

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

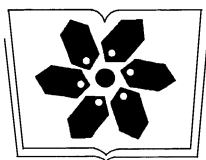
(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 5 期
Vol.31 No.5
2011



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 31 卷 第 5 期

2011 年 3 月 (半月刊)

目次

盐胁迫下 3 种滨海盐生植物的根系生长和分布·····	弋良朋,王祖伟 (1195)
蕙兰病株根部内生细菌种群变化·····	杨娜,杨波 (1203)
森林不同土壤层全氮空间变异特征·····	张振明,余新晓,王友生,等 (1213)
基于生态位模型的秦岭山系林麝生境预测·····	罗翀,徐卫华,周志翔,等 (1221)
黑河胜山自然保护区红松和红皮云杉生长释放判定及解释·····	王晓春,赵玉芳 (1230)
两种大型真菌菌丝体对重金属的耐受和富集特性·····	李维焕,于兰兰,程显好,等 (1240)
2005—2009 年浙江省不同土地类型上空对流层 NO ₂ 变化特征·····	程苗苗,江洪,陈健,等 (1249)
关帝山天然次生针叶林林隙径高比·····	符利勇,唐守正,刘应安 (1260)
鄱阳湖湿地水位变化的景观响应·····	谢冬明,郑鹏,邓红兵,等 (1269)
模拟氮沉降对华西雨屏区撑绿杂交竹凋落物分解的影响·····	涂利华,戴洪忠,胡庭兴,等 (1277)
喷施芳香植物源营养液对梨树生长、果实品质及病害的影响·····	耿健,崔楠楠,张杰,等 (1285)
不同覆膜方式对旱砂田土壤水热效应及西瓜生长的影响·····	马忠明,杜少平,薛亮 (1295)
干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响·····	张仁和,郑友军,马国胜,等 (1303)
不同供水条件下冬小麦叶与非叶绿色器官光合日变化特征·····	张永平,张英华,王志敏 (1312)
水分亏缺下紫花苜蓿和高粱根系水力学导度与水分利用效率的关系·····	李文尧,李小利,张岁岐,等 (1323)
美洲森林群落 Beta 多样性的纬度梯度性·····	陈圣宾,欧阳志云,郑华,等 (1334)
水体泥沙对菖蒲和石菖蒲生长发育的影响·····	李强,朱启红,丁武泉,等 (1341)
蚯蚓在植物修复芑污染土壤中的作用·····	潘声旺,魏世强,袁馨,等 (1349)
石榴园西花蓟马种群动态及其与气象因素的关系·····	刘凌,陈斌,李正跃,等 (1356)
黄山短尾猴食土行为·····	尹华宝,韩德民,谢继峰,等 (1364)
扎龙湿地昆虫群落结构及动态·····	马玲,顾伟,丁新华,等 (1371)
浙江双栉蝠蛾发生与土壤关系的层次递进判别分析·····	杜瑞卿,陈顺立,张征田,等 (1378)
低温导致中华蜜蜂后翅翅脉的新变异·····	周冰峰,朱翔杰,李月 (1387)
双壳纲贝类 18S rRNA 基因序列变异及系统发生·····	孟学平,申欣,程汉良,等 (1393)
基于物理模型实验的光倒刺鲃生态行为学研究·····	李卫明,陈求稳,黄应平 (1404)
中国铁路机车牵引能耗的生态足迹变化·····	何吉成 (1412)
城市承载力空间差异分析方法——以常州市为例·····	王丹,陈爽,高群,等 (1419)
水资源短缺的社会适应能力理论及实证——以黑河流域为例·····	程怀文,李玉文,徐中民 (1430)
寄主植物叶片物理性状对潜叶昆虫的影响·····	戴小华,朱朝东,徐家生,等 (1440)

专论与综述

C ₄ 作物 FACE(free-air CO ₂ enrichment) 研究进展·····	王云霞,杨连新,Remy Manderscheid,等 (1450)
---	------------------------------------

研究简报

石灰石粉施用剂量对重庆酸雨区受害马尾松林细根生长的影响·····	李志勇,王彦辉,于澎湃,等 (1460)
女贞和珊瑚树叶片表面特征的 AFM 观察·····	石辉,王会霞,李秧秧,刘肖 (1471)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 284 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 32 * 2011-03

CONTENTS

Root system characters in growth and distribution among three littoral halophytes	YI Liangpeng, WANG Zuwei (1195)
Population dynamics of endophytic bacteria isolated from the roots of infected <i>Cymbidium faberi</i>	YANG Na, YANG Bo (1203)
Spatial variability of forest soil total nitrogen of different soil layers	ZHANG Zhenming, YU Xinxiao, WANG Yousheng, et al (1213)
Habitat prediction for forest musk deer (<i>Moschus berezovskii</i>) in Qinling mountain range based on niche model	LUO Chong, XU Weihua, ZHOU Zhixiang, et al (1221)
Growth release determination and interpretation of Korean pine and Koyama spruce in Shengshan National Nature Reserve, Heilongjiang Province, China	WANG Xiaochun, ZHAO Yufang (1230)
Growth tolerance and accumulation characteristics of the mycelia of two macrofungi species to heavy metals	LI Weihuan, YU Lanlan, CHENG Xianhao, et al (1240)
Characters of the OMI NO ₂ column densities over different ecosystems in Zhejiang Province during 2005—2009	CHENG Miaomiao, JIANG Hong, CHEN Jian, et al (1249)
The forest gap diameter height ratio in a secondary coniferous forest of Guan Di Mountain	FU Liyong, TANG Shouzheng, LIU Yingan (1260)
Landscape responses to changes in water levels at Poyang Lake wetlands	XIE Dongming, ZHENG Peng, DENG Hongbing, et al (1269)
Effect of simulated nitrogen deposition on litter decomposition in a <i>Bambusa pervariabilis</i> × <i>Dendrocalia mopsis</i> plantation, Rainy Area of West China	TU Lihua, DAI Hongzhong, HU Tingxing, et al (1277)
Effect of aromatic plant-derived nutrient solution on the growth, fruit quality and disease prevention of pear trees	GENG Jian, CUI Nannan, ZHANG Jie, et al (1285)
Influences of different plastic film mulches on temperature and moisture of soil and growth of watermelon in gravel-mulched land	MA Zhongming, DU Shaoping, XUE Liang (1295)
Effects of drought stress on photosynthetic traits and protective enzyme activity in maize seeding	ZHANG Renhe, ZHENG Youjun, MA Guosheng, et al (1303)
Photosynthetic diurnal variation characteristics of leaf and non-leaf organs in winter wheat under different irrigation regimes	ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, WANG Zhimin (1312)
The root system hydraulic conductivity and water use efficiency of alfalfa and sorghum under water deficit	LI Wenrao, LI Xiaoli, ZHANG Suiqi, et al (1323)
Latitudinal gradient in beta diversity of forest communities in America	CHEN Shengbin, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1334)
Influence of silts on growth and development of <i>Acorus calamus</i> and <i>Acorus tatarinowii</i> in turbid water	LI Qiang, ZHU Qihong, DING Wuquan, et al (1341)
Roles of earthworm in phytoremediation of pyrene contaminated soil	PAN Shengwang, WEI Shiqiang, YUAN Xin, et al (1349)
Population dynamics of <i>Frankliniella occidentalis</i> (Thysanoptera: Thripidae) along with analysis on the meteorological factors influencing the population in pomegranate orchards	LIU Ling, CHEN Bin, LI Zhengyue, et al (1356)
Geophagy of <i>Macaca Thibetana</i> at Mt. Huangshan, China	YIN Huabao, HAN Demin, XIE Jifeng, et al (1364)
The structure and dynamic of insect community in Zhalong Wetland	MA Ling, GU Wei, DING Xinhua, et al (1371)
Analysis of layer progressive discriminant relations between the occurrence of <i>Bipectilus zhejiangensis</i> and soil	DU Ruiqing, CHEN Shunli, ZHANG Zhengtian, et al (1378)
New mutations in hind wing vein of <i>Apis cerana cerana</i> (Hymenoptera: Apidae) induced by lower developmental temperature	ZHOU Bingfeng, ZHU Xiangjie, LI Yue (1387)
18S rRNA gene variation and phylogenetic analysis among 6 orders of Bivalvia class	MENG Xueping, SHEN Xin, CHENG Hanliang, et al (1393)
Laboratory study on ethology of <i>Spinibarbus hollandi</i>	LI Weiming, CHEN Qiuwen, HUANG Yingping (1404)
Dynamic change in ecological footprint of energy consumption for traction of locomotives in China	HE Jicheng (1412)
Approach to spatial differences analysis of urban carrying capacity: a case study of Changzhou City	WANG Dan, CHEN Shuang, GAO Qun, et al (1419)
Social adaptive capacity for water resource scarcity in human systems and case study on its measuring	CHENG Huaiwen, LI Yuwen, XU Zhongmin (1430)
Effects of physical leaf features of host plants on leaf-mining insects	DAI Xiaohua, ZHU Chaodong, XU Jiasheng, et al (1440)
Review and Monograph	
Progresses of free-air CO ₂ enrichment (FACE) researches on C ₄ crops: a review	WANG Yunxia, YANG Lianxin, Remy Manderscheid, et al (1450)
Scientific Note	
Influence of limestone powder doses on fine root growth of seriously damaged forests of <i>Pinus massoniana</i> in the acid rain region of Chongqing, China	LI Zhiyong, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al (1460)
Leaf surface microstructure of <i>Ligustrum lucidum</i> and <i>Viburnum odoratissimum</i> observed by Atomic force microscopy (AFM)	SHI Hui, WANG Huixia, LI Yangyang, LIU Xiao (1471)

女贞和珊瑚树叶片表面特征的 AFM 观察

石 辉^{1,*}, 王会霞¹, 李秧秧², 刘 肖³

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100;
3. 榆林市土壤肥料工作站, 陕西 榆林 719000)

摘要:应用原子力显微镜观察了女贞 (*Ligustrum lucidum*)、珊瑚树 (*Viburnum odoratissimum*) 幼叶和成熟叶的表面特征,并探讨了叶面微结构对滞尘能力的可能影响以及抵抗干旱、污染物等胁迫的能力。女贞幼叶和成熟叶正背面的粗糙度 R_a 分别为 417.8、794.5、1069、957.4 nm;珊瑚树幼叶和成熟叶正背面的粗糙度 R_a 分别为 471.3、469.6、291.1、865.9 nm。和幼叶相比,成熟叶表面的粗糙度发生变化,但 2 个物种的变化趋势不同,这种变化可能与气孔的发育以及外界环境条件对叶片表面形态结构、蜡质含量和成分的影响不同有关。叶片表面存在大量的沟状、孔状峰谷区域和直径约为 10 μm 的凹陷,有利于 PM_{10} 的滞留。女贞和珊瑚树成熟叶气孔只分布在叶下表皮且下陷。这些特征均说明女贞和珊瑚树具有较强的滞尘能力和抵抗干旱、污染物胁迫的能力,作为绿篱植物对消减城市大气颗粒物污染和提高空气质量具有重要的意义。

关键词:原子力显微镜;叶表面微结构;粗糙度;滞尘

Leaf surface microstructure of *Ligustrum lucidum* and *Viburnum odoratissimum* observed by Atomic force microscopy (AFM)

SHI Hui^{1,*}, WANG Huixia¹, LI Yangyang², LIU Xiao³

1 School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

3 Soil and Fertilizer Working Station of Yulin, Yulin 719000, China

Abstract: Leaf surfaces are multifunctional interfaces between plant and their environment which affect both ecological and biological processes. Leaf surface topography is an important characteristic that directly affects microhabitat and microclimate availability for dust deposition, water storage and microbial colonization. However, few studies have been conducted which measure accurately the three dimensional structure of the leaf surface or record precise changes of leaf surface microstructure over time. The Atomic Force Microscopy (AFM) is one of the most powerful tools for determining the surface topography of native biomolecules at subnanometer resolution, and can image a wide variety of samples under variable conditions, thus providing a new way to probe biological structures. Using oscillating mode AFM, we measured the two- and three-dimensional coordinates of adaxial and abaxial surfaces of *Ligustrum lucidum* and *Viburnum odoratissimum*, two common perennial plant species for urban greening in Xi'an City, on leaves of two age classes. We then produced topographic maps of these leaf surfaces, which revealed striking differences between adaxial and abaxial surfaces and between age classes. The leaf surface was uneven due to wax crystals, stomata, various cells, papillae and hollows. For *Ligustrum lucidum*, the roughness of adaxial and abaxial surface was 417.8 nm and 794.5 nm for young leaves, 1069 nm and 957.4 nm for old leaves, respectively. Old leaves had much rougher surfaces than young leaves. However, in *Viburnum odoratissimum*, the roughness of adaxial and abaxial surface for young leaves was 471.3 nm and 469.6 nm respectively, and 291.1 nm and 865.9 nm for old leaves. The adaxial surface of young leaves was rougher than old leaves, but the abaxial surface was the converse. The roughness of plant leaves was much greater than artificial surfaces with only several nanometer

基金项目:国家自然科学基金项目(31070541);陕西省环境科学重点学科建设项目资助

收稿日期:2010-07-01; **修订日期:**2011-01-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shihui06@126.com

elevation. The different change of leaf surface roughness in the two plants may be related to the development of stomata, the changes of amount, chemical composition, and crystal structure of cuticular wax. There existed many papillae and hollows on the adaxial surface of these two plants with a radius of about 10 μm ; a structure able to capture PM_{10} (particle matter with aerodynamic diameter less than 10 μm), which was now thought to be the most important of the commonly occurring air pollutants. The shape of the epidermal cells of the old leaves in these two plants was irregular, and the stomatal apparatus only distributed on the abaxial surface and sunk into epidermis. It can be inferred that the two species examined in this study showed high dust capturing capacity and stress tolerance of drought and environmental pollutants, and can be recommended for introduction as avenue trees along road sides or as road dividers. Our results also indicated that AFM was an effective method for quantifying and comparing leaf surface landscape patterns and identifying the critical features at a scale relevant to both biological and physical processes on the leaf surfaces.

Key Words: atomic force microscopy (AFM); leaf surface morphology; roughness; dust capturing

原子力显微镜 (Atomic Force Microscopy, 缩写为 AFM) 是 20 世纪 80 年代初由扫描隧道显微镜 (Scanning Tunnel Microscopy, 缩写为 STM) 发展而来的一种扫描探针显微镜 (Scanning Probe Microscopy, 缩写为 SPM)。它通过控制和检测微悬臂末端探针与扫描样品表面原子之间的作用力来获取样品表面的形貌信息^[1]。因其具有放大倍数高 (高达 10 亿倍, 比电子显微镜分辨率高 1000 倍)、可在多种环境 (如大气、真空、低温等) 下工作、无需对样品进行特殊处理、样品制备简单、能够生成高分辨率的三维图像等优点, 在植物学中具有广泛的应用^[2], 特别是能够在接近生理状态的条件下观察样品, 为植物样品接近活体状态形貌的观察研究提供了强大的技术支持。

植物叶面是植物与环境进行物质和能量交换的重要界面, 对截留降水^[3]、滞留大气污染物^[4-5]、抵抗干旱^[6]和污染物^[7-8]胁迫具有重要的影响, 其表面的微观结构特征是这些功能的基础^[9]。目前, 有关植物叶面微观结构特征的 AFM 观察已经引起了一些学者的关注。Mechaber 等^[10]采用 AFM 研究了大果越橘 (*Vaccinium macrocarpon*) 叶面生境的异质性, 得到了叶片表面结构随叶龄变化的三维图像; 发现幼叶和老叶表面结构特征不同, 与幼叶相比, 老叶皱缩, 表面不规则且粗糙度增加。Wagner 等^[9]定量分析植物叶片表面疏水结构时, 观察到海芋 (*Alocasia macrorrhiza*) 叶片表面有很多突起, 对单个突起的 AFM 扫描则能清晰地观察到角质层折叠基础上的精细结构。Burton 和 Bhushan^[11]在研究莲叶 (*Nelumbo nucifera*) 和芋叶 (*Colocasia esculenta*) 表面结构、机械属性时, 观察到叶片表面有很多突起, 定量测定得到突起的峰谷值 ($P-V$) 分别为 9 μm 和 5 μm 。Perkins 等^[12]用 AFM 观察了桂樱桃 (*Prunus laurocerasus*) 叶片在纳米尺度上的微结构, 发现了叶表面物质的异质性, 并计算得到粗糙部分和平滑部分的平均粗糙度分别为 5.6 nm 和 1.4 nm。还有研究者利用 AFM 观测芥蓝 (*Brassica alboglabra*) 叶片在失水过程中保卫细胞、副卫细胞、其他表皮细胞等的微观结构形态变化^[13]。上述研究均是在离体叶片上完成的, 在这个过程中可能由于叶片失水收缩而造成叶片表面结构的变化^[11], 同时由于对叶片的破坏导致不能对同一叶片连续动态观测。为了解决这一问题, Koch 等^[14]用 AFM 原位 (*in situ* AFM) 研究了续随子 (*Euphorbia lathyris*)、雪花莲 (*Galanthus nivalis*) 和花韭 (*Ipheion uniflorum*) 3 种植物叶片脱蜡质后表皮蜡质的再生过程, 发现表皮蜡质一旦被外力去除就立即开始再生, 但不同的植物叶片表皮蜡质晶体的形成过程不同。但由于植物生长环境所限, AFM 原位观察受到很大的限制, 目前应用较多的依然是离体的观测; 在离体观察过程中只要条件控制得当, 仍可能获取样品真实结构特征的特征。

女贞 (*Ligustrum lucidum*) 和珊瑚树 (*Viburnum odoratissimum*) 是目前城市常见的绿篱植物, 也是北方城市为数不多的常绿树种, 对大气颗粒物的消减作用尤为重要。它们在有效改善城市生态环境的同时也时刻受到颗粒污染物、烟尘、汽车尾气等污染物以及因机动车辆行驶引起的局部气候干旱、风速过大等因素的影响。一

些研究者采用光学显微镜^[15-16]、扫描电镜^[8, 17]观察了处于空气污染状况下的多种植物叶片表面结构特征,并分析了表面结构对滞尘、抵抗干旱和污染物等胁迫的影响。目前,关于女贞和珊瑚树这 2 种植物叶片表面结构的 AFM 观察在我国尚未见报道。本文应用原子力显微镜技术对这 2 种植物不同生长阶段(出生不久的幼叶和成熟叶)的叶片表面微结构进行了观察,并探讨了叶片表面结构对滞尘能力的可能影响以及抵抗干旱、污染物等胁迫的能力。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为常见的绿化树种,分别为木犀科的常绿乔木女贞和忍冬科常绿灌木珊瑚树;枝叶选择向阳、位于植株高度 2/3 处的健康叶片,分为出生不久的幼叶和健康的成熟叶片 2 种。为了防止失水对叶片表面结构的影响,用修枝剪剪下带叶片的枝条插入装满水的三角烧瓶中备用。

1.2 试验方法

将试验材料带回实验室后,用蒸馏水冲洗叶片正背面,用吸水纸小心除去叶片表面水分,选取叶片较平坦的表面并尽量避开叶脉,制成约 5 mm×5 mm 的样本。在室温条件下,用扫描探针显微镜(SPI3800-SPA-400, Seiko Instruments Inc.)在原子力显微分析模式下以非接触模式对样品进行扫描和拍摄,扫描速率 0.5 Hz,用的是金涂层 Si₃N₄ 探针,横向分辨率为 0.2 nm,垂直分辨率为 0.01 nm,最大扫描范围为 100 μm×100 μm。所有的 AFM 图都是高度模式,未对图像进行任何处理。

2 结果与分析

2.1 叶片表面的 AFM 扫描特征

用 AFM 对样品进行扫描,得到图 1 所示扫描范围为 100 μm×100 μm 的二维和三维形态图。二维图以色度值的高低表示物体高度的变化,色度值越高表示高度越高,色度值越低表示高度越低;三维图可以从各个角度观察物体,可以得到更形象的结果。

从图 1 中可以看出,女贞成熟叶片的正面较平滑,局部存在高低不平的峰和谷;背面由于气孔、保卫细胞、各种突起和皱褶的存在导致粗糙度较高,气孔大小约为 25 μm×13 μm 且下陷。对于幼叶,正面有各种细胞和突起存在,但突起的表面轮廓高度较小,表面粗糙度相对较小;背面的气孔尚未形成,可清晰地看到左右两个半月形的保卫细胞;表面有各种细胞和突起,表皮细胞小而密,表面光滑,细胞壁较平直;同时可以看到一个直径约为 40 μm 的腺体,表面的粗糙度相对较高。从图中进一步分析,女贞成熟叶片的正背面峰谷之间的高差差异不大,分别为 7101 nm 和 7885 nm;而幼年叶片则差异显著,分别为 3978 nm 和 6899 nm。相似的,珊瑚树成熟叶片的正面粗糙度较小,高低峰谷的极差值为 2333 nm;而背面有气孔(大小约为 40 μm×17 μm)、各种突起和皱褶,较粗糙,且拱盖在气孔口上,保卫细胞略下陷,高低峰谷的极差值为 6123 nm。对于珊瑚树幼年叶片,表皮细胞表面光滑且较规则,气孔已形成(大小约为 17 μm×10 μm),气孔器保卫细胞略下陷,但与成熟叶片背面的气孔相比,在形态和大小方面均存在较大差异。幼年叶片正面则分布有大量的突起和凹陷,高低峰谷极差值为 3467 nm,背面由于气孔的存在和突起导致峰谷值高差较大,为 6131 nm。

女贞、珊瑚树成熟叶片上下表皮细胞具有较大差异,气孔只分布在叶下表皮,气孔下陷,表皮细胞形状无规则,外切向面明显向外隆起,而垂周壁略下陷。女贞、珊瑚树成熟叶片的气孔器均为长椭圆形,气孔器保卫细胞下陷,内缘平滑。气孔的形成是表皮细胞之间和表皮与叶肉细胞之间相互调节的结果,以减少水分自气孔的蒸发,这是植物叶片适应外界恶劣环境变化的一种表现。本文所观察的 2 种植物的气孔特征与其他研究者对旱生植物^[18-19]以及具有较强抵抗污染物^[8]胁迫植物的研究结果一致。

2.2 叶片表面的 AFM 扫描参数

在表征表面的粗糙度时常用的参数有轮廓算术平均偏差(R_a)、微观不平度十点高度(R_z)、峰谷值($P-V$)和微粗糙度(RMS),其中 R_a 是最常用的粗糙度表征参数。在表 1 中还包括了参数 S ,它是用于测定粗糙度参数的面积, S_{ratio} 是测定粗糙度参数的面积占整个视窗面积的比例。从表 1 可以看出,女贞幼叶的粗糙度

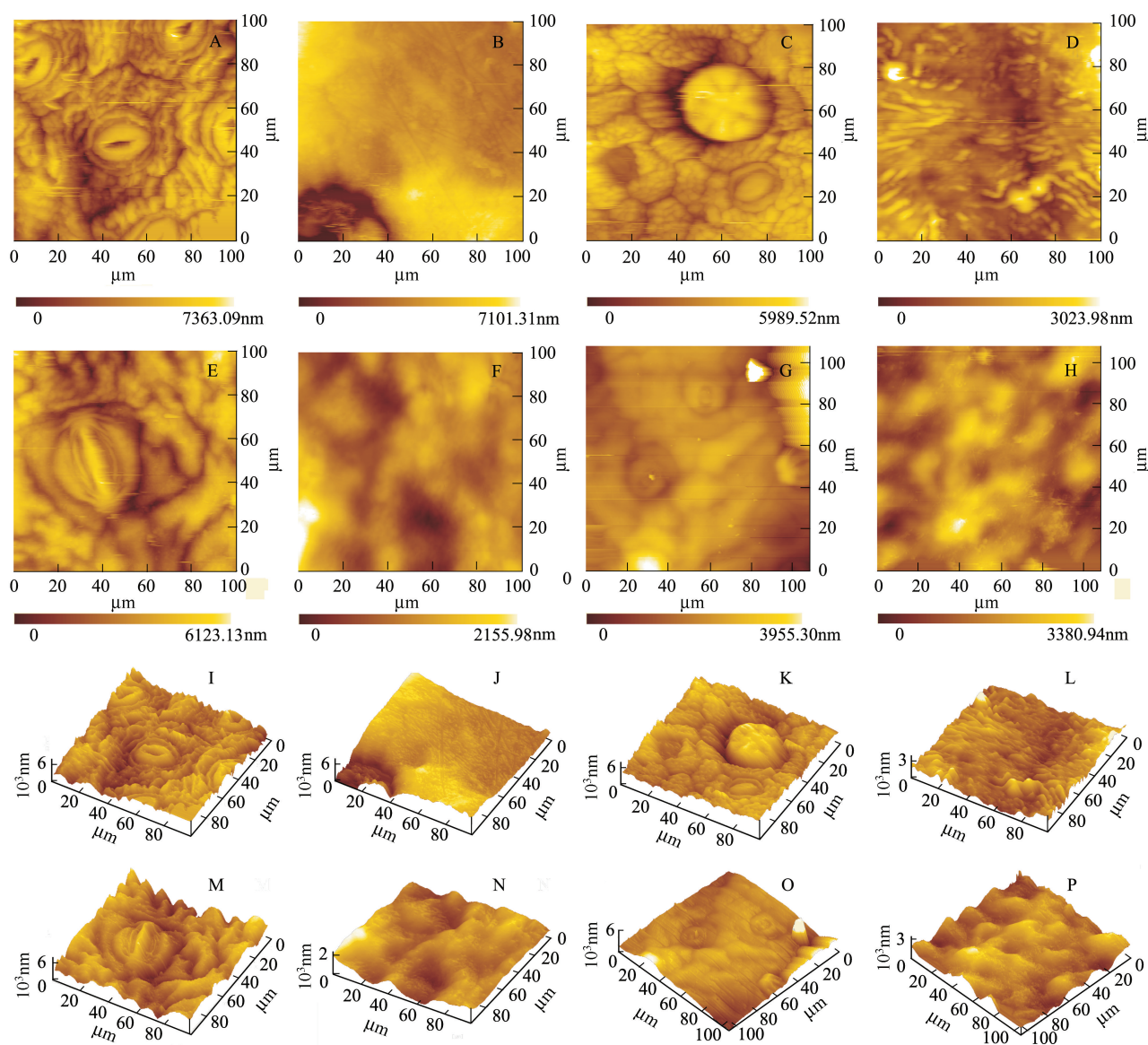


图1 女贞和珊瑚树幼叶、成熟叶的 AFM 图

Fig. 1 The two and three dimensional AFM images of *Ligustrum lucidum* and *Viburnum odoratissimum* on adaxial and abaxial surfaces

A—H 分别为女贞成熟叶背面、正面;女贞幼叶背面、正面;珊瑚树成熟叶背面、正面;珊瑚树幼叶背面、正面的二维图像;I—P 分别为对应的三维图像

R_a 正面为 417.8 nm、背面为 794.5 nm,成熟叶正面和背面的粗糙度分别为 1069 nm 和 957.4 nm。珊瑚树幼叶的粗糙度 R_a 正面为 471.3 nm、背面为 469.6 nm,成熟叶正面和背面的粗糙度分别为 291.1 nm 和 865.9 nm。一般人工制备的各种表面粗糙度在几至几十个 nm,女贞和珊瑚树叶片表面的粗糙度远高于人工制备的表面;其 R_a 值与新鲜和干燥的蘑菇 (2100±800) nm 和 (2200±500) nm 相当^[20],但明显低于洋葱表皮 4900—6000 nm、大蒜表皮 7500—11500 nm、青胡椒粉表皮 7300 nm 和苹果表皮 4500 nm^[20-21]。进一步分析不同生长阶段叶片的表面粗糙度可知,女贞幼叶背面粗糙度与正面粗糙度之比为 1.90,而成熟叶片为 0.90,表现出叶片正背面粗糙度的趋同化趋势;说明随着叶片的生长,处于相同环境下的叶片正背面受到各种因素的制约,正背面的粗糙度逐渐接近。而珊瑚树幼叶背面和正面粗糙度的比值为 1.00,成熟叶片则为 2.97,其变化趋势与女贞叶片的变化趋势相反。但是,这 2 种植物叶片随着叶龄的增长,老叶皱缩,表面粗糙度增加。 $P-V$ 、 RMS 和 R_z 参数也具有与 R_a 相似的变化特征。

不同的植物在生长过程中叶片表面粗糙度的变化趋势不同,可能与外界环境因素导致叶片表面蜡质含量、成分和形态结构发生变化的不同有关。Koch 等^[22]研究了不同相对湿度条件下甘蓝(*Brassica oleracea*)、冈尼桉(*Eucalyptus gunnii*)和旱金莲(*Tropaeolum majus*)表皮蜡质含量、成分和形态结构的变化,发现在相对湿度 20%—30% 条件下 3 个物种叶片表面蜡质含量及蜡质晶体密度均增加,但增加的程度因物种而异。高湿度条件导致甘蓝叶面蜡质形态和成分均发生变化,而冈尼桉和旱金莲则变化不明显。同时,植物叶片在不同的生长期,表皮蜡质膜的厚度、分布和表达也会有所不同^[23]。但目前针对表皮蜡质对表面粗糙度的影响开展的研究相对较少。Hershko 等^[20]检测了蜡质对表皮粗糙度的影响。当扫描样品区域小于 250 μm^2 时,样品表皮的粗糙度 R_a 值为 78 nm;氯仿漂洗去除表皮蜡质后, R_a 增大到 198 nm。有机溶剂去除叶片表面蜡质时破坏了叶面结构和本身的物理特性,并在叶片表面产生多孔结构^[24],从而导致表面粗糙度的增大。Mechaber 等^[10]也认为大果越橘幼叶和老叶表面粗糙度的变化与不同生长期叶片表面的蜡质有关。随着叶龄的增长,叶片在环境中受到降水、颗粒物等的机械磨蚀作用以及各种污染物的作用,叶片表面蜡质数量、形态和分布均受到影响,可能导致叶片更易受外界环境的干扰。女贞和珊瑚树叶片在相同的环境条件下受到各种因素的制约,其表面粗糙度的变化趋势却不同,表皮蜡质影响其表面粗糙度的机制有待进一步研究。

表 1 女贞和珊瑚树叶片 AFM 观测的参数
Table 1 AFM parameters of *Ligustrum lucidum* and *Viburnum odoratissimum*

植物 Species		AFM 参数 AFM parameters					
		轮廓算术 平均偏差 R_a/nm	峰谷值 $P-V/\text{nm}$	微粗糙度 RMS $/\text{nm}$	微观不平度 十点高度 R_z/nm	表面积 S/nm^2	面积比 S ratio
女贞幼叶 Young leaves of	正面 Adaxial	417.8	3978	528.1	2243	1.046×10^{10}	1.046
<i>Ligustrum lucidum</i>	背面 Abaxial	794.5	6899	1013	4001	1.153×10^{10}	1.153
女贞成熟叶 Old leaves of	正面	1069	7101	1379	2629	1.061×10^{10}	1.061
<i>Ligustrum lucidum</i>	背面	957.4	7885	1181	5746	1.315×10^{10}	1.314
珊瑚树幼叶 Young leaves of	正面	471.3	3467	580.8	2273	1.192×10^{10}	1.023
<i>Viburnum odoratissimum</i>	背面	469.6	6131	634.1	2826	1.206×10^{10}	1.034
珊瑚树成熟叶 Old leaves of	正面	291.1	2333	373.6	948.7	1.003×10^{10}	1.003
<i>Viburnum odoratissimum</i>	背面	865.9	6123	1058	3972	1.104×10^{10}	1.104

3 结论与讨论

通过 AFM 直接对叶片表面的观察,较好地保持了叶片表面原来的形态,而且可以在接近生理状态的条件 下观察样品,并获取叶面的二维和三维微观结构图像,包括表皮细胞形态、气孔微结构、保卫细胞形态等以及 用其他方法很难观察到的精细结构,为认识叶面的结构和功能提供了有力的技术支持。

3.1 叶表面微形态特征与滞尘的关系

颗粒物在叶片表面的沉积可通过重力作用下的降落、扩散、湍流作用下的撞击、降水及隐性沉降 5 种机 制^[25]。除降水引起的湿沉降外,叶面的微形态结构、表面粗糙度以及颗粒物的大小影响颗粒物的沉积方式。 粒径小于 0.1 μm 的颗粒主要靠布朗运动、互相碰撞而凝聚成较大的颗粒,通过大气湍流扩散到叶面或碰撞 而滞留。重力沉降和惯性碰撞则是直径 1.0 μm 以上颗粒物沉积的主要因素。Burkhardt 等^[26]的风洞实验表 明,细小的颗粒(直径约为 0.5 μm)多积聚在针叶树的气孔附近。Chamberlin 的研究认为叶面的粗糙度影响 细小颗粒物的滞留,颗粒物与叶面之间的物理作用力则是影响较大颗粒物滞留的主要因素^[25]。从叶片的 AFM 微结构可以看出,叶片表面存在大量的沟状、孔状峰谷区域和凹陷,导致叶面的粗糙度较高,这样的结构 有利于颗粒物的滞留。叶片表面的细微结构和凹陷可以深藏许多颗粒物^[17,27],成为叶片滞尘的主要原因。 当空气中运动的颗粒物与叶片表面接触,叶面上的峰谷区域导致颗粒物与叶面具有较大的接触面积,二者之

间物理作用力较强,这些颗粒将附着在叶片表面。一些粒径较小的颗粒物则易于进入叶面上存在的大量凹陷中,一旦滞留很难被风吹起和降水冲洗掉;图 1 中的亮点即为各种尘埃。

3.2 叶表面微形态特征与生态适应性

女贞和珊瑚树成熟叶片具有厚的角质层,覆盖在植物叶片上形成一层保护层,使表皮具有高度的不透水性,可以有效地减少水分蒸腾,坚硬的角质层对防止病菌的侵犯和增加机械支持也有一定的作用^[28]。从叶片的 AFM 图可以看出,女贞和珊瑚树成熟叶片气孔分布在叶下表面且下陷,气孔器保卫细胞略下陷,表皮细胞无规则且具有平直细胞壁,这样的结构既能保证植物与外界环境进行气体交换,可阻止干旱环境中因失水而造成的细胞破裂,又可有效控制水分通过角质层蒸腾,提高水分利用效率^[29]。同时,女贞和珊瑚树的结构特征使其具有较强抵抗污染物^[8]胁迫的能力,使其在污染严重的区域也能生长良好,作为绿化植物对消减大气颗粒物具有重要的作用。

References:

- [1] Xing S P, Li B S, Wang C, Hu Y X, Lin J X. Atomic force microscopic observation on substructure of pollen exine in *Cedrus deodara* and *Metasequoia glyptostroboides*. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(16): 306-310.
- [2] Zu Y G, Zhang Y L, Liu Z G, Wang Y B, Liang H L, Liu H M. Application of atomic force microscope in plant biology research. Chinese Bulletin of Botany, 2006, 23(6): 708-717.
- [3] Holder C D. Leaf water repellency of species in Guatemala and Colorado (USA) and its significance to forest hydrology studies. Journal of Hydrology, 2007, 336(1/2): 147-154.
- [4] Neinhuis C, Barthlott W. Seasonal changes of leaf surface contamination in beech, oak and ginkgo in relation to leaf micromorphology and wettability. New Phytologist, 1998, 138(1): 91-98.
- [5] Peng G, Tian D L, Yan W D, Zhu F, Liang X C. Relationship between Polycyclic Aromatic Hydrocarbons accumulation and surface structure of leaves in four urban street tree species. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(14): 3700-3706.
- [6] Yang H M, Wang G X. Leaf stomatal densities and distribution in *Triticum aestivum* under drought and CO₂ enrichment. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25(3): 312-316.
- [7] Li H E, Li B T, Lan S F. Responses of the urban roadside trees to traffic environment. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(9): 2180-2187.
- [8] Pal A, Kulshreshtha K, Ahmad K J, Behl H M. Do leaf surface characters play a role in plant resistance to auto-exhaust pollution? Flora, 2002, 197(1): 47-55.
- [9] Wagner P, Fürstner R, Barthlott W, Neinhuis C. Quantitative assessment to the structural basis of water repellency in natural and technical surfaces. Journal of Experimental Botany, 2003, 54(385): 1295-1303.
- [10] Mechaber W L, Marshall D B, Mechaber R A, Jobe R T, Chew F S. Mapping leaf surface landscapes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1996, 93(10): 4600-4603.
- [11] Burton Z, Bhushan B. Surface characterization and adhesion and friction properties of hydrophobic leaf surfaces. Ultramicroscopy, 2006, 106(8/9): 709-719.
- [12] Perkins M C, Roberts C J, Briggs D, Davies M C, Friedmann A, Hart C A, Bell G A. Surface morphology and chemistry of *Prunus laurocerasus* L. leaves: a study using X-ray photoelectron spectroscopy, time-of-flight secondary-ion mass spectrometry, atomic-force microscopy and scanning-electron microscopy. Planta, 2005, 221(1): 123-134.
- [13] Chen S X, Chen J N, Cai J Y. Morphological observation on stomata of cabbage mustard by atomic force microscope. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2010, 36(1): 9-11.
- [14] Koch K, Neinhuis C, Ensikat H J, Barthlott W. Self assembly of epicuticular waxes on living plant surfaces imaged by atomic force microscopy (AFM). Journal of Experimental Botany, 2004, 55(397): 711-718.
- [15] Kardel F, Wuyts K, Babanezhad M, Vitharana U W A, Wuytack T, Potters G, Samson R. Assessing urban habitat quality based on specific leaf area and stomatal characteristics of *Plantago lanceolata* L. Environmental Pollution, 2010, 158(3): 788-794.
- [16] Balasooriya B L W K, Samson R, Mbikwa F, Vitharana U W A, Boeckx P, van Meirvenne M. Biomonitoring of urban habitat quality by anatomical and chemical leaf characteristics. Environmental and Experimental Botany, 2009, 65(2/3): 386-394.
- [17] Li H M, Liu X. Relationships between leaf epidermal morphology and dust-retaining capability of main garden trees in Chengyang District of Qingdao City. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(10): 1659-1662.
- [18] Liu J Q, Pu J C, Liu X M. Comparative studies on water relations and xeromorphic structures of some plant species in the middle part of the desert

- zone in China. *Acta Botanica Sinica*, 1987, 29(6): 662-673.
- [19] Yao Z H, Hao L Z, Wang P, Zhang F L, Chen H W, Hu N B. Study on the stomata characters of leaves of the *Puionium Gaertn.* *Bulletin of Botanical Research*, 2007, 27(2): 199-203.
- [20] Hershko V, Nussinovitch A. Physical properties of alginate-coated onion (*Allium cepa*) skin. *Food Hydrocolloids*, 1998, 12(2): 195-202.
- [21] Zhang L F, Chen F S, Sun X Y, Yang H S. Advances in structural characterization of postharvest fruits and vegetables using atomic force microscopy. *Food and Machinery*, 2008, 24(1): 159-163.
- [22] Koch K, Hartmann K D, Schreiber L, Barthlott W, Neinhuis C. Influences of air humidity during the cultivation of plants on wax chemical composition, morphology and leaf surface wettability. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 56(1): 1-9.
- [23] Jetter R, Schäffer S. Chemical composition of the *Prunus laurocerasus* leaf surface. Dynamic changes of the epicuticular wax film during leaf development. *Plant Physiology*, 2001, 126(4): 1725-1737.
- [24] Boyce R L, McCune D C, Berlyn G P. A comparison of foliar wettability of red spruce and balsam fir growing at high elevation. *New Phytologist*, 1991, 117(4): 543-555.
- [25] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*, 1998, 99(3): 347-360.
- [26] Burkhardt J, Peters K, Crossley A. The presence of structural surface waxes on coniferous needles affects the pattern of dry deposition of fine particles. *Journal of Experimental Botany*, 1995, 46(7): 823-831.
- [27] 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.
- [28] Hu X M, Zhang Z F, Rao L Q, Huang W. Molecular biology research progress in the biosynthesis and genetic manipulation of plant cuticular wax. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2007, 25(4): 377-380.
- [29] Bosabalidis A M, Kofidis G. Comparative effects of drought stress on leaf anatomy of two olive cultivars. *Plant Science*, 2002, 163(2): 375-379.

参考文献:

- [1] 邢树平, 李冰石, 王琛, 胡玉熹, 林金星. 雪松和水杉花粉外壁亚结构的原子力显微镜研究. *科学通报*, 2000, 45(3): 306-310.
- [2] 祖元刚, 张宇亮, 刘志国, 王延兵, 梁慧丽, 刘红梅. 原子力显微镜在植物学研究中的应用. *植物学通报*, 2006, 23(6): 708-717.
- [5] 彭钢, 田大伦, 闫文德, 朱凡, 梁小翠. 4 种城市绿化树种叶片 PAHs 含量特征与叶面结构的关系. *生态学报*, 2010, 30(14): 3700-3706.
- [6] 杨慧敏, 王根轩. 干旱和 CO₂ 浓度升高对干旱区春小麦气孔密度及分布的影响. *植物生态学报*, 2001, 25(3): 312-316.
- [7] 李寒娥, 李秉涛, 蓝盛芳. 城市行道树对交通环境的响应. *生态学报*, 2005, 25(9): 2180-2187.
- [13] 陈少雄, 陈家楠, 蔡继业. 利用原子力显微镜观察芥蓝叶片气孔. *湖南农业大学学报 (自然科学版)*, 2010, 36(1): 9-11.
- [17] 李海梅, 刘霞. 青岛市城阳区主要园林树种叶片表皮形态与滞尘量的关系. *生态学杂志*, 2008, 27(10): 1659-1662.
- [18] 刘家琼, 蒲锦春, 刘新民. 我国沙漠中部地区主要不同生态类型植物的水分关系和旱生结构比较研究. *植物学报*, 1987, 29(6): 662-673.
- [19] 姚兆华, 郝丽珍, 王萍, 张凤兰, 陈宏伟, 胡宁宝. 沙芥属植物叶片的气孔特征研究. *植物研究*, 2007, 27(2): 199-203.
- [21] 张丽芬, 陈复生, 孙晓洋, 杨宏顺. 原子力显微镜表征采后果蔬结构特性的研究进展. *食品与机械*, 2008, 24(1): 159-163.
- [27] 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.
- [28] 胡晓敏, 张志飞, 饶力群, 黄卫. 植物角质层蜡质合成与调控的分子生物学研究进展. *武汉植物学研究*, 2007, 25(4): 377-380.

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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)

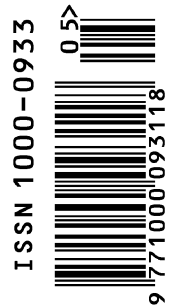
第 31 卷 第 5 期 (2011 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 5 2011

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

国内外公开发行人

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元