Y.Promoting sustainable carbon sequestration of plants in urban greenspace by planting design:a case study in parks of Beijing[J].Urban Forestry & Urban Greening,2021,64:127291.

[22]褚芷萱,马锦义,邵海燕,等.不同应用类型园林树木固碳能力[J].中国城市林业,2022,20(1):126-129.