

## 滞尘影响下的茶树叶片水分高光谱估算

江 景<sup>1,2</sup>, 赵紫薇<sup>1,2</sup>, 蔡 唱<sup>1,2</sup>, 张劲松<sup>3</sup>, 程志庆<sup>1,2\*</sup>

1. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036
2. 农业部合肥农业环境科学观测实验站, 安徽 合肥 230036
3. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091

**摘 要** 减少叶面滞尘对茶树叶片水分有效光谱信息提取的干扰, 有利于建立更加稳健的茶树叶片水分高光谱估算模型。以“舒茶早”为研究对象, 通过田间随机采集鲜叶样品, 测定叶片原始光谱反射率、含水量以及滞尘率。比较分析滞尘对茶树叶片原始光谱的影响, 分别基于归一化计算与比值计算方法构建新波段植被指数, 并利用相关系数法筛选叶片水分含量相关性最高的新波段植被指数, 结合相对变率分析获取滞尘对叶片水分估算影响不敏感的待选指数。通过分析不同滞尘条件下新建植被指数和已有水分指数与滞尘的响应关系, 筛选出滞尘影响下茶树叶片水分估算的最优植被指数, 最终构建茶树叶片水分估算的高精度模型。结果表明: (1)位于 711~1 378 nm 波段范围的叶片光谱反射率受滞尘影响呈现显著降低的趋势, 随着滞尘率增大光谱反射率减小, 且无尘叶片反射率与有尘状态反射率具有明显聚类现象, 相同状态下的不同叶片反射率差异性极显著。(2)新波段植被指数、已有水分指数与茶树叶片含水量之间的相关性以及基于该指数构建的茶树叶片水分估算模型的精度, 在滞尘影响下均呈现明显的下降趋势。(3)在滞尘混合状态下, 以 1 298 和 1 325 nm 为中心波段的新建比值植被指数对滞尘敏感性最低, 且与叶片含水量相关性高, 为最优植被指数, 其建立的茶树叶片水分高光谱估算模型具有较高的预测精度( $y=0.245x-0.241$ ,  $R^2=0.854$ ,  $RMSE=0.001$ ), 并且实测值与预测值具有较好的一致性。因此, 该研究可为茶树的水分精细化管理提供依据, 并可为基于高光谱信息构建复杂环境条件下的水分估算高精度模型提供新思路。

**关键词** 滞尘; 高光谱模型; 植被指数; 叶片水分含量

**中图分类号:** S127 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)11-3532-06

## 引 言

茶树叶片水分是茶树生长状态以及茶叶品质的良好指示器。精确、快速、无损监测茶树叶片含水量对茶树生产精准管理具有重要指导意义。高光谱遥感可以无损、快速地捕获地物微弱光谱信息, 具有精准定量反演地物特征的巨大潜力, 为植被叶片水分的精确、快速、无损监测提供了一种新的技术<sup>[1]</sup>。目前, 已有较多学者在农作物和树木上开展了基于高光谱信息的叶片水分估算研究, 也取得了一定的成果<sup>[2-3]</sup>, 但茶树叶片水分光谱估算研究较少。且已有研究结果显示在不同环境条件下, 虽然针对同种植物使用同一方法, 但获得的叶片水分估算精度也具有差异, 如: 胡珍珠

等<sup>[4]</sup>利用水分指数(WI)对核桃叶片水分含量进行估算取得了较高精度, 而潘庆梅等<sup>[5]</sup>利用该植被指数进行核桃叶片水分估算应用时, 其模型估算精度不理想; 其他水分植被指数光谱估算模型同样存在精度差异显著的现象<sup>[6-7]</sup>。针对以上现象分析发现, 已有叶片水分光谱估算研究中均未涉及叶面滞尘对光谱信息的影响, 而叶面滞尘的存在以及不同滞尘量对叶片光谱信息具有很大影响<sup>[8-9]</sup>, 是影响叶片水分光谱估算应用鲁棒性的问题之一。因此, 分析叶面滞尘对高光谱信息估算植物叶片水分的影响, 对茶树叶片水分光谱估算精度的提高具有重要意义。

目前, 叶面滞尘的高光谱研究主要集中于利用高光谱技术进行不同植被类型滞尘能力的比较、不同环境下不同植被类型滞尘能力的比较与分析、植被叶片特征对滞尘能力的影

收稿日期: 2020-10-26, 修订日期: 2021-03-12

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0300905), 安徽省高校自然科学研究项目(KJ2018A0127), 安徽农业大学研究生创新基金项目(2020ysj-67)资助

作者简介: 江 景, 1996年生, 安徽农业大学资源与环境学院硕士研究生 e-mail: jiangjingahau@163.com

\* 通讯作者 e-mail: chengzhiqing1@126.com

响、叶面滞尘率模型建立及估算研究<sup>[10-11]</sup>。而滞尘影响叶片水分高光谱模型估算精度以及如何降低滞尘对叶片水分高光谱估算的影响有待研究。茶树由于其生长环境的差异性,造成了不同的叶面滞尘环境。因此,以茶树为研究对象,讨论并分析茶树叶片水分在滞尘影响下的光谱变化规律、通过相关系数法构建新指数,对比分析不同滞尘状态对新建指数、已有水分指数与叶片含水量相关性的影响,筛选受滞尘影响小且与叶片含水量相关性高的植被指数,用以降低滞尘的干扰,提高茶树叶片水分估算精度,以期在复杂环境下的精准估算提供重要的理论基础,为减少叶面滞尘影响高光谱信息的应用提供技术支持。

## 1 实验部分

### 1.1 样品采集

试验地位于安徽农业大学农萃园茶叶园(117°14'49.44"E, 31°52'2.66"N),茶树品种为“舒茶早”。采样时间为2019年4月5日—10日,采用随机采样方式,采集无损、健康的茶树鲜叶,叶片样本共350个。采样过程中避免抖动;样本采集后立即放入已编号的保鲜袋、封口后立即带回实验室进行数据测定。

### 1.2 数据测定

#### 1.2.1 光谱反射率测定

用美国ASD公司生产的Field Spec Pro光谱仪(光谱波段范围为:350~2500 nm,视场角25°)自带的植被探头与叶片夹式光谱探测器在室内分别对茶树叶片样品进行滞尘清除前和清除后的光谱测定,并将滞尘清除前后数据分别标记为有尘(dl)、无尘(cl),测量中被测叶片面积保持相同且叶面平整,以有效消除背景反射、叶片表面弯曲而造成的光谱波动,保证结果的精确性。同时为减少测量误差,测量前利用标准白板校正。每个样本采集光谱数据3次,并取其平均值作为该样本光谱反射率。共获取350组茶树叶片光谱数据。

#### 1.2.2 单位滞尘率、叶片含水量测定

采用万分之一电子分析天平分别测定滞尘清除前叶片质量和滞尘清除后叶片质量,然后利用扫描仪对该叶片进行扫描并计算叶面积(为了防止水分的变化上述步骤均在10 min内完成)。利用式(1)计算单位滞尘率(UDR)

$$UDR = \frac{(M_1 - M_2)}{S} \quad (1)$$

式(1)中,UDR为叶片单位滞尘率,  $g \cdot cm^{-2}$ ;  $M_1$ 为滞尘清除前叶片质量,  $g$ ;  $M_2$ 为滞尘清除后叶片质量,  $g$ ;  $S$ 为叶面积,  $cm^2$ 。

单位滞尘含量测定后,将该叶片放入烘箱105℃杀青15 min,90℃持续烘干至叶片质量不再变化,称取烘干叶片质量。利用式(2)计算叶片等效水厚度(EWT)

$$EWT = \frac{(M_2 - M_3)}{S} \quad (2)$$

式(2)中,EWT为叶片等效水厚度,  $g \cdot cm^{-2}$ ;  $M_2$ 为滞尘清除后叶片质量,  $g$ ;  $M_3$ 为叶片烘干质量,  $g$ ;  $S$ 为叶面积,  $cm^2$ 。

## 1.3 数据分析

### 1.3.1 数据概况

为了保证数据的独立性,提高模型的适用范围及稳定性,将350组数据随机分为特征波段提取集、建模集、检验集,每个集合内均包含了全滞尘率及含水量的茶树叶片,如表1所示。利用View Spec Pro软件对茶树叶片光谱反射率进行平均与数据导出处理;通过MATLAB 2012b和SPSS 21.0进行相关关系分析与建模,利用Origin 8.0进行绘图。

表 1 样本信息

Table 1 Informations of samples

样本	样本数	等效水厚度范围 /( $g \cdot cm^{-2}$ )	单位滞尘率范围 /( $g \cdot cm^{-2}$ )
特征波段提取集	200	0.010~0.023	0.067~2.523
建模集	100	0.012~0.020	0.033~1.612
检验集	50	0.012~0.029	0.124~1.9403
总量	350	0.010~0.029	0.033~2.523

### 1.3.2 植被指数

植被指数(VI)是两个或多个波长范围内的地物反射率组合运算,能有效地增强植被某一细节,通过植被指数来区分各种植被的方法运算简单,便于操作,实用性强。虽然目前有较多植物水分植被指数,但这些指数构建时并未考虑到叶面滞尘的因素。因此,本研究利用特征波段提取集的200组数据通过随机组合叶片有尘原始光谱350~2500 nm的任意两波段,利用常见的归一化算法、比值算法构建植被指数并分别与EWT进行相关性分析<sup>[12]</sup>,提取最佳组合波段,最终分别构建新归一化植被指数(NDVI)和新比值植被指数(RVI)。

归一化算法公式如式(3)所示

$$NDVI_{(i,j)} = \frac{R_i - R_j}{R_i + R_j} \quad (3)$$

式(3)中,  $NDVI_{(i,j)}$ 为以  $i$  和  $j$  为中心波段归一化植被指数;  $R_i$  和  $R_j$  分别为  $i$  和  $j$  波段的光谱反射率。

比值算法公式如式(4)所示

$$RVI_{(i,j)} = \frac{R_i}{R_j} \quad (4)$$

式(4)中,  $RVI_{(i,j)}$ 为以  $i$  和  $j$  为中心波段的比值植被指数;  $R_i$  和  $R_j$  分别为  $i$  和  $j$  波段的光谱反射率。

为分析植被指数在不同滞尘条件下对茶树叶片高光谱估算的响应,同时选取6种常用精度较高的水分指数,其新建植被指数与常用水分指数如表2所示。

### 1.3.3 分析方法

不同植被指数对滞尘影响的响应大小以相对变率(RCR)作为评判指标,若RCR越大表明该植被指数受滞尘影响越大,若RCR越小则反之。RCR的计算公式如式(5)所示

$$RCR = \frac{x_n - x_y}{(x_n + x_y) \times \frac{1}{2}} \quad (5)$$

式(5)中,RCR为相对变率;  $x_n$ 为无尘状态下的相关系数;  $x_y$ 为有尘状态下的相关系数。

表 2 植被指数及计算方式

Table 2 Vegetation indexes and calculation methods

植被指数	计算公式	文献
NDVI <sub>(1 298, 1 340)</sub>	$(R_{1 298} - R_{1 340}) / (R_{1 298} + R_{1 340})$	—
RVI <sub>(1 298, 1 325)</sub>	$R_{1 298} / R_{1 325}$	—
NDWI <sub>(860, 1 450)</sub>	$(R_{860} - R_{1 450}) / (R_{860} + R_{1 450})$	[2]
NDWI <sub>(860, 2 130)</sub>	$(R_{860} - R_{2 130}) / (R_{860} + R_{2 130})$	[2]
NDII	$(R_{800} - R_{1 600}) / (R_{800} + R_{1 600})$	[2]
MSI	$R_{1 600} / R_{820}$	[2]
SIWSI	$(R_{860} - R_{1 640}) / (R_{860} + R_{1 640})$	[11]
NDMSI	$(R_{820} - R_{1 600}) / (R_{820} + R_{1 600})$	[11]

### 1.3.4 模型构建与验证

偏最小二乘回归(PLSR)是一种结合了多元线性回归分析、典型相关分析和主成分分析三种算法优点的化学计量分析方法,广泛应用于光谱分析<sup>[13]</sup>。因此,采用 PLSR 构建水分估算模型,并利用均方根误差(RMSE)、决定系数( $R^2$ )、剩余估计偏差(RPD)对不同植被指数构建模型的预测能力和稳定性进行评价,最终获得叶面滞尘影响最小的高精度茶树叶片水分指数估算模型。

## 2 结果与讨论

### 2.1 滞尘对茶树叶片光谱反射率的影响

为分析滞尘对茶树叶片光谱反射率不同波段的影响,将光谱数据划分为具有区分度的分组,根据滞尘率从小到大分为 3 组每组 100 个数据样本,每个分组间均空除 25 个数据样本,分组结果如下: 0.033~0.31, 0.34~0.545 和 0.602~2.523  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 并对每组的叶片有尘与对应无尘状态下光谱数据分别进行平均处理,并对不同状态下相同波段反射率进行差异性检验,具体结果见图 1。由图 1 可见,大于 400 nm 波段的叶片光谱反射率曲线在除尘前、后呈现相似形态,且在 680~780 nm 间均出现了光谱反射率曲线的斜率发生骤变的植被典型“陡坡”现象,但小于 400 nm 波段光谱反射率变化较为复杂且无规律,可见该波段区间光谱反射率并不稳定,而相关研究指出叶片水分有效光谱信息几乎不受小于 400 nm 波段的影响,因此,分析叶片水分光谱特征时可忽略小于 400 nm 波段区间的光谱信息。400~530, 579~696 和 2 454~2 500 nm 波段范围内有尘叶片均明显高于无尘状态下相同叶片的反射率;其中 400~530 nm 波段范围各滞尘状态下不同叶片的反射率重叠非常明显;579~696 nm 波段范围虽然无尘叶片反射率差异较为明显,但有尘状态下叶片反射率重叠较多;而 2 454~2 500 nm 波段范围有尘无尘状态叶片反射率聚类较为明显,但同种滞尘状态下的叶片反射率差异不显著。531~578 和 711~1 378 nm 波段范围无尘叶片反射率大于该叶片有尘状态光谱反射率,且滞尘率越小反射率越大;其中 531~578 nm 波段范围无尘叶片反射率与有尘叶片反射率交叉现象严重;而 711~1 378 nm 波段范围无尘叶片反射率与有尘状态反射率具有明显聚类现象,且相同状态下的不同叶片反射率差异性极显著( $p < 0.01$ ); 1 379~1 882 nm 波段范围虽然无尘叶片光谱反射率均高于相同叶片有尘

状态反射率,但无尘状态和有尘状态下叶片反射率重叠明显。可见,茶树叶片光谱反射率受到滞尘影响其 531~578 和 711~1 378 nm 波段范围受到滞尘影响光谱反射率具有显著的降低趋势,而 400~530, 579~696 和 2 454~2 500 nm 波段范围受到滞尘影响光谱反射率具有显著的增加趋势。711~1 378 nm 对于不同滞尘率状态具有明显聚类现象,且差异性显著。因此,711~1 378 nm 区间在叶面滞尘对茶树叶片水分估算影响研究中具有较大潜力,且本研究对所有波段进行两波段组合并进行归一化计算与比值计算,利用相关系数法筛选并新建的归一化指数和比值指数的波段亦位于该潜力波段区间,分别为 1 298, 1 340 和 1 298, 1 325 nm。

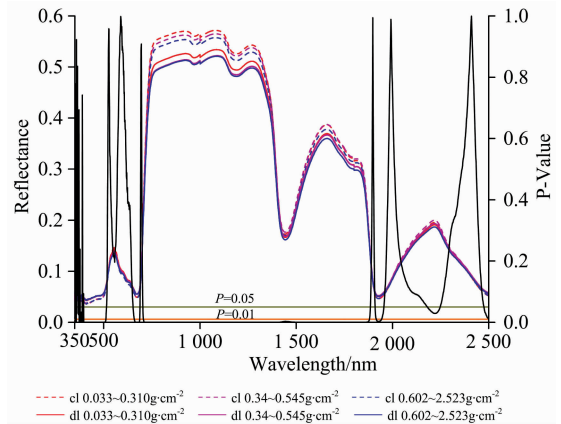


图 1 有尘和无尘茶树叶片光谱反射率对比

Fig. 1 Comparison of spectral reflectance between dust and clean tea leaves

### 2.2 滞尘对茶树叶片含水量与植被指数相关性的影响

利用建模集的 100 组数据分别进行植被指数与茶树叶片有尘、无尘状态下的 EWT 相关性分析,并对相关系数进行相对变率计算,结果见表 3。由表 3 可见,植被指数与 EWT

表 3 茶树叶片 EWT 在有尘、无尘状态下分别与各指数的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of EWT with various indices in dust and clean tea leaves

植被指数	相关系数		相对变率 $n=100$
	无尘( $n=100$ )	有尘( $n=100$ )	
NDVI <sub>(1 298, 1 340)</sub>	0.865 **	0.848 **	0.019
RVI <sub>(1 298, 1 325)</sub>	0.864 **	0.844 **	0.023
NDWI <sub>(860, 1 450)</sub>	0.837 **	0.795 **	0.051
NDWI <sub>(860, 2 130)</sub>	0.805 **	0.752 **	0.068
NDII	0.808 **	0.760 **	0.061
MSI	-0.805 **	-0.748 **	0.073
SIWSI	0.801 **	0.754 **	0.060
NDMSI	0.806 **	0.757 **	0.062

注: \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,  $n$  为样本数量

Note: \*\* represents significant correlation at the level of 0.01 (bilateral), \* represents significant correlation at the level of 0.05 (bilateral), and  $n$  is the number of samples

的相关系数在无尘状态下均高于有尘，且绝对值皆已达到 0.7 以上；除 MSI 与 EWT 呈负相关外，其余 7 个指数与 EWT 均呈正相关；无尘状态下  $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$ ， $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$  与 EWT 相关性最高，分别达到 0.865 和 0.864，而有尘状态下  $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$  与 EWT 相关性最高，达 0.848。对比无尘、有尘状态下植被指数与 EWT 的相关性方向（即正、负相关性）可知，无论是否有尘植被指数与 EWT 的相关性方向不会改变，只会改变相关性的 大小，且有尘状态下各植被指数与 EWT 的相关性始终低于无尘状态。对比植被指数与 EWT 相关系数的相对变率大小可知， $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$ ， $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$ ， $NDWI_{(860,\ 1\ 450)}$  和 SIWSI 的相对变率均小于 0.06，其大小分别为 0.019，0.023，0.051 和 0.060，可见以上 4 个植被指数受到叶面滞尘影响较小；且叶片有尘、无尘状态下的 EWT 与以上 4 个植被指数相关系数均显著 ( $p < 0.01$ ) 达到 0.754 以上。

### 2.3 滞尘对茶树叶片水分估算精度的影响

根据上述结果可见  $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$ ， $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$ ，ND-

$WI_{(860,\ 1\ 450)}$  和 SIWSI 受滞尘影响小，且与 EWT 的相关性最高。因此，利用这 4 个植被指数作为自变量，分别构建有尘、无尘状态下茶树叶片 EWT 估算模型用以分析叶面滞尘对各植被指数构建模型精度的影响。

利用建模集数据的叶片有尘、无尘数据，采用偏最小二乘回归法分别建立有尘、无尘状态下以  $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$ ， $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$ ， $NDWI_{(860,\ 1\ 450)}$  和 SIWSI 为自变量的茶树叶片 EWT 估算模型，并对相同植被指数的有尘、无尘模型  $R^2$  进行相对变率计算，具体结果见表 4。由表 4 可知，无论有尘与无尘状态下，所选 4 种植被指数构建茶树叶片 EWT 模型的  $R^2$  均达到 0.7 以上，且无尘茶树叶片 EWT 估算模型的  $R^2$  始终大于相同植被指数构建的有尘模型  $R^2$ ；4 种植被指数构建的茶树叶片 EWT 估算模型在有尘、无尘状态下其  $R^2$  大小依次为： $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)} > NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)} > NDWI_{(860,\ 1\ 450)} > SIWSI$ ；其  $R^2$  相对变率大小为： $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)} < RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)} < NDWI_{(860,\ 1\ 450)} < SIWSI$ 。

表 4 在有尘和无尘状态下分别建立的茶树叶片 EWT 指数估算模型与评价

Table 4 Estimation and evaluation for EWT model using vegetation indexes of tea leaves under clean and dust conditions

植被指数	无尘回归方程	$R^2$	有尘回归方程	$R^2$	$R^2$ 相对变率
$NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$	$EWT=0.291NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}+0.002$	0.870	$EWT=0.268NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}+0.004$	0.812	0.069
$RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$	$EWT=0.253RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}-0.249$	0.873	$EWT=0.233RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}-0.228$	0.814	0.070
$NDWI_{(860,\ 1\ 450)}$	$EWT=0.038NDWI_{(860,\ 1\ 450)}-0.003$	0.799	$EWT=0.031NDWI_{(860,\ 1\ 450)}+0.0004$	0.741	0.075
SIWSI	$EWT=0.066SIWSI+0.003$	0.770	$EWT=0.049SIWSI+0.007$	0.704	0.089

利用检验样本集数据的有尘、无尘数据，对上述 4 种植被指数构建的模型进行精度检验，分析叶面滞尘对不同指数构建模型精度的影响，结果见表 5。由表 5 可知，以  $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$ ， $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$ ， $NDWI_{(860,\ 1\ 450)}$  和 SIWSI 为自变量构建的茶树叶片 EWT 估算模型，在有尘、无尘状态下其估算值与实测值线性拟合方程的 RMSE 均为 0.001， $R^2$  除 SIWSI 指数构建的模型外其余均大于 0.6。以  $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$  构建的模型估算值与实测值拟合方程的  $R^2$  最大，相对变率最小，但仅有尘状态下其估算值与实测值相近（线性拟合方程斜率为 0.777），而无尘状态下估算值与实测值线

性拟合方程斜率仅为 0.225，表明估算值与实测值相差较大。以  $NDWI_{(860,\ 1\ 450)}$  构建的估算模型估算值与实测值线性拟合方程的  $R^2$  虽然在有尘、无尘不同状态下同样具有较小的相对变率，且在无尘状态下该模型估算值与实测值线性拟合方程斜率最接近 1，但其决定系数较小，在有尘状态下其斜率值与 1 相差较大。以  $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$  构建的模型估算值与实测值线性拟合方程虽然  $R^2$  相对变率较  $NDWI_{(860,\ 1\ 450)}$  和  $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$  大，但在有尘、无尘状态下其  $R^2$  均具有较大值 ( $> 0.694$ )，且估算值与实测值线性拟合方程斜率均与 1 相差小，可见滞尘对以  $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$  构建的估算模型精度影响小。

表 5 茶树叶片 EWT 的实测值与估算值比较分析

Table 5 Comparative analysis of the measured and predicted values of EWT in tea leaves

植被指数	无尘			有尘			$R^2$ 相对变率
	估算值与实测值拟合方程	$R^2$	RMSE	估算值与实测值拟合方程	$R^2$	RMSE	
$NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$	$y=0.225x+0.005$	0.719	0.001	$y=0.777x+0.003$	0.711	0.001	0.011
$RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$	$y=0.871x+0.002$	0.718	0.001	$y=0.733x+0.004$	0.694	0.001	0.033
$NDWI_{(860,\ 1\ 450)}$	$y=0.899x+0.002$	0.667	0.001	$y=0.696x+0.005$	0.649	0.001	0.027
SIWSI	$y=0.679x+0.006$	0.565	0.001	$y=0.689x+0.005$	0.534	0.001	0.055

### 2.4 滞尘混合状态下的茶树叶片含水量高光谱估算模型构建与验证

自然条件下茶树叶片处于不同滞尘环境，叶面滞尘状态的不确定将严重影响茶树叶片水分的准确估算，构建一种对

滞尘不敏感的茶树叶片水分光谱模型，对于无损、快速、准确测定茶树叶片水分具有重要作用。因此，利用建模集数据中有尘、无尘数据进行随机混合，并采用偏最小二乘回归法分别以  $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$ ， $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$ ， $NDWI_{(860,\ 1\ 450)}$  和 SI-

WSI 为自变量构建混合状态茶叶叶片 EWT 估算模型, 建模结果见表 6。由表 6 可知, 基于上述 4 种植被指数构建的茶树叶 EWT 模型的确定系数以  $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$  最大 ( $R^2 = 0.853$ ),  $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$  次之 ( $R^2 = 0.837$ ),  $NDWI_{(860,\ 1\ 450)}$  和  $SIWSI$  最小分别为 0.752 和 0.688。

表 6 茶叶叶片 EWT 在有尘、无尘混合状态下的指数估算模型

Table 6 Estimated models for EWT of tea leaf by using vegetation indexes under mixed conditions

植被指数	(有尘+无尘)回归方程	$R^2$
$NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$	$EWT=0.278NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}+0.006$	0.837
$RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$	$EWT=0.245RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}-0.241$	0.853
$NDWI_{(860,\ 1\ 450)}$	$EWT=0.033NDWI_{(860,\ 1\ 450)}-0.001$	0.752
$SIWSI$	$EWT=0.053SIWSI+0.006$	0.688

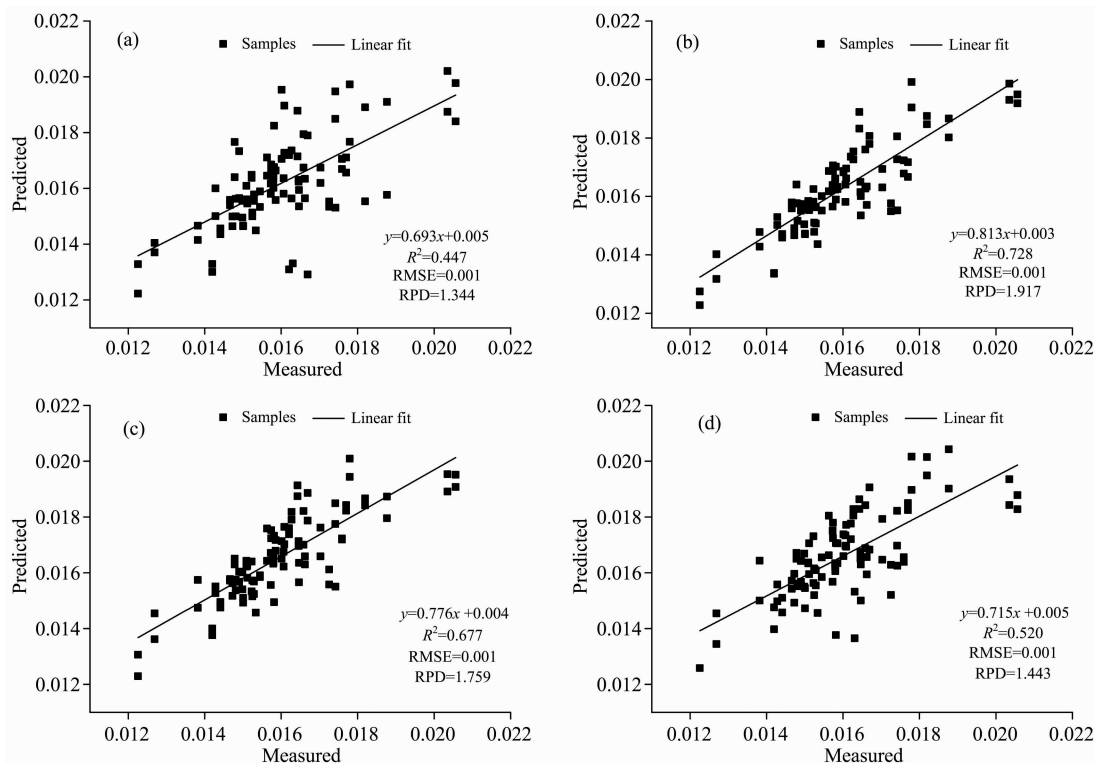


图 2 混合条件茶叶叶片水分含量实测值与预测值比较分析

(a):  $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$ ; (b):  $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$ ; (c):  $NDWI_{(860,\ 1\ 450)}$ ; (d):  $SIWSI$

Fig. 2 Comparative analysis of the measured and predicted EWT in tea leaves

(a):  $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$ ; (b):  $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$ ; (c):  $NDWI_{(860,\ 1\ 450)}$ ; (d):  $SIWSI$

### 3 结论

通过分析不同植被指数对茶叶叶面滞尘的敏感性, 发现  $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$ ,  $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$ ,  $NDWI_{(860,\ 1\ 450)}$ ,  $SIWSI$  与 EWT 的相关性高, 且有、无尘状态下相关系数的相对变率小。选择这 4 个指数构建 EWT 估算模型并分析滞尘对 EWT 估算精度的影响, 利用偏最小二乘回归法分别建立有尘、无

为了检验所建模型精度, 利用检验集样本(包括有尘、无尘数据)对模型估算值与实测值进行线性拟合分析, 结果如图 2。由图 2 可知, 在混合条件下以  $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$ ,  $NDWI_{(860,\ 1\ 450)}$ ,  $SIWSI$ ,  $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$  为自变量构建的模型估算值与实测值线性拟合方程的 RMSE 均为 0.001, 其  $R^2$  依次为: 0.728, 0.677, 0.520, 0.447, RPD 依次为: 1.917, 1.344, 1.759, 1.443; 线性拟合方程斜率分别依次为: 0.813, 0.776, 0.715 和 0.693, 线性拟合方程截距依次为: 0.003, 0.004, 0.005 和 0.005。比较 4 种植被指数构建模型的估算值与实测值线性关系可知, 以  $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$  为自变量构建的茶树叶 EWT 模型的估算值与实测值线性拟合方程的  $R^2$  和 RPD 最大, 斜率与 1 差值最小, 方程截距最小。因此, 该模型受滞尘影响小, 是混合滞尘状态下的最优模型, 该结果也验证了  $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$  受滞尘的影响最小的结论。

尘茶叶叶片水分估算模型, 发现滞尘会降低茶叶叶片水分估算精度, 且 4 个模型中在有尘、无尘两种状态下, 以  $NDVI_{(1\ 298,\ 1\ 340)}$ ,  $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$  为自变量的模型估算精度高、反演效果优于  $NDWI_{(860,\ 1\ 450)}$ 、 $SIWSI$ 。在有尘、无尘混合状态下以  $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$  为自变量的茶叶叶片水分估算模型精度最高(模型为  $y=0.245x-0.241$ ), 模型估算值与实测值具有较强的一致性, 反演效果最佳, 因此  $RVI_{(1\ 298,\ 1\ 325)}$  构建的茶树叶水分估算模型在自然滞尘状态下对茶叶叶片含水量的精确

估算具有较大潜力,能够为遥感估测有尘、无尘以及混合状态下茶树叶片水分含量提供参考依据,对茶树精准管理具有重要的指导和参考价值。

## References

- [ 1 ] Verrelst J, Rivera J P, Frank V, et al. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 108: 260.
- [ 2 ] Fang M H, Ju W M, Zhan W F. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 196: 13.
- [ 3 ] Feng Z, Zhou G S. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 7(11): 2239.
- [ 4 ] HU Zhen-zhu, PAN Cun-de, PAN Xin, et al(胡珍珠, 潘存德, 潘鑫, 等). *Scientia Silvae Sinicae(林业科学)*, 2016, 52(12): 39.
- [ 5 ] PAN Qing-mei, ZHANG Jin-song, MENG Ping, et al(潘庆梅, 张劲松, 孟平, 等). *Journal of Northeast Forestry University(东北林业大学学报)*, 2019, 47(7): 68.
- [ 6 ] CHEN Zhi-fang, SONG Ni, WANG Jing-lei, et al(陈智芳, 宋妮, 王景雷, 等). *Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学)*, 2017, 50(5): 871.
- [ 7 ] XU Qing, MA Yi, JIANG Qi, et al(徐庆, 马驿, 蒋琦, 等). *Remote Sensing Information(遥感信息)*, 2018, 33(5): 1.
- [ 8 ] SUN Teng-teng, LIN Wen-peng, LI Ying, et al(孙腾腾, 林文鹏, 李莹, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2017, 37(8): 2539.
- [ 9 ] LI Wei-tao, WU Jian, CHEN Tai-sheng, et al(李伟涛, 吴见, 陈泰生, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2016, 32(2): 180.
- [ 10 ] GAO Chuan-you(高传友). *Research of Soiland Water Conservation(水土保持研究)*, 2016, 23(1): 187.
- [ 11 ] Lin W P, Li Y, Du S Q, et al. *Ecological Indicators*, 2019, 104(9): 41.
- [ 12 ] CHENG Zhi-qing, ZHANG Jin-song, ZHENG Ning(程志庆, 张劲松, 郑宁). *Chinese Patent(中国专利)*: ZL201410310957.6, 2017.
- [ 13 ] Katherine M H, Christopher M, Jin W. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111.

## Hyperspectral Estimation of Tea Leaves Water Content Under the Influence of Dust Retention

JIANG Jing<sup>1,2</sup>, ZHAO Zi-wei<sup>1,2</sup>, CAI Chang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin-song<sup>3</sup>, CHENG Zhi-qing<sup>1,2\*</sup>

1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Hefei Agricultural Environment Science Observation and Experiment Station, Ministry of Agriculture, Hefei 230036, China

3. Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

**Abstract** In order to reduce the influence of dust retention on the extraction of effective spectral information of tea leaf and to establish a more robust water content estimation model of tea leaf by spectrum, We took “Shu Chazao” as the research object and collected samples of tea leaves by random sampling. Then the hyperspectral information, leaf water content and dust retention rate of leaves were measured. The correlation coefficient method was used to extract feature information. Newly-built vegetation indexes were constructed by the normalization calculation method and ratio calculation method, The relative variability analysis was used to screen the candidate indexes that reduce the impact of dust retention on the accuracy of the leaf water content estimation model. By comparing the response relationship between newly-built vegetation indexes and existing water indexes under the different conditions of dust retention, the optimal vegetation index estimation model of tea leaf water content which less affected by dust retention, was selected. Finally, the high-precision estimation models of the tea leaf water content with the optimal vegetation index were established and verified. The results show that, dust leaves’ spectral reflectance is higher than clean leaves in 711~1 378 nm bands. The correlation between the water content of the tea leaves and vegetation index is affected by dust retention, but its correlation direction is not. Dust retention also makes the accuracy value of tea leaf water content estimation model decreased. The newly-built ratio index ( $RVI_{(1\ 298, 1\ 325)}$ ) with 1 298 and 1 325 nm as the center band is least affected by leaf dust retention under complex environmental conditions. Therefore, it is the optimal vegetation index, and the hyperspectral estimation model of tea leaf water content constructed by  $RVI_{(1\ 298, 1\ 325)}$  has higher estimation accuracy, better sensitivity and stability ( $y=0.245x-0.241$ ,  $R^2=0.854$ ,  $RMSE=0.001$ ). In conclusion, this study provides a basis for the refined water management of tea trees and provides new ideas that high-precision models of water content estimation is constructed by hyperspectral information under complex environmental conditions.

**Keywords** Dust retention; Hyperspectral model; Vegetation index; Water content of tea leaf

\* Corresponding author

(Received Oct. 26, 2020; accepted Mar. 12, 2021)