

上海城市森林区系组成及不同植被类型物种多样性差异

Composition of Shanghai Urban Forest and of Species Diversity of Different Vegetation Types

罗心怡 郭雪艳 高志文 常铭阳 张希金 宋 坤* 达良俊*
LUO Xinyi GUO Xueyan GAO Zhiwen CHANG Mingyang ZHANG Xijin SONG Kun* DA Liangjun*

文章编号: 1000-0283 (2021) 10-0019-08
DOI: 10.12193/j.laing.2021.10.0019.003
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2021-06-14
修回日期: 2021-07-26

罗心怡

1999年生/女/贵州贵阳人/华东师范大学生态与环境科学学院博士在读/研究方向为城市生态学(上海200241)

宋 坤

1983年生/男/安徽宣城人/博士/华东师范大学生态与环境科学学院副教授、硕士生导师/研究方向为植被生态学(上海200241)

达良俊

1962年生/男/上海人/博士/华东师范大学生态与环境科学学院教授, 博士生导师/上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室主任, 上海崇明生态研究院生态保育与恢复中心主任, 自然资源部大都市区国土空间生态修复工程技术创新中心副主任, 国务院学位委员会生态学学科评议组成员/研究方向为城市生态学与植被生态学(上海200241)

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: ksong@des.ecnu.edu.cn
ljda@des.ecnu.edu.cn

摘要

城市森林是城市生态系统的重要组成部分, 具有多种生态功能。研究通过收集上海市2004—2019年的1 371个城市森林群落样方数据, 分析其中出现的83科218属353种植物的科属组成、地理分布, 继而应用植被分类的相关原则与方法将其归为8种群落类型, 并对比了不同群落类型的物种丰富度、Shannon-Wiener指数和Simpson指数。研究结果表明: (1) 上海城市森林出现“孑遗化”现象, 即物种组成上单科单属植物占主导地位; (2) 在科和属/种水平上分别归属于15和23个地理分布区类型; (3) 群落类型以阔叶森林占主导优势; (4) 常绿落叶阔叶混交林各多样性指数均较高, 竹林均较低。研究初步形成上海城市森林样方数据库, 可为上海植被研究与城市森林建设提供参考。

关键词

城市森林; 植物多样性; 绿化

Abstract

Urban forests are an essential part of the urban ecosystem and have multiple ecological functions. This study sample data of 1 371 urban forest relevés in Shanghai from 2004 to 2019, to analyze the family composition and geographic distribution of 353 species in 83 families, 218 genera. We also classified the relevés into eight vegetation types by following relevant principles and methods of vegetation classification, and then compared species richness, Shannon-Wiener index and Simpson index among different vegetation types. The results show that: (1) Shanghai urban forests showed a "legacy" phenomenon, that is, single-family and single genera dominate the species composition; (2) In terms of geographical composition, all species can be grouped into 15 and 23 areal-types at family and genus levels respectively; (3) Broad-leaved forests were the dominate vegetation of Shanghai urban forests; (4) Evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest had higher value of diversity indexes, while bamboo forest had lower values. The research has initially formed a Shanghai urban forest sample database, providing references for Shanghai vegetation research and urban forest construction.

Key words

urban forest; plant diversity; greening

城市森林的概念最早于1965年由多伦多大学Erik Jorgensen教授提出, 他认为城市森林包括整个地区受城市人口影响和利用的所有树木^[1], 现普遍认为城市森林包括城市建成区及周边单株树木、小片林木、林地和灌木丛内的林分^[2]。快速城市化使得城市生态系统脆弱、生态服务功能较低、自然生境面积减少且更加破碎, 但城市森林可缓解城市化带来的影响^[3-4], 并具有调节局部气候、净化

城市空气、缓解热岛效应、提供休闲游憩等生态服务功能^[5-6]，还可为乡土物种提供庇护场所，并提高其遗传多样性^[7-8]。

然而，城市森林群落内常出现物种组成简单且群落结构单一的现象，使其生态服务价值无法充分实现。达良俊等发现上海市中心城区物种数小于5的植物群落出现频率最高^[9]；张凯旋等在针对上海市外环林带的研究中，其样方中乔木层或灌木层的平均物种数均小于4^[10]。同时，各地的城市森林优势种非常相似。胡志斌等研究沈阳市城市森林时发现，其树种单种优势明显、优势种的种类少、分布规律相似^[11]；宋坤等在对上海市居住区植物多样性的研究中发现，不同居住区的共有物种数无显著差异，并且存在均质化现象^[12]；汪永英等在哈尔滨城市林业示范基地进行研究时，发现各林型乔木层均出现物种单一的现象^[13]。因此，城市森林在建设过程中不仅要追求量的提升，其质的提升也应受到充分的关注，以避免形成城市“绿色沙漠”^[14]。

上海自20世纪末开始大力发展城市绿化，是中国最早践行城市森林建设的城市之一^[15]，并在“十三五”规划中提出建设“生态之城”的要求^[16]，其目标是不断提升城市森林覆盖率以增加生物栖息地，为回引乡土动植物以及构建城市生命地标提供政策指导^[17]。鉴此，本研究收集了2004—2019年间上海城市森林群落调查数据，对其科属组成、地理分布及物种多样性等进行分析 and 比较，以厘清上海城市森林植被类型区系和物种多样性差异，研究结果以期上海市“生态之城”的建设提供植被本底数据，构建城市植被数据库，并为未来城市的植被景观建设提供合理的建议。

1 研究区域概况

上海市(120° 52′—122° 12′ E, 30° 40′—31° 53′ N)位于长江入海口，东临东海，是陆地、大江与海洋交汇之地，

是长江三角洲冲积平原的最前端，最高海拔103.7 m，平均海拔约2.2 m，总面积约6 340.5 km²。上海属于北亚热带季风气候，四季分明，雨水充沛，日照充分，利于植物生长。

上海是中国的经济中心，这意味着频繁的人类活动对植被及其生境的形成有重要的影响^[18]。近年来，上海市城市化水平不断提高，到2014年时，城镇化率已达到90.3%^[19]。由于上海的高度城市化，仅佘山山脉的部分地区和大金山岛有残存自然植被^[20]。

根据在上海市开展的研究及文献资料发现，在原江湾机场等地有放弃管护的次生演替样地^[21-22]；浦东新区和闵行区建有近自然林^[23]；奉贤区、松江区等地有水源涵养林样地^[24-25]；有人工建造、自然演替与人工管护相结合的公园，如外环林带^[26]；还有大量高度管护的景观公园如迪士尼乐园^[27]，以及道路绿化带等。

2 研究方法

2.1 历史数据收集

本研究通过收集整理2004—2019年间在上海开展的植被调查样方数据(表1)，对原始记录资料、文献记录资料等数据进行整理；对于同一群落的多次调查数据，选取最近一次的调查数据进行汇总，最终整理分析的森林群落样方数据主要为2011年及以后的调查数据(占比81.0%)。调查样地可大致分为人工植被样地(公园绿地、近自然林、水源涵养林、外环林带等)和自然残存植被样地(佘山山脉、大金山岛等)两大类，共1 371个样方，各类型样方分布情况如图1所示。

2.2 数据处理与分析

2.2.1 数据汇总

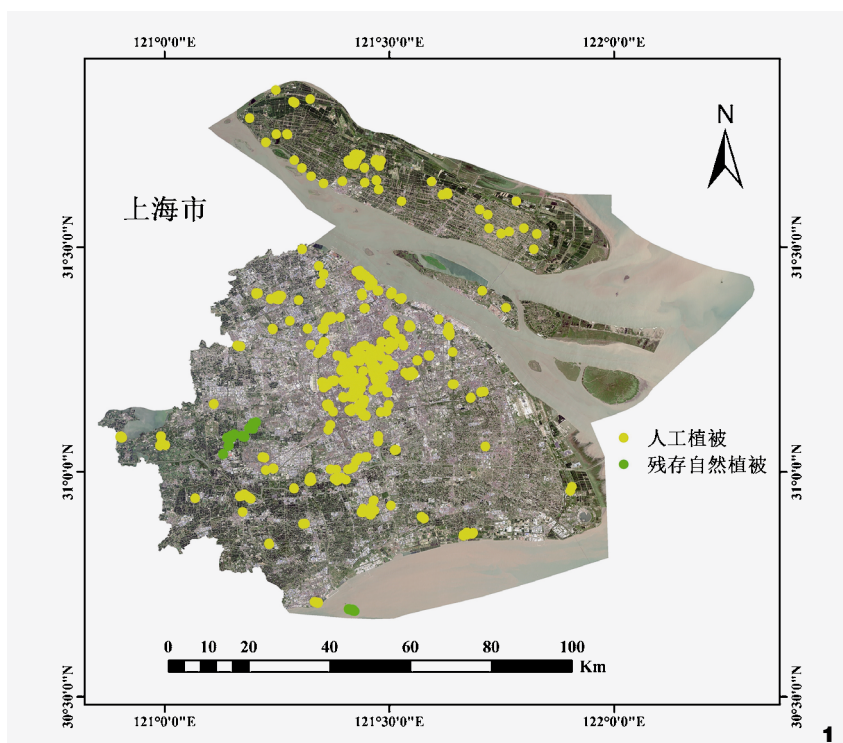
根据样方调查记录，统计乔木层和灌木层的高度和盖

表1 上海城市森林群落样方调查年份分布情况

调查年份	2004	2005	2007	2010	2011	2012	2013	2015	2016	2017	2018	2019	总计
样方数量	184	27	48	2	504	229	39	14	204	82	14	24	1 371
比例/%	13.4	2.0	3.5	0.1	36.8	16.7	2.8	1.0	14.9	6.0	1.0	1.8	100.0

表2 Braun-Blanquet多盖度等级与百分比盖度的转换方法

多盖度等级	0	0.2	1.1	2.2	3.3	4.4	5.5
盖度/%	≤0.5	0.5~1.0	1.1~5.0	5.1~25.0	25.1~50.0	50.1~75.0	>75.0



1. 上海市森林群落样方分布图

度, 汇总每个个体的胸径, 或物种的高度和盖度 (或株数) 等 (根据实际调查情况确定分析数据所用的具体参数, 盖度可通过冠幅和样方面积换算, 株数可根据密度和样方面积换算)。其中以Braun-Blanquet多盖度等级表示的数据均按表2转换为平均盖度。

2.2.2 优势度计算

根据群落物种组成分别计算每个物种在乔木层和灌木层的物种优势度。物种优势度通过相对重要值 (RIV) 表示, 其中乔木层物种优势度的计算公式 (1) 和灌木层物种优势度的计算公式 (2) 分别为:

$$RIV_{\text{乔木}} = \text{相对高度} \times \text{相对盖度} \text{ 或 } RIV_{\text{乔木}} = \text{相对显著度} \quad (1)$$

$$RIV_{\text{灌木}} = \text{相对高度} \times \text{相对盖度} \text{ 或 } RIV_{\text{灌木}} = \text{相对高度} \times \text{相对多度} \quad (2)$$

其中, 相对显著度=某物种的胸径断面积/样方内所有物

种的胸径断面积 $\times 100\%$; 相对高度=某物种的平均 (最大) 高度/样方内所有物种的平均 (最大) 高度 $\times 100\%$; 相对盖度=某物种的平均盖度/样方内所有物种的平均盖度 $\times 100\%$; 相对多度=某物种的株数/样方内所有物种的总株数 $\times 100\%$ 。

对群落水平上物种的相对重要值通过乔木层和灌木层的体积当量 (即高度与盖度的乘积) 进行加权, 计算公式为公式 (3):

$$RIV_{\text{总}} = RIV_{\text{乔木}} \times \left(\frac{\text{乔木层高度} \times \text{乔木层盖度}}{\text{乔木层高度} \times \text{乔木层盖度} + \text{灌木层高度} \times \text{灌木层盖度}} \right) + RIV_{\text{灌木}} \times \left(\frac{\text{灌木层高度} \times \text{灌木层盖度}}{\text{乔木层高度} \times \text{乔木层盖度} + \text{灌木层高度} \times \text{灌木层盖度}} \right) \quad (3)$$

2.2.3 群落划分

采用聚类分析对所有样方进行类型划分: (1) 利用整合后的样方资料, 形成“物种—样方”物种优势度矩阵; (2) 利用PCORD 5软件, 采用组间平均联结法, 进行聚类分析; (3) 根据聚类结果, 结合群落物种组成及各物种优势度, 划分不同群落类型。

表3 科水平上的科属种数量统计

	数目（比例/%）		
	科	属	种
单种科（种数=1）	32（38.6）	32（14.7）	32（9.1）
寡种科（种数2~4）	24（28.9）	50（22.9）	65（18.4）
中等科（种数5~14）	23（27.7）	93（42.7）	172（48.7）
多种科（种数≥15）	4（4.8）	43（19.7）	84（23.8）
总计	83（100.0）	218（100.0）	353（100.0）

2.2.4 物种多样性对比

以乔木层和灌木层中的物种为对象计算物种多样性指数。物种多样性的衡量采用物种丰富度 (S)、多样性指数 (Shannon-wiener 指数, H) 和优势度指数 (Simpson 指数, D) 3 个指数, 其计算公式分别为公式 (4) (5) (6)：

$$\text{物种丰富度 } S = \text{出现在样方内的物种总数} \tag{4}$$
$$\text{多样性指数 } H = -\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \tag{5}$$
$$\text{优势度指数 } D = 1 - \sum_{i=1}^n P_i^2 \tag{6}$$

其中, P_i 表示第*i*个物种的相对重要值。根据计算的物种丰富度、Shannon-wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数, 绘制箱线图, 并利用 SPSS 独立样方非参数检验分析各群落类型是否存在显著差异。

3 结果与分析

3.1 物种组成特征

3.1.1 科属组成

本研究的1 371个样方中, 共有83科218属353种植物。在科分类水平上, 单种科占据优势, 占比38.6% (表3); 在属分类水平上, 单种属占据绝对优势, 占比70.2% (表4)。因此, 从物种科属分布来看, 上海城市森林乔灌木层植物主要由单种

表4 属水平上的属种数量统计

	数目（比例/%）	
	属	种
单种属（种数=1）	153（70.2）	153（43.3）
寡种属（种数2~4）	56（25.7）	140（39.7）
多种属（种数≥5）	9（4.1）	60（17.0）
总计	218（100.0）	353（100.0）

科、单种属构成, 如银杏科银杏属的银杏 (*Ginkgo biloba*)、防己科木防己属的木防己 (*Cocculus orbiculatus*)、杜仲科杜仲属的杜仲 (*Eucommia ulmoides*) 等, 具有较为明显的“子遗化”现象。

3.1.2 地理分布

在科分类尺度上, 83科可分为15个分布区类型, 其中以世界广布和热带广布的植物科为主 (表5); 在属/种水平上,

表5 植物科分布区类型

性质	地理成分	科数（比例/%）
世界性	1 广布（世界广布）	22（-）
	2 泛热带（热带广布）	23（37.7）
	2-1 热带亚洲—大洋洲和热带美洲（南美洲或/和墨西哥）	1（1.6）
	2-2 热带亚洲—热带非洲—热带美洲（南美洲）	1（1.6）
	2S 以南半球为主的泛热带	3（4.9）
	3 东亚（热带、亚热带）及热带南美间断分布	6（9.8）
	4 旧世界热带	2（3.3）
	5 热带亚洲至热带大洋洲	2（3.3）
	6 热带亚洲至热带非洲	1（1.6）
	6d 南非（主要是好望角）	1（1.6）
热带性	小计	40（65.6）
	8 北温带	3（4.9）
	8-4 北温带和南温带间断分布	13（21.3）
	8-5 欧亚和南美洲温带间断分布	1（1.6）
	9 东亚及北美间断分布	2（3.3）
	小计	19（31.1）
	15 中国特有	2（3.3）
温带性	总计	83（100.0）

可划分为23个分布区类型, 其中以北温带分布的植物属种和泛热带(热带广布)的植物属种为主(表6)。出现该结果的主要原因可能为上海市位于北亚热带, 兼具热带和北温带的气候特征。对于上海城市绿地、市内自然山体与岛屿、周边自然山体的研究, 均说明该地区的植物以泛热带分布为主, 其次为北温带分布和世界广布的植物^[15,28]。

3.2 群落类型

依据聚类结果, 并参考中国植被分类体系^[29], 1 371个样方可归为常绿阔叶灌丛、落叶阔叶灌丛、常绿阔叶林、常绿针叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、落叶针叶林和竹林8种群落类型(表7)。其中, 常绿阔叶林最多, 有448个样方, 占比32.7%; 落叶阔叶灌丛最少, 仅19个样方, 占比1.4%。

3.3 植物群落的物种多样性差异

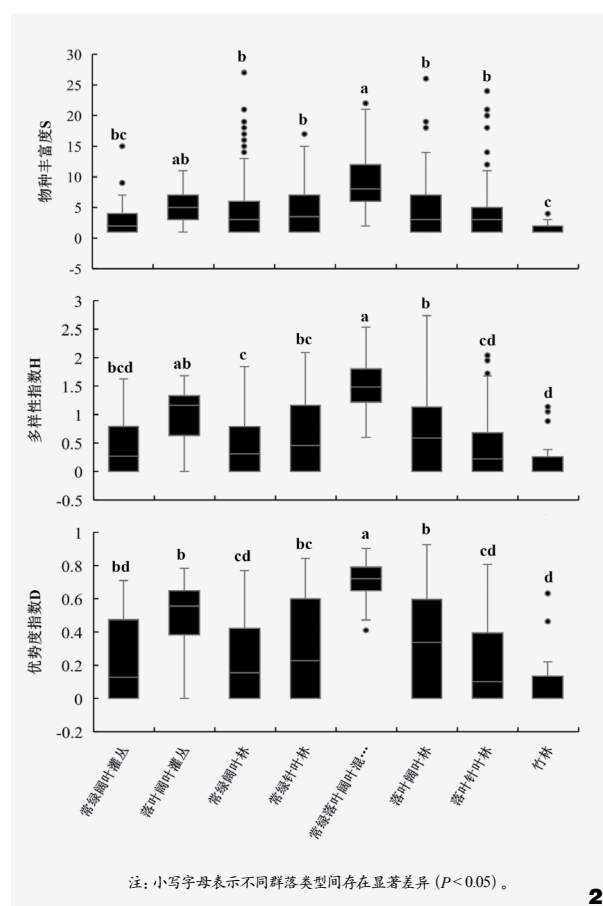
就物种丰富度而言(图2), 常绿落叶阔叶混交林与落叶阔叶灌丛无显著差异, 但显著高于其余6种群落类型($P < 0.05$); 竹林与常绿阔叶灌丛无显著差异, 但显著小于其余6种群落类型($P < 0.05$); 落叶阔叶灌丛、落叶阔叶林、常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、常绿阔叶灌丛6种群落类型之间无显著差异。

对于Shannon-Wiener多样性指数, 常绿落叶阔叶混交林与落叶阔叶灌丛无显著差异, 但显著高于其余6种群落类型($P < 0.05$); 落叶阔叶灌丛和落叶阔叶林间无显著差异, 但显著高于常绿阔叶林、落叶针叶林和竹林($P < 0.05$); 常绿针叶林和常绿阔叶林间无显著差异, 但显著高于竹林($P < 0.05$); 常绿阔叶灌丛、落叶针叶林和竹林三种群落类型间无显著差异。

对于Simpson优势度指数, 常绿落叶阔叶混交林显著高于其余7种群落类型($P < 0.05$); 落叶阔叶灌丛和落叶阔叶林间无显著差异, 但显著高于常绿阔叶林、落叶针叶林和竹林($P < 0.05$); 常绿针叶林显著高于竹林($P < 0.05$); 常绿阔叶灌丛、常绿阔叶林、落叶针叶林和竹林4种群落类型间无显著差异。

4 讨论

植被数据是开展植被研究和管理的最核心内容。建立统一的植被数据库, 尤其是基于样方调查数据的数据库, 对深入认识植被的形成与维持机制, 开展科学动态管理极其重要。20世纪末, 美国国家科学基金会(NSF)资助实施了国家



2. 上海城市森林各群落类型的物种多样性

层面的植被调查计划——“植被库计划”(VegBank, <http://www.vegbank.org>); 2010年, 国际植被科学协会(International Association for Vegetation Science, IAVS)和欧洲植被观测组织(European Vegetation Survey, EVS)共同推动了“全球植被样方数据库索引”平台的建立(Global Index of Vegetation-plot Databases, GIVD); 另外, 全球森林生物多样性倡议(Global Forest Biodiversity Initiative, GFB)建立了GFB数据库, 该数据库包括来自44个国家、含全球主要陆地生物群区的777 126个固定样地的数据; 在此之后, 德国整合生物多样性研究中心(German Centre for Integrative Biodiversity Research)整合了近130年(1885—2015年)全球各地1 121 244个植被样地的数据并建立“整合样方数据库”(sPlot)^[30-33]。但目前鲜有关于城市植被数据库的报道。

表6 植物属种分布区类型

性质	分布区类型	属数（比例/%）	种数（比例/%）
世界性	1 广布（世界广布）	11 (-)	14 (-)
	2 泛热带（热带广布）	36 (17.4)	56 (16.5)
热带性	2S 以南半球为主的泛热带	1 (0.5)	1 (0.3)
	3 东亚（热带、亚热带）及热带南美间断分布	9 (4.3)	12 (3.5)
	4 旧世界热带	9 (4.3)	14 (4.1)
	5 热带亚洲至热带大洋洲	8 (3.9)	9 (2.7)
	6 热带亚洲至热带非洲	10 (4.8)	19 (5.6)
	7 热带亚洲（即热带东南亚至印度—马来，太平洋诸岛）	7 (3.4)	9 (2.7)
	7-1 爪哇（或苏门答腊），喜马拉雅间断或星散分布到华南、西南	1 (0.5)	1 (0.3)
	(7a) 西马来	7 (3.4)	15 (4.4)
	(7e) 全分布区东南达西太平洋诸岛弧	1 (0.5)	1 (0.3)
	小计	89 (43.0)	137 (40.4)
温带性	8 北温带	40 (19.3)	83 (24.5)
	8-4 北温带和南温带间断分布	6 (2.9)	14 (4.1)
	9 东亚及北美间断分布	25 (12.1)	35 (10.3)
	10 旧世界温带	8 (3.9)	17 (5)
	10-1 地中海区,至西亚（或中亚）和东亚间断分布	2 (1)	2 (0.6)
	10-3 欧亚和南非（有时也在澳大利亚）	2 (1)	2 (0.6)
	11 温带亚洲	3 (1.4)	4 (1.2)
	12 地中海区、西亚至中亚	4 (1.9)	4 (1.2)
	12-4 巴尔干半岛至西喜马拉雅间断于索科特群岛（Socotra）分布	1 (0.5)	1 (0.3)
	14 东亚	14 (6.8)	25 (7.4)
	14-2 中国—日本（SJ）分布	6 (2.9)	7 (2.1)
	小计	111 (53.6)	194 (57.2)
	15 中国特有	7 (3.4)	8 (2.4)
总计		218 (100.0)	353 (100.0)

表7 群落类型汇总

群落类型	样方数量	比例/%
常绿阔叶灌丛	43	3.1
落叶阔叶灌丛	19	1.4
常绿阔叶林	448	32.7
常绿针叶林	88	6.4
常绿落叶阔叶混交林	141	10.3
落叶阔叶林	403	29.4
落叶针叶林	201	14.7
竹林	28	2.0
总计	1 371	100.0

上海市森林覆盖率从2000年的9.2%增加到2019年的17.6%^[34]（图3）。在这期间陆续有研究报道了上海城市森林的组成与结构，例如：达良俊等针对中心城区的森林群落进行调查，采用法瑞学派调查方法记录了489个样方，并对群落类型、结构及物种的多样性进行分析^[9]；张凯旋等在2009年针对上海市外环林带的森林群落进行调查，采用每木调查法记录了177个样方，并分析群落的类型、树种选择、物种多样性和垂直结构特征^[10]；孙文于2012年针对崇明岛的森林群落进行调查，采用法瑞学派调查法记录了171个样方，分析了群落结构并对群落进行评价^[35]。但上述研究主要针对某一特定区域开展调



3. 上海延中绿地 (汤春梅 摄)

查, 且调查方法不同导致结果难以比较。因而本研究通过收集2004—2019年间在上海开展的城市森林群落样方调查数据, 按照一定要求进行样方资料筛选, 并采用统一的数据格式进行汇总整理, 形成了包含1 371个样方的上海城市森林样方数据集。本数据集基本涵盖了不同起源性质的植被类型, 既有分布于余山和大金山岛的残存自然植被, 也有广泛分布于各区的人工林, 后者主要来自公园绿地和生态公益林, 以及经济果林等, 可以较好地体现上海城市森林的主要植被类型和群落特征。随着数据开放意识逐渐提高以及更多相关调查研究的积累, 本数据集将不断补充完善, 并将参考国际植被样方数据库的建设和管理方式开放共享。

研究通过对其中出现的83科218属353种植物进行分析, 发现其物种组成存在单科单属植物占主导地位的“子遗化”现象, 主要原因可能是大多数木本植物都由人工种植, 在物种选择上较为单一, 该结果与郭雪艳的研究中植物以单种科和单种属为主的结果一致^[9]。

研究将研究样方归为8个植被类型, 其中, 属于落叶阔叶林的群落类型最多, 落叶针叶林最少, 且阔叶森林在样方数量上占据主要优势 (占比62.1%)。在上海城市森林中, 常绿阔叶灌丛以八角金盘灌丛 (*Fatsia japonica*) 和夹竹桃灌丛 (*Nerium oleander*) 为主; 落叶阔叶灌丛以野桐灌丛 (*Mallotus tenuifolius*)、蜡梅灌丛 (*Chimonanthus praecox*) 和紫荆灌丛 (*Cercis*

chinensis) 为主; 常绿阔叶林以樟林 (*Cinnamomum camphora*) 为主; 常绿针叶林以雪松林 (*Cedrus deodara*) 为主; 常绿落叶阔叶混交林以樟+落叶阔叶混交林为主; 落叶阔叶林以无患子林 (*Sapindus mukorossi*) 和栎树林 (*Koelreuteria paniculata*) 为主; 落叶针叶林以水杉林 (*Metasequoia glyptostroboides*) 为主; 竹林以毛竹林 (*Phyllostachys edulis*) 和孝顺竹林 (*Bambusa multiplex*) 为主。该研究结果与郭雪艳研究中人工次生林和人工林的代表性群落类型基本一致^[9], 表明上海市城市森林组成主要受人类栽植管理的影响, 其群落物种一般为绿篱与行道树常用物种 (夹竹桃、栎树、樟等)、观赏物种 (蜡梅、紫荆、雪松等) 以及经济物种等。

研究分别计算了8种群落类型的物种丰富度、Shannon-Wiener多样性指数和Simpson优势度指数, 通过非参数检验分析发现, 常绿落叶阔叶混交林的物种多样性较高, 而竹林偏低, 这与陈勇等研究中混交林各多样性指数均较高的结论基本一致^[6]。城市森林群落的物种多样性与人类栽植管理活动有密切的关系, 其物种主要来源于人工种植和周围植物群落木本植物逸生。在上海, 常绿落叶阔叶混交林一般由樟或女贞与多种落叶阔叶树种混交, 植物种类多样, 因此物种多样性较高; 竹林多由单一物种种植形成, 加之其郁闭度较高、林下更新个体极少, 因而物种多样性较低。

本研究结果可为上海植被研究提供参考, 对城市森林建设

与管理具有积极作用。但如何对城市森林进一步分类，各群落类型具有不同的物种多样性特征的原因等，还需要更多的研究以探索和讨论。▲

致谢：

感谢方和俊、张凯旋、孙文、范昕宇、许俊丽、崔易舫、王泽英，以及城市生态与植被工程实验室（UEVE）研究人员提供的上海城市森林群落的样方调查数据，并感谢论文写作过程中UEVE各成员的指导。

参考文献

- [1] JORGENSEN E. Urban Forestry in Canada[J]. *Arborists News*, 1971, 46(6): 529.
- [2] 郭雪艳. 上海城市森林多尺度生态质量评价研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [3] BODNARUK E W, KROLL C N, YANG Y, et al. Where to Plant Urban Trees? A Spatially Explicit Methodology to Explore Ecosystem Service Tradeoffs[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017(157): 457-467.
- [4] 冯伟, 于一苏, 吴中能. 城市化对城市森林植物多样性的影响研究进展[C]//第十届中国科协年会论文集(二). 北京: 中国科学技术协会学会学术部, 2008: 6.
- [5] 宋永昌, 由文辉, 王祥荣. 城市生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2000.
- [6] 陈勇, 孙冰, 廖绍波, 等. 深圳市主要植被群落类型划分及物种多样性研究[J]. *林业科学研究*, 2013, 26(05): 636-642.
- [7] ITANI M, AL ZEIN M, NASRALLA N, et al. Biodiversity Conservation in Cities: Defining Habitat Analogues for Plant Species of Conservation Interest[J]. *Plos One*, 2020, 15(6): e220355.
- [8] CRUZ-SALAZAR B, RUIZ-MONTOYA L, PÉREZ-GÓMEZ M T, et al. Diversity and Floristic Enrichment with Montane Cloud Forest Species, in an Urban Forest in Chiapas, Mexico[J]. *Madera y Bosques*, 2020, 26(3): e2632100.
- [9] 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.
- [10] 张凯旋, 车生泉, 马少初, 等. 城市化进程中上海植被的多样性、空间格局和动态响应(VI): 上海外环线带群落多样性与结构特征[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2011(04): 1-14.
- [11] 胡志斌, 何兴元, 陈玮, 等. 沈阳市城市森林结构与效益分析[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2108-2112.
- [12] 宋坤, 秦俊, 高凯, 等. 上海居住区植物多样性的均质化[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1603-1607.
- [13] 汪永英, 孟琳, 韩冬荟, 等. 城市森林物种多样性——以哈尔滨城市林业示范基地为例[J]. *东北林业大学学报*, 2017, 45(03): 34-38.
- [14] 陈克霞, 吕晨, 达良俊. 城市森林建设存在问题剖析及建议[J]. *中国城市林业*, 2004, 2(4): 48-51.
- [15] 方和俊. 上海城市绿地植物群落现状及综合评价研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.
- [16] 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(01): 8-13.
- [17] 达良俊. 基于本土生物多样性恢复的近自然城市生命地标构建理念及其在上海的实践[J]. *中国园林*, 2021, 37(5): 20-24.
- [18] 潘艺, 鲍海君, 黄玲燕, 等. 浙江沿海城市化时空格局演变及其对生境质量的影响——基于InVEST模型的研究[J]. *上海国土资源*, 2020, 41(03): 18-24.
- [19] 上海市统计局. 上海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [20] 杨永川, 达良俊. 上海乡土树种及其在城市绿化建设中的应用[J]. *浙江林学院学报*, 2005(03): 286-290.
- [21] 杨永川, 王娟, 达良俊. 城市化进程中上海植被的多样性、空间格局和动态响应(II): 城市废弃地上上海江湾机场的植物组成[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2008(04): 40-48.
- [22] 王娟, 达良俊, 李艳艳, 等. 城市化进程中上海植被的多样性、空间格局和动态响应(V): 管护放弃后城市水杉林下植被自然演替格局的研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2009(06): 12-22.
- [23] 宋坤, 郭雪艳, 王泽英, 等. 上海城市近自然森林的重建动态[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(04): 1075-1081.
- [24] 刘娜娜, 张希金, 达良俊. 间伐对人工水源涵养林碳储量及其垂直分布的影响[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(05): 29-36.
- [25] 蔡婷, 李阿瑾, 宋坤, 等. 黄浦江上游近自然混交林和人工纯林水源涵养功能评价[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(02): 36-40.
- [26] 吴国强, 余思澄, 王振健. 上海城市环城绿带规划开发理念初探[J]. *城市规划*, 2001(04): 74-75.
- [27] 陆春晖. 上海迪士尼乐园星愿公园水生植物的种植施工技术及后期养护[J]. *中国园林*, 2017, 33(07): 26-29.
- [28] 张光富, 宋永昌. 浙江天童灌丛群落的种类组成、结构及外貌特征[J]. *广西植物*, 2001(03): 201-207.
- [29] 郭柯, 方精云, 王国宏, 等. 中国植被分类系统修订方案[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(02): 111-127.
- [30] DENGLER J, JANSEN F, GLOECKLER F, et al. The Global Index of Vegetation-Plot Databases (GIVD): A New Resource for Vegetation Science[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2011, 22(4SI): 582-597.
- [31] LIANG J, CROWTHER T W, PICARD N, et al. Positive Biodiversity-productivity Relationship Predominant in Global Forests[J]. *Science*, 2016, 354: 6309.
- [32] BRUELHEIDE H, DENGLER J, JIMENEZ-ALFARO B, et al. sPlot — A New Tool for Global Vegetation Analyses[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2019, 30(2): 161-186.
- [33] 方精云, 郭柯, 王国宏, 等. 《中国植被志》的植被分类系统、植被类型划分及编排体系[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(02): 96-110.
- [34] 上海市统计局. 上海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [35] 孙文. 崇明岛主要植物群落类型、分布及其生态景观协调性评价[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.