

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 22 期 Vol.32 No.22 **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 22 期

2012 年 11 月 (半月刊)

目 次

CO ₂ 浓度和温度升高对噬藻体 PP 增殖的联合作用	牛晓莹,程 凯,荣茜茜,等 (6917)
1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局	陈 军,王玉辉 (6925)
两个污水处理系统的能值与经济综合分析	李 敏,张小洪,李远伟,等 (6936)
退化草地阿尔泰针茅种群个体空间格局及关联性	赵成章,任 珩 (6946)
地表覆盖栽培对雷竹林凋落物养分及其化学计量特征的影响	刘亚迪,范少辉,蔡春菊,等 (6955)
福州酸雨区次生林中台湾相思与银合欢叶片的 12 种元素含量	郝兴华,洪 伟,吴承祯,等 (6964)
“雨花露”水蜜桃主要害虫与其捕食性天敌的关系	柯 磊,施晓丽,邹运鼎,等 (6972)
大兴安岭林区 10 小时滞可燃物湿度的模拟	胡天宇,周广胜,贾丙瑞 (6984)
陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征	李文斌,李新平 (6991)
南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析	唐罗忠,葛晓敏,吴 麟,等 (7000)
黑河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系	鱼腾飞,冯 起,刘 蔚,等 (7009)
树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应	梅婷婷,赵 平,倪广艳,等 (7018)
外来植物紫茎泽兰入侵对土壤理化性质及丛枝菌根真菌(AMF)群落的影响	于文清,刘万学,桂富荣,等 (7027)
基于 Landsat TM 的热带精细地物信息提取的模型与方法——以海南岛为例	王树东,张立福,陈小平,等 (7036)
雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响	杨玉莲,吴福忠,杨万勤,等 (7045)
不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响	王唯逍,刘小军,田永超,等 (7053)
木蹄层孔菌不同居群间生长特性、木质素降解酶与 SRAP 标记遗传多样性	曹 宇,徐 晔,王秋玉 (7061)
加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响	陈 雯,李 涛,郑荣泉,等 (7072)
间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响	张向前,黄国勤,卞新民,等 (7082)
接种 AM 真菌对玉米和油菜种间竞争及土壤无机磷组分的影响	张宇亭,朱 敏,钱岩相注,等 (7091)
大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系	柯志新,黄良民,徐 军,等 (7102)
太湖水华期间有毒和无毒微囊藻种群丰度的动态变化	李大命,叶琳琳,于 洋,等 (7109)
锌胁迫对小球藻抗氧化酶和类金属硫蛋白的影响	杨 洪,黄志勇 (7117)
基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究	邱寿丰,朱 远 (7124)
能源活动 CO ₂ 排放不同核算方法比较和减排策略选择	杨喜爱,崔胜辉,林剑艺,等 (7135)
基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估	李京梅,刘铁鹰 (7146)
县级生态资产价值评估——以河北丰宁县为例	王红岩,高志海,李增元,等 (7156)
专论与综述	
丛枝菌根提高宿主植物抗旱性分子机制研究进展	李 涛,杜 娟,郝志鹏,等 (7169)
城市土壤碳循环与碳固持研究综述	罗上华,毛齐正,马克明,等 (7177)
基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述	董泰锋,蒙继华,吴炳方 (7190)
光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展	吴明丽,李叙勇 (7202)
浮游动物化学计量学稳态性特征研究进展	苏 强 (7213)
研究简报	
2010 年两个航次獐子岛海域浮游纤毛虫丰度和生物量	于 莹,张武昌,张光涛,等 (7220)
基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究	杨锡涛,周学红,张 伟 (7230)
残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响	王意锟,方升佐,田 野,等 (7239)
人工湿地不同季节与单元之间根际微生物多样性	陈永华,吴晓芙,张珍妮,等 (7247)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-11



封面图说: 水杉农田防护林中的小麦熟了——水杉曾广泛分布于北半球,第四纪冰期以后,水杉属的其他种类全部灭绝,水杉却在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存,成为旷世奇珍,野生的水杉是国家一级保护植物。由于水杉耐水,适应力强,生长极为迅速,其树干通直挺拔,高大秀颀,树冠呈圆锥形,姿态优美,自发现后被人们在中国南方广泛种植,不仅成为了湖边、道路两旁的绿化观赏植物,更成为了农田防护林的重要树种。此图中整齐划一的水杉防护林像忠实的哨兵一样,为苏北农村即将成熟的麦田站岗。

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

DOI: 10.5846/stxb201110171537

郝兴华, 洪伟, 吴承祯, 李健, 王幼茹, 杨晓伟. 福州酸雨区次生林中台湾相思与银合欢叶片的 12 种元素含量. 生态学报, 2012, 32(22): 6964-6971.

Hao X H, Hong W, Wu C Z, Li J, Wang Y R, Yang X W. Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in *Acacia confusa* and *Leucaena glauca* in secondary forests of acid rain region in Fuzhou. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 6964-6971.

福州酸雨区次生林中台湾相思与 银合欢叶片的 12 种元素含量

郝兴华^{1,3}, 洪伟^{1,2,*}, 吴承祯^{1,2}, 李健^{1,2}, 王幼茹¹, 杨晓伟¹

(1. 福建农林大学福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福州 350002;

2. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 3. 河北省地矿局水文工程地质勘察院, 石家庄 050021)

摘要:在酸雨区,研究叶片元素浓度变化规律对于理解树种选择与重建亚热带森林具有重要意义。在中亚热带丘陵次生林的酸雨区内,测定两个优势树种——台湾相思树(*Acacia confusa*)、银合欢(*Leucaena glauca*)的叶片元素(N、P、S、K、Ca、Na、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 和 Al)含量,并探讨其可能遭受酸雨的影响。结果表明,两树种叶片营养元素含量均表现为 N > K > Ca > S > P > Mg > Na,重金属元素表现为 Fe > Al > Cu。两树种叶片的 P、Ca、Mg、Na、Mn 和 Cu 含量差异极显著,Zn 含量差异显著。受频繁酸雨影响,台湾相思(3.42 g/kg)和银合欢(2.70 g/kg)的 S 含量明显高于中国陆生被子植物叶片的平均值((1.66±3.06) g/kg),Na 含量低于 S 含量,也明显低于中国陆生被子植物叶片 Na 含量的平均值((2.48±5.45) g/kg),表明研究区域植物叶片的 Na 元素的特异性,酸雨加速土壤酸化导致土壤 Na 含量低可能是一个原因。由 N/P、Ca/Al 摩尔比值的大小可得出,台湾相思为 P 制约型树种,虽然其 Al 含量并未超出正常范围值,但其 Ca/Al 摩尔比值小于 12.5,表明存在 Al 的危害风险;而银合欢属 N 制约型树种,并未受到 Al 的危害,更适应研究区生长环境。若仅从叶片元素含量分析,该区域的台湾相思和银合欢受到 Fe 危害风险,且存在更大的 Cu 和 Zn 危害风险,银合欢的 Zn、Cu 元素累积量大于台湾相思,所以可以认为银合欢的抗性优于台湾相思,可能更适应于酸雨区域生长。

关键词:酸雨区;台湾相思;银合欢;叶片元素含量

Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in *Acacia confusa* and *Leucaena glauca* in secondary forests of acid rain region in Fuzhou

HAO Xinghua^{1,3}, HONG Wei^{1,2,*}, WU Chengzhen^{1,2}, LI Jian^{1,2}, WANG Youru¹, YANG Xiaowei¹

1 Key Laboratory of Fujian Universities for Forest Ecological System Process and Management, Fuzhou 350002, China

2 Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

3 Hebei Prospecting Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shijiazhuang 050021, China

Abstract: Acid rain is one of serious environmental problems in many cities due to the industrial pollution. In acid rain regions, it is important to understand the pattern of changes in element concentrations in leaves for selection of tree species planted and re-establishing mid-subtropical forests. In hilly secondary forests of acid rain regions, *Acacia confusa* and *Leucaena glauca* are the two dominant tree species in mid-subtropical zone. This study determined twelve element concentrations (N, P, S, K, Ca, Na, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn and Al) in the leaves of the two species, and analyzed the potential harm of some toxic metal elements caused by the acid rain. The results showed that element concentrations were as

基金项目:教育部博士学科专项基金(200803890010);福建省科技厅资助项目(2009N0005)

收稿日期:2011-10-17; **修订日期:**2012-05-17

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

following $N > K > Ca > S > P > Mg > Na$, and $Fe > Al > Cu$ in leaves of the two species. Significant differences were found in the leaf element concentrations such as P, Ca, Mg, Na, Mn, Cu and Zn between the two species. Due to the frequent acid rains, mean leaf S concentrations of *Acacia confuse* (3.42 g/kg) and *Leucaena glauca* (2.70 g/kg) in our study region were higher than the average level of that of terrestrial angiosperm in China ((1.66 ± 3.06) g/kg). However, leaf Na concentrations ((0.63 ± 0.25) g/kg) were lower than leaf S concentrations for both of *Acacia confuse* and *Leucaena glauca*, respectively, and also lower than the average level of that of terrestrial angiosperm in China ((2.48 ± 5.45) g/kg). The characteristics of leaf Na concentration in study region could probably resulted from the soil acidification by acid rain which lowered soil Na content. On the one hand, according to the mol ratios of N/P and Ca/Al in leaves, *Acacia confuse* was one of the P-constrained species. Although leaf Al concentration of *Acacia confuse* was within the normal range, the mol ratio of Ca/Al in leaves was less than 12.5, which indicated that change in leaf Al concentration was potentially as a result of the harm caused by acid rain. On the other hand, *Leucaena glauca* was one of the N-constrained species and free of Al harm, suggesting that *Leucaena glauca* could be more adaptable to study region than *Acacia confuse*. Significant differences in leaf Al/P, Mn/Cu, Mn/Zn, Mn/Ca, Mn/Mg between the two species showed that the antagonism occurred during the growth of *Acacia confuse* and *Leucaena glauca* by the joint actions of leaf Al and P concentrations, and those of Mn with Cu, Zn, Ca or Mg. According to the level of leaf element concentrations, *Acacia confuse* and *Leucaena glauca* in the study region could be harmed by Cu and Zn, and even more seriously harmed by Fe. The amounts of Zn and Cu accumulation in leaves of *Leucaena glauca* were larger than that in those of *Acacia confuse*, respectively, which indicated that *Leucaena glauca* was with higher resistance to the harm from heavy metal elements, and more acclimatized to the growth in the acid rain regions than *Acacia confuse*.

Key Words: acid rain region; *Acacia confuse*; *Leucaena glauca*; element concentrations in the leaves

中国酸雨区是继欧洲和北美之后的世界第三大酸雨区,福建省为中亚热带常绿阔叶林分布的典型区域,全省 23 个城市中有 20 个城市出现酸雨,酸雨频率大于 50% 的城市有 8 个,其中泉州、厦门和南平等地酸雨频率大于 75%;pH 值均值低于 5.6 的城市有 9 个,其中酸度最强为厦门,其 pH 值为 3.81^[1]。可见福建酸雨问题已相当严重,成为越来越需迫切重视的问题。植物组织(尤其是叶片)化学分析结果,作为生物监测指标已广泛应用于森林健康和森林衰退风险评价^[2]。自然环境下,酸雨的酸度并不太高,对植物的危害作用是一个积累的过程,开展酸雨区树种的营养元素含量及其对酸雨的指示作用和敏感程度的研究,可为中亚热带酸雨区的森林保护、生态系统健康评价及城市绿化树种选择提供科学依据。

近年来,中亚热带酸雨区开展了一系列相关研究,包括酸雨区土壤^[3-4]及其与林木生长关系^[5-6]等研究。由于环境污染引发的营养元素缺失及有毒元素累积,都会对植物正常生长产生严重影响,对森林健康产生威胁。对中亚热带酸雨区植物组织化学计量分析的研究仅有少量报道,中亚热带酸雨区次生林树种叶片化学分析的研究鲜见报道。本研究以中亚热带酸雨区丘陵次生林群落两个优势树种——台湾相思(*Acacia confusa*)和银合欢(*Leucaena glauca*)为对象,测定其叶片元素(N、P、S、K、Ca、Na、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 和 Al)含量,并分析元素含量的比值,探讨中亚热带福州酸雨区丘陵次生林群落优势树种叶片的营养状况,以及由环境变化而可能带来的有害金属元素的胁迫,为中亚热带酸雨区森林生态系统的经营与管理、生物多样性保护和退化生态系统的恢复与重建提供依据。

1 研究区概况

本研究地点为福州市西郊的鬼洞山,北纬 $26^{\circ}02'22''$ — $26^{\circ}03'07''$,东经 $119^{\circ}53'32''$ — $119^{\circ}55'15''$,属海洋性中亚热带季风气候,年均降水量 900—2100 mm;年均气温 16—20 °C,最高气温 42.3 °C,最低气温 -1.2 °C,年相对湿度约 77%。主体山脉呈东北—西南走向,绵延 1.19 km。主脊山脉相对高度为 113.7 m,属丘陵地形,南坡地势较北坡平缓,物种多样性南坡大于北坡。主要地带土壤为红壤,经过多次人为干预,鬼洞山森林在其

次生演替中形成了中亚热带独特的植被,是福建省中亚热带酸雨区丘陵次生林的典型群落。群落主要树种有台湾相思(*Acacia confusa*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)、桉树(*Eucalyptus*)、银合欢(*Leucaena glauca*)、野牡丹(*Common Melastoma Herb*)、三叉苦(*Euodia lepta*)、黄梁木(*Anthocephalus chinensis*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等,乔木郁闭度 0.89,灌木郁闭度 0.25,草本郁闭度 0.70。其中台湾相思和银合欢均为优势木,优势度分别为 0.96 和 0.67。2010 年,福州市空气污染指数(API)平均值为 59,全年空气质量以优良为主,优良率为 96.17%,降水 pH 值均值 5.54,酸雨率 29.48%^[1]。

2 材料与方法

2010 年 9 月初在次生林中设定 20 m×20 m 的样地 4 块,对高度>1.3 m 的乔木进行每木检尺,选取各样地中年龄相近、胸径 2—5 cm 的台湾相思和银合欢样树各 3 株,在树冠中上层 4 个方位采集成熟叶片混合均匀,因成熟台湾相思无真正叶片,所以取其叶状柄,每个叶样本 3 个重复。叶片先用自来水冲洗,后用去离子水快速冲洗干净,70 ℃ 下烘干,将样品用陶瓷研钵研磨混合均匀后包装于密封袋内,供化学分析测试用。

植物样品元素测定方法参照《中华人民共和国林业行业标准》进行,每个样品做 3 次重复。植物叶片 N 含量按照 LY/T1269—1999《森林植物与森林枯枝落叶层全 N 的测定》测定,待测样品经高氯酸-浓硫酸消煮后,用凯氏消化-蒸馏法测定 N 含量。其余元素按照 LY/T1270—1999《森林植物与森林枯枝落叶层全 Si、全 Fe、全 Al、全 Ca、全 Mg、全 K、全 Na、全 P、全 S、全 Mn、全 Cu、全 Zn 的测定》测定。样品经高氯酸-浓硝酸消煮后,根据硫酸钡比浊法、钼锑抗分光光度法、铝试剂比色法用 721 分光光度计测定 S、P、Al 含量,根据原子吸收分光光度法用 AA7002 原子吸收光谱仪测定 K、Na、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 含量。所有金属元素测定时用相应标准溶液(由国家标准物质研究中心提供)配置系列浓度,绘制标准曲线,各标准曲线相关系数均要求大于 0.999。以试剂空白作对照。

3 结果与分析

3.1 叶片营养元素含量特征

根据两树种叶片营养元素浓度大小,先选择 N、P、S、K、Ca、Mg 和 Na 7 种元素分析。7 种元素的平均含量近似等于其几何平均值(表 1),其含量大小排序均表现为 N>K>Ca>S>P>Mg>Na,与福州鼓山季风常绿阔叶林叶营养元素特征^[7]基本一致。

表 1 台湾相思和银合欢叶片的营养元素含量/(g/kg)

Table 1 Leaf nutrient concentrations of *Acacia confusa* (Ac) and *Leucaena glauca* (Lg)/(g/kg)

树种 Species	元素 Element	含量值范围 Range for concentrations	算术平均值 Arithmetic mean	参考文献 ^[7] References ^[7]	几何平均值 Geometric mean	参考文献 ^[9] (几何平均值) References ^[9] (G. M.)	被子植物范围 ^[10] Range for angiosperms
Ac	N	16.97—24.81	21.23A	15.5	20.97A	—	12—38
Lg	N	18.52—20.04	19.47A		19.45A		
Ac	P	0.96—1.04	1.00A	2.7	1.00A	—	0.12—2
Lg	P	1.81—2.04	1.94B		1.94B		
Ac	S	2.59—5.03	3.57A	—	3.42A	1.66±3.06	2—8.7
Lg	S	2.30—3.35	2.73A		2.70A		
Ac	K	14.76—15.58	15.08A	5.4	15.08A	12.61±1.96	4—15
Lg	K	14.05—14.57	14.29A		14.29A		
Ac	Ca	1.68—1.87	1.76A	8.7	1.75A	11.44±2.46	3—14
Lg	Ca	12.01—12.28	12.15B		12.15B		
Ac	Mg	0.12—0.37	0.22A	1.29	0.20A	—	1.3—9
Lg	Mg	1.69—2.54	2.23B		2.20B		
Ac	Na	0.62—0.63	0.63A	0.14	0.63A	2.48±5.45	0.034—0.950
Lg	Na	0.24—0.26	0.25B		0.25B		

1) 不同字母表示差异显著($P<0.01$),相同字母表示差异不显著($P<0.01$);2) 元素含量以干重计

台湾相思和银合欢叶片的 N、S、K 平均含量并未表现出差异性。其 N 元素含量与福州鼓山季风常绿阔叶林叶片 N 含量^[7]相近,但台湾相思 N 的平均含量为 21.229 g/kg,明显低于厦门五老峰的台湾相思成熟林(43.13±1.67) g/kg 和衰老林(39.90±2.10) mg/g 的叶状柄的氮含量^[8];考虑到厦门的酸雨强度大于福州,其台湾相思 N 含量是否受酸雨影响,还有待进一步研究。台湾相思与银合欢均为固氮树种,固氮树种一般通过固氮作用提高土壤中 N 的有效性,从而使叶片 N 含量提高,二者 N 含量并未出现显著差异。本研究中,台湾相思和银合欢的 S 含量均在 2 g/kg 之上,且台湾相思高于银合欢,其含量虽处世界木本被子植物的范围值内,但却明显高于中国陆生被子植物叶片 S 含量的平均值(1.66±3.06) g/kg^[9],若仅从营养元素角度分析,体现了两树种在酸雨区环境中生长的适应性,这种适应性对中亚热带酸雨地区人工植被恢复树种选择提供了营养依据。两树种叶片 K 含量均处于世界被子植物叶片范围 4—15 g/kg^[10]的高临界值,种间差异不明显。

两树种叶片 P、Ca、Mg 及 Na 等 4 种营养元素的平均含量均表现出极显著差异。P 含量较低,是由其自身生物特性决定的,且台湾相思叶片 P 元素含量明显低于福州鼓山季风常绿阔叶林植物叶片 P 的平均含量 2.7 g/kg^[7]。1999 年福州酸雨与现在相比还不严重,而其与厦门五老峰的台湾相思叶状柄的成熟林(1.16±0.05) g/kg 和衰老林(1.24±0.04) g/kg 含量相近^[8];P 含量是否受酸雨影响,还有待进一步研究。Ca、Mg 在植物体内渗透压的调节、代谢平衡的维持、物质的合成中都有着不可或缺的作用,是植物必需元素。银合欢叶片中的 Ca、Mg 含量均在世界被子植物的范围值内,且与福州鼓山季风常绿阔叶林植物叶片 Ca、Mg 含量相近^[7];台湾相思与银合欢之间存在极显著差异,且其含量明显低于世界被子植物范围值,尤其是元素 Mg,体现了该区域台湾相思对土壤 Ca 和 Mg 吸收的特异性。与世界陆生植物平均元素含量相比较,我国植物叶片 Na 的含量偏高,微量元素 Na 的平均含量高于大量元素 S,但研究区这两种树种的 Na 含量低于 S 含量,明显低于中国陆生被子植物叶片 Na 含量的平均值(2.48±5.45) g/kg^[9],而 Na 含量均在世界被子植物范围值内,且与福州鼓山季风常绿阔叶林叶片 Na 含量^[7]相近,表明研究区域植物叶片的 Na 元素的特异性,这主要是因为该区域属我国酸性土壤主要分布区,并且酸雨会加速土壤酸化,使土壤中 Na 溶出量降低^[11]。

3.2 重金属及 Al 含量特征

两树种叶片 4 种重金属和 Al 平均含量(图 1)的分析表明,尽管不同重金属含量的树种差异不同,但 Fe、Mn、Al 元素在两树种叶片含量上表现出完全相同的模式:银合欢含量低于台湾相思,其中 Fe 元素是台湾相思略高于银合欢。植物叶片重金属含量不但受土壤环境影响,也受树种本身生物学特性影响,即使生长在相同土壤环境上,不同树种对重金属元素的吸收仍存在差别^[6]。台湾相思叶片 5 种元素含量大小顺序为 Mn>Fe>Al>Zn>Cu,而银合欢为 Fe>Zn>Al>Mn>Cu,相同点仅为 Fe>Al>Cu。酸雨的频繁沉降加速了土壤酸化,导致土壤铝大量活化,从而会引起铝毒害影响植物生长^[12]。研究区域的两树种叶片 Al 含量没有出现显著差异,均在世界被子植物的范围值(90—200 mg/kg)^[10]内,且小于我国陆生被子植物叶片 Al 含量的平均值(420±3020) mg/kg^[9]。

重金属 Fe 属于植物必需元素,两树种叶片 Fe 含量均略高于中国陆生被子植物叶片 Fe 含量的平均值(220±2600) mg/kg^[9],表明仅从叶片元素含量水平看,该区域次生林存在 Fe 危害风险。重金属 Cu 和 Zn 是植物光合作用的酶底物,高浓度的 Cu 和 Zn 会对植物产生毒害。本研究中两树种叶片 Cu 和 Zn 含量已超出了世界被子植物范围值(Cu 为 6—14 mg/kg, Zn 为 34—68 mg/kg)^[10]边界,并且其 Cu 含量还要高于广州市工业污染区乔木树种叶片含量^[13],表明仅从叶片元素含量水平看,研究区域的台湾相思和银合欢遭受重金属 Cu 和 Zn 危害风险更大。并且两树种在此两种元素含量上出现显著差异性,银合欢的累积量高于台湾相思,而两者的

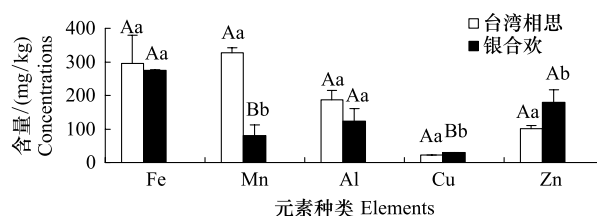


图 1 两种树种的重金属及 Al 的平均含量

Fig. 1 Average concentrations of heavy metals and Al of *Acacia confusa* and *Leucaena glauca*

大小写字母分别表示差异达 0.01 和 0.05 的显著水平

Fe、Al 含量未出现差异性。Mn 元素只能从土壤中吸收,中国陆生被子植物叶片的平均值为 (180 ± 3980) mg/kg^[9],该区域台湾相思和银合欢存在着极显著差异,台湾相思明显高于平均值,但在世界被子植物范围值内,银合欢明显比平均值要低,体现两树种吸收 Mn 元素的差异性。

3.3 叶片元素含量比值的特征

N 和 P 是影响植物生长和群落第一性生产力的重要因素^[14]。在生态系统中,N、P 的有效性限制了植物的生长,N/P 比值可用来表示群落营养限制的状况^[8],以 N/P 来判断营养限制已得到广泛认同。Güsewell 等^[15]对欧洲湿地植物研究发现,在群落水平上,成熟叶不同 N/P 比值反映不同的 N、P 限制情况,N/P>16,表示 P 限制;N/P<14,表示 N 限制;14<N/P<16,表示 N 与 P 单独或者两者共同影响着植物的生长。台湾相思的 N/P 为 21.3,为 P 制约型;银合欢的 N/P 为 10.0,为 N 制约型。钟安良^[16]对杉木林养分研究时发现,N、S 代谢具有明显的相伴性,两者之间互相促进。本研究中台湾相思与银合欢的 N/S 也并未出现显著差异性,且比较相近。这是因为 N、S 在一定的蛋白质中存在相应的比例关系,N、S 任一元素不足或过量都会导致蛋白质合成不能正常进行^[16]。

研究表明,高浓度 Al 能明显抑制林木根系对 P 的吸收,从而影响林木生长,树种不同,其耐 Al 性也有明显差异^[17]。台湾相思叶片 Al 元素的含量大于银合欢,而台湾相思的 Al/P 比值极显著地大于银合欢,与上述结论一致。在欧洲,植物叶片的 Ca/Al 摩尔比值经常用于诊断酸沉降下植物是否受到 Al 毒害,植物叶片 Ca/Al 摩尔比值等于 12.5 是植物 Al 毒害的一个阈值,当 Ca/Al 小于 12.5 时,表明植物受到潜在 Al 毒伤害^[18-19]。据此理论,结合两树种叶片 Ca、Al 的摩尔比值(图 2),本研究区酸沉降比较严重,土壤 Al 的可利用性与土壤 pH 值降低有关^[20],银合欢的 Ca/Al 摩尔比值远大于 12.5,而对于台湾相思,虽然其 Al 含量并未超出正常范围值,但其 Ca/Al 摩尔比值小于 12.5,表明该区域的台湾相思已受到 Al 危害风险。但由于地理气候和树木生理代谢营养代谢的迥然差异,欧洲温带和寒带的森林所得到的阈值是否适合于我国亚热带酸雨地区值得商榷和实验研究。

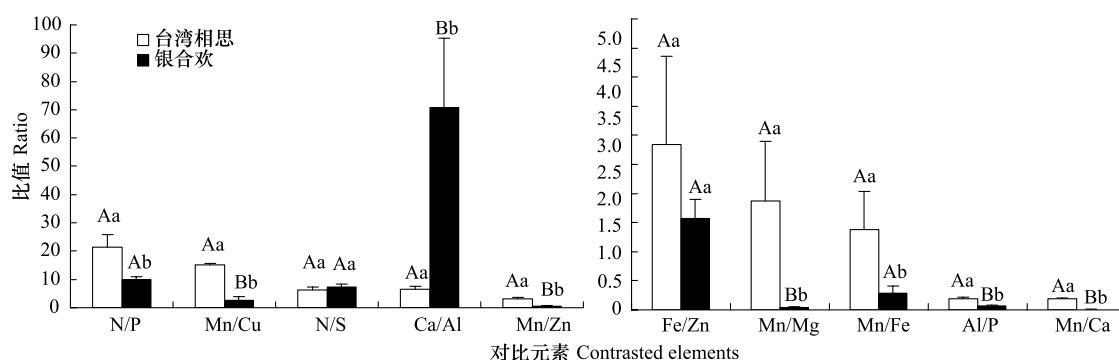


图 2 两种树种叶片元素含量比值(Ca/Al 为摩尔比,其余为质量分数比)

Fig. 2 Ratios of element concentrations in the leaves of *Acacia confuse* and *Leucaena glauca*

在 Al 之后,Mn 被认为可能是酸性土壤中限制植物生长的第二个重要因素^[21]。台湾相思叶 Mn 含量极显著大于银合欢,而叶是 Mn 的累积部位,涉及复杂的金属解毒和累积^[17]。在两树种叶片元素比值中,Mn/Cu、Mn/Zn、Mn/Ca、Mn/Mg 均出现极显著的差异性,Mn/Fe 出现显著的差异性,体现过高的 Cu、Zn 水平会减少植物对 Mn 的吸收作用^[22-23],与本研究趋势基本一致。而 Mn^{2+} 的结合能力比较强,过量的 Mn 能够抑制必需元素 Mg、Ca 和 Fe 的吸收,导致叶绿素合成减少,光合作用效率下降^[17]。说明 Mn 与这些元素对台湾相思和银合欢的生长基本上起着拮抗的作用。

在植物叶片中,Zn-Fe 呈拮抗作用^[24]。本研究中,台湾相思与银合欢的 Zn/Fe 比值并未出现差异性,说明其 Zn-Fe 并未呈拮抗作用,原因可能在于营养元素之间的相互作用关系不仅仅受营养元素所处的范围影响,同时植物对元素的吸收特征也会存在差异性,最终会使得表现形式有所不同。

4 结论

福州酸雨区丘陵次生林中的台湾相思和银合欢的叶片营养元素含量均表现为 $N > K > Ca > S > P > Mg > Na$, 重金属特征表现为 $Fe > Al > Cu$ 。两树种叶片在 P 、 Ca 、 Mg 、 Na 、 Mn 和 Cu 元素含量上的差异性极为显著, 在元素 Zn 含量上差异显著。该研究区域中两者的 S 含量明显高于中国陆生被子植物叶片 S 含量的平均值, 而 Na 的含量明显低于平均值, 且 Na 含量要低于 S 含量, 表明酸雨加速土壤酸化导致的土壤 Na 含量低可能是一个原因。

在全球性大气污染蔓延和局部森林健康衰退的背景下, 利用植物组织化学分析结果来诊断环境污染对森林健康的影响已成为生态学家广泛采用的方法之一^[25], 如通过分析森林植物叶片重金属元素含量评价森林遭受大气污染的胁迫程度^[26], 或用来指示城市环境污染水平^[27]。本研究测定的几种重金属元素以及 S 元素, 均为常见的酸污染或工业污染指示元素, 城市化和工业排放都可能导致这些元素在植物叶片中异常积累^[28]。通过对重金属及 Al 含量的测定, 并与元素范围值对比, 表明从叶片元素含量水平分析的角度来看时, 两树种已存在 Fe 危害风险, 并且受到 Cu 和 Zn 危害风险更大; 虽然 Al 含量属于正常范围, 但通过 Ca/Al 摩尔比值大小, 可以得出台湾相思已受到了 Al 危害风险, 而银合欢并未受到其影响。但欧洲温带和寒带的森林所得到的 Al/Ca 阈值是否适应于我国还难以确定。银合欢的 Zn 、 Cu 元素累积量大于台湾相思, 所以从这个角度看, 银合欢的抗性优于台湾相思, 可能更适合在本研究区域生长。但本研究区域内银合欢的优势度并未高于台湾相思, 另外二者是否受到干沉降的影响, 都还有待于深入探讨。

元素在植物的生长过程中可表现为拮抗作用和协同作用两方面。与单一的元素浓度相比, 植物组织元素含量的比值更能真实指示环境的变化^[29], 因为元素在被根系吸收时会受到其它元素的影响, 比如随着酸沉降增加, Al 抑制根系对钙的吸收^[30]。通过 N 、 P 元素质量分数比, 可以得出台湾相思为 P 制约型植物, 而银合欢为 N 制约型植物。通过对元素含量比值的分析, N/S 未出现差异性, 说明两树种 $N-S$ 对植物的生长起着协同作用。两树种叶片 Al/P 、 Mn/Cu 、 Mn/Zn 、 Mn/Ca 、 Mn/Mg 均出现了极显著的差异性, Mn/Fe 出现显著的差异性, 表明 $Al-P$ 以及 $Mn-Cu$ 、 Zn 、 Ca 、 Mg 对本研究区域的台湾相思和银合欢的生长起着拮抗的作用。这些均与前人的结论一致。而本区域内两种树种 Zn/Fe 比值并未出现差异性, 与前人的研究结论并不一致, 原因在于营养元素之间的相互作用关系受营养元素所处的范围以及植物对元素的吸收特性的影响, 最终会使得表现形式有所差异。

一般认为, 影响土壤重金属移动的最重要因子是土壤 pH 值^[31], 在酸雨区土壤 pH 值低, 因此土壤中重金属移动性会比较大, 植物受重金属威胁的可能性也比较大。近年来, 受工业排放增加影响, 许多重金属已通过多种途径进入到陆地生态系统中。对植物叶片重金属含量进行长期监测和定期分析, 能够为酸雨区次生林的健康评价提供精确的信息。

References:

- [1] Environment Protection Bureau of Fujian Province. Annual Report on Provincial Environment Status of 2010. 2011.
- [2] Kuang Y W, Wen D Z, Yan J H, Liu S Z, Chu G W, Zhou C Y, Wang G Q, Zhang Q M. Characteristics of element contents in leaves of 3 dominant species in karst forest in Puding, Guizhou, China. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2010, 16(2): 158-163.
- [3] Zhan S X, Chen F S, Hu X F, Gan L, Zhu Y L. Soil nitrogen and phosphorus availability in forest ecosystems at different stages of succession in the central subtropical region. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4673-4680.
- [4] Li Z Y, Chen J J, Wang Y H, Yu P T, Du S C, He P, Duan J. Effects of *Schima superba* plantations on soil chemical properties in the acid rain region of Chongqing, southwestern China. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(3): 632-638.
- [5] Li Z Y, Wang Y H, Yu P T, Zhang Z J, Du S C, He P, Wang X, Duan J, Li Z H. Soil chemical properties and growth characteristics of mixed plantation of *Pinus massoniana* and *Cinnamomum camphora* in the acid rain region of Chongqing, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(4): 387-395.
- [6] Wang J F, Wen Y G, Liang H W. The Research on the content of chemical element of *Pinus massoniana*'s tree ring in Liuzhou. Ecologic Science, 2005, 24(4): 310-313.

- [7] Lin C C. Calorific values and nutrient composition of the leaves of monsoon evergreen broad-leaved forest and some forest-edge plants on Gushan Mountain in Fuzhou. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6): 832-836.
- [8] Tan Z Q. Resorption efficiencies of nitrogen and phosphorus of phyllodes during senescence for *Acacia confusa* at Wulaofeng, Xiamen. *Subtropical Plant Science*, 2010, 39(3): 18-20, 78-78.
- [9] Qin H, Li J X, Gao S P, Li C, Li R, Shen X H. Characteristics of leaf element contents for eight nutrients across 660 terrestrial plant species in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1247-1257.
- [10] Bowen H J M. *Environmental Chemistry of Elements*. Beijing: Science Press, 1986: 71-73.
- [11] Liang J, Zheng Y F, Li L, Mai B R. Effect of simulated acid rain on acidification and dissolution of potassium, sodium, calcium and magnesium in the rape plantation soil. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(2): 56-62.
- [12] Hong W, Lin C Y, Wu C Z, Song P, Hong T, Fan H L, Chen C. Effects of different aluminum toxicity on nutritional quality of bamboo shoots in Moso bamboo. *Journal of Bamboo Research*, 2008, 27(1): 13-17.
- [13] Yu N, He S Q, Lu Y L, Chen H Y, Kang M M. Accumulation of heavy metals in six trees in industrial pollution area. *Ecology and Environment*, 2010, 19(9): 2214-2218.
- [14] Venterink H O, Wassen M J, Verkroost A W M, de Ruiter P C. Species richness-productivity patterns differ between N-, P-, and K-limited wetlands. *Ecology*, 2003, 84(8): 2191-2199.
- [15] Güsewell S, Koerselman W. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants. *Perspectives in Plant, Ecology Evolution and Systematics*, 2002, 5(1): 37-61.
- [16] Zhong A L, Xiong W Y. Seasonal changes of nutrient concentrations and nutrient interactions in needles of Chinese fir plantations. *Journal of Nanjing Forestry University*, 1993, 17(3): 1-8.
- [17] Zhang Y X, Li L F, Chai T Y, Lin D, Zhang H M. Mechanisms of manganese toxicity and manganese tolerance in plants. *Chinese Bulletin of Botany*, 2010, 45(4): 506-520.
- [18] Rengel Z. Role of calcium in aluminium toxicity. *New Phytologist*, 1992, 121(4): 499-513.
- [19] Cronan C S, Grigal D F. Use of calcium/aluminum ratios as indicators of stress in forest ecosystems. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(2): 209-226.
- [20] Tomlinson G H II. Air pollutants and forest decline. *Environmental Science and Technology*, 1983, 17(6): 246A-256A.
- [21] Foy C D. *Soil Acidity and Liming Monograph*. 2nd ed. Maryland: A. S. A., 1984: 57-97.
- [22] Mengel K, Kirkby E A. *Principles of Plant Nutrition*. 4th ed. Bern: International Potash Institute, 1987: 522-522.
- [23] Tu S H, Feng W Q. Effect of Mn on wheat growth and the interactions between Mn and some other plant nutrients. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 1999, 12(Z1): 13-20.
- [24] Wang Y A, Dong D P, Li K, Li X H, Liu D, Li D Q, Shu H R. Effects of regulation of zinc and iron uptake and distribution in apple trees under zinc and iron interaction. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(7): 1469-1478.
- [25] Percy K E, Ferretti M. Air pollution and forest health: Toward new monitoring concepts. *Environmental Pollution*, 2004, 130(1): 113-126.
- [26] Yilmaz S, Zengin M. Monitoring environmental pollution in Erzurum by chemical analysis of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles. *Environment Pollution*, 2004, 29(8): 1041-1047.
- [27] Alfani A, Baldantoni D, Maisto G, Bartoli G, De Santo A V. Temporal and spatial variation in C, N, S and trace element contents in the leaves of *Quercus ilex* within the urban area of Naples. *Environmental Pollution*, 2000, 109(1): 119-129.
- [28] Guan D S, Pear M R. Heavy metal concentrations in plants and soils at roadside locations and parks of urban Guangzhou. *Journal of Environmental Science*, 2006, 18(3): 495-502.
- [29] Berger T W, Köllensperger G, Wimmer R. Plant-soil feedback in spruce (*Picea abies*) and mixed spruce-beech (*Fagus sylvatica*) stands as indicated by dendrochemistry. *Plant and Soil*, 2004, 264(1/2): 69-83.
- [30] Cronan C S. Differential adsorption of Al, Ca, and Mg by roots of red spruce (*Picea rubens* Sarg.). *Tree Physiology*, 1991, 8(3): 227-237.
- [31] Brümmer G W, Gerth J, Herms U. Heavy metal species, mobility and availability in soils. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 1986, 149(4): 382-398.

参考文献:

- [1] 福建省环保厅. 2010 年福建省环境状况公报. 2011.
- [2] 旷远文, 温达志, 闫俊华, 刘世忠, 褚国伟, 周传艳, 王国勤, 张倩媚. 贵州普定喀斯特森林 3 种优势树种叶片元素含量特征. *应用与环境学报*, 2010, 16(2): 158-163.
- [3] 詹书侠, 陈伏生, 胡小飞, 甘露, 朱友林. 中亚热带丘陵红壤区森林演替典型阶段土壤氮磷有效性. *生态学报*, 2009, 29(9):

4673-4680.

- [4] 李志勇, 陈建军, 王彦辉, 于澎涛, 杜士才, 何萍, 段健. 重庆酸雨区人工木荷林对土壤化学性质的影响. 植物生态学报, 2008, 32(3): 632-638.
- [5] 李志勇, 王彦辉, 于澎涛, 张治军, 杜士才, 何萍, 王祥, 段健, 李振华. 重庆酸雨区马尾松香樟混交林的土壤化学性质和林木生长特征. 植物生态学报, 2010, 34(4): 387-395.
- [6] 王金凤, 温远光, 梁宏温. 柳州酸雨区马尾松年轮元素含量变化研究. 生态科学, 2005, 24(4): 310-313.
- [7] 林承超. 福州鼓山季风常绿阔叶林及其林缘几种植物叶热值和营养成分. 生态学报, 1999, 19(6): 832-836.
- [8] 谭忠奇. 台湾相思叶状柄衰老过程中氮磷内吸收变化研究. 亚热带植物科学, 2010, 39(3): 18-20, 78-78.
- [9] 秦海, 李俊祥, 高三平, 李铨, 李蓉, 沈兴华. 中国 660 种陆生植物叶片 8 种元素含量特征. 生态学报, 2010, 30(5): 1247-1257.
- [11] 梁骏, 郑有飞, 李璐, 麦博儒. 模拟酸雨对油菜大田土壤酸化及 K, Na, Ca, Mg 溶出的影响. 环境科学研究, 2008, 21(2): 56-62.
- [12] 洪伟, 林存炎, 吴承祯, 宋萍, 洪滔, 范海兰, 陈灿. 不同铝毒害对毛竹笋营养品质影响的研究. 竹子研究汇刊, 2008, 27(1): 13-17.
- [13] 余娜, 何淑琼, 卢雅莉, 陈红跃, 康敏明. 工业污染地 6 种乔木树种重金属累积特征研究. 生态环境学报, 2010, 19(9): 2214-2218.
- [16] 钟安良, 熊文愈. 杉木人工林林木养分的季节变化及养分间的相互关系. 南京林业大学学报: 自然科学版, 1993, 17(3): 1-8.
- [17] 张玉秀, 李林峰, 柴团耀, 林单, 张红梅. 锰对植物毒害及植物耐锰机理研究进展. 植物学报, 2010, 45(4): 506-520.
- [23] 涂仕华, 冯文强. 锰对小麦生长的影响及与其它元素的交互作用. 西南农业学报, 1999, 12(Z1): 13-20.
- [24] 王衍安, 董佃朋, 李坤, 李新会, 刘娣, 李德全, 束怀瑞. 铁锌互作对苹果锌、铁吸收分配的影响. 中国农业科学, 2007, 40(7): 1469-1478.

CONTENTS

The combined effects of elevated CO ₂ and elevated temperature on proliferation of cyanophage PP	NIU Xiaoying, CHENG Kai, RONG Qianqian, et al (6917)
Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009	CHEN Jun, WANG Yuhui (6925)
Emergy and economic evaluations of two sewage treatment systems	LI Min, ZHANG Xiaohong, LI Yuanwei, et al (6936)
Individual spatial pattern and spatial association of <i>Stipa krylovii</i> population in Alpine Degraded Grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6946)
Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for <i>Phyllostachys praecox</i> over soil-surface mulching	LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, et al (6955)
Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in <i>Acacia confusa</i> and <i>Leucaena glauca</i> in secondary forests of acid rain region in Fuzhou	HAO Xinghua, HONG Wei, WU Chengzhen, et al (6964)
Relationships between main insect pests and their predatory natural enemies in “Yuhualu” juicy peach orchard	KE Lei, SHI Xiaoli, ZOU Yunding, et al (6972)
Simulating 10-hour time-lag fuel moisture in Daxinganling	HU Tianyu, ZHOU Guangsheng, JIA Bingrui (6984)
Soil nutrient characteristics under different vegetations in the windy and sandy region of northern Shaanxi	LI Wenbin, LI Xinpeng (6991)
Partitioning of autotrophic and heterotrophic soil respiration in southern type poplar plantations	TANG Luozhong, GE Xiaomin, WU Lin, et al (7000)
Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China	YU Tengfei, FENG Qi, LIU Wei, et al (7009)
Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag	MEI Tingting, ZHAO Ping, NI Guangyan, et al (7018)
Invasion of exotic <i>Ageratina adenophora</i> Sprengel. alters soil physical and chemical characteristics and arbuscular mycorrhizal fungus community	YU Wenqing, LIU Wanxue, GUI Furong, et al (7027)
Models and methods for information extraction of complex ground objects based on LandSat TM images of Hainan Island, China	WANG Shudong, ZHANG Lifu, CHEN Xiaoping, et al (7036)
Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine <i>Abies faxoniana</i> forest of western Sichuan	YANG Yulian, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (7045)
Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice	WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al (7053)
Growth characteristics, lignin degradation enzyme and genetic diversity of <i>Fomes fomentarius</i> by SRAP marker among populations	CAO Yu, XU Ye, WANG Qiuyu (7061)
Effects of the invasion by <i>Solidago canadensis</i> L. on the community structure of soil animals	CHEN Wen, LI Tao, ZHENG Rongquan, et al (7072)
Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils	ZHANG Xiangqian, HUANG Guoqin, BIAN Xinmin, et al (7082)
Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms	ZHANG Yuting, ZHU Min, XIAN Yanxiangwa, et al (7091)
The stable nitrogen isotope of size-fractionated plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay	KE Zhixin, HUNG Liangmin, XU Jun, et al (7102)
Dynamics of toxic and non-toxic <i>Microcystis</i> spp. during bloom in the large shallow hypereutrophic Lake Taihu	LI Daming, YE Linlin, YU Yang, et al (7109)
Activities of antioxidant enzymes and Zn-MT-like proteins induced in <i>Chlorella vulgaris</i> exposed to Zn ²⁺	YANG Hong, HUANG Zhiyong (7117)
Ecological footprint in Fujian based on calculation methodology for the national footprint accounts	QIU Shoufeng, ZHU Yuan (7124)
The comparison of CO ₂ emission accounting methods for energy use and mitigation strategy: a case study of China	YANG Xiai, CUI Shenghui, LIN Jianyi, et al (7135)
Ecological damage assessment of Jiaozhou Bay reclamation based on habitat equivalency analysis	LI Jingmei, LIU Tieying (7146)
The value assessment of county-level ecological assets: a case in Fengning County, Hebei Province	WANG Hongyan, GAO Zhihai, LI Zengyuan, et al (7156)
Review and Monograph	
Molecular basis for enhancement of plant drought tolerance by arbuscular mycorrhizal symbiosis: a mini-review	LI Tao, DU Juan, HAO Zhipeng, et al (7169)
A review of carbon cycling and sequestration in urban soils	LUO Shanghua, MAO Qizheng, MA Keming, et al (7177)
Overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing	DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang (7190)
Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation	WU Mingli, LI Xuyong (7202)
The framework of stoichiometry homeostasis in zooplankton elemental composition	SU Qiang (7213)
Scientific Note	
Abundance and biomass of planktonic ciliates in the sea area around Zhangzi Island, Northern Yellow Sea in July and August 2010	YU Ying, ZHANG Wuchang, ZHANG Guangtao, et al (7220)
Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China	YANG Xitao, ZHOU Xuehong, ZHANG Wei (7230)
Influence of residue composition and addition frequencies on carbon mineralization and microbial biomass in the soils of agroforestry systems	WANG Yikun, FANG Shengzuo, TIAN Ye, et al (7239)
Seasonal changes in microbial diversity in different cells of a wetland system constructed for municipal sewage treatment	CHEN Yonghua, WU Xiaofu, ZHANG Zhenni, et al (7247)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,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,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

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 22 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 22 (November, 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 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

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元