研究论文

成都市模块式立体绿化草本植物的选择与生长评价*

李欣蔓 周 波 石 杨 赵薇可

四川大学建筑与环境学院 成都 610065

摘要：【目的】研究立体绿化垂直空间的环境特征并筛选合适的植物种类进行配置，以最大化发挥其生态效能，为后续立体绿化建设提供科学决策依据。【方法】选取 11 种成都市常见的草本植物构建模块式立体绿化进行试验，采用统计分析法、熵权 TOPSIS 法和 AHP 层次分析法，分析立体绿化种植槽微环境，探究不同朝向和高度适宜种植的植物种类。【结果】自然环境因子与种植槽微环境因子具有显著差异性（$P<0.05$），种植槽微环境具有弱光、低温、高湿的环境特征。种植槽微环境下各植物生长状态有所差异，其中肾蕨、吊兰生长较为稳定；铁线蕨、虎耳草在试验后期有恢复迹象；豆瓣绿、红掌生长逐渐衰退。此外，肾蕨、春羽可适应各朝向环境，而虎耳草、红掌等植物表现对北向更为喜爱；春羽、吊兰具有高存活、低倒伏优势，可匹配上层强风区；红掌、嫣红蔓具有长花期、高色彩度优势，能为中层增添美观度；豆瓣绿、铁线蕨有高耐涝耐阴优势，优先考虑种植于低层。【结论】在未来立体绿化建造中，应充分关注垂直种植空间的环境特征，并根据不同朝向和高度的植物生长状态筛选植物种类。

关键词：模块式；立体绿化；综合评价；植物选择；成都市

DOI：10.12169/zgcsly.2025.04.03.0003

Selection and Growth Evaluation of Modular Three-Dimensional Greening Herbaceous Plants in Chengdu

Li Xinman Zhou Bo Shi Yang Zhao Weike

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: 【Objective】 Studying the environmental characteristics of the vertical space of three-dimensional greening and selecting suitable plant species for configuration can maximize its ecological efficiency and provide a scientific decision-making basis for subsequent three-dimensional greening construction. 【Method】 Eleven common herbaceous plants in Chengdu were selected to construct modular three-dimensional greening for experiments, and statistical analysis, entropy-weighted TOPSIS method and AHP analytic hierarchy process were used to explore the orientation and height of plants suitable for planting on the basis of analyzing the microenvironment of three-dimensional greening planting troughs. 【Result】 There were significant differences between the natural environmental factors and the planting trough microenvironmental factors ($P<0.05$), and the microenvironment of the planting trough had the environmental characteristics of low light, low temperature and high humidity. In this environment, the growth status of each plant was different, and the growth of *Nephrolepis cordifolia* and *Chlorophytum comosum* was relatively stable. *Adiantum capillus-veneris* and *Saxifraga stolonifera* showed signs of recovery in the later stage of the experiment; The growth of *Peperomia tetraphylla* and *Anthurium andraeanum*

收稿日期：2025-04-03

* 基金项目：市级重点研发支撑计划科技项目（2022-YF05-00480-SN）

第一作者：李欣蔓（2001- ），女，硕士生，研究方向为城乡规划与设计。E-mail：947522280@qq.com

通信作者：周波（1964- ），男，博士，教授，研究方向为城乡规划与设计。E-mail：zxt001@163.com

gradually declined. In addition, *Nephrolepis cordifolia* and *Thaumatophyllum bipinnatifidum* could adapt to the environment of each orientation, while plants such as *Saxifraga stolonifera* and *Anthurium andraeanum* were more fond of the north. *Thaumatophyllum bipinnatifidum* and *Chlorophytum comosum* had the advantages of high survival and low lodging, which could match the upper strong wind area. *Anthurium andraeanum* and *Hypoestes phyllostachya* have the advantages of long flowering period and high color, which can add aesthetics to the middle layer; *Peperomia tetraphylla* and *Adiantum capillus-veneris* have the advantages of high waterlogging tolerance and shade tolerance, and priority is given to planting in low layers. 【Conclusion】 In the future construction of three-dimensional greening, full attention should be paid to the environmental characteristics of the vertical planting space, and plant species should be screened according to the growth state of plants in different orientations and heights.

Keywords: modular; three-dimensional greening; comprehensive evaluation; Plant selection; Chengdu city

随着城市化的推进，城市生态失衡与气候变暖等问题日益显著。绿地系统虽然具备改善空气质量、调节城市气候的功能[1]，但城市规划留给绿地的建设面积有限，故立体绿化这种垂直绿化形式成为了实现城市增绿的重要手段[2]。建设立体绿化不仅能够缓解城市用地紧张和热岛效应[3]，还能起到局部降温增湿、滞尘杀菌等生态作用。当前模块式立体绿化凭借其自由选择度高、可移动性强、施工便捷和结构稳定等突出优势逐渐成为未来立体绿化大规模应用的首选[4]。因此，深入分析模块式立体绿化适宜种植的植物种类对推动城市生态建设可持续发展具有一定现实意义。

当前立体绿化植物选择研究主要围绕植物特性、地域气候和场地环境 3 大要素展开。部分研究基于植物防风降噪、滞尘净化等生态效能，针对性配置在居住区、医院和校园等场景[5-7]。另有学者主张依据植物色相变化与季相交替等原则构建植物种植层次。大多数学者倡导根据地域气候条件优选乡土植物[8]，或者根据植物适应性选择抗旱、耐热的植物种类。而具体到场地环境，有研究解析不同立交桥的结构特征以匹配植物种类与配置方式[9]，或者基于不同栽培基质中的植物生长状态差异选择植物种类[10]。

综上，目前针对立体绿化植物选择研究较多停留于定性化描述层面，且植物选择方式也适用于平面绿化空间，未充分关注立体绿化作为竖直立面空间具有朝向和高度的区别，这也将导致植物间的生长状态存在差异。基于此，本文选取 11 种适宜成都市生长的草本植物进行试验，评价其在各朝向和高度的生存适应性，揭示植物生长状态和空间配置规律，补充垂直维度植物选择机制，为后续立体绿化建设提供科学决策依据。

1　研究方法

1.1　试验场地

试验场地位于成都市四川大学江安校区（103°59′57.624″E，30°33′26.856″N）。地处亚热带湿润季风气候区，气候温和，雨量充沛。

1.2　试验材料

通过对成都市首批启动创建的 25 个未来公园社区中立体绿化进行实地调研，结合试验地气候、经济易得和植物体型大小等条件[11]，选定 11 种草本植物的成熟植株移植于种植槽内进行研究（表 1），每种植物 36 株，共计 396 株草本植物。

表 1　试验植物材料

中文名称	拉丁名	常见应用场景
豆瓣绿	*Peperomia tetraphylla*	阳台绿化
吊兰	*Chlorophytum comosum*	阳台绿化
矾根	*Heuchera micrantha*	墙体绿化
铁线蕨	*Adiantum capillus-veneris*	阳台绿化
狐尾天门冬	*Asparagus densiflorus* ‘Myersii’	墙体绿化
嫣红蔓	*Hypoestes phyllostachya*	墙体绿化
虎耳草	*Saxifraga stolonifera*	墙体绿化
肾蕨	*Nephrolepis cordifolia*	墙体绿化
春羽	*Thaumatophyllum bipinnatifidum*	墙体绿化
红掌	*Anthurium andraeanum*	墙体绿化
竹芋	*Maranta arundinacea*	墙体绿化

1.3　数据测定

试验数据测定时间为 6 月 13 日—8 月 28 日每隔 3 天的 13 ：00，共记录 20 次数据。使用

DL336011 手持温湿度计测量环境温度和湿度，Testo625 温湿度计测量土壤温度和湿度，Tes-1330A 数字式照度计测量环境照度和叶片照度，YMJ-B 便捷式叶片面积测量仪测量叶片面积与叶片长度，其他生长性状数据采用游标卡尺测量。其中，新芽数测定为移植后植物新发叶芽数[12]；冠幅宽度为植物冠层横向扩展的幅度[13]；基部直径为茎贴近土壤处的粗度或者丛生区域的整体直径[14]。

1.4 试验设计

搭建 12 格×10 格的四面朝向小型模块式立体绿化，一面共 120 个种植槽，顶层及空余种植槽用于安置滴灌管线网络。种植槽一格长 8 cm、高 14 cm、厚 7 cm，槽内深度为 10 cm。一面模块式立体绿化由 11 列不同植物组成，竖向同种植物共 9 株，定期记录植物性状并分析植物生长状态。

构建植物生长状况综合评价指标体系分析植物在不同朝向的生长状态（表 2），同时根据垂直梯度环境建立分层评价指标体系分析植物在不同高度的生长状态（表 3）。分层指标体系中上层相对光照量大，风速较高[15]，增加耐高温、抗风性等指标；中层适度光照、温度稳定、通风佳，优先选择美观性指标；下层弱光照、高湿度、通风较差，适当添加耐阴耐涝等抗逆性指标[16]。

表 2 植物生长状况综合评价指标体系

目标层（A）	一级指标层（B）	二级指标层（C）	计算方法
植物生长状况综合评价	生长幅度（B1）	C1 叶片长度变化	ΔL（cm）= $L_T - L_0$
		C2 基部直径变化	ΔD（cm）= $D_T - D_0$
		C3 冠幅宽度变化	ΔP（cm）= $P_T - P_0$
	生长活力（B2）	C4 生长速度	v（cm · d^{-1}）= $\Delta L / t$
		C5 新芽率	（新发芽株数/初始植株数）×100%
		C6 存活率[17]	（存活植物数/初始植株数）×100%
	生存适应（B3）	C7 旺盛率	（健康植株/存活植物数）×100%

注：L_T代表试验末叶长；L_0代表试验初叶长；D_T代表试验末基部直径；D_0代表试验初基部直径；P_T代表试验末冠幅宽度；P_0代表试验初冠幅宽度；v 代表生长速率；t 代表试验时间；Δ 代表变化量。

表 3 不同高度下植物种植效益综合评价指标体系

目标层(A)	一级指标层(B)	二级指标层(C)	计算方法
上层(A1)(1.3~1.8 m)	耐高温(B1)	C1 耐晒性	卷曲叶片数量/总叶片数量
		C2 灼伤面积	灼伤面积/叶片面积
	抗风性(B2)	C3 倒伏率	(倒伏株数/总株数)×100%
		C4 基部直径	根茎贴近土壤处的粗度
	存活状态(B3)	C5 存活率	(存活植物数/初始植株数)×100%
		C6 旺盛率	(健康植株/存活植物数)×100%
中层(A2)(0.8~1.3 m)	景观性(B4)	C7 花期时长	总计开花时长
		C8 色彩斑斓度	总计色彩种类
	存活状态(B3)	C5 存活率	(存活植物数/初始植株数)×100%
		C6 旺盛率	(健康植株/存活植物数)×100%
下层(A3)(0.1~0.7 m)	耐阴耐涝(B6)	C9 比叶面积	叶片面积/干重的比值
		C10 根系健康	涝渍条件存活植物/总植株数
	存活状态(B3)	C5 存活率	(存活植物数/初始植株数)×100%
		C6 旺盛率	(健康植株/存活植物数)×100%

1.5 数据分析

1）统计分析法。采用成对样本 t 检验分析自然天气与种植槽中 3 组成对环境因子[18]；重复测量方差分析植物生长性状的时间序列数据[19]；相关性分析用于探究环境数据与植物生长数据的相关程度[20]。分析软件为 IBM SPSS Statistics 26，绘图软件使用 Origin 2020。

2）熵权 TOPSIS 法。将数据进行归一化标准

处理，使用熵值法计算出权重系数（采用四面朝向数据的平均值），最后根据所求的权重对四面朝向进行 topsis 分析，计算出得分结果与综合排序[21]。

3）AHP 层次分析法。针对不同高度植物种植效益评价的主观性特点，采用 AHP 层次分析法进行综合评价[22]。有效收集 20 份来自风景园林、城乡规划等领域专家问卷，上、中、低层判断矩阵 CR 等检验值均小于 0.1。

2　结果与分析

2.1　立体绿化种植槽微环境与植物生长的关系

2.1.1　种植槽微环境

试验期间平均环境照度为 15 775.50 Lux，平均天气温度为 31.85 ℃，平均天气湿度为 62.52%（图 1）。种植槽内的植物平均叶片照度为 6 884.58 Lux，平均土壤温度为 28.46 ℃，平均土壤湿度为 69.68%（图 2）。

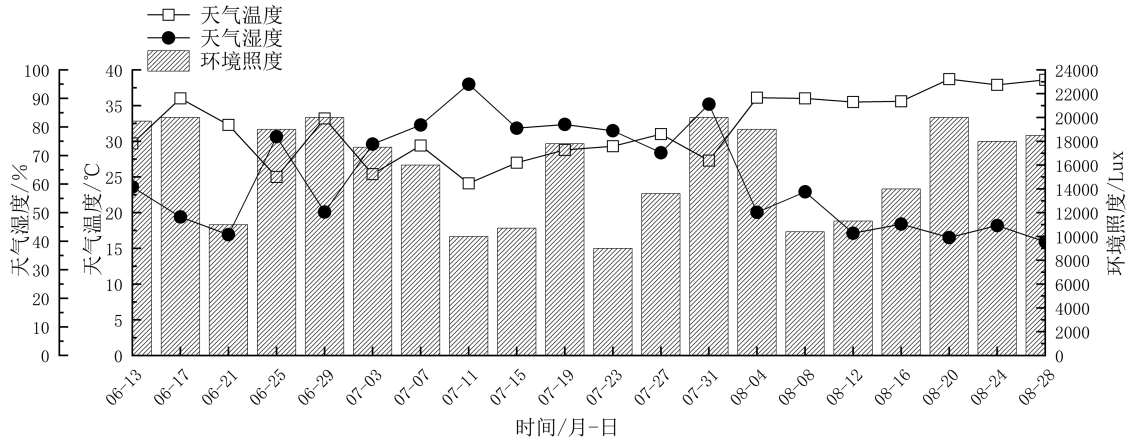


图 1　试验期间温湿度、环境照度变化

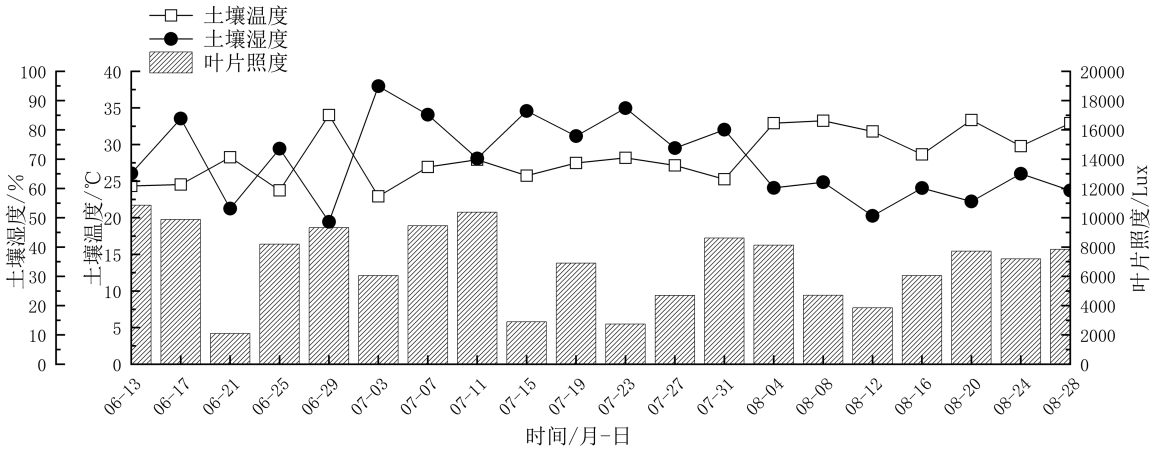


图 2　试验期间种植槽微环境因子变化

成对 t 检验结果显示（表 4），3 对环境因子均存在显著差异（$P<0.05$）。其中，天气温度显著高于土壤温度，天气湿度显著低于土壤湿度，环境照度显著大于叶片照度。

表 4　环境因子成对 t 检验

环境因子对	标准误差平均值	标准偏差	配对差值标准误差平均值	t	Sig（双尾）
天气温度-土壤温度	3.39	3.196	0.71	3.33	0.003
天气湿度-土壤湿度	-7.16	12.97	2.90	-2.82	0.011
环境照度-叶片照度	8 890.92	5 677.46	1 269.52	7.00	<0.001

部分植物在土壤温度、土壤湿度或叶片照度中存在显著差异（$P<0.05$），如肾蕨、豆瓣绿和吊兰获得的平均光照强度显著（$P<0.05$）高于矾根、铁线蕨、嫣红蔓和虎耳草（图 3A）；豆瓣绿、铁线蕨、嫣红蔓、虎耳草平均土壤温度显著（$P<0.05$）高于吊兰、肾蕨和春羽（图 3B）；吊兰的土壤湿度显著（$P<0.05$）高于豆瓣绿、铁线蕨、嫣红蔓和虎耳草（图 3C）。

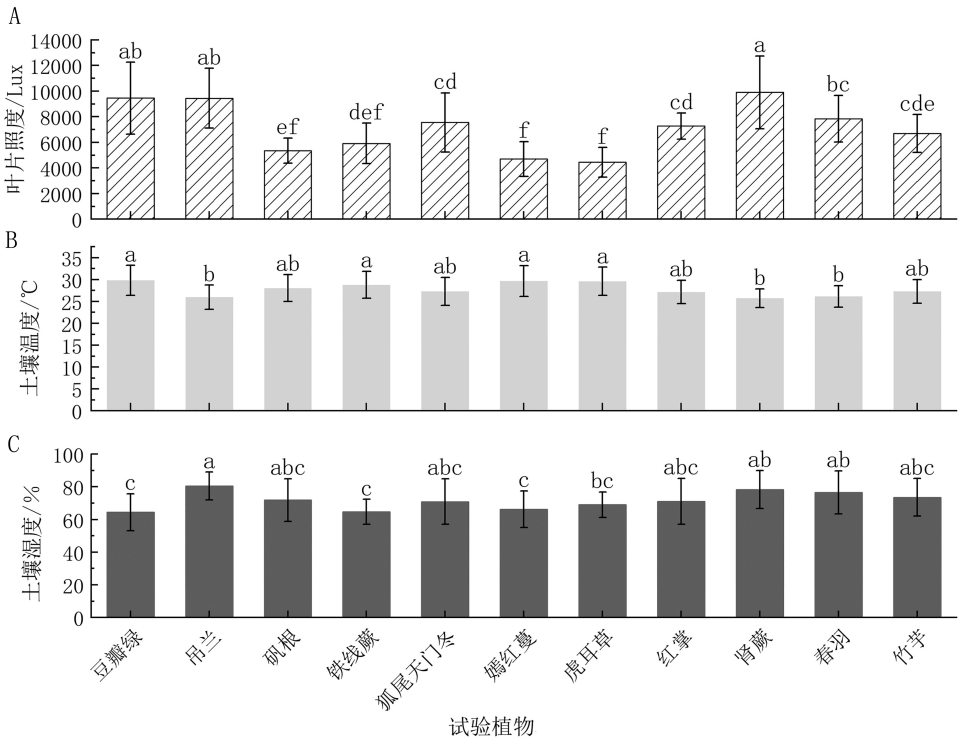


图 3 各植物种植槽微环境因子均值比较

2.1.2 植物生长性状

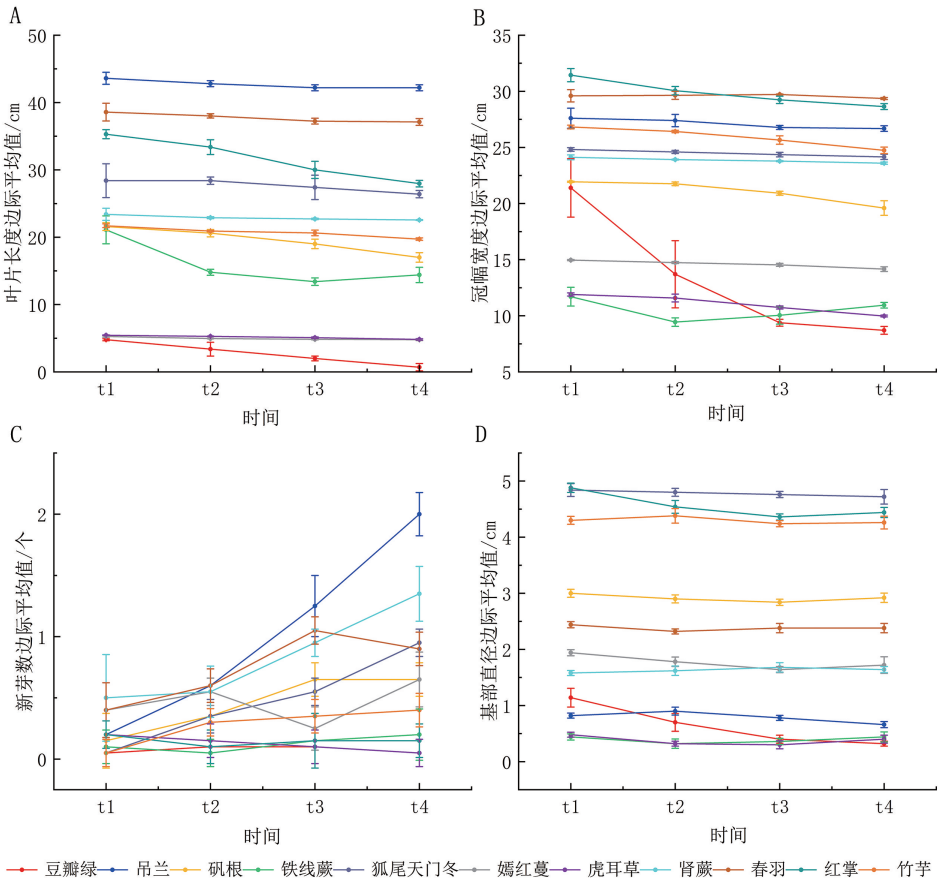
从表 5 可以看出，各植物在叶片长度、冠幅宽度、新芽数和基部直径上具有显著（$P<0.001$）差异，其中组内效应显著表明所有植物性状随时间推进显著增加或减少，组间效应显著代表不同植物在各性状上具有差异，组内 * 组间效应显著表示不同植物间的性状增速有差异。叶片长度变化上，所有植物叶片长度随着时间推进而减少，红掌、矾根和豆瓣绿下降速度明显快于其他植物，铁线蕨呈现先下降后增加的趋势（图 4A）；各植物冠幅宽度呈现整体下降趋势，吊兰、春羽、竹芋和肾蕨变化量不大，豆瓣绿从 7 月份开始急剧下降，铁线蕨呈现先下降后上升趋势（图 4B）；各植物新芽数呈现随着时间推进而增加的趋势，红掌、竹芋和铁线蕨新芽数保持在 1 个左右，吊兰、肾蕨新芽数在试验末期保持 2 个左右（图 4C）；基部直径整体随时间推进而减少，红掌、铁线蕨和虎耳草基部直径呈现先下降后上升的趋势，嫣红蔓、豆瓣绿基部直径减少幅度明显（图 4D）。

表 5 各植物生长性状的重复测量方差分析

效应类型	叶片长度	冠幅宽度	新芽数	基部直径
组内效应	$F=153.64$ $P<0.001$	$F=193.21$ $P<0.001$	$F=103.359$ $P<0.001$	$F=56.75$ $P<0.001$
组间效应	$F=3\,624.78$ $P<0.001$	$F=1\,301.71$ $P<0.001$	$F=47.3$ $P<0.001$	$F=10\,337.8$ $P<0.001$
组内 * 组间效应	$F=32.93$ $P<0.001$	$F=92.03$ $P<0.001$	$F=16.28$ $P<0.001$	$F=10.54$ $P<0.001$

2.1.3 种植槽微环境因子与植物性状相关性

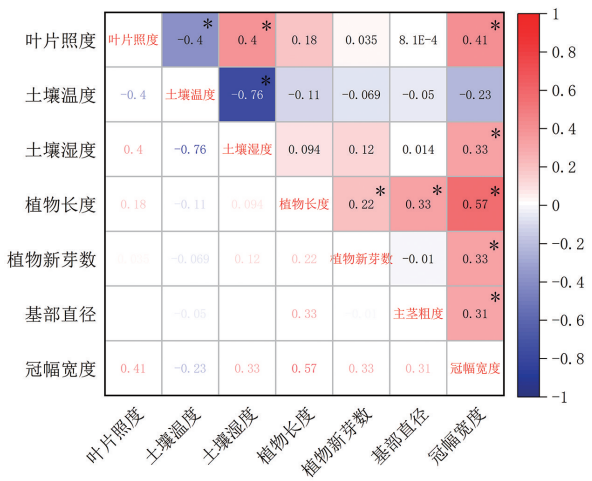
由图 5 可知，部分变量间存在显著（$P<0.05$）相关性。环境因子中，土壤温度与土壤湿度、叶片照度与土壤温度呈现显著负相关，叶片照度与土壤湿度呈现显著正相关。生长性状中，冠幅宽度与植物叶片长度、植物新芽数、主茎粗



注：边际平均值代表不同条件下的平均效应；X 轴将试验时期分为 4 个时间段，其中 t1（6 月 13—29 日）、t2（7 月 3—19 日）、t3（7 月 23 日—8 月 8 日）、t4（8 月 12—28 日）。

图 4　各植物生长性状均值比较

度呈显著正相关性，是判断植物生长状况的重要因子。环境因子与植物性状之间，土壤温度与植物生长都呈现弱负相关，叶片照度和土壤湿度与冠幅宽度呈现显著正相关。



注：红色代表正相关；蓝色代表负相关；数字代表相关性系数；＊表示 $P<0.05$。

图 5　植物种植槽微环境因子与生长性状相关性分析热图

2.2　模块式立体绿化各朝向生存适应性评价

从表 6~7 可以看出，东向生长的植物中春羽得分最高，虎耳草、铁线蕨和豆瓣绿的得分较低；南向生长的植物中肾蕨的得分最高，铁线蕨和豆瓣绿的评价分数相对较低；西向生长的植物中吊兰得分最高，豆瓣绿评价分数最低；北向生长的植物中春羽得分最高，铁线蕨、豆瓣绿评价分数较低。

表 6　植物生长状况评价体系权重

评价指标	信息熵值 e	信息效用值 d	权重系数 w/%
叶片长度变化	0.96	0.04	9.18
新芽率	0.91	0.09	18.69
基部直径变化	0.90	0.10	21.19
冠幅宽度变化	0.96	0.04	8.91
生长速度	0.96	0.04	9.18
存活率	0.92	0.08	16.62
旺盛率	0.92	0.08	16.22

表 7 不同朝向下植物生长状态熵权 TOPSIS 评价

朝向	结果	豆瓣绿	吊兰	矾根	铁线蕨	狐尾天门冬	嫣红蔓	虎耳草	肾蕨	春羽	红掌	竹芋
东（E）	D+	0.87	0.26	0.56	0.65	0.44	0.35	0.59	0.27	0.16	0.39	0.27
	D−	0.25	0.84	0.6	0.54	0.66	0.74	0.55	0.83	0.9	0.71	0.82
	C	0.22	0.76	0.52	0.45	0.6	0.68	0.48	0.76	0.85	0.65	0.75
	排序	11	2	8	10	7	5	9	3	1	6	4
南（S）	D+	0.81	0.3	0.5	0.82	0.42	0.44	0.32	0.16	0.23	0.44	0.34
	D−	0.43	0.85	0.74	0.48	0.68	0.84	0.74	0.92	0.83	0.63	0.7
	C	0.35	0.74	0.6	0.37	0.62	0.66	0.67	0.85	0.78	0.59	0.67
	排序	11	3	8	10	7	6	4	1	2	9	5
西（W）	D+	0.79	0.08	0.5	0.66	0.46	0.44	0.2	0.23	0.27	0.74	0.28
	D−	0.44	0.96	0.74	0.51	0.79	0.82	0.83	0.89	0.84	0.5	0.8
	C	0.36	0.92	0.6	0.43	0.63	0.65	0.76	0.8	0.76	0.4	0.74
	排序	11	1	8	9	7	6	2	3	4	10	5
北（N）	D+	0.9	0.45	0.47	0.78	0.56	0.56	0.24	0.16	0.16	0.51	0.49
	D−	0.33	0.84	0.77	0.39	0.68	0.69	0.82	0.9	0.91	0.72	0.77
	C	0.27	0.65	0.62	0.33	0.55	0.55	0.78	0.85	0.85	0.58	0.61
	排序	11	4	5	10	9	8	3	2	1	7	6

注：D+和 D−分别表示评价对象与正负理想解的距离；C 表示评价对象与最优方案的接近程度，评价结果按 C 值排序。

2.3 模块式立体绿化植物垂直分层评价

由表 8～9 可知，在限定本试验中的 11 种植物种类情况下，3 层中得分较高的即为推荐种植层级。上层得分较高的有吊兰、肾蕨等 6 种植物，具有低倒伏，粗基茎等优势；中层得分较高的有嫣红蔓、红掌，具有高花期、多色彩的优势，低层得分较高的有铁线蕨、虎耳草等 3 种植物，具有高耐涝、耐阴的优势。

表 8 AHP 法立体绿化分层指标体系权重

目标层（A）	二级指标层（C）	权重
上层	C1 耐晒性	0.11
	C2 灼伤面积	0.57
	C3 倒伏率	0.22
	C4 基部直径	0.22
	C5 存活率	0.26
	C6 旺盛率	0.13
中层	C7 花期时长	0.33
	C8 色彩斑斓度	0.17
	C5 存活率	0.38
	C6 旺盛率	0.13
低层	C9 比叶面积	0.50
	C10 根系健康	0.25
	C5 存活率	0.19
	C6 旺盛率	0.06

表 9 不同高度下植物种植效益评分

植物名称	上层得分	中层得分	低层得分	推荐层级	优势指标
豆瓣绿	0.02	0.09	0.25	低层	高耐涝(0.25)
吊兰	0.89	0.56	0.63	上层	低倒伏(0.22)
矾根	0.86	0.65	0.45	上层	粗基茎(0.23)
铁线蕨	0.29	0.07	0.87	低层	高耐阴(0.5)
狐尾天门冬	0.87	0.57	0.33	上层	低倒伏(0.22)
嫣红蔓	0.77	0.83	0.5	中层	叶片色彩(0.22)
虎耳草	0.65	0.64	0.79	低层	高耐阴(0.33)
肾蕨	0.88	0.48	0.83	上层	低倒伏(0.22)
春羽	0.86	0.57	0.39	上层	高存活(0.26)
红掌	0.70	0.87	0.23	中层	长花期(0.33)
竹芋	0.91	0.79	0.57	上层	高存活(0.26)

3 讨论

3.1 种植槽微环境具有弱光、低温、高湿的环境特征

种植槽的半封闭环境导致植物接收的平均光照强度均低于平均环境照度，种植槽中的土壤温度都低于平均环境温度，这与前人研究结果中植物墙可以使植被表面冷却的结论相似[23-24]，植物墙的土壤湿度略高于环境湿度的结论与 Susorova

等[25]的研究结果一致。造成种植槽微环境与自然环境不同的原因主要与植物蒸腾作用、种植盒材质和土壤基质等有关[26]。其中，各植物所接收的光照强度产生差异的主要原因是叶片长度和形态大小的不同，如肾蕨、吊兰和豆瓣绿因叶片分支多且叶片较长所接收的光照强度相对较高，其茂密叶片遮蔽导致土壤温度低于其他植物，与 Charoenkit 等[23]认为叶片密集的植物降温能力更强的结论类似。较为特殊的是豆瓣绿因叶片的大量掉落，种植盒中的干旱土壤与气候温度和湿度相近。

3.2　立体绿化植物生长性状具有差异性表现

因试验时间处于夏季高温期，植物性状除新芽数增加外，叶片长度、冠幅宽度和基部直径都有所下降，这与前人研究的在高温胁迫下植物生长受影响的结论相似[27-28]。根据植物不同的生长状态可以将其分为稳定型、恢复型与衰退型 3 类。肾蕨、吊兰、春羽这类稳定型植物在试验的高温期间表现出显著的生理稳定性，可以纳入立体绿化植物参考范围；铁线蕨和虎耳草这类恢复型植物的生长性状都出现先下降后上升的趋势，表明试验初期这些植物长势欠佳但后期仍有一定自我调节的能力；相比之下，豆瓣绿、红掌这类衰退型植物在试验初期生长性状出现明显减少趋势，需要重新考虑是否合适作为室外立体绿化种植的植物种类。受限于本试验的试验周期，不排除在更长的时间内这些植物会恢复生长，后续研究可以增加试验天数以研究植物的长期生长表现。

3.3　植物生长状态显示对种植朝向有偏好性差异

熵权 TOPSIS 评价结果揭示，不同植物对朝向适应性存在差异，与前人分析的立体绿化朝向会影响植物的生长发育的结论一致[29]，其认为植物在南向和西向的生长情况比东向略有延迟。本试验根据排序结果大致可以将植物分为朝向广适型与朝向特殊匹配型，其中肾蕨、春羽和吊兰这类朝向广适型植物在各朝向的平均得分都较高，种植时对朝向没有特殊需求。虎耳草、红掌这类朝向特殊匹配型植物在不同朝向的排序有变化，结果显示其更适宜种植在北向。因本试验植物种类有限，后续可以扩大试验种类范围，筛选不同朝向下更合适的植物种类。

3.4　筛选植物生长优势特性以适配立体绿化垂直生态位

通过筛选植物生长优势指标，以动态匹配上层强风区、中层景观带、低层阴蔽区的环境需求，与前人提出立体绿化应根据高度差异进行植物种类选择的观点一致[30]。本试验中，上层适宜种植肾蕨、狐尾天门冬、吊兰等具有较好抗风性的植物[15]，其叶片也能为中下层的植物遮挡大部分直射光；中层可以选择红掌、嫣红蔓等长花期和高色彩度的植物以提升绿化景观效果；而低层更容易受到水胁迫的影响[16]，可选择豆瓣绿、铁线蕨等耐阴性、耐涝性强的植物。对于不同高度下没有明显生长的差异的植物，可以依据美观性原则确定种植植物种类。

4　结论

模块式立体绿化对比自然环境有低光照、低温度和高湿度的特征，能够进一步为城市局部地区提供降温的生态作用。肾蕨、吊兰和春羽等拥有较好的耐高温、抗风性的特征，是室外立体绿化上层区种植的首选。狐尾天门冬、嫣红蔓、竹芋和矾根能较好适应夏季气候条件，也可以纳入室外立体绿化植物选择范围内。红掌、虎耳草等植物适用于北向立体绿化，并尽量种植于中低层以避免长时间光照直射。铁线蕨、豆瓣绿在夏季适应生存能力低，应优先考虑种植于室内立体绿化。立足于立体绿化垂直空间环境快速筛选合适植物种类并进行合理配置，能够在提升立体绿化建设效率的同时最大化发挥其生态价值，是一种更合理、更科学、更生态的建设思路。

参考文献

[1]苏泳娴,黄光庆,陈修治,等.城市绿地的生态环境效应研究进展[J].生态学报,2011,31(23):302-315.

[2]虞金龙.城市立体绿化的创新探索[J].中国园林,2021,37(12):6-13.

[3]姜之点,杨峰.建筑立体绿化方式和设计高度对三维空间降温潜力的影响[J].风景园林,2023,30(5):75-82.

[4]刘瑞雪,李佳轩,严仙友阳.中国立体绿化政策发展与量化评价[J].中国城市林业,2025,23(1):179-187.

[5]高凯,秦俊,胡永红.上海城市居住区绿化缓解热岛效应研究进展[J].中国园林,2010,26(12):12-15.

[6]兰国鹏.重庆综合医院户外空间植物造景研究[D].重庆:西南大学,2012.
[7]杨斯玲.大学校园绿化规划设计管理研究[D].天津:天津大学,2009.
[8]曾晓阳,柳林安,高永恒.成都市空间立体绿化藤本植物的选择[J].西北林学院学报,2012,27(1):196-200.
[9]马晓琳,赵方莹,郭莹莹.北京市朝阳区立交桥立体绿化植物配置模式[J].中国水土保持科学,2006,4(增刊1):78-82.
[10]殷丽峰,李树华.屋顶绿化基质的选择及绿化种植模式的建立[J].风景园林,2006,13(4):46-49.
[11]陈金艳,员浩帆,徐文斌,等.不同生境下城市自生植物多样性对城市化的响应[J].西南林业大学学报(自然科学),2025,45(4):132-141.
[12]李炎林,熊兴耀,于晓英,等.红花檵木花叶芽变生物学特性[J].林业科学,2010,46(8):56-61,183.
[13]曾慧卿,刘琪璟,马泽清,等.基于冠幅及植株高度的檵木生物量回归模型[J].南京林业大学学报(自然科学版),2006,30(4):101-104.
[14]屈彦成,江怡航,姜彦妍,等.基于胸高处边材面积、胸径和冠基部直径的杉木单木叶生物量预测模型[J].林业科学,2023,59(7):106-114.
[15]BUSTAMI R A,BELUSKO M,WARD J,et al.Vertical greenery systems:a systematic review of research trends[J].Building and Environment,2018,146:226-237.
[16]CHENG C Y,CHEUNG K K S,CHU L M.Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls[J].Building and Environment,2010,45(8):1779-1787.
[17]HE Y H,LIU X P,WANG M M,et al.Grazing alters seedling emergence number,dynamics,and diversity of herbaceous plants in a semiarid sandy grassland[J].Ecological Research,2023,38(1):154-166.
[18]李广析.新型城镇化城乡居民收入差距的收敛性研究:基于成对数据的t检验方法[J].贵州财经大学学报,2018(5):96-103.
[19]李灿.重复测量数据方差分析在SPSS16.0软件中的实现[J].统计与决策,2011,27(1):34-36.
[20]谭杰锋.评价指标体系中的相关性分析[J].统计与决策,2005,21(22):145-146.
[21]杜挺,谢贤健,梁海艳,等.基于熵权TOPSIS和GIS的重庆市县域经济综合评价及空间分析[J].经济地理,2014,34(6):40-47.
[22]虞晓芬,傅玳.多指标综合评价方法综述[J].统计与决策,2004,20(11):119-121.
[23]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.
[24]MANSO M,CASTRO-GOMES J P.Thermal analysis of a new modular system for green walls[J].Journal of Building Engineering,2016,7:53-62.
[25]SUSOROVA I,AZIMI P,STEPHENS B.The effects of climbing vegetation on the local microclimate,thermal performance,and air infiltration of four building facade orientations[J].Building and Environment,2014,76:113-124.
[26]JIM C Y.Air-conditioning energy consumption due to green roofs with different building thermal insulation[J].Applied Energy,2014,128:49-59.
[27]王坤,杨淑华,丁杨林.植物应答高温胁迫的机制研究进展[J].植物生理学报,2023,59(4):759-772.
[28]冯欣洁,俞政男,郭和蓉,等.高温胁迫影响红掌生长发育的研究进展[J].生态科学,2021,40(2):218-224.
[29]PÉREZ G,COMA J,SOL S,et al.Green facade for energy savings in buildings:the influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect[J].Applied Energy,2017,187:424-437.
[30]LI H Y.Creepers vertical greening strategies on high-rise building[J].IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2019,401(1):012020.