

DOI: 10.5846/stxb202203150630

邢强, 秦俊, 胡永红. 城市垂直绿墙常用植物的根系构型特征和生长动态. 生态学报, 2023, 43(6): 2515-2523.

Xing Q, Qin J, Hu Y H. Research on the architectural characteristics and growth dynamics of two plants root in vertical greenery systems. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 2515-2523.

城市垂直绿墙常用植物的根系构型特征和生长动态

邢 强, 秦 俊, 胡永红*

上海辰山植物园 城市园艺技术研发与推广中心, 上海 201602

摘要:以适应性强的 2 种常见藤本植物: 夹竹桃科的花叶蔓长春 (*Vinca major* 'Variegata') 和花叶络石 (*Trachelospermum jasminoides* 'Variegatum') 为研究对象, 每年随机选择 5 盆进行重复测试, 比较它们 2017—2021 年的根系生物量、根冠比及根系的长度、表面积、直径、体积、根尖数等形态指标及比较各指标间的变异率和相关度, 分析植物在垂直绿墙容器种植条件下根系的动态变化特征, 以量化植物根系受根域限制而生长退化的时间节点和有效衡量指标, 从而为延长绿墙使用寿命和开发低维护管养技术提供科学依据。结果表明: 1) 2 种植物的根系生物量及根长、根表面积、根体积、根分叉数、根尖数均在植物上墙后 2019 年达到峰值后开始下降, 可作为衡量植物根系生长受根域限制而退化的时间节点; 根冠比值在 2020 年达最低水平, 反映了地下根系生长受限制早于所观测到的地上枝叶退化现象。2) 根长、根表面积、根体积、根尖数均可作为衡量指标, 其中, 根系体积可作为典型的衡量指标, 花叶蔓长春和花叶络石生长受限的根体积占比分别为 2.2%、1.8%。3) 2 种植物的根冠比与根长等构型特征指标呈一致的变化趋势, 但花叶蔓长春的变化幅度大于花叶络石; 花叶蔓长春的根平均直径反复波动规律也不同于花叶络石持续下降趋势, 反映了不同生长型植物对根域限制的不同适应策略: 根系集中生长在固定容器中的悬垂型花叶蔓长春, 在受到根域环境限制时通过根系径级间周变化来适应环境; 攀爬型花叶络石通过滋生发达的不定根吸收周边容器土壤中水分、养分供给生长。

关键词:城市生态; 垂直绿化系统; 根域限制; 生物量; 根系构型特征

Research on the architectural characteristics and growth dynamics of two plants root in vertical greenery systems

XING Qiang, QIN Jun, HU Yonghong*

Urban Horticulture Research and Extension Center, Shanghai Chenshan Botanical Garden, Shanghai 201602, China

Abstract: In this experiment, two species of *Vinca major* 'Variegata' and *Trachelospermum jasminoides* 'Variegatum', which belong to the same family of Apocynaceae were studied. Five pots are randomly selected for repeat testing each year. The above-ground biomass, root to shoot ratio, root biomass and morphological indicators such as root length, diameter, surface area, volume, root tip number, and root forks were selected to analyze the changes in root architecture characteristics and growth dynamics with increasing seedling age. The purpose of this experiment is to prolong plant life for long-term utilization, and to develop low-maintenance technologies. Quantifying the time node and measurement indicators of plant growth and degradation due to root limitation. The results showed that: 1) The root biomass and root length, root surface area, root volume, number of root forks, and number of root tips of the two plants all reached their peak in the third year after the plants were put on the wall and then began to decline, and the 3rd year can be used as a measurement point for the degradation of plant root growth restricted by the root domain; the root to shoot ratio was delayed by one year to reach

基金项目:上海市绿化和市容管理局科研专项 (G222407); 上海市科委科技创新行动计划 (18DZ1204700); 上海市科委科技创新行动计划 (21DZ1203006)

收稿日期:2022-03-15; **网络出版日期:**2022-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huyonghong@csnbgsh.cn

its lowest level by 2020, reflecting that the restricted growth of the underground root system actually preceded the observed degradation of branches and leaves. 2) Root length, root surface area, root volume, and root tip number can be used as measures, and root volume can be the main measure in terms of the significance of variability and correlation compared. The percentage of root volume of the 2 plants with restricted growth was 1.8% and 2.2%. 3) Both two species' root to shoot ratio and morphological indicators exhibited consistent trends, however the variation of *Vinca major* 'Variegata' was larger than *Trachelospermum jasminoides* 'Variegatum'; the average root diameter of *Vinca major* 'Variegata' displayed a continuous fluctuation pattern distinct from that of *Trachelospermum jasminoides* 'Variegatum'. The similarities and variations between the two species' reflect to the root domain's volume limitation; *Trachelospermum jasminoides* 'Variegatum', the climbing type with well-developed adventitious roots adapts to environmental changes through inter-grade turnover of root diameter when limited by the root domain; *Vinca major* 'Variegata', whose root system is concentrated in a fixed container, adapts to environmental changes through inter-grade turnover of root diameter when limited by the root domain.

Key Words: urban ecology; vertical greenery system; root restriction; biomass; roots morphological characteristics

城市特殊生境绿化是指对城市建筑、构筑物等不透水表面重建生境、实施绿化,包括垂直绿墙、屋顶绿化等形式,主要为解决城市发展带来的生态用地不断被压缩、高密度“水泥森林”和横向硬质铺装不停延伸引发的绿色空间严重缩水、热岛效应加剧、内涝频发等一系列城市环境问题。其中,垂直绿墙的模块化容器种植形式,因安装便捷高效、可适用植物多样等特性而被广泛用于城市生态用地功能补偿,但植物也常常在这种根域体积限制下出现根系畸形、盘结、缠绕现象^[1-5],严重影响到绿墙景观的寿命和质量,产生绿化寿命短、效益低、成本高等一系列问题,制约了其推广应用,已受到国内为众多关注^[6-12]。

根系作为植物寿命和功能的关键部分,发挥着物理支撑固定、生理吸收养分和水分,保障植物正常生长的作用^[13],其基础是根系构型,决定着根系吸收、转化功能和运输效率^[14]。根系构型泛指根系在生长介质中的空间造型和分布,是植物研究的热点之一,最早 Weaver 较系统地研究了 10 多种作物的根系生长及构型变化过程,指出科学地理解作物生产必须全面地认识作物根系构型、分布和不同生育时期根系活力及不同环境下根系的变化情况^[15]。当前研究发现植物根系生长受所处环境影响,尤其是生长空间的有效性直接影响了根系构型和功能^[16-18]。另外,现研究主要聚焦于森林、湿地、沙漠等自然生态系统中植物根系构型在不同生境干旱、淹水、盐渍等条件胁迫下的动态变化特征^[19-22],对城市生态系统的垂直绿墙中植物根系受根域体积限制下构型特征的研究几乎属于空白。

因此,针对城市生态系统重要组成部分的垂直绿墙,为探索植物因根域体积限制所导致的植物大面积退化、死亡的问题,本试验以模块化垂直绿墙容器种植方式为试验条件,通过观测、分析 2 种常见同科藤本植物第 1—5 年的根系生物量、构型特征形态指标及指标间相关性,主要目的为统计植物根系在根域环境限制条件下动态变化情况,量化植物受根域体积限制而发生退化的时间节点以及评估指标,为城市垂直绿墙这种特殊生境绿化的植物根冠平衡理论研究及根冠设计技术开发提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验材料来源于上海辰山植物园办公楼通道的室外模块式绿墙(31°4'24"N, 121°10'36" E),地处上海市松江区,属北亚热带季风气候区,全年平均气温 15.5℃,日照条件较为充足,年日照时间 2000 h 左右,全年降水量平均为 1200 mm。针对绿墙常用的代表性植物,本试验材料选取同为夹竹桃科的常绿藤本植物花叶蔓长春(*Vinca major* 'Variegata')、花叶络石(*Trachelospermum jasminoides* 'Variegatum'),扦插条选择来源同一株原生苗同等长度、同等直径的枝条,成活后选择生长一致的扦插苗、选用蚯蚓土+泥炭+蛭石(1:1:1)栽培介质,定植于与绿墙模块配套的长、宽、高 15 cm×10 cm×8.5 cm 容器中,每盆种植 5 株,养护成苗定根生长 1 a,于 2017

年 5 月将容器苗连同容器一起从苗圃直接移植到绿墙模块框架中。

1.2 试验设计

采用 2 种植物材料进行完全随机区组试验,分 5 个区组,每个区组 30 盆,于 2017 年、2018 年、2019 年、2020 年、2021 年 8 月随机取样 5 盆,分截地上茎叶、地下根系两部分,将根系清洗干净,逐株用 EPSON PERFECTION V700 扫描仪扫描根系,运用 Win RHIZO-Pro 2008b(加拿大 Regent Instruments Inc)根系分析软件对根系参数进行分析,统计 2 种植物的根长、根表面积、根体积、平均直径、分叉数、根尖数。所有根系样品及剪下的茎叶在 105 ℃ 下杀青 30 min,75 ℃ 下烘干 3d 至恒重后用天平称重。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 进行简单的数据处理、绘图,图、表中不同年份的根系特征指标数据为平均值±标准误(mean±SE)。采用 SPSS 21.0 的对不同阶段的 AGB、RB、RSR、LPV、SA、AD、RV、RT 和 RF 根系各特征参数进行单因素方差分析和主成分分析,采用 Duncan 法进行多重比较($\alpha=0.05$)。用 Pearson 法对不同年份下根系地上和地下性状进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同年份 2 种植物生物量分配特征

根系生物量是反映根系生长状况的一个重要指标,根冠比是判断植物的功能性大小、抗逆能力水平的常用形态指标^[23]。2 种藤本植物 2017—2021 年的根系生长量变化及根冠比变化,花叶蔓长春、花叶络石的根系生物量随着年份增加,呈先上升再下降的趋势,花叶蔓长春所达到根系生物量峰值时是花叶络石的 1.5 倍,2 种藤本植物在 2019 年时间节点根系量开始降低,花叶蔓长春升降变化的幅度高于花叶络石(图 1)。

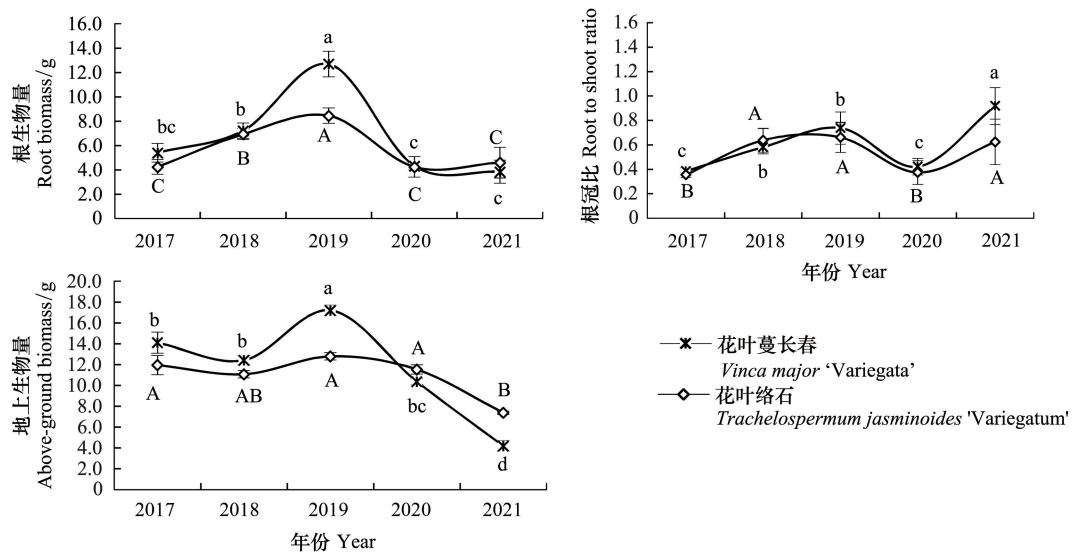


图 1 植物根系生物量、根冠比、地上生物量随苗龄的变化

Fig.1 Growth of roots biomass, root to shoot ratio and above-ground biomass with seedling ages

不同小写字母表示花叶蔓长春不同苗龄下差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示花叶络石不同苗龄下差异显著($P<0.05$)

2 种植物在根冠比曲线上显示先上升再下降后回升的趋势,2 种植物的根冠比都在 2019 年节点后开始下降,从 2020 年节点均开始增加,且花叶蔓长春在 2021 年时达到峰值,花叶络石在 2019 年达到峰值并与 2018 年、2021 年差异不显著(图 1, $P>0.05$)。2 种植物的根系量在 2019 年后均呈快速下降趋势,在 2020 年到 2021 年阶段根系量变化并不大,在 2021 年节点为最小值,但根冠比却在 2020 年开始逆势上升(图 1),这个规律与观测到的植物在 2020 年时地上茎叶部分开始稀疏、地上生物量明显下降的外观形态变化相符。

2.2 不同年份 2 种植物地下根系的构型特征和生长规律

根据 2.1 生物量的分析结果,为进一步了解垂直绿化系统中植物生命周期和景观可持续性利用的影响因素,量化植物根系退化的指标数据,本试验从反映根系总体平面几何构型的根长度、根表面积、根体积、根直径、根根尖数、根分叉数 6 个参数来描述植物生长动态,在 5 年的试验周期内,除根直径外,其他 5 个指标都呈先上升后下降的趋势,并且在所测试的 2019 年时间节点呈现峰值(图 2)。根长作为植物获取养分和水分的功能器官,一般用单位体积内植株根系的总长度表示,在 2017—2021 年测得花叶蔓长春、花叶络石根系长度从 2017 年到 2018 年均缓慢增加,2018 年到 2019 年根系快速增长,到 2019 年根长达到峰值后开始下降,花叶蔓长春下降幅度大于花叶络石(图 2)。根表面积可从整体上反映根系的吸收水分和无机盐等物质的有效吸收面积,根系表面积在第 2017—2021 年与根长呈一致缓慢增加趋势,2 种植物的根表面积表明 2018 年到 2019 年表面积不断增加,从 2019 年开始,2 种植物值均开始下降,下降速率达 70% 以上(图 2)。

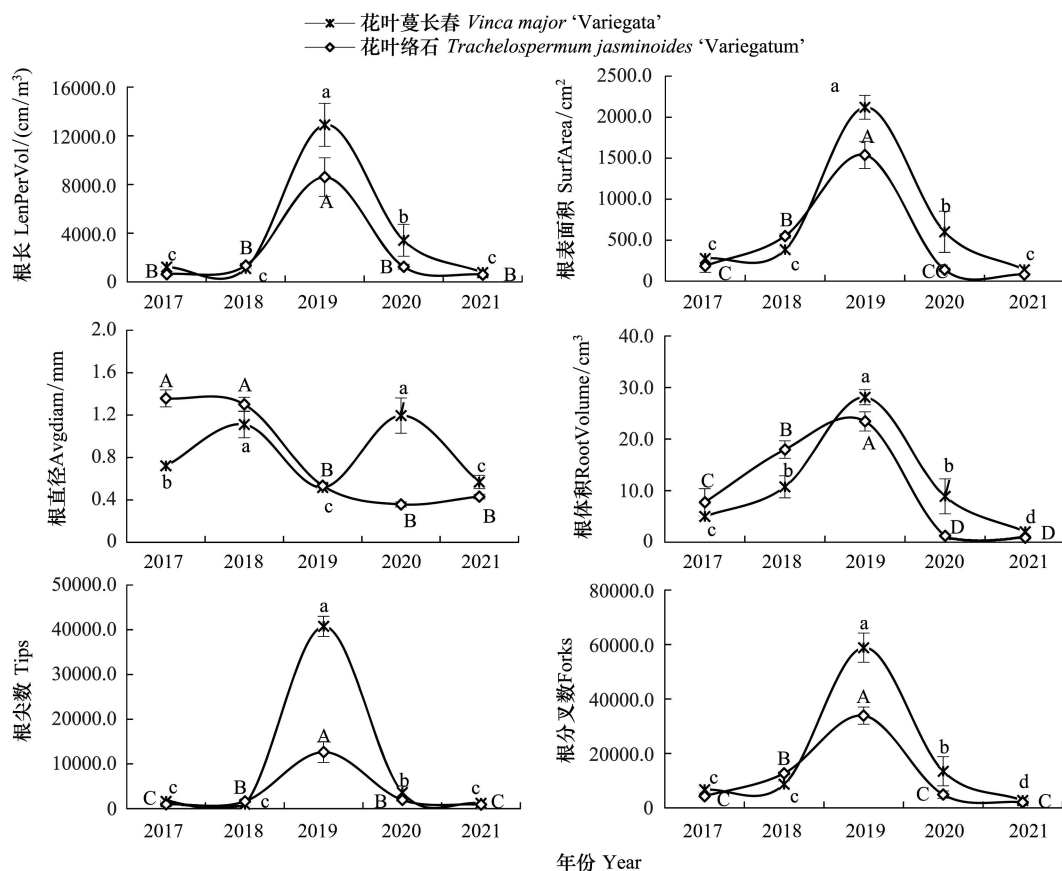


图 2 根系长度、根直径、根表面积、根体积、根尖数、根分叉数随苗龄的变化

Fig.2 Growth of root length, root avgdiam, root surface area, root volume, number of root tip and fork with seedling ages

根直径是根系研究中重要的参数,直接与根系的养分吸收功能和自身寿命息息相关,2 种植物在 2018 年到 2019 年直径大小显著下降,分别为 53.15% 和 58.46% (图 2)。花叶蔓长春在 2017 年到 2018 年阶段根系还未受到容器的根域限制,整体根系平均直径增加,在 2019 年时根系平均直径降至最小值,随后显著增加到 2020 年后再下降,2019 年与 2021 年差异不显著;花叶络石则从 2017—2020 年年,根直径逐年变细,到 2020 年、2021 年根直径无显著变化。根体积能够直观地反映根系在土层中的空间分布特征。在第 2017—2019 年阶段花叶蔓长春和花叶络石根系体积曲线一直呈上升趋势,花叶蔓长春在 2017 年到 2018 年增幅最高达 161.6%,花叶络石则在 2017 年到 2018 年增幅达 132.3%,随之 2 种植物在 2019 年达到峰值,分别为 28.12、23.44 cm³,分别占容器总体积的 2.2% 和 1.8% (图 2),此时容器中大量根系层层盘结在容器壁内部。根

尖数、根分叉数代表根系活跃度、再生能力,2种植物总体上呈先增加后降低的趋势,在2019年均达到峰值,对外界环境条件的改变较敏感,值变化较大(图2)。因2种植物生长特性不同,使其增长和降低幅度不一,花叶蔓长春的变化值基本都高于花叶络石。

2.3 不同年份2种植物地下根系构型与生物量的相互关系

2.3.1 地下根系构型特征和生物量变异特征

花叶蔓长春与花叶络石的根系数量性状和生物量表现出不同的变化特征。2种植物地下根系指标中根尖数变化幅度最大,变异率分别达到167.9%、132.0%,其最大值分别是最小值的66.2和23.6倍(表1),根平均直径变化幅度最小,各指标的变异程度大小为:根尖数>根长>根分叉>根表面积>根体积>根平均直径,根体积和根平均直径是比较稳定的衡量指标。生物量方面,地上和地下生物量变化幅度方面,花叶蔓长春高于花叶络石,2者的根冠比的变异率相近,较稳定。

表1 2种藤本植物数量性状的变异特征

Table 1 Variation characteristics of quantitative characters in two lianas

数量特征 Quantitative character	物种 Species	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均值 Mean value	标准差 Standard deviation	变异率 Coefficient of variation/%
AGB	Vm	3.76	17.58	11.66	4.54	38.9%
	Tj	7.23	12.71	10.81	1.88	17.4%
RB	Vm	3.18	13.88	6.70	3.39	50.7%
	Tj	3.59	9.17	6.05	1.74	28.7%
RSR	Vm	0.35	1.04	0.61	0.22	36.6%
	Tj	0.28	0.83	0.53	0.17	32.4%
LPV	Vm	624.54	14426.41	3880.04	4840.38	124.8%
	Tj	523.08	10371.54	2484.60	3242.41	130.5%
SA	Vm	104.74	2284.52	704.42	757.94	107.6%
	Tj	75.70	1664.27	486.18	543.17	111.7%
AD	Vm	0.50	2.34	1.02	0.65	63.6%
	Tj	0.33	1.45	0.80	0.46	57.3%
RV	Vm	1.40	29.81	10.96	9.57	87.3%
	Tj	0.79	25.20	10.32	9.56	92.6%
RT	Vm	652.00	43137.00	9627.00	16162.77	167.9%
	Tj	649.00	15305.00	3617.27	4776.06	132.0%
RF	Vm	2317.00	62970.00	18080.47	21597.76	119.5%
	Tj	1563.00	37309.00	11546.40	12217.34	105.8%

Vm为花叶蔓长春;Tj为花叶络石;AGB为地上生物量 Above-ground Biomass;RB为根生物量 Root Biomass;RSR为根冠比 Root to Shoot Ratio;LPV为根长 LenPerVol;SA为根表面积 SurfArea;AD为根直径 AvgDiam;RV为根体积 RootVolume;RT为根尖数 Root Tips;RF为根分叉数 Root Forks

2.3.2 地下根系构型特征与生物量的相关性系数

用 Pearson 法对2种植物的根系地上和地下性状指标进行相关性分析。植物地上生物量与根系根长、根表面积、根体积、根尖数、根分叉数都显著正相关(表2, $P<0.01$),且与根分叉数相关度最高,其次是根体积,与根直径正弱相关(表2, $P>0.05$)。根生物量与根长、根表面积、根体积、根尖数、根分叉数显著正相关,与根体积相关度最高。根直径与根生物量、根冠比、根长、根表面积、根尖数、根分叉数负相关,但不显著(表2, $P>0.05$)。

表 2 2 种藤本植物地下根系构型特征和生物量的相关性

Table 2 Correlation coefficients between belowground root architecture characteristics and biomass of two lianas

	AGB	RB	RSR	LPV	SA	AD	RV	RT	RF
AGB	1	0.716 **	-0.335	.577 **	.617 **	0.016	0.622 **	0.610 **	0.643 **
RB		1	0.287	.822 **	.879 **	-0.179	0.881 **	0.853 **	0.877 **
RSR			1	0.305	0.29	-0.338	0.262	0.325	0.319
LPV				1	0.971 **	-0.187	0.842 **	0.929 **	0.972 **
SA					1	-0.116	0.917 **	0.911 **	0.979 **
AD						1	0.04	-0.254	-0.157
RV							1	0.761 **	0.888 **
RT								1	0.957 **
RF									1

* $P<0.05$; * * $P<0.01$

2.3.3 地下根系构型特征与生物量的主成分分析

在 2 种藤本生物量和根系功能特征的主成分分析中, 9 个功能性状的前 2 个主成分方差累积贡献率为 84.084%(表 3), 表明这 2 个主成分是植物根系构型变化的主要因子。各功能特征的综合得分越高, 重要性越高, 地上生物量、根生物量、根长、根表面积、根体积、根尖数、根分叉数、均可作为 2 种藤本根系构型特征相关的主要指标, 其中根表面积、根体积、根分叉数贡献突出(表 3)。

表 3 2 种藤本植物地下根系构型特征和生物量各性状主成分分析

Table 3 Principal component analysis of traits between belowground root architecture characteristics and biomass of two lianas

功能特征 Functional trait	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	综合得分 Comprehensive score	综合位次 Comprehensive ranking	公因子方差 Communality
AGB	0.692	0.574	0.318	2	0.808
RB	0.936	0.029	0.309	5	0.878
RSR	0.303	-0.847	-0.039	9	0.81
LPV	0.959	-0.056	0.303	6	0.922
SA	0.979	0.008	0.320	1	0.958
AD	-0.18	0.656	0.048	8	0.463
RV	0.915	0.115	0.316	4	0.85
RT	0.946	-0.091	0.293	7	0.903
RF	0.987	-0.022	0.318	3	0.975
贡献率 Contribution rate/%	67.37	16.713			
累积贡献率 Cumulative contribution rate/%	67.37	84.084			

3 讨论

3.1 根系构型特征变化的衡量指标和时间节点

植物根系在土壤中的形态结构和分配格局受外界环境影响, 其根系指标能反映环境对其影响的大小及关键时间节点^[24]。本研究显示, 随着年份增加, 2 种植物根系分布规律大致相同, 根生物量和根系根长、根表面积、根体积、根尖数等形态指标表现上在同一节点出现峰值后趋势向下, 这与 Brouwer 研究发现的根生物量、根体积等指标与根系生长恢复密切相关, 可作为植物根冠平衡理论的实践应用衡量指标的观点相符^[25]。植物生物量与根系构型各指标的变异率、相关性不同, 不同指标衡量植物生长变化的稳定性、可靠性也不同。本研究发现, 尽管根长、根尖数、根分叉数与生物量显著相关, 但对外界环境干扰比较敏感, 性状变异率较高, 而同样与生物量相关度显著的根表面积和与根体积指标变异率相对较低, 更适合作衡量指标, 这与洪雪男等的

研究中结论一致^[26-28]。在时间节点上,本研究发现 2019 年作为 2 种植物根系特征变化的关键节点,从 2019 年开始地上、地下生物量大量衰减,但在 2020 年时根冠比却逆势反弹,推测原因是地上部分衰减程度高于地下根系部分。另外,结合根系各指标退化的 2019 年时刻早于地上生物量大幅下降的 2022 年转折点,说明根域限制首先引起植物根系退化,又进一步引起了地上部分的生物量下降,可用于实际生产中植物生长受限的预测评估及进行相应的根系复壮的重要节点。现有研究大多以同一年或同一营养生长期不同月份为周期探究植物的地上、地下构件生长速率和生物量积累特征^[29-30],或研究短期内不同植株间因养分竞争导致根系构型特征增量的时间效应^[31],与本研究以长周期的每年同一月份为代表研究根系构型的动态变化的方法和结论有所不同,需在下一步研究中结合全年不同阶段植物的生长情况及各阶段不同土壤温度、水分、养分水平等环境条件进一步展开研究。

3.2 不同生长型植物对根域环境变化的不同适应策略

受到根域体积限制,不同生长型植物根系对根域环境的变化适应性不同。根系直径作为根系特征典型指标,不仅可从中探索整体根系系统生长变化的动态规律,而且可通过研究根系平均直径所包含的各根序粗根、细根间相互作用来反映不同生长型植物的适应策略。本研究中发现,花叶蔓长春属于悬挂垂吊型植物,原栽容器中根系总量明显高于花叶络石,受环境影响也较大,平均直径变化呈重复波动起伏趋势:根平均直径在植物生长前期,根系不受根域限制,养分和水分都供给充分,根系平均直径增加,并随着根系定根生长后活力增加,推测有大量细根生成并通过快速细根周转以吸收土壤更多养分和水分使植物在 2019 年细根数量达到峰值,导致平均直径达最小值,后因总根系达到峰值后受到根域空间限制,细根因高度敏感性,消亡快于粗根,又出现了平均直径增大的趋势。根系在收到外界环境变化时,通过不同径级根系间的周转来适应根域环境的变化,与王文娜、Pregitzer、Hendrick 等人的结论一致^[32-34]。与花叶蔓长春不同,花叶络石的根系平均直径则基本呈缓慢下降趋势,这个应该与络石在 2017 年到 2019 年通过前期定根生长积累形成大量根系而受到原栽容器生长空间限制后,出现主栽根系大量退化、气生侧根大量滋生有关,到 2020 年、2021 年根直径无显著变化,一方面可能与细根、粗根衰减的速率不同相关,另一方面也与络石在受到容器限制情况下导致植株不断向上攀缘生长而吸收维持低水平生长水分、养分相关,反映植物生长选择成本最小、效益最大的根系生长的策略,与杨雨等人研究结论一致^[35],值得深入研究。

3.3 不同生境下植物的根系构型特征研究实践

根系的形态特征取决于植物本身遗传特性和环境的共同作用,植物根系的构型和分布、动态变化对不同生境的适应性表现不同。本研究主要针对城市生态系统中特殊生境之一——垂直绿墙,研究植物根系在人工建造的受限种植土壤空间中根系生物量和构型分布的动态变化特征,目的为解决植物在根域体积限制下可持续生长的科学问题,这与在针对自然生态系统因不同地形、不同土壤性质、不同温湿度、不同营养等条件引起不同生境中,探究植物根系构型及分布分层情况所反映的植物生存适应、资源竞争机制存在明显区别^[36],具有不同的研究价值。

在城市生态系统构建中,垂直绿墙、屋顶绿化、行道树绿化及相关的容器式绿化是缓解用地矛盾、维持城市生态质量的重要途径,但在这些城市特殊生境中植物也因根域限制导致根系发生不可逆的盘结、畸形。对容器种植条件下植物根系的发育进行准确的预测和有效的控制,成为延长植物寿命及提高类似容器植物质量的关键技术问题,但目前可以量化的衡量指标和栽培时间节点数据的研究几乎没有。本文利用便利、易控的绿墙模块容器式试验条件,通过长周期系统的分析植物根系构型特征和动态变化,探讨了适合垂直绿墙植物生长的经济、合理的栽培时间和条件,为植物容器化选育、栽培、养管提供指导依据。将来,基于可控条件下挖掘不同生境中植物根系表型性状及与之关联的遗传信息,借鉴农业作物栽培研究已取得突破的重要途径^[37],通过自动化、高通量根表型平台、图像解译技术,高效获取定量数据,为城市特殊生境下受限生长空间内植物的生态适应性、生态效益研究和技术开发、推广提供重要支持。

4 结论

1) 2019 年可作为该种植容器中植物受到根域限制而退化的时间节点, 根系根长、根表面积、根体积、根尖数、根分叉数均可作为衡量植物退化的衡量指标。2) 2 种植物的根体积特征变异率低、相关度高, 可作为主要衡量指标。2) 2 种藤本植物根冠比及根系根长等构型特征指标呈一致的变化趋势, 但花叶蔓长春根系指标值变化幅度大于花叶络石, 且花叶蔓长春的根平均直径反复波动规律也不同于花叶络石持续下降趋势, 各特征指标变化趋势的差异性和相似性, 反映 2 种同科藤本植物在特殊生境中的不同适应策略。3) 以上所得到的量化指标及数据, 可为植物根冠平衡理论研究提供支撑, 也可作为筛选城市立体绿化、行道树种植、容器苗生产等特殊生境下植物种类, 开发有关根冠设计的园艺技术提供数据支持, 指导生产实践, 目的为解决植物景观的可持续利用与低成本维护之间的矛盾。

参考文献 (References):

- [1] 张玲, 王树凤, 陈益泰, 段红平. 3 种枫香的根系构型及功能特征对干旱的响应. 土壤, 2013, 45(6): 1119-1126.
- [2] 吴楚, 王政权, 范志强. 树木根系衰老研究的意义与现状. 应用生态学报, 2004(7): 1276-1280.
- [3] Vasishth A, Kaushal P, Kaushal AN, Dutt B. Effect of root pruning and nitrogen application on post planting survival, growth and establishment of acacia catechu willd. seedlings. Indian Forester, 2007, 133: 1027-1044.
- [4] 岳龙, 徐迎春, 张伟, 王秀琴, 董凤祥. 美植袋物理控根容器培育对玉兰苗根系构型的影响. 林业科学研究, 2010, 23(6): 883-888.
- [5] Harris JR, Fanelli J, Niemiera A, Wright R. Root pruning pin oak liners affects growth and root morphology. Horttechnology, 2001, 11: 49-52.
- [6] 杨学军. 立体绿化植物评价方法研究及综合评价模型建立——以地锦属植物为例. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [7] Wong NH, Tan AYK, Tan PY, Sia A, Wong NC. Perception studies of vertical greenery systems in singapore. Journal of Urban Planning and Development, 2010, 136(4): 300-338.
- [8] Perini K, Rosasco P. Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems. Building and Environment, 2013, 70, 110-121.
- [9] Perini K, Rosasco P. Is greening the building envelope economically sustainable? An analysis to evaluate the advantages of economy of scope of vertical greening systems and green roofs. Urban Forestry & Urban Greening, 2016, 20, 328-337.
- [10] Forman RTT. (邹建国, 刘志峰, 黄甘霖, 黄璐译, 黄庆旭, 刘颖慧, 申卫军, 杨健, 赵媛媛, 周伟奇, 朱伟兴. 译). 城市生态学: 城市之科学. 北京: 高等教育出版社, 2017: 392-398.
- [11] Rosasco P, Perini K. Evaluating the economic sustainability of a vertical greening system: a cost-benefit analysis of a pilot project in mediterranean area. Building and Environment, 2018, 142, 524-533.
- [12] 代文斌. 上海城市立体绿化的植物造景及其应用价值的研究. 上海: 上海师范大学, 2018.
- [13] 王政权, 郭大立. 根系生态学. 植物生态学报, 2008, (6): 1213-1216.
- [14] Fitter A. Characteristics and functions of root systems. New York: Marcel Dekker Inc., 2002: 30.
- [15] Weaver EB. Root development of field crops. New York: McGraw-Hill Book Co., Inc. 1926: 11.
- [16] Adams TS, McCormack ML, Eissenstat DM. Foraging strategies in trees of different root morphology: the role of root lifespan. Tree Physiology, 2013, 33: 940-948.
- [17] 安慧, 上官周平. 根域限制和氮素水平对连翘幼苗生长的影响. 生态学报, 2007, 27(4): 1323-1332.
- [18] 刘晓娟. 根域限制对牡丹花器官碳代谢的影响. 河南农业大学学报, 2017, 51(2): 170-176.
- [19] 胡瑞芝, 杜自强, 刘爽, 史建伟. 不同海拔华北落叶松细根形态特征. 生态学报, 2016, 35(5): 1248-1253.
- [20] 杨小林, 张希明, 李义玲, 李绍才, 孙海龙. 塔克拉玛干沙漠腹地 3 种植物根系构型及其生境适应策略. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1268-1276.
- [21] 唐罗忠, 黄宝龙, 生原喜久雄, 户田浩人. 高水位条件下池杉根系的生态适应机制和膝根的呼吸特性. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1258-1267.
- [22] 周洪华, 李卫红. 胡杨木质部水分传导对盐胁迫的响应与适应. 植物生态学报, 2015, 39(1): 81-91.
- [23] 肖春旺, 周广胜, 马风云. 施水量变化对毛乌素沙地优势植物形态与生长的影响. 植物生态学报, 2002(1): 69-76.
- [24] 王晶晶, 闫海冰, 王紫瑄, 解甜甜, 杨秀清. 断根与 IBA 处理对沙冬青根系质量及幼苗生长的影响. 干旱区研究, 2022, 39(1): 230-239.
- [25] Brouwer R. Some aspects of the equilibrium between overground and underground plant parts. Meded. Inst. Biol. Shield. Onderzoek Landbouw

Gewassen 1963, 213, 31 - 39.

- [26] 洪雪男, 杨允菲. 松嫩平原赖草无性系构件生长的可塑性及其规律. 草地学报, 2019, 27(2): 371-376.
- [27] Mao W, Felton AJ, Ma YH, Zhang TH, Sun ZB, Zhao XY, Smith MD. Relationships between aboveground and belowground trait responses of a dominant plant species to alterations in watertable depth. Land Degradation & Development, 2018, 29(11): 4015-4024.
- [28] 陈明涛, 赵忠. 干旱对 4 种苗木根系特征及各部分物质分配的影响. 北京林业大学学报, 2011, 33(1): 16-22.
- [29] 郭文婷, 王国华, 缙倩倩, 刘婧. 河西走廊荒漠绿洲过渡带 3 种典型一年生藜科植物构件生长及生物量分配特征. 草业学报, 2022, 31(2): 25-38.
- [30] 李霞. 控根栽培对桂花根系构型及功能变化影响. 南京: 南京林业大学, 2010.
- [31] 许静静, 李琦, 吴文景, Rashid MHU, 马祥庆, 吴鹏飞. 垂直方向磷素竞争对杉木根系生长及生物量分配的影响. 生态学报, 2019, 39(6): 2071-2081.
- [32] 王文娜. 施氮肥对六个温带树种细根解剖结构、形态、养分和菌根侵染特征的影响. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
- [33] Pregitzer KS, DeForest JL, Burton AJ, Allen MF, Ruess RW, Hendrick RL. Fine Root Architecture of nine north american trees, Ecological Monographs, 2002, 72(2), 293-309.
- [34] Hendrick RL, Pregitzer KS. Patterns of fine root mortality in 2 sugar maple forests. Nature, 1993, 361: 59-61.
- [35] 杨雨, 李芳兰, 包维楷, 黄龙, 胡慧. 川西亚高山 11 种常见灌木细根形态特征. 应用与环境生物学报, 2020, 26(6): 1376-1384.
- [36] Konôpka B, Tsukhara H, Netsu A. Biomass distribution in 40-year-old trees of Japanese black pine. Journal of Forest Research, 2000, 5: 163-168.
- [37] Fiorani F, Schurr U. Future Scenarios for Plant Phenotyping. Annual Review of Plant Biology. 2013, 64: 267-291.