

城市森林

生态效应对全球变化的响应与反馈

付士磊◎著


天津出版传媒集团

天津科学技术出版社

城市森林生态效应 对全球变化的响应与反馈

付士磊 著

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

城市森林生态效应对全球变化的响应与反馈 / 付士磊著. -- 天津: 天津科学技术出版社, 2015.6

ISBN 978-7-5308-9952-6

I. ①城… II. ①付… III. ①城市林—生态效应—影响—气候变化—研究 IV. ①P467

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 142238 号

责任编辑: 张婧

天津出版传媒集团



天津科学技术出版社

出版人: 蔡 颢

天津市西康路 35 号 邮编 300051

电话: (022) 23332400

网址: www.tjkjcs.com.cn

山东华盛印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 12 字数 220 千字

2016 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

定价: 52.00 元

作者简介

付士磊，男，汉族，1978年生，河南延津人，中国科学院沈阳应用生态研究所理学博士，现任职于沈阳建筑大学建筑与规划学院，副教授，主要从事城市生态规划理论与方法、城市低碳规划设计等方面的研究和工。目前主持国家、省、市级课题5项，其中国家自然科学基金1项，国家科技支撑计划课题1项，参与课题20余项，获省、市级奖项目10余项，发表论文20余篇，其中第一作者SCI收录1篇，EI收录3篇。

本书由十二五国家科技支撑计划“典型城镇群空间规划与动态监测技术集成与示范(2012BAJ15B06)”、国家自然科学基金“基于动态释氧效应场的城市绿地空间布局研究(51178274)”和“基于二氧化碳扩散模拟的城市绿地系统空间规划研究(51308350)”等项目资助出版。

前 言

在全球气候变化及城市化进程不断加速的今天，建设城市森林已经成为世界范围内生态城市发展的主流。发展城市森林必须解决如下科学问题：如何进行城市森林树种光合特性的定量评价，从而确定城市森林的适宜低碳树种选择，使有限的城市森林最大限度地发挥其固碳释氧气的生态功能；全球变化对城市森林的光合生理产生了哪些影响，如何揭示城市森林光合生理对全球变化的响应机制。

银杏 (*Ginkgo biloba*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*) 是沈阳市城市森林的两种重要树种，对大气环境变化的响应具有代表性。本书采用开顶箱法研究了在高浓度 CO_2 ($700 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)、 O_3 ($80 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) 及其复合作用条件下城市银杏、油松生长、光合、蒸腾以及呼吸作用的日动态、季节动态变化，揭示了银杏、油松光合对高浓度 CO_2 、 O_3 的适应机制及其本身环境效应的变化规律，为研究城市森林对全球变化的响应与反馈提供了重要基础。

本书得出的主要结果如下：

1. 利用 LI-6400 光合分析系统，对生长在同一环境、具有相似生长状况的 42 个主要树种的光合速率日变化进行了观测；获得了沈阳城市森林 42 种树种光合作用及以固碳释氧能力的生理生态研究的基础数据。为城市森林低碳树种选择以及城市森林固碳释氧生态效益的定量评价提供了必要的科学依据。

2. 短期 (0~30 d) 高浓度 CO_2 处理提高了银杏、油松叶片/针叶细胞间 CO_2 浓度、羧化效率和表观量子效率，从而提高了银杏、油松的净光合速率。

3. 一个生长季 (100 d) 高浓度 CO_2 处理促进了银杏、油松叶片/针叶的生长，提高了细胞渗透调节物质含量，增强了银杏、油松抵御逆境胁迫的潜能。银杏、油松日变化曲线趋向单峰曲线，缓解了中午的光抑制现象；固碳释氧量提高了近 1 倍，有助于减缓全球变化的速度。银杏、油松的气孔导度和羧化效率的降低是发生光合适应的重要原因。

4. 高浓度 O_3 处理可导致两树种的生理伤害，银杏叶片表现为褐斑型伤害，油松则为水锈型，叶片生长受到抑制。同时两树种可溶性蛋白、可溶性糖含量降低，电导率升高。

两树种叶绿素含量降低，净光合速率下降。银杏光合速率的降低前期表现为气孔限制，后期转为非气孔限制为主。油松光合速率下降则是两种限制因素共同作用的结果，难分主次，表明油松的气孔调节能力弱于银杏，更易受到 O_3 的伤害。造成实验处理后期银杏、油松光合速率下降的非气孔因素是表观量子效率和羧化效率的降低。

高浓度 O_3 处理使银杏、油松的光抑制现象加强，固碳释氧、降温增湿能力降低，且油松降低幅度大于银杏。

5.高浓度 CO_2 和 O_3 复合处理提高了银杏油松的叶绿素含量，减轻了高浓度 O_3 对叶片/针叶的伤害，促进了叶的生长。

与对照相比，复合处理提高了银杏、油松的净光合速率，降低了气孔导度和蒸腾速率，从而使水分利用效率和含水量得到提高。表观量子效率和羧化效率的提高是光合速率大幅度上升的重要因素；呼吸速率的提高则是后期光合速率增幅减小的重要原因。复合处理前期 CO_2 主要是通过气孔调节来缓解 O_3 对树木的伤害，高浓度 CO_2 处理对光合作用的促进作用大于高浓度 O_3 处理的抑制作用。

高浓度 O_3 处理使油松、银杏的抗氧化系统活性下降。将经高浓度 O_3 预处理的油松、银杏分别置入倍增浓度 CO_2 与自然 CO_2 环境中，随后的高 CO_2 处理使活性氧水平低于自然 CO_2 环境，而抗氧化酶活性高于自然 CO_2 环境。表明倍增 CO_2 浓度能有效地恢复高浓度 O_3 处理对油松、银杏的氧化胁迫。

高浓度 CO_2 和 O_3 复合处理的银杏、油松的光呼吸速率、可溶性蛋白、可溶性糖的含量增加，电导率降低，提高了银杏、油松的抗逆性，这是高浓度 CO_2 缓解 O_3 胁迫对树木伤害的一个原因。复合处理同样缓解了银杏、油松光抑制现象，提高了固碳释氧量，但银杏降温增湿能力降低。

本书部分章节引用了国内外同行专家的结果，尤其宋力博士、阮亚男博士等专家的相关成果对本书有较大贡献，在此深表感谢！在撰写过程中得到了中国科学院何兴元研究员，沈阳建筑大学石铁矛校长、李殿生教授、李绥副教授、高畅副教授等领导、同事的大力支持和热情帮助，在此表示衷心的感谢！

由于水平有限，疏漏及不足之处在所难免，敬请批评、指正！

作者

2015年1月

目 录

第一章 全球变化与城市森林概述	1
1.1 全球变化概况	1
1.1.1 全球气候变化定义	1
1.1.2 全球变化研究	2
1.1.3 全球变化后果	3
1.2 全球变化与城市森林的关系	4
1.2.1 城市森林概述	4
1.2.2 城市森林对减缓全球气候变化的贡献	5
1.2.3 全球气候变化与光合作用的关系	8
1.3 树木光合生理研究现状	8
1.3.1 树木光合作用的限制因素	8
1.3.2 树木环境效应研究现状	12
1.4 CO ₂ 、O ₃ 浓度升高对植物的影响	15
1.4.1 CO ₂ 浓度升高对植物的影响	15
1.4.2 O ₃ 浓度升高对植物的影响	20
1.4.3 CO ₂ 、O ₃ 浓度复合作用对植物的影响	28
1.5 本项研究的目的、意义及创新点	30
1.5.1 研究的目的和意义	30
1.5.2 研究内容	31
1.5.3 创新点	31
第二章 城市森林树种光合特性研究	32
2.1 研究区域概况与研究方法	32
2.1.1 研究区域概况	32
2.1.2 研究方法	34
2.2 城市森林主要树种光合速率特征研究	36
2.2.1 主要乔木树种光合速率日变化规律	36
2.2.2 主要灌木树种光合速率日变化规律	44
2.3 城市森林主要树种光合速率变化与影响因子研究	51
2.3.1 主要乔木树种光合速率变化与影响因子关系	51
2.3.2 主要灌木树种光合速率变化与影响因子关系	52
2.4 城市森林主要树种固碳释氧能力计算与分析	53
2.4.1 树种固碳释氧量计算	53
2.4.2 主要树种固碳释氧量分析	54
2.5 城市森林主要树种年均日光合总量与年最高光合速率相关分析	56
2.6 小结	56
第三章 CO ₂ 、O ₃ 浓度增高的实验方法	58
3.1 研究区域概况	58

3.2 实验设备	58
3.2.1 OTC- I 型气室的结构	58
3.2.2 OTC- I 型气室工作原理	58
3.2.3 光合测定仪器	60
3.3 实验材料	60
3.4 实验方法	60
3.4.1 实验处理	61
3.4.2 实验环境参数的季变化	61
3.4.3 测定指标	63
3.4.4 数据处理	67
3.5 本书中所涉及的符号含义	69
第四章 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对城市树种生长的影响	70
4.1 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对银杏生长的影响	70
4.1.1 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对银杏主枝生长的影响	70
4.1.2 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对银杏叶片造成的可见伤害	70
4.1.3 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对银杏叶片生长的影响	70
4.2 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对油松生长的影响	73
4.2.1 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对油松主枝生长的影响	73
4.2.2 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对油松针叶的可见伤害	73
4.2.3 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对油松针叶生长的影响	73
4.3 讨论	75
4.3.1 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 处理对树木的可见伤害	75
4.3.2 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 处理对树木生长的影响	75
4.4 结论	76
第五章 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对城市树种光合生理的影响	77
5.1 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木光合作用的影响	77
5.1.1 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木净光合速率季变化的影响	77
5.1.2 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木气孔导度季变化的影响	79
5.1.3 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木胞间 CO ₂ 浓度和气孔限制值季变化的影响	81
5.1.4 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木蒸腾速率季变化的影响	84
5.1.5 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木水分利用效率季变化的影响	85
5.1.6 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木表观量子效率季变化的影响	86
5.1.7 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木羧化效率季变化的影响	88
5.2 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木呼吸作用的影响	90
5.2.1 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木光呼吸季变化的影响	90
5.2.2 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木暗呼吸季变化的影响	91
5.3 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 下树木主要光合参数的相关性分析	91
5.3.1 银杏	91
5.3.2 油松	92
5.4 讨论	93
5.4.1 高浓度 CO ₂ 、O ₃ 及其复合作用对树木的水分状况的影响	93
5.4.2 高浓度 CO ₂ 、O ₃ 及其复合作用下树木的光合作用的气孔限制	93
5.4.3 高浓度 CO ₂ 、O ₃ 及其复合作用对树木的光合作用的影响	94

5.4.4 高浓度 CO ₂ 、O ₃ 及其复合作用对树木的呼吸作用的影响	95
5.5 结论	96
第六章 城市树种对高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 处理的生理响应	98
6.1 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木生理指标的影响	98
6.1.1 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木叶片叶绿素含量的影响	98
6.1.2 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木叶片类胡萝卜素含量的影响	99
6.1.3 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木可溶性糖含量的影响	101
6.1.4 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木可溶性蛋白含量的影响	103
6.1.5 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木叶片细胞膜透性的影响	105
6.2 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 下树木各生理指标的相关性分析	107
6.2.1 银杏	107
6.2.2 油松	108
6.3 讨论	108
6.3.1 高浓度 CO ₂ 、O ₃ 及其复合作用对银杏、油松叶绿素含量的影响	108
6.3.2 高浓度 CO ₂ 、O ₃ 浓度及其复合作用对银杏、油松物质代谢的影响	109
6.3.3 高浓度 CO ₂ 、O ₃ 及其复合作用对银杏、油松脂膜透性的影响	109
6.4 结论	110
第七章 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对城市树种抗氧化系统的影响	111
7.1 试验材料	111
7.2 试验设计	111
7.2.1 试验设备	111
7.2.2 试验设计	111
7.2.3 数据处理	111
7.3 结果与分析	111
7.3.1 高浓度 CO ₂ 对高 O ₃ 预处理油松、银杏 O ₂ ⁻ 产生速率的影响	111
7.3.2 高浓度 CO ₂ 对高 O ₃ 预处理油松、银杏 H ₂ O ₂ 含量的影响	113
7.3.3 高浓度 CO ₂ 对高 O ₃ 预处理油松、银杏丙二醛含量的影响	113
7.3.4 高浓度 CO ₂ 对高 O ₃ 预处理油松、银杏类胡萝卜素含量的影响	114
7.3.5 高浓度 CO ₂ 对高 O ₃ 预处理油松、银杏抗坏血酸含量的影响	116
7.3.6 高浓度 CO ₂ 对高 O ₃ 预处理油松、银杏 SOD 活性的影响	117
7.3.7 高浓度 CO ₂ 对高 O ₃ 预处理油松、银杏 APX 活性的影响	118
7.3.8 高浓度 CO ₂ 对高 O ₃ 预处理油松、银杏 MDAR 活性的影响	119
7.3.9 高浓度 CO ₂ 对高 O ₃ 预处理油松、银杏 DHAR 活性的影响	120
7.3.10 高浓度 CO ₂ 对高 O ₃ 预处理油松、银杏 GR 活性的影响	121
7.4 CO ₂ 浓度倍增条件下高 O ₃ 预处理油松、银杏抗氧化系统各指标相关性分析	122
7.4.1 CO ₂ 浓度倍增对高 O ₃ 预处理油松抗氧化系统各指标相关性分析	122
7.4.2 CO ₂ 浓度倍增条件下高 O ₃ 预处理银杏抗氧化系统各指标的相关性分析	122
7.5 讨论	122
7.5.1 高浓度 CO ₂ 对高 O ₃ 预处理油松、银杏活性氧含量的影响	122
7.5.2 高浓度 CO ₂ 对高 O ₃ 预处理油松、银杏抗氧化剂含量的影响	123
7.5.3 高浓度 CO ₂ 对高 O ₃ 预处理油松、银杏抗氧化酶活性的影响	123
7.5.4 高浓度 CO ₂ 对高 O ₃ 预处理油松、银杏膜脂过氧化的影响	123
7.6 小结	123

第八章 城市树种环境效应对高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 的反馈	125
8.1 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木光合日变化的动态影响	125
8.1.1 银杏光合作用日变化的季节动态	125
8.1.2 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对银杏光合日变化的动态影响	127
8.1.3 油松光合作用日变化的季节动态	127
8.1.4 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对油松光合日变化的动态影响	130
8.2 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木降温增湿的动态影响	133
8.2.1 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木蒸腾速率日变化的动态影响	133
8.2.2 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木降温增湿能力的影响	138
8.3 讨论	140
8.3.1 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木光合日变化的影响	140
8.3.2 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木蒸腾日变化的影响	141
8.3.3 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木环境效应的影响	142
8.4 结论	142
第九章 讨论与展望	144
9.1 银杏、油松对高浓度 CO ₂ 的适应	144
9.1.1 短期 CO ₂ 浓度升高对银杏、油松光合作用的影响	144
9.1.2 一个生长季 CO ₂ 浓度升高对银杏、油松光合作用的影响	144
9.1.3 银杏、油松对一个生长季 CO ₂ 浓度升高反馈	145
9.2 高浓度 O ₃ 对银杏、油松的伤害机制	145
9.2.1 银杏、油松对高浓度 O ₃ 的感应与防御	145
9.2.2 较长期高浓度 O ₃ 对银杏、油松的伤害	146
9.2.3 较长期高浓度 O ₃ 对银杏、油松环境效应的影响	147
9.3 高浓度 CO ₂ 缓解了高浓度 O ₃ 处理对树木的伤害的机制	147
9.3.1 高浓度 CO ₂ 缓解了 O ₃ 处理对树木叶片伤害	147
9.3.2 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 下树木的光合作用的气孔限制	147
9.3.3 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 下树木的光合作用的响应	148
9.3.4 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 下树木的呼吸作用的响应	148
9.3.5 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对银杏、油松脂膜透性的影响	148
9.3.6 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对银杏、油松活性氧含量的影响	148
9.3.7 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对银杏、油松抗氧化剂含量的影响	149
9.3.8 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对银杏、油松抗氧化酶活性的影响	149
9.3.9 高浓度 CO ₂ 和 O ₃ 对树木环境效应的影响	149
9.4 展望	150
附图表	151
参考文献	163

第一章 全球变化与城市森林概述

“城市化”是 20 世纪全球普遍现象。据统计，在此期间，城市人口比例已从 14% 上升到了 50% 以上；预计到 2030 年，将有超过 60% 的世界人口居住在城市。2010 年，46.6% 的中国人口居住在城市，未来，中国政府要将中国的城市人口比例提升到 75%，中国城市人口将超过全欧洲人口。城市化促进了社会经济的高速发展，同时也带来了许多严重的环境问题。大量的证据表明，由于城市化和工业化的发展，加快了人类改变地球气候变化的速度。根据全球气候模型 (GCM) 预测，在今后 100 年内大气 CO_2 浓度将会在目前水平上增加一倍，约 $700\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (Boer et al.2000)。大气 CO_2 浓度的上升引起了以全球气温升高为主要特征的气候变化，平均温度将增加 3.3°C 到 5.8°C (Boer et al.2000)；如此快速的气候变化必将导致许多物种由于不能及时地进化与迁移而灭绝 (Hansen et al.2001)；导致海平面上升，冰雪融化，冰川后退，使农业和森林的分布、格局、生产力受到影响(周广胜等 2003, 林而达等 1997)。全球气候变化对人类与环境的影响已经引起了世界各国政府、科技界及公众的强烈关注，在过去和未来都是中外科学家高度重视和重点研究的领域之一(蒋有绪 1992, 周广胜等 1996&1997, Aber et al.2001, Dale et al.2001)。

城市是人类主要聚集地，是全球气候变化反应敏感的区域之一。我国又是一个发展中国家，经济正处在由低技术向高技术、高信息转变阶段。在过去 15 年间，我国的经济增长率平均达到 8.8%，城市数目增加 1.5 倍，城市化水平几乎提高 1 倍，大约 43% 的人口居住在城市。城市中的高密度人口，加上工业、交通物耗能耗过高，废物、废能排放量大等，导致了城市的环境污染严重，人居环境质量下降。而城市森林作为城市生态环境的重要组成部分，恰恰能够通过吸收大气中的化学物质（如 CO_2 等），释放多种有益大气化学物质（如 O_2 等），降低空气温度，增加空气湿度，改变楼房耗能等几个方面改善城市气候，减轻或消除城市热岛效应，维持城市的碳氧平衡 (Sailor et al.1992, Taha et al.1991, Kamran K. Abdollahi et al.2000, Simpson1998, Nowak 1994c)，从而有效缓解全球气候变化所带来的压力；并且城市森林与人类居住环境关系密切，能增进人体健康，提高环境质量，并为全球气候变化及城市化的潜在影响方面的研究提供了有价值的实验场所，可见发展全球气候变化与城市森林的关系研究已迫在眉睫。

1.1 全球变化概况

1.1.1 全球气候变化定义

全球变化指可能改变地球支撑生命能力的环境变化，包括气候变化、陆地生产力变化、海洋和其他水资源变化、大气化学变化以及生态系统变化等(刘闯, 2005)。

已知的变化包括温室效应，臭氧层破坏，森林锐减，物种灭绝，土地退化，淡水资源缺乏和污染等一系列重大全球环境变化，它困扰着人类社会，威胁全球的可居住性。

1.1.2 全球变化研究

气候变化是指除在类似时期内所观测气候的自然变异之外，由于直接或间接的人类活动改变了地球大气的组成而造成的气候变动。它被认为是威胁世界环境、人类健康与福利和全球经济持续性的最危险的因素之一。大多数科学家们认为，地球的气候正受到不断累积的温室气体的影响，诸如由人类活动产生的 CO_2 等（周广胜，1997；张志强等，1999）。温室效应已被认为是目前人类面临的重大环境问题。如果得不到有效控制，将对人类未来的生存和社会发展造成巨大威胁。20 世纪 50 年代后期，科学界开始注意并研究全球气候变化与温室气体的关系。经过 30 多年的探讨，直至 90 年代初，各界普遍认为：人类向大气中排放温室气体是导致全球温暖化的主要因素（Ehleringer, 1997）。自 1992 年巴西里约热内卢联合国环境与发展大会以来，尤其是 1997 年在日本京都，世界主要发达国家签订了温室气体排放控制条约（即“京都协定”）以来，各国政府越来越重视陆地生态系统和全球变化的相互关系，筹集巨资并动员众多研究人员开展这一领域的研究，以期通过改变植被的盖度，提高陆地生态系统的生产力或者增加土壤的固碳能力来减缓大气 CO_2 浓度的急剧增加（Bowes, 1993）。

国际全球变化与陆地生态系统的主要研究计划有：世界气候研究计划（WCRP），其中包括气候变率及其可预报性计划（CLIVAR）等 6 个子计划；全球环境变化的人为因素计划（IHDP）；生物多样性计划（DIVERSITAS）；国际地圈生物圈计划（IGBP），它于 1986 年正式确立，它的核心项目“全球变化与陆地生态系统”（Global Change and Terrestrial Ecosystems, GCTE）目标是描述和了解控制地球系统及其演化的相互作用的物理、化学和生物过程，以及人类活动在其中所起的作用。其应用目标是增强人类对未来几十年至百年尺度上预测自然和人为的因素对大气化学影响的程度，它在很大程度上提高了我们对全球变化内容和导因的认识、增强了对全球变化可能产生的影响的预测以及对陆地生态系统固碳量的估测能力（张志强，1999）。

全球变化研究指通过研究、监测、评价、预测和信息管理等行为，描述和理解控制整个地球系统相互影响的物理、化学和生物过程；发生在地球系统中的变化和受到人类行为影响的系统以及环境及其变化的特点等的活动（刘闯，2005）。自从人类社会进入工业化时代，尤其是 20 世纪以来，人类活动对大气成分的影响越来越显著。在人们最为关注的五种温室气体二氧化碳（ CO_2 ）、甲烷（ CH_4 ）、氧化亚氮（ N_2O ）、氟利昂（CFC）和臭氧（ O_3 ）中， CO_2 浓度自工业革命以来一直呈增加的趋势，而且增加的速率不断提升。据计算，从 1958 年到 1998 年 40 年间， CO_2 浓度增加了 $52 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，年增加率由 60 年代的 $0.8 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 增加到了 80 年代的 $1.6 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ （方精云等，2000）。

中国位于欧亚大陆东南部季风气候区, 不仅具有从北温带到亚热带, 从湿润到干旱的不同气候带(区), 同时, 也具有从寒冷的北方针叶林到温暖的亚热带常绿阔叶林的多样性自然植被。这种环境、气候和植被的多样性和复杂性为研究中国陆地生态系统与全球气候变化的相互关系提供了良好的研究基础和条件。

1.1.3 全球变化后果

大气污染对气候的影响很大, 大气污染排放的污染物对局部地区和全球气候都会产生一定影响, 尤其对全球气候的影响, 从长远的观点看, 这种影响将是很严重的。首先, 大气中二氧化碳的含量增加, 燃料中含有各种复杂的成分, 在燃烧后产生各种有害物质, 即使不含杂质的燃料达到完全燃烧, 也要产生水和二氧化碳。正因为燃料燃烧使大气中的二氧化碳浓度不断增加, 破坏了自然界二氧化碳的平衡, 以至可能引发“温室效应”, 致使地球气温上升。其次, 温室效应增强, 存在于大气中的某些痕量气体和存在于对流层中的臭氧具有吸收太阳能和近地表的长波辐射从而使大气增温的作用, 称之为温室效应。具有这种作用的气体称之为温室气体。这种温室气体主要有 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、含氯氟烃和其他气体, 其中 CO_2 对温室效应的贡献率最大。

由于城市化和工业化的发展, 人类在改变着地球的气候。冰芯记录表明, 工业革命前地球大气的 CO_2 浓度约为 $280 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。自 1750 年至今的近 300 年内, 大气 CO_2 含量增加了近 $70 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 年均增长率为 0.4% (周广胜, 王玉辉, 2003); 并继续以每年 $1\sim 2 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 的速率上升, 一个多世纪以来, 地球表面年平均温度上升了 0.6°C (Watson et al., 1998, Kerr, 2000)。预计到 21 世纪中期大气 CO_2 浓度将达到 $550 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 21 世纪末达到 $650\sim 700 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。大量观测结果表明, 大气 CO_2 浓度的上升引起了以全球气温升高为主要特征的气候变化, 并引发了气候物理系统的其他变化等全球性变化。根据全球气候模型 (GCM) 预测, 在今后 100 年内大气 CO_2 浓度将会在目前水平上增加一倍, 约 $700 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 平均温度将增加 3.3°C 到 5.8°C , 而且高纬度地区将有大幅度增温 (Boer et al., 2000; Johns et al., 1997)。与全球气候变暖的历史记录相比, 人类工业源温室气体排放及土地利用变化所引起的增温速度是前所未有的, 如果得不到有效控制, 将对人类和生物的生存和社会发展造成巨大威胁。自然界中的物种往往需要几百年甚至上千年的进化过程才能达到与环境的协调平衡与适应, 如此快速的气候变化必将导致许多物种由于不能及时的进化与迁移而灭绝 (Hansen et al., 2001)。物种的灭绝与生态环境的改变最终将危及人类的生存和社会的发展。由 CO_2 上升而引发的温室效应对人类及生物赖以生存的环境和生态系统的影响已经引起了各国政府、科技界及公众的强烈关注。全球气候变化对人类与环境的影响在过去和未来都是中外科学家高度重视和重点研究的领域之一 (蒋有绪, 1992; 周广胜, 张新时, 1996; 倪健, 张新时, 1998; 彭少麟, 1998; VEMAP members, 1995; Aber et al., 2001; Dale et al., 2001; Hansen et al., 2001)。如何既能保护全球生态平衡以满足人类自身健康发展的需要, 又能促进社会、

经济与环境的协调发展与进步，是当代和未来生态学研究的核心。

全球变化使得陆地生态系统的生境长期处于一种连续性的被干扰状态，明显影响生态系统的结构和功能及陆地植被的分布格局和演替进程。据估计，在 CO₂ 浓度倍增的气候条件下，现有北半球北部森林面积的 65% 将受到影响 (IPCC, 2001)；我国平均气温、降水量、自然植被 NPP 等将受到不同程度的影响 (周广胜等 1996a)。目前，虽然全球森林面积仅约占地球陆地面积的 26%，但其碳储量占整个陆地植被碳储量的 80% 以上，而且森林每年的碳固定量约占整个陆地生物碳固定量的 2/3，因此，森林在维护全球碳平衡、减缓全球气候变化方面具有重大作用。

1.2 全球变化与城市森林的关系

1.2.1 城市森林概述

在城市，尤其是中心区域很少有大面积的森林绿地存在，普通表现为稀疏种植的单株树木或小面积的人工绿化群落，因此城市森林具有与自然森林不同的特点。美国俄亥俄州提出，树干基断面积达到 6m² / hm² 时就可认为是城市森林。

日本专家认为，城市森林包含市区绿地中的城市公园、市内环境保护林、道路及河流沿岸的绿地、机关企业等专用绿地、居民区绿化美化及立体绿化等；郊区绿地主要包括郊区环境保护林、自然休养林、森林公园等城市近郊林及农、林、畜、水产的生产绿地。欧洲不少国家的城市森林也包含相似的成分。美国 Grey, G W.(1986) 和我国台湾高清 (1984) 教授认为，城市林业包括：“庭园木的建造、行道树的建造、都市绿地的造林与都市范围内风景林与水源涵养林的营造”。美国学者认为：城市林业的任务是栽培和管理城市树木，在广义上，包括城市水域、野生动物栖息地、户外娱乐场所、园林设计，城市污水再循环、树木管理和木质纤维生产 (Gene W.Grey, 1978; Robert W Miller, 1988)。尽管各国学者的论述不尽相同，但基本点却是一致的。简而言之，凡是被城市影响和利用的树木及其他植物生长的地域，以及其中的野生动物，均包含在城市森林范围内。

城市森林是指在城市及其周围生长的以乔灌木为主体的绿色植物，包括城市的道路绿化、公园近郊和远郊的森林公园风景名胜、果林、防护林、水源涵养林等。它具有两个明显的特征：一是与城市人工环境体系紧密联系的经人工改造了的自然植物群落；二是其物质流动和能量循环遵循一定的自然规律，但它的生存状态和演化形式不仅受自然环境影响，而且在很大程度上受种种社会因素制约。(刘德良，张琴，2001)

国内学者对此也有论述：城市森林是指生长在人工环境中的城市植被，它可分为公园、园艺式生境和森林生境。城市森林总的概念应包括城市公园、花园、植物园、动物园、街道树、水旁树，庭园绿化、郊区森林、国家森林公园和旅游胜地等，它是城市林业的经营对象。主要目的是改善城市环境条件、净化空气、向市民提供文化娱乐、休养和游憩的优美场所。内容包括风景林、卫生疗养林、森林公园、居民住宅区公园、工矿企业的绿化地带、市区行道树；运动场和公共场所的绿化地带(何

兴元, 2002、2003)。沈国航教授认为, 城市森林是“城市内及其周围的树木和相关植被”。因此, 城市森林可以理解为, 包括城市树木、以木本植物为主的城市人工绿化群落和城郊森林植被等组成的一个系统整体(杨学军, 许东部等, 2001)。

广义上, 城市森林包括城市水域、野生动物栖息地、户外娱乐场所、园林设计、城市污染水再循环、树木管理和木质纤维素生产。

城市森林的产生源于城市化进程的加快及随之而来的城市人口的集聚, 能源危机, 资源短缺和环境恶化。粉尘、有害气体、噪音等使越来越多的市民患有气管炎、肺癌、高血压等“城市病”, 已成为人们深感忧虑的社会性问题。人类终于在大自然的惩罚下认识到“城市发展必然与自然共存”, 改善环境质量和“将森林引入城市, 让城市坐落在森林中”已成为人们迫切需要解决的问题和切实的需要(司马永康, 徐涛, 王跃华.2002)。于是, 为了改善城市的生态环境, 维持城市可持续发展, 恢复森林、回归自然是行之有效的途径。

城市森林大约在 20 世纪下半叶在西方兴起, 主要是指为城市服务的林业。其特点是突破了过去以城市市区绿化、美化为目的的狭义的城市绿化, 发展成为城市生态系统服务的森林体系。因为西方快速现代城市化的后果是市区建筑密集, 绿化空间狭小, 只能在钢筋水泥建筑群中形成斑点、小块状点缀的绿化点或园林小景点, 在寸土如金的大都市, 有时干脆连行道树的栽植都牺牲掉了。人们不愿再忍受长期生活在令人压抑的灰色水泥丛林中, 并出现了一百年前人口向城市集中居住的反向流, 大量的城市居民往郊外乡村转移。如何把林业引入城市建设, 改造城市环境, 或者在新兴城市建设之始, 就注意发展城市林业, 成了西方一些城市付诸实施的行动, 这是 20 世纪下半叶世界“反城市化”趋势中表现出来的一些特征(蒋有绪, 2000)。1979 年法国出版的《森林与城市》一书中指出: 应把城市绿化空间看成是不可缺少的城市社会设施。城市愈发展、愈需要森林。“城市中的森林和森林中城市”已成为人们的迫切要求。越来越多的城市拥有“绿色之都”、“花园城市”、“绿城”之美称, 城市森林是社会林业, 它的兴起已成为世界林业发展的总趋势之一。城市森林的出现是时代的产物, 特别是随着城市化进程的迅猛推进, 大量的人口集中、工业的迅速崛起、汽车制造业的高速发展以及城市建设和旧城区改造的加速等形成的污染等环境问题, 使城市发展受到严重影响, 导致城市中的植物严重缺乏, 从而促进了城市森林的出现及发展(梁星权, 2001), 形成了“将森林引入城市, 把城市建在森林中”的理念。城市林业是与“城市”、“森林”有关, 但又不单纯限于“城市学”或“森林学”的内容, 它综合了城市学和森林生态等学科的有关内容, 成为一门新兴和交叉的边缘学科。城市林业从满足城市人民的需要出发, 以城市森林生态系统的建设为主要切入点, 并把这一系统放在城市生态这一大系统中进行管理, 来协调人与自然的关系(张春霞, 蔡剑辉.2001)。

1.2.2 城市森林对减缓全球气候变化的贡献

城市是人类主要聚集地, 是全球气候变化反应敏感的区域。在过去 15 年间, 我

国城市数目增加 1.5 倍，城市化水平几乎提高 1 倍，大约 43%的人口居住在城市。工业、交通物耗能耗过高，废物、废能排放量大，城市化程度加剧，城市人口密度增大，都导致了城市的环境污染严重，人居环境质量下降。

全球森林面积大约仅占地球陆地面积的 26%，但其碳储量却占整个陆地植被碳储量的 80%以上，而且森林每年的碳固定量约占整个陆地生物碳固定量的 2/3。森林在维持全球碳平衡、减缓全球气候变化方面具有重大的作用。于是，20 世纪 60 年代，在全球人口急剧增加、环境日益恶化、人类生存面临严重威胁的背景下，继“城市公园”、“城市绿地系统”之后，国外有关学者又开始探讨一种解决城市问题的新思路，即从人类生活和生存的角度出发，把森林引入城市，让城市坐落于森林，并通过调整人类、社会、森林之间的关系，促使社会、经济与自然的协调发展。这便是源自美国的又一种城市绿色开放空间的新概念——“城市森林”(何兴元等, 2002; 刘殿芳, 1997)。如今 40 余年过去了，事实已经证明，城市森林是城市绿地中一种更高级、更稳定、更具有自我调节、自我更新能力的形式，已经成为城市生存与发展不可或缺的基础设施。作为实现以人为中心、以物理环境为主宰的城市区域生态系统良性循环的第一位资源(刘殿芳, 1997)，城市森林，不仅在吸收与降解城市污染物、改善城市小气候、减轻或消除城市热岛效应、保证城市生态安全等方面具有无法替代的作用，而且在调城市与区域生态环境之间的矛盾、维持城市、区域乃至全球持续发展，维持大气碳氧平衡、缓解全球变化所带来的压力等方面也具有重要意义(McPherson, Nowak and Rowntree, 1994)。因此，建设城市森林已经成为新世纪世界范围内生态城市发展的主流方向(Mark, 1996; 1997)。在此情形下，如何因地制宜地制定城市森林的发展规划，充分发挥其生态效益，创建理想的城市人居环境，便成了当前城市森林、城市生态学领域研究的热点问题(Kaplan, 1989; 何兴元等, 2002)。

全球变化使得陆地生态系统的生境长期处于一种连续性的被干扰状态，明显影响生态系统的结构和功能及陆地植被的分布格局和演替进程。据估计，在 CO₂ 浓度倍增的气候条件下，现有北半球北部森林面积的 65%将受到影响(IPCC, 2001)；而我国平均气温、降水量、自然植被 NPP 等也将受到不同程度的影响(周广胜等 1996a)。目前，虽然全球森林面积仅约占地球陆地面积的 26%，但其碳储量却占整个陆地植被碳储量的 80%以上，而且森林每年的碳固定量约占整个陆地生物碳固定量的 2/3，因此，森林在维持全球碳平衡、减缓全球气候变化方面具有重大作用。

城市森林作为城市生态环境的重要组成部分，能够通过吸收大气中的化学物质(如 CO₂ 等)，释放多种有益大气化学物质(如氧气等)，改善城市小气候(如降低空气温度)，改变楼房耗能等几个方面起作用。

(1) 吸收大气温室气体。树木在它们的生长过程中从大气中吸收了部分 CO₂，并且以有机物的形式储存在体内。而且，树木具有很大的叶面积，多种有害气体也被清除，这主要是通过叶气孔实现的(Smith, 1990)。据估计，在美国，城市森林中

由树木所固定的碳有 6.6~9.9 亿吨(Nowak, 1994c)。森林所储存的碳在 Oakland 为 145800 吨(11tC/ha)。

尽管城市树木所储存的碳只是全美国所有森林储碳量的一小部分(4%~5%),但是,城市树木因具有相对高的次级减排效应(如保存能量,降低气温),因此,与非城市树木相比,城市树木每棵树在降低温室气体浓度方面具有更高的效应。

影响城市森林清除污染物的因素包括树木覆盖率、叶面积指数、生长季节的时间长度、气象(如气温、风速、降雨)以及污染物浓度等(Nowak et al., 1998)。

(2) 改善城市小气候。树木蒸腾作用及树冠影响空气温度、辐射吸收及热量储存、风速、相对湿度、大气湍流、地表草皮状况,并且最终影响混合层高度的变换(Heisler et al., 1995; Berman et al., 1997)。树木覆盖率每增加一个百分点,它所引起的最大正午气温降低量为 0.04~0.2℃(Sailor et al., 1992; Taha et al., 1991)。城市大气中 O₃ 的浓度甚至高达背景浓度的 10 倍以上。城市小气候的改变可影响污染物的排放和形成,尤其是 O₃ 的形成。从 Washington 到 Massachusetts 中部,把增加了的城市树木覆盖对 O₃ 浓度的影响进行模拟分析后表明:城市树木可以降低市区 O₃ 浓度。

(3) 树种及其大小的影响。在城市森林中进行树种筛选,可影响整片森林对全球气候变化的作用。除了选择那些适合于立地环境的树种以减少维护需求及延长寿命之外,树种的一些特性还可影响化学物质的清除、化学物质的排放、城市小气候以及楼房能量保护。那些具有相对高的叶面积和蒸腾速率的树种应该被用来加强蒸腾冷却,从而降低气温和温度依赖性的 VOC 排放。除了在楼房周围植树之外,树的大小、蒸腾作用、叶和枝条密度均可影响楼房能量使用(Heisler, 1986; Mcpherson, 1994)。

城市森林有助于减轻全球气候变化,尽管与城市地区的总排放相比,这些效应相对较少。然而,城市森林在减轻全球气候变化方面,就单棵树而言,它所发挥的功效最大,因为城市森林与许多排放源都相距很近,它对城市排放的次级功效也相当大。而且,城市森林与人们的关系密切,这一点可以加强森林的其他功效,从而增进了人体健康并提高了环境质量。对于全球气候变化的潜在影响,以及城市化对森林生态的潜在影响,城市森林为这些方面的研究提供了非常有价值的试验场所及试验材料。

“城市森林对全球变化的响应与反馈”研究是全球变化及其区域响应中不可缺少的研究内容,以城市中的森林为研究对象,研究城市森林主要树种在 CO₂ 浓度的倍增及多因子复合作用条件下,形态变化、主要生理生化指标的动态变化,揭示城市森林对全球气候变化的响应机制,阐明城市森林对减缓全球气候变化的贡献和作用,已经成为目前城市森林生态学领域重要的研究课题。环境因子的变化必然导致植物生理反应的变化,植物本身的活性氧水平、抗氧化酶活性、膜脂过氧化程度都是比较敏感的因子。而应对外界环境变化植物自身抗氧化系统活性的激发程度与植