

低温胁迫下毛竹叶片色素质量分数与反射光谱的相关性

许改平¹, 刘芳¹, 吴兴波¹, 温国胜¹, 王玉魁², 高岩¹, 高荣孚^{1,3}, 张汝民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, 浙江 临安 311300; 2. 国家林业局 竹子研究开发中心, 浙江 杭州 310012; 3. 北京林业大学 生物科学与技术学院, 北京 100083)

摘要: 为了探讨低温处理后毛竹 *Phyllostachys edulis* 叶片反射光谱特性与色素质量分数的相互关系, 筛选出能够准确监测低温胁迫下毛竹伤害程度的光谱参数。测定了低温处理后毛竹叶片色素质量分数与反射光谱的变化参数, 分析叶片光谱反射率、微分光谱及特征参数与色素质量分数的相关性。结果表明: 随着温度的降低, 叶绿素 a 和类胡萝卜素质量分数呈下降趋势 ($P < 0.01$)。反射光谱参数光谱反射指数、改良红边比、色素比值指数、归一化植被指数、红边归一化指数、改良类胡萝卜素指数和光化学反射指数等均随着温度的降低而降低 ($P < 0.01$); 红边面积随着胁迫加深不断减小, 红边位置向短波方向移动。在绿光区和红光区, 叶绿素 a 和类胡萝卜素质量分数与光谱反射率及微分光谱显著相关 ($P < 0.05$), 且与大部分光谱参数达到极显著相关 ($P < 0.01$), 说明反射光谱特征及其参数可用来估算叶片色素质量分数。图 4 表 5 参 40

关键词: 植物学; 毛竹; 色素; 低温胁迫; 反射光谱

中图分类号: S718.43; S795.7 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2014)01-0028-09

Pigment content correlated to reflectance spectrums in *Phyllostachys edulis* leaves stressed by low temperature

XU Gaiping¹, LIU Fang¹, WU Xingbo¹, WEN Guosheng¹, WANG Yukui², GAO Yan¹,
GAO Rongfu^{1,3}, ZHANG Rumin¹

(1. The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. China Bamboo Research Center, Hangzhou 310012, Zhejiang, China; 3. College of Biological Sciences and Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The reflectance spectrum for photosynthetic pigments of *Phyllostachys edulis*, a widely distributed, important bamboo with high economic value in China, has a close relationship to the growth process of *P. edulis* leaves. To evaluate the relationship between reflectance spectra characteristics and pigment content, and to seek sensitive spectral parameters for exact estimations of damage in *P. edulis* leaves stressed by low temperature, pigment content and reflectance spectra indexes, such as spectral reflectance index wavelength of 705 nm (SR_{705}), modified spectral ratio (mSR), pigment-specific simple ratio (PSSR), normalized difference vegetation index (NDVI), red NDVI (rNDVI), memory carotenoid reflectance index (Mc_{ri}), and photochemical reflectance index (PRI), in *P. edulis* leaves under low temperature stress were tested and a correlation analysis was used for comparison. Results showed that as temperature decreased, chlorophyll a content and carotenoids in the leaves significantly decreased ($P < 0.01$). As the stress level increased, reflectance spectrum parameters (SR_{705} , mSR, PSSR, NDVI, rNDVI, Mc_{ri}, and PRI) significantly decreased ($P < 0.01$). The red-edge area (S_{red}) decreased, and the red-edge inflection (λ_{red}) position moved

收稿日期: 2013-01-09; 修回日期: 2013-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30972397, 31270497, 31270756); 浙江省科技计划项目(2012F20025); 浙江农林大学科研发展基金资助项目(2010FR058)

作者简介: 许改平, 从事园林植物栽培管理研究。E-mail: pingping963220@163.com。通信作者: 张汝民, 教授, 博士, 从事植物生理生态等研究。E-mail: ruminzhang@sohu.com

toward the short-wave direction with increasing stress. Significant correlations ($P < 0.05$) were found for chlorophyll a content, carotenoids in the leaves and reflectance spectra characteristics, and first derivative of reflectance spectra at the wavelength regions for blue edge and red edge. Moreover, correlations were significant ($P < 0.01$) between pigment content and spectral characteristic parameters of SR_{705} ($r = 0.709$), $rNDVI$ ($r = 0.724$), M_{cri} ($r = 0.706$), and S_{red} ($r = 0.706$). These reflectance spectrum parameters (PSSR, NDVI, $rNDVI$, and S_{red}) could be used to evaluate leaf pigment content. [Ch, 4 fig. 5 tab. 40 ref.]

Key words: botany; *Phyllostachys edulis*; pigment; low temperature stress; reflectance spectrum

叶片色素质量分数与其光合能力和营养状况有较好的相关性, 通常是植物环境胁迫的良好指示器^[1], 叶片光谱反射率测定是一种快捷无损估测叶片色素质量分数的方法^[2]。研究表明, 近红外波段反射率 (>750 nm) 与 700 nm 和 550 nm 的比值 (R_{750}/R_{700} , R_{750}/R_{550}) 与植物叶片中叶绿素 a 和叶绿素 a+b 质量分数具有良好的相关性; 绿度归一化光谱指数 (gNDVI) 对叶绿素 a 的质量分数变化非常敏感^[3]。修正型光谱指数 (mSR_{705}) 和叶片衰老指数 (PSRI) 能够很好地反应叶片结构和色素质量分数^[4]。北美短叶松 *Pinus banksiana* 高光谱观测显示, 光谱指数 R_{750}/R_{710} 对叶绿素敏感, 可用于估测总叶绿素质量分数^[5]。当植物在受到胁迫时, 叶片色素质量分数降低, 色素质量分数与光谱反射率有显著的相关性^[6]。可见光部分光谱反射率的变化主要是由叶片的叶绿素质量分数对胁迫异常敏感所致, 且对胁迫敏感的波段范围主要集中在 550 nm 附近的绿光反射峰及 700 nm 附近的红边附近^[7]。温度水分双重胁迫综合作用于光谱反射率的光化学反射指数 (PRI), 叶片总叶绿素质量分数与红边位置 (λ_{red}) 显著相关^[8]。温度胁迫使叶片叶绿素降解, 近红外区域光谱反射率随温度胁迫程度的加剧而降低, λ_{red} 向短波方向移动^[9]。这些研究表明: 植物胁迫程度与其叶片中色素质量分数及光谱特征均有紧密的联系。毛竹 *Phyllostachys edulis* 林是中国南方重要的森林资源, 具有较高的社会、经济和生态效益, 在竹产业中具有极其重要的地位。研究显示: 绿峰 (R_g), 红谷 (R_r), λ_{red} , 红边振幅 ($D_{\lambda_{red}}$) 等可作为毛竹林光谱识别的主要参数^[10]。毛竹叶片绿光区的光谱反射率随叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素质量分数增加而逐渐降低, 且色素与红边参数有极显著的相关性^[11]。低温胁迫是毛竹生长过程中最为常见的胁迫类型, 然而, 在低温胁迫下, 毛竹叶片光合色素质量分数与反射光谱及相关参数的相关性研究未见报道。因此, 本研究以 3 年生毛竹实生苗为研究对象, 综合分析低温胁迫条件下叶片色素质量分数与反射光谱的相互关系, 以探究毛竹低温胁迫响应机制。

1 材料与方 法

1.1 材料处理

供试材料为毛竹 3 年生实生苗, 2012 年 4 月中旬将其移入花盆 (盆径 25 cm) 中缓苗。6 月中旬选取株高 1.0 m, 生长良好, 无病虫害的毛竹 3 株, 放入人工气候箱中, 相对湿度为 $(60 \pm 3)\%$, 光照条件为光照 12 h/黑暗 12 h, 光照强度为 $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 适应培养 2 d 后进行温度胁迫。处理温度设有 25 °C, 20 °C, 15 °C, 10 °C 和 5 °C 等 5 个梯度, 从 25 °C 依次降低, 以 $2\ \text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 过渡到下一温度, 在各温度中处理 24 h, 选取毛竹植株中部当年生枝条顶端向下第 3~4 片完整的功能叶片, 测定各项指标。

1.2 研究方法

1.2.1 叶绿素和类胡萝卜素质量分数测定 称取毛竹叶片 0.2 g, 剪碎后置于带盖的试管中, 加 5.0 mL 体积分数为 80% 的丙酮, 室温下遮光萃取至叶片完全变白后, 分别在 470, 645 和 663 nm 处测定其 $D(\lambda)$ 值, 按 Lichtenthaler^[12] 的方法计算叶绿素 a, 叶绿素 b 和类胡萝卜素质量分数。在各温度中处理毛竹 3 株, 取样 3 次·株⁻¹。

1.2.2 光谱数据采集 采用光谱分析仪 (UniSpec-SC, 美国产) 测定毛竹叶片在 310~1 130 nm 处的反射光谱数据, 采样间隔 1 nm, 分辨率 1 nm。测定时间为上午 10:00~12:00, 测定毛竹 3 株·次⁻¹, 选取叶子 6 片·株⁻¹, 取其平均值作为该温度的光谱反射率。测量过程中及时进行标准白板校正, 用 Multispec 5.1 数据处理软件读取反射光谱原始数据。

1.2.3 光谱分析方法 光谱数据微分处理: 将毛竹叶片反射光谱通过下列公式进行一阶微分处理得到微

分光谱。

$$D_{\lambda_i} = \frac{|R_{\lambda_{(i+1)}} - R_{\lambda_{(i-1)}}|}{2\Delta\lambda}$$

其中： λ_i 为波段*i*处的波长值； R_{λ_i} 为波长 λ_i 处的光谱反射率值； $\Delta\lambda$ 为波长 $\lambda_{(i-1)}$ 到 λ_i 的差值，由光谱采样间隔而定。“三边”参数计算方法：分别在490~530 nm，560~640 nm和680~750 nm范围内确定蓝边、黄边和红边位置、幅值和面积。 λ_{red} 为红光范围内一阶导数光谱最大值所对应的波长， $D_{\lambda_{red}}$ 为一阶导数光谱的最大值，红边面积(S_{red})为一阶导数光谱线所包围的面积。黄边(黄边位置 λ_{yellow} ，黄边幅值 $D_{\lambda_{yellow}}$ ，黄边面积 S_{yellow})和蓝边(蓝边位置 λ_{blue} ，蓝边幅值 $D_{\lambda_{blue}}$ ，蓝边面积 S_{blue})参数与红边参数意义类似。根据叶片特征，筛选出较能反应叶片特征结构的光谱参数^[2,13-22]及相关公式见表1。

1.3 数据处理

采用SPSS 13.0进行数据处理和统计分析，用OriginPro 8.0软件对光谱信息进行去噪处理，提取出与叶绿素有关的特征波段，并进行绘图。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对毛竹叶片光合色素质量分数的影响

叶绿素质量分数是表征毛竹叶片光合作用状况的主要指标。在温度胁迫下，毛竹叶片叶绿素a，叶绿素b及类胡萝卜素质量分数变化基本一致，均随着温度降低而逐渐降低(表2)。当温度降到15℃时，叶绿素a和类胡萝卜素有极显著的降低($P < 0.01$)，分别比25℃时降低了4.2%和10.9%；当温度达到5℃时，叶绿素a和类胡萝卜素质量分数比对照25℃时分别降低了6.9%和23.1%；与叶绿素a和类胡萝卜素相比，叶绿素b变化趋势不明显。

表2 低温胁迫对毛竹叶片色素质量分数的影响

Table 2 Effects of low temperature stress on pigments content in *Phyllostachys edulis* leaves

温度/℃	叶片色素质量分数/(mg·g ⁻¹)				
	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素 a+b	类胡萝卜素	叶绿素 a/b
25(ck)	2.22 ± 0.01 aA	0.86 ± 0.02 aA	3.09 ± 0.03 aA	0.08 ± 0.01 aA	2.57 ± 0.03 aA
20	2.22 ± 0.01 aAB	0.86 ± 0.01 aA	3.08 ± 0.03 abA	0.08 ± 0.01 aA	2.56 ± 0.02 aA
15	2.12 ± 0.01 bBC	0.83 ± 0.01 aA	2.97 ± 0.02 cA	0.07 ± 0.01 bAB	2.55 ± 0.01 aA
10	2.12 ± 0.01 bBC	0.85 ± 0.02 aA	2.99 ± 0.01 bcA	0.06 ± 0.01 bB	2.50 ± 0.07 aA
5	2.07 ± 0.01 bC	0.85 ± 0.02 aA	2.97 ± 0.01 cA	0.06 ± 0.01 cC	2.49 ± 0.06 aA

说明：小写字母不同表示0.05水平上的差异性($P < 0.05$)，大写字母不同表示0.01水平上的差异性($P < 0.01$)。

2.2 低温胁迫对毛竹叶片反射光谱的影响

2.2.1 低温胁迫对毛竹叶片光谱反射率的影响 低温胁迫显著影响毛竹叶片的光谱反射特征，在不同波段区域光谱响应不同(图1)。在680 nm附近的红光区域和490 nm的蓝光区域有吸收低谷，而在550 nm处有反射峰，在近红外区域，由于没有叶片色素的吸收，反射率增加，使得780~1 000 nm波段出现较高的反射平台^[23]。随着温度的降低，反射光谱在蓝光区(525~605 nm)存在明显差异，其次是黄光区(605~655 nm)和近红外区(750~1 000 nm)。毛竹叶片的反射率在460~680 nm波段随温度降低而逐渐升

表1 反射光谱参数

Table 1 Reflectance spectrum parameters

反射光谱参数	定义
叶绿素光谱指数	
光谱反射指数	R_{750} / R_{705}
改良红边比	$(R_{750} - R_{445}) / (R_{705} + R_{445})$
色素比值指数	$R_{800} / R_{680}, R_{800} / R_{635}$
反射光谱比分析	$R_{675} / R_{700}, R_{650} / R_{700}$
归一化植被指数	$(R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680})$
红边归一化指数	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$
色素归一化指数	$(R_{800} - R_{675}) / (R_{800} + R_{675}),$ $(R_{800} - R_{650}) / (R_{800} + R_{650})$
类胡萝卜素光谱指数	
反射光谱比率分析	R_{760} / R_{500}
色素比值指数	R_{800} / R_{500}
植物衰老反射指数	$(R_{680} - R_{500}) / R_{750}$
改良的类胡萝卜素指数	$R_{780} [(1 / R_{510}) - (1 / R_{530})]$
光化学反射指数	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$
花青素光谱指数	
红绿比指数	$\text{Sum}(R_{600} \sim R_{699}) / \text{Sum}(R_{500} \sim R_{599})$

高, 10 ℃时出现显著增加, 在波长 550 nm 处, 当温度降低到 5 ℃时, 反射率比对照 25 ℃提高了 24.5% ($P < 0.01$); 在 750~1 000 nm 波段, 反射率随温度降低而降低。

2.2.2 低温胁迫对毛竹叶片反射光谱“三边”参数的影响 在分析光谱数据过程中, 对原始光谱数据进行微分变换, 以减少背景噪声的影响, 从而提高参数的监测效果。将低温胁迫后毛竹叶片的反射光谱数据进行一阶导数处理, 结果如图 2 所示。不同温度处理的毛竹叶片在 680~760 nm 波段内都只有 1 个峰值。随着温度的降低, λ_{red} 逐渐向短波方向移动(表 3)。 S_{red} 随之减小, 15 ℃时差异显著。 S_{blue} 随着温度降低呈现出逐渐增加的趋势, 而 λ_{blue} 则逐渐减小; λ_{yellow} 随温度降低而减小, 而 S_{yellow} 和 D_{yellow} 则随着温度的降低呈现先升高后降低的趋势。无论是蓝边还是黄边, 最明显的变化都出现在 5 ℃时(表 3)。

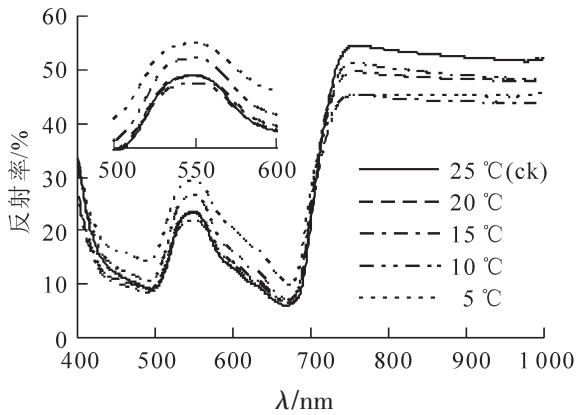


图 1 低温胁迫对毛竹叶片反射光谱的影响

Figure 1 Effects of low temperature stress on reflectance spectra in *Phyllostachys edulis* leaves

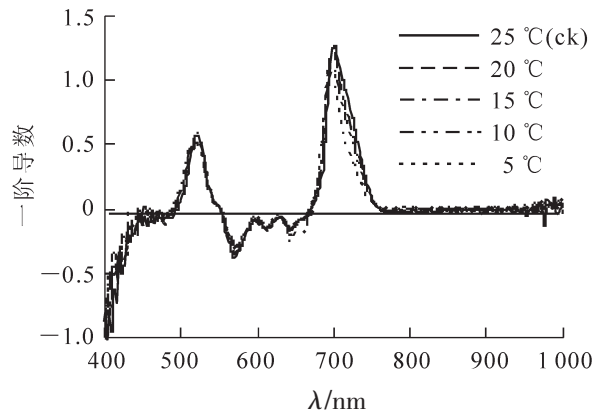


图 2 低温胁迫下毛竹叶片的微分光谱

Figure 2 First derivative of reflectance spectra in *Ph. edulis* leaves under low temperature stress

表 3 低温胁迫对毛竹叶片“三边”参数的影响

Table 3 Effects of low temperature stress on “three edge” parameters in *Ph. edulis* leaves

参数	不同温度下的参数值				
	25(ck)	20	15	10	5 ℃
λ_{blue}	520.50 ± 1.50 aA	519.70 ± 0.01 aA	520.10 ± 1.50 aA	519.60 ± 1.29 aA	518.70 ± 0.43 aA
D_{blue}	0.58 ± 0.04 aA	0.55 ± 0.04 aA	0.51 ± 0.07 aA	0.61 ± 0.12 aA	0.53 ± 0.11 aA
S_{blue}	11.90 ± 1.20 aA	12.10 ± 1.40 aA	12.60 ± 1.90 aA	13.70 ± 1.20 aA	13.50 ± 2.20 aA
λ_{yellow}	569.20 ± 0.10 bAB	568.50 ± 0.50 bB	571.50 ± 0.20 aA	569.20 ± 1.10 bAB	568.10 ± 0.01 bB
D_{yellow}	-0.38 ± 0.01 bA	-0.32 ± 0.02 abA	-0.29 ± 0.04 aA	-0.37 ± 0.04 abA	-0.31 ± 0.05 aA
S_{yellow}	13.84 ± 0.87 aA	12.82 ± 1.03 aA	12.01 ± 1.79 aA	14.61 ± 2.72 aA	13.47 ± 2.12 aA
λ_{red}	700.20 ± 1.20 aA	699.50 ± 0.80 abA	699.00 ± 1.40 abA	697.70 ± 1.40 abA	696.50 ± 0.10 bA
D_{red}	1.27 ± 0.02 aA	1.19 ± 0.05 aA	1.09 ± 0.17 aA	1.14 ± 0.14 aA	1.08 ± 0.16 aA
S_{red}	47.66 ± 1.80 aA	42.02 ± 1.53 abAB	40.31 ± 1.72 abAB	39.52 ± 0.95 bcAB	34.71 ± 2.91 cB

说明: 小写字母不同表示 0.05 水平上的差异性 ($P < 0.05$), 大写字母不同表示 0.01 水平上的差异性 ($P < 0.01$)。

2.2.3 低温胁迫对毛竹叶片反射光谱参数的影响 光谱参数是绿色植物的光谱反射特征, 是反映植物生长状况的最常用光谱变量。本试验中筛选出的叶绿素、类胡萝卜素和花青素的相关光谱参数, 均随着温度降低有显著地增加或降低, 且大部分参数的变化幅度达到了极显著 ($P < 0.01$) 水平。表 4 可知: 光谱反射指数、改良红边比、色素比值指数 a、色素比值指数 b、归一化植被指数、红边归一化指数、色素归一化指数 a、色素归一化指数等叶绿素相关参数, 及反射光谱比分析、色素比值指数、改良的类胡萝卜素指数、光化学反射指数等类胡萝卜素相关参数随温度的降低而降低; 反射光谱比率分析 a、红绿比指数和反射光谱比率分析 b 随着温度降低而升高; 除反射光谱比率分析 a 外, 各光谱参数变化均达极显著 ($P < 0.01$) 水平。

2.3 低温胁迫下毛竹叶片色素质量分数与反射光谱特征的相关性

2.3.1 色素质量分数与光谱反射率的相关性 对低温胁迫后毛竹叶色素质量分数与光谱反射率进行相关

表4 低温处理后毛竹叶片的反射光谱参数变化

Table 4 Effects of low temperature stress on reflectance spectrum parameters in *Phyllostachys edulis* leaves

参数	不同温度下的参数值				
	25(ck)	20	15	10	5℃
光谱反射指数	1.982 ± 0.169 aA	1.778 ± 0.172 abAB	1.744 ± 0.151 abAB	1.805 ± 0.374 abAB	1.476 ± 0.134 bB
改良红边比	0.626 ± 0.013 aA	0.638 ± 0.013 aA	0.619 ± 0.058 aA	0.590 ± 0.092 aA	0.466 ± 0.027 bB
色素比值指数 a	7.984 ± 0.817 aA	6.545 ± 0.745 aAB	6.395 ± 1.156 aAB	7.268 ± 2.477 aAB	4.365 ± 0.584 bB
色素比值指数 b	5.828 ± 0.829 aA	4.870 ± 0.782 aAB	4.589 ± 0.858 abAB	4.914 ± 2.205 aAB	2.883 ± 0.427 bB
反射光谱比分析 a	0.291 ± 0.009 bA	0.305 ± 0.032 bA	0.311 ± 0.034 bA	0.294 ± 0.066 bA	0.369 ± 0.018 aA
反射光谱比分析 b	0.338 ± 0.011 bB	0.352 ± 0.039 bB	0.368 ± 0.033 bB	0.373 ± 0.084 bB	0.482 ± 0.016 aA
归一化植被指数	0.776 ± 0.020 aA	0.733 ± 0.029 aAB	0.724 ± 0.049 aA	0.739 ± 0.086 aAB	0.624 ± 0.039 bB
红边归一化指数	0.328 ± 0.037 aA	0.278 ± 0.044 abAB	0.269 ± 0.041 abAB	0.278 ± 0.090 abAB	0.190 ± 0.044 bB
色素归一化指数 a	0.792 ± 0.017 aA	0.754 ± 0.027 aA	0.743 ± 0.047 aAB	0.758 ± 0.083 aA	0.647 ± 0.031 bB
色素归一化指数 b	0.762 ± 0.024 aA	0.720 ± 0.044 aA	0.703 ± 0.053 aA	0.700 ± 0.109 aA	0.561 ± 0.047 bB
反射光谱比率分析	5.869 ± 0.539 aA	5.298 ± 0.619 aA	5.138 ± 0.899 aA	5.052 ± 1.708 aA	2.970 ± 0.229 bB
色素比值指数	5.779 ± 0.547 aA	5.225 ± 0.591 aA	5.064 ± 0.888 aA	4.964 ± 1.689 aA	2.976 ± 0.264 bB
植物衰老反射指数	-0.047 ± 0.004 bA	-0.038 ± 0.007 bA	-0.041 ± 0.011 abA	-0.070 ± 0.029 bAB	-0.107 ± 0.025 cB
改良的类胡萝卜素指数	2.478 ± 0.358 aA	2.055 ± 0.326 bAB	1.956 ± 0.449 bAB	2.002 ± 0.993 aAB	0.898 ± 0.113 bB
光化学反射指数	0.060 ± 0.004 aA	0.052 ± 0.012 abAB	0.050 ± 0.006 abAB	0.056 ± 0.011 aAB	0.040 ± 0.006 bB
红绿比指数	0.524 ± 0.004 bB	0.565 ± 0.031 bAB	0.567 ± 0.030 bAB	0.536 ± 0.049 bB	0.616 ± 0.010 aA

说明：小写字母不同表示 0.05 水平上的差异性 ($P < 0.05$)，大写字母不同表示 0.01 水平上的差异性 ($P < 0.01$)。

分析表明(图 3)，波长小于 710 nm，毛竹叶叶绿素 a，叶绿素 a+b 和类胡萝卜素质量分数与反射率呈负相关，且于 452~700 nm 的反射率达显著 ($P < 0.05$) 相关，在 620 nm 处相关系数最大。光谱反射率与除叶绿素 b 外的各色素质量分数均显著相关，叶绿素 a 与光谱反射率的相关系数较类胡萝卜素要高；波长大于 710 nm，叶绿素 a，叶绿素 b，叶绿素 a+b 和类胡萝卜素质量分数与光谱反射率呈正相关，且均达到极显著 ($P < 0.01$) 水平。

2.3.2 色素质量分数与微分光谱的相关性 毛竹叶片色素质量分数与一阶微分光谱之间的相关系数图表明(图 4)，叶绿素 a，叶绿素 a+b 和类胡萝卜素质量分数与一阶微分光谱在 450~462，480~516，521~549，554~587，589~676，695~756，757~820 nm 处均达极显著相关。其中，在 450~462，480~516，554~587 和 757~820 nm 等 4 个波段达极显著负相关，480~516 nm 波段相关系数的绝对值最大，513 nm 处为 -0.973；而在其他几个显著相关波段呈极显著正相关，其中 695~756 nm 相关系数最大，745 nm 处为 -0.822，属于红边范围。可见蓝光和红光区域是毛竹叶片色素微分光谱的敏感区域。

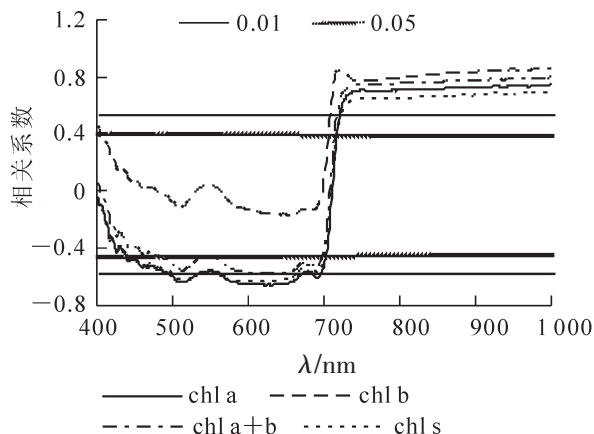


图3 毛竹叶片色素质量分数与光谱反射率的相关性

Figure 3 Correlation between reflectance spectra and pigment content in *Phyllostachys edulis* leaves

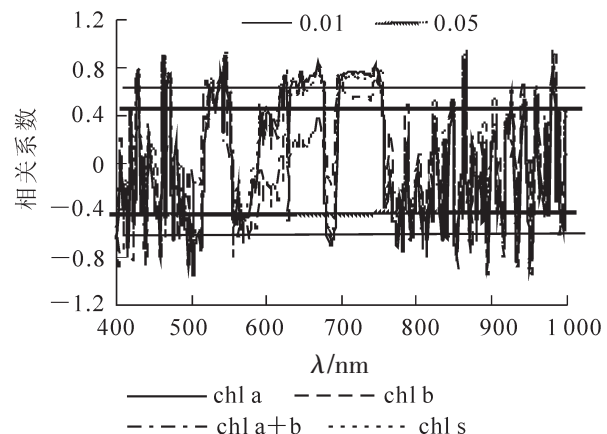


图4 毛竹叶片色素质量分数与微分光谱的相关性

Figure 4 Correlation between derivative spectra and pigment content in *Ph. edulis* leaves

2.3.3 色素质量分数与光谱特征参数的相关性 相关分析表明：毛竹叶片绝大多数参数都与叶绿素 a、叶绿素 a+b 及类胡萝卜素质量分数之间存在极显著($P<0.01$)的相关性(表 5)。叶绿素 a、叶绿素 a+b 及类胡萝卜素质量分数与光谱反射指数、改良红边比、色素比值指数 b、色素归一化指数 b、归一化植被指数、红边归一化指数、反射光谱比分析、色数比值指数、改良的类胡萝卜素指数、光化学反射指数、 λ_{red} 、 D_{red} 和 S_{red} 等光谱参数极显著正相关，其中与光化学反射指数相关系数最小，与 S_{red} 的相关系数最大。叶绿素 a、叶绿素 a+b 及类胡萝卜素质量分数与反射光谱比分析 a、反射光谱比分析 b、红绿比指数呈负相关，其中与红绿比指数相关系数最小，与反射光谱比分析 b 的相关系数最大。叶绿素 b 与除 D_{red} 、 S_{red} 以外的各参数均未达到显著相关，与前面叶绿素 b 质量分数和反射率及微分光谱相关性未达显著水平相一致。

3 讨论

毛竹叶片叶绿素 a 和类胡萝卜素质量分数随温度降低而降低，是由于植物色素的合成过程，绝大部分都要有酶的参与，低温降低了叶绿体中一系列合成酶的活性^[24]；再者，低温胁迫引起叶片叶绿体结构变形、膜系统受到破坏，体内活性氧积累过多，从而加速了色素的降解^[25]，因此低温胁迫下的色素质量分数的降低，不仅是合成受阻，而且存在色素分解的加剧。植物色素是植物体内主要的吸收光能物质，其质量分数往往是植物环境胁迫、光合能力等生理状态的良好指示剂^[26]，因而常用于监测植物长势、估算植被光合效率和生物量^[27]。毛竹叶片叶绿素 b 变化不明显，这与前人的研究结果有所不同，可能是低温处理时间太短，叶绿素 b 对低温胁迫不敏感，也可能与毛竹苗生长阶段和叶片发育状况有关。有待进一步研究探讨。

低温胁迫下毛竹叶片光谱显著差异主要在可见光区，且随温度降低而升高。植物绿光区(525~605 nm)及红光到近红外波段(680~750 nm)的反射率突变区域，包含着丰富的信息^[28]。研究显示温度胁迫后的水稻 *Oryza sativa* 在近红外区反射率随温度胁迫程度的加剧而降低，可见光区与之相反^[9]，这与毛竹叶片研究一致。毛竹叶片光谱参数光谱反射指数、改良红边比、色素比值指数 b、归一化植被指数、红边

表 5 毛竹叶片反射光谱参数与色素质量分数的相关性

Table 5 Correlation between reflectance spectrum parameters and pigment contents in *Phyllostachys edulis* leaves

光谱参数	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素 a+b	类胡萝卜素
光谱反射指数	0.709 **	0.447	0.682 **	0.656 **
改良红边比	0.677 **	0.235	0.614 **	0.653 **
色素比值指数 a	0.608 *	0.395	0.587 *	0.545 *
色素比值指数 b	0.717 **	0.433	0.686 **	0.666 **
反射光谱比 a	-0.568 *	-0.304	-0.536 *	-0.510 *
反射光谱比 b	-0.699 **	-0.316	-0.649 **	-0.663 **
归一化植被指数	0.669 **	0.368	0.633 **	0.618 **
红边归一化指数	0.724 **	0.423	0.690 **	0.676 **
色素归一化指数 a	0.673 **	0.369	0.637 **	0.623 **
色素归一化指数 b	0.724 **	0.360	0.678 **	0.685 **
反射光谱比率分析	0.696 **	0.321	0.647 **	0.656 **
色素比值指数	0.702 **	0.325	0.653 **	0.662 **
植物衰老反射指数	0.663 **	0.139	0.548 *	0.659 **
改良的类胡萝卜素指数	0.706 **	0.369	0.665 **	0.661 **
光化学反射指数	0.633 **	0.472	0.623 **	0.567 *
红绿比指数	-0.538 *	-0.381	-0.525 *	-0.468
λ_{red}	0.851 **	0.397	0.792 **	0.843 **
D_{red}	0.652 **	0.740 **	0.690 **	0.580 *
S_{red}	0.881 **	0.675 **	0.870 **	0.845 **

说明：* 表示差异显著($P<0.05$)，** 表示差异极显著($P<0.01$)。

归一化指数、色素比值指数 a、色素归一化指数 b、反射光谱比率分析、色数比值指数、改良的类胡萝卜素指数、光化学反射指数和 S_{red} 等, 在低温胁迫下变化尤为明显(表 4), 其中反射光谱比分析^[29]、色素比值指数^[15]、色素比值指数^[15]、光谱反射指数^[13]和 S_{red} ^[30]等表现光谱特征优于其他参数, 可作为监测依据。

毛竹叶片 25 °C 时红光吸收较多。随着温度降低, 叶结构的破坏和叶绿素减少, 导致红边区域吸收能力降低, 反射增加, 红边向短波方向移动, S_{red} 也随之减小。叶绿素的吸收光谱区主要是在 550~750 nm 波段, 生长旺盛时红光吸收较多^[31-32], 红光区光谱特征, 可指示叶绿素质量分数的变化情况^[33-34]。可见光和近红外区域是色素感受胁迫的敏感区域, 色素质量分数与一阶微分光谱在红边(695~754 nm)内相关性最高^[35]。毛竹叶片绿光区光谱反射率与色素质量分数(除叶绿素 b 外)呈显著负相关, 红边(680~780 nm)内一阶微分值, 与叶片色素(除叶绿素 b 外)质量分数达极显著相关, 与前人有相似的结果。红光波段和绿光波段在评价毛竹长势上是十分有用的。

光谱参数由光谱反射曲线衍生而来, 在表现植物生长状况上更为具体和更具指向性, 光谱反射指数、改良红边比、色数比值指数 b、归一化植被指数、红边归一化指数、色素比值指数 a、色素归一化指数 b、反射光谱比率分析、色数比值指数、光化学反射指数及 S_{red} 等毛竹光谱参数与色素质量分数(除叶绿素 b 外)表现显著相关性。研究显示植物叶片色素质量分数与光谱参数也有着紧密的关系^[33,36], 光谱参数、改良的类胡萝卜素指数、归一化植被指数及色素归一化指数 a、色素归一化指数 b 可用来分析叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 质量分数, 反射光谱比分析、光化学反射指数、改良的类胡萝卜素指数及红绿比指数可用来监测类胡萝卜素和花青素质量分数^[37]。 λ_{red} , S_{red} , 红边归一化指数, 红边斜率(S_{rg})^[38], 修正的简单化植被指数(mSR₇₀₅)和修正的归一化差值植被指数(mND₇₀₅)^[4]等几个反射光谱特征参数均与叶绿素质量分数存在指数函数关系。红边参数 λ_{red} , $D_{\lambda_{red}}$, S_{red} 由于充分发挥了微分技术的优势, 对植株生化组分的估测具有较高的能力^[28,39], 毛竹叶片红边参数与色素质量分数极显著的相关性也充分印证了这一点, 其数值大小受叶绿素及其叶片结构的影响, 对胁迫最为敏感^[40], 采用光谱参数法估测毛竹叶片色素质量分数是切实可行的。

低温胁迫下毛竹叶片色素和光谱特征均有显著差异, 且叶片色素质量分数与反射光谱及各参数有极显著的相关性, 可通过叶片光谱特征以及反射光谱比分析、色素归一化指数、色数比值指数、红边归一化指数和 S_{red} 等光谱参数, 方便快捷地反映毛竹生长状况。

参考文献:

- [1] RICHARDSON A D, DUIGAN S P, BERLYN G P. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content [J]. *New Phytol*, 2002, **153**(1): 185 - 194.
- [2] SIMS D A, GAMON J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages [J]. *Remote Sens Environ*, 2002, **81**(2/3): 337 - 354.
- [3] GITELSON A A, GITZT Y, MERZLYYAK M N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for nondestructive chlorophyll assessment in higher plant leaves [J]. *J Physiol*, 2003, **160**(3): 271 - 282.
- [4] CASTRO K L, SANCHEZ-AZOFEIFA G A. Changes in spectral properties, chlorophyll content and internal mesophyll structure of senescing *Populus balsamifera* and *Populus tremuloides* leaves [J]. *Sensors*, 2008, **8**(1): 51 - 69.
- [5] MOORTHY I, MILLER J R, NOLAND T L. Estimating chlorophyll concentration in conifer needles with hyperspectral data: an assessment at the needle and canopy level [J]. *Remote Sens Environ*, 2008, **112**(6): 2824 - 2838.
- [6] NIEMANN K O. Remote sensing of forest stand age using airborne spectrometer data [J]. *Photogr Eng Remote Sens*, 1995, **61**(9): 1119 - 1127.
- [7] CARTER G A, KNAPP A K. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration [J]. *Am J Bot*, 2001, **88**: 677 - 684.
- [8] JULIO O, LEONOR O M, ANABELA R. Reflectance indices as nondestructive indicators of the physiological status of *Ceratonia siliqua* seedlings under varying moisture and temperature regimes [J]. *Funct Plant Biol*, 2012, **39**(7): 588 - 597.

- [9] 程高峰, 张佳华, 李秉柏, 等. 不同温度处理下水稻高光谱及红边特征分析[J]. 江苏农业学报, 2008, **24**(5): 573 – 580.
CHENG Gaofeng, ZHANG Jiahua, LI Bingbai, *et al.* Hyperspectral and red edge characteristics for rice under different temperature stress levels [J]. *Jiangsu J Agric Sci*, 2008, **24**(5): 573 – 580.
- [10] 官凤英, 邓旺华, 范少辉, 等. 毛竹林光谱特征及其与典型植被光谱差异分析[J]. 北京林业大学学报, 2012, **34**(3): 31 – 35.
GUAN Fengying, DENG Wanghua, FAN Shaohui, *et al.* Spectral characteristics of *Phyllostachys pubescens* stand and its differential analysis with typical vegetation [J]. *J Beijing For Univ*, 2012, **34**(3): 31 – 35.
- [11] 高培军, 董大川, 何仁华, 等. 不同氮肥水平与毛竹林反射光谱的关系[J]. 北京林业大学学报, 2011, **33**(6): 53 – 57.
GAO Peijun, DONG Dachuan, HE Renhua, *et al.* Effect of different fertilizer supplies on reflectance spectrum in leaves *Phyllostachys pubescens* [J]. *J Beijing For Univ*, 2011, **33**(6): 53 – 57.
- [12] LICHTENTHALER H K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes [J]. *Methods Enzymol*, 1987, **148**: 350 – 382.
- [13] GITELSON A A, MERZLYAK M N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer Platanoides* L. leaves spectral features and relation to chlorophyll estimation [J]. *J Plant Physiol*, 1994, **143**: 286 – 292.
- [14] BLACKBURN G A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches [J]. *Remote Sens Environ*, 1998, **66**(3): 273 – 285.
- [15] BLACKBURN G A. Spectra indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves [J]. *Int J Remote Sens*, 1998, **19**(4): 657 – 675.
- [16] BLACKBURN G A. Relationships between spectral reflectance and pigment concentrations in stacks of deciduous broadleaves [J]. *Remote Sens Environ*, 1999, **70**(2): 224 – 237.
- [17] CHAPPELLE E W, KIM M S, MCMURTREY III J E. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remotely estimation of the concentration of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids in soybean leaves [J]. *Remote Sens Environ*, 1992, **39**(3): 239 – 247.
- [18] GAMON J A, SERRANO L, SURFUS J S. The photochemical reflectance index: an indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types and nutrient levels [J]. *Oecologia*, 1997, **112**: 492 – 501.
- [19] GAMON J A, SURFUS J S. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer [J]. *New Phytologist*, 1999, **143**: 105 – 117.
- [20] MERZLYAK M N, GITELSON A A, CHIVKUNOVA O B, *et al.* Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening [J]. *Physiol Plantarum*, 1999, **106**: 135 – 141.
- [21] GITELSON A A, KEYDAN G P, MERZLYAK M N. Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves [J]. *Geophys Res Letters*, 2006, **33**: L11402.
- [22] GAMON J A, PENUELAS J, FIELD C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency [J]. *Remote Sens Environ*, 1992, **41**(1): 35 – 44.
- [23] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦叶片氮素状况与光谱特性的相关研究[J]. 植物生态学报, 2004, **28**(2): 172 – 177.
XUE Lihong, CAO Weixing, LUO Weihong, *et al.* Correlation between leaf nitrogen status and canopy spectral characteristics in wheat [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2004, **28**(2): 172 – 177.
- [24] OSORIO M L, OSORIO J, VIEIRA A C, *et al.* Influence of enhanced temperature on photosynthesis, photooxidative damage, and antioxidant strategies in *Ceratonia siliqua* L. seedlings subjected to water deficit and rewatering [J]. *Photosynthetica*, 2011, **49**: 3 – 12.
- [25] 孙富, 杨丽涛, 谢晓娜, 等. 低温胁迫对不同抗寒性甘蔗品种幼苗叶绿体生理代谢的影响[J]. 作物学报, 2012, **38**(4): 732 – 739.
SUN Fu, YANG Litao, XIE Xiaona, *et al.* Effect of chilling stress on physiological metabolism in chloroplasts of seedlings of sugarcane varieties with different chilling resistance [J]. *Acta Agron Sin*, 2012, **38**(4): 732 – 739.
- [26] RICHARDSON A D, DUIGAN S P, BERLYN G P. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chloro-

- phyll content [J]. *New Phytologist*, 2002, **153**(1): 185 – 194.
- [27] NAIDU R A, PERRY E M, PIERCE F J, *et al.* The potential of spectral reflectance technique for the detection of Grapevine leafroll-associated virus-3 in two red-berried wine grape cultivars [J]. *Computer Electron Agric*, 2009, **66**(1): 38 – 45.
- [28] HORLER D N H, DOCKRAY M, BARBER J. The red edge of plant leaf reflectance [J]. *Int J Remote Sens* 1983, **4**(2): 273 – 288.
- [29] CHAPPELLE E W, KIM M S, McMURTREY III J E, *et al.* Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remotely estimation of the concentration of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids in soybean leaves [J]. *Remote Sens Environ*, 1992, **39**(3): 239 – 247.
- [30] MUTANGA O, SKIDMORE A K. Red edge shift and biochemical content in grass canopies [J]. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2007, **62**(1): 34 – 42.
- [31] 冯伟, 朱艳, 田永超, 等. 基于高光谱遥感的小麦叶片氮积累量[J]. 生态学报, 2008, **28**(1): 23 – 32.
FENG Wei, ZHU Yan, TIAN Yongchao, *et al.* Monitoring leaf nitrogen accumulation with hyperspectral remote sensing in wheat [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(1): 23 – 32.
- [32] BLACKBURN G A, FERWERDA J G. Retrieval of chlorophyll concentration from leaf reflectance spectra using wavelet analysis [J]. *Remote Sens Environ*, 2008, **112**(4): 1614 – 1632.
- [33] GITELSON A A, MERZLYAK M N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll [J]. *J Plant Physiol*, 1996, **148**(3/4): 494 – 500.
- [34] GARBULSKY M F, PENUELAS J, GAMON J, *et al.* The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies: a review and meta-analysis [J]. *Remote Sens Environ*, 2011, **115**(2): 281 – 297.
- [35] 冯锐, 张玉书, 于文颖, 等. 辽西不同针叶被害率的油松冠层光谱特征[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(7): 1774 – 1780.
FENG Rui, ZHANG Yushu, YU Wenying, *et al.* Spectral characteristics of *Pinus tabulaeformis* canopy with different damaged rates of needle leaf in western Liaoning Province, Northeast China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(7): 1774 – 1780.
- [36] BUSCH F, HUNER N P A, ENSMINGER I. Biochemical constraints limit the potential of the photochemical reflectance index as a predictor of effective quantum efficiency of photosynthesis during the winter spring transition in Jack pine seedlings [J]. *Funct Plant Biol*, 2009, **36**: 1016 – 1026.
- [37] 薛中财, 高辉远, 彭涛, 等. 光谱分析在植物生理生态研究中的应用[J]. 植物生理学报, 2011, **47**(4): 313 – 320.
XUE Zhongcai, GAO Huiyuan, PENG Tao, *et al.* Application of spectral reflectance on research of plant eco-physiology [J]. *Plant Physiol J*, 2011, **47**(4): 313 – 320.
- [38] 杜华强, 葛宏立, 范文义, 等. 马尾松针叶光谱特征与其叶绿素含量间关系研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, **29**(11): 3033 – 3037.
DU Huaqiang, GE Hongli, FAN Wenyi, *et al.* Study on relationships between total chlorophyll with hyperspectral features for leaves of *Pinus massoniana* forest [J]. *Spectr Spectr Anal*, 2009, **29**(11): 3033 – 3037.
- [39] BLACKBURN G A. Wavelet decomposition of hyperspectral data: a novel approach to quantifying pigment concentrations in vegetation [J]. *Int J Remote Sens*, 2007, **28**(12): 2831 – 2855.
- [40] 王秀珍, 黄敬峰, 李云梅, 等. 水稻生物化学参数与高光谱遥感特征参数的相关分析[J]. 农业工程学报, 2003, **19**(2): 144 – 148.
WANG Xiuzhen, HUANG Jingfeng, LI Yunmei, *et al.* Correlation between chemical contents of leaves and characteristic variables of hyperspectra on rice field [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2003, **19**(2): 144 – 148.