

基于光谱水分指数的阔叶树种叶片等效水厚度估算

赵静瑶¹, 张学霞^{1,2}, 杨 维¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083)

摘要: 植物叶片的水分含量是评价植物水分状态的一项重要指标。为快速、准确地获取植物的叶片含水量, 分别使用传统敏感性分析方法和扩展傅立叶振幅灵敏度分析(EFAST方法)对 PROSPECT 模型进行了敏感性分析。在此基础上筛选与叶片含水量敏感度高的光谱水分指数, 并以阔叶树种为研究对象, 根据地面实测叶片等效水厚度(l_{EWT})和光谱数据建立了叶片等效水厚度估算模型并验证。结果表明: EFAST 方法比传统的敏感性分析方法, 可以量化叶片各项生化参数的敏感特征。叶片等效水厚度的敏感波段为 900~2 500 nm, 但在这个范围内光谱反射率也受叶片结构(N)和干物质含量(C_m)的影响; 在选取的 8 个光谱水分指数中, 水分胁迫指数(I_{MSI})、归一化差异红外指数(I_{NDII})和归一化差异水分指数($I_{NDWI1640}$)可以有效提高 l_{EWT} 的敏感度。基于实测数据对植被水分指数建立的叶片等效水厚度估算模型的验证结果显示: $I_{NDWI1640}$ 和 I_{NDII} 估算模型的预测精度要优于其他指数。对比分析表明: 在选取的光谱水分指数中, $I_{NDWI1640}$ 和 I_{NDII} 是叶片尺度上估算水分的最佳指数, 而归一化差异水分指数($I_{NDWI240}$)和简单水分指数(I_{SRWI})适合于低值区域的叶片等效水厚度反演。图 3 表 5 参 28

关键词: 森林水文学; PROSPECT 模型; 等效水厚度; 扩展傅立叶振幅灵敏度分析(EFAST); 植被水分指数
中图分类号: S715.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2019)05-0868-09

Leaf equivalent water thickness estimation based on spectral moisture indexes in broadleaf species

ZHAO Jingyao¹, ZHANG Xuexia^{1,2}, YANG Wei¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of National Administration of Forestry and Grassland on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To quickly and accurately obtain the leaf water content of plants, an important evaluation indicator for evaluating the plant water status, a sensitivity analysis with the PROSPECT Model was performed using the traditional sensitivity analysis method and the EFAST (Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test) method. Then, the spectral water indexes with a high sensitivity were selected. Using 8 deciduous broadleaf tree species as the research samples, 1 494 spectral data as input data, an equivalent water thickness estimation model was established and validated based on the ground equivalent water thickness and spectral data. Results showed that EFAST was more sensitive than the traditional sensitivity analysis method in quantifying characteristics of various biochemical parameters. The sensitive wavelength of leaf equivalent water thickness (l_{EWT}) was in the range of 900–2 500 nm, but in the same range, spectral reflectance was also affected by leaf structure and dry matter content. Among the eight spectral water indexes selected, moisture stress index (I_{MSI}), normalized difference infrared index (I_{NDII}), and normalized difference water index ($I_{NDWI1640}$) effectively increased sensitivity to l_{EWT} . Validation results based on measured data showed that prediction accuracy of $I_{NDWI1640}$ and I_{NDII} estimation

收稿日期: 2018-03-18; 修回日期: 2018-05-03

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD07B030201)

作者简介: 赵静瑶, 从事资源环境时空动态信息研究。E-mail: 646121489@qq.com。通信作者: 张学霞, 副教授, 博士, 从事生态环境遥感研究。E-mail: xuexiazh@yeah.net

models were better than other indexes. Therefore, among the spectral water indexes selected for this study, $I_{NDWI1640}$ and I_{NDII} were the best indexes for estimating leaf equivalent water thickness at the scale of the plant leaf; whereas, normalized difference water index ($I_{NDWI1240}$) and simple ratio water index (I_{SRWI}) were suitable for inversion of leaf equivalent water thickness in the areas with lower moisture. The research demonstrated that EFAST method has significant value in guiding modification for localization of model parameters. [Ch, 3 fig. 5 tab. 28 ref.]

Key words: forest hydrology; PROSPECT model; equivalent water thickness; EFAST; vegetation water index

植物的蒸腾作用是生物圈水循环中非常重要的一个环节，对于调节大气湿度、环境温度和降雨量有着重要作用。植被水分含量也是影响生物体燃烧的一个重要因素^[1]，对森林火险有着重要的影响。在干旱和半干旱地区，叶片含水量可以反映水分胁迫下树木的生长状态，进而对不同树种的耐旱性能进行评价。同时，植物叶片含水量也是陆面生态模型计算的一个关键参数^[2]。因此，快速、准确地估算植物的叶片含水量，不仅可以为绿化园林建设，提升区域生态功能，打造生态宜居城市提供指导意义，而且在防护林经营管理以及森林火灾风险管理和预测方面也具有重要的参考价值。传统的叶片水分含量测定方法需要对植物进行破坏性采样，而且耗时费力。光谱技术的快速发展，使快速无损地测定叶片水分含量成为可能。目前，利用高光谱数据估算植被生化参数的方法主要有 2 种^[3]：一是基于经验和半经验的统计方法，即建立光谱反射率或其变化形式与植被生化参数的回归方程来估算植被生化参数，半经验统计方法的重点是构建与某一生化参数高度相关而对其他参数不敏感的植被指数，建立其与生化参数之间的关系，对植被生化参数进行估算。二是基于辐射传输模型反演方法，辐射传输模型描述了植被与入射光谱之间的相互作用过程和特征，相对于传统的经验/半经验方法，辐射传输模型物理意义明确，稳定性好且具有普适性。冀荣华等^[4]研究表明：在 420~500，640~680 和 740~860 nm 等 3 个波段区间内叶片含水量与反射光谱有较高的相关性，而且采用神经网络方法建立的苹果 *Malus pumila* 叶片含水量预测模型精度较高。胡珍珠等^[5]选取水分指数(water index, I_{WI})，水分波段指数(water band index, I_{WBI})，归一化水分指数(normalized difference water index, I_{NDWI})，比值指数(I_{WI}/I_{NDWI})，中心波长比值指数($I_{Ratio975}$)和光化/生理反射(photochemical reflectance index, I_{PRI})等 6 种光谱水分指数构建了核桃 *Juglans* 叶片等效水厚度估算模型，表明应用光谱水分指数可以较好地定量反演核桃叶片含水量。冯海宽等^[6]利用扩展傅里叶幅度灵敏度检测方法和偏最小二乘方法，构建新的归一化近红外水分指数(I_{NDWI})建立苹果叶片等效水厚度估算模型，表明 EFAST-PLS 在估算叶片等效水厚度方面有较大潜力。程志庆等^[2]应用 I_{CVM}/I_{MSI} ，全球植被水分指数(I_{CVM})，水分胁迫指数(moisture stress index, I_{MSI})估算杨树 *Populus* 叶片水分含量，表明 I_{CVM}/I_{MSI} 指数为估算杨树叶片等效水厚度的最佳指数。王青华等^[7]分析了原始光谱的反射率及其 13 种变换光谱反射率与苹果叶片水分含量之间的相关性，筛选敏感波段并利用支持向量机建立了苹果叶片等效水厚度的定量估算模型，达到较好精度。目前，应用最为广泛的植物叶片辐射传输模型主要为 PROSPECT 模型和 LIBERTY 模型，分别用于模拟计算阔叶和针叶的反射率和透射率。陆成等^[8]研究表明：PROSPECT 模型有良好的物理基础，能够准确地模拟叶片的反射率和透射率。徐寿林^[9]基于 PROSPECT 模型和粒子群算法建立了叶片生化组分与光谱反射率之间的关系，为反演提取叶片组分的含量信息打下了基础。CECCATO 等^[10]通过对 PROSEPT 模型进行敏感度分析，表明结合近红外波段(NIR)和短波近红外波段(SWIR)可以提高估算叶片等效水厚度的精度。方美红等^[11]基于 PROSPECT 模型的辐射传输理论，并用实测数据验证表明小波分析方法在反演叶片水分含量方面具有独特的优势。COLOMBO 等^[12]分别使用光谱水分指数和 PROSPECT 模型估算了叶片等效水厚度，探究了经验模型和辐射传输模型估算叶片含水量的适用性。目前，植被水分估算研究大多应用于作物水分方面，对阔叶树种的研究较少。而且传统的基于特征波段建立的叶片水分估算模型，由于光谱信息复杂，容易存在入选波段稳定性差，生化参量含义不明确、多重共线性、回归过度拟合的问题^[13]。光谱指数可以使光谱反射信息最大化，外部因素最小化，简化叶片含水量估算模型。本研究以阔叶树种为研究对象，利用 EFAST 全局敏感性分析方法，旨在筛选与叶片含水量敏感度高的光谱水分指数，构建叶片等效水厚度估算模型，为叶片层次上估算等效水厚度提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 实测数据获取

本研究选取8个阔叶树种作为研究对象,分别为华东椴 *Tilia japonica*, 山杏 *Armeniaca sibirica*, 洋白蜡 *Fraxinus pennsylvanica*, 加杨 *Populus × canadensis*, 蒙古栎 *Quercus mongolica*, 美国榆 *Ulmus americana*, 刺槐 *Robinia pseudoacacia*, 臭椿 *Ailanthus altissima* 定期进行样本采集,并测量得到其叶片光谱反射率数据和叶片等效水厚度数据。监测地点选在北京林业大学校园内,监测时间为2016年4-10月和2017年5-6月,监测周期为7 d。

1.1.1 叶片采样及叶片光谱测定 叶片光谱测定采用荷兰爱万提斯 AvaSpec 光纤光谱仪进行测定,其中可见光光谱仪波长范围为200~1 100 nm,近红外光谱仪范围为1 000~2 500 nm,光谱间隔为1 nm。叶片光谱测定时间与采集样本时间同步,选在11:00到14:00光照充足,晴朗少云无风的时段进行。对新鲜叶片样品测量光谱后迅速放入自封袋中带回实验室进行叶片等效水厚度的测定。

1.1.2 叶片等效水厚度测定 使用精度为1/1 000的分析天平称取取得的叶片鲜质量,用Yaxin-1241叶面积仪测量得到叶片面积,然后使用烘箱将所有叶片样品在75 °C条件下烘干48 h以上,直至恒量再次称量得到叶片干质量。叶片等效水厚度(l_{EWT})的计算公式如下: $l_{EWT} = (m_{FW} - m_{DW})/A$ 。其中: l_{EWT} 为等效水厚度($g \cdot cm^{-2}$ 或者cm), m_{FW} 表示叶片鲜质量(g), m_{DW} 表示叶片干质量(g), A 为叶片面积(cm^2)。

1.2 PROSPECT 模型

PROSPECT模型通过模拟叶片在400~2 500 nm波段内的上行和下行辐射通量得到叶片的反射率和透射率。该模型假设叶片由 N 层同性质的平板堆叠而成,并由 $N-1$ 层空气隔开,只有在叶片表皮存在光线的非漫射特性,而在叶片内部,光线被认为是各向同性的。本研究采用最新版PROSPECT模型(PROSPECT5)^[14]。该模型把光合色素区分为叶绿素和类胡萝卜素来探索叶片的光合特性,并通过计算新的折射指数以及设置更加合理的叶片表面参数,从而使模拟的叶片反射率更加准确,是目前得到广泛认可的叶片辐射传输模型之一。PROSPECT5模型需要6个输入参数,包括叶片结构(N),叶绿素含量(C_{ab} , $\mu g \cdot cm^{-2}$),等效水厚度(l_{EWT} , $g \cdot cm^{-2}$),类胡萝卜素含量(C_{ar} , $\mu g \cdot cm^{-2}$),叶黄素含量(C_{brown} , $\mu g \cdot cm^{-2}$)和干物质含量(C_m , $g \cdot cm^{-2}$)。研究参照公开的野外实测数据集LOPEX'93(Leaf Optical Properties Experiment)中的样本数据^[15-16]以及实测叶片样本数据,确定了模型各参数的取值范围(表1)。

表1 PROSPECT模型输入参数的取值范围

Table 1 Range of input parameters for PROSPECT model

参数	叶片结构参数(N)	叶绿素(C_{ab})/ ($\mu g \cdot cm^{-2}$)	类胡萝卜素(C_{ar})/ ($\mu g \cdot cm^{-2}$)	叶黄素(C_{brown})/ ($\mu g \cdot cm^{-2}$)	等效水厚度(l_{EWT})/ ($g \cdot cm^{-2}$)	干物质(C_m)/ ($\mu g \cdot cm^{-2}$)
分布范围	1.0~4.0	15~90	3~20	0.000 6~0.002 0	0.005~0.050	0.002~0.020
分布形式	均匀分布	均匀分布	均匀分布	均匀分布	均匀分布	均匀分布

1.3 EFAST 全局敏感性分析方法

扩展傅立叶振幅灵敏度分析(EFAST)是由SALTELLI等^[17]在CUKIER等的基础上进一步扩展的一种敏感性分析方法。EFAST可以定性并且定量地得到不同输入参数对模型输出结果的影响。EFAST是对局部敏感性分析的一种改进,它允许模型的输入参数可以同时变化,以探究参数之间的耦合作用对模型输出结果的影响。局部敏感性分析只允许一个参数变化,其他参数保持不变。EFAST分析方法可以得到一阶敏感指数和总阶敏感指数,一阶敏感指数表示的是目标模型输入参数的方差占总方差的百分比,总阶敏感指数表示目标输入参数和所有输入参数之间相互作用的方差占总体方差的百分比。当模型输入参数相互独立或者说参数之间没有耦合作用时,总敏感性指数等同于局部敏感性指数。本研究使用的敏感性分析软件为SimLab 2.2以及Matlab 2015b。分析过程包括样本生成、连接模型、Monte Carlo模拟以及敏感性分析4个部分。

2 结果与分析

2.1 叶片参数敏感性定性分析

本研究首先采用传统的参数敏感性分析方法 OTA(one factor at a time)^[18]对 PROSPECT 模型进行了敏感性研究，即设定目标的参数范围，其他参数保持不变，并且认定各参数之间是相互独立的，进而分析各个参数变化对模型输出结果的影响程度。模型参数参照表 1 的基础值，因为类胡萝卜素含量和叶黄素含量影响范围较小，此处不作考虑。参数取值变化引起的光谱变化范围如图 1 所示。

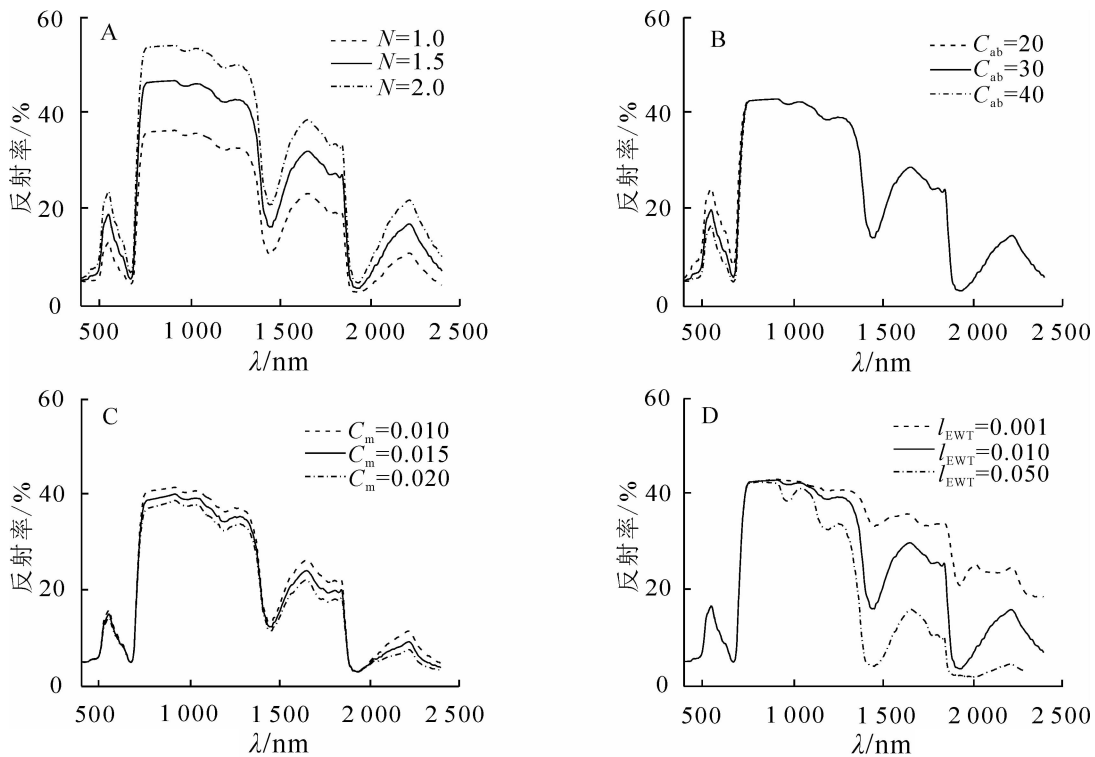


图 1 PROSPECT 模型各参数引起光谱变化情况

Figure 1 Spectral changes caused by parameter variations of PROSPECT model

图 1 显示叶绿素含量对光谱的影响主要在可见光波段，即 400~800 nm，其光谱反射率随叶绿素含量的增大而减小，在近红外和短波红外波段范围内不变化。叶片结构和干物质含量的主要影响波段为 700~2 500 nm。叶片等效水厚度和干物质含量对可见光波段影响不明显，其主要影响范围在近红外和短波红外波段，叶片等效水厚度主要影响的光谱波段为 900~2 500 nm。在这段范围内，光谱反射率随两者取值的增大而减小。

2.2 叶片参数敏感性定量分析

为了量化每个参数对光谱反射率的影响，本研究采用 EFAST 方法进行了全局敏感性分析，并与之前的敏感性分析进行比较。研究对 PROSPECT 模型的输入参数范围设置为均匀分布，按照 EFAST 采样方法得到 1 494 组模型输入参数样本(EFAST 法认为采样次数大于参数个数 65 倍的分析结果有效)^[16]，然后连接 PROSPECT 模型，基于参数样本模拟出 1 494 条光谱数据，最后在 Simlab 软件中对模拟结果执行 Monte Carlo 模拟及敏感性分析。

图 2 显示了使用 PROSPECT 模型模拟出来的数据进行全局敏感性分析的结果。图 2 中一阶敏感指数以

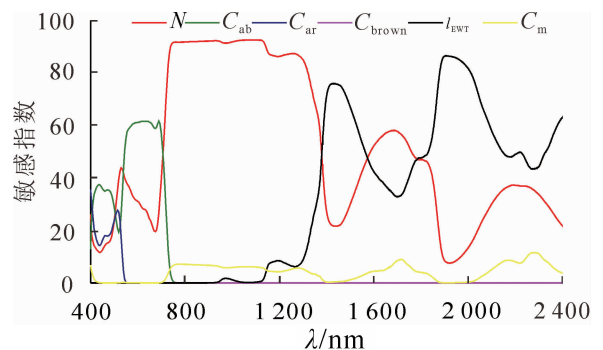


图 2 叶片生化参数的一阶敏感指数

Figure 2 First order indices of leaf spectral reflectance to leaf characteristics

百分比形式表示,表示每个参数对模型输出结果的贡献程度,也可以解释为光谱反射率对每个叶片生化参数的敏感度。一阶敏感指数总和接近于100%,这表明模型输出的不确定性不是由于参数之间的相互作用引起的。图2显示在400~750 nm波段内,模型输出结果主要受 C_{ab} 的影响,其次为 N 。在750~1 200 nm波段内,光谱反射率主要受 N 和 C_m 影响,其中 N 的贡献度最高达90%左右, C_m 的贡献度保持在8%~9%。在波长900 nm处,可以观察到 l_{EWT} 开始对模型输出结果产生影响,并在波长1 440, 1 920和2 500 nm处其贡献达到顶峰。这一波段范围内, l_{EWT} 起着主要贡献作用,然而 C_m 和 N 也在一定程度上影响着模型输出结果。因此,为了提高估算 l_{EWT} 的精度,应该结合其他波段的信息将 N 和 C_m 的影响最小化。根据上述分析结果,在750~1 200 nm波段内, l_{EWT} 的敏感度较小,光谱反射率主要受 N 和 C_m 影响,因此可以与900~2 500 nm波段结合以减弱 N 和 C_m 的影响,以达到提高对 l_{EWT} 敏感度的目的。

2.3 植被水分指数敏感性分析

为了探究这2个波段范围的组合是否有效,本研究选择了8种目前应用广泛的植被水分指数。这8种植被水分指数均由参考波段和测量波段2个波段以比值或者归一化形式组成。参考波段选择 l_{EWT} 敏感度较低的波段,如820和860 nm。测量波段为 l_{EWT} 敏感的波段,如1 240, 1 600, 1 640和2 130 nm。由于实测光谱中1 340~1 450, 1 780~2 000和2 350~2 500 nm波段是大气中受水汽和噪声影响较大的波段^[19],所以本研究在选择植被指数时不考虑这些波段。本研究选择的具体植被水分指数名称及其计算公式见表2。

表2 植被水分指数计算公式

Table 2 Equation of water content spectral indices

指数名称	计算公式	参考文献
水分胁迫指数(moisture stress index, MSI)	$I_{MSI}=R_{1600}/R_{820}$	[20]
简单水分指数(simple ratio water index, SRWI)	$I_{SRWI}=R_{860}/R_{1240}$	[21]
归一化差异红外指数(normalized difference infrared index, NDII)	$I_{NDII}=(R_{820}-R_{1600})/(R_{820}+R_{1600})$	[22]
归一化差异水分指数(normalized difference water index, NDWI ₁₂₄₀)	$I_{NDWI1240}=(R_{860}-R_{1240})/(R_{860}+R_{1240})$	[23]
归一化差异水分指数(normalized difference water index, NDWI ₁₆₄₀)	$I_{NDWI1640}=(R_{860}-R_{1640})/(R_{860}+R_{1640})$	[24]
归一化差异水分指数(normalized difference water index, NDWI ₂₁₃₀)	$I_{NDWI2130}=(R_{860}-R_{2130})/(R_{860}+R_{2130})$	[24]
归一化多波段干旱指数(normalized multi-band drought index, NMDI)	$I_{NMDI}=\frac{R_{860}-(R_{1640}-R_{2130})}{R_{860}+(R_{1640}-R_{2130})}$	[25]
全球植被水分指数(global vegetation moisture index, GVMi)	$I_{GVMi}=\frac{(R_{820}+0.1)-(R_{1600}+0.02)}{(R_{820}+0.1)+(R_{1600}+0.02)}$	[26]

为探究这些植被水分指数对 l_{EWT} 的敏感度,本研究对这8种植被水分指数进行了EFAST敏感性分析,并与植被水分指数中测量波段的敏感性分析结果进行对比。结果如表3和表4。

对比表3和表4可以看出: I_{MSI} , I_{SRWI} , I_{NDII} , $I_{NDWI1240}$, $I_{NDWI1640}$, $I_{NDWI2130}$ 和 I_{GVMi} 相较测量波段都有效地降低了 N 和 C_m 对光谱反射率的影响,提高了 l_{EWT} 的敏感度。其中 I_{MSI} , I_{SRWI} , I_{NDII} , $I_{NDWI1240}$ 和 $I_{NDWI1640}$ 这5种植被水分指数对 l_{EWT} 的敏感度都达80%以上, I_{MSI} 最高,为87.03%。 I_{NMDI} 对 l_{EWT} 的敏感度最低,与测量波段相比, I_{NMDI} 只是较好地降低了 N 的影响,其对 l_{EWT} 的敏感度反而降低,对 C_m 的敏感度也有所上升。从敏感指数改变量来看, $I_{NDWI1240}$ 提升 l_{EWT} 敏感度而弱化叶片结构和干物质含量的干扰能力最强,敏感指数增加了76.54%,其次为 I_{SRWI} ,除 I_{NMDI} 外, $I_{NDWI2130}$ 的敏感指数改变量最低,仅为24.8%。说明对测量波段的选择也不是 l_{EWT} 敏感性越高越好。所以根据敏感性分析结果,对 l_{EWT} 敏感度最高的植被水分指数依次为 I_{MSI} , I_{NDII} 和 $I_{NDWI1640}$ 。

2.4 基于光谱水分指数的叶片等效水厚度估算能力分析

为了直观表明8种植被水分指数估算叶片等效水厚度的能力,本研究基于314组实测的光谱反射率

表3 单一波长光谱反射率敏感性分析

Table 3 Sensitivity analysis of single wavelength to l_{EWT} , N and C_m

参数	λ /nm	$l_{EWT}/\%$	$N/\%$	$C_m/\%$
参考波段	820	0.00	91.92	7.03
	860	0.02	92.07	6.87
测量波段	1 240	7.02	87.18	4.88
	1 600	42.91	51.76	4.38
	1 640	38.50	55.96	4.71
	2 130	53.07	33.40	6.80

表 4 植被水分指数敏感性分析

Table 4 Sensitivity analysis of vegetation water content indices to I_{EWT} , N and C_m

指数名称	I_{EWT}		N		C_m		指数名称	I_{EWT}		N		C_m	
	敏感指数/%	改变量/%	敏感指数/%	改变量/%	敏感指数/%	改变量/%		敏感指数/%	改变量/%	敏感指数/%	改变量/%	敏感指数/%	改变量/%
I_{MSI}	87.03	44.12	12.28	-39.48	1.09	-3.29	$I_{NDWI1640}$	84.54	46.04	14.39	-41.57	1.08	-3.63
I_{SRWI}	82.15	75.13	13.32	-73.86	0.41	-4.47	$I_{NDWI2130}$	77.87	24.8	17.48	-15.92	5.19	-1.61
I_{NDII}	84.80	41.89	14.09	-37.67	0.99	-3.39	I_{NMDI}	29.86	-8.64	5.55	-50.46	25.73	21.02
$I_{NDWI1240}$	83.56	76.54	12.77	-74.41	0.39	-4.49	I_{CVWI}	77.17	34.26	22.90	-28.86	1.75	3.63

数据和对应的叶片水分数据，分别使用这 8 个植被水分指数建立统计回归模型并进行预测，以模型决定系数 (R^2) 和均方根误差 (E_{RMSE}) 为指标对各植被指数的估算模型精度进行评价。研究以植被水分指数为自变量，266 组叶片水分数据分别建立线性、一元二次函数、对数、幂函数和指数函数估算模型。结果表明： I_{SRWI} ， I_{NDII} ， $I_{NDWI1240}$ ， $I_{NDWI1640}$ ， $I_{NDWI2130}$ ， I_{NMDI} 和 I_{CVWI} 建立的叶片水分估算模型，拟合 R^2 最大的均为一元二次函数， I_{MSI} 为指数函数，但其 R^2 与对应的一元二次函数模型的 R^2 相差很小。所以本研究就以 8 种植物水分指数的一元二次函数模型进行对比(表 5)。

表 5 基于光谱水分指数的统计回归模型及其评价指标

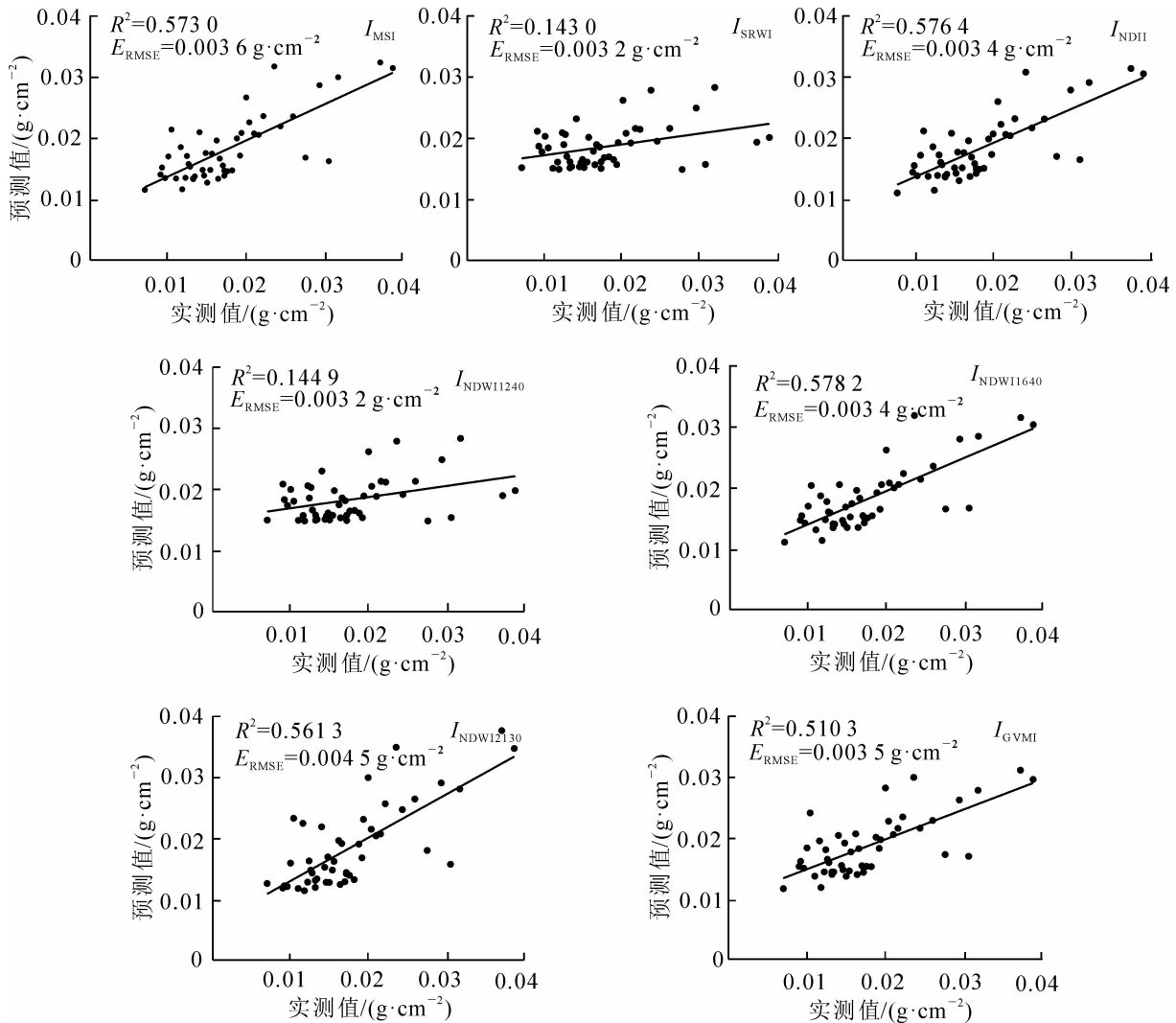
Table 5 Spectral index statistical regression model and its evaluation indexes

指数	回归模型	评价指标	
		R^2	E_{RMSE}
I_{MSI}	$y=0.210 5-0.429 0 I_{MSI} +0.305 2 I_{MSI}^2$	0.675 2	0.007 1
I_{SRWI}	$y=1.322 0-2.572 0 I_{SRWI} +1.265 0 I_{SRWI}^2$	0.596 2	0.008 0
I_{NDII}	$y=0.012 0-0.051 4 I_{NDII} +0.400 3 I_{NDII}^2$	0.679 5	0.007 1
$I_{NDWI1240}$	$y=0.015 9-0.178 4 I_{NDWI1240} +7.004 0 I_{NDWI1240}^2$	0.595 8	0.008 0
$I_{NDWI1640}$	$y=0.011 6-0.051 4 I_{NDWI1640} +0.492 0 I_{NDWI1640}^2$	0.684 3	0.007 1
$I_{NDWI2130}$	$y=0.052 8-0.232 0 I_{NDWI2130}+0.323 6 I_{NDWI2130}^2$	0.605 8	0.007 9
I_{NMDI}	$y=0.798 0-3.182 0 I_{NMDI} +3.239 0 I_{NMDI}^2$	0.160 0	0.011 5
I_{CVWI}	$y=0.025 5-0.170 9 I_{CVWI} +0.475 5 I_{CVWI}^2$	0.615 8	0.007 8

从表 5 可以看出： I_{MSI} ， I_{NDII} ， $I_{NDWI1640}$ ， $I_{NDWI2130}$ 和 I_{CVWI} 的建模精度较高，其估算模型 R^2 均在 0.60 以上，估算模型精度排名前 3 位的依次为 $I_{NDWI1640}$ ， I_{NDII} 和 I_{MSI} ， R^2 分别为 0.684 3，0.679 5 和 0.675 2，均方根误差 E_{RMSE} 均为 0.007 1 $g \cdot cm^{-2}$ 。 I_{SRWI} 和 $I_{NDWI1240}$ 的建模精度较低， R^2 分别为 0.596 2 和 0.595 8， E_{RMSE} 均为 0.008 0 $g \cdot cm^{-2}$ 。 I_{NMDI} 估算模型的 R^2 最低，仅为 0.16。综合敏感性分析和估算模型的结果， I_{NMDI} 并不适合在叶片尺度上估算叶片含水量。

为了对比上述估算模型的预测能力，本研究利用另外 48 组实测的样本数据对估算模型进行验证。以决定系数 R^2 ，均方根误差 E_{RMSE} 作为评估叶片等效水厚度估算模型的预测精度和稳定性的指标。各植被水分指数估算模型的预测结果如图 3。

从图 3 可以看出：估算模型预测结果的 R^2 较高的为 $I_{NDWI1640}$ ， I_{NDII} 和 I_{MSI} ，与估算模型的 R^2 保持良好一致，其均方根误差 E_{RMSE} 分别为 0.003 4，0.003 4 和 0.003 6 $g \cdot cm^{-2}$ 。 $I_{NDWI2130}$ 模型预测精度也保持在良好水平， R^2 为 0.561 3，但是其 E_{RMSE} 较大，为 0.004 5 $g \cdot cm^{-2}$ ，说明该模型的预测值与实测值相差较大。 I_{CVWI} 模型的预测能力属于中等水平，其 R^2 为 0.510 3， E_{RMSE} 为 0.003 5 $g \cdot cm^{-2}$ 。 $I_{NDWI1240}$ 和 I_{SRWI} 的估算模型预测精度较差， R^2 仅在 0.140 0 左右，从图 3B 和图 3D 可以看出：当 I_{EWT} 大于 0.020 0 $g \cdot cm^{-2}$ 时， $I_{NDWI1240}$ 和 I_{SRWI} 预测值出现较大偏差，出现了过早饱和现象，说明 $I_{NDWI1240}$ 和 I_{SRWI} 适合低值区域的叶片等效水厚度反演。而且研究发现：在植被水分指数敏感分析中， $I_{NDWI1240}$ 和 I_{SRWI} 与测量波段相比，其敏感度改变量最大，可能是 $I_{NDWI1240}$ 和 I_{SRWI} 在 I_{EWT} 某一特定范围内比较敏感，陈小平等^[27]研究显示： $I_{NDWI1240}$ 在 I_{EWT} 低值区域变化比较明显，到一定程度时达到饱和，而且指数抗噪能力差，实际反演效果具有局限性。程志庆等^[2]研究显示： I_{CVWI} 在 I_{EWT} 处于 0.009 0~0.027 0 $g \cdot cm^{-2}$ 时，可以灵敏地反应叶片水分的变化，但当 I_{EWT} 大于 0.027 0 $g \cdot cm^{-2}$ 时，其敏感性趋于稳定。综合考虑，叶片尺度上估算叶片等效水厚度效果最好的指

图3 验证集叶片 l_{EWT} 预测值与实测值的关系Figure 3 Relationships between predicted l_{EWT} and measured l_{EWT}

数为 I_{NDWI1640} 和 I_{NDII} 。这一结果与陈小平等^[27]和张佳华等^[28]的研究结果基本一致。同时研究表明：基于冠层反射率提出的 I_{NMDI} 不适合用于叶片尺度的等效水厚度估算。

3 结论

本研究使用 EFAST 方法对 PROSPECT 模型叶片各项生化参数进行了敏感性分析。在敏感性分析基础上优选植被水分指数，并以阔叶树种为研究对象，根据其地面实测 l_{EWT} 和光谱数据建立了叶片等效水厚度估算模型。得出以下结论：①EFAST 相较传统的敏感性分析方法，可以定量地得到叶片各项生化参数的敏感指数，其中： l_{EWT} 的敏感波段为 900~2 500 nm，但在这个范围内光谱反射率也受 N 和 C_m 的影响，所以应该结合其他波段的信息来估算 l_{EWT} 。基于此选择了 8 种植被水分指数，敏感性最强的依次为 I_{MSI} ， I_{NDII} 和 I_{NDWI1640} ，最弱的为 I_{NMDI} 。其结果为叶片生化参数反演植被水分指数选择以及模型结果的优化与改进奠定了基础。②本研究基于植被水分指数建立叶片等效水厚度估算模型并验证发现， I_{NDWI1640} ， I_{NDII} 和 I_{MSI} 估算模型的预测精度较好，并与其模型精度保持了良好的一致性。 I_{NDWI1640} 和 I_{NDII} 是叶片尺度上估算水分的最佳指数。 I_{NDWI1240} 和 I_{SRWI} 适合低值区域的叶片等效水厚度反演，基于冠层反射率提出的 I_{NMDI} 不适合用来估算叶片含水量。

研究仍存在一些不足。实验数据采用了 2016 和 2017 年 2 期的实测数据，考虑到气候原因也可能是影响模型精度的重要因素，在以后研究中会结合气象数据来建立叶片等效水厚度估算模型。其次，在研究中发现：植被水分指数随 l_{EWT} 的变化其估算能力也会变化。在以后的研究中应探究不同 l_{EWT} 范围内各

个植被水分指数的敏感性和估算能力, 以提高叶片等效水厚度估算模型的精度。

4 参考文献

- [1] RIAÑO D, VAUGHAN P, CHUVIECO E, *et al.* Estimation of fuel moisture content by inversion of radiative transfer models to simulate equivalent water thickness and dry matter content: analysis at leaf and canopy level [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2005, **43**(4): 819 – 826.
- [2] 程志庆, 张劲松, 孟平, 等. 基于高光谱信息的 107 杨叶片等效水厚度估算模型的研究[J]. 林业科学研究, 2016, **29**(6): 826 – 833.
CHENG Zhiqing, ZHANG Jingsong, MENG Ping, *et al.* Estimation model of poplar equivalent water thickness based on hyperspectral information [J]. *For Res*, 2016, **29**(6): 826 – 833.
- [3] 王蒙, 张连蓬, 马维维, 等. 植物叶片生化组分遥感反演的主成分变换算法[J]. 测绘科学技术学报, 2013, **30**(6): 619 – 623.
WANG Meng, ZHANG Lianpeng, MA Weiwei, *et al.* Remote sensing inversion of leaf biochemical components through PCA algorithm [J]. *J Geomatics Sci Technol*, 2013, **30**(6): 619 – 623.
- [4] 冀荣华, 郑立华, 邓小蕾, 等. 基于反射光谱的苹果叶片叶绿素和含水率预测模型[J]. 农业机械学报, 2014, **45**(8): 269 – 275.
JI Ronghua, ZHENG Lihua, DENG Xiaolei, *et al.* Forecasting chlorophyll content and moisture of apple leaves in different tree growth period based on spectral reflectance [J]. *Trans Chin Soc Agric*, 2014, **45**(8): 269 – 275.
- [5] 胡珍珠, 潘存德, 潘鑫, 等. 基于光谱水分指数的核桃叶片含水量估算模型[J]. 林业科学, 2016, **52**(12): 39 – 49.
HU Zhenzhu, PAN Cunde, PAN Xin, *et al.* Estimation models for water content of walnut leaves based on spectral moisture index [J]. *Sci Silv Sin*, 2016, **52**(12): 39 – 49.
- [6] 冯海宽, 李振海, 金秀良, 等. 基于 EFAST 和 PLS 的苹果叶片等效水厚度高光谱估算[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(12): 165 – 171.
FENG Haikuan, LI Zhenghai, JIN Xiuliang, *et al.* Estimating equivalent water thickness of apple leaves using hyperspectral data based on EFAST and PLS [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2016, **32**(12): 165 – 171.
- [7] 王青华, 朱西存, 王凌, 等. 基于光谱变换定量估算苹果叶片的等效水厚度[J]. 红外, 2016, **37**(11): 42 – 48.
WANG Qinghua, ZHU Xicun, WANG Ling, *et al.* Quantitative estimation of equivalent water thickness of apple leaves based on hyperspectral transformation [J]. *Infrared*, 2016, **37**(11): 42 – 48.
- [8] 陆成, 陈圣波, 刘万崧. 叶片辐射传输模型 PROSPECT 理论研究[J]. 世界地质, 2013, **32**(1): 177 – 188.
LU Cheng, CHEN Shengbo, LIU Wansong. Research of PROSPECT leaf optical property model [J]. *World Geol*, 2013, **32**(1): 177 – 188.
- [9] 徐寿林. 基于辐射传输模型提取叶片组分信息的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
XU Shoulin. *Study on Estimating Biochemical Content of Leaf Based on Radiative Transfer Model* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [10] CECCATO P, FLASSE S, TARANTOLA S, *et al.* Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain [J]. *Remote Sensing Environ*, 2001, **77**(1): 22 – 33.
- [11] 方美红, 居为民. 基于叶片光学属性的作物叶片水分含量反演模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, **35**(1): 167 – 171.
FANG Meihong, JU Weimin. A inversion model for remote sensing of leaf water content based on the leaf optical property [J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2015, **35**(1): 167 – 171.
- [12] COLOMBO R, MERONI M, MARCHESI A, *et al.* Estimation of leaf and canopy water content in poplar plantations by means of hyperspectral indices and inverse modeling [J]. *Remote Sensing Environ*, 2008, **112**(4): 1820 – 1834.
- [13] 郭超凡, 段福洲, 郭道宇, 等. 基于最佳波段判别的湿地植物叶片全氮反演研究[J]. 生态学报, 2014, **34**(17): 4839 – 4849.
GUO Chaofan, DUAN Fuzhou, GUO Xiaoyu, *et al.* Estimating wetland plant leaf total nitrogen content based on optimal bands of reflectance from wetland vegetation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(17): 4839 – 4849.
- [14] FERET J B, FRANÇOIS C, ASNER G P, *et al.* PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments [J]. *Remote Sensing Environ*, 2015, **112**(6): 3030 – 3043.

- [15] 吴伶, 刘湘南, 周博天, 等. 利用 PROSPECT+SAIL 模型反演植物生化参数的植被指数优化模拟[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(12): 3250 – 3256.
WU Ling, LIU Xiangnan, ZHOU Botian, *et al.* Simulation of vegetation indices optimizing under retrieval of vegetation biochemical parameter based on PROSPECT+SAIL model [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(12): 3250 – 3256.
- [16] 王李娟, 牛铮. PROSAIL 模型的参数敏感性研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, **29**(2): 219 – 223.
WANG Lijuan, NIU Zheng. Sensitivity analysis of vegetation parameters based on PROSAIL model [J]. *Remote Sensing Technol Appl*, 2014, **29**(2): 219 – 223.
- [17] SALTELLI A, TARANTOLA S, CHAN P S. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output [J]. *Technometrics*, 1999, **41**(1): 39 – 56.
- [18] 白云洁, 卢玲, 李新, 等. 积雪微波辐射亮温对积雪参数的敏感性分析: 以多层积雪微波辐射为例[J]. 遥感技术与应用, 2009, **24**(5): 622 – 630.
BAI Yunjie, LIU Ling, LI Xin, *et al.* Sensitivity analysis on snow parameters impacting passive microwave brightness temperature of snow: an study based on MEMLS [J]. *Remote Sensing Technol Appl*, 2009, **24**(5): 622 – 630.
- [19] 宫兆宁, 林川, 赵文吉, 等. WorldView-2 影像的湿地典型挺水植物群落含水量估算研究: 以北京野鸭湖湿地为例[J]. 红外与毫米波学报, 2014, **33**(5): 533 – 545.
GONG Zhaoning, LIN Chuan, ZHAO Wenji, *et al.* Canopy water content estimation for typical emerged plant community using WorldView-2 imagery: a case study in wild duck lake wetland, Beijing [J]. *J Infrared Millimeter Wave*, 2014, **33**(5): 533 – 545.
- [20] ERJR H, ROCK B N. Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances [J]. *Remote Sensing Environ*, 1989, **30**(1): 43 – 54.
- [21] ZARCO P J. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods [J]. *Remote Sensing Environ*, 2003, **85**(1): 109 – 124.
- [22] HARDISKYS M, KLEMAS V, SMART R M, *et al.* The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina Alterniflora* canopies [J]. *Photogramm Eng Remote Sensing*, 1983, **48**(1): 77 – 84.
- [23] GAO Bocai. NDWI: anormalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space [J]. *Remote Sensing Environ*, 1996, **58**(3): 257 – 266.
- [24] CHEN Daoyi, HUANG Jingfeng, JACKSON T J. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near-and short-wave infrared bands [J]. *Remote Sensing Environ*, 2005, **98**(2/3): 225 – 236.
- [25] WANG Lingli, QU J J, HAO Xianjun, *et al.* Sensitivity studies of the moisture effects on MODIS SWIR reflectance and vegetation water indices [J]. *Int J Remote Sensing*, 2008, **29**(24): 7065 – 7075.
- [26] CECCATO P, FLASSE S, GREGOIRE J M. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1. theoretical approach [J]. *Remote Sensing Environ*, 2002, **81**(2): 188 – 197.
- [27] 陈小平, 王树东, 张立福, 等. 植被叶片含水量反演的精度及敏感性[J]. 遥感信息, 2016, **31**(1): 48 – 57.
CHEN Xiaoping, WANG Shudong, ZHANG Lifu, *et al.* Accuracy and sensitivity of retrieving vegetation leaf water content [J]. *Remote Sensing Inf*, 2016, **31**(1): 48 – 57.
- [28] 张佳华, 郭文娟, 姚凤梅. 植被水分遥感监测模型的研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2007, **15**(1): 45 – 53.
ZHANG Jiahua, GUO Wenjuan, YAO Fengmei. The study on vegetation water content estimating model based on remote sensing technique [J]. *J Basic Sci Eng*, 2007, **15**(1): 45 – 53.