

doi: 10.6046/zrzyyg.2021216

引用格式: 王界,王光辉,刘宇,等. 基于 PROSPECT – VISIR 模型构建新植被水分指数[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(2): 56 – 62. (Wang J, Wang G H, Liu Y, et al. Construction of new vegetation water index based on PROSPECT – VISIR model[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(2): 56 – 62.)

基于 PROSPECT – VISIR 模型构建新植被水分指数

王界¹, 王光辉^{1,2}, 刘宇¹, 齐建伟¹, 张涛¹

(1. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048; 2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116)

摘要: 利用 PROSPECT – VISIR 叶片模型, 获得了不同叶片参数条件下可见光—中红外波段区间的叶片反射率模拟数据, 分析了植被叶片光谱特征波段, 找到叶片反射率对含水量变化敏感的波段范围。在几种常见的可见光—近红外波段植被水分指数基础上, 加入中红外波段反射率, 提出了 4 种新型植被水分指数模型: 中红外归一化差异红外指数 (mid – infrared normalized difference infrared index, $NDII_M$)、中红外归一化水分指数 (mid – infrared normalized difference water index, $NDWI_M$)、中红外归一化多波段干旱指数 (mid – infrared normalized multi – band drought index, $NMDI_M$) 和中红外归一化植被指数 (mid – infrared normalized difference vegetation index, $NDVI_M$)。利用叶片反射率模拟数据, 比较了 4 种新型植被水分指数与传统水分指数对叶片含水量的敏感性, 建立了新植被水分指数与叶片含水量和干物质含量的定量关系模型, 其中 $NMDI_M$ 的关系式决定系数 R^2 达到 0.972, 表现最好。文章基于 $NMDI_M$ 和 $NDII_M$ 发展了一种双植被指数的叶片含水量估算模型, 实现在干物质含量未知情况下对叶片含水量的准确估算 (均方根误差为 0.0021 g/cm^2)。

关键词: 叶片辐射传输模型; 植被水分指数; 中红外波段反射率; 叶片含水量

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097 – 034X(2022)02 – 0056 – 07

0 引言

植被在地球系统中扮演着重要角色, 其生化物质都直接或间接地参与生物地球化学循环, 在生态系统的物质和能量循环中发挥重要的作用。其中, 水分是控制植物光合作用、呼吸作用和生物量的主要因素之一, 准确估计叶片含水量可以监测植物生理状态, 可用于精准农业、预测干旱风险和森林火灾风险^[1–4]。相比于传统的技术手段, 卫星遥感能够提供大区域的连续时空监测能力^[5]。而通过不同波段反射率组合的植被指数, 可以简单、有效地对地面植被状况进行度量^[6]。目前国内外学者提出的植被水分指数主要是可见光—近红外波段反射率组合^[7–8], 其中比较有代表性的是归一化差异红外指数 (normalized difference infrared index, $NDII$)^[9]、归一化水分指数 (normalized difference water index, $NDWI$)^[10]、归一化多波段干旱指数 (normalized multi – band drought index, $NMDI$)^[11] 和归一化植被指数

(normalized difference vegetation index, $NDVI$)^[12]。

但可见光—近红外波段的波长远小于大气气溶胶的直径, 受大气的散射作用较强。而中红外波段的波长与大气气溶胶颗粒直径相当, 能穿透大部分的烟雾、阴霾等 (沙粒除外), 对气溶胶相对不敏感^[13]。当有大量燃烧物的烟或者城市的薄雾存在时, 中红外比可见光和近红外具有更强的穿透性。同时, 由于液态水对中红外波段的辐射具有很强的吸收性^[14], 当植被叶片含水量变化时, 中红外波段的反射率也会出现明显波动^[15]。因此, 中红外波段在雾霾气候下监测植被水分、森林火灾预警、灾中火势预测等方面有独特的优势。

Libonati 等^[16]认识到中红外波段的辐射能够穿透大部分的烟雾, 将其用于燃烧区植被识别的研究, 准确率达到 98.20%; Vescovo 等^[17]将传统植被指数与一个中红外波段的改正因子相乘, 估算草原的叶面积指数、生物量和草地覆盖比例, 有不错的效果; Tang 等^[18]利用中红外地表双向反射率, 改进 $NDVI$ 作为新的植被指数, 能够很好地反映出植被

收稿日期: 2021 – 07 – 14; 修订日期: 2021 – 12 – 01

基金项目: 国家重点研发计划、高分辨率对地观测系统重大专项“高分遥感测绘应用系统 (二期)” (编号: 42 – Y30B04 – 9001 – 19/21) 资助。

第一作者: 王界 (1990 –), 男, 硕士, 主要从事地表参量定量反演、热红外遥感及应用研究。Email: wangjie0039@163.com。

通信作者: 王光辉 (1982 –), 男, 高级工程师, 主要从事遥感影像数据处理、信息提取与变化检测等的研究。Email: wanggh@lasac.cn。

的生长状况信息,并且受大气的吸收、散射作用影响更小。这些研究发现了中红外波段在减小大气影响方面的特点,但更多是用于火灾区域的植被覆盖识别,还未将其用于植被水分监测的研究中。Ullah 等^[19-20]利用连续小波分析法,发现中红外波段反射率对叶片水分非常敏感,并建立了叶片水分反演模型,与实测数据相比,误差在 10% 左右; Arshad 等^[21]利用遗传算法结合偏最小二乘回归,发现中红外波段用于反演叶片水分时相关性最好,精度最高。这些学者分析了中红外波段反射率用于叶片含水量估算的潜力,但方法较为复杂,不如植被指数简单、有效,在实际应用中受到限制。

为了构建一种基于中红外波段反射率的植被水分指数,有效减小雾霾、烟雾的影响,即使在复杂大气条件下也可以得到比较精确的植被水分信息,用于植被生长状况、森林火险的遥感监测应用。本文利用 PROSPECT - VISIR 植被叶片模型,获得不同生化参数下植被叶片在可见光—中红外波谱区间的反射率曲线,通过加入中红外波段反射率,对 4 种常用植被水分指数进行改进,建立叶片含水量估算模型。

1 PROSPECT - VISIR 模型

植被叶片辐射传输模型是植被遥感研究的基础,利用植被叶片模型可以从理论上分析不同生化物理参数对植被叶片光谱特征的影响。

PROSPECT 模型是目前使用最广泛的植被叶片模型之一。它从最初的平板模型中发展而来^[22],对于原平板模型中叶片表面各向同性的假设作了改动,加入了立体角,提高了模型精度。输入 4 个参

数,能够模拟得到叶片在 400 ~ 2 500 nm 的反射率和透过率。

随着遥感技术和测量仪器的不断发展,考虑到中红外波段在植被遥感中的应用潜力, Gerber 等^[23]基于 PROSPECT 模型,提出了 PROSPECT - VISIR (VISible to InfraRed) 模型,他们分别在美国地质调查局光谱实验室和法国图卢兹航空航天研究院各测量了几十组叶片数据,包括反射率、透过率、水含量和干物质含量,采集到从可见光到热红外的整个光谱的数据。利用这些实测数据扩展了 PROSPECT 模型的数据库,将原本只能到 2.5 μm 的光谱范围延伸到 5.7 μm 。该模型需要输入 5 个参数: 叶肉结构、叶绿素含量、类胡萝卜素含量、含水量和干物质含量,能够模拟 0.4 ~ 5.7 μm 的叶片反射率和透过率,光谱分辨率为 1 nm。

本文选择该模型来模拟在不同叶片参数下的可见光—中红外波段叶片反射率数据,从而定量评估不同波段反射率对叶片参数变化的敏感性,构建一种新的植被水分指数模型。

2 植被叶片光谱反射特性分析

为了分析植被叶片对几种参数的光谱反射特性,本文利用 PROSPECT - VISIR 模型分别模拟了不同叶肉结构 (N)、叶绿素含量 (C_{ab})、类胡萝卜素含量 (C_{ar})、含水量 (C_w) 和干物质含量 (C_m) 下的叶片反射率,每次模拟时只有一个参数变化,其他 4 个参数固定,从而分析单个参数对植被叶片光谱曲线的影响。图 1 分别是叶片叶绿素含量、类胡萝卜素含量和叶肉结构与叶片反射率关系图。

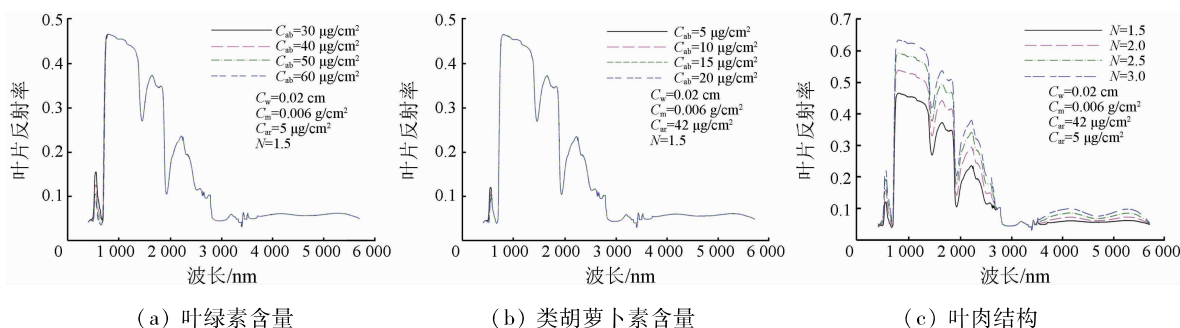


图 1 叶片反射率与 3 种叶片参数的关系图

Fig. 1 Relationship between leaf reflectance and 3 leaf parameters

可以看到,叶绿素含量的变化主要影响植被叶片 500 nm 附近的反射率,对其他波段基本不影响。类胡萝卜素则几乎对整个 400 ~ 5 700 nm 范围内的叶片反射率都没有影响。而叶肉结构几乎在整个波谱范围内都对叶片反射率有不同程度的影响。这是因为叶片中叶肉层数会影响电磁辐射在叶片内部的

反射和透射次数,最终改变反射或透射出叶片的辐射信号强度。在实际中,叶片的叶肉结构主要和植被种类和生长阶段有关,一般情况下短时间内不会有明显的变化。因此,这 3 个参数对于叶片反射率的波动影响有限,在后续模拟数据及构建新植被指数过程中,可以设置为固定值。

图2 分别是不同叶片含水量和干物质含量下的

400 ~ 5 700 nm 范围内叶片反射率波谱曲线。

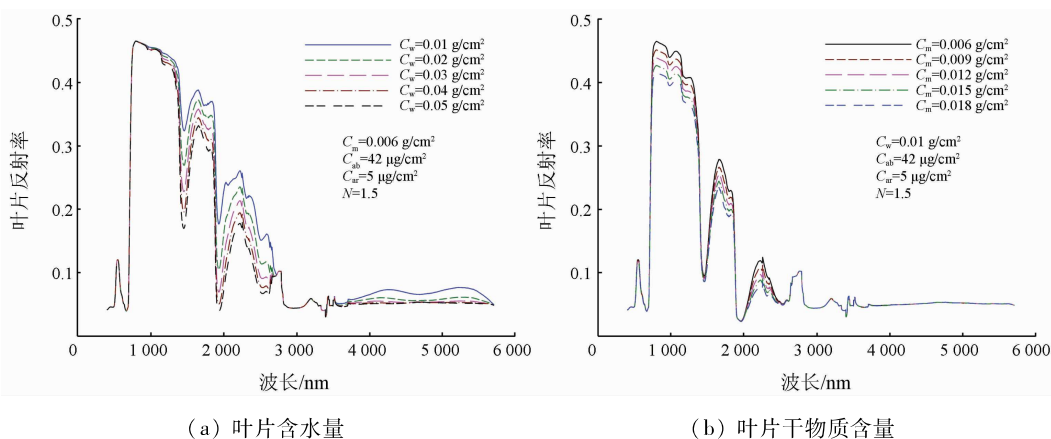


图2 叶片反射率与含水量和干物质含量的关系图

Fig. 2 Relationship of leaf reflectance with water content and dry matter content

从图中可以看到,在 400 ~ 3 000 nm 的可见光—近红外波谱区间内,存在多个对叶片水分和干物质含量敏感的波段,分别是 1 240 nm 附近、1 650 nm 附近和 2 000 ~ 2 500 nm 区间,在这些特征波段附近,叶片反射率有明显的差异,利用这个特点,可以建立叶片反射率与含水量和干物质含量之间的关系模型,目前常见的植被水分指数就是以上述特征波段反射率为基础构建的,并用于表征植被叶片水分含量的变化。

而在 3 000 ~ 5 000 nm 的中红外波谱区间内,在 4 200 nm 附近以及 5 300 nm 附近,也存在叶片水分敏感波段。通过这些中红外波段的反射率,可以改进传统植被水分指数。

3 构建新植被水分指数

根据上文分析,4 200 nm 以及 5 300 nm 附近的反射率对叶片水分较敏感,可以利用这些波段构建基于中红外波段反射率的新型植被水分指数。考虑到辐射信号在 4 200 nm 处位于大气窗口内,且常用的卫星载荷(如 MODIS)中红外波段设置在 3 600 ~ 4 200 nm 区间,因此本文利用 4 200 nm 附近的中红外波段反射率,代替 4 种传统植被水分指数中的 400 ~ 2 000 nm 范围内的一个波段反射率,构建了中红外归一化差异红外指数(mid - infrared normalized difference infrared index, $NDII_M$)、中红外归一化水分指数(mid - infrared normalized difference water index, $NDWI_M$)、中红外归一化多波段干旱指数(mid - infrared normalized multi - band drought index, $NMDI_M$)和中红外归一化植被指数(mid - infrared normalized difference vegetation index, $NDVI_M$)。表 1 是 4 种新型植被水分指数的具体公式。

表1 4种新型植被水分指数

Tab. 1 Four new water index of vegetation

传统植被指数	公式 ^①	新型植被指数	公式
NDII	$NDII = \frac{\rho_{820} - \rho_{1600}}{\rho_{820} + \rho_{1600}}$	$NDII_M$	$NDII_M = \frac{\rho_{1600} - \rho_{4200}}{\rho_{1600} + \rho_{4200}}$
NDWI	$NDWI = \frac{\rho_{860} - \rho_{1240}}{\rho_{860} + \rho_{1240}}$	$NDWI_M$	$NDWI_M = \frac{\rho_{1240} - \rho_{4200}}{\rho_{1240} + \rho_{4200}}$
NMDI	$NMDI = \frac{\rho_{860} - (\rho_{1640} - \rho_{2130})}{\rho_{860} + (\rho_{1640} + \rho_{2130})}$	$NMDI_M$	$NMDI_M = \frac{\rho_{860} - (\rho_{4200} - \rho_{2130})}{\rho_{860} + (\rho_{4200} + \rho_{2130})}$
NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{895} - \rho_{675}}{\rho_{895} + \rho_{675}}$	$NDVI_M$	$NDVI_M = \frac{\rho_{895} - \rho_{4200}}{\rho_{895} + \rho_{4200}}$

①表中 ρ 为叶片反射率;下标数字为波长,如 ρ_{820} 表示 820 nm 处的叶片反射率。

根据图 2 可知,叶片含水量和干物质含量的变化都会对不同波段的叶片反射率造成影响,因此要分析上述 4 种新型植被水分指数与叶片含水量的关系,就必须同时考虑干物质含量的影响。本文采取的方法是,对叶片含水量和干物质含量进行单变量分析,并分别建立关系式;再假设 2 个变量对叶片反射率的影响是独立的,从而将两个关系式进行整合,得到植被指数与 2 个变量因子的关系,构建出叶片含水量反演模型。

设置 PROSEPRC - VISIR 模型的参数时,叶片含水量从 0.005 ~ 0.05 g/cm² 变化,干物质含量从 0.006 ~ 0.018 g/cm² 变化,其他参数:叶肉结构 1.5,叶绿素含量 42 µg/cm²,类胡萝卜素含量 5 µg/cm²。从模型输出的叶片反射率中提取出各波段反射率,并按照公式计算出不同叶片参数下的植被指数,生成模拟数据集。首先分析 4 种植被水分指数模型对叶片含水量变化的敏感性,图 3 分别是新型植被水分指数和传统植被水分指数与叶片含水量之间的变化关系。

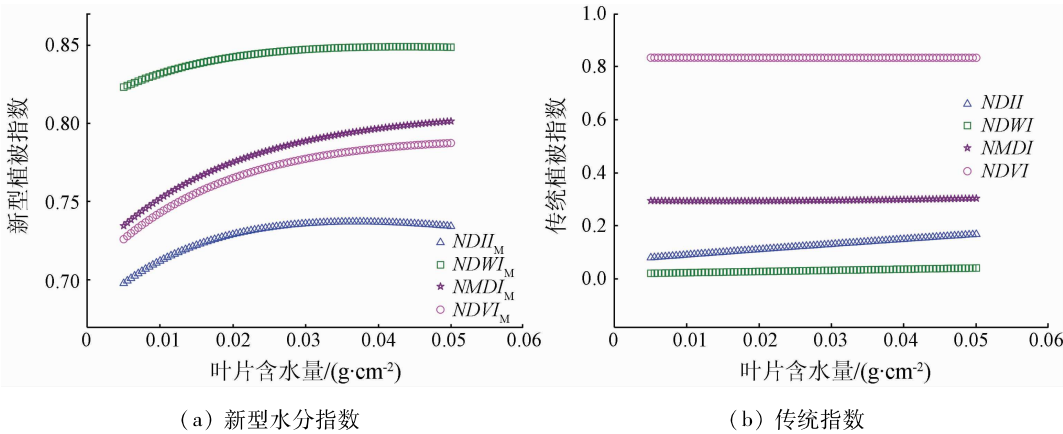


图3 新型植被水分指数和传统指数与叶片含水量之间的关系图

Fig.3 Relationship between new water index, traditional water index and leaf water content

可以看到,改进后的新型植被水分指数对叶片含水量更加敏感,且随叶片含水量呈非线性增长。其中, $NMDI_M$ 的变化最大,对叶片含水量最敏感,而 $NDWI_M$ 则变化最小。为了定量分析4种新型植被水分指数与叶片含水量的关系,利用模拟数据进一步拟合得到4种指数与叶片含水量 C_w 之间的具体关系式及其 R^2 和均方根误差(root mean square error, RMSE),如表2所示。通过关系式也可以看出, $NMDI_M$ 的关系式中,叶片含水量的决定系数 R^2 最高,其次是 $NDVI_M$,最小的是 $NDWI_M$ 。

表2 新型植被水分指数与叶片含水量的关系式

Tab.2 Relationship between new vegetation water index and leaf water content

关系式	R^2	RMSE
$NDII_M = 0.792\ 7 + 0.017\ 1 \times \ln C_w$	0.912	$2.885e^{-4}$
$NDWI_M = 0.887\ 2 + 0.011\ 8 \times \ln C_w$	0.963	$1.263e^{-4}$
$NMDI_M = 0.896\ 8 + 0.031\ 2 \times \ln C_w$	0.997	$9.268e^{-5}$
$NDVI_M = 0.876\ 2 + 0.028\ 7 \times \ln C_w$	0.994	$1.179e^{-4}$

同样的分析方式,图4分别是4种新型植被水分指数和传统指数与叶片干物质含量之间的关系图。可以看到,4种改进后的植被水分指数与叶片

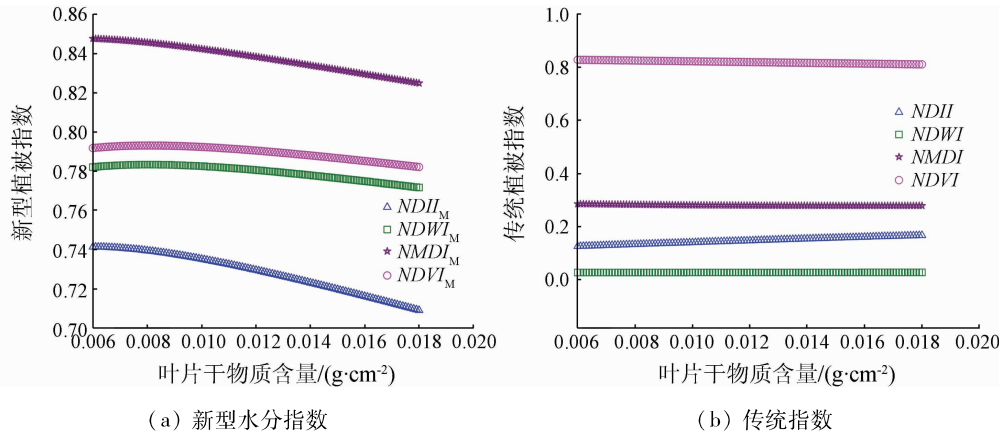


图4 新型植被水分指数和传统指数与叶片干物质含量之间的关系图

Fig.4 Relationship between new water index, traditional water index and leaf dry matter content

干物质含量之间是线性关系。
利用模拟数据集,拟合得到4种改进后的植被指数与叶片干物质含量 C_m 之间的具体关系式,如表3所示。

表3 新型植被水分指数与叶片干物质含量的关系式

Tab.3 Relationship between new vegetation water index and leaf dry matter content

关系式	R^2	RMSE
$NDII_M = 0.762\ 2 - 2.840C_m$	0.982	$1.386e^{-4}$
$NDWI_M = 0.791\ 3 - 0.998C_m$	0.905	$1.182e^{-4}$
$NMDI_M = 0.861\ 3 - 1.981C_m$	0.991	$6.697e^{-5}$
$NDVI_M = 0.800\ 1 - 0.931C_m$	0.901	$1.188e^{-4}$

从关系式可以得知, $NDII_M$ 和 $NMDI_M$ 对叶片干物质含量的变化更加敏感, $NDWI_M$ 和 $NDVI_M$ 则相对次之。
综合分析4种改进后植被水分指数与 C_w 和 C_m 的关系,本文假设2种参数的变化对叶片反射率的影响是互相独立的,因此可以得到4种指数模型与 C_w 和 C_m 的关系式为:
$$VI = a_0 + a_1 \ln C_w + a_2 C_m, \quad (1)$$

式中: VI 为上述4种新型植被水分指数; a_0, a_1, a_2 为系数。
进一步利用模拟数据按式(1)进行拟合,得到

拟合系数 a_0 , a_1 和 a_2 , 数值如表 4 所示。

表 4 4 种植被水分指数的系数

Tab. 4 Coefficients of four vegetation water index

新型植被指数	a_0	a_1	a_2	R^2	RMSE
$NDII_M$	0.703	-0.015 0	-2.987	0.932	0.001 7
$NDWI_M$	0.789	-0.000 7	-1.115	0.811	0.003 9
$NMDI_M$	0.840	-0.005 0	-2.002	0.972	0.001 3
$NDVI_M$	0.812	-0.002 6	-1.043	0.837	0.002 7

可以看到, 4 个关系式中 R^2 最高的是 $NMDI_M$, $NDII_M$ 次之; 模型 RMSE 最小的也是 $NMDI_M$, 为 0.001 3。根据 a_1 与 a_2 的绝对值大小, 可以判断 4 种植被水分指数对叶片含水量和干物质含量变化的敏感性, 数值越大敏感性越高; 从表 4 可知, $NDII_M$ 对叶片含水量和干物质含量的敏感性最高, $NMDI_M$ 次之。

综合分析来看, $NMDI_M$ 是用于反演叶片含水量最优的指数模型, 其次是 $NDII_M$, 另外 2 种新型植被水分指数 $NDWI_M$ 和 $NDVI_M$ 则误差相对较大, 不适合用于叶片含水量的反演。

4 植被指数反演叶片含水量

由于 $NMDI_M$ 和 $NDII_M$ 与叶片含水量的关系中还包含干物质含量这一变量, 要利用指数模型反演叶片含水量, 就要解决如何获取叶片干物质含量这一问题。

首先假设干物质含量已知的情况下, 利用 PROSPECT-VISIR 模型输出的叶片反射率以及表 2 中 $NMDI_M$ 的关系式, 可以反演叶片含水量, 并以模型输入时设置的叶片含水量作为实际值进行验证。图 5 是反演的叶片含水量与模拟数据集中实际值的对比图。

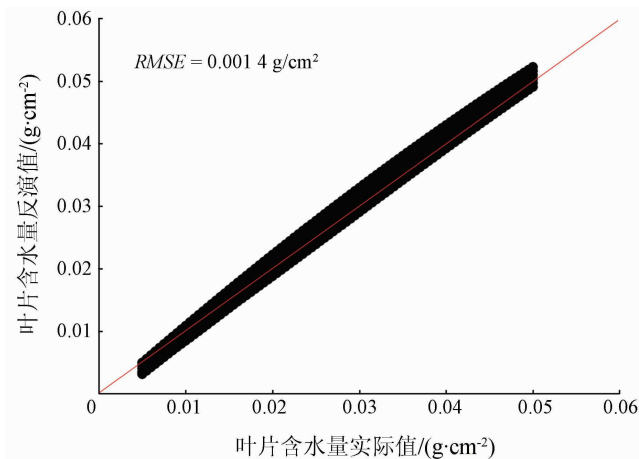


图 5 叶片含水量反演值与实际值的对比图

Fig. 5 Comparison between the retrieved value and actual value of water content

从图中可以看到, 在已知叶片干物质含量的情况下, 利用 $NMDI_M$ 的关系式反演得到的叶片含水量与实际值相比, RMSE 仅为 0.001 4 g/cm², 精度非常高。

实际应用中, 很难利用遥感技术手段准确获取叶片干物质含量来反演叶片含水量。因此, 需要建立更加实用的反演方法, 在无法获取叶片干物质含量的情况下反演叶片含水量。

考虑到同时有 2 个未知数, 至少需要 2 个方程, 因此利用 $NMDI_M$ 和 $NDII_M$ 2 种植被水分指数模型, 可以同时反演出叶片含水量和干物质含量, 计算公式为:

$$\begin{cases} NMDI_M = 0.840 - 0.005 \times \ln C_w - 2.002 C_m \\ NDII_M = 0.703 - 0.015 \times \ln C_w - 2.987 C_m \end{cases} \quad (2)$$

利用模拟数据集, 结合方程组 (2) 反演得到叶片含水量, 并以模型输入时设置的叶片含水量作为实际值进行对比验证, 结果如图 6 所示, RMSE 为 0.002 1 g/cm²。可以看出, 在无法获取干物质含量时, 利用 2 种新型植被水分指数联合反演的叶片含水量, 精度虽然有所降低, 但 0.002 1 g/cm² 的 RMSE 已经能够满足要求, 并且这种双植被指数估算模型适用范围更广。如果有实际测量的叶片参数和反射率数据, 可以进一步优化植被水分指数与叶片含水量和干物质含量的关系式, 提高估算模型的精度。

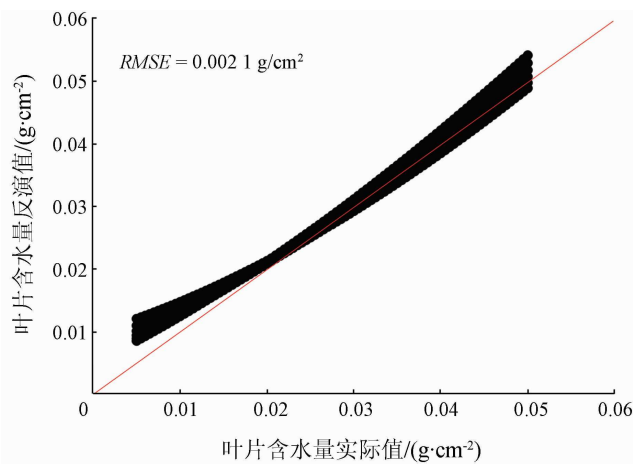


图 6 叶片含水量反演值与实际值的对比图

Fig. 6 Comparison between the retrieved value and actual value of water content

5 结论

本文利用 PROSPECT-VISIR 模型对植被叶片光谱反射特性进行了分析, 构建了 4 种基于中红外波段反射率的新型植被水分指数, 利用模拟数据对

4 种指数进行分析评价,得出以下结论:

1) 4 种新型植被水分指数中, $NMDI_M$ 与叶片含水量和干物质含量的相关性最高,拟合关系式的 $RMSE$ 最小; $NDII_M$ 的相关性和 $RMSE$ 仅次于 $NMDI_M$, $NDWI_M$ 和 $NDVI_M$ 的误差相对较大,不适合用于叶片水分估算。

2) 基于 $NMDI_M$ 和 $NDII_M$ 构建的双植被指数估算模型,可以同时反演出叶片含水量和干物质含量,叶片含水量反演 $RMSE$ 仅为 $0.002\ 1\ g/cm^2$,解决了在无法获取干物质含量情况下,利用遥感数据准确反演叶片含水量的难题。

3) 本研究是利用模拟数据进行建模和分析验证,后续可以利用实际测量的叶片参数和反射率数据对模型进行验证和完善,能有效提高叶片含水量反演精度,并将其进一步用于植被生长状况、干旱预测和森林火险遥感监测。

参考文献 (References):

- [1] Datt B. Remote sensing of water content in Eucalyptus leaves[J]. Australian Journal of Botany, 1999, 47(6): 909–923.
- [2] Penuelas J, Gamon J A, Griffin K L, et al. Assessing community type, plant biomass, pigment composition, and photosynthetic efficiency of aquatic vegetation from spectral reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 46(2): 110–118.
- [3] Bauer M E, Daughtry C S T, Biehl L L, et al. Field spectroscopy of agricultural crops[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1986(1): 65–75.
- [4] Chuvieco E, Riaño 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.
- [5] Hunt E R, Rock B N, Nobel P S. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 1987, 22(3): 429–435.
- [6] Bannari A, Morin D, Bonn F, et al. A review of vegetation indices[J]. Remote Sensing Reviews, 1995, 13(1–2): 95–120.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Hardisky M, Klemas V, Smart M. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance[J]. Spartina Alterniflora, 1983, 49: 77–83.
- [10] Gao B C. 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.
- [11] Wang L L, and John J Q. NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34: 20.
- [12] Rouse J W, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS[J]. NASA Special Publication, 1974, 351: 309.
- [13] Boyd D S. The relationship between the biomass of Cameroonian tropical forests and radiation reflected in middle infrared wavelengths (3.0–5.0 μm) [J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(5): 1017–1023.
- [14] Kaufman Y J, Remer L A. Detection of forests using mid-IR reflectance: An application for aerosol studies[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(3): 672–683.
- [15] Carter G A. Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves [J]. American Journal of Botany, 1991, 78(7): 916–924.
- [16] Libonati R, DaCamara C C, Pereira J M C, et al. A new optimal index for burnt area discrimination in satellite imagery [C]//2007 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference and the 15th American Meteorological Society (AMS) Satellite Meteorological & Oceanography Conference. Germany: Darmstadt, 2007: 24–28.
- [17] Vescovo L, Gianelle D. Using the MIR bands in vegetation indices for the estimation of grassland biophysical parameters from satellite remote sensing in the Alps region of Trentino (Italy) [J]. Advances in Space Research, 2008, 41(11): 1764–1772.
- [18] Tang B H, Jia Y Y, Zhang X, et al. Vegetation monitoring with surface bi-directional reflectivities in MODIS near-IR and mid-IR channels [C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2007: 3333–3336.
- [19] Ullah S, Skidmore A K, Naeem M, et al. An accurate retrieval of leaf water content from mid to thermal infrared spectra using continuous wavelet analysis [J]. Science of the Total Environment, 2012, 437: 145–152.
- [20] Ullah S, Skidmore A K, Ramoelo A, et al. Retrieval of leaf water content spanning the visible to thermal infrared spectra [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 93: 56–64.
- [21] Arshad M, Ullah S, Khurshid K, et al. Estimation of leaf water content from mid- and thermal- infrared spectra by coupling genetic algorithm and partial least squares regression [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2018, 12(2): 022203.
- [22] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra [J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34(2): 75–91.
- [23] Gerber F, Marion R, Olioso A, et al. Modeling directional-hemispherical reflectance and transmittance of fresh and dry leaves from 0.4 μm to 5.7 μm with the PROSPECT-VISIR model [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(2): 404–414.

Construction of new vegetation water index based on PROSPECT – VISIR model

WANG Jie¹, WANG Guanghui^{1,2}, LIU Yu¹, QI Jianwei¹, ZHANG Tao¹

(1. Land Satellite Remote Sensing Application Center, MNR, Beijing 100048, China; 2. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In this paper, the leaf reflectance simulation data of visible to mid – infrared spectral range under the condition of different leaf parameters were obtained using the PROSPECT – VISIR leaf model. The spectral characteristic bands of vegetation leaves were analyzed to find the range of bands within which leaf reflectance is sensitive to changes in water content. On the basis of several common vegetation water indexes derived from visible and near – infrared bands, four new vegetation water index models were proposed by addition of the reflectance of the mid – infrared band, namely mid – infrared normalized difference infrared index ($NDII_M$), mid – infrared normalized difference water index ($NDWI_M$), mid – infrared normalized multi – band drought index ($NMDI_M$) and mid – infrared normalized difference vegetation index ($NDVI_M$). Based on the leaf reflectance simulation data, the sensitivity of four new vegetation water indexes and that of common water index to leaf water content were compared, and the quantitative relationship model between, on one hand, new vegetation water index and, on the other hand, leaf water content and dry matter content, was established. The fitting degree of $NMDI_M$ was 0.972, showing the best performance. Finally, a leaf water content estimation model was developed based on two new vegetation water indexes $NMDI_M$ and $NDII_M$ so that accurate estimation of leaf water content can be achieved even when the dry matter content is unknown (the root mean square error of the model was 0.002 g/cm^2).

Keywords: leaf radiative transfer model; vegetation water index; mid – infrared reflectance; leaf water content

(责任编辑: 张 仙)