中国林业科学研究院

硕士学位论文

城市不同类型绿地空气颗粒物浓度变化规律的研究

姓名：吴志萍

申请学位级别：硕士

专业：生态学

指导教师：王成

20070701

摘 要

本研究以探讨城市不同类型绿地空气颗粒物浓度变化规律为目的，选取了清华大学校园内草坪、篱草、阔叶乔草、针叶乔草、阔叶乔木以及乔灌草六种典型的绿地类型以及对照点一个进行监测。从2005年12月至2006年11月，历经12个月，定期、定点监测并研究了不同类型绿地内空气TSP、PM10、PM2.5以及PM1等颗粒物浓度的季节变化和日变化规律，分析了环境因子对颗粒物的影响。初步得出以下结论：

1. 6种类型绿地的空气颗粒物浓度在季节分布上差异显著，空气TSP、PM10、PM2.5、PM1浓度均是在秋季浓度最低。其中春季不同类型绿地空气TSP、PM10浓度极显著高于其它三季，夏季、秋季和冬季之间没有显著差异。夏季不同类型绿地空气PM2.5浓度极显著高于春季、秋季和冬季；冬季不同类型绿地空气PM2.5、PM1浓度极显著高于秋季、显著高于春季，春季、秋季之间没有显著差异。

2. 秋季不同类型绿地之间空气TSP、PM10浓度存在显著差异，其它季节没有显著差异。不同类型绿地之间空气PM2.5和PM1在四季均没有显著差异。秋季，乔灌草内空气TSP、PM10浓度极显著低于对照、草坪、篱草、阔叶乔草，阔叶乔木内空气TSP、PM10浓度显著低于篱草和对照。

3. 四种粒径颗粒物浓度出现高低值的月份不尽一致。TSP、PM10、PM2.5和PM1浓度两个低值段均出现在2月份、11月份；而TSP、PM10浓度的最高值出现在沙尘暴肆虐的4月份，PM2.5、PM1浓度最高值出现在1月份。

4. 四种粒径空气颗粒物浓度日变化曲线均呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在11:00~15:00最低；早晚相比，早上的颗粒物浓度低于晚上。

5. 从白天的空气质量来看，非采暖期好于采暖期。在观测时段内非采暖期的TSP和PM10的浓度均达到国家环境空气质量标准（GB3095—1996）的二级标准；非采暖期PM2.5的浓度均达到美国EPA环境空气质量标准。

6. 在非采暖期，不同类型绿地之间空气TSP浓度在07:00和13:00差异均不显著，PM2.5浓度在07:00至17:00差异均不显著，其它时间段存在显著差异。在采暖期，不同类型绿地之间空气TSP浓度在09:00、13:00和15:00的差异均不显著，PM2.5浓度在11:00至15:00以及19:00差异均不显著，其它时间段存在显著差异。

7. 总体上负离子与颗粒物的相关关系不显著。在风速、温度、湿度、郁闭度等因子中，影响颗粒物浓度的主要因素是风速、郁闭度，温湿度对颗粒物浓度也有影响，但相对较小。

8. 阴天颗粒物的浓度比晴天高24%～45%；雨后阴天颗粒物的浓度比晴天高67%~426%，其中以PM2.5浓度雨后阴天比晴天增加的幅度最大，为426%。

关键词：城市，绿地类型，颗粒物浓度，日变化，季节变化

Abstract

In this research, six types of urban green-land in Tsinghua University, including herb, greenbelt-herb, deciduous tree-herb, evergreen tree-herb, deciduous tree arbor-shrub-herb and a control, are selected to study the relationship between urban green-land and Particulate Matter. The field survey of this research lasted for 12 months, from December 2005 to November 2006. TSP, PM10, PM2.5, PM1 and some environmental factors are the main parameters monitored. Some results are as fellows:

1. The particulate matter concentrations are different significantly between four seasons. The concentrations of particulate matters with four-type diameters are lower in autumn than in other seasons. For TSP and PM10, the concentrations in spring are significantly higher than in other seasons. The difference between summer, autumn and winter is not significant. For PM2.5 and PM1, the concentrations in summer are higher than in other seasons. In summer, PM2.5 and PM1 concentrations are significantly higher than other seasons. In winter, it is significantly higher than autumn and spring. And difference is not significant between spring and autumn.

2. In autumn, TSP and PM10 concentrations are less than in other seasons significantly. To PM2.5 and PM1, the differences are not significant between four seasons. In autumn, the lowest concentration of TSP and PM10 is in arbor –shrub-herb, and the lower is in deciduous tree. In autumn, PM2.5 and PM1concentrations are significantly lower than control.

3. The high and low concentration months are different between those particular matters. For TSP, PM10, PM2.5 and PM1, the lowest concentrations are in Feb and Nov. The highest concentrations for TSP and PM10 are in April when the sandstorm happened. The highest concentrations for PM2.5 and PM1 are in Jan.

4. The daily variety of Particulate Matter is a "double-apex" curve, the Particulate Matter concentrations is higher in dawn and dusk and lower in noon. To compare the concentration between dawn and dusk, it is lower in dawn normally.

5. In daytime, the air quality in non-heating season is better than heating season. During monitoring period, TSP and PM10 concentration for heating season can meet the Second Criteria of State Environmental Air Quality Standard （GB3095—1996） at the monitored spots. PM2.5 concentration for heating season can meet EPA standard of USA.

6.In non-heating time, TSP concentration difference is significant between various vegetations except at 7:00 Am and 13:00 PM; PM2.5 concentration difference is significant between various vegetations except at 7:00 Am and 17:00 PM. In heating time, TSP concentration difference is significant between various vegetations except at 9:00 AM, 13:00 PM and 15:00 PM; and PM2.5 concentration difference is significant except at 11:00 AM, 13:00 PM, 15:00 PM, and 19:00 PM.

7. In general, correlation between aero-anion and Particulate Matter is not significant. Among those factors such as wind speed, temperature, humidity and density, the main factor which influence particular matters are wind speed and density. The influence from other factors is not very clear.

8. In overcast weather, the Particulate Matter concentrations is about 24%~45% higher than in clear weather. After raining, the overcast weather is about 67%~426% higher than clear weather. The biggest increasing scope is happened on PM2.5, the concentration can increased 426% than clear weather.

Keywords: urban, green-land type, particulate matter concentration, daily change, seasonal change

表 目 录

表 2-1 实验时间及天气情况 9
表 3-1 TSP 与 PM10、PM2.5、PM1 之间的相互关系 12
表 3-2 PM10 与 PM2.5、PM1 之间的相互关系 13
表 3-3 PM2.5 与 PM1 之间的相互关系 14
表 3-4 方差分析 15
表 3-5 多重比较 15
表 3-6 不同类型城市绿地空气 TSP 浓度的全年均值 15
表 3-7 春季不同类型城市绿地空气 TSP 浓度的比较 16
表 3-8 夏季不同类型城市绿地空气 TSP 浓度的比较 17
表 3-9 多重比较 17
表 3-10 秋季不同类型城市绿地空气 TSP 浓度的比较 18
表 3-11 冬季不同类型城市绿地空气 TSP 浓度的比较 19
表 3-12 方差分析 20
表 3-13 多重比较 20
表 3-14 不同类型城市绿地空气 PM2.5 浓度的全年均值 21
表 3-15 春季不同类型城市绿地空气 PM2.5 浓度的比较 21
表 3-16 夏季不同类型城市绿地空气 PM2.5 浓度的比较 22
表 3-17 秋季不同类型城市绿地空气 PM2.5 浓度的比较 23
表 3-18 冬季不同类型城市绿地空气 PM2.5 浓度的比较 24
表 4-1 多重比较 35
表 4-2 多重比较 36
表 4-3 多重比较 36
表 4-4 多重比较 37
表 4-5 多重比较 37
表 4-6 多重比较 38
表 4-7 多重比较 38
表 4-8 多重比较 39
表 4-9 多重比较 39
表 4-10 多重比较 40
表 4-11 多重比较 40
表 4-12 多重比较 48
表 4-13 多重比较 48
表 4-14 多重比较 49
表 4-15 多重比较 50
表 4-16 多重比较 50
表 4-17 多重比较 51
表 5-1 空气清洁度与空气质量评价指数的关系 53
表 5-2 空气负离子浓度日变化 54
表 5-3 多重比较 54
表 5-4 绿地类型对空气质量的影响 55

表 5-5 空气负离子对不同粒径空气颗粒物的影响 56
表 5-6 偏相关关系系数分析表 57
表 5-7 相关关系矩阵 58
表 5-8 各因子特征值及累计贡献率 58
表 5-9 旋转后的因子荷载阵 58
表 5-10 不同粒径颗粒物浓度在晴天和阴天的独立样本 T 检验 59
表 5-11 不同粒径颗粒物浓度在雨后晴天和阴天的独立样本 T 检验 59
表 5-12 降水对颗粒物的清除率 60

图 目 录

图 3-1 不同粒径空气颗粒物相关关系矩阵散点图 11
图 3-2 不同类型城市绿地空气 TSP 浓度的年变化 14
图 3-3 不同类型城市绿地空气 PM2.5 浓度的年变化 19
图 4-1 非采暖期草坪内空气 TSP 浓度日变化 26
图 4-2 非采暖期草坪内温湿度、风速日变化 26
图 4-3 采暖期草坪内空气 TSP 浓度日变化 26
图 4-4 采暖期草坪内温湿度、风速日变化 26
图 4-5 非采暖期篱草内空气 TSP 浓度日变化 27
图 4-6 非采暖期篱草内温湿度、风速日变化 27
图 4-7 采暖期篱草内空气 TSP 浓度日变化 28
图 4-8 采暖期篱草内温湿度、风速日变化 28
图 4-9 非采暖期阔叶乔木内空气 TSP 浓度日变化 28
图 4-10 非采暖期阔叶乔木内温湿度、风速日变化 28
图 4-11 采暖期阔叶乔木内空气 TSP 浓度日变化 29
图 4.12 采暖期阔叶乔木内温湿度、风速日变化 29
图 4-13 非采暖期阔叶乔草内空气 TSP 浓度日变化 30
图 4-14 非采暖期阔叶乔草内温湿度、风速日变化 30
图 4-15 采暖期阔叶乔草内空气 TSP 浓度日变化 30
图 4-16 采暖期阔叶乔草内温湿度、风速日变化 30
图 4-17 非采暖期针叶乔草内空气 TSP 浓度日变化 31
图 4-18 非采暖期针叶乔草内温湿度、风速日变化 31
图 4-19 采暖期针叶乔草内空气 TSP 浓度日变化 32
图 4-20 采暖期针叶乔草内温湿度、风速日变化 32
图 4-21 非采暖期乔灌草内空气 TSP 浓度日变化 32
图 4-22 非采暖期乔灌草内温湿度、风速日变化 32
图 4-23 采暖期乔灌草内空气 TSP 浓度日变化 33
图 4-24 采暖期乔灌草内温湿度、风速日变化 33
图 4-25 非采暖期对照点内空气 TSP 浓度日变化 33
图 4-26 非采暖期对照点内温湿度、风速日变化 33

图 4-27 采暖期对照点内空气 TSP 浓度日变化 34
图 4-28 采暖期对照点内温湿度、风速日变化 34
图 4-29 非采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度日变化 42
图 4-30 采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度日变化 42
图 4-31 非采暖期篱草内空气 PM2.5 浓度日变化 43
图 4-32 采暖期篱草内空气 PM2.5 浓度日变化 43
图 4-33 非采暖期阔叶乔木内空气 PM.2.5 浓度日变化 43
图 4-34 采暖期阔叶乔木内空气 PM2.5 浓度日变化 43
图 4-35 非采暖期阔叶乔草内空气 PM2.5 浓度日变化 44
图 4-36 采暖期阔叶乔草内空气 PM2.5 浓度日变化 44
图 4-37 非采暖期针叶乔草内空气 PM2.5 浓度日变化 45
图 4-38 采暖期针叶乔草内空气 PM2.5 浓度日变化 45
图 4-39 非采暖期乔灌草内空气 PM2.5 浓度日变化 46
图 4-40 采暖期乔灌草内空气 PM2.5 浓度日变化 46
图 4-41 非采暖期对照点内空气 PM2.5 浓度日变化 47
图 4-42 采暖期对照点内空气 PM2.5 浓度日变化 47

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得本研究生培养单位或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：[illegible]　　日期：2007 年 7 月 16 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解中国林业科学研究院有关保留、使用学位论文的规定，中国林业科学研究院有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权中国林业科学研究院可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：[illegible]　　导师签名：[illegible]

2007 年 7 月 16 日　　2007 年 7 月 16 日

学位论文作者毕业联系方式

工作单位：

联系电话：

电子邮件：

通讯地址、邮编：

第一章　前言

改革开放以来，中国经济取得了快速发展，1979年至2004年中国GDP年均增长率为9.6%，2005年中国GDP增长率为9.9%（新华网，2006）。与此同时，城市化进程在加速，中国人口的城市化率已从1993年的28%提高到2005年的42.99%（国家统计局，2006；中国人口网，2004）。城市发展对城市生态环境的破坏，特别是对城市空气质量的影响日益凸现出来。《2004年中国环境状况公报》指出，空气颗粒物仍是影响空气质量的首要污染物。全国城市空气质量总体上与上年变化不大，部分污染较严重的城市空气质量有所改善，在监测的342个城市中，空气质量达标城市的人口占统计城市人口的33.1%，比去年减少3.3个百分点；暴露于未达标空气中的城市人口占统计城市人口的66.9%。《2005年中国环境状况公报》指出，城市空气质量总体较上年有所好转，但部分城市污染仍然严重，空气颗粒物仍是影响空气质量的首要污染物。在监测的522个城市中，空气质量达到二级标准的城市占56.1%、三级标准的城市占29.1%、劣于三级标准的城市占10.6%，主要污染物仍为可吸入空气颗粒物。

现在，越来越多的国家把环保作为保障经济的大事来抓（尹公，2001）。各国的政府及有关部门都高度重视空气颗粒物污染问题。2000年以前，我国对大气空气颗粒物污染的控制是以TSP为主，进入新世纪，国家把空气颗粒物控制的重点放在了PM10上。我国1996年1月18日发布、1996年10月1日实施的《环境空气质量标准》（GB3095－1996）规定了PM10的标准。国家环境保护总局规定从2000年6月5日开始许多城市（环境保护重点城市中已建空气自动监测系统的城市）将空气质量预报指标体系由PM10代替原来的TSP（上海市环境保护宣传中心，2000a、2000b）。监测的目标直接指向对人体健康有害的污染物。PM10对人体的危害远远大于TSP，会诱发、引发许多疾病（Berube，1997；Zanobetti等，2000）对老人、儿童、已患呼吸道疾病患者和心肺病患者有较大风险，同时对环境产生许多不良影响，空气质量预报指标体系的改变体现了“环境保护，以人为本”的原则。

国外许多国家对颗粒物也制定了严格的标准。欧洲委员会对PM10年平均值设定的标准是40μg/m^3，该标准2005年开始执行（Marko Valius，2005）。欧洲标准委员会建议每年PM2.5的标准是20μg/m^3。美国环保署（EPA）1987年质量标准中增加了对PM10的规定，为50μg/m^3（年均值）和150μg/m^3（日均值）；1997年又制定了新的环境空气质量标准，率先对PM2．5的质量浓度限值做出了规定，为15μg/m^3（年均值）和65μg/m^3（日均值），2005年6月6日开始实施（EPA, 2005）。

世纪之交，北京主办2008年奥运会，“绿色奥运”的理念已深入人心。“绿色奥运”的宗旨是为奥运会提供一座具有空气清新、水质洁净、环境优美、节约能源和资源、市民具有良好环境道德意识，并具有良好生态系统服务功能的世界一流的生态城市（孙高峰，

2005）。打造配置合理的城市绿地，发挥绿色植物对降低固体颗粒物的功能，改善北京的空气质量，成为公众关注的热点之一。

本研究的目的就是要深入探讨城市不同类型绿地空气中不同粒径颗粒物浓度的变化情况，为今后城市绿化建设中绿地植物选择与配置提供依据，也为居民在绿地的休闲提供一个有益的参考。

1.1 国内外研究综述

1.1.1 颗粒物的来源及其分类

颗粒物在大气中悬浮时间长，沉降速度慢，难以彻底自净。颗粒物不仅是严重危害人体健康的主要污染物，具有特殊的理化特性及生物活性，而且也是气态、液态污染物的载体，为大气中的化学反应提供反应床，是大气污染监测重要项目之一。颗粒大小以颗粒的物理性状或直径来表示。

颗粒物来源有原生和次生两类（秦瑜等，2003）。原生源粒子有自然源和人为源。自然源包括火山爆发、火灾、海水喷溅、土壤风蚀、自然燃烧、花粉、孢子、昆虫残骸等形成的漂浮在空气中的颗粒物；人为源则主要有工业排放、燃料燃烧、交通运输、建筑粉尘、生活用燃烧、路面扬尘等。次生源是指由微量气体通过成核与凝结转化为粒子。

颗粒物的源分配与季节、地域、气象条件、颗粒物粒径等有很大关系。以北京为例，冬季最主要的源是煤烟尘，这是大量没有除尘设备的小型取暖炉具造成的；春季最主要的来源是土壤尘，春季干燥多风使北京周围大量土壤尘进入北京大气；夏季最主要的来源是硫酸盐，虽然冬季大气 SO_2 的浓度最大、夏季最低，但是夏季温度高、湿度大、太阳辐射强，SO_2 的转化速率高；秋季最主要的是基建工地尘，北京的水泥石灰尘四季浓度都很高（王明星，1999）。

北京市颗粒污染物主要来源有石化燃料的燃烧、工业活动、机动车尾气、建筑扬尘和风扬尘等。王明星（1999）用富集因子法对北京气溶胶粒子的富集因子进行了分析，说明建筑粉尘是北京粗粒子的一个源，细粒子中有工业污染源、汽车尾气和燃煤。王玮等（2000）认为北京城区机动车排放对细粒子的贡献最大，其次是煤炭燃烧，特别是冬季煤炭燃烧的贡献显著高于秋季，人为污染对细粒子的影响非常大，而工业排放对细粒子的贡献不大。与城区相比，郊区机动车污染对细粒子的贡献显著降低，而工业排放的贡献则有所提高。

目前研究的与人体健康有关的颗粒物主要有：总悬浮颗粒物（TSP，0～100μm）；降尘（指粒径大于 30μm 的较大尘粒）；可吸入颗粒物（IP，0～10μm），也称为胸部颗粒物（TP）或飘尘（孙铁珩等，2001）；细颗粒（FP，2～2.5μm）等。

1.1.2 颗粒物对生物和环境的影响

空气中携带的成分复杂的颗粒物，其粒径大小、形态以及组成成分都与人体健康、动植物生长和环境密切相关。

1.1.2.1 颗粒物对生物的影响

粒径较大（大于30μm）的降尘很少能进入呼吸道，故对人体健康危害较小。粒径较小的可吸入颗粒物，可随人的呼吸进入人体的呼吸道中，对人体健康产生较大的危害。特别是粒径小于5μm的颗粒物能沉积在呼吸道深部肺泡内，对人体健康危害更大（《大气质量监测分析方法标准实务手册》编委会，2002；车凤翔，1999；钱易等，2001；Stoker等，1976）。调查表明，当人们长期吸入高浓度的二氧化硅的尘粒，硅肺的发病率明显增加；长期生活在一定浓度的汞、铝、砷、铬、钍、铍及其他游离硅灰的空气中，可引起某些慢性中毒，有的产生纤维肺、硅肺甚至恶性肿瘤。国内外关于颗粒物浓度与肺癌死亡率关系的研究较多（Brunekreef等，2002；Arden Pope等，2002；Xu X等，1994；阮素云等，2002）。Brunekreef认为，PM10的浓度平均上升10 μg/m^3，每日总死亡率上升0.6%，呼吸系统疾病上升1.5%，心血管疾病上升1.1%，哮喘上升3%，肺功能下降0.1%。Arden Pope等从120万成年人中选取50万人进行的十几年跟踪调查得出：细颗粒物浓度与肺癌死亡率、心肺病死亡率关系密切。空气中的细颗粒物浓度每升高10μg/m^3，肺心病和肺癌死亡率分别相应升高6%和8%。印度尼西亚的雅加达是一个颗粒物浓度非常高的城市，预计将颗粒物浓度减少到世界卫生组织推荐的水平，可以防止1400人死亡，约占这个城市年死亡率的2%（杨小波等，2000）。国外有人在六个城市对颗粒物与死亡率关系进行了研究，结果表明，细颗粒物PM2.5与死亡率的关系远远大于PM2.5～10与死亡率的关系（Schwartz等，1996）。

颗粒物对动物的危害也不小，粉尘污染的空气能使动物体质变弱：鸡在粉尘污染的空气中很难长大，蚕吃了带粉尘的桑叶生长缓慢、产丝量下降。黄雪莲等人利用采集自北京市城区的沙尘暴颗粒物测定了沙尘对大鼠肺泡巨噬细胞吞噬功能的影响（肺泡巨噬细胞除了具有吞噬功能外，还有很强的分泌功能，在炎症过程中起重要作用），得出沙尘暴颗粒物PM2.5、PM10作用于巨噬细胞8h后，PM2.5、PM10最高剂量组（150μg/ml）的细胞存活率分别为对照的85.4%及89.9%；而且，PM2.5的毒性比PM10要明显（黄雪莲等，2004）。

颗粒物除了对人类、动物产生危害之外，植物也难逃此劫。植物对颗粒物有一定的净化作用，是降低大气污染影响的重要途径之一，但超过了一定的阀值，大气中的颗粒物降落在植物叶片上时，布满全叶，堵塞气孔，妨碍光合作用、呼吸作用和蒸腾作用，从而危害植物。这些微尘中的一些有毒物质也可通过溶解渗透，进入植物体内，产生毒害作用（杨小波等，2000）。

1.1.2.2 颗粒物对环境的影响

颗粒物对环境的影响主要表现在对温度、能见度、降水和酸碱度影响上（董雪玲，2004；刘泽常等，2004）。

颗粒物对光的吸收和散射降低了能见度、对太阳光的阻挡使地面温度降低。颗粒物的散射造成60%～95%能见度减弱。在极干净的大气中能见度可以达到30km以上；在

城市污染大气中能见度在5km左右甚至更低；在浓雾中能见度只有几米。F
全球本底不透明度增加四倍，将使全球温度降低3.5℃之多，这么大的降温
千年，相信足以引起一个冰河期（塞思菲尔德，1986）。

颗粒物中凝结核的成云作用和降水对颗粒物的冲刷作用均可以使颗粒
云水中。粒径较大的粒子主要来源于风沙扬尘和土壤颗粒，含有较多的碱
一定的碱性，可在一定程度缓冲降水中的酸性物质；粒径较小的细粒子主
燃烧等人为活动,具有较强的酸性，颗粒物的酸性与颗粒物中的SO_4^{2-}和NH^{4+}
颗粒物的酸碱性影响降水的化学性质。

1.1.3 气象条件对颗粒物的影响

温度、湿度、风速和降水等气象条件与颗粒物有不同程度的相关关系（
等，2003）。

大气低层风向、风速影响着污染物的传输及扩散过程（周丽等，2003）
作用是对污染物的平流输送，通常风速越大越有利于空气中污染物质的稀
时间的微风或静风则会抑制污染物的扩散，使近地面层的污染物成倍地增
变化在稳定天气时与相对湿度呈正相关，与能见度、风速和气压呈反相关；
时，其浓度的变化与风速和气压呈正相关。王淑英等（2002）认为PM2.5
速的负相关显著，为-0.64，PM2.5与同期风速的相关系数为-0.44，可见观
期至同期的风速对气溶胶的浓度均有显著影响。鲁兴等（2004）也得出一
与PM10和PM2.5浓度存在明显的负相关关系，相关系数分别是-0.63和-0.
刮风对细颗粒物去除效果比粗颗粒物强。

空气中湿度越大越有利于细颗粒物形成，并且高湿常与逆温相伴，稳定
利于颗粒物扩散。PM10和PM2.5浓度与湿度的相关系数分别是0.25和0.3

颗粒物浓度与温度呈较弱的负相关关系。由于空气分子随温度升高或
动速度也升高或降低，当温度升高时，分子运动速度增快，有利于气体扩
温度的升高，颗粒物污染水平下降。

颗粒物浓度与月平均气压呈正相关关系。气压高时浓度值大，气压低
据统计，TSP浓度与月平均气压的相关概率为75%。

自然降雨、降雪对颗粒物起着清除和冲刷作用。较大的雨雪对颗粒物
除作用（尹振东，2005）。但是少量降水对颗粒物浓度的降低作用则很小，
本没有变化。

气象因素对颗粒物浓度的影响是集体作用的结果，并且某些气象因素
性，如相对湿度、降水量、风速、温度之间都会相互影响，晴天的相对湿
太阳辐射既增强大气不稳定性又促使二次颗粒物形成，这就减弱了单一气
力度。

1.1.4 植物对颗粒物的影响

城市树木、森林等绿色植被在减少环境空气中颗粒物方面发挥着无法替代的重要作用，主要体现在三方面：一是树木的降尘作用。在重力或风的作用下，粉尘可以沉降在植物表面。当含尘气流经过树冠时，一部分颗粒较大的灰尘被枝叶阻挡而降落，另一部分滞留在枝叶表面，粉尘保留一段时间后被雨水冲洗掉（Sehmel，1980）。同时乔灌草绿地的复层结构为再次截留粉尘提供了条件。当尘埃碰到树木枝叶时，有 3 种可能：保留在枝叶表面、弹离开或保留一段时间后返回空气中或被雨水冲洗掉（Sehmel，1980）。弹离后重新回到空气中的粉尘，就有可能在重力或风的作用下，被不同层的枝叶再次截获(陈自新等，1998c)，因此提高了绿地的减尘作用。也就是说树木、森林通过对风的影响而影响了起尘和降尘过程，这种作用是非常主要的。二是树木的滞尘作用。由于树木的枝冠茂密，具有较强的降低风速的作用，随着风速的降低，空气中携带的大颗粒尘埃便下降到树木的叶片或地面。由于不同树木叶子表面的结构不同，有的树木叶片多茸毛，有的树木叶片还能分泌粘性的油脂和汁浆，树木叶片在进行光合作用和呼吸作用过程中，增加了空气湿度、负离子含量，有利于吸收、阻滞、过滤灰尘，空气中的颗粒物在经过树木时，便被附着于叶面及枝干。所以植物可以吸收大量的尘埃。正因为如此，树木被称为天然的空气过滤器。第三，高大的乔木降低了绿地及周围的风速（王正非，1985）这也为有效的截留并吸附粉尘提供了条件。

不同植物，由于各自叶面粗糙性、树冠结构、枝叶密度和叶面倾角的差异，导致它们滞留粉尘能力的差异（陈自新等，1998a；Smith，1984；Danvidson 等，1990）。叶表皮具沟状组织、密集纤毛的树种滞尘能力强，叶表皮具瘤状或疣状突起的树种滞尘能力差（柴一新等，2002）。在哈尔滨的研究表明，常绿针叶树种中红皮云杉、杜松是优良的滞尘树种，4 周后滞尘分别为 5.7g/m^2 和 4.4g/m^2；落叶阔叶树种中，银中杨、金银忍冬和山桃稠李分别是有优良的落叶阔叶树种，2 周后滞尘分别为 1.9 g/m^2、2.0 g/m^2 和 2.45g/m^2。根据合肥市 15 个树种滞尘量测定结果，阔叶乔木树种单位面积滞尘量：广玉兰>女贞>棕榈>悬铃木>香樟，阔叶灌木树种：石楠>木槿>红叶李>小叶女贞>大叶黄杨>桂花；针叶树种单位重量滞尘量：雪松>龙柏>蜀桧（彭镇华，2003）。由于树木的叶表面积通常为植物本身占地面积的 20 倍以上，因而树木的滞尘能力是非常巨大的（韩阳等，2005；张秀梅等，2001）。

1.2 目前存在的问题

城市绿地是城市系统中的自然成分，具有生态环境功能、人体保健功能、教育文化功能、景观游憩功能和产业经济功能（康博文等，2005；彭镇华，2003；王铸豪，1986；Jim，1987）。关于森林的滞尘能力，许多研究都与灌丛、草坪、旷地等立地类型进行了对比（褚泓阳等 1995；张新献等，1997；周坚华，1998；周志翔等，2002；孙淑萍等，2004）。不同的绿地类型，其景观效果不同，生态效益也不一样。虽然作为一种人工或半人工的植物群落类型，与自然群落之间存在很大的差别，但它们作为陆地生态系统的组

成成分，在宏观上还是属于森林生态系统和草地生态系统这两种主要的类型。这两种生态系统之间存在的功能结构差异，以及它们本身在细尺度下划分的不同类型之间在功能结构上也存在的差异，在城镇绿地植物群落中依然存在，而且这种差异也导致人们对城镇绿地植物群落构建模式存在分歧（王成，2002）。总的来看，这方面研究主要存在以下问题：

（1）在研究重点上，研究多偏重于 TSP 或 PM10，缺乏对于 TSP、PM10、PM2.5 和 PM1 的全面研究，尤其是缺乏长期监测基础上的资料分析。

（2）在研究方法上，目前主要有两种方法。一种方法是使用粉尘仪来监测绿地空气中的颗粒物浓度，从而分析比较不同类型绿地中的空气质量（孙淑萍等，2004；周志翔等，2002；陈勇等，2006）。另一种方法是利用颗粒物的重力沉降原理，有的使用单叶片滞尘量来推算一定时期单位叶面积的滞尘量，从而推算整株植物的滞尘能力（赵勇等，2002）；有的是用重量法，分析不同类型绿地滞尘量的差异（粟志峰等，2002）。由于研究方法的不同使得监测结果难以比较。

（3）在研究时间跨度上，对绿地与空气颗粒物关系研究主要以某个时段或某些季节为主（周志翔等，2002；张新献 1997；陈勇等，2006；孙淑萍等，2004），缺少全年的、全天的连续监测分析。而空气颗粒物的浓度分布很不均匀，且有较大的时间变化率，在某个时段或某些季节的变化并不能说明全年或全天的实际变化情况。

（4）在环境因子与颗粒物浓度的相关关系上，风向、风速、温度、湿度、气压等方面对颗粒物浓度影响的研究较多（周丽等，2003；杨东贞等，2003；尹振东，2005），而鲜见关于空气负离子以及林地郁闭度与颗粒物关系的研究。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

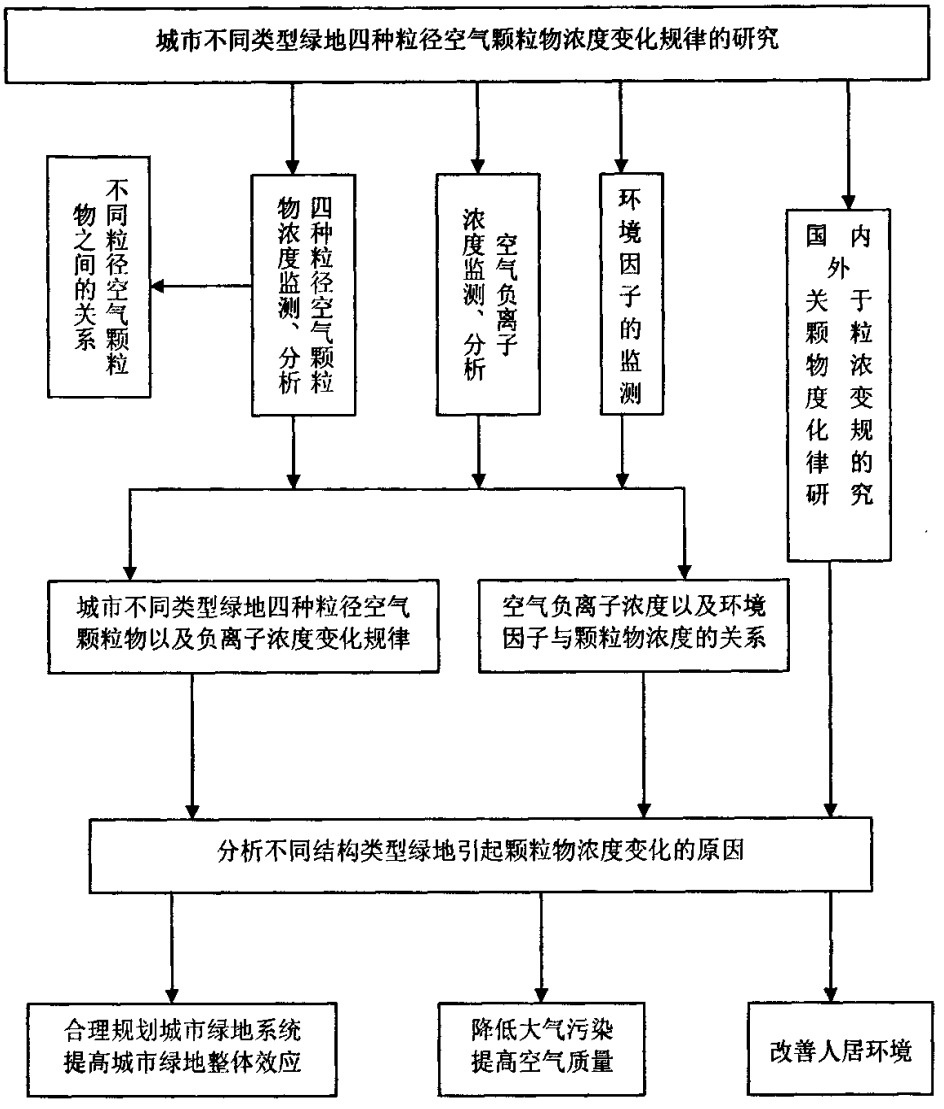
本文重点研究：

（1）不同类型绿地内四种粒径空气颗粒物浓度的年变化规律

（2）不同类型绿地内四种粒径空气颗粒物浓度的日变化规律

（3）环境因子对空气颗粒物浓度的影响

1.3.2 技术路线


城市不同类型绿地四种粒径空气颗粒物浓度变化规律的研究
不同粒径空气颗粒物之间的关系
四种粒径空气颗粒物浓度监测、分析
空气负离子浓度监测、分析
环境因子的监测
国内外关于颗粒物浓度变化规律研究
城市不同类型绿地四种粒径空气颗粒物以及负离子浓度变化规律
空气负离子浓度以及环境因子与颗粒物浓度的关系
分析不同结构类型绿地引起颗粒物浓度变化的原因
合理规划城市绿地系统提高城市绿地整体效应
降低大气污染提高空气质量
改善人居环境

第二章 研究区概况及研究方法

2.1 研究区概况

试验地点位于北四环以外的清华大学，校园内绿草青青，树木成荫，景色优雅，环境相对稳定、受外界人为因素影响较小，其周围主要是居住区。

在校园内选取草坪、篱草、乔草（包括针叶乔草、阔叶乔草）、阔叶乔木和乔灌草六种典型的绿地类型，并在校门口选取对照点一个。样地的具体位置见附录。

（1） 草坪型：面积 1660 m^2，主要是草地早熟禾（*Poa pratensis*），覆盖度99%。

（2） 篱草型：面积 2900 m^2，草坪为草地早熟禾（*Poa pratensis*），覆盖度99%；绿篱有小檗(*Berberis thumbergii*)、金叶女贞(*Ligustrum vicaryi*)、小叶黄杨(*Buxus microphylla*)，草坪居中、绿篱环绕草坪四周。

（3） 针叶乔草型：面积 1600m^2，属油松(*Pinus tabulaeformis*)、圆柏(*Sabina chinensis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、雪松(*Cedrus deodara*)混交林，以油松、侧柏为主，圆柏、雪松较少。油松树高 5.5~6.5m，胸径 18.7~26cm，冠幅平均 3m×5.5m，枝下高 3.3m；侧柏树高 6.8~8.5m，胸径 23.5cm，冠幅 3m×4m；圆柏树高 3.5~4.5m，冠幅 2m×2m；郁闭度 90%，林下覆草麦冬（*Ophiopgon japonicus*），草地覆盖度 85%。

（4） 阔叶乔草型：面积1200m^2，主要树种为银杏(*Ginkgo biloba*)，混杂着几颗油松；银杏树高5~7.5m，枝下高1.8~2.2m，胸径9.7~12.7cm，冠幅4.5m×5.6m；郁闭度75%，林下覆草麦冬（*Ophiopgon japonicus*），草地覆盖度70%。

（5） 阔叶乔木型：面积400m^2，树种为泡桐（*Paulownia fortunei*），属纯林；树高12.5m~13.2m，胸径29~36cm，冠幅5.2m×6.5m；郁闭度75%。

（6） 乔灌草型：面积约20亩，西临万泉河，高低错落、疏密有致，是典型的乔灌草组合的植物群落。绿地内植物种类多样，乔木有黄栌(*Cotinus coggygria*)、柿树(*Diospyros kaki*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、垂柳(*Salix babylonica*)、合欢(*Albizzia julibrissin*)、栾树(*Koelreuteria paniculata*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、玉兰(*Magnolia denudata*)、龙爪榆(*Ulmus pumila. var pendula*)，树木高低错落，树高从2m、5m到12.4m；灌木有紫丁香(*Syringa oblata*)、榆叶梅(*Prunus triloba*)、小檗(*Berberis thumbergii*)、铺地柏(*Sabina procumbens*)、紫薇(*Lagerstroemia indica*)、鸡麻(*Rhodotypos scandens*)、玫瑰(*Rosa rugosa*)、小檗等，株高2.5~3.5m；郁闭度60%，林下覆草麦冬（*Ophiopgon japonicus*），草地覆盖度60%。是游憩、休闲之地。

（7） 对照点：远离绿地的空旷地设置一个非绿地的对照观测点。

2.2 观测指标选取与测定

2.2.1 指标的选取

（1） 颗粒物浓度（包括TSP、PM10、PM2.5和PM1）：用英国Turnkey公司生产的Dustmate粉尘测试仪，测定范围在0~600mg/m^3。

大气中固体颗粒物质粒径通常用空气动力学当量直径来表示（《大气质量监测分析方法标准实务手册》编委会，2002）；粒子浓度是描述大气气溶胶特性的一个重要物理量，表示方法有数浓度、质量浓度等（王明星，1999），本研究采用质量浓度来表示。

（2） 正、负离子浓度：用DLY-5G型离子浓度测试仪。此指标仅用于采暖期和非采暖期进行的日变化监测。

（3） 空气温湿度：用台湾Center生产的温湿度仪。

（4） 风速（包括最大风速、平均风速）：用Novi袖珍式气候测量仪。

（5） 郁闭度、覆盖度：目测。

2.2.2 指标的测定

2.2.2.1 年变化

2005年12月至2006年11月，每月上中下旬各选取一天，每天测试一次，每次从09:00开始，每个样地采集气体10min，每2min读取一组数据（包括TSP、PM10、PM2.5和PM1）。同时记录空气温度、空气湿度、风速。采样高度为距离地表1.5m，与成人呼吸高度基本一致。每月上中下旬颗粒物浓度的平均值为当月颗粒物浓度值。具体天气情况见表2-1。

表 2-1 实验时间及天气情况
Table 2-1 Experiment time and weather

实验季节	实验时间	天气情况
春　季	3、4、5月	2天阴、7天晴
夏　季	6、7、8月	6天阴、3天晴
秋　季	9、10、11月	3天阴、6天晴
冬　季	12、1、2月	6天阴、1天晴

2.2.2.2 日变化

在2006年7月即非采暖季节、2006年11月即采暖季节各选取3天晴朗微风日子，每天07:00至21:00，每隔2h 测试1次。同时记录温湿度、风速。采样高度为1.5m，与成人呼吸高度基本一致。

（1） 颗粒物浓度：每次采气3min，每1min读取1组数据（包括TSP、PM10、PM2.5和PM1）。

（2） 正、负离子浓度：每次采气3min，瞬时读取3组正、负离子峰值数。

2.3 统计分析方法

数据统计分析采用SPSS11.0统计软件和Excel。运用的统计分析方法有：

（1）方差分析

运用方差分析方法来分析不同类型绿地对空气颗粒物或负离子的影响是否显著；如果存在显著差异，再运用LSD方法进一步做多重比较分析，从而找出空气颗粒物浓度或负离子浓度最好的绿地类型。另外，在空气颗粒物浓度年变化中也用到了方差分析，以确定不同季节空气颗粒物浓度是否存在差异。

（2）回归分析

运用回归分析确定不同粒径空气颗粒物之间的相关性、空气负离子与空气颗粒物之间的相关性，并确定不同粒径空气颗粒物之间、空气负离子与空气颗粒物之间的数学关系式。

（3）因子分析

选择因子变量温度、湿度、最大风速、平均风速和郁闭度，进行因子分析。其目的在于对影响空气颗粒物浓度的这些因子进行综合评价，从中提取少数几个综合指标来描述若干各指标之间的联系，对原始资料进行简化，将多个实测变量转化为少数几个线性不相关的综合指标，用较少的综合指标来反映原始资料的大部分信息，使问题简化，并且更能反映因子体系的本质。

（4）T 检验

对不同粒径空气颗粒物浓度在晴天——阴天以及雨后的晴天——阴天进行独立样本T检验，以判断在晴天——阴天以及雨后的晴天——阴天情况下，不同粒径空气颗粒物的总体方差是否相同；进而判断空气颗粒物浓度在晴天阴天是否存在显著差异。

第三章　不同类型绿地空气颗粒物浓度的年变化动态分析

为了衡量四种粒径颗粒物之间相关程度的强弱、以便确定年变化、日变化的研究重点，首先分析一下TSP、PM10、PM2.5以及PM1之间的相关关系。

3.1　不同粒径空气颗粒物之间相关关系

将全年监测的空气颗粒物浓度原始数据进行分析，得到TSP、PM10、PM2.5、PM1之间的相关关系矩阵散点图（见图3-1）。

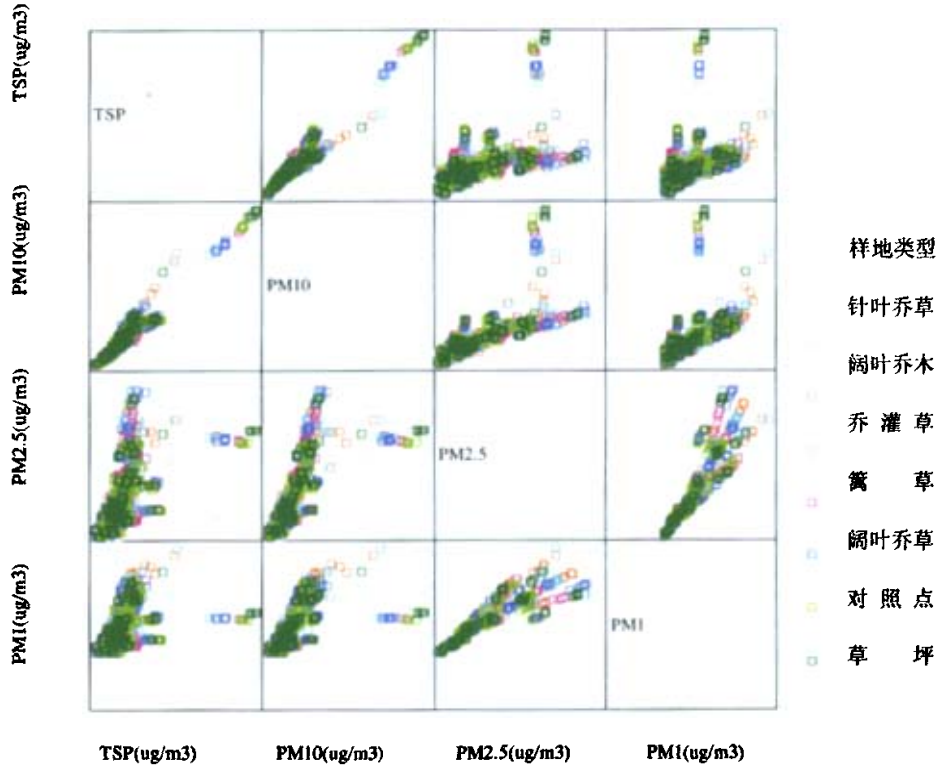


图 3-1 不同粒径空气颗粒物相关关系矩阵散点图
Fig. 3-1 Matrix scatterplot chart of air PM correlations

从图3-1可知，不同粒径空气颗粒物之间存在一定的相关关系。TSP与PM10之间的线性方程为：R^2=0.931，y=-35.594+0.684x；TSP与PM2.5之间的线性方程为：R^2=0.386，y=30.984+0.162x；TSP与PM1之间的线性方程为：R^2=0.257，y=20.555+0.04504x；PM10

与PM2.5之间的线性方程为：R^2=0.574, y=24.254+0.279x；PM10与PM1之间的线性方程为：R^2=0.432, y=16.925+0.08226x；PM2.5与PM1之间的线性方程为：R^2=0.827, y=7.967+0.309x。从判定系数R^2可知TSP与PM10、以及PM2.5与PM1的相关性很高；PM10与PM2.5的相关性次之；PM10与PM1、TSP与PM2.5、TSP与PM1之间的相关关系最低。

但是，一年之中的不同季节，不同粒径空气颗粒物之间的相关关系有差别。下面从全年和春夏秋冬四季对不同粒径空气颗粒物之间的相关关系进行分析。

3.1.1 TSP 与 PM10、PM2.5、PM1 的关系

表 3-1 表明了 TSP 与 PM10、PM2.5、PM1 之间的相关关系。

表 3-1 TSP 与 PM10、PM2.5、PM1 之间的相互关系

Table 3-1 Mutuality among TSP, PM10, PM2.5 and PM1

时间	颗粒物关系名称	样本量	复相关系数	回归方程	相伴概率	所占比例
全年	TSP 与 PM10	1176	R^2=0.931	y=-35.594+0.684x	0.000	60
	TSP 与 PM2.5	1176	R^2=0.386	y=30.984+0.162x	0.000	21
	TSP 与 PM1	1176	R^2=0.257	y=20.555+0.04504x	0.000	8
春季	TSP 与 PM10	315	R^2=0.986	y=-69.304+0.649x	0.000	55
	TSP 与 PM2.5	315	R^2=0.846	y=14.375+0.110x	0.000	13
	TSP 与 PM1	315	R^2=0.469	y=18.654+0.01957x	0.000	5
夏季	TSP 与 PM10	273	R^2=0.969	y=-134.327+0.939x	0.000	66
	TSP 与 PM2.5	273	R^2=0.675	y=-26.508+0.373x	0.000	29
	TSP 与 PM1	273	R^2=0.769	y=-9.208+0.127x	0.000	10
秋季	TSP 与 PM10	308	R^2=0.860	y=-87.033+0.782x	0.000	57
	TSP 与 PM2.5	308	R^2=0.578	y=-112.547+0.456x	0.000	18
	TSP 与 PM1	308	R^2=0.668	y=-29.932+0.137x	0.000	6
冬季	TSP 与 PM10	280	R^2=0.941	y=-47.694+0.758x	0.000	61
	TSP 与 PM2.5	280	R^2=0.803	y=-12.673+0.276x	0.000	22
	TSP 与 PM1	280	R^2=0.823	y=-9.203+0.145x	0.000	11

（1） TSP 与 PM10 之间的相关性在一年四季中都很高；PM10 在 TSP 中占有很大比例，全年平均值为 60%，四季中每季的平均值也都在 55%~66%之间。其中春季所占比例最低，夏季所占比例最高，说明春季粒径大于 10μm 的颗粒物在 TSP 中所占的比例大于其它月份、夏季粒径在 10μm 以下的颗粒物在 TSP 中所占比例高于其它季节，同时也表明 TSP 大部分由大粒径颗粒物组成。

（2） 从全年总体来说，TSP 与 PM2.5 的相关性不高，但是在不同时期相关性变化很大，其中春季 TSP 与 PM2.5 之间的相关性高于冬季、夏季，其相关系数秋季最低；PM2.5 在 TSP 中所占的比例低于 PM10 占 TSP 的比例，其年均值为 21%，夏季所占比例最高，为 29%。说明在夏季，TSP 的升高不会引起 PM2.5 的同步升高。

（3） 从全年总体来说，TSP 与 PM1 的相关性较低，但是在不同时期相关性变化很大，冬季 TSP 与 PM1 之间的相关性高于其它季节。

无论是PM10还是PM2.5，均是在春季与TSP的相关性最高，表明与其它季节相比，春季PM10、PM2.5随着TSP变动而变动的一致性最高。同时，无论是PM10还是PM2.5均是夏季占TSP的比例最高，表明与其它季节相比，夏季细颗粒物的含量最高。

3.1.2 PM10与PM2.5、PM1的关系

从全年总体来看，PM10与PM2.5和PM1的相关关系均是中度相关，但是在不同时期相关性差别很大（见表3-2）。

表3-2 PM10与PM2.5、PM1之间的相互关系
Table 3-2 Mutuality among PM10, PM2.5 and PM1

时间	颗粒物关系名称	样本量	复相关系数	回归方程	相伴概率	所占比例
全年	PM10与PM2.5	1176	R^2=0.574	y=24.254+0.279x	0.000	33
	PM10与PM1	1176	R^2=0.432	y=20.415+0.03079x	0.000	13
春季	PM10与PM2.5	315	R^2=0.888	y=24.673+0.172x	0.000	24
	PM10与PM1	315	R^2=0.496	y=20.415+0.03079x	0.000	9
夏季	PM10与PM2.5	273	R^2=0.704	y=25.981+0.399x	0.000	42
	PM10与PM1	273	R^2=0.810	y=8.278+0.136x	0.000	15
秋季	PM10与PM2.5	308	R^2=0.893	y=-86.482+0.672x	0.000	29
	PM10与PM1	308	R^2=0.915	y=-18.826+0.190x	0.000	10
冬季	PM10与PM2.5	280	R^2=0.837	y=5.649+0.360x	0.000	35
	PM10与PM1	280	R^2=0.823	y=1.46+0.185x	0.000	17

（1）PM10与PM2.5的相关关系是秋季最大夏季最小，PM10与PM1的相关关系是秋季最大春季最小。

（2）PM2.5在PM10中所占的比例是夏季最大春季最小，PM1在PM10中所占的比例是冬季最大春季最小。

（3）PM1占PM2.5的比例表明，PM10大部分由粒径2.5μm以上的大粒径颗粒物组成，夏季和冬季PM10中粒径小于2.5μm的细颗粒物含量最高，春季PM10中粒径大于2.5μm的大粒径颗粒物含量高。

3.1.3 PM2.5与PM1的关系

从全年总体来看，PM2.5与PM1的相关关系较高，但是在不同时期相关性有差别（见表3-3）。二者的复相关系数是秋冬季节高于春夏季节。PM1占PM2.5的比例也是秋冬季节高于春夏季节。表明一年之中的任何时期，PM2.5都是由粒径大于1μm的颗粒物组成的。同时也表明在冬季，PM1的升高会引起PM2.5的同步升高；夏季PM1的升高不一定会引起PM2.5的同步变动。

从上面的分析可得，TSP大部分由PM10组成，PM10大部分由粒径为2.5~10μm的颗粒物组成，PM2.5大部分由粒径为1~2.5μm的颗粒物组成。一年之中不同时期不同粒径之间的相关关系变化很大，从全年总体来看TSP与PM10的相关关系最大，其次是

PM2.5 与 PM1、PM10 与 PM2.5、PM10 与 PM1、TSP 与 PM2.5，TSP 与 PM1 的相关关系最小。也就是说，TSP 浓度的升降不一定引起其他三种粒径颗粒物浓度的同步变动。PM10 随着 TSP 的升高而增加，PM1 随着 PM2.5 的增加而升高；PM10 与 TSP 的浓度变化趋势基本一致、PM1 与 PM2.5 的浓度变化趋势基本一致；但是 TSP 或者 PM10 浓度的升高不一定会引起 PM2.5 或 PM1 浓度的同步提高，升降比例可能大也可能小。

表 3-3 PM2.5 与 PM1 之间的相互关系
Table 3-3 Mutuality between PM2.5 and PM1

时间	复相关系数	样本量	回归方程	相伴概率	所占比例（%）
全年	R^2=0.827	1176	y=7.967+0.309x	0.000	35
春季	R^2=0.776	315	y=12.528+0.21x	0.000	35
夏季	R^2=0.880	273	y=7.307+0.300x	0.000	34
秋季	R^2=0.945	308	y=6.816+0.272x	0.000	36
冬季	R^2=0.975	280	y=-1.209+0.512x	0.000	48

3.2 TSP 与 PM10 的年变化

从 3.1.1 分析结果可知，TSP 与 PM10 高度相关，因此不同类型绿地空气 PM10 浓度的变化情况与 TSP 基本一致，本文以 TSP 浓度的年变化情况为主，不再赘述 PM10 浓度的年变化情况。

3.2.1 总的年变化趋势

从 TSP 浓度的年变化曲线（见图 3-2）可以看出，不同类型绿地空气 TSP 浓度的年变化趋势比较接近，基本上是 2、7、11 月份浓度最低，1、3、5、6、8、9、10、12 月份次高，4 月份浓度最高。TSP 浓度的这种变化与气候变化、植物生长状况相吻合（具体分析见 3.2.2.1~3.2.2.4）。

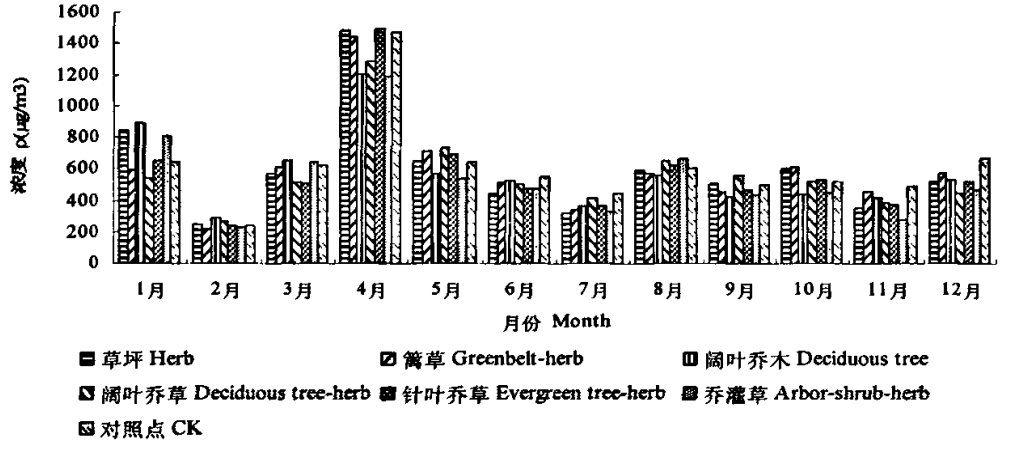


图 3-2 不同类型城市绿地空气 TSP 浓度的年变化
Fig. 3-2 Year variety of air TSP concentration in different types of urban green-lands

为了探究 TSP 浓度的四季变化差异是否显著，对 TSP 浓度在不同季节的变化情况进行方差分析（见表 3-4），发现相伴概率值<0.01，也就是说 TSP 浓度在不同季节存在极显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 3-5）。结果表明，TSP 浓度秋季最低、春季最高，春季不同类型绿地空气 TSP 浓度极显著高于夏季、秋季和冬季的，夏季、秋季和冬季的 TSP 浓度没有显著差异。

表 3-4 方差分析
Table 3-4 Analysis of variation

方差来源	自由度	平方和	F 值	相伴概率
因　素 A	3	3.3E+08	76.937	0.000
随机误差	1169	1.7E+08		
总　　和	1172	2.0E+08		

表 3-5 多重比较　　单位：μg/m³
Table 3-5 Multiple comparisons

季节	平均值	最大值	最小值	Xi-467.02	Xi-504.39	Xi-507.25
春季	871.23	2918.20	253.70	404.21**	366.84**	363.98**
夏季	507.25	890.20	98.90	40.23	2.86	
冬季	504.39	1534.70	177.20	37.37		
秋季	467.02	987.70	96.80			

注：**在 0.01 水平上差异显著。

3.2.2 不同类型绿地的变化情况

为了探究 TSP 浓度在不同类型绿地中是否存在差异，对全年 TSP 浓度在不同类型绿地中的情况进行方差分析，得出 F 值为 0.644，相伴概率为 0.695>0.05，TSP 浓度在不同类型绿地中没有显著差异。其原因可能与大学校园内整体环境相差不大有关。

表 3-6 不同类型城市绿地空气 TSP 浓度的全年均值
Table 3-6 Year average of air TSP concentration in defferent types of urban green-land

绿地类型	草　坪	篱　草	阔叶乔木	阔叶乔草	针叶乔草	乔灌草	对照点
均值（μg/m³）	604.97	611.42	578.97	582.16	592.98	551.81	632.23

从表 3-6 可知，按照均值对 TSP 浓度进行排序，其大小顺序为：对照>篱草>草坪>针叶乔草>阔叶乔草>阔叶乔木>乔灌草。但是从 TSP 浓度的年变化图（见图 3-2）可以看出，一年之中 TSP 浓度的变化很大，又由于植物生长有一定的季节性，因此下面将从四个季节对不同类型绿地空气 TSP 浓度的变化情况进行分析。

3.2.2.1 春季

为了探究 TSP 浓度在春季是否存在显著差异，对春季 TSP 浓度进行方差分析，得出 F 值为 0.302、相伴概率为 0.935>0.05，从总的 TSP 浓度变化来看，春季不同类型绿地空气 TSP 浓度没有显著差异。

北京春季风沙大、气候干旱、沙尘暴频繁且主要集中于 3、4 月份；根据 2006 年国家环保总局的重点城市质量日报（国家环境保护总局，2006），北京 3 级、4 级和 5 级污染天数在 3 月份共有 11 天，在 4 月份有 21 天，而且北京地区 4 月 16 日～17 日总降尘达到 33 万吨，有人戏称"在北京买房等同于提前进驻撒哈拉"（中国新闻网，2006）。春季风沙对 TSP 的贡献，导致 4 月份 TSP 浓度最高，所有样地中空气 TSP 浓度的最大值均出现在 4 月份。

从不同类型绿地空气 TSP 浓度变化来看，春季，TSP 浓度的大小顺序为：篱草>对照>草坪>针叶乔草>阔叶乔草>阔叶乔木>乔灌草（见表 3-7）。从表 3-7 可以发现，由阔叶树组成的绿地内空气 TSP 浓度的均值标准误较小、离差小，颗粒物浓度相对稳定。

春季植物进入生长期，树木郁闭度和草坪的覆盖度逐渐增加，3 月中旬供暖停止、落叶树木从休眠转入生长期。3 月份阔叶乔草、针叶乔草绿地内空气 TSP 浓度最低，4、5 月份均是以灌木为主的乔灌草绿地内空气 TSP 浓度最低。一方面，由于高大树木降低了林内的风速，利于颗粒物的沉降。根据原始资料统计，针叶乔草、阔叶乔草内的最大风速仅为草坪、对照点以及篱草内风速的 50%~60%，乔灌草内的风速仅为草坪、对照点以及篱草内风速的 75%~90%；另一方面，树叶、树枝、树干都对尘土起到了降尘、滞尘作用，林下覆草也减轻了二次扬尘。

表3-7 春季不同类型城市绿地空气TSP浓度的比较　　单位：$\mu g/m^3$

Table 3-7 Comparisons of air TSP concentration in spring

绿地类型	均　值	均值标准误差	最小值	最大值
草　　坪	905.04	113.08	365.10	2918.20
篱　　草	924.35	100.35	405.60	2700.40
阔叶乔木	810.13	81.48	299.80	2239.20
阔叶乔草	850.39	88.01	349.30	2389.50
针叶乔草	902.31	111.15	388.40	2898.00
乔 灌 草	791.60	81.68	253.70	2226.40
对 照 点	914.82	103.10	351.50	2757.80

3.2.2.2　夏季

为了探究 TSP 浓度在夏季是否存在显著差异，对夏季 TSP 浓度进行方差分析，得出 F 值为 0.61、p 为 0.722>0.05，从总的 TSP 浓度变化来看，夏季不同类型绿地空气 TSP 浓度没有显著差异。

本次观测的夏季绿地内颗粒物浓度较低，可能受多种因素的影响。一是植物生长进入旺盛期，代谢旺盛，林内郁闭度和草坪的覆盖度都达到最高，植物起到了很好的滞尘作用；二是实验期间的平均风速和最大风速都高于春季，风对颗粒物的疏散作用很大；三是夏季的降水量多，降水起到了湿沉降的作用——许多颗粒物充当了降水凝结核，然后随着降水降落到地面，而雨滴在下降的过程中碰撞、捕获了一部分颗粒物，使得空气中的颗粒物浓度减少，特别是 7 月份，几乎每天晚上一场雨。8 月份的雨量比 7 月份的少、

湿度比9月份大，湿度与TSP浓度呈负相关关系，导致8月份浓度高9月份浓度低。

从不同类型绿地内空气TSP浓度变化来看，夏季，TSP浓度的大小顺序为对照>阔乔草>针叶乔草>乔灌草>篱草>阔叶乔木>草坪（见表3-8）。从表3-8可以发现，所有地空气TSP浓度均值标准误的大小都差不多、小于春季，也说明夏季TSP浓度离差小颗粒物浓度相对稳定。

夏季草坪、篱草中的风速最大，平均风速为0.3~1.5m/s，针叶乔草、阔叶乔草、乔草、阔叶乔木中的风速较小，平均风速为0~0.6m/s，而风对TSP的扩散作用很重要；灌草内的湿度比草坪、篱草、对照点的高出10%，高温高湿不仅不利于颗粒物的扩散反而利于颗粒物的形成。因此，在夏季高温高湿的情况下，相对空旷的地方——草坪篱草内，空气对流性好，TSP浓度低于郁闭度较高、空气对流性差的针叶乔草、阔叶草以及乔灌草内空气TSP浓度。

表3-8 夏季不同类型城市绿地空气TSP浓度的比较 单位：μg/m³

Table 3-8 Comparisons of air TSP concentrations in summer

绿地类型	均 值	均值标准误差	最小值	最大值
草 坪	471.68	30.19	99.10	828.70
篱 草	496.38	30.85	136.80	854.10
阔叶乔木	493.66	32.48	197.30	839.00
阔叶乔草	538.95	35.20	98.90	836.10
针叶乔草	503.71	31.55	115.80	780.20
乔灌草	502.44	37.89	149.50	888.20
对照点	542.28	30.60	200.60	890.20

3.2.2.3 秋季

为了探究TSP浓度在秋季是否存在显著差异，对秋季TSP浓度进行方差分析，得F值为2.911、p为0.009<0.01，从总的TSP浓度变化来看，秋季不同类型绿地空气T浓度存在显著差异。用LSD方法分别在α=0.05和α=0.01水平上进行多重比较（见表3-9结果表明，乔灌草内空气TSP浓度极显著低于对照点、草坪、篱草、阔叶乔草空气T的浓度，阔叶乔木内空气TSP浓度显著低于篱草和对照点内空气TSP浓度。

表3-9 多重比较 单位：μg/m³

Table 3-9 Multiple comparisons

绿地类型	均 值	Xi-385.21	Xi-419.87	Xi-460.60	Xi-487.49	Xi-489.46	Xi-502.
篱 草	511.05	125.84**	91.18*	50.45	23.56	21.59	8.43
对照点	502.62	117.41**	82.75*	42.02	15.13	13.16	
阔叶乔草	489.46	104.25**	69.59	28.86	1.97		
草 坪	487.49	102.28**	67.62	26.89			
针叶乔草	460.60	75.39	40.73				
阔叶乔木	419.87	34.66					
乔灌草	385.21						

注：*在0.05水平上差异显著，**在0.01水平上差异显著。

从不同类型绿地空气TSP浓度变化来看，秋季，TSP浓度的大小顺序为：篱草>>阔叶乔草>草坪>针叶乔草>阔叶乔木>乔灌草（见表3-10）。从表3-10可以发现，样地内空气TSP浓度均值标准误的大小都差不多、小于春季、夏季，也说明秋季空气浓度离差小，颗粒物浓度最稳定。

北京的秋季天高气爽，利于颗粒物的输送和扩散，因此一年之中秋季TSP浓度从图3-2看到，TSP浓度在10月份稍有升高，但从原始数据来看，10月中下旬浓度高、上旬较高，原因可能是国庆节前后游玩的人数增多。

秋季叶片自然脱落、落叶树由生长期进入休眠期，乔灌草、阔叶乔草、阔叶乔的郁闭度逐渐降低，透气性好于夏季；对照点、草坪内的平均风速最大，分别为0~1和0~0.9m/s，乔灌草内的平均风速最小，为0~0.3m/s；所有样地内湿度的差别小于不到10%。天高气爽的大环境、加上透气性好的小环境，使得秋季乔灌草内空气T度最低。

表3-10 秋季不同类型城市绿地空气TSP浓度的比较 单位：$\mu g/m^3$

Table 3-10 Comparisons of air TSP concentrations in autumn

绿地类型	均 值	均值标准误差	最小值	最大值
草 坪	487.49	26.02	160.60	794.9(
篱 草	511.05	21.48	292.00	766.0(
阔叶乔木	419.87	23.21	96.80	684.9(
阔叶乔草	489.46	32.52	148.60	987.7(
针叶乔草	460.60	27.61	179.70	813.4(
乔灌草	385.21	27.85	127.70	738.0(
对照点	502.62	26.83	196.10	814.2(

3.2.2.4 冬季

为了探究TSP浓度在冬季是否存在显著差异，对冬季TSP浓度进行方差分析，F值为1.602、p为0.147>0.05，从总的TSP浓度变化来看，冬季不同类型绿地空气浓度没有显著差异。

北京冬季漫长，雾天和逆温层出现的天数较多，不利于颗粒物的扩散，使颗粒渐积累、浓度逐渐增大，再加上年底人们繁忙，使1月份TSP浓度高于12月份。春后，单位都放假了，人们都回家过年，机动车和人的活动减少导致2月份的TSP浓从不同类型绿地空气TSP浓度变化来看，冬季，TSP浓度的大小顺序为：阔叶乔木>>草坪>乔灌草>篱草>针叶乔草>阔叶乔草（见表3-11）。从表3-11可以发现，所有内空气TSP浓度均值标准误的大小都差不多，比春季的小、比夏秋季的大，也说明TSP浓度不如夏季稳定。

冬季，落叶植物进入相对休眠期，常绿树种的优势开始体现出来，以常绿树为针叶乔草以及以常绿树为付的阔叶乔草、乔灌草内空气TSP浓度较低。对照点、草

阔叶乔木内空气 TSP 浓度较高。

表3-11 冬季不同类型城市绿地空气TSP浓度的比较 单位：μg/m³

Table 3-11 Comparisons of air TSP concentrations in winter

绿地类型	均 值	均值标准误差	最小值	最大值
草 坪	529.91	39.20	228.90	1288.90
篱 草	484.46	33.18	188.80	1000.70
阔叶乔木	560.89	43.53	177.20	1484.40
阔叶乔草	427.87	20.54	208.00	630.20
针叶乔草	483.20	36.41	208.00	1417.90
乔 灌 草	494.33	41.56	208.90	1534.70
对 照 点	550.06	35.55	210.10	916.30

3.3 PM2.5 与 PM1 的年变化

从 3.1.3 分析结果可知，PM2.5 与 PM1 高度相关，因此不同类型绿地空气 PM1 浓度的变化情况与 PM2.5 基本一致，本文以 PM2.5 浓度的年变化情况为主，不再赘述 PM1 浓度的年变化情况。

3.3.1 总的年变化趋势

从 PM2.5 浓度的年变化曲线（见图 3-3）可以看出，不同类型绿地空气中空气 PM2.5 浓度的年变化趋势比较接近，基本上是 2、11、3、9 月份浓度最低，4、6、8、10、12 月份次高，5、7 月份居中，1 月份浓度最高。PM2.5 浓度的这种变化与气候变化、植物生长状况相吻合。

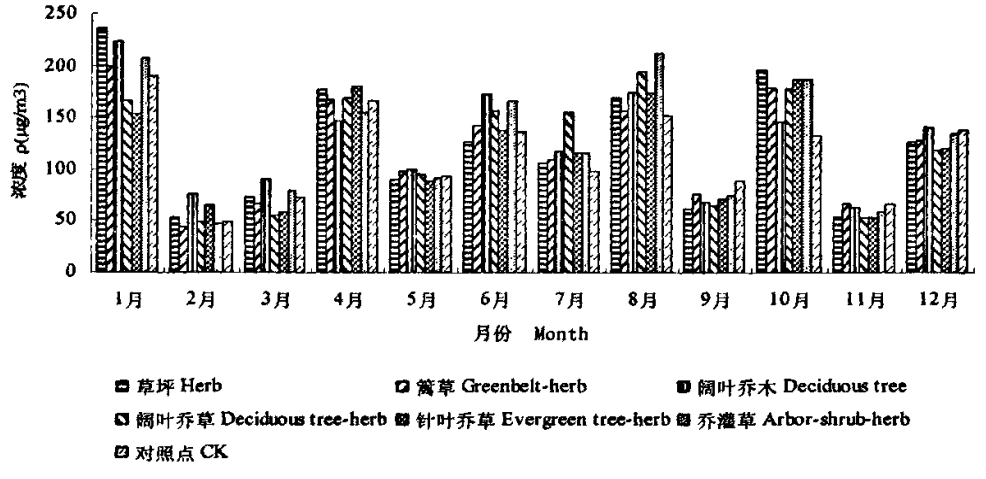


图 3-3 不同类型城市绿地空气 PM2.5 浓度的年变化

Fig. 3-3 Year variety of air PM2.5 concentration in different types of urban green-lands

为了探究 PM2.5 浓度的四季变化差异是否显著，对空气中 PM2.5 浓度在不同季节的变化情况进行方差分析（见表 3-12），发现相伴概率值<0.01，也就是说 PM2.5 浓度在不

同季节存在显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 3-13）。结果表明，PM2.5 浓度秋季最低、夏季最高；夏季不同类型绿地空气 PM2.5 浓度极显著高于春季、秋季和冬季的；冬季不同类型绿地空气 PM2.5 浓度极显著高于秋季，显著高于春季。春季、秋季不同类型绿地空气 PM2.5 浓度没有显著差异。这一季节变化，与前人所研究的冬季 PM2.5 浓度最高的结果有区别（杨复沫等，2002），同时也说明现在北京实施的大气污染防治措施——改造燃煤锅炉、提高机动车排放标准（北京市环境保护局，2004）已经起到了好的效果。

表 3-12　方差分析

Table 3-12 Analysis of variation

方差来源	自由度	平方和	F 值	p 值
因　素 A	3	404997	15.790	0.000
随机误差	1169	9994230		
总　　和	1172	1.0E+07		

表 3-13 多重比较　　单位：$\mu g/m^3$

Table 3-13 Multiple comparisons

季节	平均值	最大值	最小值	Xi-100.45	Xi-110.21	Xi-127.51
夏季	149.88	404.11	15.67	49.43**	39.67**	22.37**
冬季	127.51	355.29	24.57	27.06**	17.3*	
春季	110.21	327.16	30.45	9.76		
秋季	100.45	449.09	7.64			

注：*在 0.05 水平上差异显著，**在 0.01 水平上差异极显著。

3.3.2　不同类型绿地的变化情况

为了探究 PM2.5 浓度在全年是否存在显著差异，对全年空气中 PM2.5 浓度在不同类型绿地中的情况进行方差分析，得出 F 值为 0.246，相伴概率为 0.961>0.05，PM2.5 浓度在不同类型绿地中没有显著差异。其可能与大学校园内整体环境相差不大有关。

从表 3-14 可知，按照均值将 PM2.5 浓度进行排序，其大小顺序为：乔灌草>阔叶乔木>草坪>阔叶乔草>篱草>针叶乔草>对照。乔灌草和阔叶乔木型绿地位于清华西门附近、其它样地位于清华东门附近，相对于清华东门来说，清华西门附近的小饭店和依靠煤炭燃烧来取暖的房子多；而且清华西门附近有一个加油站。煤炭燃烧使大气中 S 元素的浓度增加、汽油挥发使大气中 Pb 元素的浓度增加，而 S 和 Pb 都是北京细粒子的主要来源。乔灌草和阔叶乔木林离清华西门较近，受煤炭燃烧和汽油挥发影响较大，PM2.5 的浓度一直受到影响。因此，受客观影响的原因，乔灌草、阔叶乔木林内的空气 PM2.5 浓度一直较大。

表 3-14 不同类型城市绿地空气 PM2.5 浓度的全年均值

Table 3-14 Year average of air PM2.5 concentration in defferent types of urban green-land

绿地类型	草　坪	篱　草	阔叶乔木	阔叶乔草	针叶乔草	乔灌草	对照点
均值（μg/m^3）	122.05	119.51	125.11	121.04	117.71	126.01	116.19

从 PM2.5 浓度的年变化图（见图 3-3）可以看出，一年之中 PM2.5 浓度的变化很大，又由于植物生长有一定的季节性，因此下面将从四个季节对不同类型绿地空气 TSP 浓度的变化情况进行分析。

3.3.2.1　春季

为了探究 PM2.5 浓度在春季是否存在显著差异，对春季 PM2.5 浓度进行方差分析，得出 F 值为 0.042、p 为 1.000>0.05，从总的 PM2.5 浓度变化来看，春季不同类型绿地空气 PM2.5 浓度没有显著差异。

相对于 TSP 和 PM10 而言，PM2.5 和 PM1 受人为影响较大，机动车排放和煤炭燃烧对 PM2.5 和 PM1 的贡献较大。进入春季，天气干燥以及沙尘暴引起的土壤粒子逐渐增加，春季频繁发生的沙尘天气对土壤尘细粒子有重要贡献，PM2.5、PM1 的浓度也逐渐增加。但是由于 PM2.5 和 PM1 与 TSP 的相关性不高、占 TSP 的比例较小，没有随着 TSP 浓度在 4 月份的急剧增加而升高，PM2.5 的浓度在 4 月份没有达到一年中的最高点，低于 1 月份的浓度。

从不同类型绿地内空气 PM2.5 浓度变化来看，春季，PM2.5 浓度的大小顺序为：草坪>阔叶乔木>篱草>对照>针叶乔草>阔叶乔草>乔灌草（见表 3-15）。从表 3-15 可以发现，PM2.5 浓度的均值标准误较小、离差小，颗粒物浓度相对稳定。

表3-15 春季不同类型城市绿地空气PM2.5浓度的比较　　单位：μg/m^3

Table 3-15 Comparisons of air PM2.5 concentration in spring

绿地类型	均　值	均值标准误差	最小值	最大值
草　坪	113.26	12.51	34.14	327.16
篱　草	110.83	10.85	41.40	297.90
阔叶乔木	112.69	11.58	40.38	310.06
阔叶乔草	106.43	11.81	44.67	303.53
针叶乔草	109.09	12.78	40.43	327.03
乔灌草	108.52	11.62	30.45	308.92
对照点	110.62	10.71	34.29	290.73

春季，TSP 与 PM2.5 的关系大于其他季节、而且春季 PM2.5 占 TSP 的比例最小。不同类型绿地空气 PM2.5 的变化情况与 TSP 的变化情况近似，都是针叶、阔叶乔草和乔灌草内空气颗粒物浓度低、草坪、篱草内浓度高；与 TSP 浓度不同的是，阔叶乔木内空气 PM2.5 浓度较高，原因可能是阔叶乔木型样地四周居民较多，做饭的小炉灶较多。

3.3.2.2 夏季

为了探究 TSP 浓度在夏季是否存在显著差异，对夏季 PM2.5 浓度进行方差分析，得出 F 值为 0.801、p 为 0.570>0.05，从总的 PM2.5 浓度变化来看，夏季不同类型绿地空气 PM2.5 浓度没有显著差异。

PM2.5 在大气中的寿命最长，主要靠降水冲刷和重力沉降作用清除，夏季雨量大、降水次数多，PM2.5 浓度本应该降低却升高了，原因可能是夏季温度高、湿度大、日照时间长，光化学反映尤其活跃，生成了更多的粒径较小的二次性气溶胶。而且，许多游客在 7、8 月份慕名前往清华大学参观、学习，这也增加了 PM2.5 的浓度，由于 7 月份降水量大于 8 月份，使得 7 月份的浓度低于 8 月份。

从不同类型绿地内空气 PM2.5 浓度变化来看，夏季，PM2.5 浓度的大小顺序为阔叶乔草>乔灌草>阔叶乔木>针叶乔草>篱草>草坪>对照（见表 3-16）。从表 3-16 可以发现，乔灌草、阔叶乔木内空气 PM2.5 浓度的均值标准误大于其它绿地空气 PM2.5 浓度，所有样地内空气 PM2.5 浓度均值标准误大于春季，也说明夏季 PM2.5 浓度离差大，PM2.5 浓度不如春季相对稳定。

夏季草坪、篱草中的风速最大，平均风速为 0.3~1.5m/s，针叶乔草、阔叶乔草、乔灌草、阔叶乔木中的风速较小，平均风速为 0~0.6m/s，风速小使得体积小、质量轻的细颗粒物很难在短时间内被清除；而且乔灌草内的湿度比草坪、篱草、对照点的高出 10%，高温高湿不仅不利于颗粒物的扩散、反而利于颗粒物的形成。因此，在夏季高温高湿的情况下，相对空旷的地方——草坪、篱草内，空气对流性好，PM2.5 浓度低于郁闭度较高、空气对流性差的针叶乔草、阔叶乔草以及乔灌草内的空气 PM2.5 浓度。

表3-16 夏季不同类型城市绿地空气PM2.5浓度的比较 单位：$\mu g/m^3$

Table 3-16 Comparisons of air PM2.5 concentration in summer

绿地类型	均 值	均值标准误差	最小值	最大值
草 坪	137.79	13.73	19.24	267.82
篱 草	138.54	15.618	21.29	304.02
阔叶乔木	158.36	20.805	24.61	404.11
阔叶乔草	170.56	17.52	15.67	339.14
针叶乔草	145.79	14.56	15.93	282.64
乔 灌 草	167.00	20.71	22.34	365.52
对 照 点	132.73	15.42	24.57	284.57

3.3.2.3 秋季

为了探究 TSP 浓度在秋季是否存在显著差异，对秋季 PM2.5 浓度进行方差分析，得出 F 值为 0.144、p 为 0.990>0.05，从总的 PM2.5 浓度变化来看，秋季不同类型绿地空气 PM2.5 浓度没有显著差异。

北京的秋季天高气爽，利于颗粒物的输送和扩散，因此一年之中秋季空气 PM2.5 浓度最低。从图 3-3 看到，PM2.5 浓度在 10 月份稍有升高，但从原始数据来看，10 月中下

旬浓度都不高、上旬较高，原因可能是国庆节前后游玩的人数增多。

从不同类型绿地内空气 PM2.5 浓度变化来看，秋季，PM2.5 浓度的大小顺序为：篱草>草坪>针叶乔草>乔灌草>阔叶乔草>对照>阔叶乔木（见表 3-17）。从表 3-17 可以发现，所有样地内空气 PM2.5 浓度均值标准误大于春季，也说明秋季 PM2.5 浓度离差大，PM2.5 浓度不如春季相对稳定。

秋季叶片自然脱落、落叶树由生长期进入休眠期，乔灌草、阔叶乔草、阔叶乔木内的郁闭度逐渐降低，透气性好于夏季；对照点、草坪内的平均风速最大，分别为 0~1.1m/s 和 0~0.9m/s，乔灌草内的平均风速最小，为 0~0.3m/s；所有样地内湿度的差别小于夏季，不到 10%。天高气爽的大环境、加上透气性好的小环境，使得秋季阔叶乔草、乔灌草内的空气 PM2.5 浓度较低。对照点、阔叶乔木内空气 PM2.5 浓度是最低的，可能因为这两块样地都是硬化路面，大粒径颗粒物占的比例高、小粒径颗粒物的比例相对小。

表3-17 秋季不同类型城市绿地空气PM2.5浓度的比较　　单位：$\mu g/m^3$

Table 3-17 Comparisons of air PM2.5 concentration in autumn

绿地类型	均　值	均值标准误差	最小值	最大值
草　坪	104.85	17.75	11.93	420.89
篱　草	107.17	14.88	18.89	385.07
阔叶乔木	88.81	13.49	7.64	326.99
阔叶乔草	99.05	18.15	10.63	441.21
针叶乔草	103.79	18.88	11.71	449.09
乔灌草	103.02	18.80	10.68	443.03
对照点	95.81	12.08	12.88	284.21

3.3.2.4　冬季

为了探究 TSP 浓度在冬季是否存在显著差异，对冬季 PM2.5 浓度进行方差分析，得出 F 值为 0.957、p 为 0.455>0.05，从总的 PM2.5 浓度变化来看，冬季不同类型绿地空气 PM2.5 浓度没有显著差异。

北京冬季漫长，雾天和逆温层出现的天数较多，不利于颗粒物的扩散，使颗粒物逐渐积累、浓度逐渐增大，再加上年底人们繁忙，使 1 月份 TSP 浓度高于 12 月份。春节前后，机动车和人的活动减少导致 2 月份的 PM2.5 浓度低。

从不同类型绿地内空气 PM2.5 浓度变化来看，冬季，PM2.5 浓度的大小顺序为：阔叶乔木>草坪>乔灌草>对照>篱草>针叶乔草>阔叶乔草（见表 3-18）。从下表我们可以发现，针叶乔草内空气 PM2.5 浓度均值标准误最小，说明冬季针叶乔草内空气 PM2.5 浓度离差小，颗粒物浓度最稳定。

冬季，落叶植物进入相对休眠期，常绿树种的优势开始体现出来，以常绿树为主的针叶乔草以及以常绿树为付的阔叶乔草内空气 PM2.5 浓度最低。

表3-18 冬季不同类型城市绿地空气PM2.5浓度的比较 单位：μg/m³

Table 3-18 Comparisons of air PM2.5 concentration in winter

绿地类型	均 值	均值标准误差	最小值	最大值
草 坪	135.11	12.62	26.99	315.39
篱 草	124.61	11.21	26.02	243.21
阔叶乔木	145.51	13.37	24.57	355.29
阔叶乔草	112.71	10.17	27.76	253.13
针叶乔草	115.01	8.82	29.19	235.69
乔 灌 草	130.76	13.87	25.57	354.64
对 照 点	128.84	10.52	28.12	237.28

3.4 小结

（1）不同类型绿地空气颗粒物浓度在季节分布上差异显著，这四种粒径颗粒物浓度均是在秋季最低。TSP、PM10 浓度秋季最低、春季最高，春季不同类型绿地空气 TSP、PM10 浓度极显著高于其它三季，夏季、秋季和冬季之间没有显著差异。PM2.5、PM1 浓度秋季最低、夏季最高，夏季不同类型绿地空气 PM2.5 浓度极显著高于春季、秋季和冬季；冬季不同类型绿地空气 PM2.5 浓度极显著高于秋季、显著高于春季，春季、秋季之间没有显著差异。PM2.5 的这一季节变化，与前人所研究的冬季 PM2.5 浓度最高的结果有区别（杨复沫等，2002），这也说明北京实施的大气污染防治措施——改造燃煤锅炉、提高机动车排放标准（北京市环境保护局，2004）已经起到了好的效果。

在春夏秋冬四季将这七块样地内这四种粒径空气颗粒物浓度做一比较可以发现，春、秋、冬季有乔木的绿地内这四种粒径空气颗粒物浓度较低，夏季草坪内这四种粒径颗粒物浓度最低。采取措施增加城市林木数量，建设植物组成合理的复层结构绿地，可能不仅可以起到很好的降尘、滞尘作用，而且能有效减少二次扬尘，对提高城市空气质量也非常有益。

（2）只有在秋季不同类型绿地之间空气 TSP、PM10 浓度存在显著差异，在其它季节这四种粒径颗粒物在不同类型绿地之间均没有显著差异。秋季，乔灌草内空气 TSP、PM10 浓度极显著低于对照、草坪、篱草、阔叶乔草内空气 TSP、PM10 的浓度，阔叶乔木内空气 TSP、PM10 浓度显著低于篱草和对照内空气 TSP、PM10 浓度。

（3）不同类型绿地空气颗粒物浓度的年变化趋势比较接近，但不同粒径颗粒物浓度出现高低值的月份不尽一致。这四种粒径颗粒物浓度最低值均出现在 2 月份、11 月份；而 TSP、PM10 浓度的最高值出现在沙尘暴肆虐的 4 月份、PM2.5、PM1 浓度的最高值出现在 1 月份。

第四章　不同类型绿地空气颗粒物浓度的日变化动态分析

不同类型绿地空气颗粒物浓度的日变化特征是在非采暖季节（7 月下旬）和采暖季节（11 月下旬）分别进行。

4.1　TSP 与 PM10 的日变化

从 3.1.1 分析结果可知，TSP 与 PM10 高度相关，因此不同类型绿地空气 PM10 浓度的变化情况与 TSP 基本一致，本文以 TSP 浓度的日变化情况为主，不再赘述 PM10 浓度的日变化情况。

4.1.1　草坪

4.1.1.1　非采暖期

非采暖期草坪内空气 TSP 浓度日变化见图 4-1、草坪内温湿度、风速日变化见图 4-2。由图 4-1 可知，1 日中草坪内空气 TSP 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 09:00，低谷值在 13:00。从这两个图也可以看出，TSP 浓度与温度呈负相关关系、与湿度呈正相关关系。

影响空气颗粒物浓度日变化的主要因素是污染源的排放情况、人的活动和气象因素。一般来讲，清晨是人们活动、居民小炉灶、交通运输等大量污染源低空排放的高峰期；日出后太阳辐射增强，地面温度逐渐升高，大气容易处于不稳定状态，特别是 11:00~14:00 时最不稳定，大气的湍流交换和垂直扩散能力加强，有利于颗粒物的扩散和输送；傍晚，人们下班，车流量增加，颗粒物浓度呈现上升的趋势；夜晚，空气层较稳定，不利于污染物的扩散。而在草坪绿地内，09:00 前后出现次高峰可能与上班时间、车辆行驶高峰有关；07:00 以后，温度逐渐升高、湿度逐渐降低，13:00 出现一天中的最高温，此时空气层不稳定，有利于颗粒物的扩散和输送，颗粒物浓度最低，产生低谷；13:00 以后温度逐渐降低，湿度逐渐升高，大气稳定度也逐渐增强；17:00 前后，学生放学，使得人流量和车流量增加，颗粒物浓度上升的趋势较大；19:00 以后温度继续下降，到 21:00 降至最低点，而湿度逐渐上升，到 21:00 升至一天中的次高点。低温高湿加上微风使得大气稳定，不利于颗粒物扩散和输送，造成 21:00 的最大峰值。

从图 4-1 还可以看出，在 09:00~17:00 草坪内空气 TSP 浓度在我国《环境空气质量标准》（GB3095－1996）的一级标准以下，其它时间段 TSP 浓度均在一级、二级标准之间。

因此 09:00~17:00 草坪内空气 TSP 对人的危害最小。但从早、晚来看，早上 07:00 只是略高于一级标准，比晚上要好。

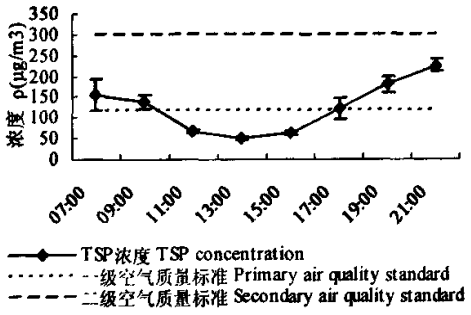


图 4-1 非采暖期草坪内空气 TSP 浓度日变化
Fig.4-1 Daily variation of TSP concentration in non-heating period in herb

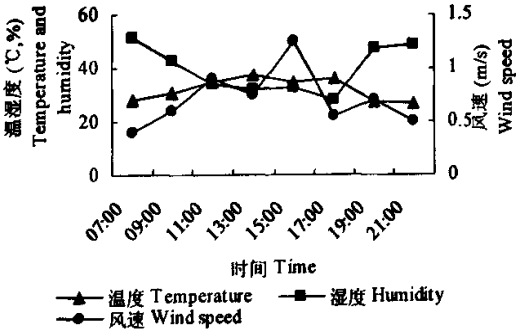


图 4-2 非采暖期草坪内温湿度、风速日变化
Fig.4-2 Daily variation of temperature, humidity, wind speed in non-heating period in herb

4.1.1.2 采暖期

采暖期草坪内空气 TSP 浓度日变化见图 4-3、草坪内温湿度、风速日变化见图 4-4。由图 4-3 可知，1 日中草坪内空气 TSP 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 07:00，低谷值在 11:00。从这两个图也可以看出，TSP 浓度与温度呈负相关关系、与湿度呈正相关关系。

在草坪绿地内，TSP 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 TSP 浓度出现高峰或低谷的原因。

从图 4-3 还可以看出，11:00 草坪内空气 TSP 浓度在我国《环境空气质量标准》（GB3095－1996）的一级标准以下，09:00、13:00 至 17:00 TSP 浓度在一级、二级标准之间，07:00、19:00 至 21:00 TSP 浓度在二级标准以上。因此 09:00~17:00 草坪内空气 TSP 对人的危害最小。但是早晚对比同样是早上好于晚上。

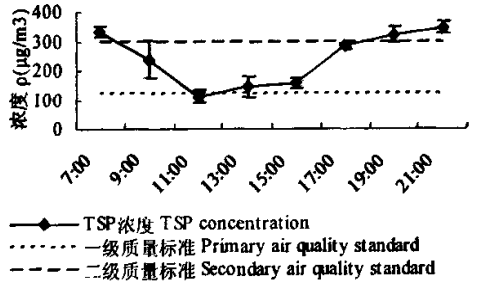


图 4-3 采暖期草坪内空气 TSP 浓度日变化
Fig.4-3 Daily variation of TSP concentration in heating period in herb

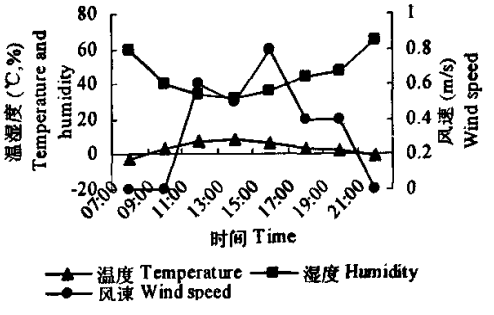


图 4-4 采暖期草坪内温湿度、风速日变化
Fig.4-4 Daily variation of temperature, humidity, wind speed in heating period in herb

4.1.2　篱草

4.1.2.1　非采暖期

非采暖期篱草内空气 TSP 浓度日变化见图 4-5、篱草内温湿度、风速日变化见图 4-6。由图 4-5 可知，1 日中篱草内空气 TSP 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 07:00，低谷值在 15:00。从这两个图也可以看出，TSP 浓度与温度呈负相关关系、与湿度呈正相关关系。

在篱草绿地内，TSP 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 TSP 浓度出现高峰或低谷的原因。

从图 4-5 还可以看出，在 09:00 至 17:00 篱草内空气 TSP 浓度均在我国《环境空气质量标准》（GB3095－1996）的一级标准以下，其它时间段 TSP 浓度均在一级、二级标准之间。因此 09:00 至 17:00 篱草内空气 TSP 对人的危害最小。但是早晚对比同样是早上好于晚上。

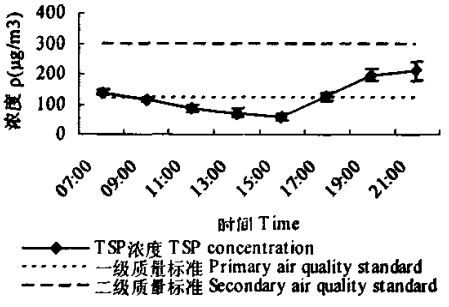


图 4-5 非采暖期篱草内空气 TSP 浓度日变化
Fig.4-5 Daily variation of TSP concentration in non-heating period in greenbelt-herb

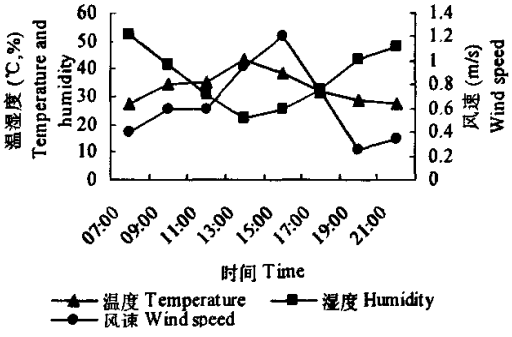


图 4-6 非采暖期篱草内温湿度、风速日变化
Fig.4-6 Daily variation of temperature, humidity, wind speed in non-heating period in greenbelt-herb

4.1.2.2　采暖期

采暖期篱草内空气 TSP 浓度日变化见图 4-7、篱草内温湿度、风速日变化见图 4-8。由图 4-8 可知，1 日中篱草内空气 TSP 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 07:00，低谷值在 11:00。从这两个图也可以看出，TSP 浓度与温度呈负相关关系、与湿度呈正相关关系。

在篱草绿地内，TSP 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 TSP 浓度出现高峰或低谷的原因。

从图 4-8 还可以看出，11:00 篱草内空气 TSP 浓度在我国《环境空气质量标准》（GB3095－1996）的一级标准以下，09:00、13:00 至 17:00 TSP 浓度在一级、二级标准之间，07:00、19:00 至 21:00 TSP 浓度在二级标准以上。因此 09:00~17:00 篱草内空气 TSP 对人的危害最小。但是早晚对比同样是早上好于晚上。

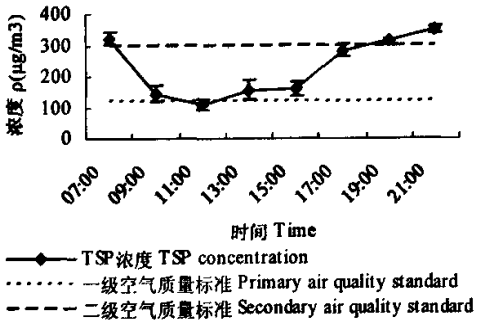


图 4-7 采暖期篱草内空气 TSP 浓度日变化
Fig.4-7 Daily variation of TSP concentration in heating period in greenbelt-herb

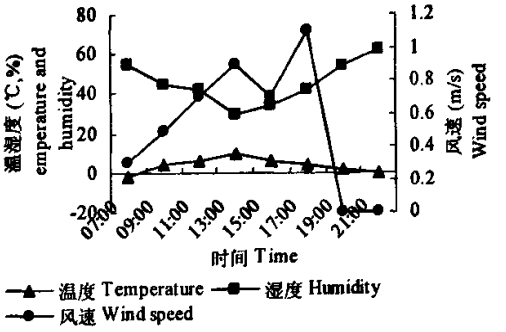


图 4-8 采暖期篱草内温湿度、风速日变化
Fig.4-8 Daily variation of temperature, humidity, wind speed in heating period in greenbelt-herb

4.1.3 阔叶乔木

4.1.3.1 非采暖期

非采暖期阔叶乔木内空气 TSP 浓度日变化见图 4-9、阔叶乔木内温湿度、风速日变化见图 4-10。由图 4-9 可知，1 日中阔叶乔木内空气 TSP 浓度的日变化呈现多峰多谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 09:00、次高峰在 17:00，最低值在 15:00。从这两个图也可以看出，TSP 浓度与温度呈负相关关系、与湿度呈正相关关系。

在阔叶乔木绿地内，TSP 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 TSP 浓度出现高峰或低谷的原因。与其它类型绿地不同的是 11:00 至 15:00 前后一直处于一天中的高温，再加上 15:00 前后的风速与其他时段相比相对大，使得此时最有利于颗粒物的扩散和输送，造成 15:00 的低谷；阔叶乔木型绿地内没有林下覆草，是硬铺装，散热慢，15:00 以后温度缓慢降低，大气稳定度也逐渐增强；17:00 前后，学生放学，使得人流量和车流量增加，颗粒物浓度上升的趋势较大，达到一天中的最高点；17:00 以后 TSP 浓度开始下降，但是到 19:00TSP 浓度又有上升的趋势。

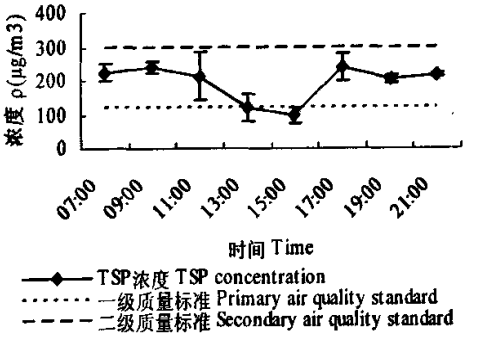


图 4-9 非采暖期阔叶乔木内空气 TSP 浓度日变化
Fig.4-9 Daily variation of TSP concentration in non-heating period in deciduous tree

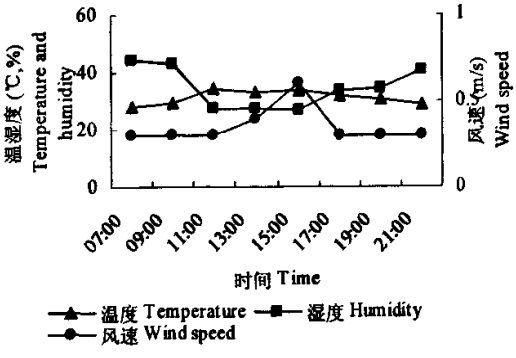


图 4-10 非采暖期阔叶乔木内温湿度、风速日变化
Fig.4-10 Daily variation of temperature, humidity, wind speed in non-heating period in deciduous tree

从图 4-9 我们也可以看出，13:00~15:00 阔叶乔木内空气 TSP 浓度在我国《环境空气

质量标准》（GB3095－1996）的一级标准以下，其它时间段 TSP 浓度均在一级、二级标准之间。因此 13:00~15:00 阔叶乔木内空气 TSP 对人的危害最小。但是早晚对比相差不大。

4.1.3.2 采暖期

采暖期阔叶乔木内空气 TSP 浓度日变化见图 4-11、阔叶乔木内温湿度、风速日变化见图 4-12。由图 4-11 可知，1 日中阔叶乔木内空气 TSP 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 19:00，低谷值在 09:00。从这两个图也可以看出，TSP 浓度与温度呈负相关关系、与湿度呈正相关关系。

在阔叶乔木内，TSP 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 TSP 浓度出现高峰或低谷的原因。

从图 4-11 还可以看出，09:00~15:00 阔叶乔木内空气 TSP 浓度在我国《环境空气质量标准》（GB3095－1996）的一级、二级标准之间，07:00、17:00 至 21:00 TSP 浓度在二级标准以上。因此 09:00~15:00 阔叶乔木内空气 TSP 对人的危害最小。但是早晚对比同样是早上好于晚上。

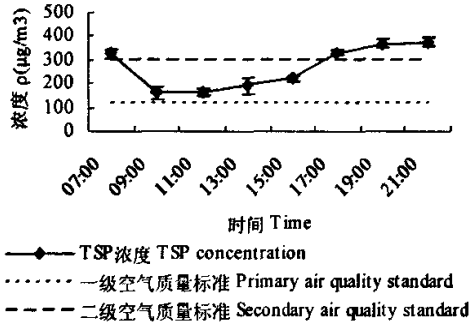


图 4-11 采暖期阔叶乔木内空气 TSP 浓度日变化
Fig.4-11 Daily variation of TSP concentration in heating period in deciduous tree

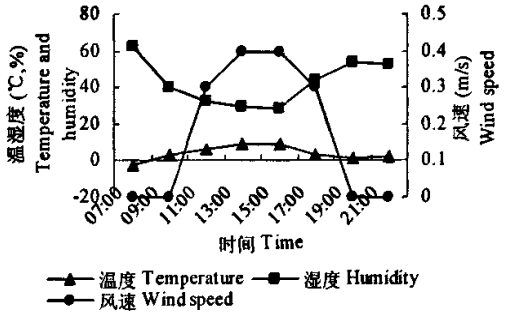


图 4.12 采暖期阔叶乔木内温湿度、风速日变化
Fig.4-12 Daily variation of temperature, humidity, wind speed in heating period in deciduous tree

4.1.4 阔叶乔草

4.1.4.1 采暖期

非采暖期阔叶乔草内空气 TSP 浓度日变化见图 4-13、阔叶乔草内温湿度、风速日变化见图 4-14。由图 4-13 可知，1 日中阔叶乔草内空气 TSP 浓度的日变化呈现双峰单谷型，及早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 19:00 次高峰在 09:00，低谷值在 13:00。从这两个图也可以看出，TSP 浓度与温度呈负相关关系、与湿度呈正相关关系。

在阔叶乔草绿地内，09:00、13:00、19:00 前后 TSP 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 TSP 浓度出现高峰或低谷的原因。

从图 4-13 中我们也可以看出，在 11:00~17:00 阔叶乔草绿地内空气 TSP 浓度均在我国《环境空气质量标准》（GB3095－1996）的一级标准以下，其它时间段 TSP 浓度均在

一级、二级标准之间。因此 11:00~17:00 阔叶乔草绿地内空气 TSP 对人的危害最小。早晚相比，早上要好于晚上。

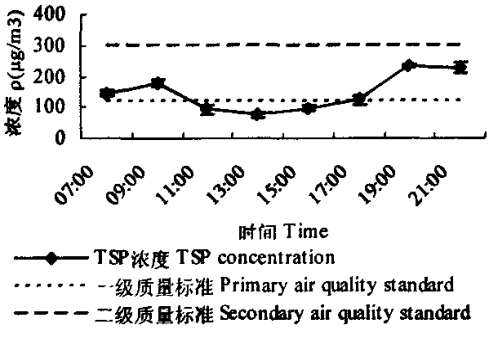


图 4-13 非采暖期阔叶乔草内空气 TSP 浓度日变化
Fig.4-13 Daily variation of TSP concentration in non-heating period in deciduous tree-herb

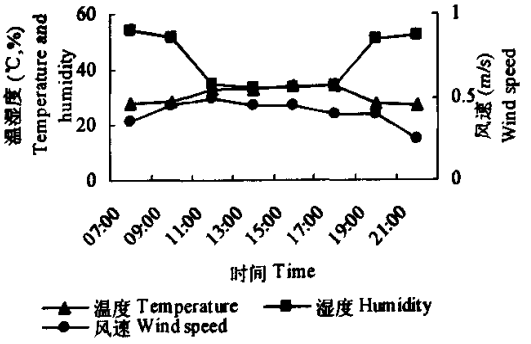


图 4-14 非采暖期阔叶乔草内温湿度、风速日变化
Fig.4-14 Daily variation of temperature, humidity, wind speed in non-heating period in deciduous tree-herb

4.1.4.2 采暖期

采暖期阔叶乔草内空气 TSP 浓度日变化见图 4-15、阔叶乔草内温湿度、风速日变化见图 4-16。由图 4-15 可知，1 日中阔叶乔草内空气 TSP 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 07:00，次高峰在 21:00，低谷值在 11:00。从这两个图也可以看出，TSP 浓度与温度呈负相关关系、与湿度呈正相关关系。

在阔叶乔草绿地内，TSP 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 TSP 浓度出现高峰或低谷的原因。

从图 4-15 还可以看出，09:00~17:00 阔叶乔草内空气 TSP 浓度均在我国《环境空气质量标准》（GB3095－1996）的一级、二级标准之间，07:00、19:00、21:00 TSP 浓度在二级标准以上。因此 09:00~7:00 阔叶乔草内空气 TSP 对人的危害最小。但是早晚对比是晚上好于早上。

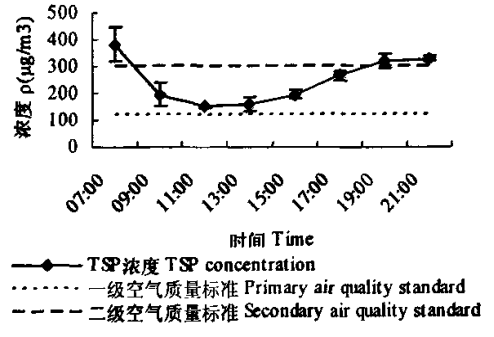


图 4-15 采暖期阔叶乔草内空气 TSP 浓度日变化
Fig.4-15 Daily variation of TSP concentration in heating period in deciduous tree-herb

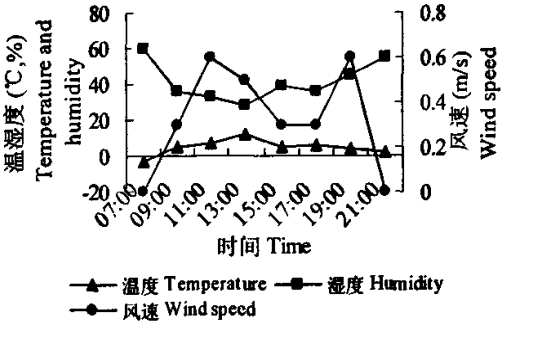


图 4-16 采暖期阔叶乔草内温湿度、风速日变化
Fig.4-16 Daily variation of temperature, humidity, wind speed in heating period in deciduous tree-herb

4.1.5　针叶乔草

4.1.5.1　非采暖期

非采暖期针叶乔草内空气 TSP 浓度日变化见图 4-17、针叶乔草绿地内温湿度、风速日变化见图 4-18。由图 4-17 可知，1 日中针叶乔草内空气 TSP 浓度的日变化基本上呈现出双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 09:00，低谷值在 13:00，但是不同时段稍有起伏。从这两个图也可以看出，TSP 浓度与温度呈负相关关系、与湿度呈正相关关系。

在针叶乔草绿地内，09:00、13:00、21:00 前后 TSP 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 TSP 浓度出现高峰或低谷的原因。与其他类型绿地不同的是 15:00 前后的风速较一天中其它时段的风速大，起到了扩散、输送颗粒物的功能，使 17:00 TSP 的浓度与 15:00 TSP 的浓度基本持平。

从图 4-17 我们也可以看出，在 11:00~17:00 针叶乔草绿地内空气 TSP 浓度均在我国《环境空气质量标准》（GB3095－1996）的一级标准以下，其它时间段 TSP 浓度均在一级、二级标准之间。因此 11:00~17:00 针叶乔草绿地内空气 TSP 对人的危害最小。早晚相比，早上要好于晚上。

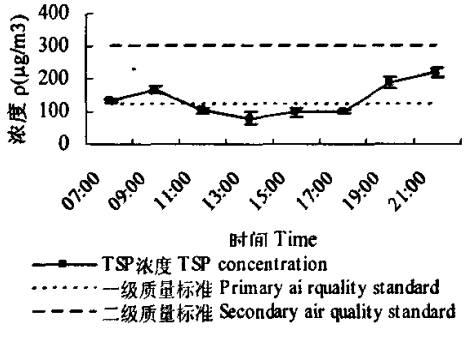


图 4-17 非采暖期针叶乔草内空气 TSP 浓度日变化
Fig.4-17 Daily variation of TSP concentration in non-heating period in everygreen tree-herb

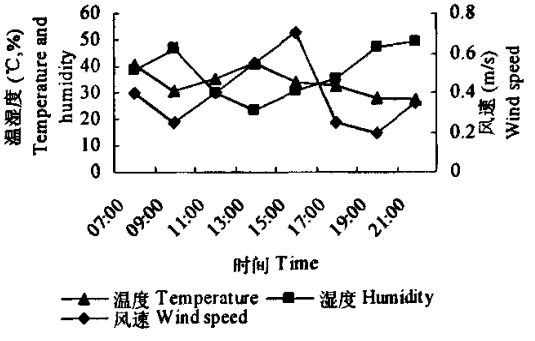


图 4-18 非采暖期针叶乔草内温湿度、风速日变化
Fig.4-18 Daily variation of temperature, humidity, wind speed in non-heating period in everygreen tree-herb

4.1.5.2　采暖期

采暖期针叶乔草内空气 TSP 浓度日变化见图 4-19、针叶乔草内温湿度、风速日变化见图 4-20。由图 4-19 可知，1 日中针叶乔草内空气 TSP 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 19:00，低谷值在 11:00。从这两个图也可以看出，TSP 浓度与温度呈负相关关系、与湿度呈正相关关系。

在针叶乔草绿地内，TSP 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 TSP 浓度出现高峰或低谷的原因。

从图 4-19 还可以看出，09:00~17:00 针叶乔草内空气 TSP 浓度均在我国《环境空气质量标准》（GB3095－1996）的一级、二级标准之间，07:00、19:00、21:00 TSP 浓度在

二级标准以上。因此 09:00~17:00 针叶乔草内空气 TSP 对人的危害最小。但是早晚对比是早上好于晚上。

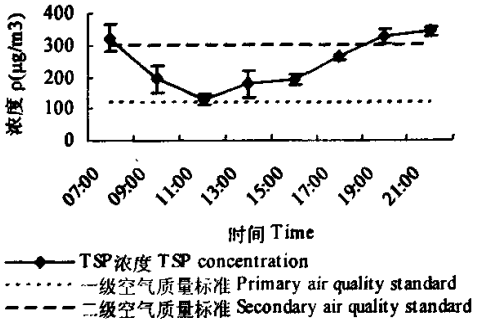


图 4-19 采暖期针叶乔草内空气 TSP 浓度日变化
Fig.4-19 Daily variation of TSP concentration in heating period in everygreen tree-herb

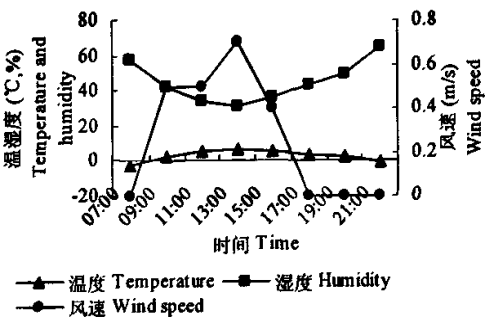


图 4-20 采暖期针叶乔草内温湿度、风速日变化
Fig.4-20 Daily variation of temperature, humidity, wind speed in heating period in everygreen tree-herb

4.1.6 乔灌草

4.1.6.1 非采暖期

非采暖期乔灌草内空气 TSP 浓度日变化见图 4-21、乔灌草内温湿度、风速日变化见图 4-22。由图 4-21 可知，1 日中乔灌草内空气 TSP 浓度的日变化情况较复杂，几起几伏，但基本上还是早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，低谷值在 13:00。从这两个图也可以看出，TSP 浓度与温度呈负相关关系、与湿度呈正相关关系。

在乔灌草绿地内，TSP 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 TSP 浓度出现高峰或低谷的原因。

从图 4-21 中也可以看出，07:00~21:00 乔灌草内空气 TSP 浓度均在我国《环境空气质量标准》（GB3095－1996）的一级、二级标准之间。早晚相比，相差不大。

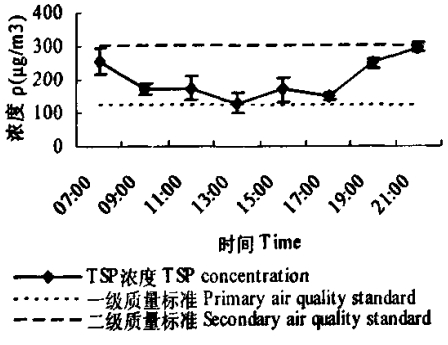


图 4-21 非采暖期乔灌草内空气 TSP 浓度日变化
Fig.4-21 Daily variation of TSP concentration in non-heating period in arbor-shrub-herb

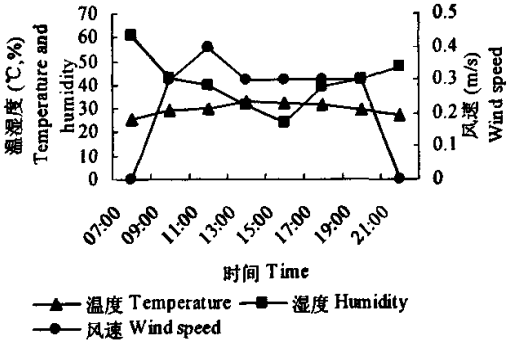


图 4-22 非采暖期乔灌草内温湿度、风速日变化
Fig.4-22 Daily variation of temperature, humidity, wind speed in non-heating period in arbor-shrub-herb

4.1.6.2 采暖期

采暖期乔灌草内空气 TSP 浓度日变化见图 4-23、乔灌草内温湿度、风速日变化见图

4-24。由图 4-23 可知，1 日中乔灌草内空气 TSP 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 19:00，低谷值在 13:00。从这两个图也可以看出，TSP 浓度与温度呈负相关关系、与湿度呈正相关关系。

在乔灌草内，TSP 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 TSP 浓度出现高峰或低谷的原因。

从图 4-23 还可以看出，07:00~15:00 乔灌草内空气 TSP 浓度均在我国《环境空气质量标准》（GB3095－1996）的在一级、二级标准之间，17:00~21:00 TSP 浓度在二级标准以上。因此 07:00~15:00 针叶乔草内空气 TSP 对人的危害最小。但是早晚对比是早上好于晚上。

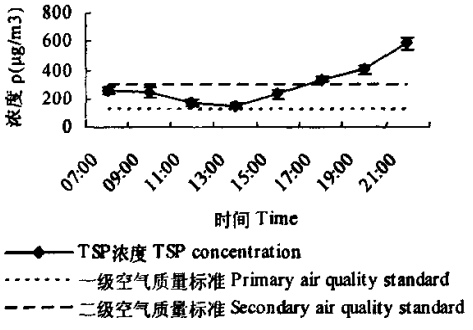


图 4-23 采暖期乔灌草内空气 TSP 浓度日变化
Fig.4-23 Daily variation of TSP concentration in heating period in arbor-shrub-herb

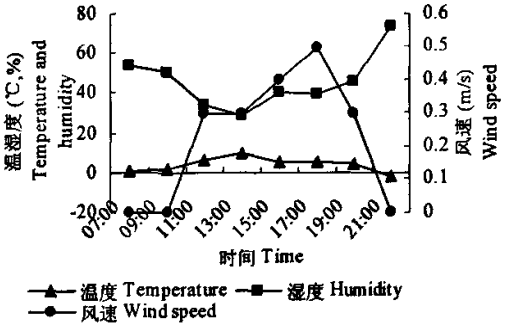


图 4-24 采暖期乔灌草内温湿度、风速日变化
Fig.4-24 Daily variation of temperature, humidity, wind speed in heating period in arbor-shrub-herb

4.1.7 对照点

4.1.7.1 非采暖期

非采暖期对照点内空气 TSP 浓度日变化见图 4-25、对照点内温湿度、风速日变化见图 4-26。由图 4-25 可知，1 日中对照点内空气 TSP 浓度的日变化情况较复杂，几起几伏，但基本上还是早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，低谷值在 13:00。

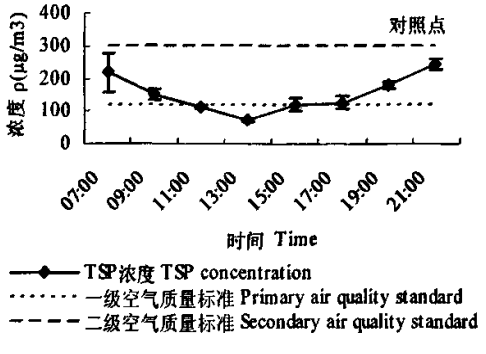


图 4-25 非采暖期对照点内空气 TSP 浓度日变化
Fig.4-25 Daily variation of TSP concentration in non-heating period in CK

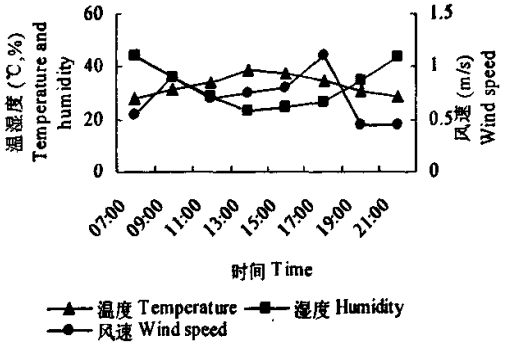


图 4-26 非采暖期对照点内温湿度、风速日变化
Fig.4-26 Daily variation of temperature, humidity, wind speed in non-heating period in CK

在对照点内，TSP 浓度出现高峰或谷值的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 TSP 浓度出现高峰的原因。

从图 4-25 中我们也可以看出，从 07:00~21:00 对照点内空气 TSP 浓度均在我国《环境空气质量标准》（GB3095－1996）的一级、二级标准之间。早晚相比，相差不大。

4.1.7.2　采暖期

采暖期对照点内空气 TSP 浓度日变化见图 4-27、对照点内温湿度、风速日变化见图 4-28。由图 4-27 可知，1 日中对照点内空气 TSP 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 19:00，低谷值在 11:00。从这两个图也可以看出，TSP 浓度与温度呈负相关关系、与湿度呈正相关关系。

在对照点内，TSP 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 TSP 浓度出现高峰或低谷的原因。

从图 4-27 还可以看出，07:00~17:00 对照点内空气 TSP 浓度均在我国《环境空气质量标准》（GB3095－1996）的在一级、二级标准之间，19:00、21:00 TSP 浓度在二级标准以上。因此 07:00~17:00 对照点内空气 TSP 对人的危害最小。但是早晚对比是早上好于晚上。

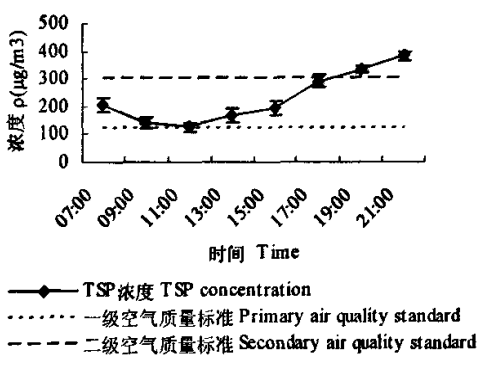


图 4-27 采暖期对照点内空气 TSP 浓度日变化
Fig.4-27 Daily variation of TSP concentration in heating period in CK

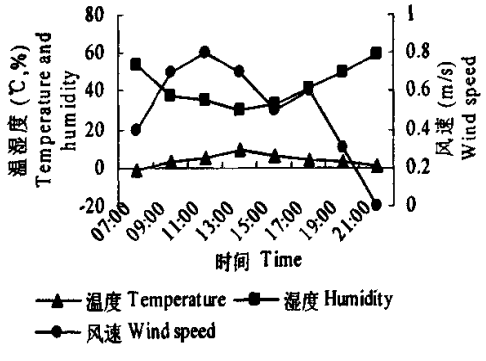


图 4-28 采暖期对照点内温湿度、风速日变化
Fig.4-28 Daily variation of temperature, humidity, wind speed in heating period in CK

4.1.8　小结

从以上分析可知，TSP、PM10 浓度日变化曲线基本上呈现双峰单谷型即早晚高、白天低。早上与晚上相比，早上的 TSP 浓度低于晚上。

虽然不同时期各类型绿地内空气 TSP 浓度出现峰值、谷值的时间并不一致，但在观测时段内基本上是非采暖期、采暖期的最大峰值均出现在 19:00~21:00，非采暖期的低谷值出现在 13:00~15:00、采暖期的低谷值出现在 11:00。采暖期低谷值出现的时间要比非采暖期早 2 小时。

从一日的空气质量来看，非采暖期好于采暖期。在观测时段内非采暖期的 TSP 浓度

均达到国家环境空气质量标准（GB3095—1996）的二级标准，符合居住区、文化区的标准，其中大部分绿地内 11:00~15:00TSP 的浓度最低，TSP 浓度低于一级标准，空气质量最好。在观测时段内采暖期的 TSP 浓度基本上是 09:00~17:00 达到国家环境空气质量标准（GB3095—1996）的二级标准，其他时段 TSP 浓度高于二级标准。

4.2 不同时间段 TSP 浓度的差异性分析

从上文第 4.1 部分可以看到，空气 TSP 浓度在一天中不同时间段的变化很复杂。为了了解这七个样地空气 TSP 浓度在采暖期、非采暖期的观测时段内某一时间段是否存在显著差异，需要对这七个样地在某一时间段的变化进行方差分析。下面将分八个时间段分别说明分析。

4.2.1 07:00

4.2.1.1 非采暖期

对不同类型绿地空气 TSP 浓度方差分析，结果表明，07:00 非采暖期不同类型绿地之间空气 TSP 浓度没有显著差异。

4.2.1.2 采暖期

对采暖期不同类型绿地空气 TSP 浓度方差分析，结果表明，07:00 不同类型绿地之间空气 TSP 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-1）。

表 4-1 多重比较　　单位：μg/m^3

Table 4-1 Multiple comparisons

绿地类型	均　值	Xi-203.63	Xi-255.98	Xi-322.63	Xi-322.98	Xi-324.85	Xi-333.45
阔叶乔草	382.00	178.37**	126.02**	59.37	59.02	57.15	48.55
草　坪	333.45	129.82**	77.47	10.82	10.47	8.60	0
阔叶乔木	324.85	121.22*	68.87	2.22	1.87	0	
针叶乔草	322.98	119.35*	67.00	0.35	0		
篱　草	322.63	119.00*	66.65	0			
乔灌草	255.98	52.35	0				
对照点	203.63	0					

结果表明，阔叶乔草内空气 TSP 浓度极显著高于对照点和乔灌草的；草坪内空气 TSP 浓度极显著高于对照点的；针叶乔草、阔叶乔木、篱草内空气 TSP 浓度显著高于对照点的。

4.2.2 09:00

4.2.2.1 非采暖期

对非采暖期不同类型绿地空气 TSP 浓度方差分析，结果表明，09:00 不同类型绿地之

间空气 TSP 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-2）。

表 4-2 多重比较　　单位：μg/m³

Table 4-2 Multiple comparisons

绿地类型	均　值	Xi-116.50	Xi-140.12	Xi-150.22	Xi-166.92	Xi-171.37	Xi-177.77
阔叶乔木	239.07	122.57*	98.95*	88.85*	72.15*	67.70*	61.30*
阔叶乔草	177.77	61.27*	37.65	27.55	10.85	6.40	0
乔灌草	171.37	54.87*	31.25	21.15	4.45	0	
针叶乔草	166.92	50.42*	26.80	16.70	0		
对照点	150.22	33.72	10.10	0			
草　坪	140.12	23.62	0				
篱　草	116.50	0					

结果表明，阔叶乔木内空气 TSP 浓度显著高于其它六块样地；阔叶乔草、乔灌草、针叶乔草内 TSP 浓度显著高于篱草的。

4.2.2.2　采暖期

对不同类型绿地空气 TSP 浓度方差分析，结果表明，09:00 采暖期不同类型绿地之间空气 TSP 浓度没有显著差异。

4.2.3　11:00

4.2.3.1　非采暖期

对非采暖期不同类型绿地空气 TSP 浓度方差分析，结果表明，11:00 不同类型绿地之间空气 TSP 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-3）。

表 4-3 多重比较　　单位：μg/m³

Table 4-3 Multiple comparisons

绿地类型	均 值	Xi-66.90	Xi-86.67	Xi-93.6	Xi-103.43	Xi-113.17	Xi-173.78
阔叶乔木	213.83	146.93**	127.17**	120.23*	110.40*	100.67*	40.05
乔灌草	173.78	106.88*	87.12	80.18	70.35	60.62	0
对照点	113.17	46.27	26.50	19.57	9.73	0	
针叶乔草	103.43	36.53	16.77	9.83	0		
阔叶乔草	93.60	26.70	6.93	0			
篱　草	86.67	19.77	0				
草　坪	66.90	0					

结果表明，阔叶乔木内空气 TSP 浓度极显著高于篱草、草坪的，显著高于对照点、针叶乔草、阔叶乔草的。乔灌草内空气 TSP 浓度显著高于草坪的。

4.2.3.2　采暖期

对采暖期不同类型绿地空气 TSP 浓度方差分析，结果表明，不同类型绿地之间空气 TSP 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-4）。

表 4-4 多重比较　　单位：μg/m³

Table 4-4 Multiple comparisons

绿地类型	均值	Xi-106.85	Xi-110.97	Xi-126.68	Xi-129.78	Xi-152.87	Xi-162.98
乔灌草	175.25	68.40*	64.28*	48.57	45.47	22.38	12.27
阔叶乔木	162.98	56.13*	52.01	36.30	33.20	10.11	0
阔叶乔草	152.87	46.02	41.90	26.19	23.09	0	
针叶乔草	129.78	22.93	18.81	3.10	0		
对照点	126.68	19.83	15.71	0			
草坪	110.97	4.12	0				
篱草	106.85	0					

结果表明，乔灌草内空气 TSP 浓度显著高于草坪、篱草的；阔叶乔木内空气 TSP 浓度显著高于篱草的。

4.2.4　13:00

对不同类型绿地空气 TSP 浓度方差分析，结果表明，13:00 非采暖期、采暖期不同类型绿地之间空气 TSP 浓度均没有显著差异。

4.2.5　15:00

4.2.5.1　非采暖期

对非采暖期不同类型绿地空气 TSP 浓度方差分析，结果表明，15:00 不同类型绿地之间空气 TSP 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-5）。

表 4-5 多重比较　　单位：μg/m³

Table 4-5 Multiple comparisons

绿地类型	均值	Xi-56.28	Xi-62.22	Xi-96.20	Xi-97.90	Xi-98.87	Xi-121.12
乔灌草	171.10	114.82**	108.88**	74.90**	73.20**	72.23*	49.98
对照点	121.12	64.83*	58.90*	24.92	23.22	22.25	0
针叶乔草	98.87	42.58	36.65	2.67	0.97	0	
阔叶乔草	97.90	41.62	35.68	1.70	0		
阔叶乔木	96.20	39.92	33.98	0			
草坪	62.22	5.93	0				
篱草	56.28	0					

结果表明，乔灌草内空气 TSP 浓度极显著高于篱草、草坪、阔叶乔木、阔叶乔草的，显著高于针叶乔草的。对照点内空气 TSP 浓度显著高于篱草、草坪的。

4.2.5.2　采暖期

对不同类型绿地空气 TSP 浓度方差分析，结果表明，15:00 采暖期不同类型绿地之间空气 TSP 浓度没有显著差异。

4.2.6　17:00

4.2.6.1　非采暖期

对非采暖期不同类型绿地空气 TSP 浓度方差分析，结果表明，17:00 不同类型绿地之间空气 TSP 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-6）。

表 4-6 多重比较　　单位：μg/m³

Table 4-6 Multiple comparisons

绿地类型	均值	Xi-100.80	Xi-122.35	Xi-123.25	Xi-123.27	Xi-125.40	Xi-148.77
阔叶乔木	238.42	137.62**	116.07**	115.17**	115.15**	113.02**	89.65**
乔灌草	148.77	47.97	26.42	25.52	25.50	23.37	0
对照点	125.40	24.60	3.05	2.15	2.13	0	
篱　草	123.27	22.47	0.92	0.02	0		
阔叶乔草	123.25	22.45	0.90	0			
草　坪	122.35	21.55	0				
针叶乔草	100.80	0					

结果表明，阔叶乔木内空气 TSP 浓度极显著高于其它六块样地的。

4.2.6.2　采暖期

对采暖期不同类型绿地空气 TSP 浓度方差分析，结果表明，17:00 不同类型绿地之间空气 TSP 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-7）。

表 4-7 多重比较　　单位：μg/m³

Table 4-7 Multiple comparisons

绿地类型	均值	Xi-262.73	Xi-265.67	Xi-281.98	Xi-282.02	Xi-291.67	Xi-329.93
乔灌草	337.20	74.47**	71.53**	55.22*	55.18*	45.53*	7.27
阔叶乔木	329.93	67.20**	64.26**	47.95*	47.91*	38.26	0
对照点	291.67	28.94	26.00	9.69	9.65	0	
篱　草	282.02	19.29	16.35	0.04	0		
草　坪	281.98	19.25	16.31	0			
阔叶乔草	265.67	2.94	0				
针叶乔草	262.73	0					

结果表明，乔灌草内空气 TSP 浓度极显著高于针叶乔草、阔叶乔草的，显著高于篱草、草坪、对照点的；阔叶乔木内空气 TSP 浓度极显著高于针叶乔草、阔叶乔草的，显

著高于篱草、草坪的。

4.2.7 19:00

4.2.7.1 非采暖期

对非采暖期不同类型绿地空气 TSP 浓度方差分析，结果表明，19:00 不同类型绿地之间空气 TSP 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-8）。

表 4-8 多重比较 单位：μg/m³

Table 4-8 Multiple comparisons

绿地类型	均值	Xi-179.28	Xi-180.35	Xi-187.08	Xi-196.53	Xi-206.13	Xi-232.12
乔灌草	249.33	70.05**	68.98**	62.25**	52.80*	43.20*	17.21
阔叶乔草	232.12	52.83*	51.77*	45.04*	35.59	25.99	0
阔叶乔木	206.13	26.85	25.78	19.05	9.60	0	
篱草	196.53	17.25	16.18	9.45	0		
针叶乔草	187.08	7.80	6.73	0			
草坪	180.35	1.07	0				
对照点	179.28	0					

结果表明，乔灌草内空气 TSP 浓度极显著高于对照、草坪、针叶乔草的，显著高于篱草和阔叶乔木的；阔叶乔草内空气 TSP 浓度显著高于对照点、草坪、针叶乔草的。

4.2.7.2 采暖期

对采暖期不同类型绿地空气 TSP 浓度方差分析，结果表明，19:00 不同类型绿地之间空气 TSP 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-9）。

表 4-9 多重比较 单位：μg/m³

Table 4-9 Multiple comparisons

绿地类型	均值	Xi-312.58	Xi-318.47	Xi-322.67	Xi-326.18	Xi-332.53	Xi-367.63
乔灌草	400.42	87.84*	81.95*	77.75*	74.24*	67.89*	32.79
阔叶乔木	367.63	55.05	49.16	44.96	41.45	35.10	0
对照点	332.53	19.95	14.06	9.86	6.35	0	
针叶乔草	326.18	13.60	7.71	3.51	0		
草坪	322.67	10.09	4.20	0			
阔叶乔草	318.47	5.89	0				
篱草	312.58	0					

结果表明，乔灌草内空气 TSP 浓度显著高于对照点、篱草、草坪、针叶乔草、阔叶乔草的。

4.2.8 21:00

4.2.8.1 非采暖期

对非采暖期不同类型绿地空气 TSP 浓度方差分析，结果表明，21:00 不同类型绿地之间空气 TSP 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-10）。

表 4-10 多重比较 单位：μg/m³

Table 4-10 Multiple comparisons

绿地类型	均值	Xi-211.1	Xi-217.9	Xi-219.65	Xi-224.72	Xi-227.77	Xi-244.45
乔灌草	296.80	85.70**	78.90**	77.15**	72.08**	69.03*	52.35*
对照点	244.45	33.35	26.55	24.80	19.73	16.68	0
阔叶乔草	227.77	16.67	9.87	8.12	3.05	0	
草坪	224.72	13.62	6.82	5.07	0		
针叶乔草	219.65	8.55	1.75	0			
阔叶乔木	217.90	6.80	0				
篱草	211.10	0					

结果表明，乔灌草内空气 TSP 浓度极显著高于篱草、阔叶乔木、针叶乔草、草坪的，显著高于对照点、阔叶乔草的。

4.2.8.2 采暖期

对采暖期不同类型绿地空气 TSP 浓度方差分析，结果表明，21:00 不同类型绿地之间空气 TSP 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-11）。

表 4-11 多重比较 单位：μg/m3

Table 4-11 Multiple comparisons

绿地类型	均值	Xi-328.58	Xi-342.45	Xi-347.92	Xi-348.6	Xi-376.58	Xi-382.68
乔灌草	584.72	256.14**	242.27**	236.8**	236.12**	208.14**	202.04**
对照点	382.68	54.10	40.23	34.76	34.08	6.10	0
阔叶乔木	376.58	48.00	34.13	28.66	27.98	0	
篱草	348.6	20.02	6.15	0.68	0		
草坪	347.92	19.34	5.47	0			
针叶乔草	342.45	13.87	0				
阔叶乔草	328.58	0					

结果表明，乔灌草内空气 TSP 浓度极显著高于其它六块样地的。

4.2.9 小结

从以上分析可知，非采暖期不同类型绿地空气 TSP 浓度之间的差异在 07:00 和 13:00 均不显著，在其它时间段均存在不同程度的差异。

采暖期不同类型绿地空气 TSP 浓度之间的差异在 09:00、13:00、15:00 均不显著，其它时间段均存在不同程度的差异。

4.3 PM2.5 与 PM1 的日变化

从 3.1.3 分析结果可知，PM2.5 与 PM1 高度相关，因此不同类型绿地空气 PM1 浓度的变化情况与 PM2.5 基本一致，本文以 PM2.5 浓度的日变化情况为主，不再赘述 PM1 浓度的日变化情况。

4.3.1 草坪

4.3.1.1 非采暖期

非采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度日变化见图 4-29、草坪内温湿度、风速日变化见图 4-2。由图 4-29 可知，1 日中草坪内空气 PM2.5 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 07:00，低谷值在 15:00。

影响 PM2.5 浓度日变化的主要因素是污染源的排放情况、人的活动和气象因素。一般来讲，清晨是人们活动、居民小炉灶排放、交通运输等大量污染源低空排放的高峰期；日出后太阳辐射增强，地面温度逐渐升高，大气容易处于不稳定状态，特别是中午 11 点至 14 点时最不稳定，大气的湍流交换和垂直扩散能力加强，有利于颗粒物的扩散和输送；傍晚，人们下班、车流量增加，颗粒物浓度呈现上升的趋势；夜晚，空气层较稳定，不利于污染物的扩散。而在草坪绿地内，7 点前后出现次高峰可能与上班时间、车辆行驶高峰有关；7 点以后，温度逐渐升高、湿度逐渐降低，13 点出现一天中的最高温，此时空气层最不稳定、最有利于颗粒物的扩散和输送，同时高温易引起化学反映、形成粒径较小的二次性气溶胶，因此此时颗粒物浓度没有到达最低值，而是在 15 点产生低谷；17 点前后，学生放学，使得人流量和车流量增加，颗粒物浓度上升的趋势较大；19 点以后温度继续下降、到 21 点降至最低点，湿度逐渐上升、到 21 点升至一天中的次高点；低温高湿加上微风使得大气稳定，不利于颗粒物扩散和输送，造成 21 点的最大峰值。

目前，我国还没有对 PM2.5 制定标准，参照美国（EPA）1997 年制定的环境空气质量标准，PM2.5 质量浓度限值为日平均 65μg / m^3。从图 4-29 还可以看出草坪内空气 PM2.5 浓度均低于美国 EPA 的环境空气质量标准，而且早晚对比是早上好于晚上。

4.3.1.2 采暖期

采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度日变化见图 4-30、篱草内温湿度和风速日变化见图 4-4。由图 4-30 可知，1 日中篱草内空气 PM2.5 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 09:00，低谷值在 11:00。

在草坪内，PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因。

草坪内，除了 09:00、19:00、21:00 之外，其它时间段 PM2.5 浓度均低于美国 EPA

的环境空气质量标准，而且早晚对比是早上好于晚上。

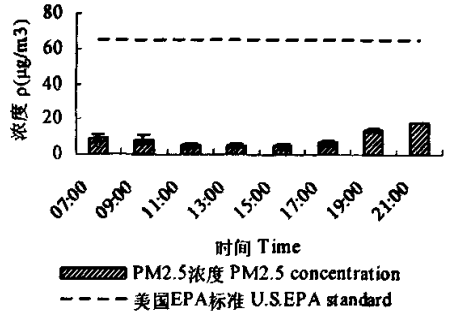


图 4-29 非采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度日变化
Fig.4-29 Daily variation of PM2.5 concentration in non-heating period in herb

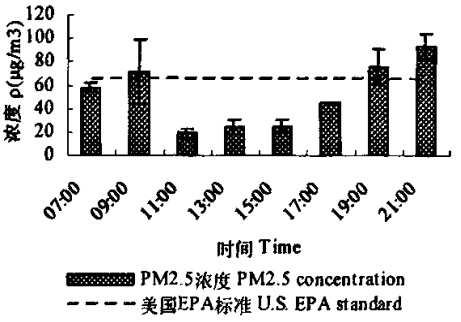


图 4-30 采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度日变化
Fig.4-30 Daily variation of PM2.5 concentration in heating period in herb

4.3.2 篱草

4.3.2.1 非采暖期

非采暖期篱草内空气 PM2.5 浓度日变化见图 4-31、篱草内温湿度、风速日变化见图 4-6。由图 4-31 可知，1 日中篱草内空气 PM2.5 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 07:00，低谷值在 15:00。

在篱草内，PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因。

篱草内空气 PM2.5 浓度均低于美国 EPA 的环境空气质量标准，而且早晚对比是早上好于晚上。

4.3.2.2 采暖期

采暖期篱草内空气 PM2.5 浓度日变化见图 4-32、篱草内温湿度、风速日变化见图 4-8。由图 4-32 可知，1 日中篱草内空气 PM2.5 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 07:00，低谷值在 11:00。

在篱草内，PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因。

篱草内，除了 21:00 之外，其它时间段 PM2.5 浓度均低于美国 EPA 的环境空气质量标准，而且早晚对比是早上好于晚上。

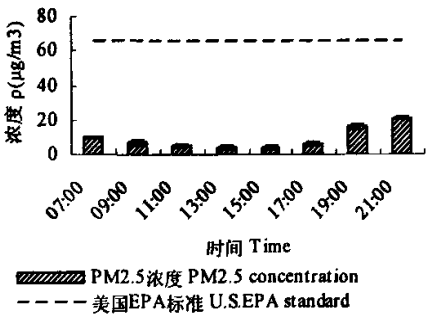


图 4-31 非采暖期篱草内空气 PM2.5 浓度日变化
Fig.4-31 Daily variation of PM2.5 concentration in non-heating period in greenbelt-herb

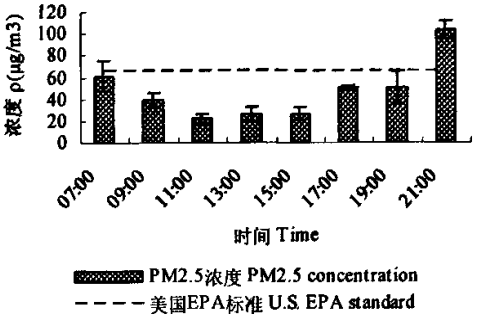


图 4-32 采暖期篱草内空气 PM2.5 浓度日变化
Fig.4-32 Daily variation of PM2.5 concentration in heating period in greenbelt-herb

4.3.3 阔叶乔木

4.3.3.1 非采暖期

非采暖期阔叶乔木内空气 PM2.5 浓度日变化见图 4-33、阔叶乔木内温湿度、风速日变化见图 4-10。由图 4-33 可知，1 日中阔叶乔木内空气 PM2.5 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 07:00，低谷值在 15:00。

在阔叶乔木内，PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因。

阔叶乔木内空气 PM2.5 浓度均低于美国 EPA 的环境空气质量标准，而且早晚对比是早上好于晚上。

4.3.3.2 采暖期

采暖期阔叶乔木内空气 PM2.5 浓度日变化见图 4-34、阔叶乔木内温湿度、风速日变化见图 4-12。由图 4-34 可知，1 日中阔叶乔木内空气 PM2.5 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 19:00，次高峰在 07:00，低谷值在 11:00。

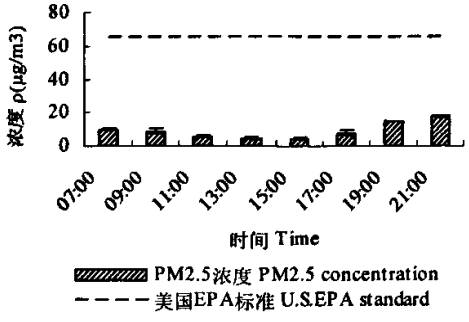


图 4-33 非采暖期阔叶乔木内空气 PM.2.5 浓度日变化
Fig.4-33Daily variation of PM2.5 concentration in non-heating period in deciduous tree

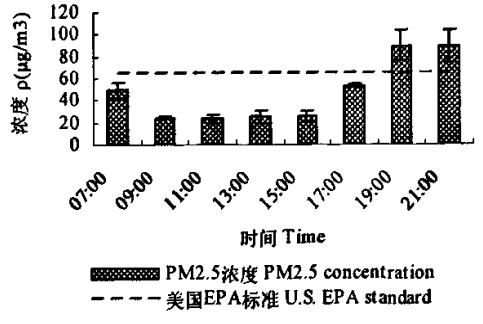


图 4-34 采暖期阔叶乔木内空气 PM2.5 浓度日变化
Fig.4-34 Daily variation of PM2.5 concentration in heating period in deciduous tree

在阔叶乔木内，PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气

PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因。

阔叶乔木内，除了 19:00、21:00 之外，其它时间段 PM2.5 浓度均低于美国 EPA 的环境空气质量标准，而且早晚对比是早上好于晚上。

4.3.4 阔叶乔草

4.3.4.1　非采暖期

非采暖期阔叶乔草内空气 PM2.5 浓度日变化见图 4-35、阔叶乔草内温湿度、风速日变化见图 4-14。由图 4-35 可知，1 日中阔叶乔草内空气 PM2.5 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 19:00，次高峰在 09:00，低谷值在 15:00。

在阔叶乔草绿地内，PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因。

阔叶乔草内空气 PM2.5 浓度均低于美国 EPA 的环境空气质量标准，而且早晚对比是早上好于晚上。

4.3.4.2　采暖期

采暖期阔叶乔草内空气 PM2.5 浓度日变化见图 4-36、阔叶乔草内温湿度、风速日变化见图 4-16。由图 4-36 可知，1 日中阔叶乔草内空气 PM2.5 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 07:00，低谷值在 11:00。

在阔叶乔草内，PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因。

阔叶乔草内，除了 19:00、21:00 之外，其它时间段 PM2.5 浓度均低于美国 EPA 的环境空气质量标准，而且早晚对比是早上好于晚上。

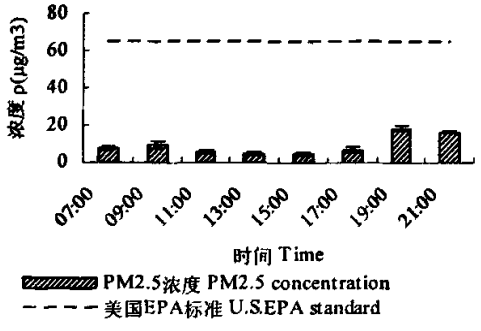


图 4-35 非采暖期阔叶乔草内空气 PM2.5 浓度日变化
Fig.4-35 Daily variation of PM2.5 concentration in non-heating period in deciduous tree-herb

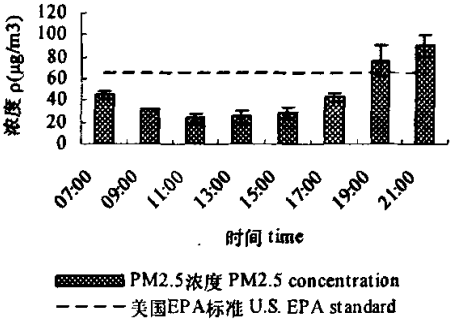


图 4-36 采暖期阔叶乔草内空气 PM2.5 浓度日变化
Fig.4-36 Daily variation of PM2.5 concentration in heating period in deciduous tree-herb

4.3.5 针叶乔草

4.3.5.1　非采暖期

非采暖期针叶乔草内空气 PM2.5 浓度日变化见图 4-37、针叶乔草内温湿度、风速日

变化见图 4-18。由图 4-37 可知，1 日中针叶乔草内空气 PM2.5 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即及早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 07:00，低谷值在 13:00。

在针叶乔草内，PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因。

针叶乔草内空气 PM2.5 浓度均低于美国 EPA 的环境空气质量标准，而且早晚对比是早上好于晚上。

4.3.5.2　采暖期

采暖期针叶乔草内空气 PM2.5 浓度日变化见图 4-38、针叶乔草内温湿度、风速日变化见图 4-20。由图 4-38 可知，1 日中针叶乔草内空气 PM2.5 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 07:00，低谷值在 11:00。

在针叶乔草内，PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因。

针叶乔草内，除了 19:00、21:00 之外，其它时间段 PM2.5 浓度均低于美国 EPA 的环境空气质量标准，而且早晚对比是早上好于晚上。

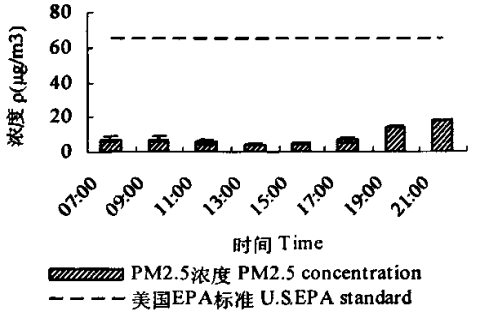


图 4-37 非采暖期针叶乔草内空气PM2.5浓度日变化
Fig.4-37 Daily variation of PM2.5 concentration in non-heating period in everygreen tree-herb

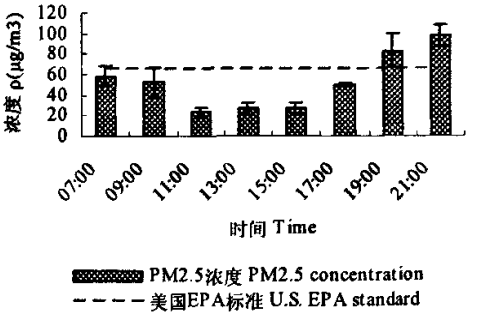


图 4-38 采暖期针叶乔草内空气 PM2.5 浓度日变化
Fig.4-38 Daily variation of PM2.5 concentration in heating period in everygreen tree-herb

4.3.6 乔灌草

4.3.6.1　非采暖期

非采暖期乔灌草内空气 PM2.5 浓度日变化见图 4-39、乔灌草内温湿度、风速日变化见图 4-22。由图 4-39 可知，1 天中乔灌草内空气 PM2.5 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 19:00，次高峰在 07:00，低谷值在 15:00。从图中我们可以看出乔灌草内空气 PM2.5 浓度均低于美国 EPA 的标准。

在乔灌草内，PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因。

乔灌草内空气 PM2.5 浓度均低于美国 EPA 的环境空气质量标准，而且早晚对比是早

上好于晚上。

4.3.6.2　采暖期

采暖期乔灌草内空气 PM2.5 浓度日变化见图 4-40、乔灌草内温湿度、风速日变化见图 4-24。由图 4-40 可知，1 日中乔灌草内空气 PM2.5 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 07:00，低谷值在 11:00。

在乔灌草内，PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因。

乔灌草内，除了 19:00、21:00 之外，其它时间段 PM2.5 浓度均低于美国 EPA 的环境空气质量标准，而且早晚对比是早上好于晚上。

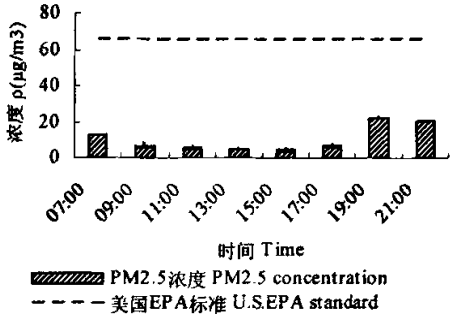


图 4-39 非采暖期乔灌草内空气 PM2.5 浓度日变化
Fig.4-39 Daily variation of PM2.5 concentration in non-heating period in arbor-shrub-herb

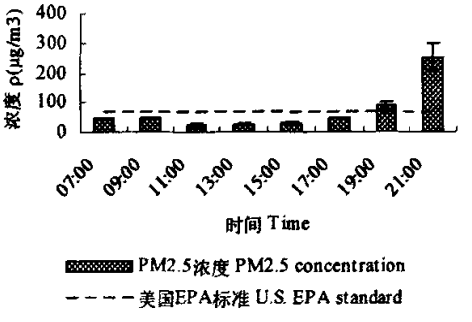


图 4-40 采暖期乔灌草内空气 PM2.5 浓度日变化
Fig.4-40 Daily variation of PM2.5 concentration in heating period in arbor-shrub-herb

4.3.7 对照点

4.3.7.1　非采暖期

非采暖期对照点内空气 PM2.5 浓度日变化见图 4-41、对照点内温湿度、风速日变化见图 4-26。由图 4-41 可知，1 日中 PM2.5 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 21:00，次高峰在 07:00，低谷值在 15:00。

在对照点绿地内，PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内 PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因。

对照点内空气 PM2.5 浓度均低于美国 EPA 的环境空气质量标准，而且早晚对比是早上好于晚上。

4.3.7.2　采暖期

采暖期对照点内空气 PM2.5 浓度日变化见图 4-42、对照点内温湿度、风速日变化见图 4-28。由图 4-42 可知，1 日中对照点内空气 PM2.5 浓度的日变化呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在观测时段内最高峰在 19:00，次高峰在 07:00，低谷值在 11:00。

在对照点内，PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因同前面所述非采暖期草坪内空气 PM2.5 浓度出现高峰或低谷的原因。

对照点内，除了 19:00、21:00 之外，其它时间段 PM2.5 浓度均低于美国 EPA 的环境空气质量标准，而且早晚对比是早上好于晚上。

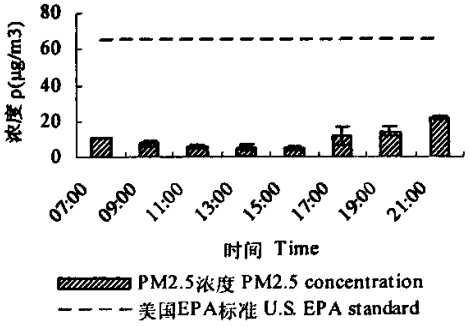


图 4-41 非采暖期对照点内空气 PM2.5 浓度日变化
Fig.4-41 Daily variation of PM2.5 concentration in non-heating period in CK

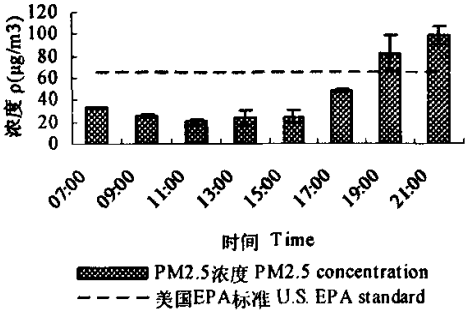


图 4-42 采暖期对照点内空气 PM2.5 浓度日变化
Fig.4-42 Daily variation of PM2.5 concentration in heating period in CK

4.3.8 小结

从以上分析可知，PM2.5 浓度日变化曲线基本上呈现双峰单谷型即早晚高、白天低。早上与晚上相比，早上的 PM2.5 浓度低于晚上。

虽然不同时期各类型绿地内空气 PM2.5 浓度出现峰值、谷值的时间并不一致，但在观测时段内基本上是非采暖期、采暖期的最大峰值均出现在 19:00 至 21:00，非采暖期的低谷值出现在 15:00、采暖期的低谷值出现在 11:00。采暖期低谷值出现的时间要比非采暖期早 4 小时。

从一日的空气质量来看，非采暖期好于采暖期。在观测时段内非采暖期的 PM2.5 浓度均达到美国 EPA 环境空气质量标准，空气质量较好。在观测时段内采暖期的 PM2.5 浓度基本上是除了 19:00、21:00 之外，其他时段的 PM2.5 浓度均达到美国 EPA 环境空气质量标准。

4.4 不同时间段 PM2.5 浓度的差异性分析

从上文第 4.3 部分可以看到，空气 PM2.5 浓度在一天中不同时间段的变化很复杂。为了了解这七个样地空气 PM2.5 浓度在采暖期、非采暖期的观测时段内某一时间段是否存在显著差异，需要对这七个样地在某一时间段的变化进行方差分析。下面将分八个时间段分别说明分析。

4.4.1 07:00

4.4.1.1 非采暖期

对不同类型绿地空气 PM2.5 浓度方差分析，结果表明，07:00 非采暖期不同类型绿地之间空气 PM2.5 浓度没有显著差异。

4.4.1.2　采暖期

对采暖期不同类型绿地空气 PM2.5 浓度方差分析，结果表明，07:00 不同类型绿地之间空气 PM2.5 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-12）。

表 4-12 多重比较　　单位：μg/m³

Table 4-12 Multiple comparisons

绿地类型	均值	Xi-50.54	Xi-61.46	Xi-62.59	Xi-68.60	Xi-83.20	Xi-86.93
篱　草	86.25	35.71**	24.79*	23.66*	17.65	3.05	-0.68
草　坪	86.93	36.39**	25.47*	24.34*	18.33	3.73	0
针叶乔草	83.20	32.66**	21.74*	20.61*	14.60	0	
阔叶乔木	68.60	18.06	7.14	6.01	0		
阔叶乔草	62.59	12.05	1.13	0			
乔灌草	61.46	10.92	0				
对照点	50.54	0					

结果表明，草坪、篱草、针叶乔草内空气 PM2.5 浓度均是极显著高于对照点的，显著高于阔叶乔草、乔灌草的。

4.4.2　09:00

4.4.2.1　非采暖期

对不同类型绿地空气 PM2.5 浓度方差分析，结果表明，09:00 非采暖期不同类型绿地之间空气 PM2.5 浓度没有显著差异。

4.4.2.2　采暖期

对采暖期不同类型绿地空气 PM2.5 浓度方差分析，结果表明，09:00 不同类型绿地之间空气 PM2.5 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-13）。

表 4-13 多重比较　　单位：μg/m³

Table 4-13 Multiple comparisons

绿地类型	均值	Xi-32.18	Xi-38.56	Xi-43.99	Xi-56.28	Xi-59.04	Xi-73.34
草　坪	107.16	74.98**	68.6**	63.17**	50.88**	48.12**	33.82*
针叶乔草	73.34	41.16*	34.78*	29.35	17.06	14.30	0
乔灌草	59.04	26.86	20.48	15.05	2.76	0	
篱　草	56.28	24.10	17.72	12.29	0		
阔叶乔草	43.99	11.81	5.43	0			
对照点	38.56	6.38	0				
阔叶乔木	32.18	0					

结果表明，草坪内空气 PM2.5 浓度极显著高于对照点、阔叶乔木、阔叶乔草、篱草、

乔灌草的，显著高于针叶乔草的；针叶乔草内空气 PM2.5 浓度显著高于对照点和阔叶乔木的。

4.4.3　11:00

对不同类型绿地空气 PM2.5 浓度方差分析，结果表明，11:00 非采暖期、采暖期不同类型绿地之间空气 PM2.5 浓度均没有显著差异。

4.4.4　13:00

对不同类型绿地空气 PM2.5 浓度方差分析，结果表明，13:00 非采暖期、采暖期不同类型绿地之间空气 PM2.5 浓度均没有显著差异。

4.4.5　15:00

对不同类型绿地空气 PM2.5 浓度方差分析，结果表明，15:00 非采暖期、采暖期不同类型绿地之间空气 PM2.5 浓度均没有显著差异。

4.4.6　17:00

4.4.6.1　非采暖期

对不同类型绿地空气 PM2.5 浓度方差分析，结果表明，17:00 非采暖期不同类型绿地之间空气 PM2.5 浓度没有显著差异。

4.4.6.2　采暖期

对采暖期不同类型绿地空气 PM2.5 浓度方差分析，结果表明，17:00 不同类型绿地之间空气 PM2.5 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-14）。

表 4-14 多重比较　　单位：$\mu g/m^3$

Table 4-14 Multiple comparisons

绿地类型	均值	Xi-58.45	Xi-65.03	Xi-67.65	Xi-67.88	Xi-70.61	Xi-72.40
阔叶乔木	72.58	14.13**	7.55*	4.93	4.70	1.97	0.18
对照点	72.40	13.95**	7.37*	4.75	4.52	1.79	0
篱草	70.61	12.16**	5.58	2.96	2.73	0	
草坪	67.88	9.43**	2.85	0.23	0		
针叶乔草	67.65	9.20**	2.62	0			
乔灌草	65.03	6.58*	0				
阔叶乔草	58.45	0					

结果表明，阔叶乔草内空气 PM2.5 浓度极显著低于阔叶乔木、对照点、篱草、草坪、针叶乔草的，显著低于乔灌草的。对照点和阔叶乔木内客气 PM2.5 浓度均显著高于乔灌草的。

4.4.7　19:00

4.4.7.1　非采暖期

对非采暖期不同类型绿地空气 PM2.5 浓度方差分析，结果表明，19:00 不同类型绿地之间空气 PM2.5 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-15）。

表 4-15 多重比较　　单位：μg/m³

Table 4-15 Multiple comparisons

绿地类型	均值	Xi-13.99	Xi-14.26	Xi-14.56	Xi-14.75	Xi-16.34	Xi-18.35
乔灌草	22.93	8.94**	8.67**	8.37**	8.18**	6.59**	4.58*
阔叶乔草	18.35	4.36*	4.09*	3.79*	3.60	2.01	0
篱　草	16.34	2.35	2.08	1.78	1.59	0	
阔叶乔木	14.75	0.76	0.49	0.19	0		
针叶乔草	14.56	0.57	0.30	0			
对照点	14.26	0.27	0				
草　坪	13.99	0					

结果表明，乔灌草内空气 PM2.5 浓度极显著高于草坪、对照点、针叶乔草、阔叶乔木、篱草的，显著高于阔叶乔草的。阔叶乔草内空气 PM2.5 浓度显著高于草坪、对照点的。

4.4.7.2　采暖期

对不同类型绿地空气 PM2.5 浓度方差分析，结果表明，19:00 非采暖期不同类型绿地之间空气 PM2.5 浓度没有显著差异。

4.4.8　21:00

4.4.8.1　非采暖期

对非采暖期不同类型绿地空气 PM2.5 浓度方差分析，结果表明，21:00 不同类型绿地之间空气 PM2.5 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-16）。

表 4-16 多重比较　　单位：μg/m³

Table 4-16 Multiple comparisons

绿地类型	均值	Xi-16.54	Xi-17.63	Xi-18.11	Xi-18.30	Xi-20.20	Xi-21.24
对照点	21.37	4.83**	3.74**	3.26**	3.07**	1.17	0.13
篱　草	21.24	4.70**	3.61**	3.13**	2.94**	1.04	0
乔灌草	20.20	3.66**	2.57**	2.09**	1.90*	0	
草　坪	18.30	1.76*	0.67	0.19	0		
针叶乔草	18.11	1.57*	0.48	0			
阔叶乔木	17.63	1.09	0				
阔叶乔草	16.54	0					

结果表明，对照点和篱草内空气 PM2.5 浓度极显著高于草坪、针叶乔草、阔叶乔草、阔叶乔木的；乔灌草内空气 PM2.5 浓度极显著高于针叶乔草、阔叶乔草、阔叶乔木的，显著高于草坪的；草坪、针叶乔草内 PM2.5 浓度均显著高于阔叶乔草的。

4.4.8.2　采暖期

对采暖期不同类型绿地空气 PM2.5 浓度方差分析，结果表明，21:00 不同类型绿地之间空气 PM2.5 有显著差异。用 LSD 方法分别在 α=0.05 和 α=0.01 水平上进行多重比较（见表 4-17）。

表 4-17 多重比较　　单位：$\mu g/m^3$

Table 4-17 Multiple comparisons

绿地类型	均值	Xi-113.56	Xi-119.66	Xi-131.66	Xi-140.41	Xi-140.73	Xi-147.76
乔灌草	265.93	152.37**	146.27**	134.27**	125.52**	125.20**	118.17**
对照点	147.76	34.20	28.10	16.10	7.35	7.03	0
篱　草	140.73	27.17	21.07	9.07	0.32	0	
草　坪	140.41	26.85	20.75	8.75	0		
针叶乔草	131.66	18.10	12.00	0			
阔叶乔草	119.66	6.10	0				
阔叶乔木	113.56	0					

结果表明，乔灌草内空气 PM2.5 浓度极显著高于其它六个样地的空气 PM2.5 浓度。

4.4.9　小结

从以上分析可知，非采暖期不同类型绿地空气 PM2.5 浓度之间的差异在 07:00 至 17:00 均不显著，仅在 19:00 和 21:00 存在不同程度的差异。

采暖期不同类型绿地空气 PM2.5 浓度之间的差异在 11:00 至 15:00 以及 19:00 均不显著，其它时间段均存在不同程度的差异。

第五章 环境因子对空气颗粒物浓度的影响

5.1 空气负离子对空气颗粒物浓度的影响

评价空气质量的一个重要指标就是负离子含量（Terman 等，1995）。负离子是一种无形的森林资源，又是一种客观存在的生态环境资源。空气电离，使自由电子与其它中性分子相结合，而得到电子的气体分子带负电，称为负离子。负离子具有杀菌、降尘、清洁空气、提高免疫力、调节机能平衡的功效，被誉为"空气维生素和生长素"（倪军等，2004；章志攀等，2006）。 负离子浓度与大气环境关系密切。负离子浓度越高，空气越清洁，感觉就越舒服；负离子含量少，且正、负离子浓度比例越大，空气就越差（黄彦柳等，2004）。

地面上负离子的产生与植被、水体等因素有关，但其浓度主要取决于该地区的植物数量，尤其是树木的数量，因为树木比农作物高得多，更容易放电（蒙晋佳等，2005）。森林与负离子浓度有什么关系呢?国内外的研究资料表明，森林中负离子浓度明显高于无林地区，森林能有效地增加负离子的数量，主要的原因：一是由于森林植物进行光合作用会释放大量氧气，森林的蒸腾作用产生大量水汽，氧气和水汽容易离化产生自由电子，同时氧气和水汽分子也最易捕获自由电子，而形成负离子；二是由于森林具有滞尘作用，森林的滞尘能力比裸露地面高 75 倍，因而森林中浮尘减少了，负离子损耗也就少；三是森林植物叶面常分泌各种植物精油，这些精油能促进空气离化（任云卯等，2004）；四是由于树叶的尖端效应和树木产生的萜烯类物质具有增加空气中负离子的功能。所以植树种草，搞好城市和居民区绿化，就等于为城市和居民区安装了空气调节器和负离子发生器（邵海荣等，2000）。

不同树种环境中的空气负离子水平不同。吴际友等（2003）对八种优良园林阔叶树种空气负离子效应的分析表明，这八个树种与街道道路绿化带或公园绿化区相比，其空气负离子水平均较高；其从大到小的排序为：沉水樟、罗汉松、乐东拟单性木兰、木莲、南方木莲、金叶含笑、乐昌含笑、中国鹅掌楸。

空气负离子不仅与植物树种、植物群落的种类有关，还与群落的结构、植物的配置有关。不同的绿地类型空气负离子浓度存在着显著差异。王洪俊等（2004）、邵海荣等（2005）研究表明，复层林比单层林空气负离子水平浓度大，乔灌草复层结构与其它结构类型的空气负离子水平差异极显著；乔灌结构与灌草结构无显著差异，与草坪存在极显著差异；除草坪外，各类型均与对照存在极显著差异。姜国义（2001）认为树木在增加空气中负离子数量上比草坪增加近 1 倍。范亚民等（2005）认为负离子含量还与植物群落的绿量、有无水环境等有关，负离子浓度的大小顺序是复层结构（乔灌草）>简单植

被配置结构（乔灌、乔草、灌草）>单一配置结构（草坪、稀乔、稀灌草）。邵海荣等（2005）还认为，由于针叶树是常绿树种，秋、冬季节的负离子浓度要明显高于落叶的阔叶林，就年平均情况而言，针叶林中的空气负离子平均浓度要高于阔叶林。针叶林平均浓度为942个/cm^3，阔叶林平均浓度为774个/cm^3。

5.1.1　空气负离子浓度的分级评价方法

关于负离子浓度的分级评价方法，目前我国尚无统一的评价标准（邵海荣等，2000）。以负离子浓度为基本观测指数，以单极系数和空气质量评价指数作为空气质量的评价指标（郭圣茂等，2006）。其公式为：

$$q= n^+/ n^- \qquad \text{公式（5.1）}$$

$$CI=n-/1000*q \qquad \text{公式（5.2）}$$

公式（5.1）、（5.2）中，n+为正离子数，n-为负离子数，q为单极系数，CI为空气质量评价指数。

一些学者经过研究认为单极系数等于或小于1时，才能给人以舒适感。单极系数小于1，表示空气中负离子浓度大于正离子浓度。单极系数越小，表示负离子浓度比正离子浓度高的越多，对人体越有利（邵海荣等，2005）。

CI指标把负离子作为评价指数，同时又考虑了正负离子的构成。CI值越大，空气质量越好。目前国内外通行的空气清洁度等级标准（见表5-1）（李伟华等，2003）。

表5-1 空气清洁度与空气质量评价指数的关系

Table 5-1 Rlationship between air cleanness degree and CI

清洁度	CI	等　级
最清洁	>1.0	A
清　洁	1.0～0.7	B
中等清洁	0.69～0.5	C
容　许	0.49～0.30	D
临界值	<0.29	E
	其中：0.29～0.19　轻污染	
	0.18～0.10　中等污染	
	<0.09　　重污染	

5.1.2　不同类型绿地空气负离子浓度变化情况

（1）6种类型绿地以及对照点内空气负离子浓度日变化均较明显，但是由于植被组成不同，出现最高浓度、最低浓度的时间差别较大：乔灌草、针叶乔草、阔叶乔草的浓度最高值出现在07:00－09:00和19:00－21:00，最低浓度值出现在17:00；草坪、阔叶乔木的浓度最高值出现在07:00－09:00，浓度最低值出现在15:00；篱草以及对照点的浓度最高值出现在15:00，浓度最低值出现在21:00（见表5-2）。

表5-2 空气负离子浓度日变化

Table 5-2 Daily variation of air-borne anions

时 间	负离子浓度/（个·m^{-3}）						
	阔叶乔草	乔灌草	阔叶乔木	篱草	针叶乔草	对照点	草坪
07:00	513	578	582	382	347	288	418
09:00	415	493	585	385	300	283	352
11:00	410	430	485	397	320	273	318
13:00	477	442	301	243	292	358	278
15:00	345	448	258	430	245	407	118
17:00	213	337	445	308	193	267	315
19:00	505	213	322	363	340	243	168
21:00	477	400	360	148	368	148	195

（2）对不同类型绿地空气负离子浓度进行方差分析，得出F值为7.843，p=0.000<0.01，发现不同类型绿地空气负离子存在显著差异。用LSD方法分别在α=0.05和α=0.01水平上进行多重比较（表5-3）。结果表明，不同类型绿地之间空气负离子浓度存在显著差异。对照点和草坪的空气负离子浓度均极显著低于阔叶乔草、乔灌草和阔叶乔木型；篱草型显著低于阔叶乔草、乔灌草和阔叶乔木型。从均值来看，空气负离子浓度大小的顺序是，阔叶乔草型>乔灌草型>阔叶乔木型>篱草型>针叶乔草型>对照点>草坪型，乔灌草和阔叶乔木类型的空气负离子浓度基本持平。但是从原始统计数据分析，乔灌草类型的空气负离子浓度整体差别不大，数值比较集中于400~500个•cm^{-3}之间，而阔叶乔木类型的空气负离子浓度差异较大，且最大值就出现在该类型中。分析说明，阔叶乔草和乔灌草类型的空气负离子浓度较高且稳定，与国外较早报道的公园环境条件下负离子测定的数据（400~600 个•cm^{-3}）（钟林生等，1998）基本一致。

表5-3　多重比较　　单位：个•cm^{-3}

Table 5-3 Multiple comparisons

绿地类型	空气负离子浓度均值/（个·m^{-3}）	标准差	显著性水平	
			0.05	0.01
阔叶乔草	419	225.79	a	A
乔灌草	418	128.60	a	A
阔叶乔木	417	171.56	a	A
篱　草	332	174.83	b	AB
针叶乔草	298	139.16	b	B
对照点	284	129.89	b	B
草　坪	270	170.14	b	B

注：同一列相同字母表示经 LCD 检验差异不显著。

（3）利用公式（5.1）、（5.2）并依据观测值计算得出空气质量评价指数CI（见表5-4）。阔叶乔草、乔灌草和阔叶乔木型评价指数最高，空气清洁度属于允许范围；篱草型的评价指数接近0.30，略高于临界值，空气质量稍好于对照点；草坪和对照点都属于轻污染。

表5-4 绿地类型对空气质量的影响

Table 5-4 Effect on air quality at styles of different urban green-lands

绿地类型	负离子数（个/cm³）	正离子数（个/cm³）	单极系数	评价指数	空气清洁等级
对照点	284	411	1.632	0.223	E
篱　草	332	396	1.312	0.300	D
草　坪	270	390	1.638	0.206	E
阔叶乔木	417	519	1.252	0.356	D
针叶乔草	298	355	1.411	0.272	E
阔叶乔草	419	507	1.375	0.371	D
乔灌草	418	536	1.363	0.343	D

综合上述（1）、（2）两点可以得出：

第一，从绿地组成植被对负离子的影响看，高大乔木光合作用强、蒸腾旺盛、易产生大量水气，进而易形成负离子、CI指数高，使得林内空气好，空气质量高。绿篱低矮，光合作用弱于高大乔木，负离子浓度非常低，CI指数处于临界状态，空气质量较差。相比之下，乔灌草和由阔叶乔木组成的绿地更适合夏季人们的休闲娱乐；置身于这样的环境中，不仅有娱乐游憩的作用，还使人精神抖擞、减少呼吸道疾病发生，真正起到娱乐与健康的双重功效。

第二，从绿地结构来看，由枝叶茂盛的高大乔木组成的乔灌草、乔草林内郁闭度和地被物覆盖度高较高，绿量高，颗粒物少，负离子损耗较少。绿篱和草坪组成的复层结构以及草坪型的立体绿量少，负离子浓度低，CI指数小，空气质量差。乔灌草和乔草型绿地中，人流量、自行车流量少；而位于学校中央主楼附近的草坪型和篱草型空气负离子浓度低，除了与绿地结构有关之外，人流量和自行车流量较多等人为因素也相应降低了负离子浓度。

第三，试验对照点——校门口来往汽车多，尾气排放和地面扬起的灰尘使负离子浓度大大减少；又由于硬质水泥路面的负离子浓度低于土质路面，使得对照点CI指数低，空气质量差。同样空旷的草坪型绿地的空气质量与对照点的相差无几。二者空气质量不好，不仅因为其附近人流量、车流量多，还因为这两个地方较为空旷，四周没有树木，湿度低，不易形成负离子。

5.1.3　空气负离子浓度对不同粒径空气颗粒物的影响

从表5-5看出，总体上负离子与空气颗粒物的相关关系不显著。在未剔除各种气象因素的情况下，负离子与PM2.5的关系最密切，其次是PM10和TSP，与PM1的关系最低。剔除湿度影响后，负离子与PM10、PM2.5的相关性最大；剔除温度和风速影响后，负离子与PM2.5的相关性最大。说明负离子中和PM2.5的能力较强，其次是PM10，对TSP和PM1的中和作用较低。

表5-5 空气负离子对不同粒径空气颗粒物的影响

Table 5-5 Effect of negative air ions on PM

颗粒物名称	未剔除影响因素的相关系数	剔除影响因素后的相关系数					
		最大风速	平均风速	最高温度	最低温度	最高湿度	最低湿度
TSP	-0.077	-0.158	-0.211	-0.101	-0.137	-0.212	-0.248
PM10	-0.097	-0.176	-0.215	-0.130	-0.171	-0.244	-0.299
PM2.5	-0.163	-0.244	-0.238	-0.199	-0.230	-0.243	-0.279
PM1	-0.042	-0.088	-0.093	-0.052	-0.076	-0.105	-0.124

5.2 影响颗粒物浓度的其它因子分析

风是反映大气动力稳定性的重要特征量，是与空气污染密切相关的气象参数，它对大气污染物的稀释扩散和三维输送起着重要作用（刘宇等，2002）。颗粒物与气象因子的关系国内外学者都有研究。王淑英等（2002）对 PM10 浓度与风速、相对湿度、本站气压、地面温度和水平能见度进行线性相关性统计分析，结果表明，PM10 浓度与能见度、相对湿度、本站气压和风速相关性较好，与气温相关性较差。杨书申等（2005）分析了大气颗粒物浓度与主要气象要素（降水量、风速和能见度）的关系，结果表明：在风速较小（2 级以下）时，不会对颗粒物浓度的下降起作用，在没有降水的情况下，一般使颗粒物产生积累，质量浓度上升；在风速为 3 级时，就会使颗粒物浓度的下降起作用，在当日或次日质量浓度就会有明显的下降，风速对颗粒物浓度的下降作用有明显的滞后现象，当风速更高时，对颗粒物浓度的影响就变得比较复杂；适当的风速是颗粒物浓度下降的另一个主要原因。孙韧等（2005）对 TSP 浓度与风速的关系进行分析，得出临界风速为 7 米/秒；也就是说，风速越大，TSP 浓度越小，但风速达到 7 米/秒后，TSP 浓度与风速呈正相关——即风速越大，TSP 浓度越高。

鲁兴等（2004）对 PM10 和 PM2.5 浓度与风速、温度、湿度的相关性进行了分析，得出 PM10 和 PM2.5 与风速存在明显的负相关关系，相关系数分别为-0.63 和-0.66；与湿度的相关系数分别为 0.25 和 0.32；与温度呈较弱的负相关关系。周丽（2003）也研究了 PM2.5 浓度与风速、气压、湿度和温度的相关关系，其相关系数分别为-0.45、-0.68，0.48 和 0.2；风速、气压对 PM2.5 的作用是显著的，温度、湿度对 PM2.5 的作用是不显著的，并建立了 PM2.5 与气压、风速的回归模型。

5.2.1 相关性分析

对全年颗粒物浓度与温度、湿度、最大风速、平均风速和郁闭度的偏相关关系进行分析，可得表 5-6。

表5-6 偏相关关系系数分析表

Table 5-6 Partial correlation analysis

	温度	湿度	最大风速	平均风速	郁闭度
TSP	-0.0254	0.0516	-0.0744	0.0354	-0.0556
PM10	-0.0551	0.2299	-0.0639	0.0119	-0.0624
PM2.5	-0.0190	0.4966	-0.0508	-0.0589	-0.0964
PM1	-0.1666	0.4561	-0.1007	-0.0413	-0.1590

从表 5-6 可以看出，TSP、PM10、PM2.5 以及 PM1 浓度与湿度呈正相关关系，与温度、最大风速、平均风速和郁闭度有负相关关系。也就是说，湿度越高，越有利于颗粒物的积聚使颗粒物浓度越高；在一定范围内温度、风速、郁闭度越大，颗粒物浓度越低；适当的风速有利于颗粒物的扩散。由于实验过程中选择的是典型的天气条件，因此颗粒物浓度与上述因子的关系系数不是太大，例如与风速的关系系数就比其它研究人员得出的结论要低。

5.2.2 因子分析

颗粒物进入大气、转变、扩散到沉降或其它方式去除均与气象条件密切相关，某时段的颗粒物浓度是多种气象因素共同作用的结果，并且某些气象因素之间也有相关性，但又没有必然联系，如相对湿度、太阳辐射、风速、降水量、逆温层厚度之间都会相互影响，但是晴天的相对湿度也会很大，太阳辐射既增强了大气不稳定又促使二次颗粒物形成，这就减弱了单一气象因素的影响力度。因此有必要对影响颗粒物浓度的因素进行因子分析。选择的因子变量包括温度、湿度、最大风速、平均风速、郁闭度。

进行因子分析的目的在于对影响颗粒物浓度的各因子进行综合评价，从中提取少数几个综合指标来描述若干各指标之间的联系，对原始资料进行简化，将多个实测变量转化为少数几个线性不相关的综合指标，用较少的综合指标来反映原始资料的大部分信息，使问题简化，并且更能反映因子体系的本质（卢纹岱，2000）。

5.2.2.1 原始数据标准化

由于原始数据各物理量具有不同的量纲，因此，为了消除量纲的影响，需对原始数据进行标准化。具体的标准化结果省略。

5.2.2.2 标准化数据的相关系数矩阵

对影响 TSP 浓度的各因子之间进行相关分析，得到如表 5-7 所示的相关系数矩阵。

经过 KMO 检验和 Bartlett 球度检验，适合进行因子分析。

表5-7 相关关系矩阵

Table5-7 Correlation Matrixes

	平均温度	平均湿度	最大风速	平均风速	郁闭度
平均温度	1.000				
平均湿度	.073	1.000			
最大风速	.228**	-.292**	1.000		
平均风速	.085	-.231**	.819**	1.000	
郁 闭 度	.058	.117	-.462**	-.464**	1.000

注：*在 0.05 水平上差异显著，**在 0.01 水平上差异显著。

5.2.2.3 采用主成分分析法构造因子变量

根据主成分法计算出的因子的特征值和累计贡献率如表 5-8 所示：

表5-8 各因子特征值及累计贡献率

Table 5-8 Eigenvalues and cumulative variance ratio

公因子	特征值	累计贡献率（%）
1	2.309	46.182
2	1.089	67.957
3	0.892	85.789
4	0.548	96.741
5	0.163	100

虽然前 2 个公因子的累计贡献率仅为 67.957%，前 3 个公因子的累计贡献率为 85.789%，但是第三个公因子的特征值为 0.892，已经小于 1，也就是说第三个主成分的解释力度不如直接引入一个原变量的平均解释力度大（张文彤，2002）。因此，前 2 个公因子已经能够概括原因子矩阵中的大部分信息。

5.2.2.4 因子荷载矩阵及因子解释

为实现对各公因子合理的命名解释，进一步得到方差极大法对因子荷载矩阵旋转后的结果（见表 5-9）。

表5-9 旋转后的因子荷载阵

Table5-9 Rotated Component Matrix

变 量	公因子	
	1	2
温 度	.142	.916
湿 度	-.425	.426
最大风速	.917	.173
平均风速	.898	5.788E-02
郁 闭 度	-.678	.189
累计公因子百分比（%）	46.182	67.957
原贡献率（%）	46.182	21.775

因子分析的目的不仅仅使找出主因子，更主要的是知道每个主因子的意义，即知道每个主因子所代表的影响 TSP 浓度的因素。可见：（1）公因子 F1 在最大风速、平均风速上的载荷比较大，在郁闭度上的载荷居中；公因子 F1 集中了风速的指标；（2）公因子 F2 在温度上的载荷较大。

因此，可以说，影响颗粒物浓度的主要因素是风速、郁闭度，温湿度对颗粒物浓度也有影响，但相对较小。除了郁闭度对颗粒物的影响之外（本人未见有颗粒物与郁闭度相关关系的研究），本文得出的其它因子对颗粒物的影响的结果与其它研究人员得出的研究结果近似。

5.2.3 不同天气条件下颗粒物浓度情况对比

5.2.3.1 晴天、阴天情况下对比

通过对不同粒径颗粒物浓度晴天、阴天进行独立样本 T 检验，表明这四种粒径颗粒物均存在极显著差异（相伴概率均小于 0.01），见表 5-10。

表5-10 不同粒径颗粒物浓度在晴天和阴天的独立样本T检验

Table 5-10 Independent-sample T test of PM concentration in sunshine and overcast sky

项 目	TSP		PM10		PM2.5		PM1	
	晴天	阴天	晴天	阴天	晴天	阴天	晴天	阴天
均 值	743.59	918.73	421.33	600.55	119.89	174.33	47.07	62.86
标准差	216.74	771.00	97.08	513.85	49.66	111.50	26.12	39.88
标准误	16.48	53.46	7.38	35.63	3.78	7.73	1.99	2.77
t 值	-3.131		-4.926		-6.327		-4.640	
相伴概率	0.002		0.000		0.000		0.000	

从上表所示的均值可以看出，阴天颗粒物的浓度比晴天高 24%~45%。

5.2.3.2 雨后晴天、阴天情况下对比

通过对不同粒径颗粒物浓度雨后晴天、阴天进行独立样本 T 检验，表明这四种粒径颗粒物均存在极显著差异（相伴概率均小于 0.01），见表 5-11。

表5-11 不同粒径颗粒物浓度在雨后晴天和阴天的独立样本T检验

Table 5-11 Independent-sample T test of PM concentration

项 目	TSP		PM10		PM2.5		PM1	
	晴天	阴天	晴天	阴天	晴天	阴天	晴天	阴天
均 值	389.61	653.79	213.34	506.58	56.05	294.81	21.20	94.62
标准差	136.79	100.03	85.51	106.42	39.65	90.02	15.65	25.66
标准误	13.41	9.90	8.38	10.54	3.89	8.91	1.53	2.54
t 值	-15.844		-21.777		-24.553		-24.739	
相伴概率	0.000		0.000		0.000		0.000	

从上表所示的均值可以看出，雨后阴天颗粒物的浓度比晴天高 67%~426%，其中以

PM2.5 浓度雨后阴天比晴天增加的幅度最大，为 426%。

5.2.3.3 雨后及非雨后情况下对比

从上述两表（表 5-10 和表 5-11）可知，不同天气情况下（阴天、晴天）降水对颗粒物的清除作用有很大差别。采用公式：清除率＝（雨前颗粒物浓度－雨后颗粒物浓度）/雨前颗粒物浓度，计算不同天气情况下（晴天、阴天）降水对颗粒物的清除作用（见表 5-12）。

表5-12 降水对颗粒物的清除率

Table 5-12 Cleanup rate of rainfall

项 目	TSP		PM10		PM2.5		PM1	
	晴天	阴天	晴天	阴天	晴天	阴天	晴天	阴天
均值 A（平时）	743.59	918.73	421.33	600.55	119.89	174.33	47.07	62.86
均值 B（雨后）	389.61	653.79	213.34	506.58	56.05	294.81	21.20	94.62
颗粒物清除率（A－B）/A	48%	29%	49%	16%	53%	-69%	55%	-50%

从表 5-12 可知，降水对颗粒物的清除作用在雨后晴天发挥的最好。雨后晴天 TSP、PM10、PM2.5 和 PM1 的浓度均比非雨后的晴天的浓度低 50%左右；而雨后阴天，TSP 和 PM10 的浓度比非雨后的阴天的浓度有小幅度的降低、PM2.5 和 PM1 的浓度不降反而分别升高 69%和 50%。

5.3 小结

（1）总体上空气负离子与颗粒物的相关关系不显著。在未剔除各种气象因素的情况下，负离子与 PM2.5 的关系最密切。剔除湿度影响后，负离子与 PM10、PM2.5 的相关性最大；剔除温度和风速影响后，负离子与 PM2.5 的相关性最大。说明负离子中和 PM2.5 的能力较强，其次是 PM10，对 TSP 和 PM1 的中和作用较低。

（2）TSP、PM10、PM2.5 以及 PM1 浓度与湿度呈正相关关系，与温度、最大风速、平均风速和郁闭度有负相关关系。也就是说，湿度越高，越有利于颗粒物的积聚使颗粒物浓度越高；在一定范围内温度、风速、郁闭度越大，颗粒物浓度越低；适当的风速有利于颗粒物的扩散。

（3）在影响因素风速、温度、湿度、郁闭度中，影响颗粒物浓度的主要因素是风速、郁闭度，温湿度对颗粒物浓度也有影响，但相对较小。

（4）阴天颗粒物的浓度比晴天高 24%~45%。

（5）雨后阴天颗粒物的浓度比晴天高 67%~426%，其中以 PM2.5 浓度雨后阴天比晴天增加的幅度最大，为 426%。

（6）降水对颗粒物的清除作用在雨后晴天发挥的最好。雨后晴天四种粒径颗粒物的浓度均比非雨后的晴天的浓度低 50%左右；而雨后阴天，TSP 和 PM10 的浓度比非雨后的阴天的浓度有小幅度的降低、PM2.5 和 PM1 的浓度不降反而分别升高 69%和 50%。

第六章 结论与讨论

本研究通过对草坪、篱草、阔叶乔草、针叶乔草、阔叶乔木、乔灌草等六种典型绿地内空气颗粒物浓度的观测，研究了不同类型绿地 TSP、PM10、PM2.5、PM1 等颗粒物浓度的季节变化和日变化规律，分析了环境因子对颗粒物的影响。初步得出以下结论：

6.1 结论

（1）6 种类型绿地的空气颗粒物浓度在季节分布上差异显著，空气 TSP、PM10、PM2.5、PM1 浓度均是在秋季浓度最低。其中 TSP、PM10 浓度秋季最低、春季最高，春季不同类型绿地空气 TSP、PM10 浓度极显著高于其它三季，夏季、秋季和冬季之间没有显著差异。PM2.5、PM1 浓度秋季最低、夏季最高，夏季不同类型绿地空气 PM2.5、PM1 浓度极显著高于春季、秋季和冬季；冬季不同类型绿地空气 PM2.5、PM1 浓度极显著高于秋季、显著高于春季，春季、秋季之间没有显著差异。

（2）秋季不同类型绿地之间空气 TSP、PM10 浓度存在显著差异，其它季节没有显著差异。不同类型绿地之间空气 PM2.5 和 PM1 在四季均没有显著差异。秋季，乔灌草内空气 TSP、PM10 浓度极显著低于对照、草坪、篱草、阔叶乔草，阔叶乔木内空气 TSP、PM10 浓度显著低于篱草和对照。

（3）四种粒径颗粒物浓度出现高低值的月份不尽一致。TSP、PM10、PM2.5 和 PM1 浓度两个低值段均出现在 2 月份、11 月份；而 TSP、PM10 浓度的最高值出现在沙尘暴肆虐的 4 月份，PM2.5、PM1 浓度最高值出现在 1 月份。

（4）四种粒径空气颗粒物浓度日变化曲线均呈现双峰单谷型，即早晚高、白天低，在 11:00~15:00 最低；早晚相比，早上的颗粒物浓度低于晚上。

（5）从白天的空气质量来看，非采暖期好于采暖期。在观测时段内非采暖期的 TSP 和 PM10 的浓度均达到国家环境空气质量标准（GB3095—1996）的二级标准；非采暖期 PM2.5 的浓度均达到美国 EPA 环境空气质量标准。

（6）在非采暖期，不同类型绿地之间空气 TSP 浓度在 07:00 和 13:00 差异均不显著，PM2.5 浓度在 07:00 至 17:00 差异均不显著，其它时间段存在显著差异。在采暖期，不同类型绿地之间空气 TSP 浓度在 09:00、13:00 和 15:00 的差异均不显著，PM2.5 浓度在 11:00 至 15:00 以及 19:00 差异均不显著，其它时间段存在显著差异。

（7）总体上负离子与颗粒物的相关关系不显著。在风速、温度、湿度、郁闭度等因子中，影响颗粒物浓度的主要因素是风速、郁闭度，温湿度对颗粒物浓度也有影响，但相对较小。

（8）阴天颗粒物的浓度比晴天高 24%～45%；雨后阴天颗粒物的浓度比晴天高 67%~426%，其中以 PM2.5 浓度雨后阴天比晴天增加的幅度最大，为 426%。

6.2 讨论

（1）本次研究主要是在校园内进行，空气环境相对洁净，对于城市其他绿地类型来说，由于城市颗粒物来源、影响因素的复杂性、外界环境条件的瞬时多变性，其与颗粒物的关系还需要开展针对性的研究。

（2）颗粒物与绿地类型的关系较复杂，除了受绿地结构、绿地类型的影响以外，不同季节、不同时间也有变化。例如，在对不同类型绿地空气颗粒物浓度进行比较时，夏季多层复合结构的乔灌草绿地中树木郁闭度和地被物覆盖度都很高、绿量大，但是它的颗粒物浓度却高于单层结构、绿量少于它的草坪和篱草绿地。而陈自新（1998c）、周坚华（1998）等人的研究结果是乔灌草绿地内空气颗粒物浓度最低。本研究与他人研究有所区别的原因可能与乔灌草绿地的植物密度较高、枝下高偏低、花灌木数量多有关系。植物密度高、枝下高偏低，使得林内阴湿、通风条件不好，不利于颗粒物的输送和扩散，在城市不断有外界颗粒物输入的情况下，可能反而导致颗粒物浓度居高不下。因此，在这种条件下，究竟哪种绿地类型更有利于降低颗粒物浓度、有利于人的休闲活动，这方面还有待今后深入研究。

（3）城市颗粒物浓度与环境因子的关系比较复杂，国内外研究的很多。本实验的结果是 TSP、PM10、PM2.5 以及 PM1 浓度可能与湿度呈正相关关系，与温度、最大风速、平均风速和郁闭度有负相关关系，但是相关关系均较弱。可能由于在城市条件下小气候变化较快、气象条件不稳定、区域空间差异等因素有关，这方面有待今后进一步研究。

（4）在分析不同类型绿地空气 TSP 浓度季节内的变化时，得出的结论是春季、夏季、冬季均无显著差异。而做日变化分析时，无论是采暖季节还是非采暖季节，不同类型绿地空气 TSP 浓度之间的差异在某些时间段却是显著的。这表明在城市条件下，绿地中颗粒物的浓度变化是一个非常复杂的过程，仅仅比较某个时段的颗粒物状况还不能够完全反应实际的情况，今后这种分析应该逐步向时时的定位监测发展。

（5）本次在时间尺度上只研究了 07:00 至 21:00 的颗粒物浓度变化情况，对于夜间的情况还缺乏研究，还无法完整的勾勒处颗粒物在不同绿地内 24 小时的整个变化情况，建议以后的研究继续完善夜间颗粒物变化的研究。

（6）陆地表面的覆盖状况（主要是土壤和植被类型）可以明显影响它与大气之间的水分、能量和其它的物质交换，从而影响大气环流和气候（赵鸣等，1995）。由于植被的存在，大气边界层可明显分为粗糙亚层和惯性亚层两个亚层。植物下层为粗糙亚层，在粗糙亚层，气流受植物单体的影响强烈，风速变化复杂（董治宝等，1996）。然而，在城市条件下不同类型绿地对于气流有何影响，还需进一步深入研究。

参考文献

[1] 北京市环境保护局：北京市人民政府关于发布本市第十阶段控制大气污染措施的通告．2004．http://www.bjepb.gov.cn/bjhb/tabid/68/InfoID/6399/Default.aspx

[2] 陈自新，苏雪痕，刘少宗．北京城市园林绿化生态效益的研究（2）．中国园林，1998，14（2）：51~54

[3] 陈自新，苏雪痕，刘少宗等．北京城市园林绿化生态效益的研究（6）．中国园林，1998，14（6）：53~56

[4] 柴一新，祝宁，韩焕金．城市绿化树种的滞尘效应——以哈尔滨市为例．应用生态学报，2002，13（9）：1121~1126

[5] 车凤翔．中国城市气溶胶危害评价．中国粉体技术，1999，1（3）：4~9

[6] 陈勇，梁小像，孙冰等．深圳市生态风景林的人体舒适效应．中国城市林业，2006，4（2）：48~51

[7] 褚泓阳，弓弼，彭泓．草坪的生态景观研究．陕西林业科技，1995，2：41~44

[8] 《大气质量监测分析方法标准实务手册》编委会．大气监测分析方法标准实物全书．北京：科学技术出版社，2002

[9] 董雪玲．大气可吸入颗粒物对环境和人体健康的危害．资源·产业，2004，6（5）：50~53

[10] 董治宝，陈渭南，董光荣等．植被对风沙土风蚀作用的影响．环境科学学报，1996，16（4）：437~443

[11] 范亚民，何平，李建龙．城市不同植被配置类型空气负离子效应评价．生态学杂志，2005，24（8）：883~886

[12] 国家环境保护总局：重点城市空气质量日报查询（北京）．2006．http://www.sepa.gov.cn/quality/air_s.php3?offset=100&city=北京

[13] 国家统计局．2005年中国城市化率达到42.99%．2006．http://www.ccgov.org.cn/zwjjcbg/jqjc20060424001.htm．

[14] 郭圣茂，杜天真，赖胜男．城市绿地对空气负离子的影响．河北师范大学学报（自然科学版），2006，30（4）：478~482

[15] 黄彦柳，陈东辉，陆丹等．空气负离子与城市环境．干旱环境监测，2004，18（4）：208~211

[16] 韩阳、李雪梅、朱延姝等．环境污染与植物功能．北京：化学工业出版社、环境科学与工程出版中心，2005

[17] 黄雪莲，金昱，郭新彪等．沙尘暴PM2.5和PM10对大鼠肺泡巨噬细胞吞噬功能的影响．卫生研究，2004，33（2）：154~157

[18] 姜国义．生态园林绿地建设中应用树木与草坪效果对比分析．防护林科技，2001，1：25~27

[19] 康博文，王得祥，刘建军等．城市不同绿地类型降温增湿效应的研究．西北林学院学报，2005，20（2）：54~56

[20] 阚海东，陈秉衡．我国大气颗粒物暴露与人群健康效应的关系．环境与健康杂志，2002，19（6）：422~424

[21] 鲁兴，吴贤涛．北京市采暖期大气中PM10和PM2.5质量浓度变化分析．焦作工学院学报（自

然科学版），2004，23（6）：487~490
[22] 卢纹岱．SPSS for Windows 统计分析．北京：电子工业出版社，2000
[23] 李伟华，陈章和．城镇绿地对空气质量的影响——以中山市小榄镇为例．应用与环境生物学报，2003，9（4）：362~366
[24] 刘宇，王式功，尚可政等．兰州市低空风时空变化特征及其与空气污染的关系．高原气象，2002，21（3）：322～326
[25] 刘泽常，王志强，李敏等．大气可吸入颗粒物研究进展．山东科技大学学报（自然科学版），2004，23（4）：97~100
[26] 蒙晋佳，张燕．地面上的空气负离子主要来源于植物的尖端放电.环境科学与技术，2005，28（1）：112~113
[27] 倪军、徐琼、石登荣等．城市绿地空气负离子相关研究——以上海公园为例．城市林业，2004，2（3）：30~33
[28] 彭镇华．中国城市森林．北京：中国林业出版社，2003
[29] 钱易，唐孝炎．环境保护与可持续发展．北京：高等教育出版社，2001
[30] 秦瑜，赵春生．大气化学基础．北京：气象出版社，2003
[31] 阮素云、苏瑾、李延红等．环境 2.5μm 以下颗粒物污染对哮喘及肺癌发病的影响．环境与职业医学，2002，19（6）：396~397
[32] 任云卯，李涛，侯智等．森林、空气负离子与人居环境．绿化与生活，2004，4：8~16
[33] 上海市环境保护宣传教育中心．空气质量日报、预报指标体系调整问答．2000．http://www.envir.gov.cn/info/2000/5/529967.htm
[34] 上海市环境保护宣传教育中心．环境保护 以人为本——本市空气质量日报、预报指标体系将作相应调整．2000．http://www.envir.gov.cn/info/2000/5/529971.htm
[35] 孙高峰．绿色奥运与环境保护．黑龙江环境通报，2005，29（3）：4~6.
[36] 孙铁珩，周启星，李培军．污染生态学．北京：科学出版社，2001
[37] 孙淑萍，古润泽，张晶．北京城区不同绿化覆盖率和绿地类型与空气中可吸入颗粒物(PM10)．中国园林，2004，(3)：77~79
[38] 孙韧，刘伟，张赞等．城市典型气象条件与大气颗粒物污染之间的关系．中国环境监测，2005，21（2）：80~83
[39] 粟志峰，刘艳，彭倩芳．不同绿地类型在城市中的滞尘作用研究．干旱环境监测，2002，16（3）：163~165
[40] 邵海荣，杜建军，单宏臣．用空气负离子浓度对北京地区空气清洁度进行初步评价．北京林业大学学报，2005，27（4）：56~59
[41] 邵海荣，贺庆棠．森林与空气负离子．世界林业研究，2000，13（5）：19~23
[42] J.H.塞思菲尔德（美）．空气污染·物理和化学基础（中译本）．北京：科学出版社，1986
[43] 王明星．大气化学．北京：气象出版社，1999
[44] 王玮，汤大钢，刘红杰等．中国 PM2.5 污染状况和污染特征的研究．环境科学研究，2000，13（1）：1~5
[45] 王淑英，张小玲．北京地区 PM10 污染的气象特征．应用气象学报，2002，13（特刊）：177~184
[46] 王正非，朱劲伟，崔启武等．森林气象学．北京：中国林业出版杜．1985
[47] 王铸豪．植物与环境．北京：科学出版社，1986
[48] 王成．城镇不同类型绿地生态功能的对比分析．东北林业大学学报，2002，5（3）：111~114

[49] 王洪俊. 城市森林结构对空气负离子水平的影响. 南京林业大学学报（自然科学版），2004，28（5）：96~98

[50] 吴际友，程政红，龙应忠. 园林树种林分中空气负离子水平的变化. 南京林业大学学报（自然科学版），2003，7（4）：78~80

[51] 新华网. 中国公布 GDP 历史数据修订结果：2004 年增长 10.1%. 2006. http://news.xinhuanet.com/fortune/2006-01/09/content_4028231.htm

[52] 周丽，徐祥德，丁国安等. 北京地区气溶胶 PM2.5 粒子浓度的相关因子及其估算模型. 气象学报， 2003，61（6）：761~768

[53] 尹公. 城市绿地建设工程. 北京：中国林业出版社，2001

[54] 尹振东. 气象条件对可吸入颗粒物浓度的影响. 环境科学与管理，2005，30（3）：46~47

[55] 杨小波，吴庆书，邹伟等. 城市生态学. 北京：科学出版社，2000

[56] 杨书申，邵龙义，肖正辉. 中国典型城市 2004 年大气质量及颗粒物浓度与气象条件关系分析. 中原工学院学报，2005，16（5）：5~9

[57] 杨复沫，贺克斌，马永亮等. 北京 PM2.5 浓度的变化特征及其与 PM10、TSP 的关系. 中国环境科学，2002，22（6）：506~510

[58] 杨东贞，于海青，丁国安等. 北京北郊冬季低空大气气溶胶分析. 应用气象学报，2002，13（特刊）：113~126

[59] 中国人口网. 国家统计局：中国城市化率已达 40.5%. 2004. http://www.gjjsw.gov.cn/rkzh//zgrk/rkysh/t20041101_17094.htm

[60] 中国新闻网. 北京只有 9 天蓝 中重度污染出现 17 天. 2006. http://news.sohu.com/20060430/n243077917.shtml

[61] 周志翔，邵天一，王鹏程等. 武钢厂绿地景观类型空间结构及滞尘效应. 生态学报，2002，22（12）：2036~2040

[62] 张秀梅，李景平. 城市污染环境中适生树种滞尘能力研究.环境科学动态，2001，2：27~30

[63] 张新献，古润泽，陈自新等. 北京城市居住区绿地的滞尘效益. 北京林业大学学报，1997，19（4）：12~17

[64] 张文彤. SPSS11.0 统计分析教程（高级篇）. 北京：希望电子出版社，2002

[65] 张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积. 第四纪研究，2001，21（1）：29~40

[66] 周坚华. 城市生存环境绿色量值群的研究(5)——绿化三维量及其应用研究. 中国园林，1998，14（59）：61~63

[67] 赵勇、李树人、阎志平. 城市绿地的滞尘效应及评价方法. 华中农业大学学报，2002，21（6）：582~586

[68] 赵鸣，江静，苏炳凯. 一个引入近地层的土壤一植被一大气相互作用模式. 大气科学，1995，19（4）：405~414

[69] 章志攀，俞益武，孟明浩等. 旅游环境中空气负离子的研究进展. 浙江林学院学报，2006，23（1）：103~108

[70] 钟林生，吴楚材，肖笃宁. 森林旅游资源评价中的空气负离子研究. 生态学杂志，1998，17（6）：56~60

[71] Berube K A. Electron microscopy of urban airborne particulate matter. Microscopy Anal，1997，11~13

[72] B Brunekreef，S T Holgate. Air pollution and health. The Lancet，2002，360：1233~1242

[73] C. Arden Pope III, Richard T. Burnett, Michael J. Thun, et al.. Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. The American medical association, 2002, 287 (9): 1132~1141

[74] Davidson C I and Wu Y L. Dry deposition of particles and vapors. Acidic Precipitation. New York: Springer-Verlag, 1990, 103~126

[75] EPA. Transportation Conformity Rule Amendments for the New PM2.5 National Ambient Air Quality Standard: PM2.5 Precursors. Federal Register. 2005, 70 (87): 24280~24292

[76] Jim C Y. Urban Trees in Hong Kong Benefits and Constraint. Arboricultural Journal, 1987, (11): 145~164

[77] Marko Vallius. Characteristics and Sources Of Fine Particulate Matter In Urban Air. Finland: Publications of the National Public Health Institute, 2005

[78] P Meenakshi, M K Saseetharan. Analysis of Seasonal Variation of Suspended Particulate Matter and Ox-ides of Nitrogen with Reference to Wind Direction in Coimbatore City. Journal-EN. 2003, 84 (September): 1~5

[79] Schwartz J, Dockery DW, Neas LM. Is daily mortality associated specifically with fine particles? Air Waste Manage Assoc., 1996, 46: 927~939

[80] Sehmel G A. Particle and gas dry deposition: a review. Atmospheric Environment, 1980, 14: 983~1011

[81] Smith W H. Pollutant uptake by plants. // Treshow M. Air Pollution and Plant Life. New York: John Wiley and Sons, 1984

[82] Stoker H S, Seager S L. Environmental chemistry: air and water pollution. Illinois: Scott, Foresman and Company, 1976

[83] Terman M, Terman JS. Treatment of seasonal affective disorder with high—output negative ionizer. Alternative and Complementary Medicine. 1995, 1: 87~92

[84] Xu X, Gao J, Dockery DW, Chen Y. Air pollution and daily mortality in residential areas of Beijing. China Journal: Arch Environ Health, 1994, 49 (4): 216~222

[85] Zanobetti A, Schwartz, Gold D. Are there sensitive subgroups for the effects of airborne particles? Envion Health Perspect, 2000, 108 (9) : 841~845

附录 1：研究区概况

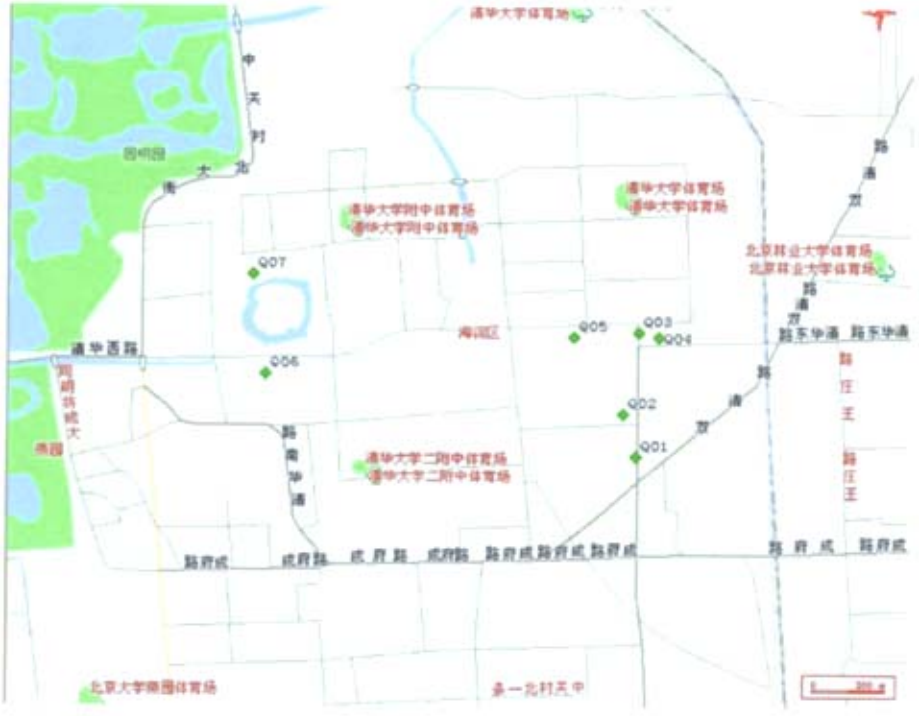


图　　例：

Q01：　对照点

Q02：　篱草型

Q03：　草坪型

Q04：　针叶乔草型

Q05：　阔叶乔草型

Q06：　阔叶乔木型

Q07：　乔灌草型

附录 2：缩写符号说明

CP	Coarse Particulates
FP	Fine Particulates
IP	Inhalable Particulates
PM	Particulate Matters
PM1	Particulate Matters smaller than 1 micrometers in size
PM2.5	Particulate Matters smaller than 2.5 micrometers in size
PM10	Particulate Matters smaller than 10 micrometers in size
TP	Thoracic Particulates
TSP	Total Suspended Particulates

本人在读期间的学术研究

发表论文

- 吴志萍，王成．城市绿地与人体健康．世界林业研究，2007，20（2）：32~37
- Xiao Jianmin，Wu Zhiping．Economic benefit analysis of Carbon sequestration of five typical forests types in Miyun watershed．Chinese forestry science and technology，2007，6（1）：57~61
- 吴志萍，王成，许积年等．六种类型城市绿地内夏季空气负离子与颗粒物．清华大学学报（自然科学版），2007，47（12）（已接收）

参加科研项目

- 中国林科院林业所城市林业研究室、北京大学、国家气象中心共同承担的国家科技部科研院所社会公益研究专项——“主要尘源性与植源性大气污染物对人体健康的影响评价”（2004DIB1J031），参与颗粒物、负离子、植物挥发物、花粉对人体健康的研究工作。
- 国家十一五科技支撑计划重大项目课题——“城市人居生态林构建关键技术研究”（2006BAD03A06），参与不同类型城市森林保健功能的研究工作。

获奖情况

- 2006 年 12 月获得中国林科院林业所 2006 年度“青年优秀科技论文”三等奖

导师简介

王成，男，1967年7月生，博士，研究员。1990年毕业于吉林林学院，1996在东北林业大学造林学专业获农学硕士学位，1999在北京林业大学生态学专业获理学博士学位，2001年从中国林科院博士后流动站出站。现任中国林科院林业研究所城市林业研究室主任，中国林学会城市森林分会常务副理事长兼秘书长，是“中国城市森林论坛”专家委员会成员，担任中国林学会森林生态分会、北京林学会的理事，《中国城市林业》编委。长期从事城市林业、森林生态、景观生态方面的教学科研工作。

近年来，先后主持和参加国家“十五”重大攻关项目课题“中国森林生态网络体系建设‘点’的研究与示范”、上海现代城市森林发展理论研究、绿色江苏现代林业发展研究、北京林业发展总体规划与布局研究、浙江林业现代化发展总体规划与布局研究、广州林业总体规划与布局研究、扬州市城市林业发展研究。目前正在主持国家十一五科技支撑重大项目课题“典型地区城市森林建设技术试验示范”，中国林科院与湖南、福建、江西等省院合作项目“湖南林业发展总体规划与布局研究、海峡西岸现代林业发展总体规划与布局研究、江西现代林业发展总体规划与布局研究”，科技部科研院所社会公益研究专项“主要尘源性与植源性大气污染物对人体健康的影响评价”，以及国家林业局948项目“城市林业有机地表覆盖物生产与应用技术引进”等项目，在中国城市森林建设理论、城市森林发展规划、城市森林生态功能与评价等方面开展了广泛研究。

创办了中国城市森林网站（http://www.cuf.com.cn），是《中国可持续发展林业战略研究》中“城市林业发展战略”的第一主笔人，先后荣获了2003年国家科技进步二等奖（第三名）；2005年首届梁希林业科学技术奖一等奖（第三名）；作为骨干参与的《中国可持续发展林业战略研究》项目组荣获2004年林业科技贡献奖；负责的城市林业研究室2005年获首届梁希科普奖。参与出版了《中国城市森林》等3本专著，发表学术论文60余篇。是2007年浙江省林业厅表彰的为“浙江林业现代化发展战略研究与规划”作出突出贡献的专家，2007年荣获“中央国家机关优秀青年”称号。

致 谢

首先，我要衷心地感谢我的导师王成研究员三年来对我的辛勤培养、悉心指导！从论文的选题、实验设计、实验监测、数据分析乃至论文的撰写，无不倾注了王老师大量的心血。通过这三年的学习，不仅提高了我的知识与技能，还培养了一个研究者所应有的人生态度。我的每一个进步都凝聚了导师的汗水和热诚！

在三年的学习生活中，我耳闻目染了导师刻苦钻研的精神、严谨的治学态度、严于律己宽以待人的高尚品格，这些都给我莫大的影响和启迪，渊博的学识、谆谆的教诲将使我受益终生。临毕业之际，谨向尊敬的导师致以诚挚地敬意！

感谢邱尔发老师、郄光发老师、孙朝晖、詹晓红老师在实验设计、仪器使用以及日常学习等方面给予的无私帮助和支持；感谢林业所王冬老师！感谢研究生院的老师！

感谢在实验过程中给我提供便利的清华大学绿色办公室的许积年老师和他的同事们以及总务办的诸位老师！深深的感谢国家气象中心的张志刚老师为我提供气象资料！他们的无私支持使我的实验监测、数据分析进展的非常顺利！

感谢同窗好友胡立香、杨影、任启文以及城市林业研究室的各位同学对我的关心和帮助；特别要感谢在我实验观测阶段白岩峰、陈玉娟、笪志祥、冯慧想、房城、胡新玲、侯晓静、韩帅、姜凯青、矫振彪、李艳霞、牟新涛、马玉峰、孙志伟、王鑫、王维枫、杨伟伟、赵辉、张亚勇等同学的鼎立支持，和我一起战酷暑、斗严寒；在此，一并表示诚挚的谢意！

最后，我要深深地感谢一直在身边默默支持我的父母和家人，感谢他们对我的关怀、支持和鼓励；感谢我的爱人校建民先生给予的理解、支持与付出；感谢我两岁的姑娘校乐静，她用天真浪漫的笑声化解了我学习、生活中的苦恼，不断让我产生研究灵感！是他们的浓浓亲情陪伴我克服了生活上和学业上的一切困难，顺利的完成了学业！

再一次感谢所有曾经给予我关心和帮助的老师、同事、同学及家人！

吴志萍

二零零七年五月于中国林科院