

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

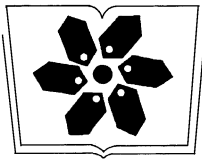
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第18期 Vol.32 No.18 **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 18 期

2012 年 9 月 (半月刊)

目 次

亚热带典型树种对模拟酸雨胁迫的高光谱响应.....	时启龙,江 洪,陈 健,等 (5621)
珠江三角洲地面风场的特征及其城市群风道的构建.....	孙 武,王义明,王越雷,等 (5630)
粤北山地常绿阔叶林自然干扰后冠层结构与林下光照动态.....	区余端,苏志尧 (5637)
四种猎物对南方小花蝽生长发育和繁殖的影响.....	张昌容,鄧军锐,莫利锋 (5646)
普洱季风常绿阔叶林次生演替中木本植物幼苗更新特征.....	李帅锋,刘万德,苏建荣,等 (5653)
喀斯特常绿落叶阔叶混交林物种多度与丰富度空间分布的尺度效应.....	张忠华,胡 刚,祝介东,等 (5663)
格氏栲天然林土壤养分空间异质性.....	苏松锦,刘金福,何中声,等 (5673)
种植香根草对铜尾矿废弃地基质化学和生物学性质的影响.....	徐德聪,詹 婧,陈 政,等 (5683)
灌溉对三种荒漠植物蒸腾耗水特性的影响.....	单立山,李 毅,张希明,等 (5692)
真盐生植物盐角草对不同氮形态的响应.....	聂玲玲,冯娟娟,吕素莲,等 (5703)
鹿泉沟自然保护区寒温性针叶林演替优势种格局动态分析.....	张钦弟,毕润成,张金屯,等 (5713)
不同水肥条件下 AM 真菌对丹参幼苗生长和营养成分的影响.....	贺学礼,马 丽,孟静静,等 (5721)
垄沟覆膜栽培冬小麦田的土壤呼吸.....	上官宇先,师日鹏,韩 坤,等 (5729)
不同方式处理牛粪对大豆生长和品质的影响.....	郭立月,刘雪梅,战丽杰,等 (5738)
基于大气沉降与径流的乌鲁木齐河源区氮素收支模拟.....	王圣杰,张明军,王飞腾,等 (5747)
基于能值理论的循环复合农业生态系统发展评价——以福建省福清星源循环农业产业示范基地为例.....	钟珍梅,翁伯琦,黄勤楼,等 (5755)
低温暴露和恢复对棘胸蛙雌性亚成体生存力及能量物质消耗的影响.....	凌 云,邵 晨,颜志刚,等 (5763)
暗期干扰对棉铃虫两个不同地理种群滞育抑制作用的比较.....	陈元生,涂小云,陈 超,等 (5770)
水土流失治理措施对小流域土壤有机碳和全氮的影响.....	张彦军,郭胜利,南雅芳,等 (5777)
不同管理主体对泸沽湖流域生态系统影响的比较分析.....	董仁才,苟亚青,李思远,等 (5786)
连江鱼类群落多样性及其与环境因子的关系.....	李 捷,李新辉,贾晓平,等 (5795)
溶氧水平对鲫鱼代谢模式的影响.....	张 伟,曹振东,付世建 (5806)
象山港人工鱼礁区的网采浮游植物群落组成及其与环境因子的关系.....	江志兵,陈全震,寿 鹿,等 (5813)
填海造地导致海湾生态系统服务损失的能值评估——以套子湾为例.....	李睿倩,孟范平 (5825)
城市滨水景观的视觉环境质量评价——以合肥市为例.....	姚玉敏,朱晓东,徐迎碧,等 (5836)
专论与综述	
生态基因组学研究进展.....	施永彬,李钧敏,金则新 (5846)
海洋酸化生态学研究进展.....	汪思茹,殷克东,蔡卫君,等 (5859)
纺锤水蚤摄食生态学研究进展.....	胡思敏,刘 胜,李 涛,等 (5870)
河口生态系统氨氧化菌生态学研究进展.....	张秋芳,徐继荣,苏建强,等 (5878)
嗜中性微好氧铁氧化菌研究进展.....	林超峰,龚 骏 (5889)
典型低纬度海区(南海、孟加拉湾)初级生产力比较.....	刘华雪,宋星宇,黄洪辉,等 (5900)
植物叶片最大羧化速率及其对环境因子响应的研究进展.....	张彦敏,周广胜 (5907)
中国大陆鸟类栖息地选择研究十年.....	蒋爱伍,周 放,覃 玥,等 (5918)
研究简报	
孵化温度对赤链蛇胚胎代谢和幼体行为的影响.....	孙文佳,俞 霄,曹梦洁,等 (5924)
不同培肥茶园土壤微生物量碳氮及相关参数的变化与敏感性分析.....	王利民,邱珊莲,林新坚,等 (5930)
施肥对两种莧菜吸收积累镉的影响.....	李凝玉,李志安,庄 萍,等 (5937)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 322 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-09



封面图说: 冬天低空飞翔的丹顶鹤——丹顶鹤是鹤类中的一种,因头顶有“红肉冠”而得名。是东亚地区特有的鸟种,因体态优雅、颜色分明,在这一地区的文化中具有吉祥、忠贞、长寿的象征,是传说中的仙鹤,国家一级保护动物。丹顶鹤具备鹤类的特征,即三长——嘴长、颈长、腿长。成鸟除颈部和飞羽后端为黑色外,全身洁白,头顶皮肤裸露,呈鲜红色。丹顶鹤每年要在繁殖地和越冬地之间进行迁徙,只有在日本北海道等地是留鸟,不进行迁徙,这可能与冬季当地人有组织地投喂食物,食物来源充足有关。

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

DOI: 10.5846/stxb201108051150

时启龙, 江洪, 陈健, 张倩倩. 亚热带典型树种对模拟酸雨胁迫的高光谱响应. 生态学报, 2012, 32(18): 5621-5629.

作者. Hyperspectral characteristics of typical subtropical trees at different levels of simulated acid rain. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5621-5629.

亚热带典型树种对模拟酸雨胁迫的高光谱响应

时启龙¹, 江 洪^{1,2}, 陈 健^{1,*}, 张倩倩¹

(1. 浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 杭州 311300;

2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093)

摘要:对亚热带地区 6 种典型树种幼苗在不同模拟酸雨梯度下的光谱响应特征进行了研究。结果表明, 针叶树种和阔叶树种对酸雨敏感性具有明显差异。针叶树种马尾松、杉木和香榧对酸雨敏感性高于阔叶树种刨花楠、香樟和杨梅。针叶树种内部, 马尾松和杉木叶绿素含量随酸雨浓度变化的幅度明显高于香榧; 而阔叶树种内部, 刨花楠、香樟和杨梅三者之间无显著差别。马尾松、香樟和香榧不能承受长时间高浓度酸雨胁迫, 叶绿素含量呈先增加后减少趋势, 杉木则先减少后增加, 杨梅能承受长时间高浓度酸雨胁迫, pH 值 2.5 处理下叶绿素含量高于 pH 值 5.6 处理。刨花楠 4 期试验中叶绿素含量变化无明显规律。各受试植物光谱反射率红边位置与其叶绿素含量变化规律基本一致。针叶树种马尾松和香榧主要表现为“蓝移”, 杉木则先“蓝移”后“红移”, 表现出对高浓度酸雨长时间的抗性; 阔叶树种香樟先“红移”后“蓝移”, 对高浓度模拟酸雨表现出先促进后抑制现象, 杨梅光谱反射率一阶导数曲线比较平缓, 无明显“红移”和“蓝移”现象, 刨花楠则“红移”和“蓝移”交替出现, 与其叶绿素含量变化相一致, 对酸雨敏感性不明显。

关键词:酸雨; 叶绿素; 光谱; 红边; 一阶导数

Hyperspectral characteristics of typical subtropical trees at different levels of simulated acid rain

SHI Qilong¹, JIANG Hong^{1,2}, CHEN Jian^{1,*}, ZHANG Qianqian¹

1 The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang Agriculture and Forestry University Lin an 311300, China

2 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Hankou Road 22, Nanjing 210093, China

Abstract: In this study, we evaluated the spectral response characteristics of 6 typical tree seedlings in subtropical areas under acid rain in different simulative levels. The experiment shows that there are conspicuous differences between the coniferous and broadleaf in terms of their sensitivities to the acid rain. 3 conifers, i. e. *Pinus massoniana*, *Cunninghamia lanceolata* and *Torreya grandis* are evidently more sensitive to the acid rain than *Machilus pauhoi*, *Cinnamomum camphora* and *Myrica rubra*, 3 kinds of broad-leaved trees. For conifer, the chlorophyll content of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* was greatly higher than that of *Torreya grandis*. For the species of broad-leaved trees, however, there was no significant difference among the *Machilus pauhoi*, *Cinnamomum camphora* and *Myrica rubra*. Since *Pinus massoniana*, *Cinnamomum camphora* and *Torreya grandis* cannot stand the high level of acid rain, their chlorophyll content at first increased and later declined, which was contrary to that of *Cunninghamia lanceolata*. While *Myrica rubra* could withstand long-term acid rain of high level, its chlorophyll content under pH2.5 was higher than that under pH5.6. As for the *Machilus pauhoi*, there was no evident law in the changes of chlorophyll content of *Machilus pauhoi* during the 4 experimental phases. What's more, the red-edged spectral reflectance positions of the testing plants were substantially

基金项目:科技部重大国际合作项目(200073819); 浙江省重大科技专项(2008C13G2100010); 浙江农林大学科研启动基金(2007FR074)

收稿日期:2011-08-05; **修订日期:**2012-02-01

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

consistent with the changing rules of the chlorophyll content. To be more exact, *Pinus massoniana* and *Torreya grandis* which belong to the species of coniferous tree mainly showed a “blue shift”, while *Cunninghamia lanceolata* showed “blue shift” first and “red shift” later, which reflected the long-term resistance to the acid rain of high level. *Cinnamomum camphora*, a type of the broad-leaved tree showed “red shift” first and “blue shift” later, which was the acceleration and then the resistance to the simulated acid rain of high level. The first derivative curve of *Myrica rubra* spectral reflectance was relatively flat, and there was no obvious phenomenon related to the “red shift” and “blue shift”. *Machilus pauhoi* showed “red shift” and “blue shift” alternatively, which corresponded to the changes of chlorophyll content and revealed its inconspicuous sensitivity to the acid rain.

Key Words: acid rain; chlorophyll; spectrum; red-edge; first derivative

自 20 世纪中叶以来,酸雨已成为严重的全球性环境污染问题之一,其成因主要是由于化石燃料燃烧所排放的 SO_2 及 NO_x 等酸性气体所致^[1]。迅速增长的能源消费使得中国在 1987 年成为世界上 SO_2 排放量最大的国家,直接导致中国南方地区出现了大面积的严重酸沉降危害区。森林作为陆地生态系统的主要组成部分,是酸雨污染的主要受体^[2]。长三角地区是我国的主要酸沉降区域之一,自 20 世纪 70 年代末以来,随着酸雨频率普遍升高,该地区的森林生长及森林生态效益均受到不同程度的影响。酸沉降通过影响植物的形态结构以及生理生化过程导致森林植被生长量减少和生长率下降,同时也改变土壤化学性质以及土壤中微生物区系和活性从而抑制植物的生长^[3]。

高光谱遥感技术已被用于研究各类环境胁迫对不同植物所造成的影响^[4-9]。许多研究者利用植被光谱反射率在环境胁迫作用下的变化特征,来研究污染物对植物生理生态方面的影响,间接推断特定环境胁迫的范围及强度,其优势在于可进行快速和大面积的实时动态监测^[4-9]。在诸多应用中,很少见到将高光谱遥感技术用于研究中国亚热带地区典型树种在酸雨胁迫下的光谱反射率的变化特征。本文利用高光谱遥感技术手段,研究酸雨胁迫下亚热带 6 种典型树种幼苗叶片的高光谱反应特征,探寻这 6 种典型树种在酸雨胁迫下的光谱反应模式,不仅为大尺度酸雨胁迫遥感监测提供技术支持,也为酸雨区林木配置、物种保护提供参考价值。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为亚热带典型树种马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、香榧(*Torreya grandis*)、刨花楠(*Machilus pauhoi*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、杨梅(*Myrica rubra*)等 6 种树种幼苗。

1.2 试验设计

2006 年春季选择长势较好且基本一致的二年生幼苗材料,移栽于内径 22 cm,高 27 cm 的生长盆中,取当地的黄红壤作为栽培土,每种每个梯度 5 盆,放置于室外大棚中。根据浙江地区酸雨监测分析资料和自然降水化学成分的测定结果,借助 pHSH-2C 型精密酸度计测定,按 $\text{SO}_4^{2-}:\text{NO}_3^-$ (体积分数)8:1 配置母液,用去离子水稀释,配置 pH 值为 5.6(CK)、4.0 和 2.5 3 种酸雨梯度,同时根据浙江省临安市平均月降雨量确定酸雨喷淋量,酸雨从 2006 年 5 月开始喷淋,喷淋频率为每周 2 次,每次 18.75 mm,喷淋期间使用塑料薄膜遮挡自然降雨,但不影响植物的正常生长。本文选取试验数据时间为 2006 年 8 月、2007 年 5 月、2008 年 8 月和 2009 年 5 月共 4 期数据。

1.3 光谱反射率、叶绿素测定

光谱反射率的测定采用美国分析光谱仪器公司(Analytical Spectral Devices, ASD)生产的 ASD Field Spec FR 光谱仪,光谱范围在 350—2500 nm 之间。其在 350—1000 nm 间的采样间隔为 1.4 nm,光谱分辨率为 3 nm;在 1000—2500 nm 间的采样间隔为 2 nm,光谱分辨率为 10 nm。选取待测树种的 1 年生叶 30 片,叶子采集后,立即送入遮光实验室内进行光谱测定,样品被平置于黑色背景的工作台上,光纤探头垂直向下,并确保

样品充满仪器的视场角,光源采用两盏 ASD 公司生产的溴钨灯,从两侧以等角度方式照射样品,以尽量消除阴影的影响。为消除外界干扰以保证精度,对每个样品采集 5 条光谱曲线,取平均后作为该样品的代表性光谱曲线。每隔 10 min 对仪器做一次优化及参考板校正。光谱测量结束后,立即进行叶绿素含量测定,叶绿素含量采用日本 MINOLTA 公司生产的手持式叶绿素计 SPAD-502 进行测量,手持式叶绿素计 SPAD-502 的读数是在 0—99.9 之间的一个无单位的值,大量研究表明该值与叶片内的叶绿素含量相关^[10]。为保证读数的可靠性,对每片叶子(与光谱测量区域位置基本相同)等间距地读取 10 个读数,取平均值作为该片叶子的叶绿素含量相对值。

1.4 数据分析

1.4.1 一阶导数分析

传统的植被指数容易受外部条件(如植被覆盖率,土壤颜色等)的影响,利用高光谱遥感导数光谱技术能压缩背景噪音对目标信号的影响或不理想的低频信号,使数据更科学^[11]。Lwamoto 等综述了高光谱遥感中导数光谱的求解方法,最简单的方法使用相邻光谱值的差除以波长间距,其定义如下^[12]:

$$R'(\lambda_i) = \frac{(R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1}))}{2\Delta\lambda} \quad (1)$$

式中, λ_i 代表波长位置, $R(\lambda_i)$ 和 $R'(\lambda_i)$ 分别表示该位置处的光谱反射率及一阶导数值, $\Delta\lambda$ 表示两个相邻波长的间距。

1.4.2 反高斯模型

反高斯模型(Inverted-Gaussian, IG)模型用于定量分析植被的红边特性,可模拟植被在 670—780 nm 范围内的光谱反射率曲线,其定义如下^[13]:

$$R(\lambda) = R_s - (R_s - R_0) \exp\left(\frac{-(\lambda_{0g} - \lambda_{pg})}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

式中, R_s 为近红外区域肩反射率值; R_0 为红光区域叶绿素吸收最小反射率值; λ_{0g} 为红光区域叶绿素吸收最大值所对应的光谱位置; λ_{pg} 为红边波长位置; σ 为反高斯函数的标准差系数,对应红光吸收谷的宽度。

在实际计算中,以 670—685 nm 和 780—795 nm 波段范围内的光谱反射率的平均值分别作为 R_0 和 R_s ,而后在 685—780 nm 范围内利用最小二乘法估计另外两个模型参数 λ_{0g} 和 σ ^[13]:

$$B(\lambda) = \left[-\ln\left(\frac{R_s - R(\lambda)}{R_s - R_0}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$= a_1\lambda + a_0$$

利用 R_0 和 R_s 两个参数在 $B(\lambda)$ 和 λ 间用最小二乘法进行线性拟合估计最佳系数 a_0 和 a_1 ,则 IG 模型的参数 λ_{0g} 和 λ 分别为:

$$\lambda_{0g} = -\frac{a_0}{a_1}, \sigma = \frac{1}{\sqrt{2}a_1} \quad (4)$$

式中, λ_{pr} 是实测红边反射率曲线的拐点波长。本文由实测反射率曲线的一阶导数谱极大值所对应的波长位置所得。

2 结果与分析

2.1 叶绿素含量分析

叶绿素含量的高低可一定程度上反映植物的营养状况;同时,由于植物叶片的叶绿素含量在植物遭受胁迫的状态下通常呈降低的趋势,故亦可间接指示植物所受胁迫的严重程度^[14]。图 1 是不同处理下 6 种受试植物叶片叶绿素含量 SPAD 值对比。从图中可以看到,4 期试验中,马尾松在 2006 年 8 月到 2007 年 5 月试验期间,pH 值 2.5 处理与 pH 值 5.6(CK)处理相比,其叶片叶绿素含量对比明显增加,由初期的 43.58 和 45.08

上升至 67.61 和 58.05,表现出一定的抗性,但随着试验的继续,其叶绿素含量对比于 2009 年 5 月下降至 41.15 和 65.44,生长受到抑制。究其原因,可能是试验初期,模拟酸雨中 NO_3^- 浓度随 pH 值降低而增加,氮的施肥作用促进了马尾松叶片中叶绿素含量的增加^[4,15],随着叶片中氮的饱和以及强酸雨对马尾松叶片组织及其功能的破坏,马尾松叶绿素含量开始下降,生长受到抑制;pH 值 4.0 处理下叶绿素含量与 pH 值 5.6 处理相比并无明显区别,但在后期也开始受到抑制。针叶树种香榧和阔叶树种香樟表现出与马尾松类似的特征。不同的是,马尾松和香樟均在 2008 年 8 月期间才表现出受 pH 值 2.5 高浓度酸雨的抑制,而香榧在 2007 年 5 月间,其在 pH 值 2.5 处理下叶绿素含量就开始低于 pH 值 5.6 处理,分别为 25.44 和 33.02,这表明,香榧在试验前期表现出比马尾松和香樟更弱的抗性。香樟在 pH 值 4.0 处理下的叶绿素含量前 3 期试验中一直高于其他两个梯度,但在 2009 年 5 月却低于 pH 值 5.6 处理。香榧在 pH 值 4.0 处理下的叶绿素含量与其他两个梯度相比无明显规律。

4 期试验中,杉木在 2006 年 8 月到 2007 年 5 月间,其在 pH 值 2.5 处理下的叶绿素含量低于 pH 值 5.6 (CK) 处理,其叶绿素含量差值分别为 -0.91 和 -19.77,但随着试验时间的持续,2008 年 8 月,其叶绿素含量开始增加,并于 2009 年 5 月高于对照组 pH 值 5.6 处理,叶绿素含量差值为 5.10。这说明,随着时间的延续,杉木能够忍受长期高浓度酸雨胁迫,表现出对酸雨一种长时间的抗性;pH 值 4.0 处理与其他两个梯度相比,无明显规律。杨梅在 pH 值 2.5 处理下的叶绿素含量均高于 pH 值 5.6 处理,但在前 3 期试验中,这种差别并不明显;pH 值 4.0 处理与其他两个梯度相比亦无明显规律。此外,刨花楠在 4 期试验 3 个梯度下均无明显变化,表明刨花楠对酸雨不具有敏感性。

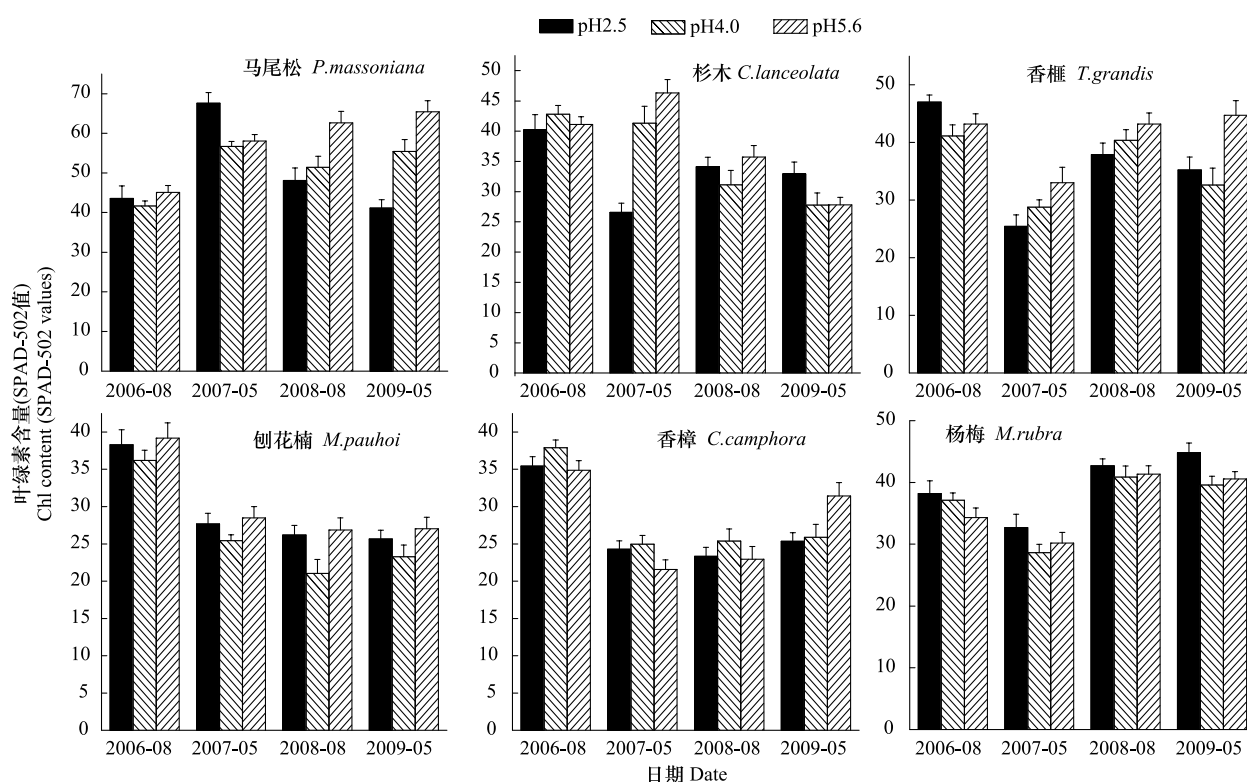


图 1 四期试验中 6 种植物叶片叶绿素含量在酸雨 3 个梯度处理下的比较

Fig. 1 Comparisons of chlorophyll concentration for 6 species under three simulated acid rain treatments

图 2 是四期试验中 pH 值 2.5 和 pH 值 5.6 (CK) 两个模拟酸雨梯度下的叶绿素含量差值 (pH 值 2.5 处理下叶绿素含量 - pH 值 5.6 处理下叶绿素含量) 变化情况,对其做差异显著性分析如表 1 所示,从表中可以清楚看到,受试的 3 种针叶树种对酸雨的敏感性高于阔叶树种。这可能和阔叶树种叶表面普遍具有较厚的蜡质层

有关^[16]。在针叶树种内部,马尾松和杉木随酸雨浓度变化的幅度显著高于香榧;而阔叶树种内部,刨花楠、香樟和杨梅三者之间无显著性差异。

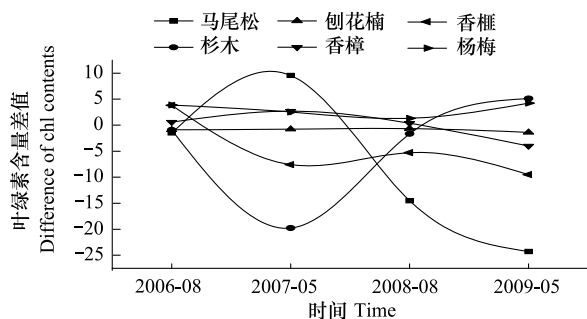


图2 4期试验中 pH 值 2.5 和 5.6 处理的叶绿素含量差值对照

Fig.2 Comparison of the differences of chlorophyll concentration at levels of pH 2.5 and pH5.6 in the four experiments

表1 4期试验中 pH 值 2.5 和 pH 值 5.6 处理下的叶绿素含量差值变化显著性分析

Table 1 Analysis of the significance of Chlorophyll content differential change under pH2.5 and pH5.6 in the 4th phase of experiments

	树种	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Student-Newman-Keuls	刨花楠	4	0.4150	
	杨梅	4	2.0925	
	香樟	4	3.8725	
	香榧	4	7.8150	
	杉木	4		17.1500
	马尾松	4		19.6900
	Sig.		0.343	0.563

植物光谱反射率曲线的红边位置与其叶绿素含量间具有较好的相关性。在植物叶绿素含量高、生长旺盛时,红边位置一般会向长波方向移动,即所谓的“红移”;反之,则会向短波方向移动,称之为“蓝移”。红边位置除受植物的季节性、长势、年龄等的影响外,还可反映由于胁迫所导致的绿色植物失绿现象^[6]。图3为3种针叶树种在模拟酸雨处理下红边区域(670—750 nm)的一阶导数曲线,如图可见,随着时间的增加,马尾松和香榧的一阶导数曲线逐渐变得陡峭,并伴随红边位置的“蓝移”,与叶绿素含量变化特征所不同的是,二者从

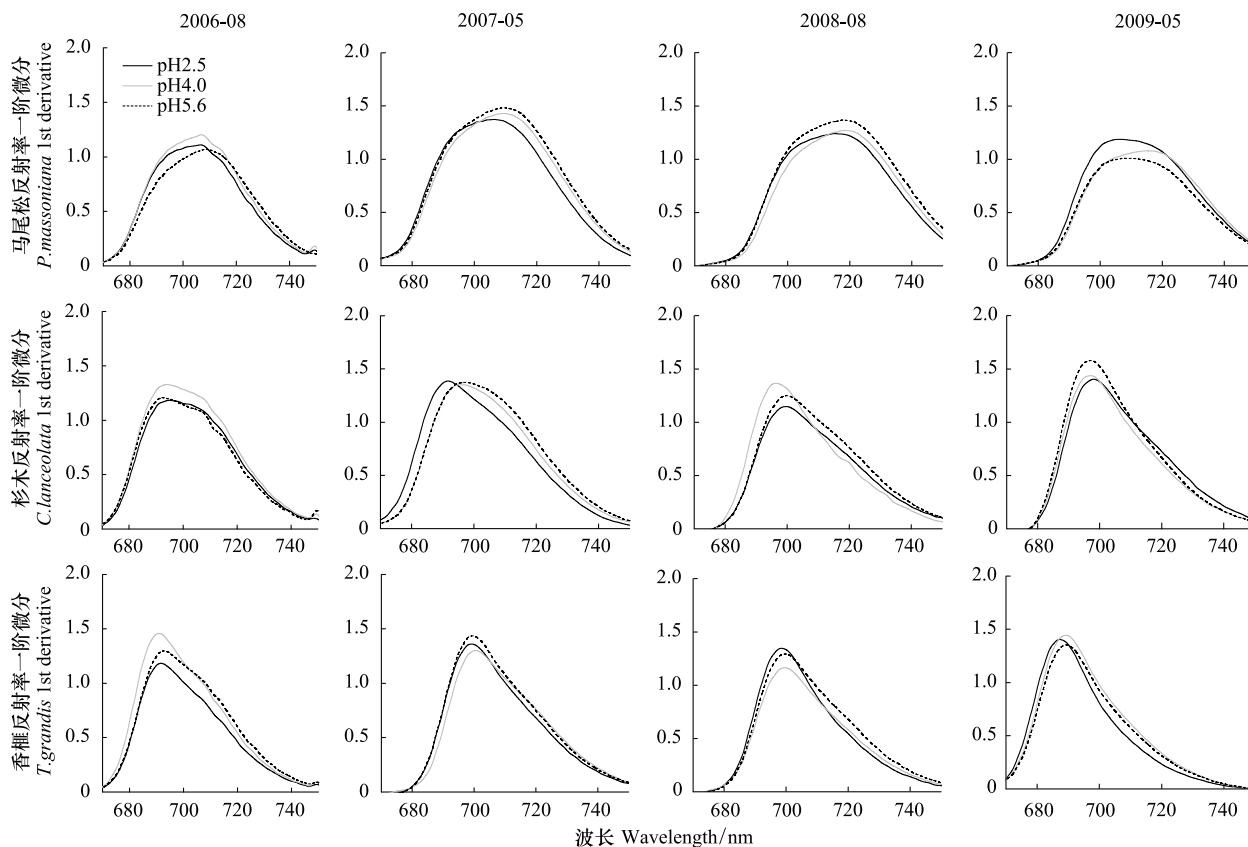


图3 3种针叶树种在模拟酸雨处理下红边区域的一阶导数分析

Fig. 3 The first derivative spectrum curves of red-edge reflectance for the three conifer species with three simulated acid rain treatment

试验初期就表现为光谱一阶导数的“蓝移”。酸雨淋洗叶片中 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 等阳离子,而 Mg^{2+} 是叶绿素形成不可缺少的物质,正是由于 Mg^{2+} 的缺失,造成叶绿素的合成存在抑制现象,从而使叶绿素含量与其光谱反射率相关关系出现差异。试验期间,杉木一阶导数曲线比较平缓,在 2006 年 8 月至 2007 年 5 月期间,主要表现为光谱一阶导数的“蓝移”,而后则向长波方向移动,表现为“红移”现象,和叶绿素含量变化特征基本一致。

图 4 为 3 种阔叶树种在模拟酸雨处理下红边区域(670—750 nm)的一阶导数曲线。如图所示,刨花楠在 4 期试验中,光谱一阶导数曲线“蓝移”和“红移”现象交替产生,无明显规律。结合其叶绿素含量变化特征可知,刨花楠对酸雨胁迫无明显反应,不具有敏感性。香樟在前 3 期试验中主要表现为“红移”现象,而在后续试验中则逐渐向短波方向移动,表现为对酸雨承受能力的减弱。杨梅在 4 期试验中,除第三期光谱一阶导数曲线有明显的“蓝移”外,其余各期均比较平缓,没有表现出明显的“蓝移”后“红移”现象。

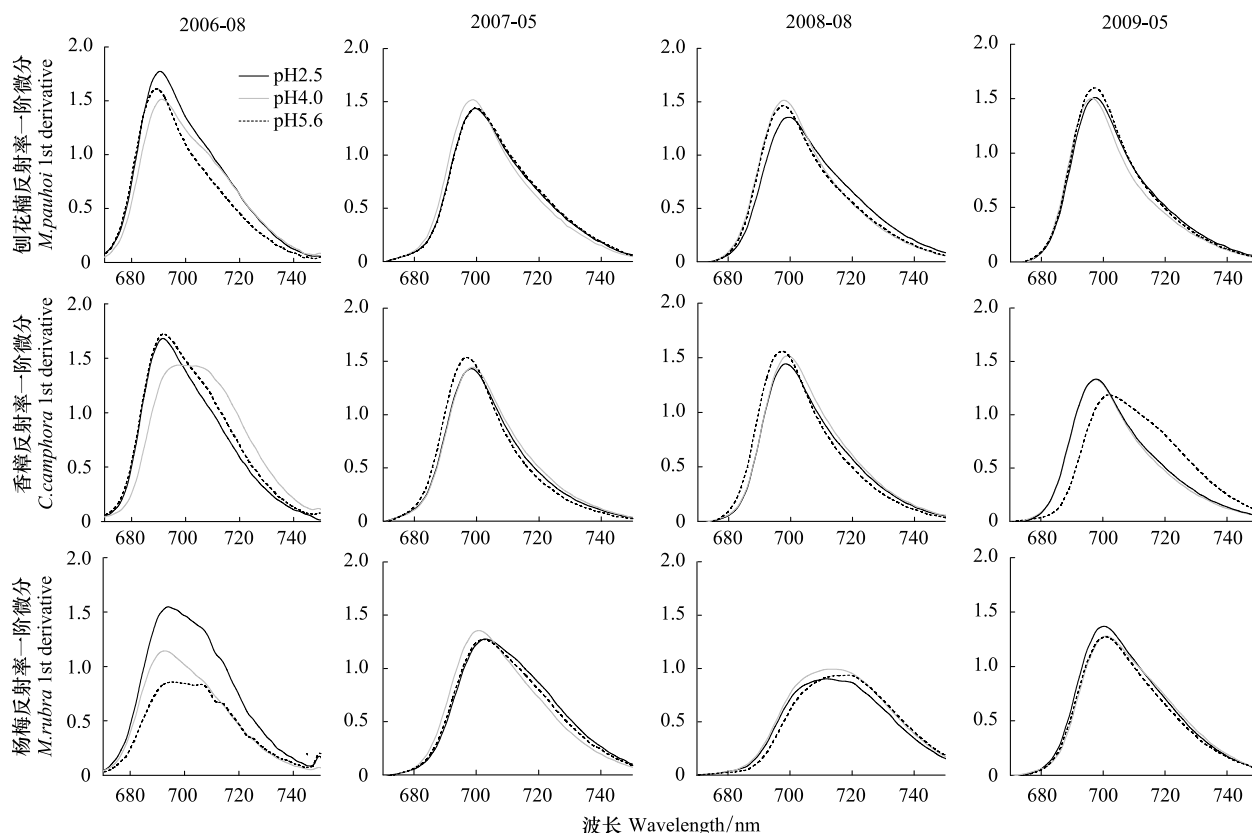


图 4 3 种阔叶树种在模拟酸雨处理下红边区域的一阶导数分析

Fig. 4 The first derivative spectrum curves of red-edge reflectance for the three broad-leaved species with three simulated acid rain treatment

2.3 红边特征定量分析

Smith 等研究表明,酸雨处理对叶绿素 a 的影响要大于其对叶绿素 b 的影响^[17]。而 R_0 位于红光区域叶绿素 a 的吸收峰值区,其叶绿素含量的降低将导致其对入射光吸收的减少,而使得该区域内的光谱反射率呈现上升的趋势。表 2 是 6 个树种在 3 个梯度模拟酸雨处理下反高斯模型参数 R_0 的比较。通过表 2 可以发现,马尾松和香樟在前两期试验中 pH 值 2.5 处理下的 R_0 值均低于 pH 值 5.6 (CK) 处理,后两期则相反, pH 值 2.5 处理高于 pH 值 5.6 处理,其 R_0 差值分别由 2006 年 8 月的 -0.08 和 -0.27 上升为 2009 年 5 月的 1.03 和 0.46,差异较为明显;马尾松 pH 值 4.0 处理在 4 期试验中均低于其他两个梯度,而香樟 pH 值 4.0 处理与其他两个梯度相比无明显规律。杉木在前 3 期试验中 pH 值 2.5 处理均高于 pH 值 5.6 处理, R_0 差值分别为 0.04、1.04 和 0.75,但在 2009 年 5 月的试验中开始低于 pH 值 5.6 处理,下降为 -2.43,变化显著,其 pH 值

4.0 处理除在 2008 年 8 月第三期试验中高于其他两个梯度外,其余试验期间均低于二者。香榧与杉木正好相反,第一期试验中,其 pH 值 2.5 处理低于 pH 值 5.6 处理,后 3 期试验中 pH 值 2.5 处理基本均高于 pH 值 5.6 处理,pH 值 4.0 处理除在最后一期试验中低于其他两个梯度外,前 3 期试验期间均介于其他两个梯度之间。刨花楠在第一期试验中 pH 值 2.5 处理高于 pH 值 5.6 处理,其他 3 期试验中均低于 pH 值 5.6 处理, R_0 差值分别为-0.10、-0.22 和-0.22,但差别并不显著。杨梅 4 期试验中 pH 值 2.5 处理均低于 pH 值 5.6 处理, R_0 差值分别为-0.24、-0.27、-0.85 和-0.24,无显著变化,pH 值 4.0 处理基本介于其他两个梯度之间。比较 6 个树种 3 个酸雨梯度处理间 R_0 值,并结合图 1 中叶绿素含量可知,叶绿素含量与其对应的 R_0 值之间呈现明显的负相关关系。

表 2 六个树种反高斯模型参数 R_0 的比较Table 2 Comparisons of parameter R_0 in IG model for the six tree species

树种 Species	模拟酸雨处理 Simulated acid rain treatment			
	试验时间 Time	pH 值 2.5	pH 值 4.0	pH 值 5.6
马尾松 <i>P. massoniana</i>	2006.08	5.48	5.30	5.56
	2007.05	5.31	5.20	5.46
	2008.08	4.06	2.72	3.66
	2009.05	5.31	4.27	4.28
	2006.08	6.18	6.52	6.14
杉木 <i>C. lanceolata</i>	2007.05	5.98	5.54	4.94
	2008.08	5.53	6.54	4.78
	2009.05	6.02	7.39	8.45
	2006.08	6.82	7.03	7.29
香榧 <i>T. grandis</i>	2007.05	9.70	8.52	7.67
	2008.08	5.30	5.13	5.09
	2009.05	5.15	4.78	5.13
	2006.08	10.75	8.87	9.28
刨花楠 <i>M. pauhoi</i>	2007.05	5.16	5.55	5.26
	2008.08	4.89	5.38	5.11
	2009.05	5.07	5.21	5.29
	2006.08	8.90	7.53	9.17
香樟 <i>C. camphora</i>	2007.05	4.03	5.28	5.74
	2008.08	5.19	5.18	3.53
	2009.05	5.68	4.12	5.22
	2006.08	6.79	6.96	7.03
杨梅 <i>M. rubra</i>	2007.05	5.58	6.24	5.85
	2008.08	4.15	4.63	5.00
	2009.05	5.30	4.46	5.54

公式(2)中 λ_{0g} 和 λ_{pg} 分别对应红光区域叶绿素吸收谷及红边所对应的波长,二者间具有关系: $\lambda_{pg} = \lambda_{0g} + \sigma$ 。本文选取 λ_{pg} 进行分析,模型计算结果如表 3 所示,2006 年 8 月至 2007 年 5 月试验期间,马尾松和香樟幼苗在 pH 值 2.5 处理下的 λ_{pg} 大于 pH 值 5.6(CK)处理,但在后两期试验中 pH 值 2.5 处理小于 pH 值 5.6 处理,由试验初期的“红移”转为“蓝移”;杉木在前 3 期试验中 pH 值 2.5 处理基本均小于 pH 值 5.6 处理,而在 2009 年 5 月试验期间,pH 值 2.5 和 pH 值 5.6 处理下的 λ_{pg} 分别为 701.27 nm 和 698.90 nm,由初期的“蓝移”变为“红移”;与杉木相反,香榧在 2006 年 8 月试验期间 pH 值 2.5 处理下红边位置为 695.31 nm,大于 pH 值 5.6 处理 693.72 nm,后 3 期试验期间则小于 pH 值 5.6 处理;刨花楠在 4 期试验期间 pH 值 2.5 处理与 pH 值 5.6 处理相比无显著规律;杨梅在 4 期试验期间,除第三期外,pH 值 2.5 处理均大于 pH 值 5.6 处理。此外,香榧在 4 期试验期间 pH 值 4.0 处理大于 pH 值 2.5 处理,其余树种 pH 值 4.0 处理与其他两个酸雨梯度之间无显著规律。结合图 1 中叶绿素含量可进一步验证已有结论,即植物光谱反射率曲线的红边位置与其叶绿素含量间具有较好的相关性^[6]。

表 3 3 个树种反高斯模型的 λ_{pg} 值比较Table 3 Comparisons of parameter λ_{pg} in IG model for the three tree species

树种 Species	λ_{pg}			
	试验时间 Time	pH 值 2.5	pH 值 4.0	pH 值 5.6
马尾松 <i>P. massoniana</i>	2006.08	701.47	702.03	699.81
	2007.05	704.02	701.91	703.95
	2008.08	710.64	712.23	712.37
	2009.05	708.66	710.62	709.21
杉木 <i>C. lanceolata</i>	2006.08	698.35	698.94	699.75
	2007.05	697.31	699.43	700.12
	2008.08	703.33	699.07	703.41
	2009.05	701.27	698.80	698.90
香榧 <i>T. grandis</i>	2006.08	695.31	692.30	693.72
	2007.05	685.71	691.67	689.05
	2008.08	700.03	702.03	702.39
	2009.05	701.80	704.20	702.74
刨花楠 <i>M. pauhoi</i>	2006.08	692.00	694.46	688.10
	2007.05	703.00	701.52	703.17
	2008.08	702.51	700.26	700.47
	2009.05	700.11	699.23	699.85
香樟 <i>C. camphora</i>	2006.08	697.54	702.08	696.72
	2007.05	698.97	700.76	698.50
	2008.08	702.93	698.38	706.79
	2009.05	699.49	702.12	702.70
杨梅 <i>M. rubra</i>	2006.08	699.71	699.51	699.60
	2007.05	706.40	703.96	705.55
	2008.08	713.00	711.63	715.17
	2009.05	704.78	703.74	703.94

3 结论与讨论

本研究探讨了亚热带 6 种常见典型树种在不同模拟酸雨梯度处理下叶片叶绿素含量及其光谱反射率的变化规律和特征。得到如下主要结论:

(1) 针叶树种对酸雨敏感性高于阔叶树种。本研究中, 针叶树种马尾松、杉木和香榧对酸雨的敏感性高于阔叶树种刨花楠、香樟和杨梅。针叶树种内部, 马尾松和杉木随酸雨浓度变化的幅度要明显高于香榧; 而阔叶树种内部, 刨花楠、香樟和杨梅三者之间无显著差别。此外, 马尾松和香樟在前两期试验中 pH 值 2.5 处理下叶绿素含量高于 pH 值 5.6 (CK) 处理, 表现出一定的抗性, 但随着试验时间的延长, 其叶绿素含量开始下降, 说明马尾松和香樟不能承受长时间的高浓度酸雨胁迫, 生长状况受到抑制。香榧叶绿素含量变化规律与马尾松和香樟类似, 也呈现出先增加后减少的现象, 只是在第二期试验中就开始表现出这种逆转, 表明香榧在试验前期对酸雨的抗性要弱于马尾松和香樟。四期试验中, 杉木叶绿素含量先减少后增加, 说明试验初期其生长受到抑制, 但随着时间的增加, 开始表现出对高浓度酸雨的抗性。杨梅在四期试验中一直表现出对高浓度酸雨较好的抗性, 生长状况良好。而刨花楠叶绿素含量变化无明显规律, 对酸雨胁迫无敏感反应。

(2) 各受试植物光谱反射率红边位置与其叶绿素含量变化规律基本一致。针叶树种马尾松和香榧主要表现为“蓝移”, 杉木则先“蓝移”后“红移”, 表现出对高浓度酸雨长时期的抗性; 阔叶树种香樟先“红移”后“蓝移”, 对高浓度模拟酸雨表现出先促进后抑制现象, 杨梅在四期试验中, 除第三期光谱一阶导数曲线有明显的“蓝移”外, 其余各期均比较平缓, 无明显“红移”和“蓝移”现象, 刨花楠则“红移”和“蓝移”交替出现, 与其叶绿素含量变化相对应, 对酸雨敏感性不明显。

(3)红边的光谱特点在许多卫星的传感器中都有相应的波段覆盖,如陆地资源卫星的第3波段、AVHRR卫星的第1波段、IKONOS卫星的第3波段、SPOT HRV卫星的第2波段和MODIS的第14波段等。如何将地基酸雨监测数据结合上述广泛应用的遥感波段进行大范围的森林植被酸雨胁迫监测,将是今后的研究主题,具有深远的意义。

References:

- [1] Menza F C, Seip H M. Acid rain in Europe and the United States: an update. *Environmental Science and Policy*, 2004, 7(4): 253-265.
- [2] Fan H B. A Review of research on interactions between acid rain and forest decline. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2003, 23(1): 88-92.
- [3] Feng Z W, Ogura N. Impacts and control strategies of acid deposition on terrestrial ecosystems in Chongqing area, China: overviews of the cooperative study between Japan and China. *Advances in Environmental Science*, 1998, 6(5): 1-8.
- [4] Song X D, Jiang H, Yu S Q, Zhou G M, Chang J, Jiang Z S, Jiang B. Relationship between chlorophyll concentrations and spectral reflectance feature of the typical evergreen hardwood species in subtropical region of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 1959-1963.
- [5] Carter G A, Knapp A K. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany*, 2001, 88(4): 677-684.
- [6] Carter G A. Responses of leaf spectral reflectance to plant stress. *American Journal of Botany*, 1993, 80(3): 239-243.
- [7] Smith K L, Steven M D, Colls J J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(2): 207-217.
- [8] Ellis R J, Scott P W. Evaluation of hyperspectral remote sensing as a means of environmental monitoring in the St. Austell China clay (kaolin) region, Cornwall, UK. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(1/2): 118-130.
- [9] Jiang J B, Chen Y H, Huang W J. Using hyperspectral derivative index to monitor winter wheat disease. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(12): 2475-2479.
- [10] Filella I, Penuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(7): 1459-1470.
- [11] Chi G Y, Liu X H, Liu S H, Yang Z F. Spectral characteristics of vegetation in environment pollution monitoring. *Environmental Science and Technology*, 2005, 28(S1): 16-20.
- [12] Lwamoto M. Nondestructive quality measurement of food by near infrared spectroscopic technique. *Japanese Society for Food Science and Technology*, 1980, 27(9): 464-472.
- [13] Miller J R, Hare E W, Wu J. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance I. An inverted-Gaussian reflectance model. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(10): 1755-1773.
- [14] Richardson A D, Duigan S P, Berlyn G P. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. *New Phytologist*, 2002, 153(1): 185-194.
- [15] Liu J X. Current and future study about effects of acid deposition on forest ecosystems. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(5): 113-117.
- [16] Adams C M, Caporn S J M, Hutchinson T C. Crystal occurrence and wax disruption on leaf surfaces of cabbage treated with simulated acid rain. *New Phytologist*, 1990, 114(1): 147-158.
- [17] Smith K L, Steven M D, Colls J J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(2): 207-217.

参考文献:

- [2] 樊后保. 酸雨与森林衰退关系研究综述. *福建林学院学报*, 2003, 23(1): 88-92.
- [3] 冯宗炜, 小仓纪雄. 重庆酸雨对陆地生态系统的影响和控制对策——中日酸雨合作研究总结. *环境科学进展*, 1998, 6(5): 1-8.
- [4] 宋晓东, 江洪, 余树全, 周国模, 常杰, 江子山, 江波. 亚热带典型常绿阔叶树种叶片叶绿素含量与其高光谱特征间的关系. *生态学报*, 2008, 28(5): 1959-1963.
- [11] 迟光宇, 刘新会, 刘素红, 杨志峰. 环境污染监测中的植物光谱效应研究. *环境科学与技术*, 2005, 28(S1): 16-20.
- [15] 刘菊秀. 酸沉降对森林生态系统影响的研究现状及展望. *生态学杂志*, 2003, 22(5): 113-117.

CONTENTS

Hyperspectral characteristics of typical subtropical trees at different levels of simulated acid rain	SHI Qilong, JIANG Hong, CHEN Jian, et al (5621)
Wind fields and the development of wind corridors in the urban metropolis of the Pearl River Delta	SUN Wu, WANG Yiming, WANG Yuelei, et al (5630)
Dynamics of canopy structure and understory light in montane evergreen broadleaved forest following a natural disturbance in North Guangdong	OU Yudian, SU Zhiyao (5637)
The influence of 4 species of preys on the development and fecundity of <i>Orius similis</i> Zheng	ZHANG Changrong, ZHI Junrui, MO Lifeng (5646)
Woody seedling regeneration in secondary succession of monsoon broad-leaved evergreen forest in Puer, Yunnan, Southwest China	LI Shuaifeng, LIU Wande, SU Jianrong, et al (5653)
Scale-dependent spatial variation of species abundance and richness in two mixed evergreen-deciduous broad-leaved karst forests, Southwest China	ZHANG Zhonghua, HU Gang, ZHU Jiedong, et al (5663)
The spatial heterogeneity of soil nutrients in a mid-subtropical <i>Castanopsis kawakamii</i> natural forest	SU Songjin, LIU Jinfu, HE Zhongsheng, et al (5673)
Effects of <i>Vetiveria zizanioides</i> L. growth on chemical and biological properties of copper mine tailing wastelands	XU Decong, ZHAN Jing, CHEN Zheng, et al (5683)
Effects of different irrigation regimes on characteristics of transpiring water-consumption of three desert species	SHAN Lishan, LI Yi, ZHANG Ximing, et al (5692)
The response of euhalophyte <i>Salicornia europaea</i> L. to different nitrogen forms	NIE Lingling, FENG Juanjuan, LÜ Sulian, et al (5703)
Dynamic analysis on spatial pattern of dominant tree species of cold-temperate coniferous forest in the succession process in the Pangquangou Nature Reserve	ZHANG Qindi, BI Runcheng, ZHANG Jintun, et al (5713)
Effects of AM fungi on the growth and nutrients of <i>Salvia miltiorrhiza</i> Bge. under different soil water and fertilizer conditions	HE Xueli, MA Li, MENG Jingjing, et al (5721)
The dynamics of soil respiration in a winter wheat field with plastic mulched-ridges and unmulched furrows	SHANGGUAN Yuxian, SHI Ripeng, HAN Kun, et al (5729)
Cattle dung composted by different methods had different effects on the growth and quality of soybean	GUO Liyue, LIU XueMei, ZHAN Lijie, et al (5738)
Nitrogen budget modelling at the headwaters of Urumqi River Based on the atmospheric deposition and runoff	WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, WANG Feiteng, et al (5747)
Evaluating the ecosystem sustainability of circular agriculture based on the energy theory: a case study of the Xingyuan circular agriculture demonstration site in Fuqing City, Fujian	ZHONG Zhenmei, WENG Boqi, HUANG Qinlou, et al (5755)
Effects of cold exposure and recovery on viability and energy consumption in the sub-adult female giant spiny frogs (<i>Paa spinosa</i>)	LING Yun, SHAO Chen, XIE Zhigang, et al (5763)
A comparison of night-interruption on diapause-averting among two populations of the cotton bollworm, <i>Helicoverpa armigera</i>	CHEN Yuansheng, TU Xiaoyun, CHEN Chao, et al (5770)
Effects of soil erosion control measures on soil organic carbon and total nitrogen in a small watershed	ZHANG Yanjun, GUO Shengli, NAN Yafang, et al (5777)
Comparative analysis of Lugu Lake watershed ecosystem function under different management authorities	DONG Rencai, GOU Yaqing, LI Siyuan, et al (5786)
Relationship between fish community diversity and environmental factors in the Lianjiang River, Guangdong, China	LI Jie, LI Xinhui, JIA Xiaoping, et al (5795)
Effect of dissolved oxygen level on metabolic mode in juvenile crucian carp	ZHANG Wei, CAO Zhendong, FU Shijian (5806)
Community composition of net-phytoplankton and its relationship with the environmental factors at artificial reef area in Xiangshan Bay	JIANG Zhibing, CHEN Quanzhen, SHOU Lu, et al (5813)
Emergency appraisal on the loss of ecosystem service caused by marine reclamation: a case study in the Taozi Bay	LI Ruiqian, MENG Fanping (5825)
Assessing the visual quality of urban waterfront landscapes: the case of Hefei, China	YAO Yumin, ZHU Xiaodong, XU Yingbi, et al (5836)
Review and Monograph	
Advances in ecological genomics	SHI Yongbin, LI Junmin, JIN Zexin (5846)
Advances in studies of ecological effects of ocean acidification	WANG Siru, YIN Kedong, CAI Weijun, et al (5859)
Advances in feeding ecology of <i>Acartia</i>	HU Simin, LIU Sheng, LI Tao, et al (5870)
Research progress on ammonia-oxidizing microorganisms in estuarine ecosystem	ZHANG Qiufang, XU Jirong, SU Jianqiang, et al (5878)
Recent progress in research on neutrophilic, microaerophilic iron(II)-oxidizing bacteria	LIN Chaofeng, GONG Jun (5889)
A comparison study on primary production in typical low-latitude seas (South China Sea and Bay of Bengal)	LIU Huaxue, SONG Xingyu, HUANG Honghui, et al (5900)
Advances in leaf maximum carboxylation rate and its response to environmental factors	ZHANG Yanmin, ZHOU Guangsheng (5907)
10-years of bird habitat selection studies in mainland China: a review	JIANG Aiwu, ZHOU Fang, QIN Yue, et al (5918)
Scientific Note	
The effects of incubation temperature on embryonic metabolism and hatchling behavior in the Red-banded Snake, <i>Dinodon rufonotatum</i>	SUN Wenjia, YU Xiao, CAO Mengjie, et al (5924)
Sensitivity analysis and dynamics of soil microbial biomass carbon, nitrogen and related parameters in red-yellow soil of tea garden with different fertilization practices	WANG Limin, QIU Shanlian, LIN Xinjian, et al (5930)
Effect of fertilizers on Cd uptake of two edible amaranthus herbs	LI Ningyu, LI Zhian, ZHUANG Ping, et al (5937)

《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 18 期 (2012 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 18 (September, 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