我国城市森林研究回顾及未来研究方向和重点*

吴泽民 陶 晓

安徽农业大学林学与园林学院 合肥 230036

摘要：城市森林理念引入我国以来，其相关研究一直是国土绿化建设和管理的科学支撑，并取得了丰硕成果。目前，我国关于城市森林的研究主要集中在以下 4 方面：1）城市森林结构、景观格局分析及动态过程；2）城市森林树种选择、群落结构、配置模式及营建技术；3）应用树木覆盖分析评估城市森林现状；4）城市森林生态效益、服务功能评估等。文章对城市森林内涵、范围等问题作出辨析后认为，未来城市森林的研究方向和重点体现在以下 4 方面：1）促进城市森林健康及可持续发展研究；2）基于生态学理论的城市森林群落构建及管护研究；3）城市森林应对气候变化的研究；4）科学提高城市森林总量和质量，规范城市森林碳汇计量及监测的研究等。城市林业应强调用跨学科的技术来解决科学、政策和社会之间的差缺，进而满足城市居民的多种需求。

关键词：城市森林；研究回顾；未来方向；中国

DOI：10.12169/zgcsly.2023.12.18.0002

A Review of Urban Forest Researches and Its Future Directions in China

Wu Zemin Tao Xiao

(Forestry and Landscaping Institute, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Since the concept of urban forest was introduced into China, the research on urban forest has much achieved and provided important scientific support for land greening and its management. Currently, the research is focused on the following 4 aspects: 1) Urban forest structure, landscape pattern analysis and dynamic process; 2) Species selection, community structure, configuration modes and establishment/regeneration technique for urban forest; 3) Applying tree canopy cover analysis to evaluate the condition of urban forest; and 4) Evaluation of ecological benefits, services and functions of urban forest. This paper holds, after the review and analysis of the connotation and scope of urban forests, that future research on urban forest will be directed a the following 4 areas: 1) The research on how to improve the health and sustainable development of urban forests; 2) The research on community establishment and management of urban forest based on ecology theories; 3) The research on how urban forest mitigate and adapt to climate change; and 4) The research on scientific methods for enhancing both quantity and quality of urban forest and regulating the accounting and monitoring of urban forest sink. Urban forest research is supposed to apply multi-disciplinary technologies to fill the gaps among science, policy and society, thereby meeting the multiple requirements of urban citizens.

Keywords: urban forest; research review; future direction; China

我国城市化水平从 1995 年的 28.8%开始进入快速城市化阶段，到 2022 年达到 65.22%，接近成熟阶段，仅用了不到 30 年的时间。快速城市化对自然环境造成巨大压力的同时带来很多生态问

收稿日期：2023-12-18

*基金项目：国家自然科学基金（32271954）

第一作者：吴泽民（1944-），男，教授，博士生导师，研究方向为城市林业、景观生态。E-mail：zeminwu2@qq.com

题，特别是在城市及周边地区，而城市森林在一定程度上能缓解这些影响[1]。值得注意的是，我国的城市森林研究与建设基本上与城市化快速发展同步。

20 世纪 80 年代，我国林学界开始关注城市森林和城市林业。经过 30 多年的发展，城市林业在理论和实践上都有了非常丰富的积累。2016 年，习近平总书记提出“要着力开展森林城市建设，搞好城市内绿化，使城市适宜绿化的地方都绿起来。搞好城市周边绿化，充分利用不适宜耕作的土地开展绿化造林；搞好城市群绿化，扩大城市之间的生态空间”[2]，将城市森林建设推向新的高潮，更加注重城市可持续发展和提升居民福祉。

尽管我国城市森林和城市林业研究的历史较短，但在研究水平、研究成果、研究深度等方面都已赶上世界水平。国际上认为，中国在城市林业创新和城市中树木应用的国际发展贡献了重要的理念[3]，并成为国际上城市森林和城市林业研究最为重要的成员之一。

回顾我国城市森林和城市林业研究历程，自有许多值得总结的经验；面对未来城市环境及社会发展，也必然有许多需要认真思考和应对的问题。本文就此对以往研究热点及相关理论作简单分析，对未来的研究方向和重点提出一些建议。

1　我国城市森林研究回顾

20 世纪 70 年代，中国林业科学研究院王义文率先将源自北美的《Urban Forestry》译成“城市森林”，从此，城市森林进入中国林业的学术词汇中。1982 年，程世抚先生的《园林科学发展趋向的初步探讨》一文是最早出现“城市森林”一词的论文[4]，当时表述为“源于上世纪六十年代欧洲兴起‘回到自然去’的运动，英国于城市中开辟自然式绿地，名之为城市森林（urban woodland）”，但这显然不同于来自北美的术语。80 年代中期，国内相继出现谈及城市森林（林业）的文章，如时任杭州市副市长的园林学家余森文，多次提到“城市森林”的概念且作了必要的诠释，认为城市森林绿化反映了当前城市绿化的一个趋势[5]。之后 10 年中约有数十篇文章介绍国外的城市林业概况，其中发表于《世界林业研究》的《美国城市林业》一文是最早系统论述城市林业的文章[6]。然而在整个 90 年代，关于城市森林和城市林业的发文量并不多，且主要是讨论、探索其理论，仅有少数城市开始实践。而最初以城市森林为题开展实际研究的有李树人等[7]和粟娟等[8]，并建立了城市森林信息管理系统。1999 年，林业部在《中国 21 世纪议程—林业行动计划》中，明确提出了我国发展城市林业的依据、目标和行动，这标志城市林业进入了国家层面，从而推动了相关研究。

本文分别用城市森林和城市林业作为关键词在知网检索国内发表的论文，从时间序列分析，两者的发文量在 2001 年开始有明显增长，2004 年开始创建森林城市活动促进了城市森林研究迅速发展，并分别在 2009 年和 2010 年发文量达最高，之后却有明显的下降（图 1）。而同时期，有较多文章使用城市绿地、城市绿色基础设施为关

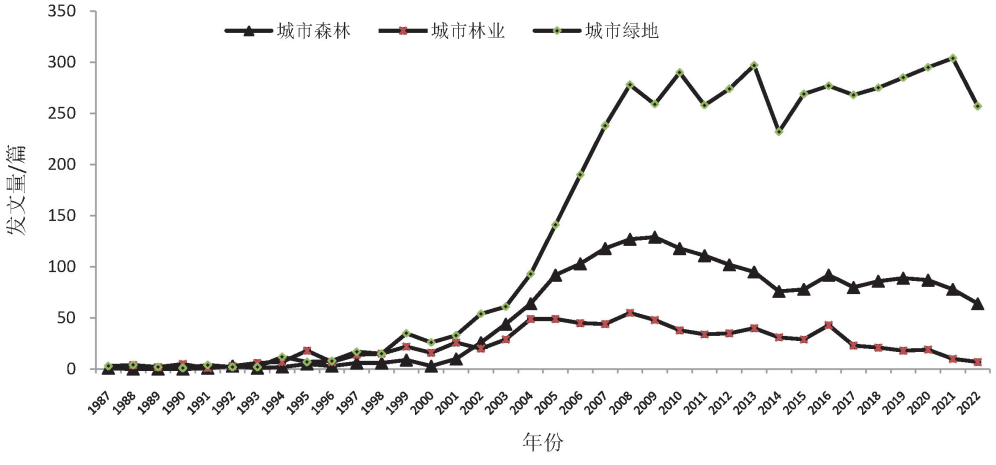


图 1　关于城市森林、城市林业及城市绿地研究的国内发文量

键词，使得以城市绿地为关键词的发文量持续处于高位（图 1）。这有可能是城市森林研究缺乏更有特色的主题，或缺少创新的方法和内容，或认为城市森林是绿色基础设施的重要组成，习惯性地使用了城市绿地，也可能有更深层次的原因，值得研究。

通过对相关论文主题的分析，30 余年来国内城市森林研究除了对定义、内涵等的辨析外，主要研究内容集中在以下 4 个方面。

1.1 城市森林结构、景观格局分析及动态过程

城市森林的结构与格局决定了其外貌、总体绿量与分布状态，从而影响其生态服务功能，同时也是制定营建、更新、管护计划的重要依据，是城市森林重要的研究内容之一，前者属森林生态内容、后者为景观生态范畴。

早期一般引用美国 20 世纪 80—90 年代的传统方法研究城市森林结构，按照 Rowantree 的城市森林生态研究模式，通过样方调查获得具体数据，如合肥市、昆明市、济南市等；在更大地域范围则采用遥感技术和实地调查相结合方法，如沈阳市市区（230 km^2）、北京市六环内（923 km^2）等[9-10]。然而，至今发表的明确标明为城市森林结构研究的许多论文，实际上仅是对部分组成作了分析，如行道树、主要群落类型、郊区林分、各种用地类型的树木等。

2003 年，基于景观生态学的城市森林空间格局分析最初见于合肥市[11]，后来由于 3S 技术的发展而成为研究热点之一，从单一的格局扩展到动态变化，并与热岛效应、生态效益评测相结合为城市森林规划提供服务。2006 年，在安徽沿江三城市开始开展不同城市森林景观格局之间的比较[12]，至今少见有同类研究。这是因为不同作者对城市森林斑块有不同的理解，标准不一导致无法进行不同城市之间的比较，更难以从区域尺度上作客观评价。

另外，从城市森林景观格局在城乡环境梯度上的差异来分析自然干扰、人类活动方式与强度之间的相互关系的研究已拓展到城市群范围[13]，如基于“空间形态-破碎化-聚集度”的粤港澳大湾区森林景观格局时空演变以及珠三角城市群等。然而，尽管是基于斑块-廊道-基质的景观生态模式，至今多数研究主要涉及斑块层面，对于廊道连通性的研究则依然很少。虽然关于城市重要生态廊道的“绿道”研究论文很多，却很少涉及绿道的景观生态网络连通性这一重要的景观生态属性的量化研究。

1.2 城市森林树种选择、群落结构、配置模式和营建技术

树种选择、组成及规划是城市森林营建的永远主题，主要提出选择的原则，如考虑生态功能兼顾景观效果、适应城市特殊立地环境、提倡乡土树种为主；针对一个地方或某个特定环境的树种规划，提出可供选择的树种名录，以及考虑应对气候变化的树种选择问题等[14-15]。在构建城市绿化植物群落时一般提出乔灌草种植模式，但这个概念比较笼统，容易形成形式上的多层次种植配置。

20 世纪 90 年代，中欧国家已经普遍采用的“接近自然的林业”“近自然森林”理论进入我国林学界，不久出现在城市森林研究实践中。按照近自然原则考虑种间生态关系和竞争、群落结构动态变化与树木生长之间的关系、减少树木养护及群落调控措施的使用、以维持相对稳定的群落结构等。并根据一定生境上潜在植被的特征，培育成最接近处于不同演替阶段具有明显地带性森林组成和外貌的健康、稳定的林分。典型的如上海浦东新区采用宫胁造林法开展近自然森林的营建实践等[16]。近年来提出基于自然演替的植被恢复，以及城市森林野境和再野化等的研究[17]，是在“近自然”经营理念上的发展，这个概念似在逐渐被接受。

同时，城市森林生物多样性研究已成为一个热点，不同城市尺度的研究主要集中在物种丰富度，如北京的木本植物多样性及空间分布，上海、广州、深圳等地的群落结构及类型与生物多样性的关系等。闫蓬勃[18-19]基于 257 个主要城市的树种多样性评估是一项较为系统的研究，结果表明我国城市森林树种多达 2 640 种，乔木有 1 718 种，平均每个城市 92 种，西安最多达到 627 种，且与全球城市树种多样性水平相比差别不大。现在已有不少研究关注城市鸟类、昆虫、土壤微生物甚至是小型哺乳动物[20-22]。同时，在调查方法

上做了新的尝试，如采用遥感方法反演城市乔木的生物多样性指数等[23]。

1.3　应用树木覆盖分析评估城市森林现状

我国一般应用森林覆盖率、林木覆盖率或绿化覆盖率来评价一个城市的绿化水平。在北美，城市森林管理最有用的基础测度指标是树冠覆盖率（UTCC）的总量与空间分布。这项研究主要用于一些大城市的植树计划，评估城市树木覆盖现状及发展潜力，并依据地理、气候条件及土地利用情况，为不同的城市提出树冠覆盖率目标的指导。

21 世纪初，我国学者引进城市树木覆盖率概念，最早研究见于广州市、合肥市、上海浦东新区、厦门市等。在 2012 年发布的《国家森林城市评价指标》（行业标准）中就采用了行道树树冠覆盖率，之后在 2019 年颁布的国家标准中把城区树冠覆盖率作为评价指标，因此在森林城市规划中一般都作了相关分析，然而缺少深入的研究，至今相关研究论文不多。其中，北京是系统研究的代表，用遥感影像与高分辨率航片结合的计算机技术，测定现有树冠覆盖总量、空间分布格局以及时空动态分析，并作不同用地类型的比较，既清楚给出了未来城市森林发展的数量潜力，又预测了树冠覆盖率潜力的空间分布，极大地增强了相关决策的科学性[24]。

1.4　城市森林生态效益、服务功能

城市森林的生态效益研究主要包括改善城市气候及水文环境、缓解热岛效应、净化大气、助力“双碳目标”等。评估方法可归纳为单株树木经济价值评估法、城市森林生态服务综合价值评估法、空间景观模型评估法[25]。

我国对城市绿地环境效益的测定最早见于 1974 年李嘉乐的研究，1985 年他又采用航片估算北京各类绿地改善环境的作用。然而，在市区尺度明确表述为城市森林生态效益的研究始于 21 世纪初，国内学者开始与国外合作研究城市森林减少大气污染的作用，如应用 Nowak 等开发的 UFORE（Urban Forest Effects Model）模型研究合肥主城区（20 km^2）及北京 4 环内（301 km^2）城市森林减少大气污染、储碳、降低能源消耗等[26-27]。但应用 UFORE 模型需将具体数据传送给 Nowak 实验室才能运行，故在国内仅见于少数研究，并没有得到推广。后来，殷杉研究团队[28]用其核心方法估算上海城市森林削减大气 $PM_{2.5}$ 量，并作了不同林分的比较，是一项很有意义的研究。

2003 年，景观模型评估法的 City green 模型引入国内，因其基于 GIS 技术使用较为方便而被多个研究者应用，如在上海、南京，北京 及厦门等城市广泛应用[29-30]。

2006 年，Nowak 等重新构筑了城市森林效益计算体系（以 i-Tree toolset 发表），包括城市森林效益评估（UFORE）和行道树管理分析（STRATUM）两个模块，适合不同区域城市森林生态效益的研究。虽然该系统树种数据库包括的树种有限，但因自带“确定树种”功能，通过输入树种特征在数据库中自动匹配出一个和数据库树种相似的树种，能适应不同地区的使用要求，受到国内研究者的推崇和应用。如陶晓等[31]首次应用此工具估算出合肥城区（100 km^2）主干道行道树创造的生态总效益为 5145.8 万元/年，并首次对行道树的美学价值作出量化估算，如估算合肥行道树单株平均美学价值为 79.3 元。马宁等[32]]详细介绍该工具的应用，之后有郑州、青岛、杭州等多个城市采用，研究内容逐步由行道树拓宽至城市广场、滨水、校园等不同地类。i-Tree toolset 模型还包括了对挥发性有机混合物（VOC）的估算，这是树木对大气环境的影响，在国内研究中还较少涉及[33]。

城市森林调控空气悬浮颗粒物的研究尤其是对 $PM_{2.5}$ 削减作用一直是研究热点，一般采用实地检测的方法分析城市森林的滞尘机理及作用，包括树种、树冠层、叶面积以及群落结构与滞尘能力的关系、时空变化等[34-35]。上海的一项研究应用 UFORE 在城市尺度上对不同城市森林削减 $PM_{2.5}$ 量进行估算是很好的尝试，结果表明，由于常绿针叶林的 $PM_{2.5}$ 沉降速率高，在平均风速下尽管其叶面积较少但削减 $PM_{2.5}$ 的量却要高于叶面积多的阔叶林[28]。然而，这项研究所应用的基础数据基本引自国外文献，如能对国内主要树种的沉降能力开展研究并获得基础数据，类似的估算自然会更加接近实际。

城市森林（或常用植被、绿色基础设施）的热环境研究是又一个热点，一般涉及城市热岛（冷岛）时空分布格局、变化，以及与城市化进程的关系；应用遥感影像资料提取植被覆被及地表温度多维度、空间分异性等特征，反演地表温度与植被指数、叶面积指数以及植被类型的关系；林木斑块的斑块特征、空间配置、景观格局、群落结构及树冠覆盖对斑块降温效应的影响[36-38]，以及城市森林（绿地）斑块的热场效应对周边温度场的影响等。如在北京，面积>1 000 m^2的林木斑块可在一定程度上缓解城市热岛效应；合肥大蜀山森林公园（345 hm^2）的热场影响距离范围在1 575~1 830 m，面积达到18.2 km^2，合肥逍遥津公园（35.8 hm^2）的热场影响距离达到124~336 m，面积为1 km^2[39]，但这方面的研究至今还不多。

2 城市森林内涵、范围及尺度的再思考

随着城市化及城市人口的持续增加，城市森林的重要性也在增加，它可能是21世纪最重要的森林影响以及有影响力的森林之一。联合国粮农组织把城市森林定义为城市及周边的森林（urban and Peri-urban），Garey Moll在总结城市森林的不同解释后把城市森林划分成4个带区，即郊区边缘、郊区、市区居住区和市中心商业区。因为不同国家的城市地理环境、城市发展历程、历史文化传承、森林经营活动的差异，导致对城市森林内涵、经营范围的理解各有不同。

我国对于城市森林的概念、范围也一直在探讨辨析之中，目前多数学者倾向于城市森林是城市及周围与人类及建筑等有更为密切的关系的所有树木和森林，它占全部林地的一部分。一般认为其范围应是以城市建成区为中心，向城市周围辐射，对城市生态环境和市民的日常生活有直接影响的地域。今天，具体研究常常针对市区、建成区或城市周边的一些特定类型[40-43]。

然而，由于城市森林所谓的影响及“周边”这个空间范围，在实际界定中比较模糊又难以测定，认为“城市森林这种比较模糊的学术空间范围必须与边界清晰的行政管理范围结合起来。中国每个城市行政管理的市域范围与城市森林生态系统整体性的空间范围比较吻合”[44]，同时“在行政区范围开展城市森林建设，相较于严格意义上的城市森林概念来说范围偏大，但从应对城市发展的负面影响和满足生态环境需求来说是合适的”[43]。从而提出“全域森林城市建设把城市森林生态系统的科学研究范围、规划建设范围与行政管理范围统一起来”[44]。

我国森林城市建设实践取得了丰硕成果，在客观上具备了进一步提升森林城市水平的条件，现在提出建设全域森林城市这个目标十分恰当。至于全域森林城市要把城市森林的建设范围与行政管理范围统一起来，则是对城市森林空间范围的再诠释，有必要进一步商榷。确实，国际上有一种观点认为，现在是全球城市化时代，城市的影响无处不在，因此再讨论哪里不是城市森林已无意义。但这并不等于城市森林可代替传统的一般意义上的森林。

在国家尺度上，从任何一个角度，城市森林只能是森林的一个组成部分，城市林业也只能是林业的一个分支。但在城市尺度上，则可因城而异：在高度城市化地区，其市域范围的森林因其以环境服务作用为优先考虑，也许都可划为城市森林；而在其他地区，全域的森林应是“城市森林+传统的森林（乡村森林、集约经营的森林、国家公园的森林、荒野的森林等）的连续体。森林城市应是建设以森林（包括城市森林）为主体构成的“林、田、湖、草、沙的一个完整生态系统”[44]。

现在，有的城市在森林城市总体规划空间布局中，把主城区及周围的一定范围划为核心区、其他城镇作为点，以建设城市森林为主，这显然是合理的。至于统计上的问题，现在遥感技术很发达，按距离、按类型都可方便获得具体数据。如此，各个城市可根据自身的情况，如地理特点、城市规模、城市化进程和水平、居民活动、森林分布现状等因素具体划定城市森林范围，制定城市林业计划进行科学管理，不必纠结于城市森林学术概念的空间范围与我国城市行政管理范围的问题。

3 未来研究方向和重点

3.1 促进城市森林健康及可持续发展的研究

城市森林更易受城市污染、热岛效应、经营

方式以及人为活动影响，导致城市树木的死亡率一般较高、整体健康水平下降、树木更替周期短，尤其是行道树、道路绿化、居住区及广场等地的树木，这不仅影响城市森林效益的发挥，还大大增加管护费用。因此，森林健康的概念及评价技术引入到城市森林经营中来。然而，至今在我国相关的研究很少，如评价指标体系较为注重对宏观性指标的描述，缺乏长期的监测基础[45]；多数研究针对具体类型而缺少在城市尺度、国家尺度上的评价。今后的研究必须采用更加跨学科的研究方法，建立城市森林大数据，发展关于促进生态系统健康及可持续发展的城市森林资源经营管理的知识及创新。

1）伴随城市发展，对城市森林结构、功能及城市森林健康水平应实施动态评测，应分别从个体、群落（林分）及城市尺度进行。现在，已初步在全国范围内建立城市生态系统定位观测站系统，应将动态监测作为一项主要内容，在此基础上有必要组织开展全国性的评测。

2）影响城市森林健康的主要因素包括自然因素、人为活动与经营管理等，不同城市都有其特殊性。针对这方面的研究虽然一直备受关注，但一般是在树木个体或群落尺度，对城市尺度的理论和方法研究还需进一步探究。

3）研究更适合我国实际情况的评估方法，开发更适合我国立地条件的评估模型，更重要的是如何选用合适的调查方法。

4）实现可持续发展的城市森林的综合管理。需了解经营管理活动及策略对城市森林直接和间接的影响；需了解与城市森林资源相关人群的需求、兴趣和活动多样性、动态特征及其对城市环境的重要影响；加强城市森林建设决策层、经营者及利用者之间的有效交流，争取居民对城市森林持续发展计划及经营管理的支持。

3.2　基于生态学理论的城市森林群落构建及管护的理论与技术

只有在生态学理论指导下才能实现城市森林的科学构建和管护，以达到我们企求的健康、稳定、多样性的目的。从理论上说过度的人为干扰是不符合生态学基本原理的，但在人居环境中又不可能（至少不能完全）不予人为干预。提出近自然的经营原则就是要在人为干扰和自然过程之间达到一种平衡。

1）影响城市森林（城市尺度）结构稳定的主要原因是城市环境及人为因素，应从系统平衡、景观功能、生态效应以及宏观决策、人为影响等诸多方面考虑城市森林的结构稳定性。

2）城市森林分布格局如何影响城市森林利用、功能及效益，以及在不同尺度上估计城市森林结构变化导致的功能变化，这需要城市树木及城市森林生长的具体资料。

3）城市森林是基于自然的解决方案（Nature-Based Solution，NBS）的重要组分，这是一个新课题，需跨学科的技术来解决科学、政策和社会之间的差缺。

4）相对稳定的城市森林群落的生态基础。如植物群落种类组成与生态关联性、组成种生态位与生境、种间关系，以及群落的水平与垂直结构与当地自然森林群落的相似性。

5）近自然经营，城市森林野境、城市森林再野化等理论与实践应用。真正意义上的自然经营必然会导致城市野生动物区系增加，它们是城市生物多样性的重要一环、是城市环境质量的重要指示之一，过去关注很少甚至一度认为城市不应有野生动物，现在虽然已有相关研究，但深度与广度还远不够。更重要的是要建立对话机制，改变落后的观点，提出符合服务人群的要求，让城市居民理解、支持，让管理者接受、重视，让设计师能真正将理论赋予实践。

6）需要更广泛的研究项目，包括病虫害评估与控制、种植立地评价、树木损害和安全评价等。科学的树木种植和管护技术是必须的，但却常常认为这方面的研究缺乏理论深度而被忽略，这个观点必须转变。

3.3　城市森林应对气候变化和对“双碳”目标贡献的研究

人口增长和气候变化是未来世界的主要威胁，城市森林的作用也许不单单是碳的封存或生态赤字的补偿，它应该将创造一个更加适宜的居住区。

1）基于气候变化的城市森林功能。应将气候变暖的科学预测和城市森林研究相结合，目前依然缺乏气候变化对城市树木影响以及树木响应的

研究。

2）应对气候变化的树种选择。应建立经济、社会、环境 3 方面协调的选择模式；在树种选择时应考虑气候变化因素，有必要基于树种功能提出更有前瞻性的树种选择名录，种植适应气候变化的城市森林。

3）未来树木和城市森林如何改善居住地环境。进一步理解城市树木及城市森林如何提高空气及水质量以及提高其他环境服务功能；更加关注城市森林缓解热压力的机制与提高热舒适度潜力的重要意义，尤其是针对高密度居住区的城市森林种植计划。目前多数研究针对城市森林（绿地）斑块内部的降温效应，但更重要的应是其热场所能影响（辐射）的范围，以及与面积、树木群体、生物量等的关系。

4）研究城市森林（尤其是城区范围）对碳循环的作用和影响，以及对实现碳中和、碳达峰目标的贡献。这需要更为准确的计量和监测城市森林碳收支状态，包括树种、群落结构、分布格局、经营管护措施与碳汇的关系，从而提出更科学、更具效率的增汇措施。

5）研究城市主要树种的生理生态特点，积累基础资料。目前在估算城市森林功能时，缺少主要树种的生长模型以及对固碳、截流雨水、削减大气污染等功能的具体数据支撑，往往只能参考国外文献。因此，研究城市主要树种的生理生态特点，积累基础资料更为重要。

3.4 科学提高城市森林总量和质量研究

21 世纪以来，我国城市绿化水平提高很多，尤其是在森林城市建设推动林木覆盖率稳步提高方面更是成果卓著，未来依然会有城市发展和更新为植树提供机会，而在增加总量的基础上提高质量同样重要。

1）在全国范围科学客观评价城市森林资源，估算城市森林的贡献率。这需要按不同城市具体划定城市森林范围，最终完成全国范围的城市森林资源清查。

2）改善城市、社区树冠覆盖的政策与规划。无论是制定城市林业政策、经营管理计划还是开展城市森林功能、效益的评测，城市树冠覆盖率都是重要的指标，这项研究值得继续推进。

3）研究城市中各种低效低质城市森林植被恢复和维护技术，预测在不同的管理条件下城市植物群落的生长发育。

4）合理的树种种群结构。据研究，我国城市应用的树种并不少，但总有城市绿化树木雷同的感觉，问题不是树种少了，而是常常种植少数几个树种而导致种群结构不合理。美国采用多样性公式《Diversification formula》来决定树种的比例，属于同一个属的树木不宜超过 10%，属于同一个种的树木不宜超过 5%，这不仅适用于整个城市也适用于各类用地类型。这个公式表达的理念可以借鉴，但需研究国内城市的具体情况，提出合适的多样性公式。

5）城市森林林木种质资源保护与培育，科学评价乡土树种与外来树种的作用，更好地理解和应用乡土树种。目前，城市环境中（市区）外来树种的比例较高是一个普遍现象，而且还有增加趋势。我国有丰富的珍稀树种资源，如何进一步开发培育城市森林树种还需要深入研究，应通过科学育苗形成商品苗木规模并走向市场。

综上所述，我国在城市化快速发展的进程中，城市森林建设取得了长足发展，从而推动了城市森林研究，其成果也为世界城市森林研究作出了重要贡献。由于我国城市发展模式、城市环境、植被资源、土地利用格局以及城市管理体制的特殊性，这又为城市森林研究提出了许多新内容、新课题。然而，未来城市化进程必将继续推动城市森林建设，更需要我们进一步考虑城市森林的理论与实践，拓展、创新并开展深入的研究，本文提出的一些思考仅供学界参考。

参考文献

[1] NOWAK D J, GREENFIELD E J. US urban forest statistics, values, and projections[J]. Journal of Forestry, 2018, 116(2): 164-177.

[2] 习近平. 论坚持人与自然和谐共生[M]. 北京：中央文献出版社, 2022.

[3] MCBRIDE J R. China's contribution to urban forestry[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2023, 84: 127929.

[4] 程世抚. 园林科学发展趋向的初步探讨[J]. 建筑学报, 1982(12): 18-22.

[5] 余森文. 城市绿地与居民生存环境[J]. 中国园林, 1986, 2(3): 1-3.

[6]吴泽民.美国的城市林业[J].世界林业研究,1989,2(3):85-88,68.
[7]李树人,赵勇,李相宽,等.城市森林对热污染及人体舒适度影响的研究[J].河南农业大学学报,1995,29(1):11-19.
[8]粟娟,孙冰,钟丰,等.广州城市森林的格局[J].广东园林,1996,18(2):2-5.
[9]吴泽民,黄成林,白林波,等.合肥城市森林结构分析研究[J].林业科学,2002,38(4):7-13.
[10]马杰,贾宝全,张文,等.北京市六环内城市森林结构总体特征[J].生态学杂志,2019,38(8):2318-2325.
[11]吴泽民,吴文友,高健,等.合肥市区森林景观格局分析[J].应用生态学报,2003,14(12):2117-2122.
[12]王原.安徽沿江三城市城市森林景观格局分析与综合评价[D].合肥:安徽农业大学,2006.
[13]王近秋.上海浦东新区城市森林景观格局研究[D].合肥:安徽农业大学,2011.
[14]吴泽民,王嘉楠.应对气候变化:城市森林树种选择思考[J].中国城市林业,2017,15(3):1-5.
[15]郄光发,王成,彭镇华.我国城市森林建设树种选择现状与策略[J].世界林业研究,2012,25(4):63-66.
[16]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(4):1075-1081.
[17]张庆费.城市生态空间再野化及其实施途径探讨[J].中国城市林业,2022,20(6):10-14,40.
[18]闫蓬勃.中国城市树种多样性评价及树种规划研究[D].北京:北京林业大学,2019.
[19]YAN P B,YANG J.Species diversity of urban forests in China[J].Urban Forestry & Urban Greening,2017,28:160-166.
[20]韩丹,韩丛海,王成,等.北京不同城市区域蝴蝶多样性及优势种生态位差异[J].中国城市林业,2023,21(5):74-81.
[21]张恒,赵德先,吕志坤,等.合肥城市森林结构与秋季鸟类栖息的关系[J].浙江农林大学学报,2022,39(3):571-581.
[22]ZENG H C,WANG J N,GUAN M Z,et al.Effects of vegetation structure and environmental characteristics on pollinator diversity in urban green spaces[J].Urban Forestry & Urban Greening,2023,84:127928.
[23]靖传宝,周伟奇,钱雨果.城市乔木树种多样性遥感反演方法研究[J].生态学报,2019,39(22):8383-8391.
[24]李晓婷.北京六环内林木树冠覆盖时空动态及影响因素分析[D].北京:中国林业科学研究院,2021.
[25]赵煜,赵千钧,崔胜辉,等.城市森林生态服务价值评估研究进展[J].生态学报 2009,29(12):6723-6732.
[26]吴泽民,MCBRIDE J,NOWAK D J,等.合肥城市森林减少大气污染的效果[J].中国城市林业,2003,1(1):39-43.
[27]YANG J,MCBRIDE J,ZHOU J X,et al.The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction[J].Urban Forestry & Urban Greening,2005,3(2):65-78.
[28]曹宏亮,殷杉,章旭毅,等.基于 UFORE 模型的上海城市森林对大气 $PM_{2.5}$ 的削减量估算[J].上海交通大学学报(农业科学版),2016,34(5):76-83.
[29]彭立华,陈爽,刘云霞,等.Citygreen 模型在南京城市绿地固碳与削减径流效益评估中的应用[J].应用生态学报,2007,18(6):1293-1298.
[30]王耀萱,兰思仁,洪志猛.基于 CITYgreen 模型的厦门城市森林生态效益研究[J].河南科技学院学报(自然科学版),2014,42(2):20-23.
[31]陶晓,吴泽民,郝焰平.合肥市行道树生态效益研究[J].中国农学通报,2009,25(3):75-82.
[32]马宁,何兴元,石险峰,等.基于 i-Tree 模型的城市森林经济效益评估[J].生态学杂志,2011,30(4):810-817.
[33]吴泽民.城市景观中的树木与森林:结构、格局与生态功能[M].北京:中国林业出版社,2011.
[34]张维康,王兵,牛香.北京市常见树种叶片吸滞颗粒物能力时间动态研究[J].环境科学学报,2016,36(10):3840-3847.
[35]包红光,王成,杜万光.城市林木滞尘效应研究进展[J].生态与农村环境学报,2021,37(12):1514-1523.
[36]韩晶,邓喀中,范洪冬.基于归一化植被指数的城市热岛效应分析[J].测绘与空间地理信息,2012,35(9):18-20,25.
[37]唐泽,任志彬,郑海峰,等.城市森林群落结构特征的降温效应[J].应用生态学报,2017,28(9):2823-2830.
[38]李晓婷,李彤,仇宽彪,等.城市森林林木斑块特征与降温效应的关系:以北京市城区为例[J].林业科学,2021,57(4):32-42.
[39]伍卉.基于 GIS 技术的合肥市城市绿地缓解热岛效应作用研究[D].合肥:安徽农业大学,2010.
[40]宋永昌.城市森林研究中的几个问题[J].中国城市林业,2004,2(1):4-9.
[41]吴泽民,王嘉楠.城市林业的机遇与挑战[J].中国城市林业2016,14(2):7-9.
[42]王成,蔡春菊,陶康华.城市森林概念、范围及其研究[J].世界林业研究,2004,17(2):23-27.
[43]王成.中国城市森林建设范围与研究尺度[J].中国城市林业,2021,19(4):1-5.
[44]王成.全域森林城市建设的基本内涵、必要性、可行性和实施路径[J].中国城市林业,2023,21(5):1-8.
[45]张志永,叶兵,杨军.城市森林健康与监测评价研究进展[J].世界林业研究,2013,26(5):53-58.