

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第16期 Vol.32 No.16 **2012**

中国生态学学会
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32卷第16期 2012年8月 (半月刊)

目次

基于生物多样性保护的兴安落叶松与白桦最佳混交比例——以阿尔山林区为例	李菁, 骆有庆, 石娟 (4943)
中国能源消费碳排放的时空特征	舒娱琴 (4950)
黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因素	姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河 (4961)
新疆艾比湖流域土壤有机质的空间分布特征及其影响因素	王合玲, 张辉国, 秦璐, 等 (4969)
雅鲁藏布江山南宽谷风沙化土地土壤养分和粒度特征	李海东, 沈渭寿, 邹长新, 等 (4981)
一株溶藻细菌对海洋原甲藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 等 (4993)
种形态对黑藻和竹叶眼子菜有机酸含量的影响	钟正燕, 王宏镔, 王海娟, 等 (5002)
七项河流附着硅藻指数在东江的适用性评估	邓培雁, 雷远达, 刘威, 等 (5014)
杭州湾滨海湿地不同植被类型沉积物磷形态变化特征	梁威, 邵学新, 吴明, 等 (5025)
剪形臂尾轮虫形态的时空变化及其与生态因子间的关系	葛雅丽, 席貽龙, 马杰, 等 (5034)
太湖流域河流水质状况对景观背景的响应	周文, 刘茂松, 徐驰, 等 (5043)
荒漠植物白刺属4个物种的生殖分配比较	李清河, 辛智鸣, 高婷婷, 等 (5054)
臭氧浓度升高对香樟叶片光合色素及抗过氧化的影响及其氮素响应	牛俊峰, 张巍巍, 李丽, 等 (5062)
不同密度下凤仙花重要形态性状与花朵数的关系	田旭平, 常洁, 李娟娟, 等 (5071)
五种高速公路边坡绿化植物的生理特性及抗旱性综合评价	谭雪红, 高艳鹏, 郭小平, 等 (5076)
散孔材与环孔材树种枝干、叶水力学特性的比较研究	左力翔, 李俊辉, 李秧秧, 等 (5087)
北京城区行道树国槐叶面尘分布及重金属污染特征	戴斯迪, 马克明, 宝乐 (5095)
南亚热带米老排人工林碳贮量及其分配特征	刘恩, 刘世荣 (5103)
植物生活史型定量划分及其权重配置方法——以四棱豆生活史型划分为例	赵则海 (5110)
半干旱区湿地-干草原交错带边界判定及其变化	王晓, 张克斌, 杨晓晖, 等 (5121)
氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响	吴光磊, 郭立月, 崔正勇, 等 (5128)
氮肥形态对冬小麦根际土壤氮素生理群活性及无机氮含量的影响	熊淑萍, 车芳芳, 马新明, 等 (5138)
基于数字相机的冬小麦物候和碳交换监测	周磊, 何洪林, 孙晓敏, 等 (5146)
黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响	姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 等 (5154)
基于土地破坏的矿区生态风险评价: 理论与方法	常青, 邱瑶, 谢苗苗, 等 (5164)
基于生态位的山地农村居民点适宜度评价	秦天天, 齐伟, 李云强, 等 (5175)
氯虫苯甲酰胺对黑肩绿盲蝽实验种群的影响	杨洪, 王召, 金道超 (5184)
6种植物次生物质对斜纹夜蛾解毒酶活性的影响	王瑞龙, 孙玉林, 梁笑婷, 等 (5191)
云南元江芒果园桔小实蝇成虫日活动规律及空间分布格局	叶文丰, 李林, 孙来亮, 等 (5199)
重庆市蝴蝶多样性环境健康指示作用和环境监测评价体系构建	邓合黎, 马琦, 李爱民 (5208)
专论与综述	
生态系统服务竞争与协同研究进展	李鹏, 姜鲁光, 封志明, 等 (5219)
中国沿海无柄蔓足类研究进展	严涛, 黎祖福, 胡煜峰, 等 (5230)
冰雪灾害对森林的影响	郭淑红, 薛立 (5242)
不同干扰因素对森林和湿地温室气体通量影响的研究进展	杨平, 全川 (5254)
采石场废弃地的生态重建研究进展	杨振意, 薛立, 许建新 (5264)
研究简报	
基于地统计学和CFI样地的浙江省森林碳空间分布研究	张峰, 杜群, 葛宏立, 等 (5275)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 344 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-08



封面图说: 秋色藏野驴群——秋天已经降临在海拔4200多米的黄河源区, 红色的西伯利亚蓼(生于盐碱荒地或砂质含盐碱土壤)铺满大地, 间有的高原苔草也泛出了金黄, 行走在上面的藏野驴们顾不上欣赏这美丽的秋色, 只是抓紧时间, 在严冬到来之前取食, 添肥增膘以求渡过青藏高原即将到来的漫长冬天。

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

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32 ,No. 16 August ,2012(Semimonthly)

CONTENTS

The optimum mixture ratio of larch and birch in terms of biodiversity conservation;a case study in Aershan forest area	LI Jing, LUO Youqing, SHI Juan (4943)
Spatiotemporal characteristics of carbon emissions from energy consumption in China	SHU Yuqin (4950)
Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China	YAO Xueling, FU Bojie, LÜ Yihe (4961)
The characteristics of the spatial distribution of soil organic matter and factors influencing it in Ebinur Lake Basin of Xinjiang Autonomous Region, China	WANG Heling, ZHANG Huiguo, QIN Lu, et al (4969)
Soil nutrients content and grain size fraction of aeolian sandy land in the Shannan Wide Valley of the Yarlung Zangbo River, China	LI Haidong, SHEN Weishou, ZOU Changxin, et al (4981)
Algicidal activity against <i>Prorocentrum micans</i> by a marine bacterium isolated from a HABs area, South China	SHI Rongjun, HUANG Honghui, QI Zhanhui, et al (4993)
Effects of arsenic speciations on contents of main organic acids in <i>Hydrilla verticillata</i> and <i>Potamogeton malaianus</i>	ZHONG Zhengyan, WANG Hongbin, WANG Haijuan, et al (5002)
Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang basin	DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (5014)
Phosphorus fraction in the sediments from different vegetation type in hangzhou bay coastal wetlands	LIANG Wei, SHAO Xuexin, WU Ming, et al (5025)
Spatio-temporal variation of morphometric characteristics of <i>Brachionus forficula</i> in relation to ecological factors	GE Yali, XI Yilong, MA Jie, et al (5034)
Response of river water quality to background characteristics of landscapes in Taihu Lake basin	ZHOU Wen, LIU Maosong, XU Chi, et al (5043)
Reproductive allocation in four desert species of the genus <i>Nitraria</i> L.	LI Qinghe, XIN Zhiming, GAO Tingting, et al (5054)
Effects of elevated ozone on foliar chlorophyll content and antioxidant capacity in leaves of <i>Cinnamomum camphora</i> under enhanced nitrogen loads	NIU Junfeng, ZHANG Weiwei, LI Li, et al (5062)
Correlation analysis between floret numbers and important traits of <i>Impatiens balsamina</i> under different planting density	TIAN Xuping, CHANG Jie, LI Juanjuan, et al (5071)
Physiological characteristics and comprehensive evaluation of drought resistance in five plants used for roadside ecological restoration	TAN Xuehong, GAO Yanpeng, GUO Xiaoping, et al (5076)
Comparison of hydraulic traits in branches and leaves of diffuse- and ring-porous species	ZUO Lixiang, LI Junhui, LI Yangyang, et al (5087)
Distribution and heavy metal character of foliar dust on roadside tree <i>Sophora japonica</i> of urban area in Beijing	DAI Sidi, MA Keming, BAO Le (5095)
The research of carbon storage and distribution feature of the <i>Mytilaria laosensis</i> plantation in south sub-tropical area	LIU En, LIU Shirong (5103)
The novel methods of quantitative classification of plant life cycle forms and weight collocation; taking classification of life cycle forms of <i>Psophocarpus tetragonolobus</i> as an example	ZHAO Zehai (5110)
Research on boundary definition and changes of wetland-dry grassland ...	WANG Xiao, ZHANG Kebin, YANG Xiaohui, et al (5121)
Differential effects of nitrogen managements on nitrogen, dry matter accumulation and transportation in late-sowing winter wheat	WU Guanglei, GUO Liyue, CUI Zhengyong, et al (5128)
Effects of nitrogen form on the activity of nitrogen bacteria group and inorganic nitrogen in rhizosphere soil of winter wheat	XIONG Shuping, CHE Fangfang, MA Xinming, et al (5138)
Using digital repeat photography to model winter wheat phenology and photosynthetic CO ₂ uptake	ZHOU Lei, HE Honglin, SUN Xiaomin, et al (5146)
Impacts of climate change on growth and yield of winter wheat in the semi-humid region of the Loess Plateau	YAO Yubi, WANG Runyuan, YANG Jinhu, et al (5154)
Theory and method of ecological risk assessment for mining areas based on the land destruction	CHANG Qing, QIU Yao, XIE Miaomiao, et al (5164)
Suitability evaluation of rural residential land based on niche theory in mountainous area	QIN Tiantian, QI Wei, LI Yunqiang, et al (5175)
Effects of chlorantraniliprole on experimental populations of <i>Cyrtorhinus lividipennis</i> (Reuter) (Hemiptera: Miridae)	YANG Hong, WANG Zhao, JIN Daochao (5184)
Effects of six plant secondary metabolites on activities of detoxification enzymes in <i>Spodoptera litura</i>	WANG Ruilong, SUN Yulin, LIANG Xiaoting, et al (5191)
Daily activity and spatial distribution pattern of the oriental fruit fly, <i>Bactrocera dorsalis</i> (Diptera: Tephritidae) in mango orchard, Yuanjiang, Yunnan	YE Wenfeng, LI Lin, SUN Lailiang, et al (5199)
The establishment of the indication on environmental health of butterfly and of the environmental monitoring evaluation system in Chongqing	DENG Heli, MA Qi, LI Aimin (5208)
Review and Monograph	
Research progress on trade-offs and synergies of ecosystem services; an overview	LI Peng, JIANG Luguang, FENG Zhiming, et al (5219)
A review on the balanomorph barnacles in the coastal waters of China	YAN Tao, LI Zufu, HU Yufeng, et al (5230)
Effects of ice-snow damage on forests	GUO Shuhong, XUE Li (5242)
Greenhouse gas flux from forests and wetlands; a review of the effects of disturbance	YANG Ping, TONG Chuan (5254)
Advances in ecology restoration of abandoned quarries	YANG Zhenyi, XUE Li, XU Jianxin (5264)
Scientific Note	
Spatial distribution of forest carbon in Zhejiang Province with geostatistics based on CFI sample plots	ZHANG Feng, DU Qun, GE Hongli, et al (5275)

DOI: 10.5846/stxb201110271602

戴斯迪, 马克明, 宝乐. 北京城区行道树国槐叶面尘分布及重金属污染特征. 生态学报, 2012, 32(16): 5095-5102.

Dai S D, Ma K M, Bao L. Distribution and heavy metal character of foliar dust on roadside tree *Sophora japonica* of urban area in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 5095-5102.

北京城区行道树国槐叶面尘分布及重金属污染特征

戴斯迪, 马克明*, 宝 乐

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:叶面尘分布范围广、累积时间长,能够较好地指示近地面大气颗粒物污染特征和累积状况。为揭示城市道路交通的大气颗粒物污染特征,研究了北京城区不同类型道路两侧行道树国槐(*Sophora japonica*)的叶面滞尘量,分析了叶面尘主要重金属的浓度和污染特征,采用相关分析和主成分分析法探讨了颗粒物重金属的主要来源。结果表明:国槐叶面滞尘量在快速路、主干路、次干路、支路上的比值为 100:84:75:75,受车流量影响较大。行道树国槐的平均叶面滞尘量为 0.68 g/m²,庭院树国槐(远离交通)叶面滞尘量是 0.51 g/m²,两者差异显著。行道树叶面尘重金属元素 Cu、Zn、Pb 在叶面尘中的浓度达到土壤背景值的 6 倍,空间分布较均匀,主要来自交通排放,庭院树叶面尘重金属污染也受到交通排放的重要影响。

关键词: 北京;国槐;叶面尘;重金属;主成分分析;交通排放

Distribution and heavy metal character of foliar dust on roadside tree *Sophora japonica* of urban area in Beijing

DAI Sidi, MA Keming*, BAO Le

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Foliar dust is an important indicator of particulate matter (PM) in the near ground atmosphere, it can provide valuable information about the accumulation and characteristic of PM. The study on distribution and pollution characteristics of foliar dust is important for identifying the airborne particle source. With the rapid increase of traffic flow in cities, emission from traffic has become one of the main sources of the air PM pollution, and led to the deterioration of air quality in urban area. However, characteristics of road-based particle emissions and their effects on PM pollution have not been well studied. *Sophora japonica* is the main species of roadside trees of the urban area of Beijing and also serves as a good indicator species for monitoring PM pollution. In this study, we collect 105 samples of foliar dust on *Sophora japonica*, which contains 91 samples along different types of road and 14 samples in parks and gardens as background. Foliar dust is obtained by elution and filtration, and the dust retention is classified according to road type and analyzed by one-way Analysis of Variance (ANOVA). The total concentrations of main heavy metals Mn, Ni, Cu, Zn, Pb and Cr in foliar dust are determined by Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). The possible pollution sources of these metals are identified by Pearson correlation and Principal component analysis (PCA). The result shows that the highest foliar dust retention, mainly affected by the traffic volume, is found on roadside trees of freeways, followed by major arterial, minor arterial and collector road, with a ratio of 100:84:75:75. Foliar dust retention by the roadside trees (0.68 g/m²) is significantly higher (with $P=0.054$) than that of the garden trees (0.51 g/m²). The concentrations of Cu, Zn and Pb in foliar dust of roadside trees are 6 times higher than the soil background values, indicating that traffic emission is a

基金项目:国家科技支撑计划项目(2007BAC28B01);城市与区域生态国家重点实验室自主项目

收稿日期:2011-10-27; **修订日期:**2012-06-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mkm@rcees.ac.cn

significant source of metal pollution. The concentrations of heavy metals may be affected by a number of factors and have a generally uniform spatial distribution on traffic area. The correlation among Mn, Ni, Cu, Zn, Pb and Cr is significant in traffic areas, which means they are mainly originated from particle emissions from on-road vehicles. Lots of heavy metal pollutants are generated from vent-pipe emission, tyre abrasion, brake wear abrasion, road surface abrasion and resuspension in the wake of passing traffic. More than one source of particulate heavy metals is identified for foliar dust of garden trees and traffic emissions accounts for a large proportion. The major heavy metal pollutant Pb, Cu and Zn are mainly derived from traffic emissions. By comparing the concentrations of Pb, Cu and Zn between garden samples and roadside samples, we find that Pb is most likely to transport, followed by that of Cu and Zn. This study implies that traffic emission has become the major anthropogenic source of PM and heavy metal pollution in the urban area in Beijing, corresponding measures should be adopted for the pollution control.

Key Words: Beijing; *Sophora japonica*; foliar dust; heavy metal; principal component analysis; traffic emissions

城市近地面大气颗粒物 (Particulate matter, PM) 携带着多种污染物, 会引起各种人类疾病甚至人体机能障碍^[1], 直接危害人群健康, 近年来广受关注。城区中, 道路交通排放和二次扬尘等是大气颗粒物污染的重要来源^[2]。以北京为例, 截至 2011 年 4 月, 北京市机动车保有量达 489.2 万辆, 交通排放已经跃居为城市空气污染的主要来源。而严重的拥堵, 又加剧了交通污染排放^[3]。因此, 了解城市道路交通区大气颗粒物的污染特征与分布规律, 对于城市大气污染治理具有重要意义。

研究城市大气颗粒物污染, 选择合适的取样方法非常重要。目前的研究大多采用大流量空气采样器^[4-9], 这种方法有两个局限性: 一是由于该方法对监测站点和监测仪器的硬件设备要求较高, 采样点少, 只能代表较小区域内的状况。如段菁春等选取 3 个采样点研究了北京市大气细粒子的分布特征^[7], 一些对杭州、北京、广州 PM 特征的研究也只选取一个采样点^[4-6, 8, 10]; 二是只能反映短时间内的大气 PM 状况, 空气采样器的采样时间一般少于 48 h, 而大气 PM 日变化比较大, 短时间的测量不能准确反映 PM 长期总体污染水平。

行道树叶片具有滞尘作用^[11], 且叶片高度与人的呼吸带相近, 叶面尘与人群可吸入的 PM 特征相似。相对于环境监测站点的仪器测量, 行道树的覆盖面广、取样简单, 而且叶面尘能反映 PM 的累积污染情况。选取行道树叶片作为 PM 载体, 在一定程度上突破了大气采样器的局限性, 能够大范围布点, 研究 PM 长期累积污染的情况, 从空间和时间上增大了 PM 的研究尺度, 提高了取样的可靠性。

本文以国槐 (*Sophora japonica*) 为例, 探讨北京城区行道树叶面尘的空间分布特征和重金属污染浓度, 为研究城市近地面大气环境对居民健康的风险提供参考。

1 研究方法

1.1 样品采集与分析

国槐是北京市高频度应用的行道树树种, 分布广泛, 选择国槐开展行道树叶面尘研究具有代表性和典型性。

(1) 样品采集

采样区域在北京市六环以内, 从市中心向 8 个方向放射状等距布设采样点, 选择距样点最近的道路采集叶片样品, 部分样点周围分布有不同类型的道路, 则作为不同道路级别的样点, 尽量使不同类型道路的采样点数量相近、分布均匀, 样点分布如图 1 所示。

此次调查共得到快速路 24 个、主干路 25 个、次干路 22 个、支路 20 个行道树样点。作为对照, 在公园和生活区选择 14 个庭院树的样点。在 2010 年 8 月 27—30 日, 9 月 10—15 日进行样地调查和样品采集 (8 月 31 日、9 月 1 日有阵雨, 一般认为雨后 5d 以上叶面尘量变化不大)。样点设在道路中段, 避开交叉路口, 行道树面朝道路, 背向道路一侧多为人行道, 硬质地面。在道路的两侧选择长势相同的 5 棵树, 用高枝剪剪下朝向道

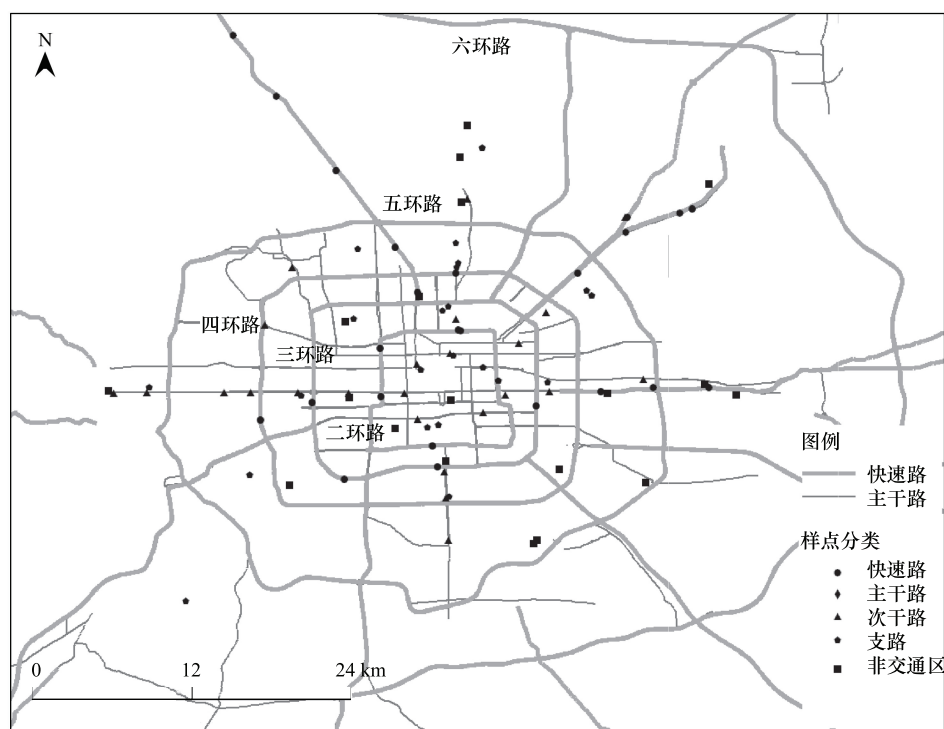


图1 北京城区样点位置图

Fig.1 A sketch map showing the sampling sites in Beijing

路和背向道路的健康叶片,取样高度距地面 3 m 左右,将同一道路采集的所有叶片混合成一个样本(约 200 g),装入自封袋后放入冰盒保存后运回实验室,共计 105 个样本。

(2) 样品处理

滞尘量测定 叶面积测定采用扫描分析法。每个样本中取 20 片健康叶片,用去离子水冲洗干净,擦干称重得到叶片质量 m ,扫描仪扫描后用 WinFOLIA 软件分析叶面积 s ,计算单位质量叶面积 $f=s/m$ 。

叶面尘提取采用洗脱法。从每个样本中称取 50 g 叶片,用去离子水超声振荡 4 min,洗涤液用已烘至恒重的混纤微孔滤膜($\phi 0.45 \mu\text{m}$)抽滤,得到载尘滤膜,烘至恒重,滤膜两次烘干后均称重,得到质量差 Δm ,单位质量的叶面尘质量 $M=\Delta m/50$ 。叶面滞尘量计算: $D=M/f$ 。

重金属含量测定 用酸溶法($\text{HCl-HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$)在电热板上加热消解载尘滤膜,用全谱直读等离子体发射光谱仪(Prodigy ICP-OES,美国 Leeman 公司)测定重金属元素浓度。

1.2 数据处理

通过 Grubbs 法剔除异常值后,用单样本 K-S(Kolmogorov-Smirnov)法检验发现,叶面尘中 Mn、Ni、Cu、Zn、Pb、Cr 均服从对数正态分布。数据计算用 Excel2007 完成,统计分析用 SPSS13.0 软件完成,图像由 ArcGIS9.3 完成。

2 结果

2.1 不同道路类型的滞尘量

实验数据显示北京市行道树国槐的叶面滞尘量的均值为 0.68 g/m^2 ,庭院树国槐(生活区)作为城区背景值,其滞尘量为 0.51 g/m^2 ,二者在 $P=0.054$ 水平上差异显著,行道树叶面滞尘量显著高于庭院树。不同类型道路的行道树滞尘量有差异(表 1),快速路、主干路、次干路、支路的叶面滞尘量分别为 0.81 、 0.68 、 0.61 、 0.61 g/m^2 。

2.2 叶面尘的重金属浓度

2.2.1 行道树叶面尘的重金属浓度

行道树样点共 91 个,剔除异常值后 Mn、Ni、Cu、Cr、Pb、Zn 服从对数正态分布。行道树叶面尘重金属浓度

见表2。以北京市土壤背景值^[12]作为参照分析各元素的污染程度(表2),发现叶面尘重金属 Cu、Zn、Pb 的浓度远高于背景值,分别是土壤背景值的 18.7 倍、6.2 倍、5.9 倍, Ni、Cr 略高于背景值, Mn 略低于背景值,可见叶面尘中 Cu、Zn、Pb 的污染程度最高,其次是 Ni、Cr。

表 1 不同道路类型的行道树和庭院树(城市背景)的叶面滞尘量

Table 1 Foliar dust retention of different types of road and residential area/(g/m²)

	样本数 No. samples	均值 Mean	最小值 Minimum	中值 Median	最大值 Maximum	标准差 Std. Deviation
快速路 Freeways	24	0.813	0.257	0.580	2.812	0.629
主干路 Major arterial	25	0.675	0.229	0.554	1.552	0.314
次干路 Minor arterial	22	0.611	0.307	0.515	1.539	0.313
支路 Collector roads	20	0.615	0.294	0.499	1.660	0.341
交通区(行道树)总体 Total of roadside trees	91	0.683	0.229	0.544	2.812	0.426
城市背景值(庭院树) Total of garden trees	9	0.505	0.226	0.375	1.352	0.370

表 2 行道树叶面尘的重金属浓度

Table 2 The heavy metal content of foliar dust on roadside trees/(mg/kg)

	Mn	Ni	Cu	Cr	Pb	Zn
样本数 No. Samples	90	91	91	89	91	90
均值 Mean	579.94	48.54	442.29	184.16	150.63	632.15
标准差 Std. Deviation	203.13	17.90	206.87	98.72	45.99	183.64
土壤背景值 Soid background value	705.00	29.00	23.60	68.10	25.40	102.60
叶面尘/土壤 Foliar dust / Soil	0.82	1.67	18.74	2.70	5.93	6.16

ANOVA 方差分析表明不同道路类型的叶面尘中 Mn、Ni、Cu、Cr、Pb、Zn 的浓度差异不显著($P>0.05$)。说明行道树叶面尘中重金属浓度在空间上较均匀。

2.2.2 行道树叶面尘与庭院树叶面尘的重金属浓度比较

比较行道树与庭院树叶面尘的 Cu、Zn、Mn、Ni、Cr、Pb 浓度(表3),并计算庭院树/行道树的重金属浓度比($C_{(庭院树/行道树)}$),发现 $Zn_{(庭院树/行道树)}$ 最小, $Pb_{(庭院树/行道树)}$ 最大, $Cu_{(庭院树/行道树)} \approx 1$,说明 Zn 在行道树叶面尘中浓度高于庭院树, Pb 反之。

表 3 行道树与庭院树的叶面尘重金属浓度比较

Table 3 Comparison of heavy metal content of foliar dust in roadside trees and garden trees/(mg/kg)

	Mn	Ni	Cu	Cr	Pb	Zn
庭院树 Garden trees	526.99	53.32	435.42	159.50	175.55	541.33
行道树 Roadside trees	579.94	48.54	442.29	184.16	150.63	632.15
庭院树/行道树 Garden trees / Roadside trees	0.91	1.10	0.98	0.87	1.17	0.86

2.3 重金属元素的相关性分析

对行道树和庭院树的叶面尘重金属浓度分别进行相关分析(表4),结果表明行道树叶面尘的所有重金属元素显著相关,而庭院树叶面尘中 Cu 与 Mn、Ni、Cr 不相关, Cr 与 Pb、Cu、Zn 不相关, Pb-Mn、Ni-Zn 弱相关。这说明行道树叶面尘重金属的同源性较大,而庭院树的叶面尘重金属来源不止一个。

2.4 重金属元素的主成分分析

行道树和庭院树叶面尘中各重金属元素浓度均服从对数正态分布,经对数转换后进行主成分分析(表5),按累积百分比大于 85% 的要求抽取主成分。结果显示:行道树叶面尘中, Cu、Pb、Zn 在第一主成分有较大

载荷量(贡献率 35.2%),Mn 在第二主成分有较大载荷量(贡献率 26.5%),Cr、Ni 在第三主成分载荷量大(贡献率 23.5%);非交通叶面尘中 Cr、Mn、Ni 是第一主成分的主要元素(贡献率 44.7%),Cu、Zn、Pb 在第二主成分的载荷量较大(贡献率 41.2%)。

表 4 行道树和庭院树叶面尘重金属元素的 Pearson 相关系数矩阵
Table 4 Pearson correlation coefficients of heavy metals of doliar dust on roadside trees and garden trees

	行道树 Roadside trees						庭院树 Garden trees					
	Mn	Ni	Cu	Cr	Pb	Zn	Mn	Ni	Cu	Cr	Pb	Zn
Mn	1						1					
Ni	0.528 **	1					0.794 **	1				
Cu	0.371 **	0.493 **	1				0.475	0.471	1			
Cr	0.456 **	0.475 **	0.329 **	1			0.839 **	0.775 **	0.435	1		
Pb	0.583 **	0.638 **	0.713 **	0.374 **	1		0.579 *	0.814 **	0.690 **	0.513	1	
Zn	0.612 **	0.681 **	0.579 **	0.306 **	0.726 **	1	0.716 **	0.660 *	0.755 **	0.529	0.749 **	1

* 在 5% 水平显著相关, ** 在 1% 水平显著相关

表 5 行道树和庭院树叶面尘重金属来源的因子载荷量矩阵
Table 5 Factor load of the heavy metals on the former three principal components

	行道树 Roadside trees			庭院树 Garden trees		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
Cu	0.914	0.066	0.200	Cr	0.917	0.207
Pb	0.773	0.468	0.209	Mn	0.876	0.345
Zn	0.627	0.580	0.288	Ni	0.816	0.444
Mn	0.171	0.896	0.270	Cu	0.165	0.911
Cr	0.190	0.230	0.923	Zn	0.429	0.814
Ni	0.472	0.419	0.564	Pb	0.440	0.787
因子贡献率% of variance	35.249	26.531	23.498	因子贡献率% of variance	44.657	41.179
累积贡献率 cumulative %	35.249	61.780	85.278	累积贡献率 cumulative %	44.657	85.836

3 讨论

3.1 行道树国槐叶面尘分布与道路等级密切相关

道路交通可能是影响行道树国槐叶面尘的主要因素,而车流量越大的道路行道树的滞尘量可能越大。道路类型是车流量的间接体现,据统计^[13],快速路、主干路、次干路、支路的车流量比例为 100:29:10:9。樊守彬等^[13]报道了 2007 年 8—9 月间北京市不同类型道路的降尘量,快速路:主干路:次干路:支路=100:85:76:66。本研究中,不同道路类型的行道树叶面滞尘量为快速路:主干路:次干路:支路=100:84:75:75,与道路降尘情况相似,说明道路降尘与行道树叶面尘有相同的影响因素,即道路降尘主要受车流量影响,因此叶面滞尘量的主要影响因素是车流量。

交通主要可能通过 3 种方式影响行道树叶面滞尘量:车辆行驶造成气流扰动,将路面积尘再次扬起形成二次扬尘;汽车尾气排放大量 PM,且在汽车加速、减速、停止时会排放更多尾气^[14],车流量大时加速、减速、停止等行为更频繁;制动磨损、轮胎磨损、路面磨损等非尾气排放也增加行道树 PM^[3, 15]。这些交通排放的 PM 使大气 PM 含量增加,部分 PM 通过沉降、附着等方式滞留在行道树的叶片上形成叶面尘,在未达到饱和之前随空气 PM 浓度的增加而增大。因此车流量越大的道路其行道树滞尘量也越大。

行道树滞尘量显著大于庭院树,可能归结于两个原因:一是行道树的阻滞作用拦截了近地面大气 PM 的迁移,被叶面滞留的 PM 难以重新扬起;二是由于重力作用,较大粒径的 PM 都在道路及路侧区域沉降,只有粒径较小的 PM 能够随气流迁移到距道路较远的庭院树。

3.2 行道树国槐叶面尘的重金属主要来源于道路交通

大气中的重金属元素主要借助风力迁移,车辆行驶形成的气流扰动会使重金属元素沿道路均匀分布。本

研究中,国槐叶面尘中 Mn、Ni、Cu、Cr、Pb、Zn 的浓度在不同道路类型的差异不显著,说明它们具有很高的同源性,与以往的研究结论相符^[16-17]。

通过比较行道树叶面尘与土壤背景值的重金属浓度可以辨识出交通排放产生的主要污染元素。叶面尘中 Cu、Zn、Pb 的浓度达到土壤背景值的 6 倍以上, Ni、Cr 约为背景值的 2 倍, Mn 略低于土壤背景值,说明交通区的首要重金属污染物是 Cu、Zn、Pb,其次是 Ni、Cr。Cu 是制动磨损的标志元素、Zn 是轮胎磨损的典型代表,它们代表非尾气排放水平。本研究发现 Cu、Zn 显著高于土壤背景值,说明非尾气排放对交通排放的影响很大。据估算,北京典型道路交通高峰时机动车尾气排放 PM_{10} 为 1.14 t/h(2009 年)^[18],非尾气排放 PM_{10} 为 0.67 t/h(2008 年)^[19],非尾气排放已超过交通 PM 总排放量的三分之一。一些欧洲城市的研究者也发现尾气排放量持续减小,但非尾气排放有增无减^[15]的情况,例如英国繁忙道路上尾气排放和非尾气排放的贡献几乎相同^[20]。可见,非尾气排放是现代城市交通污染中所占比例呈现不断增加的趋势。

主成分分析进一步证实了交通区叶面尘的同源性。3 个主因子中, Cu、Pb、Zn 在第一主成分有较大载荷量,是典型街道灰尘的污染组合^[21]。Zn 是轮胎硬化剂的材料,叶面尘 Zn 主要来自轮胎磨损^[15, 22],润滑油泄漏^[23],镀锌护栏、灯柱的腐蚀^[3]也有一定贡献。Cu 主要来自汽车金属部件,尤其是刹车里衬的磨损^[24]。Pb 来自尾气排放、路面磨损、油漆涂料腐蚀等。Mn 是第二主成分的主要元素, Zn、Pb、Ni 也有一定的载荷量。Mn 是合金材料和建筑材料的特征元素,路面材料和油漆涂料中含有少量的 Zn、Pb,据此推测第二主成分主要是路面扬尘,主要由路面磨损、建筑材料风化、路边裸土等共同产生。Cr、Ni 在第三主成分有较大载荷量,与刹车制动^[25]、燃料燃烧、建筑材料的风化、天然降尘等相关,为非特定源污染。

Pearson 相关性分析发现庭院树叶面尘的来源不止一个,这与交通区的情况形成对比。由于样点附近没有显著工业源,推测庭院树叶面尘来源主要有大气降尘和交通排放。主成分分析发现,庭院树叶面尘中 Cr、Ni、Mn 是第一主成分的主要元素, Pb 和 Zn 也有一定的载荷量,可以认为第一主成分主要来自大气降尘,是融合了交通、工业、建筑材料、岩石风化等多种来源的混合源 PM; Cu、Zn、Pb 在第二主成分的载荷量较大, Cu-Zn-Pb 的组合是交通排放的典型识别标志,这说明交通排放已经成为北京市居民区 PM 重金属污染物的重要来源,某些欧洲城市^[26]的研究也得到类似结果。

Pb、Zn、Cu 虽然都主要来自交通排放,但它们在大气环境中的扩散能力不同。本研究比较发现,典型交通源重金属的扩散能力为 $Pb > Cu > Zn$ 。Pb 在庭院树叶面尘中浓度高 ($Pb_{(庭院树/行道树)} > 1$), Zn 刚好相反 ($Zn_{(庭院树/行道树)} < 1$),这种差异可能与重金属的扩散能力有关。研究表明,粒径越小的 PM 越容易长时间停留在大气中,并且随气流远距离迁移^[27]。陈同斌等^[28]研究发现香港海拔 800 m 人类活动很少的山地土壤 Pb 浓度也受到人类排放影响, Pb 能以大气为媒介传输到很远的地方。徐宏辉等^[8]在北京研究发现, Pb 主要在粒径 $< 1.1 \mu m$ 的颗粒中被富集,且垂直分布比较均匀,而 Zn、Cu 在粒径 $< 5.8 \mu m$ 的颗粒中富集较多,在近地面浓度更高,较难扩散到高空,对污染源周边区域影响更大。

4 结论

(1)行道树国槐的平均叶面滞尘量为 $0.68 g/m^2$,庭院树国槐(远离交通)叶面滞尘量是 $0.51 g/m^2$,两者差异显著。交通排放是路域 PM 浓度显著高于庭院树的主要原因。

(2)行道树叶面滞尘量在快速路、主干路、次干路、支路的滞尘量比值为 100:84:75:75,滞尘量与车流量正相关。

(3)交通排放产生的首要重金属污染物是 Cu、Zn、Pb,在叶面尘中的浓度达到土壤背景值的 6 倍,重金属主要来自尾气排放、制动磨损、轮胎磨损、路面磨损等,非尾气交通排放对交通环境影响越来越显著。

(4)行道树叶面尘中的重金属元素具有很高的同源性,道路交通排放是主要贡献者,其中尾气排放、制动磨损、轮胎老化的贡献较大。交通排放也是庭院树叶面尘的重要来源。

(5)首要交通源重金属 Cu、Zn、Pb 的扩散能力由大到小依次为 Pb、Cu、Zn。

References:

- [1] Fang F M. Research on environmental geochemistry of metal elements in atmospheric particles in China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 979-984.
- [2] Harrison R M, Tilling R, Romero M S C, Harrad S, Jarvis K. A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(17): 2391-2402.
- [3] Hjortenkranz D, Bergbäck B, Häggerud A. New metal emission patterns in road traffic environments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 117(1/3): 85-98.
- [4] Fan X B, Liu W, Wang G H, Lin J, Fu Q Y, Gao S, Li Y. Size distributions of concentrations and chemical components in Hangzhou atmospheric particles. *China Environmental Science*, 2011, 31(1): 13-18.
- [5] Liu X D, Li Y W, Dong S P, Li B, Zhao Y. Cluster analysis of atmospheric aerosol in Beijing based on chemical compositional data. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2010, 31(3): 157-164.
- [6] Lü X W, Chen C Y, Huang R D, Dang Z. Speciation analysis and transfer of heavy metals in atmospheric particulates. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2005, 33(1): 75-78.
- [7] Duan J C, Li X H, Tan J H, Chai F H. Size distribution and source apportionment of atmospheric particle number concentration in winter in Beijing. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(10): 1134-1140.
- [8] Xu H H, Wang Y S, Wen T X, He X X. Size distributions and vertical distributions of metal elements of atmospheric aerosol in Beijing. *Environmental Chemistry*, 2007, 26(5): 675-679.
- [9] Chen Y, Cen K, Norra S, Schleicher N, Yu Y. Study on pollution characteristics of PM_{2.5} in the aerosol, tracing and tracking atmospheric particulates in Beijing city. *Geoscience*, 2010, 24(2): 345-354.
- [10] Zhang T, Tao J, Wang B G, Zhang R J. Research on size distribution of particles and its impact on visibility in urban Guangzhou during spring. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2010, 27(3): 3312.
- [11] Chai Y X, Zhu N, Han H J. Dust removal effect of urban tree species in Harbin. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9): 1121-1126.
- [12] China Environmental Monitoring Station. Background Concentrations of Soil Heavy Metals in Beijing. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 330-382.
- [13] Fan S B, Tian G, Qin J P, Li G. Emission characteristics of road dust-fall in Beijing. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(3): 629-632.
- [14] Furusjö E, Sternbeck J, Cousins A P. PM₁₀ source characterization at urban and highway roadside locations. *Science of the Total Environment*, 2007, 387(1/3): 206-219.
- [15] Thorpe A, Harrison R M. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review. *Science of the Total Environment*, 2008, 400(1/3): 270-282.
- [16] Lu N C, Ran W J, Yang F. Research on traffic heavy metal contamination of the soil-plant system along roadside. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2010, 16(1): 142-145.
- [17] Hu X M, Wang L P, Bi J H. Research on the heavy metal pollution in city atmosphere. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(1): 302-303.
- [18] Fan S B. Tail-pipe emission characteristics from on-road vehicles in Beijing. *Environmental Science and Management*, 2011, 36(4): 28-31.
- [19] Fan S B. Non-exhaust particles emission characteristics from on-road vehicles. *Environmental Science and Technology*, 2011, 34(5): 124-127.
- [20] Harrison R M, Yin J X, Mark D, Stedman J, Appleby R S, Booker J, Moorcroft S. Studies of the coarse particle (2.5—10 μm) component in UK urban atmospheres. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(21): 3667-3679.
- [21] Ferreira-Baptista L, de Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(25): 4501-4512.
- [22] Li X D, Poon C S, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(11/12): 1361-1368.
- [23] Sternbeck J, Sjödin Å, Andréasson K. Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension-results from two tunnel studies. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(30): 4735-4744.
- [24] Saint'Pierre T D, Dias L F, Maia S M, Curtius A J. Determination of Cd, Cu, Fe, Pb and Tl in gasoline as emulsion by electrothermal vaporization inductively coupled plasma mass spectrometry with analyte addition and isotope dilution calibration techniques. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*, 2004, 59(4): 551-558.

- [25] Liu C H, Cen K. Chemical composition and possible sources of elements in street dusts in Beijing. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(7): 1181-1188.
- [26] Lenschow P, Abraham H J, Kutzner K, Lutz M, Preuß J D, Reichenbacher W. Some ideas about the sources of PM10. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(S1): S23-S33.
- [27] Liu C H, Cen K. Particle size characteristics and possible sources of street dust in Beijing. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6): 1006-1012.
- [28] Chen T B, Huang M H, Huang H Z, Zhou H Y. A study on heavy metal pollution in soils in Hong Kong. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(3): 228-236.

参考文献:

- [1] 方凤满. 中国大气颗粒物中金属元素环境地球化学行为研究. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 979-984.
- [4] 范雪波, 刘卫, 王广华, 林俊, 伏晴艳, 高松, 李燕. 杭州市大气颗粒物浓度及组分的粒径分布. *中国环境科学*, 2011, 31(1): 13-18.
- [5] 刘咸德, 李玉武, 董树屏, 李冰, 赵越. 北京市大气颗粒物化学元素组成的聚类分析. *质谱学报*, 2010, 31(3): 157-164.
- [6] 吕玄文, 陈春瑜, 黄如秋, 党志. 大气颗粒物中重金属的形态分析与迁移. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(1): 75-78.
- [7] 段青春, 李兴华, 谭吉华, 柴发合. 北京冬季大气颗粒物数浓度的粒径分布特征及来源. *环境科学研究*, 2009, 22(10): 1134-1140.
- [8] 徐宏辉, 王跃思, 温天雪, 何新星. 北京市大气气溶胶中金属元素的粒径分布和垂直分布. *环境化学*, 2007, 26(5): 675-679.
- [9] 陈媛, 岑况, Norra S, Schleicher N, 于扬. 北京市区大气气溶胶 PM2.5 污染特征及颗粒物溯源与追踪分析. *现代地质*, 2010, 24(2): 345-354.
- [10] 张涛, 陶俊, 王伯光, 张仁健. 广州市春季大气颗粒物的粒径分布及能见度研究. *中国科学院研究生院学报*, 2010, 27(3): 331-337.
- [11] 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.
- [12] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 330-382.
- [13] 樊守彬, 田刚, 秦建平, 李钢. 北京道路降尘排放特征研究. *环境工程学报*, 2010, 4(3): 629-632.
- [16] 卢宁川, 冉文静, 杨芳. 交通源路域土壤—植物系统中重金属污染研究. *安徽农学通报*, 2010, 16(1): 142-145.
- [17] 胡星明, 王丽平, 毕建洪. 城市大气重金属污染分析. *安徽农业科学*, 2008, 36(1): 302-303.
- [18] 樊守彬. 北京机动车尾气排放特征研究. *环境科学与管理*, 2011, 36(4): 28-31.
- [19] 樊守彬. 车辆非尾气管颗粒物排放特征研究. *环境科学与技术*, 2011, 34(5): 124-127.
- [25] 刘春华, 岑况. 北京市街道灰尘的化学成分及其可能来源. *环境科学学报*, 2007, 27(7): 1181-1188.
- [27] 刘春华, 岑况. 北京市街道灰尘粒度特征及其来源探析. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 1006-1012.
- [28] 陈同斌, 黄铭洪, 黄焕忠, 周海云. 香港土壤中的重金属含量及其污染现状. *地理学报*, 1997, 52(3): 228-236.

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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

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 32 卷 第 16 期 (2012 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 16 (August, 2012)

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 1000717, 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:1000717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 1000717, 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

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元