

DOI: 10.5846/stxb201803300669

张玮,王鑫梅,潘庆梅,谢锦忠,张劲松,孟平.干旱胁迫下雷竹叶片叶绿素的高光谱响应特征及含量估算.生态学报,2018,38(18): - .  
Zhang W, Wang X M, Pan Q M, Xie J Z, Zhang J S, Meng P. Hyperspectral response characteristics and chlorophyll content estimation of *Phyllostachys violascens* leaves under drought stress. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): - .

# 干旱胁迫下雷竹叶片叶绿素的高光谱响应特征及含量估算

张 玮<sup>1</sup>, 王鑫梅<sup>2</sup>, 潘庆梅<sup>2</sup>, 谢锦忠<sup>1</sup>, 张劲松<sup>2</sup>, 孟 平<sup>2, \*</sup>

1 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400

2 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091

**摘要:**植物叶片的反射光谱特征与叶绿素含量密切相关。以重要的笋用竹种雷竹(*Phyllostachys violascens*)为研究对象,采用盆栽及控水试验方法研究了2年生雷竹在干旱胁迫条件下冠层叶片反射光谱的响应特征,分析了叶片叶绿素含量与不同波段光谱反射率一阶微分值以及光谱特征参数之间的相关关系,并以雷竹叶绿素含量敏感波段及构建的植被指数与叶绿素含量进行了拟合。结果表明,重度缺水处理后雷竹叶片叶绿素含量显著降低,在可见光区叶片光谱反射率随叶绿素含量的降低而增加,以波长493、639、693、756 nm等处的光谱反射率一阶微分值与叶绿素含量的相关性较高。雷竹叶片叶绿素含量与光谱特征参数如绿峰反射率、红谷反射率、蓝边面积、绿峰面积之间的相关性较高。与已有的植被指数相比基于雷竹叶绿素含量敏感波段修正后的植被指数与叶绿素含量相关性优于原植被指数。基于反射率一阶微分值构建的多元回归方程以及修正的绿色归一化植被指数(mGNDVI)构建的回归方程拟合效果较好,为雷竹叶绿素含量的较优估算方程。研究结果可以为雷竹叶绿素含量的快速无损测定以及季节性干旱条件下雷竹林的科学经营及灾后评估提供依据。

**关键词:**雷竹;冠层叶片;干旱胁迫;叶绿素;反射光谱

## Hyperspectral response characteristics and chlorophyll content estimation of *Phyllostachys violascens* leaves under drought stress

ZHANG Wei<sup>1</sup>, WANG Xinmei<sup>2</sup>, PAN Qingmei<sup>2</sup>, XIE Jinzhong<sup>1</sup>, ZHANG Jinsong<sup>2</sup>, MENG Ping<sup>2, \*</sup>

1 Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China

2 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

**Abstract:** Plant leaf spectral reflectance is closely related to leaf chlorophyll content (LCC). The present study investigated the canopy leaf reflectance spectrum characteristics of *Phyllostachys violascens* under drought stress with 2a potted plants and water control methods. The correlation between LCC and first derivative of spectral reflectance together with spectral characteristics parameters were calculated and analyzed. The regression equation of vegetation index and LCC was build based on the reflectance spectrum sensitive wavelengths of LCC. The results indicated that: the LCC in *P. violascens* leaves was significantly reduced under severe drought stress conditions. In the visible region, the spectral reflectance of leaves increased with the decrease of LCC. The correlation with LCC and first derivative of spectral reflectance at wavelengths of 493 nm, 639 nm, 693 nm and 756 nm was higher. The correlation coefficients between LCC and spectral characteristic parameters such as green peak reflectance, red valley reflectivity, blue edge area and green peak area was higher than other parameters. The correlation between the modified vegetation index and LCC was better than that of original vegetation index.

**基金项目:**中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2016SY011);对发展中国家科技援助项目(KY201502001)

**收稿日期:**2018-03-30; **修订日期:**2018-07-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mengping@caf.ac.cn

The regression equation based on spectral reflectance and first derivative of spectral reflectance at four wavelengths (493 nm, 639 nm, 693 nm, and 756 nm) together with the modified green normalized vegetation index (mGNDVI) were optimal equation for estimation LCC of *P. violascens*. The results can provide a basis for the rapid and nondestructive determination of LCC. Furthermore, it can provide guidance for scientific management and post-disaster evaluation of bamboo forests under seasonal drought conditions.

**Key Words:** *Phyllostachys violascens*; canopy leaves; drought stress; chlorophyll; reflectance spectrum

水分是影响植物生长发育的重要因子<sup>[1-2]</sup>,严重的水分胁迫甚至会破坏植物叶绿体结构和功能,影响植物光合碳同化进程,造成光合产物合成受阻,致使生产力严重下降<sup>[3-6]</sup>。竹类植物在我国分布广、面积大,笋用竹林是广大竹农的重要经济收入来源<sup>[7]</sup>。但由于竹类植物根系通常分布较浅(0—30 cm),对浅层土壤水分变化敏感<sup>[8]</sup>,加上近年来我国南方夏秋季节性干旱的发生频率增加,已对亚热带地区农林生产经营造成重大影响<sup>[9]</sup>。及时准确地对于旱胁迫条件下植株叶片叶绿素含量进行估算及诊断,对制定科学的水肥管理措施及进行干旱状况评估具有重要的现实意义。

传统的生理生化分析方法对叶绿素进行测定的过程具有破坏性且难以实时、快速监测。植被反射光谱受叶片内部结构、水分、色素含量等因素的影响,已成为研究者获取植物生理生化信息的重要手段<sup>[10-12]</sup>。目前已有相关研究利用反射光谱技术对植物叶片的叶绿素含量进行估算<sup>[13-16]</sup>,但不同的试验材料其反射光谱对叶绿素的敏感特征可能不同<sup>[16-17]</sup>,这就需要在应用前进行地面验证。雷竹(*Phyllostachys violascens*)属禾本科(*Poaceae*)竹亚科(*Bambusoideae*)刚竹属(*Phyllostachys*),是我国最重要的笋用竹种之一<sup>[18]</sup>。目前有关雷竹叶片反射光谱特征方面的研究较少,已有研究基于已有的光谱参数对雷竹叶绿素含量进行计算,但并未对雷竹叶绿素敏感波段做进一步的分析与光谱指数修正<sup>[19]</sup>。

本文以雷竹为研究对象,通过盆栽及不同的人工控水处理模拟夏秋季干旱胁迫条件,对其冠层叶片叶绿素及反射光谱进行测定,探讨干旱胁迫下雷竹叶片叶绿素的高光谱响应特征以及利用敏感波段估算叶绿素含量的方法,以期对竹类植物叶片叶绿素含量的无损监测以及进一步的高光谱高空遥感提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究地位于浙江省杭州市临安区(29°56'N—30°23'N,118°51'E—119°72'E)太湖源观赏竹种园内,该区属中亚热带季风气候,年均温 15.4℃,极端最低温 -13.3℃,极端最高温 40.2℃,日均温大于 10℃ 的活动积温约 5100℃,年日照时数 1850—1950 h,年均无霜期 235 d,年降水量 1250—1700 mm,年均空气相对湿度在 80% 以上。

### 1.2 试验方案

试验材料为田间正常生长的雷竹,2017 年 3 月 31 选择生长状况较为一致的 2 年生竹株切鞭进行盆栽,盆栽苗的平均胸径 3.6 cm,平均高度 4.0 m,盆栽土壤为进行充分混合均一化的红壤,移栽后所有雷竹采用常规统一管理进行恢复性生长。2017 年 8 月 2 日选择生长状况相近的雷竹作 3 种水分处理,每处理 12 盆样竹:正常水分处理(盆栽土壤水分保持田间最大持水量 70%—90%,记为 WW);中度缺水处理(盆栽土壤水分保持田间最大持水量 40%—60%,记为 MD);重度缺水处理(盆栽土壤水分保持田间最大持水量 20%—40%,记为 SD),试验期间棚内平均气温 27.8℃,极端最高气温 38.3℃,平均相对湿度大于 80%,当盆栽土壤水分含量下降到试验设计下限时进行补水,补水到不超过该试验设计范围的上限。样品采集与测试在 2017 年 8 月 31 日进行(试验处理进行到第 28 天,根据预备试验,此时不同水分处理之间的雷竹生理生化指标已产生明显差异),选取 3 种不同水分处理(WW、MD、SD)的雷竹各 4 株,每株样竹选取 3 片冠层成熟叶片,共 36 片叶,用于

测定叶片叶绿素含量及其对应的反射光谱特征。

### 1.3 测定指标、方法

每一片叶采下后立即进行反射光谱测定,然后编号放入自封袋,置于阴暗条件下立即带回实验室进行叶绿素含量的测定,叶绿素含量的测定采用丙酮-乙醇混合液浸提叶片 24 h,通过分光光度计在 663 nm 与 645 nm 处进行比色测定,将叶绿素浓度换算成单位质量的叶绿素含量。

叶片反射光谱采用美国 ASD 公司的 FieldSpec 4 地物光谱仪进行测定,利用仪器内置光源及自带的叶片夹与探头进行测定,每组数据测量前进行标准白板校正,每一叶片测定 4 次,取平均值。光谱测量的波长范围为 350—2500 nm,分辨率为 1 nm。

### 1.4 数据计算与分析方法

使用仪器自带软件进行光谱数据平均计算并导出作为原始光谱反射率,由于光谱仪采集的是离散数据,对原始光谱数据进行一阶微分计算<sup>[20]</sup>,即

$$DR_i = (R_{i+1} - R_{i-1}) / (\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}) = (R_{i+1} - R_{i-1}) / 2\Delta\lambda$$

式中, $i$  为光谱通道, $R_i$  为第  $i$  个波长的光谱反射率, $DR_i$  为  $R_i$  的一阶微分光谱, $\lambda_i$  为第  $i$  个通道的波长使用 Excel 2016 软件和 SPSS 19.0 软件对数据进行平均值、相关系数、回归方程等计算和制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水分处理条件下雷竹叶片叶绿素含量变化

图 1 显示了不同缺水处理条件下雷竹叶片叶绿素含量的变化,经缺水处理 28 天后,雷竹叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量均随缺水程度的增加呈逐步降低的趋势。中度缺水处理(MD)雷竹叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总含量分别较水分良好的处理(WW)降低 4.1%、4.5%和 4.2%;重度缺水处理(SD)雷竹叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总含量分别较 WW 降低 16.2%、10.9%和 15.0%;但 WW 和 MD 处理雷竹叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量差异不显著( $P < 0.05$ ),而 SD 处理叶片叶绿素 a 和叶绿素总量显著低于 WW 和 MD 处理( $P < 0.05$ )。说明干旱胁迫显著影响了雷竹叶片叶绿素含量,特别是重度缺水处理后造成叶绿素 a 和叶绿素总含量的锐减。

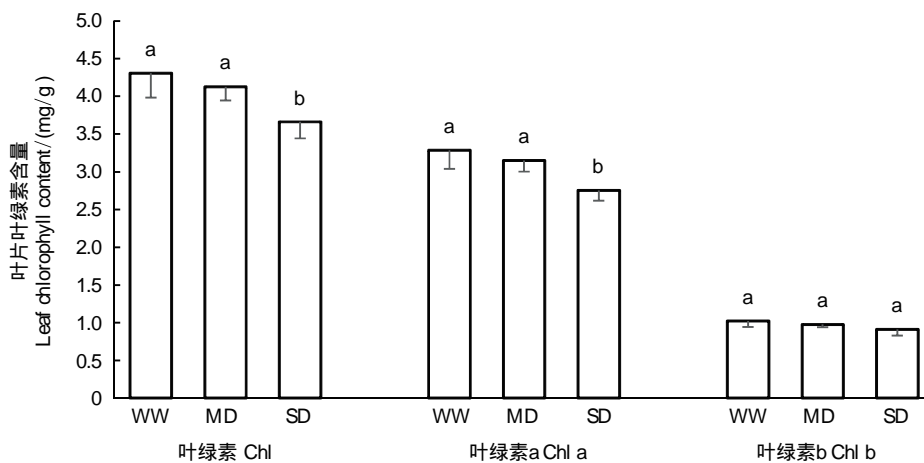


图 1 不同水分处理雷竹叶片叶绿素含量

Fig.1 Comparison of chlorophyll content in *P. violascens* leaves between different water treatment

WW:正常水分处理 Well-watered;MD:中度缺水处理 Moderate drought stress;SD:重度缺水处理 Severe drought stress;不同字母代表不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )

### 2.2 不同水分处理条件下雷竹叶片反射光谱及其一阶微分值与叶绿素含量相关性

图 2 显示了不同水分处理间的雷竹叶片光谱反射率曲线,图中显示光谱反射率在 350—500 nm 及 600—

700 nm 间形成两个反射谷。在这 2 个谷之间,形成一小的绿光波段反射峰。675—755 nm 反射率骤然上升,780 nm 后进入近红外波段,在 1380—1500 nm 和 1900—2000 nm 波段出现了两个明显的反射低谷。

不同的水分处理造成了叶片叶绿素及水分含量的变化,进而影响了叶片的反射光谱,在可见光及近红外波段光谱反射率在不同处理间呈现出差异特征。在 400—680 nm 波段内呈现随干旱胁迫加重、叶绿素含量降低而反射率随之增加的趋势;680—750 nm 波段,光谱反射率急剧变化,为反射光谱的“红边”区间,但不同叶绿素含量的原始光谱反射率差异较小。

图 3 显示了不同水分处理条件下雷竹叶片光谱反射率一阶微分曲线,图中可见,一阶微分光谱中有 4 个峰值,分别位于 500—540、690—755、1390—1410 nm 以及 1870—1900 nm 波段,其峰值分别位于 522、716、1396 nm 及 1885 nm 处。

图 4 显示了雷竹叶片叶绿素含量与其光谱反射率一阶导数的相关系数曲线,相关系数大于 0.6 的波长位于 482—550、570—673、680—706、714—766、1890—1914 nm 以及 1970—2000 nm,在可见光区以波长 493、639、693、756 nm 等处的相关性最高。其中 482—550、680—706、1970—2000 nm 波段光谱一阶微分值随缺水胁迫程度增加、叶绿素含量的降低而增加,570—673、714—766、1890—1914 nm 波段光谱一阶微分值随缺水胁迫程度增加、叶绿素含量的降低而降低。

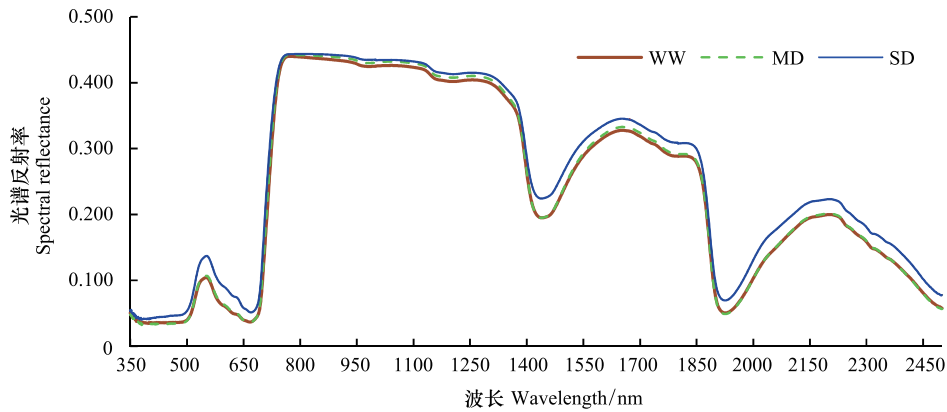


图 2 不同水分处理条件下雷竹叶片光谱反射率曲线

Fig.2 Changes of spectral reflectance curve of *P. violascens* leaves between different water treatment

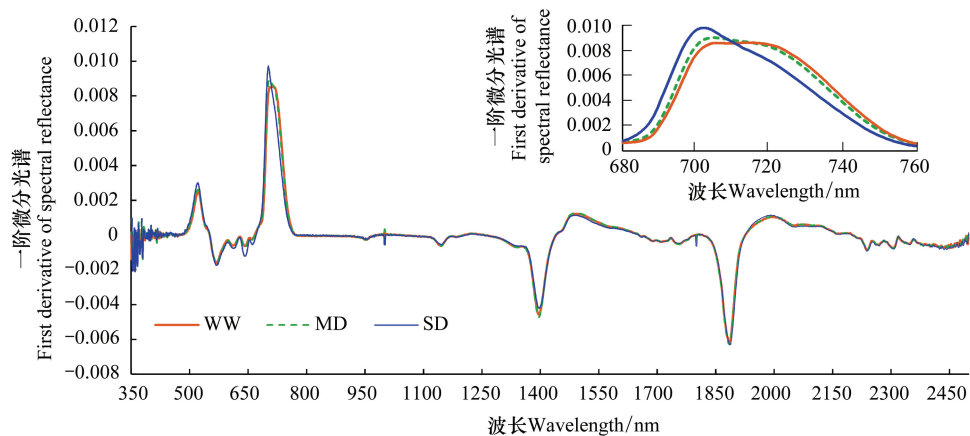


图 3 不同水分处理条件下雷竹叶片光谱反射率一阶微分曲线

Fig.3 Changes of first derivative of spectral reflectance of *P. violascens* leaves between different water treatment

### 2.3 雷竹叶片光谱特征参数变化及其与叶绿素含量的相关性分析

“三边”是植被光谱的典型特征,指的是蓝边(490—530 nm)、黄边(560—640 nm)和红边(680—760

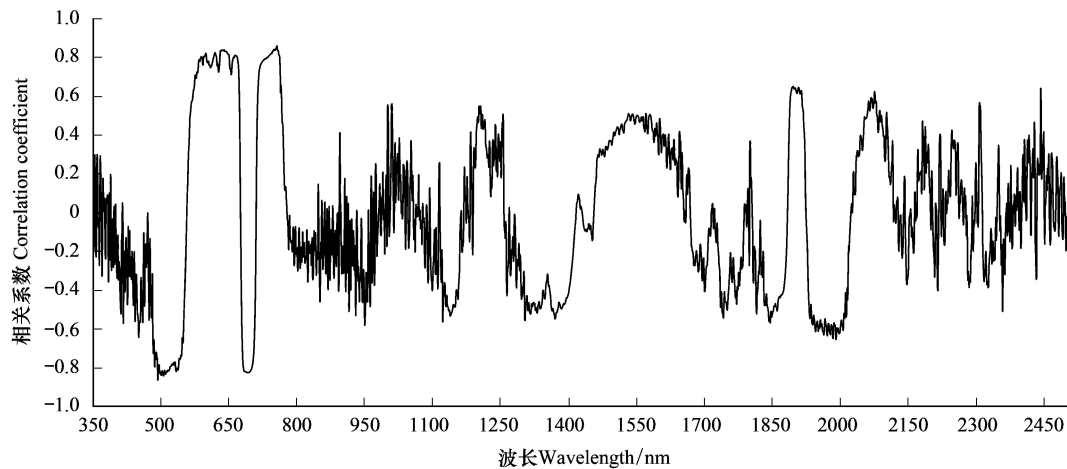


图4 雷竹叶片叶绿素含量与其一阶微分光谱值的相关系数曲线

Fig.4 Correlation between leaf chlorophyll content and first derivative of spectral reflectance of *P. violascens*

nm),描述“三边”特征的参数主要有三边位置、三边幅值和三边面积<sup>[21]</sup>。光谱特征参数的定义由表1所示,从表1可看出,雷竹叶片叶绿素含量与蓝边幅值、黄边幅值、红边幅值、红边位置、绿峰反射率、红谷反射率、红谷位置、蓝边面积、黄边面积、绿峰面积之间的相关系数都达到极显著水平( $P < 0.01$ )。不同缺水处理条件下叶片叶绿素含量与黄边幅值、红边位置、黄边面积之间呈极显著正相关关系,而与蓝边幅值、红边幅值、绿峰反射率、红谷反射率、红谷位置、蓝边面积之间呈极显著负相关关系。其中,叶绿素含量与绿峰反射率、红谷反射率、蓝边面积、绿峰面积之间的相关系数绝对值大于0.8。

红边是绿色植物光谱最明显的特征之一<sup>[15]</sup>。图3显示出雷竹叶片红边一阶微分光谱呈“单峰”变化,680—708 nm 红边一阶微分值随叶绿素含量的增加而降低,“主峰”之后720—760 nm 红边一阶微分值随叶绿素含量的增加而升高。

表1 反射光谱特征参数的定义及其与叶绿素含量的相关系数

Table 1 The spectral reflectance characteristic parameters and its correlation coefficient with chlorophyll content

| 参数<br>Variable | 名称<br>Name | 定义和描述<br>Definition and describing  | 相关系数<br>Correlation coefficient |
|----------------|------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| <i>Db</i>      | 蓝边幅值       | 波长在490—530 nm内(蓝边)光谱反射率一阶导数最大值      | -0.793 **                       |
| $\lambda b$    | 蓝边位置       | 波长在490—530 nm内(蓝边)光谱反射率一阶导数最大值对应的波长 | 0.428 *                         |
| <i>Dy</i>      | 黄边幅值       | 波长在560—640 nm内(黄边)光谱反射率一阶导数最大值      | 0.754 **                        |
| $\lambda y$    | 黄边位置       | 波长在560—640 nm内(黄边)光谱反射率一阶导数最大值对应的波长 | 0.292                           |
| <i>Dr</i>      | 红边幅值       | 波长在680—760 nm内光谱反射率一阶导数最大值          | -0.721 **                       |
| $\lambda r$    | 红边位置       | 波长在680—760 nm内光谱反射率一阶导数最大值对应的波长     | 0.633 **                        |
| <i>Rg</i>      | 绿峰反射率      | 波长在510—560 nm内最大的光谱反射率              | -0.849 **                       |
| $\lambda g$    | 绿峰位置       | 波长在510—560 nm内最大的光谱反射率对应的波长         | -0.311                          |
| <i>Rr</i>      | 红谷反射率      | 波长在650—690 nm内最小的光谱反射率              | -0.831 **                       |
| $\lambda b$    | 红谷位置       | 波长在650—690 nm内最小光谱反射率对应的波长          | -0.771 **                       |
| <i>SDb</i>     | 蓝边面积       | 蓝边波长范围内一阶导数值的总和                     | -0.824 **                       |
| <i>SDy</i>     | 黄边面积       | 黄边波长范围内一阶导数值的总和                     | 0.781 **                        |
| <i>SDr</i>     | 红边面积       | 红边波长范围内一阶导数值的总和                     | 0.282                           |
| <i>SDg</i>     | 绿峰面积       | 波长在510—560 nm内原始光谱曲线所包围的面积          | -0.849 **                       |

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ 

## 2.4 植被光谱指数及其与叶绿素含量相关性分析

本研究选取了目前广泛采用的3个光谱指数(归一化植被指数NDVI、绿色归一化植被指数GNDVI以及

红边归一化植被指数  $ND_{705}$ ) 以及根据雷竹叶绿素敏感光谱波段进行修正后的 3 个指数(表 2), 将特定波段进行归一化计算后, 与叶片叶绿素含量值进行相关性分析。表 2 结果显示, 原有光谱指数与新构建的光谱指数与雷竹叶绿素含量均达到了极显著相关水平 ( $P < 0.01$ ), 新构建的光谱指数与原有光谱指数相比拟合精度更好。

表 2 植被光谱指数的定义及其与叶绿素含量的相关系数

Table 2 The vegetation index and its correlation coefficient with chlorophyll content

| 植被指数<br>Vegetation<br>index | 名称<br>Name   | 定义和描述<br>Definition and describing          | 相关系数<br>Correlation<br>coefficient |
|-----------------------------|--|---|------------------------------------|
| NDVI                        | 归一化植被指数 <sup>[22]</sup><br>Normalized difference vegetation index                      | $(R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680})$ | 0.835 **                           |
| GNDVI                       | 绿色归一化植被指数 <sup>[23]</sup><br>Green normalized difference vegetation index              | $(R_{750} - R_{550}) / (R_{750} + R_{550})$ | 0.853 **                           |
| $ND_{705}$                  | 红边归一化植被指数 <sup>[16]</sup><br>Red-edge normalized difference vegetation index           | $(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$ | 0.822 **                           |
| mNDVI                       | 修正归一化植被指数(本文)<br>Modified normalized difference vegetation index(this work)            | $(R_{950} - R_{693}) / (R_{950} + R_{693})$ | 0.858 **                           |
| mGNDVI                      | 修正绿色归一化植被指数(本文)<br>Modified green normalized difference vegetation index(this work)    | $(R_{756} - R_{557}) / (R_{756} + R_{557})$ | 0.854 **                           |
| mND705                      | 修正红边归一化植被指数(本文)<br>Modified red-edge normalized difference vegetation index(this work) | $(R_{756} - R_{693}) / (R_{756} + R_{693})$ | 0.850 **                           |

## 2.5 基于光谱指数及敏感波段的叶绿素含量估算模型与验证

将雷竹叶片叶绿素含量样本数据随机划分为两组, 其中总样本的  $2/3$  ( $n = 24$ ) 用于建模, 剩余的  $1/3$  ( $n = 12$ ) 用于模型验证。根据雷竹叶片叶绿素敏感光谱波段选取波长 493 nm、639 nm、693 nm、756 nm 的原始反射率光谱值及其一阶微分值作为自变量, 与叶绿素含量进行多元线性回归方程拟合。同时选取与叶绿素相关性较高的 3 个修正植被指数与叶绿素含量进行线性及非线性回归方程拟合。从表 3 中可以看出, 由敏感波段提取的 4 个波长光谱数据及其一阶微分值构建的多元回归方程以及基于绿峰面积的非线性回归方程决定系数较高, 由修正归一化植被指数构建的非线性回归模型决定系数次之。模型的验证结果显示, 由 4 个敏感波段一阶微分值构建的多元回归方程的拟合精度最高, 决定系数  $R^2$  为 0.882, 平均相对误差为 2.72%, 均方根误差为 0.157; 修正绿色归一化植被指数模型次之, 这两个模型估算与实测值拟合方程的斜率均较接近于 1, 更接近于实测值。因此, 由敏感波段提取的 4 个波长 (493、639、693、756 nm) 光谱反射率一阶微分值构建的多元回归方程以及基于敏感波段修正的绿色归一化植被指数 (mGNDVI) 模型其训练样本拟合与验证样本精度检验水平均较高, 为雷竹叶绿素含量的较优估算模型。

## 3 讨论与结论

### 3.1 干旱胁迫处理对雷竹叶片叶绿素含量的影响

由植物缺水引起的叶片颜色、水分含量及形态结构等发生变化, 从而引起光谱反射特性的变化已在多种植物中得到证实<sup>[16-17]</sup>, 在本试验中, 干旱胁迫试验处理进行到第 28 d, 重度缺水处理雷竹叶片叶绿素含量已显著低于水分良好处理, 且叶片已有轻度卷曲现象, 在生产实践中需要尽量避免竹林经受超过 20 d 的重度高温干旱的胁迫, 尽早采取应对措施。

### 3.2 干旱胁迫处理条件下雷竹叶片叶绿素的高光谱响应特征

植物反射光谱含有大量的重复信息, 而一阶微分光谱可以减少光照条件、大气散射和吸收以及背景光谱的影响, 并且通常用于构建特征性光谱参数<sup>[24]</sup>。红边是绿色植物光谱最明显的特征之一<sup>[25]</sup>, 有研究认为可见光和红边区参数光谱变化主要与胁迫诱导的生理变化如叶绿素含量等变化有关<sup>[15, 26]</sup>。在本研究中, 雷竹

叶片光谱反射率随胁迫导致的叶绿素含量的降低而升高,以波长 493、639、693、756 nm 等处一阶微分值与叶绿素含量的相关性最高,雷竹叶片红边一阶微分光谱呈“单峰”变化(图 3),680—708 nm 红边一阶微分值随叶绿素含量的增加而降低,“主峰”之后 720—760 nm 红边一阶微分值随叶绿素含量的增加而升高。说明随着叶绿素含量的增加,叶片反射光谱的红边位置向长波方向移动,即红边位置产生了“红移”现象。然而,在一些研究中,植被红边反射光谱呈现出双峰特征,其经常发生在 700 nm 和 720 nm 附近,这削弱了红边位置在监控叶片叶绿素含量上的实用性<sup>[27-28]</sup>。

表 3 叶绿素含量回归模型拟合与验证精度比较

Table 3 Regression models of chlorophyll content and fitting accuracy parameters of model checking

| 变量<br>Variable                                       | 回归方程<br>Regression equation  | 训练样本<br>Training<br>samples<br>$R^2$ | 验证样本<br>Validation<br>samples<br>$R^2$ | 均方根误差<br>Root mean<br>squared error<br>(RMSE) | 相对误差/%<br>Relative<br>error (RE) | 斜率<br>Slope    |
|--|--|--------------------------------------|--|---|----------------------------------|----------------|
| $R_{493}$ 、 $R_{639}$ 、<br>$R_{693}$ 、 $R_{756}$     | $y = 5.35 - 51.22R_{493} - 75.45R_{693} + 90.73R_{639} + 2.4R_{756}$       | 0.728                                | 0.7329                                 | 0.268   | 5.14                             | 0.700          |
| $DR_{493}$ 、 $DR_{639}$ 、<br>$DR_{693}$ 、 $DR_{756}$ | $y = 3.36 - 1518.2DR_{493} + 46.4DR_{693} + 72.8DR_{639} + 1199.1DR_{756}$ | 0.716                                | 0.882                                  | 0.157   | 2.72                             | 1.026          |
| $Rg$   | 线性 $y = -14.375x + 5.6528$<br>非线性 $y = -109x^2 + 11.815x + 4.1393$         | 0.693<br>0.720                       | 0.834<br>0.791                         | 0.238<br>0.247                                | 4.19<br>4.42                     | 1.254<br>1.158 |
| $SDg$  | 线性 $y = -0.3271x + 5.6184$<br>非线性 $y = -0.0511x^2 + 0.2037x + 4.294$       | 0.704<br>0.726                       | 0.817<br>0.775                         | 0.244<br>0.256                                | 4.42<br>4.70                     | 1.205<br>1.116 |
| $mNDVI$  | 线性 $y = 6.6128x - 0.8152$<br>非线性 $y = 1.1537e^{1.6999x}$                   | 0.695<br>0.724                       | 0.827<br>0.830                         | 0.184<br>0.183                                | 3.88<br>3.74                     | 0.895<br>0.901 |
| $mGNDVI$   | 线性 $y = 5.9565x + 0.4985$<br>非线性 $y = 6.3866x^{0.8829}$                    | 0.670<br>0.710                       | 0.845<br>0.845                         | 0.170<br>0.172                                | 3.72<br>3.69                     | 0.974<br>0.965 |
| $mND705$   | 线性 $y = 6.3997x - 0.6718$<br>非线性 $y = 1.1975e^{1.6446x}$                   | 0.671<br>0.699                       | 0.824<br>0.826                         | 0.181<br>0.181                                | 3.77<br>3.65                     | 0.931<br>0.935 |

$R_i$  为第  $i$  个波长的光谱反射率;  $DR_i$  为  $R_i$  的一阶微分光谱

### 3.3 基于光谱指数及敏感波段的叶绿素含量估算

目前有许多基于 705 nm 附近的植被指数被开发出来用于叶绿素含量的计算<sup>[16,29]</sup>。国内也有研究者提出了其他方法用于叶片叶绿素含量的估算,如程志庆等利用最佳指数-相关系数法提取出杨树叶片叶绿素含量敏感波段<sup>[20]</sup>,宋开山等利用小波分析构建大豆叶绿素含量的高光谱反演模型<sup>[30]</sup>,以及有研究者利用神经网络模型进行相关指标的拟合及估测<sup>[31-32]</sup>等。而通过两个甚至多个光谱波段构建出的反射光谱指数,在一定程度上也可以消除干扰,成为提取植被生化组分信息的重要手段,其中归一化植被指数(NDVI)是应用频率较高的指数之一<sup>[22]</sup>。本研究参照前人提出的部分植被指数进行针对性的修正,其中选用红边区和短波红外区相关系数较高的波长值 693 nm 与 950 nm 的组合构建的修正归一化植被指数(mNDVI)以及红边一阶微分较小的波长值 557 nm 以及与叶绿素相关系数较高的波长值 756 nm 组合构建的绿色归一化植被指数(mGNDVI)与雷竹叶片叶绿素含量相关系数较高,证实了其在竹类植物叶片叶绿素含量估算上可以得到较好的应用。

在植物叶绿素含量的无损快速监测方面,利用便携式叶绿素仪(SPAD 502)测定叶绿素相对含量也是一种光谱学方法,但其用于估算叶绿素含量的波段较为单一固定,不能根据特定的植被类型进行调整,且难以满足大面积测定及区域尺度测算的需要。近年来发展起来的无人机低空遥感技术由于获取的数据具有分辨率高、易判读、时效性强等特点,倍受研究者青睐<sup>[33]</sup>,逐步成为今后高光谱遥感的发展趋势。本研究在雷竹叶片尺度上对其反射光谱进行测定,所得出的结果对雷竹冠层尺度上叶绿素含量的高光谱测算具有一定的参考意义,但仍需通过大量的测试和拟合检验来提高模型的估算精度。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Wullschleger S D, Tschaplinski T J, Norby R J. Plant water relations at elevated CO<sub>2</sub>-implications for water-limited environments. *Plant, Cell & Environment*, 2002, 25(2): 319-331.
- [ 2 ] Blackman C J, Brodribb T J, Jordan G J. Leaf hydraulics and drought stress: response, recovery and survivorship in four woody temperate plant species. *Plant, Cell & Environment*, 2009, 32(11): 1584-1595.
- [ 3 ] McDowell N, Pockman W T, Allen C D, Breshears D D, Cobb N, Kolb T, Plaut J, Sperry J, West A, Williams D G, Yezzer E A. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 2008, 178(4): 719-739.
- [ 4 ] Wang W F, Peng C H, Kneeshaw D D, Larocque G R, Luo Z B. Drought-induced tree mortality: ecological consequences, causes, and modeling. *Environmental Reviews*, 2012, 20(2): 109-121.
- [ 5 ] 段洪浪, 吴建平, 刘文飞, 廖迎春, 张海娜, 樊后保. 干旱胁迫下树木的碳水过程以及干旱死亡机理. *林业科学*, 2015, 51(11): 113-120.
- [ 6 ] 王爱英, 姜艳娟, 郝广友, 曹坤芳. 季节性干旱胁迫对石灰山三种常绿优势树种的水分和光合生理的影响. *云南植物研究*, 2008, 30(3): 325-332.
- [ 7 ] 易同培, 史军义, 马丽莎, 王海涛, 杨林. *中国竹类图志*. 北京: 科学出版社, 2008.
- [ 8 ] 费世民. *竹林生态研究*. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [ 9 ] 黄晚华, 隋月, 杨晓光, 代姝玮, 李茂松. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应. III. 基于降水量距平百分率的南方地区季节性干旱时空特征. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 397-406.
- [ 10 ] Wang Q, Li P H. Hyperspectral indices for estimating leaf biochemical properties in temperate deciduous forests: comparison of simulated and measured reflectance data sets. *Ecological Indicators*, 2012, 14(1): 56-65.
- [ 11 ] Wang L L, Qu J J. NMDI: a normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(20): L20405.
- [ 12 ] Seelig H D, Hoehn A, Stodieck L S, Klaus D M, Adams III W W, Emery W J. The assessment of leaf water content using leaf reflectance ratios in the visible, near-, and short-wave-infrared. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(13): 3701-3713.
- [ 13 ] 杜华强, 葛宏立, 范文义, 金伟, 周宇峰, 李进. 马尾松针叶光谱特征与其叶绿素含量间关系研究. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(11): 3033-3037.
- [ 14 ] 李敏夏, 张林森, 李丙智, 张海燕, 郭雯. 苹果叶片高光谱特性与叶绿素含量和 SPAD 值的关系. *西北林学院学报*, 2010, 25(2): 35-39.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 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. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2): 337-354.
- [ 17 ] 刘畅, 孙鹏森, 刘世荣. 基于反射光谱指数的锐齿栎叶片色素含量估算. *林业科学研究*, 2017, 30(1): 88-98.
- [ 18 ] 马乃训, 赖广辉, 张培新, 张宏亮. *中国刚竹属*. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2014.
- [ 19 ] 李亚丹, 杜华强, 周国模, 谷成燕, 徐小军, 孙少波, 高国龙. 雷竹叶绿素与高光谱植被指数关系及其反演模型. *浙江农林大学学报*, 2015, 32(3): 335-345.
- [ 20 ] 程志庆, 张劲松, 孟平, 李岩泉, 王鹤松, 李春友. 杨树叶片叶绿素含量高光谱估算模型研究. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 264-271.
- [ 21 ] 张永贺, 陈文惠, 郭乔影, 张清林. 桉树叶片光合色素含量高光谱估算模型. *生态学报*, 2013, 33(3): 876-887.
- [ 22 ] Rouse J W, Hass R H, Schell J A, Deering D W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS//Proceedings of 3rd Earth Resource Satellite-1 Symposium. Greenbelt: NASA Special Publication, 1974, 351: 309-309.
- [ 23 ] Gitelson 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. *Journal of Plant Physiology*, 1994, 143(3): 286-292.
- [ 24 ] Tsai F, Philpot W. Derivative analysis of hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(1): 41-51.
- [ 25 ] 谭昌伟, 郭文善, 王纪华, 朱新开, 王君婵. 浅析遥感光谱特征参量的原理及基本方法. *遥感技术与应用*, 2010, 25(1): 155-160.
- [ 26 ] 王秀珍, 黄敬峰, 李云梅, 王人潮. 水稻生物化学参数与高光谱遥感特征参数的相关分析. *农业工程学报*, 2003, 19(2): 144-148.
- [ 27 ] Cho M A, Skidmore A K. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: the linear extrapolation method. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101(2): 181-193.
- [ 28 ] Clevers J G P W, Kooistra L, Salas E A L. Study of heavy metal contamination in river floodplains using the red-edge position in spectroscopic data. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(19): 3883-3895.
- [ 29 ] Maccioni A, Agati G, Mazzinghi P. New vegetation indices for remote measurement of chlorophylls based on leaf directional reflectance spectra. *Journal of Photochemistry and Photobiology Biology*, 2001, 61(1): 52-61.
- [ 30 ] 宋开山, 张柏, 王宗明, 刘殿伟, 刘焕军. 基于小波分析的大豆叶绿素 a 含量高光谱反演模型. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 152-160.
- [ 31 ] 刘文雅, 潘洁. 基于神经网络的马尾松叶绿素含量高光谱估算模型. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1128-1136.
- [ 32 ] 陈婉婧, 阎广建, 吕琳, 张开, 李凯. 大豆叶片水平叶绿素含量的高光谱反射率反演模型研究. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(1): 60-65.
- [ 33 ] 孙中宇, 陈燕乔, 杨龙, 唐光良, 袁少雄, 林志文. 轻小型无人机低空遥感及其在生态学中的应用进展. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 528-536.