

# 毛竹林叶绿素高光谱植被指数反演

应诗瑶 邬梁超 钟毅飞

舟山市自然资源测绘设计中心 浙江省舟山市 316000

**摘要:** 毛竹具有生长速度快, 经济效益高的特点。本研究采用CCM-200手持叶绿素测量仪与便携式ASD野外光谱测量仪分别测量毛竹林生长过程中的叶绿素含量与高光谱反射率数据。经过了连续一年的观测, 分析高光谱植被指数与相对叶绿素含量间的相关关系并计算其相关系数。最后通过逐步回归与曲线拟合的方法构建定量反演模型。研究表明: 与毛竹林整个生长过程中叶绿素相关性较好的植被指数有GM、Vog3、DD、NDVI<sub>705</sub>、REP、TCARI与OSAVI的比值植被指数。利用这6种植被指数所构建的定量反演模型中, 逐步回归模型的确定系数 $R^2$ 高于曲线拟合模型, REP的幂模型具有最高的估计精度95.56%, 其余模型精度也均在94%以上。本研究为毛竹林的科学经营提供参考。

**关键词:** 毛竹林; 高光谱植被指数; 叶绿素; 模型; 反演

## 1 前言

纵观国内外对于植被叶绿素含量的高光谱研究发现, 该研究主要集中于对棉花、玉米、小麦、水稻、葡萄等农作物, 而对于毛竹林的研究少之又少, 毛竹林的生态价值十分显著, 尤其是其高效的固碳潜力。不同的植物由于其叶片结构不同, 表面反射属性不同, 其叶绿素的敏感波段往往具有明显差异性, 不能一概而论, 为此本研究从毛竹林这一特殊的森林类型出发进行研究。本文

基于实测毛竹林高光谱数据与叶绿素数据, 通过查阅相关文献, 使用半经验方法, 归纳出29个可用于估算植被叶绿素含量的植被指数, 并通过算法计算其对应值。其次, 将计算得到的植被指数值与每个月实测的叶绿素含量进行相关分析, 确定每个月的最佳植被指数。通过连续观察植被指数与叶绿素之间的相关性, 确定在整个生长期期都与毛竹林叶绿素显著相关的植被指数, 把这些植被指数作为特征参数用来参与叶绿素高光谱遥感反演。

## 2 研究区与研究方法

### 2.1 数据获取与预处理

借助通量塔的高度, 把在通量塔周围生长的毛竹冠层分为上、中、下三层, 每层选取5组叶片进行测量, 共15组。实验从2015年的1月初一直持续到12月底, 每月进行一次测量, 测量间隔为30-45天, 获取毛竹叶片

的高光谱反射率以及叶片的相对叶绿素含量。

#### 2.1.1 高光谱反射率的获取与预处理

高光谱反射率数据采用便携式ASD野外光谱测量仪获取, 其波长范围为350~2500nm, 光谱分辨率为3.0nm (350-1000nm), 10nm (1000-2500nm); 扫描时间为100ms; 采样间隔1.4nm (350-1050nm), 2nm (1000-2500nm); 波长精度 $\pm 1$ nm; 标准参考板为聚四氟乙烯标准白板。选择天气晴朗无云、风力较小的日子对毛竹林叶片光谱进行测量, 观测时间点在当地时间9:30-14:30左右。为保证测量精度, 在每次测量前先进行白板校正和自动优化, 仪器校正优化完成后, 分别对15组叶片样本进行光谱采集, 每次测量, ASD自动读取10组光谱数据, 并取平均值作为该叶片的反射率光谱值。

#### 2.1.2 叶绿素含量的测定

毛竹林叶片的相对叶绿素含量通过CCM-200手持叶绿素测量仪进行测量, 在完成光谱数据采集后, 使用CCM-200手持叶绿素仪在相应的叶片基部、中部和尖部测量3次, 并取平均值作为该叶片的相对叶绿素含量。

### 2.2 植被指数的选取

本文采用半经验方法, 在选取与毛竹林叶绿素含量有较高相关性的植被指数时, 参考了陆国富研究过程中所发现的几个与毛竹林叶绿素具有高度相关性的植被指数: 毛竹林叶绿素与叶绿素吸收比值数(MCARI)、转换型叶绿素吸收比值数(TCARI)、优化型土壤调整植被指数(OSAVI)以及TCARI与OSAVI的比值、MCARI与OSAVI的比值。同时, 由于雷竹林与毛竹林在生长情况上有一定的相似性, 参考了李亚丹在研究雷竹叶叶绿素的反演中发现的与雷竹叶各生长期叶相关性较高的几个植被指数。大致可将其分为5类, 比值型植被指数、差值型植被指数、归一化植被指数、叶绿素吸收比值型植被指数和反射光谱峰谷反映指数。最终, 本研究共选择了

### 作者简介:

1. 应诗瑶 (1995), 女, 汉族, 浙江舟山, 助理工程师, 舟山市自然资源测绘设计中心, 测绘地理信息;
2. 邬梁超 (1991), 男, 汉族, 浙江绍兴, 工程师, 舟山市自然资源测绘设计中心, 海洋资源保护利用与生态修复;
3. 钟毅飞 (1987), 女, 汉族, 浙江湖州, 工程师, 舟山市自然资源测绘设计中心, 海洋工程与技术。

29个植被指数进行研究。可用于估算相对叶绿素含量的高光谱指数如表1所示。

通过MATLAB编程，将15组高光谱反射率数据，计算如表1所示的植被指数，分别计算其每月的植被指数对应值，并分析其余相对叶绿素含量的相关性，本研究用相关系数R来表示，其计算公式如式（1）所示。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}} \quad (1)$$

式（1）中， $u_i$ 表示第*i*株样本的相对叶绿素含量， $\bar{u}$ 表示所有样本平均相对叶绿素含量， $v_i$ 表示第*i*株样本的植被指数值， $\bar{v}$ 表示所有植被指数的平均值，*n*为样本总数。

### 2.3 反演模型的构建

从每个月获取的实测数据中随机抽取70%的数据用于建模，分别将计算所得的高光谱植被指数与相对叶绿素含量进行相关性分析，确定与相对叶绿素含量相关性较高的植被指数，分别使用逐步回归方法和曲线估计方法建立毛竹林叶绿素含量估测模型。然后利用剩余30%的数据对模型进行验证，选取相关系数（R）、均方根误差（RMSE）、相对均方根误差（RMSEr）和估算精度（ $E_A$ ）作为验证指标，对估测模型的精度进行检验与评价。其中均方根误差（RMSE）、相对均方根误差（RMSEr）和估算精度（ $E_A$ ）的计算方法分别如下所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$RMSEr = \frac{RMSE}{y_c} \times 100\% \quad (3)$$

$$E_A = 1 - RMSEr \quad (4)$$

其中 $\hat{y}_i$ 为模型的估计值， $y_i$ 为试验实测值， $y_c$ 为试验实测值的平均值。

## 3 结果与分析

### 3.1 反射率光谱特征分析

受叶片色素、细胞构造与叶片含水率、细胞液等的影响，植被的反射率光谱曲线在不同的波段呈现特异性。本实验选取毛竹在中具有代表性反射光谱曲线，计算1月、4月、6月和12月的平均光谱反射率，并绘制光谱曲线（图1）。如图1所示，由于仪器自身的问题，造成一定的误差，剔除了明显误差350~400nm波段数据后，观察401nm~1300nm的植被光谱曲线可以发现，毛竹叶片叶绿素含量的光谱反射率具有典型的植物光谱特征，在蓝紫光波段（400nm~500nm）与红光波段（650nm~680nm）具有明显的吸收谷，在绿光波段（520~550nm）形成小

反射峰，反射率约为0.2。通过观察大于680nm的波段，该处为近红外线波段，该处毛竹叶的光谱反射率陡然增加。680nm~800nm期间存在拐点即为红边位置，随着植被生长状态与叶绿素含量不同时发生不同红移。当波段大于800nm之后，形成稳定的反射平台，反射率值在0.4~0.6的范围波动，最高反射率随着毛竹林生长期的不同，呈现不同的变化。选取变化较明显的4个月来分析毛竹林的最高反射率值可知，在1月份具有最大值，6月份具有最小值，表明气温对毛竹林生长发育影响显著。

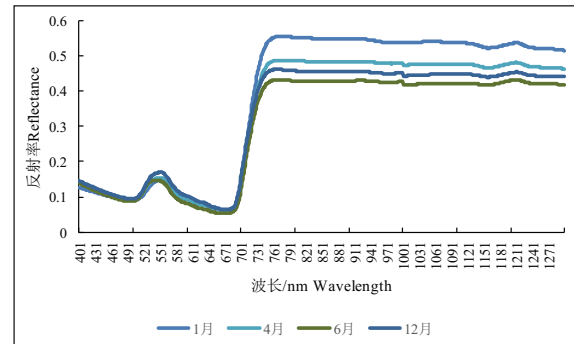


图1 不同月份毛竹林光谱反射率

### 3.2 光谱植被指数与叶绿素含量的相关分析

根据半经验模型选取29个高光谱植被指数与叶绿素含量进行相关分析，通过公式（1）分别计算了各个不同测量时期两者相关系数R，同时也计算了不同植被指数的所有测量值与叶绿素的相关系数。当相关系数大于0.5时，表示该植被指数与毛竹林相对叶绿素的含量相关。为此，不同测量时期叶绿素含量与植被指数相关性分析表保留了0.5以上的数据，剔除了非相关数据。

### 3.3 模型的建立与验证

根据表2得出五类植被指数中GM、Vog3、DD、mND705、TCARI/OSAVI、REP这6个植被指数与毛竹林叶绿素高光谱植被指数反演具有较好的相关性。本研究随机选取每个月中的70%的数据，运用两种回归分析的方法建立反演模型，分别是逐步回归分析与曲线估计的方法。建立所得的不同模型，均用剩余的30%的数据进行了模型验证与评价。

#### 3.3.1 逐步回归分析模型

逐步回归的方法，第一步引入满足判断条件且对因变量贡献最大的自变量进入回归方程，第二步移出模型中的异常数据。重复进行引入与移出，直至没有任何变量被引入与移出，即得到回归方程。从回归分析的原则出发，在高光谱植被指数的筛选基础上建立总的回归方程，其中因变量为相对叶绿素含量（RCC），自变量为高光谱植被指数（VIs），逐步引入与移出之后，筛选对叶绿素含量有显著影响的植被指数为自变量，建立最佳回归方程。本次逐步回归分析采用SPSS软件进行运算，共得到2个回归模型，模型的汇总如表3所示。

表1 模型汇总

模型	引入变量	R	R <sup>2</sup>	修正的R <sup>2</sup>	估计标准误差	F	显著水平
1	REP	0.83	0.68	0.68	0.86	187.586	0.000
2	REPVog3	0.84	0.71	0.71	0.82	9.505	0.003

此次共进行了2次回归分析的拟合,在6个植被指数中,最先被引入的是红边指数REP,其次是Vog3植被指数。通过观察决定系数R<sup>2</sup>发现,两个模型的决定系数都大于0.6,这表明两个模型均具有好的拟合程度。其中模型2的决定系数大于模型1的决定系数,如是印证了一般情况下,回归平方和随着自变量的增多而变大。

表2 回归分析中每一步的方差分析

模型		平方和	自由度	F	显著水平	方差膨胀因子
1	回归	138.279	1	187.586	0.000	1
	残差	64.869	88			
	总计	203.148	89			
2	回归	144.668	2	107.610	0.000	4.192
	残差	58.480	87			
	总计	203.148	89			

通过观察表2,分析模型1可知,回归平方和是138.279,残差平方和是64.869,总计203.148,由此可知,总计平方和的绝大部分为回归平方和,说明模型1绝大部分解释了总平方和,表示模型1的拟合效果较好。同样类比可知,模型2也具有较好的拟合效果。另外,表中的2个模型的方差性膨胀因子(VIF)均比较小,说明各模型中的变量基本不存在共线的问题。观察两模型的显著水平Sig值,发现模型1和模型2显著性概率均小于0.01,拒绝回归系数都为0的原假设,均通过了显著性检验。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

本研究基于浙江省安吉县2015年连续观测的毛竹林高光谱反射率数据与实地测量的毛竹叶相对叶绿素数据,通过进行各高光谱植被指数与叶绿素含量的相关分析后,选取相关性高的高光谱植被指数并运用这些植被指数建立毛竹林叶片尺度叶绿素的逐步回归模型、曲线拟合模型、一元线性模型等反演模型。一方面,在植被指数的选取中,首先通过半经验的方法,参考各类文献海选了29个植被指数作为预选变量。后通过相关分析的方法,得知与毛竹林叶绿素高度相关的6个植被指数是:GM、Vog3、DD、NDVI<sub>705</sub>、TCARI/OSAVI、REP。其中以REP为最佳植被指数,Vog3居其后。另一方面,通过不同的反演方法,得到2个逐步回归模型,6个线性模型与6个最佳曲线拟合模型。在这14个模型中,所有模型的估算精度均较好,其中通过REP构建的幂模型具有最高的估

算精度。为此,更证实了利用高光谱植被指数反演毛竹林叶绿素的方法简便灵活,稳定性较好。

### 4.2 展望

首先,由于本研究仅有一年的高光谱植被数据与叶绿素含量数据进行毛竹林高光谱叶绿素反演,然而毛竹林的生长周期为2年并存在大小年,数据量过少所以很难根据不同的生长期来建立单独的反演模型。试验得出结论毛竹林处于不同的月份时,均有几个更适合该月份的高光谱植被指数。由此可知,当毛竹林处于不同生长期时,其与叶绿素敏感的高光谱植被指数不同。因此,可基于不同生长期使用不同的植被指数,建立不同的生长期叶绿素反演模型提高模型的时效性与准确性。

其次,一个好的反演叶绿素的植被指数应该仅对叶绿素敏感而对其他因此不敏感。然在植被指数的选取中,发现植被指数相关的波段主要集中于670~780nm附近,波段间距较小。为增强所选取植被指数的独立性,应尽可能的选择波段距离稍大,且仅对叶绿素含量敏感的指数。

最后,植被的不同会导致对叶绿素含量敏感的植被指数不同。为此,本研究所建立的半经验模型的适用性是有限的,外推性不强。可根据本实验过程,根据植被的不同,通过输入不同的参数,建立不同植被指数叶绿素反演模型系统,更具普适性。

### 参考文献:

- [1]陈婉婧,阎广建,吕琳,等.大豆叶片水平叶绿素含量的高光谱反射率反演模型研究[J].北京师范大学学报自然科学版,2012,48(1):60-65.
- [2]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.
- [3]方圣辉,乐源,梁琦.基于连续小波分析的混合植被叶绿素反演[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(3):296-302.
- [4]何彩莲,郑顺林,周少猛,等.基于高光谱植被指数的马铃薯叶片叶绿素含量估测模型[J].华南农业大学学报,2016,37(5):45-49.
- [5]靳彦华,熊黑钢,张芳,等.不同地类春小麦叶片叶绿素含量高光谱植被指数估算模型研究[J].麦类作物学报,2013,33(5):1012-1018.
- [6]李明泽,赵小红,刘钺,等.基于机载高光谱影像的植被冠层叶绿素反演[J].应用生态学报,2013,24(1):177-182.
- [7]李亚丹.雷竹叶绿素高光谱遥感反演研究[D].浙江农林大学,2015.
- [8]陆国富.毛竹林冠层参数动态变化及高光谱遥感反演研究[D].浙江农林大学,2012.