

基于四阶导数毛竹冠层叶片反射光谱特性分析

董大川, 孔 振, 杨伟晰, 李爽爽, 高荣孚, 高培军

(浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江 临安 311300)

摘要: 毛竹 *Phyllostachys pubescens* 是高效的固碳植物, 但在不同光环境下成长的叶片之间有何差异? 毛竹怎样最大程度地利用光能? 这些问题尚未明确。对 1, 2, 3 度毛竹叶片分别从不同朝向, 不同冠层高度叶片和不同年龄等 3 个维度测量了毛竹叶片叶绿素含量及叶片反射光谱, 并以 Origin 为平台对反射光谱数据进行四阶导数处理。结果表明: 弱光环境下会造成毛竹叶绿素变化, 叶绿素 a/b 值下降, 叶黄素水平降低, 类胡萝卜素升高, 辅助色素种类增加。随着竹龄增加色素组成改变, 光合效能降低。四阶导数能有效地分离重叠峰, 提高光谱信息的可读性。结合原始光谱和四阶导数光谱的对比分析, 可以有效对毛竹叶片色素含量进行定性定量分析。图 3 表 1 参 24

关键词: 森林生态学; 毛竹; 叶绿素; 光合作用; 反射光谱; 四阶导数

中图分类号: S795.7 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2011)06-0893-07

Spectral reflectance of leaves for *Phyllostachys pubescens* at different canopy layers using a 4th order derivative

DONG Da-chuan, KONG Zhen, YANG Wei-xi, LI Shuang-shuang, GAO Rong-fu, GAO Pei-jun

(The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To determine how *Phyllostachys pubescens* (moso bamboo), a highly efficient photosynthetic plant, efficiently used solar energy and what changes occurred with different light environments, the spectral reflectance of *Ph. pubescens* leaves was measured in different directions, heights, and ages. There were 36 treatments were set, and 108 samples in total. Then, raw data was processed with Origin 8.0 software using a 4th order derivative. Derivative processing was utilized to decompose overlapped peaks so the derived spectra could improve the signal-to-noise ratio (SNR) of the crude data leading to better qualitative and quantitative analysis. Results showed that in shade conditions, the proportion of chlorophyll changed, chlorophyll a/b declined, and carotenoids and xanthophylls accumulated. Also, potential photosynthesis decreased as *Ph. pubescens* grew. These results suggested that sun leaves and upper leaves have higher utilization of photosynthesis. [Ch, 3 fig. 1 tab. 24 ref.]

Key words: forest ecology; *Phyllostachys pubescens*; chlorophyll; photosynthesis; spectral reflectance; 4th order derivative

在植物生理监测过程中, 反射光谱具有无损、快速、高效的优越性。可见光(400~700 nm)反射光谱在一定程度上表征了叶片的色素水平^[1], 其中对叶绿素的变化尤为敏感^[2]。基于此, 近年来利用叶片反射光谱反演叶片色素水平的研究时有报道^[3]。同时, 反射率高光谱的红边参数和近红外光谱特征也已被广泛应用于水体评价^[4]、重金属胁迫监测^[5]、叶片含水量^[6]、氮素营养^[7-8]、品质鉴定^[8]等方面。光谱数

收稿日期: 2011-01-25; 修回日期: 2011-04-27

基金项目: 浙江省科学技术重大科技专项(2008C02001-1); 浙江省农业重大攻关项目(2006C12112)

作者简介: 董大川, 从事竹子栽培与利用研究。E-mail: dong_dachuan@yahoo.com.cn。通信作者: 高培军, 讲师, 博士, 从事竹子栽培与利用研究。E-mail: zlgpj@zafu.edu.cn

据信息量较大,需要进行一些处理。利用导数光谱^[9]或高斯分解法^[10]可将线性叠加的重叠峰有效分离,提高信噪比且不改变峰位置,其灵敏度远高于二阶导数和三阶导数,在定性分析上具有不可比拟的优势^[11]。毛竹 *Phyllostachys pubescens* 光合作用的研究起步较早,内容主要围绕于毛竹叶片生理特性^[12]、气体交换特性^[13]、光合作用动态变化^[14-15]等方面展开,而较详实的反射光谱特征在竹类光合特性研究中则鲜有报道。本研究从毛竹叶绿素含量出发,基于四阶导数反射光谱特征,从冠层水平上对毛竹可见-红边区反射光谱特性做初步的探讨。旨在为竹林结构优化,毛竹碳同化能力等研究提供一定的试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

实验于2009年7-8月间进行。实验地位于浙江省临安市研里村,浙江农林大学竹类研究所毛竹生理生态定位监测站(30°13'N, 119°48'E)内。该地年平均气温为16.0℃左右。年降水量为1400mm,亚热带湿润型季风气候。毛竹林土壤属棕红壤,土层厚度约为60cm。pH 5.20~5.90,有机质为3.97 g·kg⁻¹,全氮、速效磷、速效钾分别为0.14, 4.25和78.16 mg·kg⁻¹。室外实测选于夏季晴朗无风的天气,时间选在上午10:00-11:00。

1.2 实验材料

供试毛竹生长在西南坡中部,生长状态良好,高度相近,展枝方向一致,无病虫害。选1度竹、2度竹和3度竹各3株。每株毛竹按叶片的生长位置,划分为上、中、下、阴生叶(中层)4水平。共计36个处理。

1.3 叶绿素测定

各处理中,选择10片光照充分,叶片完整的毛竹叶片,去叶脉剪碎混匀后取3份样品称量,0.30 g·份⁻¹。共计108份样品。叶片叶绿素浓度测定采用Arnon法^[16]:用体积分数为80%丙酮溶液25mL浸提,静置24h待测。用紫外-可见分光光度计UV-2500(日本岛津)测定在663nm和645nm波长下的吸光度值。

1.4 光谱数据的测定

在各处理中选光照充分,叶色均匀无病斑的毛竹叶片10片。采样点1个·叶⁻¹。利用Unispec-SC型单通道光纤光谱仪(美国PP-System),测量活体状态下毛竹叶片反射光谱。光谱仪的测定波段范围为310~1100nm,光谱采样间隔为1nm,光谱分辨率3nm。Unispec-SC单通道光谱分析仪内置1个卤素灯,测定时,将1个分支光纤(直径为2.3mm)的一端连接到卤素灯的输出端口,另一端连接到检测器的输入端口,光纤的探头端固定在一个标准叶夹中,与叶片呈60°。测量前用标准白板校对调0。得到的反射光谱数据用Multispec 5.1初步处理,后用Origin 8.0整理分析。

1.5 光谱数据的处理

从10组原始数据中任意选出8组求平均值得到平均光谱。对平均光谱做一阶导数处理。一阶导数可以消除线性噪音,提高信噪比。而且可以直观地得到红边位置,红边位置被定义为在红边范围(680~760nm)内一阶导数光谱最大值对应的波长。对平均光谱做四阶导数处理并选择用快速傅里叶变换来平滑数据,以较好地筛选有效信息。平滑后的导数光谱数据根据公式 $Y'=Y/|Y|_{\max}$ 做归一化处理。

2 结果

2.1 毛竹叶片叶绿素分析

如表1所示:叶绿素a的变化较复杂,1度竹阳生叶片叶绿素a水平比阴生叶高28.80%;而自上而下,叶绿素a的水平呈现增加的趋势,上层叶片和中层叶片的叶绿素a和总叶绿素水平无显著差异,下层叶片的叶绿素a较高,是上层叶片的1.24倍。在2,3度竹中也呈现同样的变化趋势。1度竹阴生叶片叶绿素b比阳生高11.14%,3度竹阴生叶中叶绿素b是阳生叶的20.96%;2度竹中略有不同,阴生叶中叶绿素b为阳生叶的90.31%。从不同冠层来看,叶绿素b从上到下呈逐渐增加的趋势,1度竹中层叶叶绿素b是上层的1.43倍,下层是中层的1.50倍,在2,3度竹中叶绿素b的变化趋势与1度竹的相同。叶绿素总量阳生叶中要高;随着下层光线的减弱,叶绿素的总量在增加;随着年龄的增加总量相对稳定,略有波动。叶绿素a/b的值,阳生叶的值高于阴生叶的;不同高度的叶片,自上而下,叶绿

表1 毛竹叶片叶绿素含量

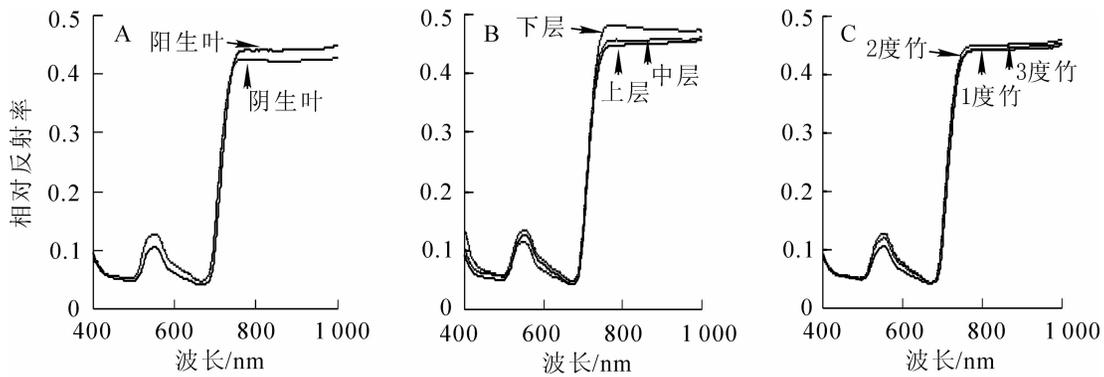
Table 1 Chlorophyll contents in *Phyllostachys pubescens*

竹龄		叶绿素 a / (mg·L ⁻¹)	叶绿素 b / (mg·L ⁻¹)	叶绿素 a+b / (mg·L ⁻¹)	叶绿素 a / b
1 度竹(2008)	上层	2.450 2 ± 0.432 9	0.367 0 ± 0.136 1	2.817 2 ± 0.568 7	6.676 9
	中层	2.362 2 ± 0.347 8	0.527 9 ± 0.132 5	2.890 1 ± 0.478 4	4.474 5
	下层	3.045 8 ± 0.192 2	0.793 3 ± 0.074 5	3.839 1 ± 0.263 8	3.839 4
	阴面(中层)	1.834 0 ± 0.162 3	0.586 7 ± 0.041 4	2.420 7 ± 0.203 7	3.126 2
2 度竹(2006)	上层	2.073 0 ± 0.103 6	0.570 5 ± 0.025 8	2.643 4 ± 0.125 4	3.633 9
	中层	3.017 7 ± 0.545 3	0.913 3 ± 0.174 0	3.931 0 ± 0.719 2	3.304 3
	下层	3.011 2 ± 0.084 8	0.985 9 ± 0.030 1	3.997 2 ± 0.112 2	3.054 2
	阴面(中层)	2.482 0 ± 0.549 8	0.824 8 ± 0.190 1	3.306 8 ± 0.739 4	3.009 0
3 度竹(2004)	上层	2.013 8 ± 0.191 9	0.693 7 ± 0.074 8	2.707 4 ± 0.266 7	2.903 0
	中层	2.546 0 ± 0.601 7	0.841 9 ± 0.143 0	3.387 9 ± 0.744 7	3.024 1
	下层	3.051 8 ± 0.297 0	1.180 6 ± 0.121 3	4.232 4 ± 0.418 2	2.585 0
	阴面(中层)	2.670 6 ± 0.788 9	1.018 4 ± 0.279 7	3.689 0 ± 1.068 1	2.622 3

素 a/b 的值呈下降趋势；随着年龄的增加也呈下降趋势。

2.2 毛竹叶片的反射光谱特征

如图 1 所示：毛竹叶片的原始反射光谱变化趋于一致。均具有典型的反射光谱特征，都具有 550 nm 处绿光反射峰、420~500 nm 蓝光谷和 600~680 nm 红光谷、680~740 nm 红边区的快速上升以及 780~1 100 nm 的近红外高原平台。不同朝向的叶片，在可见光区的相对反射率阳生叶小于阴生叶，近红外区的相对反射率阳生叶大于阴生叶。不同冠层高度毛竹叶片，在可见光区的相对反射率中层大于上层，下层叶片的反射率在 <500 nm 时高于中上层，500~670nm 反射率下层<上层<中层，随后反射率上升，下层>中层>上层。不同年龄毛竹叶片中，反射率随着年龄的变化先升后降。



A.不同朝向毛竹叶片相对反射率；B.不同冠层高度毛竹叶片相对反射率；C.不同年龄毛竹叶片相对反射率

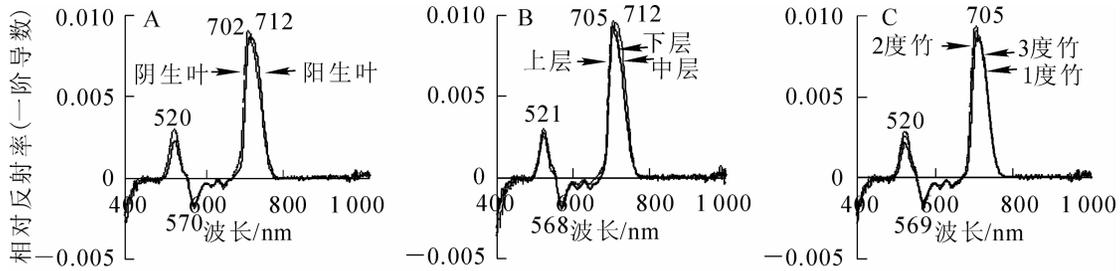
图 1 毛竹叶片反射光谱

Figure 1 Spectral reflectance of *Phyllostachys pubescens*

2.3 一阶导数光谱特征

对反射光谱做一阶导数处理结果见图 2。毛竹叶片的一阶导数光谱特征明显，呈典型的 2 峰夹 1 谷状。通过一阶导数可以清楚的观察到“三边位置”。在所试叶片中蓝边位置和黄边位置表现一致，蓝边位置都出现在 520 nm 附近，黄边位置均出现在 570 nm 附近。红边位置则有所不同，不同朝向的毛竹叶片，阴生叶的红边位置在 702 nm 处，阳生叶的则位于 712 nm 处，相对于阴生叶片发生了约 10 nm 的

“红移”；不同高度的毛竹叶片，上层叶片与中层叶片的红边位置相同，都在 705 nm 处，而下层叶片则在 712 nm 处，下层叶中出现了红移，强度为 7 nm 的。在不同年龄毛竹之间，红边位置均没有差异，都出现在 705 nm 处。



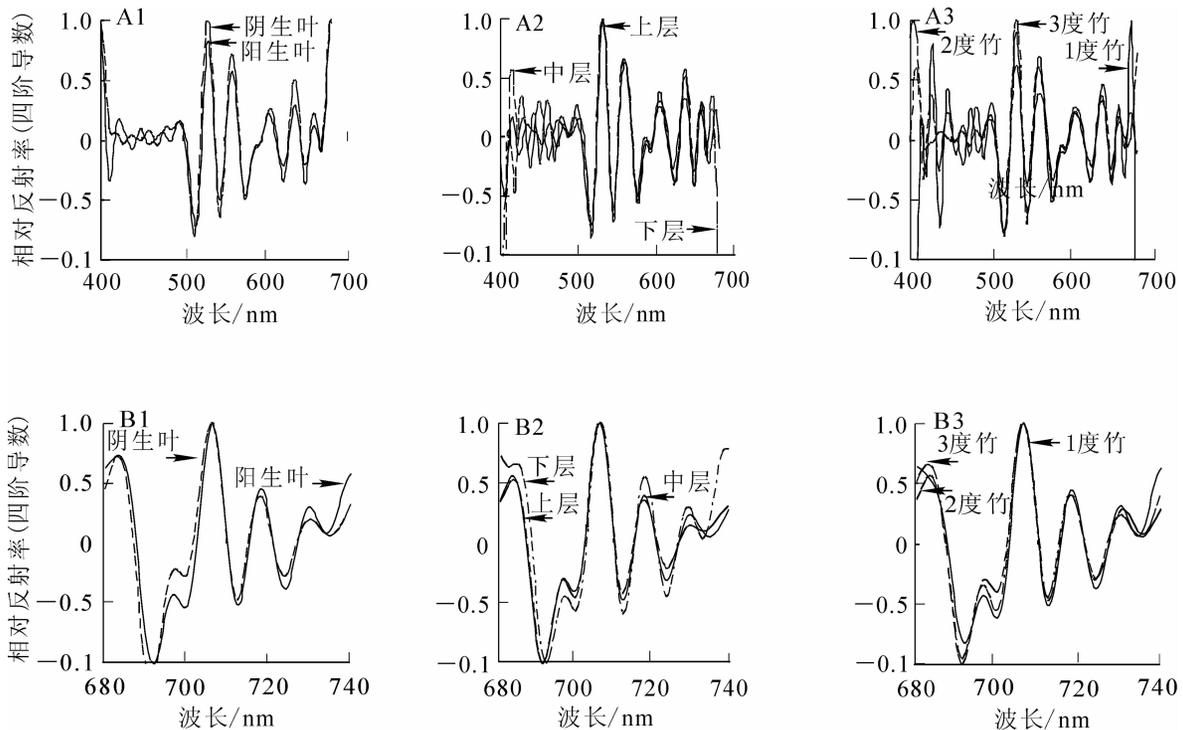
A.不同朝向毛竹叶片相对反射率(一阶导数); B.不同冠层高度毛竹叶片相对反射率(一阶导数); C.不同年龄毛竹叶片相对反射率(一阶导数)

图2 毛竹叶片反射光谱(一阶导数)

Figure 2 Spectral reflectance of *Phyllostachys pubescens* (1st order derivative)

2.4 四阶导数光谱特征

通过四阶导数处理，在可见光区分离得到的反射峰很多，结果如图 3A。大致可以分为 2 部分：① 400~500 nm 段的蓝光区，在此区段内，光的波长较短，出现峰数量多，位置也多有偏移。阳生叶中可以观察到有 4 个峰位置，阴生叶中为 5 个峰；上层叶和 中层叶表现为 5 个峰，下层叶则有 6 个；1, 2 度竹 5 个峰，3 度竹 6 个峰。②500~700 nm 段，谱峰的宽度随波长增加逐渐变宽，峰形清晰，供试叶片均呈现 6 峰 6 谷(峰位置为 530, 559, 586, 604, 635 和 659 nm; 谷位置为 515, 544, 575, 621, 648 和 667 nm)，且峰位置无明显差异。



A1. 400~700 nm不同朝向毛竹叶片相对反射率(四阶导数); A2. 400~700 nm不同冠层高度毛竹叶片相对反射率(四阶导数); A3. 400~700 nm不同年龄毛竹叶片相对反射率(四阶导数); B1. 680~740 nm不同朝向毛竹叶片相对反射率(四阶导数); B2. 680~740 nm不同冠层高度毛竹叶片相对反射率(四阶导数); B3. 680~740 nm不同年龄毛竹叶片相对反射率(四阶导数)。

图3 毛竹叶片反射光谱(四阶导数)

Figure 3 Spectral reflectance of *Phyllostachys pubescens* (4th order derivative)

在 680~740 nm 的红边区域,如图 3B,含 5 个主要的反射峰,分别位于 683, 697, 705, 718 和 730 nm 附近;在 691, 699, 712, 724 和 734 nm 附近还有 5 个谷位置。所试毛竹叶片的变化趋势较一致。略有不同的是,在 690 nm 位置,阳生叶的谷位置,下层叶片的谷位置均有向红光方向的偏移。在不同竹龄的叶片中没有这种偏移。

3 讨论

3.1 光环境对毛竹叶片色素组成的影响

光合作用是一个复杂而又重要的过程,在不同光环境下生长的叶片,在叶片的色素组成上逐渐发生了一些变化。光环境的变化细分为 2 种:一是展枝方向不同,接受阳光的时间和角度不同造成的光环境差异,二是位于不同高度的叶片。由于上层叶片的遮挡造成的光环境的差异,这 2 种不同原因造成的弱光环境对叶片的影响有相同的地方也有不同的地方:614 nm 和 661 nm 处是叶绿素 a 的特征位点^[17],在四阶导数处理后(图 3A),620 nm 和 667 nm 有明显的谷位置,即表征叶绿素 a 的特征位点,通过光谱反射率和四阶导数反射率的比较分析,得出:阳生叶的叶绿素 a 高于阴生叶,而不同高度竹叶,自上而下叶绿素 a 是随光的减弱而增加的。同样,在总叶绿素量上也表现出同样的差异。不同朝向叶片间的叶绿素 a 差异可能是由于强光诱导,使得光反应中心的数量增加,所以阳生叶中的叶绿素 a 要高于阴生叶。而不同高度毛竹叶片造成的遮光,不仅由于上层叶片截光造成了光量子密度(PFD)上的差异,在光质上也发生了变化。研究显示,下层遮光处的蓝光比例较高,而红光比例较低。这是由于上层叶片更多的将红光截获并吸收从而导致蓝光聚集于下层遮光处^[18]。光质的改变使得叶绿体中的基粒变大,片层结构的垛叠程度增加导致叶绿素 a 增加^[19]。

645 nm 处是叶绿素 b 的吸收峰,实测结果发现在 648 nm 处有一反射谷(图 3A),通过比较分析得出以下结果:阴生叶的含量高于阳生叶的;下层叶片中的叶绿素 b 含量要高于中上层的。可见,生长在弱光环境下的毛竹叶片会增加其叶片中的叶绿素 b,以保证一定的光合捕获能力。此外,在阴生叶和下层叶片中叶绿素 a/b 的值下降,这是因为弱光条件导致 LHC II (light harvesting complex - II, 光系统 II 捕光复合体)的数量增加,LHC II 中既有叶绿素 a 也有叶绿素 b,光反应中心则只有叶绿素 a,因此植株总的叶绿素 a/b 降低是为了在弱光下捕获更多的光能^[20]。类胡萝卜素是一大类天然化合物的总称,有 600 多种之多。四阶导数处理后在 530 nm 处有一个明显的峰位置(图 3A),正好处于 510~540 nm 类胡萝卜素的吸收峰范围内^[8]。通过比对分析可知:阴生叶和下层叶片中都拥有较高的类胡萝卜素含量。苏新宏等^[22]也发现在烟草中为保证在弱光条件下也能进行正常的生理代谢活动,遮光处理会促进类胡萝卜素含量积累。475 nm 是叶黄素的吸收峰^[23],445 nm 和 505 nm 是玉米黄素的吸收峰^[24]。叶黄素和玉米黄素这 2 种色素有着重要的生物学意义,它们不仅仅执行捕获光能的作用,更重要的是参与叶黄素循环,提供一种光破坏的防御机制,而在强光下的毛竹叶片更容易遇到光破坏的胁迫,因此,在阳生叶和上层叶片中叶黄素和玉米黄素的含量较高。

从阳生叶的一阶导数光谱(图 2)的红边区观察到的“红移”现象,是因为阳生叶片中较高的色素含量,导致对红光的吸收范围变宽造成的。同样,在下层叶片中也出现了这样的“红移”现象。另外值得注意的是在 400~500 nm 范围内(图 3A),可以观察到在弱光环境中毛竹叶片反射峰数目增多,是否是由于叶片中某组分的合成或分解所引起还有待进一步研究。

3.2 年龄对毛竹叶片色素组成的影响

毛竹叶片色素组成的变化不仅仅是空间上的变化,在时间维度上也呈现出一定的变化趋势。在较大竹龄毛竹叶片中有类似于在弱光环境中叶片发生的变化。从四阶导数反射光谱的分析来看,不同年龄的叶片,在色素组成上较为一致,3 度竹在蓝光区的反射峰要比 1, 2 度竹多,这意味着 3 度竹中某些组分(或为辅助色素)相对增加。从叶绿素来看,随着年龄的增加叶绿素 a 逐渐减少,叶绿素 b 相对积累,叶绿素 a/b 的值急剧下降。因此推测:毛竹叶片随着年龄的增加,光合效能是逐渐降低的。

4 结论

反射光谱数据容易获取,但是在实际操作过程中不可避免的会遇到信噪比低、光谱波动、背景复杂

和谱峰重叠的问题^[23]。四阶导数反射率光谱有着良好的可操作性和准确性,可以从复杂的背景环境中较大程度的还原有效信息,为定性分析提供依据。通过原始光谱和四阶导数光谱对比分析可以质与量兼顾,较好的反映毛竹叶片生理变化。

毛竹冠层叶片中,不同的光线环境下,叶片为适应光环境在色素组成上发生了一些变化。总的来说,弱光环境会导致:①叶绿素 a 变化;②叶绿素 b 的累积;③叶绿素 a/b 值降低;④类胡萝卜素增加;⑤叶黄素库的水平减少;⑥辅助色素种类增多。

参考文献:

- [1] 张金恒,王珂,王人潮. 高光谱评价植被叶绿素含量的研究进展[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2003, **21** (1): 74 - 80.
ZHANG Jinheng, WANG Ke, WANG Renchao. Study on hyperspectral remote sensing in estimate vegetation leaf chlorophyll content [J]. *J Shanghai Jiaotong Univ Agric Sci*, 2003, **21** (1): 74 - 80.
- [2] CHAPPELLE E W, KIM M S, MCMURTREY III J E. Ratio analysis of reflectance spectra (PARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids in soybean leaves [J]. *Rem Sens Environ*, 1992, **39**: 239 - 247.
- [3] 方慧,宋海燕,曹芳,等. 油菜叶片的光谱特征与叶绿素含量之间的关系研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, **27** (9): 1731 - 1734.
FANG Hui, SONG Haiyan, CAO Fang, *et al.* Study on the relationship between spectral properties of oilseed rape leaves and their chlorophyll content [J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2007, **27** (9): 1731 - 1734.
- [4] 李素菊,吴倩,王学军,等. 巢湖浮游植物叶绿素含量与反射光谱特征的关系[J]. 湖泊科学, 2002, **14** (3): 228 - 234.
LI Suju, WU Qian, WANG Xuejun, *et al.* Correlations between reflectance spectra and contents of chlorophyll-a in Chaohu Lake [J]. *J Lake Sci*, 2002, **14** (3): 228 - 234.
- [5] 陈思宁,刘新会,侯娟. 重金属锌胁迫的白菜叶片光谱响应研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, **27** (9): 1797 - 1801.
CHEN Sining, LIU Xinhui, HOU Juan. Study on the spectrum response of *Brassica campestris* L. leaf to the zinc pollution [J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2007, **27** (9): 1797 - 1801.
- [6] 王树东,刘素红,丁建丽,等. 叶片水分含量光谱响应变化研究[J]. 干旱区地理, 2006, **29** (4): 510 - 516.
WANG Shudong, LIU Suhong, DING Jianli, *et al.* Research on spectral changes with water losing of leaves [J]. *Arid Land Geogr*, 2006, **29** (4): 510 - 516.
- [7] MENTINK R L, HOFFMAN P C, BAUMAN L M. Utility of near-infrared reflectance spectroscopy to predict nutrient composition and in vitro digestibility of total mixed rations [J]. *J Dairy Sci*, 2006, **89**: 2320 - 2326.
- [8] 周冬琴,田永超,姚霞,等. 水稻叶片全氮浓度与冠层反射光谱的定量关系[J]. 应用生态学报, 2008, **19** (2): 337 - 344.
ZHOU Dongqin, TIAN Yongchao, YAO Xia, *et al.* Quantitative relationships between leaf total nitrogen concentration and canopy reflectance spectra of rice [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19** (2): 337 - 344.
- [9] 沈艳,牛铮,王汶,等. 基于导数光谱变量叶片含水量模型的建立[J]. 地理与地理信息科学, 2005, **21** (7): 16 - 19.
SHEN Yan, NIU Zheng, WANG Wen, *et al.* Establishment of leaf water content models based on derivative spectrum variables [J]. *Geogr Geo-Inf Sci*, 2005, **21** (7): 16 - 19.
- [10] 卢璐,苏荣国,胡序朋,等. 高斯分解法研究浮游植物荧光激发光谱[J]. 中国激光, 2007, **34** (8): 1115 - 1119.
LU Lu, SU Rongguo, HU Xupeng, *et al.* Research on phytoplankton chlorophyll fluorescence excitation spectra by Gaussian decomposition [J]. *Chin J Lasers*, 2007, **34** (8): 1115 - 1119.
- [11] 卢璐,苏荣国,王修林,等. 基于四阶导数的浮游植物叶绿素荧光激发光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, **27** (11): 2307 - 2312.
LU Lu, SU Rongguo, WANG Xiulin, *et al.* Study on the characters of phytoplankton chlorophyll fluorescence excitation spectra based on fourth-derivative [J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2007, **27** (11): 2307 - 2312.

- [12] 陈建华, 毛丹, 马宗艳, 等. 毛竹叶片的生理特性[J]. 中南林学院学报, 2006, **26** (6): 76 – 80.
CHEN Jianhua, MAO Dan, MA Zongyan, *et al.* Physiological characteristics of leaves of bamboo *Phyllostachys pubescens* [J]. *J Central South For Univ*, 2006, **26** (6): 76 – 80.
- [13] 许大全, 李国耀, 邱国雄, 等. 毛竹叶光合作用的气孔限制研究[J]. 植物生理学报, 1987, **13** (2): 154 – 160.
XU Daquan, LI Deyao, QIU Guoxiong, *et al.* Studies on stomatal limitation of photosynthesis in the bamboo (*Phyllostachys pubescens*) leaves [J]. *Acta Phytophys Sin*, 1987, **13** (2): 154 – 160
- [14] 施建敏, 郭起荣, 杨光耀. 毛竹光合动态研究[J]. 林业科学研究, 2005, **18** (5): 551 – 555.
SHI Jianmin, GUO Qirong, YANG Guangyao. Study on the photosynthetic dynamic variation of *Phyllostachys edulis* [J]. *For Res*, 2005, **18** (5): 551 – 555
- [15] 陈存及, 邱尔发, 梁一池, 等. 毛竹不同种源光合特性研究[J]. 林业科学, 2001, **37** (6): 15 – 19.
CHEN Cunji, QIU Erfa, LIANG Yichi, *et al.* Study on the photosynthetic characters of *Phyllostachys pubescens* provenances [J]. *Sci Silv Sin*, 2001, **37** (6): 15 – 19.
- [16] ARNON D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris* [J]. *Plant Physiol*, 1949, **24** (1): 1 – 15.
- [17] 周武. 叶绿素 a 的光谱分析[J]. 山东师大学报: 自然科学版, 1998, **13** (2): 228 – 232.
ZHOU Wu. Spectral analysis of chlorophyll a [J]. *J Shandong Norm Univ Nat Sci*, 1998, **13** (2): 228 – 232.
- [18] BELL G E, DANNEBERGER T K, MCMAHON M J. Spectral irradiance available for turf grass growth in sun and shade [J]. *Crop Sci*, 2000, **40**: 189 – 195.
- [19] ATANASOVA L. Comparative characteristics of growth and photosynthesis of sun and shade leaves from normal and pendulum walnut (*Juglans regia* L.) trees [J]. *Photosynthetica*, 2003, **41**: 289 – 292.
- [20] 孙小玲, 许岳飞, 马鲁沂, 等. 植株叶片的光合色素构成对遮阴的响应[J]. 植物生态学报, 2010, **34** (8): 989 – 999.
SUN Xiaoling, XU Yuefei, MA Luyi, *et al.* A review of acclimation of photosynthetic pigment composition in plant leaves to shade environment [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34** (8): 989 – 999
- [21] 苏新宏, 韦凤杰, 张学林, 等. 旺长期遮光及光照转换对不同肥料条件下烟草叶片光合特性的影响 [J]. 生态学报, 2010, **30** (20): 5592 – 5600.
SU Xinhong, WEI Fengjie, ZHANG Xuelin, *et al.* Characterization of photosynthetic responses to shading and a light/shade switch during the rapid growth phase of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) subjected to different fertilization regimes [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (20): 5592 – 5600.
- [22] 严衍禄, 赵龙莲, 李军会, 等. 现代近红外光谱分析的信息处理技术[J]. 光谱学与光谱分析, 2000, **30** (6): 777 – 780.
YAN Yanlu, ZHAO Longlian, LI Junhui, *et al.* Information technology of modern NIR spectral analysis [J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2000, **30** (6): 777 – 780.
- [23] 李艳菊. 元宝枫叶片色素吸收光谱研究[J]. 西北林学院学报, 2004, **19** (2): 28 – 30.
LI Yanju. Study on the absorption spectrum of pigment in *Acer truncatum* leaves [J]. *J Northwest For Univ*, 2004, **19** (2): 28 – 30.
- [24] 朱蕾. 玉米黄色素的分离提取及四种类胡萝卜素测定方法研究[D]. 北京: 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 2005.
ZHU Lei. *The Extraction of Maize Yellow Pigment and Study on Analysis Method of Four Kinds of Carotenoids* [D]. Beijing: China Agricultural University. College of Food Science & Nutritional Engineering, 2005.