

环保型发泡生态板在华南垂直绿化中的适配植物引种优选

Optimal Introduction of Plant Species Adapting to Eco-Friendly Foamed Ecological Boards for Vertical Greening in South China

汪蓉 钟纪琪 龙衍君 周厚高 伍青*

WANG Rong, ZHONG Jiqi, LONG Yanjun, ZHOU Hougao, WU Qing*

基金项目: 广东景泽生态环境股份有限公司与仲恺农业工程学院产学研合作项目“耐盐碱新型绿墙植物资源收集与优选”(编号: D122202S9)

摘要

环保型发泡生态板是以建筑垃圾和粉煤灰为原料制作的模块化垂直绿化种植载体, 绿色环保、质轻价廉, 具有广阔的应用前景。为筛选适应发泡生态板碱性环境的垂直绿化植物, 从滨海和石灰岩等地区引种 61 种植物, 对其在生态板栽培的存活率、越冬率、越夏率以及抗逆性、观赏性及生长势等指标进行观测评价。结果表明, 引种植物存活 49 种, 适应生态板栽培、越冬率和越夏率在 85% 及以上的有 18 种。采用“百分法”综合筛选了 12 种适用于发泡生态板的垂直绿化植物, 其中紫背铺地锦竹草 *Callisia repens*、秋红假紫万年青 *Belosynapsis ciliata* 和垂盆草 *Sedum sarmentosum* 3 种植物综合得分大于 80 分, 可快速覆盖板体成坪。

Abstract

Eco-friendly foamed ecological boards, made from construction waste and fly ash, offer a modular and low-cost solution for vertical greening. However, their alkaline nature poses challenges for plant survival. To identify suitable species, 61 plant varieties were introduced from coastal and limestone regions in South China and evaluated for survival rate, overwintering and oversummering performance, stress tolerance, ornamental value, and growth potential under board cultivation. Results showed 49 species survived, with 18 exhibiting overwintering and oversummering rates above 85%. Twelve varieties of vertical greening plants suitable for foaming ecological board were selected by 'percentage method', and *Callisia repens*, *Belosynapsis ciliata*, *Sedum sarmentosum* had a comprehensive score of more than 80 and could quickly cover 100% of the board body to form a lawn.

文章亮点

1) 从滨海、石灰岩等地区成功引种 49 种植物, 为环保型生态板提供专属种质库; 2) 突破碱性生态板 (pH>8.5) 在华南垂直绿化中的植物适配瓶颈, 筛选获得 12 种适配植物, 其中 3 种可实现 60 日内 100% 覆盖板体成坪。

关键词

发泡生态板; 垂直绿化; 引种; 植物筛选; 绿色环保; 固废资源化

Keywords

Foamed ecological board; Vertical greening; Plant introduction; Plant screening; Environment-friendly; Solid waste recycling

收稿日期: 2024-08-13

修回日期: 2024-12-29

随着我国城市化进程的加速推进, 截至 2023 年末, 全国设市城市城区总面积已达 11.02 万 km², 珠江三角洲核心城市广州和深圳的城镇化率已突破 86.76% 和 99.80%^[1]。在这一背景下, 垂直绿化作为缓解城市用地紧张、提升生态质量的关键技术, 其需求量显著增长。现有垂直绿化技术主

要包括绿墙和生态墙 2 类^[2]。其中直接式绿墙技术为攀缘植物 (如常春藤 *Hedera nepalensis* var. *sinensis*) 自然附着于墙面生长, 虽成本低但可能侵蚀墙体^[3-4]; 而间接式绿墙技术通过支架 (如金属网) 引导植物生长, 可减少结构损害, 但覆盖速度受限^[5]。其他垂直绿化技术, 如模块化面板

系统通过预制含轻质基质的防水面板支持多样化植物配置, 具有优异的隔音、隔热性能, 但维护成本高^[6-7]; 纺织袋系统采用耐候织物装载植物, 灵活性高但易受水土流失影响, 且长期稳定性不足^[8-9]。针对上述局限, Peter J. Irga 等^[10]提出 Tessellated 双面穿孔绿墙系统, 整合了模块化与绿墙技术优势, 该系统的预制混凝土结构被证实可通过热量效应调节热负荷。而同类技术研究^[11]表明此类设计有助于缓解热岛效应并降低建筑能耗。尽管初期成本较高, 但其模块化特性适配既有建筑改造^[12], 未来需通过实验室验证 (如颗粒物吸附实验^[13]) 和长期实地测试, 评估生态服务稳定性^[14], 以推动城市绿化策略从单一绿化向城市生态系统构建的转型。

垂直绿化技术历经近 30 年的快速发展, 已取得长足的进步, 然而目前广泛应用的技术仍普遍面临经济性、可持续性、生态稳定性三重困境: 塑料和金属模块化系统的造价成本高; 传统基质更换周期短, 易导致二次污染; 单一植物群落年补苗率高^[8-9]。与此同时, 我国建筑废弃物年产量达 35 亿吨, 综合利用率不足 10%; 粉煤灰年产量为 6 亿吨, 综合利用率不足 70%^[15-16]。资源浪费与环境污染问题亟待解决。针对上述矛盾, 研究团队开发了以建筑垃圾 (掺量 60%) 和粉煤灰 (利用率 25%) 为主要原料的环保型发泡生态板^[17], 通过容重优化 (0.8 g/cm³)、抗压强度提升 (2.0 MPa) 及模块化设计, 结合“乔灌木”植被结构, 显著降低了垂直绿化的成本, 提升其生态稳定性并延长其使用寿命^[17-18]。然而, 环保型发泡生态板因原料特性呈碱性 (pH 值为 8.5~9.2), 常规绿化植物难以适应该环境, 故亟需筛选适应板体碱性环境且兼具景观与生态功能的植物。

植物筛选可通过引种试验与综合评分法实现。其中, 综合评分法基于多指标加权评估体系, 可系统量化植物的抗逆性、景观效果及生长势等关键性状, 现已成为垂直绿化植物筛选的主流方法。通过动态调整评价指标权重, 该体系可适配建筑外墙、立交桥体等不同应用场景的植物优选需求^[19-21]。因此, 研究从广东省珠海市等滨海地区、清远市等石灰岩地区和广州岭南花卉市场引种栽培 61 种候选植物, 对其在发泡生态板栽培的存活率、越冬率、越夏率和抗逆性、观赏性以及生长势等指标进行观测评价, 并采用“百分法”进行综合评价优选, 以获取具有优良抗逆性、观赏性和生长势, 且能完全适应发泡生态板, 并快速成坪实现全覆盖的优良植物。研究结果可加速环保型发泡生态板在垂直绿化上的推广应用, 并推动建筑垃圾和粉煤灰等固废资源化。

1 材料与方法

1.1 材料

试验选用地被植物、藤蔓植物及屋顶绿化植物为材料, 常见种类购自广州岭南花卉市场, 其他则采自广东省惠州市、珠海市等滨海地区, 以及清远市、贵州省息烽县等石灰岩地

区, 共引种 61 种具备耐盐碱、耐高温等抗逆性的植物 (表 1)。

1.2 试验方法

试验于 2021 年 1 月至 2023 年 12 月在广州市增城区展开。增城属南亚热带海洋性季风气候, 2021—2023 年的平均气温为 22.7 °C, 平均降雨量为 1 450.8 mm, 平均日照时数为 1 818.8 h。其中, 1 月平均气温为 14.6 °C, 7 月平均气温为 29.5 °C; 极端最高气温为 38.5 °C, 极端最低气温达 -3.0 °C^①。

首先进行植物引种试验, 主要采用 3 种育苗方法。1) 播种法: 将长春花 (紫花)、海边月见草、罗汉松、含羞草、九里香和马蹄金共 6 种植物的种子用清水浸泡 2~4 h 后播种。2) 带根移植法: 将玉龙草、蛇莓、大叶石上莲、小叶冷水花、石松、铺地黍、细辛、鱼藤、链荚豆、番杏、渐尖毛蕨和江南卷柏共 12 种植物连根采挖后移栽。3) 扦插法: 对其余 43 种植物各取 8~10 cm 的顶芽或茎枝, 将其放入生根剂 (100 mg/L 的 NAA+IBA) 溶液中浸泡 1 h 后进行扦插。其中, 扦插与播种的基质由腐熟中药渣、泥炭、珍珠岩、泥土按照 2:1:0.5:1 比例配制而成, 移植法的基质由泥炭、珍珠岩按照 5:1 比例配制而成。每种植物引种 20 株, 所有引种植物均进行遮荫保湿养护, 并在引种园养护 90 d 后, 以长出新根新叶为存活标准统计引种存活率, 不低于 80% 即达标。最后, 将存活植株移栽至合适的花盆, 露天常规养护 2 年, 期间持续观察记录其生态习性与观赏特性。

基于引种试验结果, 将存活的植物采用与引种育苗相同的方法进行穴盘育苗, 并在 4 月中旬将穴盘苗 (每种植物 200 株) 移植至环保型发泡生态板 (株行距设定为 10 cm×10 cm), 同时安装自动滴箭系统 (每 625 cm² 配置 1 个, 流速为 0.5 L/h, 开启时段为每天 8:00—8:20 和 16:30—16:50)。移植后第 1 周采用遮光率为 20% 的遮阳网进行遮荫, 之后移出遮阳网进行为期 2 年的露地养护。

试验过程中, 统计植物在生态板栽培的 4 项指标。1) 生态板存活率: 将穴盘苗移植于生态板种植养护 30 d 后, 以长出新根新叶为存活标准, 计算存活植株占比。2) 越冬率和越夏率: 于 11 月中下旬白天最低气温低于 15 °C 前, 以及 4 月底至 5 月初白天最高气温高于 32 °C 前, 分别标记 100 株正常植株, 在次年 2 月底和当年 10 月底统计枯损株的数量 (枝叶干枯的面积 ≥ 60%), 计算健康株占比, 即越冬率/越夏率 = [(100 - 枯损株数) ÷ 100] × 100%。3) 覆盖度: 种植 180 d 后测量植株覆盖发泡生态板的面积, 即覆盖度 = 覆盖面积 ÷ 生态板面积 × 100%。4) 成坪时间: 自种植日起到生态板覆盖度稳定不低于 90% 所需的天数。

1.3 垂直绿化植物评价筛选体系

参考郁永英^[19]和何秋华^[22]评价筛选垂直绿化植物的方法, 结合试验地长期高温的气候特点, 以及长期开展城市垂直绿化项目的经验, 构建包含抗逆性、观赏性和生长势 3 个

① 数据来源于增城天气 <http://www.tqyb.com.cn/zengcheng/climaticprediction/appraise/>。

表 1 引种植物概况

Tab.1 Summary of introduced plant species and ecological characteristics

名称	材料来源	原生境	原生境逆境耐受程度					主要应用
			盐碱	高温	干旱	暴晒	贫瘠	
厚藤 <i>Ipomoea pes-caprae</i>	广东江门	滨海沙地	高	高	高	高	高	海岸带固沙绿化
海马齿 <i>Sesuvium portulacastrum</i>	广东珠海	滨海沙地	高	高	高	高	高	滨海湿地覆盖
草海桐 <i>Scaevola taccada</i>	广东惠州	滨海沙地	高	高	高	高	高	海岛垂直绿化
滨豇豆 <i>Vigna marina</i>	广东珠海	滨海沙地	高	高	高	高	高	沙地护坡
海滨大戟 <i>Euphorbia atoto</i>	广东惠州	滨海礁石带	高	高	高	高	高	盐雾区立面绿化
单叶蔓荆 <i>Vitex rotundifolia</i>	广东惠州	海滨灌丛	高	高	高	高	高	海岸带景观绿化
铺地黍 <i>Panicum repens</i>	广东惠州	滨海沙地	高	高	高	高	高	盐碱地绿化
蔓荆 <i>Vitex trifolia</i>	广东珠海	海滨灌丛	高	高	高	高	高	海岸带景观绿化
苦郎树 <i>Volkameria inermis</i>	广东惠州	滨海礁石带	高	高	高	高	高	潮间带绿化
酒饼簕 <i>Atalantia buxifolia</i>	广东惠州	海滨灌丛	高	高	高	高	高	海岸带绿篱
毛马齿苋 <i>Portulaca pilosa</i>	广东惠州	滨海沙地	高	高	高	高	高	贫瘠土壤绿化
阔苞菊 <i>Pluchea indica</i>	广东珠海	滨海礁石带	高	高	高	高	高	盐碱地景观
海边月见草 <i>Oenothera drummondii</i>	广东惠州	海滨沙地	高	高	高	高	高	滨海公园地被
番杏 <i>Tetragonia tetragonioides</i>	广东惠州	海滨沙地	高	高	高	高	高	沙地覆盖
铁包金 <i>Berchemia lineata</i>	广东惠州	滨海礁石带	高	高	高	高	高	碱性土壤修复
鱼藤 <i>Derris trifoliata</i>	广东江门	滨海礁石带	高	高	高	高	高	海岸带绿化
链荚豆 <i>Alysicarpus vaginalis</i>	广东珠海	滨海沙地	高	高	高	高	高	护坡沙地改良
芙蓉菊 <i>Crossostephium chinense</i>	广东广州	海滨礁石带	高	高	高	高	高	盐碱地景观
假地豆 <i>Grona heterocarpus</i>	广东珠海	滨海旱地	中	高	高	高	高	低维护绿化
蔓九节 <i>Psychotria serpens</i>	广东珠海	滨海岩石缝	中	高	高	高	高	隐蔽墙面覆盖
勾儿茶 <i>Berchemia sinica</i>	广东珠海	石灰滨海岩石缝	中	高	高	高	高	石质边坡绿化
落地生根 <i>Bryophyllum pinnatum</i>	广东惠州	滨海岩石缝	中	高	高	高	高	岩石园造景
了哥王 <i>Wikstroemia indica</i>	广东珠海	石灰岩缝隙	中	高	高	高	高	石质立面绿化
垂盆草 <i>Sedum sarmentosum</i>	贵州息烽	石灰岩缝隙	中	高	高	高	高	屋顶绿化
异叶地锦 <i>Parthenocissus dalzielii</i>	广东广州	石灰岩山地	中	高	中	高	高	岩壁覆盖
大叶石上莲 <i>Oreocharis benthamii</i>	清远英德	石灰岩缝隙	中	高	高	中	高	石壁绿化
薛荔 <i>Ficus pumila</i>	广东广州	喀斯特崖壁	中	高	高	中	高	石墙垂直绿化
长春花（紫花） <i>Catharanthus roseus</i>	广东广州	热带草原	中	高	高	高	高	花坛造景
九里香 <i>Murraya exotica</i>	广东广州	石灰岩丘陵	中	高	高	中	高	绿篱庭院造景
紫背万年青 <i>Tradescantia spathacea</i>	广东广州	热带林缘	低	高	中	低	中	隐蔽墙面绿化
金叶过路黄 <i>Lysimachia nummularia</i>	广东广州	溪边湿地	低	中	低	低	低	湿地公园覆盖
紫背铺地锦竹草 <i>Callisia repens</i>	广东广州	热带林下	低	高	高	高	高	屋顶绿化
秋红假紫万年青 <i>Belosynapsis ciliata</i>	广东广州	热带林下	低	高	高	高	高	屋顶绿化
牛鞭草 <i>Murdannia loriformis</i>	广东汕头	溪边湿地	低	高	低	低	低	湿地公园覆盖
细竹篙草 <i>Murdannia simplex</i>	广东汕头	湿润草地	低	中	低	中	低	低维护地被
玉龙草 <i>Ophiopogon japonicus</i>	广东广州	林缘阴湿地	低	中	低	低	低	庭院镶边
薄雪万年草 <i>Sedum hispanicum</i>	广东广州	多石山坡	低	高	高	高	高	屋顶绿化
罗汉松 <i>Podocarpus macrophyllus</i>	广东广州	湿润丘陵	低	中	中	低	中	庭院绿篱
含羞草 <i>Mimosa pudica</i>	广东广州	热带荒地	低	高	高	高	高	公园
胭脂云锦竹草 <i>Callisia repens</i>	广东广州	林下阴湿处	低	高	低	低	低	彩色地被
白花紫露草 <i>Tradescantia fluminensis</i>	广东广州	溪边阴湿地	低	高	低	低	低	湿地公园边缘覆盖
吊竹梅 <i>Tradescantia zebrina</i>	广东广州	热带林下	低	高	低	低	低	彩色立面
蛇莓 <i>Duchesnea indica</i>	广东清远	湿润草地	低	中	低	中	低	常见地被
科西嘉薄荷 <i>Mentha requienii</i>	广东广州	溪边石缝	低	中	低	低	中	芳香地被
金毛耳草 <i>Hedyotis chrysotricha</i>	清远英德	林缘阴湿地	低	中	低	低	中	隐蔽区地被
马蹄金 <i>Dichondra micrantha</i>	广东广州	湿润草地	低	中	低	中	低	地维护地被
油画婚礼紫露草 <i>Tradescantia cerinthoides</i>	广东广州	林下阴湿处	低	中	低	低	低	彩色垂吊景观
小叶冷水花 <i>Pilea microphylla</i>	清远英德	阴湿绿化地	低	中	低	低	低	墙面点缀

表1 引种植物概况（续）

Tab.1 Summary of introduced plant species and ecological characterstics（Continued）

名称	材料来源	原生境	原生境逆境耐受程度					主要应用
			盐碱	高温	干旱	暴晒	贫瘠	
三点金 <i>Grona triflora</i>	广东珠海	海滨旱地	低	高	高	高	高	地被修复
钻叶漆姑草 <i>Sagina subulata</i>	广东广州	高山草甸	低	低	中	高	中	岩石园
双花堇菜 <i>Viola biflora</i>	广东广州	亚高山湿地	低	低	低	中	低	开花地被
丛生福禄考 <i>Phlox subulata</i>	广东广州	干燥山坡	低	高	高	高	高	花坛镶边
飞扬草 <i>Euphorbia hirta</i>	广东惠州	路边荒地	低	高	高	高	高	荒地修复
蛇婆子 <i>Waltheria indica</i>	广东惠州	热带干旱区	低	高	高	高	高	贫瘠土地覆盖
渐尖毛蕨 <i>Cyclosorus acuminatus</i>	广东清远	溪边阴湿地	低	高	低	低	低	隐蔽区绿化
山蒟 <i>Piper hancei</i>	广东清远	石灰岩林下	低	高	低	低	中	石壁覆盖
江南卷柏 <i>Selaginella moellendorffii</i>	广东清远	阴湿岩缝	低	中	低	低	中	隐蔽山区地被
络石 <i>Trachelospermum jasminoides</i>	广东清远	湿润山谷	低	中	低	低	低	廊架绿化
细辛 <i>Asarum heterotropoides</i>	广东清远	阴湿林下	低	中	低	低	中	低盐区地被
石松 <i>Lycopodium japonicum</i>	广东广州	酸性土林下	低（偏好酸性）	中	低	低	中	蕨类主题园
地榆 <i>Melastoma dodecandrum</i>	广东广州	酸性红壤丘陵	低（偏好酸性）	高	中	中	中	酸性土区地被

层次的垂直绿化植物筛选体系（表2）。其中，抗逆性重点考核植物对极端环境的适应性，核心指标为耐干旱、耐高温、耐暴晒，重要指标为耐低温与抗病虫；观赏性侧重绿化功能与美学价值，设置绿叶期、覆盖密度、叶形叶色和花果期4项指标；生长势聚焦空间拓展能力，包含攀缘能力、生长速度、高度和整齐度。最终按总分划分植物等级，总分不低于70分者入选，总分不低于80分者为良好，总分不低于90分者为优秀。特别规定，若某植物任意一项抗逆性核心指标获评0分，则直接筛选该植物。该体系可确保筛选出既适应高温环境又兼具功能性与观赏性的优质垂直绿化植物。

2 结果与分析

2.1 引种植物存活适应性及观赏性
状观测

试验共引种61种抗逆植物，存活49种（存活率80.33%），有38种植物的引种存活率达标。其中，广州引种24种（存活21种，达标16种），其他地区采集37种（存活28种，达标22种）。存活的植物中有32种为草本，其余为乔木、灌木或藤本。蛇莓以观叶、观果为主；毛马齿苋、海边月见草、滨豇豆、厚藤、地榆、单叶蔓荆、蔓荆和假地豆均有美丽显眼

表2 垂直绿化植物评价筛选体系		
Tab.2 Evaluation criteria for vertical greening plant selection		
类型	指标	评分标准
抗逆性 (46分)	耐干旱（10分）	强：8~10分 中：4~7分 弱：0~3分
	耐高温（10分）	强：8~10分 中：4~7分 弱：0~3分
	耐暴晒（10分）	强：8~10分 中：4~7分 弱：0~3分
	耐低温（8分）	强：6~8分 中：3~5分 弱：0~2分
	抗病虫（8分）	强：6~8分 中：3~5分 弱：0~2分
观赏性 (28分)	绿叶期（8分）	常绿：6~8分 半常绿：3~5分 落叶：0~2分
	覆盖密度（8分）	大于90%：7~8分 80%~90%：5~6分 60%~80%：3~4分 40%~60%：1~2分 小于40%：0分
	叶形叶色（6分）	美观：5~6分 较美观：3~4分 一般：0~2分
	花果期（6分）	大于60 d：6分 30~60 d：5分 10~30 d：3~4分 小于10 d：0~2分
生长势 (26分)	攀缘能力（8分）	吸附：7~8分 卷须缠绕：5~6分 蔓生：3~4分 其他：0~2分
	生长速度（6分）	快：5~6分 中：3~4分 慢：0~2分
	高度（6分）	小于10 cm：5~6分 10~15 cm：3~4分 15~20 cm：0~2分
	整齐度（6分）	高：5~6分 中：3~4分 低：0~2分

的花朵，以观叶、观花为主；其余大部分引种成功的植物以观叶为主（表3）。

2.2 引种植物在生态板的适应性分析

根据引种植物在人工栽培条件下的生态习性和生态板性质对植物的要求，综合考虑植物的逆境耐受能力、引种存活率和观赏性等关键性状，本试验共挑选了紫背铺地锦竹草、秋红

假紫万年青、垂盆草等25种植物进行穴盘育苗，并移植至发泡生态板墙体的种植槽或种植孔进行栽培观察。除了罗汉松和九里香无法在生态板存活外，其余23种植物均可正常生长，其中20种存活率在90%及以上。越冬率达85%及以上的有20种植物，越夏率达85%及以上的有18种，越冬率和越夏率均在85%及以上的有18种。存活率100%、越冬率100%、越

夏率 100% 的植物有 8 种，分别是紫背铺地锦竹草、吊竹梅、白花紫露草、金叶过路黄、毛马齿苋、牛鞭草、海边月见草和蔓荆（表 4）。

成坪时间和覆盖度在一定程度上反映了植物在生态板的适应性和生长状态，有 9 种植物可在 2 个月内成坪，其中紫背铺地锦竹草、秋红假紫万年青、垂盆草、吊竹梅和 白花紫露草在移植至生态板的 180 d 后，可实现对板体的 100% 覆盖。这 5 种植物可认为是适应生态板盐碱性环境并能快速成坪的植物。

2.3 引种植物在发泡生态板的综合评价

垂直绿化植物的筛选重点考量抗逆性、观赏性和生长势 3 个方面。本试验根据垂直绿化对植物的要求和发泡生态板

对植物的适应性要求，采用“百分法”对 25 种试验植物进行综合评价（表 5）。总分 70 分以下的植物有 13 种，主要存在攀缘能力差、无法延展成坪、覆盖密度低、植株高度过高、景观凌乱、不耐暴晒等问题。总分 70 分以上的植物有紫背铺地锦竹草、秋红假紫万年青、垂盆草、吊竹梅、胭脂云锦竹草、白花紫露草、金叶过路黄、细竹篙草、毛马齿苋、牛鞭草、薛荔、海边月见草共 12 种。

总分 80~90 分的植物有秋红假紫万年青和垂盆草，二者均具有很强的抗逆性、良好的观赏性和较强的生长势，是能够完全适应发泡生态板、快速成坪且覆盖度达到 100% 的良好材料。其中，秋红假紫万年青在墙体栽培时应注意控制湿度，浇水过度易患根腐病，影响其生长状态和存活率；垂盆

表 3 引种植物的存活率及其生态习性和主要观赏部位

Tab.3 Survival rates, ecological traits, and ornamental characteristics of introduced plants

中文名称	引种存活率	生态习性	观赏部位	中文名称	引种存活率	生态习性	观赏部位
紫背铺地锦竹草	扦插存活 100%	常绿匍匐草本	叶	马蹄金	播种存活 95%	常绿小草本	叶
秋红假紫万年青	扦插存活 95%	常绿匍匐草本	叶	油画婚礼紫露草	扦插存活 40%	常绿蔓性草本	叶
垂盆草	扦插存活 95%	常绿平铺草本	叶	大叶石上莲	带根种植存活 60%	常绿簇生草本	叶、花
牛鞭草	扦插存活 100%	常绿缠绕草本	叶	小叶冷水花	带根种植存活 100%	常绿纤草草本	叶
细竹篙草	扦插存活 100%	常绿丛生草本	叶	石松	带根种植存活 60%	常绿匍匐草本	叶
毛马齿苋	扦插存活 95%	常绿茎密丛生草本	叶、花	厚藤	扦插存活 95%	常绿匍匐草本	叶、花
落地生根	扦插存活 100%	常绿直立草本	叶	草海桐	扦插存活 60%	常绿直立或铺散灌木	叶
紫背万年青	扦插存活 100%	常绿直立草本	叶	海马齿	扦插存活 100%	常绿平卧肉质草本	叶
玉龙草	带根种植存活 95%	常绿簇生草本	叶	铺地黍	带根种植存活 100%	常绿匍匐草本	叶
薄雪万年草	扦插存活 95%	常绿匍匐草本	叶	酒饼簕	扦插存活 30%	常绿小灌木	叶
阔苞菊	扦插存活 95%	半常绿灌木	叶	苦郎树	扦插存活 85%	常绿直立或攀缘灌木	叶
长春花（紫花）	播种存活 100%	常绿直立亚灌木	花	细辛	带根种植存活 30%	常绿草本	叶
海边月见草	播种存活 100%	半常绿平铺草本	叶、花	鱼藤	带根种植存活 50%	常绿攀缘灌木	叶
异叶地锦	扦插存活 100%	常绿木质藤本	叶	链荚豆	带根种植存活 80%	半落叶蔓性草本	叶
罗汉松	播种存活 100%	常绿乔木	叶	三点金	扦插存活 80%	半落叶平卧草本	叶
蔓荆	扦插存活 95%	落叶灌木	叶、花	假地豆	扦插存活 80%	常绿直立或平卧亚灌木	叶、花
含羞草	播种存活 90%	常绿披散亚灌木状草本	叶、花	番杏	带根种植存活 90%	常绿平卧上升草本	叶
九里香	播种存活 80%	常绿小乔木	叶、花	蔓九节	扦插存活 10%	常绿攀缘或匍匐藤本	叶
薛荔	扦插存活 80%	常绿攀缘或匍匐藤本	叶	了哥王	扦插存活 0	-	-
海滨大戟	扦插存活 80%	常绿亚灌木状草本	叶	勾儿茶	扦插存活 0	-	-
胭脂云锦竹草	扦插存活 95%	常绿匍匐草本	叶	钻叶漆姑草	扦插存活 0	-	-
白花紫露草	扦插存活 100%	常绿匍匐草本	叶	双花堇菜	扦插存活 0	-	-
金叶过路黄	扦插存活 100%	常绿蔓性常绿草本	叶	丛生福祿考	扦插存活 0	-	-
吊竹梅	扦插存活 95%	常绿匍匐草本	叶	飞扬草	扦插存活 0	-	-
蛇莓	带根种植存活 90%	半常绿匍匐草本	叶、果	蛇婆子	扦插存活 0	-	-
芙蓉菊	扦插存活 60%	常绿直立亚灌木	叶、花	铁包金	扦插存活 0	-	-
地榆	扦插存活 60%	常绿匍匐小灌木	叶、花	渐尖毛蕨	带根种植存活 0	-	-
滨豇豆	扦插存活 90%	常绿匍匐或攀缘草本	叶、花	山药	扦插存活 0	-	-
科西嘉薄荷	扦插存活 60%	常绿蔓性亚灌木	叶	江南卷柏	带根种植存活 0	-	-
金毛耳草	扦插存活 85%	常绿披散草本	叶	络石	扦插存活 0	-	-
单叶蔓荆	扦插存活 90%	落叶匍匐灌木	叶、花				

草的茎节处无法大量生根并吸附在墙体。总分 90 分以上的植物有紫背铺地锦竹草，常用于屋顶绿化，具有很强的耐干旱、耐高温、耐暴晒、耐低温和抗病虫能力，其茎节根系发达，可延展吸附于生态板并快速成坪，成坪后低矮茂密且整齐稳定；当温度低于 10℃时叶片由绿变紫。其是能够完全适应发泡生态板环境的优秀植物（图 1）。

3 讨论

3.1 改进繁殖技术提高引种存活率

此次引种采集地集中在广东珠江三角洲及其周边地区，其气候特征等生态条件均与广州栽培试验地相似，理论上引种试验成功率较高。然而，本次共收集引种 61 种植物，其中引种存活率 80% 以上的仅有 38 种，占总引种种数的 62.30%，总体而言试验情况并不理想。引种存活率除了与植物在不同地区的生态适应性相关，还与繁殖的难易程度以及繁殖技术显著相关。本次试验主要通过扦插、播种和带根移植方法进行繁殖引种，通过采集茎段、枝条等营养体进行扦插繁殖引种的有 43 种植物，其中 10 种的存活率为 0，可见扦插繁殖技术显著影响引种存活率。扦插繁殖的生根率和成苗率受到营养体器官、扦插基质、生根剂、温湿度等条件的影响^[23-25]，因此可通过改善以上条件改进繁殖技术，从而提高引种存活率。

3.2 垂直绿化植物的评价筛选“百分法”

综合评分法通过对植物的性状按一定权重标准进行评分，可有效评判植物是否符合垂直绿化对抗逆性、观赏性和生长势等性状的要求，是目前较常用且有效的垂直绿化植物筛选方法。为在有限地面上增加空间绿化面积，垂直绿化植物的存活时间和绿叶期非常重要，所选植物应具有很强的抗逆性和越冬、越夏能力，以及四季常绿不落叶的周年观赏性。其中绿叶期是观赏性当中非常重要的指标，枝叶茂密、叶色鲜亮、可观花观果也应为优选性状。与立地生长的条件不同，垂直绿化通常需要植物依附墙体生长且不易掉落，要

求其具有吸附或缠绕等较强的攀缘能力。因此，综合评价筛选在优先考虑抗逆性和观赏性的基础上，增加攀缘能力等与生长习性相关的评选指标。为了能在较短时间内让植物在墙体表面形成较大的绿化面积，应尽量选择生长速度快的优良材料，以尽快形成茂盛的绿化景观效果。本研究在常用综合评分法的基础上，根据环保型发泡生态板对植物的要求，调

表 4 引种植物在生态板的适应性分析
Tab.4 Performance of introduced plants cultivated on foamed ecological boards

中文名称	存活率	越冬率	越夏率	成坪时间	覆盖度
紫背铺地锦竹草	100%	100%	100%	30~35d	100%
秋红假紫万年青	95%	95%	95%	40~45d	100%
垂盆草	98%	98%	98%	40~45d	100%
吊竹梅	100%	100%	100%	40~50d	100%
胭脂云锦竹草	90%	85%	95%	60~70d	100%
白花紫露草	100%	100%	100%	40~50d	100%
金叶过路黄	100%	100%	100%	40~50d	90%
细竹篙草	95%	95%	95%	35~40d	90%
毛马齿苋	100%	100%	100%	45~50d	70%
牛鞭草	100%	100%	100%	35~40d	90%
薛荔	90%	90%	90%	90~100d	80%
海边月见草	100%	100%	100%	难成坪	-
紫背万年青	98%	98%	98%	240~270d	60%
落地生根	98%	98%	98%	70~80d	85%
薄雪万年草	90%	90%	90%	90~120d	80%
玉龙草	60%	50%	20%	100~120d	50%
蛇莓	95%	95%	20%	死亡	-
长春花（紫花）	100%	90%	50%	60~80d	80%
海滨大戟	80%	40%	40%	60~70d	60%
异叶地锦	70%	60%	50%	死亡	-
阔苞菊	95%	90%	90%	180~200d	75%
蔓荆	100%	100%	100%	难成坪	-
九里香	0	-	-	-	-
含羞草	90%	90%	90%	难成坪	-
罗汉松	0	-	-	-	-



图 1 总分最高植物在发泡生态板覆盖成坪后的景观
Fig.1 Landscape of top three plant species after coverage on foamed ecological boards

整权重评分标准，形成了新的“百分法”，并利用该方法筛选了12种适用于发泡生态板的垂直绿化植物，其中综合得分大于80分的3种植物可快速覆盖板体成坪。可见，该方法有助于筛选更多适配环保型发泡生态板的垂直绿化植物资源。

3.3 加快绿色环保垂直绿化技术应用

近30年来，垂直绿化技术快速发展，目前有传统型攀爬牵引式绿色垂直立面（绿色墙）和新兴技术型墙面人工植被系统（模块化组合式生命墙）等多项技术^[8,26]。与攀爬牵引式的传统型技术不同，模块化组合式新兴型垂直绿化技术更多通过特殊的支撑结构使植物在建筑立面上生长，以提高绿化覆盖率、观赏性和改善生态环境。支撑结构作为新兴型垂直绿化系统的四大构成部分之一，是植物种植载体的基础，由塑料、金属等材料制作而成，其成本占总安装成本的10%~12%，普遍存在造价成本高、难以回收利用而产生废弃垃圾等问题。

在开展城市垂直绿化工作时，选择何种技术不仅需要考虑其覆盖度和观赏性，还需考虑其成本及养护难度等问题。随着城市垂直绿化需求规模的逐步扩大、工业绿色低碳转型的呼声日益强烈，该技术应用过程中的成本、绿色环保和废弃物回收等方面的问题将不得不被置于更加突出的位置。在

此情况下，可持续绿色垂直绿化技术，尤其是环保型材料的使用显得尤为重要。本研究所使用的环保型发泡生态板是一种以城市建筑垃圾和粉煤灰等废弃物为主要原料的新型模块化垂直绿化种植载体，具有绿色环保、质轻价廉、便于运输与安装等优点^[17~18]。将该环保型生态板与本研究优选获得的紫背铺地锦竹草、秋红假紫万年青等优良植物配套使用，将形成一套既能保证优良覆盖度、观赏性，又兼具环保性、低成本的新型绿色可持续垂直绿化技术。随着更多与环保型生态板相适应的垂直绿化植物的评价筛选，新型绿色环保垂直绿化技术将广泛应用于大规模的城市垂直绿化中。大量建筑垃圾和粉煤灰废弃物将用于生产发泡生态板，以供城市垂直绿化使用，这对建筑废垃圾和粉煤灰废弃物的再生循环利用具有重要的促进意义。

4 结论

环保型发泡生态板是以建筑垃圾和粉煤灰为原料制作的模块化垂直绿化种植载体，绿色环保、质轻价廉，在城市垂直绿化中具有广阔的应用前景。本文以该生态板作为垂直绿化种植载体，进行华南地区垂直绿化植物筛选。引种61种植物，最终存活49种，并从中筛选出12种适配环保型发泡生态板的垂直绿化植物，包括紫背铺地锦竹草、秋红假紫万

表5 25种试验植物在发泡生态板栽培的综合评价得分
Tab.5 Comprehensive scoring of 25 tested plants for suitability on foamed ecological boards

植物名称	抗逆性（46分）				观赏性（28分）				生长势（26分）					总分	排序
	耐干旱	耐高温	耐暴晒	耐低温	抗病虫	绿叶期	覆盖密度	叶形叶色	花果期	攀缘能力	生长速度	高度	整齐度		
紫背铺地锦竹草	10	10	10	8	7	8	8	4	1	7	6	6	6	91	1
秋红假紫万年青	10	10	10	8	5	7	8	3	1	7	6	6	6	87	2
垂盆草	9	9	9	7	7	7	7	4	1	4	6	6	5	81	3
吊竹梅	8	7	6	7	7	8	8	6	0	4	5	6	6	78	4
胭脂云锦竹草	8	7	6	5	7	8	8	5	1	7	4	6	5	77	5
白花紫露草	8	8	7	7	7	8	7	3	2	4	5	6	5	77	6
金叶过路黄	8	8	8	6	7	6	7	4	0	7	5	6	5	77	7
细竹篙草	9	9	9	8	8	8	6	3	1	2	5	4	4	76	8
毛马齿苋	10	10	10	8	8	8	3	3	3	2	4	4	3	76	9
牛鞭草	9	9	9	8	8	8	6	3	1	2	5	4	3	75	10
薛荔	7	7	6	8	7	7	4	3	1	8	3	6	5	72	11
海边月见草	9	9	9	8	8	6	4	3	5	2	5	2	1	71	12
紫背万年青	10	10	10	8	8	7	3	4	0	0	1	4	4	69	13
落地生根	10	10	10	8	8	8	5	2	0	0	4	1	1	67	14
薄雪万年草	8	8	8	7	7	8	4	3	0	2	2	6	2	65	15
玉龙草	9	9	9	8	7	5	2	3	0	0	2	5	5	64	16
蛇莓	4	8	3	7	7	6	3	3	4	3	5	5	4	62	17
长春花（紫花）	7	7	7	8	8	5	4	3	6	0	4	0	2	61	18
海滨大戟	9	9	9	8	8	7	3	3	0	1	2	1	0	60	19
异叶地锦	9	9	7	7	7	7	3	3	1	0	3	2	1	59	20
阔苞菊	7	7	7	8	7	6	4	3	0	0	3	3	3	58	21
蔓荆	9	9	9	8	8	4	0	3	2	0	4	0	0	56	22
九里香	7	7	7	7	7	7	1	3	5	0	3	1	1	56	23
含羞草	9	9	9	5	7	4	2	3	3	0	3	1	0	55	24
罗汉松	7	7	7	4	7	5	0	3	1	0	2	3	3	49	25

年青和垂盆草。筛选的优良植物可与环保型生态板配套形成一整套可持续绿色环保的新型垂直绿化技术,显著加快环保型生态板在城市垂直绿化中的推广应用,并推动建筑垃圾和粉煤灰等固废资源化。

但本文筛选的植物以草本为主,木本及藤本植物不足,制约了多样化景观营造和生态功能拓展。未来需针对不同气候区开展区域性植物筛选,通过补充乔木、灌木等植物类型,提高生态板绿化技术体系在全国范围的适用性和生态效益。

注:图片均为作者自摄。

参考文献:

- [1] 韩扬眉. 我国设市城市城区面积首次测定 [N]. 中国科学报, 2024-03-28. (1)
- [2] RADIĆ M, BRKOVIĆ DODIG M, AUER T. Green facades and living walls—a review establishing the classification of construction types and mapping the benefits[J]. Sustainability, 2019, 11 (17): 4579.
- [3] HINDLE R L. A vertical garden: origins of the vegetation-bearing architectonic structure and system[J]. Studies in the history of gardens & Designed landscapes, 2012, 32 (2): 99-110.
- [4] KOHLER M. Green facades—a view back and some visions[J]. Urban ecosystems, 2008, 11 (4): 423-436.
- [5] MANSO M, CASTRO-GOMES J. Green wall systems: a review of their characteristics[J]. Renewable & Sustainable energy reviews, 2015, 41: 863-871.
- [6] RAJI B, TENPIERIK M J, VAN DEN DOBBELSTEEN A. The impact of greening systems on building energy performance: a literature review[J]. Renewable & Sustainable energy reviews, 2015, 45: 610-623.
- [7] RILEY B. The state of the art of living walls: lessons learned[J]. Building and environment, 2017, 114: 219-232.
- [8] MEDLA, STANGL R, FLORINETH F. Vertical greening systems—a review on recent technologies and research advancement[J]. Building and environment, 2017, 125: 227-239.
- [9] PÉREZ-URRESTARAZU L, FERNÁNDEZ-CAÑERO R, FRANCO-SALAS A, et al. Vertical greening systems and sustainable cities[J]. The Journal of urban technology, 2015, 22 (4): 65-85.
- [10] IRGA P J, TORPY F R, GRIFFIN D, et al. Vertical greening systems: a perspective on existing technologies and new design recommendation[J]. Sustainability, 2023, 15 (7): 6014.
- [11] FOX M, MOREWOOD J, MURPHY T, et al. Living wall systems for improved thermal performance of existing buildings[J]. Building and environment, 2022 (207): 108491.
- [12] WILKINSON S, CARMICHAEL M, KHONASTY R. Towards smart green wall maintenance and wallbot technology [J]. Property management, 2021, 39 (4): 466-478.
- [13] PAULL N J, KRIX D, IRGA P J, et al. Airborne particulate matter accumulation on common green wall plants[J]. International journal of phytoremediation, 2020, 22 (6): 594-606.
- [14] KUMAR P, DEBELE S E, SAHANI J, et al. An overview of monitoring methods for assessing the performance of nature-based solutions against natural hazards[J]. Earth-science reviews, 2021, 217: 103603.
- [15] LI S, YI X, LIU M, et al. Non-market valuation of construction waste recycling: evidence from china[J]. Journal of cleaner production, 2023 (412): 137384.
- [16] 姜龙. 燃煤电厂粉煤灰综合利用现状及发展建议 [J]. 洁净煤技术, 2020 (26): 31-39.
- [17] 汪蓉, 钟纪琪, 胡苏西, 等. 一种立体绿化种植载体: CN202123072964.1[P]. 2022-07-05.
- [18] 汪蓉, 钟纪琪, 关琼琼, 等. 一种低维护植物生态板的构建方法: CN202310857433.8[P]. 2023-09-29.
- [19] 郁永英, 张志军, 于德利. 黑龙江省垂直绿化攀缘树种的筛选 [J]. 国土与自然资源研究, 2010 (3): 84-86.
- [20] 张仪东, 王玲玲, 宋红丽. 临沂市立交桥垂直绿化现状与植物的筛选 [J]. 山东林业科技, 2018, 48 (3): 39-42, 45.
- [21] 黄可, 汤泽华. 赣南地区室外垂直绿化植物筛选与滞尘作用研究 [J]. 南方农业, 2023, 17 (19): 90-92, 96.
- [22] 何秋华, 石东扬, 黎兆海, 等. 广西园林藤本植物的筛选研究 [J]. 广西植物, 2010, 30 (2): 237-241.
- [23] MAYNARD B. Recent advances in cutting propagation[C]// INTERNATIONAL PLANT PROPAGATORS' SOCIETY. Combined Proceedings International Plant Propagators' Society. Carlisle, PA, USA: International Plant Propagators' Society, 2006.
- [24] OWEN JR J S, MAYNARD B K. Environmental effects on stem-cutting propagation: a brief review[C]// INTERNATIONAL PLANT PROPAGATORS' SOCIETY. Combined Proceedings International Plant Propagators' Society. Bellefonte, PA: International Plant Propagators' Society, 2007.
- [25] WINKELMANN T. Recent advances in propagation of woody plants[C]// INTERNATIONAL SOCIETY FOR HORTICULTURAL SCIENCE. II International Symposium on Woody Ornamentals of the Temperate Zone. Leuven, Belgium: International Society for Horticultural Science, 2013.
- [26] WANG P, WONG Y H, TAN C Y, et al. Vertical greening systems: technological benefits, progresses and prospects[J]. Sustainability, 2022, 14 (20): 12997.

作者简介:

汪蓉/1990年生/女/四川南充人/硕士/广东景泽生态环境股份有限公司(广州510650)/中级园林工程师/专业方向为园林植物与观赏园艺

钟纪琪/1994年生/男/湖南邵阳人/本科/广东景泽生态环境股份有限公司(广州510650)/生态环境工程助理/专业方向为立体绿化

龙衍君/2000年生/男/广东吴川人/本科/广东景泽生态环境股份有限公司(广州510650)/生态环境工程助理/专业方向为园林植物与观赏园艺

周厚高/1962年生/男/四川安岳人/博士/仲恺农业工程学院园艺园林学院(广州510225)/教授/研究方向为园林植物与观赏园艺

伍青(*通信作者)/1990年生/男/广东阳江人/博士/仲恺农业工程学院园艺园林学院(广州510225)/讲师/研究方向为园林植物与观赏园艺/E-mail: wuqing@zhku.edu.cn