

基于干旱区地面实测热红外光谱的土壤含水量反演研究

丁建丽^{1,2}, 曾小箕^{1,2}, 李争光^{1,2}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 土壤水分在干旱地区生态系统中起着重要的作用, 同时土壤含水量是确定土壤干旱的重要参数。通过分析野外和室内实测土壤发射率光谱特征参数与含水量之间的关系, 采用光谱特征分析参数提取反演土壤含水量的最佳敏感波段, 发现波长在 9.480 2~9.790 1 μm 土壤含水量对其发射率最为敏感。根据最佳敏感波段的范围, 模拟 MODIS, ASTER, HJ-1B 卫星的热红外波段, 对波段及波段比值与土壤含水量进行回归分析, 得出波段比值的线性模型可有效地反演出土壤的含水量。然后对该模型进行验证分析, 确定模拟 ASTER 卫星传感器的 12 和 14 两个热红外波段的发射率比值与土壤含水量的线性关系, 其反演精度更高。建立了适合研究区的土壤热红外发射率与含水量之间的反演模型。

关键词: 热红外光谱; 土壤含水量; 干旱区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2014)01-0321-06

中图分类号: S152.7, X87

A Study on Inversion of Soil Moisture Based on Measured Ground Thermal Infrared Spectrum in Arid Area

DING Jian-li^{1,2}, ZENG Xiao-ji^{1,2}, LI Zheng-guang^{1,2}

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology of the Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

Abstract: Soil moisture plays an important role in arid ecological system, and soil moisture content is an important parameter in determining soil drought. We analyzed the relationship between the spectral characteristic parameters of emissivity and the soil moisture content that were measured in field and laboratory, and extracted the best sensitive band of inversed soil moisture content by the parameters from spectral characteristic analysis. It was found that the wave length were in 9.480 2~9.7901 μm and the soil moisture content was the most sensitive to its emissivity. Based on the scope of the most optimal sensitive waveband, the thermal infrared wavebands of MODIS, ASTER and HJ-1B Satellites were simulated, a regression analysis was made for waveband, waveband ratio and soil moisture content, and a linear model of waveband ratio was ultimately constructed, which can effectively deduce soil moisture content. The model was verified so as to find the linear relation of soil moisture content with the emissivity of thermal infrared bands 12 to 14(simulated ASTER satellite sensor). The inversion is so precise that an inversion model applicable to the relation of infrared emissivity and soil moisture content in the studied area was established.

Keywords: thermal infrared spectrum; soil moisture content; arid area

在地球系统中, 土壤含水量是陆地和大气能量交换过程中的重要因子, 对陆地表面蒸散、水的运移、碳循环具有很强的控制作用, 是气候、生态、水文、农业等领域衡量土壤干旱水平的重要指标^[1-2]。在干旱地区由于土壤水分蒸发较大, 导致土壤缺水而干旱, 易引起水土流失、植被退化、土壤沙化等生态环境恶化

现象, 因此对土壤水分实时动态监测的研究具有重要意义。目前使用的测定土壤含水量的方法中, 较为常用的有称重法、湿度计法、时域反射法、中子法等, 这些常用的方法都是以点为测定基础的, 虽然能够精确地测定多个不同层次的土壤参数, 但其不足之处也是显而易见的, 例如费时, 费力, 难以准确科学地揭示出

收稿日期: 2012-12-02

修回日期: 2013-04-14

资助项目: 新疆维吾尔自治区青年科技创新人才培养工程, 杰出青年科技人才培养项目(2013711014); 国家自然科学基金项目“新疆绿洲浅层地下水盐变化与地表植被生态效应遥感研究”(41261090); 国家自然科学基金项目“新疆联合基金本地优秀青年人才: 新疆绿洲水盐运移情景模拟数据同化”(U1303381)

作者简介: 丁建丽(1974—), 女(汉族), 山东省成武县人, 教授, 博士生导师, 研究方向为资源遥感与 3S 技术应用。E-mail: ding_jl@163.com。

土壤参数的空间分布及其特征^[3]。遥感技术的出现和发展,弥补了传统方法上的不足之处,也为实现土壤特征参数的宏观、实时、动态的监测提供了一些新的思路,然而进行大面积的土壤特征参数定量反演一直都是科学界中公认的难题^[4-5]。相对其他遥感方法来说,基于土壤的热学特性,热红外波段对土壤水分更为敏感,目前也已逐渐成为监测土壤含水量的主要方法之一^[6-7]。

国内外学者在热红外遥感进行监测土壤水分的研究中开展了大量的工作。Myers 等^[8]和 Watson 等^[9]最早提出了利用地表温度日较差来推算热惯量的模型,并成功地应用了该模型。Price 等^[10]在研究中首次提出了表观热惯量(ATD)的概念,并通过卫星传感器的热红外辐射温度差算出了热惯量,进一步估算出了土壤含水量。Nemani 等^[11]在研究植被冠层热辐射时,证实了冠层温度/植被指数(Ts/NDVI)对土壤含水量变化的敏感程度非常高,在利用热红外遥感技术反演土壤水分上也取得了一定的成果。隋洪智等^[12]利用 NOAA/AVHRR 数据计算出热惯量,得出了土壤表观热惯量与土壤含水量的线性关系。张可慧等^[13]构造出不同深度土壤含水量和 NOAA/AVHRR 的线性回归模型和幂指数模型。赵杰鹏等^[14]结合可见光红外与被动微波遥感的土壤水分协同反演。

本文通过结合野外和实验室实测的土壤热红外发射率数据,分析研究地表土壤含水量的光谱特征,并模拟计算得到 MODIS, ASTER, HJ-1B 卫星的热红外波段与土壤含水量的回归分析结果。这项研究可为该区域土壤退化和环境监测提供热红外的理论基础和部分技术支持,对加强新疆土壤水分监测、促进遥感技术在新疆生态环境监测中的应用具有重要意义^[15]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择渭干河—库车河三角洲绿洲(简称渭库绿洲)为研究区,地理坐标为 83°15′—83°35′E, 41°30′—41°40′N。渭库绿洲位于塔里木盆地的中北部,地处南疆腹地,是一个典型而完整的扇形平原绿洲,总面积达 $5.24 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。属大陆性暖温带极端干旱气候,年均降水量与蒸发量比约为 40:1,蒸发强烈,透水性差,为典型的绿洲农业,农作物生长全靠灌溉^[16]。

1.2 数据获取

本研究在绿洲内部及绿洲外围交错带均匀选择

30 个采样点,其植被及地表土壤水分有着非常明显的梯度变化,有助于通过遥感手段进行各种土壤参数反演的研究。数据采集所采用的仪器是美国 Design & Prototypes 公司出产的便携式 FTIR 光谱仪(102F 机型)。测量期间尽量避免环境变化过大,选择晴朗无风的天气,在室外自然光照条件下垂直或者小角度向下采用多点多地物,一点多次测量的方法,取单点多次测量结果的平均值为该地物的发射率光谱。测量时段范围为 07:00—09:00 和 20:00—22:00。

在野外土壤热红外光谱测量时,同时进行土壤样本的采样。去除采样点的表层浮土,选取地表以下约为 5 cm 的土壤,装入铝盒进行密封编号,称其铝盒重量,并送回实验室进行土壤含水量的测定^[17]。同时取 0—5 cm 不同深度的混合土约 200 g,密封后自然风干碾碎,过 0.5 mm 细筛,取 20 g 进行土壤样本参数的测定,剩余的使用 FTIR 光谱仪对风干后的土样进行辐射光谱测量。

1.3 光谱数据的预处理

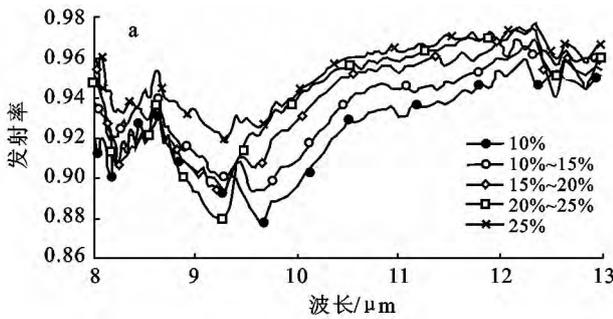
1.3.1 土壤热红外光谱的分离获取 热红外高光谱数据拥有大量的连续光谱波段,为解读目标物的热特性提供了极其丰富的信息,也有助于对目标进行更为细致的识别和分类^[18],这就要求对地物温度和发射率进行分离计算。目前常采用的温度/发射率分离算法有包络线法、黑体拟合法、参考通道法、独立变量迭代法、光谱平滑迭代法,除此之外还有针对热红外高光谱数据的一些方法。例如灰体法、发射率归一化法、a 剩余法和最大最小值发射率法等^[19]。采用光谱平滑迭代法可以获得较高的发射率分离精度,首先得到拟合后的发射率光谱曲线,然后修改拟合温度来改变曲线的平滑度,最终得到一个最为平滑的曲线,该曲线即为此温度下的土壤发射率光谱曲线。

1.3.2 光谱曲线去噪 由于实测土壤光谱中掺杂着大量的环境背景和仪器自身产生的噪声,在进行温度/发射率分离后,如果直接用于其数据进行分析建模会造成较大的误差,因此需要对其光谱数据进行光谱去噪。本文对所选取的土壤发射率光谱进行一阶微分处理,由于地物的热红外发射率对测量环境非常敏感,即使在测量中已经减少外界不利因素的影响,依旧会存在噪声。本文采用了五点移动平均光滑的算法,去除了仪器在测量中因为波段对相应能量上的差异所产生的噪声,并获取了与原始光谱曲线总体趋势相似的新光谱曲线,该光谱曲线更加平滑,更有利于对光谱特征的分析。

2 结果与讨论

2.1 土壤含水量建模波段的确

通过对不同含水量土壤的发射率光谱测量,对其光谱特征曲线进行分析,土壤水分含量主要在 8.0~8.2,8.7~8.9,9.5~11.9,12.5~13 μm 的几个波段区间里有明显变化。如图 1a 所示,由于水分含量不同,土壤发射率曲线出现了不同程度的上下起伏,尤其是在峰值点最为明显。从曲线的整体上可以看出,土壤的发射率随着含水量的增加而变大。在 11~13 μm 波段,光谱曲线的对比度在下降,曲线开始趋



直;在 8.5~8.7 和 11.9~12.5 μm 两个波段区间内,光谱出现不同程度的重叠交叉,说明在该波段土壤发射率随含水量的变化并不明显。

图 1b 是对 30 个不同含水量土壤样品在每个波段对应求取的发射率与含水量之间的相关系数。可看出图 1b 中相关系数的变化同图 1a 中光谱曲线的变化基本保持一致。土壤发射率随含水量变化明显的波段区间,其相关系数也高,光谱重叠现象比较明显的区间相关系数较低。尤其在 8.0,8.6 和 9.7 μm 波长附近,相关系数达到了 0.35 以上,说明该波长处,土壤发射率对水分含量最为敏感。

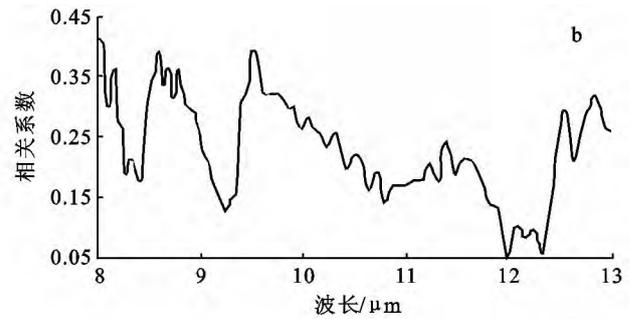


图 1 不同含水量土壤发射率光谱曲线及逐波段与土壤含水量的相关性

通过进一步的主成分分析(表 1),发现上述 3 个相关系数最高的波长点全都落在前两个主成分对应的波段范围内。累计贡献率达到了 94.52% 的主成分所对应的波段几乎覆盖了整个窗口,也就是说土壤发射率随水分变化的“信息”基本上存在于整个热红外波段内。其中,9.45~11.90 μm 的贡献率达到 57.13%,而 8.26~8.45 和 8.71~8.83 μm 两个区间的贡献率也达到了 32.52%。

表 1 土壤含水量敏感波段的主成分分析

波段/ μm	贡献率/%	累计贡献率/%
9.45~11.90	57.13	57.13
8.0~8.22,8.71~8.83	32.52	89.65
12.45~12.95	4.87	94.52

2.2 土壤含水量发射率模型建立与分析

研究区土壤含水量和野外实测的土壤发射率光谱具有良好的相关性,本文尝试建立土壤发射率与土壤含水量的统计模型,通过模拟 MODIS,ASTER 和 HJ-1B 卫星的波段发射率和发射率比值数据与土壤含水量进行回归分析,实现了一定程度的量化,最后并用实测的土壤含水量对其模型进行验证。

本文对研究区野外实测和室内测定的土壤发射率数据按照不同的通道分段,最终选择了 MODIS 的

B_{30} 和 B_{30}/B_{32} , ASTER 的 B_{12} 和 B_{12}/B_{14} , HJ-1B 星红外相机的 B_8 作为自变量,土壤水分作为因变量,进行回归分析,回归模型选择线性、一元二次方程、对数函数、幂函数和指数函数,分析结果如表 2 所示。研究表明,由于土壤表面并不光滑,所以其温度分布也不均匀,而且土壤结构和状态发生微小的变化也会引起表面温度的改变,在实测土壤发射率光谱时,很难对其表面温度进行控制。但是通过发射率比值的运算可抑制土壤样品表面温度对其发射率的影响,因此,通过发射率比值的方式可更好地进行土壤水分的反演。从不同的传感器上来看,通过 ASTER 的波段通道建立模型,整体精度上要大于 MODIS,而 HJ-1B 星的效果最差,这主要取决于传感器的波段通道是否与土壤含水量敏感波段具有良好的响应关系,从波段选择可看出,土壤的不同含水量的最佳敏感波段完全位于 ASTER 传感器的波段通道内。从模型类型上来看,如果只进行 R^2 检验,则一元二次方程建立的模型效果最好;如果只做 F 检验,则幂函数模型更优;如果同时考虑两个检验方式,可看出线性模型的 R^2 值和 F 值都比较高。考虑到模型的难易程度,本研究认为线性模型是最佳选择。图 2—3 为 B_{30}/B_{32} , B_{12}/B_{14} 波段比值与土壤含水量的散点图及线性回归分析。

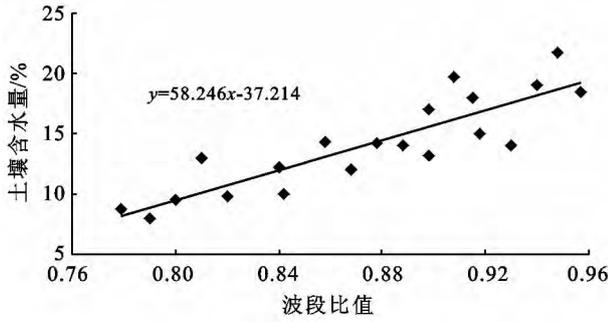


图 2 B₃₀/B₃₂ 波段比值与土壤含水量关系

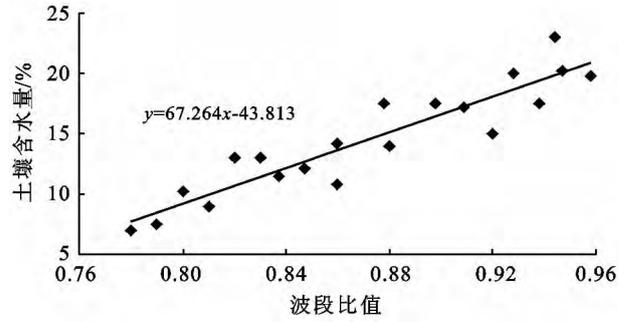


图 3 B₁₂/B₁₄ 波段比值与土壤含水量关系

表 2 土壤发射率、发射率比值与土壤含水量之间的拟合模型

通道分段	模型类型	模型方程	R ² 值	F 值
MODIS B ₃₀	线性	$y=34.274x-18.533$	0.326 4	17.485
	一元二次	$y=-198.17x^2+394.67x-184.83$	0.382 8	12.358
	对数	$y=36.767\ln(x)+18.372$	0.302 6	18.282
	幂函数	$y=18.625x^{2.517}$	0.286 7	18.428
	指数	$y=1.027e^{3.876 1x}$	0.265 8	17.683
MODIS B ₃₀ /B ₃₂	线性	$y=58.246x-37.214$	0.531 8	30.546
	一元一次	$y=-284.567x^2+524.36x-218.42$	0.581 2	19.458
	对数	$y=56.328\ln(x)+21.742$	0.541 5	30.825
	幂函数	$y=23.671x^{4.621 3}$	0.535 9	31.024
ASTER B ₁₂	指数	$y=0.304e^{4.083 9x}$	0.524 8	28.158
	线性	$y=45.284x-22.731$	0.504 6	25.625
	一元一次	$y=-268.27x^2+503.74x-213.48$	0.546 8	18.426
	对数	$y=38.796\ln(x)+22.607$	0.513 8	22.482
ASTER B ₁₂ /B ₁₄	幂函数	$y=35.641x^{2.684}$	0.462 1	26.288
	指数	$y=1.158 6e^{4.142 3x}$	0.452 6	21.494
	线性	$y=67.264x-43.813$	0.683 4	50.264
	一元一次	$y=-296.83x^2+578.34x-258.46$	0.702 5	30.538
HJ-1B B ₈	对数	$y=60.286\ln(x)+22.451$	0.691 2	51.082
	幂函数	$y=23.242x^{4.520 3}$	0.687 5	51.169
	指数	$y=0.307e^{4.573 8x}$	0.651 6	45.761
	线性	$y=22.025x-11.435$	0.153 4	10.158
HJ-1B B ₈	一元一次	$y=-86.25x^2+173.826x-76.459$	0.182 5	12.268
	对数	$y=11.257\ln(x)+6.358$	0.163 5	15.242
	幂函数	$y=17.026 1x^{1.089 2}$	0.132 8	15.458
	指数	$y=0.156e^{4.257 5x}$	0.128 6	15.038

注: x 为波段发射率值或波段比值; y 为土壤含水量; R^2 值为相关系数检验值; F 值为方差齐性检验值。

2.3 热红外发射率模型的精度验证

在建立了不同土壤含水量的发射率估算模型后, 本文还对模型进行了精度验证。选取不同含水量的土壤样品数据, 通过由波段比值建立的线性模型进行预测精度的分析, 分析时采用可决系数 (r^2)、均方根误差 (RMSE) 和平均相对误差 (σ) 方法^[20], 计算公式分别如下:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_{ii} - E_{ai})^2}{\sum_{i=1}^n (E_{ii} - \overline{E_{ii}})^2} \quad (1)$$

式中: E_{ii} —— 实测土壤光谱发射率值; E_{ai} —— 预测光谱发射率值; $\overline{E_{ii}}$ —— 实测光谱的平均发射率值; n —— 样品数目。下同。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{ii} - E_{ai})^2}{n}} \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n |E_{ii} - E_{ai}|}{nE_{ii}} \quad (3)$$

$$P_{\lambda} = \sigma_{\lambda} \times R_{\lambda} \quad (4)$$

式中: P_{λ} ——热红外光谱诊断指数; σ_{λ} ——波段上发射率数值的均方差; R_{λ} ——波段上发射率与土壤水分含量之间的相关系数。 R_{λ} 绝对值越大, 说明土壤

参数在该波段和其发射率的相关性越高。

在确定土壤含水量对其发射率的影响时, 本文通过分别计算 P_{λ} , σ_{λ} , R_{λ} 的绝对值, 选取了综合之后 P_{λ} 绝对值最大的 6 个波段(表 3)。由表 3 中可见, 土壤含水量在波长为 9.480 2~9.790 1 μm 对其发射率最为敏感, 相比特征分析参数所获得的敏感波段来说, 土壤水分光谱诊断指数提取的敏感波段更为集中, 冗余度更低, 因此可选择该波段区间进行反演土壤含水量。

表 3 土壤含水量光谱诊断指数

序号	1	2	3	4	5	6
波长	9.480 2	9.543 1	9.630 6	9.675 1	9.746 7	9.790 1
$ P_{\lambda} $	0.035 1	0.035 5	0.035 9	0.035 6	0.035 3	0.034 8

注: P_{λ} 指热红外光谱诊断指数。

为了更好地完善土壤含水量的反演模型, 本文随机选取了野外实测不同土壤水分的光谱样点各 30 个, 分别选取其中的 20 个样点参与土壤水分的模型回归分析, 另外的各 10 个样点数据用于模型验证。按照 r^2 和 RMSE 相对较高 $\bar{\sigma}$ 相对较低的原则进行分析, 结果见表 4。从表 4 中看出, 通过 ASTER 热红外通道发射率比值模拟的土壤含水量模型精度整体都

高于 MODIS, 可认为通过热红外发射率反演土壤含水量的模型中, 以 B_{12}/B_{14} 的波段比值作为自变量的线性模型最为合适。将 10 个样点的含水量数据分别与两种波段比值进行对比(图 4), 针对含水量预测模型来说, B_{12}/B_{14} 的预测值比 B_{30}/B_{32} 预测值更逼近于真实值。这表明波段比值的线性模型具有一定的实用性。

表 4 土壤含水量热红外发射率预测模型精度验证结果

特征参数	自变量	回归方程	r^2	RMSE	$\bar{\sigma}/\%$
含水量	B_{30}/B_{32}	$y=58.246x-37.214$	0.638 7	0.566 1	14.53
	B_{12}/B_{14}	$y=67.264x-43.813$	0.702 6	0.641 8	12.15

注: r^2 为可决系数; RMSE 为均方根误差; $\bar{\sigma}$ 为平均相对误差。

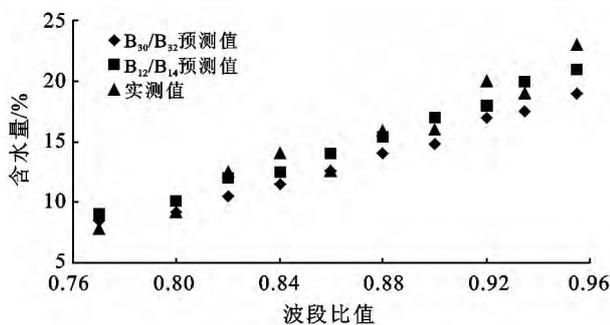


图 4 土壤含水量实测值与预测值对比

3 结论

(1) 在热红外辐射传输模型理论的支持下, 利用便携式 FTIR 光谱仪, 分别设计出野外与室内实测土壤热红外光谱数据的方法。可人为地减少因环境辐射而引起的土壤发射率的变化; 在室内通过样品的制备可以很好地分析土壤特征参数对其发射率的影响。

(2) 对研究区的各样点进行了土壤发射率光谱的测量, 通过对数据的分析, 发现选择植被覆盖度低, 类型比较均匀的自然裸土更适合进行研究区土壤含水量的反演研究

(3) 对野外实测的不同土壤含水量的土壤发射率光谱曲线研究发现, 在 8.0~8.2, 8.7~8.9, 9.5~11.9, 12.5~13 μm 的 4 个波段区间随着土壤含水量的增加, 土壤的发射率变化明显, 在 12.1~12.5 μm 波段, 土壤发射率受含土壤水量的影响较小, 而在 8.0~8.2 和 9.3~9.7 μm 波段随着含水量的增加, 土壤的发射率却出现一定程度的降低。

(4) 通过分析光谱特征参数与土壤含水量的关系, 发现土壤含水量在波段 9.480 2~9.790 1 μm 对其发射率最为敏感。

(5) 利用实测的光谱数据, 建立了基于实测土壤热红外发射率光谱的土壤含水量反演模型, 对比模型的结果, 认为模拟热红外传感器波段比值数据与土壤

含水量的相关性更高,而且模拟 ASTER 的波段比值数据要优于模拟 MODIS 的波段比值数据。

(6) 土壤发射率一般同时受多个因子的综合影响,有必要对多因素复合作用下的土壤发射光谱特征进行深入的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 杨涛,宫辉力,李小娟,等. 土壤水分遥感监测研究进展[J]. 生态学报,2010,30(22):6264-6277.
- [2] 余凡,赵英时. ASAR 和 TM 数据协同反演植被覆盖地表土壤水分的新方法[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2011,21(3):532-540.
- [3] 薛辉,倪绍祥. 我国土壤水分热红外遥感监测研究进展[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(6):168-172.
- [4] 仝兆远,张万昌. 土壤水分遥感监测的研究进展[J]. 水土保持通报,2007,27(4):107-113.
- [5] 徐金鸿,徐瑞松,夏斌,等. 土壤遥感监测研究进展[J]. 水土保持研究,2006,13(2):17-20.
- [6] 陈书林,刘元波,温作民. 卫星遥感反演土壤水分研究综述[J]. 地理科学进展,2012,27(11):1192-1203.
- [7] 周鹏,丁建丽,王飞,等. 植被覆盖地表土壤水分遥感反演[J]. 遥感学报,2010,14(5):966-973.
- [8] Myers V I, Heilman H D. Thermal IR for soil temperature studies[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1969,35:1024-1032.
- [9] Watson K, Rowan L C, Offield T W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images(Thermal modeling for IR images geologic interpretation, discussing physical parameters role in materials natural environmental diurnal temperature behavior)[C] // International Symposium on Remote Sensing of Environment, 7th, University of Michigan, Ann Arbor, Mich. 1971:2017-2041.
- [10] Price J C, Li L. The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer surface soil moisture and evaporation[J]. Water Resources Research, 1980,16(4):787-795.
- [11] Nemani R R, Running S W, Pierce L. Developing satellite-derived estimates of surface moisture status[J]. Journal of Applied Meteorology, 1993,32(3):548-557.
- [12] 隋洪智,田国良,李付琴. 农田蒸散双层模型及其在遥感干旱监测中的应用[J]. 遥感学报,1997,1(3):220-224.
- [13] 张可慧,刘芳圆,刘剑峰,等. 河北省土壤水分遥测研究[J]. 地理学与国土研究,2002,18(3):101-104.
- [14] 赵杰鹏,张显峰,包慧漪,等. 基于可见光红外与被动微波遥感的土壤水分协同反演[J]. 红外与毫米波学报,2012,31(2):137-142.
- [15] 张显峰,赵杰鹏,刘羽. 一种改进的土壤水分微波遥感反演模型[J]. 地理科学进展,2013,32(1):78-86.
- [16] 罗江燕,塔西甫拉提·特依拜,陈金奎. 基于表观反射率的渭一库绿洲植被动态变化分析[J]. 水土保持研究,2008,15(5):65-67.
- [17] 张军红,吴波,杨文斌,等. 半干旱沙地 3 种土壤水分测定方法对比研究[J]. 水土保持通报,2012,32(2):147-149.
- [18] 申柯娅. 红外光谱在仿古玉石鉴定中的应用[J]. 光谱实验室,2010,27(4):1393-1397.
- [19] 程洁,柳钦火,李小文,等. 基于相关性的热红外温度与发射率分离算法[J]. 中国科学,2008,38(2):261-272.
- [20] 肖武,李小昱,李培武,等. 基于近红外光谱土壤水分检测模型的适应性[J]. 农业工程学报,2009,25(3):33-36.