

卫星遥感估测土壤水分的一种方法*

刘培君 张琳 艾里西尔·库尔班 常萍

(中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所 乌鲁木齐 830011)

李良序 锴拉提 赵兵科

(新疆气象局遥感中心 乌鲁木齐 830002)

摘要 对于植被影响土壤水分遥感的大小,提出了“光学植被盖度”新概念来衡量,并用遥感法进行估测。用分解象元法排除植被干扰来提取土壤水分光谱信息。采用土壤水分光谱法并借助回归分析建立土壤水分遥感的TM数据模型。以此为桥梁,建立了AVHRR数据模型。

关键词 土壤水分; 遥感, 光学植被盖度

1 引言

由于土壤水分受多种因素的影响,又受植被覆盖的干扰,因而土壤水分遥感是一项难度较大的研究课题。国内外关于土壤水分遥感的方法可归纳为土壤水分光谱法、热惯量法、气象法、植物水分生理法^[1-3]。该研究采用土壤水分光谱法。对植被的影响,采用遥感估算光学植被盖度,分解象元排除法来提取土壤水分光谱信息。从TM2、3、4波段(与NOAA1、2通道相近)数据入手建立土壤水分遥感模型,用理论和实践相结合的方法,建立NOAA-AVHRR1、2通道的土壤水分遥感估测模型。这样更便于大面积土壤水分遥感估测。

2 基本原理

2.1 土壤水分与光谱反射率的关系

土壤是含多种成分的复杂的自然综合体。土壤光谱受土壤母质、有机质、水分等多种复杂因素的影响,在母质等其余因素固定的情况下,土壤光谱受土壤水分的制约比较明显。不同土壤类型随水分变化稍有差别,一般随土壤水分的增加而反射率降低,这为用遥感方法探测土壤水分提供了可能。

从各波长点的土壤水分—反射率曲线图,发现土壤水分含量约大于5%时,随土壤水分含量的增加而反射率呈指数下降趋势。两者关系可用下式

表达^[4]:

$$R = ae^{bP} \quad (1)$$

式中 R 为光谱反射率, P 为土壤水分百分数, a, b 为待定系数。

模拟试验区内灌淤土、灌耕土、灌耕灰漠土、风沙土、水稻土等5种主要土壤含水量与反射率的关系皆有类似的规律。前4种土壤的毛管持水量分别为29.2%, 29.4%, 16.6%, 26.0%^[5, 6]。

2.2 土壤反射率与辐亮度的关系

卫星传感器接收到土壤某波长的光谱辐亮度 B_λ 有下列关系^[7]:

$$B_\lambda = R_\lambda \tau_\lambda B_{o\lambda} \quad (2)$$

式中 R_λ 为土壤对波长 λ 的光谱反射率; τ_λ 为大气对波长 λ 的光谱透射率; $B_{o\lambda}$ 为土壤在 λ 处的太阳光谱辐亮度。

传感器某波段的平均辐亮度 B_n 可表示为:

$$B_n = aR_n \tau_n B_{on} + b \quad (3)$$

其中 R_n, τ_n, B_{on} 分别为相应波段的土壤平均反射率、大气平均透射率、入射到土壤平均辐亮度。 a 和 b 是与仪器对波段频率响应和仪器灵敏度有关的系数和常数。当波段范围确定,大气稳定时, τ_n, B_{on} 可视为定量。由(3)式可变成:

$$R_n = AB_n - b \quad (4)$$

这说明土壤某波段平均光谱反射率与卫星遥感数据相应波段的光谱亮度成正比。利用这个关系可

* 本文为新疆维吾尔自治区“八五”重要科研项目子项“土壤水分遥感监测研究”成果之一。参加该工作的还有王让会、付华等同志。

将卫星数据转换成相应的土壤反射率。

2.3 排除植被干扰, 恢复土壤象元数据

这里引入一个“光学植被盖度”概念, 它被定义为实有植被的光学信息量占观测范围内全部为植被光学信息量的比^[8]。对于陆地卫星 TM 数据的一个象元的光学植被盖度可由 2、3、4 波段的光谱亮度来估算, 其公式如下:

$$C_{vo} = \frac{B_4 - B_{23} - r_{so}}{B_{4植} - B_{23植} - r_{so}} \quad (5)$$

式中 C_{vo} 即象元的光学植被盖度; B_4 为 4 波段的光谱亮度; B_{23} 指 2、3 波段的平均光谱亮度; $B_{4植}$ 为理想的全为植被光学信息时的 4 波段的光谱亮度; $B_{23植}$ 为理想的全为植被光学信息时的 2、3 波段平均光谱亮度; r_{so} 为一常数, 在数值上等于裸土壤的 $B_{4土}$ 和 $B_{23土}$ 的差值, 其意义为裸土壤的虚生物量本底。

式(5)分子表示象元覆盖范围内实有植被光学特征信息量(相当纯差值植被指数), 分母为理想的象元全被植被覆盖(无空隙地)时的光学特征信息量。因此, C_{vo} 的物理意义表示象元范围内实有植被光学信息的权重, 其几何意义相当于象元内植物枝叶投影和象元面积比。它的植物学意义相当于枝叶郁闭度(小于生态学上的植被盖度)。它的生物学意义表示生物量的有无(无生物量 C_{vo} 为 0)和多少。土壤水分在遥感监测中取其几何意义。

在包含土壤和植被两种覆盖信息的一个象元中, 其光谱亮度是两种地物的辐亮度的复合。以 4 波段为例, 其土壤的光谱:

$$B_{4土} = \frac{B_4 - C_{vo}B_{4植}}{1 - C_{vo}} \quad (6)$$

此为排除植被对土壤水分的干扰, 使复合象元变成裸土光谱亮度的一种估算方法, 公式(6)也适用于裸土壤。

2.4 利用 TM 数据估算土壤水分的方法

从以上分析看出, 利用公式(1)、(4)、(5)、(6), 辅助于数理统计和回归分析, 可以建立土壤水分遥感估测的 TM 光谱亮度数据模型。

3 土壤水分遥感的 TM 数据模型

3.1 实验方法

选择阜北农场东北部一块 $3.3 \times 3.3 \text{ km}^2$ 农区作为

主要样区, 每隔 300m 选一样点, 配合 TM 数据进行准同步观测, 测其光谱反射率、植被盖度、枝叶郁闭度、表层 10cm 土壤含水量。同时在阜康境内选择灌耕土、灌耕灰漠土、风沙土、水稻土、灌淤土作为辅助样地, 作各项观测。其目的是: (1) 为了建立土壤反射率—光谱辐亮度回归直线, 以便将土壤卫星数据转换为反射率值; (2) 用统计方法确定公式(5)中的 r_{so} 、 $B_{4植}$ 、 $B_{23植}$; (3) 验证和调试土壤水分遥感模型, 以便符合实际。

取上述几种类型土壤烘干, 各称约 1000g, 模拟铺厚约 10cm, 然后逐渐增加不同的水, 依次测其光谱反射率。采用非线性回归方法确定公式(1)中的 a 、 b 常数, 以便建立土壤水分的反射率模型。

3.2 光学植被盖度的 TM 数据模型

用 82 个裸土壤样本进行统计分析, 测得 r_{so} 等于 15.38。用 15 个样本(含较高植被覆盖)统计分析, 得 $B_{4植}$ 为 211.5, $B_{23植}$ 为 23.40。将上述实验统计数据代入(5)并将 B_{23} 重新分解成 B_2 和 B_3 , C_{vo} 有下列形式:

$$C_{vo} = 0.00579B_4 - 0.003308B_2 - 0.002482B_3 - 0.08905 \quad (7)$$

该模型不但对排除植被干扰有用, 而且对识别水体也十分有用。当 C_{vo} 为负值时, 该地物一般为水体。

3.3 排除植被干扰, 恢复裸土壤光谱亮度的 TM 数据模型

利用公式(6)、(7), 可以将带有植被光谱信息的复合象元的光谱亮度换算成裸土壤的象元光谱亮度。合并(6)、(7)两式, 得:

$$B_{4土} = \frac{0.6996B_2 + 0.5249B_3 - 0.2246B_4 + 18.83}{1.089 - 0.00579B_4 + 0.003308B_2 + 0.002482B_3} \quad (8)$$

3.4 将裸土壤光谱亮度转换成反射率的模型。

根据公式(4), 由 20 个样本数据进行回归分析, 建立了下列模型(相关系数为 0.9692):

$$R_{4土} = 0.9960B_{4土} - 42.05 \quad (9)$$

式中, $R_{4土}$ 为土壤在 4 波段平均反射率。

由(8)、(9)式可得:

$$R_{4土} = \frac{0.6968B_2 + 0.5228B_3 - 0.2237B_4 + 18.76}{1.089 - 0.00579B_4 + 0.003308B_2 + 0.002482B_3} - 42.05 \quad (10)$$

上述公式可以用来由某象元的 2、3、4 波段辐射亮度数据估测该象元的裸土壤在 TM4 波段的平均光谱反射率。

3.5 土壤水分的 TM 数据模型

用不同土壤类型进行非线性回归分析, 旨在建立反射率和含水量的关系。各种类型土壤回归分析结果, 常数有些差异。对各类土壤回归分析的相关系数在 0.92—0.98。为了实施快速宏观遥感监测土壤水分状况, 取该区几种类型土壤水分遥感模式的平均值:

$$P_4 = 91.70 - 42.91 \lg R_{4\pm} \quad (11)$$

P_4 表示用 TM4 波段求出的土壤含水百分率。将公式(10)代入(11), 并用已知数据进行调试, 修正截距变为:

$$P_4 = 77.0 - 42.91 \lg[(0.6968B_2 + 0.5228B_3 - 0.2237B_4 + 20.26) / (1.089 - 0.00579B_4 + 0.003308B_2 + 0.002482B_3) - 18.0] \quad (12)$$

(12) 式可由 TM2、3、4 波段亮度数据快速估测昌吉农区土壤水分状况, 测量深度 10cm。把土壤水分含量分成 6 级 (<5%, 5%—10%, 10%—15%, 15%—20%, 20%—25%, >25%), 经计算机系统运行, 比较符合实际。

4 土壤水分遥感的 NOAA / AVHRR 数据模型

4.1 B_{A1} 和 B_{23} 的关系, B_{A2} 和 B_4 的关系

由公式(2)可以粗略地推论出下列公式:

$$B_n = R_n \tau_n B_{on} \quad (13)$$

其中, B_n 为某波段接收地物的平均光谱亮度; R_n 为该波段平均反射率; τ_n 为该波段平均大气透过率; B_{on} 为该波段射到地面的太阳平均辐亮度。于是 NOAA / AVHRR1 通道和 Landsat / TM2、3 通道的平均辐亮度的比可写成:

$$\frac{B_{A1}}{B_{23}} = \frac{R_{A1} \tau_{A1} B_{oA1}}{R_{23} \tau_{23} B_{o23}} = \frac{R_{A1}}{R_{23}} \cdot \frac{\tau_{A1}}{\tau_{23}} \cdot \frac{B_{oA1}}{B_{o23}}$$

下脚 A1 表示 AVHRR 1 通道, 其它字符含义如前, 分别用样本统计法、理想大气透过率曲线分析法^[9]、太阳辐照度分布曲线分析法, 求 R_{A1} / R_{23} , τ_{A1} / τ_{23} , B_{oA1} / B_{o23} , 计算得:

$$B_{A1} / B_{23} = 0.9366$$

考虑到两种传感器的频率响应和仪器灵敏度有差异, 可将上式写成:

$$B_{23} = 1.068 B_{A1} + C_1 \quad (14)$$

C_1 为两传感器数据之间校正常数。

用同样方法, 可得:

$$B_4 = 1.070 B_{A2} + C_2 \quad (15)$$

C_2 为两传感器之间的校正常数。

4.2 土壤水分的 NOAA / AVHRR 数据模型

将公式(12)中的 B_2 、 B_3 合并成 B_{23} 的表达形式, 然后合并(12)、(14)、(15), 得

$$P_{A2} = 77.0 - 42.91 \lg[(0.6444B_{A1} - 0.2394B_{A2} + C_3) / (1.089 - 0.006195B_{A2} + 0.003059B_{A1} + C_4) - 18.0]$$

为保证对数符号内为正值, 含水量结果为正值, 且土壤水分含量适中, 调整常数, 分式变成:

$$P_{A2} = 56.56 - 42.91 \lg[(0.6444B_{A1} - 0.2394B_{A2} + 26.5) / (1.089 - 0.006195B_{A2} + 0.003059B_{A1} + 0.05) - 18.0] \quad (16)$$

这个土壤水分遥感的 NOAA 卫星数据模型经初步运行试验, 比较符合实际, 可以实施大面积快速土壤旱情监测。模型是根据阜康农区及毗邻地物, 经 TM 数据作桥梁建立的, 但从试验结果看, 天然植被区和裸地区也适用。

5 结语

(1) 经土壤水分敏感波段选择和实测比较, 近红外波段估测土壤水分精度优于可见光波段。故文中选用近红外波段相关模型。

(2) 从模型估测的土壤水分分布情况看, 比较符合地貌分布规律。按高山—中山—低山—平原的顺序土壤水分含量依次减少。1994 年 4 月份土壤水分含量分布图(封二图版 I 图 1)。6 月份森林带和草甸带土壤水分含量约 15%—20%, 草原带 10%—15%, 荒漠带约 5%—10%, 沙漠带小于 5%, 农区土壤水分多在 5%—10% 和 10%—15% 两档之内(封二图版 I 图 2)。图中下部浅蓝色带、绿色带、深蓝色属山区草地或山区森林, 土壤水分含量较高。

(3) 两种遥感资料中, TM 的地面分辨率高, 相应土壤水分含量的地面分辨率也高, 可以分到 $30 \times 30 \text{m}^2$, 但一般一个田块的含水量在一个级别(封二图版 I 图 3)。含水量达 20%—25% 的一般为灌水不久的棉田或玉米地。NOAA 资料地面分辨率低些, 但适合宏观大面积快速监测土壤水分, 覆盖面大, 重复周期短, 频次高。

(4) 水体(包括固体水)、重盐碱土不遵守模型规律,但可以用光学植被盖度模型将它们区分出来,作特殊地物看待。

(5) 光学植被盖度不但能反映植被盖度的大小,而且是生物量多少的度量,所以对作物估产、草场生物量估测有巨大潜力。

(6) 光学植被盖度分式中的参量 r_{so} 随土壤类型不同稍有差异,为提高估测精度,不同类型区域的土壤应通过试验采用不同的参数,分别建立模型。

(7) 用本方法估测的土壤水分含量和实测数据进行比较,经过 12 个样区检验,一般精度达 80% 以上,有的在 90% 以上,平均精度为 87.99%。

(8) 该区农田几种类型土壤毛管持水量一般在 22%—29%。田间持水量一般小于毛管持水量。模拟测试灌耕灰漠土、灌淤土、灌耕土、风沙土、水稻土的土壤水分—反射率的关系数据时所用的最高含水量分别是 22.99%, 23.29%, 24.86%, 14.46%, 25.52%。基本上达到其田间持水量级。如果再提高其土壤含水量,反射率有反弹现象。所以,模型测得的土壤含水量达 25% 左右时可靠性低些。

(9) 一般来说,土壤含水量在田间持水量的 60%—80% 作物生长最佳。按此计,该区农田土壤含水量在 15%—20%,有利于作物生长。我们 3 年采集的 400 个土样中,只有 15 个超过 20% (灌水不久的棉田和玉米地),其他皆低于 20%。模型在宏观监测这些生产实践中的土壤水分范围时是可以满足需要的。

(10) 利用可见光和近红外波遥感监测的深度有限,不及微波和热红外波段。该文所说估测深度 10cm 是根据模拟厚度和采样检验深度大体相符而言。实际上模拟和自然状态有一定差异,自然表层较干。这也是此法估测精度受到限制的一个原因。另外,此方法尚未考虑植被阴影的影响,有待改进。

参 考 文 献

- [1] 张仁华,以红外辐射信息为基础的估算作物缺水状况的新模式,遥感遥测及计算机应用,气象出版社,1990,18—26.
- [2] 张仁华. 近远红外波段遥感裸地土壤水分. 遥感遥测及计算机应用. 气象出版社,1990,131—140.
- [3] 田国良. 土壤水分的遥感监测方法,环境遥感,1991,6(2): 89—98.
- [4] 天津大学等,高等数学,人民教育出版社,1960,170—179.
- [5] 李和平. 新疆灌溉——自成型绿洲耕作土壤系统分类初探. 干旱区研究,1993,10(2): 30.
- [6] 杨春明等. 新疆生产建设兵团垦区土壤,新疆科技卫生出版社,1993,428
- [7] 陈沈斌等. 地面反射波谱与卫星磁带记录数据间关系模拟的初步探讨. 遥感技术与应用,1994,(1): 11—17.
- [8] 刘培君等. 用 TM 数据估测光学植被盖度的方法,遥感技术与应用,1995,10(4): 9—14.
- [9] 钱灿圭等. MSS 四通道光谱辐射仪在 NOAA / AVHRR 通道的换算模式及应用,遥感技术与应用,1995,10(1): 10—16.

作 者 简 介

刘培君,男,1941年生,毕业于复旦大学生物物理专业,研究员,现从事遥感技术及应用研究。发表论文报告 60 余篇,文集 2 部。

A Method for Monitoring Soil Water Contents Using Satellite Remote Sensing

Liu Peijun Zhang Lin Alishir Kurban Chang Ping

(Xinjiang Institute of Biology Pedology and Desert Research, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, 830011)

Li Liangxu Pularti Zhao Bingke

(The Remote Sensing Center, Xinjiang Meteorological Bureau, Urumqi, 830002)

Abstract A new concept of "Optical Vegetation Coverage" is put forward to estimating the amount of water contents of soil affected by vegetation using remote sensing technology. Spectral information of Water contents are extracted using the method of decomposing pixels to remove the vegetation effects. The method of spectrum of soil water contents is adopted. A TM data model is built using a regression method. On the basis of above methods, an AVHRR data model is set up.

Key words Soil water contents, Remote sensing, Optical vegetation coverage

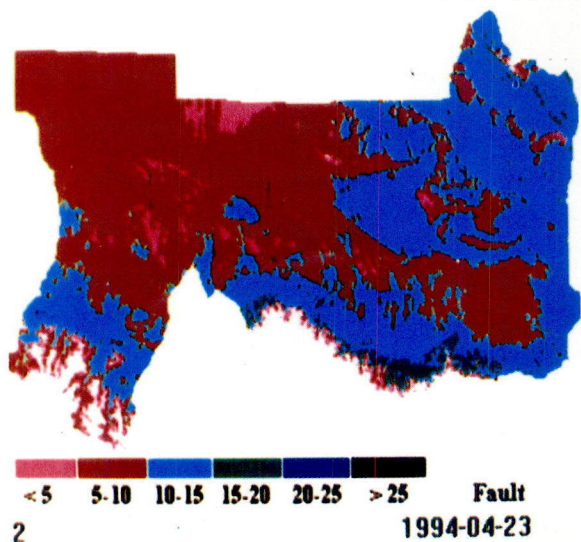


图1 1994年4月23日土壤水分含量分布图
(据AVHRR数据模型)

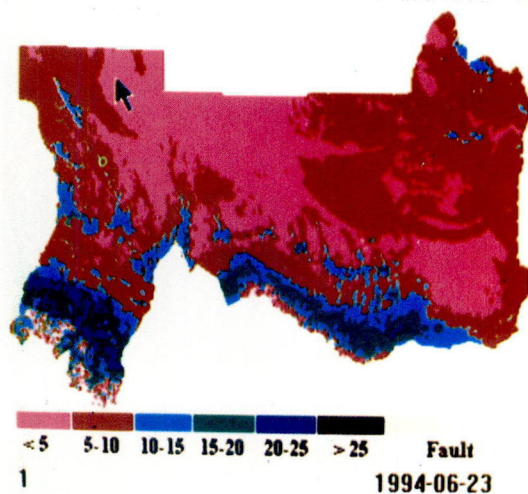


图2 1994年6月23日土壤水分含量分布图
(据AVHRR数据模型)

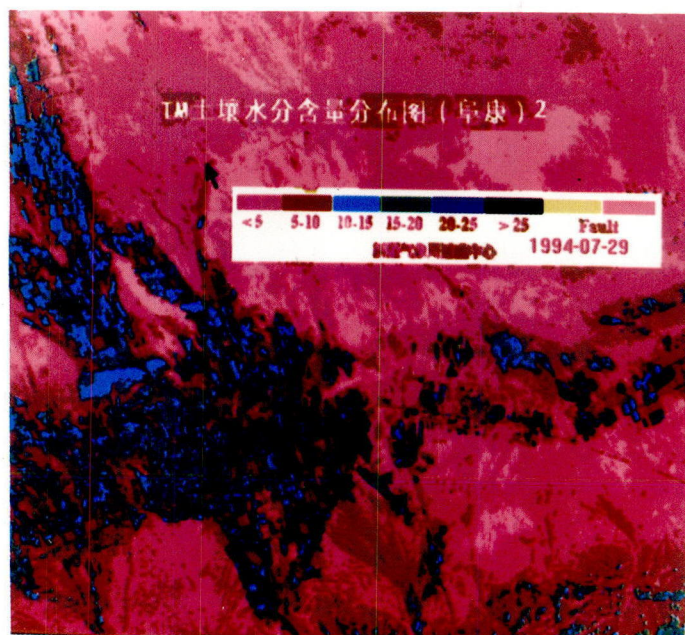


图3 1994年7月29日阜康农区土壤水分含量分布图 (据TM数据模型)