

文章编号: 1007-4619 (2004)01-0075-06

粗糙地表土壤含水量遥感模型研究

邓孺孺^{1,2}, 田国良¹, 柳钦火¹, 辛晓洲¹

(1 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2 中山大学 地环学院, 广州 510275)

摘 要: 土壤粗糙度对地表二向反射率特征有重要影响而且极不稳定, 是影响土壤含水量遥感精度的一个重要因素。该文分析土壤含水量影响反射率的物理过程, 论证土壤含水量与土壤光谱的关系服从比尔定律; 分析土块级土壤粗糙度影响土壤反射率的根本原因是微坡面的倾斜使二次和多次散射的比例增加。在此基础上建立粗糙地表土壤含水量遥感模型; 实验证明模型具有较高的精度。

关键词: 土壤含水量; 反射率; 粗糙度; 二向反射模型

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

国内外对土壤含水量遥感都进行过大量研究, Etienne Muller^[1]等进一步提出了土壤湿度与土壤反射率关系的通用公式。但所有这些研究均未对频繁变化土壤表面结构因素予以充分考虑, 故所建立的土壤水分遥感模型在实际应用中通常误差较大, 而土壤粗糙度正是制约土壤水分遥感精度的重要因素。对于土壤粗糙度的研究, Deer^[2]和 Cierniewski^[3]等提出各自的几何模型, 用一定形状几何体的集合在坡面上的排列来表示地表面, 并假设土壤反射率与土颗粒的阴影高度相关。这种假设是正确的, 但是, 正如 Escadafal^[4]指出, 反射率的减少并不像反射率取决于阴影总量的模型预测的那样迅速。另一类模型从辐射传输理论来对多次散射进行定量描述^[5,6], 这类模型较为复杂, 且参数没有明确的物理意义。

Cruse 等^[7]认为, 入射光射到粗糙土壤表面后经历了散射过程, 落入相邻土颗粒或土块顶点之间的能量被二次反射, 使总的反射能量降低, 降低程度取决于土壤粗糙度。沿着这一思路, 本文拟建立一个具有清晰物理意义的粗糙土壤表面二向反射模型, 进而结合土壤水与反射率之间的函数关系, 建立粗糙表面土壤含水量的遥感模型。

2 平整表面土壤含水量与土壤光谱的关系

土壤为不透明物质, 在可见光—近红外波段, 其光谱主要为反射光谱。水体为透明物质。土壤中的水分在湿度小于土壤田间持水量的情况下, 是以附着水的方式分布于土壤颗粒间隙中。入射光在射入颗粒表面和从颗粒表面反射出来时要受到水分吸收和散射的衰减。由于含量有限, 水分对入射光的影响主要是吸收, 散射和反射可以忽略。当含水量达到和超过土壤田间持水量时, 水分在颗粒表面形成薄膜, 才需考虑水膜镜面反射的影响。故当湿度明显小于田间持水量时, 湿润土壤反射率服从比尔(Beer)定律, 可表示为:

$$R_s(\lambda) = R_{s0}(\lambda) e^{-\alpha_{ws}(\lambda)V_{ws}} \quad (1)$$

R_s ——含水土壤反射率, R_{s0} ——干土壤反射率, V_{ws} ——土壤含水量, α_{ws} ——土壤水分吸收系数。 $\alpha_w(\lambda)$ 为无量纲参数, 我们将之定义为: 1%的土壤含水量对某波段入射光在土壤表面的入射和反射过程中所吸收的光强与该波段入射光总强度之比。Etienne Muller^[1]也提出过相似的公式, 所不同的是其将 α_{ws} 称作反射率减低因子(reflectance attenuation factor), 将 V_{ws} 用土壤湿度代替。我们通过对北

收稿日期: 2002-10-09; 修订日期: 2003-02-28

基金项目: 国家自然科学基金; 青藏高原地表反照率遥感反演及冷热源作用的研究(49971062)及国家重点基础研究发展规划项目(G2000077900)

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

作者简介: 邓孺孺(1963—), 男, 副教授, 1984年本科毕业于武汉地质学院, 1989年于中国地质大学获理学硕士学位, 现在中山大学任教并在中科院遥感应用研究所攻读博士学位。目前主要从事辐射传输模型和环境遥感方面的研究, 已发表论文十余篇。

京地区的 26 个不同湿度棕黄壤样品的光谱测量,得到土壤反射率 $R_s(\lambda)$ 和水分吸收系数 $\alpha_w(\lambda)$ 的平均值曲线如图 1 所示。图中可以看出,在波长小于 1300nm 时土壤水吸收率的值很小,且变化不大,在波长大于 1300nm 后其总趋势是不断增加,并在 1400nm 和 1900nm 附近分别有一小一大两个峰值。

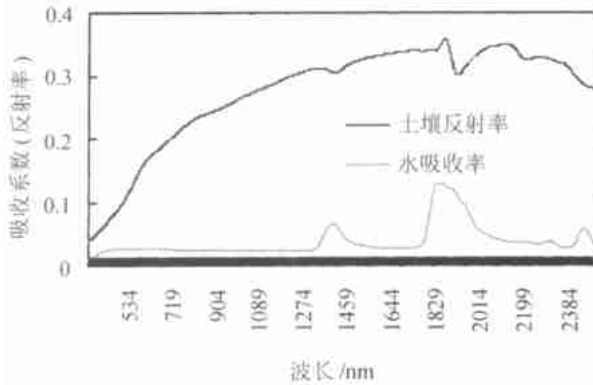


图 1 土壤反射率和水分吸收率

Fig. 1 Soil reflectance and absorb coefficient of soil moisture

3 粗糙土壤的二向反射模型

从众多有关土壤粗糙度与反射率关系的文献中,可以总结出以下结论:(1)土壤的反射率及二向反射性质与土壤颗粒粒度密切相关,颗粒粒度越小,土壤反射率越大,越接近于朗伯体。(2)使部分土壤反射光发生二次或多次散射是粗糙度影响土壤反射率的根本原因。(3)从承照面入手研究土壤的反射率及二向反射特征显然比从阴影方面来研究更为适宜。

实际上,土壤粗糙度可以分为两个层次:一个是颗粒粒度层次。这一层次的粗糙度稳定,其取决于土壤中矿物颗粒的成分和成熟度等方面,但对大多数土壤类型,该层次粗糙度对二向反射性质影响有限。另一个层次是从大型矿物集合体到土块和土壤表面的小丘,如耕作形成的土块、雨滴溅击形成的小丘等。这一层次的粗糙度对土壤反射率影响大,产生的方向性分异显著,而且这一层次的粗糙度不稳定,随时间,地点和环境的不同而发生变化。

我们对土壤的光谱测量是在平整土壤表面上进行的,其结果已包含了土壤颗粒粒度层次粗糙度的影响。但将之直接应用于土块,小丘等大量分布的粗糙

地表显然是不适宜的。目前并未见有针对这一问题的模型。下面我们将根据土壤光谱散射的物理过程建立一个粗糙土壤表面的二向反射模型,以建立一个沟通测量光谱与粗糙土壤表面实际反射光谱的桥梁。

3.1 粗糙土壤的二向反射模型的建立

作如下假设:(1)对于由大型矿物集合体、土块和小丘构成的粗糙地表,可将其看成由许多平整土壤小平面组成的拼合曲面,单个小平面的倾向为随机分布,而在 0° 到 90° 范围内,各种倾角的小平面在水平面上的投影面积服从正态分布。(3)各个方向的小平面落在周围坡面的落影里的概率相等。

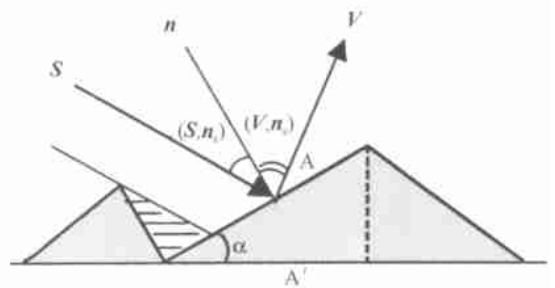


图 2 粗糙土壤表面二向反射示意图

Fig. 2 Sketch map of bi-directional reflecting on rough surface

对于一般结构的土壤来说,假设(1)是基本可以成立的。因土块,小丘等的小平面在一般情况下不受任何因素的影响,因而其倾向为随机分布的假设是合理的。而对小面的倾角的产生,通常有一种主导的影响因素,或耕作,或是雨溅击,其决定了倾角的众数,但倾角在所有取值范围内都有分布,所以倾角正态分布的假设是适宜的。在以上假设下,发生多次反射的土壤反射光取决于这些小平面的倾角分布。大倾角小平面的比例越大,反射光受周围的地表的阻挡的比例越大,发生多次反射的土壤反射光就越多,产生阴影的概率也越大。小平面的多是倾斜的,故下称次级坡面。在以上假设下,对于入射方向为 $S(\theta_s, \varphi_s)$, 观测方向为 $V(\theta_v, \varphi_v)$, 入射和反射光的关系如图 2 所示。

若只考虑一次散射且暂不考虑阴影,坡度和坡向分别为 α, φ , 坡面法线单位矢量为 n_s 的坡面在观测方向上的反射光亮度为:

$$E = \frac{I_0}{\pi} AR_s \cos(S, n_s) \cos(V, n_s) \quad (2)$$

A 为坡面面积, (S, n_s) 、 (V, n_s) 分别为阳光入射方向和观测方向与坡面法线的夹角。设 A' 为坡面在水平面上的投影, 有: $A = A' / \cos \alpha$, 故:

$$E = \frac{I_0 A' R_s \cos(S, n_s) \cos(V, n_s)}{\pi \cos \alpha} \quad (3)$$

对于单位水平面积, $A' = P(\alpha, \varphi)$ 。 $P(\alpha, \varphi)$ 为粗糙表面内, 坡度和坡向分别为 α, φ 的次级坡面在水平面投影的分布函数(概率)。

当入射方向与坡面法线方向夹角大于 90° 时光照不到坡面, 当观测方向与坡面法线方向夹角大于 90° 时, 坡面在观测方向上不可见, 这两种情况下 $E=0$, 我

$$E = I_0 \int_{2\pi} \int_{\pi/2} k_s k_v P(\alpha, \varphi) (1 - P_s(\theta_s)) \frac{R_s \cos(S, n_s) \cos(V, n_s)}{\pi \cos \alpha} d\alpha d\varphi \quad (5)$$

仍用反射光强与水平标准板反射光强之比来求反射率。水平标准板单位面积的方向反射光强为:

$$R_r = \int_{2\pi} \int_{\pi/2} k_s k_v P(\alpha, \varphi) \frac{(1 - P_s(\theta_s)) P_s \cos(S, n_s) \cos(V, n_s)}{\cos \theta_s \cos \theta_v \cos \alpha} d\alpha d\varphi \quad (6)$$

阴影的几何关系如图 3 所示。当小坡面法线与入射方向夹角大于 90° 时, 将产生阴影。阴影由本影和落影两部分组成。本影为坡面本身。落影则落在相邻坡面上, 使其光照面积减少。落影在垂直入射光线平面上的投影面积为:

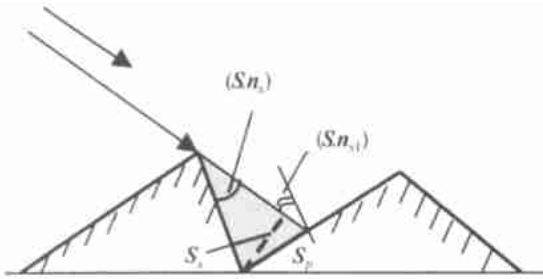


图 3 粗糙土壤表面阴影几何关系示意图

Fig. 3 Sketch map for geometric relationship of shadow on rough surface

$$S_s = A \sin(S, n_s)$$

若落影全部落在一个相邻坡面上, 则落影面积为:

$$S_p = A \sin(S, n_s) / \cos(S, n_{s1})$$

n_{s1} 为位于落影中坡面的法线方向, 其坡度、坡向分别用 α_1, φ_1 表示。因 n_{s1} 可以为任何方向的坡面, 所以一个坡面在其它坡面上投下的落影面积应为以下积分式:

$$S_p = A \sin(S, n_s) \int_{2\pi} \int_{\pi/2} \frac{P(\alpha_1, \varphi_1)}{\cos(S, n_{s1})} d\alpha_1 d\varphi_1 \quad (7)$$

们用阴影因子 k_s 和可见因子 k_v 来表示这个关系:

当 $(S, n_s) < 90^\circ, k_s(S) = 1$; 当 $(S, n_s) \geq 90^\circ, k_s = 0$

当 $(V, n_s) < 90^\circ, k_v(V) = 1$; 当 $(V, n_s) \geq 90^\circ, k_v = 0$

另外, 坡面还可能落在周围坡面的阴影中。粗糙度参数确定时, 次级坡面落在阴影中的概率取决于太阳天顶角, 记为 $P_s(\theta_s)$ 。(3)式可写为:

$$E_A = \frac{I_0 k_s k_v (1 - P_s(\theta_s)) P(\alpha, \varphi) R_s \cos(S, n_s) \cos(V, n_s)}{\pi \cos \alpha} \quad (4)$$

单位面积粗糙地表的方向反射光强为所有方向次级坡面反射的积分, 可表示为:

水平标准板与高亮度为 $\frac{I_0}{\pi} \cos \theta_s \cos \theta_v$, 故粗糙土壤表面的二向反射率为:

单位面积的粗糙表面产生落影总的概率为:

$$P_s = \int_{2\pi} \int_{\pi/2} (1 - k_s(n_s)) P(\alpha, \varphi) \frac{S_p}{A} d\alpha d\varphi \quad (8)$$

式中乘以 $1 - k_s(n)$ 是因为非承照坡面才会产生阴影。将(7)式代入(8)式得:

$$P_s(\theta) = \int_{2\pi} \int_{\pi/2} (1 - k_s(n_s)) p(\alpha, \varphi) \sin(S, n_s) \times \left[\int_{2\pi} \int_{\pi/2} \frac{P(\alpha_1, \varphi_1)}{\cos(S, n_{s1})} d\alpha_1 d\varphi_1 \right] d\alpha d\varphi \quad (9)$$

因为小坡面方位角在 360° 范围内是随机分布的, 各方向的分布概率相等, 而坡度分布服从在 $(0, 90^\circ)$ 范围内的正态分布 $P(\alpha, \varphi) = \frac{1}{2\pi} P(\alpha)$ 。 $p(\alpha)$ 为小平面坡度为 α 的概率。因坡度只有 $(0, \pi/2)$ 中取值, 故倾角为 α 的概率为:

$$P(\alpha) = \exp\left[-\frac{(\alpha - u_s)}{2\sigma_s^2}\right] \int_0^{\pi/2} \exp\left[-\frac{(\alpha - u_s)}{2\sigma_s^2}\right] d\alpha \quad (10)$$

u_s 为倾角分布的均值, σ_s 为标准差。(9)式可写成:

$$P_s(\theta) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{2\pi} \int_{\pi/2} (1 - k_s(n_s)) p(\alpha) \sin(S, n_s) \times \left[\int_{2\pi} \int_{\pi/2} \frac{P(\alpha_1)}{\cos(S, n_{s1})} d\alpha_1 d\varphi_1 \right] d\alpha d\varphi \quad (11)$$

(6)式可写成:

$$R_r = \frac{R_s}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{\pi/2}^{\pi/2} \frac{k_s k_v P(\alpha)(1 - P_s(\theta_s)) \cos(S, n_s) \cos(V, n_s)}{\cos \theta_s \cos \theta_v \cos \alpha} d\alpha d\varphi \quad (12)$$

上式可以用计算机求其数值解。实际应用中采用离散公式求近似解,离散公式为:

$$R_r = \frac{R_s}{2\pi} \sum_{j=0}^M \sum_{i=0}^N \frac{k_s k_v P(\alpha)(1 - P_s(\theta_s)) \cos(S, n_s) \cos(V, n_s)}{\cos \theta_s \cos \theta_v \cos \alpha} \Delta\alpha \Delta\varphi \quad (13)$$

其中: $M=2\pi/\Delta\varphi$, $N=\pi/(2\Delta\alpha)$, $\alpha_i = i\Delta\alpha$, $\varphi_j = j\Delta\varphi$

最后,考虑湿润土壤的情况。只需将(1)式带入,可以得到土壤的一般方向反射公式:

$$R = \frac{R_{s0} e^{-\alpha_{ws} V_{ws}}}{2\pi} \sum_{j=0}^M \sum_{i=0}^N \frac{k_s k_v P(\alpha)(1 - P_s(\theta_s)) \cos(S, n_s) \cos(V, n_s)}{\cos \theta_s \cos \theta_v \cos \alpha} \Delta\alpha \Delta\varphi \quad (14)$$

3.2 模型的二向反射率分布特点

图4为太阳天顶角为 50° ,粗糙面坡度均值为 20° ,方差为1.5,土壤反射率为0.25,观测方向与阳光入射方向的方位夹角分别为 0° 至 180° 、 45° 至 125° 和 90° 至 270° 的不同观测天顶角的模拟反射率曲线图:

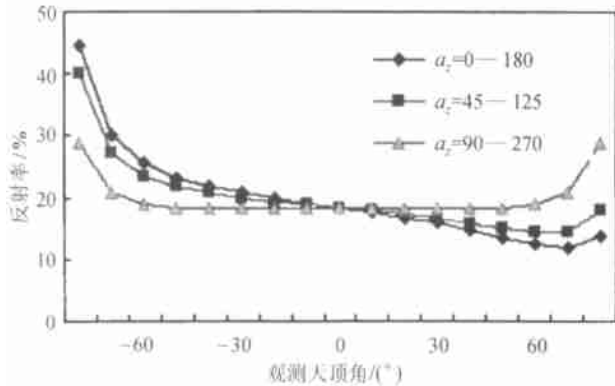


图4 不同观测方向下的表面粗糙土壤反射率曲线。太阳天顶角为 50° ;粗糙面坡度均值为 20° ,方差为1.5;土壤反射率为0.25

Fig.4 Reflectance curves of rough surface soil under different observation direction. Solar zenith angle is 50° , angle of surface slope is 20° , deviation is 1.5, and soil reflectance is 0.25

图5为土壤粗糙面坡度均值为 20° ,方差为1.5;土壤反射率为0.25,在太阳主平面上,不同阳光入射角与不同观测天顶角下的模拟反射率曲线图。

3.3 粗糙地表的土壤含水量计算

在可见光波段,粗糙表面使土壤反射率降低的情况与由于含水量增加而导致的反射率降低的情况很相似。图6是土壤表面粗糙影响土壤反射率的典型情况。

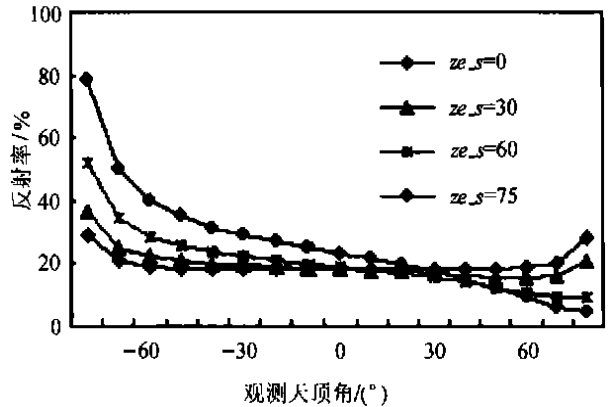


图5 主平面上不同太阳天顶角下的表面粗糙土壤反射率曲线。糙面坡度均值为 20° ,方差为1.5;土壤反射率为0.25

Fig.5 Reflectance curves of rough surface soil under different Solar zenith angle. The normal of surface angle slope is 20° , deviation is 1.5, and soil reflectance is 0.25

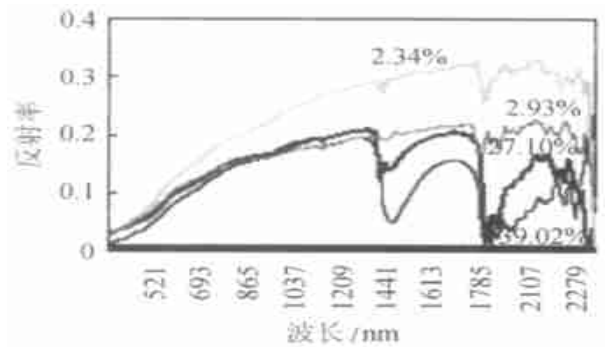


图6 几种不同表面粗糙度和含水量的土壤反射率曲线
Fig.6 Reflectance curves of several typical soil surfaces with different water content and roughness

图6中4个土壤样品均为北京顺义地区的棕黄壤。含水量为2.34%和39.02%的土壤样品表面平

整,含水量为 27.10% 的土壤样品表面为中等粗糙,而含水量为 2.93% 的土壤样品表面为非常粗糙。图中可以看出,由于粗糙度的影响,第 2 个样品(含水量 2.93%)的反射率在整个波长范围内大幅下降,第 3 个样品(含水量 27.10%)的反射率也在一定程度上下降。虽然土壤含水量相差很大,但含水量为 2.93%、27.10% 与 39.02% 的土壤样品反射率在可见光波段非常接近。但在 1350nm 以后的短波红外波段,特别是水吸收带上或附近,粗糙表面引起的反射率下降明显小于含水量引起的反射率下降。故其中:

$$S = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=0}^M \sum_{i=0}^N \frac{k_s k_v P(\alpha) (1 - P_s(\theta_s)) \cos(S, n_s) \cos(V, n_s)}{\cos \theta_s \cos \theta_v \cos \alpha} \Delta \alpha \Delta \varphi \quad (16)$$

且 $0 \leq s < 1$, 这样,只要两个波段,即一个可见光波段和一个红外波段的土壤反射率已知,就可以应用公式(16)求出粗糙表面土壤的含水量。在土壤反射率曲线已知时,也可以用数据拟合的方法计算土壤含水量。

4 模型的检验

检验是根据实测的土壤光谱和测得的水吸收系数,用曲线拟合的方法计算土壤含水量,并将计算结

同时使用可见光波段和红外波段进行土壤含水量计算可消除粗糙度的影响。

在干土壤反射率和水吸收率已测定且入射和观测方向已知的情况下,公式(14)中未知数实际上只有 u_s 、 σ_s 和 V_{us} 。将三个波段的土壤反射率代入可将该三个参数求出。公式中的积分部分代表粗糙度的影响,与波段无关。在入射方向的观测方向一定,且不考虑多次散射的情况下,可用一粗糙度影响因子 s 代替,公式(14)可表示为:

$$R_r = SR_s e^{-\alpha \frac{V}{u_s}} \quad (15)$$

果与实际测量的土壤含水量进行对比,检验误差。所采用的样品亦是采自北京地区的棕黄壤,共用 41 个含水量不同的样品,其含水量由 0.63% 至 19.18%。结果如表 1 所示。

含水量计算值与实测值的平均误差为 1.16%,误差的标准差为 1.45。计算值与实测值的相关系数为 0.97,二者散点图如图 7,样点在图中的分布反映计算值与实测值呈很好的线性关系。实验结果证明上述模型具有较高的计算精度。

表 1 土壤样品含水量计算值与实测值对比(单位:%)

Table 1 Compare of calculated value with measured value of soil samples water content

样品编号	实测值	计算值	编号	实测值	计算值	样品编号	实测值	计算值
1	0.7	0.015	15	13.46	13.933	29	7.4	6.822
2	1.3	1.072	16	15.27	15.335	30	8.1	6.740
3	2.54	1.130	17	14.7	14.664	31	8.2	7.736
4	2.79	1.806	18	16.43	17.482	32	9	8.195
5	3.5	2.486	19	16.26	17.873	33	10.2	10.018
6	4.4	3.408	20	19.5	18.379	34	0.63	0
7	4.67	4.769	21	1.4	0	35	2.4	2.316
8	5.85	5.021	22	1.8	0.239	36	2.9	3.985
9	7.6	6.009	23	3.3	0.773	37	3.2	4.950
10	8.4	7.437	24	3.6	1.643	38	5.78	5.586
11	10.14	8.584	25	4.4	1.918	39	6.2	7.750
12	10.57	11.45	26	5.5	3.706	40	6.2	6.357
13	11.35	15.236	27	5.8	4.746	41	8.6	8.170
14	12.47	16.457	28	7.2	4.916			

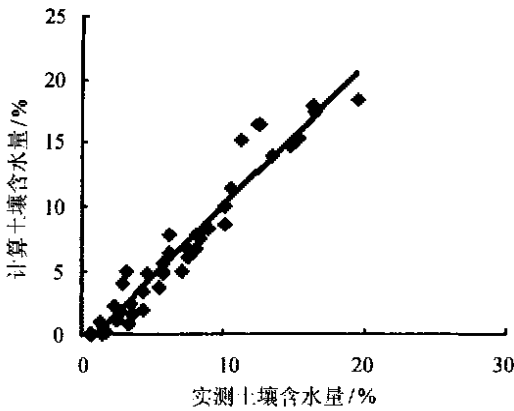


图 7 土壤样点含水量计算值与测量值散点图

Fig. 7 Linear regression of calculated value on measure value of soil samples water content

5 讨论与结论

1) 土壤粗糙度是决定土壤光谱的一个重要因素,也是决定土壤含水量遥感精度的重要因子。与土壤湿度一样,土壤粗糙度也是使土壤反射率降低的因子。该两种因素造成的反射率降低在可见光波段极为相似,但在红外波段,特别是水吸收带附近有明显区别。

2) 土壤粗糙度影响反照率的根本原因是其粗糙表面的微小坡面的倾斜使部分反射光发生多次散射,导致被吸收的入射光的比例增大,微小坡面的倾

角越大,发生多次散射的入射光比例越大,反射率越低。根据此情况建模可以有效消除土壤表面粗糙度的影响。

一般情况下,土壤粗糙度在时间和空间上都是频繁变化的,是影响定量遥感精度的一个重要参数。本文提出的模型虽可较好地考虑了粗糙土壤的二向反射情况,但存在两方面的不足。一是没有给出模型的解析式,需用数值逼近的方法求数值解,运算量较大。二是没考虑多次散射,使精度受到一定影响。拟在进一步的研究中加以解决。

参 考 文 献 (References)

- [1] Etienne Muller, Henri D'écamps. Modeling soil moisture reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **76**: 173-180.
- [2] Deer, D. W., Eck, T. F., and Otteman, J. Bidirectional reflectances of selected desert surfaces and their three-parameter soil characterization [J]. *Agric. Forest Meteorol.* 1990, **52**: 71-93.
- [3] Jerzy Cierniewski. The influence of the viewing geometry of bare soil surfaces on their spectral response in the visible and near infrared [J]. *Remote Sens. Environ.* 1990, **27**: 135-142.
- [4] S. Jacquemoud, F. Baret, and J. F. Hanocq. Modeling Spectral and Bidirectional Soil Reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, **41**: 123-132.
- [5] Chandrasekhar, S. . Radiative Transfer [M]. New York. 1960.
- [6] Irons, J. R., Weismiller, R. A and Petersen, G. W. . Soil reflectance, in Theory and Applications of Optical Remots Sensing [J], *Wiley-Interscience*, 1989, 66-106.
- [7] Cruse, R. M., Linden, D. R., Radke, J. K. Larsen, W. E., and Larnitz, K. (1980). A model to predict tillage effects on soil temperature [J], *Soil Sci. Am. Proc.* 1980, **4**: 378-383.

Research on Remote Sensing Model for Soil Water on Rough Surface

DENG Ru-tu^{1,2}, TIAN Guo-liang¹, LIU Qin-huo¹, XIN Xiao-zhou¹

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Center for Remote Sensing Application, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Roughness of soil surface performs a remarkable inference to bi-directional reflectance function of ground, and it is a variable. So it's one of the important factor that affect the precision of the remote sensing for soil water content. Though analyzing the physical course of soil surface reflecting under the inference of soil water, this paper demonstrated that the relationship between soil reflected spectrum and the soil water content obeys the Beer Law, and that the essential cause of soil surface roughness affecting the soil reflectance is the slant of sub slopes on clod surface which result in the increasing of the raer of multi-reflecting light. Basing on it, a remote sensing mode for soil water remote sensing on rough surface is proposde in this paper. The result of experimental data showed that the model has a satisfied precision.

Key words: soil water content; roughness; BRDF; remote sensing model