

基于NIR-Red光谱特征空间的土壤水分 监测新方法^{*}

詹志明^{①②} 秦其明^{①**} 阿布都瓦斯提·吾拉木^① 汪冬冬^①

(① 北京大学遥感与 GIS 研究所, 北京 100871; ② 北京市东城区环保局, 北京 100007)

摘要 干旱是一种频繁发生的自然灾害, 而土壤水分作为干旱监测最重要的指标, 一直成为干旱遥感监测研究的重点内容. 利用经过几何精校正和大气校正的 ETM+ 近红外(Nir)、红光(Red)波段反射率建立 Nir-Red 光谱特征空间, 根据土壤水分在该特征空间的分布规律, 提出了遥感监测土壤水分的新方法, 并建立了基于 Nir-Red 光谱特征空间的土壤水分监测模型(SMMRS). 利用野外测定的不同深度土壤水分数据验证了 SMMRS 模型. 计算结果表明 SMMRS 模型观测值变化曲线和实测土壤水分变化趋势保持一致, 与 5 cm 和 0~20 cm 平均土壤水分相关系数分别为 0.80 和 0.87. 认为基于 Nir-Red 光谱特征空间的 SMMRS 简单、易于构建, 有一定的应用价值和推广意义.

关键词 NIR-Red 光谱特征空间 土壤水分 遥感监测

土壤水分是描述地气能量变换和水循环的重要因素, 也是遥感干旱监测的重要指标. 土壤水分的时空分布和变化对地表热量平衡、蒸散发、土壤温度和农业墒情等都会产生显著的影响. 由于土壤水分在不同波段的遥感图像上呈现出不同的特性, 国内外土壤水分遥感监测以可见光-近红外、热红外和微波遥感为主要手段, 已经提出了不少的模型与方法. 可见光-近红外方法借助于土壤反射率随土壤水分的增加而降低的特点, 综合考虑植被生长(植被指数)和水胁迫状况间接计算土壤水分如距平植被指数法 [1],

土壤水分光谱法 [2]等, 然而植被生长状况反映的是土壤干旱的滞后效应, 而人们更关注实时的土壤水分时空分布, 此外, 利用可见光-近红外地物反射光谱差异或植被指数来估算土壤水分受到表面粗糙度、土壤结构、有机质含量等的影响, 提高精度有一定的困难. 热红外遥感主要依据土壤水分平衡方程与能量平衡原理, 通过土壤表面发射率和地表温度的关系估算土壤水分, 方法有热惯量法、植物蒸散法和缺水指数法等 3 种. 用热红外遥感技术监测土壤水分的研究始于 20 世纪 70 年代. 最早 Waston 等人 [3]提出了一

收稿日期: 2005-06-11; 接受日期: 2006-04-11

^{*} 国家“973”项目(批准号: G2000077900)、国家“863”项目(批准号: 2001AA135110)和中国博士后自然科学基金项目(批准号: 2004035021)

^{**} 联系人, E-mail: qmjin@pku.edu.cn

个用地表温度日较差推算热惯量的简单模式。此后, Price^[4,5], Kahle^[6], England^[7,8], 张仁华^[9], 田国良^[10], 余涛等人^[11]就用热惯量模式开展了各种应用性实验研究, 并对模式作了改进。热惯量方法对于裸露或植被覆盖低的表面土壤水分监测很有效, 但实际应用还需要根据当地的状况对模型参数进行适当的调整, 要获取目标物体昼夜温度, 并以温度差来计算土壤水分, 其推广使用是面临着一定的限制。水分供应是蒸散过程的主要动力, 土壤水分多寡对蒸散速率影响比较大。人们把植被实际蒸散量与潜在蒸散量之比作为作物缺水的量度, 通过缺水量度和土壤水分的关系, 寻求高植被覆盖条件下的土壤水分计算方法。Jackson^[12]提出了作物缺水指数(Crop Water Stress Index, CWSI)的概念; 田国良等^[13]结合遥感得到的表面温度、蒸散数据和当地气象台站的气象数据, 建立了土壤水分与作物缺水指数的关系模型。作物缺水指数物理意义明确, 但需要地面气象数据, 而气象观测数据的空间离散性对该方法的计算精度带来一定的不确定性。土壤水分的微波遥感依据土壤介电常数、表面发射率和土壤的水分含量的关系。由于土壤水分不同导致微波后向散射和表面介电特性不一样国内外众多专家^[14-17]通过介电常数模型和面散射理论, 建立了后向散射辐射和土壤水分之间的定量关系。微波遥感监测土壤水分精度较高, 可进行全天候观测, 但成本高, 受表面粗糙度、植被、坡度等的干扰大。

地表温度(LST)、植被指数(NDVI)和反照率(albedo)都是间接反映土壤水分的关键因素, 这些要素的综合应用在多元尺度上能够准确的反映土壤水分状况。因此, 可见光、热红外和微波遥感的结合应用是目前土壤水分与干旱遥感监测的发展方向。Wang等^[18]利用ERS-2和TM数据, 建立微波后向散射、NDVI和土壤水分之间的关系模型, 成功估算半干旱区草原土壤水分; Goward^[19], Price^[20]等提出了LST-NDVI特征空间, Ridd^[21], Gilles^[22,23], 韩丽娟^[24], 王鹏新^[25,26]等利用LST-NDVI特征空间进行了地面蒸散量的分析及土壤水分监测; Ghulam等^[27]尝试以地表反照率代替地表温度, 构建NDVI-albedo的特征空间, 利用NDVI和地表宽波段反照率进行干旱监测。

NDVI-LST特征空间的综合分析, 可以衍生出更丰富、更清晰的地表信息, 有助于更加准确、有效地评价干旱时空变化规律, 但对一些可见光、近红外和热红外波段分辨率不同的遥感数据(如TM/ETM+)来说, 需要通过重采样统一NDVI和LST产品的分辨率, 因而丢失了可见光、近红外波段的部分信息, 此外, 地表温度和反照率的反演既复杂又包含了一定的误差, 误差逐步累计, 放大了土壤水分估算的不确定性。

本文在分析以上方法与模型优缺点的基础上, 提出了遥感监测土壤水分的新方法, 并建立了基于红光与近红外光反射率光谱特征空间的土壤水分监测模型 (Soil Moisture Monitoring by Remote Sensing, SMMRS)。

1 方法

1.1 遥感数据的大气校正

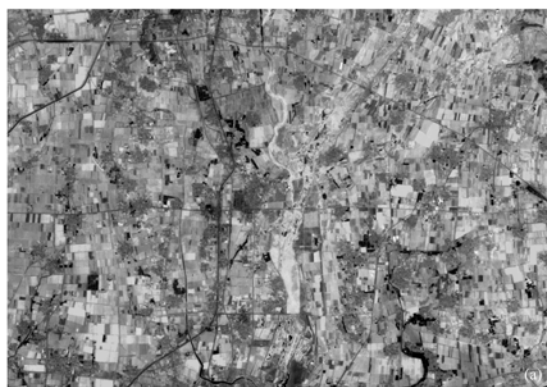
研究区域的遥感影像为2001年4月17日获取的北京市的ETM+数据, 经过几何精校正之后, 从中选取以北京顺义遥感实验场为中心的影像, 进行处理。首先要对数据进行辐射订正, 图像灰度值转换为具有辐射意义的亮度值, 计算大气顶部反射率, 然后利用6S模型得到校正后的地表的真实反射率。6S描述了由于瑞利散射和气溶胶的存在, 大气如何影响辐射在太阳-地表-传感器之间的传输。准确校正需要输入卫星过境当时的实测大气廓线数据如气溶胶、大气水汽含量等, 但获取实测数据难, 不能满足快速业务运行要求。据研究报道^[28], 选用6S提供的标准大气廓线进行校正和利用实测数据进行校正的结果相近, 误差可以忽略(反射率和NDVI计算误差分别为 ± 0.02 和0.02)。因此, 本研究大气廓线选择为中纬度夏天, 大陆性气溶胶类型, 地表为非均匀表面, 对ETM+图像的可见光和近红外波段进行了大气校正。上述工作为准确提取特征空间所需要的地表反射率等信息奠定了基础。

1.2 NIR-Red 特征空间的建立

植物叶片组织对蓝紫光和红光有强烈的吸收, 对近红外有强烈反射。从红光(Red)到近红外(Nir), 裸地反射率基数较高但增幅很小。植被覆盖越高, 红

光反射越小, 近红外反射越大. 由于对红光的吸收很快饱和, 只有近红外反射的增加才能反映植被增加. 任何增强近红外和红光差别的数学变换都可以作为植被指数描述植被状况. 植被指数都是利用此原理建立的, 如比值植被指数、差值植被指数和均一化植被指数. 在高植被覆盖区, 近红外和红光反射率比值与叶面积指数、叶生物量、叶绿素含量等密切相关, 而 NDVI 则适宜于植被早期生长阶段或低覆盖植被的监测. 本文利用 Landsat ETM+ 图像的红光波段 (band3: 630~690 nm) 和近红外波段 (band4: 775~900 nm) 大气校正后的反射率建立 Nir-Red 特征空间. 在研究区中, 选择了地表覆盖类型比较全面的样区(图 1(a)), 利用经过大气校正的 ETM+ band3 和 band4 反射率, 构建 Nir-Red 空间的散点图(图 1(b)). 利用 ETM+ 数据构建的散点图呈典型的三角形分布, 这与前人利用 NDVI-LST 数据研究的结果不一样, 但是不同覆盖的地表类型在 Nir-Red 空间的分布具有相似的分异规律, 从 Nir-Red 空间的散点图中, 我们发现不仅可以描述植被的覆盖度, 而且也可以反映地表干旱状况.

Richardson 和 Wiegand^[29] 利用 MSS 红光和近红外波段图像灰度值建立 Nir-Red 特征空间, 用在 Nir-Red 特征空间任一点到土壤线的垂直距离来描述植被覆盖情况, 提出了垂直植被指数 (PVI). 从利用 ETM+ 图像近红外和红光波段反射率构建的图 1(b) 中可以看到植被覆盖与 Nir-Red 空间特征的关系,



A-E-D 一线的植被变化: 植被覆盖量多的区域位置被全覆盖区(A), 植被较少的半覆盖区(E), 无植被的裸露地(D), 植被覆盖变化趋势和 Richardson 和 Wiegand 报道的结果一致. 此外, 从图 1(b) 中也发现地表土壤水分在 Nir-Red 特征空间的分布规律, 即 B-D-C 一线的土壤湿度依次由湿土区(B), 半湿润区(D), 干土区(C) 变化规律. 随着干旱程度的加重, 干燥土地在 Nir-Red 空间的迁移轨迹和 BC 线一致. BC 线垂直于 PVI 而平行于土壤基线. 由此可见, 地表的光谱特征与地表覆盖和土壤水分存在着复杂而又密切的关系. 研究它们之间的关系与规律, 可产生基于地表光谱特征的地表土壤水分监测模型, 该方法直接用光谱特征代替了 albedo 和 LST 的反演, 既简单又有效.

1.3 基于 NIR-Red 特征空间的土壤水分监测模型的建立

利用 ETM+ 数据构建的 Nir-Red 特征空间散点图呈典型的三角形分布, B-C 为土壤基线, 并由 B 至 C 土壤渐干, 经过空间统计特征可以得到 B-C 为土壤基线的数学表达式:

$$R_{\text{nir}} = MR_{\text{red}} + I, \quad (1)$$

其中 R_{nir} 为近红外波段反射率, R_{red} 为红波段反射率, M 为土壤线斜率, I 代表土壤线在纵坐标上的截距.

在图 2 中, 取得经过坐标原点垂直于土壤基线的垂线 L , 即可得到方程(1)的法线方程(2)

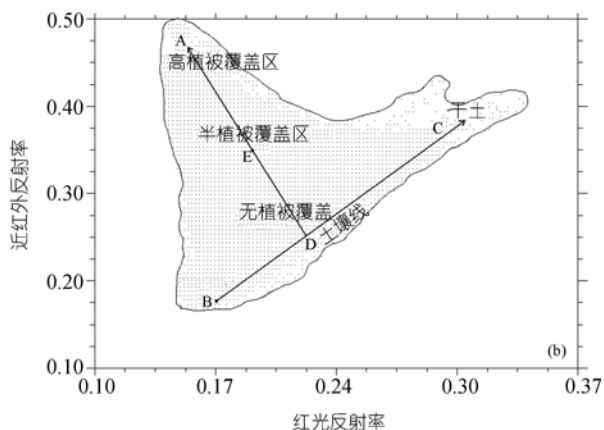


图 1

(a) 利用 ETM+ 图像构建的 Nir-Red 光谱特征空间(遥感图像); (b) 利用 ETM+ 图像构建的 Nir-Red 光谱特征空间(画图)

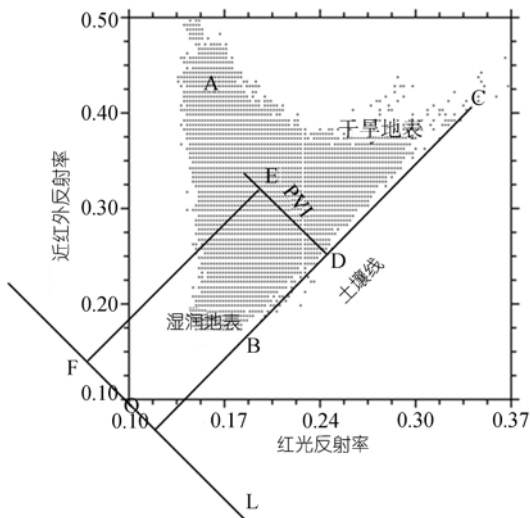


图 2 土壤水分监测模型构想示意图

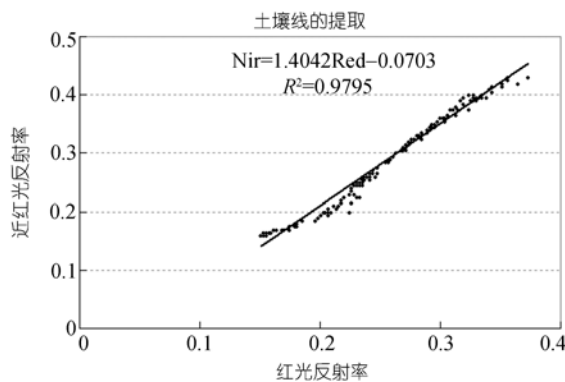


图 3 土壤水分提取

$$R_{nir} = -\frac{1}{M} R_{red} \quad (2)$$

在 Nir-Red 特征空间上, 从任何一个点到直线 L 的垂直距离可以说明地表的干旱情况, 即离 L 线越远地表越干旱, 土壤水分越小, 反之亦然. 在 Nir-Red 特征空间任取一点 $E(R_{red}, R_{nir})$, 根据从点到直线的距离方程, 可以得到从 $E(R_{red}, R_{nir})$ 到直线 L 的距离 EF.

$$EF = \frac{1}{\sqrt{M^2 + 1}} (R_{red} + MR_{nir}). \quad (3)$$

对黑体来说其距离等于零, 正好落在坐标原点, 其余具有一定反射能力任何物体越湿润越接近原点. 一般来说, 最接近 L 线的空间都是水体或较湿区域分布. 远离 L 线的空间都是较干旱的区域. 因此, 可以

用 Nir-Red 特征空间上的任意一点到直线 L 的距离 EF 来描述土壤水分分布的状况. 假设地表极度干旱, EF 无穷接近 1, 那么土壤水分就接近或等于零, 若地表极度湿润或是水体, EF 接近于零, 而土壤水分等于或接近于 1. 这样通过 1 减去归一化后 EF 值就可以建立一个基于 Nir-Red 光谱空间特征的土壤水分监测模型 (Soil Moisture Monitoring of Remote Sensing, SMMRS).

$$SMMRS = 1 - \frac{1}{\sqrt{M^2 + 1}} (R_{red} + MR_{nir}). \quad (4)$$

根据研究区域的裸地光谱反射率信息提取土壤线 (图 3), 其数学方程可以用 (5) 式来描述.

$$R_{nir} = 1.40426R_{red} - 0.0703. \quad (5)$$

从 (5) 式提取 $M = 1.40426$ 和 $I = -0.0703$, 代入 (4) 式, 可以得到研究区域的 SMMRS.

$$SMMRS = 1 - \frac{1}{\sqrt{1.4042^2 + 1}} (R_{red} + 1.40426R_{nir}). \quad (6)$$

2 验证和应用

研究区为北京顺义遥感实验场 (E 116°26'~117°E, N 40°~40°21'), 从 2001 年 3 月底到 6 月中, 进行了星-机-地遥感综合同步试验, 以北京顺义为机载数据获取试验场和重点地面试验场, 获取了机载多角度多光谱数据和高光谱数据. 同步观测实验在顺义县 4 个区域 (分别代表顺义四种典型的土壤类型) 布设定位观测区, 分别为中央试验区 (C1-C5)、西北试验区 (NW1-NW5)、东北试验区 (NE1-NE5) 和东南试验区 (SE1-SE5). 每个定位观测区域选定 5 个定位观测点, 分别代表正常、受旱、过水、缺肥、过肥五种不同的水肥调控区 (每点对应的地块面积 500 km² 左右). 西北试验区内 NW3, NW4 及 NW5 观测点各设 16 个样点, NW1 和 NW2 各设 9 个样点, 每小时轮回重复测定每个样点 5, 10, 20, 40, 60 和 100 cm 深度土壤含水量. 土壤含水量采用 CNC-503DR 型智能中子水分仪测定, 铝盒法标定后换算为重量含水量, 即单位重量的土壤中所含有的水的重量 (克水/克干土) × 100. 本文使用的数据包括 NW3, NW4 和 NW5 三个观测点卫星过境当时 2001 年 4 月 17 日同步观测的表层 5, 10 和 20 cm 深度土壤含水量.

遥感监测土壤水分的有效深度是迄今一直在争论的问题. 李杏朝^[30], 郭妮等^[31]对 NOAA/AVHRR 获取的 NDVI 和亮度温度与同期的土壤水分作相关分析, 结果表明 20 cm 深处的土壤水分与卫星资料的相关关系最好且稳定. 刘培君等^[2]认为可见光-近红外波段数据估算土壤水分的有效深度为 10 cm. 由于 ETM+ 数据分辨率高, 经过几何精校正后, 根据每一个观测点铝管的经纬度可以找到观测点在图像像元坐标的位置.

我们用(6)式计算了各观测点代表的像元土壤水分并进行归一化处理. 考虑到 0~5 cm 表层受灌溉方式、地面风速等外界因素的影响大, 很不稳定, 分别利用表层 5 cm 土壤水分和耕层 0~20 cm 土壤水分平均值进行比较(图 4 和表 1). 可以看到, 实测土壤水分和模型观测土壤水分曲线趋势是一致的, 模型观测值与 5 cm 和 0~20 cm 平均土壤水分相关系数分别为 0.80 和 0.87, 与 0~20 cm 平均土壤水分的相关系数明显高于表层 5 cm 土壤水分的相关性. 在基于 Nir-Red 反射率光谱特征空间的土壤水分监测模型中, 我们

暂时没有考虑植被的干扰, 以及 CNC-503DR 型智能中子水分仪测定土壤水分受地表风速、气候条件等外界因素的影响所造成的误差.

3 结论

本文基于近红外光-红光(Nir-Red)反射率光谱特征空间, 提出了土壤水分监测新方法, 并建立了一个简单、有效的土壤水分遥感监测模型(SMMRS). 利用野外实测的表层 5 cm 土壤水分和 0~20 cm 平均土壤水分与基于 Nir-Red 反射率光谱特征空间模型进行比较(如图 4 和表 1). 研究结果表明本文提出的方法与野外观测数据的变化总体趋势是一致的. 基于 Nir-Red 反射率光谱特征空间的土壤水分监测模型能反映地表覆盖、水热组合及其变化, 具有较明确的生物物理意义, 且简单易用, 在实际应用中, 仅仅从光谱的特征空间 Nir-Red 就可以有效地对土壤水分进行监测.

需要指出, 本文在研究过程中还存在 2 个问题有待进一步解决: (1) 虽然验证的数据总体变化趋势

表 1 卫星观测土壤水分和野外测量数据的比较

观测点管号	经度	纬度	SMMRS	5 cm 土壤水分	0~20 cm 平均土壤水分
25	116°34'33.4"	40°11'41.2"	0.404907	0.213731	0.284258
26	116°34'34.3"	40°11'43.6"	0.163456	0.153242	0.129031
27	116°34'34.0"	40°11'46.0"	0.163456	0.108497	0.186132
28	116°34'33.7"	40°11'48.5"	0.261047	0.278104	0.327929
29	116°34'37.2"	40°11'49.0"	0.263545	0.103496	0.397978
30	116°34'37.5"	40°11'46.6"	0.545243	0.445868	0.619867
31	116°34'37.9"	40°11'44.1"	0.117159	0.09887	0.178069
32	116°34'38.1"	40°11'41.8"	0.32941	0.181735	0.266157
33	116°34'42.4"	40°11'41.6"	0.32941	0.239893	0.242699
34	116°34'41.8"	40°11'46.5"	0.473299	0.268698	0.407033
35	116°34'41.6"	40°11'49.0"	0.522094	0.352105	0.479281
36	116°34'24.8"	40°11'34.1"	0.195154	0.069191	0.150935
46	116°34'25.2"	40°11'30.1"	0.163456	0.290435	0.347914
47	116°34'31.1"	40°11'30.4"	0.097591	0.235605	0.314258
48	116°34'30.8"	40°11'34.4"	0.017098	0.204767	0.29371
49	116°34'34.4"	40°11'34.7"	0	0.194341	0.238028
52	116°34'34.8"	40°11'30.6"	0.160958	0.324175	0.364041
53	116°34'31.7"	0°11'53.6"	0.839042	0.886009	0.971363
54	116°34'31.2"	40°11'56.9"	1	0.701837	0.825518
55	116°34'37.1"	40°11'57.6"	0.468302	0.128927	0.329626
58	116°34'37.5"	40°11'54.6"	0.260531	0.039086	0.248479
59	116°34'42.8"	40°11'54.6"	0.697652	0.667579	0.801132
60	116°34'42.4"	40°11'58.0"	0.504996	0.563223	0.523413
相关系数				0.80	0.87

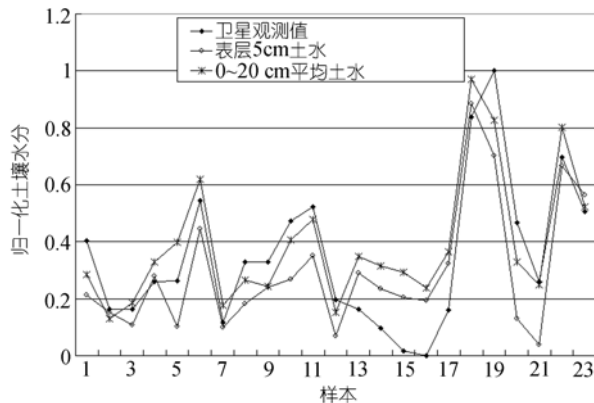


图 4 实测土壤水分和模型观测值比较

是非常一致的, 但 *SMMRS* 观测值与 5 和 0~20 cm 平均土壤水分相关系数分别为 0.80 和 0.87, 相关系数不是很理想. 其原因可能是基于 Nir-Red 反射率光谱特征空间的 *SMMRS* 是土壤和植被的综合反映, 像元由植被和土壤组成的混合像元, 模型没有消除植被的干扰. (2) 基于 Nir-Red 反射率光谱特征空间的 *SMMRS* 的数学表达式和相关参数是基于一条固定土壤基线来确定的, 这仅是一种理想的假设, 实际上土壤线的形状和性质随土壤类型和土壤的施肥状况有关, 严格的说土壤线不是一条固定线, 这可能也是引起误差的原因之一. 研究组下一步的研究工作计划是在 Nir-Red 特征空间中有效地分解植被和土壤信息, 完善模型的数学表达式.

致谢 对项目研究组提供土壤常数和土壤水分含量实测数据, 以及北京大学遥感与 GIS 研究所徐希甯教授在研究中提出的建议与帮助, 在此一并感谢.

参 考 文 献

- 肖乾广, 陈维英, 盛永伟. 用气象卫星监测土壤水分的试验研究. *应用气象学报*, 1994, 5(2): 312—317
- 刘培君, 张琳, 艾里西尔库尔班, 等. 卫星遥感估测土壤水分的一种方法. *遥感学报*, 1997, 1(2): 135—138
- Waston K, Rowen L C, Offield T W. Application of thermal modeling in geologic interpretation of IR images. *Rem Sen Environ*, 1971, 3: 2017—2041
- Price J C. Thermal inertia mapping: a new view of the earth. *J Geophys Res*, 1977, 82: 2582—2590
- Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: the limited utility of apparent thermal inertia. *Rem Sen Environ*, 1985, 18: 59—93[DOI]
- Kahle A B. A simple thermal model of the Earth's surface for geologic mapping by remote sensing. *J Geophys Res*, 1977, 82: 1673—1680
- England A W. Radiobrightness of diurnally heated freezing soil. *IEEE Trans Geosci Remo Sen*, 1990, 28 (3): 464—476[DOI]
- England A W, Galantowicz J F, Schretter M S. The radio brightness thermal inertia measure of soil moisture. *IEEE Trans Geosci Rem Sen*, 1992, 30 (1): 132—139[DOI]
- 张仁华. 土壤含水量的热惯量模型及其应用. *科学通报*, 1991, 36(12): 924—927
- 田国良. 土壤水分的遥感监测方法. *环境遥感*, 1991, 6(2): 89—99
- 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究. *遥感学报*, 1997, 1(1): 24—31
- Jackson R D, Idso S B. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour Res*, 1981, 17: 133—138
- 田国良, 杨希华, 郑柯. 冬小麦旱情遥感监测模型研究. *环境遥感*, 1992, 7 (2): 83—89
- Wigneron J P, Calvet J C, Pellarin T, et al. Retrieving near-surface soil moisture from microwave radiometric observations: current status and future plans. *Rem Sens Environ*, 2003, 85: 489—506[DOI]
- Huisman J A, Hubbard S S, Redman J D, et al. Measuring soil water content with ground penetrating radar: a review. *Vadose Zone J*, 2003, 2: 476—491
- Cashion J, Lakshmi V, Bosch D, et al. Microwave remote sensing of soil moisture: evaluation of the TRMM microwave imager (TMI) satellite for Little River Watershed Tifton, Georgia. *J Hydrol*, 2005, 307: 242—253[DOI]
- 金亚秋. 星载微波遥感在中国东北华北农田的辐射特征分析. *遥感学报*, 1998, 2(1): 19—25
- Wang C, Qi J, Moran S, et al. Soil moisture estimation in a semi-arid rangeland using ERS-2 and TM imagery. *Rem Sen Environ*, 2004, 90: 178—189[DOI]
- Goward S N, Hope A S. Evaporation from combined reflected solar and emitted terrestrial radiation: Preliminary FIFE results from AVHRR data. *Adv Space Res*, 1989, 9: 239—249[DOI]
- Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Trans Geosci Rem Sen*, 1990, 28: 940—948[DOI]
- Ridd M K. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. *Int J Rem Sen*, 1995, 16: 2165—2185
- Gilles R R, Carlson T N. Thermal remote sensing of surface soil

- water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models. *J Appl Met*, 1995, 34: 745—756[DOI]
- 23 Gilles R R, Carlson T N. A verification of the ‘triangle method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the normalized difference vegetation index (NDVI) and surface radiant temperature. *Int J Rem Sen*, 1997, 18(5): 3145—3166[DOI]
- 24 韩丽娟, 王鹏新, 王锦地, 等. 植被指数-地表温度构成的特征空间研究. *中国科学, D辑: 地球科学*, 2005, 35(4): 371—377[摘要]
- 25 王鹏新, WAN Z, 龚健雅, 等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型. *地球科学进展*, 2003, 18(8): 527—533
- 26 王鹏新, 龚健雅, 李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2001, 26(5): 412—418
- 27 Ghulam A, Qin Q, Wang L, et al. Development of Broadband Albedo Based Ecological Safety Monitoring Index, 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), September 20-24, 2004, Anchorage, Alaska, Egan Convention Center, USA, VI:4115—4118
- 28 Zhao W J, Massayuki Tamura, Hidenori Takahashi. Atmospheric and Spectral Corrections for Estimating Surface Albedo from Satellite Data Using 6S Code. *Rem Sen Environ*, 2000, 76: 202—212[DOI]
- 29 Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogr Eng Rem Sen*, 1977, 43(12): 1541—1552
- 30 李杏朝, 董文敏. 利用遥感和 GIS 监测旱情的方法研究. *遥感技术与应用*, 1996, 11(3): 7—15
- 31 郭妮, 陈添宇, 雷建勤, 等. 用 NOAA 卫星可见光和近红外资料估算甘肃省东部农田区土壤湿度. *应用气象学报*, 1997, 8(2): 212—218