不同郁闭度城市林荫生境的植物多样性*

吴 奇 蒋亚蓉 李秋月 邢小艺 李 松 杨 麟 白 婷

华中农业大学园艺林学学院 武汉 430070

摘要:【目的】探讨不同郁闭度林荫生境对林下栽培植物和自生植物种类多样性的影响,为城市阴生生境植物种类选择和景观营造提供科学指导。【方法】以华中农业大学校园为例,通过网格系统取样法,结合郁闭度、光照强度季节性测定及植物群落调查,分析不同郁闭度林下植物多样性的季节响应特征。【结果】林荫生境的光照强度较全光环境降低约 80%,林下郁闭度普遍较高,且与光照强度显著负相关。夏季郁闭度约 0.6 时,草本层丰富度最高,冬季中、低郁闭度有利于增加林下植物多样性。当郁闭度达到 0.9 时,栽培植物种类单一,仅马兰、渐尖毛蕨、黄鹌菜等自生植物能良好生长,这些植物是提升林下植物多样性的关键种质资源。冬季常绿落叶阔叶混交林郁闭度适中,其草本层丰富度明显高于常绿阔叶林和落叶阔叶林,且冬季各林分条件下的草本植物丰富度较夏季显著增加。【结论】林下植物多样性受郁闭度与季节共同调控,中、低郁闭度及混交林分是维持草本层多样性的关键条件。未来应综合考虑郁闭度的季节变化以及林分管理等因素,采取合理措施优化林下光照环境,促进城市森林生态系统的健康和可持续发展。

关键词:光照强度;郁闭度;耐阴植物;自生植物;物种多样性

DOI:10.12169/zgcsly.2024.12.19.0002

Plant Diversity in Urban Shaded Habitats with Different Canopy Densities

Wu Qi Jiang Yarong Li Qiuyue Xing Xiaoyi Li Song Yang Lin Bai Ting

(College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China)

Abstract:【Objective】To explore the effects of different canopy densities on species diversity of understory cultivated plants and spontaneous plants in shaded habitats, enhance the diversity of understory plants and establish stable plant communities.【Method】With the campus of Huazhong Agricultural University as a study case, the seasonal response characteristics of understory plant diversity under different canopy densities are analyzed using grid system sampling method, combined with seasonal determination of canopy density, light intensity, and plant community investigation.【Result】The light intensity in shaded habitats decreases by about 80% compared to full light environments, and the canopy densities under the forest is generally higher, which is significantly negatively correlated with light intensity. When the summer canopy density is about 0. 6, the richness of the herbaceous layer is the highest, and in winter, medium and low canopy densities are beneficial for increasing understory plant diversity. When the canopy density reaches 0. 9, there are few cultivated plant species, and only spontaneous plants such as *Aster indicus*, *Cyclosorus acuminatus*, and *Youngia japonica* can grow well. These plants are the key germplasm resources for improving understory plant diversity. When canopy densities of the mixed evergreen deciduous broad-leaved forest are moderate in winter, its herbaceous layer richness is significantly higher than that of the evergreen broad-leaved forest and deciduous broad-leaved forest. Moreover, the herbaceous plant richness under various forest conditions in winter significantly increases compared to summer.【Conclusion】The diversity

收稿日期:2024-12-19

* 基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2662021YLQD005)

第一作者:吴奇(1999-),女,硕士生,研究方向为园林植物应用与生态。E-mail:915200258@qq.com

通信作者:蒋亚蓉(1993-),女,博士,讲师,研究方向为园林植物应用与生态。E-mail:jiangyarong@mail.hzau.edu.cn

of understory plants is jointly regulated by canopy density and season, and medium to low canopy densities and mixed forest stands are the key conditions for maintaining herbaceous layer diversity. In the future, we should comprehensively consider the seasonal changes in canopy density and forest management factors, take reasonable measures to optimize the understory lighting environment, and promote the healthy and sustainable development of urban forest ecosystems.

Keywords: light intensity; canopy density; shade tolerant plant; spontaneous plant; species diversity

随着城市化进程加快，高层建筑、高架桥以及不断生长扩张的林木等因素形成的阴生生境已占城市绿地 50%以上[1-2]。目前此类生境面临两大矛盾：其一，高郁闭空间持续扩张与适生植物匮乏的矛盾，导致林下植被覆盖不足、缺株斑秃现象显著[3]。例如，在北京奥林匹克森林公园和纽约中央公园等著名城市公园养护管理中发现，林荫之下植物多样性难以维持[4-5]。其二，生态建设标准提升与景观同质化的矛盾，《国家园林城市评价标准》等虽强化了林荫覆盖率指标，但林荫之下可应用植物种类非常单一[6]，且植物群落的结构和色彩欠缺[7]。实践表明，欧美城市基于自然的解决方案的应用导致对环境耐受性植物需求激增[8]。为此，国内外学者归纳总结了较多耐阴植物种类用于阴地植物景观营造。例如，日本放送协会（NHK）通过长期的实地观测与研究，推荐了适应落叶树下生长的植物种类[9]；Susanna[10]则针对不同程度的林荫生境，梳理了适宜植物种类。然而目前对乡土耐阴植物适应性缺乏系统研究，忽略了城市本土原生植物的潜力，因此迫切需要深入探究其特征，以优化植物配置实践，丰富林下植被，提升城市绿地生态与景观综合质量。

林下植物是城市森林群落的基础组成部分，在维持城市物种多样性及生态系统稳定性等方面发挥积极作用[11]。而林下植物的多样性与上层树木的郁闭度密不可分。研究表明，尾巨桉（*Eucalyptus urophylla* × *grandis*）人工林的郁闭度影响了林下透光率，进而改变了林下植物的多样性[12]。郁闭度较小的树种其林下光照较多，林下植物的物种丰富度更高[13-14]。但也有研究发现，相比于高郁闭度（>0.7）的树种，中郁闭度的树种对人工经济林的林下植物多样性起着正向增加的作用，控制郁闭度在 0.45～0.6 能保持较大的林下植物多样性[15]。然而，当前研究主要针对树种单一的经济纯林，而城市林荫生境具有显著异质性，林分结构混杂，生境破碎严重[16-17]，其林下植物多样性对不同郁闭度的响应特征仍不清楚。此外，郁闭度和光照呈现季节性变化，同样会影响林下植物群落结构和多样性[18-19]。因此，有必要深入研究城市林下植物多样性对不同郁闭度的季节响应规律。

本研究选取林荫覆盖率高，且受高层建筑影响较小的华中农业大学校园为研究地点，于夏至日和冬至日前后分别测定林下郁闭度和光照强度，调查林下栽培植物和自生植物多样性，探究林下植物多样性特征对不同郁闭度的响应，以期为城市阴生生境植物种类选择和景观营造提供科学指导。

1　研究区概况

武汉市位于我国中部，四季分明，日照充足，年日照总时数 1 810～2 100 h，年总辐射 4 354.3～4 773 MJ · cm^{-2}。植被以常绿阔叶林和落叶阔叶林为主，林荫生境复杂多样。气候夏热冬冷，对植物耐受性要求较高。华中农业大学（29°58′—31°22′N，113°41′—115°05′E）位于武汉三环内，建筑平均高度（14.4 m）和密度（26.1%）较低。校园林荫遍布，林下植物多样性较高，植物群落相对稳定，兼具自然与人工的植被群落特征。

2　研究方法

2.1　样方设置

基于天地图 2024 年高分辨率遥感影像，利用 ArcGIS 10.8 绘制华中农业大学校园建成区平面图。该区域地形平坦，海拔（约 30 m）和土壤条件（pH 约 6.04）二者空间变异程度较低，环境基底条件相对均一，并由校园环维中心实施网格化管理，确保环境监管全覆盖[20]。研究区域内基本形成了乔灌草相结合的绿化体系，林下植物种类较为丰富，同时内部规划了大量绿廊，存在大面积的林下空间。由于建成区的植被分布较为均

匀且具典型性，因此采用网格系统取样法进行实地调研[21-22]。根据预试验，沿南北方向布置 200 m×200 m 的网格线，取网格线交叉点为调研样点，去除无效样点（如落在建筑上和裸露土地的点），确保每个分区都有样点分布，最终保留 41 个样点。同时，在每个样点布设 1 个 10 m×10 m 的乔木层样方，再在样方对角线处分别设置 2 个 2 m×2 m 的灌木层样方，草本层样方为 1 m×1 m。

2.2 植物群落调研

于 2023 年夏至日（6 月 21 日）和冬至日（12 月 21 日）前后 10 天进行植物调研和光强测定（后文简称为夏季和冬季）。将样地植被分为常绿阔叶林（Evergreen broad-leaved forest，EF）、落叶阔叶林（Deciduous broad-leaved forest，DF）、常绿落叶阔叶混交林（Mixed evergreen deciduous broad-leaved forest，MF）3 种林分类型以及乔灌草、乔草、乔灌 3 种植被层次[23]。详细记录样地的林分类型，各层植物种类（栽培与自生）、盖度、优势种、群落结构以及样方郁闭度、光照强度，其中光照强度需选择晴朗无风的天气，使用数字照度计从上午 9：00—11：00 在选定植物群落内（即群落样地中心以及东西南北 4 个方向）进行测定，各测点设在离地面 1.3 m 处，每个测点测量 3 次，待仪器稳定后读取数值，取其平均值[24]。为降低因光照强度随时间波动引入的测量误差，单个群落内全部测点的时间控制在 10 min 以内，并且沿样地对角线分两次设定样线，通过测量样线上植物所覆盖的样线长度计算郁闭度[25]。将林下郁闭度划分为高（0.7～1）、中（0.4～0.7）、低（0～0.4）3 个梯度[26]。

2.3 数据分析

数据整理和计算在 Excel 2019 和 R 语言（4.3.1）中进行。采用 Patrick 丰富度指数表征物种多样性，并在 R 语言的 vegan 包中计算[27]。郁闭度对林下光照强度、林下植物多样性的影响分别采用线性回归分析和非参数化回归分析，下载 agricolae 包对不同时期郁闭度、不同林分类型以及不同植被层次林下植物多样性差异显著性进行 Duncan 检验，其中乔灌结构因缺乏草本层，数据未纳入分析。箱线图、散点图等统计图由 R 语言的 ggplot2 绘制。物种频度为植物出现的样方数占总样方数的百分比。

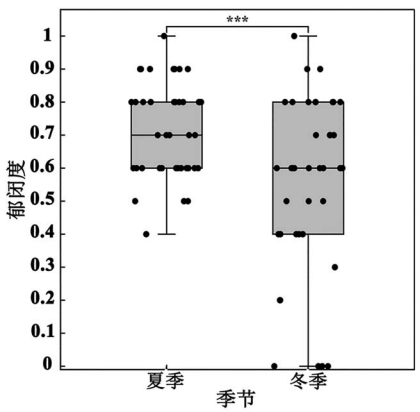
3 结果与分析

3.1 植物多样性特征

研究区共记录 50 科 74 属 97 种植物，其中乔木 26 种（27%），灌木 26 种（27%），藤本 4 种（4%），草本 41 种（42%）。草本植物中，自生植物种类 30 种，占比为 73%，如马蹄金（*Dichondra micrantha*）、车前（*Plantago asiatica*）、酢浆草（*Oxalis corniculata*）、渐尖毛蕨（*Cyclosorus acuminatus*）等，栽培植物 11 种（27%），主要是吉祥草（*Reineckea carnea*）、麦冬（*Ophiopogon japonicus*）、蜘蛛抱蛋（*Aspidistra elatior*）。林下草本植物以多年生为主，禾本科、豆科、菊科植物种类较多，且多为观叶植物，观花植物较少。此外，冬季自生植物丰富度较夏季多 19 种，如蛇莓（*Duchesnea indica*）、紫花地丁（*Viola philippica*）、酢浆草等。

3.2 郁闭度与林下光照强度

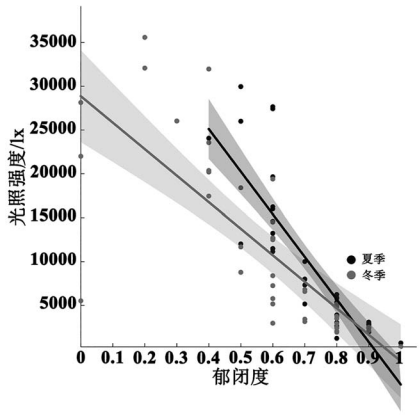
根据调查结果，研究区中林下光照强度主要为 5 000～20 000 lx，仅为全光照的 10%～20%，说明林荫生境的光照强度较全光环境降低了约 80%。其中，夏季 90%样地的郁闭度>0.6 且光照强度<30 000 lx，而冬季 62%样地的郁闭度>0.6 且光照强度<20 000 lx。由图 1 可知，夏季和冬季的最大郁闭度均达到了 1，香樟（*Camphora officinarum*）林在夏季郁闭度较高，而桂花（*Osmanthus fragrans*）林在冬季郁闭度高。夏季郁闭度（平均值 0.72）显著（$P<0.001$）高于冬季郁闭度（平均值 0.57）。



注：*** 代表 $P<0.001$。

图 1 夏季与冬季林下郁闭度比较

由图 2 可知，郁闭度与光照强度显著负相关（$P<0.001$）。夏季林下光照强度大于冬季（$P=0.31$），且随着郁闭度的增加，夏季的光照强度快速降低，当郁闭度为 0.867～1 时，冬季林下光照强度略强于夏季。



注：$R^2_{夏}=0.718\ 3$，$P_{夏}<0.001$；$R^2_{冬}=0.591\ 3$，$P_{冬}<0.001$。

图 2　林下郁闭度与光照强度线性回归曲线

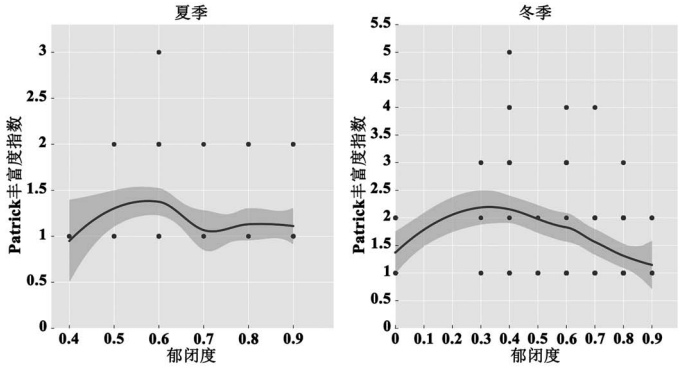
3.3　不同郁闭度对林下灌木层和草本层多样性的影响

3.3.1　郁闭度与灌木层植物多样性

根据调查结果，林下灌木层的 Patrick 丰富度为 1～1.5，主要有蜡梅（*Chimonanthus praecox*）、石榴（*Punica granatum*）、海桐（*Pittosporum tobira*）、八角金盘（*Fatsia japonica*）、红叶石楠（*Photinia* × *fraseri*）等，其中海桐、八角金盘在高郁闭生境表现良好。不同郁闭度和季节变化下林下灌木层的 Patrick 丰富度差异均不显著（$P>0.05$）。

3.3.2　郁闭度与草本层植物多样性

根据调查结果，林下草本层植物 Patrick 丰富度为 1～5。由图 3 可知，当夏季的郁闭度约为 0.6 时，草本层的 Patrick 丰富度最高；而冬季林下草本层的 Patrick 丰富度随郁闭度增加呈先增后减的钟型曲线的趋势，当郁闭度为 0.3～0.4 时，Patrick 丰富度最高。



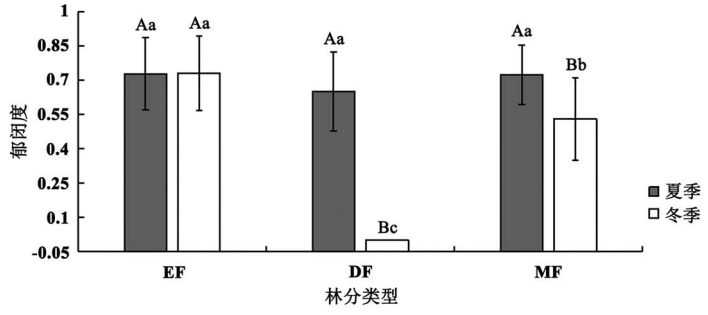
注：由于存在散点重叠的现象，图中散点的数量存在差异。

图 3　夏季和冬季郁闭度与林下草本层植物 Patrick 丰富度的回归曲线

3.4　不同林分类型对林下郁闭度和多样性的影响

3.4.1　林分类型与林下郁闭度

由图 4 可知，夏季 3 种林分类型的郁闭度差异不显著，平均约为 0.7。冬季 EF>MF>DF，且有明显的差异性（$P<0.001$）。EF 的郁闭度在夏、冬季差异不显著；而 MF 的郁闭度在夏、冬季差异显著（$P<0.001$），冬季平均为 0.53。



注：不同小写字母表示同季节不同林分的差异显著（$P<0.05$）；不同大写字母表示同林分不同季节的差异显著（$P<0.05$）；下同。

图 4　3 种林分类型林下郁闭度季节变化

3.4.2 林分类型与灌木层植物多样性

调查结果显示，3 种林分类型的灌木层 Patrick 丰富度没有明显差异，在不同林分类型和季节中差异均不显著（$P>0.05$）。

3.4.3 林分类型与草本层植物多样性

由图 5 可知，夏季，3 种林分类型下草本层植物 Patrick 丰富度没有明显差异（$P=0.973$），而冬季 MF 明显大于其他两种林分类型。冬季 EF、MF 的草本层丰富度均明显大于夏季，DF 冬季与夏季差异不明显。此外，夏季和冬季，不同林分植被层次草本植物 Patrick 丰富度差异并不显著（$P>0.05$）。

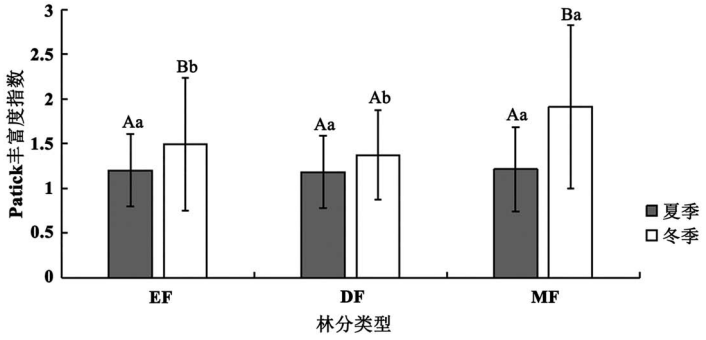


图 5 3 种林分类型林下草本层植物 Patrick 丰富度指数季节变化

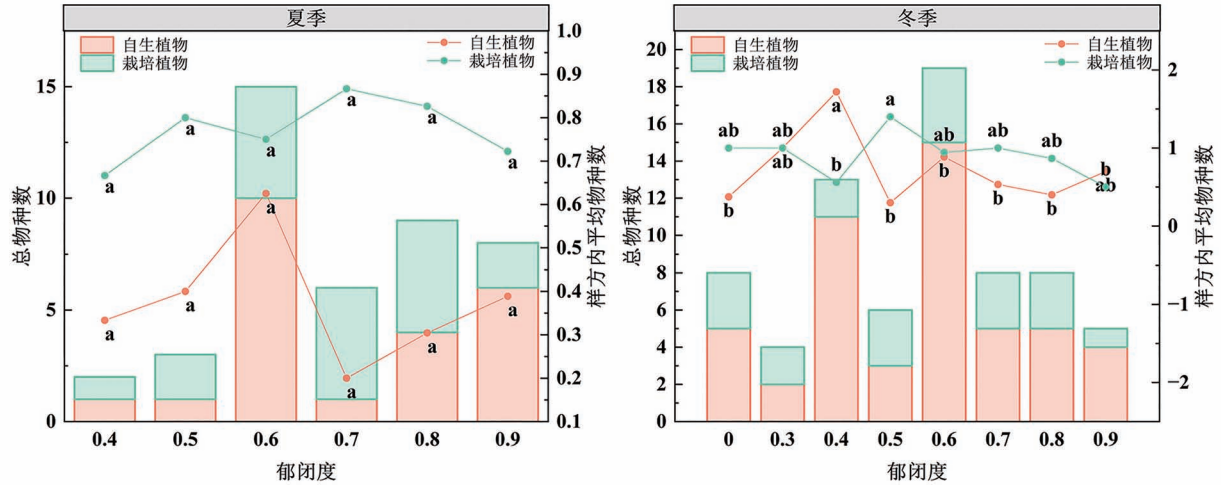
3.5 不同郁闭度下草本植物分布格局

3.5.1 栽培草本分布格局

夏、冬两季样方内栽培草本物种数随郁闭度变化不显著（$P>0.05$），通常为 0~2 种（图 6）。夏季栽培草本共应用 9 种，以吉祥草、麦冬、草坪草为主。当郁闭度达到 0.9 时，栽培草本仅吉祥草和麦冬能存活（盖度均值分别为 87% 与 55%）。当郁闭度大于 0.8 时，林下草坪草盖度出现显著下降，秃裸面积占比达 30%以上。冬季栽培草本植物总物种数与夏季持平（9 种）。当郁闭度为 0.6 时，应用种类最多，如红花酢浆草（*Oxalis corymbosa*）、吉祥草等。在高郁闭度生境中，栽培草本以吉祥草为主。

3.5.2 自生草本分布格局

郁闭度与季节对样方内自生草本物种数有显著影响（$P<0.05$），且冬季不同郁闭度样方内自生草本物种数存在显著差异（$P<0.001$）（图 6）。

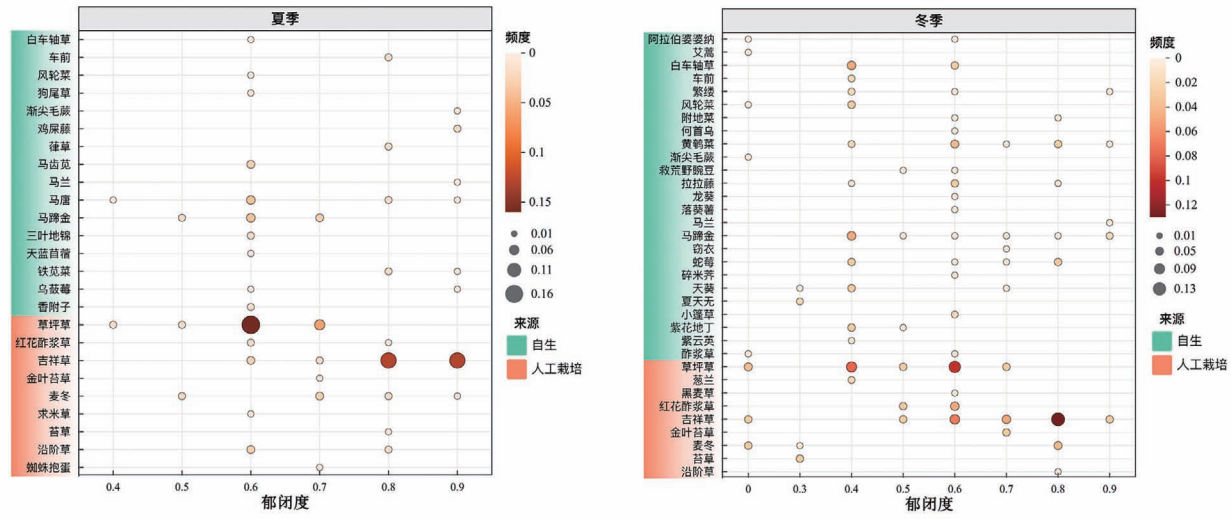


注：不同小写字母表示同季节不同郁闭度的差异显著（$P<0.05$）。

图 6 夏季与冬季草本植物在不同郁闭度中的物种组成和样方内物种数变化

由图 7 可知，夏季自生草本总物种数随郁闭度增加呈单峰型变化，峰值出现在郁闭度 0.6（10 种，样方均值 0.63 种），以马蹄金、马齿苋（*Portulaca oleracea*）等广适性物种为主。高郁闭度总物种数与样方内自生草本物种数均较低；当郁闭度达到 0.9 时，总物种数减至 6 种，其中马

兰、渐尖毛蕨表现较好，平均盖度能达到 50%以上，可作为极阴生境关键种。冬季自生草本总物种数随郁闭度增加呈双峰型变化（图 7），主峰值出现在郁闭度 0.6（15 种），以黄鹌菜、白车轴草（*Trifolium repens*）为主等；次峰出现在郁闭度 0.4（11 种），其中马蹄金、白车轴草等出现频率较高，且样方内自生草本物种数峰值向低郁闭度 0.4 偏移（$R^2 = 0.09$，$P < 0.001$）。当郁闭度达到 0.9 时，总物种数较夏季减少 2 种，而马蹄金、繁缕（*Stellaria media*）、黄鹌菜仍能适应 0.9 的高郁闭度生境，表现出较强的耐阴性。此外，紫花地丁、天葵（*Semiaquilegia adoxoides*）、救荒野豌豆（*Vicia sativa*）等在中郁闭度生境中出现，具备较高的开发潜力。



注：图中列举的植物按首字母拼音进行排序；气泡颜色越深、直径越大，代表频度越大。

图 7　夏季与冬季草本植物在不同郁闭度中的频度分布

4　讨论

4.1　林下郁闭度与光照强度的季节动态

林下郁闭度与光照强度的关系呈现显著的季节依赖性。本研究发现，林荫生境的光照强度较全光环境降低了约 80%，其林下郁闭度普遍较高，达到了 0.6~0.9。这充分表明了树木遮荫防晒的功能，同时也体现了城市林荫生境的光照条件普遍较差，且随着林木的生长，林下更为郁闭，不利于群落的长期稳定发展。因此，有必要采取相应的管理措施调控林分郁闭度。

4.2　林荫生境植物的多样性特征

林荫生境中耐阴植物以草本为主，藤本和灌木多样性较低。目前，吉祥草、麦冬等已作为极耐阴的地被植物在武汉林下绿地中被大量应用，同质化程度较高。而本研究在林下发现较多具有观赏价值的乡土植物，能耐受极阴的生境，如马兰、渐尖毛蕨、黄鹌菜、繁缕等，具有良好的开发潜力。此外，冬季林下自生草本丰富度较夏季显著增加，例如日本晚樱（*Prunus serrulata* var. *lannesiana*）林下从 2 种增至 8 种，这可能是由于冬季上层树木落叶，露出部分林窗，林下光照条件增强，进而促进植物生长与更新。

4.3　不同郁闭度对林下植物多样性的影响

4.3.1　灌木层多样性对郁闭度的响应

灌木层多样性对郁闭度的响应不显著。研究表明，郁闭度与人工林林下灌木多样性存在先上升后下降的变化趋势[28]。这种差异可能与人工栽植和管理养护有关。现有林下灌木以海桐、八角金盘为主，乡土耐阴灌木（如白檀 *Symplocos tanakana*、臭牡丹 *Clerodendrum bungei*）应用较少[29]。尽管高郁闭度生境中灌木生长良好，但其低丰富度（1~1.5）反映了乡土耐阴灌木资源的开发不足。未来需加强乡土灌木的筛选与应用，并结合动态郁闭度调控（如修枝疏冠），探索其在城市林下的适应性。

4.3.2　草本层多样性对郁闭度的响应

草本层多样性对郁闭度的响应呈现显著季节差异。夏季郁闭度约为 0.6 时，草本层丰富度最高，这与王依瑞等[15]的研究一致；而冬季中、低

郁闭度有利于林下草本植物多样性增加，且丰富度随郁闭度增加呈先增后减的钟型曲线的趋势，这表明在一定范围内，适度的郁闭度有利于草本植物的生长和多样性的增加。此外，本研究揭示了夏季（生长季）和冬季（非生长季）不同郁闭度林下植物多样性的差异，而林下植物多样性的四季以及多年的变化规律还需进一步研究。

冬季 MF 的郁闭度相对适中（0.53±0.181），为草本植物提供了多样化的生境，因而草本植物多样性最高。而 DF 的郁闭度偏低，导致夏冬两季的草本植物多样性差异不显著。EF 在夏冬两季的郁闭度基本相同，但林下光的季节变化使冬季草本层多样性较夏季有所提高。城市林分结构通常因为树种的组分不同而对林下植被的生长、分布有着较大的影响[30]。未来可深入研究林荫生境中落叶乔木比例对林下植物多样性的影响，以及如何通过修枝、施肥等养护管理措施，实现林下光照资源的合理利用和植物多样性的最大化。

此外，栽培草本和自生草本在不同郁闭度中的时空分布格局存在差异。栽培草本物种数受人为影响，随郁闭度变化较为稳定；而自生草本对郁闭度和季节响应更为敏感，物种数存在明显差异。原因可能是对于林荫生境，郁闭度是影响自生草本分布的重要因素[31]。冬季落叶导致林窗开放，光照增强，促进休眠种子萌发（如紫花地丁），同时低温抑制竞争物种生长，形成季节性生态位释放；而夏季高郁闭度抑制多数自生草本，仅极耐阴植物存活（如渐尖毛蕨）。

不同植物对郁闭度的适应性不同，如吉祥草适应中高郁闭度，而草坪草仅适应低中郁闭度，渐尖毛蕨适应高郁闭度。这反映了植物对光照的生态位幅度不同，在应用中有必要对其进行精细化评估以指导应用[6]。同时在 0.8 以上的高郁闭度环境中，林下植物的多样性很低，因此筛选适应高郁闭度生境的耐阴植物是提升林下植物多样性的关键。此外，本研究仅选取了校园植被进行调查，后续有必要对近自然植物群落中的林下植物进行调研，有助于开发更多乡土耐阴植物种类。

4.4 城市林荫生境绿地优化策略

一是动态调控林分郁闭度，通过修剪乔木将夏季郁闭度控制在 0.4～0.6，以满足遮阴需求，冬季调整为 0.3～0.4，以保障透光性，林下重点绿化区域的上层乔木采用 MF 类型；二是实施郁闭度分级植物配置，中郁闭度区域种植马蹄金、紫花地丁等草本植物，高郁闭度区域优选马兰、渐尖毛蕨等耐阴乡土植物；三是结合落叶树种季相特征开展景观设计，通过水仙（*Narcissus tazetta* subsp. *chinensis*）、老鸦瓣（*Amana edulis*）等春季球根植物与玉簪等春秋生长的耐阴植物的时序组合，实现四季景观延续[9,32]；四是利用植物光环境指示作用指导林下植物配置，如绣球（*Hydrangea macrophylla*）能正常开花的区域为散射弱光环境需种植耐阴植物[9]，而草坪草分布区域则指示光照良好宜配置喜阳植物。

5 结论

林荫绿地的郁闭度多在 0.6 以上，过高的郁闭度会抑制林下植物多样性，而中、低郁闭度则有利于增加其多样性。冬季常绿落叶阔叶混交林的草本层丰富度明显高于落叶阔叶林和常绿阔叶林。不同郁闭度下草本植物的分布表现出明显的时空异质性，能适应高郁闭度生境的栽培植物较少。马兰、渐尖毛蕨、黄鹌菜、繁缕等自生植物能耐受极阴的生境，具有良好的开发潜力，为城市林下绿化提供了重要资源。未来有必要进一步筛选和评估耐阴植物，并综合考虑郁闭度的季节变化以及林分管理等因素，采取合理措施优化林下光照环境，促进城市森林生态系统的健康和可持续发展。

参考文献

[1]TAN P Y, ISMAIL M R B. Building shade affects light environment and urban greenery in high-density residential estates in Singapore[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2014, 13(4): 771-784.

[2]陈斌,刘筱玮,贾琳,等.光强对 4 种鸭跖草科植物生长和光合特性的影响[J].生态学报,2022,42(4):1450-1461.

[3]李娜,张平安,张烨.耐阴地被植物在郑州市园林景观中的应用初探[J].河南林业科技,2023,43(1):27-30.

[4]李英男,杨秀珍,任利超,等.北京奥林匹克森林公园地被植物的应用[J].北京林业大学学报,2010,32(S1):189-193.

[5]ATHA D, ALVAREZ R V, KEN C Y, et al. The spontaneous vascular plant flora of New York's central Park1[J]. The Journal of the Torrey Botanical Society, 2020, 147(1): 94.

[6]温韦华，陈燕，刘东焕，等.10 种园林植物的耐阴性比较研究[J].中国园林，2018，34(9)：104-108.

[7]徐小玉，王焕.武汉市高架桥下绿化现状及模式探讨[J].江汉大学学报(自然科学版)，2022，50(6)：91-96.

[8]FRANCINI A，TOSCANO S，FERRANTE A，et al.Method for selecting ornamental species for different shading intensity in urban green spaces[J].Frontiers in Plant Science，2023，14：1271341.

[9]日本 NHK.背阴花园设计与植物搭配[M].光合作用，译.长沙：湖南科学技术出版社，2020.

[10]SUSANNA G.Shade：work with the light，grow the right plants，bring dark corners to life[M].London：Frances Lincoln，2022.

[11]孟祥玉，范舒欣，董丽，等.北京城市森林林下植物多样性与土壤因子的相关性[J].东北林业大学学报，2023，51(7)：102-114.

[12]段文军，李达，李冲.不同林龄尾巨桉人工林林下植物和种子库多样性比较及影响因素分析[J].中南林业科技大学学报，2022，42(12)：26-33，81.

[13]姜祖扬，覃业辉，刘季，等.海拔和林分密度对热带雨林林下植物多样性的影响[J].生态学杂志，2023，42(5)：1049-1055.

[14]REN S Y，ALI A，LIU H M，et al.Response of community diversity and productivity to canopy gap disturbance in subtropical forests[J].Forest Ecology and Management，2021，502：119740.

[15]王依瑞，王彦辉，段文标，等.黄土高原刺槐人工林郁闭度对林下植物多样性特征的影响[J].应用生态学报，2023，34(2)：305-314.

[16]LI X P，LI X L，ZHANG M Y，et al.Urban park attributes as predictors for the diversity and composition of spontaneous plants-A case in Beijing，China[J].Urban Forestry & Urban Greening，2024，91：128185.

[17]徐珊珊，严靖，彭志，等.上海城市森林草本植物多样性的城乡分布格局[J].生态学杂志，2022，41(1)：25-32.

[18]周光，徐玮泽，万静，等.长白山阔叶红松林不同演替阶段林下红松幼苗能量与养分季节动态[J].应用生态学报，2021，32(5)：1663-1672.

[19]YIN J，MAO Z K，JIANG P C，et al.Seasonal variations in the mechanisms of understory herb diversity in a temperate forest in Northeast China[J].Ecological Indicators，2024，160：111827.

[20]华中农业大学资产经营与后勤保障部.【卓越后保人】记为绿色校园建设默默奉献的校园美容师[EB/OL].(2021-03-26)[2024-12-19].https://hq.hzau.edu.cn/info/1024/5355.htm.

[21]杨超.大学校园的弹性规划体系与空间模式探索：以华中农业大学为例[J].世界建筑，2023(1)：60-66.

[22]骆沁宇，张梦园，李晓璐，等.北京城市绿地不同生境自生植物多样性特征及其功能性状组成[J].生态学报，2024，44(11)：4744-4757.

[23]张亚琴，郭其强，罗丝琼，等.不同马尾松林下光环境中油茶叶片和光合特征比较及其与主要环境因子的相关性[J].植物资源与环境学报，2022，31(6)：25-33.

[24]何萍，于颖，范文义，等.基于 4-Scale 模型的人工林郁闭度遥感估测[J].南京林业大学学报(自然科学版)，2023，47(1)：23-30.

[25]隋夕然，赵庆军，周小青，等.徐州市侧柏人工林林下植物多样性对郁闭度的响应[J].南京林业大学学报(自然科学版)，2024，48(4)：219-226.

[26]褚晨晖.南京市主城区闲置土地分布及植物多样性研究[D].南京：南京农业大学，2020.

[27]李晓鹏，冯黎，黄瑞，等.成都城区河流廊道自生植物的物种组成及其响应不同生境的多度格局[J].中国园林，2023，39(8)：108-114.

[28]郭弘婷，纪小芳，汪成，等.我国人工林林下灌木层植物多样性空间变异及影响要素[J].南京林业大学学报(自然科学版)，2022，46(4)：144-152.

[29]刘秀群，刘海燕，陈龙清.武汉市乡土植物资源及其园林应用潜力[J].湖北农业科学，2009，48(6)：1422-1425.

[30]罗毓明，谭向平，邹晓君，等.我国南方 4 种常见人工林林下植物多样性特征及影响因素[J].热带亚热带植物学报，2022，30(1)：1-10.

[31]李晓鹏，董丽，关军洪，等.北京城市公园环境下自生植物物种组成及多样性时空特征[J].生态学报，2018，38(2)：581-594.

[32]托马斯·雷纳.生态种植势在必行：创建功能性的系统，而非程式化的生态[J].景观设计学，2021，9(1)：112-119.