商侃侃,张家乐,王若宇,等.不同建成时期上海城市公园木本植物种间关系的比较[J].华中农业大学学报,2026,45(1):73-83.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.01.007

不同建成时期上海城市公园木本植物种间关系的比较

商侃侃[1,2],张家乐[1,2],王若宇[2,3,4],叶子易[5],胡远东[1,3]

1.西安建筑科技大学交叉创新研究院,西安 710055; 2.上海辰山植物园,上海 201602;
3.东北林业大学园林学院,哈尔滨 150040; 4.莱州市林业局,莱州 261400;
5.上海园林(集团)有限公司,上海 200131

摘要 为揭示上海城市公园不同建成时期木本植物种间关系的变化特征,选取分属4个时期(1995年前、1995—2004年、2005—2017年、2018年后)的14座城市公园,通过调查1 434个10 m×10 m的植物群落样方,针对重要值(Ⅳ)≥5的29种乔木和27种灌木,运用方差比率法(R_V)、χ^2检验和Spearman秩相关系数检验分析种间关联性。结果显示:各时期乔灌木总体关联性均呈显著正联结($R_V>1$,$P<0.05$),且随建成时间逐步增强,R_V从时期Ⅰ的1.43升至时期Ⅳ的1.98。乔木层种间关系呈现明显差异,早期(时期Ⅰ)以不显著负联结为主,表现为树种习性差异;后期(时期Ⅳ)形成显著正关联,表现为生态位需求相似。灌木层始终保持强的正联结,时期Ⅳ的R_V达1.98,Spearman秩检验正相关种对比例达23.81%。乔灌木层间正相关种对从时期Ⅰ的5.06%升至时期Ⅳ的5.98%,负相关种对占比减少,总体联结性持续增强。因此,建议早期建成公园应重点替换负关联乔木种对,新建公园需配置乔木层正关联组合,灌木层则强化适生树种集群配置,以提升植物群落稳定性。

关键词 城市公园; 种间联结; 植物配置; 群落结构; 种对

中图分类号 Q948.11 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)01-0073-11

随着城市化进程的不断推进,城市公园作为复合生态系统的关键载体,兼具社会与生态双重属性。城市公园的植物配置并非一蹴而就,而是基于历史设计,历经长期实践与持续优化调整形成的动态平衡结果[1-2]。植物群落作为城市公园的核心主体,其形成与演化受人为选择和自然演替的双重驱动[3-4]。植物群落内的种间关系亦会随着植物生长发育和时代需求的迭代更新而不断演进,成为衡量植物配置科学性、指导群落结构优化的重要依据。因此,开展城市公园植物种间关系研究,可为构建健康稳定的植物群落提供科学支撑,进而助力城市人工植物群落的近自然化管理实践。

植物群落种间关系研究多聚焦自然生态系统,围绕种间联结与种间相关两大维度,前者侧重根据物种存在与否分析物种在空间分布上的关联性,后者根据物种重要值判断其在资源竞争与利用过程中的相互影响,样方面积以50～100 m^2为佳[5-8]。相较于自然生态系统,城市公园绿地植物群落学研究多围绕植物配置优化与评价展开,从群落结构、多样性、景观美学等角度,解析植物景观协调性与城市空间功能的关联[2-3,9-10]。近年,我国南亚热带(澳门、东莞、南宁等)[11-13]和北亚热带(上海、合肥、扬州等)[14-16]开展相关研究,常以木本植物群落为对象,通过分析树种组成及优势种种间联结性与关联性,探讨园林植物配置法则。但现有研究多聚焦特定时期配置特点,缺乏对不同建植时期群落树种选择与配置变化的系统梳理。

上海作为我国高度城市化典型区域,城市公园建设已逾百年[17]。随着园林绿化植物引种推广的推进,其公园植物应用模式与配置策略呈现鲜明的时代阶段性特征[18-20]。本研究通过调查上海不同建成时期城市公园植物群落的种类组成与数量特征,比较分析乔灌木种间关系,梳理植物配置发展规律,旨在为上海老旧公园改造及新公园建设的植物选择与

收稿日期: 2025-06-24
基金项目:上海市科学技术委员会重大项目(23dz1204500);上海建工集团股份有限公司重点科研项目(25JCSF-23)
商侃侃, E-mail: shangkankan@163.com
通信作者: 胡远东, E-mail: huyuandong@nefu.edu.cn

群落构建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象

本研究以上海市虹口区、长宁区、普陀区等6个行政区的14座城市公园为对象，各公园基本概况如表1所示。结合上海园林绿化发展的政策导向、设计理念演进及树种应用变迁[19-22]，将公园建设分为4个具有特征鲜明的阶段，各阶段定义及植物配置特征如下：

时期Ⅰ（1995年前，建国初期探索阶段）：受经济条件、园林技术及苗木资源限制，公园建设以满足市民基本休憩需求为核心，植物配置追求快速成景，主选悬铃木（*Platanus acerifolia*）、加杨（*Populus* × *canadensis*）、柳树（*Salix* sp.）等速生树种，种类单调[17,20]，群落以单层乔木为主，灌木层配置稀疏。时期Ⅱ（1995—2004年，创建国家园林城市阶段）：1996年上海提出创建国家园林城市目标，绿化建设跨越式发展，植物应用和配置面积快速扩张，重点推广樟树（*Camphora officinarum*）、桂花（*Osmanthus fragrans*）、黄山栾树（*Koelreuteria bipinnata* 'integrifoliola'）、乐昌含笑（*Michelia chapensis*）、榉树（*Zelkova serrata*）等新优园林植物[20]，绿化面积和乔木多样性同步提升。时期Ⅲ（2005—2018年，"春花秋色"工程阶段）：2004年上海成功获评"国家园林城市"，开始实施"春景秋色"工程[21]，核心目标为丰富季相景观和群落层次结构，大量引入榉树、槭树（*Acer* sp.）、栎树（*Quercus* sp.）、海棠（*Malus* sp.）、红叶石楠（*Photin-*

表1 上海不同建成时期14座城市公园基本情况

Table 1 Basic information of 14 parks at different construction periods in Shanghai

公园名称 Park name	建成时间 Construction time	公园类型 Park type	面积/hm² Area	行政区 Administrative division	时期特点 Characteristics of the period
鲁迅公园 Luxun Park	1905	综合公园 Comprehensive park	28.63	虹口区 Hongkou District	古典园林风格浓厚，保留有一定西式风格，速生树种为主 Boast a strong classical garden style, retain certain Western-style elements, dominated by fast-growing tree species
长风公园 Changfeng Park	1958	综合公园 Comprehensive park	35.86	普陀区 Putuo District	
天山公园 Tianshan Park	1978	综合公园 Comprehensive park	6.91	长宁区 Changning District	
松江中央公园 Songjiang Central Park	2004	社区公园 Community park	32.16	松江区 Songjiang District	跨越式发展，融合西方生态园林城市理念，大力推广新优园林彩色植物 Leapfrog development, integrate the Western concept of ecological garden cities, vigorously promote new and superior colored plants
思贤公园 Sixian Park	2001	社区公园 Community park	10.00	松江区 Songjiang District	
大宁公园 Daning Park	2002	综合公园 Comprehensive park	58.46	静安区 Jingan District	
世博公园 Expo Park	2010	综合公园 Comprehensive park	23.00	浦东新区 Pudong New District	
黎安公园 Li'an Park	2006	社区公园 Community park	23.90	闵行区 Minhang District	"春花秋色"为抓手，注重生态效益，植物配置更注重丰富群落层次 Regard "Spring Blossoms and Autumn Color" as the guideline, improve ecological benefits and enrich community stratification for plant configuration
闵行文化公园 Minhang Cultural Park	2014	社区公园 Community park	82.98	闵行区 Minhang District	
莘庄梅园 Xinzhuang Park	2015	社区公园 Community park	10.70	闵行区 Minhang District	
方松体育公园 Fangsong Sports Park	2019	社区公园 Community park	5.30	松江区 Songjiang District	"四化"建设推进，提高新优品种应用，推广自然式与混合式配置 Advance the "Four Modernizations" construction, promote the application of new and superior varieties, and mixed planting configurations
古美公园 Gumei Park	2021	社区公园 Community park	9.89	闵行区 Minhang District	
得翠园 Decui Park	2022	社区公园 Community park	11.80	闵行区 Minhang District	
世博文化公园 Expo Culture Park	2022	综合公园 Comprehensive park	85.00	浦东新区 Pudong New District	

ia × *fraseri*）等色叶观花树种，强化“乔木-灌木-地被”的复层结构[19-20]。时期Ⅳ（2018年后，“四化”建设阶段）：2018年上海市发布“绿化、彩化、效益化、珍贵化”四化提升绿化品质的指导意见，植物配置进入生态化、精细化，推广自然式与混合式配置，强调群落各层次协调统一，聚焦构建稳定长效的近自然植物群落[22]。

1.2　样地调查

沿公园道路设置调查样线，踏查植物配置现状后，随机设置典型植物群落样方。参考已有研究[6,15]，将乔木样方面积设置为10 m×10 m，每个乔木样方四角各布设1个5 m×5 m的灌木样方，14座公园共设置乔木样方1 434个。

样方内按层次记录植物指标：①乔木层（高度≥4 m，胸径≥3 cm且主干明显的木本植株）：记录种名、高度、株数、胸径（1.3 m处）及多聚度级；②灌木层（高度0.6～4 m的丛生木本或此高度范围内乔木幼苗）：记录种名、高度、株数及盖度。

1.3　数据处理

1）主要树种确定。木本植物重要值综合反映物种在群落中的数量、分布及优势度，乔木和灌木计算重要值依据已有文献[6,23]。重要值取值0～100，数值越高表明物种对群落结构、资源竞争和功能的影响越显著。筛选各时期重要值IV≥5的树种以排除稀有物种的干扰，最终确定4个时期主要乔木29种、灌木27种（表2）。

2）总体联结性检验。采用方差比率法（variance ratio，VR，公式中记为R_V）检验所有物种总体联结性[23]，并通过统计量W来检验联结显著性。VR值作为全部物种的关联指数，在独立性假设零条件下，若$R_V=1$，表示物种间完全独立，无关联；若$R_V>1$，则物种间表现正联结；若$R_V<1$，则物种间表现负联结。用$W=R_V\times N$进一步检验总体偏离1的显著程度，若在$\chi^2_{0.95}(N)<W<\chi^2_{0.05}(N)$区间内，表示总体关联性不显著（$P<0.05$），置信区间90%。反之，总体联结显著（$P<0.05$）。

$$\delta_T^2=\sum_{i=1}^{S}p_i(1-p_i) \tag{3}$$

$$p_i=n_i/N \tag{4}$$

$$S_T^2=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}(T_j-t)^2 \tag{5}$$

$$R_V=S_T^2/\delta_T^2 \tag{6}$$

式（3）～（6）中，S为总物种数；N为总样方数；T_j为样方j内出现的研究物种总数；n_i为物种i出现的样方数；t为样方中种的平均数。

3）种间相关性。以物种重要值构建“样方×物种”数据矩阵，采用公式（7）进行种对Spearman秩相关性分析。该方法为非参数检验，可捕捉非正态或非线性关联，避免遗漏关键信号。

$$r_s(i,j)=1-\frac{6\sum_{k=1}^{n}d_k^2}{N^3-N} \tag{7}$$

式（7）中，r_s为种i和种j的相关系数，$d_k=(x_{ik}-x_{jk})$，N表示取样数量。

引入效应量分级，对相关系数的绝对值进行分级：$|r|<0.2$视为可忽略关联；$0.2\leqslant|r|<0.4$视为弱关联；$0.4\leqslant|r|<0.6$视为中等关联；$|r|\geqslant0.6$视为强关联[24]。

2　结果与分析

2.1　不同建成时期乔灌木总体关联性

方差比率法及检验统计量分析显示，不同建成时期乔灌木总体呈现显著正联结（表3）。其中，时期Ⅰ与时期Ⅱ的乔灌木层间R_V均为1.43，时期Ⅲ和时期Ⅳ分别升至1.92和1.98，表明随建成时间推移，种间联结强度逐步增强。乔木层从时期Ⅰ的不显著负关联（$R_V=0.88$）转变为时期Ⅳ的显著正关联（$R_V=1.23$）；灌木层各时期均保持强的正关联（$R_V\geqslant1.30$），且检验统计量W均超出卡方临界值区间（$\chi^2_{0.95}$，$\chi^2_{0.05}$），表明显著正联结特征。乔灌木层间种间联结性趋势与灌木层一致，均表现为显著正联结。

2.2　乔木层种间相关性

乔木层共105个种对，各时期正、负相关性显著的种对数均较少，不显著相关占比最高，但时期差异明显：时期Ⅰ正相关极显著与显著种对数均为6对；时期Ⅳ无负相关极显著种对，整体关联程度较弱。

由图1可知，时期Ⅰ极显著和显著正相关种对有9对，如夹竹桃（*Nerium oleander*）-垂柳（*Salix babylonica*）、东京樱花（*Cerasus yedoensis*）-桂花、桂花-悬铃木等；极显著和显著负相关种对有10对，如银杏（*Ginkgo biloba*）-夹竹桃、女贞（*Ligustrum lucidum*）-夹竹桃。时期Ⅱ极显著和显著正相关种对有5对，如紫叶李（*Prunus cerasifera* ‘Pissardii’）-石楠（*Photinia serratifolia*）、榉树-东京樱花、银杏-女贞等；极显著和显著负相关种对有3对。时期Ⅲ极显著和显著正相关种对有8对，如鸡爪槭（*Acer palmatum*）-垂柳、玉兰（*Yulania denudata*）-荷花玉兰（*Magnolia*

表2 主要木本植物种类及代码

Table 2 Species and codes of main woody plants

乔木 Trees	代码 Code	灌木	代码 Code
银杏 *Ginkgo biloba*	Gb	杜鹃 *Rhododendron simsii*	Rs
樟树 *Camphora officinarum*	Co	红花檵木 *Loropetalum chinense* var. *rubrum*	Lcr
垂柳 *Salix babylonica*	Sb	红叶石楠 *Photinia*×*fraseri*	Pfr
悬铃木 *Platanus*×*acerifolia*	Pa	金丝桃 *Hypericum monogynum*	Hm
荷花玉兰 *Magnolia grandiflora*	Mg	南天竹 *Nandina domestica*	Nd
榉树 *Zelkova serrata*	Zs	小叶黄杨 *Buxus sinica* var. *parvifolia*	Bsv
池杉 *Taxodium distichum* var. *imbricatum*	Td	八角金盘 *Fatsia japonica*	Fj
女贞 *Ligustrum lucidum*	Ll	大花六道木 *Abelia*×*grandiflora*	Ag
水杉 *Metasequoia glyptostroboides*	Mgl	海桐 *Pittosporum tobira*	Pt
乌桕 *Triadica sebifera*	Ts	绣球 *Hydrangea macrophylla*	Hma
无患子 *Sapindus saponaria*	Ss	银姬小蜡 *Ligustrum sinense*‘variegatum’	Ls
榔榆 *Ulmus parvifolia*	Up	金钟花 *Forsythia viridissima*	Fv
墨西哥落羽杉 *Taxodium mucronatum*	Tm	日本女贞 *Ligustrum japonicum*	Lj
朴树 *Celtis sinensis*	Cs	日本珊瑚树 *Viburnum awabuki*	Va.1
玉兰 *Yulania denudata*	Yd	山茶 *Camellia japonica*	Cj
樟叶槭 *Acer coriaceifolium*	Aco	野迎春 *Jasminum mesnyi*	Jm
棕榈 *Trachycarpus fortunei*	Tf	茶梅 *Camellia sasanqua*	Csa
罗汉松 *Podocarpus macrophyllus*	Pm	枸骨 *Ilex cornuta*	Ic
夹竹桃 *Nerium oleander*	No	花叶青木 *Aucuba japonica* ‘Variegata’	Aj
日本珊瑚树 *Viburnum awabuki*	Va	火棘 *Pyracantha fortuneana*	Pf
石楠 *Photinia serratifolia*	Ps	火焰南天竹 *Nandina domestica* ‘Firepower’	Ndf
蚊母树 *Distylium racemosum*	Dr	金边冬青卫矛 *Euonymus japonicus* ‘Aurea-marginatus’	Eja
紫薇 *Lagerstroemia indica*	Li	锦绣杜鹃 *Rhododendron*×*pulchrum*	Rp
紫叶李 *Prunus cerasifera* ‘Pissardii’	Pc	六月雪 *Serissa japonica*	Sj
鸡爪槭 *Acer palmatum*	Ac	贴梗海棠 *Chaenomeles speciosa*	Csp
桂花 *Osmanthus fragrans*	Of	孝顺竹 *Bambusa multiplex*	Bm
东京樱花 *Cerasus yedoensis*	Cy	栀子 *Gardenia jasminoides*	Gc
垂丝海棠 *Malus halliana*	Mh		
梅 *Armeniaca mume*	Am		

grandiflora)、乌桕(*Triadica sebifera*)-鸡爪槭等;极显著和显著负相关种对有9对,如玉兰-池杉(*Taxodium distichum* var. *imbricatum*)、墨西哥落羽杉(*Taxodium mucronatum*)-榔榆(*Ulmus parvifolia*)等。时期Ⅳ极显著和显著正相关种对有6对,如乌桕-墨西哥落羽杉、乌桕-梅(*Armeniaca mume*)等;显著负相关种对有1对,为墨西哥落羽杉-东京樱花。

2.3 灌木层种间相关性

灌木层105个种对中,各时期均无负相关极显著种对,负相关性整体极弱。正相关性表现为时期Ⅳ极显著种对数最多(18对),时期Ⅲ次之;各时期不显著正相关种对占比均较高,整体以弱相关为主,时期间正相关程度差异明显(表5)。

由图2可知,时期Ⅰ极显著和显著正相关种对有2对,为绣球(*Hydrangea macrophylla*)-金钟花(*Forsythia viridissima*)和枸骨(*Ilex cornuta*)-海桐(*Pittosporum tobira*)。时期Ⅱ极显著和显著正相关种对有9对,如杜鹃(*Rhododendron simsii*)-南天竹(*Nandina domestica*)、孝顺竹(*Bambusa multiplex*)-南天竹、海桐-红花檵木(*Loropetalum chinense* var. *rubrum*)等。时期Ⅲ极显著和显著正相关种对有21对(占20.00%),如南天竹-火棘(*Pyracantha fortuneana*)、红花檵木-海桐、野迎春(*Jasminum mesnyi*)-金钟花等。时期Ⅳ极显著和显著正相关种对有25对(占23.81%),

表 3　不同建成时期主要树种总体关联性

Table 3　Interspecific associations of main woody species in different construction periods

时期 Period	种对 Species pair	方差比率值 Variance ratio (R_V)	检验统计量 Test statistic (W)	χ^2临界值 Critical values ($\chi^2_{0.95}$, $\chi^2_{0.05}$)	检验结果 Test result
Ⅰ	乔木层 Tree species	0.88	274.28	(262.20, 359.59)	不显著负联结 Non-significant negative association
	灌木层 Shrub species	1.51	467.19	(262.20, 359.60)	显著正联结 Significant positive association
	乔灌木 Tree and shrub species	1.43	443.54	(262.20, 359.61)	显著正联结 Significant positive association
Ⅱ	乔木层 Tree species	1.14	478.18	(365.11, 478.68)	不显著正联结 Non-significant positive association
	灌木层 Shrub species	1.30	549.38	(365.11, 478.69)	显著正联结 Significant positive association
	乔灌木 Tree and shrub species	1.43	600.97	(365.11, 478.70)	显著正联结 Significant positive association
Ⅲ	乔木层 Tree species	1.07	336.43	(266.80, 364.98)	不显著正联结 Non-significant positive association
	灌木层 Shrub species	1.81	571.00	(266.80, 364.99)	显著正联结 Significant positive association
	乔灌木 Tree and shrub species	1.92	603.49	(266.80, 364.10)	显著正联结 Significant positive association
Ⅳ	乔木层 Tree species	1.23	471.68	(331.60, 440.18)	显著正联结 Significant positive association
	灌木层 Shrub species	1.98	761.76	(331.60, 440.19)	显著正联结 Significant positive association
	乔灌木 Tree and shrub species	1.98	763.66	(331.60, 440.20)	显著正联结 Significant positive association

注：检验统计量 W 为所有物种的 R_V，$R_V>1$ 且 W 在卡方临界值外时，总体呈显著正联结；$R_V<1$ 且 W 在临界值外时，总体呈显著负联结。Note: The test statistic W is the sum of variance ratios of all species. When $R_V>1$ and W falls outside the χ^2 critical value interval, the overall species association is significantly positive; when $R_V<1$ and W falls outside the critical value interval, the overall species association is significantly negative.

表 4　不同建成时期乔木层种间关系的相关性检验

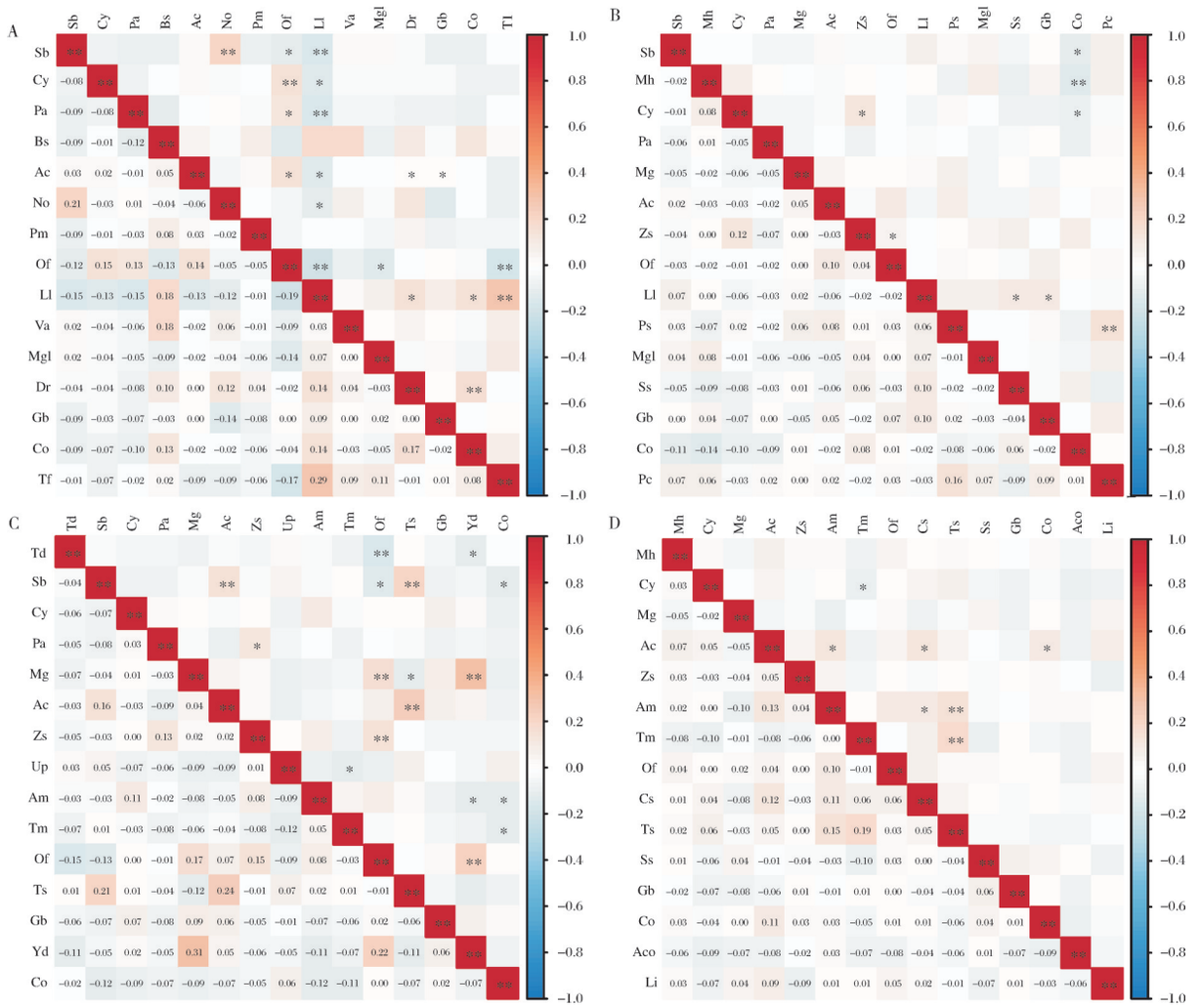
Table 4　Interspecific associations of tree species in different construction periods

时期 Period	正相关性种对数 Number of positively correlated species pairs			负相关性种对数 Number of negatively correlated species pairs		
	极显著 Highly significant	显著 Significant	不显著 Non-significant	极显著 Highly significant	显著 Significant	不显著 Non-significant
	($P<0.01$)	($P\leqslant0.05$)	($P>0.05$)	($P<0.01$)	($P\leqslant0.05$)	($P>0.05$)
Ⅰ	6	6	26	4	8	55
Ⅱ	1	4	41	1	2	56
Ⅲ	7	1	30	1	8	58
Ⅳ	2	4	47	0	1	51

如金边冬青卫矛(*Euonymus japonicus* 'Aurea-marginatus')-杜鹃、日本女贞(*Ligustrum japonicum*)-杜鹃等，显著负相关种对有 1 对。

2.4　乔灌木种间相关性

由表 6 可知，乔灌木层间 435 个种对的相关性分析中，各时期正相关性种对数整体均多于负相关性种对数。其中，时期Ⅲ正相关特征最突出，极显著 40 对、显著 26 对，时期Ⅳ次之；负相关性普遍较弱，时期Ⅳ无负相关极显著种对，整体种间关系以不显著弱相关为主。



A:时期Ⅰ Period Ⅰ;B:时期Ⅱ Period Ⅱ;C:时期Ⅲ Period Ⅲ;D:时期Ⅳ Period Ⅳ;*:$P\leqslant0.05$显著水平 Significant level at 0.05 level;**:$P<0.01$极显著水平 Highly significant level at 0.01 level,下同 The same as below.

图1 不同建成时期乔木种对Spearman秩相关系数

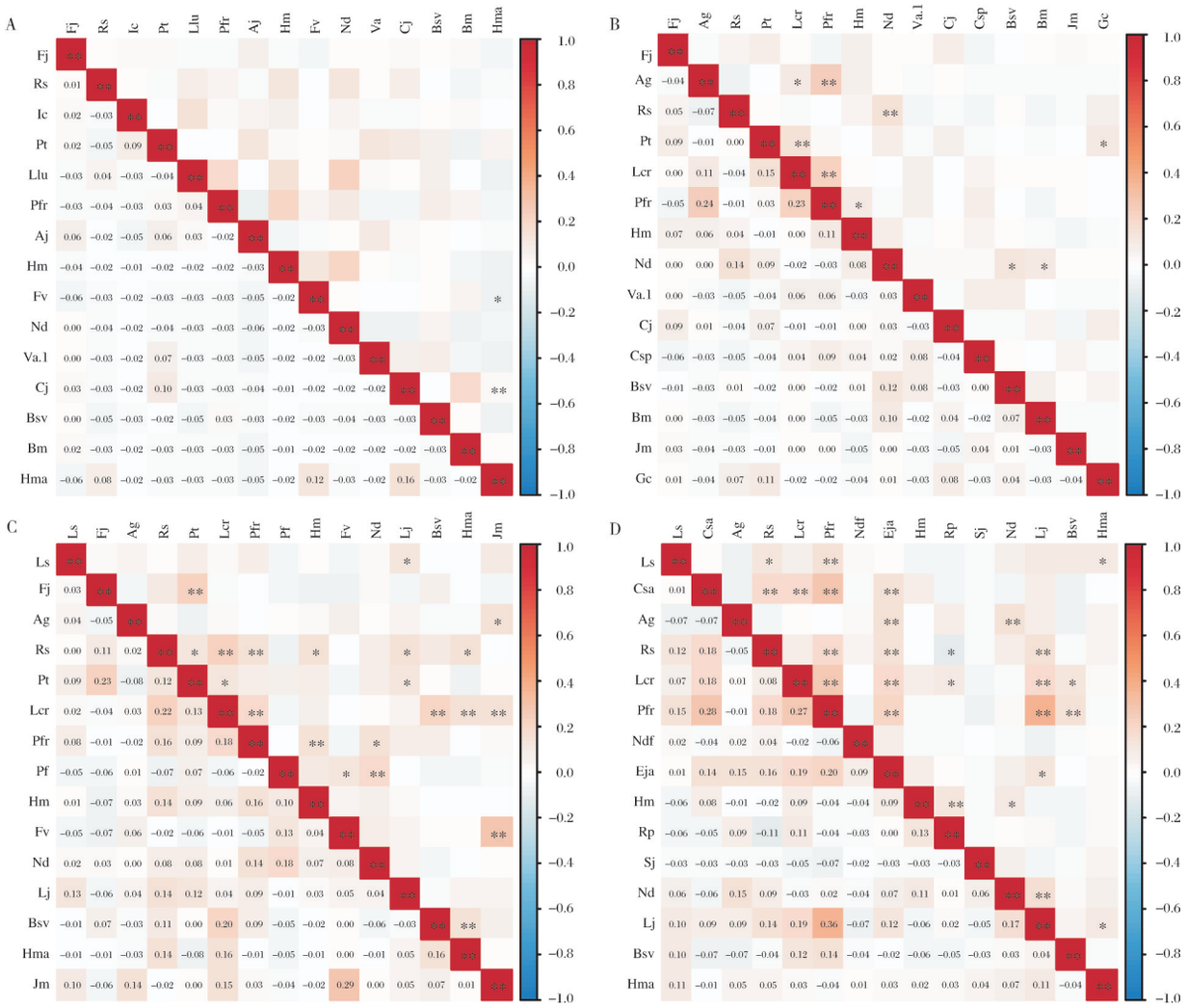
Fig. 1 Spearman's rank correlation coefficients of tree species pairs in different construction periods

表5 不同建成时期灌木层种间关系的相关性检验

Table 5 Interspecific associations of shrub species in different construction periods

时期 Period	正相关性种对数 Number of positively correlated species pairs			负相关性种对数 Number of negatively correlated species pairs		
	极显著 Highly significant	显著 Significant	不显著 Non-significant	极显著 Highly significant	显著 Significant	不显著 Non-significant
	($P<0.01$)	($P\leqslant0.05$)	($P>0.05$)	($P<0.01$)	($P\leqslant0.05$)	($P>0.05$)
Ⅰ	7	8	37	0	1	52
Ⅱ	4	5	40	0	0	56
Ⅲ	11	10	44	0	0	40
Ⅳ	18	7	36	0	1	43

由图3可知,时期Ⅰ极显著和显著正相关种对有32对,如棕榈(*Trachycarpus fortunei*)-花叶青木(*Aucuba japonica* 'Variegata')、樟树-山茶(*Camellia japonica*)、女贞-八角金盘(*Fatsia japonica*)等,极显著和显著负相关种对有11对,占2.53%。时期Ⅱ极显著和显著正相关种对有34对,如桂花-红叶石楠、女贞-贴梗海棠(*Chaenomeles speciosa*)、银杏-红花檵木等;极显著和显著负相关种对有8对,占1.84%。时



A：时期Ⅰ Period Ⅰ；B：时期Ⅱ Period Ⅱ；C：时期Ⅲ Period Ⅲ；D：时期Ⅳ Period Ⅳ.

图 2　不同建成时期灌木种对 Spearman 秩相关系数

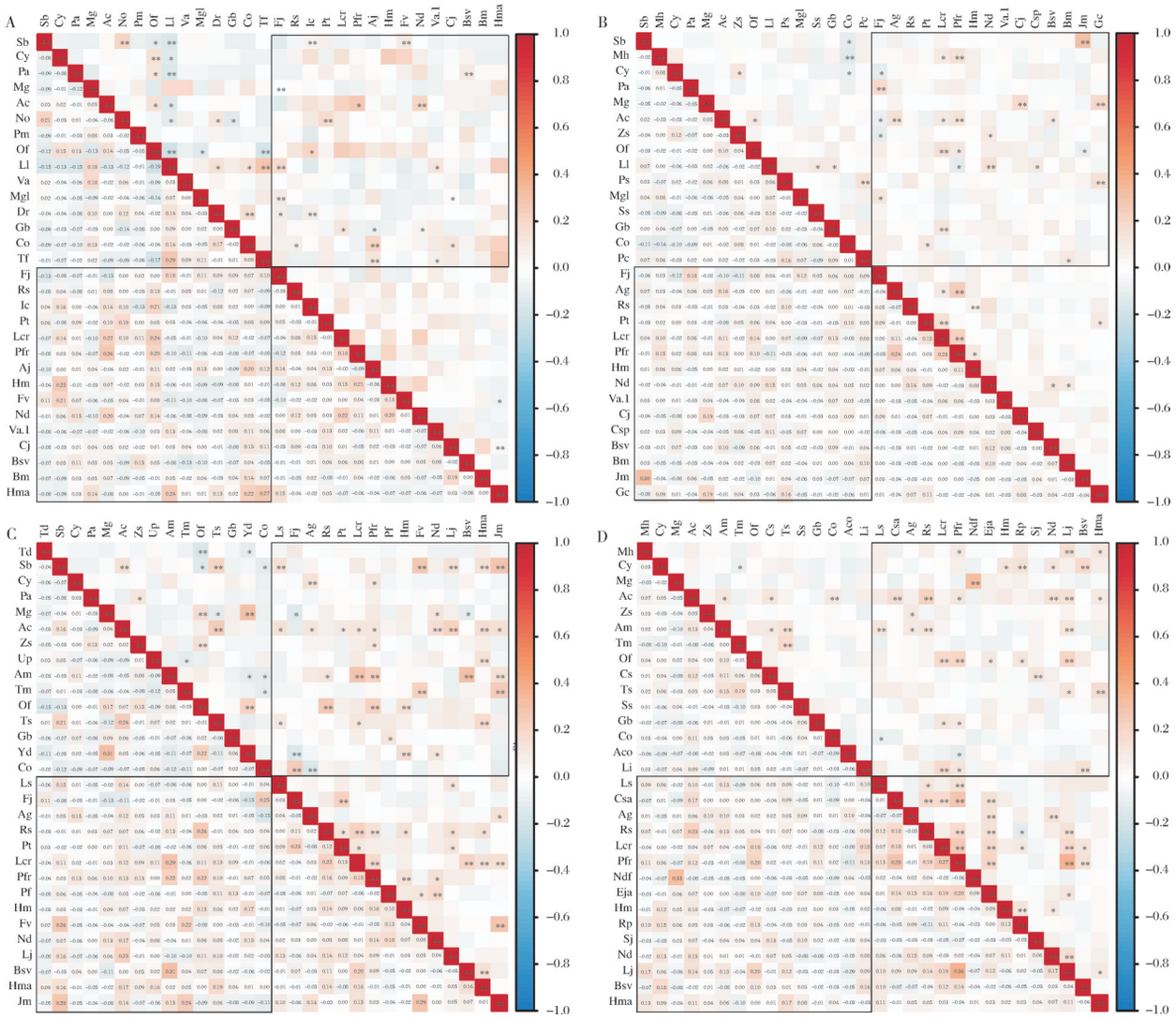
Fig. 2　Spearman's rank correlation coefficients of shrub species pairs in different construction periods

表 6　不同建成时期乔灌木种间关系的相关性检验

Table 6　Interspecific associations of tree and shrub species in different construction periods

时期 Period	正相关性种对数 Number of positively correlated species pairs			负相关性种对数 Number of negatively correlated species pairs		
	极显著 Highly significant	显著 Significant	不显著 Non-significant	极显著 Highly significant	显著 Significant	不显著 Non-significant
	($P<0.01$)	($P\leqslant0.05$)	($P>0.05$)	($P<0.01$)	($P\leqslant0.05$)	($P>0.05$)
Ⅰ	31	29	140	4	15	216
Ⅱ	16	18	180	1	7	213
Ⅲ	40	26	156	3	10	200
Ⅳ	38	25	175	0	4	193

期Ⅲ极显著和显著正相关种对有 66 对，如梅-野迎春、垂柳-银姬小蜡（*Ligustrum sinense* 'Variegatum'）、鸡爪槭-绣球，占 15.17%；极显著和显著负相关种对 13 对，如樟树-杜鹃、玉兰-大花六道木（*Abelia* × *grandiflora*）、荷花玉兰-八角金盘等。时期Ⅳ极显著和显著正相关种对有 63 对，如乌桕-绣球、梅-杜鹃、女贞-红花檵木等，显著负相关种对有 4 对。



A:时期Ⅰ Period Ⅰ;B:时期Ⅱ Period Ⅱ;C:时期Ⅲ Period Ⅲ;D:时期Ⅳ Period Ⅳ.

图3 不同建成时期乔灌木Spearman秩相关系数

Fig. 3 Spearman's rank correlation coefficients between tree and shrub species pairs in different construction periods

3 讨 论

城市公园植物群落是人为设计干预与自然发育共同作用的结果,其种间关系研究可以直观反映群落构建的人为选择机制[25-26]。已有研究表明,上海豫园、扬州瘦西湖等受古典园林风格影响较大的城市公园,其植物种间关联受人为筛选与管理调控的影响显著[14,16],尤其乔木多呈现显著负联结或不显著联结的特征。陈家龙等[15]对合肥城市公园的研究证实,优先配置正联结种对,有助于实现群落生态功能与景观价值的最大化,契合城市森林近自然化经营方向。傅徽楠等[3]指出,上海城市园林植物群落虽受人为干扰强烈,但其结构组成保留地带性植被特征,下层植物已呈现出一定的种间关联性。达良俊等[2]亦强调,上海中心城区绿地因人为干扰导致群落类型单一、结构简单且种植规则,需从"植物造景主导"向"近自然化构建"转变。本研究发现,上海城市公园植物群落种间关系随建成时期表现为乔木层从时期Ⅰ的不显著负联结,经时期Ⅱ、Ⅲ的不显著正联结,最后呈现为时期Ⅳ的显著正联结,灌木层各时期始终保持强正联结,乔灌木间正联结性则持续增强。这一趋势与上海城市绿化从"单一树种规模化种植"向"多树种复层异龄配置"的发展规律相吻合[19-20],同时印证了人工植物群落构建从早期"规则式种植"向后期"生态化设计"的理念转变[26]。

从分时期特征来看，时期Ⅰ乔木层种间关系分化明显，但显著正负相关种对占比均较低，反映出该阶段乔灌木搭配随机性强，尚未形成稳定的配置关系，可能与其历史背景相关。该阶段受苗木资源与园林技术限制，上海绿化以悬铃木、加杨等速生树种为主[20]，植物配置侧重单体景观效果，多采用“乔木遮阴＋灌木耐阴”的简单组合[27-28]，种间配置缺乏生态考量。20世纪90年代后，随着生态园林理念推广，公园植物配置开始重视物种多样性、结构层次和生态适应性的协同[2,19]。时期Ⅱ借“创建国家园林城市”契机扩大绿化规模，乔木种类显著丰富；时期Ⅲ以“春花秋色”工程为导向，聚焦复层群落与季相景观构建，种间关系持续优化；时期Ⅳ依托“绿化、彩化、效益化、珍贵化”的“四化”政策指引，以提升群落稳定性为目标，推动乔木层形成显著正联结。此过程中，上海绿化建设探索出一些植物配置的优势组合，如乌桕-墨西哥落羽杉、垂丝海棠（*Malus halliana*）-红叶石楠、荷花玉兰-火焰南天竹（*Nandina domestica* ‘Firepower’）等[13]，以生态习性相似的物种形成稳定的生态种组，为公园植物群落构建提供参考。因此，建议老旧公园改造时重点替换负关联乔木种对（如樟树与墨西哥落羽杉），引入乌桕等适配树种；新建公园则应优先配置乌桕与墨西哥落羽杉等乔木层正关联组合，强化金边冬青卫矛-杜鹃等灌木适生种对的集群配置，以提升植物群落的稳定性。

城市公园植物配置从“数量扩容”到“质量提升”再到“生态优化”的演进轨迹，与木本植物种间关系从负关联向正关联转变形成印证，这一过程是多重因素共同作用的结果。其一，从历史背景来看，早期公园植物配置受设计理念、苗木资源及生态认知的限制[20]，普遍忽视了种间生态位的互补性；时期Ⅱ、Ⅲ逐步重视树种多样化与景观层次[26,28]，但植物配置关系仍以人为调控为主导，自然演替的驱动作用相对较弱[2,5]；随着园林绿化技术的发展，时期Ⅳ可供选择的新优树种资源丰富，植物配置更注重物种生态适应性与种间协同性，优先选择生态位互补的树种组合[19,22]。从客观条件来看，早期园林苗木资源相对匮乏，可供选择的优良树种有限[20]，部分习性相似树种因生态位竞争形成负关联，后期新优树种引入为正关联组合的构建提供了基础。在管理模式层面，传统管理侧重病虫害防治与修剪，对种间关系调控不足；现代管理则更注重生态系统整体维护，促进正关联种对稳定[26]。需注意的是，时期Ⅳ乔木层显著正联结仍处于设计干预的阶段，群落关系稳定性仍需长期自然演替与科学管理的双重检验。

参考文献 References

[1] 董丽，胡洁，吴宜夏. 北京奥林匹克森林公园植物规划设计的生态思想[J]. 中国园林，2006，22(8)：34-38. DONG L，HU J，WU Y X. Ecological concepts of plants planning in Beijing Olympic Forest Park[J]. Chinese landscape architecture，2006，22(8)：34-38 (in Chinese with English abstract).

[2] 达良俊，方和俊，李艳艳. 上海中心城区绿地植物群落多样性诊断和协调性评价[J]. 中国园林，2008，24(3)：87-90. DA L J，FANG H J，LI Y Y. Diversity analysis and harmony assessment on the plant community in green space of central Shanghai[J]. Chinese landscape architecture，2008，24(3)：87-90 (in Chinese with English abstract).

[3] 傅徽楠，严玲璋，张连全，等. 上海城市园林植物群落生态结构的研究[J]. 中国园林，2000，16(2)：22-25. FU H N，YAN L Z，ZHANG L Q，et al. Study on ecological structure of the ornamenfal plants community in Shanghai[J]. Journal of Chinese landscape architecture，2000，16(2)：22-25 (in Chinese with English abstract).

[4] 李婧，张晓婉. 城市修补理论在上海老公园改造中的应用[J]. 中国园林，2019，35(6)：67-71. LI J，ZHANG X W. The application of the urban repair theory in the reconstruction of old parks in Shanghai[J]. Chinese landscape architecture，2019，35(6)：67-71 (in Chinese with English abstract).

[5] 彭少麟. 南亚热带森林群落动态学[M]. 北京：科学出版社，1996. PENG S L. Dynamics of south subtropical forest communities[M]. Beijing：Science Press，1996 (in Chinese).

[6] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海：华东师范大学出版社，2001. SONG Y C. Vegetation ecology [M]. Shanghai：East China Normal University Press，2001 (in Chinese).

[7] 商侃侃. 浙江天目山孑遗植物群落主要种群的种间关系[J]. 浙江农林大学学报，2013，30(2)：206-214. SHANG K K. Interspecific relationship of dominant populations in relict deciduous forests on Mount Tianmu，Eastern China [J]. Journal of Zhejiang A & F University，2013，30(2)：206-214 (in Chinese with English abstract).

[8] 李刚，朱志红，王孝安，等. 子午岭辽东栎群落乔木种间联结与取样面积[J]. 生态学杂志，2008，27(5)：689-696. LI G，ZHU Z H，WANG X A，et al. Interspecific association of trees species in *Quercus wutaiensis* communities in Ziwu Mountain related to quadrat size[J]. Chinese journal of ecology，2008，27(5)：689-696 (in Chinese with English abstract).

[9] 王旭东，杨秋生，张庆费. 城市绿地植物群落构建与调控策略探讨[J]. 中国园林，2016，32(1)：74-77. WANG X D，YANG Q S，ZHANG Q F. Research on the construction of landscape

plant communities and management in the urban green space [J]. Chinese landscape architecture, 2016, 32(1): 74-77 (in Chinese with English abstract).

[10] 王美婷,孙冰,陈雷,等.广州市典型性城市公园植物景观美景度研究[J].浙江农林大学学报,2017,34(3):501-510. WANG M T, SUN B, CHEN L, et al. Scenic beauty for forest plants of typical urban park in Guangzhou[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2017, 34(3): 501-510 (in Chinese with English abstract).

[11] 张桥英,彭少麟,张素梅,等.澳门松山市政公园优势种的种间关联性分析[J].生态环境,2008,17(4):1541-1547. ZHANG Q Y, PENG S L, ZHANG S M, et al. Interspecific associations of dominant species in Macao's montanha florida municipal park[J]. Ecology and environment, 2008, 17(4): 1541-1547 (in Chinese with English abstract).

[12] 沈德才,胡桢健,陈跃洲,等.东莞城市绿地植物群落优势种群的生态位和种间联结分析[J].林业与环境科学,2024,40(6):46-58. SHEN D C, HU Z J, CHEN Y Z, et al. Niche and interspecific association of dominant species in urban green space of plant communities of Dongguan City[J]. Forestry and environmental science, 2024, 40(6): 46-58 (in Chinese with English abstract).

[13] 李娟,温远光,王成,等.南宁市城区森林灌木层优势种种间联结分析[J].林业科学研究,2009,22(2):230-236. LI J, WEN Y G, WANG C, et al. Interspecific association analysis of the main species in shrub layer of the forestry in the urban area in Nanning[J]. Forest research, 2009, 22(2): 230-236 (in Chinese with English abstract).

[14] 王敉敉,吴泽民.上海豫园主要植物群落的种间关系研究[J].安徽农学通报,2011,17(9):173-177. WANG M M, WU Z M. Disposition characters and association of tree species in classical gardens in Yuyuan of Shanghai[J]. Anhui agricultural science bulletin, 2011, 17(9): 173-177 (in Chinese with English abstract).

[15] 陈家龙,吴泽民,朱锋,等.合肥市城市公园木本植物群落树种组成及种间联结性研究[J].安徽农业大学学报,2009,36(3):403-407. CHEN J L, WU Z M, ZHU F, et al. The tree species composition and interspecific associations of woody plant communities in urban park in Hefei[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2009, 36(3): 403-407 (in Chinese with English abstract).

[16] 王敉敉,吴泽民.扬州瘦西湖主要植物群落种间关系研究[J].安徽农业大学学报,2010,37(2):290-295. WANG M M, WU Z M. Disposition characters and association of tree species in classical gardens in Shouxihu Lake of Yangzhou[J]. Journal of Anhui Aagricultural University, 2010, 37(2): 290-295 (in Chinese with English abstract).

[17] 赵慧.上海现代城市公园变迁研究(1949—1978)[D].上海:上海交通大学,2010. ZHAO H. Study on evolution of modern city parks in Shanghai (1949－1978)[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010 (in Chinese with English abstract).

[18] 莫非.上海市城市绿地系统规划70年演变(1949—2019年)[C]//中国风景园林学会.中国风景园林学会2019年会论文集.上海:[s.n.], 2019:561-564. MO F. Evolution of Shanghai urban green space system planning in 70 Years (1949—2019)[C]//Chinese society of landscape architecture. Annual conference of Chinese society of landscape architecture. Shanghai:[s.n.], 2019:561-564 (in Chinese).

[19] 杨文悦,田旗.以引种科研为基础营建上海城市绿化"春景秋色"景观[J].上海建设科技,2005(5):30-31. YANG W Y, TIAN Q. Based on scientific research on introduced seeds, create "spring scenery and autumn tints" landscape in Shanghai City[J]. Shanghai coustruction science and technology, 2005(5): 30-31 (in Chinese).

[20] 钱又宇.上海"四化"新优树种的应用现状与前景展望[J].园林,2020,37(1):6-11. QIAN Y Y. Application status and prospect of new varieties in shanghaiwith the policy of "four modernizations"[J]. Landscape architecture, 2020, 37(1): 6-11 (in Chinese with English abstract).

[21] 骆会欣."春景秋色"扮靓上海[N].中国花卉报,2007-06-28(005). LUO H X. "Spring scenery and autumn colors" make Shanghai more beautiful[N]. China flower and horticulture news, 2007-06-28(005) (in Chinese).

[22] 达良俊,郭雪艳.上海城市生态建设"四化"内涵的生态学释意[J].园林,2019,36(1):8-13. DA L J, GUO X Y. Ecological interpretation on the connotations of "afforestation, colorization, preciousness, efficiency" during urban ecological construction in Shanghai[J]. Landscape architecture, 2019, 36(1): 8-13 (in Chinese with English abstract).

[23] 徐满厚,刘敏,翟大彤,等.植物种间联结研究内容与方法评述[J].生态学报,2016,36(24):8224-8233. XU M H, LIU M, ZHAI D T, et al. A review of contents and methods used to analyze various aspects of plant interspecific associations[J]. Acta ecologica sinica, 2016, 36(24): 8224-8233 (in Chinese with English abstract).

[24] COHEN J. Statistical power analysis for the behavioral sciences[M]. New York: Academic Press, 1977.

[25] 王明荣,宋国防.生态园林设计中植物的配置[J].中国园林,2011,27(5):86-90. WANG M R, SONG G F. On plant configuration in ecological landscape design[J]. Chinese landscape architecture, 2011, 27(5): 86-90 (in Chinese with English abstract).

[26] 杨学军,唐东芹.园林植物群落及其设计有关问题探讨[J].中国园林,2011,27(2):97-100. YANG X J, TANG D Q. Discussion on garden plant community and its design[J]. Chinese landscape architecture, 2011, 27(2): 97-100 (in Chinese with English abstract).

[27] 张声平,刘纯青.浅谈我国现代园林植物配置的趋势[J].江西农业大学学报(社会科学版),2004,3(4):131-133. ZHANG S P, LIU C Q. Discussion on the trend of modern gar-

den plant allocation in China[J].Journal of Jiangxi Agricultural University(social sciences edition),2004,3(4):131-133 (in Chinese with English abstract).

[28] 高雅英.上海公园植物造景研究[J].现代园艺,2013(16):113. GAO Y Y.Study on plant landscaping in Shanghai parks [J].Xiandai horticulture,2013(16):113 (in Chinese).

Comparison of interspecific relationships of woody plants in urban parks in Shanghai City during different periods of construction

SHANG Kankan[1,2], ZHANG Jiale[1,2], WANG Ruoyu[2,3,4], YE Ziyi[5], HU Yuandong[1,3]

1.*Institute for Interdisciplinary and Innovative Research, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China*;
2.*Shanghai Chenshan Botanical Garden, Shanghai 201602, China*;
3.*College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China*;
4.*Laizhou Bureau of Forestry, Laizhou 261400, China*;
5.*Shanghai Landscape (Group) Co., Ltd., Shanghai 200131, China*

Abstract　14 urban parks belonging to four periods including before 1995 (period Ⅰ), 1995－2004 (period Ⅱ), 2005－2017 (period Ⅲ), and after 2018 (period Ⅳ) were used to study the changing characteristics of interspecific relationships of woody plants in urban parks in Shanghai City during different periods of construction. 1 434 plant community plots of 10 m×10 m were investigated. The variance ratio method (R_V), chi-square (χ^2) test and Spearman's rank correlation coefficient test were used to analyze interspecific associations for 29 arbor species and 27 shrub species with an important value (IV)≥ 5. The results showed that the overall associations between arbors and shrubs in each period had a significantly positive correlation ($R_V>1$, $P<0.05$), and gradually increased with the extension of construction time, with the R_V increasing from 1.43 in period Ⅰ to 1.98 in period Ⅳ. The interspecific relationships in the layer of arbors had significant differences, with insignificant negative associations being the main feature in the early period (period Ⅰ), manifested as differences in habits of species. A significant positive correlation was formed in the later period (period Ⅳ), manifested by similar demands of ecological niche. The layer of shrubs maintained strong positive association throughout all periods, with the R_V reaching 1.98 in period Ⅳ and the proportion of positively correlated pairs of species in the Spearman's rank test accounting for 23.81%. The proportion of positively correlated pairs of species between the arbor and shrub layers increased from 5.06% in period Ⅰ to 5.98% in period Ⅳ, while the proportion of negatively correlated pairs decreased, with a continuous enhancement of overall interspecific association. Thus, it is recommended that priority should be given to replacing arbor species with negative associations for renovation of parks in the early period. Newly constructed parks should be equipped with positive correlation combinations in the layer of arbor and the layer of shrub should be strengthened with clustered configuration of suitable native species to improve the stability of plant communities.

Keywords　urban parks; interspecific association; plant configuration; structure of community; pairs of species

(责任编辑:葛晓霞)