

基于植被-土壤二向反射模型的土壤含水量遥感

宋承运^{1,2}, 邓孺孺¹, 王中挺^{1,3}

(1. 中山大学遥感与地理信息工程系, 广州 510275; 2. 安徽理工大学资源与环境工程系, 淮南 232001; 3. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要: 以北京地区为例, 利用像元信息分解法, 定量提取出区域植被盖度, 由植被盖度得到区域叶面积指数, 在只考虑一次散射的情况下, 利用植被-土壤二向反射模型, 提取出下层湿润土壤反射率。通过引入粗糙度因子建立起粗糙地表下土壤反射率与叶面积指数的函数关系, 进而得出土壤含水量。

关键词: 植被-土壤二向反射模型; 像元信息分解; 叶面积指数; 土壤含水量

中图分类号: TP 79 文献标识码: A 文章编号: 1001-070X(2006)03-0029-04

0 引言

土壤水分含量在农业生产、水土保持以及地下水补及等方面都具有重要意义。土壤含水量遥感始于上世纪80年代中期, 90年代后, 我国在土壤水分遥感监测理论方面的研究得到了深入发展, 土壤含水量遥感模型及其应用研究有了很大的提高, 形成了许多土壤含水量监测方法, 如表观热惯量法、作物缺水指数法、距平植被指数法及微波遥感法^[1]等等。

植被与土壤的粗糙度是影响土壤含水量遥感监测的重要因素。植被覆盖度大的地区, 传感器所探测的信息中植被信息比例很大, 下层土壤所占的信息很少, 在很大程度上影响了监测精度。频繁变化的土壤表面结构使土壤表面具有不可忽略的粗糙度。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向反射, 使总的反射能量降低, 降低程度取决于土壤粗糙度^[3], 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, 尤其在光谱法中直接影响到计算结果。

植被-土壤二向反射模型^[2]建立起了下层土壤的反射率与叶面积指数之间的函数关系, 而叶面积指数与植被盖度存在着密切的关系, 可以通过植被盖度求解出叶面积指数。一般情况下, 当地表不是很平整时, 粗糙度对土壤反射率的影响是不可忽略

的, 因此, 引入土壤粗糙度因子, 建立起粗糙地表下土壤含水量与下层土壤反射率之间的函数关系。利用植被-土壤二向反射模型, 通过引入粗糙度因子, 建立起粗糙地表下土壤含水量与叶面积指数的函数关系, 进而提取出土壤含水量。

1 叶面积指数

根据像元信息分解模型, 像元反射率是其内部各组分反射率及其含量的函数。由线性模型可表示为

$$R_i = \alpha_1 R_{1i} + \alpha_2 R_{2i} + \alpha_3 R_{3i} + \dots + \alpha_j R_{ji} + e \quad (1)$$

式中 $\alpha_j R_{ji}$ 分别为第 i 种组分的含量与反射率。

将不同波段数据代入方程组, 即可得到植被盖度。

假设植被在所有波段是朗伯体, 植被冠层由无数倾角、倾向均随机分布的叶子组成, 植被层是水平均匀(但在垂直方向上可能是不均匀的)且无限延伸的, 则在植被覆盖区域, 叶面积指数

$$L = -\frac{\mu}{k} \ln T \quad (2)$$

式中 L 为叶面积指数; $\mu = \cos \theta$, θ 为入射角; k 为消光系数; T 为入射光的透射率。

在植被覆盖地区, $T = 1 - \alpha_v$, α_v 为植被覆盖度, 故

$$L = -\frac{\mu}{k} \ln T = -\frac{\mu}{k} \ln(1 - \alpha_v) \quad (3)$$

2 土壤含水量

2.1 土壤反射率

在研究区域内, 植被对入射光的反射是朗伯体,

$$R = \frac{\rho_l P(g)}{k_1 \mu_2 + k_2 \mu_1} [1 - e^{-[\frac{k_1}{\mu_1} + \frac{k_2}{\mu_2}] L}] + T_p(\theta_1) T_p(\theta_0) \left[\frac{R_s}{1 - R_s R_p(\theta_0)} \right]^{[2]} \quad (4)$$

式中, $P(g)$ 为散射相函数; $\mu_1 = \cos \theta_s, \mu_2 = \cos \theta_v$; k_1, k_2 是冠层在入射角 θ_s 、观测角 θ_v 方向上的消光系数; ρ_l 为叶子上落射率, 且 $\frac{\omega}{4\pi} = \frac{2\pi\rho_l}{4\pi} = \frac{\rho_l}{2}$, $T_p(\theta_0), T_p(\theta_1)$ 分别为在入射方向与反射方向的透过率; R_s 为下层土壤的反射率, 即具有一定粗糙度的湿润土壤的反射率; $R_p(\theta_0)$ 为叶面在入射方向的反射率; R 为植被覆盖区反射率。

实验表明, 当入射天顶角不是很大时, 叶片的正面反射率、背面反射率和透射率在可见光波段反射率均很低, 而在红外波段很接近^[7,8]并接近朗伯反射, 故令 $R_l = \rho_l/2$ 。为表示方便, 令

$$\rho = \frac{R_l P(g)}{k_1 \mu_2 + k_2 \mu_1} [1 - e^{-[\frac{k_1}{\mu_1} + \frac{k_2}{\mu_2}] L}]$$

由式(4)得土壤反射率

$$R_s = \frac{R - \rho}{T_p(\theta_1) T_p(\theta_0) + R R_p(\theta_0) - \rho R_p(\theta_0)} \quad (5)$$

2.2 粗糙地表下土壤含水量

研究表明, 当平整土壤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^[2], 可表示为

$$R_s = R_{s0} e^{-\alpha_{ws} V_{ws}} \quad (6)$$

式中 R_s 为含水土壤反射率; R_{s0} 为干土壤反射率; V_{ws} 为土壤含水量; α_{ws} 为土壤水分吸收系数。

$$R_r = \frac{R_{s0}}{2\pi} \sum_{j=0}^M \sum_{i=0}^N \frac{k_s k_v P(\alpha) [1 - P_s(\theta_s)] \cos(S n_s) \cos(V n_s)}{\cos \theta_s \cos \theta_v \cos \alpha} \Delta \alpha \Delta \phi^{[3]} \quad (7)$$

式中, α 为坡度角; θ_s, θ_v 分别为光线的入射角与观测角; $(S n_s), (V n_s)$ 分别为光线入射方向和观测方向与坡面的夹角; $P(\alpha)$ 为坡度倾角概率; $P_s(\theta_s)$ 为次级坡面落在阴影中的概率; k_s, k_v 分别

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

由式中可知, 湿润土壤的反射率小于干燥土壤的反射率, 故 $0 < S < 1$ 。

因此, 在土壤湿度明显小于田间持水量且地面万方数据

而且在小区域范围内, 植被冠层内叶倾角和倾向是随机分布的。

由植被-土壤二向反射模型, 在植被覆盖区域传感器所测的是植被层与下层土壤的混合值, 即

实际上, 土壤表面结构是不断变化的, 如不同季节的农作, 表层植被的生长与枯萎等都造成了土壤表面的变化, 这些都会在一定程度上引起土壤表面结构的变化, 造成土壤表面具有不可忽略的粗糙度。而粗糙表面入射角小于坡倾角时, 在坡的阴面就没有入射能量, 但是入射光的散射光在坡面发生二向散射, 因此, 从土壤表面的反射光也包括二向或多次的散射光(图1)。

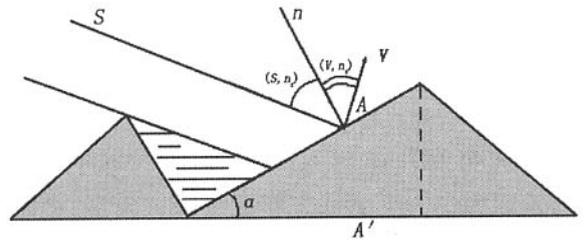


图1 粗糙土壤表面二向反射示意图

当土壤的粗糙地表被看作由许多平整土壤小平面组成, 且这些小平面的倾角随机分布时, 根据入射光线在土壤小平面的二次的散射过程, 可建立起平整地表的反射率 R_{s0} 与粗糙地表反射率 R_r 之间的关系式, 即

为阴影区的阴影因子和可见因子; $M = 2\pi / \Delta \phi$, $\alpha_i = i \Delta \alpha, \phi_j = j \Delta \phi, N = \pi / (2 \Delta \alpha)$ 。

为表达方便, 令粗糙度因子

为粗糙地面时, 引入粗糙度因子 S , 故湿润土壤反射率可表示为^[5,6]

$$R_s = S R_{s0} e^{-\alpha_{ws} V_{ws}} \quad (8)$$

3 数据处理

采用 2001 年 4 月 17 日北京地区 TM 图像一景。首先,经过遥感器的校准、辐射校正和基于地面耦合的 TM 影像的大气校正^[5]、几何校正,可得到研究区域 RGB 假彩色合成图像。

在研究区域,地物的组成成分主要包括水体、植被、土壤和水泥地(建筑物)等 4 种基本地物,忽略差值 e ,将 TM2 ~ TM5 波段数据代入式(1)组成方程组,解方程可得到 4 种地物的基本组分比例,即

$$\begin{cases} \alpha_v = -0.011R_5 + 0.031R_4 - 0.031R_3 + 0.013R_2 \\ \alpha_s = 0.160R_5 - 0.032R_4 - 0.295R_3 + 0.142R_2 \\ \alpha_w = -13.918R_5 - 0.093R_4 + 33.417R_3 + 0.540R_2 \\ \alpha_c = 0.018R_5 + 0.013R_4 + 0.162R_3 - 0.077R_2 \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入式(3),可得到区域叶面积指数 L 。

实验区域为北方平原地区,植被的叶倾角分布可认为是随机的,各参数如表 1、2 所示。

表 1 土壤反射率计算参数

k_1	k_2	$f(g)$	$\theta_1 / (^\circ)$	$\mu_1 = \cos \theta_1$	$\theta_2 / (^\circ)$	$\mu_2 = \cos \theta_2$
$2/\pi$	$2/\pi$	$2/\pi$	27.7	0.885 5	0	1

表 2 TM 数据各波段叶子反射率

波段	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5
R_i	0.04	0.08	0.04	0.52	0.35

将参数代入式(5)可得到土壤反射率 R_s 。在 TM 各波段中,水吸收率在 TM5 波段吸收率较大,在 TM2 波段吸收率较小,而且土壤的反射率在 TM 数据中随着波长的增大而增大,因此,采用 TM2 与 TM5 波段数据。将各参数代入式(8)组成方程组

$$\begin{cases} R_2 = S \cdot 0.124 \cdot E^{-0.022 V_{ws}} \\ R_5 = S \cdot 0.294 \cdot E^{-0.032 V_{ws}} \end{cases} \quad (10)$$

解方程可得到土壤含水量 V_{ws} 与粗糙度因子 S

$$\begin{cases} V_{ws} = \frac{\ln 0.294 - \ln 0.124 - \ln R_5 + \ln R_2}{0.01} \\ S = \frac{R_2}{0.124 \cdot e^{-\frac{\ln 0.294 - \ln 0.124 - \ln R_5 + \ln R_2}{0.01} \times 0.124}} \end{cases} \quad (11)$$

将 TM 遥感数据代入式(11),计算出土壤含水量(图 2)。



图 2 土壤含水量灰度图像

4 精度分析与结论

4.1 精度分析

北京顺义北部地区植被盖度偏低,大多为裸地和稀疏草地,在试验区选取 29 个样品值与土壤含水量计算值进行对比,如表 3 所示。

表 3 顺义赵全营地区土壤含水量实测值与计算值对比

样品号	实测值/%	计算值/%	相对误差	样品号	实测值/%	计算值/%	相对误差
1	24.92	20.20	0.19	16	2.26	3.73	0.65
2	22.45	31.59	0.41	17	30.67	24.65	0.20
3	22.41	22.68	0.01	18	7.44	9.91	0.33
4	21.29	22.45	0.05	19	9.63	8.21	0.15
5	21.69	22.03	0.02	20	16.82	17.94	0.07
6	18.89	13.21	0.30	21	21.73	23.44	0.08
7	18.40	18.15	0.01	22	18.61	26.10	0.40
8	19.44	18.49	0.05	23	21.62	27.04	0.25
9	10.75	12.99	0.21	24	20.67	26.27	0.27
10	3.98	5.59	0.40	25	23.63	24.65	0.04
11	3.32	5.73	0.73	26	21.18	21.31	0.01
12	29.76	20.32	0.45	27	22.72	22.27	0.02
13	25.87	17.59	0.32	28	4.65	5.73	0.23
14	26.76	18.21	0.32	29	9.76	9.91	0.02
15	13.55	18.31	0.35				

在实验区域,含水量计算值与实测值的平均误差为 18.16%,二者的散点图如图 3 所示。由图中可

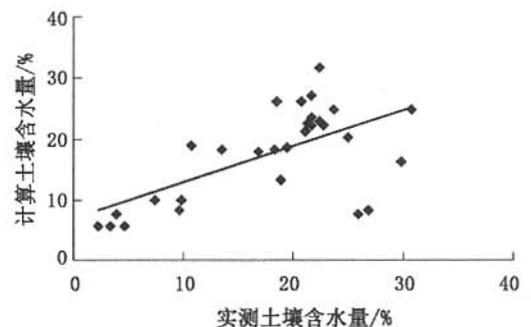


图 3 土壤样点含水量计算值与测量值散点图

以看出,计算值与实测值具有一定的线性相关性。

另外,由于实验条件的限制,实验所用卫星影像资料为2001年4月17日北京一景,而实测数据采集时间为2001年4~5月。实测数据与卫星影像资料的时差会产生结果偏差,模型自身的限制也会使结果产生偏差,随着模型的改进,计算结果会更加精确。

4.2 结论

基于植被-土壤二向反射模型,土壤含水量遥感具有明确的物理机制,在植被盖度不是很高的区域具有较好的效果。但是,在植被覆盖度较大的地区,一方面由于遥感传感器本身所接受到的信息中所包含的下层土壤信息比较少;另一方面,在本文中只考虑了地物的一次散射,而实际上,地物的散射是二次或多次散射,其计算结果的误差,可以通过提高传感器分辨率与充分考虑植被层的多次散射以及模型的优化来提高计算精度。

参考文献

[1] 田国良. 土壤水分的遥感监测方法[J]. 环境遥感, 1991, 16(2): 89-99.

[2] 邓孺孺, 田国良, 柳钦火, 等. 基于多次散射的植被-土壤二向反射模型[J]. 遥感学报, 2004, 8(3): 193-200.

[3] 邓孺孺, 田国良, 柳钦火. 粗糙地表土壤含水量遥感模型研究[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 75-80.

[4] 陈蕾, 邓孺孺, 等. 基于地面耦合的TM影像的大气校正——以珠江口为例[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(2): 34-37.

[5] 邓孺孺. 青藏高原地表反照率反演及冷热源分析[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2002.

[6] 赵英时, 等. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[7] David M Gates, Harry J Keegan, et al. Spectral Properties of Plants [J]. Applied Optics, 1965, 4(1): 11-20.

[8] Breece III H T, Holmes R A. Bidirectional Scattering Characteristics of Healthy Green Soybean and Corn leaves in Viviv[J]. Applied Optics, 1971, 10(1): 119-127.

REMOTE SENSING FOR DETECTING SOIL WATER CONTENT BASED ON BI-DIRECTIONAL REFLECTANCE MODEL OF CANOPY AND SOIL

SONG Cheng-yun^{1,2}, DENG Ru-ru¹, WANG Zhong-ting^{1,3}

(1. Center for Remote Sensing Application, Zhong Shan University, Guangzhou 510275, China; 2. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In this paper, Beijing was chosen as a representative study area, and the method of pixel information decomposition was taken on the land part. The land cover percentage was extracted. LAI was calculated according to the research on the cover of plant. Based on characteristics of multi-reflecting light, the authors obtained the reflectance of the soil by using the Bi-directional Reflectance Model of Canopy and Soil and taking only one reflectance into account. According to the roughness factor, the soil water content could be calculated based on the relationship between soil reflection and LAI.

Key words: Bi-directional reflectance model of canopy and soil; Pixel information decomposition; LAI; Soil water content

第一作者简介: 宋承运(1981-), 男, 硕士, 2005年毕业于中山大学地图学与地理信息系统专业, 研究方向为地理信息学, 现在安徽理工大学资源与环境工程系工作。

(责任编辑: 刁淑娟)

珍惜土地资源, 构建和谐社会。