

基于高光谱信息的 107 杨叶片等效水厚度 估算模型的研究

程志庆^{1,2}, 张劲松^{1,2*}, 孟平^{1,2}, 李岩泉¹, 郑宁^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院林业研究所; 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要: [目的] 为实现杨树叶片水分高光谱信息进行快速、准确估算, [方法] 将实测杨树叶片等效水厚度作为水分含量表征量, 并测定叶片高光谱数据, 同时, 利用辐射传输模型模拟不同等效水厚度条件下的叶片尺度和冠层尺度的高光谱反射数据, 通过分析常用水分植被指数对等效水厚度的敏感性, 利用植被指数比值的方法构建新等效水厚度植被指数 (*GVMI/MSI*)。通过 *GVMI/MSI*、全球植被水分指数 (*GVMI*)、水分胁迫指数 (*MSI*) 分别对杨树叶片尺度和冠层尺度等效水厚度估算精度进行比较分析。 [结果] 表明: *GVMI* 指数、*MSI* 指数以及新建 *GVMI/MSI* 指数的叶片尺度杨树叶片等效水厚度估算模型的精度 R^2 分别为 0.997、0.995、0.998; 冠层尺度杨树叶片等效水厚度估算模型精度分别为 0.837、0.836、0.973, 其中, 新建 *GVMI/MSI* 指数为杨树叶片等效水厚度估算最佳指数。 [结论] *GVMI/MSI* 构建的杨树叶片等效水厚度模型的预测精度较高, 是杨树叶片等效水厚度的最佳估算模型。

关键词: 杨树; 叶片水分含量; 光谱模型; 水分植被指数

中图分类号: S792.119

文献标识码: A

Estimation Model of Poplar Equivalent Water Thickness Based on Hyperspectral Information

CHENG Zhi-qing^{1,2}, ZHANG Jin-song^{1,2*}, MENG Ping^{1,2}, LI Yan-quan¹, ZHENG Ning^{1,2}

(1 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 2 Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] To establish a model for the purpose of rapid and effective monitoring of poplar leaf water. [Methods] The equivalent water thickness (EWT) of poplar leaves was used as the token water content, the hyperspectral data of poplar was measured. The range of the equivalent water thickness, measured in poplar leaves, was used as the input parameters of the model. The hyperspectral reflectance data of leaf scale and canopy scale were simulated in different equivalent water thickness. By analyzing common water vegetation index sensitivity of equivalent water thickness, a vegetation index was constructed by the method of vegetation index ratio. The equivalent water thickness estimation accuracy of the leaf scale and canopy scale of poplar was compared with *GVMI/MSI*, global vegetation moisture index (*GVMI*) and water stress index (*MSI*). [Results] The result shows that the accuracies of the equivalent water thickness estimation model of Poplar (R^2) with *GVMI*, *MSI* and *GVMI/MSI* as variable are respectively 0.997, 0.995 and 0.998 in leaf scale, and 0.837, 0.836 and 0.973 in canopy scale. *GVMI/MSI* is the best index for the equivalent water thickness of poplar leaves. [Conclusion] The equivalent water thickness model

收稿日期: 2015-03-30

基金项目: 林业公益性行业科研专项项目(201204105); 国家“十二·五”科技支撑课题(2011BAD38B06)

作者简介: 程志庆(1986—), 男, 安徽安庆人, 讲师, 主要从事林业高光谱模型方面研究。E-mail: chengzhiqing1@126.com

* 通讯作者: 张劲松(1968—), 男, 浙江永嘉人, 研究员, 主要从事复合农林业、林业气象等方面研究。E-mail: zhangjs@caf.ac.cn

of poplar leaves modeled by *GVTMI/MSI* has higher prediction accuracy. It is the optimal estimation model of equivalent water thickness of poplar leaves.

Keywords: poplar; equivalent water thickness; spectral model; vegetation water index

杨树因其生长迅速、成林早、木材用途广、防护效益高等优势,成为我国农田防护林的主要树种之一。叶片水分影响着植物对氮素的利用与叶片碳交换速率,从而影响碳循环和能量收支^[1]。叶片水分含量被作为植物水分状态的评价指标,同时也是遥感估算植被生产力以及陆面生态模型计算的关键参数^[2-3],因此,准确、快速测定杨树叶片水分含量,对于准确测算农田防护林区域尺度生产力,加强防护林的经营管理,提升防护林的生态功能具有重要意义。传统的叶片水分含量测定方法破坏性大、费时费力;而随着光谱技术的发展,高光谱技术能够对地物微弱光谱差异进行辨别与分析^[4],为遥感精确估算叶片水分含量提供了可行性,也为叶片水分含量快速、无损测定提供一个新的契机^[5-6]。利用高光谱数据特征波段构建植被指数对植被水分进行建模估算是目前最为简单与常用的方法^[7-13]。Hunt等^[14]、Gao等^[15]利用近红外和短波红外2个波段分别获归一化差值水分指数(*NDWI*)和水分胁迫指数(*MSI*),实现了植物叶片水分的反演;Peñuelas等^[16]建立了植被水分指数(*WI*)并成功地对植被水分进行了估算;Ceccato等^[17]利用辐射传输模型构建了全球植被水分指数(*GVTMI*)。Peñuelas等^[16]考虑到水分与绿度之间的关系,将*NDVI*与*WI*联合建立了*WI/NDVI*复比型植被指数;赵祥等^[11]分析*NDWI*与*MCARII*的关系,建立了改进的归一化水分指数(*M-NDWI*)。

以上水分植被指数虽能较好估算植被水分含量,但相关研究表明:不同物种对水分植被指数与其水分含量的关系不同^[18-20],而且不同植被指数对水分变化的敏感度不同。因此,本研究利用实测的杨树理化数据作为辐射传输模型的输入参数,模拟杨树光谱反射信息,分析常用水分植被指数与杨树叶片水分含量的敏感性;尝试分析不同水分指数对水分含量的敏感性关系,选取敏感植被指数比值的方法构建高敏感度与精度的杨树水分植被指数,并选取最佳杨树水分含量的高光谱估算模型,为实现杨树叶片水分含量准确估算提供参考。

1 研究方法

1.1 样品采集

试验地设在河北农业大学科技园,115°24'

31.31'E,38°48'22.31"N,海拔18 m。2014年6—9月采样。试验材料采用盆栽1年生相近形态的速生107杨(107杨树,欧美杨107号)苗,分别做6组处理:极度干旱、不施氮处理,干旱、不施氮处理,正常水分、不施氮处理(即为空白对照);极度干旱、施氮处理,干旱、施氮处理,正常水分、施氮处理。水分处理条件为(最大田间持水量的70%(正常)、55%(干旱)和40%(极度干旱));氮素处理条件为每株施氮量为0.167 g·kg⁻¹。本试验处理是为了获得不同生长状态的杨树,从而获得更加全面的数据。

107杨树片林位于衡水市武邑县,115°52'58.25"E,37°46'59.69"N,树种为速生107杨(107杨树,欧美杨107号),面积为30 000 m²。片林中间设立一座高25 m观测铁塔,分别位于杨树冠层底部,冠层内部和冠层顶部1 m处各修建观测平台。

1.2 实测数据

1.2.1 光谱数据测定 本试验使用美国ASD公司生产的Field Spec Pro光谱仪(光谱波段为:350~2500 nm)进行反射光谱测定,利用仪器自带的植被探头与叶片夹式光谱探测器在野外直接测定杨树叶片光谱。为减少误差,测量前用标准白板进行校正,同时将叶片表层的浮尘用干净干燥的试纸轻拂去。采集每个样本观测记录的6次数据(测定时避开叶脉),取其平均值作为该处的光谱反射率。利用植被探头与叶片夹,采用光谱仪自带光源,保证叶片平整且被探测面积相同,有效的消除了背景反射、叶片表面弯曲造成的光谱波动造成的影响,保证了研究结果的精确性。利用该方法获得了305组叶片尺度光谱数据。

利用树顶上方1 m处的平台进行冠层光谱测定,在天气晴朗无云,无风的2014年10月5日上午10:00—14:00,利用光纤视场角为25°的美国ASD公司生产的Field Spec Pro光谱仪,从平台上垂直朝下测量杨树冠层反射光谱,并用LI-2200测定该视场角范围内的冠层叶面积指数(*LAI*),利用该方法获得23组冠层尺度光谱数据。

1.2.2 水分数据测定 常用含水量表示方法有3种:叶片水分含量(*FMC*)^[19],相对水分含量(*RWC*)^[21]和等效水厚度(*EWT*)^[22]。Ceccato等^[7]

发现,在用遥感数据反演植被水分含量时,由于 *FMC* 受叶片中的干物质影响,用 *EWT* 来表征水分含量优于 *FMC*。因此,本研究使用 *EWT* 表示水分含量^[23]。

叶片水分含量测定采用测定光谱后的杨树叶片,采集光谱测定视场角范围内的杨树顶、中、底层三部位叶片各 20 片,放入自封袋并冷藏。

首先利用 Li-3000 测定鲜叶叶面积并测定质量,然后立刻放入 105℃ 烘箱中杀青 15 min,再在 90℃ 下烘至恒质量。

叶片等效水厚度 (EWT_{leaf}) 计算公式:

$$EWT_{leaf} = \frac{F_w - D_w}{A} \quad (1)$$

叶片尺度干物质含量 (LM) 计算公式:

$$LM = \frac{D_w}{A} \quad (2)$$

冠层水分含量 (EWT_{canopy}) 计算公式:

$$EWT_{canopy} = LAI \times EWT_{leaf} \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)中: EWT_{leaf} 与 EWT_{canopy} 分别表示叶片等效水厚度和冠层等效水厚度(单位:cm), LM 表示单位面积中叶片的质量(单位: $g \cdot cm^{-2}$), F_w 与 D_w 分别为叶片的鲜叶质量与干叶质量(单位:g), A 为叶片叶面积(单位: cm^2), LAI 为叶面积指数。

1.3 植被水分含量估算指数

水分植被指数是估算植被水分含量广泛使用的

方法,本研究选取的现有主要水分植被指数见表 1。

表 1 叶片水分指数

指数名称	计算公式	参考文献号
全球植被水分指数 ($GVMi$)	$GVMi = \frac{(R_{820} + 0.1) - (R_{1600} + 0.02)}{(R_{820} + 0.1) + (R_{1600} + 0.02)}$	[17]
水分胁迫指数 (MSI)	$MSI = \frac{R_{1600}}{R_{820}}$	[14]
归一化差值水分指数 ($NDWI$)	$NDWI = \frac{R_{860} - R_{1240}}{R_{860} + R_{1240}}$	[15]
水分波段指数 (WBI)	$WBI = \frac{R_{950}}{R_{900}}$	[24]
水分指数 (WI)	$WI = \frac{R_{900}}{R_{970}}$	[25]
水分指数/归一化指数 ($WI/NDVI$)	$\frac{WI}{NDVI} = \frac{R_{900}(R_{800} - R_{680})}{R_{970}(R_{800} - R_{680})}$	[16]

1.4 辐射传输模型的参数反演方法

为了获得更精确的杨树叶肉结构参数 (N),通过代价函数求得最优杨树叶肉结构参数 ($cost$):

$$cost = \min \sum_{\lambda=400}^{2500} \{ [R_{mes}(\lambda) - R_{mod}(\lambda)]^2 \} \quad (4)$$

式中: R_{mes} 为实测值; R_{mod} 为模型模拟值。

主要考虑水分植被指数受叶绿素与干物质的影响,叶绿素与干物质的含量范围选取利用实测 305 组杨树叶片数据,同时 N 采用本文中获得的杨树最优叶肉结构参数值, *SAIL* 模型输入的叶片理化参数与 *PROSPECT* 模型相同,具体模型参数根据实测参数设置(表 2)。

表 2 模型输入参数

参数	叶绿素含量/ ($ug \cdot cm^{-2}$)	等效水 厚度/cm	干物质含量/ ($g \cdot cm^{-2}$)	叶肉结 构参数	叶倾角分 布类型	叶面积 指数	热点效 应参数	太阳天 顶角/ $^{\circ}$	观测天 顶角/ $^{\circ}$	相对方 位角/ $^{\circ}$	土壤反 射率
变化范围	20~40	0.0~0.15	0.004~0.014	1.65	球面	0.5~9.0	0.01	30 $^{\circ}$	10 $^{\circ}$	0 $^{\circ}$	实测
变化间隔	5	0.001	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-

2 结果与分析

2.1 杨树最优叶肉结构参数选取

利用 305 个不同杨树生长期以及不同叶片状态的实测叶片干物质含量与高光谱数据代入公式(4),通过迭代计算获得对应的最优 N 值,将最优 N 值排序并做分布图(图 1)。

从图 1 中可以看出:杨树最优 N 值为 1.18~2.02,而且 80% N 值为 1.5~1.8,平均值为 1.65,与 Jacquemoud 等^[26]提出的具有海绵叶肉组织的双子叶植物叶片 N 值(1.5~2.5)相一致;因此,本文把 1.65 作为杨树的最优 N 值。

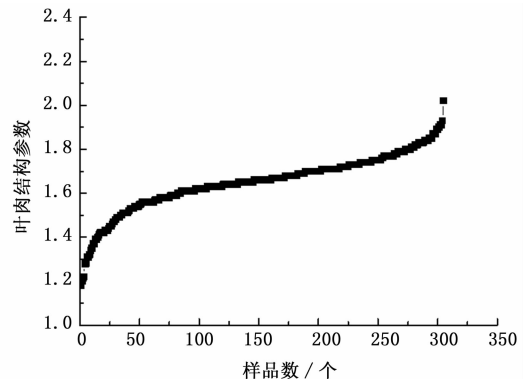


图 1 杨树最优叶肉结构参数

2.2 水分植被指数敏感性分析

2.2.1 叶片水分含量对叶片光谱反射率的影响

PROSPECT模型中,利用的叶绿素含量与干物质含量实测数据的平均值分别为 $34.58 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $0.0097 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$,叶肉结构参数采用 1.65,水分含量分别设为 0.001、0.005、0.010、0.014 cm,模型输出水分影响的高光谱反射曲线见图2。

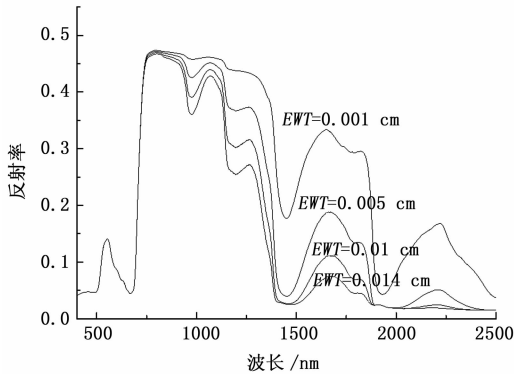


图2 不同水分条件下的杨树叶片光谱反射率曲线

由图2可见:受水分影响较大的波段主要位于近红外与短波红外波段范围内,其中,在 1 600、2 200 nm波段位置光谱反射率受水分的影响最大,反射率随水分含量的增大而减小。Carter 等^[28]研究亦发现,叶片水分强烈的吸收带位于 1 300 ~ 2 500 nm。

2.2.2 水分植被指数的敏感性分析 现有水分植被指数对植被水分含量的敏感性研究时,只考虑水分单一的因素,尽管该方法能够避免其他因素的影响,但植物叶片光谱反射率受多种因素影响,且各因素间的交互影响大,从而弱化单一因素的影响^[12]。因此,本试验中讨论植被水分指数对叶片水分含量的敏感性时,在同一植被水分含量条件下,加入了不同的叶绿素含量以及叶片干物质含量,且采用变异系数作为植被水分指数对不同叶绿素与干物质含量的影响指标。

图3为不同水分植被指数在不同叶绿素、干物质含量条件下对叶片水分含量的敏感性。由方程斜率绝对值的大小作为水分植被指数对水分含量的敏感性评判指标。图3中 $GVMI$ 与 MSI 为指数拟合方程,其他水分植被指数均为线性关系,根据直线方程的斜率求解可知, $GVMI$ 与 MSI 最大斜率分别为 9.589 和 12.307, $WI/NDVI$ 、 $NDVI$ 、 WI 、 WBI 拟合方程的斜率分别为 8.334, 1.815, 1.645, -0.832,其对水分含量敏感性大小分别为 $WI/NDVI > NDVI > WI >$

WBI 。通过图3a、b的拟合方程求解可知,当 $GVMI$ 在含水量低于 0.009 cm 和 MSI 在含水量低于 0.027 cm时,其斜率都大于 8.334,但等效水厚度超过该值时,这2个水分植被指数的敏感性迅速降低。

由图3可知: WI 与 WBI 的变异系数最小,其变异系数随等效水厚度的增加而增加,这说明 WI 与 WBI 受叶片干物质与叶绿素含量的影响较小,但是随着水分的增加干物质与叶绿素含量对这2个水分植被指数的影响增大。 $NDWI$ 在等效水厚度小于 0.02 cm时,随着水分的增加受叶片干物质与叶绿素的影响增大,在 0.02 cm影响趋于稳定。在等效水厚度小于 0.07 cm之前, $GVMI$ 和 MSI 随着等效水厚度的增加而受叶片干物质与叶绿素含量的影响逐渐减小;等效水厚度等于 0.07 cm时影响最小,接近于 0;等效水厚度大于 0.07 cm之后, $GVMI$ 受叶片干物质与叶绿素含量的影响有所增加,但较 WI 、 WBI 小; MSI 受叶片干物质与叶绿素含量的影响较 $GVMI$ 大; MSI 与 WI 、 WBI 受叶片干物质与叶绿素含量的影响相近;与 $NDWI$ 、 $WI/NDVI$ 相比, $GVMI$ 与 MSI 受叶片干物质、叶绿素含量的影响较小。

由以上分析可知:在低等效水厚度时, $GVMI$ 与 MSI 的敏感性都较高,且受叶片干物质与叶绿素含量的影响较小,通过 $GVMI$ 与 MSI 的趋势图以及拟合曲线可见,若将 $GVMI$ 与 MSI 进行比值处理,将能消除 $GVMI$ 与 MSI 的饱和现象。通过 $GVMI$ 与 MSI 的计算公式可知, $GVMI$ 与 MSI 是基于光谱波段为 1 600 nm与 820 nm所构建的水分植被指数,而由 2.2.1节可知,1 600 nm波段受水分影响最大。因此,比值计算是利用 1 600 nm与 820 nm波段重新建立指数,其计算公式为:

$$\frac{GVMI}{MSI} = \frac{R_{820}^2 - R_{1600} \cdot R_{820} + 0.08 \cdot R_{820}}{R_{1600}^2 - R_{1600} \cdot R_{820} + 0.12 \cdot R_{820}} \quad (4)$$

2.3 改进植被指数的敏感性与估算能力分析

2.3.1 改进植被指数的敏感性分析 通过公式(4)计算 $GVMI/MSI$ 数值,并分析与水分含量的敏感性以及干物质与叶绿素含量对 $GVMI/MSI$ 的影响(图4)。

由 $GVMI/MSI$ 与等效水厚度拟合的曲线方程可见, $GVMI/MSI$ 随水分含量的增加其敏感程度也随之增加,且该指数的斜率远大于 2.2.2节中所有的水分植被指数斜率,拟合曲线最小斜率值为 20.752。

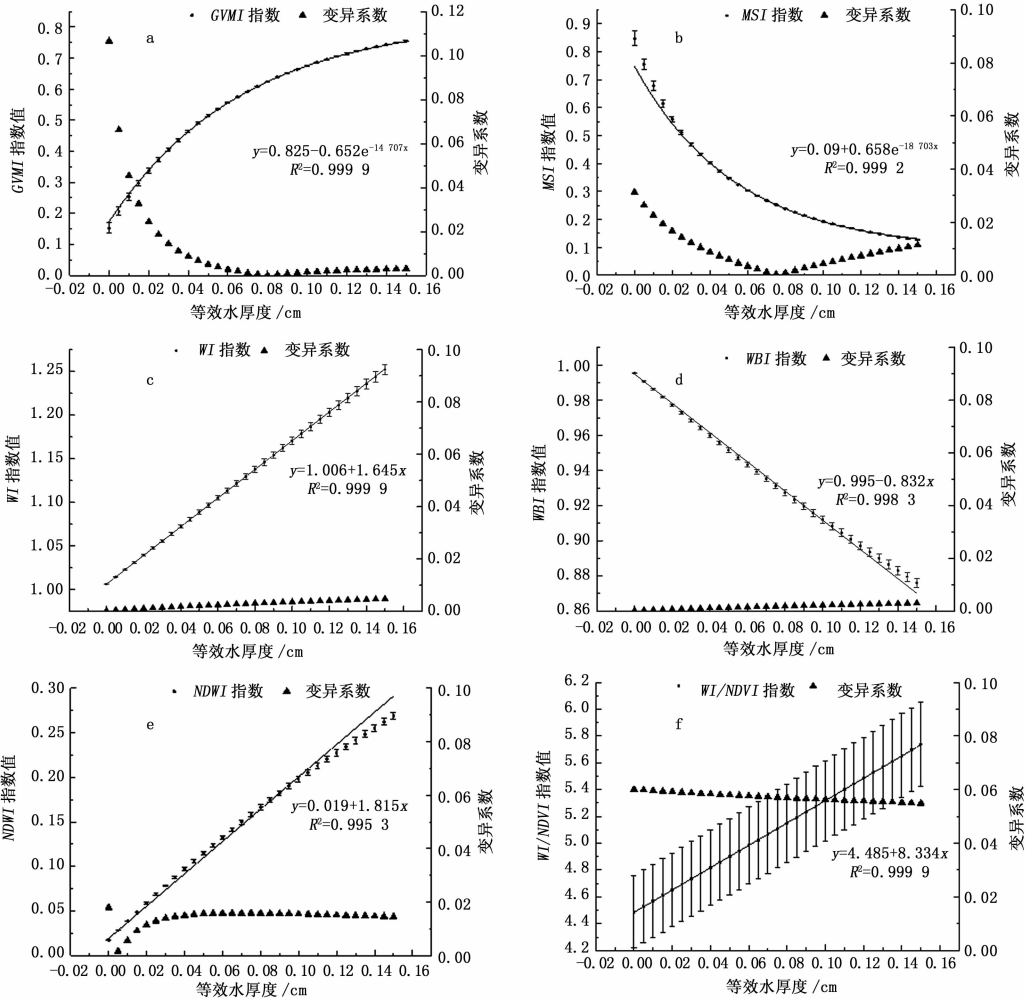


图3 不同水分指数对植被等效水厚度的敏感性

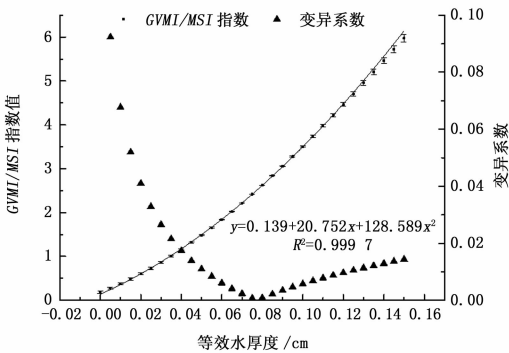


图4 GVMI/MSI对植被等效水厚度的敏感性

可见, *GVMI/MSI* 指数对水分具有更高的敏感性。当等效水厚度小于 0.02 时, *GVMI/MSI* 受叶片干物质含量、叶绿素含量的影响较大, 并超过 *GVMI* 与 *MSI* 受叶片干物质含量与叶绿素含量的影响。可见, *GVMI* 与 *MSI* 进行比值计算后将会放大对叶片干物质含量与叶绿素含量的影响, 但较 *NDWI* 与 *WI/NDVI*,

GVMI/MSI 受叶片干物质含量与叶绿素含量的影响较低。

GVMI/MSI 虽受叶片干物质与叶绿素含量的影响较组成该指数的原来指数的影响大, 但仍小于 *NDWI* 与 *WI/NDVI*, 同时考虑 *GVMI/MSI* 对水分含量敏感性更高, 可以更加灵敏的反应水分的变化。因此, *GVMI/MSI* 水分植被指数对于植被等效水厚度的估算具有很大潜力。

2.3.2 叶片尺度等效水厚度的估算能力分析 & 最佳估算模型构建 利用 PROSPECT 模型, 同时利用实测的杨树叶片叶绿素干物质以及等效水厚度的区间内数据进行拟合, 获取 606 个模拟光谱数据与 284 个实测光谱数据作为建模数据集, 通过拟合构建 *GVMI*、*MSI* 与 *GVMI/MSI* 的等效水厚度估算模型, 估算能力使用拟合度 (R^2) 及均方根误差 (*RMSE*) 进行评判 (图 5)。

图 5 显示: 3 个水分植被指数对等效水厚度的

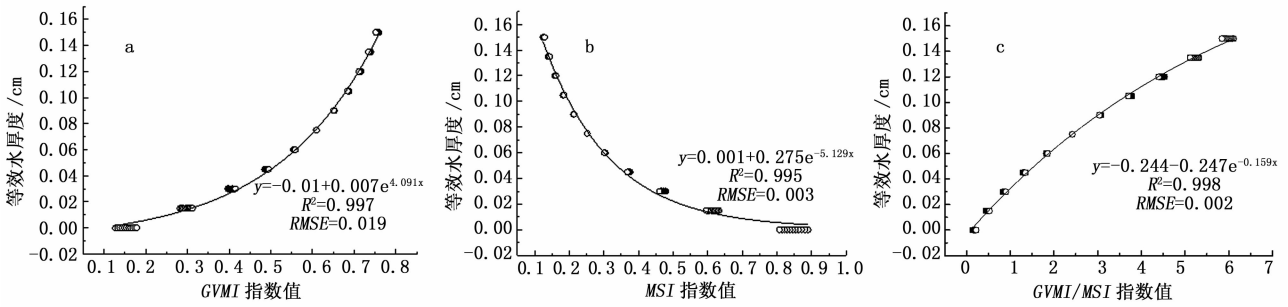


图5 叶片等效水分厚度估算结果

估算值拟合度均已超过 0.99, *GVMI*、*MSI*、*GVMI/MSI* 的拟合度分别为 0.997、0.995、0.998;估算结果的均方根误差分别为 0.019、0.003、0.002。可见, *GVMI/MSI* 对等效水厚度的饱和度变缓,而且估算值拟合度与均方根误差与 *GVMI*、*MSI* 的相比,都优于后二者。由此可见, *GVMI/MSI* 对等效水厚度的估算精度

更高。

根据以上构建的 *GVMI*、*MSI* 以及 *GVMI/MSI* 的等效水厚度估算模型,利用实测另外的 21 组高光谱反射率估算的叶片等效水厚度,并与其对应实测的叶片等效水厚度进行线性拟合分析,实现叶片尺度等效水厚度估算模型预测精度的验证(图 6)。

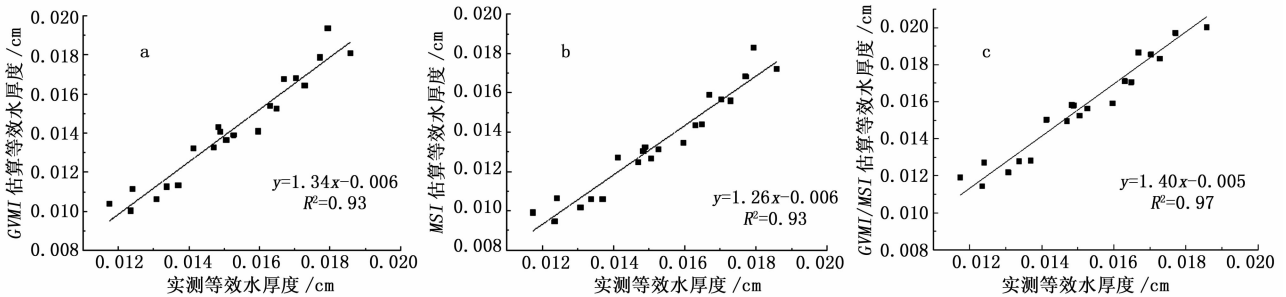


图6 叶片等效水厚度估算值与实测值散点图

从 *GVMI*、*MSI* 以及 *GVMI/MSI* 指数估算的等效水厚度与实测的等效水厚度的线性拟合结果可知:该 3 组植被指数的估算拟合度都超过 0.9,其中, *GVMI/MSI* 指数拟合度最大为 0.97, *GVMI* 与 *MSI* 估算值的拟合度均为 0.93。由此可见,利用 *GVMI* 与 *MSI* 比值所构建的 *GVMI/MSI* 指数对水分具有较高的精度。

2.3.3 冠层尺度等效水厚度的估算能力分析 & 最佳估算模型的构建 为了验证 *GVMI/MSI* 指数对冠层水分的估算精度,本文利用实测杨树叶绿素含量、水分含量以及干物质含量数据的变化范围和叶肉结构参数 1.65 作为 PROSAIL 模型输入参数(表 1),利用输出的 3 300 组冠层光谱反射率,与 12 组实测数据,对 *GVMI*、*MSI*、与 *GVMI/MSI* 进行比较分析。

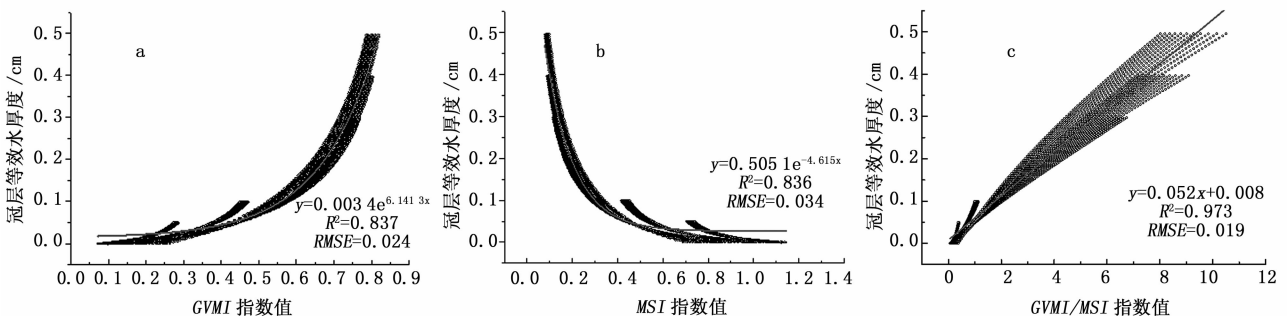


图7 冠层叶片等效水分厚度估算结果

从图7可见:GVMI/MSI指数构建的冠层等效水厚度的估算模型精度最大为0.973,同时均方根误差最小为0.0019,GVMI与MSI在较低等效水厚度下都出现饱和现象。由于冠层等效水厚度与叶面积指数相关,当等效水厚度增加时,GVMI/MSI

对冠层等效水厚度的估算能力受叶面积指数的影响增大。

根据以上指数构建的冠层等效水厚度的估算模型,利用实测的另外11组杨树冠层光谱数据与等效水厚度的数据对模型预测精度进行验证(图8)。

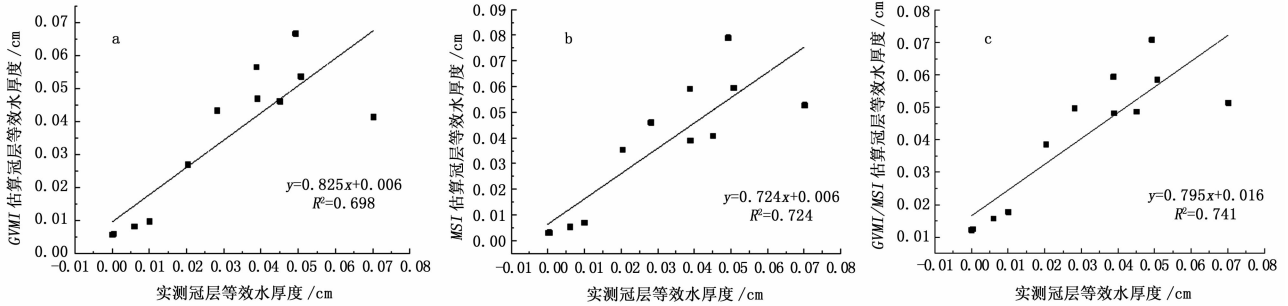


图8 冠层叶片等效水厚度估算值与实测值散点图

从图8中各水分植被指数对冠层等效水厚度的估算值与实测值的线性拟合比较可知,GVMI、MSI与GVMI/MSI的冠层等效水厚度估算值与实测值的拟合度分别为0.698、0.724和0.741,可见,GVMI/MSI估算冠层等效水厚度的精度最高,则由GVMI/MSI构建的冠层等效水厚度估算模型为最佳的杨树叶片等效水厚度。

3 讨论

(1)本研究中通过分析不同植被指数对水分的敏感性,利用比值关系构建了新的植被指数。从图6可见,利用GVMI与MSI比值所构建的GVMI/MSI指数较前两者指数对水分具有较高的精度。单独使用GVMI和MSI指数,在不同的等效水厚度范围内都会产生严重的饱和现象,杜晓等^[29]研究显示:GVMI指数在较低等效水厚度条件下,用以估算等效水厚度的精度很低,陈小平等^[30]研究结果表明,MSI指数在等效水厚度较大时,该指数发生饱和现象,影响了水分含量的估算精度;而分析不同植被指数在不同等效水厚度范围内的饱和情况,利用比值等方法进行构建新的植被指数的方法,能有效提高量程跨度较大的等效水厚度的估算精度。

(2)本试验在研究冠层尺度等效水厚度估算中,通过对叶片尺度获取的植被指数中引入叶面积,能够有效的提高冠层尺度等效水厚度的估算精度。程晓娟等^[31]利用植被指数对冠层尺度等效水厚度进行估算,由于直接利用冠层等效水厚度选取的植被指数,同时没有从等效水厚度自身考虑从而影响

了模型的准确性。

4 结论

利用实测杨树叶片光谱数据,通过代价函数获得了杨树最优叶肉结构参数1.65。通过对常用水分植被指数的敏感性分析以及受叶片干物质与叶绿素含量的影响分析,提出利用GMVI与MSI进行比值计算,获取新的水分植被指数GMVI/MSI,并在叶片尺度与冠层尺度分别对GMVI/MSI指数估算等效水厚度精度进行分析,获得了杨树的2种尺度的叶片水分最佳估算模型。在杨树叶片等效水厚度的估算中,由GMVI与MSI比值计算获得的GMVI/MSI指数,估算杨树等效水厚度的精度较高,尤其在冠层尺度上该水分指数比其他指数的精度更高。因此,GMVI/MSI指数对植物等效水厚度的估算潜力很大,该指数构建的等效水厚度估算模型为杨树等效水厚度的最佳模型。

参考文献:

- [1] Nautiyal P C, Rachaputi N R, Joshi Y C. Moisture-deficit-induced changes in leaf-water content, leaf carbon exchange rate and biomass production in groundnut cultivars differing in specific leaf area[J]. Field Crops Research, 2002, 74(1): 67-79.
- [2] 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 of Environment, 2008, 112(4): 1820-1834.
- [3] 毛罕平,高洪燕,张晓东.生菜叶片含水率光谱特征模型研究[J].农业机械学报,2011,42(5):166-170.
- [4] Hunt G R. Electromagnetic radiation: the communication link in re-

- remote sensing[M]//Siegal B S, Gillespie A R. Remote Sensing in Geology, New yourk:wiley, 1980: 702.
- [5] 梁亮,张连蓬,林卉. 基于导数光谱的小麦冠层叶片含水量反演[J]. 中国农业科学, 2013, 46(1): 18-29.
- [6] Kim Y, Glenn D M, Park J, *et al.* Hyperspectral image analysis for water stress detection of apple trees[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 77(2): 155-160.
- [7] Ceccato P, Flasse S, Tarantola S, *et al.* Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 77(1): 22-33.
- [8] Chuvieco E, Riano D, Aguado I, *et al.* Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of landsat thematic mapper reflectance data: applications in fire danger assessment[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(11): 2145-2162.
- [9] Danson F M, Bowyer P. Estimating live fuel moisture content from remotely sensed reflectance [J]. Remote Sensing Environment, 2004, 92: 309-321.
- [10] Ceccato P, Flasse S, Gregoire J. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: part 2. validation and applications [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82(2): 198-207.
- [11] 赵祥,王锦地,刘素红. 耦合辐射传输模型的植被含水量遥感改进监测[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(3): 185-189.
- [12] 刘小军,田永超,姚霞,等. 基于高光谱的水稻叶片含水量监测研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(3): 435-442.
- [13] 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, 30(1): 167-171.
- [14] Hunt E R, Rock B N. Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances[J]. Remote sensing of environment, 1989, 30(1): 43-54.
- [15] Gao B. NDWI-a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. Remote sensing of environment, 1996, 58(3): 257-266.
- [16] Peñuelas J, Pinol J, Ogaya R, *et al.* Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970) [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(13): 2869-2875.
- [17] Ceccato P, Gobron N, Flasse S, *et al.* Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: part 1: theoretical approach [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82(2): 188-197.
- [18] Jackson T J, Chen D, Cosh M, *et al.* Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(4): 475-482.
- [19] Chen D, Huang J, 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 of Environment, 2005, 98(2): 225-236.
- [20] 吴见,陈泰生,潘立新. 不同含水量条件下树种叶片光谱差异分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 30(7): 1961-1966.
- [21] Viegas D X, Viegas T P, Ferreira A D. Moisture content of fine forest fuels and fire occurrence in central Portugal [J]. The International Journal of Wildland Fire, 1992, 2: 69-85.
- [22] Inoue Y, Morinaga S, Shibayama M. Nondestructive estimation of water status of intact crop leaves based on spectral reflectance measurements [J]. Japan Journal of Crop Science, 1993, 62(3): 462-469.
- [23] Danson F M, Steven M D, Malthus T J, *et al.* High spectral resolution data for determining leaf water content [J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(3): 461-470.
- [24] 王洁,徐瑞松,马跃良,等. 植被含水量的遥感反演方法及研究进展[J]. 遥感信息, 2008(1): 100-105.
- [25] Peñuelas J, Filella I, Biel C, *et al.* The Reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(10): 1887-1905.
- [26] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra [J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34(2): 75-91.
- [27] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model [J]. Remote sensing of environment, 1984, 16(2): 125-141.
- [28] Carter G A. Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves [J]. American Journal of Botany, 1991: 916-924.
- [29] 杜晓. 植被叶面水遥感监测及其时空特征分析[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006.
- [30] 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.
- [31] 程晓娟,杨贵军,徐新刚,等. 新植被水分指数的冬小麦冠层水分遥感估算[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(12): 3391-3396.

(责任编辑:詹春梅)