

不同粒径沙地表面双向反射特性研究*

赵子傑 赵云升†

(东北师范大学地理科学学院, 长春 130024)

(2014年3月11日收到; 2014年5月25日收到修改稿)

由于自然环境遭到人为因素的破坏, 我国沙地面积正在逐步扩大, 确定沙地的性质与面积已经成为改善环境的重要的指示性信息. 遥感技术以其特有的优势可以为沙地监测提供科学有效的信息. 本文以不同粒径沙地表面为研究对象, 测量其双向反射信息, 分析粒径大小对沙地表面反射特性的影响; 基于现有的模型对不同粒径大小沙地表面的反射信息进行计算, 与实测信息进行对比. 研究表明, 粒径大小对沙地表面反射的反射分布特性有明显的影响; 通过对比测量的反射信息与模型计算的反射信息发现, 利用双向反射模型可以准确地计算出不同粒径沙地表面的反射信息. 本研究不仅确定了粒径大小对反射信息的影响, 也为遥感技术估算沙地表面粒径大小以及研究地表固有光学特性提供参考.

关键词: 双向反射, 沙地, 多角度, 粒径**PACS:** 78.20.Bh, 78.20.Ci**DOI:** 10.7498/aps.63.187801

1 引言

沙地的表层被沙覆盖, 而且植被较少, 通常处在半干旱气候地区. 由于人类活动使得沙地的面积正在逐步扩大, 对环境的负面影响逐渐攀升. 大面积的沙地在大气与其表面之间的能量交换也起到非常重要的作用, 从而影响地球系统的辐射能量平衡. 沙地表面沙子粒径大小是评价沙地自身特性的重参数, 粒径大小的变化也会对其表面的反射有影响, 从而会影响利用遥感技术在土地调查、土地退化评估等方面的应用, 也成为对农业、生态以及水文研究提供服务的依据^[1-3].

在土地变化评价过程中, 地表的反射特性已经逐步成为预测地表性质的重要依据^[4]. 利用可见光近红外光谱仪估算一系列的土壤特性已经成为一种非常有效且快速的方法. 例如表征土壤特性与量化其空间差异, 包括评价土地的质量、污染和退化情况^[5,6]. 不过这些都是基于经验模型的研究.

反射光的方向性在描述地表特征过程中具有

诊断性意义. 表面的各向异性特征为表征地表参数提供了额外的信息源, 同时也可以帮助研究者更好地了解地球表面的物理特征. 不同种类裸土表面的各向异性反射信息已经被一些研究者测量^[7]. 沙地表面通常由于风的影响, 会形成高低不平的表面, 从而使得各向异性特征变得更复杂. Shoshany^[8]利用经验模型研究了沙漠中路面的反射特性, 结果表明其后向散射区域具有明显的反射峰值. 随后, Kamieli 和 Cierniewski^[9]利用几何反射模型推断了沙漠岩石表面的粗糙度. 尽管这些研究可以表示出沙地表面的双向反射特征, 但是以上这些方法还不能表达沙地表面双向反射的物理机制^[10].

沙地表面的双向反射特性是遥感应用的基础, 尤其是利用辐射传输理论解释沙质表面的反射特征过程. 值得注意的是由 Hapke^[11,12]基于辐射传输理论建立的模型, 旨在解决一些较为复杂的问题, 如土壤的形状、粒径大小、方向等. 在随后的研究中, 研究者进一步扩展并且改进了 Hapke 模型, 利用新的模型来研究土壤的物理特性^[13,14]. 其中, Chappell 等^[15]应用 Hapke 模型研究了被风和雨侵

* 国家自然科学基金(批准号: 41271350)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhaoy975@163.com

蚀的沙地表面的辐射特性; Wu等^[10]将MISR数据与Hapke模型两者结合开展对中国西部不同类型沙漠地区模型参数的比较,并且证明了模型具有很好的精度.

由于多角度遥感技术的发展,例如像POLDER (polarization and directionality of the Earth's reflectances) 这样的星载多角度探测器为研究地表各向异性反射特征提供了很好的机会. 因此,需要更多关于地表反射特性的基础研究,才能更好地利用丰富的多角度遥感信息反演地表参数. 本研究主要测量不同粒径大小沙地表面的双向反射信息,分析粒径大小对其各向异性反射特征的影响,并且与Hapke模型计算值进行对比,为遥感技术估算沙地表面光学特性提供依据,同时也为反演沙地表面粒径大小提供了参考.

2 原理与方法

2.1 Hapke 模型描述

Hapke模型已经被广泛地应用在表示土壤表面双向反射特性,但是变得越来越复杂,现在已经采用多达9个参数来表示^[16]. 这里选用比较原始简单的推导公式,并且已经被Pinty等^[17]通过实际测量数据证明其有效性. 基于Hapke模型,土壤的双向反射 $r(\theta_s, \theta_o, \varphi)$ 可以表示为

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

式中 θ_s 表示太阳入射天顶角, θ_o 为探测天顶角, φ 为相对太阳方位的探测方位角; ω 为土壤的单次散射反照率; $P(g)$ 为相函数; $B(g)$ 为后向散射函数; $H(\cos \theta_s)H(\cos \theta_o) - 1$ 表示多次散射的贡献. 相角可以通过以下公式计算得到:

$$\cos(g) = \cos(\theta_s) \cos(\theta_o) + \sin(\theta_s) \sin(\theta_o) \cos(\varphi), \quad (2)$$

$$P(g) = 1 + b \cos(g) + c[(3 \cos^2 g - 1)/2], \quad (3)$$

$$B(g) = \frac{B_0}{1 + (1/h) \tan(g/2)}. \quad (4)$$

除了 ω 之外,在公式中还有四个未知参数, b, c, h 和 $S(0)$. b 和 c 是勒让德多项式中表达颗粒相函数

的系数, h 表示后向峰值的宽度,与介质的孔隙度有关; $S(0)$ 表示后向峰值的振幅^[10,14-17].

$$B_0 = \frac{S(0)}{\omega P(0)}, \quad (5)$$

$$H(x) = \left(\frac{1 + 2x}{1 + 2x\sqrt{1 - \omega}} \right), \quad (6)$$

其中, ω 可以通过与双向反射系数 r_m 之间的关系表示为

$$\omega = \frac{\left[1 - \left(\frac{1 - r_m}{1 + r_m} \right)^2 \right]}{\left[1 + \frac{b}{4} \left(\frac{1 - r_m}{1 + r_m} \right)^2 \right]}, \quad (7)$$

其中 r_m 为垂直方向测量得到的双向反射系数,可以表示为

$$r_m = \frac{dL'(\theta_s, 0^\circ, \varphi)}{dL(\theta_s, 0^\circ, \varphi)}, \quad (8)$$

dL' 为测量目标表面的辐射亮度, dL 为相同探测、入射条件下标准白板的辐射亮度,目标与标准白板被探测的面积相同,当 θ_o 为 0° ,即垂直方向.

对于在其他角度进行实际测量时,沙地表面的真实双向反射系数(r)可以表示为

$$r = \frac{dL'(\theta_s, \theta_o, \varphi)}{dL(\theta_s, \theta_o, \varphi)}. \quad (9)$$

(9)式中 dL' 与 dL 的定义与(8)式中的相同,唯一的区别是当入射角度 θ_s 不变时, θ_o 在测量过程中在改变,而且每变化一次均在相同探测几何条件下测量样品与标准白板的辐射亮度值,最后得到双向反射系数.

2.2 实验材料与方法

研究中所用的沙子来自科尔沁左翼中旗附近,地理坐标为 $45^\circ 02' 50'' N$, $121^\circ 49' 12'' E$. 采集的样品均在地表2 cm以上,并且记录当时空气的相对湿度为35%. 采集到的沙子样品经过一组土壤筛对其粒径进行筛选,最终确定了3个粒径等级,0.9 mm, 0.45 mm, 0.3 mm. 其中,0.9 mm粒径等级的沙子在筛选过程中利用两个孔径为0.9 mm的筛子得到,即两个筛子中间的沙子. 其余的粒径等级使用相同的方法得到.

随后,每个样品被装入一个圆柱形容器中,容器的直径为15 cm,高度为10 cm. 为了尽可能真实地模拟沙子的自然状态,在样品准备过程中没有对样品表面进行按、刮等操作,只有轻微的晃动,让沙

地表面变得平整. 得到的样品如图 1 所示. 由于本研究的沙子来自相同地点, 所以这里忽略样品的化学成分的差异, 只考虑其粒径大小. 测量环境与实际沙地表面的空气湿度相似, 实验室的空气相对湿度为 32%, 可以排除空气湿度改变对土壤含水量的影响. 在测量过程中, 光斑的直径为 10 cm, 为了确保在最大的倾斜角度进行测量时, 探测器的探测面积范围始终保持在光斑所照射的样品范围之内, 将测量视场角度调整至 10°.

研究过程中使用的光谱测量仪器为 ASD FS3 系列光谱仪, 结合东北师范大学实验室角度测量系统 (NENULGS)^[18] 对不同粒径沙子表面的反射信息进行测量. 该测量系统包括入射光源与探测架两个主要部分. 光源入射角度范围为 0°—90°, 可以在间隔 0.5° 变换角度. 探测方位角为 0—360°, 方位角的测量间隔为 0.5°, 探测角度方向在 ±90° 范围内自由倾斜, 精度为 0.2°. 通过测量方位与探测天顶角的变化, 可以实现对测量目标在 2π 空间反

射信息的获取^[18]. 研究过程中测量的方位角范围为 0—360°, 间隔为 15°, 探测天顶角范围为 0—60°, 测量间隔为 5°, 测量过程中入射天顶角为 45°. 排除绝对后向探测方向, 共在 150 个方向对三种不同粒径的沙地进行反射测量.

3 结果与分析

3.1 沙地表面的反射特性

研究中依据 (9) 式的定义测量了不同粒径沙地表面的双向反射信息. 图 2 是粒径大小为 0.45 mm 的沙地表面不同波段的反射系数随着探测角度的变化, 光源入射天顶角为 45°, 探测天顶角范围 0—60°, 在入射主平面向散射方向进行测量的 (入射主平面指探测方向与入射方向相同的方位, 即相对方位角度为 180°), 为了表示清楚, 这里选择 10° 为间隔不同波段情况下粒径大小反射系数随着探测角度变化的规律.

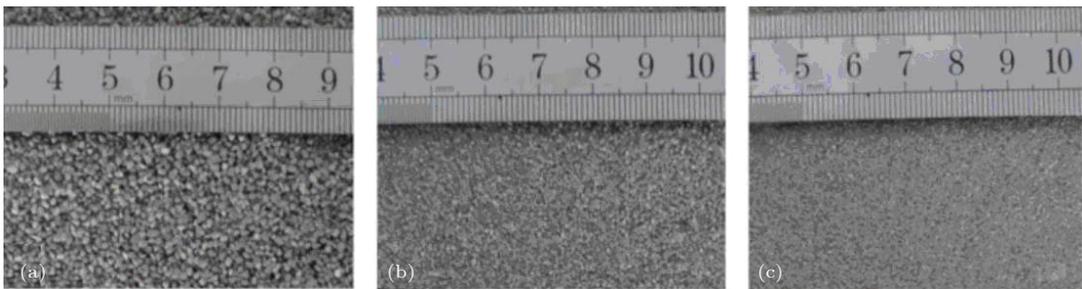


图 1 不同粒径沙子表面照片 (a) 直径为 0.9 mm; (b) 直径为 0.45 mm; (c) 直径为 0.3 mm

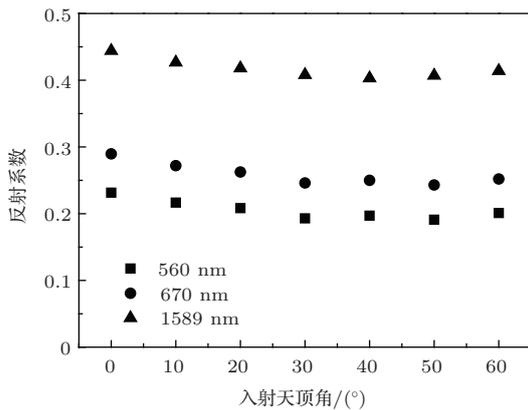


图 2 入射天顶角为 45° 时, 主平面内前向方向 0.45 mm 粒径大小不同波段的反射系数随着探测角度的变化

从图 2 中可以发现, 当入射天顶角不变时, 随着探测天顶角的增加, 反射先逐渐变小 (从 0°—40°), 后逐渐增加 (从 50°—60°). 这是由于随着探测角度的增加, 探测范围中包括由于沙子颗粒形

成的阴影面积会变大, 因此, 会出现随着探测天顶角的增加反射降低的现象. 而当探测角度增加到与入射角度相同时, 单次散射光成为被探测器获取的主要部分, 而且会随着探测角度的增加而变大^[19], 就会出现从 50° 增加到 60° 时反射会有所增加. 本研究中测量得到的结果与 Peltoniemi 等^[19] 的测量结果得出的规律相同.

3.2 不同粒径沙地表面的反射特性

为了研究不同粒径沙地表面的反射特性, 研究过程中对 3 个粒径等级沙地表面的反射光谱进行了测量. 结果如图 3 所示, 其中入射角度为 45° 与 60°, 探测方向为垂直方向. 通过图中直径分别为 0.9 mm, 0.45 mm, 0.3 mm 的反射光谱对比分析发现, 随着粒径的增加, 在相同条件下得到的反射光

谱曲线逐渐降低. 而且随着波长的增加, 粒径大小对反射影响越明显, 即在可见光波段差异较小, 近红外波段差异较大 [20].

随着粒径增加, 反射降低主要是由于不同粒径在相同入射条件下形成的阴影面积大小不同, 粒径越大, 相互遮蔽产生的阴影越大; 粒径越小形成的阴影面积越小, 因此在垂直方向测量过程中就会出现大粒径沙地面对应低反射的现象.

由于POLDER星载探测器与RSP (research scanning polarimeter) 机载探测器包含可见光到近红外波段, 本研究中选择其中三个波段进行分析:

560 nm, 670 nm, 1589 nm. 为了清楚地表示出粒径大小对双向反射信息的影响, 图4对应波段为560 nm, 图5对应波段为1589 nm, 均为在150个方向探测得到的不同粒径沙地表面的双向反射分布图. 图中从左到右依次为0.9 mm, 0.45 mm 和0.3 mm. 其中, 0°方位附近对应的后向散射方向, 180°方位附近为前向散射方向, 图中探测天顶角标注为0°—60°. 从图4中可以看出, 不同粒径大小对双向反射分布有较大影响. 出现随着粒径的增加, 反射降低总体降低的趋势; 而且粒径越小, 后向散射方向出现反射峰值越大.

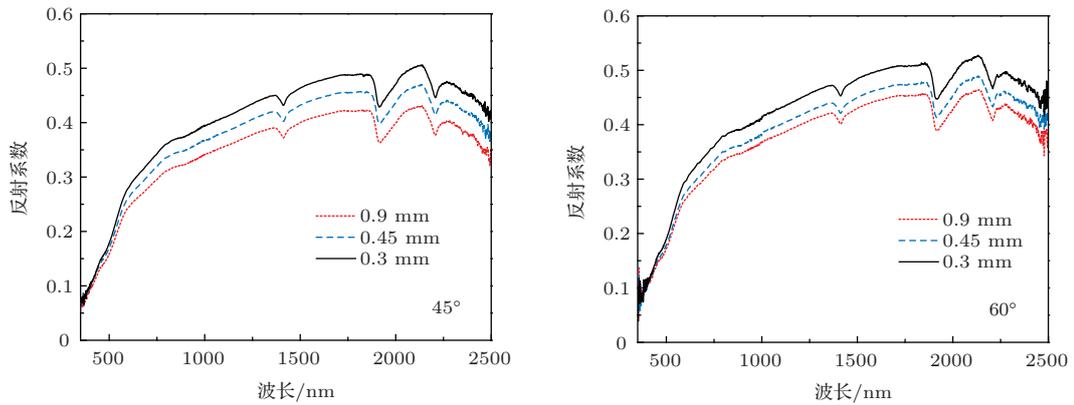


图3 入射天顶角为45°与60°, 垂直方向探测不同粒径沙地表面的双向反射光谱

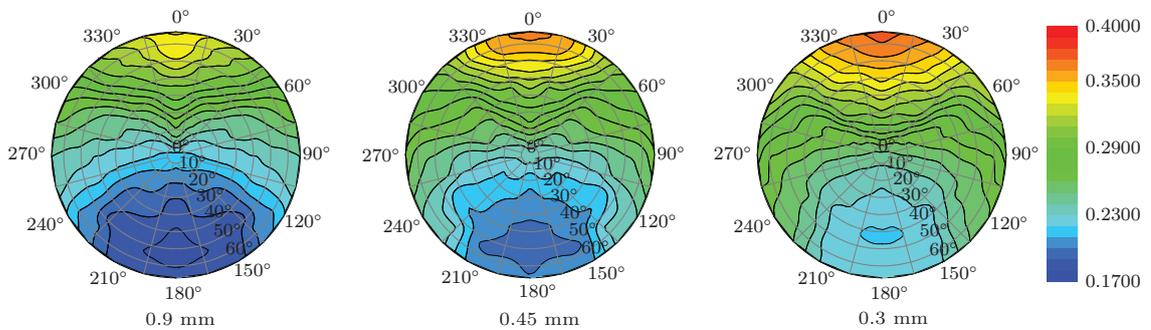


图4 (网刊彩色) 波长为560 nm、入射天顶角为45°时, 不同粒径沙地表面的双向反射分布

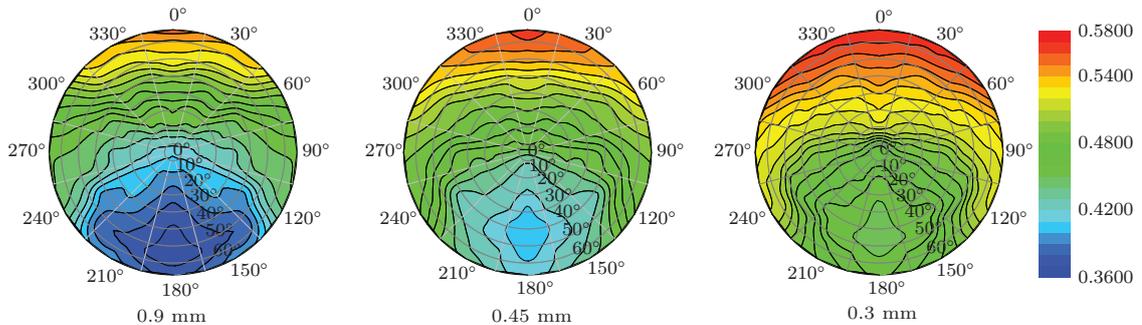


图5 (网刊彩色) 波长为1589 nm、入射天顶角为45°时, 不同粒径沙地表面的双向反射分布

在前向散射方向, 粒径越大, 对应反射特性变化越明显; 而在后向散射方向, 随着粒径的减小, 反射特性变化越明显. 这主要与不同粒径沙地表面的孔隙度有关. 由于沙子的粒径属于毫米级, 远远大于入射辐射的波长, 在相同体积情况下, 粒径越小, 孔隙度越低, 前向散射方向形成的阴影越小, 探测角度变化时测量范围内的阴影面积变化就相对较小, 从而使反射信息变化相对大粒径不明显. 对于沙地表面粒径越小, 形成的凸凹不平部分会越多, 因此, 后向散射方向探测时会有更多的小平面使探测器得到更多对应小相角情况的后向散射光, 从而增加后向散射方向的反射峰值, 这一解释已经被

Hapke通过数学公式形式表述^[12]. 其他波段与此相似, 这里不再复述.

3.3 实际测量值与Hapke模型计算值对比

在研究过程中, 为了证明测量值具有现实意义, 这里通过与Hapke模型计算值进行对比, 来确定不同粒径双向反射特性对遥感技术估算沙地表面光学特性的意义, 同时也为反演沙地表面粒径大小提供研究基础. 表1中为Hapke模型需要的各个参数的值, 其中 ω 为(8)式依据实际测量值计算得到的.

表1 Hapke模型各个参数值

粒径	波长/mm	ω	b	c	h	$S(0)$	$RMSE$
0.9 mm	560	0.5128	0.59625	-0.5753	0.33512	1.99	0.01133
	670	0.6392	0.5315	-0.5358	0.398	1.985	0.01565
	1589	0.8082	0.7258	-0.5095	0.9986	1.196	0.01765
0.45 mm	560	0.5725	0.7108	-0.5216	0.3402	1.982	0.00764
	670	0.6599	0.5568	-0.5168	0.4263	1.986	0.01065
	1589	0.8195	0.6986	-0.4865	0.8651	1.991	0.01037
0.3 mm	560	0.5997	0.6817	-0.5653	0.3605	1.996	0.01154
	670	0.6835	0.6023	-0.4862	0.4532	1.986	0.00985
	1589	0.8649	0.7569	-0.4657	0.8628	1.982	0.00866

$RMSE$ (均方根误差)表示模拟计算值与真实测量值之间的偏差:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_m - r_{md})^2}{n_f}}, \quad (10)$$

式中 r_m 表示实际测量值, r_{md} 模拟计算值, n_f 表示测量总数减去模型参数的数量. 在确定Hapke模型参数时, 参照Yang等^[14]的 $RMSE$ 结果, 即 $RMSE$ 小于0.02, 确保计算值与真实值之间的差异较小. 为了突出Hapke模型计算的双向反射值与实际测量得到的真实双向反射值之间的符合性, 将两者进行比较, 如图6所示. 其中横坐标为计算的反射值, 纵坐标为实际测量得到的反射值, 从图6以及表1的 $RMSE$ 可以看出, 测量值与计算值非常相似, $R^2 = 0.9797$.

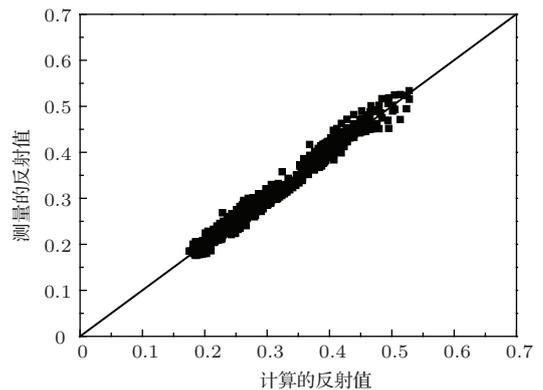


图6 测量值与计算值的比较, 测量波段如表1所示

4 结论与展望

基于对三个粒径沙地表面双向反射信息的测量结果表明, 不同粒径大小的沙地表面的双向反射特性有明显的差异, 粒径越大反射越低, 而且在近

红外波段降低趋势比可见光波段大. 粒径大小对沙地表面的双向反射分布也有很大的影响, 尤其是在前向和后向散射两个方向, 其中小粒径比大粒径的沙地表面在后向散射方向各向异性特征明显, 大粒径比小粒径沙地表面在前向散射方向各向异性特征明显.

通过该实验不仅研究了不同粒径大小沙地表面的方向反射特性, 同时扩展到了土壤表面的双向反射模型计算上, 即 Hapke 模型^[11,12,17]. 这里采用双向反射信息与单次反照率之间的定量关系, 沙地表面的粒径大小问题被引入到模型当中. 基于 150 个方向, 对三个粒径等级沙地表面双向反射信息的实际探测数据与模型计算值对比, 以及基于 RMSE 的精度分析可以证明, Hapke 的土壤双向辐射模型可以在考虑粒径大小的前提下进行计算.

在不考虑大气的前提下, 参列表 1 中的参数, 可以通过理论计算的反射值作为实际沙地反射信息的参照值, 从而估算出沙地表面的粒径大小. 本研究不仅确定了粒径大小对沙地表面双向反射的影响, 同时也基于理论模型证明了可以计算出不同粒径大小沙地表面的反射信息, 为沙地表面粒径大小的反演提供依据. 由于实际当中沙地表面粒径大小并不是单一的, 而且是不同粒径混合情况, 这将在以后的研究过程中逐步完成, 从而真正实现通过双向反射信息估算沙地表面粒径分布. 再者, 考虑大气或者云层的影响以及偏振特性对研究沙地表面反射特性是必要的^[21,22].

参考文献

- [1] Banninger D, Fluhler H 2004 *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sen.* **42** 1462
- [2] Liang S 1997 *Int. J. Rem. Sen.* **18** 3365
- [3] Nolin A W, Liang S 2000 *Rem. Sens. Rev.* **18** 307
- [4] Bilgili A V, Akbas F, van Es H M 2011 *Prec. Agr.* **12** 395
- [5] Idowu O J, van Es H M, Abawi G S, Wolfe D W, Ball J I, Gugino B K, Moebius B N, Schindelbeck R R, Bilgili A V 2008 *Plant Soil* **307** 253
- [6] Wu Y Z, Chen J, Ji J F, Tian Q J, Wu X M 2005 *Environ. Sci. Techn.* **39** 873
- [7] Privette J L, Myneni R B, Emery W J, Pinty B 1995 *J. Geophys. Res.* **100** 25497
- [8] Shoshany M 1993 *Remote. Sens. Environ.* **45** 15
- [9] Kamieli A, Cierniewski J 2001 *Adv. Spac. Res.* **28** 171
- [10] Wu Y, Gong P, Liu Q, Chappell A 2009 *Remote. Sens. Environ.* **113** 213
- [11] Hapke B W 1981 *J. Geophys. Res.* **86** 3039
- [12] Hapke B W 1984 *Icarus* **59** 41
- [13] Shepard M K, Helfenstein P 2011 *Icarus* **215** 526
- [14] Yang G J, Zhao C J, Huang W J, Wang J H 2011 *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **15** 2317
- [15] Chappell A, Zobeck T, Brunner G 2006 *Remiron. Sen. Enzron.* **102** 328
- [16] Helfenstein P, Shepard M K 2011 *Icarus* **215** 83
- [17] Pinty B, Verstraete M M, Dickinson R E 1989 *Remote. Sens. Environ.* **27** 273
- [18] Sun Z Q, Wu Z F, Zhao Y S 2014 *Rev. Sci. Inst.* **85** 014503
- [19] Peltoniemi J, Hakala T, Suomalainen J, Puttane E 2009 *J. Quant. Spectros. Rad. Transfer* **110** 1940
- [20] Sun Z, Zhang J, Tong Z, Zhao Y 2014 *J. Quant. Spectros. Rad. Transfer* **133** 1
- [21] Cheng T H, Gu X F, Chen L F, Yu T, Tian G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5223 (in Chinese) [程天海, 顾行发, 陈良富, 余涛, 田国良 2008 物理学报 **57** 5223]
- [22] Yao C K, Zeng X D, Cao C Q 2012 *Chin. Phys. B* **21** 124206

Bidirectional reflectance of sandy land surface with different particle sizes^{*}

Zhao Zi-Jie Zhao Yun-Sheng[†]

(School of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

(Received 11 March 2014; revised manuscript received 25 May 2014)

Abstract

The area of sandy land is extending in China because the natural environment suffers the destruction by the human activity. The estimation of the properties and area of sandy land is an important indicative information for improving the environment. Remote sensing technique can provide scientific and effective data sources using its unique advantage. In this study, we measure the bidirectional reflectance information from sandy land surfaces with different particle sizes and analyze the effect of particle size on the reflection characteristics. Then, a comparison is performed between the measured reflectance and the reflectance of sandy land surface with different particle sizes which is computed based on existing model. The results show that the effect of particle size on the bidirectional reflectance distribution is apparent. We also find that the bidirectional reflectance of sandy land surface with different particle sizes can be computed using the bidirectional reflectance model when the difference between measured reflection information and modeled reflection information is small. This study not only defines the effect of particle size on the reflectance from sandy land surface, but also provides valuable reference for estimating the particle size from sandy land surface using remote sensing technique and studying the intrinsic optical property of land surface.

Keywords: bidirectional reflectance, sandy land, multi-angle, particle size

PACS: 78.20.Bh, 78.20.Ci

DOI: [10.7498/aps.63.187801](https://doi.org/10.7498/aps.63.187801)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41271350)

† Corresponding author. E-mail: zhaoy975@163.com