

# 不同演替阶段典型树种幼苗对酸胁迫 响应的高光谱监测

程苗苗<sup>1</sup>, 江 洪<sup>1,2,\*</sup>, 陈 健<sup>1</sup>, 余树全<sup>1</sup>, 宋晓东<sup>3</sup>, 王 彬<sup>1</sup>, 谢小赞<sup>1</sup>,  
郭 徵<sup>1</sup>, 江子山<sup>2</sup>

(1. 浙江林学院国际空间生态与生态系统生态研究中心, 杭州 311300; 2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093;  
3. 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021)

**摘要:**通过在为期 2a 的可控酸雨试验下对处于不同演替阶段的典型树种幼苗的高光谱测定, 得到不同梯度酸雨下各树种的叶片光谱反应曲线及相应叶片的生理生化参量。对测定的 3 种树种的叶片叶绿素含量及一阶导数光谱进行分析, 发现随着酸雨浓度的增加, 处于演替前期的先锋树种马尾松的幼苗叶绿素含量呈现增加趋势, 而处于演替中、后期的木荷和青冈幼苗叶绿素含量则呈现减少趋势; 随着试验时间的推移, 马尾松的红边位置呈现“红移”趋势, 其中 pH2.5 处理下的“红移”趋势较明显; 而木荷和青冈的红边位置则呈现不同程度的“蓝移”趋势。较长时期高浓度酸胁迫对先锋树种马尾松的幼苗生长有一定促进作用, 而对演替中期和后期树种木荷和青冈幼苗生长则主要表现为抑制作用。

**关键词:**亚热带树种; 演替; 酸胁迫; 高光谱; 红边

文章编号: 1000-0933(2009)11-5953-10 中图分类号: Q948 文献标识码: A

## Evaluation of stress in the seedlings of succession typical species induced by acid rain using hyperspectral remote sensing

CHENG Miao-Miao<sup>1</sup>, JIANG Hong<sup>1,2,\*</sup>, CHEN Jian<sup>1</sup>, YU Shu-Quan<sup>1</sup>, SONG Xiao-Dong<sup>3</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, XIE Xiao-Zan<sup>1</sup>, GUO Zheng<sup>1</sup>, JIANG Zi-Shan<sup>2</sup>

1 International Research Center of Spatial Ecology and Ecosystem Ecology, Zhejiang Forestry University, Lin'an 311300, China

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

3 Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 5953 ~ 5962.

**Abstract:** In order to revealing the influence of acid rain stress in succession species, the hyperspectral traits of three seedlings of *Pinus massoniana*, *Schima superba* and *Cyclobalanopsis glauca* were measured during two years. There were three acid rain stress treatments, include pH5.6, pH4.0 and pH2.5. The hyperspectral information is helpful to reveal the relationship between chlorophyll concentration and spectral reflectance in succession species under acid rain influence. The results indicated (1) Chlorophyll concentration of *Pinus massoniana* seedling in earlier succession stage showed the increased trend with the increasing of the simulated acid rain density, however the seedling of *Schima superba* and *Cyclobalanopsis glauca*, which are in middle and late succession stages showed the Chlorophyll concentration are decreased; (2) Along with the test period, the peak wavelength of red edge for the seedling of *Pinus massoniana* shifted to longer wavelengths but while *Schima superba* and *Cyclobalanopsis glauca* shifted to shorter wavelengths; (3) It may promote the seedling of *Pinus massoniana* growth and impacted the seedling of *Schima superba* and *Cyclobalanopsis glauca* growth with

**基金项目:** 国家科技部 973 资助项目 (No. 2002CB111504, 2002CB410811, 2005CB422208); 国家自然科学基金资助项目 (40671132); 国家科技部数据共享平台建设资助项目 (2006DKA32300-08)

**收稿日期:** 2008-12-29; **修订日期:** 2009-02-25

**致谢:** 李佳等参加有关实验工作, 特此致谢。

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongjiang.china@gmail.com

the high density and longer period acid rain stress.

**Key Words:** subtropical species; succession; acid rain stress; hyperspectral; red-edge

目前酸雨污染已经成为一个全球性的环境问题。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<sup>[1]</sup>。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<sup>[2]</sup>。酸雨对森林树种急性伤害症状与机理的研究已有较多报道,大部分的研究均侧重于单个指标研究<sup>[3~6]</sup>,而对不同演替阶段森林树种抗酸雨能力差异研究尚不多见。

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<sup>[6~11]</sup>。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<sup>[6~11]</sup>。高光谱技术将环境胁迫研究范围从个体水平发展到整个生态系统水平。本文利用高光谱遥感技术手段,研究酸雨胁迫下不同演替阶段树种叶片的高光谱反应特征,探寻不同植物在酸雨胁迫下的光谱反应模式,为大尺度酸雨胁迫遥感监测提供技术支持,也为亚热带地区植被恢复选择抗酸雨的树种提供科学依据,此外在酸雨区林木配置、物种保护方面也给出一定的参考价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料为亚热带森林演替先锋树种马尾松(*Pinus massoniana*)、过渡树种木荷(*Schima superba*)和顶级群落树种青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)3 种植物幼苗。

### 1.2 试验设计

2006 年 6 月下旬选择长势较好且基本一致的 2 年生幼苗材料,每种选 20 株,移栽于内径 22cm,高 27cm 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,按体积分数  $\text{SO}_4^{2-}:\text{NO}_3^- = 8:1$  配置母液,用去离子水稀释,配置 pH 值为 5.6(CK)、4.0、2.5 等 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。酸雨于 2006 年 7 月开始喷淋,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~2008 年 5 月。

### 1.3 光谱反射率、叶绿素和生长量指标测定

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。选取待测树种的 1 年生叶 30 片,分别对每片叶子采集 5 条光谱曲线,取平均后代表该片叶子的代表性光谱曲线。每隔 10min 对仪器做 1 次优化及参考板校正。光谱测量结束后,立即进行 SPAD-502 测定,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。生长量指标包括株高及地径,测量工具为游标卡尺和卷尺,与光谱反射率同步测定。

### 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<sup>[4]</sup>。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<sup>[12]</sup>:

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

其中,  $\lambda_i$  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 ~ 780nm 范围内的光谱反射率曲线(图 1),其定义如下<sup>[13]</sup>:

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

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;  $\lambda_{0g}$  为红光区域叶绿素吸收最大值所对应的光谱位置;  $\lambda_{pg}$  为红边波长位置;  $\sigma$  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 ~ 685nm 和 780 ~ 795nm 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 ~ 780nm 范围内利用最小二乘法估计另外两个模型参数  $\lambda_{0g}$  和  $\sigma$ <sup>[13]</sup>:

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

利用  $R_0$  和  $R_s$  两个参数在  $B(\lambda)$  和  $\lambda$  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  $\lambda_{0g}$  和  $\lambda$  分别为:

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

$\lambda_{pg}$  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 叶绿素含量与其生长状况关系

马尾松幼苗具有叶绿素含量最高值(图 2)。在本试验期间马尾松幼苗的叶绿素含量均随着时间呈增加趋势, 而木荷与青冈幼苗的叶绿素含量都呈现先增加后减少趋势。对比不同处理可见: 在 2006 年 8 月到 11 月份的试验期间, 马尾松幼苗在 pH2.5 处理下的叶绿素含量略低于 pH5.6 处理; 但在 2007 年 5 月到 2008 年 5 月的试验期间, pH2.5 处理下马尾松幼苗的叶绿素含量增加趋势显著, 且高于 pH5.6 处理。木荷幼苗在 pH2.5 处理的叶绿素含量低于 pH5.6 处理, 在 pH4.0 处理下无显著规律。青冈幼苗的叶绿素含量在 2006 年

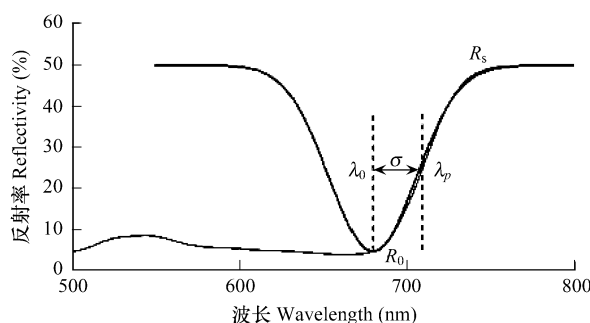


图 1 反高斯(Inverted-Gaussian, IG)模型模拟植被红边处的光谱反射率的最佳拟合及模型的光学参数<sup>[13]</sup>

Fig. 1 Best fit vegetation reflectance around the red edge position by the Inverted-Gaussian model and its parameters<sup>[13]</sup>

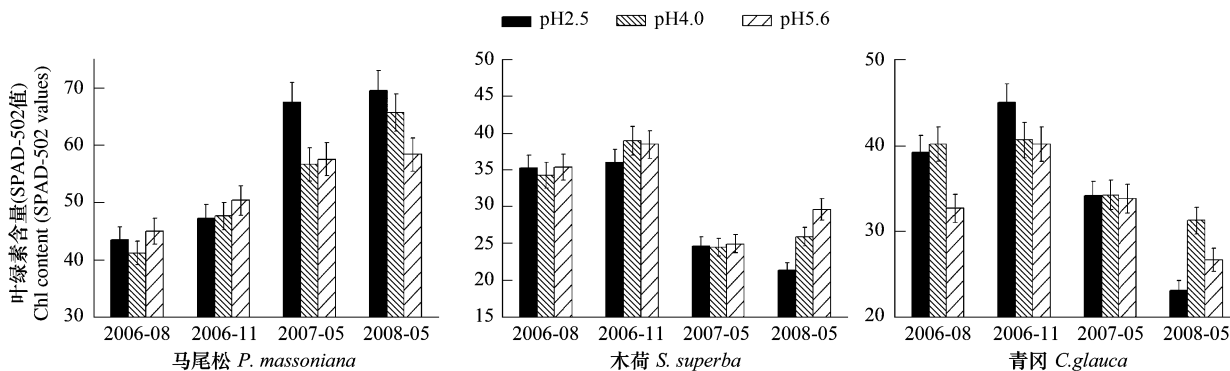


图 2 4 期试验中在 3 个梯度的模拟酸雨处理下各树种叶片叶绿素含量的对照

Fig. 2 Comparisons of chlorophyll concentration for each tree species under simulated acid rain treatment with three different pH value levels in total four experiments

8 月到 11 月试验期间 pH2.5 处理高于 pH5.6 处理;但在 2007 年 5 月到 2008 年 5 月的试验期间, pH2.5 处理下其叶绿素含量下降趋势显著,且低于 pH5.6 处理。

由图 3 可以看出, pH2.5 处理下马尾松幼苗的生长高度大于 pH5.6 处理。而木荷和青冈幼苗的生长高度规律则为 pH5.6 处理大于 pH2.5 处理。在不同酸胁迫条件下, 3 种植物幼苗的地径生长无显著规律。

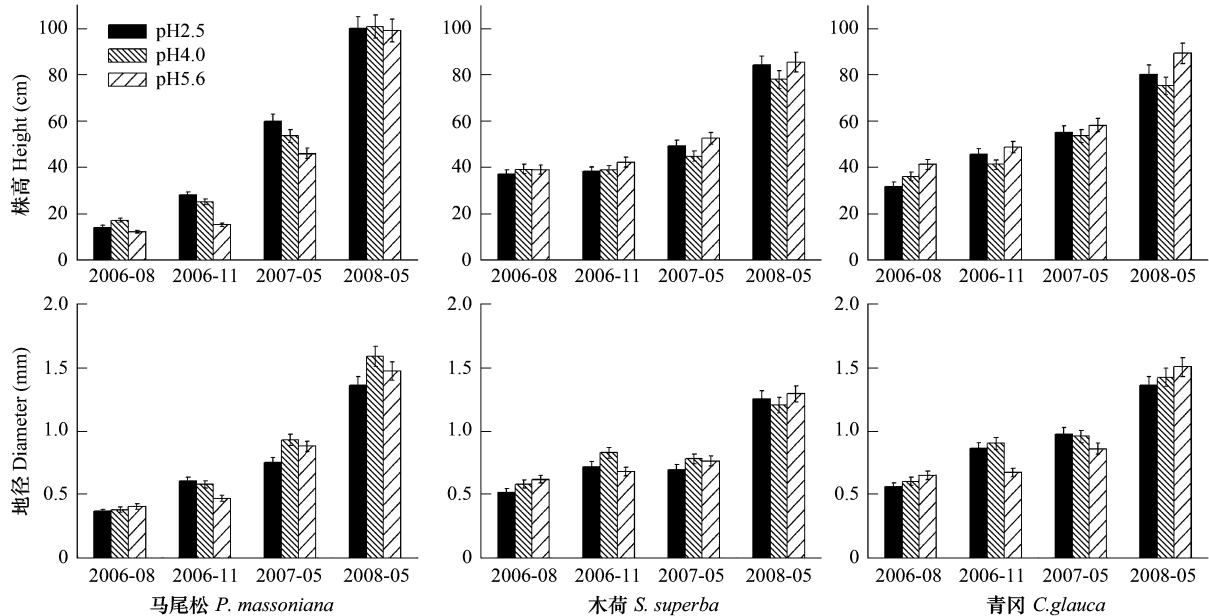


图 3 4 期试验中在 3 个梯度的模拟酸雨处理下各树种幼苗的株高和地径

Fig. 3 The height and diameter for each tree species under simulated acid rain treatment with three different pH value levels in total four experiments

叶绿素含量可表示植物的营养状况,叶绿素含量越高,叶片的氮含量也越多<sup>[6]</sup>;同时它作为植物受胁迫及外界环境因子干扰状态下的指示器,可以反映植物在演替阶段中生产力的高低<sup>[14]</sup>。而大量研究表明,处于不同演替阶段的植物对环境承受能力不同,所能承受的胁迫强度也不同<sup>[6]</sup>。对于本试验所选的 3 种植物,马尾松处于演替前期,是群落中的先锋种,这类植物的幼龄阶段具有较高的生产力和适应能力,因此它们的叶绿素含量相对较高,这与试验结果一致。在本试验中,3 种梯度的模拟酸雨均使马尾松幼苗的叶绿素含量增加,不同的是在 2006 年 8 月到 11 月的试验期间 pH2.5 处理下的叶绿素含量低于 pH5.6 处理,但在 2007 年 5 月到 2008 年 5 月的试验期间 pH2.5 处理下其叶绿素含量值高于 pH4.0 和 pH5.6。可见在马尾松幼苗时期,高浓度的酸雨(pH2.5)刺激其生长作用不明显,随着马尾松幼苗生长,高浓度酸雨显著地促进其生长,促进作用为 pH2.5 > pH4.0 > pH5.6(图 3)。而对于演替中期树种木荷来说,3 种梯度的模拟酸雨均使其幼苗叶绿素含量减少。2006 年 8 月到 11 月的试验期间, pH4.0 处理对其叶绿素含量增加的促进作用较明显,而促进其生长作用不明显。随着试验时间增加, pH2.5 处理木荷幼苗的叶绿素含量显著减少;在 2007 年 5 月到 2008 年 5 月的试验期间, pH4.0 和 pH5.6 处理下其叶绿素含量呈现增加趋势。可见木荷幼苗无法忍受长期高浓度酸胁迫,但能忍受长期中低浓度酸胁迫。青冈是亚热带地区群落优势种,其幼苗易受到环境因子干扰。在本试验中,酸雨环境下青冈幼苗的叶绿素含量呈现不同程度的下降趋势,其中 pH2.5 处理下其叶绿素含量减少趋势显著。在酸胁迫下,青冈幼苗对高浓度酸雨有高敏感性。

## 2.2 不同酸雨梯度下各树种光谱一阶导数分析

图 4 说明了不同演替阶段的树种在不同处理下其红边位置及反射率的变化情况。一阶导数图显示:红边(680~750nm)是由一个不对称的峰值与其他几个次要的峰值所组成,这些峰值反映了植物在不同处理水平下的显著特征<sup>[11,15,16]</sup>。如图可见,3 种树种的红边主峰值落在 700~715nm 左右,在 2006 年 8 月的试验中, 750nm 处有一个辅助峰值,但随着时间增加该峰逐渐消失。此外在本实验中 702nm 左右的峰值也具有显著

特征,其他研究人员也发现类似的特征<sup>[7,9,10,15]</sup>。部分研究表明在红边区域(680~730nm)上一般有两个潜在的峰值,前峰落在690~710nm左右,后峰落在720~730nm。但是随着胁迫的时间和强度增加,其一阶导数中双峰的特征将逐渐消失<sup>[15,16]</sup>。当植物生长旺盛、叶绿素含量多时其红边反射率的一阶导数曲线的主峰为后峰,前峰逐渐消失;反之,则曲线主峰为前峰,后峰峰值逐渐变小<sup>[16]</sup>。如图所示,在前两期试验中,其一阶导数在702nm左右的峰值较为突出,在725nm左右有一个不很明显的肩值,随着试验时间的增加,这个辅助的肩的特征逐渐消失,表现为在702nm左右有突出峰的特征。3个树种相比可见:随着酸胁迫时间和强度的增加,马尾松在702nm处的峰值相对较平缓,且在整个试验过程中其肩的特征较明显;而木荷和青冈在702nm处峰值突出,其肩的特征基本消失,峰值愈加尖锐。结合图3可见在酸胁迫下,马尾松幼苗叶绿素含量较高且生长较好,受酸胁迫影响较小;而木荷和青冈幼苗则表现叶绿素含量减少、生长受抑制现象,受酸胁迫的影响严重。

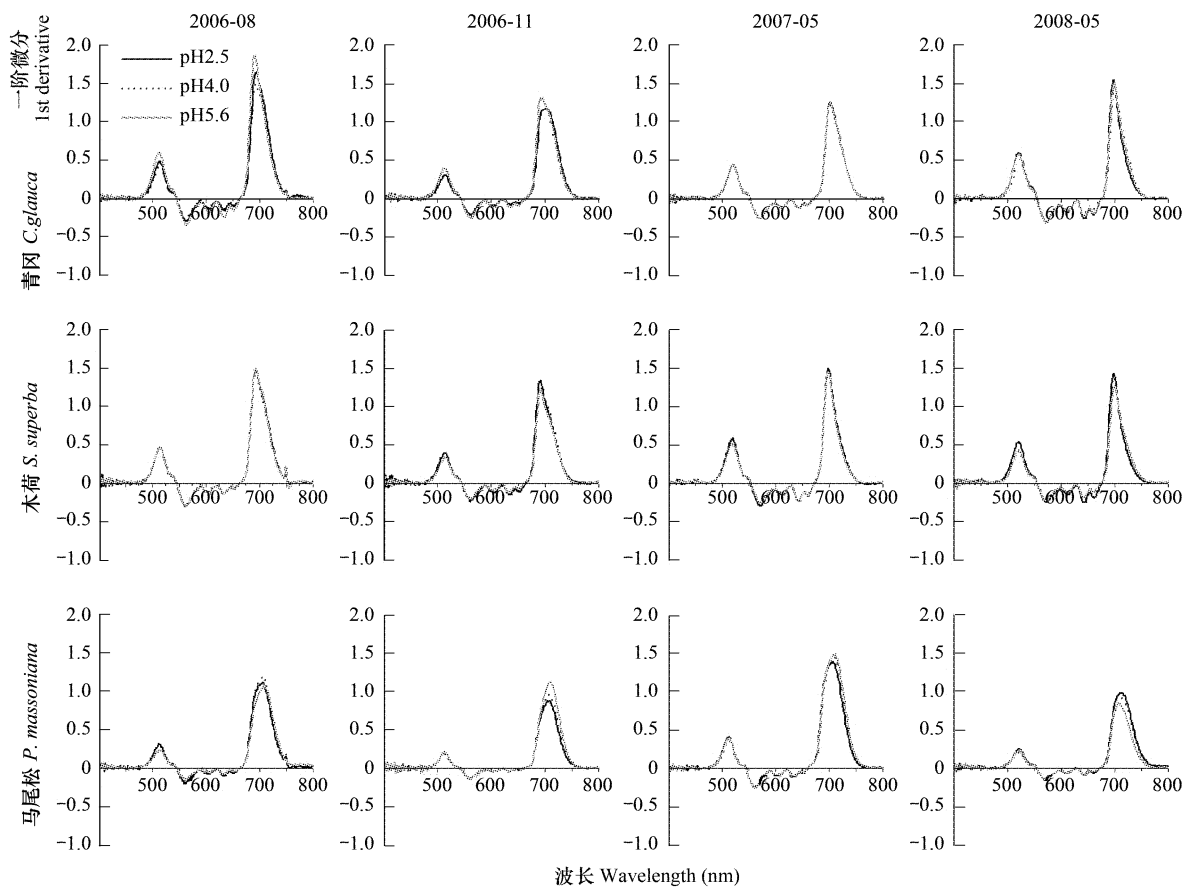


图4 3个树种4期试验中各模拟酸雨处理下的一阶导数分析

Fig. 4 The first derivative spectrum reflectance for the three tree species with three simulated acid rain treatment in four experiments, respectively

图5为700~750nm的光谱一阶导数特征。如图可见,马尾松的一阶导数曲线比较平缓。在2006年8月到11月的试验期间,马尾松一阶导数曲线的峰值为后峰,在2006年8月和2006年11月试验期间其肩的特征比较明显;同时在峰值的短波方向有一个明显的肩,而在2007年5月到2008年5月的试验期间,这一特征逐渐消失。但是其峰值所对应的光谱值随着时间的推移逐渐增加。木荷的一阶导数曲线峰值为前峰,在2006年8月到11月的试验期间也呈现肩的特征,但是其肩的特征出现在峰值的长波方向,而这一特征随着试验时间的推移而逐渐消失。值得注意的是,木荷的一阶导数曲线越来越陡峭,其峰值更加明显,峰值的反射值也逐渐增加;青冈的一阶导数曲线与木荷基本相似,但是其峰值所对应的波长随着时间的推移呈先增加后减少趋势。

通常用反射率曲线一阶导数谱峰值波长的增加来表示红边的“红移”<sup>[17]</sup>。从图5可以看出,随着时间的推移,马尾松的一阶导数峰值逐渐呈现“红移”趋势,马尾松幼苗生长较好,对酸胁迫具有较强的承受能力;木

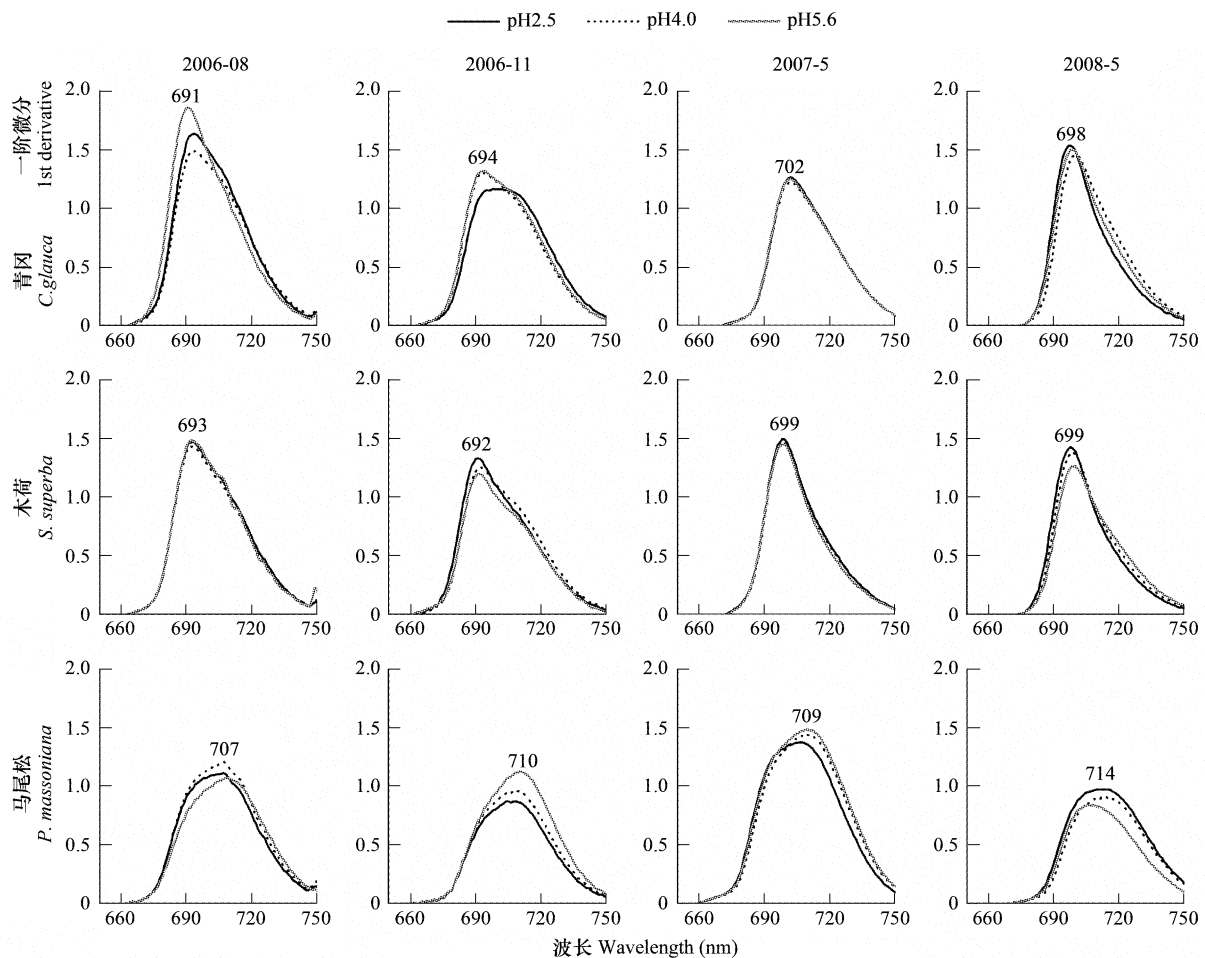


图5 3种树种在四期试验中各个模拟酸雨处理下红边区域的一阶导数分析

Fig. 5 The first derivative spectrum curves of red-edge reflectance for the three tree species with three simulated acid rain treatment in four experiments, respectively

荷的一阶导数峰值呈现先“蓝移”后“红移”趋势,其幼苗对酸胁迫的承受能力相对较弱,但适应性较强;而青冈的一阶导数曲线峰值则先“红移”后“蓝移”,可见青冈幼苗对酸雨的承受能力最弱,且短时间的酸雨胁迫可促进其幼苗的生长,长时间的酸雨胁迫则抑制其生长。

### 2.3 红边特征定量分析

研究表明,叶绿素 a 受模拟酸雨的影响要大于叶绿素 b<sup>[9]</sup>。 $R_o$  位于红光区域叶绿素 a 的吸收峰值区,叶绿素含量水平降低所导致对入射光吸收的减少将会使得该区域内的光谱反射率呈现上升的趋势。在表 1 中,3 个树种的 pH2.5 处理下的  $R_o$  值基本均低于 pH5.6 处理。pH4.0 与 pH2.5 相比较,呈现这样的规律:在处理前期 pH4.0 的  $R_o$  反射率基本高于 pH2.5,而在处理后期却呈相反的规律,pH4.0 处理的  $R_o$  反射率基本低于 pH2.5。在大多数情况下,pH4.0 处理的光谱反射率低于 pH5.6。联系图 1 的叶绿素含量的对比不难看出,随着时间的推移,3 个处理的  $R_o$  值均呈递减趋势,其中青冈递减趋势较明显,马尾松和木荷递减趋势较平缓。

比较 pH2.5 与 pH5.6 处理间  $R_o$  值,并结合图 1 中叶绿素含量可见,叶绿素含量与其对应的  $R_o$  值之间呈现明显的负相关关系:即对于 3 个树种来说,较强的酸雨在一定程度上增加了其叶绿素含量并降低叶绿素红光吸收峰附近的光谱反射率。从整个试验期来看,不同处理下各树种的  $R_o$  值均有不同程度的下降:即在较长时间内的各梯度酸雨胁迫下,各树种在一定程度上均降低叶绿素红光吸收峰附近的光谱反射率,表明其叶绿

素含量有不同程度的增加,这可能是酸雨中氮素的累积施肥效应所致<sup>[18]</sup>。

| 表 1 3 个树种反高斯模型参数 $R_o$ 的比较 (nm)                                               |                                      |       |       |       | 表 2 3 个树种反高斯模型的 $\lambda_{pg}$ 值比较 (nm)                                                |                   |        |        |        |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------|--------|--------|
| Table 1 Comparisons of parameter $R_o$ in IG model for the three tree species |                                      |       |       |       | Table 2 Comparisons of parameter $\lambda_{pg}$ in IG model for the three tree species |                   |        |        |        |
| 树种<br>Species                                                                 | 模拟酸雨处理 Simulated acid rain treatment |       |       |       | 树种<br>Species                                                                          | $\lambda_{pg}$    |        |        |        |
|                                                                               | 试验时间<br>Test time                    | pH2.5 | pH4.0 | pH5.6 |                                                                                        | 测试时间<br>Test time | pH2.5  | pH4.0  | pH5.6  |
| 马尾松<br><i>P. massoniana</i>                                                   | 2006-08                              | 5.76  | 5.95  | 5.46  | 马尾松<br><i>P. massoniana</i>                                                            | 2006-08           | 699.95 | 700.54 | 702.57 |
|                                                                               | 2006-11                              | 5.33  | 6.03  | 5.59  |                                                                                        | 2006-11           | 702.41 | 703.09 | 704.59 |
|                                                                               | 2007-05                              | 5.31  | 5.15  | 5.46  |                                                                                        | 2007-05           | 701.91 | 704.04 | 704.02 |
|                                                                               | 2008-05                              | 4.42  | 4.26  | 4.72  |                                                                                        | 2008-05           | 710.17 | 710.96 | 708.62 |
| 木荷<br><i>S. superba</i>                                                       | 2006-08                              | 7.73  | 7.57  | 8.62  | 木荷<br><i>S. superba</i>                                                                | 2006-08           | 695.23 | 694.75 | 694.25 |
|                                                                               | 2006-11                              | 5.01  | 6.21  | 5.89  |                                                                                        | 2006-11           | 696.67 | 698.22 | 696.76 |
|                                                                               | 2007-05                              | 6.37  | 6.44  | 6.45  |                                                                                        | 2007-05           | 701.55 | 701.55 | 700.80 |
|                                                                               | 2008-05                              | 4.72  | 4.58  | 5.18  |                                                                                        | 2008-05           | 697.60 | 696.95 | 698.24 |
| 青冈<br><i>C. glauca</i>                                                        | 2006-08                              | 8.25  | 8.49  | 11.31 | 青冈<br><i>C. glauca</i>                                                                 | 2006-08           | 694.36 | 696.50 | 691.86 |
|                                                                               | 2006-11                              | 6.53  | 6.80  | 6.89  |                                                                                        | 2006-11           | 701.40 | 699.59 | 699.79 |
|                                                                               | 2007-05                              | 3.86  | 3.86  | 3.97  |                                                                                        | 2007-05           | 705.82 | 706.06 | 705.90 |
|                                                                               | 2008-05                              | 4.66  | 3.85  | 4.76  |                                                                                        | 2008-05           | 700.66 | 704.11 | 702.35 |

$\lambda_{0g}$  和  $\lambda_{pg}$  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: $\lambda_{0g} = \lambda_{pg} + \sigma$ 。本文选取  $\lambda_{pg}$  进行分析,模型计算结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,2006 年 8 月到 11 月的试验期间,马尾松幼苗在 pH2.5 处理下的  $\lambda_{pg}$  值小于 pH5.6 处理,但是在 2008 年 5 月 pH2.5 处理的  $\lambda_{pg}$  值大于 pH5.6 处理,pH4.0 处理无显著规律;而木荷和青冈则呈现相反规律:2006 年 8 月到 11 月的试验期间,其幼苗在 pH2.5 处理下的  $\lambda_{pg}$  值大于 pH5.6 处理,但是在 2008 年 5 月其  $\lambda_{pg}$  值为 pH2.5 处理小于 pH5.6 处理,pH4.0 处理无显著规律。

在 2006 年 8 月到 11 月的试验期间,随着模拟酸雨强度的增加,马尾松幼苗的红边位置出现“蓝移”现象,但在 2007 年 5 月到 2008 年 5 月的试验期间,其红边位置出现“红移”现象。结合图 3 可见在 2006 年试验期间,高浓度酸雨对马尾松幼苗的生长有不同程度的抑制作用,但在 2007 年到 2008 年 5 月的试验期间高浓度酸雨对马尾松幼苗生长则起到促进作用。在这一过程中马尾松幼苗呈现出较好的抗酸性,这与其演替阶段特征一致。相反对于木荷和青冈来说,在 2006 年试验期间,随着模拟酸雨强度的增加,其红边位置相应地出现“红移”现象;但在 2007 年到 2008 年 5 月的试验期间,其红边位置出现“蓝移”现象。这表明在 2006 年试验期间,木荷和青冈幼苗对高浓度酸雨具有一定的承受能力,但随着酸胁迫时间的持续增加,木荷和青冈幼苗在模拟酸雨胁迫中表现出叶绿素含量下降、生长状况差的特征。与其它两个处理相比,pH4.0 处理下 3 个树种的红边均呈现不同水平的“红移”现象,均表现出较好的生长特性。

## 2.4 不同酸雨梯度下红边反射率特征波长分析

在红边反射率的研究中通常用  $\lambda_{pr}$  的减少来表现红边的蓝移<sup>[17]</sup>。3 种植物的平均红边反射率特征波长  $\lambda_{pr}$ 、 $\lambda_{pg}$ 、 $\lambda_{0g}$  随时间的变化曲线如图 6 所示。由图可见  $\lambda_{pr}$ 、 $\lambda_{pg}$ 、 $\lambda_{0g}$  具有基本相同的时间变化特征。2006 年试验期间,马尾松的  $\lambda_{pr}$ 、 $\lambda_{pg}$ 、 $\lambda_{0g}$  呈上升趋势(红移),但是在 2006 年 11 月到 2007 年 5 月这一试验期间,这 3 个特征波长呈现缓慢下降,随后又逐渐增加,其整体趋势是增加,说明马尾松幼苗对酸雨的耐受性较强。值得注意的是,pH2.5 处理的其增长趋势较明显,而 pH5.6 处理下 3 个特征波长的变化趋势不显著,2007 年 5 月到 2008 年 5 月的试验期间  $\lambda_{pr}$  呈现明显的下降趋势,可见 pH2.5 对马尾松幼苗促进其生长作用较明显。木荷的  $\lambda_{pr}$ 、 $\lambda_{pg}$ 、 $\lambda_{0g}$  趋势是先上升(红移)后下降(蓝移),但是下降趋势缓慢,随着胁迫时间的增加,不同处理下木荷幼苗均呈现不明显的生长抑制现象,其红边位置均呈现蓝移现象,pH2.5 蓝移程度大于 pH5.6,表明木荷幼苗对酸雨胁迫具有一定的耐受性,但是不能忍受长时间的酸雨胁迫。青冈的  $\lambda_{pr}$ 、 $\lambda_{pg}$ 、 $\lambda_{0g}$  也呈现先上升(红移)

后下降(蓝移)的趋势,而这一趋势较明显。在2006年8月到2007年5月这一时期,其红边位置红移趋势较明显,3个处理对青冈幼苗生长有较好促进作用,其中促进强度为  $\text{pH}2.5 > \text{pH}5.6 > \text{pH}4.0$ ;在2007年5月到2008年5月这一试验期间,3个处理对青冈幼苗生长均起到抑制作用,抑制强度为  $\text{pH}2.5 > \text{pH}5.6 > \text{pH}4.0$ 。可见, $\text{pH}2.5$ 对青冈幼苗生长状况影响最大,短时期的酸雨胁迫促进其幼苗的生长,但是随着胁迫时间的增加,其生长抑制现象也较明显。其中  $\text{pH}4.0$ 处理对青冈幼苗生长影响最小。

3个树种比较可见,马尾松幼苗对酸雨胁迫的耐受性较好,能长时期忍受较强酸雨胁迫,木荷和青冈幼苗对酸雨的耐受性较差,其中青冈幼苗耐受性最弱。3个处理比较可见,短时期内,不同处理对植物生长均具有一定的促进作用,促进作用的大小因植物不同而不同。短时期内, $\text{pH}2.5$ 梯度对3种树种幼苗的生长促进作用显著, $\text{pH}4.0$ 对植物生长抑制作用较小。

### 3 结论与讨论

本研究基于ASD便携式光谱仪对亚热带地区各个演替阶段代表树种幼苗的光谱特征进行测量,并结合SPAD-502叶绿素相对含量值和生长量指标,研究了在中国亚热带地区酸雨对各演替阶段典型树种幼苗的胁迫模式。

(1)不同演替阶段树种在酸胁迫的影响下其叶绿素含量不同。比较本试验所选的3种树种,马尾松处于演替前期,因此它们的叶绿素含量相对较高。在不同梯度的酸胁迫环境下,马尾松的叶绿素含量均呈递增趋势,可见酸胁迫对马尾松生长状况的影响较小。而对于处于演替阶段的中、后期的木荷和青冈来说,其叶绿素含量均呈现不同程度的下降趋势。此外不同浓度模拟酸雨对3种树种幼苗叶绿素含量影响不同。高浓度酸雨能促进马尾松幼苗叶绿素含量的增加,且随着酸胁迫时间的增加促进作用显著。而木荷幼苗则不能适应长期高浓度酸胁迫,但中低浓度酸雨对其叶绿素含量影响较小。对于青冈幼苗来说,高浓度酸雨对其影响显著:试验初期(2006年8月到2006年11月)表现为促进其叶绿素含量增加,但在2007年到2008年5月的试验期间,高浓度酸雨对其生长抑制现象较明显。

一般而言,胁迫会导致植物叶片的叶绿素含量的下降<sup>[5,6,19]</sup>。但在本试验证实对于演替前期植物马尾松树种,模拟酸雨在一定程度上促进其叶绿素含量的升高。对于随模拟酸雨强度增加,某些植物叶片叶绿素含量增加这一现象,一般认为这是由于酸雨中所含的 $\text{NO}_3^-$ 所带来的氮施肥效应所致<sup>[6,18]</sup>。

(2)不同演替阶段树种在酸胁迫影响下其光谱特征不同。根据其红边特征来看,随着试验时间的推移,马尾松的红边位置呈现“红移”趋势,其中 $\text{pH}2.5$ 处理下的“红移”趋势较明显;而木荷和青冈的红边位置则呈

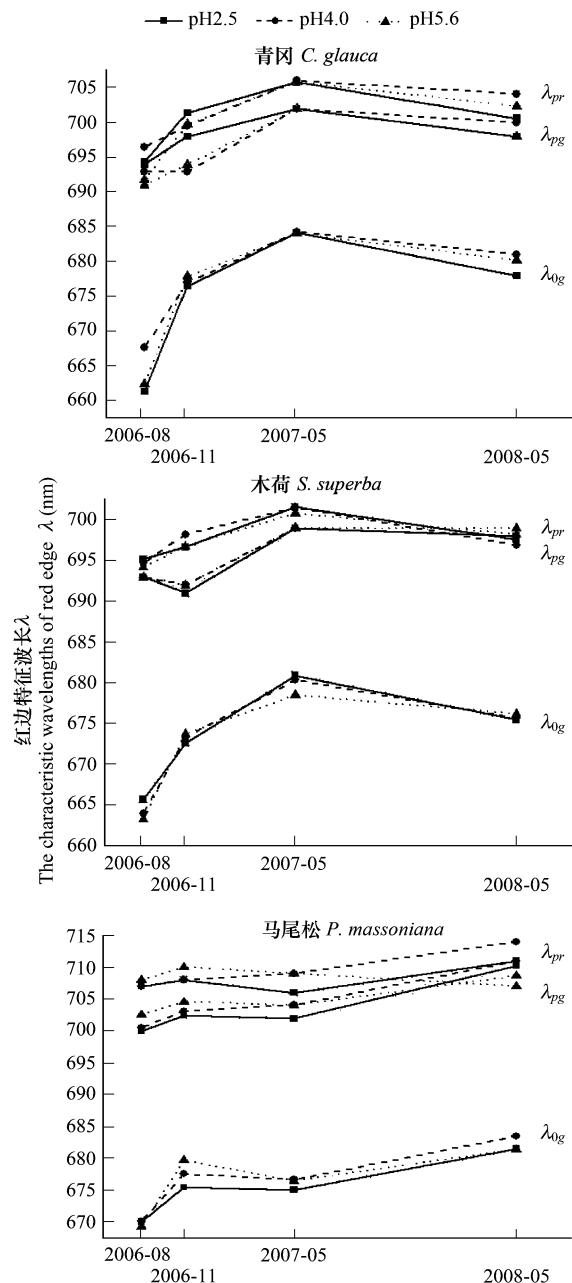


图6 3种树种红边反射率特征波长随时间的变化

Fig. 6 Temporal curves of characteristic wavelengths of red-edge for three tree species

现不同程度的“蓝移”趋势。作为演替前期树种马尾松幼苗能够适应较长时期高浓度酸雨胁迫,但是作为演替中、后期树种,木荷和青冈幼苗对短时期内的高浓度酸雨具有一定的耐受性,而不能忍受较长时期(2a)的高浓度酸雨。

在以往研究中,植物光谱曲线一阶导数红边的双峰位置为 705nm 和 725nm 左右<sup>[9]</sup>,但是在本试验中其双峰特征不明显,但是从曲线的肩特征亦可见与双峰相似特征;此外,本试验中其双峰所对应波长落在 692nm 和 710nm 左右,这与以往的研究不同。

(3)本文讨论了酸雨胁迫对中国亚热带主要演替阶段典型树种幼苗的影响。本实验仅表明在大棚试验范围内通过 ASD 便携式光谱仪监测酸雨对植物胁迫是可能的;但是在大规模度的森林背景下,如何应用卫星遥感手段监测酸雨对森林的影响将是今后的研究主题。此外本试验未考虑土壤中 pH 值变化对植物生长的影响,在以后试验中需要进一步研究。

## References:

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] Feng Z W, Norio Ogura. impacts and control strategies of acid deposition on terrestrial ecosystems in chongqing area, China: overviews of the cooperative study between japan and chian. *Advances in Environmental Science*, 1998, 6(5):1—8.
- [ 3 ] Tian D L, Huang Z Y, Fu X P. Effects of simulated acid rain on mineral elements content in leaves of *Cinnamomum camphora* seedling in artificial potted environment. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3):1100—1105.
- [ 4 ] 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, 6:16—20.
- [ 5 ] Fan H B. Effects of Simulated Acid Rain on Seedling Growth of Five Hardwood Species. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1996, 16(4):289—292.
- [ 6 ] Song X D, Jiang H, Yu S Q, *et al.* 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.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] Carter G A. Responses of Leaf Spectral Reflectance to Plant Stress. *American Journal of Botany*, 1993, 80(3):239—243.
- [ 9 ] 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, 92:207—217.
- [ 10 ] Richard J. Ellis, Peter W. Scott. 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):118—130.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] Lwamoto M. Nondestructive Quality Measurement of Food by Near Infrared Spectroscopic Technique, *Japan Soc Food Sci Technol*, 1980, 27(9):464—472.
- [ 13 ] Miller J. R, Hare E. W, Wu J. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance 1. An inverted-Gaussian reflectance model. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(10):1755—1773.
- [ 14 ] Pu R L, Gong P. *Hyperspectral remote sensing and its applications*. Bering: Higher Education Press, 2000. 52—78
- [ 15 ] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Mohammed G H, Noland T L, & Sampson P H. Vegetation stress detection through chlorophyll a + b estimation and fluorescence effects on hyperspectral imagery. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31:1433—1441.
- [ 16 ] Zarco-Tejada P J, Pushnik J C, Dobrowski S, Ustin S L. Steady-state chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative reflectance and double-peak red-edge effects. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84: 283—294.
- [ 17 ] Horler D N H, Dockray M, Barber J. The Red Edge of Plant Leaf Reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 1983, 4:273—288.
- [ 18 ] Liu J X. Current and future study about effects of acid deposition on forest ecosystems. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(5):113—117.
- [ 19 ] Feng Z W. Impacts and Control Strategies of Acid Deposition on Terrestrial Ecosystems in China. *Engineering Science*, 2000, 2(9):5—11.

## 参考文献:

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] 冯宗炜. 重庆酸雨对陆地生态系统的影响和控制对策. 环境科学进展, 1998, 6(5):1~8.
- [ 3 ] 田大伦, 黄智勇, 付晓萍. 模拟酸雨对盆栽樟树 (*Cinnamomum camphora*) 幼苗叶矿质元素含量的影响. 生态学报, 2007, 27(3):1100~1105.
- [ 4 ] 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, 6:16~20.
- [ 5 ] 樊后保. 模拟酸雨对 5 种阔叶树幼苗生长的影响. 福建林学院学报, 1996, 16(4):289~292.
- [ 6 ] 宋晓东, 江洪, 余树全等. 亚热带典型常绿阔叶树种叶片叶绿素含量的高光谱研究. 生态学报, 2008, 28(5):1959~1963.
- [ 11 ] 蒋金豹, 陈云浩, 黄文江. 用高光谱微分指数监测冬小麦病害的研究. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(12):2475~2479.
- [ 14 ] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京:高等教育出版社, 2000. 52~78.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策. 中国工程科学, 2000, 2(9):5~11.