

基于辐射传输模型的叶片含水量定量反演研究

曾凡超¹ 赵静² 王英修¹ 姚付启¹

(1. 鲁东大学 水利工程学院, 山东 烟台 264039; 2. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430012)

摘要: 为了快速、准确地估测出植物的叶片含水量,为研究植物生长发育状况提供数据支持,本研究通过叶片内部辐射传输机制的 PROSPECT 模型模拟出大量不同生化含量和叶肉结构的叶片光谱反射率,深入探讨有效反演叶片含水量的植被水分指数,并对各指数的稳定性和抗干扰能力进行评估。结果显示,各植被水分指数对叶片含水量的敏感性差异不大,除水应力指数(moisture stress index, MSI)和归一化多波段干旱指数(normalized multi-band drought index, NMDI)两种指数外,其他指数值均随叶片含水量的增加而增加。叶绿素含量的差异对各植被水分指数的影响较小,干物质次之,叶肉结构影响最大。在抵抗干物质影响和叶肉结构影响方面,水分指数(water index, WI)相比其他 11 种指数来说具有较大优势,简单水比指数(simple ratio water index, SRWI)次之。通过使用叶片光学模型的模拟光谱来研究叶片含水量变化的光谱响应及其影响因素,具有较强的理论性和普适性,是研究植物生长发育状况的一种重要手段。

关键词: 辐射传输模型; 叶片含水量; 高光谱; 植被水分指数; 反演

中图分类号: S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-8020(2023)03-0251-07

水分对植物的生长发育至关重要,对植物的呼吸速率、光合速率、生物量等一系列生理变化和结构变化都有重要影响,是研究植被生长的重要指标^[1]。水作为植物生长发育的必要条件,影响着植物的生长及产量,因此,及时准确地监测植物的水分状况在植被研究中显得尤为重要^[2]。传统的对植被水分的估算大都通过野外实测的手段,但实测获取的数据仅仅反映了采样点周边的小范围情况,并且只能反映当时较短时间范围内的状况,具有一定的局限性,而且采样需要布控大量采样点,时间和经济成本较高。

遥感可以很好地满足植被水分监测的空间广泛性和时间连续性特点,可以快速、无损、精确地得出所需要的数据^[3]。高光谱遥感能够快速无损地捕获地表植被的微弱光谱信息,通过光谱信息,能够精准地得出所需要的植被叶片含水量的数据,是一种反演植被叶片含水量的新技术^[4]。目前,在研究植被生化组分的植被含水量时,有 3 类反演植被含水量的方法,即统计算法、物理模型和多种算法集合的方法。基于物理模型的方法相

当于传统的经验/半经验方法,物理意义明确,具有更高的稳定性和普适性,其中应用最广泛、模型最简单、最实用的是 PROSPECT 模型。

植被指数是一种可以将不同波段的反射率经过线性或者非线性分析,提取独特的光谱信号,来反映某种特定信息的指数^[5]。通过结合光谱特性,植被指数可以提供更加准确的结果,这使得它相较于传统的统计回归方法,拥有更高的稳定性和鲁棒性。传统的多光谱监测中,宽波段植被指数应用较多,但由于各个传感器的监测原理不同,导致各个传感器得到的植被指数之间缺少可比性,从而限制了我们对植被指数的应用。随着高光谱技术的发展,纳米级窄波段植被指数的应用越来越广泛^[6],进而出现了许多有关植物生化参量的植被指数。但是对于各个植被指数来说,其对某种特定生化参量的敏感程度以及对于其它因素的抗干扰能力有很大不同,如一种植被指数可能对某种特定的生化参量敏感度很高,对其它生化参量的敏感度很差,且抵抗其他因素干扰的能力很强,该植被指数就适合该生化参量的反演;但有

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-04-20

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2020ME254, ZR2020QD061)

通信作者简介: 姚付启(1982—),男,教授,硕士研究生导师,博士,研究方向为农业节水及水资源高效利用研究。E-mail: fuqiyao163@163.com

的植被指数可能对某种生化参量敏感度很高,但是其抵抗其它因素干扰的能力较差,它就不适合该生化参量的反演。因此,选取一个对某种特定的生化参量敏感性较高且抵抗其它因素干扰能力较强的植被指数对于定量反演植物的某种特定生化含量有着重要意义。

国内外学者对不同生化含量的植被指数进行了分析比较,Andrés等^[7]通过分析8种植被指数与叶面积指数之间的关系,得出陆地叶绿素指数(meris terrestrial chlorophyll index, MTCI)与叶面积指数(leaf area index, LAI)有着良好的线性关系,并且其对土壤背景的敏感性较弱,适合用来反演LAI; Ghada等^[8]选取了5个叶绿素相关的高光谱植被指数,通过分析比较,发现归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是与叶绿素最相关的指标;施润和等^[9]通过PROSPECT模型对5种常用的叶绿素高光谱指数进行分析比较,得出结构无关色素指数(structure insensitive pigment index, SIPI)在对叶绿素含量的敏感性以及抵抗其它因素干扰能力方面更胜一筹;赵虎等^[10]利用HJ-1-A/B CCD2数据反演冬小麦叶面积指数,通过分析比较5种冬小麦LAI反演植被指数,发现比值植被指数(ratio vegetation index, RVI)不适宜作为反演LAI的指标,而土壤调节植被指数(soil-adjusted vegetation index, SAVI)、增强植被指数(enhanced vegetation index, EVI)和双波段增强植被指数(2-bands enhanced vegetation index, EVI2)则在不同的估算模型下有不同的优势,应根据模型选取相应的植被指数;郑踊谦等^[11]为寻找一种可靠的反演LAI的植被指数,选取了6个常用的植被指数在其饱和性和拟合精度方面进行分析比较,得出三角植被指数(triangle vegetation index, TVI)、改进的土壤可调节植被指数(modified soil-adjusted vegetation index, MSAVI)和改进的叶绿素吸收指数(modified chlorophyll absorption ratio index, MCARI2)3个植被指数对反演LAI有着较大优势;方圣辉等^[12]基于HyperScan成像光谱数据对植被叶绿素进行反演,对选取的8种植被指数进行分析比较,发现2波段植被指数的反演精度明显高于3波段植被指数。大多数研究都是针对有关叶绿素浓度以及叶面积指数的植被指数进行分析,而对于叶片含水量来说,应该也存在一种或几种植被水分指数适合对其反演,但目前针对这方面

面的研究较少。

因此,本研究在结合前人经验的基础上,整合了具有一定技术突破的12种典型指数,基于PROSPECT模型,模拟出不同生化含量以及不同叶肉结构下的叶片反射率,利用植被水分指数对叶片含水量进行反演尝试,分析各个指数对叶片含水量的敏感性以及其抵抗其它因素的干扰能力,为研究植被叶片含水量提供依据,进一步推动遥感监测植物水分含量的发展。

1 研究方法

1.1 PROSPECT模型

PROSPECT模型可以计算出叶片内部在400~2500 nm波段的半球反射率和透过率,模拟出叶片光谱,在遥感研究中被广泛应用,是一种基于辐射传输机制的叶片光学模型。这一模型可以应用于各种阔叶植物,并且具有良好的准确性和可靠性^[13-14]。PROSPECT模型是从PLATE模型演变过来的。PLATE模型是把叶片看作一个密实的结构,而PROSPECT模型是把叶片看作 n 层表面粗糙的平板和 $n-1$ 层空气隔层结合在一起的非密实结构^[15]。它模拟了叶片光谱400~2500 nm范围内上行下行辐射通量,从而得到叶片的反射率 ρ_1 和透过率 τ_1 。该研究使用PROSPECT模型,其表达式^[16]为:

$$(\rho_1, \tau_1) = f(N, C_{ab}, C_w, C_m), \quad (1)$$

式中: N 表示叶肉结构参数; C_{ab} 表示叶绿素含量; C_w 表示叶片含水量; C_m 表示叶片干物质含量。

众多学者认为,PROSPECT模型是目前最好的叶片光学模型之一。可以给定叶片含水量、叶绿素含量、干物质含量和叶肉结构参数的具体数值或取值范围,输入到模型中,模拟出叶片的光谱特征,也可以通过光谱特征来反演叶片的生化含量。本文使用PROSPECT模型来模拟实验数据,并通过这些模拟数据来研究不同植被水分指数对叶片含水量的响应程度。此外,本文还将利用这个模型来探究其他因素如何影响植被水分指数,并提出相应的解决方案,通过科学方法来评估可用来反演叶片含水量的植被水分指数。

1.2 植被水分指数选择及应用

利用植被水分指数研究植被叶片含水量的理

论基础为: 植被中液态水的含量影响着绿色植被在 900 ~ 2500 nm 范围内的叶片反射率^[17]。植被水分指数通常由参考波段和测量波段以比值或者归一化的形式组成。参考波段一般选择对植被含水量敏感度较小的区域, 如 820、860 和 900 nm; 测量波段相比较参考波段来说应该对植被含水量的敏

感度较高, 一般选择在这两个光谱范围内: 900 ~ 1300 nm 和 1500 ~ 2500 nm; 前者的吸收峰主要是 970、1200 和 1240 nm; 后者主要的吸收峰为 1450、1640、1940 和 2130 nm^[18]。通过分析植被水分指数的形成机理以及组成形式, 该研究选择有一定技术突破的典型指数, 参与后续分析, 计算公式见表 1。

表 1 植被水分指数计算公式

Tab. 1 Calculation formula for vegetation moisture index

类型	指数	计算公式	引文
比值型	水应力指数 (MSI)	$I_{MSI} = R_{1600} / R_{820}$	[19]
	水分指数 (WI)	$I_{WI} = R_{900} / R_{970}$	[20]
归一化型	简单水比指数 (SRWI)	$I_{SRWI} = R_{860} / R_{1240}$	[21]
归一化型	归一化差值近红外指数 (normalized different infrared index, NDII)	$I_{NDII} = (R_{820} / R_{1600}) / (R_{820} + R_{1600})$	[22]
	归一化植被指数 1200 (normalized different water index 1200, NDWI ₁₂₀₀)	$I_{NDWI1200} = (R_{860} - R_{1200}) / (R_{860} + R_{1200})$	[23]
	归一化植被指数 1240 (NDWI ₁₂₄₀)	$I_{NDWI1240} = (R_{860} - R_{1240}) / (R_{860} + R_{1240})$	[24]
	归一化植被指数 1450 (NDWI ₁₄₅₀)	$I_{NDWI1450} = (R_{860} - R_{1450}) / (R_{860} + R_{1450})$	[23]
	归一化植被指数 1640 (NDWI ₁₆₄₀)	$I_{NDWI1640} = (R_{860} - R_{1640}) / (R_{860} + R_{1640})$	[25]
	归一化植被指数 1940 (NDWI ₁₉₄₀)	$I_{NDWI1940} = (R_{860} - R_{1940}) / (R_{860} + R_{1940})$	[23]
	归一化植被指数 2130 (NDWI ₂₁₃₀)	$I_{NDWI2130} = (R_{860} - R_{2130}) / (R_{860} + R_{2130})$	[25]
	归一化多波段干旱指数 (normalized multi-band drought index, NMDI)	$I_{NMDI} = \frac{R_{860} - (R_{1640} - R_{2130})}{R_{860} + (R_{1640} - R_{2130})}$	[24]
	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]

注: I_{MSI} 表示水应力指数; I_{WI} 表示水分指数; I_{SRWI} 表示简单水比指数; I_{NDII} 表示归一化差值近红外指数; I_{NDWI} 表示归一化植被指数, 不同下标表示该植被指数采用不同波段的反射率; I_{NMDI} 表示归一化多波段干旱指数; I_{GVMi} 表示全球植被水分指数。

通过设置不同的生化含量和叶肉结构参数作为输入参数集, 利用 PROSPECT 模型模拟出叶片 400 ~ 2500 nm 的光谱反射率, 从而计算出表 1 中的 12 种植被水分指数。首先, 我们保持叶绿素含量、干物质含量和叶肉结构参数不变, 仅改变叶片含水量, 考察上述指数对叶片含水量变化的响应, 并评估它们的灵敏度。然后, 保持叶片含水量不变, 通过依次调整叶绿素含量、干物质含量和叶肉结构参数, 观察上述植被水分指数的变化程度, 通过定义敏感性指数 SI (见公式 2), 计算植被水分指数对其他因素的敏感性指数, 从而反映出植被水分指数抵抗其他因素干扰的能力, 检验其是否受这些因素的影响, 并评估它们的影响程度。

敏感性指数 (SI)^[9] 为:

$$I_{SI} = \frac{|I_{VI}|_{\max} - |I_{VI}|_{\min}}{|I_{VI}|_{\min}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 I_{VI} 表示各种植被水分指数。

2 敏感性及抗干扰能力分析

2.1 对不同叶片含水量的敏感性分析

将 PROSPECT 模型中的 3 个参数叶肉结构

参数 (N)、叶绿素含量 (C_{ab})、干物质含量 (C_m) 分别取固定值: 1.2、30 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、0.009 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 叶片含水量 (C_w) 分别取 0.001 ~ 0.008 cm (步长为 0.0001 cm)。输入模型中, 模拟出 71 条叶片光谱曲线, 将模拟出的光谱波段所对应的数值带入表 1 中的表达式中计算各植被水分指数。由于各指数的波段取值范围不同, 因此得出的结果也就差别很大, 为了便于比较, 对各个指数值在 0 到 1 区间内进行归一化处理 (图 1)。

如图 1 所示, 12 个指数中所有指数都对叶片含水量变化的响应呈单调特征, 其中 MSI 和 NMDI 两种指数与叶片含水量呈负相关: MSI 指数中所应用的两种波段 820 nm 波段对叶片含水量响应较小, 而 1600 nm 波段对叶片含水量响应较大, 并且 820 nm 波段 (受叶绿素影响) 相对于 1620 nm 波段反射率较高, 因此随着叶片含水量在区间内变化而导致该植被水分指数呈负相关趋势; NMDI 指数中应用的 3 种波段 860 nm 波段对叶片含水量的响应较小, 而 1640 nm 波段和 2130 nm 波段属于该研究主要测量的第二波普区间, 对叶片含水量的响应较大, 其中 2130 nm 波段属于主要

的水分吸收峰,因此根据公式,随着叶片含水量在区间内的变化而该植被水分指数呈负相关趋势,NMDI 对叶片含水量的变化敏感度较差,不太适合作为反演叶片含水量的指标;MSI 对叶片含水量的变化敏感度较好,可以作为反演叶片含水量的指标。相反其它 10 种植被水分指数与叶片含

水量的变化呈正相关,其中 $NDWI_{1940}$ 对叶片含水量的变化敏感度较差,不太适合作为反演指标。其他 9 种植被水分指数对叶片含水量变化相对较敏感,均可作为反演叶片含水量的指标;其中 WI 对叶片含水量变化最敏感,具有良好的线性关系,最适合作为反演叶片含水量的指标。

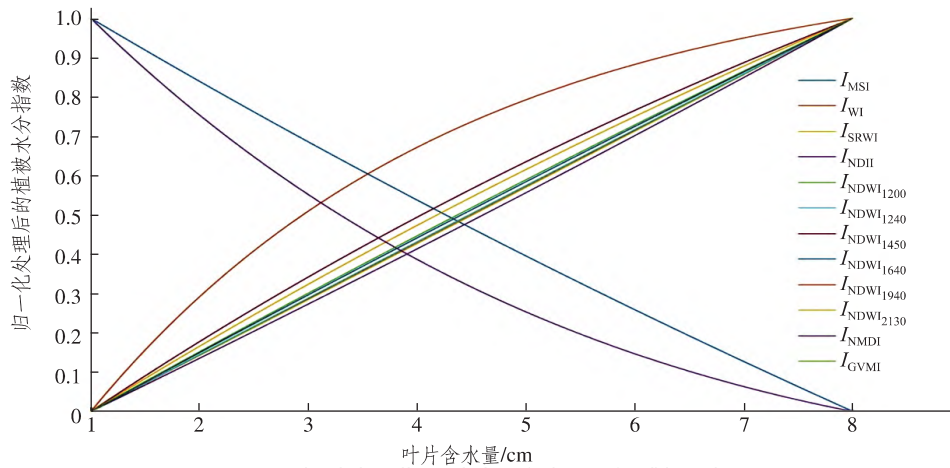


图 1 植被水分指数对叶片含水量的敏感性分析

Fig. 1 Sensitivity analysis of vegetation moisture index to leaf moisture content

2.2 抵抗叶绿素和干物质影响的能力

叶绿素 a 和叶绿素 b 的光谱吸收主要出现在 380 ~ 450 nm、675 nm 以及 410 ~ 470 nm 和 610 nm,这是由于它们独特的生物学结构所决定的。这些吸收峰的出现,能够更好地反映出它们的物理性质。而本文研究的 12 种植被水分指数的光谱反射率都

位于 800 ~ 2500 nm 的区域。PROSPECT 模拟数据还表明,叶绿素含量的差异对这 12 种指数几乎没有影响。图 2 是当叶肉结构参数 (N) 取 1.2、叶绿素含量 (C_{ab}) 取 $30 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、含水量 (C_w) 取 0.004 cm 时,干物质含量 (C_m) 从 $0.005 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 变化到 $0.025 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (以 $0.005 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 为步长) 时的模拟反射光谱。

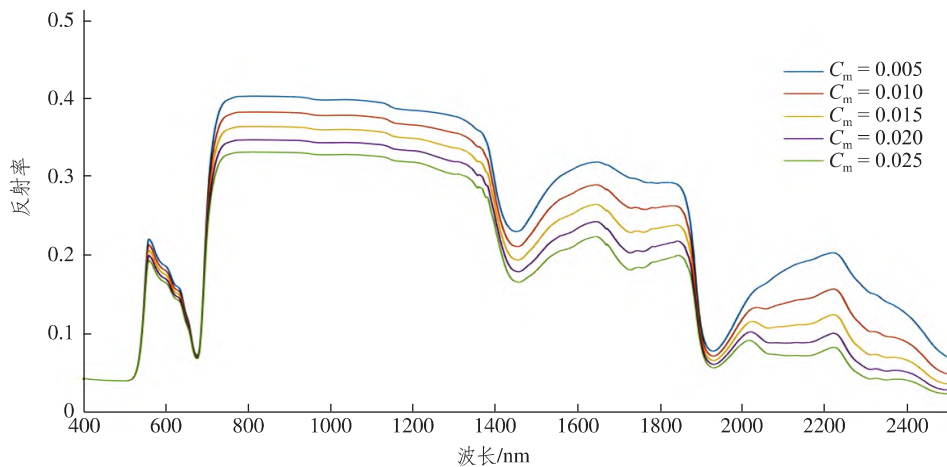


图 2 不同干物质含量下的叶片反射率模拟光谱

Fig. 2 Simulated spectra of leaf reflectance under different dry matter contents

表 2 显示了在不同干物质含量下,各植被水分指数值及其对干物质含量的敏感性指数值,我

们可以明显的发现,各植被水分指数对干物质的敏感性相差很大,水分指数(WI)对干物质的敏感

性指数仅为 0.07% ,敏感性非常弱 ,但对于归一化植被指数($NDWI_{2130}$) 来说 ,敏感性指数却达到了 39.15% ,敏感性较强。对于不同的植被水分指数来讲 ,对干物质含量的敏感性不同 ,甚至相差非常大 ,这对我们选取植被水分指数来反演叶片

含水量带来很大影响。因此 ,从抵抗干物质含量干扰的角度来讲 ,水分指数(WI) 更胜一筹 ,其敏感性最弱 ,抵抗干物质干扰的能力最强;而归一化植被指数($NDWI_{2130}$) 对干物质的敏感性较强 ,抵抗干物质干扰的能力较弱。

表 2 不同干物质含量下的植被水分指数

Tab. 2 Vegetation water index under different dry matter content

C_m	I_{MSI}	I_{WI}	I_{SRWI}	I_{NDII}	$I_{NDWI_{1200}}$	$I_{NDWI_{1240}}$	$I_{NDWI_{1450}}$	$I_{NDWI_{1640}}$	$I_{NDWI_{1940}}$	$I_{NDWI_{2130}}$	I_{NMDI}	I_{GVMI}
0.005	0.777 3	1.010 0	1.051 7	1.798 5	0.022 7	0.025 2	0.271 8	0.116 5	0.665 1	0.361 4	0.512 7	0.203 1
0.007	0.761 6	1.009 8	1.052 2	1.891 2	0.022 3	0.025 4	0.278 3	0.125 4	0.669 2	0.401 7	0.481 2	0.213 7
0.009	0.746 6	1.009 7	1.052 7	1.985 9	0.021 9	0.025 7	0.284 8	0.134 0	0.673 2	0.438 4	0.456 4	0.223 9
0.011	0.732 4	1.009 5	1.053 1	2.082 6	0.021 5	0.025 9	0.291 0	0.142 3	0.677 1	0.472 1	0.436 6	0.233 7
0.013	0.718 8	1.009 3	1.053 6	2.181 6	0.021 2	0.026 1	0.297 1	0.150 4	0.680 8	0.502 9	0.420 7	0.243 3
SI/%	8.13	0.07	0.18	21.30	7.07	3.57	9.30	29.09	2.36	39.15	21.86	19.79

2.3 抵抗叶肉结构影响的能力

PROSPECT 模型中 ,叶肉结构参数(N) 尤为特殊 ,它无法像其它参数一样 ,能够通过正常的测量方法获得 ,但它对叶片反射光谱的影响却极其显著 ,能够影响到可见光和近红外区域 ,从而改变叶片的光学特性 ,进而影响叶片的光学性质(图 3)。按照 3.2 同样的方法 ,确定叶绿素含量、含水量和干物质含量 3 个参数分别为 $30 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 0.004 cm 和 $0.009 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$,确定叶肉结构参数的取值范围为 $1.0 \sim 3.0$ (以 0.5 为步长) ,用 PROSPECT 模型模拟出叶片反射光谱 ,计算各植被水分指数 ,最后

分析敏感性指数 SI 。由不同叶肉结构参数下的植被水分指数(表 3) 可以看出 ,植被水分指数对叶肉结构参数的敏感性较强 , $NDII$ 在同样的叶片含水量条件下 ,当叶肉结构参数从 1.0 变化到 3.0 时 , $NDII$ 的值竟然变化了 2 倍之多 ,由此看来 ,在叶肉结构参数无法确定的情况下 ,使用指数 $NDII$ 反演叶片含水量具有较大风险。然而根据数据显示 , WI 对叶肉结构参数的敏感性较差 ,当叶肉结构参数从 1.0 变化到 3.0 时 , WI 仅仅变化了 0.003 7 ,几乎可以忽略不计。因此得知水分指数 WI 抵抗叶肉结构影响的能力很强 ,几乎不受叶肉结构参数变化的影响。

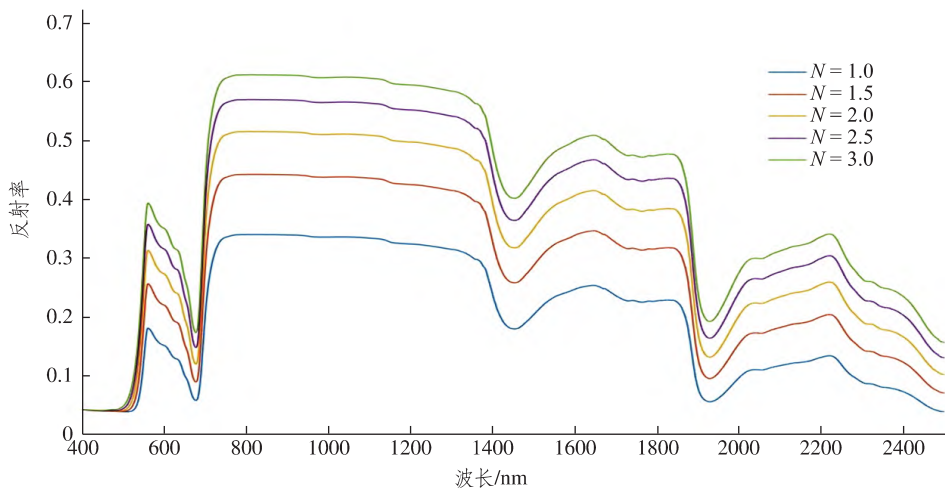


图 3 不同叶肉结构下的叶片反射率模拟光谱

Fig. 3 Simulated spectra of leaf reflectance under different mesophyll structures

表3 不同叶肉结构参数下的植被水分指数

Tab. 3 Vegetation water index under different mesophyll structure parameters

<i>N</i>	<i>I_{MSI}</i>	<i>I_{WI}</i>	<i>I_{SRWI}</i>	<i>I_{NDH}</i>	<i>I_{NDWI₁₂₀₀}</i>	<i>I_{NDWI₁₂₄₀}</i>	<i>I_{NDWI₁₄₅₀}</i>	<i>I_{NDWI₁₆₄₀}</i>	<i>I_{NDWI₁₉₄₀}</i>	<i>I_{NDWI₂₁₃₀}</i>	<i>I_{NMDI}</i>	<i>I_{GVMi}</i>
1.0	0.728 0	1.010 5	1.033 7	2.333 2	0.023 8	0.028 0	0.306 6	0.145 5	0.705 1	0.471 0	0.442 6	0.243 6
1.5	0.766 8	1.008 8	1.036 9	1.666 7	0.019 7	0.023 1	0.261 6	0.121 6	0.633 0	0.402 6	0.473 6	0.203 1
2.0	0.789 6	1.007 9	1.041 1	1.372 8	0.017 2	0.020 1	0.236 1	0.108 0	0.581 2	0.361 9	0.496 3	0.180 7
2.5	0.805 2	1.007 2	1.047 3	1.207 3	0.015 4	0.018 1	0.219 0	0.098 8	0.542 0	0.333 9	0.514 2	0.166 3
3.0	0.818 6	1.006 8	1.057 5	1.101 1	0.014 1	0.016 6	0.206 3	0.092 0	0.511 0	0.312 8	0.529 0	0.155 9
SI/%	12.44	0.36	2.30	111.89	68.79	1.14	48.61	58.15	37.98	50.57	19.52	56.25

3 结论

本研究利用光学辐射传输模型 PROSPECT 模型,通过植被水分指数与含水量的响应关系,反演叶片含水量,选取敏感性高、抵抗其他因素能力强的植被水分指数。一个好的植被水分指数必须兼顾两个方面:一是能够准确反映叶片含水量,二是能够有效抑制其他因子变化带来的影响。通过对 PROSPECT 模型模拟出的叶片光谱进行综合分析,比较各个指数对叶片含水量的敏感性以及抵抗其他因素干扰的能力,结果显示:水分指数 WI 与叶片含水量之间存在良好的线性关系,对叶片含水量的敏感性较高,简单水比指数 SRWI 次之;水分指数 WI 对干物质含量和叶肉结构的敏感性指数仅为 0.07% 和 0.36%,简单水比指数 SRWI 对两者的敏感性指数为 0.18% 和 2.3%。相对于其他 10 种植被指数来说,抵抗其他因素干扰能力较强,几乎不受其他因素干扰。因此得出,水分指数 WI 可以很好的用来反演叶片含水量,简单水比指数 SRWI 次之。

本研究依靠辐射传输模型模拟光谱数据,全面分析了各植被水分指数的敏感性及抗干扰能力,相比于传统的监测方法,其物理意义更加明确。通过模拟出绝大多数条件下的数据,避免了以往通常以某次实验数据为基础,选取最佳植被水分指数所存在的偶然性,具有更高的稳定性和普适性。该方法成本低,耗时短,可以高效的模拟出用于实验分析的大量数据,是一种发展前景非常广阔的方法。

本研究仍存在一些不足:实验数据仅仅采用了模型模拟的光谱数据,尽管 PROSPECT 模型模拟精度较高,但依然有无法模拟的情况。在以后的研究中应将模拟数据和实验数据相结合,以提高研究的精确性。

参考文献:

- [1] 李锐,常庆瑞,陈倩,等. 基于连续小波变换耦合 CARS 算法的冬小麦冠层叶片含水量估算[J/OL]. 麦类作物学报, 2023(2): 1-8 [2023-03-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1359.S.20221117.1122.032.html>.
- [2] 刘宪锋,傅伯杰. 干旱对作物产量影响研究进展与展望[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2632-2646.
- [3] 孔婕,李纯斌,吴静. 草地土壤水分遥感反演方法的适用性[J]. 草业科学, 2020, 37(12): 2463-2474.
- [4] 林毅,李倩,王宏博,等. 高光谱反演植被水分含量研究综述[J]. 中国农学通报, 2015, 31(3): 167-172.
- [5] BANNARI A, MORIN D, BONN F, et al. A review of vegetation indices[J]. Remote Sensing Reviews, 1995, 13(1/2): 95-120.
- [6] 张淳民,穆廷魁,颜廷昱,等. 高光谱遥感技术与展望[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3): 104-114.
- [7] ANDRES V, ANATOLY A G, ANTHONY L N, et al. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12): 3468-3478.
- [8] GHADA K, SAYED A, MOHAMED A, et al. Selection of optimal hyperspectral vegetation indices for estimating chlorophyll content of some plant species[J]. European Chemical Bulletin, 2017, 6(11): 531-535.
- [9] 施润和,庄大方,牛铮,等. 基于辐射传输模型的叶绿素含量定量反演[J]. 生态学杂志, 2006(5): 591-595.
- [10] 赵虎,裴志远,马尚杰,等. 利用 HJ-1-A/BCCD2 数据反演冬小麦叶面积指数[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 172-176.
- [11] 郑踊谦,董恒,张城芳,等. 植被指数与作物叶面积指数的相关关系研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(10): 1-6.
- [12] 方圣辉,乐源,杨光. 基于 HyperScan 成像光谱数据的植被叶绿素反演[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(4): 40-47.
- [13] JACQUEMIUD S, BARET F. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra[J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34(2): 75-91.
- [14] JACQUEMOUD S, JUSTIN S L, VERDEBOUT J, et al.

- Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model [J]. *Remote Sensing of Environment* ,1996 ,56(3) : 194-202.
- [15] GAUSMAN H W. Reflectance of leaf components [J]. *Remote Sensing of Environment* ,1977 ,6(1) : 1-9.
- [16] 谷成燕 杜华强 周国模 等. 基于 PROSAIL 辐射传输模型的毛竹林叶面积指数遥感反演 [J]. *应用生态学报* ,2013 ,24(8) : 2248-2256.
- [17] 张海威 张飞 张贤龙 等. 光谱指数的植被叶片含水量反演 [J]. *光谱学与光谱分析* ,2018 ,38(5) : 1540-1546.
- [18] 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.
- [19] LI X Q ,LIU X N ,LIU M L ,et al. A hyperspectral index sensitive to subtle changes in the canopy chlorophyll content under arsenic stress [J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* ,2015 ,36: 41-53.
- [20] 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.
- [21] 张春兰 杨贵军 李贺丽 等. 基于随机森林算法的冬小麦叶面积指数遥感反演研究 [J]. *中国农业科学* ,2018 ,51(5) : 855-867.
- [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] WU C Y ,NIU Z ,TANG Q ,et al. Predicting vegetation water content in wheat using normalized difference water indices derived from ground measurements [J]. *Journal of Plant Research* ,2009 ,122(3) : 317-326.
- [24] GAO. 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.
- [25] CHEN D Y ,HUANG J F ,THOMAS J 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) : 255-236.
- [26] PIETRO C ,NADINE G ,STEPHANE F ,et al. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1 [J]. *Remote Sensing of Environment* ,2002 ,82(2) : 188-197.

Quantitative Inversion of Leaf Water Content Based on Radiation Transfer Model

ZENG Fanchao¹ , ZHAO Jing² , WANG Yingxiu¹ , YAO Fuqi¹

(1. School of Hydraulic Engineering ,Ludong University ,Yantai 264039 ,China;

2. Yangtze River Water Resources Commission Yangtze River Academy of Sciences ,Wuhan 430012 ,China)

Abstract: In order to quickly and accurately estimate the leaf water content of plants and provide data support for studying the growth and development status of plants ,this study simulated a large number of leaf spectral reflectance with different biochemical contents and mesophyll structures through the PROSPECT model of the internal radiation transmission mechanism of leaves ,deeply explored the effective vegetation water index for inverting leaf water content ,and evaluated the stability and anti-interference ability of each index. The results showed that there was no significant difference in the sensitivity of various vegetation moisture indices to leaf moisture content. Except for the moisture stress index(MSI) and normalized multiband drought index(NMDI) , all other indices increased with the increase of leaf moisture content. The difference in chlorophyll content has a smaller impact on the water index of each vegetation ,followed by dry matter ,and the mesophyll structure has the greatest impact. In terms of resistance to the effects of dry matter and mesophyll structure ,the water index (WI) has a significant advantage over the other 11 indices ,followed by the simple water ratio index(SRWI) . Studying the spectral response and influencing factors of leaf water content changes through the use of simulated spectra of leaf optical models has strong theoretical and universal applicability ,and is an important means of studying plant growth and development status.

Keywords: radiation transfer model; leaf moisture content; hyperspectral; vegetation moisture index; inversion
(责任编辑 李维卫)