

植被叶片及冠层层次含水量估算模型的建立*

沈艳^{1,2**} 牛铮² 颜春燕²

(¹南京信息工程大学气象学院, 南京 210044; ²中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

【摘要】 利用 LOPEX'93 数据库中 67 个鲜叶片含水量(Cw)和光谱反射率实测数据, 基于光谱指数法, 在叶片层次, 用 47 个随机样本建立 Cw 与不同光谱指数的统计模型, 并用另外 20 个样本验证. 结果表明, Cw 的两种表征形式相对含水量 FMC 和等价水深 EWT 在提取叶片 Cw 时差异较大, EWT 与各光谱指数的相关性较 FMC 高, 但 FMC 对叶片 Cw 的反演精度高于 EWT. 而反演精度更高的是基于最优子集回归建立的光谱指数线性模型. Ratio₉₇₅ 是叶片层次提取 Cw 的普适光谱指数. 冠层层次, 利用 PROSPECT + SAILH 耦合模型, 模拟在不同叶面积指数 LAI 和 Cw 下的冠层光谱. 为了剔除背景影响, 更好地提取冠层 Cw, 提出用近红外和短波红外波段反射率构造土壤可调节水分指数(SAWI), 该指数与其他光谱指数的比值能明显地剔除土壤背景影响, 更准确地提取冠层 Cw. Ratio₉₇₅ 的改进型光谱指数 (Ratio₉₇₅ - 0.96) / (SAWI + 0.2) 能用来提取叶面积指数 LAI 从 0.3 到 8.0, Cw 从 0.0001cm 到 0.07cm 的冠层 Cw, 研究表明精度较高.

关键词 光谱指数法 含水量 土壤可调节水分指数

文章编号 1001-9332(2005)07-1218-06 **中图分类号** TP79;Q945 **文献标识码** A

Estimation models for vegetation water content at both leaf and canopy levels. SHEN Yan^{1,2}, NIU Zheng², YAN Chunyan² (¹College of Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; ²State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2005, 16(7): 1218~1223.

Based on spectral indices method, this paper utilized the water content (Cw) and reflectance data of 67 fresh different type leaves from LOPEX'93 database to establish the statistical model between leaf Cw and spectral indices at leaf level through 47 samples, and to test the model with the other 20 samples. The results suggested that fuel moisture content (FMC) and equivalent water thickness (EWT) as Cw demonstrators were different in reflectance spectral curves. The difference between FMC and EWT was large when they were utilized to retrieve the leaf Cw. The correlation coefficient between EWT and each spectral index was higher than FMC, but the forecast precision of FMC was better than that of EWT. The 7 spectral indices could all retrieve the leaf FMC accurately, but only the Ratio₉₇₅, II and SR were suitable to estimate the leaf EWT. Spectral indices linear model on the strength of optimal subset regressions had the highest precision to retrieve the leaf Cw. Ratio₉₇₅ might be the universal spectral index to estimate the leaf Cw. At canopy level, the simulated canopy spectra under different leaf area index (LAI) and Cw were derived from the PROSPECT and SAILH coupling models. In order to eliminate background influence and to precisely retrieve the Cw, soil-adjusted water index (SAWI) was proposed at the first time to indicate the information of near-infrared and short-wave infrared canopy reflectance. The ratio of SAWI and other spectral indices could dramatically eliminate the soil background, and effectively retrieve the vegetation Cw at canopy level. Spectral index (Ratio₉₇₅ - 0.96) / (SAWI + 0.2) as improved Ratio₉₇₅ could be used to compute the canopy Cw more precisely when LAI was ranging from 0.3 to 8.0 and Cw from 0.0001 to 0.07cm.

Key words Spectral indices method, Water content, Soil-adjusted water index.

1 引言

植被是陆地生态系统的重要组成部分, 而植物冠层中水分含量约占 40%~80%^[8]. 水分是控制植物燃烧、光合作用和生物量的主要因素之一^[20,28]. 及时准确监测或诊断叶片和冠层含水量可以反映植物生理状况, 趋利弊害, 并为火势模型提供输入参数^[30]. 传统测定叶片含水量(Cw)的方法局限在小面积或单株上, 所得结论必定带有某些片面性和局限性. 而且一般都是事后性和破坏性的, 难以真正大

面积应用. Kramer^[19]较早认识到测定植株含水状态的重要性. 目前常用的测定叶片 Cw 的方法有冠层温度法^[29]和植被绿度指示 Cw 法^[3]. 其适用范围受植被类型、环境条件及时空变化的影响很大. 因此, 基于植被光谱随 Cw 的变化, 应用遥感技术实时监测和诊断植被 Cw 越来越受到重视. 随着高光谱遥

* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077902)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-02)和国家自然科学基金资助项目(40271086).

** 通讯联系人.

2004-08-23 收稿, 2004-11-29 接受.

感的发展,准确评价植被水量状况成为重要应用领域^[11].已有研究者尝试用遥感数据直接提取叶片 C_w ^[1,4,9,10,27]针对性不强,而准确提取植被冠层 C_w 的文章尚不多见.但应用的最终目的要归结到植被冠层层次,本文在综合分析光谱指数法提取叶片层次 C_w 的基础上,进而提出了有效剔除土壤背景影响,准确提取冠层 C_w 的新方法.

2 研究方法

2.1 数据

采用国外 LOPEX'93 数据库^[14]建立叶片 C_w 估算模型.该数据库体现了叶片水分含量和叶片类型的多样性.选取 67 个新鲜叶片 C_w 和从 400~2 500 nm、采样间隔为 1 nm 半球反射率数据.每个叶片 C_w 和反射率数据都是同一类型 5 片不同叶片测量值的平均.而冠层 C_w 模型的建立则基于 PROSPECT + SAILH 耦合模型,模拟了不同 C_w (cm)和叶面积指数 LAI 下的冠层光谱指数.其中 C_w 取值范围:0.0001~0.07cm^[5],分别模拟 C_w 是 0.0001、0.001、0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.06、0.07 及 LAI 是 0.3、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0 和 8.0 下的冠层光谱.在光谱模拟中,叶片内部叶肉结构参数 N 设为对大部分植物都成立的 1.5^[18];太阳天顶角 30°,相对方位角为 0°;叶倾角分布设为球形,平均叶倾角 $ALA = 57.3^\circ$;叶绿素含量设定 35 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$,干物质含量设定 0.01 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$,土壤光谱为实验室测量的多条光谱的平均.

2.2 方法

使用光谱指数法估算冠层和叶片 C_w .光谱指数法研究田间或实验室获得的基于生理状态的生物指示因子与植被反射率间的关系.光谱指数是指某些特定波段反射率的组合,与叶片色素或光合作用以及植被的水、氮胁迫状态等有关.其中波段组合的选取参照一定的物理基础,能部分消除环境背景的影响,在此基础上的统计分析比单纯的统计结果更具有物理意义.另一方面,该方法又比物理模型方法简单、适用性好.

2.3 C_w 表示方法

表征 C_w 的常用方法有两种:相对含水量 FMC 和等价水深 EWT. FMC 是叶片中水量占鲜叶重^[21]或干叶重^[3,6]的百分比,即:

$$\text{FMC} = \frac{\text{鲜叶重} - \text{干叶重}}{\text{鲜叶重(或干叶重)}} \times 100\% \quad (1)$$

EWT (Equivalent Water Thickness) 是单位叶面积的 C_w ^[7].用公式表示:

$$\text{EWT} = \frac{\text{鲜叶重} - \text{干叶重}}{\text{叶面积}} \quad (2)$$

EWT 的单位是 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 或 cm.研究表明^[12], FMC 和 EWT 是定义 C_w 的 2 个不相关量,定量提取 C_w 时代表 2 种不同方法.基于 LOPEX93 数据库,选取任意 4 种叶片类型,考虑 EWT 相同时 FMC 的变化(表 1 左)及其相应的反射光谱曲

线(图 1A).再考虑 FMC 相同时 EWT 的变化(表 1 右)及相应的反射光谱曲线(图 1B).表 1 和图 1 的结果都证明了上述结论.相同 EWT 对应的 FMC 和相同 FMC 对应的 EWT 都有所不同.对比图 1 可知,在近红外区,反射率光谱曲线对 EWT 变化更敏感,而在短波红外区,这种差别不大.所以将近红外和短波红外结合而成的光谱指数能增强叶片 C_w 信息,更好地提取叶片 C_w .下面的研究也证实了该结论.

表 1 4 种叶片类型下 EWT 相同时 FMC 的变化(左)和 FMC 相同时 EWT 的变化(右)

Table 1 Variations of FMC(EWT) during the same EWT(FMC) under 4 leaf types

叶片类型 Leaf type	FMC (%)	EWT (cm)	叶片类型 Leaf type	FMC (%)	EWT (cm)
大叶槲 <i>Tilia platyphyllos</i>	74.62	0.0085	葡萄 <i>Vitis silvestris</i>	70.289	0.012
三叶草 <i>Trifolium pratense</i>	75.81	0.0085	加拿大杨 <i>Populus canadensis</i>	70.377	0.010
梯牧草 <i>Phleum pratense</i>	69.57	0.0085	假挪威槭 <i>Acer pseudoplatanus</i>	70.566	0.006
野黑櫻 <i>Prunus serotina</i>	54.18	0.0085	鼠尾草 <i>Salvia</i>	70.821	0.023

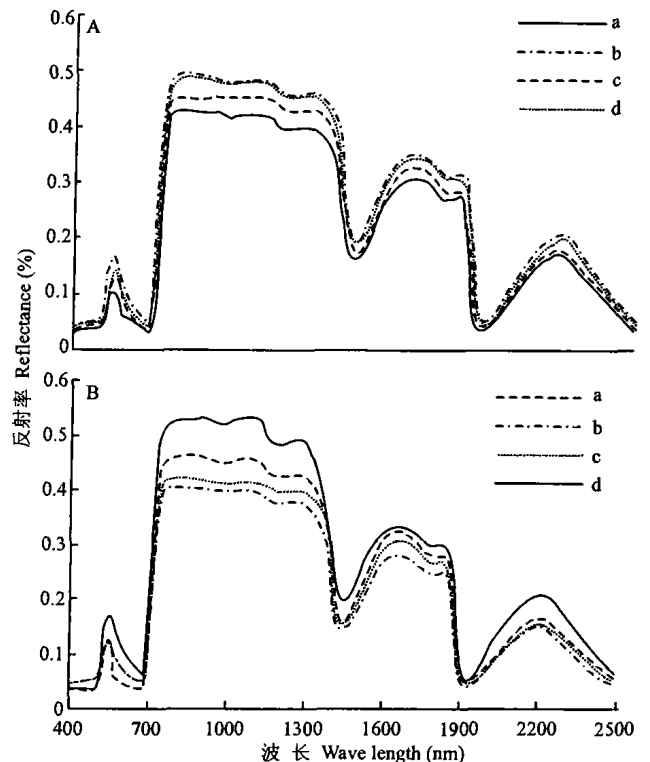


图 1 与表 1 对应的 4 个不同 FMC(EWT) 下的反射光谱曲线 A(B)
Fig. 1 Reflectance spectra curves of 4 different FMC(EWT) corresponding to table 1.

A: a)大叶槲 *Tilia platyphyllos*; b)三叶草 *Trifolium pratense*; c)梯牧草 *Phleum pratense*; d)野黑櫻 *Prunus serotina*; B: a)葡萄 *Vitis silvestris*; b)加拿大杨 *Populus canadensis*; c)假挪威槭 *Acer pseudoplatanus*; d)鼠尾草 *Salvia*.

3 结果与分析

3.1 植被叶片层次 C_w 估算模型的建立

提取叶片 C_w 的常用光谱指数包括:由于 970 nm、950 nm 是水分的敏感波段,分别将 900 nm 作

为参比波段,简单的反射率之比定义成水分指数 WI_1 ^[22]和 WI_2 ^[17].将 860 nm 和 1 240 nm 处的反射率比值指数,经非线性归一化处理得“归一化差值水分指数 NDWI^[10]”.最早提出 820 nm 和 1 600 nm 的归一化红外指数(II)的是 Hardisky^[13].之后,又提出了 1 600 nm 和 820 nm 反射率的简单比值指数(Simple Ratio, SR)^[16].最近,有研究者尝试用多个波段组合构造水分指数,并提出了中心波长分别位于 975 nm 和 1 200 nm 的比值指数 Ratio₉₇₅、Ratio₁₂₀₀^[24].

利用 FMC 和 EWT 的 47 个样本分别与植被指数建立最优回归关系(表 2).另外,有研究者用 WI_1 和 NDVI 的比值 $WI_1/NDVI$ ($NDVI = (R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680})$)提取某种植物冠层或叶片 C_w ^[23].之所以考虑 NDVI 是认为植被绿度和 C_w 相关.但在本研究中,FMC 和 EWT 与 $WI_1/NDVI$ 指数都不相关.可能是由于叶片类型的多样性,使得植被绿度和 C_w 相关的结论不能成立.表 2 中,与 FMC 相关程度最高的水分指数是 WI_1 ,相关系数 $R^2 = 0.567$,最差的是 Ratio₁₂₀₀,相关系数 $R^2 = 0.2637$;与 EWT 最相关的水分指数是 Ratio₉₇₅,相关系数 $R^2 = 0.9595$,最差的是 NDWI,相关系数 $R^2 = 0.6414$.所以,用 EWT 表征叶片 C_w 与光谱指数建立的统计关系相关性更好.

取 20 个训练样本验证表 2 的统计关系.用相对误差(RE)评价模型精度(表 3).

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i}$$

其中, Y_i 是实测值, \hat{Y}_i 是模型模拟值, n 是样本数.结果表明,FMC 的验证精度好于 EWT.在 7 个光谱指数中,对 FMC 和 EWT 反演精度最好的分别是 II 和 Ratio₉₇₅,相对误差分别是 11.09% 和 13.19%.各个指数对 FMC 的影响不大,相对误差变化范围在 11.09% ~ 13.04%,说明这 7 个指数都能准确地提取 FMC.然而,7 个指数对 EWT 的反演精度差别很大,相对误差在 13.19% ~ 88.08%,效果较好的是 Ratio₉₇₅、II 和 SR.因此,为了建立 EWT 最优统计关系并取得较好的反演精度,首选用 Ratio₉₇₅ 作为反演因子,其次是 II 和 SR.若为了简单,也可选 II 和 SR 作为反演因子.结果说明,用 FMC 表征叶片 C_w 选用近红外波段组合或近红外和短波红外组合都能较准确提取叶片 C_w ,而反演 EWT 时选用近红外和短波红外组合的光谱指数精度较高.同时也表明,在叶片层次,能找到通

表 2 FMC 和 EWT 与各种植被指数(x)间的相关关系

Table 2 Correlations between FMC(EWT) and different vegetation indices

植被指数 Vegetation indices	模型 Model	F	Proc>F	R ²
$WI_1 = R_{970}/R_{900}$	FMC = -860.53x + 910	58.933	0.0001	0.567
	EWT = -0.0008 - 0.6098 ln(x)	224.452	0.0001	0.833
NDWI = $(R_{860} - R_{1240}) / (R_{860} + R_{1240})$	y = 48.111 + 572.01 x	43.965	0.0001	0.4942
	y = -0.0012 + 0.3916 x	80.478	0.0001	0.6414
SR = R_{1600}/R_{820}	FMC = 44.817 - 54.343 ln(x)	27.872	0.0001	0.3825
	EWT = 0.0025 x ^{-3.4539}	388.526	0.0001	0.8962
II = $(R_{820} - R_{1600}) / (R_{820} + R_{1600})$	FMC = 44.087 + 114.32 x	27.573	0.0001	0.3799
	EWT = 0.0024 exp(7.2832 x)	381.136	0.0001	0.8944
$WI_2 = R_{950}/R_{900}$	FMC = 1445.9 - 1394.5 x	54.13	0.0001	0.546
	EWT = 0.0008 - 0.969 ln(x)	137.149	0.0001	0.7529
Ratio ₉₇₅ = $\frac{2 \times R_{960} - 990}{R_{920} - 940 + R_{1050} - 1110}$	FMC = -914.22 x + 968.98	24.339	0.0001	0.351
	EWT = -0.0002 - 0.89 ln(x)	1065.678	0.0001	0.9595
Ratio ₁₂₀₀ = $\frac{2 - R_{1180} - 1220}{R_{1090} - 1100 + R_{1265} - 1285}$	FMC = 50.818 - 431.16 ln(x)	18.715	0.0001	0.2937
	EWT = -0.005 - 0.458 ln(x)	492.074	0.0001	0.9162

表 3 训练样本验证 FMC 和 EWT 与各光谱指数统计关系的相对误差
Table 3 Relative error of training samples to test FMC(EWT) and indices statistic relations

	WI_1	NDWI	SR	II	WI_2	Ratio ₉₇₅	Ratio ₁₂₀₀
FMC(%)	11.42	11.92	11.21	11.09	13.04	12.20	12.9
EWT(cm)	73.8	64.69	14.06	13.23	88.08	13.19	18.76

用的 C_w 提取关系.采用最优子集回归方法研究光谱指数各种组合对 FMC 和 EWT 的贡献率.反演量是 FMC 或 EWT,反演因子是上述的 7 个光谱指数.该方法能充分考虑各种光谱指数组合个数(1~7 个)下反演精度,建立的回归关系是全局最优.经过分析,选用 WI_1 、SR、Ratio₉₇₅、Ratio₁₂₀₀ 4 个反演因子时,模型(4)对 FMC 的反演精度最高:

$$FMC = 1338.343 - 890.646 \times WI_1 - 162.779 \times SR - 2712.881 \times Ratio_{975} + 2477.752 \times Ratio_{1200} \quad (4)$$

此时相对误差 RE = 8.08%,比选用单个反演因子的精度提高了约 3%.反演 EWT 选用 WI_1 、SR、II、Ratio₉₇₅、Ratio₁₂₀₀ 5 个反演因子时精度最高,模型是(5):

$$EWT = 1.15 - 0.279 \times WI_1 - 0.064 \times SR - 0.131 \times II - 0.658 \times Ratio_{975} - 0.152 \times Ratio_{1200} \quad (5)$$

相对误差 RE = 8.44%,比选用单个反演因子的精度提高了约 5%.

3.2 植被冠层层次 C_w 估算模型的建立

3.2.1 冠层层次 C_w 提取时背景的剔除

遥感获得的冠层光谱是植被和土壤的混合光谱,一个有效的植被指数必须能将植被信息与背景信息分离.上面

的分析可知,在叶片层次建立 C_w 估算模型是完全可能的.但在冠层层次,受背景影响,简单将某种光谱指数与 C_w 在—批样本上建立的相关用于提取其它样本的 C_w 时,效果往往不好,所以必须找到一种能够剔除背景影响的方法.

用红光和近红外冠层反射率构造的土壤可调节植被指数^[2, 15, 25, 26]与某个光谱指数结合,能够大大减小背景影响,更好地提取冠层叶绿素含量.研究发现,从近红外到 2400nm,水分影响占据了主导地位^[10, 31].因此,本文用近红外和短波红外反射率构造了用于提取冠层 C_w 的土壤可调节水分指数 SAWI (soil-adjusted water index):

$$SAWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR} + L} \times (1 + L) \quad (6)$$

式中, ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR} 分别是近红外和短波红外冠层反射率,分别取 820 nm 和 1 600 nm; L 是土壤调节系数,是一个以植被量为先验知识的调整值,用来减小植被指数对不同土壤反射变化的敏感性,本文取 L 0.16^[26].

基于 PROSPECT + SAILH 的耦合模型数据,考虑本文提出的 7 个水分光谱指数与 SAWI 的比值随 C_w 和 LAI 的变化,在一定范围内,其结果都比不考虑 SAWI 时提取冠层 C_w 的精度更高、适用性更广.下图只给出 NDWI 在不考虑 SAWI(图 2)和考虑 SAWI(图 3)时随 C_w 和 LAI 的变化.分析图 2 可知,NDWI 与 C_w 和 LAI 呈正相关,随 C_w 的增加和 LAI 的增大,NDWI 增大.对应 LAI 的每条等直线,当 $C_w \leq 0.001\text{cm}$ 时,NDWI 值随水分含量变化很小.这说明在相同的 LAI 下,NDWI 只能用来提取 $C_w > 0.001\text{cm}$ 的冠层 C_w .但是 LAI 对 NDWI 的影响很大,只有当 $LAI \geq 5.0$,NDWI 对 LAI 的敏感性才不明显.所以,NDWI 只有用来提取 $C_w > 0.001\text{cm}$ 并且 $LAI \geq 5.0$ 时的冠层 C_w 才可能获得较好的结果,但是, $LAI \geq 3.0$ 时,冠层已经不受土壤背景影响^[32],因此,该结论不再具有实际意义.图 3 表明,NDWI/SAWI 与 C_w 和 LAI 呈正相关,随 C_w 增加和 LAI 增大,NDWI/SAWI 增大. $LAI \leq 2.5$ 时,对应每一条 LAI 等值线,当 $C_w \leq 0.01\text{cm}$,NDWI/SAWI 随 C_w 和 LAI 的变化较大.但是,当 $C_w > 0.01\text{cm}$ 时,NDWI/SAWI 的值随 LAI 几乎不变.所以,NDWI/SAWI 适合用来提取 $C_w > 0.01\text{cm}$ 并且 $LAI \geq 1.5$ 时的冠层 C_w .综合以上分析,总趋势是图 3 中 NDWI/SAWI 对 LAI 的敏感性要小于图 2 中 NDWI 对 LAI 的敏感性,而且 C_w 对二者能否

用来提取冠层 C_w 也有影响,说明某一水分光谱指数能否有效提取冠层 C_w ,是 C_w 和 LAI 综合作用的结果.在提取冠层 C_w 时,NDWI/SAWI 比 NDWI 更能有效剔除环境背景影响.值得一提的是,当 $LAI \leq 1.0$ 时,NDWI/SAWI 随 LAI 和 C_w 的变化没有规律,主要表现为 NDWI/SAWI 值在某个 C_w 时急剧变大,例如,当 $LAI = 1.0$, $C_w = 0.001$ 时,NDWI/SAWI = -89.4934,认为不能用来提取冠层 C_w ,可能主要是低植被覆盖环境背景影响很大造成.其他光谱指数与 SAWI 的比值,在低 LAI 下同样有比值骤增的情况.下面将改进某个光谱指数,使之更好地剔除环境背景影响.

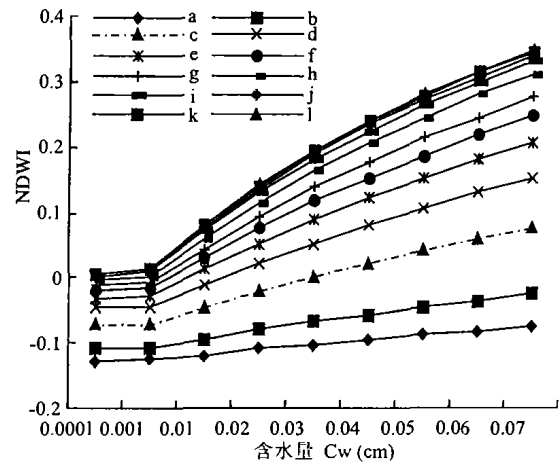


图 2 NDWI 在不同叶面积指数和 C_w 下的分布曲线
Fig. 2 Curves of NDWI under different leaf area index (LAI) and water content.
a) LAI=0.3; b) LAI=0.5; c) LAI=1.0; d) LAI=1.5; e) LAI=2.0; f) LAI=2.5; g) LAI=3.0; h) LAI=4.0; i) LAI=5.0; j) LAI=6.0; k) LAI=7.0; l) LAI=8.0.

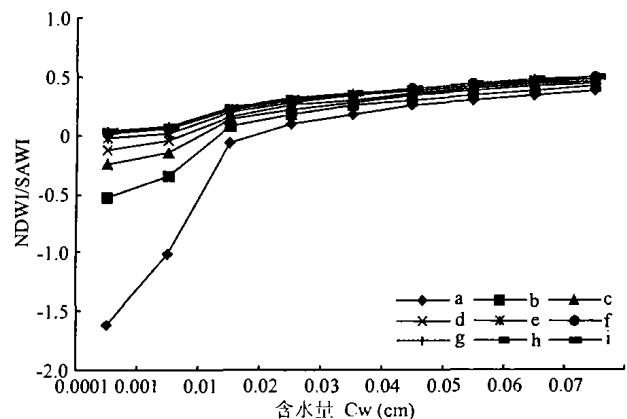


图 3 NDWI/SAWI 在不同叶面积指数和 C_w 下的分布曲线
Fig. 3 Curves of NDWI/SAWI under different LAI and water content.
a) LAI=1.5; b) LAI=2.0; c) LAI=2.5; d) LAI=3.0; e) LAI=4.0; f) LAI=5.0; g) LAI=6.0; h) LAI=7.0; i) LAI=8.0.

3.2.2 光谱指数 Ratio₀₉₇₅ 在冠层层次提取 C_w 的改进

在叶片层次,无论是用 FMC 还是 EWT 表征 C_w ,光谱指数 Ratio₀₉₇₅ 都能较好地提取 C_w .根据 PROSPECT 模拟数据绘制的不同 N 和 C_w 下的

Ratio₉₇₅变化曲线图(未给出)也说明,结构参数 N 对 Ratio₉₇₅的影响不大,Ratio₉₇₅可能是叶片层次提取 C_w 的一个普适光谱指数.为了找到叶片和冠层层次都能有效提取 C_w 的光谱指数,设想改进 Ratio₉₇₅.

图4给出了不同 C_w 和叶面积指数下的 SAWI 和 Ratio₉₇₅分布图.图中每一条弧线代表等 LAI 线,由原点向外 LAI 增大.可知,Ratio₉₇₅和 SAWI 都和 LAI 呈正相关,即低的 Ratio₉₇₅和 SAWI 对应于低的 LAI,反之亦成立.因此,那些代表裸露土壤的点将集中在散点图的原点附近,而代表浓密植被的点将集中在相反一侧.对于所有的覆盖水平(LAI), C_w 沿着近似相同中心的轴线分布,高值靠近 x 轴(SAWI),低值靠近 y 轴(Ratio₉₇₅).此外,代表相同 C_w 而不同 LAI 水平的点将沿着近似以裸露土壤为原点的直线分布.这些 C_w 的等值线相交于一点,并且随着覆盖度(LAI)的增加向外呈辐射状分布.图中只给出了 C_w 最高 0.07 cm 和最低 0.0001 cm 的两条等值线.

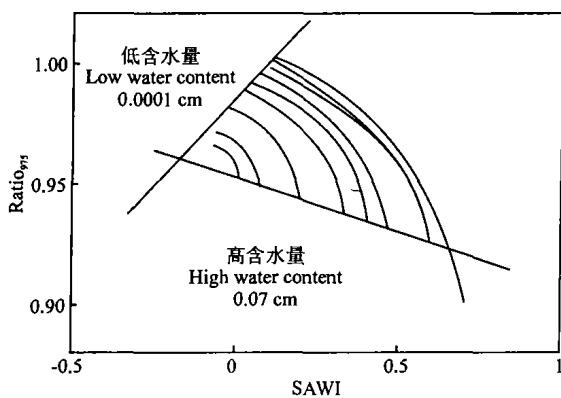


图4 不同 C_w 和 LAI 下 SAWI-Ratio₉₇₅分布图
Fig. 4 SAWI-Ratio₉₇₅ distribution under different water content and LAI.

鉴于此,提出一个冠层层次 C_w 提取模型.建模时,考虑了等 C_w 线的交点,该交点不是通常认为的 $(0,0)$,其结果将对 LAI 和土壤背景更不敏感.若该交点是原点 $(0,0)$,那么在低植被覆盖 $LAI \leq 1.0$ 时,Ratio₉₇₅/SAWI 同前述的 NDWI/SAWI 一样,不能用来提取冠层 C_w (图未给出).当 $LAI \geq 1.5$ 时,Ratio₉₇₅/SAWI 与 C_w 的关系图(未给出)表明,低 C_w ($C_w \leq 0.01$ cm)时 Ratio₉₇₅/SAWI 值较大的分散性无法用来提取冠层 C_w .因此,该指数只能提取 $LAI \geq 1.5$ 且 $C_w > 0.01$ cm 时的冠层 C_w ,具有一定局限性.若考虑图4的交点,目视判断为 $(-0.2, 0.96)$,绘制 $(Ratio_{975} - 0.96)/(SAWI + 0.2)$ 与 C_w

在 $LAI \geq 0.3$ 下的关系图5,标准差分析可知,在所有 C_w 下, $(Ratio_{975} - 0.96)/(SAWI + 0.2)$ 对 LAI 的敏感性降低,更加适合提取冠层 C_w .

为了精确求得冠层 C_w 与 Ratio₉₇₅ 和 SAWI 的函数关系,考虑图4的交点,目视图5的趋势线以倒数关系为宜.因此,设 $C_w(y)$ 与 Ratio₉₇₅ 和 SAWI 的函数关系式为:

$$y = \frac{a'}{\frac{Ratio_{975} - c'}{SAWI - b'} - d'} + e' \quad (7)$$

其中, (b', a') 为假设的图4中的交点.为了方便用 PROSPECT + SAILH 模拟数据通过最小二乘法拟合该多项式,将(7)化简成:

$$y = (a SAWI - b)/(Ratio_{975} - c SAWI - d) + e \quad (8)$$

结果是 $a = 0.1566$, $b = -0.0066$, $c = 1.215$, $d = 1.0194$, $e = 0.1622$.通过(8)式拟合结果与 PROSPECT + SAILH 模拟数据(LAI 从 0.3 到 8.0, C_w 从 0.0001 cm 到 0.07 cm)的相关系数是 0.654.

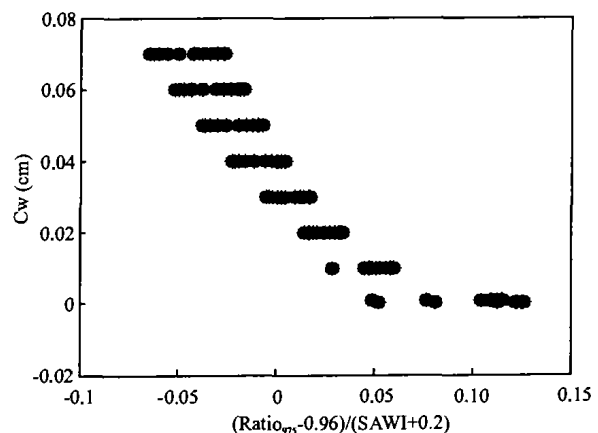


图5 LAI ≥ 0.3 时 C_w 与 $(Ratio_{975} - 0.96)/(SAWI + 0.2)$ 关系图
Fig. 5 Water content and $(Ratio_{975} - 0.96)/(SAWI + 0.2)$ correlation under LAI ≥ 0.3 .

4 结 语

准确提取植被叶片和冠层层次 C_w 是高光谱遥感重要的应用领域之一.最初研究者利用冠层光谱提取水分含量最直接的是统计方法.应用中发现,预测方程因时因地而异,受诸多因素影响,难以找到普适关系.这和该方法的机制有关.冠层光谱是植被和背景的混合光谱,用混合光谱与植被参数建立相关必然受到太多随机因素影响,难以给出理论上的解释.

光谱指数建立时考虑植被内部物理机制,有一定物理含义.而一个有效的光谱指数必须能将植被

信息与环境背景信息分离. 本文研究证实, 运用高光谱数据在叶片层次建立 C_w 估算模型是完全可能的. 理论研究表明, 在冠层层次, 受背景影响, 简单将某种光谱指数与 C_w 建立统计关系, 进而提取冠层 C_w 效果往往不好, 所以必须找到一种能够剔除背景影响的方法^[4,9].

相对于其他依赖一定实际土壤光谱特性的指数而言, 本文 SAWI 的确定不要任何土壤, 或特定场景信息. 因此, 为了去除环境背景的影响, 将某个水分光谱指数与 SAWI 结合, 可以建立冠层 C_w 的普适关系. 当然, 这里的普适并不是万能的, 是针对某种叶肉结构 N 或是特定含水量范围的普适关系.

研究表明, FMC、EWT 表示含水量时对变量的敏感性不同, 当应用不同的遥感数据源时, 对这两个量应有所选择. 另外, 本文是基于高光谱实测和模型模拟数据的研究, 用不同类型图像数据源验证本文所得结论, 是今后的研究方向之一.

参考文献

- 1 Aldakheel YY, Danson FM. 1997. Spectral reflectance of dehydrating leaves: Measurements and modeling. *Int J Remote Sensing*, 18(17):3683~3690
- 2 Baret F, Guyot G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing Environ*, 35(2):161~173
- 3 Burgan RE. 1996. Use of remotely sensed data for fire danger estimation. *EARSel Adv Remote Sensing*, 4(4):1~8
- 4 Ceccato P, Gobron N, Flasse S, et al. 2002. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1 Theoretical approach. *Remote Sensing Environ*, 82(2):188~197
- 5 Ceccato P, Flasse S, Tarantola S, et al. 2001. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing Environ*, 77(1):22~33
- 6 Chuvieco E, Deshayes M, Stach N, et al. 1999. Short-term fire risk: Foliage moisture content estimation from satellite data. In: Chuvieco E ed. *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. Berlin: Springer (University of Alcalá, Spain). 228
- 7 Danson FM, Steven MD, Malthus TJ, et al. 1992. High-spectral resolution data for determining leaf water content. *Int J Remote Sensing*, 13(3):461~470
- 8 Elvidge CD. 1990. Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. *Int J Remote Sensing*, 11(11):1775~1795
- 9 Fourty T, Baret F. 1997. Vegetation water and dry matter contents estimated from top-of-the-atmosphere reflectance data: A simulation study. *Remote Sensing Environ*, 61(1):34~45
- 10 Gao BC. 1996. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing Environ*, 58(3):257~266
- 11 Goetz AFH, Vane G, Solomon JE, et al. 1985. Imaging spectrometry for earth remote sensing. *Science*, 228(4704):1147~1153
- 12 Gond V, De Pury DG, Veroustraete F, et al. 1999. Seasonal variations in leaf area index, leaf chlorophyll, and water content; scaling-up to estimate fAPAR and carbon balance in a multilayer, multi-species temperate forest. *Tree Physiol*, 19(5):673~679
- 13 Hardisky MA, Klemas V, Smart RM. 1983. The influence of soil salinity, growth form and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogramm Eng Remote Sensing*, 49(1):77~83
- 14 Hosgood B, Jacquemoud S, Andreoli G, et al. 1995. Leaf Optical Properties Experiment 93 (LOPEX '93). European Commission, Joint Research Center Institute of Remote Sensing Applications, Ispra Italy.
- 15 Huete AR. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing Environ*, 25(3):295~309
- 16 Hunt ER, Rock BN. 1989. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing Environ*, 30(1):43~54
- 17 Inoue Y, Morinaga S, Shibayama M. 1993. Non-destructive estimation of water status of intact crop leaves based on spectral reflectance measurements. *Jap J Crop Sci*, 62(4):462~469
- 18 Jacquemoud S, Baret F. 1990. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing Environ*, 34(1):75~91
- 19 Kramer PJ. 1983. *Water Relations of Plants*. New York: Academic Press. 1983
- 20 Li Y-J(李佑稷), Li J(李 菁), Chen J(陈 军), et al. 2004. Response of dolichomitriopsis diversiformis photosynthesis rate to light, air temperature and plant water content. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, 15(3):391~395 (in Chinese)
- 21 Mbow C. 1999. Proposition of a method for early fires planning using ground and satellite (NDVI/NOAA-AVHRR) data from Niokolo Koba National Park (Southeast Senegal). Poster Presentation in Proceedings of the Second International Symposium on Operationalization of Remote Sensing, 16~20 August 1999, ITC, Enschede, The Netherlands.
- 22 Peñuelas J, Filella I, Sweeney L. 1996. Cell wall elasticity and water index (R970/R900) in wheat under different nitrogen availabilities. *Int J Remote Sensing*, 17(3):373~382
- 23 Peñuelas J, Piñol J, Ogaya R, et al. 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *Int J Remote Sensing*, 18(13):2869~2875
- 24 Pu R, GE S, Kelly NM, et al. 2003. Spectral absorption features as indicators of water status in coast live oak (*Quercus agrifolia*) leaves. *Int J Remote Sensing*, 24(9):1799~1810
- 25 Qi J, Huete AR, Kerr YH, et al. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing Environ*, 48(2):119~126
- 26 Rondeaux G, Steven M, Baret F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing Environ*, 55(1):95~107
- 27 Royo C, Aparicio N, Villegas D, et al. 2003. Usefulness of spectral reflectance indices as durum wheat yield predictors under contrasting Mediterranean conditions. *Int J Remote Sensing*, 24(22):4403~4419
- 28 Tai P-D(台培东), Guo S-H(郭书海), Song Y-F(宋玉芳), et al. 2000. Comparison of physiological characteristics of different ecotype plants. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, 11(1):53~56 (in Chinese)
- 29 Tanner CB. 1963. Plant temperature. *Agron J*, 50(3):210~211
- 30 Ustin SL, Robert DA, Pinzon J, et al. 1998. Estimating canopy water content of chaparral shrubs using optical methods. *Remote Sensing Environ*, 65(3):280~291
- 31 Yan C-Y(颜春燕), Jiang G-M(蒋耿明), Wang C(王成), et al. 2003. Theoretical simulation of single leaf's optical characteristics. *J Remote Sens (遥感学报)*, 7(2):81~85 (in Chinese)
- 32 Zarco-Tejada PJ, Miller JR, Morales A, et al. 2004. Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops. *Remote Sensing Environ*, 90(4):463~476

作者简介 沈 艳,女,1977年生,博士生.主要从事植被高光谱遥感和全球变化研究,发表论文4篇. E-mail: dysy77@163.com; Tel:010-64889215