



· 生态学研究 ·

城市绿地生态服务 功能提升的关键技术研究

任 引 左舒翟 李 峥 著



科学出版社

城市绿地生态服务功能 提升的关键技术研究

任 引 左舒翟 李 峥 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

城市绿地作为连接人类和自然生态系统的纽带,其生态服务功能在城市系统中具有重要地位。本书以厦门市城市绿地为研究对象,运用传统生态学、景观生态学和环境经济管理学的分析方法,针对城市森林和行道树所承载的主要生态服务功能及价值进行分析研究,分析了影响城市森林固碳功能的因素、冷岛效应和景观连通性的变化格局及影响因子,探讨比较了城市行道树净化空气效益,并最终计算了城市绿地生态服务价值变化及其与经济因子之间的相关关系。

本书可供生态学专业学生、城市森林生态学研究者和爱好者、城市森林管理者参考。

审图号: 闽 S (2018) 95 号

图书在版编目 (CIP) 数据

城市绿地生态服务功能提升的关键技术研究/任引, 左舒翟, 李峥著.
—北京: 科学出版社, 2019.1

ISBN 978-7-03-059944-5

I. ①城… II. ①任… ②左… ③李… III. ①城市绿地—生态系统—服务功能—研究 IV. ①S731.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 268200 号

责任编辑: 李 迪 田明霞 / 责任校对: 郑金红

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 刘新新

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019 年 1 月第一次印刷 印张: 7

字数: 140 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

城市绿地即城市范围内的各种绿地，通常包括狭义上与广义上的定义。狭义上的城市绿地是指城市中所有的园林植物种植地块和园林种植占大部分的用地，广义上包括园林绿地和农林生产绿地。由于狭义的绿地所起到的生态服务功能有限，因此，本书主要采用广义上的概念。截至 2015 年，我国森林覆盖率为 21.6%，远低于世界（31%）平均水平，但我国的城镇化率却为 56.1%，已达到世界平均水平，资源和人口发展的不平衡成为我国城镇化未来发展的主要问题之一。面对城市生态系统人口高度密集、土地资源日趋紧张的发展态势，为了发展经济和改善人类福利，城市用地正在从透水地面（如林地）向不透水地面（如建设用地）转换，使城市绿地面积不断下降，空气污染、热岛效应问题出现，对居民生活健康和能源消耗造成了负面影响和经济负担。城市绿地作为生物圈中衔接自然和人工生态系统的生物体，不仅扮演着碳平衡及潜在的碳储存者的角色，而且是城市景观的其他自然要素和可持续发展的生态基础。它通过植物叶片的光合作用固定大气中的 CO_2 合成有机质，成为碳汇，也通过影响大气、水、热循环，阻挡太阳辐射和蒸散热量来调节城市气候，降低其周围环境温度，同时还有净化空气、提供栖息地等功能。城市绿地生态服务功能的研究综合城市科学和森林生态科学、面向城市区域，其核心是生态系统管理，强调人类活动与自然景观之间的相互作用反馈关系。

本书主要选择代表城市绿地生态服务功能的三个主要方面（固碳、滞尘和降温功能）进行研究，并结合景观生态学所关注的斑块之间连通性的格局变化分析，应用空间统计学分析方法，揭示城市绿地生态服务功能的影响因子及其之间的交互作用。最后，计算城市绿地固碳制氧、吸收 SO_2 和滞尘、涵养水源等共 9 种生态系统服务价值及其变化趋势。在我国农林用地总数不断下降的趋势下，单纯依靠扩大城市绿地面积来提升其生态服务功能实际并不可行，在城市土地资源稀缺的情况下，为了调整绿地斑块布局 and 结构以改善城市整体环境功能水平，需要探明绿地生态服务功能的变化机制。本书的结果为城市绿地生态系统管理者提供思路和方法，为生态学家进行更加深入系统的研究提供思路，帮助城市规划者聚焦提升城市绿地生态系统服务功能的主要矛盾因子，开展更加合理的管理规划。

本书获得了国家“十三五”重点研发计划项目“长三角城市群生态安全保障关

键技术与集成示范”(2016YFC0502704), 国家自然科学基金项目(31670645、31470578、41771462、31200363)的资助, 以及国家社会科学基金重大项目(17ZDA058), 福建省科技计划项目(2016T3032、2016T3037、2016Y0083、2018T3018、2015Y0083)的支持。

著者

2018年4月

目 录

第 1 章 城市森林固碳功能研究	1
1.1 概述	1
1.2 城市森林植被碳储量沿城市化梯度的时空变化特征研究	2
1.2.1 研究方法	5
1.2.2 案例研究	6
1.2.3 讨论	9
1.3 城市扩张对周边森林碳储量的影响	10
1.3.1 研究方法	11
1.3.2 案例结果分析	13
1.3.3 讨论	15
1.4 景观异质性与城市森林碳储量的相互影响	16
1.4.1 研究方法	18
1.4.2 案例结果分析	21
1.4.3 讨论	26
1.4.4 结论	29
参考文献	29
第 2 章 城市行道树净化空气效益比较研究	35
2.1 概述	35
2.2 行道树桩果和高山榕叶面尘理化特性研究	36
2.2.1 研究方法	36
2.2.2 案例结果分析与讨论	38
2.3 大气 TSP 污染对行道树桩果光合生理的胁迫作用	42
2.3.1 研究方法	42
2.3.2 案例结果分析	43
2.4 不同生境下绿化树种光合作用的日变化特性分析	45
2.4.1 研究方法	45

2.4.2 案例结果分析	46
参考文献	49
第3章 城市森林冷岛效应影响因子研究	53
3.1 概述	53
3.2 城市森林地表温度热点和冷点区域空间格局	54
3.2.1 研究方法	54
3.2.2 案例结果分析	60
3.3 影响城市地表温度的主导因子及其交互作用	65
3.3.1 研究方法	65
3.3.2 案例结果分析	67
3.4 讨论	71
3.4.1 联合研究	71
3.4.2 融合全局指数 Moran's I 和局域指数 Getis-Ord G_i^* 的空间统计 分析	71
3.4.3 城市森林地表温度的影响机制	72
3.4.4 建议与展望	74
3.5 结论	74
参考文献	75
第4章 城市森林景观连通性研究	79
4.1 概述	79
4.2 城市森林景观破碎化分析	80
4.2.1 研究方法	81
4.2.2 案例结果分析	82
4.2.3 讨论	82
4.3 人类活动与城市森林景观连接度的交互作用	83
4.3.1 研究方法	83
4.3.2 案例结果分析	85
4.3.3 讨论	91
4.3.4 结论	95
参考文献	95
第5章 城市森林生态系统服务价值变化研究	98
5.1 概述	98

5.2 研究方法.....	98
5.2.1 数据来源.....	98
5.2.2 城市森林生态服务价值计算方法.....	99
5.3 案例结果分析.....	100
5.3.1 厦门市城市森林生态系统服务价值动态变化.....	100
5.3.2 生态服务价值与 GDP 动态变化.....	102
5.3.3 讨论.....	103
参考文献.....	104

第 1 章 城市森林固碳功能研究

1.1 概 述

近两个多世纪以来,人类活动已经强烈、深刻地影响到了地球生态系统,人类自身的社会和经济行为正在干扰或改变着各种自然过程,最典型、最具代表性、最突出的例子就是大气中 CO_2 等温室气体浓度的持续增加而导致全球气候变化的问题,正威胁着全球生态、环境和人类自身的生存与发展。近年来,以气候变暖为标志的全球气候变化不仅是举世瞩目的重大科学问题,而且已成为国际社会普遍关注的政治、经济问题,它给当前人类社会所带来的深远影响是空前的。

森林是陆地生态系统的主体,它不仅在维护区域生态环境上起着重要作用,而且是大气 CO_2 的重要调节者之一。森林通过植物叶片的光合作用固定大气中的 CO_2 合成有机质,成为大气 CO_2 的库。然而森林的一些其他活动也释放 CO_2 ,例如,植物的呼吸作用,土壤动物和微生物分解归还土壤的枯枝落叶,土壤的碳酸盐由于植物根系分泌的有机酸分解。而且森林采伐后被人类利用的木材和林产品最终分解等都向大气释放 CO_2 ,形成 CO_2 的源。正是因为森林植物在全球碳平衡及潜在的碳储存方面扮演着非常重要的角色使其成为与全球气候变化密切相关的重要有机体。森林本身维持着大量的碳库(占全球植被碳库的 86%以上),还维持着巨大的土壤碳库(约占全球土壤碳库的 73%),与其他陆地生态系统相比,森林生态系统具有较高的生产力,每年固定的碳约占整个陆地生态系统的 2/3,因此,森林生态系统在调节全球碳平衡、减缓大气中 CO_2 等温室气体浓度上升速度及维护全球气候等方面具有不可替代的作用。

在现代工业革命之前,全球碳循环基本处于平衡状态。随着社会的发展,人类对地球环境的影响进入了全球时代。人类活动已经给地球生态系统带来了显著的影响,人类通过自身的社会、经济行为正在扰动或改变着各种自然过程,最突出的例子是受人类活动影响的大气 CO_2 等温室气体浓度持续增加而导致全球气候变暖,以及由此引发的一系列重大而紧迫的全球环境问题,如森林锐减、生物灭绝、土地退化、环境污染、生物多样性丧失等。可见,碳循环与全球环境变化之

间存在着极为敏感的反馈机制。解释目前全球环境变化是科学家的最大挑战。全球环境变化研究给人们的启示是“人是自然的一员”，强调人类的经济活动必须遵循生态学原理，在“人-自然”系统整体利益的前提下考虑社会自身的发展，以达到自然和人类的协调发展，即共同的可持续发展。在全球环境问题中，全球气候变化及其对全球生态系统和人类生存环境的影响，不仅是举世瞩目的重大科学问题，而且已经成为国际社会普遍关注的政治、经济问题，它对当前人类社会所带来的影响之广之深是前所未有的。在全球碳循环中，受人类活动影响最大的是陆地生态系统的碳储量及碳吸收和排放行为。人类活动对大气 CO_2 等温室气体浓度的影响一般认为主要来自两个方面：一方面是大量的化石燃料燃烧及大规模的水泥生产所引起的排放；另一方面是土地利用与土地利用变化、毁林开荒、森林采伐等人为活动而导致的排放。在全球环境变化研究中最关键或最困难的问题是如何区分自然因素和人类活动的作用，以及二者是如何相互作用的。只有对二者的作用有了比较清晰的了解，才能掌握和控制人类生存环境发展、演变的方向。

城市是人类活动最集中、最活跃的区域，联合国预测至 2025 年全球 2/3 的人口将居住在城市区域。城市碳源和碳汇的研究，对减少有效温室气体排放，特别是 CO_2 排放，减小人类活动对全球气候变化的负面影响具有重要意义。城市的碳源和碳汇分析涉及一个复杂的系统，即各种自然系统和社会经济系统的复合系统。目前对城市碳源和碳汇的研究并不是很多，但是城市是碳“源”产生的集中地，又拥有复杂的下垫面，虽然在自然状态下， CO_2 在陆地生物圈和大气生物圈之间的循环保持着平衡状态。但是，城市是人类聚集最为集中的系统，拥有成为“汇”的可能，对城市开展碳源和碳汇平衡的研究，具有重大的现实意义。

碳储量是生态系统碳循环和碳平衡研究的基础，景观格局分析是研究生态系统结构与功能的重要组成部分。由于人类的长期活动，景观无时无刻不在发生着变化。景观变化不仅极大地改变了人类生存的自然环境，而且深刻影响着人类社会和经济的发展。这种人类活动影响下的变化主要表现为土地利用/土地覆被变化 (LUCC)。通过分析过去土地利用对景观变化的影响来预测景观未来的发展趋势是当前景观生态学研究热点。

1.2 城市森林植被碳储量沿城市化梯度的时空变化特征研究

城市化可以改变城市生态系统的结构功能和过程，进而影响城市生态环境质

量。快速的城市扩张和人口增长导致了土地利用/土地覆被变化模式的转变,几乎所有大城市存在的地区,城市化发展水平的空间分异都会形成由城市中心区、近郊(城乡过渡带地区)和远郊组成的三元地域结构,并构成显著的城市化梯度。自20世纪80年代以来,中国城市化进程明显加快,以人类历史上前所未有的速度实现了农村人口向城市的大规模聚集。中国的城市化率由1978年的17.4%增加到2010年的50.0%,预计2020年中国城市化率将达到58.7%。随着城市化的快速发展,中国主要城市的生态环境问题成为科学界关注的热点问题。

植被的碳储量和碳密度是城市森林碳汇功能最重要的组成部分。碳储量是评估森林固碳能力和碳收支的重要指标;碳密度不仅代表了较大面积的林分质量,而且反映了森林受干扰的程度。城市森林的建设、经营管理和可持续发展不仅有助于城市生态环境质量的提高,而且可以通过森林碳汇部分吸收抵消化石燃料消耗所排放的 CO_2 。因此,城市森林的可持续发展对于促进城市生态系统平衡和改善城市生态环境具有极其重要的意义,然而关于城市化与碳储量相互作用关系的研究很少。

尽管城市化所带来的生态环境问题已受到普遍关注,但目前的研究主要集中在土地利用变化和生物地球化学过程上,城市生态系统碳动态的研究主要局限于碳通量的过程与机制,直接测定城市化对碳动态影响的研究非常少,量化不同城市化水平的时空影响模式的研究更少。系统地评估城市发展模式需要量化城市化对森林碳储量影响的长期效应,因为不同国家由于经济发展程度和文化传统的差异导致城市化进程各不相同,城市森林建设不可能简单地照搬其他国家城市的发展模式。

大量研究表明,城市化的快速发展对城市森林碳汇功能具有正面和负面双重影响。一方面,土地利用/覆被变化给城市森林带来了永久性破坏,导致森林景观破碎化程度增加、森林面积不断减少和森林资源退化;另一方面,随着农村人口向城市的大规模聚集及农业活动集约经营程度的不断提高,林分质量及森林覆盖率呈现出较大幅度的增加。因此,研究城市生态系统中土地利用/覆被变化对城市森林碳储量和碳密度的影响,需要在特定的尺度下进行持续观测和长期研究,以便理解生态环境质量下降的原因;同时,通过评估城市森林生态系统的长期变化趋势及其特点,揭示影响城市森林结构变化的主要因子,进而预测未来城市发展情景下城市森林生态服务功能的变化情况。

准确评估城市植被的碳动态需要采用适当的方法。过去关于森林碳汇的长期

生态学研究主要依靠遥感影像、森林资源清查资料和模型估算森林碳储量。然而遥感影像虽然可以提供土地利用程度、植被覆被类型等信息,但无法提供林冠下层的详细信息,而且难以准确估算林龄。生态过程模型是一种可选择的方法,但建立模型的主观性强,而且模型的参数定义存在问题。森林资源清查资料通过详细记录每个森林小班的属性数据,克服了其他类别森林资源调查只测量研究区部分森林样地的缺点,同时可用于拟合主要树种的生长曲线。每10年进行一次森林资源规划设计调查(PMFI)的小班清单属性数据提供了树种组成、林龄、种植密度、小班蓄积量和优势树种的生物量回归方程等重要信息,可以通过生物量和碳含量来估算碳储量。重要的是,不同的树种和林龄有着不同的碳吸收率,其作为森林碳储量空间分布模式最重要的细节,反映了人类活动对城市生态系统植被恢复的干扰历史,如果不考虑林龄和树种变化对碳储量的影响,将无法准确了解气候变化下城市生态系统碳储量的时空变化。

本研究以中国城市化进程中具有典型特征的代表城市厦门市为研究对象,通过机械布点的方法设立固定样地,采用森林资源规划设计调查与地理信息系统(GIS)相结合的研究方法,对比分析城市化梯度上不同区域碳储量和碳密度的时空分布。研究目的是揭示城市化的发展模式在不同城市化梯度上对森林碳储量和碳密度的影响。

厦门市位于北纬 $24^{\circ}23' \sim 24^{\circ}54'$ 、东经 $117^{\circ}52' \sim 118^{\circ}26'$,地处我国东南沿海福建省东南部、九龙江入海处,台湾海峡西岸中部。厦门全市面积约 1699.39 km^2 ,已形成以近郊森林、远郊森林、城市公园、植物园、绿化带等为支脉的城市森林体系。研究区拥有约 8690×10^4 株树木,平均种植密度为 526.6 株/hm^2 ,森林覆盖率为45.60%。地属亚热带海洋性季风气候,年平均气温 20.9°C ,相对湿度76%,年平均降水量1143.5 mm,主要集中在4~8月。地形地貌以丘陵、台地为主,地势由西北向东南倾斜。森林土壤主要为砖红壤和红壤。主要树种类型有马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、湿地松(*Pinus elliottii* Engelm.)、杉木[*Cunninghamia lanceolata*(Lamb.) Hook.]、木麻黄(*Casuarina equisetifolia* Linn.)、台湾相思(*Acacia confusa* Merr.)、桉树(*Eucalyptus robusta* Smith)等。城市森林类型包括近郊森林、远郊森林、城市公园、植物园和绿带。

沿城市化梯度划分为城市中心(包括思明和湖里行政区,人口密度大于51人/ hm^2)、近郊(包括海沧和集美行政区,人口密度大于8人/ hm^2)、远郊3个区域(包括同安和翔安行政区,人口密度大于8人/ hm^2),分别在城市中心区域、

近郊区域和远郊区域设立固定样地作为城市化梯度生态研究界面。

1.2.1 研究方法

1. 数据来源

利用森林资源规划设计调查数据,结合样地调查和 GIS 技术,分析研究区 1972~2006 年城市化进程中不同城市化梯度下的碳储量和景观结构变化间的关系。使用的厦门城市森林相关数据来自于 1972 年、1988 年、1996 年和 2006 年共 4 期的厦门市森林资源规划设计调查的小班清单属性数据,包括 4 期的森林资源分布图、研究区历年的森林经营档案、研究区森林调查小班档案(蓄积量、小班面积、树种组成、龄组)、研究区 1:10 000 地形图。数据的准确性通过系统抽样和分层抽样相结合的方法测定不同蓄积量增长的差异情况,总体蓄积量抽样精度达 90%、可靠性达 95%。目前,为了评估中国人工造林项目的生物量和净初级生产力(NPP),森林资源规划设计调查的小班清单属性数据和生物量回归方程已应用于天然林和人工林的调查。

2. 数据处理

1) 生物量计算:本研究集中于城市森林地上部分生物量。森林资源规划设计调查资料详细记录了研究区内每个森林小班活立木(胸径 $>5\text{ cm}$,树高 $>1.3\text{ m}$)的蓄积量,森林生物量估计采用转换因子连续函数法,通过不同树种蓄积量与生物量的数量关系确定回归方程的参数。

2) 林分碳储量和碳密度估算:为了构建厦门市的碳储量和碳密度数据库,采用生物量的 50%计算碳储量,这种转换被认为是有效的,因为在不同树种和树的不同组成部分生物量中碳含量的变化很小。植被面积来源于森林资源分布图和小班属性数据记录。根据小班生物量的数据,结合小班面积计算每公顷碳储量。

3) 龄组确定:林分和疏林地样地内的优势树种均需记录龄组和代码,龄组根据林种、树种、培育目标和年龄确定(参照样地所在小班的林种),分为幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林 5 个龄组。

4) 属性库的建立:本研究属性数据使用 Access 存储与管理。每个矢量化小班要素建立一栏相应的属性数据。属性数据包括:市、县、乡(镇、公社)、林班号、小班号、小班面积、小班周长、地类、地权、林权、立地类型、林种、起源、

优势树种、树种组成、龄级、龄组、每公顷蓄积、小班总蓄积、小班生物量、小班碳储量、小班碳密度等 20 多项。同时,为了建库方便,在数据库中添加了“关键字段”或者“ID”。在 ArcMap 中,将属性数据库与图形数据连接起来,实现了小班图形与属性信息的相互查询功能。属性数据库的建立为各属性数据的统计和生物量、碳储量、碳密度等的计算提供了便利。

5) 专题图的制作:在 GIS 软件 ArcMap 中,对 4 期林相图和地形图按林场边界、林班、小班、道路、水系和等高线要素的属性类别进行符号化,制作不同时期的生物量、碳储量、碳密度分布图。

6) GIS 的空间分析:以林分碳密度空间分布图作为基本图层,在这些基本图层之间进行空间运算,得到空间分析的结果。空间分析方法主要包括查询统计和空间叠置分析。

7) 统计分析:本研究中所有的统计计算均在 Excel 软件和 SPSS 17.0 中进行。在 ArcGIS 支持下,将数据导出为 DBF 格式或者文本格式,然后在 Excel 中进行统计分析,在 SPSS 17.0 中分别进行自相关分析、双尾检验和独立样本 t 检验。

1.2.2 案例研究

1. 城市森林碳储量的时间动态分析

基于 1972 年、1988 年、1996 年和 2006 年的森林资源规划设计调查的小班清单属性数据,对 4 个时期厦门城市森林总面积、覆盖率、碳储量和林班数量进行了统计分析。1972 年城市森林总碳储量为 273 938.36 t,2006 年城市森林总碳储量为 1 139 528.07 t,碳储量在 34 年间增加了 865 589.71 t。1972~2006 年,城市森林总面积、覆盖率、碳储量和林班数量的动态变化呈现出前期(1972~1996 年)增加、后期(1996~2006 年)减少、总体上升的趋势。1988 年城市森林碳密度明显高于 1972 年($P<0.05$)。

2. 不同林龄植被的碳储量

厦门城市森林近 70%的树木是小树[胸径(DBH) <30 cm],79.18%的树木半径小于 15 cm,将 4 期城市森林碳密度数据进行统计,得出平均碳密度为 12.08 Mg C/hm^2 ,呈逐年增加的趋势,但增加的幅度呈递减的趋势(图 1-1)。1972~1988 年与 1996~2006 年两个时段,碳密度年均增加 $0.45 \text{ t/}(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 和

0.64 t/(hm²·a), 然而 1996~2006 年这一时段碳密度的变化幅度很小。这说明不同林龄的植被碳密度在城市化进程的早期发生明显变化, 而在城市化进程的后期相对平稳。1972 年, 中龄林、幼龄林是城市森林碳储量最主要的组成部分, 然而到了 1988 年, 中龄林、幼龄林碳储量占总储量的比重下降了 65.48%。1988~1996 年与 1996~2006 年两个时段, 中龄林、幼龄林碳储量变化较小, 分别占总储量的 39.29%和 33.32%。这说明随着城市化的进程, 更多的碳将储存于成熟林。

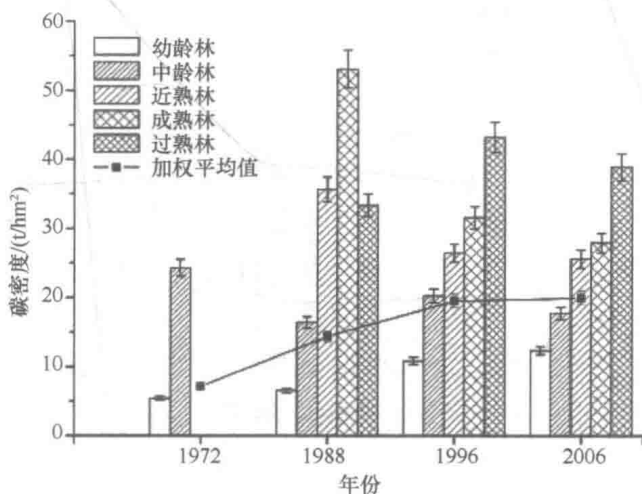


图 1-1 不同龄组碳密度的动态变化 (1972~2006 年)

3. 主要优势树种的碳密度动态

优势树种主要为台湾相思、木麻黄、马尾松、桉树和杉木。其中数量最多的树种占总数量的 44.40%(SE=9.58%), 碳储量占总碳储量的 55.21%(SE=13.14%)。对城市森林 5 种常见优势树种各个时期各个龄组林分碳密度进行比较 (图 1-2), 结果表明, 1988 年后桉树和台湾相思阔叶林的碳密度要明显高于马尾松和杉木针叶林。虽然针叶林、针阔混交林和阔叶林面积比例从 1972 年的 8.68 : 2.14 : 1 转变为 2006 年的 4.15 : 3.23 : 1, 但是碳储量比例则呈现出上升的趋势 [(1.97 : 1.87 : 1) ~ (2.37 : 2.98 : 1)]。进一步对城市森林空间分布变化的研究发现, 由于 1988~1996 年的林相改造, 部分阔叶林转变为针阔混交林, 由此我们推断城市化进程中人类活动对阔叶树的影响要大于针叶林。

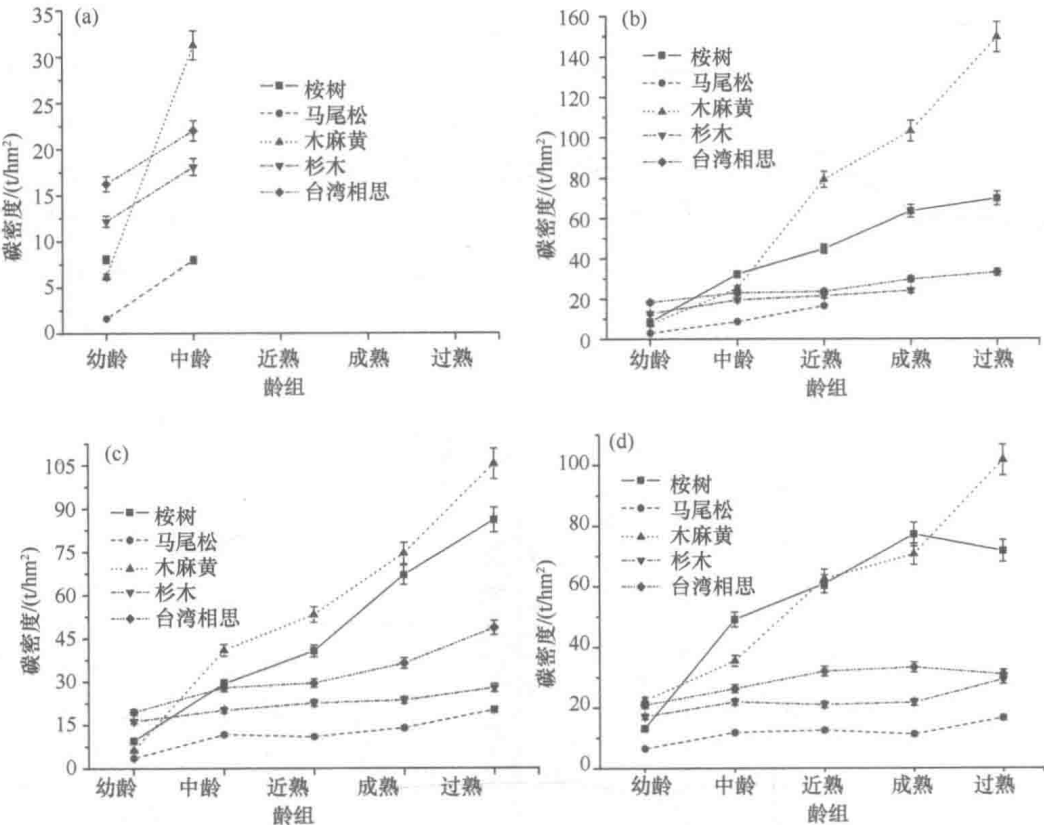


图 1-2 主要优势树种碳密度动态

(a) 1972 年; (b) 1988 年; (c) 1996 年; (d) 2006 年

4. 植被碳储量的空间分布

1) 城市中心区域林班面积和碳储量明显小于近郊和远郊区域,但是城市中心区域森林各个时期的平均碳密度 ($19.21\text{ Mg C}/\text{hm}^2$) 却高于近郊 ($12.92\text{ Mg C}/\text{hm}^2$) 和远郊 ($11.23\text{ Mg C}/\text{hm}^2$)。森林碳密度呈现出前期 (1972~1988 年) 上升、中期 (1988~1996 年) 下降、后期 (1996~2006 年) 略有上升、总体上升的趋势;与其他时段相比,1996~2006 年年均森林碳密度变化幅度最小 ($0.05\text{ Mg C}/\text{hm}^2$)。这说明城市中心区域的城市化水平达到相对成熟的阶段,森林碳收支处于相对稳定的发展状态,土地利用对碳密度的影响主要表现为内涵性的变化。

2) 1996~2006 年为快速城市化阶段,人类活动主要是在近郊区域通过改变森林景观格局的方式减少了城市森林的碳储量。

3) 1972~2006 年,远郊斑块平均面积呈现出逐年减小的趋势,但是林班数量、碳储量和碳密度却呈现出逐年增加的趋势,森林面积也呈现出前期(1972~1996 年)上升、后期(1996~2006 年)下降、总体上升的趋势。另外,远郊城市森林碳密度和变化幅度明显小于城市中心和近郊区域,由此可见,均质性较强、自然性为主的景观斑块所组成的远郊城市森林碳储量和碳密度主要由森林组成结构和景观异质性决定。

1.2.3 讨论

本研究的特色和创新之处在于采用样地尺度的实测数据融合森林资源清查数据在区域尺度上实现了城市化进程中不同城市化梯度下区域碳储量的对比分析。

快速城市化所导致的林地破碎化强烈影响着森林碳储量,在森林面积总体增加的趋势下,碳储量大小与林班数量成正比例关系。厦门城市森林 4 个时期的平均碳密度仅为 12.08 Mg C/hm^2 ,这种现象主要是年龄结构和种植密度导致的。城市中心区域森林碳储量最低,但各个时期的平均碳密度(19.21 Mg C/hm^2)却高于近郊(12.92 Mg C/hm^2)和远郊(11.23 Mg C/hm^2),土地利用对碳密度的影响主要表现为内涵性的变化。城市中心区域森林碳储量最低,主要是由于林地被大量建设用地取代,城市树叶和碎屑被人为去除等;碳密度较高,主要与树种组成、年龄结构、城市化水平较高和人口增长有关。城市中心区域 86.83%的树种是阔叶树,相比于近郊和远郊区域的针叶林,阔叶林具有较高的固碳能力。

1996~2006 年,近郊区域 55.48%的土地类型发生了土地利用/覆被变化转换,导致森林平均碳密度下降了 0.06 Mg C/hm^2 ,人类活动主要在近郊区域通过改变森林景观格局减少城市森林的碳储量。从林地转变为农田再转变为建设用地这一过程实质上是城市在人口增长驱动下通过土地利用转换的方式来减少森林碳储量的集中体现。远郊区域的城市森林林班数量、碳储量和碳密度呈现出逐年增加的趋势,碳密度的变化幅度也明显小于城市中心和近郊区域,城市景观破碎化和选择性采伐影响碳储量和碳密度,对城市森林的恢复产生负面影响。

如何根据不同城市化区域合理分配城市森林碳储量、碳蓄积成为中国城市化发展进程中面临的主要问题。根据目前的研究结果,提出以下 3 点建议:首先,城市中心区域发展城市垂直绿化,拓展绿化空间;垂直绿化是一种“占天不占地”的绿化形式,能在一定程度上缓解城市中心区域对绿地需求量大,而林地面积小