

林下冠层结构对大灰藓的生长影响分析

Analysis of the Influence of Understory Canopy Structure on the Growth of *Calohypnum plumiforme*

戚甫友 谢伟文 董晨露 丁丽君 谭广文*

QI Fuyou, XIE Weiwen, DONG Chenlu, DING Lijun, TAN Guangwen*

摘要

大灰藓 *Calohypnum plumiforme* 广泛用于园艺园林产业。为了探究营造近热带雨林林下苔藓景观方法, 通过评价大灰藓生长情况、测定林下环境与冠层结构指标, 研究林下冠层结构对大灰藓的生长影响。结果表明: 1) 林下照度、温度、湿度对大灰藓的生长都有较大的影响, 其中最适平均照度为 50~70×100lx, 最适温度为 23.2°C~24.2°C, 最适湿度为 68%rh~70%rh; 2) 冠层结构主要通过影响林下环境间接影响苔藓的生长, 平均叶面积指数、平均林隙分数、平均叶倾角、平均冠层表现聚集度因子均与林下平均照度、平均温度有显著的相关性, 与平均湿度则无显著相关性; 3) 冠层结构的叶面积指数为 2.5~3.5、平均林隙分数为 0.08~0.1、平均叶倾角为 35~45、平均冠层表现聚集度因子为 0.8~1 时更适合大灰藓的生长。群落模式可总结为: 上层为叶片大小中等且叶片不太密集的树种, 中下层为大叶灌木或者草本, 下层为低矮蕨类, 进而营造出多层次的近热带雨林苔藓景观。

Abstract

Calohypnum plumiforme is widely used in the horticultural and landscape industry. In order to explore the methods of creating a bryophyte landscape under near-tropical rainforests, this paper studied the impact of understory canopy structure on the growth of *Calohypnum plumiforme* by evaluating its growth status and measuring the understory environment and canopy structure indicators. The results showed that: 1) The understory illumination, temperature, and humidity all have a significant impact on the growth of *Calohypnum plumiforme*, of which the optimal average illumination was 50~70×100lx, the optimal temperature was 23.2°C~24.2°C, and the optimal humidity was 68%rh~70%rh; 2) The canopy structure mainly indirectly affects the growth of bryophyte by affecting the understory environment. The average leaf area index, the average diffuse non-intercepting, the mean tilt angle, and average apparent clumping factor have a significant correlation with understory average illumination and average temperature, but no significant correlation with average humidity; 3) A canopy structure with a leaf area index of 2.5~3.5, average diffuse non-intercepting of 0.08~0.1, mean tilt angle of 35~45, and average apparent clumping factor of 0.8~1 is more suitable for the growth of *Calohypnum plumiforme*. The community pattern can be summarized as follows: the upper layer is composed of tree species with medium leaf size and low density, the lower middle layer is large-leaved shrubs or herbs, and the lower layer is low ferns, thus creating a multi-layered near-tropical rainforest bryophyte landscape.

文章亮点

1) 用冠层分析仪器量化林冠结构指标; 2) 冠层结构通过影响林下环境间接影响苔藓的生长; 3) 探究了营造近热带雨林苔藓景观的方法。

关键词

近热带雨林; 林下环境; 冠层结构; 苔藓景观; 大灰藓; 群落模式

Keywords

Near-tropical rainforest; Understory environment; Canopy structure; Bryophyte landscape; *Calohypnum plumiforme*; Community pattern

收稿日期: 2024-01-15

修回日期: 2024-03-15

苔藓是植物界高等植物中结构最简单的一类，没有真根和维管束组织，所以植株较为矮小，一般不超过 10 cm。苔藓不具有完善的保护组织和输导组织^[1]，因此其生长发育高度依赖于所处环境。苔藓植物大多属于变水植物，没有角质层抵御水分挥发^[2-3]，在干燥环境中很容易因为干枯而降低代谢，同时其体内有大量贮水细胞可以吸收空气中的水分，待环境湿度增高时可快速恢复。光照是影响苔藓生长的重要因素，有研究显示，苔藓植物的孢子在缺乏光照的情况下一般不能萌发^[4]，但过多的光照会影响环境温度，从而影响苔藓的生长^[5]。

苔藓造型优美，种类繁多，是重要的园林造景材料。但对环境的高度依赖性使其目前主要局限于室内或可控环境上的应用，如园艺和微景观等，大面积室外应用苔藓的技术还有待研发。苔藓对特色园林景观营造具有重要作用。苔藓没有根部，可以种植于石头上，既能分泌出酸性物质，使岩石面逐渐溶解，还能依靠生物结皮作用减少土壤水土流失^[6]。近年已有项目尝试在户外利用苔藓进行造景，如深圳仙湖植物园里的苔藓园、庐山植物园的苔藓园、西湖苔藓公园、广州云台花园铜锣坑片区的雨林景观等。此外，苔藓是低养护植物，在合适的环境下可以代替草坪，节约管理成本。

大灰藓 *Calohypnum plumiforme* 是苔藓中适应性较强的一种，可以适应多种环境，为藓纲植物，隶属于大灰藓科大灰藓属，植物体形相对较大，高可达 7 cm，呈黄绿色或绿色，枝叶与茎叶同形，假鳞毛少数，丝状或披针形，孢蒴长圆柱形^[7]。大灰藓四季常绿，覆盖效果好，成草坪状，耐粗放管理^[4]。同时大灰藓基本在全国各省均有分布，现广泛应用于医药、园艺和园林绿化等方面，有很大的开发应用前景^[8-9]。因此，大灰藓是当下营造苔藓景观的一种优良选择。

近年来，在生态与景观领域，苔藓的研究方向主要集中在不同环境对苔藓多样性的影响、苔藓生物结皮以及生态因子对苔藓生长的影响，如李雨珊等^[10]研究了白云山国家森林公园苔藓分布，发现土壤生苔藓植物的谱系多样性最高，而树附生苔藓植物的谱系多样性最低；朱克淞等^[1]研究了 10 种苔藓的抗旱能力，其中密枝灰藓 *Hypnum densirameum* 最优等。然而从冠层分析苔藓生长情况的还鲜有报道^[1-2, 5, 9-11]。利用植物林下冠层结构最大化模拟自然环境，为苔藓营造适合的生境，可以有效减少人工控制环境成本。然而何种类型冠层结构最利于苔藓的生长还有待探析。因此，本文应用林冠学分析冠层结构对大灰藓的生长影响，以期对苔藓景观群落营造提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 研究区域概况

试验地点位于广州白云山景区云台花园铜锣坑片区（图 1）。白云山是南粤名山，景点云台花园位于其南部。本地气候为亚热带季风气候，2021 年平均气温 24.0 °C，平均相对湿度 73.0%，年降雨量 1 435.5 mm，日照时长

1 879.0 h，土壤以赤红壤为主，岩石多为花岗岩^[12]。常见乡土植物有马尾松 *Pinus massoniana*、木荷 *Schima superba*、山油柑 *Acronychia pedunculata*、鹅掌柴 *Heptapleurum heptaphyllum*、九节 *Psychotria asiatica* 和越南叶下珠 *Phyllanthus cochinchinensis* 等。铜锣坑片区位于白云山沟谷中，水热环境比外部环境更接近于季雨林环境，是苔藓生长的好位置，特在此处营造雨林景观。

1.1.2 研究材料

本试验研究对象为云台花园铜锣坑片区林冠层和林下大灰藓。大灰藓为人工种植，着生于岩石上，自由分布于整个片区，与周围的草本植物、灌木和乔木共同形成了具有雨林特征的景观（图 2）。经过半年的适应，大灰藓生长基本稳定，但在局部不同水热环境下，呈现出了不同的景观效果。

1.2 方法

1.2.1 试验方法

本试验于 2023 年 11 月下旬选择天气晴朗的一天，在铜锣坑片区雨林景观片区开展。试验样点按郁闭度梯度选取，林下郁闭度 80%~100%、林下郁闭度 60%~80%、林下郁闭度 40%~60% 各取 5 个，共 15 个样点（图 3）。分别在上午、中午和下午进行 3 次观测，包括苔藓生长评价、生境检测、冠层结构检测。苔藓生长评价即按平均高



图 1 云台花园铜锣坑片区位置

Fig.1 Location of the Tongluokeng area in Yuntai Garden

度、生长盖度、颜色和均一性 4 个指标进行评分；生境检测是使用 UNI-T 迷你温湿度计检测林冠层下空气温度和湿度，使用照度计检测林下照度；冠层结构检测是采用冠层分析仪测定各样点冠层结构指标，包括平均叶面积指数（LAI）、平均林隙分数（DIFN）、平均叶倾角（MTA）和平均冠层表观聚集度因子（ACF），共 4 项。

1.2.2 数据统计

运用 Excel 2020 对数据进行初步整理，应用 SPSSAU 对数据进行归一化处理和相关性分析，运用 Excel 进行绘图

和方程拟合。

2 结果与分析

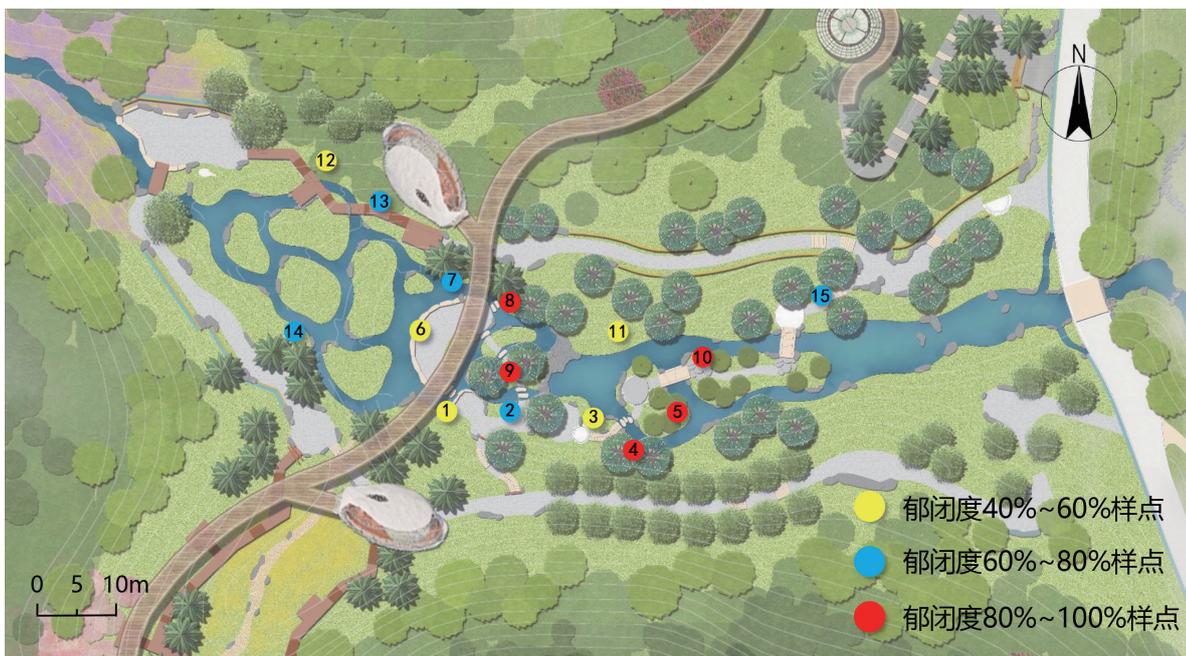
2.1 大灰藓生长评价

将大灰藓平均高度、生长盖度、颜色、均匀性 4 个指标数据进行归一化处理，获得各个指标得分，同时采用熵值法获得 4 个指标的权重，分别为：平均高度 41.04%，生长盖度 25.44%，颜色 19.23%，均匀度 14.29%。平均高度和生长盖度占比最大，与营造苔藓景观的需求基本一致。计算各



图 2 云台花园铜锣坑片区雨林片区苔藓景观

Fig.2 Bryophyte landscape of rainforest area in Yuntai Garden Tongluokeng Area



注：该底图为方案设计图，现场存在部分改动。

图 3 雨林片区苔藓景观样点分布

Fig.3 Distrabution of bryophyte landscape samples in rainforest area

样点综合得分（表1），最高分为样点4（0.97分），其次为样点1（0.79分），最低分为样点6（0.18分）。

2.2 林下生境对大灰藓的生长影响

2.2.1 林下照度对大灰藓的生长影响

由散点图（图4）可知，林下光照照度与大灰藓综合得分为非线性关系，拟合方程为 $y = -0.0004x^2 + 0.0462x - 0.6768$ ， $R^2 = 0.8431$ ，说明方程有较好的可信度，即林下照度对大灰藓生长产生较大的影响。同时，上午、中午、下午的平均照度为 $50 \sim 70 \times 100lx$ 时最适合大灰藓生长，而低于 $30 \times 100lx$ 或高于 $90 \times 100lx$ 将可能严重制约大灰藓的生存。

2.2.2 林下温度对大灰藓的生长影响

由散点图（图5）可知，林下温度与大灰藓综合得分为非线性关系，拟合方程为 $y = -0.234x^2 + 11.152x - 132.11$ ， $R^2 = 0.8319$ ，说明方程有较好的可信度，即林下平均温度对大灰藓生长有较大的影响。同时，上午、中午、下午的平均温度为 $23.2^\circ C \sim 24.2^\circ C$ 时最适合大灰藓生长，而低于 $22.5^\circ C$ 或高于 $25^\circ C$ 将降低大灰藓的生长效率。

2.2.3 林下湿度对大灰藓的生长影响

由散点图（图6）可知，林下湿度与大灰藓综合得分为非线性关系，拟合方程为 $y = -0.0268x^2 + 3.7252x - 128.91$ ， $R^2 = 0.8227$ ，说明方程有较好的可信度，即林下平均湿度对大灰藓生长有较大的影响。同时，上午、中午、下午的平均湿度为 $68\%rh \sim 70\%rh$ 时最适合大灰藓生长，而低于 $66\%rh$ 或高于 $71\%rh$ 将降低大灰藓的生长效率。

表1 各样点大灰藓生长评价

Tab.1 Growth evaluation of *Calohyponum plumiforme* at various sample sites

样点编号	平均高度得分 (41.04%)	生长盖度得分 (25.44%)	颜色得分 (19.23%)	均匀性得分 (14.29%)	综合得分
4	1.00	1.00	0.89	0.92	0.97
1	0.67	0.90	0.89	0.83	0.79
15	0.17	1.00	1.00	0.97	0.65
5	0.03	1.00	1.00	0.75	0.57
11	0	1.00	0.89	1.00	0.57
3	0.50	0.50	0.67	0.67	0.56
2	0.33	0.67	0.67	0.67	0.53
9	0.33	0.50	0.67	0.67	0.49
13	0.17	0.67	0.67	0.67	0.46
10	0.33	0.33	0.67	0.67	0.45
12	0.07	0.67	0.67	0.50	0.40
7	0.40	0	0.44	0.58	0.33
8	0.07	0	0.67	0.50	0.23
14	0.33	0.33	0	0	0.22
6	0.17	0.33	0	0.17	0.18

2.3 冠层结构对林下环境的影响

将平均叶面积指数、平均林隙分数、平均叶倾角和平均冠层表观聚集度因子4个冠层指标与林下平均照度、平均温度和平均湿度3个环境因子进行 Pearson 相关性分析，得出4个冠层指标与林下平均照度、平均温度有显著的相

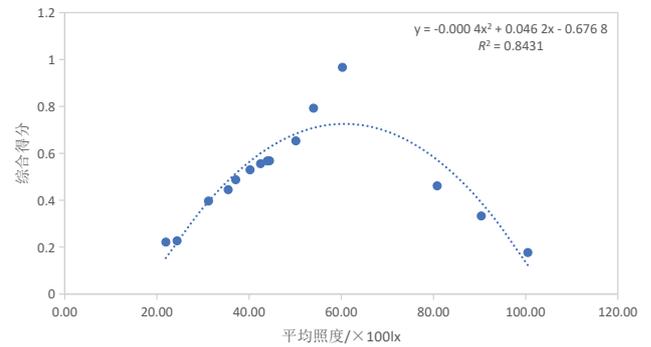


图4 平均照度对大灰藓综合得分的影响

Fig.4 The effect of average illuminance on the comprehensive score of *Calohyponum plumiforme*

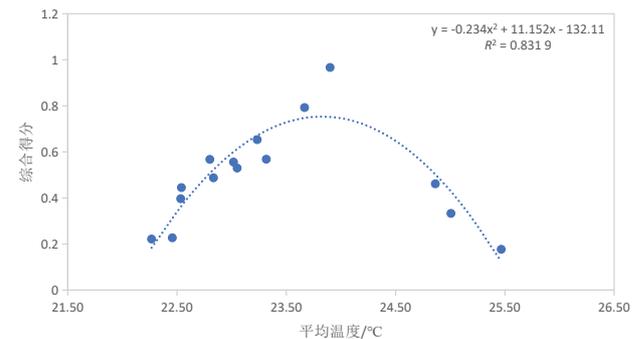


图5 平均温度对大灰藓综合得分的影响

Fig.5 The effect of average temperature on the comprehensive score of *Calohyponum plumiforme*

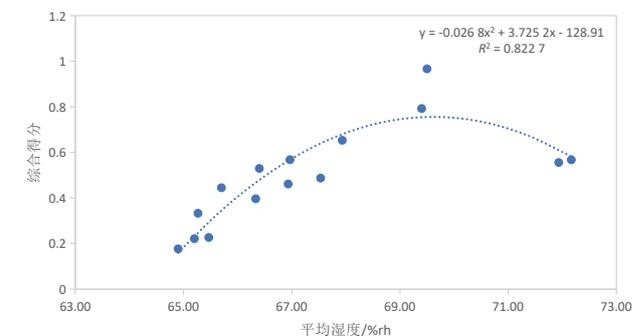


图6 平均湿度对大灰藓综合得分的影响

Fig.6 The effect of average humidity on the comprehensive score of *Calohyponum plumiforme*

关性,与平均湿度则无显著相关性(表2)。结合图7可以发现,冠层结构的叶面积指数为2.5~3.5、平均林隙分数为0.08~0.1、平均叶倾角为35~45、平均冠层表现聚集度因子为0.8~1时,更适合大灰藓的生长。

3 讨论

3.1 林下环境对苔藓的生长影响

林下照度、温度和湿度彼此交互影响,同时共同影响苔藓的生长。各因素基本表现为中间高两边低,即过高或过低的照度、温度和湿度都将影响大灰藓的生长,与陈晓

表2 冠层结构与林下环境的相关性

Tab.2 Correlation between canopy structure and understory environment

	平均照度	平均温度	平均湿度
平均叶面积指数	-0.827**	-0.804**	0.042
平均林隙分数	0.659**	0.642**	-0.407
平均叶倾角	0.600*	0.581*	-0.142
平均冠层表现聚集度因子	-0.888**	-0.879**	-0.200

注: *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$ 。

慧^[13]研究苔藓得出的规律一致。经试验检测发现,上午、中午、下午最适平均照度为 $50 \sim 70 \times 100lx$,最适温度为 $23.2^\circ C \sim 24.2^\circ C$,最适湿度为 $68\%rh \sim 70\%rh$ 。杜宝明^[9]研究大灰藓发现,遮光60%对大灰藓生长最好;刘世彪等^[14]研究尖叶拟船叶藓 *Dolichomitriopsis diversiformis* 发现,连续光照下, $20^\circ C \sim 25^\circ C$ 处理下的苔藓植物原丝体生长最快、分枝最多及分化最早;王渝淞^[15]研究发现,大羽藓 *Thuidium cymbifolium* 最适湿度为 $70\%rh \sim 80\%rh$,湿地匍灯藓 *Plagiomaia acutam* 最适湿度为 $80\%rh \sim 90\%rh$ 。以上学者研究结果与本文存在一定差异,不同苔藓对环境的需求具有一定差异,但大幅度范围内特性相对一致,即苔藓的生长需要较温暖、湿度较高和有充足散射光的环境。

3.2 冠层结构对林下环境的影响

冠层结构通过影响林下环境间接影响苔藓的生长。经 Pearson 相关性检验,4个冠层指标与林下平均照度、平均温度均有显著的相关性,与平均湿度则无显著相关性,这与段瑞君等^[16-17]在其他类似的实验中得出的部分结果比较相似。冠层结构影响林下湿度不显著的原因可能是试验地为人工园林,每天会进行人为水雾加湿,相比喷淋的直接加湿,冠层结构所起到的作用则显得略微不足。而照度和温度受人工干预相对较小,冠层结构对照度起到直接作用,透过冠层的太阳辐射量直接影响林下局部的温度。

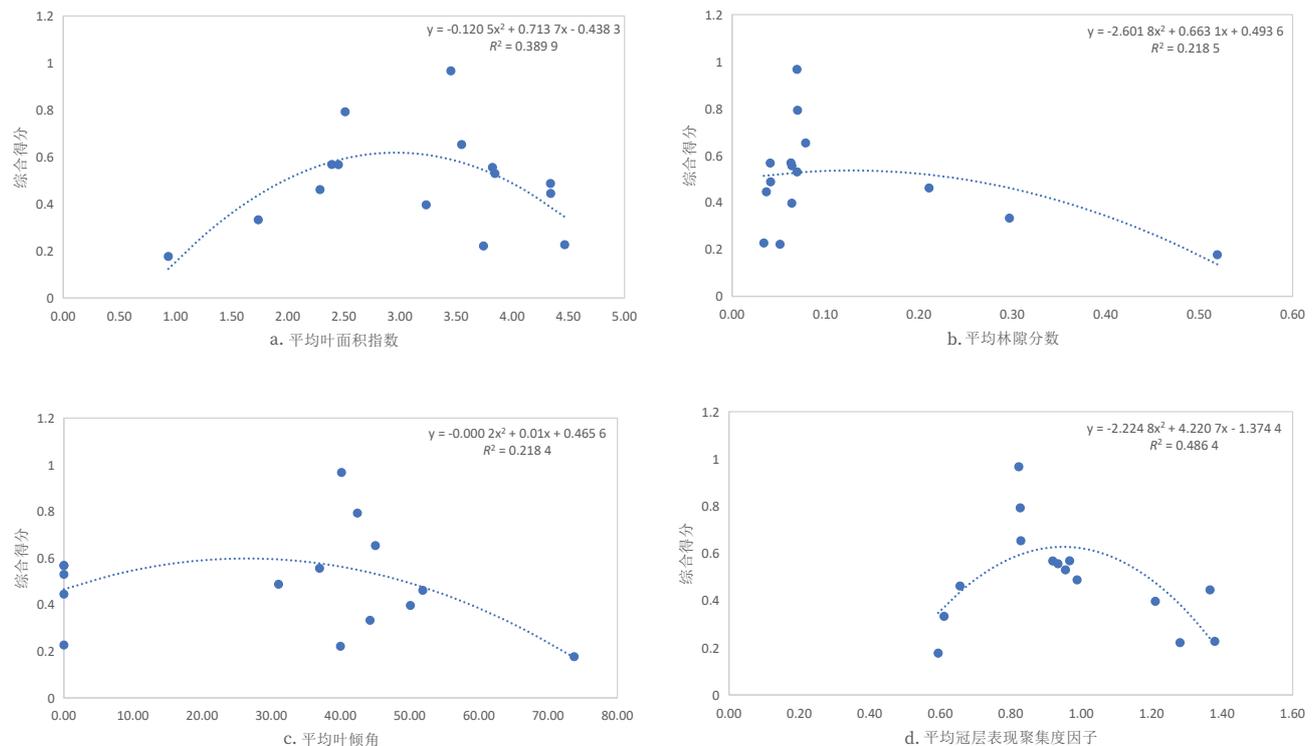


图7 冠层结构对大灰藓综合得分的影响

Fig.7 The effect of canopy structure on the comprehensive score of *Calohypnum plumiforme*

3.3 苔藓景观营造

在非热带地区户外模拟近热带雨林营造大面积苔藓景观无疑是有难度的。在没有大量天然雨水的补给下,需要靠人工的辅助方能保证维持大量苔藓生长所需要的环境。除了人工喷淋等设施外,搭建合适的群落冠层结构对下层苔藓的生长也能起到重要的作用。多层的冠层结构是营造出近热带雨林下苔藓景观的重要手段。本研究调查发现,高山榕 *Ficus altissima*、楝叶吴萸 *Tetradium glabrifolium* 和非洲楝 *Khaya senegalensis* 等叶片大小中等且叶片不太密集的树种适合作为上层乔木,海芋 *Alocasia odora*、春羽 *Thaumatococcus bipinnatifidum* 和龟背竹 *Monstera deliciosa* 等大叶植物可以做中下层植物,同时在苔藓周围辅以种植华南毛蕨 *Cyclosorus parasiticus*、蜈蚣凤尾蕨 *Pteris vittata* 等蕨类作为下层植物,便可以较好地营造出热带雨林中的苔藓景观。此外,多层的冠层结构还可以为苔藓缓冲雨水,防止苔藓因暴雨的冲刷而从土壤中脱落。

4 结论

本文通过量化检测冠层结构指标与分析林下生境条件得出,冠层结构通过影响林下生境间接影响大灰藓的生长。最适合大灰藓生长的平均照度为 $50\sim 70\times 100\text{lx}$,温度为 $23.2^{\circ}\text{C}\sim 24.2^{\circ}\text{C}$,湿度为 $68\%\text{rh}\sim 70\%\text{rh}$ 。这些数据反映到林冠层结构表现为:叶面积指数为 $2.5\sim 3.5$,平均林隙分数为 $0.08\sim 0.1$,平均叶倾角为 $35\sim 45$,平均冠层表现聚集度因子为 $0.8\sim 1$ 。因此,苔藓景观营造过程中,要确保苔藓生境有较高的湿度、较温暖的温度和足够的散射光。利用多层植物可为营造这一条件生境提供支持。

本次试验场地非实验室,虽然试验在取样过程中尽可能规避非试验因素,但不可避免地受外界多方因素影响,包括管养因素等,可能使结果存在微小误差。但总体的经验对苔藓景观营造是有效的。另外,本次试验对苔藓的生长只从表观进行评估,在条件允许的情况下,未来可考虑从分子生态学角度分析不同生境下苔藓的生理反应,为更精准判断苔藓的生长条件提供参考。

注:图3改绘于《广州花园——锣鼓坑片区建设工程设计》中的雨林与空中花园实施方案平面图,其余图片均由作者自绘自摄。

参考文献:

- [1] 朱克松,丁晓璐,李易衡,等. 10 种藓类植物的耐旱性能研究 [J]. 安徽农业科学, 2018, 46 (9): 4-7.
- [2] 朱瑞良,马晓英,曹畅,等. 中国苔藓植物多样性研究进展 [J]. 生物多样性, 2022, 30 (7): 86-97.
- [3] 关易云,雷纯义,王倩,等. 大灰藓低温响应的动态 [J]. 中山大学学报 (自然科学版) (中英文), 2023, 62 (1): 124-130.
- [4] 杜宝明. 大灰藓 (*Hypnum plumaeforme*) 的栽培和抗旱性研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2011.

- [5] 毛祝新,王宇超,卢元. 环境因子对苔藓植物生长的影响 [J]. 广西林业科学, 2021, 50 (6): 748-752.
- [6] 张雪,韩凤朋,肖波,等. 黄土高原生物结皮对地表粗糙度和灌草植物种子二次扩散的影响 [J]. 植物生态学报, 2023, 47 (12): 1668-1683.
- [7] 吴鹏,程贾渝. 中国苔藓志: 第八卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [8] 洪春桃. 大灰藓 (*Hypnum plumaeforme*) 的耐盐性研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- [9] 杜宝明,张楠,季梦成. 遮光和不同基质对观赏藓类大灰藓生长的影响 [J]. 中国园林, 2012, 28 (4): 55-57.
- [10] 李雨姗,肖曼,张会萍,等. 不同生长基质对白云山国家森林公园苔藓谱系多样性的影响 [J]. 植物科学学报, 2021, 39 (6): 600-609.
- [11] 宋泊沂,王明明,庄伟伟. 3 种苔藓植物对模拟大气气沉降的生理响应 [J]. 植物研究, 2024, 44 (1): 107-117.
- [12] 谢伟文,马绵英,关开朗,等. 白云山景区南北坡向次生裸地植被恢复差异分析 [J]. 热带农业科学, 2023, 43 (8): 93-99.
- [13] 陈晓慧,荷叶. 日本长崎县城区苔藓植物群落物种多样性研究 [J]. 内蒙古民族大学学报 (自然科学版), 2018, 33 (2): 166-169.
- [14] 刘世彪,陈军,李菁,等. 光照和温度对尖叶拟船叶藓孢子萌发及原丝体发育的影响 [J]. 西北植物学报, 2003 (1): 101-106.
- [15] 王渝崧. 坝上地区生物结皮防治风蚀扬尘的试验研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [16] 邵铭杰. 基于微气候舒适性的兰州滨水公园公共活动空间设计策略研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- [17] 段瑞君,谢意,宋词,等. 青海大学两种植物群落秋季降温增湿作用研究 [J]. 青海大学学报, 2020, 38 (5): 40-45.

作者简介:

戚甫友 / 1982 年生 / 男 / 山东济宁人 / 硕士 / 广州普邦园林股份有限公司 (广州 510600) / 高级工程师 / 专业方向为风景园林

谢伟文 / 1996 年生 / 男 / 广东茂名 / 硕士 / 广州普邦园林股份有限公司 (广州 510600) / 专业方向为园林植物与景观生态

董晨露 / 1994 年生 / 女 / 河南焦作人 / 硕士 / 广州普邦园林股份有限公司 (广州 510600) / 工程师 / 专业方向为风景园林

丁丽君 / 1983 年生 / 女 / 广东广州人 / 硕士 / 广州文化公园 (广州 510130) / 专业方向为城市公园建设管理、园林植物

(* 通信作者) 谭广文 / 1959 年生 / 男 / 广东广州人 / 硕士 / 广州普邦园林股份有限公司 (广州 510600) / 教授级高级工程师 / 专业方向为园林植物、风景园林规划设计 / E-mail: 1002871592@qq.com