

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

中国生态学学会 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 <i>Eupristina</i> 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)
极端干旱区多枝桉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)
CO ₂ 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,蒋婧,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,王秋风,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)



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/stxb201306031300

裴男才, 陈步峰, 邹志谨, 潘勇军, 肖以华. 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. 生态学报, 2013, 33(19): 6114-6120.
Pei N C, Chen B F, Zou Z J, Pan Y J, Xiao Y H. Sulfur contents in leaves and branches of dominant species among the three forest types in the Pearl River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6114-6120.

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, 潘勇军, 肖以华

(中国林业科学研究院热带林业研究所, 国家林业局珠江三角洲森林生态系统定位研究站, 广州 510520)

摘要:植物的吸储作用对降低环境中含硫污染物浓度有积极意义。筛选珠江三角洲地区具有不同污染程度的 3 处森林类型, 检测了 32 个树种叶片和枝条中的总 S 含量(其中广州市白云区帽峰山次生常绿阔叶林 16 个树种, 广州市南沙区海岸防护人工林 11 个树种, 佛山市顺德区龙凤山人工改造恢复林 5 个树种)。结果显示: 该 32 个物种的叶片和枝条中硫含量平均值分别为 $(0.24 \pm 0.02)\%$ 和 $(0.14 \pm 0.02)\%$, 叶片硫含量显著高于枝条中的 ($P=0.000$)。相同森林类型不同物种间叶片(和枝条)中硫含量呈现显著差异。帽峰山和南沙森林样地中优势种叶片(和枝条)中硫含量近似, 分别为 $(0.22 \pm 0.01)\%$ 和 $(0.22 \pm 0.02)\%$ (枝条: $(0.13 \pm 0.01)\%$ 和 $(0.10 \pm 0.01)\%$); 而龙凤山的最高, 叶片和枝条中分别为 $(0.39 \pm 0.13)\%$ 和 $(0.28 \pm 0.09)\%$; 多重检验结果显示, 在龙凤山森林类型植物体吸储硫元素的量, 显著大于帽峰山和南沙森林类型, 这与不同森林类型所处空气环境中 S 污染物格局较为吻合。在近缘类群中(如豆科、樟科), 叶片(和枝条)中硫含量的差异显著, 暗示近缘植物类群(在科的水平上)在吸储硫元素方面受系统发育约束作用不明显。在本土树种和引进树种中, 叶片(和枝条)中硫含量没有显著差异, 可能与所处环境的过滤作用相关。广州和佛山地区各林型的植物体内硫含量存在的差异, 基本反映出该两地区空气环境中受含硫污染物的影响程度。今后在该地区的造林过程中, 应更多考虑应用 S 污染物吸储能力较强的树种, 并注重本土树种和引进树种的组配, 构建适应当地环境条件的森林群落。

关键词:城市森林; 硫; 吸储效应; 植物修复; 珠江三角洲

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, PAN Yongjun, XIAO Yihua

Forest Ecosystem Station of the Pearl River Delta, State Forestry Administration, Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China

Abstract: Plants play an important role in reducing the concentrations of sulfur-containing pollutants by means of biological absorption. The present study sampled 32 tree species, and measured the sulfur (S) contents in leaves and branches (in dry weight) of dominant species for three main forest types in the Pearl River Delta, specifically coniferous and broadleaved mixed restoration (CBMR) forest in Longfeng Mountain (5 species), Foshan city; seashore shelter evergreen broadleaved (SSEB) forest of Nansha Forest Plot (11 species) and secondary evergreen broadleaved (SEB) forest (16 species) in Maofeng Mountain, Guangzhou city. Firstly, we compared the S contents in leaves and branches of three main forest types. Our results showed that mean value of S content was $(0.24 \pm 0.02)\%$ in leaves and $(0.14 \pm 0.02)\%$ in branches for these tree species; and S content in leaves was significantly higher than that of in branches ($P=0.000$). A significant interspecific difference ($P=0.000$) of S content in leaves (and branches) was also detected. Among the three forest types, CBMR forest exhibited the highest S content both in leaves $(0.39 \pm 0.13)\%$ and branches $(0.28 \pm 0.09)\%$, followed by SEB

基金项目:国家自然科学基金资助(31200471); 中国林科院热林所基本科研业务费专项资金项目(RITFYWZX201208); 国家“十二五”农村领域科技计划(2011BAD38B0305)

收稿日期: 2013-06-03; 修订日期: 2013-07-23

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

forest ($(0.22\pm 0.01)\%$ in leaves, and $(0.13\pm 0.01)\%$ in branches), and SSEB forest ($(0.22\pm 0.02)\%$ in leaves, and $(0.10\pm 0.01)\%$ in branches). Result of a Turkey Post Hoc Test showed that the amount of S elements absorbed by tree organs in CBMR forest was significantly higher than that of in SEB forest and SSEB forest, which was generally consistent with the pattern of atmospheric S-containing pollutants in heterogeneous environment in the Pearl River Delta. Secondly, we attempted to compare the S content between closely related species as well as distantly related species. In closely related species (e.g., four species in Fabaceae, and three species in Lauraceae), S contents in leaves (and branches) exhibited a significant difference respectively. The results suggested that environmental filtering effect, rather than phylogenetic constraint effect, played a more important role in the S-absorption process at the Family level. Finally, we compared the S content in leaves and branches between native species and introduced species. For native and introduced tree species, no significant difference was detected in either leaves or branches, suggesting that local habitat may determine the physiological and ecological behaviors of tree species. In conclusion, the results from three analyses collectively showed that the differences of leaves and branches of dominant species in three main forest types in Guangzhou and Foshan reflected a general status of S pollution in the atmosphere. Our results implied important strategies for urban forest management that top priorities should be given to selection of tree species with higher ability of S-absorption and a combination of native and introduced tree species for urban afforestation.

Key Words: urban forests; sulphur; absorbing effect; phytoremediation; pearl river delta

硫在自然界中可以含硫气体的形式游离于空气中,也可以硫酸盐的形式存在于生物体和非生命环境中,是生物体代谢过程必需的一种非金属元素。国内外诸多研究表明,硫含量超过一定的阈值而成为一种经常性的胁迫(缺乏或过量)时,会对动植物的生理生态过程和人类健康造成较大的负面影响^[1-5]。植物对硫胁迫的反应可体现外部表现上(如叶片功能、形状、颜色等),可通过检测硫在植物组织含量来了解植物与环境的互动关系。植物组织的 S 含量与大气的 S 污染程度具有一定的关联性。

植物对 S 的吸收方式主要有两类:一是通过叶片组织,将含 S 气体予以吸收而储存于植物体内;二是通过根系组织,将含 S 离子吸附到植物体内。进入植物体后的 S 元素参与多项生物代谢活动,而多余的部分将作为储存物质保留在植物体各器官内^[6-7]。自然界自身存在的含 S 污染物主要来自火山喷发运动等,人类活动引起的含 S 污染物主要来自含 S 燃料的燃烧(包括汽车尾气排放)、含 S 矿石冶炼、硫酸生产等^[8]。随着人类活动的加剧,特别是工业革命后,人为引起的含 S 污染物排放逐渐增多,S 污染事件不断出现(如含 S 烟雾、酸雨),且造成的后果还在持续,短期内难以消除,这在一定程度上打破了原有的自然生态系统平衡,已严重影响环境质量和人类健康。近几十年来,各国政府、科技界和产业界已意识到硫污染问题的严重性,并陆续开展一些具体措施以达到硫污染物的源头控制(如淘汰污染重的落后经营方式)、过程优化(如通过技术革新进行减排)和后期管护(如通过造林营林进行生物吸储)等目标。

树木具有生物量大、耐受性强、生活周期长等特性,能通过吸储作用降低环境(特别是城市区域)中 S 污染物浓度。因此,在深受硫污染物影响的城市区域,森林植物的修复作用对改善当地硫污染状况效果显著、意义重大。珠江三角洲地区(简称珠三角)经济总量巨大,工业生产集中,部分区域环境中硫污染较为严重^[9],这已对民众正常生活造成较大影响,迫切需要有效的措施改善遭破坏的环境。作者以广州和佛山的三处森林为例,了解各木本植物物种叶片和枝条中的硫含量特征,分析硫在各森林类型中的分布格局,为进一步探讨城市森林对环境中硫污染物的吸储效益提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究地点和森林类型选取

本研究所选取的 3 处林分为珠三角地区的代表性森林类型。具体为广州市白云区的帽峰山次生常绿阔叶林(缩写为帽峰山; $23^{\circ}16'9''N$, $113^{\circ}22'5''E$),代表着广州近郊地区的自然植被类型,随着城市化发展进程加快,此地环境状况易受人活动干扰^[10];广州市南沙区海岸防护人工林(缩写为南沙; $22^{\circ}38'38''N$, $113^{\circ}38'33''E$),代表着广州远郊地区的人工林森林类型,此地森林覆盖较少,各大交通干道连接着珠三角地区,汽车尾气排放量较大^[11];佛山市顺德区龙凤山人工改造恢复林(缩写为龙凤山; $22^{\circ}49'17''N$, $113^{\circ}13'33''E$),代表着佛山地区的人工恢复森林类型,此地工业化程度较高,环境中硫污染较重^[12]。从硫元素在空气中的聚集程度来看,帽峰山<南沙<龙凤山(表 1)。

1.2 样品采集和测定

所选择的 32 个物种中,21 个为本土物种,11 个为引进物种,隶属于 20 个种子植物科(表 2)。采集树木的叶片(主要为 2 年生)和枝条组织;一共采集到 32 个物种 64 份样品,其中帽峰山 16 个物种 32 份样品(每个样品两个重复;采于 2012 年

表 1 帽峰山、南沙和龙凤山森林区域 SO₂ 浓度 (2006 和 2011 年度)Table 1 SO₂ concentrations of Maofeng Mountain, Nansha Forest Plot and Longfeng Mountain from the year of 2006 and 2011

	SO ₂ 浓度 SO ₂ concentrations/(mg/m ³)		
	2006 年 The year 2006	2011 年 The year 2011	国家二级年均标准 National Secondary Annual Standard
广州白云区麓湖公园监测子站 (距离帽峰山最近) Luhu park monitoring station, Baiyun district in Guangzhou city (nearby Maofeng Mt)	0.05	0.02	
广州南沙区万顷沙监测子站 (在本研究取样点附近) Wanqinsha monitoring station, Nansha district in Guangzhou city (nearby the Forest Plot)	0.07	0.03	0.06
佛山惠景城监测子站 (距离龙凤山最近) Huijingcheng monitoring station, Foshan city (nearby Longfeng Mt)	0.11	0.04	

由于 2012 年南沙万顷沙监测子站仪器维护中, 监测结果不全, 因为提取了 2011 年的 SO₂ 浓度监测结果; 国家标准指国家《环境空气质量标准 (GB 3095—1996) 修正版》二级标准, 适用于居住区、商业交通居民混合区、文化区、一般工业区和农村地区; 数据来源: 粤港珠江三角洲区域空气监控网络监测结果报告 (<http://www-app.gdepb.gov.cn/eqpublish/raqi.aspx>)

表 2 本研究所采集的树种信息

Table 2 A list of tree species sampled from the three forest types

森林类型 Forest type	科名 Family	物种名称 Species name	地理来源 Provenance
帽峰山 Maofeng mountain	大戟科	山乌柏 <i>Sapium discolor</i>	本土树种
	杜英科	尖叶杜英 <i>Elaeocarpus apiculatus</i>	本土树种
	金缕梅科	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	本土树种
	锦葵科	假苹婆 <i>Sterculia lanceolata</i>	本土树种
	茜草科	猪肚木 <i>Canthium horridum</i>	本土树种
	茜草科	九节 <i>Psychotria asistica</i>	本土树种
	山茶科	杨桐 <i>Cleyera japonica</i>	本土树种
	山茶科	木荷 <i>Schima superba</i>	本土树种
	山毛榉科	中华锥 <i>Castanopsis chinensis</i>	本土树种
	山毛榉科	藜蒴 <i>Castanopsis fissa</i>	本土树种
	柿科	罗浮柿 <i>Diospyros morrisiana</i>	本土树种
	五加科	鸭脚木 <i>Schefflera heptaphylla</i>	本土树种
	樟科	阴香 <i>Cinnamomum burmannii</i>	本土树种
	樟科	黄樟 <i>Cinnamomum porrectum</i>	本土树种
	樟科	短序润楠 <i>Machilus breviflora</i>	本土树种
	棕榈科	鱼尾葵 <i>Caryota maxima</i>	引进树种
	南沙样地 Nansha forest plot	豆科	南洋楹 <i>Albizia falcataria</i>
豆科		水黄皮 <i>Millettia oraria</i>	本土树种
豆科		印度紫檀 <i>Pterocarpus indicus</i>	引进树种
豆科		黄槐 <i>Senna surattensis</i>	引进树种
锦葵科		黄槿 <i>Hibiscus tiliaceus</i>	本土树种
楝科		麻楝 <i>Chukrasia tabularis</i>	本土树种
楝科		赛楝 <i>Khaya senegalensis</i>	引进树种
千屈菜科		大叶紫薇 <i>Lagerstroemia speciosa</i>	引进树种
杉科		落羽杉 <i>Taxodium distichum</i>	引进树种
使君子科		小叶榄仁 <i>Terminalia mantaly</i>	引进树种
龙凤山 Longfeng mountain	藤黄科	铁力木 <i>Mesua ferrea</i>	本土树种
	米老排	金缕梅科 <i>Mytilaria laosensis</i>	引进树种
	木兰科	乐昌含笑 <i>Michelia chapensis</i>	本土树种
	松科	湿地松 <i>Pinus elliotii</i>	引进树种
	桃金娘科	红胶木 <i>Lophostemon confertus</i>	引进树种
芸香科	吴茱萸 <i>Tetradium ruticarpum</i>	本土树种	

6 月),南沙 11 个物种 22 份样品(每个样品 3 个重复;采于 2012 年 5 月),龙凤山 5 个物种 10 份样品(每个样品只有 1 个重复;采于 2006 年 5 月,本研究中主要作为较重污染的对照区域)。将植物组织表面清洗干净,烘箱 60℃ 恒温烘干后,分别研磨成粉末供测试,并留存部分样品。

植物(干燥)组织全硫含量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消煮, BaSO_4 比浊测定的方法获得^[13]。实验测试过程设置了空白对照,并以 GBW10015(菠菜)为标准样品进行全程监控,标准阈值为 $(0.45\pm 0.04)\%$ 。

1.3 数据分析

使用 SPSS 11.5 软件计算平均值、标准误差运算和差异显著性检验($\alpha=0.05$ 或 0.01)。作图在 OriginPro 8 软件上完成。

2 结果与分析

2.1 3 处森林类型叶片和枝条中硫含量总体比较

本研究中广州和佛山地区的 3 处森林共取样属于 20 个科的 32 个植物物种。测试结果显示,32 个物种的叶片和枝条中硫含量平均值(干重;下同)分别为 $(0.24\pm 0.02)\%$ (平均值 \pm 标准误差;下同)和 $(0.14\pm 0.02)\%$ 。成对样本 t 检验(paired samples t -test)结果显示,叶片中硫含量显著高于枝条中的。单样本 t 检验(one-sample t -test)发现 32 个物种间叶片(和枝条)中硫含量的也呈现出显著差异(表 3)。在 32 个物种中,叶片和枝条中硫含量最大值均出现在佛山的龙凤山森林类型,且同为桃金娘科的红胶木(0.72% 和 0.49%)。而叶片和枝条中的硫含量最小值,则分别出现在佛山的龙凤山和帽峰山森林类型,为芸香科的吴茱萸(0.07%)和樟科的阴香(0.05%)。

在相同森林类型中,各物种间叶片(和枝条)的 S 含量存在显著差异,其中佛山龙凤山森林的树种在 $P=0.05$ 的水平上检测到显著差异,而南沙和帽峰山森林的各树种在 $P=0.001$ 的水平上检测到显著差异。

表 3 广州佛山地区 3 种森林类型优势种叶片和枝条中硫含量比较

Table 3 Comparison of S contents in leaves and branches of dominant species from the three forest types

类别 Item	平均值 \pm 标准误差 Mean \pm s.e. /%	t 检验 t -test	df	P
帽峰山(16 个物种) Maofeng mountain (16 species)				
叶片 Leaves	0.22 \pm 0.01	17.280	15	0.000 ***
枝条 Branches	0.13 \pm 0.01	8.830	15	0.000 ***
叶片-枝条 Leaves minus branches	0.09 \pm 0.01	8.971	15	0.000 ***
南沙样地(11 个物种) Nansha forest plot (species)				
叶片 Leaves	0.21 \pm 0.02	9.515	10	0.000 ***
枝条 Branches	0.10 \pm 0.01	7.612	10	0.000 ***
叶片-枝条 Leaves minus branches	0.11 \pm 0.02	6.635	10	0.000 ***
龙凤山(5 个物种) Longfeng mountain (five species)				
叶片 Leaves	0.39 \pm 0.12	3.110	4	0.036 *
枝条 Branches	0.28 \pm 0.09	3.147	4	0.035 *
叶片-枝条 Leaves minus branches	0.11 \pm 0.04	2.405	4	0.074
3 处森林类型总体(32 个物种) Three forest types totally (32 species)				
叶片 Leaves	0.24 \pm 0.02	10.513	31	0.000 ***
枝条 Branches	0.14 \pm 0.02	7.559	31	0.000 ***
叶片-枝条 Leaves minus branches	0.10 \pm 0.01	10.159	31	0.000 ***

* 表示在 0.05 的水平上检测到显著性; *** 表示在 0.001 的水平上检测到显著性

2.2 不同森林类型叶片和枝条中硫含量比较

3 处森林类型中,植物体中硫含量最高的是龙凤山(物种数 $N=5$),叶片和枝条中分别为 $(0.39\pm 0.13)\%$ 和 $(0.28\pm 0.09)\%$;叶片中。其次是帽峰山($N=16$),叶片和枝条中分别为 $(0.22\pm 0.01)\%$ 和 $(0.13\pm 0.01)\%$;最低为南沙森林样地($N=11$),叶片和枝条中分别为 $(0.22\pm 0.02)\%$ 和 $(0.10\pm 0.01)\%$ 。

多重检验(Turkey Post Hoc Test)结果显示,在龙凤山森林类型叶片和枝条中,植物体吸储硫元素的量,均显著大于帽峰山和南沙森林类型。帽峰山的稍高于南沙的,但差异不显著(图 1)。

2.3 近缘类群叶片和枝条中硫含量比较

为了探讨近缘植物类群是否在吸储硫元素方面有较近似的能力,本研究筛选物种数 ≥ 3 的豆科和樟科,并分析了其叶片和枝条中硫含量(表4)。单样本 t 检验结果显示,豆科的4个物种和樟科的3个物种,其叶片、枝条中硫含量差异均为显著,表明亲缘关系较近的植物类群(在科的水平上)对硫元素的吸储效应有较大差异,暗示系统发育约束作用不明显。成对样本 t 检验结果显示,豆科物种叶片中硫含量显著高于枝条中的;而樟科物种叶片中硫含量稍高于枝条中的,但差异不显著。

2.4 不同地理来源物种叶片和枝条中硫含量比较

为了探讨相同地理来源(相对于中国境内)的植物类群是否在吸储硫元素方面有较近似的能力,本研究将全部的32个物种划分本土树种(21种)和引进树种(11种)两类,并在此基础上分析了其叶片和枝条中硫含量(表5)。单因素方差分析结果显示,叶片中,本土树种硫含量低于引进树种,显著性检验 P 值为0.053。其中龙凤山森林类型的两个树种红胶木(0.72%)和米老排(0.63%),表现出较大的吸储能力,对当地环境中的有害硫元素有较大的消减和转化作用。而在枝条中,本土树种硫含量略低于引进树种,但差异不显著。不同地理来源的树种,在广州和佛山地区生长一段时间后,对硫元素的吸储量近似,可能与局部环境的过滤筛选作用有关。

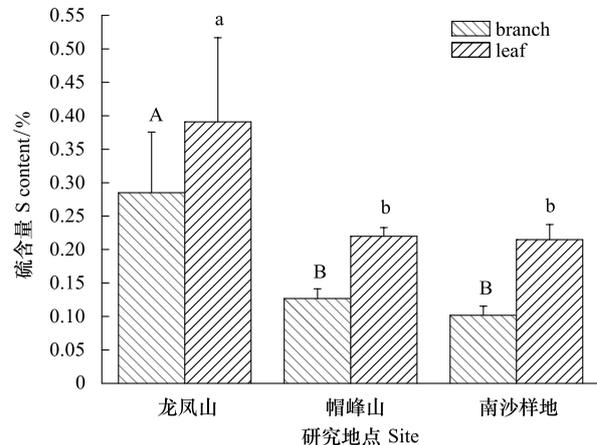


图1 广州佛山地区3种森林类型优势种叶片和枝条中全硫含量及多重检验

Fig.1 Total S content and Turkey Post Hoc Test in leaves and branches of dominant species from the three forest types

Longfeng Mt(龙凤山)在佛山市, Maofeng Mt(帽峰山)和 Nansha Forest Plot(南沙森林样地)在广州市;字母a与b表示0.05的显著水平;A与B表示0.01的显著水平

表4 近缘植物类群叶片和枝条中硫含量比较

Table 4 Comparison of S contents in leaves and branches of closely related plant taxa

类别 Item	平均值 \pm 标准误 (Mean \pm s.e.)/%	t 检验 t -test	df	P
豆科,4物种 Fabaceae (four species)				
叶片 Leaves	0.27 \pm 0.026	10.308	3	0.000***
枝条 Branches	0.13 \pm 0.02	5.831	3	0.004**
叶片-枝条 Leaves minus branches	0.14 \pm 0.03	4.316	3	0.012*
樟科,3物种 Lauraceae (three species)				
叶片 Leaves	0.18 \pm 0.02	8.205	2	0.015*
枝条 Branches	0.07 \pm 0.01	5.529	2	0.031*
叶片-枝条 Leaves minus branches	0.11 \pm 0.03	3.843	2	0.062

*表示在0.05的水平上检测到显著性; **表示在0.01的水平上检测到显著性

表5 本土树种与引进树种的叶片(和枝条)中硫含量方差分析

Table 5 Oneway ANOVA of S contents in leaves (and branches) of indigenous and introduced tree species

	平均值 \pm 标准误 (Mean \pm s.e.)/%	离均差平方和 Sum of squares	df	均方 Mean square	F	P
叶片 Leaves	0.21 \pm 0.01(本土树种)	0.064	1	0.064	4.052	0.053
	0.31 \pm 0.06(引进树种)					
枝条 Branches	0.12 \pm 0.02(本土树种)	0.020	1	0.020	1.816	0.188
	0.18 \pm 0.04(引进树种)					

3 结论与讨论

植物体中的硫,主要通过叶片吸收空气中的含硫污染气体(如 SO_2 , H_2S 等),以及通过根系积累土壤和水体中的硫酸盐离子而来。因此,可充分利用植物的这种特性,对土壤、水体和大气中过多的硫污染物进行有效的吸收和净化,被视为一种重要的途径来修复被污染的环境。植物对硫元素的吸储作用,在不同空间上、物种间和组织部位上存在显著差异^[14-17]。

不同污染程度环境下的植物,硫含量存在空间差异。本研究的结果显示具有较高 SO_2 污染下的佛山龙凤山森林类型,其植

物平均硫含量显著高于具有较低 SO_2 污染下的广州帽峰山和南沙森林类型,支持郁梦德^[18], Thomas 等^[19]的一些研究结论。近些年来,本研究区域内的大型化工生产活动已得到较大幅度减少,所监测到的空气环境中 SO_2 浓度呈现显著的下降趋势(表 1)。这种下降趋势在植物器官中的 S 含量得到体现:采集于 2006 年的佛山龙凤山森林优势种叶片和枝条,平均 S 含量较高,而采集于 2012 年的广州南沙和帽峰山森林优势种叶片和枝条,平均 S 含量较低(图 1)。但是,随着经济社会的发展,机动车保有量逐年增加,使用频率大幅提高,珠三角区域内由汽车尾气排放引起的含 S 污染物带来的空气质量问题也将日益突显。由于含 S 污染物排放方式和集中程度发生改变,需要根据新的形势,及时采取有效措施(如提高机动车燃油品质、沿公路和重点集散地造林绿化等)予以改善,标本兼治。

不同植物组织部位上,硫含量存在差异。本研究 3 种林型中,叶片硫含量均高于枝条硫含量,且在广州帽峰山和南沙森林类型中检测到显著差异。植物组织中硫含量(干重)范围在 0.1%—6%之间^[20],实际含量数值与所处环境的污染状况有关。植物叶片通过吸收空气中的硫沉降,完成光合作用,多余的部分将保留在叶片组织中,同时也将转移到枝干甚至根系组织^[21-22]。由于树木的枝干占据绝大部分生物量,且通常植物组织的年龄越久,其中的硫含量越高^[23-25],因此能吸储硫污染物的空间较大,其作用不应被低估^[26]。此外,有些植物(如豆科植物三叶草),当其生长所处的土壤中硫含量缺乏时,会主动吸收空气中的含硫气体以予补充代谢循环所需^[7]。本研究的结果倾向于支持叶片向其他组织转移的观点;由于没有采集到根系组织,暂时还无法对是否存在从根系往枝干、叶片方向的转移给出证据,需要进一步的研究。

不同植物种间硫含量存在差异。本研究 32 个树种中硫含量变化范围较大,最高量和最低量的比值达 10 倍多(叶片:0.07%—0.72%,枝条:0.05%—0.49%),其中含量超过正常植物标准值(0.45%)的均在佛山龙凤山森林类型中(如红胶木叶片和枝条硫含量分别达到 0.72%和 0.49%;米老排叶片含量也达到 0.63%,枝条硫含量 0.45%,刚好达到标准值上限)。对深圳不同地点的 116 种园林植物叶片含硫量的测定结果显示,叶片含硫量达 1.00%的植物有 5 种,0.50%—1.00%的有 12 种,其余含量的在正常范围内,说明该地不同植物对空气中含硫污染物的吸收能力有差别,具有高硫含量的植物对于改善当地空气环境有更积极的作用^[27]。在加拿大 southern Ontario 地区,检测了采集于 1968—1977 年间的 33 种植物种(近 50000 份叶片材料),发现叶片中硫含量变化幅度为 0.13%—1.72%^[28]。此外, Willey 和 Wilkins 统计了 121 个开花被子植物的硫含量相对平均值,结果显示这些物种的硫含量相对平均值符合正态分布,经过 \log_e 转换后其变化范围比以往所报道的数值还要大,变幅可达 4.66(从橡树的 -3.39,到芹菜的 1.27)。方差分析结果表明,不同分类群的硫含量受到显著的系统发育作用影响,约 36% 以上的物种间变异与目或者更高的分类阶元相关^[14]。可见硫含量存在种间差异,环境污染严重时会在植物体组织中得到更明显的体现。本研究在科的水平上未检测到显著系统发育约束作用,可能是这种约束作用在 S 吸储过程中本身就不显著,也可能是样本数量不够。

由以上分析可知:广州和佛山地区各林型的植物体内硫含量存在不同程度的差异,基本能反映出该两地区不同时间段空气中受含硫污染物的影响状况:佛山地区已遭受较严重的污染,需标本兼顾,充分利用物理、化学和生物手段进行修复;广州地区污染程度稍轻,但也应注意机动车快速增长带来的大量尾气排放,需防范于源头,进行能源结构调整,设法提高城市绿化面积。环境质量好与坏,与当地经济、社会发展水平,政府决策和居民环保意识紧密相关;在这过程中,科技发挥着杠杆作用。珠江三角洲地区经济总量大,人口集中程度高,生态环境较脆弱,通过科学的城市规划,按照适地适树的造林原则,进行本土树种和引进树种的合理搭配,并给予有效的抚育管护,能在一定程度上发挥植物吸储和修复作用,为区域环境质量改善开一剂“生态处方”。

致谢:中国科学院植物研究所米湘成博士对写作给予帮助,黄俊彪和史欣在野外采样过程提供帮助,特此致谢。

References:

- [1] Setterstrom C. Effects of sulfur dioxide on plants and animals. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1940, 32(4): 473-479.
- [2] Rennenberg H. The fate of excess sulfur in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 1984, 35(1): 121-153.
- [3] Abdallah M, Duboussat L, Meuriot F, Etienne P, Avice J C, Ourry A. Effect of mineral sulphur availability on nitrogen and sulphur uptake and remobilization during the vegetative growth of *Brassica napus* L. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(10): 2635-2646.
- [4] Schwela D, Haq G, Huizenga C, Han W J, Fabian H, Ajero M. *Urban Air Pollution in Asian Cities: Status, Challenges and Management*. London: Earthscan, 2006.
- [5] SCOEL. Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for Sulphur Dioxide. December 2009, SCOEL/SUM/27, Updated.
- [6] Yarmolinsky D, Brychkova G, Fluhr R, Sagi M. Sulfite reductase protects plants against sulfite toxicity. *Plant Physiology*, 2013, 161(2): 725-743.
- [7] Varin S, Lemauiel-Lavenant S, Cliquet J B. Is white clover able to switch to atmospheric sulphur sources when sulphate availability decreases? *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(8): 2511-2521.
- [8] World Health Organization. *Air Quality Guidelines for Europe, European Series, No. 91*. Copenhagen: WHO Regional Publications, 2000.
- [9] Kuang Y W, Zhou G Y, Wen D Z. Environmental bioindication of sulphur in tree rings of Masson pine (*Pinus massoniana*) in the Pearl River

- Delta of China. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(2): 1-7.
- [10] Chen B F, Su J, Xiao Y H, Wu T G, Liu Y T. The runoff character of rainstorm in Maofeng mountain evergreen broad-leaved forest ecosystem in Guangzhou. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(5): 829-833.
- [11] Chen B F, Pan Y J, Xiao Y H, Xu M, Wu M, Duan J P. Study on eco-effect of coast shield forest community at the South Sea of Guangzhou. Ecology and Environment, 2011, 20(5): 839-842.
- [12] Wen D Z, Kuang Y W, Liu S Z, Zhang D Q, Lu Y D, Li J L. Evidences and implications of vegetation damage from ceramic industrial emission on a rural site in the Pearl River Delta of China. Journal of Forestry Research, 2006, 17(1): 7-12.
- [13] Lu R K. Methods for Chemical Analysis of Soil Agriculture. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House, 2000.
- [14] Willey N, Wilkins J. An analysis of intertaxa differences in sulfur concentration in angiosperms. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2006, 169(5): 717-727.
- [15] Jiang G M. Research on Bioindicating and Biomonitoring Air Pollution by Woody Plants [D]. Beijing: Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, 1993.
- [16] Liu Y J, Ding H, Wang H. Comparisons of leaf sulfur content from trees near steel factory and Botanical Garden of Beijing. China Environmental Science, 2001, 21(6): 498-502.
- [17] Yan W D, Tian D L, Xiang W H, Huang Z H. Seasonal change in atmospheric SO₂ concentration in forested and non-forested urban lands. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1367-1374.
- [18] Yu M D, Yu Q F. Accumulation and translocation of sulfur by *Gendarussa vulgaris* Ness. Acta Ecologica Sinica, 1986, 6(2): 101-106.
- [19] Thomas M D, Hendricks R H, Hill G R. Sulfur content of vegetation. Soil Science, 1950, 70(1): 9-18.
- [20] Ernst W H, Krauss G J, Verkleij J A, Wesenberg D. Interaction of heavy metals with the sulphur metabolism in angiosperms from an ecological point of view. Plant, Cell & Environment, 2008, 31(1): 123-143.
- [21] Jensen K F, Kozłowski T T. Absorption and translocation of sulfur dioxide by seedlings of four forest tree species. Journal of Environmental Quality, 1975, 4(3): 379-382.
- [22] Takahashi H. Regulation of sulfate transport and assimilation in plants. International Review of Cell and Molecular Biology, 2010, 281: 129-159.
- [23] Frazer J. Sulphur content of plants. Plant Physiology, 1935, 10(3): 529-535.
- [24] Yan L Y, Zhu T J. Using plants to monitor and evaluate the level of sulphur dioxide pollution in the atmosphere of Guangzhou city. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica, 1983, 7(4): 265-272.
- [25] Yang Y K, Wang W K, Deng H Z, Sun H. Study on the relation of environmental change with element contents of S and Pb in tree rings. Science Technology and Engineering, 2012, 12(28): 7309-7313.
- [26] Liu C F. Study on the Feedback of Typical Plants Upon Atmospheric Pollutants SO₂ and NO_x in Panyu District [D]. Guangzhou: Sun Yatsen University, 2007.
- [27] Hong Y, Huang J H, Zhang D P. Sulfur content of garden plant's leaves in Shenzhen, Guangdong. Ecological Science, 2007, 26(2): 122-125.
- [28] Linzon S N, Temple P J, Pearson R G. Sulfur concentrations in plant foliage and related effects. Journal of the Air Pollution Control Association, 1979, 29(5): 520-525.

参考文献:

- [9] 旷远文, 周国逸, 温达志. 珠江三角洲马尾松年轮中 S 的环境指示意义. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 1-7.
- [10] 陈步峰, 粟娟, 肖以华, 吴统贵, 刘燕堂. 广州市帽峰山常绿阔叶林生态系统的暴雨水文特征. 生态环境学报, 2011, 20(5): 829-833.
- [11] 陈步峰, 潘勇军, 肖以华, 徐猛, 陈进, 吴敏, 段金平. 广州南沙海岸防护林群落的生态效应初步研究. 生态环境学报, 2011, 20(5): 839-842.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 蒋高明. 木本植物对大气污染指示与监测作用研究 [D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 1993.
- [16] 刘艳菊, 丁辉, 王辉. 首钢邻山和植物园植物叶片含硫量的对比. 中国环境科学, 2001, 21(6): 498-502.
- [17] 闫文德, 田大伦, 项文化, 黄志宏. 城市林地与非林地大气 SO₂ 季节动态变化. 生态学报, 2006, 26(5): 1367-1374.
- [18] 郁梦德, 余清发. 接骨草叶片硫的积累与转移. 生态学报, 1986, 6(2): 101-106.
- [24] 颜丽英, 朱天玑. 利用植物监测、评价广州市大气中二氧化硫的污染程度. 植物生态学报与地植物学丛刊, 1983, 7(4): 265-272.
- [25] 杨银科, 王文科, 邓红章, 孙浩. 树木年轮中硫、铅元素含量与环境变化. 科学技术与工程, 2012, 12(28): 7309-7313.
- [26] 刘婵芳. 番禺区典型植物对大气 SO₂、NO_x 的响应研究 [D]. 广州: 中山大学, 2007.
- [27] 洪渊, 黄俊华, 张冬鹏. 深圳市园林植物叶片含硫量的特点. 生态科学, 2007, 26(2): 122-125.

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 (*Syrnaticus reevesii*) using infrared camera
..... ZHAO Yuze, WANG Zhichen, XU Jiliang, et al (6021)
- The energy budget of tree sparrows *Passer montanus* in wind different speed and duration
..... YANG Zhihong, WU Qingming, DONG Haiyan, et al (6028)
- Nest site characteristics of *Petaurista caniceps* in Baima Snow Mountain Nature Reserve
..... LI Yanhong, GUAN Jinke, LI Dayong, HU Jie (6035)
- Effects of habitat fragmentation on the genetic diversity of *Pachycondyla luteipes* on islands in the Thousand Island Lake, East
China LUO Yuanyuan, LIU Jinliang, HUANG Jieliang, et al (6041)
- The molecular genetic relationship between the pollinators of *Ficus pumila* var. *pumila* and *Ficus pumila* var. *aukeotsang*
..... WU Wenshan, CHEN Youling, SUN Lingli, et al (6049)
- The genetic evolutionary relationships of two *Eupristina* species on *Ficus altissima*
..... CHEN Youling, SUN Lingli, WU Leilei, et al (6058)
- Metal uptake and root morphological changes for two varieties of *Salix integra* 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 *Tamarix ramosissima* 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 *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* 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 *Casuarina equisetifolia* 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 *Bauhinia faberi* 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 CO₂
..... SHI Zhibing, ZHOU Yong, LI Xia, et al (6135)
- Effects of pretreatment on germination of *Typha domingensis* and *Phragmites australis*
..... MENG Huan, WANG Xuehong, TONG Shouzheng, et al (6142)
- Transfer characteristics of cadmium from soil to *Salix × aureo-pendula* 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 *Halophila beccarii* 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 *Populus pruinosa* 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

主 编 王如松
主 管 中国科学技术协会
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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
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

订 购 全国各地邮局
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

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

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

Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



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 90.00 元