

基于野外双向反射信息利用反射模型反演土壤含水量研究

吕云峰¹ 孙仲秋² 赵云升¹

¹长春师范大学城市与环境科学学院, 吉林 长春 130032

²东北师范大学地理科学学院, 吉林 长春 130024

摘要 为了分析土壤含水量对双向反射的影响以及反演土壤含水量,研究了基于野外实测多角度高光谱数据,获取了双向反射模型的参数,并且通过模型计算值反演土壤含水量。通过分析在3个波段以及不同角度反演的模型参数与含水量之间的关系,发现在不同角度利用模型反演土壤含水量的结果具有差异性;并且在865 nm处反演精度最稳定。这表明利用双向反射分布特性能够以较高的精度反演土壤含水量,同时也应该考虑方向反射对反演精度的影响。

关键词 遥感;土壤;含水量;双向反射特性

中图分类号 TP79 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0328001

Study on Inverting Soil Moisture Content Based on the Field Bidirectional Reflectance Information with the Reflection Model

Lü Yunfeng¹ Sun Zhongqiu² Zhao Yunsheng²

¹College of Urban and Environmental Sciences, Changchun Normal University, Changchun, Jilin 130032, China

²School of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun, Jilin 130024, China

Abstract In order to invert the soil moisture content and analyze the influence of soil moisture content on the bidirectional reflectance, the parameters of bidirectional reflectance model are obtained based on the multi-angle hyper spectral data in the field, and the soil moisture content using the calculated values is inverted. The relationship between model parameters in three wavelengths and different directions and moisture content is analyzed, the differences of inverting soil moisture content results based on model in different directions are found, and the inverting accuracy is stablest at 865 nm. The result suggests that based on the bidirectional reflectance distribution characteristics, the soil moisture content can be inverted with high accuracy. At the same time, the effect of the directional reflectance on the inversion accuracy should also be considered.

Key words remote sensing; soil; moisture content; bidirectional reflectance characteristics

OCIS codes 280.4991; 290.4210; 290.5820

1 引言

土壤含水量通过调整潜热通量将陆地表面的水文圈与能量平衡联系到一起,因此,准确评估土壤含水量在时间与空间上对地表生物物理过程的影响是非常重要的。尽管通过野外实地测量网格可以得到一些土壤含水量数据,但是仍然没有办法大范围获取准确的含水量信息。微波遥感利用后向散射反演公式或者极化信息得到土壤含水量^[1-2],已经成为一种有效的获取土壤含水量的方法。但是其时间与空间分辨率比较低。因此,光学遥感在反演土壤含水量上的应用引起了研究者的重视,尤其是利用双向反射分布特性方面^[3]。

收稿日期: 2014-10-14; 收到修改稿日期: 2014-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(41201343, 41401379)、吉林省科技厅自然科学基金(20140101212JC)

作者简介: 吕云峰(1977—),男,博士,副教授,主要从事偏振光、定量遥感、遥感应用等方面的研究。

E-mail: lvyf1977@163.com

土壤含水量不仅能直接引起土壤中能量的变化,同时也能改变陆地表面的反射、吸收以及发射特性。关于研究土壤反射信息与含水量之间关系的方法主要包括两种:1)在其他影响因素固定或者忽略的前提下,直接建立土壤的光谱特性与土壤表面含水量之间的回归关系;2)基于主成分分析方法建立两者之间的关系^[4]。这些方法都是利用经验模型计算土壤含水量,通常只考虑入射角度与探测角度^[5],而且大多数是在实验室得到的,因此很难直接用来完成遥感反演含水量的研究。

土壤表面的双向反射分布模型中没有关于土壤含水量的参数,这也限制了它在利用遥感数据反演土壤含水量上的应用。为了研究复杂颗粒介质的散射特性,基于辐射传输理论的 Hapke 模型^[6]已经得到一些研究人员的认可。随后被改进,得到新的双向反射模型^[7],并且比原有的模型更准确。根据这些研究,双向反射模型在反演土壤物理特征参数上也取得了一定的进展^[8-9],其中包括土壤含水量^[3]。由于含水量的变化会改变颗粒表面对光的散射和吸收,也就意味着土壤表面反射方向的反射信息也会变化,而双向反射模型中的单次散射反照率与方向反射信息之间存在定量关系。因此,本文将土壤含水量引入到土壤的双向反射模型中,并且通过实际测量值来反演双向反射模型的参数,最后依据计算的双向反射值量化与含水量之间的关系。

2 原理与方法

使用的土壤双向反射模型依据 Jacquemoud 等^[7]得出的包含 6 个自由参数的简单的计算公式。其中,土壤的双向反射系数可以表示为

$$r(i, e, \varphi) = \frac{\omega}{4} \frac{1}{\cos i + \cos e} \{P(g)[1 + B(g)] + H(\cos i)H(\cos e) - 1\}, \quad (1)$$

式中各个部分可以表示为

$$B(g) = \frac{1}{1 + (1/h)\tan(g/2)}, \quad (2)$$

$$P(g) = 1 + b \cos g + \frac{c(3 \cos^2 g - 1)}{2} + b' \cos g' + \frac{c'(3 \cos^2 g' - 1)}{2}, \quad (3)$$

$$H(x) = \left[\frac{1 + 2x}{1 + 2\sqrt{(1 - \omega)x}} \right], \quad (4)$$

$$\cos g = \cos i \cos e + \sin i \sin e \cos \varphi, \quad (5)$$

$$\cos g' = \cos i \cos e - \sin i \sin e \cos \varphi, \quad (6)$$

式中 i 为太阳入射天顶角, e 为观测天顶角, φ 为探测方向相对入射方向的方位角, ω 为单次散射反照率, g 为入射光与出射光方向的相角, g' 为镜面反射与出射光之间的夹角, $B(g)$ 为后向散射光, 与 h 、 g 有关, h 为测量表面的粗糙度, 该值越大表面越光滑。除了 ω 、 h 之外, 还有四个未知参数, b 、 c 、 b' 和 c' 分别表示目标表面以前向或者后向散射为主, 如果 b 与 c 的值大于 b' 与 c' 的值, 则表示后向散射为主, 相反, 则表示前向散射为主; 如果 b 、 c 、 b' 和 c' 的值相似, 则表示混合散射。

在利用反射信息表示含水量方面, 主要是通过饱和液态水厚度来表示, 这是因为饱和液态水厚度 k 与土壤含水量是相等的。随后, 根据 Beer-Lambert 定律通过土壤含水量计算其反射比值

$$r_w(i, e, \varphi) = r_0(i, e, \varphi) \times \exp(-\alpha k), \quad (7)$$

式中 α 为吸收系数, k 为土壤含水量等效水厚度。 $r_0(i, e, \varphi)$ 为干土的反射系数, $r_w(i, e, \varphi)$ 为湿土的反射系数。水在 0.4~1.1 μm 波段反射的吸收系数 α 依据 Segelstein 的实验室结果^[10]。 $r_0(i, e, \varphi)$ 是直接利用光谱仪得到的干土反射系数值, $r_w(i, e, \varphi)$ 是通过反演得到的模型计算出来的结果。 $r_0(i, e, \varphi)$ 在野外测量过程中为半球方向反射系数(HDRF), 可以表示为在相同的观测、入射条件下, 同样大小面积沙土表面的反射辐射通量 dL' 与标准白板反射辐射通量 dL 的比值, 表示为

$$r_0(i, e, \varphi) = \frac{dL'(i, \varphi; e, \varphi')}{dL(i, \varphi; e, \varphi')}. \quad (8)$$

测量的反射数据包括干沙土表面与不同含水量沙土表面的反射信息, 不同含水量沙土的反射系数也是基于(8)式测量得到, 为了与干沙反射进行区分, 用 r 表示。不同含水量沙土与自然干沙土的反射信息测量是

在长春市东北方向龙泉北站附近空旷地进行,测量时间分别为2014年8月8日与2014年8月9日,测量时天气晴朗无云,微风,地理坐标为43°56′08″N,125°23′50″E。测量仪器为ASD FS3地物光谱仪,测量光谱范围350~1100 nm;以及便携式多角度测量装置,可以实现不同角度测量沙土的反射信息,该装置已经应用在积雪反射信息测量上^[1]。在测量数据过程中,将沙土装在直径为0.35 m、高为0.15 m的圆柱形容器中,随后添加不同量的水,等待5 min,取出一部分沙土进行水分含量计算,其余部分作为反射信息测量样品。最后得出四个含水量结果(4.77%,5.28%,10.55%,16.87%)。在测量过程中为了保持沙土表面的自然状态,没有对表面进行任何处理。在实验过程中为了避免沙土表层水分的快速流失,将每个含水量的样品准备了5份,每一个探测角测量结束后更换一个样品,其余样品则使用黑色塑料板进行覆盖,由于每个角度测量的时间为5 s,研究过程中忽略测量时水分流失对反射信息的影响。

3 结果与分析

3.1 干沙土与湿沙的双向反射特性

依据(8)式的定义,在野外环境下测量了干沙土与不同含水量沙土表面的HDRF。图1为干沙土与不同含水量沙土在350~1100 nm波段的HDRF,其中,颜色最深的表示干沙土的反射光谱曲线,颜色最浅的为含水量16.87%的沙土的反射光谱曲线,其他含水量依次排列。图1测量过程中的太阳入射天顶角为35°,探测天顶角为40°,相对入射方向的探测方位角为150°。从图1中可以发现,随着含水量的增加,在350~1000 nm波段范围内,沙土的反射系数整体降低,而且随波长的增加,降低的趋势越明显。这一规律与Jacquemoud等^[7]的研究结果一致。

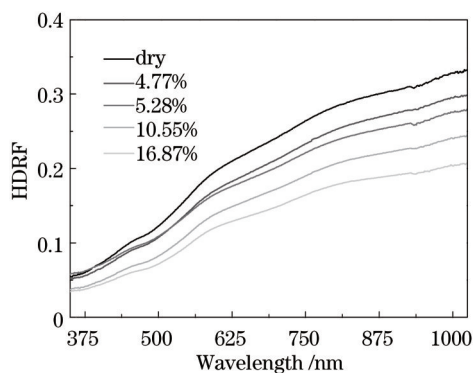


图1 干沙土与不同含水量沙土的HDRF光谱曲线

Fig.1 HDRF spectral curves of dry sand and sand with different moisture contents

为了研究含水量与HDRF之间的关系,选择了3个波段来反演沙土含水量,分别为560,670,865 nm。这是由于多角度探测器(POLDER)上带有这3个波段的探测器。图2与图3为在三个波段下野外测量结果,其中方位角0°表示后向散射方向,180°表示前向散射方向;图中心表示垂直探测方向,在测量过程中探测天顶

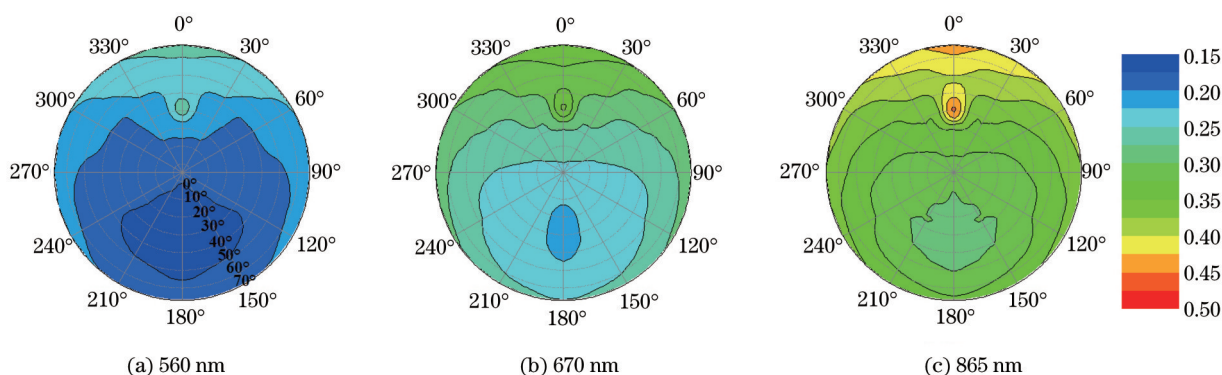


图2 干沙土在不同波段实际测量双向反射分布特性

Fig.2 Bidirectional reflectance distribution of dry sand at different wavelengths measured in fact

角的间隔为5°,最大探测天顶角为70°。通过图2的测量结果可以发现,在主平面内,干土出现了后向散射峰值,即热点效应,而前向散射方向的反射系数先减小后增加,这一变化规律与前人的研究结果相同^[7,12-13]。图3为与图2相同探测条件下,含水量为16.87%沙土的双向反射分布图,通过两图的对比可以发现,随着含水量的增加,反射系数整体降低;同时含水沙土的双向反射分布特性也有所变化,即前向散射方向与后向散射方向之间的差异变小。这是因为沙土表面后向散射峰值主要是多重散射引起的,沙土中的水分使多次散射的次数降低,所以后向散射方向与前向散射方向反射系数的差异就变小。在此过程中又发现,含水量越大,前向散射越明显。

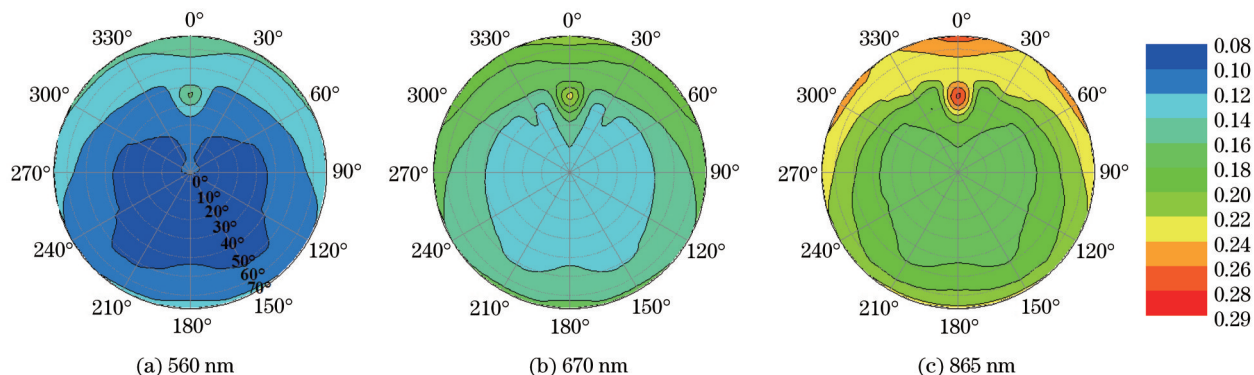


图3 含水量为16.87%沙土在不同波段实际测量双向反射分布特性

Fig.3 Bidirectional reflectance distribution of sand with moisture content of 16.87% at different wavelengths measured in fact

3.2 模型参数反演与土壤含水量计算

为了证明模型计算值具有现实意义,通过与实际测量值进行对比,来确定研究不同含水量沙土表面的反射特性对遥感技术估算沙土含水量具有一定意义。表1为3个不同含水量沙土在不同波段对应的双向反射模型参数值,表1中的各个参数是基于实际测量得到的不同含水量沙土表面的双向反射系数 r ,通过调整公式中 ω 、 h 、 b 、 c 、 b' 和 c' 这6个参数使(9)式中用来表示测量值与计算值之间的差异最小,从而得到表1中的各个参数,即反演得到的模型参数。均方根误差表示模拟计算值与真实测量值之间的偏差:

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r - r_{md})^2}{n_i}}, \quad (9)$$

式中 r 表示实际测量值, r_{md} 表示模拟计算值, n_i 表示测量数据个数减去模型参数。在确定模型参数时,参照Yang等^[3]计算时 E_{rms} 取值范围小于0.02,确保计算值与真实值之间的差异较小。图4和图5分别为干沙土和含水量为16.87%的沙土计算得到的双向反射分布特性结果。从双向反射模型的参数来看,随着含水量的增加, b 、 c 与 b' 、 c' 之间的差异减小,说明后向散射与前向散射所占的比例差异减小。

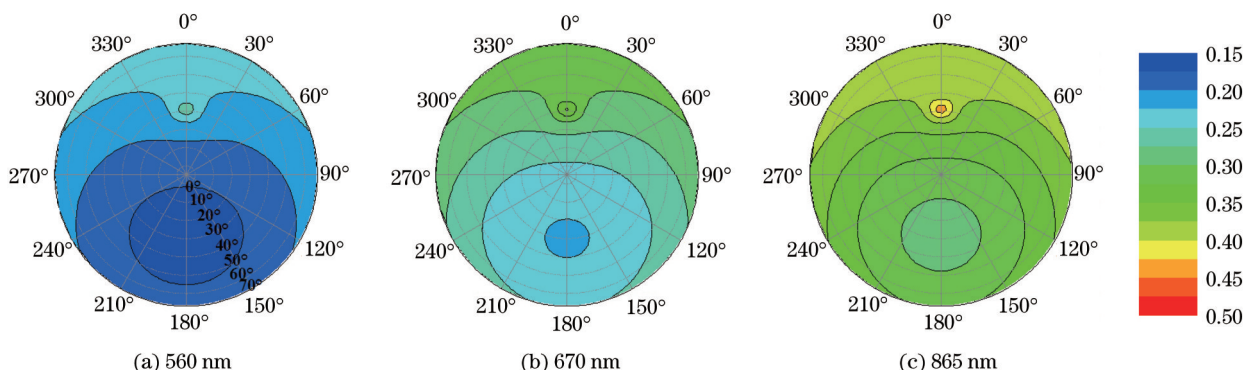


图4 干沙土在不同波段用反射模型计算得到的双向反射分布特性

Fig.4 Bidirectional reflectance distribution of dry sand at different wavelengths computed using the reflection model

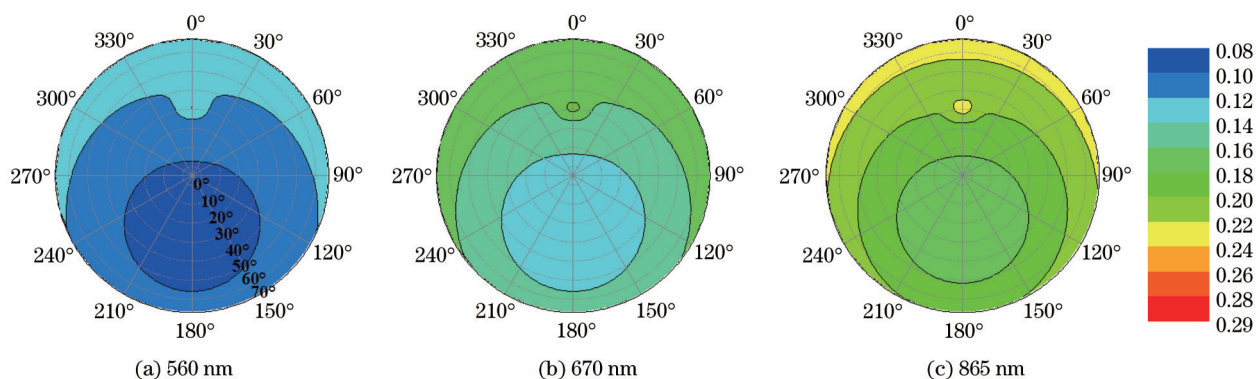


图5 含水量为16.87%沙土在不同波段用反射模型计算得到的双向反射分布特性

Fig.5 Bidirectional reflectance distribution of sand with moisture content of 16.87% at different wavelengths computed using the reflectance model

表1 双向反射模型参数以及 E_{rms}

Table 1 Parameters of bidirectional reflectance model and E_{rms}

Moisture content	Wavelength /nm	ω	h	b	c	b'	c'	E_{rms}
Dry sand	560	0.4149	0.0256	0.1646	0.1236	0.0121	-0.2879	0.0046
	670	0.5289	0.0242	0.1715	0.1195	0.0318	-0.3012	0.0058
	865	0.6458	0.0221	0.1601	0.0785	0.0392	-0.3292	0.0075
5.28%	560	0.3224	0.0402	0.1538	0.1285	-0.0568	-0.3238	0.0064
	670	0.4358	0.0216	0.1721	0.1025	-0.1285	-0.3526	0.0085
	865	0.5485	0.0345	0.0598	0.0956	-0.1358	-0.3765	0.011
16.87%	560	0.2452	0.0152	0.1538	0.0135	0.0572	-0.3462	0.0062
	670	0.3298	0.0142	0.1183	0.0152	0.0698	-0.3228	0.0081
	865	0.4201	0.0101	0.0528	0.0278	0.0837	-0.3318	0.01

在确定模型参数后,根据模型计算不同含水量沙土的双向反射系数,代入(7)式中,并且依据实际测量的干沙土的双向反射系数计算出土壤含水量等效水厚度 k ;随后建立土壤含水量与 k 之间的回归关系,发现两者之间存在很好的线性关系,图6为560 nm垂直方向得到的结果,与研究者们以往所取得的结果一致^[3]。但是先前的研究中没有考虑反射信息的方向性对反演沙土含水量的影响。研究过程中发现,考虑不同方向的反射信息用来反演含水量也具有很高的可信度,结果如表2所示。

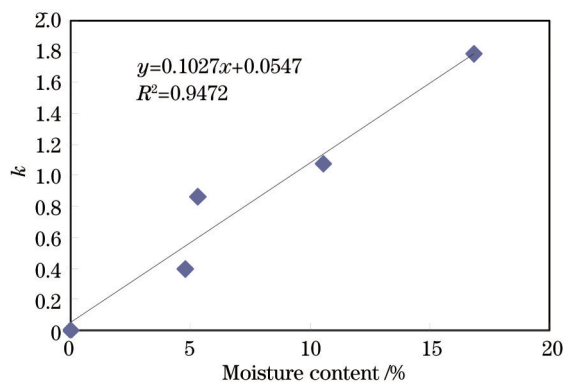


图6 560 nm垂直方向沙土含水量与 k 之间的关系

Fig.6 Relationship between sand moisture content and k at 560 nm in nadir direction

表2为每个波段在不同探测方向上土壤含水量与计算得到的等效水厚度 k 之间的相关系数,它们之间的关系是线性的。从表2中可以发现,在入射主平面内,随着探测角天顶角的增加,相关系数在逐渐变小。这主要是由于在大的探测角度计算得到的反射信息与实际测量值之间的差异增加,从而引起了相关系数变小。虽然在垂直观测方向相关性最强,但是在前向散射方向其他角度平均相关系数 R^2 也达到了0.85以上。

这就说明,利用双向反射模型可以计算出沙土的含水量,同时也可以更多探测方向来实现利用双向反射信息反演土壤含水量。依据标准差分析各个波段在不同探测方向的相关系数可以发现,865 nm波段得到的回归系数的离散程度最小,也就意味着利用该波段反演含水量的稳定性最好。

表2 不同探测方向上土壤含水量与 k 之间的相关系数Table 2 Correlation coefficient between moisture content and k at different detecting directions

Viewing zenith angle/ Azimuth angle	Wavelength /nm	R^2
Nadir direction	560	0.9472
Forward 20°/ in the principal plane	560	0.9445
Forward 30°/in the principal plane	560	0.9346
Forward 40°/in the principal plane	560	0.9251
Forward 70°/in the principal plane	560	0.8539
Nadir direction	670	0.9436
Forward 20°/in the principal plane	670	0.9341
Forward 30°/in the principal plane	670	0.9239
Forward 40°/in the principal plane	670	0.9116
Forward 70°/in the principal plane	670	0.848
Nadir direction	865	0.9393
Forward 20°/in the principal plane	865	0.9275
Forward 30°/in the principal plane	865	0.9213
Forward 40°/in the principal plane	865	0.9062
Forward 70°/in the principal plane	865	0.8902

4 结 论

基于野外实测数据以及现有的双向反射模型研究了不同含水量沙土表面的双向反射分布特性,建立了半球方向反射信息与沙土含水量之间的关系。根据实验结果得出以下结论。与自然状态下风干沙土表面的半球方向反射分布特性相比而言,含水沙土表面的半球方向反射分布呈现出较强的前向散射特性,而且出现含水量越大,前向散射特性越明显的趋势。现有的双向反射模型可以很好地计算出不同含水量沙土表面的反射信息,而且可以依据所提供的参数来进行修改,从而实现了对含水量沙土双向反射分布特性的模拟。在利用反射信息反演沙土含水量方面,通过模型计算值可以很好地反演出土壤含水量;当考虑方向反射信息反演含水量时,865 nm波段的稳定性最好。这就说明,在以后利用反射信息反演沙土含水量时可以有更多的选择,尤其是多角度遥感信息的出现^[14-15],将会促进对沙土含水量反演的发展。

实验得出的结果不仅证明了Yang等^[3]研究结果,也通过大量的实测数据将双向反射模型在反演沙土含水量方面的研究扩展到多角度遥感方面,证明了其参考价值。由于实验是通过实测样本得到的模型参数,适用于在本文描述环境下对双向反射与含水量之间关系的研究,若对不同地区进行研究,则可以参照此方法进行实际测量并且得到不同的模型参数来完成对沙土表面双向反射特性的描述。实验中的波长范围为350~1100 nm,因此不能得到其他短波及近红外波段与沙土含水量之间的关系。在以后的扩展研究中将以短波及近红外波段为主,分析是否能够更准确的反演沙土的含水量。同时,在未来的研究过程中,应该考虑粗糙地表^[16-17]是否会对反演含水量带来影响,为反演土壤含水量提供完整的技术与理论支持。

参 考 文 献

- 1 N Baghdadi, N Boyer, P Todoroff, *et al.*. Potential of SAR sensors TerraSAR-X, ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS for monitoring sugarcane crops on Reunion Island [J]. *Remote Sens Environ*, 2009, 113(8): 1724-1738.
- 2 A T Joseph, R van der Velde, P E O'Neill, *et al.*. Soil moisture retrieval during a corn growth cycle using L-band (1.6 GHz) Radar observations [J]. *IEEE T Geosci Remote*, 2008, 46(8): 2365-2374.
- 3 G Yang, C Zhao, W Huang, *et al.*. Extension of the Hapke bidirectional reflectance model to retrieve soil water content [J]. *Hydrol Earth Syst Sc*, 2011, 8(2): 3667-3692.

- 4 J C Price. On the information content of soil reflectance spectra [J]. *Remote Sens Environ*, 1990, 33(2): 113–121.
- 5 C L Walthall, J M Norman, J M Welles, *et al.*. Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces [J]. *Appl Opt*, 1985, 24(3): 383–387.
- 6 B W Hapke. Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. Theory [J]. *J Geophys Res*, 1981, 86(B4): 3039–3054.
- 7 S Jacquemoud, F Baret, J F Hanocq. Modeling spectral and bidirectional soil reflectance [J]. *Remote Sens Environ*, 1992, 41(2–3): 123–132.
- 8 A Chappell, T Zobeck, G Brunner. Using bi-directional soil spectral reflectance to model soil surface changes induced by rainfall and wind-tunnel abrasion [J]. *Remote Sens Environ*, 2006, 102(3–4): 328–343.
- 9 Y Wu, P Gong, Q Liu, *et al.*. Retrieving photometric properties of desert surfaces in China using the Hapke model and MISR data [J]. *Remote Sens Environ*, 2009, 113(1): 213–223.
- 10 D Segelstein. *The Complex Refractive Index of Water* [D]. Kansas City: University of Missouri–Kansas City, 1981.
- 11 Y Lü, Z Sun. The reflectance and negative polarization of light scattered from snow surfaces with different grain size in backward direction [J]. *J Quant Spectrosc Ra*, 2014, 133: 472–481.
- 12 J Peltoniemi, T Hakala, J Suomalainen, *et al.*. Polarised bidirectional reflectance factor measurements from soil, stones and snow [J]. *J Quantum Spectrosc Ra*, 2009, 110(17): 1940–1953.
- 13 Z Sun, J Zhang, Z Tong, *et al.*. Particle size effects on the reflectance and negative polarization of light backscattered from natural surface particulate medium: soil and sand [J]. *J Quantum Spectrosc Ra*, 2014, 133: 1–12.
- 14 P Litvinov, O Hasekamp, B Cairns, *et al.*. Reflection models for soil and vegetation surfaces from multiple-viewing angle photopolarimetric measurements [J]. *J Quantum Spectrosc Ra*, 2010, 111(4): 529–539.
- 15 F Maignan, F M Breon, E Fedele, *et al.*. Polarized reflectances of natural surfaces: Spaceborne measurements and analytical modeling [J]. *Remote Sens Environ*, 2009, 113(12): 2642–2650.
- 16 Gao Ming, Song Chong, Gong Lei. Analysis of polarization characteristics about rough surface light scattering based on polarized bidirectional reflectance distribution function [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1213002.
高明, 宋冲, 巩蕾. 基于偏振双向反射分布函数的粗糙面光散射偏振特性研究 [J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1213002.
- 17 Li Junlin, Zhang Liming, Chen Hongyao, *et al.*. Development of BRDF absolute measuring device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0528002.
李俊麟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制 [J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0528002.

栏目编辑: 苏 岑