

# 模拟酸雨不同水平下杜英和山核桃的高光谱特点

谢小赞<sup>①</sup>, 江洪<sup>①,②</sup>, 宋晓东<sup>③</sup>, 周国模<sup>①</sup>, 余树全<sup>①</sup>, 王彬<sup>①</sup>

(<sup>①</sup> 浙江林学院国际空间生态与生态系统研究中心, 杭州 311300;

<sup>②</sup> 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093;

<sup>③</sup> 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361003)

**摘要:**通过模拟酸雨大棚试验,测定了3个酸雨梯度下4个时期杜英和山核桃高光谱反射率以及对应的叶绿素相对含量(SPAD相对值),并利用反高斯模型拟合红边光谱曲线,构建红边位置 $\lambda_p$ 及红边宽度等光谱特征参量。结果表明:在pH较低的酸雨处理下杜英的叶绿素含量有一定的升高,而山核桃则是呈现下降的趋势;在可见光区,杜英在pH5.6处理下的平均光谱反射率要高于pH2.5的处理;而山核桃在pH5.6处理下的平均光谱反射率普遍要低于pH2.5的处理;杜英红光区域叶绿素吸收最小反射率值 $R_0$ 在pH5.6的处理要低于pH2.5的处理,山核桃相反;杜英的 $\lambda_p$ 值表明其反射率光谱曲线发生了“红移”现象,而山核桃则产生了“蓝移”。这表明或可建立叶片的光谱反射率同酸雨危害程度之间的定量或定性关系。

**关键词:**酸雨;高光谱;杜英;山核桃;SPAD;红边

**doi:**10.3969/j.issn.1000-3177.2010.01.007

**中图分类号:**TP79, Q945, Q948      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-3177(2010)01-0032-07

## 1 引言

随着人类活动增多、工业的大生产以及大量使用化石燃料等原因,大量的CO<sub>2</sub>排入大气圈,全球的CO<sub>2</sub>浓度不断上升,随之而来的是酸雨问题的不断加重,使其已成为一个世界性的环境问题。酸雨不仅使河湖水酸化、土壤酸化、使森林植被、生态环境受到破坏,还会对人类的健康造成危害<sup>[1~2]</sup>。中国的酸雨问题也非常严重,受酸雨影响的面积已占国土面积的40%,现已成为仅次于欧洲和北美的世界第三大酸雨区<sup>[3~5]</sup>。位于亚热带地区的浙江省,由于工业经济发达,酸雨污染情况不容乐观。监测结果表明,浙江省的酸雨属硫酸型酸雨,其危害严重并呈逐年加剧的态势,据浙江省环境监测中心站统计,2003年全省降水pH年均值为4.5,平均酸雨率为84.6%,且分布面积呈逐渐扩大的趋势<sup>[6~7]</sup>。

酸雨胁迫会使像植物叶片叶绿素含量等比较敏感的生化参数发生相应的变化,并通过叶片光谱反射率的变化得以表现出来,其在可见光部分变化尤

为明显<sup>[8~9]</sup>。通过测量,可以建立其叶片(冠层)的光谱反射率同酸雨危害程度间的定量或定性关系,在理想状态下(其他环境因子基本一致的前提下),将有助于利用遥感手段对酸沉降危害严重地区的污染分布状况从空间上进行监测。随着高光谱遥感技术的发展,使得遥感可以在光谱维上展开,能直接对地物进行微弱光谱差异的定量分析,在植被遥感研究与应用中表现出强大的优势<sup>[10]</sup>。

本实验中选用常绿阔叶树种杜英和落叶阔叶树种山核桃作为实验材料,研究其在模拟酸雨作用下的叶绿素含量及其光谱反射率的变化规律,这将有助于监测酸雨胁迫下的退化森林生态系统的恢复和重建。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验地概况及试验材料

试验地设在浙江省杭州临安市浙江林学院东湖校区(119°44'E, 30°16'N),海拔40m,属中纬度北亚热带季风气候,温暖湿润,四季分明,具有春多雨、夏湿热、秋气爽、冬干冷的气候特征,全年降雨量

收稿日期:2009-02-13      修订日期:2009-07-30

基金项目:科技部973项目(2005CB422207, 2005CB922208);科技部数据共享平台建设项目(2005DKA32306);科技部国际合作项目(20073819);浙江省重大科技专项项目(2008C13G2100010, 2006C12060)。

作者简介:谢小赞(1985~),男,浙江温州人,硕士研究生,主要从事森林生态与遥感应用研究。

E-mail: xiaozanxie@foxmail.com

1628.6mm, 历年平均气温为 15℃, 历年平均日照时数为 1939 小时, 无霜期约为 234 天。

供试材料为杜英和山核桃, 山核桃是该地区重要的经济树种, 有研究表明其对酸雨较为敏感<sup>[11]</sup>, 于 2006 年 6 月下旬选取其长势大致相同的二年生小苗, 移栽于内径 22cm, 高 27cm 的花盆中, 每盆种植一株小苗, 共计约 60 盆植株, 将其置于学校大棚内。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 试验设计

根据浙江地区酸雨的监测资料及其自然降水化学成分测定结果<sup>[6]</sup>, 本研究中选择 pH5.6 作为对照处理, 酸雨配置方法借助 pHSH-2C 型精密酸度计测定, 按  $H_2SO_4:HNO_3(V/V)8:1$  的比例配制母液, 用去离子水进行稀释, 然后配制 pH 值为 5.6、4.0、2.5 共 3 个模拟酸雨梯度。每种植物每个梯度约 5~6 个重复。根据浙江临安地区常年月平均降雨量喷淋酸雨, 酸雨从 2006 年 7 月开始喷淋, 喷淋的频率为每周 2 次(即一个月 8 次), 每次约 18.75mm。

### 2.2.2 测量仪器

光谱仪采用美国 ASD 公司的 ASD FieldSpec Pro FR™ 野外便携式光谱仪。FieldSpec Pro FR™ 的采样波长范围在 350nm~2500nm 之间, 其光谱分辨率在 350nm~1000nm 和 1000nm~2500nm 间分别为 3nm 和 10nm。叶绿素相对含量的测定采用日本 MINOLTA 生产的手持式叶绿素计 SPAD-502。

### 2.2.3 光谱的测定

于 2006 年 8 月、11 月, 2007 年 5 月和 2008 年 5 月分别对供试材料进行测量。每个不同梯度选取 5 棵植株, 每株选取 6 片叶子, 利用 FieldSpec Pro FR™ 的植物专用探头对准叶片, 确保叶片充满探头的视场, 对每个样品同时采集 10 条光谱曲线, 取平均后作为该样品的代表性曲线。每隔 10 分钟左右用  $BaSO_4$  白板对仪器进行校正。

### 2.2.4 叶绿素含量的测定

光谱测试结束后, 马上用手持式叶绿素仪 SPAD-502 测量样品叶片的叶绿素含量相对值。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)大致等间距地读取 10 个 SPAD-502 的读数, 取平均后作为该样品的叶绿素含量相对值加以记录。

## 2.3 数据的分析

本论文采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 13.0 数据统计分析软件对数据进行处理, 采用 Sigmaplot 10.0 和 origin 7.0 软件辅助作图。

## 3 结果

### 3.1 叶绿素相对含量 SPADR 及生长状况变化

叶绿素是植物正常进行光合作用的最重要的色素, 其含量的高低可以反映植物的营养状况。传统测量叶绿素含量的方法是采用破坏性采样, 利用化学溶液萃取色素, 然后根据不同色素在不同波长处吸光度的不同, 利用分光光度计测定叶绿素 a、b 的含量<sup>[12~13]</sup>。但是这种测量方法费时费力, 并且在野外条件下样品的保存及运输都存在一定的困难。为了能够快速、无损及大面积地测量植被色素, 基于植物叶片的反射和吸收光学特性, 目前已经有一些比较成熟的仪器和方法应运而生了。日本 MINOLTA 生产的手持式叶绿素计 SPAD-502, 便是一类很好的测量仪器。该仪器通过测量叶片在红光(650nm)及近红外(940nm)处的吸收率, 能够计算得到一个叶绿素含量的相对值(无单位), 也称绿色度<sup>[14]</sup>。艾天成等<sup>[15~16]</sup>在测定了水稻、棉花、大豆等的叶绿素含量及其 SPAD 值后, 确定了 SPAD 值与叶绿素含量的相关函数, 发现二者相关性达到了极显著水平; 宋晓东等<sup>[17]</sup>对木莲、细叶青冈、山核桃等的叶片叶绿素含量与 SPAD 值的研究也表明两者之间存在较好的相关性, 这些研究表明用 SPAD-502 进行叶绿素的快速测定是有效且可信的。

图 1 是酸雨大棚四期实验中三个模拟酸雨梯度处理下的杜英和山核桃叶片叶绿素含量 SPADR 对比(SPAD-502 值)。从图中可以看到, 杜英的值相对要高于山核桃的值。对比 pH2.5 和 pH5.6 两个处理的叶绿素含量, 杜英在 pH2.5 处理下的叶绿素含量要高于 pH5.6 的处理; 而山核桃则是相反, 其在 pH2.5 处理下的叶绿素含量要低于 pH5.6 的处理。杜英在 pH4.0 处理下的叶绿素含量跟其余两个梯度处理下的叶绿素含量关系不是很明确; 山核桃在 pH4.0 处理下的叶绿素含量则一般是要高于 pH2.5 的处理。随着试验时间的推移, 植物逐渐生长成熟, 不同处理下的 SPADR 差值逐渐减少。

一般植物在遭受胁迫的状态下其叶片的叶绿素含量通常会呈降低的趋势<sup>[18]</sup>。对于酸雨胁迫而言, 通常的模拟实验结果也往往认为酸雨胁迫会导致植物叶片的叶绿素含量下降。文献报道的如经济林树种<sup>[19]</sup>及阔叶树<sup>[20~21]</sup>、水稻<sup>[22]</sup>等实验结果均表明在 pH 较低的酸雨处理下其叶绿素含量值会出现一定程度的降低。相应地也有一些实验结果如冯宗炜、刘菊秀等<sup>[23~24]</sup>表明, 对于一些植物, 模拟酸雨可在

一定程度上提高其叶绿素含量。一般认为这些在酸雨胁迫下产生的叶绿素含量的变化差异可以用酸雨中含有  $\text{NO}_3^-$  带来的施肥效应来解释。从我们的实验结果来看,根据植物种类的不同其对于酸雨的反

应强度也不尽相同,叶绿素含量随酸雨的变化也是不同的。对比杜英和山核桃,根据其叶绿素及生长状况的变化情况,可见杜英对于高浓度酸雨有较强的适应性。

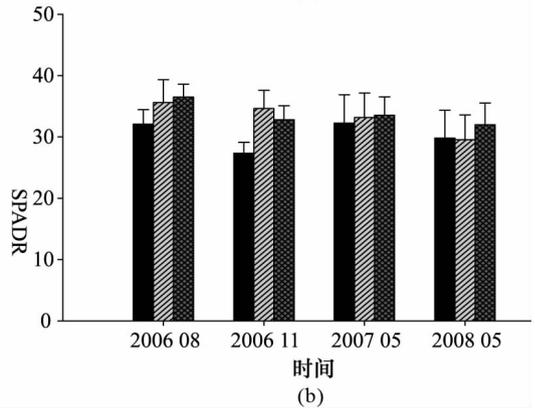
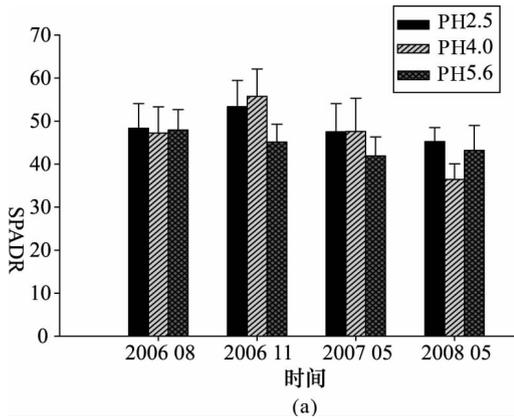


图1 模拟酸雨处理下杜英(a)和山核桃(b)叶片 SPADR 的变化

### 3.2 酸雨胁迫下杜英和山核桃光谱反射率的特征分析

#### 3.2.1 不同酸雨梯度下杜英和山核桃平均光谱反射率对比分析

图2和图3为杜英和山核桃在4期实验中3个模拟酸雨梯度处理下在可见光区至近红外部分(400nm~800nm)的平均光谱反射率对比。从图中可以看到,在可见光区,杜英在 pH5.6 处理下的平

均光谱反射率普遍要高于 pH2.5 的处理;而山核桃除 2007 年 5 月这期外,在 pH5.6 处理下的平均光谱反射率要低于 pH2.5 的处理。

结合叶绿素含量的测量结果,可以看出,杜英在酸雨胁迫条件下其叶片的叶绿素含量增加,使其可见光区的光谱反射率下降,表明其对酸雨胁迫具有一定的耐受性。而山核桃则是相反,其对于酸雨胁迫比较敏感,耐受性较杜英要差。

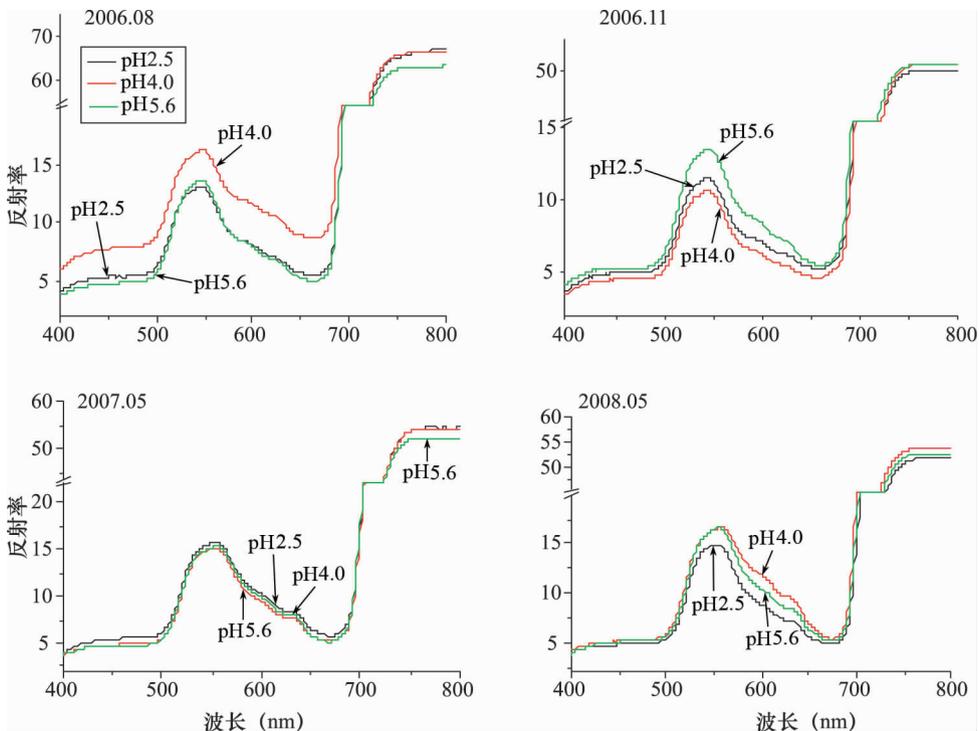


图2 模拟酸雨处理下杜英叶片光谱可见光区的平均光谱反射率

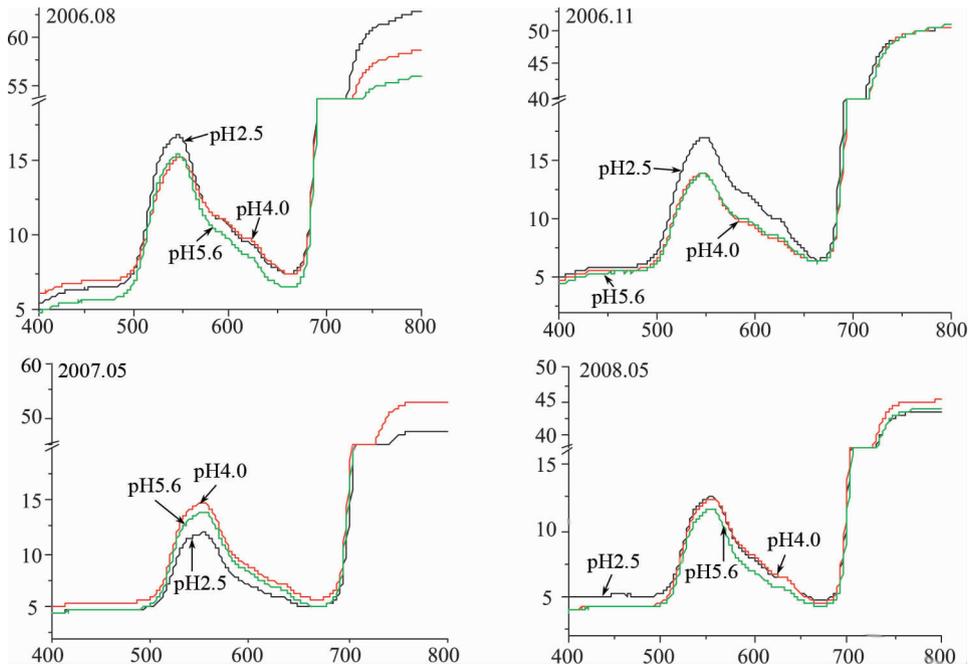


图3 模拟酸雨处理下山核桃叶片光谱可见光区的平均光谱反射率

3.2.2 酸雨胁迫下叶片的红边特征

红边是指植物光谱反射曲线上最大斜率对应的波长,一般位于 680nm~750nm 之间。有研究表明红边与植物叶片的叶绿素含量之间存在一定的相关性<sup>[25]</sup>,而且“红边”位置会随叶绿素含量、生物量和物候变化,沿波长轴方向移动<sup>[26~27]</sup>。植物在受到胁迫的时候,往往会表现为叶片失绿(叶绿素含量下降),发生所谓的“蓝移”现象<sup>[28]</sup>。因此可以通过观察叶片红边位置的变化来预测植物是否受到胁迫。

为能更好更方便的获取植物的红边位置,Miller等<sup>[29]</sup>建议采用反高斯模型来拟合(Inverted-Gaussian模型)。反高斯模型可模拟 670nm~780nm 范围内的光谱反射率曲线,其表达式为:

$$R(\lambda) = R_s - (R_s - R_0) \exp\left(-\frac{(\lambda_0 - \lambda)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中  $R_s$  为近红外区域最大反射值; $R_0$  为红光

区域叶绿素强吸收最小反射率值; $\lambda_0$  为  $R_0$  处对应的波长; $\lambda_p$  为红边波长位置; $\sigma$  为反高斯模型的标准差系数。

本文中以 670nm~685nm 和 780nm~795nm 范围的光谱反射率平均值分别作为  $R_0$  和  $R_s$ ,并在 685nm~780nm 范围内利用最小二乘法估计另两个模型参数  $\lambda_0$  和  $\sigma$ :

$$B(\lambda) = \left[ -\ln\left(\frac{R_s - R(\lambda)}{R_s - R_0}\right) \right]^2 = -\frac{\lambda}{\sqrt{2}\sigma} + \frac{\lambda_0}{\sqrt{2}\sigma} = a_1\lambda + a_0 \quad (2)$$

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  $\lambda_0$  和  $\sigma$  分别为:

$$\lambda_0 = -\frac{a_0}{a_1}, \sigma = \frac{1}{\sqrt{2}a_1}$$

表1 杜英和山核桃反高斯模型参数  $R_0$  的比较(样本数  $n=720$ )

树种	测试时间	模拟酸雨梯度		
		pH2.5	pH4.0	pH5.6
杜英	2006.8	6.47(0.003)	9.21(0.027)	6.64(0.009)
	2006.11	6.35(0.009)	5.66(0.008)	6.87(0.008)
	2007.5	5.95(0.008)	5.56(0.007)	5.69(0.006)
	2008.5	4.97(0.009)	5.53(0.008)	5.27(0.005)
山核桃	2006.8	8.85(0.60)	8.36(0.70)	8.25(0.74)
	2006.11	8.36(0.66)	7.48(1.06)	7.39(0.80)
	2007.5	5.11(0.002)	5.79(0.007)	5.03(0.006)
	2008.5	4.84(0.003)	4.47(0.003)	4.43(0.003)

经过计算,发现  $R_0$ 、 $\lambda_0$  和  $\lambda_p$  3 个参数与模拟酸雨的 pH 值之间表现出较好的相关性,而  $R_s$  和  $\sigma$  并无显著的联系。所以将  $R_0$ 、 $\lambda_0$  和  $\lambda_p$  的计算结果分别列出在表 1 和表 2 中以此来探索在酸雨胁迫下植物叶片红边参数的变化规律。

从表 1 中可以看出,两个树种 pH5.6 和 pH2.5 两个梯度对比呈现出较强的规律性,杜英在 pH5.6 处理下的叶绿素强吸收的最小反射率  $R_0$  要低于 pH2.5 的处理(除 2007.05 这期外);而山核桃则

是相反,其 pH2.5 处理下的  $R_0$  值要普遍高于 pH5.6。而 pH4.0 与两个梯度相比则没有显著的规律性,可能是因其处在中间梯度的缘故,使得其结果的趋向性不强。联系图 1 可以发现 pH5.6 和 pH2.5 两个处理的叶绿素含量同其  $R_0$  值之间基本呈现负相关性,即在较强的酸雨胁迫下,杜英的叶片叶绿素含量升高,因此降低了其在叶绿素红光吸收峰处的反射率,而山核桃则相反。

表 2 杜英和山核桃反高斯模型参数  $\lambda_0$  和  $\lambda_p$  的比较(nm)(样本数  $n=720$ )

树种	测试时间	$\lambda_0$			$\lambda_p$		
		pH2.5	pH4.0	pH5.6	pH2.5	pH4.0	pH5.6
杜英	2006.08	668.79(0.85)	667.45(5.27)	673.09(1.45)	700.36(0.43)	697.43(3.94)	700.20(0.90)
	2006.11	680.58(1.25)	681.73(2.05)	678.27(1.69)	701.88(1.36)	702.64(2.02)	699.36(1.83)
	2007.05	684.55(1.23)	685.09(1.70)	684.07(0.77)	706.52(1.47)	706.70(2.27)	705.34(0.97)
	2008.05	683.68(1.31)	681.89(1.17)	681.80(1.81)	707.74(0.97)	704.55(0.91)	705.80(1.67)
山核桃	2006.08	662.14(4.03)	665.65(3.65)	664.62(2.37)	695.13(1.63)	697.23(2.96)	696.53(1.31)
	2006.11	654.40(3.08)	663.05(3.60)	662.00(2.59)	690.39(2.16)	696.52(2.55)	696.53(1.31)
	2007.05	685.72(2.05)	683.45(2.42)	683.19(3.05)	708.06(1.17)	706.38(1.82)	705.43(1.69)
	2008.05	683.57(1.63)	681.80(2.02)	684.35(1.37)	707.28(1.82)	706.30(1.93)	708.24(1.30)

$\lambda_0$  和  $\lambda_p$  分别代表红光区域叶绿素吸收谷和红边所对应的波长位置,两者之间具有如下关系: $\lambda_p = \lambda_0 + \sigma$ 。 $\lambda_0$  和  $\lambda_p$  值计算结果如表 2 所示。从表 2 可以看到,杜英除 2006.08 一期外,其余三期的结果均显示 pH2.5 的  $\lambda_0$  和  $\lambda_p$  值要大于 pH5.6, pH4.0 和 pH2.5 相比也基本上呈现相似的情况;山核桃则是有所不同,除 2007.05 一期外,其余三期显示 pH2.5 的  $\lambda_0$  和  $\lambda_p$  值要低于 pH5.6。

从以上分析可以看出,随着酸雨胁迫的加强,杜英叶片反射率光谱曲线会发生“红移”;而山核桃会发生“蓝移”。另外,从实验中植物的高度、胸径等指标的观测对比中,发现杜英随着酸雨 pH 的降低其生长反而越加旺盛,山核桃则是明显表现出受胁迫的现象。这可能跟杜英的抗性较强有关,酸雨带来的“施肥效应”反而使得其叶片的叶绿素含量增加,生长旺盛。

#### 4 结束语

本文以常绿阔叶树种杜英和落叶阔叶树种山核桃两个树种作为实验材料,探讨了其在 3 个模拟酸雨梯度下叶片叶绿素相对含量、叶片的光谱反射率以及其红边位置的变化规律。通过上述实验及分析,可以得出以下结论:在模拟酸雨胁迫的作用下,

与对照组相比,杜英的叶绿素含量升高、可见光部分的光谱反射率普遍降低,山核桃与之相反;酸雨作用后,可见光部分光谱反射率间的差异主要集中在绿光反射峰及红边附近,同时也表现为红边所在波长位置的“红移”,山核桃为蓝移;对杜英在 pH5.6 和 pH2.5 两个处理间的光谱反射率的差随时间变化情况的研究结果说明,酸雨胁迫的累积效应也许是存在的。显然,在这里所表现出的累积效应更接近于一种正的生物效应。

分析杜英和山核桃在酸雨胁迫下光谱曲线上表现的不同,可能与不同植物叶片表面特性的不同有关,如有蜡质层等带来的伤害差异也是造成这一差异的原因之一。在本实验中,杜英表现出了对于酸雨较强的耐受性,而山核桃则对酸雨胁迫比较敏感,这可能跟常绿阔叶树种叶片表面普遍具有较厚的蜡质层有关<sup>[11]</sup>。究其原因,是否常绿阔叶树种和落叶阔叶树种之间普遍存在着这种差异,还需要我们今后结合植物生理生态测试进行更多树种高光谱的对比研究。

本实验的目的是希望未来能够在自然条件下从空间尺度上利用遥感监测酸雨胁迫对于陆地生态系统的影响。实验结果也初步揭示了在受控酸雨条件下植物光谱反射率的变化特征具有比较显著的规律

性。说明将来可以利用植物的光谱特征来预测植物是否受到酸雨等环境污染的胁迫。但是受现阶段数据和研究条件所限,实验未能以更大的空间和冠层尺度上的光谱反射率来研究酸雨胁迫对森林生态系统的影响。还需指出的是:同唐延林等<sup>[30]</sup>实验一样,本实验同样是用 ASD 野外光谱仪在大棚进行测试,这与在低空或者外太空获取的遥感影像有很大

的不同,光谱仪野外测试的视场可以做得很小,能基本保证视场范围内目标物单一,存在很少的干扰,但遥感影像则完全不同,一个像元中有多种目标物,即使是用高分辨率影像的数据,对于叶片、树枝等的区分也不是十分理想,因此要把在大棚实验获取的一些参数、规律应用推广到空间尺度上去,实现尺度的转换还需要进一步的研究。

### 参考文献

- 霍寿喜. 酸雨危害人体健康[J]. 医药与保健, 2004(7):48.
- Smith W H. Air Pollution and Forests-Interactions Between Air Contaminants And Forest Ecosystems[M]. New York: Springer-Verlag, 1981:178~191.
- 郭永林. 我国的酸雨问题和防治[J]. 山西财经大学学报(研究专刊), 2002, 24(2):104~106.
- 丁国安, 徐晓斌, 王淑凤, 等. 中国气象局酸雨网基本资料数据集及初步分析[J]. 应用气象学报, 2004(15):85~94.
- 任仁. 中国酸雨的过去, 现在和将来[J]. 北京工业大学学报, 1997, 23(3):128~132.
- 李柱国. 浙江省酸雨的时空分布、成因和发展趋势[J]. 环境污染与防治, 1988(4):10~15.
- 浙江省环境保护局. 浙江省环境质量报告书(2001-2005)[M]. 杭州: 2006.
- Carter G A, Knapp A K. Leaf optical properties in higher plants: Linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration[J]. American Journal of Botany, 2001, 88(4):677~684.
- Carter G A. Responses of leaf spectral reflectance to plant stress[J]. American Journal of Botany, 1993, 80(3):239~243.
- 唐延林, 王人潮, 黄敬峰, 等. 不同供氮水平下水稻高光谱及其红边特征研究[J]. 遥感学报, 2004, 8(2):187~192.
- 单运峰. 酸雨、大气污染与植物[M]. 中国环境科学出版社, 1994.
- Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes[J]. Method Enzymol, 1987(148):350~382.
- Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenoloxidase in Beta vulgaris[J]. Plant Physiology, 1949(24):1~15.
- 姜丽芬, 石福臣, 王化冈, 等. 叶绿素计 SPAD-502 在林业上的应用[J]. 生态学杂志, 2005, 24(2):1543~1548.
- 艾天成, 李方敏. 作物叶片叶绿素含量与 SPAD 值相关性研究[J]. 湖北农学院学报, 2000, 20(1):6~8.
- 艾天成, 周治安. 小麦等作物叶绿素速测方法研究[J]. 甘肃农业科技, 2001(4):14~18.
- 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与其高光谱特征间的关系[J]. 生态学报, 2008, 28(5):1959~1963.
- Richardson A D, Duigan S P, Berlyn G P. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content[J]. New Phytologist, 2002(153):185~194.
- 肖艳, 黄建昌. 13 种果树对酸雨抗性的研究[J]. 果树学报, 2004, 31(3):191~195.
- 樊后保. 模拟酸雨对 5 种阔叶树苗生长的影响[J]. 福建林学院学报, 1996, 16(4):289~292.
- Fan H B, Wang Y H. Effects of simulated acid rain on germination, foliar damage, chlorophyll contents and seedling growth of five hardwood species growing in China[J]. Forest Ecology and Management, 2000(126):321~329.
- 李德成, 徐彬彬, 石晓日, 等. 模拟酸雨对水稻叶片反射光谱特性影响的初步研究[J]. 遥感学报, 1996, 11(4):241~247.
- 冯宗炜, 曹洪法, 周修萍. 酸沉降对生态环境的影响及其生态恢复[M]. 中国环境科学出版社, 1999.
- 刘菊秀. 酸沉降对森林生态系统影响的研究现状及展望[J]. 生态学杂志, 2003, 22(5):113.
- Thomas J R, Gausman H W. Leaf reflectance versus leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops[J]. Agronomy Journal, 1977(69):799~802.
- Peñuelas J, Filella I, Biel C, Serrano L, Save R. The reflectance at the 950~970nm region as an indicator of the plant water status[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(10):1887~1905.
- Filella I, Peñuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(7):1459~1470.
- 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感——原理、技术与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Miller J R, Hare EW, Wu J. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance. An inverted-Gaussian reflectance model[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(10):1755~1773.
- 唐延林, 黄敬峰, 王人潮, 辛荣. 利用高光谱数据预测水稻籽粒粗蛋白含量研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7):114~118.

# Hyperspectral Characteristics of *Elaeocarpus Glabripetalus* Merr and *Carya Cathayensis* at Different Levels of Simulated Acid Rain

XIE Xiao-zan<sup>①</sup>,JIANG Hong<sup>①·②</sup>,SONG Xiao-dong<sup>③</sup>,ZHUO Guo-mo<sup>①</sup>,YU Shu-quan<sup>①</sup>,WANG Bing<sup>①</sup>

① *International Research Center of Spatial Ecology and Ecosystem Ecology,Zhejiang Forestry University, Hangzhou 311300;*

② *International Institute for Earth System Science,Nanjing University,Nanjing 210093;*

③ *Institute of Urban Environment,Chinese Academy of Sciences,Xiamen 361003)*

**Abstract:** The hyperspectral reflectance and the relative chlorophyll concentration (relative value of SPAD) of *Elaeocarpus glabripetalus* Merr and *Carya cathayensis* of 4 periods in 3 acid rain gradients were measured in the shed experiment of simulating acid rain. By use of the Inverted-Gaussian (IG) model, the curves of red edge spectral got fitted, and its position was built, including some spectral characteristic parameters, and its width. The results showed that: in the acid rain treatment of the lower pH, chlorophyll concentration of *elaecarpus glabripetalus* Merr had certain increasing, while the chlorophyll concentration of *carya cathayensis* showed a downtrend; in the visible light region, the average spectral reflectance of *Elaeocarpus glabripetalus* Merr in the pH5.6 treatment was higher than that of the pH2.5 treatment; while *carya cathayensis* had the different result which had a lower average spectral reflectance in pH5.6 treatment than pH2.5. In red light area of *elaecarpus glabripetalus* Merr had a lower minimum reflectance value  $R_0$  of chlorophyll absorption in the pH5.6 treatment than that of pH2.5, while it is opposite to *carya cathayensis*. The  $\lambda_p$  value of *elaecarpus glabripetalus* Merr showed the red-shift phenomenon of its reflectance spectral curve, while the blue-shift phenomenon happened with *Carya cathayensis*. All above shows a possibility of setting up a qualitative or quantitative relationship between the leaves spectral reflectance and the damage extent of acid rain.

**Key words:** acid rain; hyperspectral; *elaecarpaceae*; *carya cathayensis*; SPAD; red edge

(上接第 21 页)

## 参考文献

- 1 刘经南,张小红. 激光扫描测高技术的发展与现状[J]. 武汉大学学报(信息科学版)2003(4).
- 2 隋立春,张宝印. LiDAR 遥感基本原理及其发展[J]. 测绘科学技术学报,2006(4).
- 3 黄金浪. 基于 TerraScan 的 LiDAR 数据处理[J]. 测绘通报,2007(10).
- 4 刘少创,尤红建,刘彤,李树楷. 机载激光测距扫描成像制图系统的定位原理与误差分析[J]. 武汉测绘科技大学学报,1998,24(2):124~128.
- 5 www.inpho.com[EB/OL].
- 6 Pfeifer, N., Reiter, T., Briese, C., Rieger, W. . Interpolation of high quality ground models from laser scanner data in forested areas[A]. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Workshop[C]. 1999:31~36.
- 7 Hannu Hyyppa. Factors affecting the quality of DTM generation in forested areas[A]. ISPRS WG III/3, III/4[C]. 2005:12~14.

## The Research on LiDAR Data Post-processing Based on TerraSolid and Inpho

LIU Pei, LI Ying-cheng, XUE Yan-li, DING Xiao-bo

(Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039)

**Abstract:** This article introduces composition and evolution of the airborne laser scanning/LiDAR system, and mainly presents the ways and means of post-processing and the filtering principles of the TerraSolid and Inpho systems. At last, it compares the two algorithms in accuracy, efficiency, maneuverability and so on.

**Key words:** LiDAR; filtering; contour; Digital Terrain Model