

## 基于偏振信息反演土壤湿度的方法

张 颖,余焱强,赵慧洁,宣佳彬

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

**摘 要:** 为了实现基于偏振信息反演土壤湿度的目的,建立了土壤表面的偏振反射模型,并在可见光波段内开展了土壤湿度与反射光偏振信息的实验研究。首先,根据几何光学理论和测量数据建立了土壤表面的偏振反射模型。其次,制备了不同湿度的土壤样品,搭建了实验平台,并在多种入射观测条件下,使用高精度偏振成像探测系统获取了样品的偏振信息。然后,对实验数据进行分析来验证模型。最后,建立了模型中微面元坡度均方差、漫反射等效系数和折射率三个参数与土壤湿度的定量关系,利用定量关系来反演土壤湿度,并在 476 nm 波段上,对湿度为 26.0% 的土壤样品进行室内偏振探测实验。结果表明:根据文中反演方法得出土壤湿度为 24.73%,误差为 4.88%,证实了文中所提出的土壤湿度反演方法的正确性和可行性。

**关键词:** 土壤湿度; 偏振反射模型; 反演方法; 定量

**中图分类号:** TH744.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0117001

## Retrieval method of soil moisture based on polarized information

Zhang Ying, Yu Yanqiang, Zhao Huijie, Xuan Jiabin

(School of Instrumentation Science & Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** For the sake of retrieving soil moisture by the polarized information, a polarized reflection model of soil surface was established, and an experimental study of soil moisture and reflected light's polarized information was carried out in the visible wavebands. Firstly, the polarized reflection model of soil surface was established based on the geometrical optics theory and the measured data. Secondly, the soil samples of different moisture contents were made, the experimental platform was set up, the soil samples polarized information were obtained by a polarized imaging detection system with high precision in a variety of incident and observation conditions, the model was verified by analyzing the experimental data. Finally, a quantitative relationship among the micro-surface slope variance, the diffuse reflection coefficient, the equivalent refractive index and the soil moisture was established in the model and the soil moisture was retrieved according to the quantitative relationship. The research results show that: on 476 nm, the polarized information of a soil sample with a moisture content of 26% is measured by a polarized imaging detection system in the indoor environment, the soil moisture is calculated as 24.73%

收稿日期:2017-06-05; 修订日期:2017-08-21

基金项目:国家自然科学基金(61571029,61227806)

作者简介:张颖(1979-),女,讲师,硕士生导师,博士,主要从事光学设计、偏振探测、高光谱探测等方面的研究。

Email:zhangying\_1014@126.com

according to the proposed retrieval method in an error of 4.88%. Therefore, it is proved that the proposed method of retrieving soil moisture by the polarized information is correct and feasible.

**Key words:** soil moisture; polarized reflection model; retrieval method; quantitative

## 0 引言

土壤湿度是水文、气候、生态和农业等领域中的一个重要参数,它能够反映大气与地表两个界面间水分与能量之间的交换情况<sup>[1-2]</sup>。目前对于土壤湿度的测量主要有两类方法:单点测量法和遥感观测法。单点测量法具有精度高、空间代表性差的特点,一般用于检验其他测量方法。遥感观测法适用于大范围的土壤湿度监测,但空间分辨率低,反演结果精度不高<sup>[3-4]</sup>。近年来,国内外学者越来越关注于运用不同波段上的偏振信息和角度信息对环境进行监测<sup>[5-6]</sup>。Bedidi A 和 Weidong L<sup>[7-8]</sup>等人在可见光波段上进行了土壤湿度的遥感实验。Curran P J 和 Breon F M<sup>[9-11]</sup>等人研究了土壤湿度的可见光偏振特性,但仍然处于定性分析和初步模拟阶段。在国内,杜嘉等人<sup>[12]</sup>建立了土壤湿度与偏振度之间的数学模型,得到了土壤表面表现为朗伯体的临界点,但数学模型只是在特定几何条件下的统计模型。张莽等人<sup>[13]</sup>使用偏振探测系统获取了土壤不同湿度条件下的偏振信息,并改进了一种粗糙表面的偏振反射模型,但未将模型很好应用于土壤湿度的定量反演中。王新强等人<sup>[4]</sup>在可见与近红外波段上开展了土壤湿度与反射光偏振特性的实验研究。

上述学者对于土壤湿度与偏振信息的定量关系没有作过多分析,不能很好的利用偏振信息来反演土壤湿度。文中以几何光学模型为基础并结合测量数据来模拟土壤湿度与表面偏振特性之间的关系,建立了半经验模型,并确定了模型中某些参数与土壤湿度的定量关系,得到了基于偏振信息反演土壤湿度的方法。

## 1 土壤粗糙表面的偏振反射模型

目前对于粗糙表面模型有物理光学法和几何光学法两种描述方法,几何光学法是物理光学法在特殊情况下的简化,当入射光波长小于反射表面粗糙

度尺寸时,能较好地表示物体的真实反射情况。由于土壤表面粗糙度较大,因此可以采用几何光学法来建立模型。文中以 Torrance-Sparrow<sup>[14]</sup>几何光学法反射模型为基础,结合测量数据建立了土壤表面偏振反射的半经验模型。根据几何光学理论,粗糙表面认为是由一系列类似于镜面的微小面元随机分布组成的。入射光与粗糙表面的相互作用过程可以概括为:一次反射、二次反射、多次反射、表面的内部散射、遮挡和阴影等。考虑到文中所研究的土壤颗粒径小,因此可以对上述作用过程进行适当简化,忽略了土壤的遮挡、阴影作用以及内部散射作用。最终将经过土壤粗糙表面反射后的出射光划分为两大部分:微面元产生的一次反射光,遵循菲涅耳公式,具有一定的偏振特性,可以称为镜面反射光;另一部则是二次和多次反射的光,不具有偏振特性,也被称为漫反射光。根据上述思路便可以分别对两部分出射光建立模型,描述两部分的作用过程,从而最后得到整个土壤表面偏振反射情况。

对于微面元的一次反射光偏振特性,可以利用公式(1)进行表示:

$$\begin{pmatrix} E_s^r \\ E_p^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{ss} & 0 \\ 0 & a_{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_s^i \\ E_p^i \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中:等号左边矩阵表示微面元反射光琼斯矢量;等号右边依次表示入射光与反射光关系的琼斯矩阵和微面元入射光琼斯矢量。 $a_{ss}$  和  $a_{pp}$  计算公式如下所示:

$$a_{ss} = \frac{\cos \theta_t - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_t + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \quad a_{pp} = \frac{n^2 \cos \theta_t - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}}{n^2 \cos \theta_t + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \quad (2)$$

式中: $n$  为土壤折射率; $\theta_i$  为入射角。

公式(1)中微面元表面镜面反射过程琼斯矩阵可以转换为穆勒矩阵<sup>[15]</sup> $M_r$ ,  $M_r$  表达式如下:

$$M_r = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & m_{34} \\ 0 & 0 & m_{43} & m_{44} \end{pmatrix} \quad (3)$$

由于微面元与土壤整体表面不重合,它们之间

有着一定的几何关系, 因此需要进行两次坐标系的变换。首先, 将宏观坐标系(土壤整体表面)中入射光的琼斯矢量转换到微面元坐标系中的琼斯矢量, 通过琼斯矩阵求解出反射光的偏振态, 然后再将微面元坐标系中反射光的琼斯矢量转换到宏观坐标系中的琼斯矢量。上述过程中用到的转换关系可以由下述公式来表达:

$$M(\gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\gamma) & -\sin(2\gamma) & 0 \\ 0 & \sin(2\gamma) & \cos(2\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中:  $\gamma$  有两个角度  $\gamma_i$  和  $\gamma_r$ , 分别表示入射方向和目标表面法线组成的平面与入射方向和微面元表面法线组成的平面之间的夹角, 反射方向和目标表面法线组成的平面与反射方向和微面元表面法线组成的平面之间的夹角。因此土壤表面与入射光作用形式的穆勒矩阵  $M$  为:

$$M = M(-\gamma_r)M(\gamma_i) \quad (5)$$

为了获取整个表面的镜面反射量还需要考虑微面元的概率分布函数  $P$ 。概率分布函数  $P$  表达式为:

$$P = \frac{1}{2\pi\sigma^2\cos^3\alpha} \exp\left(-\frac{\tan^2\alpha}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

式中:  $\alpha$  为微面元与整体表面的夹角;  $\tan\alpha$  表示微面元坡度, 根据几何关系即可求得;  $\sigma$  表示微面元坡度均方差, 与土壤的粗糙度和含水量相关。

在实际应用中, 通常用 Stokes 矢量来表征光波的偏振状态, 假设入射到土壤表面上的 Stokes 矢量为  $S_i$ , 则镜面反射光的 Stokes 矢量  $S_{\text{mirror}}$  为:

$$S_{\text{mirror}} = P \times M \times S_i \quad (7)$$

对于无偏的漫反射光部分, 其能量大小与几何条件、土壤粗糙面特性相关, 但它们之间关系难以具体表示, 因此文中提出利用实验的方法来确定漫反射能量的大小。在某个人射和观测条件下, 利用偏振探测系统获取了某湿度土壤样品的偏振图像后, 可以在同样的位置对标准漫反射板进行成像获取漫反射板的光强大小  $S_p$ , 然而标准漫反射板和土壤表面属性是不同的, 两者之间存在一个差异, 因此可以加入一个等效系数  $e$  来表示土壤漫反射光强大小  $S_{\text{diffuse}}$  与  $S_p$  的关系, 如公式(8)所示:

$$S_{\text{diffuse}} = e \times S_p \quad (8)$$

综上所述, 土壤粗糙表面的偏振反射模型为:

$$S = P \times M \times S_i + e \times S_p \quad (9)$$

上式表明了土壤表面反射偏振特性与土壤的折射率、表面粗糙情况和入射观测条件有关。

## 2 偏振探测实验

文中采用了基于液晶可变相位延迟器的偏振成像探测系统进行室内测量实验, 测量实验示意图如图 1 所示, 可以设置不同的入射观测几何条件。

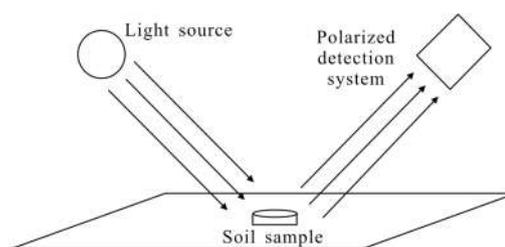


图 1 测量实验示意图

Fig.1 Schematic diagram of measurement experiment

偏振成像探测系统主要有 476、514、530、647、676 nm 五个探测波段, 波段范围内探测精度高, 其中线偏振度探测精度为 1%, 圆偏振度探测精度为 5%。光源为卤钨灯, 其提供波长 360~2 500 nm 的自然光。

实验以黄棕壤为研究对象, 并采集了地表表层 20 cm 的土壤, 采集后将土壤放置于烘干箱中烘干, 直至土壤恒重, 然后剔除土壤中的杂物, 制成干燥土壤样品。随后通过 1 mm 孔径的筛子筛选干燥土壤样品, 将样品分别置放于长 12 cm、宽 8 cm、深 5 cm 的样品盒中, 利用毛玻璃片平整土壤样品表面, 使其表面粗糙度一致。为了研究不同湿度土壤的偏振信息, 向各干燥样品中添加不同重量的蒸馏水, 采用质量含水量法来确定添加的水量, 见公式(10), 随后静置 24 h, 使其水分分布均匀, 配置而成不同湿度的土壤样本, 湿度范围从 0% 到 33.4%, 样品数目为 12 个。

$$\tau = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (10)$$

式中:  $\tau$  为土壤湿度;  $m_0$  为干燥土壤样品质量;  $m_1$  为添加蒸馏水后的土壤质量。

## 3 实验结果与反演方法分析

### 3.1 土壤湿度与反射光偏振度关系

实验中为了反映湿度与偏振度的关系, 选择了

面内测量,同时将入射角度设置为 45°,观测角度设置为 45°,476、530、676 nm 三个波段测量结果如图 2 所示。

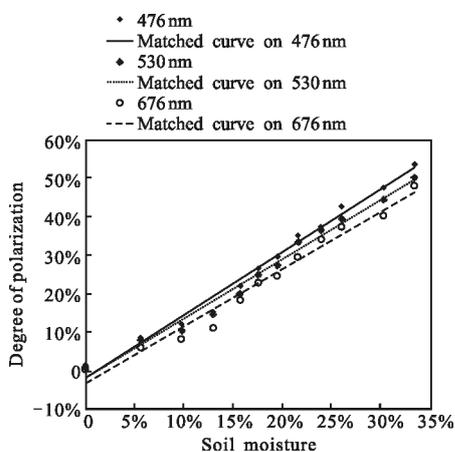


图 2 土壤湿度与偏振度关系图

Fig.2 Diagram of soil moisture and degree of polarization

图 2 中,各散点为实测数据,直线为线性拟合曲线,比较散点分布和直线,说明土壤湿度与偏振度之间存在明显的正相关关系,也表明了利用偏振信息来反演土壤湿度的可能性。

### 3.2 土壤模型的验证

在土壤成分和表面状态不改变时,模型中存在三个仅与湿度有关的未知参数,同时为了完成半经验模型的验证,因此实验进行以下设置:对湿度 9.8%、21.6%和 33.4%的土壤样品以及 99%标准漫反射板进行成像实验,入射角度、观测角度均为 45°,方位角分别设置为 157°、180°和 207°。在获取各样品在不同方位角下反射信息后,依据以下步骤进行了参数求解。

(1) 根据漫反射板反射信息  $S_p$  估算公式(9)中  $S_r$  信息,计算方法如公式(11)所示:

$$S_r = \frac{S_p}{k_d \times \cos \theta_i} \quad (11)$$

式中:  $k_d$  为 0.99;  $\theta_i$  为入射天顶角度。

(2) 将三个几何条件下的  $S_p$ 、 $S_r$  和  $S$  代入公式(9)中,再利用最小二乘法计算得到三个参数。最小二乘法的目标函数为:

$$\min \Delta S(\sigma, n, e) = \sum_{\theta_i} \sum_{\theta_o} \sum_{\phi} [S_{\text{measure}} - S_{\text{model}}] \quad (12)$$

式中:  $S_{\text{measure}}$  为实际测量值;  $S_{\text{model}}$  为模型理论值。

根据上述步骤计算得到了三份土壤样品在五个波段下对应的参数结果,结果如表 1~3 所示。

表 1 9.8%湿度参数结果表

Tab.1 Result of parameters at moisture of 9.8%

Band/nm	$n$	$\sigma$	$e$
476	1.540	0.378	0.421
514	1.539	0.366	0.414
530	1.535	0.374	0.418
647	1.531	0.377	0.403
676	1.532	0.310	0.406

表 2 21.6%湿度参数结果表

Tab.2 Result of parameters at moisture of 21.6%

Band/nm	$n$	$\sigma$	$e$
476	1.519	0.243	0.274
514	1.515	0.238	0.270
530	1.513	0.239	0.268
647	1.505	0.238	0.272
676	1.508	0.257	0.271

表 3 33.4%湿度参数结果表

Tab.3 Result of parameters at moisture of 33.4%

Band/nm	$n$	$\sigma$	$e$
476	1.503	0.117	0.136
514	1.502	0.123	0.142
530	1.501	0.125	0.143
647	1.489	0.119	0.140
676	1.504	0.116	0.137

分析上述表格,发现存在以下特点:

(1) 在不同波段上,随着土壤湿度的逐渐增加,微面元坡度均方差、折射率、等效系数三个参数均逐步减小;(2) 在不同波段下,同一个湿度土壤样品计算得到的参数值不一致,但是三个参数值的波动范围较小,表明了土壤湿度与三个参数仍有着对应关系,对于不同波段需要分开考虑。

对上述两个特点分析认为主要有以下原因:

(1) 土壤的主要成分物质为水、二氧化硅和三氧化二铝,其中水的折射率最小,三氧化二铝的折射率最大,随着土壤成分中水含量的增加,土壤组成中低

折射率物质相对含量增大,最终导致了整体折射率的减小;(2)在土壤湿度增加后,土壤表面空隙减少,表面更加平整,起伏度降低,从而引起表征土壤表面粗糙程度的微面元坡度均方差的减小;(3)在土壤湿度增加后,土壤表面的镜面反射能量增加,漫反射光部分能量减弱,最终使得漫反射等效系数逐渐减小;(4)土壤水分对于不同波段的吸收反射是不一致的,但是在模型中并没有引入波长相关参数进行描述,因此不同波段下一份湿度土壤样品计算得到的参数值不一样,与实际物理意义相悖。

将上述表中的数据依次代入对应的模型中,将几何条件统一设置为入射角度 45°、出射角度 50°、方位角 180°,计算得到相对应的模型理论值。同时将室内实验几何条件调整上述设置进行成像探测来获取实际测量值。最后对模型理论值和实际测量值进行比较验证模型的正确性。考虑到文章篇幅仅列出了湿度 21.6%下的偏振度比较结果,如表 4 所示。

表 4 模型与实测结果比较表

Tab.4 Compared table of model and experiment

Band/nm	Model	Experiment	Error
476	32.44%	35.30%	8.0%
514	31.23%	32.48%	3.85%
530	30.85%	32.46%	4.96%
647	28.83%	28.50%	1.16%
676	28.21%	28.99%	2.69%

在表 4 中,五个波段下 21.6%湿度土壤的偏振度误差范围为 1.16%~8.0%。分析上述数据表明了:(1)以几何光学理论为基础再结合有限探测条件下观测信息所建立的半经验模型是能够用于实现更多情况下的探测的;(2)模型模拟土壤表面偏振反射特性效果良好,模型也能够反映土壤表面偏振反射的方向性特点,即不同入射角度或出射角度下的偏振反射特性是不一样的。

### 3.3 反演方法

结合以上实验结果与分析,表明了土壤表面偏振反射信息与其湿度之间确实存在着某种联系,但具体的联系仍然无法明确,而且同一湿度样品在不同的观测条件下反射的偏振信息也有所不同,不能

利用某一观测条件下的偏振信息直接来反演,因此考虑利用中间参数来反演土壤湿度。所提出的反演方法为:首先通过实验测量计算得到一系列不同湿度土壤样品下的三个参数值,建立参数与土壤湿度的定量关系;然后,利用最小二乘法理论计算得到待测土壤样品的参数值;最后,查找定量关系反演得到土壤湿度大小。

根据 3.1 节实验中 12 组数据拟合得到了定量关系,考虑到文章篇幅,只列出了 476 nm 波段下的定量关系,定量关系如下:

$$\tau = -5.5n + 8.577 \quad (13)$$

$$\tau = -0.9816\sigma + 0.4564 \quad (14)$$

$$\tau = -0.8386e + 0.4468 \quad (15)$$

在上述三个公式中,土壤湿度取值在 0~1 之间。采用的拟合为线性拟合,三者的线性拟合误差分别为 99.53%、99.78%和 99.8%。

利用上述模型和反演方法对湿度 26.0%土壤样品进行实验,利用偏振成像系统获取了土壤样品与标准漫反射板的反射信息,计算出参数值  $n$  为 1.514,  $\sigma$  为 0.216,  $e$  为 0.238,再结合查找定量关系得到反演湿度为 24.73%,误差为 4.88%。

## 4 结论

土壤表面的偏振反射特性受自身湿度影响,土壤湿度越大对应的偏振信息越强,土壤湿度与反射光偏振度具有正相关性,表明了利用偏振信息来反演土壤湿度的可能性。文中基于几何光学理论和测量数据建立了半经验模型,模拟了土壤表面反射光偏振特性,准确的获取了折射率  $n$ 、微面元坡度均方差  $\sigma$  和漫反射等效系数  $e$  与土壤湿度的定量关系,对比模型数据和实验数据后,精度可达 1.16%,表明了所建模型的正确性。文中提出了利用模型中的三个参数作为中间量来反演土壤湿度的方法,对湿度为 26%的土壤样品进行反演,反演误差为 4.88%。研究结果表明了基于偏振信息反演土壤湿度的正确性与可行性,对土壤湿度的定量化偏振遥感探测有重要参考意义。

### 参考文献:

[1] Vivoni E R, Tai K W, Gochis D J. Effects of initial soil

- moisture on rainfall generation and subsequent hydrologic response during the north american monsoon [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, 10(3): 644–664.
- [2] Li Deqin, Duan Yunxia, Zhang Shuwen. Soil moisture measurement and simulation: a review [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(4): 424–434. (in Chinese)  
李得勤, 段云霞, 张述文. 土壤湿度观测、模拟和估算研究 [J]. *地球科学进展*, 2012, 27(4): 424–434.
- [3] Gao H, Wood E F, Drusch M, et al. Using a microwave emission model to estimate soil moisture from ESTAR observations during SGP99[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(1): 23–28.
- [4] Wang Xinqiang, Sun Xiaobing, Zhang Lijuan, et al. Experimental study on visible and near-infrared spectrum polarization characteristic of soil moisture [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3288–3292. (in Chinese)  
王新强, 孙晓兵, 张丽娟, 等. 可见/近红外土壤湿度的光谱偏振特性实验研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(11): 3288–3292.
- [5] Li Yanan, Sun Xiaobing, Qiao Yanli, et al. Polarized reflectance characteristics of red soil with different moisture [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2009, 4(6): 448–455. (in Chinese)  
李雅男, 孙晓兵, 乔延利, 等. 含水红壤的偏振特性分析 [J]. *大气与环境光学学报*, 2009, 4(6): 448–455.
- [6] Wu Yiming, Gao Limin, Chen Liangyi. Precision measurement and transmission of azimuthal information based on polarization modulated light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 525–529. (in Chinese)  
吴易明, 高立民, 陈良益. 基于偏振光的精密角度测量及传递技术[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(3): 525–529.
- [7] Bedidi A B, Cervelle J M, Pouget M, et al. Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils [J]. *Soil Science*, 1992, 153(2): 129–141.
- [8] Weidong L, Baret F, Xingfa G, et al. Relating soil surface moisture to reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2): 238–246.
- [9] Breon F M, Tanre D, Lecomte P, et al. Polarized reflectance of bare soils and vegetation: measurements and models [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1995, 33(2): 487–499.
- [10] Curran P J. A photographic method for the recording of polarized visible light for soil surface moisture indications [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1978, 7(4): 305–322.
- [11] Curran P J. Remote sensing: the use of polarized visible light (PVL) to estimate surface soil moisture[J]. *Applied Geography*, 1981, 1(1): 41–53.
- [12] Du Jia, Zhao Yunsheng, Wu Taixia, et al. A preliminary method to determine critical soil moisture value presented by lambert reflector—A case of black soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2): 220–224. (in Chinese)  
杜嘉, 赵云升, 吴太夏, 等. 土壤表现为朗伯体的土壤湿度临界值的确定方法初探——以黑土为例 [J]. *土壤通报*, 2007, 38(2): 220–224.
- [13] Zhang Qiao, Sun Xiaobing, Hong Jin, et al. A polarization retrieval model of soil moisture and experiment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(6): 708–712. (in Chinese)  
张荞, 孙晓兵, 洪津, 等. 土壤湿度的偏振反演模型与实验 [J]. *武汉大学学报信息科学版*, 2011, 36(6): 708–712.
- [14] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(9): 1105–1114.
- [15] Liao Yanbiao. Polarization Optics [M]. Beijing: Science Press, 2003: 61–62. (in Chinese)  
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 61–62.