

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 19 期 Vol.33 No.19 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第33卷第19期

2013年10月 (半月刊)

目次

中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

- 生态系统服务研究文献现状及不同研究方向评述 马凤娇, 刘金铜, A. Egrinya Eneji (5963)
- 非人灵长类性打搅行为研究进展 杨 斌, 王程亮, 纪维红, 等 (5973)
- 密度制约效应对啮齿动物繁殖的影响 韩群花, 郭 聪, 张美文 (5981)
- 食物链长度远因与近因研究进展综述 王玉玉, 徐 军, 雷光春 (5990)
- AM 真菌在植物病虫害生物防治中的作用机制 罗巧玉, 王晓娟, 李媛媛, 等 (5997)
- 保护性耕作对农田碳、氮效应的影响研究进展 薛建福, 赵 鑫, Shadrack Batsile Dikgwatlhe, 等 (6006)
- 圈养大熊猫野化培训期的生境选择特征 张明春, 黄 炎, 李德生, 等 (6014)
- 利用红外照相技术分析野生白冠长尾雉活动节律及时间分配 赵玉泽, 王志臣, 徐基良, 等 (6021)
- 风速和持续时间对树麻雀能量收支的影响 杨志宏, 吴庆明, 董海燕, 等 (6028)
- 白马雪山自然保护区灰头小鼯鼠的巢址特征 李艳红, 关进科, 黎大勇, 等 (6035)
- 生境片段化对千岛湖岛屿上黄足厚结猛蚁遗传多样性的影响 罗媛媛, 刘金亮, 黄杰灵, 等 (6041)
- 基于 28S, COI 和 Cytb 基因序列的薛荔和爱玉子传粉小蜂分子遗传关系研究
..... 吴文珊, 陈友铃, 孙伶俐, 等 (6049)
- 高榕榕果内 *Eupristina* 属两种榕小蜂的遗传进化关系 陈友铃, 孙伶俐, 武蕾蕾, 等 (6058)
- 镉胁迫下杞柳对金属元素的吸收及其根系形态构型特征 王树凤, 施翔, 孙海菁, 等 (6065)
- 邻苯二甲酸对萝卜种子萌发、幼苗叶片膜脂过氧化及渗透调节物质的影响
..... 杨延杰, 王晓伟, 赵 康, 等 (6074)
- 极端干旱区多枝桤柳幼苗对人工水分干扰的形态及生理响应 马晓东, 王明慧, 李卫红, 等 (6081)
- 贝壳砂生境酸枣叶片光合生理参数的水分响应特征 王荣荣, 夏江宝, 杨吉华, 等 (6088)
- 陶粒覆盖对土壤水分、植物光合作用及生长状况的影响 谭雪红, 郭小平, 赵廷宁 (6097)
- 不同林龄短枝木麻黄小枝单宁含量及养分再吸收动态 叶功富, 张尚炬, 张立华, 等 (6107)
- 珠江三角洲不同污染梯度下森林优势种叶片和枝条 S 含量比较 裴男才, 陈步峰, 邹志谨, 等 (6114)
- AM 真菌和磷对小马安羊蹄甲幼苗生长的影响 宋成军, 曲来叶, 马克明, 等 (6121)
- 盐氮处理下盐地碱蓬种子成熟过程中的离子积累和种子萌发特性 周家超, 付婷婷, 赵维维, 等 (6129)
- CO₂ 浓度升高条件下内生真菌感染对宿主植物的生理生态影响 师志冰, 周 勇, 李 夏, 等 (6135)
- 预处理方式对香蒲和芦苇种子萌发的影响 孟 焕, 王雪宏, 佟守正, 等 (6142)
- 镉在土壤-金丝垂柳系统中的迁移特征 张 雯, 魏 虹, 孙晓灿, 等 (6147)
- 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 等 (6154)
- 濒危海草贝克喜盐草的种群动态及土壤种子库——以广西珍珠湾为例
..... 邱广龙, 范航清, 李宗善, 等 (6163)
- 毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮对凝结水形成和蒸发的影响 尹瑞平, 吴永胜, 张 欣, 等 (6173)
- 塔里木河上游灰胡杨种群生活史特征与空间分布格局 韩 路, 席琳乔, 王家强, 等 (6181)
- 短期氮素添加和模拟放牧对青藏高原高寒草甸生态系统呼吸的影响 宗 宁, 石培礼, 蔺 婧, 等 (6191)
- 松嫩平原微地形下土壤水盐与植物群落分布的关系 杨 帆, 王志春, 王云贺, 等 (6202)

广州大夫山雨季林内外空气 TSP 和 PM _{2.5} 浓度及水溶性离子特征	肖以华, 李 炯, 旷远文, 等 (6209)
马鞍列岛岩礁生境鱼类群落结构时空格局	汪振华, 赵 静, 王 凯, 等 (6218)
黄海细纹狮子鱼种群特征的年际变化	陈云龙, 单秀娟, 周志鹏, 等 (6227)
三种温带森林大型土壤动物群落结构的时空动态	李 娜, 张雪萍, 张利敏 (6236)
笔管榕榕小蜂的群落结构与物种多样性	陈友铃, 陈晓倩, 吴文珊, 等 (6246)
海洋生态资本理论框架下的生态系统服务评估	陈 尚, 任大川, 夏 涛, 等 (6254)
中国地貌区划系统——以自然保护区体系建设为目标	郭子良, 崔国发 (6264)
生态植被建设对黄土高原农林复合流域景观格局的影响	易 扬, 信忠保, 覃云斌, 等 (6277)
华北农牧交错带农田-草地景观镶嵌体土壤水分空间异质性	王红梅, 王仲良, 王 堃, 等 (6287)
中国北方春小麦生育期变化的区域差异性与气候适应性	俄有浩, 霍治国, 马玉平, 等 (6295)
中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应	盛茂银, 刘 洋, 熊康宁 (6303)
气候变化对东北沼泽湿地潜在分布的影响	贺 伟, 布仁仓, 刘宏娟, 等 (6314)
内蒙古不同类型草地土壤氮矿化及其温度敏感性	朱剑兴, 王秋凤, 何念鹏, 等 (6320)
黑河中游荒漠绿洲区土地利用的土壤养分效应	马志敏, 吕一河, 孙飞翔, 等 (6328)
成都平原北部水稻土重金属含量状况及其潜在生态风险评价	秦鱼生, 喻 华, 冯文强, 等 (6335)
大西洋中部延绳钓黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层的关系	杨胜龙, 马军杰, 张 禹, 等 (6345)
夏季台湾海峡南部海域上层水体的生物固氮作用	林 峰, 陈 敏, 杨伟锋, 等 (6354)
北长山岛森林乔木层碳储量及其影响因子	石洪华, 王晓丽, 王 媛, 等 (6363)
植被类型变化对长白山森林土壤碳矿化及其温度敏感性的影响	王 丹, 吕瑜良, 徐 丽, 等 (6373)
油松遗传结构与地理阻隔因素的相关性	孟翔翔, 狄晓艳, 王孟本, 等 (6382)
基于辅助环境变量的土壤有机碳空间插值——以黄土丘陵区小流域为例	文 雯, 周宝同, 汪亚峰, 等 (6389)
基于生命周期视角的产业资源生态管理效益分析——以虚拟共生网络系统为例	施晓清, 李笑诺, 杨建新 (6398)
生态脆弱区贫困与生态环境的博弈分析	祁新华, 叶士琳, 程 煜, 等 (6411)
“世博”背景下上海经济与环境的耦合演化	倪 尧, 岳文泽, 张云堂, 等 (6418)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 464 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 55 * 2013-10



封面图说: 毛乌素沙地南缘沙丘的生物结皮——生物土壤结皮广泛分布于干旱和半干旱区, 它的形成和发育对荒漠生态系统生态修复过程产生重要的影响。组成生物结皮的藻类、苔藓和地衣是常见的先锋植物, 它们不仅能在严重干旱缺水、营养贫瘠恶劣的环境中生长、繁殖, 并且能通过其代谢方式影响并改变环境。其中一个重要的特点是, 生物结皮表面的凝结水显著大于裸沙。研究表明, 凝结水是除降雨之外最重要的水分来源之一, 在水分极度匮乏的荒漠生态系统, 它对荒漠生态系统结构、功能和过程的维持产生着重要的影响。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201305020888

肖以华, 李炯, 旷远文, 佟富春, 习丹, 陈步峰, 史欣, 裴男才, 黄俊彪, 潘勇军. 广州大夫山雨季林内外空气 TSP 和 PM_{2.5} 浓度及水溶性离子特征. 生态学报, 2013, 33(19): 6209-6217.

Xiao Y H, Li J, Kuang Y W, Tong F C, Xi D, Chen B F, Shi X, Pei N C, Huang J B, Pan Y J. Comparison of TSP, PM_{2.5} and their water-soluble ions from both inside and outside of Dafushan forest park in Guangzhou during rainy season. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6209-6217.

广州大夫山雨季林内外空气 TSP 和 PM_{2.5} 浓度及水溶性离子特征

肖以华¹, 李 炯², 旷远文^{2,*}, 佟富春³, 习 丹², 陈步峰¹, 史 欣¹,
裴男才¹, 黄俊彪¹, 潘勇军¹

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520; 2. 中国科学院华南植物园, 广州 510650;
3. 华南农业大学林学院, 广州 510642)

摘要: 采用平行同步采样法, 于 2012 年雨季, 对广州市大夫山森林公园林内外空气的总悬浮颗粒物 (TSP) 和细颗粒物 (PM_{2.5}) 样品进行了 24 h 收集, 测定了 TSP 和 PM_{2.5} 的质量浓度并分析了样品中水溶性无机离子成分。结果表明: 林内外 PM_{2.5} 的质量浓度平均值分别为 (40.18±10.47) 和 (55.79±13.01) g/cm³; 林内外 TSP 的质量浓度分别为 (101.32 ± 33.19) 和 (116.61±35.36) g/cm³。林内与林外比, PM_{2.5} 和 TSP 平均质量浓度都显著减少 ($P<0.05$), 表明森林能显著改善空气质量。TSP 和 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻、Na⁺、NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 为水溶性无机离子主要成分, 占总离子质量的 80% 以上, 林外这些离子的浓度高于林内 (NH₄⁺ 除外)。这 4 种离子雨季在空气中的主要存在方式为 NaCl、Na₂SO₄、NH₄HSO₄ 和 NH₄NO₃。计算表明, 采样期间海盐对大夫山空气 TSP 和 PM_{2.5} 的水溶性组分中 Na⁺ 和 Cl⁻ 贡献最大, 其它元素主要源自陆地源。林内外 TSP 和 PM_{2.5} 的 $c(\text{NO}_3^-)/c(\text{SO}_4^{2-})$ 比值在 0.3 以下, 表明固定源是大夫山森林公园空气主要污染贡献者, TSP 中 $c(\text{NO}_3^-)/c(\text{SO}_4^{2-})$ 的比值大于 PM_{2.5} 的比值, 说明移动源对 TSP 的贡献大于 PM_{2.5}。

关键词: TSP; PM_{2.5}; 水溶性离子; 空气污染; 林内外; 广州市

Comparison of TSP, PM_{2.5} and their water-soluble ions from both inside and outside of Dafushan forest park in Guangzhou during rainy season

XIAO Yihua¹, LI Jiong², KUANG Yuanwen^{2,*}, TONG Fuchun³, XI Dan², CHEN Bufeng¹, SHI Xin¹, PEI Nancai¹, HUANG Junbiao¹, PAN Yongjun¹

1 Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China

2 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

3 College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: There is national research interest in the dynamics of airborne particulate matter (PM) due to its detrimental effects on air quality and human health. Both regional surveys and locally intensive monitoring of PM, particularly particles less than 2.5 micrometers in diameter (PM_{2.5}), are now being conducted throughout China. The main research emphases include the spatial distribution, chemical characteristics, and main sources of airborne PM_{2.5} in many urban areas, as well as industrial sites.

The Pearl River Delta (PRD) is one of the highly urbanized and industrialized regions in China. Unfortunately, accompanying the rapid eco-social developments, the PRD has also deteriorated in terms of air, soil and water quality

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项资助项目 (20130430106); 中国林业科学研究院热带林业研究所基本科研业务费专项资助项目 (RITFYW2X201104); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KSCX2-EW-J-28); 广州市森林生态效益监测网络项目 (2012-2013); 广州市“青山绿地-林带林区”工程的生态效益监测项目

收稿日期: 2013-05-02; 修订日期: 2013-07-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kuangyw@scbg.ac.cn

during the last few decades. Air pollution has been a serious environmental problem for many years now and frequent haze episodes in this region were often attributed to high concentrations of airborne $\text{PM}_{2.5}$.

Forests play an important role in reducing airborne particulate matter and in maintaining air quality. In order to improve the urban environment and to serve the public health, many urban forests have been constructed to scavenge the huge amounts of dust through the forest canopy. However, the influence of the forest canopy on particulate matter water-soluble ions has seldom been studied to date. In the present study, we regularly monitored concentrations of the total suspended particulates (TSP), $\text{PM}_{2.5}$ and their water-soluble ions (Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , Cl^- and F^-) from both inside and outside a suburban forest in Guangzhou, during the rainy season of 2012. The objective of this study was to reveal the importance of tree canopies in scavenging airborne particles and their water-soluble ions.

The results showed that the forest canopy significantly reduced the concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and TSP ($P < 0.05$). The concentrations of diurnal $\text{PM}_{2.5}$ and TSP inside the forest were $(40.2 \pm 10.5) \text{ g/cm}^3$ and $(101.3 \pm 33.2) \text{ g/cm}^3$ respectively, increasing to $(55.8 \pm 13.0) \text{ g/cm}^3$ and $(116.6 \pm 35.4) \text{ g/cm}^3$ outside the forest, respectively. SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ and NO_3^- were the most abundant ions in both TSP and $\text{PM}_{2.5}$, accounting for more than 80% of total ions. The concentrations of SO_4^{2-} , Na^+ and NO_3^- outside the forest were significantly higher than those inside, with the exception of NH_4^+ . Correlation analysis on the ions revealed that during the study period, the principal water-soluble ions existed in the form of NaCl, Na_2SO_4 , NH_4HSO_4 and NH_4NO_3 . Na^+ and Cl^- in the water-soluble fraction of $\text{PM}_{2.5}$ and TSP were mainly sourced from sea salt, while the presence of other ions was predominantly influenced by anthropogenic sources. The ratios of $c(\text{NO}_3^-)/c(\text{SO}_4^{2-})$ in TSP and $\text{PM}_{2.5}$, both inside and outside the forest were less than 0.30, indicating that the stationary sources, e. g. coal burning, power plants and other industrial emissions, might be the main contributors to aerosols at the study site. The ratios of $c(\text{NO}_3^-)/c(\text{SO}_4^{2-})$ in TSP were higher than those in $\text{PM}_{2.5}$, implying that the mobile sources contributed more to TSP than to $\text{PM}_{2.5}$. Our results demonstrated that tree canopies could filter $\text{PM}_{2.5}$ and reduce concentrations of all water-soluble ion species, with the exception of NH_4^+ , suggesting that urban forests can improve air quality.

Key Words: TSP; $\text{PM}_{2.5}$; water-soluble ions; air pollution; inside and outside forest; Guangzhou City

我国城市化的迅速发展使城市的环境负荷日趋增重,空气中粉尘、烟雾、有害气体日趋增多,空气中的悬浮颗粒污染物,如总悬浮颗粒物(Total suspended particulate, TSP)和细颗粒物(Particulate matter less than 2.5, $\text{PM}_{2.5}$),已逐渐成为空气污染的首要污染物^[1-2]。 $\text{PM}_{2.5}$ 指的是空气中空气动力学直径小于等于 $2.5 \mu\text{m}$ 的悬浮颗粒物,它是空气中重要的污染物之一,其来源及化学组成均非常复杂,除了各种污染源的一次排放外,还包括气态污染物经由复杂的空气光化学反应而形成的二次污染物。 $\text{PM}_{2.5}$ 因其危害人体健康^[3]、携带病菌和污染物^[4]、降低能见度^[5-8]、引发灰霾^[9]等原因,已经成为国内外公众、政府和学者共同关注的重要问题。为了改善城市的空气环境和提高人居环境质量,各级政府大力营造城市森林,通过森林庞大的冠幅来阻尘、滞尘、吸尘和降解污染物的生态功能,发挥其生态效益。

森林对空气颗粒物的影响已成为研究者的热点^[10-12],Kourtchev 在德国发现混交林能减少大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中约 12% 的有机碳含量^[13];在日本中部针叶林和挪威云杉林研究发现森林林冠明显改变了 $\text{PM}_{2.5}$ 中硫的质量浓度和沉降速率^[14-15]。在国内,也有学者关注不同纬度森林区域 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度变化和离子组成^[16],不同林分类型中总悬浮颗粒物、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度季节、日变化规律等^[17-18],但不同地区由于污染源、气候、地理位置等因素差异,TSP 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度和化学组成特征也有较大区别,森林对空气 TSP 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度和化学组成成分的影响相关研究也比较少。本研究采用平行同步采样法(Real-time),对林内、外进行 24h 收集 TSP 和 $\text{PM}_{2.5}$ 样品,研究森林对空气颗粒物的影响,旨在为计量城市森林生态效益及城市森林生态建设等提供参考。

1 研究地概况和研究方法

1.1 研究地概况

大夫山森林公园位于珠三角腹地——广州市南部的番禺区,是典型的城乡结合部,滨临珠江入海口。地理位于北纬 $22^\circ 57' - 22^\circ 59'$,东经 $113^\circ 17' - 113^\circ 18'$,以低山丘陵为主,最高海拔为 226.6 m。森林公园总面积约 1000 hm^2 ,是广州地区生态型森林公园。优势树种主要是马尾松(*Pinus massoniana*)、马占相思(*Acacia mangium*)、粉紫荆(*Bauhinia variegata*)、红花紫荆(*Bauhinia blakeana*)、大叶紫薇(*Lagerstroemia speciosa*)。大夫山森林公园地处南亚热带湿润季风气候区,年平均气温为 21.8°C ,最冷的 1 月份平均气温仍达 13.3°C ,而 7 月份平均气温为 29°C ,年无霜期长达 346 d。年平均降水量为 1650 mm,降雨量的

季节分配不均,旱季雨季分明。降雨集中在4—9月,占全年的81%;相对湿度一般是81%。年均日照时数2000 h。热量充足,降水丰沛,雨热同期,对区域内植被繁衍、生长极为有利。

1.2 研究方法

1.2.1 采样仪器、时间及方法

采用国产智能中流量采样器(TH 150AO)采集大气样品,2台采样器设置于大夫山森林公园内空旷草地,周边无高大建筑和局地点源污染源,分别采集TSP和PM_{2.5};另2台采样器设置于距林外采样点30 m的林内——即在“广州市森林生态效益监测网络”林内气象场分别采集TSP和PM_{2.5}。圆形采样器距地面高度为人体平均呼吸高度(1.5 m),采样流量为100 L/min,每天9:00更换石英纤维滤膜(59 mm),每张滤膜对TSP和PM_{2.5}的采集时间为24 h。滤膜在采样前后均在干燥器中以平衡法干燥、称重。采样时间贯穿整个雨季(2012年4月至9月),逐月进行;由于空气湿度影响仪器对PM_{2.5}样品的采集,扣除雨天等天气影响,每个观测点得到TSP和PM_{2.5}有效样品各18个,共收集样品72个。

1.2.2 样品分析

采集的滤膜在干燥器中称重后,剪去一定面积的滤膜用于水溶性组分的提取与测定。将滤膜剪成碎片,置于烧杯中,加入Milli-Q高纯去离子水,超声提取30 min,提取液用孔径0.45 μm滤膜过滤。重复上述步骤,两次滤液合并后一起进行成分分析^[19],其中阴离子SO₄²⁻、NO₃⁻、NO₂⁻、Cl⁻、F⁻和阳离子Na⁺、NH₄⁺、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺浓度用离子色谱仪(ICS-900;美国)测定。同样方法对空白膜进行超声提取和测定,作为空白对照。

1.2.3 质量控制与保证

石英纤维滤膜使用前在马氟炉中灼烧3 h以上,温度为600—900 ℃,然后放入铝箔包装,密封贮存。采样前后将石英纤维滤膜放置于万分之一分析天平平衡48 h后,进行称重。样品采集前对采样器进行流量校准。样品每采集1周再次校准流量,其相对偏差小于5%。

分析用的玻璃器皿于马氟炉中450 ℃中加热8 h,对不能用马氟炉烘干的器皿用丙酮和光谱级正己烷进行溶剂清洗,干燥和清洗后的器皿封口贮存。每10个样品中随机抽取1个进行平行分析,测量全程空白并在结果中扣除^[20]。

2 结果与分析

2.1 林内外TSP和PM_{2.5}质量浓度

研究期间,大夫山森林公园林内外的PM_{2.5}和TSP的质量浓度值见表1。林内外PM_{2.5}的质量浓度平均值分别为(40.18 ± 10.47)和(55.79 ± 13.01) g/cm³;林内外TSP的质量浓度分别为(101.32 ± 33.19)和(116.61 ± 35.36) g/cm³。经方差分析表明,林内外之间的PM_{2.5}和TSP平均质量浓度差异显著($P < 0.05$),PM_{2.5}和TSP的质量浓度无论是最小值还是最大值,林外都要显著高出林内。林内外PM_{2.5}分别占TSP总质量的(39.66 ± 4.16)%和(49.51 ± 4.72)%,林外PM_{2.5}是TSP的一半,说明林外PM_{2.5}是TSP的主要组成部分,而林内的PM_{2.5}浓度值比林外的要低。参照国家环境空气质量标准(GB3095—2012),林内外PM_{2.5}达到国家一级空气质量标准(≤35 μg/m³)的天数概率分别为44%和33%;林内外TSP达到国家一级空气质量标准(≤120 μg/m³)的天数概率分别为72%和56%。从林内外PM_{2.5}与TSP的浓度间关系可知(图1),PM_{2.5}与TSP的浓度间存在明显的相关性,且林内的相关系数 R^2 大于林外;林外的TSP与PM_{2.5}为非线性关系,其方程式为:TSP = 90.59ln(PM_{2.5}) - 238.41 ($R^2 = 0.885, P < 0.01$),林内的TSP与PM_{2.5}线性关系方程式为:TSP = 1.41PM_{2.5} + 20.36 ($R^2 = 0.943, P < 0.01$)。

表1 广州大夫山森林公园林内外空气TSP和PM_{2.5}浓度

Table 1 Concentrations of TSP and PM_{2.5} inside and outside Dafushan forest parks in Guangzhou

	地点 Location	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Average	标准差 SD
PM _{2.5}	林内 Inside forest	19.47a	106.63a	40.18a	7.43
	林外 Outside forest	28.51b	156.82b	55.79b	13.01
TSP	林内 Inside forest	50.96a	168.35a	101.32a	33.19
	林外 Outside forest	64.77b	203.17b	116.61b	35.36

不同字母表示两两间差异显著($P < 0.05$)

2.2 林内外TSP和PM_{2.5}水溶性离子特征

空气颗粒物中的水溶性组分在很大程度上决定着颗粒物的理化特征,并能反映颗粒物的不同来源和形成机制。研究期间林内外PM_{2.5}和TSP中水溶性离子质量浓度值如表2和表3所示,分别是林内外的Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、F⁻、Cl⁻、NO₂⁻、SO₄²⁻和NO₃⁻离子质量浓度。林内外空气中PM_{2.5}样品中上述10种离子总浓度平均值为35.94和46.30 g/cm³,分别占PM_{2.5}质量的87.38%和84.48%;林内外空气中TSP样品中10种离子总浓度平均分别为64.32和69.81 g/cm³,分别占TSP质量的63.48%和62.01%。PM_{2.5}中水溶性离子的含量较高,表明离子大部分富集在细颗粒上。林外TSP和PM_{2.5}中水溶性离子的质量浓度比林

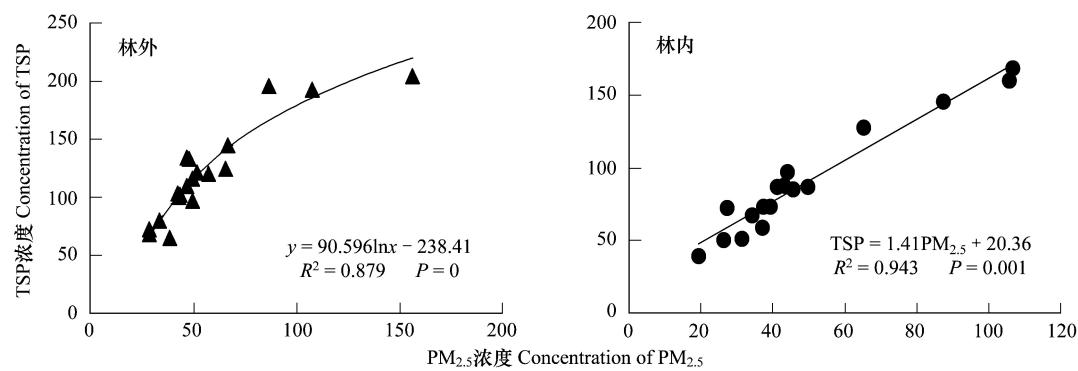


图1 林内外 TSP 与 PM_{2.5} 浓度关系

Fig.1 Relationship between TSP and PM_{2.5} concentrations inside and outside forest

TSP: 总悬浮颗粒物 Total suspended particulate; PM_{2.5}: 小于 2.5 μm 细颗粒物 Particulate matter less than 2.5 μm

内高,可能是由于森林植物通过阻尘和拦截,使得林内的细颗粒浓度减少所致。但林内 TSP 和 PM_{2.5}中的 NH₄⁺ 浓度要比林外高,其原因可能与林内凋落物分解过程类似施肥效应释放氨气有关^[1]。

表 2 林内 TSP 和 PM_{2.5}水溶性离子浓度

Table 2 Concentrations of water-soluble ions in TSP and PM_{2.5} from the inside forest

离子 Ions	总悬浮颗粒物 TSP/(g/cm ³)		细颗粒物 PM _{2.5} /(g/cm ³)	
	浓度范围 Concentration range	均值 Average	浓度范围 Concentration range	均值 Average
Na ⁺	2.94—9.22	7.31(1.43)	1.79—4.53	3.66(0.38)
NH ₄ ⁺	1.16—8.65	6.38(1.24)	2.09—7.61	4.06(0.84)
K ⁺	1.11—3.43	2.40(0.91)	1.19—1.91	1.45(0.60)
Mg ²⁺	0.44—2.36	1.75(0.78)	0.16—1.08	0.78(0.26)
Ca ²⁺	2.99—5.59	4.28(1.14)	1.40—2.51	1.90(0.03)
F ⁻	0.02—0.12	0.05(0.01)	0.01—0.04	0.02(0.01)
Cl ⁻	0.23—1.91	0.97(0.38)	0.22—1.14	0.62(0.17)
NO ₂ ⁻	0.03—0.21	0.07(0.02)	0.03—0.29	0.06(0.02)
SO ₄ ²⁻	27.17—46.36	34.71(8.05)	11.35—26.10	20.78(11.34)
NO ₃ ⁻	1.10—16.19	6.40(1.02)	1.47—4.61	2.61(0.27)

括号中为标准差

表 3 林外 TSP 和 PM_{2.5}水溶性离子浓度

Table 3 Concentrations of water-soluble ions in TSP and PM_{2.5} from the outside forest

离子 Ions	总悬浮颗粒物 TSP/(g/cm ³)		细颗粒物 PM _{2.5} /(g/cm ³)	
	浓度范围 Concentration range	均值 Average	浓度范围 Concentration range	均值 Average
Na ⁺	5.57—9.49	7.66(1.62)	1.68—6.59	5.93(0.98)
NH ₄ ⁺	1.78—8.30	4.73(0.75)	0.97—5.39	3.23(1.11)
K ⁺	1.19—3.86	2.57(1.15)	1.35—4.73	1.75(0.36)
Mg ²⁺	0.57—2.15	1.61(0.69)	0.63—1.62	1.04(0.50)
Ca ²⁺	3.10—15.11	7.13(1.27)	1.69—6.88	3.25(0.62)
F ⁻	0.03—0.12	0.07(0.02)	0.02—0.14	0.05(0.01)
Cl ⁻	0.11—3.40	1.21(0.33)	0.18—4.39	1.42(0.16)
NO ₂ ⁻	0.05—0.19	0.10(0.03)	0.01—0.27	0.11(0.03)
SO ₄ ²⁻	31.34—43.62	37.84(5.10)	1.19—38.42	26.58(9.91)
NO ₃ ⁻	3.39—14.73	7.14(2.06)	0.21—5.41	3.06(0.28)

各水溶性离子在总离子中的比例如图 2 所示,林内外 PM_{2.5}和 TSP 中 Na⁺、NH₄⁺、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 是最主要的离子组分,占总离子质量的 80%以上。NH₄⁺、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 是二次气溶胶的主要组分,是通过气态前体物 SO₂、NO_x 和 NH₃ 在空气中经气-粒转化而形成的;在采样期间,PM_{2.5}中的 NH₄⁺ 和 SO₄²⁻ 所占总离子比例要高于 TSP 中比例,但 NO₃⁻ 的变化趋势与之相反,说明 NH₄⁺ 和 SO₄²⁻ 主要富集在 PM_{2.5}中,而 NO₃⁻ 更多富集在 TSP 中。林内外 TSP 和 PM_{2.5}中的 Na⁺在离子总量中占有比例约为 10%左右,但林内 TSP 和 PM_{2.5}的 Na⁺质量浓度要低于林外;Ca²⁺质量浓度在林内 PM_{2.5}中显著减少($P=0.013$)。

2.3 主要离子间的相关性与结合方式

离子间的相关性分析可以揭示气溶胶中离子间的结合方式。为了解林内外各离子的来源和相互结合情况,对研究期间的离子浓度进行了相关矩阵分析,主要离子间的相关系数如表 4 所示。

由于 Na⁺、NH₄⁺、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 是水溶性离子的主要组成成分,首先对其存在形式进行探讨。林内 Na⁺离子与 Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 的相关极显著(表 4),与 NO₃⁻ 相关性不明显($P=0.39$),说明在林内 TSP 和 PM_{2.5}中,Na⁺离子主要以 NaCl 和 Na₂SO₄的形式存在;但在林外的 TSP 和 PM_{2.5}中 Na⁺离子与 SO₄²⁻ 相关性不明显($P=0.06$),林外的 Na⁺离子主要以 NaCl 为主。Na⁺与 Mg²⁺显著相关是由于 Na 和 Mg 都源自海盐所致。

NH₄⁺ 在气溶胶中与 Cl⁻ 和 NO₃⁻ 的结合形式相对单一,但与 SO₄²⁻ 却存在 2 种结合形式,即可能主要以 (NH₄)₂SO₄ 或 NH₄HSO₄的形式存在;当完全形成 (NH₄)₂SO₄所需 NH₄⁺ 与 SO₄²⁻ 的物质的量之比为 2,而完全形成 NH₄HSO₄所需 NH₄⁺ 与 SO₄²⁻ 的物质的量之比为 1。研究期间,林内外 TSP 和 PM_{2.5}的 NH₄⁺ 与 SO₄²⁻ 物质的量之比变化范围 0.65—1.05,在形成 (NH₄)₂SO₄ 与 NH₄HSO₄的比值之间;但 NH₄⁺ 与 NO₃⁻ 的物质的量之比都大于 2。通常,根据 NH₄⁺ 在不同化合物中化学计量比例对其进行了计算:若假设 3 离子主要以 NH₄HSO₄和 NH₄NO₃的形式存在,可通过方程(1) 计算 NH₄⁺ 的含量;假设 3 离子主要以 (NH₄)₂SO₄和 NH₄NO₃的形式存在,则通过方程(2)计算 NH₄⁺ 的含量^[21](c 代表气溶胶中离子浓度)。

$$ccal(1) (NH_4^+) = 0.29cNO_3^- + 0.19cSO_4^{2-} \tag{1}$$

$$ccal(2) (NH_4^+) = 0.29cNO_3^- + 0.38cSO_4^{2-} \tag{2}$$

由图 3 可以看出,NH₄⁺ 的测量值与理论值线性拟合结果较好($R^2=0.61, P<0.05$),PM_{2.5}中拟合的相关性比 TSP 更好,林内拟合的相关性要比林外好。以方程式(1)即以 NH₄HSO₄形式存在的计算值更接近观测值,而以 (NH₄)₂SO₄形式存在的 NH₄⁺ 计算值远大于观测值,说明雨季空气颗粒物中 NH₄⁺ 与 SO₄²⁻ 主要结合为 NH₄HSO₄^[21]。但是 2 种形式线性方程截距都不为 0,说明 SO₄²⁻ 与 NO₃⁻ 不仅与 NH₄⁺ 形成了化合物,还可能存在其它形式的硫酸盐与硝酸盐,如 Na₂SO₄、K₂SO₄和 KNO₃(表 4)。

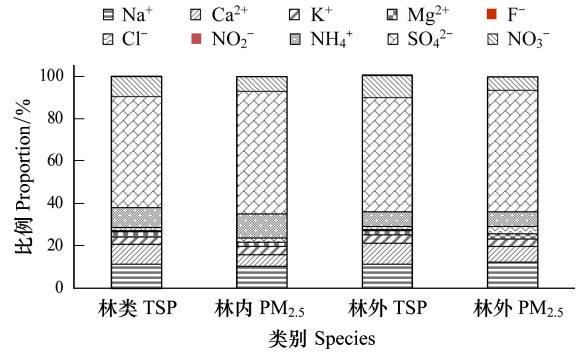


图 2 TSP 和 PM_{2.5}中无机水溶性离子所占的比例

Fig.2 The percentages of each water-soluble ion in the TSP and PM_{2.5}

表 4 林内外 TSP 和 PM_{2.5}的离子间相关系数

Table 4 Correlation coefficient between the tested ions of TSP and PM_{2.5} inside and outside forest

		Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
林内 Inside PM _{2.5}	NH ₄ ⁺	0.21						
	K ⁺	0.06	0.19					
	Mg ²⁺	1.00 **	0.12	0.87 *				
	Ca ²⁺	-0.08	0.14	0.14	-0.07			
	Cl ⁻	0.98 **	0.85 *	0.98 *	0.58	0.49		
	SO ₄ ²⁻	0.96 **	0.99 **	0.84 *	0.96 **	0.07	0.37	
	NO ₃ ⁻	0.39	0.93	1.00 **	0.70	0.31	0.27	0.58
林外 Outside PM _{2.5}	NH ₄ ⁺	0.25						
	K ⁺	-0.08	0.34					
	Mg ²⁺	0.87 *	0.26	0.72 *				
	Ca ²⁺	-0.21	0.10	0.08	0.02			
	Cl ⁻	0.93 **	0.82 *	0.40	0.47	0.53		
	SO ₄ ²⁻	0.41	0.98 **	0.95 **	0.25	0.50	0.36	

续表

		Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
林内 Inside TSP	NO ₃ ⁻	0.02	0.92 *	0.87 *	0.21	0.31	0.18	0.87 *
	NH ₄ ⁺	0.33						
	K ⁺	0.40	0.96					
	Mg ²⁺	1.00 **	0.24	0.83 *				
	Ca ²⁺	0.10	0.15	0.13	0.12			
	Cl ⁻	0.99 **	0.35	0.35	0.71	0.28		
	SO ₄ ²⁻	0.51 *	0.95 **	0.92 *	0.31	0.17	0.38	
	NO ₃ ⁻	0.21	0.84 *	0.80 *	0.26	0.11	0.23	0.62 *
林外 Outside TSP	NH ₄ ⁺	0.14						
	K ⁺	0.20	0.89 *					
	Mg ²⁺	0.86 *	0.11	0.91 *				
	Ca ²⁺	0.04	0.19	0.10	-0.09			
	Cl ⁻	0.96 **	0.36	0.89 *	0.27	0.69		
	SO ₄ ²⁻	0.46	0.98 **	0.92 *	0.41	0.68	0.92 *	
	NO ₃ ⁻	0.30	0.88 *	0.69 *	0.49 *	0.31	0.79 *	0.83 *

* 表示显著水平为 0.05, ** 表示显著水平为 0.01

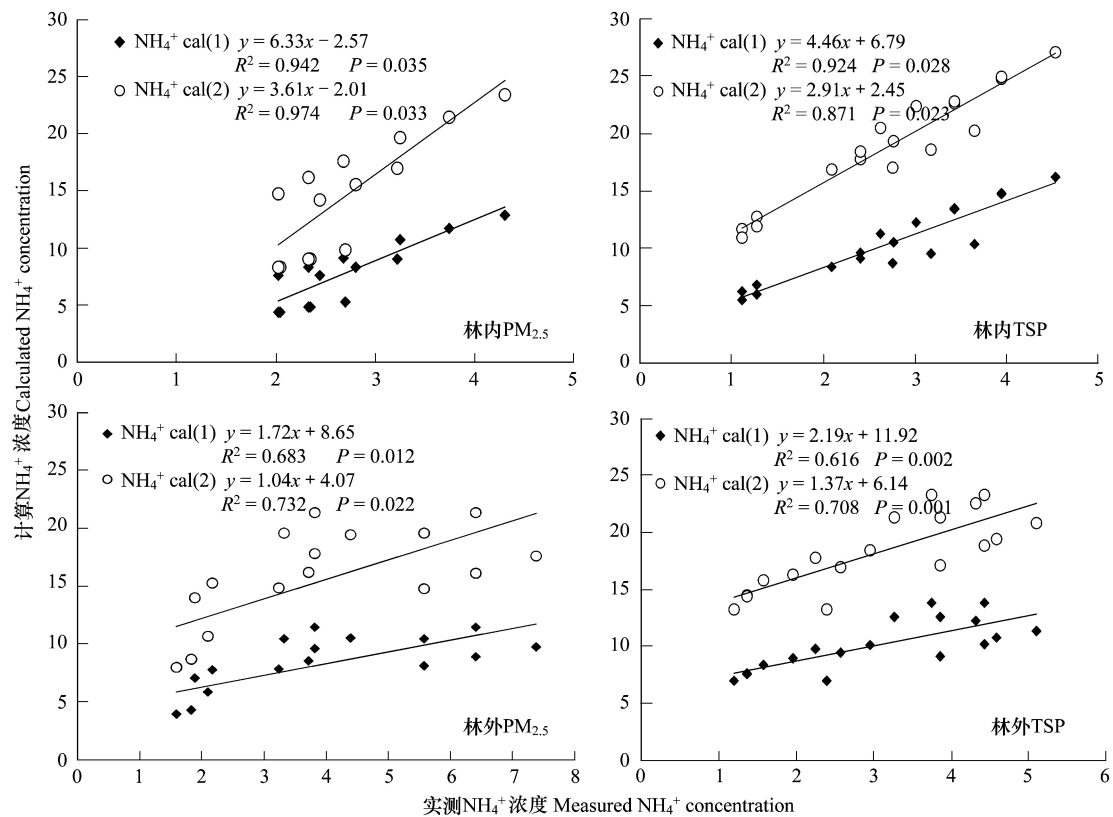


图3 计算所得 NH_4^+ 浓度与实验测得 NH_4^+ 浓度相关性图

Fig.3 The correlation between calculated and measured ammonium concentration

2.4 离子成分的源解析

2.4.1 海洋源和陆地源的解析

Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 和 K^+ 这4种离子是海水的主要成分,首先假设 Na^+ 全部来自于海盐粒子,然后通过比较海水中样品中 $c(\text{Cl}^-)/c(\text{Na}^+)$ 、 $c(\text{SO}_4^{2-})/c(\text{Na}^+)$ 和 $c(\text{K}^+)/c(\text{Na}^+)$ 的比值,来判断其它几种海盐离子主要是来自于海洋还是陆地^[2]。海水中 $c(\text{Cl}^-)/c(\text{Na}^+)$ 、 $c(\text{SO}_4^{2-})/c(\text{Na}^+)$ 和 $c(\text{K}^+)/c(\text{Na}^+)$ 分别为0.250、1.810和0.036^[22]。研究期间TSP和 $\text{PM}_{2.5}$ 样品中各离子的比

值见表 5。林内外 TSP 和 PM_{2.5} 中 Cl⁻ 与 Na⁺ 的比值小于海水中的比例,说明 Cl⁻ 主要来自于海洋。SO₄²⁻ 和 K⁺ 与 Na⁺ 的比值大于海水中的比例,说明这 2 种离子主要来自于陆地^[2]。经方差分析, $c(K^+)/c(Na^+)$ 在林内外 TSP 和 PM_{2.5} 中差异明显 ($P=0.026$ 和 $P=0.043$);但 $c(SO_4^{2-})/c(Na^+)$ 无显著差异 ($P=0.255$ 和 $P=1.847$)。

表 5 大夫山森林公园林内外雨季 TSP 和 PM_{2.5} 中离子成分的比值分析

Table 5 Ionic ratio of inside and outside forest TSP and PM_{2.5} during rainy season at the Dafushan forest park

离子比值 Ionic ratio	林内 TSP Inside TSP	林外 TSP Outside TSP	林内 PM _{2.5} Inside PM _{2.5}	林外 PM _{2.5} Outside PM _{2.5}
$c(K^+)/c(Na^+)$	0.40(0.13)	0.32(0.04)	0.48(0.10)	0.34(0.05)
$c(Cl^-)/c(Na^+)$	0.17(0.04)	0.17(0.08)	0.24(0.02)	0.13(0.03)
$c(SO_4^{2-})/c(Na^+)$	5.40(0.86)	5.57(1.33)	5.16(2.61)	4.94(1.29)
$c(NO_3^-)/c(SO_4^{2-})$	0.17(0.07)	0.19(0.10)	0.13(0.02)	0.12(0.04)

2.4.2 移动源和固定源的解析

SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 是城市空气颗粒物中的主要成分,其主要来源于化石燃料(煤和石油等)燃烧产生的 SO₂ 和 NO_x 在空气中的转化过程。空气颗粒物中 NO₃⁻ 与 SO₄²⁻ 质量比($c(NO_3^-)/c(SO_4^{2-})$)可以用来比较固定源(如燃煤)和移动源(如汽车尾气)对空气中硫和氮贡献量的大小,如果空气颗粒物中 $c(NO_3^-)/c(SO_4^{2-})$ 的比值较高,那么说明机动车对空气中 SO₂ 和 NO_x 的贡献大于固定源的贡献;反之,如果 $c(NO_3^-)/c(SO_4^{2-})$ 的比值较低,则说明 SO₂ 和 NO_x 主要源自于煤的燃烧。从表 5 的结果可知,大夫山森林公园的林内外 TSP 和 PM_{2.5} 中 $c(NO_3^-)/c(SO_4^{2-})$ 的比值比较低,说明固定污染源对空气颗粒物的贡献大于移动源;TSP 中 $c(NO_3^-)/c(SO_4^{2-})$ 的比值大于 PM_{2.5} 的比值,说明移动源对大粒径颗粒物的贡献比小粒径要大;相应粒径颗粒物在林内外的 $c(NO_3^-)/c(SO_4^{2-})$ 比值之间差异不明显($p>0.05$)。

3 结论与讨论

有研究表明,植物能通过冠幅降低树冠内风速,使得空气颗粒物以滞留或停着、附着和粘附 3 种方式达到消减空气颗粒物的生态效应^[23]。从本研究结果来看,林内的 PM_{2.5} 和 TSP 平均质量浓度比林外显著减少($P<0.05$),与广州市区雨季的 PM_{2.5} 相比减少近 50%^[21],与城区相比,大夫山森林公园森林发挥了降尘、减尘的作用,为市民提供了一个相对洁净的游憩空间。许多研究者也发现森林植被对空气 PM_{2.5} 能显著的降低效应。如任启文等^[24]对北京元大都遗址公园内不同林地类型及其旁边道路空气颗粒物进行了研究,发现公园森林内的空气 PM_{2.5} 值明显低于林外道路上的空气 PM_{2.5}。郭二果^[2]研究了北京西山地区 3 种典型游憩林对空气中颗粒物的阻滞和吸附效应,指出游憩林能有效降低空气中颗粒物的质量含量。但雨季中,森林对空气 PM_{2.5} 作用在不同地区、不同森林类型存在差异^[2,24-25],如吴志萍等^[26]研究了 6 种城市绿地环境下空气 PM_{2.5} 浓度的变化规律,发现雨季林内的空气 PM_{2.5} 浓度却高于林外;但 Cheng Manting 和郭二果等研究发现林内的空气 PM_{2.5} 浓度在雨季要低于林外^[2,25],与本研究结果一致。

林内外 TSP 和 PM_{2.5} 中的水溶性离子以 Na⁺、NH₄⁺、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 为主,且占到总离子质量的 80% 以上,这一结果与深圳郊区的空气颗粒物水溶性离子组分组成相似^[2]。空气颗粒物中的 Na⁺ 含量较高,Wang 等认为海盐是珠三角地区空气颗粒物中水溶性离子的来源之一,特别是雨季的盛行西南季风,海洋上大量 Na⁺ 离子被携带进入空气中,促使 Na⁺ 离子浓度升高^[1]。林内外的 NH₄⁺ 含量也较高,平均都在 3.0 g/cm³ 以上,这可能是由于工业生产排放或农业施肥等相关的氨气(NH₃)引入到空气中导致^[26-27];林内的 NH₄⁺ 含量高于林外,或许与凋落物的分解过程类似施肥效应释放 NH₃ 有关系^[28],有待于进一步研究验证。Cheng 等认为 SO₄²⁻ 含量高可能与广州或周边工业区硫氧化物的排放源有关^[12],如硫酸和硫酸盐矿物(例如燃煤电厂)的生产和使用,人为排放的硫氧化物经过一次或者二次光化学反应成硫酸二次气溶胶滞留空气中^[1,29]。NO₃⁻ 主要源自于汽车尾气排放的 NO_x 经过空气氧化转化为硝酸盐所致。从分析的结果看,Cl⁻ 的来源主要是海洋携带海盐所贡献,这一结果与 Wang 等对广州市区雨季空气颗粒物 Cl⁻ 的来源一致^[1]。

Mg²⁺、K⁺ 和 Ca²⁺ 是空气中典型的地壳元素,大多数是半自然或者人为活动造成的,对地表水体的硬度造成影响^[30]。从研究结果看,Mg²⁺、K⁺ 和 Ca²⁺ 在林内外的 TSP 和 PM_{2.5} 的质量浓度呈降低的趋势,其主要原因是空气颗粒物通过林冠时被树木叶面滞留,McPherson 等和 Freer Smith 等在植物滞留空气颗粒物的机理研究发现这一研究结果^[23,31]。Mg²⁺、K⁺ 在空气颗粒物中相关性显著,主要由于附近餐饮烧烤的植物燃料释放有关。而 Ca²⁺ 与其它元素各离子的相关性均较弱,说明 Ca²⁺ 有着不同于其他离子的来源,如土壤尘和建筑粉尘等^[32]。

汽油和柴油的燃烧产物中 NO_x/SO_x 比值分别为 13:1 和 8:1,燃煤或者生物质燃料燃烧后 NO_x/SO_x 比值为 1:2^[33],所以,NO₃⁻ 与 SO₄²⁻ 的质量比率可以粗略评估燃煤(固定源)和机动车(移动源)贡献率的大小^[33-34]。大夫山森林公园林内外的 TSP 和 PM_{2.5} 的 NO_x/SO_x 比值都小于 0.30,与广州居民区的 NO_x/SO_x 比值 0.07 大^[1],比交通区的 NO_x/SO_x 比值 0.50 要明显小^[35-37]。说

明固定源对大夫山森林公园的空气颗粒物的贡献远大于移动源,其原因是森林公园周边大量的工厂和居民区,具有较多的固定源,因此,与交通区相比明显要小。而旁边的市政道路和高速路,汽车尾气的排放要明显多于居民区,使得 TSP 和 $PM_{2.5}$ 的 NO_x/SO_x 比值高于居民区。所以,应适当减少周边的面源污染和采取措施限制机动车的数量和排放,以全面提升森林公园的空气质量。

References:

- [1] Wang X H, Bi X H, Sheng G Y. Chemical composition and sources of PM_{10} and $PM_{2.5}$ aerosols in Guangzhou, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 119(1/3): 425-439.
- [2] Dai W, Gao J Q, Cao G, Ouyang F. Chemical composition and source identification of $PM_{2.5}$ in the suburb of Shenzhen, China. *Atmospheric Research*, 2013, 122: 391-400.
- [3] Poschl U. Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Atmospheric Chemistry*, 2005, 44(46): 7520-7540.
- [4] Stracquadanio M, Apollo G, Trombini C. A study of $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5}$ -associated polycyclic aromatic hydrocarbons at an urban site in the Po Valley (Bologna, Italy). *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 179(1/4): 227-237.
- [5] Anderson T L, Carlson R J, Schwartz S E, Knutti R, Boucher O, Rodhe H, Heintzenberg J. Climate forcing by aerosols-a hazy picture. *Science*, 2003, 300(5622): 1103-1104.
- [6] Yan F Q, Hu H L, Yu T. Analysis of particulate mass concentration, aerosol number concentration and visibility in Beijing. *Particuology*, 2004, 2(1): 25-30.
- [7] IPCC. *Climate Change 2007-the Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 122-131.
- [8] Xu L L, Chen X Q, Chen J S, Zhang F W, He C, Zhao J P, Yin L Q. Seasonal variations and chemical compositions of $PM_{2.5}$ aerosol in the urban area of Fuzhou, China. *Atmospheric Research*, 2012, 104-105: 264-272.
- [9] Zhang T, Tao J, Wang B G, Zhu L H, Han J L, Xu Z C. Study on the pollution characteristics of particle number density in Guangzhou during January 2008. *Environmental Monitoring in China*, 2009, 25(2): 31-34.
- [10] Pio C, Alves C, Duarte A. Organic components of aerosols in a forested area of central Greece. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(2): 389-401.
- [11] Rissanen T, Hyötyläinen T, Kallio M, Kronholm J, Kulmala M, Riekkola M L. Characterization of organic compounds in aerosol particles from a coniferous forest by GC-MS. *Chemosphere*, 2006, 64(7): 1185-1195.
- [12] Ivan K, Jörg W, Willy M, Thorsten H, Magda C. marker compounds in $PM_{2.5}$ aerosol from a mixed forest site in western Germany. *Chemosphere*, 2008, 73(8): 1308-1314.
- [13] Kourtchev I, Warnke J, Maenhaut W, Hoffmann T, Claeys M. Polar organic marker compounds in $PM_{2.5}$ aerosol from a mixed forest site in western Germany. *Chemosphere*, 2008, 73(8): 1308-1314.
- [14] Matsuda K, Fujimur Y, Hayashi K, Takahashi A, Nakaya K. Deposition velocity of $PM_{2.5}$ sulfate in the summer above a deciduous forest in central Japan. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(36): 4582-4587.
- [15] Horváth L. Dry deposition velocity of $PM_{2.5}$ ammonium sulfate particles to a Norway spruce forest on the basis of S-and N-balance estimations. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(31): 4419-4424.
- [16] Li L, Wang W, Feng J L, Zhang D P, Li H J, Gu Z P, Wang B J, Sheng G Y, Fu J M. Composition, source, mass closure of $PM_{2.5}$ aerosols for four forests in eastern China. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(3): 405-412.
- [17] Guo E G, Wang C, Qie G F, Fang C, Sun Z W, Zhou Z H. Diurnal variations of airborne particulate matters in different seasons in typical recreation forests in west Mountain of Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3253-3263.
- [18] Guo E G, Wang C, Peng Z H, Qie G F, Yang W W, Fang C, Zhou Z H. Diurnal variation of airborne particulate matter in 3 typical recreation forests in west mountain of Beijing area in spring. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(6): 145-148.
- [19] Yu X C, He K B, Ma Y L, Duan F K, Yang F M, Zheng A H, Zhao C Y. Determination of water-soluble inorganic and organic species of aerosols. *Environmental Chemistry*, 2004, 23(2): 218-222.
- [20] Gu J X, Bai Z P, Li W F, Wu L P, Liu A X, Dong H Y, Xie Y Y. Chemical composition of $PM_{2.5}$ during winter in Tianjin, China. *Particuology*, 2011, 9(3): 215-221.
- [21] Lai S C, Zou S C, Cao J J, Lee S C, Ho K F. Characterizing ionic species in $PM_{2.5}$ and PM_{10} in four Pearl River Delta cities, South China. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(8): 939-947.
- [22] McInnes L M, Covert D S, Quinn P K, Germani M S. Measurements of chloride depletion and sulfur enrichment in individual sea-salt particles collected from the remote marine boundary layer. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(D4): 8257-8268.
- [23] Freer S P H, Beckett K P, Taylor G. Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoids* × *trichocarpa* 'Beaupré', *Pinus nigra* and × *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environmental Pollution*, 2005, 133(1): 157-167.
- [24] Ren Q W, Wang C, Qie G F, Yang Y. Airborne particulates in urban greenland and its relationship with airborne microbes. *Urban Environment &*

- Urban Ecology, 2006, 19(5): 22-25.
- [25] Cheng M T, Horng C L, Lin Y C. Characteristics of atmospheric aerosol and acidic gases from urban and forest sites in central Taiwan. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, 79(6): 674-677.
- [26] Wu Z P, Wang C, Hou X J, Yang W W. Variation of air PM_{2.5} concentration in six urban greenlands. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2008, 35(4): 494-498.
- [27] Fang G C, Chang C N, Wu Y S, Fu P F, Yang D G, Chu C C. Characterization of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in suburban and rural sites of central Taiwan. *The Science of the Total Environment*, 1999, 234(1/3): 203-212.
- [28] Saxena A, Kulshrestha U C, Kumar N, Kumari K M, Srivastava S S. Characterization of precipitation at Agra. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(20): 3405-3412.
- [29] Lara L B L S, Artaxo P, Martinelli L A, Victoria R L, Camargo P B, Krusche A, Ayers G P, Ferraz E S B, Ballester M V. Chemical composition of rainwater and anthropogenic influences in the Piracicaba river basin, southeast Brazil. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(29): 4937-4945.
- [30] Tang X Y, Zhang Y H. *Atmospheric Environmental Chemistry*. Beijing: China Forestry Press, 1990: 345-347.
- [31] Stelson A W, Seinfeld J H. Relative humidity and temperature dependence of the ammonium nitrate dissociation constant. *Atmospheric Environment* (1967), 1982, 16(5): 983-992.
- [32] Huang X D, Olmez I, Aras N K, Gordon G E. Emissions of trace elements from motor vehicles: Potential marker elements and source composition profile. *Atmospheric Environment*, 1994, 28(8): 1385-1391.
- [33] McPherson E G, Scott K I, Simpson J R. Estimating cost effectiveness of residential yard trees for improving air quality in Sacramento, California, using existing models. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(1): 75-84.
- [34] Ye B M, Ji X L, Yang H Z, Yao X H, Chan C K, Cadle S H, Chan T, Mulawa P A. Concentration and chemical composition of PM_{2.5} in Shanghai for a 1-year period. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(4): 499-510.
- [35] Yao X H, Chan C K, Fang M, Cadle S, Chan T, Mulawa P, He K B, Ye B M. The water-soluble ionic composition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(26): 4223-4234.
- [36] Watson J G, Chow J C, Houck J E. PM_{2.5} chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995. *Chemosphere*, 2001, 43(8): 1141-1151.
- [37] Lü W Y, Xu H J, Wang X M. Major inorganic water-soluble ions in fine particles collected in autumn in urban Guangzhou. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(1): 98-101.

参考文献:

- [9] 张涛, 陶俊, 王伯光, 朱李华, 韩静磊, 许振成. 2008 年 1 月广州颗粒物数浓度污染特征. *中国环境监测*, 2009, 25(2): 31-34.
- [17] 郭二果, 王成, 鄧光发, 房城, 孙志伟, 周志海. 北京西山典型游憩林空气颗粒物不同季节的日变化. *生态学报*, 2009, 29(6): 3253-3263.
- [18] 郭二果, 王成, 彭镇华, 鄧光发, 杨伟伟, 房城, 周志海. 北京西山三种典型游憩林春季空气颗粒物日变化规律. *林业科学*, 2009, 45(6): 145-148.
- [19] 余学春, 贺克斌, 马永亮, 段凤魁, 杨复沫, 郑爱华, 赵承易. 气溶胶水溶性无机物及有机物的离子色谱测定. *环境化学*, 2004, 23(2): 218-222.
- [24] 任启文, 王成, 鄧光发, 杨颖. 城市绿地空气颗粒物及其与空气微生物的关系. *城市环境与城市生态*, 2006, 19(5): 22-25.
- [26] 吴志萍, 王成, 侯晓静, 杨伟伟. 6 种城市绿地空气 PM_{2.5} 浓度变化规律的研究. *安徽农业大学学报*, 2008, 35(4): 494-498.
- [30] 唐孝炎, 张远航. *大气环境化学*. 北京: 高等教育出版社, 1990: 345-347.
- [37] 吕文英, 徐海娟, 王新明. 广州城区秋季大气 PM_{2.5} 中主要水溶性无机离子分析. *环境科学与技术*, 2010, 33(1): 98-101.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.19 Oct., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

A review of ecosystem services and research perspectives	MA Fengjiao, LIU Jintong, A. Egrinya Eneji (5963)
Sexual interference in non-human primates	YANG Bin, WANG Chengliang, JI Weihong, et al (5973)
Density-dependent effect on reproduction of rodents; a review	HAN Qunhua, GUO Cong, ZHANG Meiwen (5981)
Proximate and ultimate determinants of food chain length	WANG Yuyu, XU Jun, LEI Guangchun (5990)
Mechanism of biological control to plant diseases using arbuscular mycorrhizal fungi	LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LI Yuanyuan, et al (5997)
Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon and nitrogen	XUE Jianfu, ZHAO Xin, Shadrack Batsile Dikgwatlhe, et al (6006)
Habitat selection of the pre-released giant panda in Wolong Nature Reserve	ZHANG Mingchun, HUANG Yan, LI Desheng, et al (6014)
Activity rhythm and behavioral time budgets of wild Reeves's Pheasant (<i>Syrnaticus reevesii</i>) using infrared camera	ZHAO Yuze, WANG Zhichen, XU Jiliang, et al (6021)
The energy budget of tree sparrows <i>Passer montanus</i> in wind different speed and duration	YANG Zhihong, WU Qingming, DONG Haiyan, et al (6028)
Nest site characteristics of <i>Petaurista caniceps</i> in Baima Snow Mountain Nature Reserve	LI Yanhong, GUAN Jinke, LI Dayong, HU Jie (6035)
Effects of habitat fragmentation on the genetic diversity of <i>Pachycondyla luteipes</i> on islands in the Thousand Island Lake, East China	LUO Yuanyuan, LIU Jinliang, HUANG Jiuling, et al (6041)
The molecular genetic relationship between the pollinators of <i>Ficus pumila</i> var. <i>pumila</i> and <i>Ficus pumila</i> var. <i>aukeotsang</i>	WU Wenshan, CHEN Youling, SUN Lingli, et al (6049)
The genetic evolutionary relationships of two <i>Eupristina</i> species on <i>Ficus altissima</i>	CHEN Youling, SUN Lingli, WU Leilei, et al (6058)
Metal uptake and root morphological changes for two varieties of <i>Salix integra</i> under cadmium stress	WANG Shufeng, SHI Xiang, SUN Haijing, et al (6065)
Effects of phthalic acid on seed germination, membrane lipid peroxidation and osmoregulation substance of radish seedlings	YANG Yanjie, WANG Xiaowei, ZHAO Kang, et al (6074)
The morphological and physiological responses of <i>Tamarix ramosissima</i> seedling to different irrigation methods in the extremely arid area	MA Xiaodong, WANG Minghui, LI Weihong, et al (6081)
Response characteristics of photosynthetic and physiological parameters in <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i> seedling leaves to soil water in sand habitat formed from seashells	WANG Rongrong, XIA Jiangbao, YANG Jihua, et al (6088)
Effects of ceramsite mulching on soil water content, photosynthetic physiological characteristics and growth of plants	TAN Xuehong, GUO Xiaoping, ZHAO Tingning (6097)
Dynamics of tannin concentration and nutrient resorption for branchlets of <i>Casuarina equisetifolia</i> plantations at different ages	YE Gongfu, ZHANG Shangju, ZHANG Lihua, et al (6107)
Sulfur contents in leaves and branches of dominant species among the three forest types in the Pearl River Delta	PEI Nancai, CHEN Bufeng, ZOU Zhijin, et al (6114)
Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus on growth dynamics of <i>Bauhinia faberi</i> seedlings	SONG Chengjun, QU Laiye, MA Keming, et al (6121)
Characteristics of ion accumulation and seed germination for seeds from plants cultured at different concentrations of nitrate nitrogen and salinity	ZHOU Jiachao, FU Tingting, ZHAO Weiwei, et al (6129)
Physio-ecological effects of endophyte infection on the host grass with elevated CO ₂	SHI Zhibing, ZHOU Yong, LI Xia, et al (6135)
Effects of pretreatment on germination of <i>Typha domingensis</i> and <i>Phragmites australis</i>	MENG Huan, WANG Xuehong, TONG Shouzheng, et al (6142)
Transfer characteristics of cadmium from soil to <i>Salix × aureo-pendula</i>	ZHANG Wen, WEI Hong, SUN Xiaocan, et al (6147)
Effect of Close-to-Nature management on the natural regeneration and species diversity in a masson pine plantation	LUO Yinghua, SUN Dongjing, LIN Jianyong, et al (6154)
Population dynamics and seed banks of the threatened seagrass <i>Halophila beccarii</i> in Pearl Bay, Guangxi	QIU Guanglong, FAN Hangqing, LI Zongshan, et al (6163)
Effects of biological crusts on dew deposition and evaporation in the Southern Edge of the Mu Us Sandy Land, Northern China	YIN Ruiping, WU Yongsheng, ZHANG Xin, et al (6173)
Life history characteristics and spatial distribution of <i>Populus pruinosa</i> population at the upper reaches of Tarim River	HAN Lu, XI Linqiao, WANG Jiaqiang, et al (6181)
Interactive effects of short-term nitrogen enrichment and simulated grazing on ecosystem respiration in an alpine meadow on the Tibetan Plateau	ZONG Ning, SHI Peili, JIANG Jing, et al (6191)

- The correlation between soil water salinity and plant community distribution under micro-topography in Songnen Plain YANG Fan, WANG Zhichun, WANG Yunhe, et al (6202)
- Comparison of TSP, PM_{2.5} and their water-soluble ions from both inside and outside of Dafushan forest park in Guangzhou during rainy season XIAO Yihua, LI Jiong, KUANG Yuanwen, et al (6209)
- Fish community ecology in rocky reef habitat of Ma'an Archipelago II. Spatio-temporal patterns of community structure WANG Zhenhua, ZHAO Jing, WANG Kai, et al (6218)
- Interannual variation in the population dynamics of snailfish *Liparis tanakae* in the Yellow Sea CHEN Yunlong, SHAN Xiujuan, ZHOU Zhipeng, et al (6227)
- Spatial and temporal variation of soil macro-fauna community structure in three temperate forests LI Na, ZHANG Xueping, ZHANG Limin (6236)
- Community structure and species biodiversity of fig wasps in syconia of *Ficus superba* Miq. var. *japonica* Miq. in Fuzhou CHEN Youling, CHEN Xiaoqian, WU Wenshan, et al (6246)
- Marine ecological capital: valuation methods of marine ecosystem services CHEN Shang, REN Dachuan, XIA Tao, et al (6254)
- Geomorphologic regionalization of China aimed at construction of nature reserve system GUO Ziliang, CUI Guofa (6264)
- Impact of ecological vegetation construction on the landscape pattern of a Loess Plateau Watershed YI Yang, XIN Zhongbao, QIN Yunbin, et al (6277)
- Spatial heterogeneity of soil moisture across a cropland-grassland mosaic: a case study for agro-pastoral transition in north of China WANG Hongmei, WANG Zhongliang, WANG Kun, et al (6287)
- The regional diversity of changes in growing duration of spring wheat and its correlation with climatic adaptation in Northern China E Youhao, HUO Zhiguo, MA Yuping, et al (6295)
- Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst SHENG Maoyin, LIU Yang, XIONG Kangning (6303)
- Prediction of the effects of climate change on the potential distribution of mire in Northeastern China HE Wei, BU Rencang, LIU Hongjuan, et al (6314)
- Soil nitrogen mineralization and associated temperature sensitivity of different Inner Mongolian grasslands ZHU Jianxing, WANG Qiufeng, HE Nianpeng, et al (6320)
- Effects of land use on soil nutrient in oasis-desert ecotone in the middle reach of the Heihe River MA Zhimin, LÜ Yihe, SUN Feixiang, et al (6328)
- Assessment on heavy metal pollution status in paddy soils in the northern Chengdu Plain and their potential ecological risk QIN Yusheng, YU Hua, FENG Wenqiang, et al (6335)
- Relationship between the temporal-spatial distribution of longline fishing grounds of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and the thermocline characteristics in the Central Atlantic Ocean YANG Shenglong, MA Junjie, ZHANG Yu, et al (6345)
- Biological nitrogen fixation in the upper water column in the south Taiwan Strait during summer 2011 LIN Feng, CHEN Min, YANG Weifeng, et al (6354)
- Storage and drivers of forests carbon on the Beichangshan Island of Miaodao Archipelago SHI Honghua, WANG Xiaoli, WANG Ai, et al (6363)
- Impact of changes in vegetation types on soil C mineralization and associated temperature sensitivity in the Changbai Mountain forests of China WANG Dan, LÜ Yuliang, XU Li, et al (6373)
- Analysis of relationship between genetic structure of Chinese Pine and mountain barriers MENG Xiangxiang, DI Xiaoyan, WANG Mengben, et al (6382)
- Soil organic carbon interpolation based on auxiliary environmental covariates: a case study at small watershed scale in Loess Hilly region WEN Wen, ZHOU Baotong, WANG Yafeng, et al (6389)
- Eco-management benefit analysis of industrial resources from life cycle perspective: a case study of a virtual symbiosis network SHI Xiaoqing, LI Xiaonuo, YANG Jianxin (6398)
- The game analysis between poverty and environment in ecologically fragile zones QI Xinhua, YE Shilin, CHENG Yu, et al (6411)
- The coupling development of economy and environment under the background of World Expo in Shanghai NI Yao, YUE Wenzhe, ZHANG Yuntang, et al (6418)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 陈利顶

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 19 期 (2013 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 19 (October, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元