

基于 EOS/MODIS 数据的土壤水分遥感监测方法

张红卫^{1,2,3}, 陈怀亮¹, 申双和³

1. 河南省气象科学研究所, 郑州 450003
2. 新乡市气象局, 河南新乡 453000
3. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044

摘要 美国国家航空航天局(NASA)自1991年开始实施对地观测系统(EOS)计划以来,EOS/MODIS 传感器的高时间分辨率、高光谱分辨率、适中的空间分辨率等特点使其在干旱监测中具有突出的优势。纵观近年来国内外基于 EOS/MODIS 资料遥感监测土壤水分的理论、方法的发展和应用特点,可以分为5类:①基于植被指数类的遥感干旱监测方法,如简单植被指数、比值植被指数、归一化植被指数、增强植被指数、归一化水分指数法、距平植被指数等;②基于红外的遥感干旱监测方法,如垂直干旱指数法、修正的垂直干旱指数法等;③基于地表温度(LST)的遥感干旱监测方法,如热惯量法、条件温度指数、归一化差值温度指数、表观热惯量植被干旱指数等;④基于植被指数和温度的遥感干旱监测方法,如条件植被温度指数、植被温度梯形指数、温度植被干旱指数模型等;⑤基于植被与土壤的遥感监测方法,如地表含水量指数作物缺水指数法等。重点介绍了目前生物、物理意义较明显,比较成熟和广泛应用的基于可见光与热红外波段的改进型垂直干旱指数法(MPDI)、作物缺水指数法(CWSI)、地表含水量指数法(SWCI)、热惯量法(ATI)等;对各种遥感监测土壤水分方法的优缺点做出评价;指出利用高分辨率卫星资料(如 EOS/MODIS 和中国发射的风云三号极轨气象卫星 250 m 分辨率资料)进行农业干旱监测研究将成为主要的研究方向,“土壤-作物-大气”多圈层立体监测、多学科融合将是解决提高旱情定量化监测精度、使之实用化和业务化的必由之路;最后,展望了遥感监测土壤水分的发展前景。

关键词 EOS/MODIS; 遥感监测; 土壤水分

中图分类号 S127

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)12-0085-08

Research on Soil Moisture Remote Sensing Monitoring Based on EOS/MODIS Data

ZHANG Hongwei^{1,2,3}, CHEN Huailiang¹,
SHEN Shuanghe³

1. Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003, China
2. Xinxiang Meteorological Bureau, Xinxiang 453000, Henan Province, China
3. Institute of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract Since the plan of EOS was carried out in 1991, the sensor of EOS/MODIS, with high temporal resolution, high spectrum resolution and normalized spatial resolution, has shown its advantages in the drought remote sensing monitoring. The studies on the soil moisture remote sensing monitoring based on EOS/MODIS data are reviewed in the following 5 aspects: ① The models based on the Vegetation Index, such as Simple Vegetation Index, Ratio Vegetation Index, Normalized Difference Vegetation Index, Enhanced Vegetation Index, Normalized Difference Water Index, Vegetation Condition Index, Average Vegetation Index etc. ② The models based on the infrared spectrum, such as Perpendicular Drought Index, Modified Perpendicular Drought Index, etc. ③ The models based on the Land Surface Temperature, such as Appearance Thermal Initial, Temperature Condition Index, Normalized Difference Temperature Index and Appearance Vegetation Drought Index, etc. ④ The models based on the

收稿日期: 2009-05-12

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD04B01)

作者简介: 张红卫, 高级工程师, 研究方向为遥感与应用气象, 电子信箱: xxqxjzhw1966@163.com; 陈怀亮(通信作者), 研究员, 研究方向为遥感与应用气象, 电子信箱: h.chen@vip.163.com

combination of Vegetation Index and Land Surface Temperature. Such as Vegetation-Temperature Condition Index, Vegetation Index/Temperature Trapezoid, Temperature Vegetation Dryness Index, Crop Water Stress Index, etc. ⑤ The models based on the NDVI and soil background. Such as Surface Water Capacity Index, Modified Surface Water Capacity Index, etc. This paper focuses on the models with obvious physical meaning and with wide applications in practical work, such as Modified Perpendicular Drought Index (MPDI), Crop Water Stress Index (CWSI), Surface Water Capacity Index (SWCI) and Appearance Thermal Initial (ATI). The research directions of agricultural drought monitoring based on EOS/MODIS and FY-3 data are discussed. The cycle observation of "Soil-Crop-Atmosphere" and Multi-knowledge syntheses may achieve quantified monitoring. Some future research topics of remote sensing monitoring in soil moisture are proposed.

Keywords EOS/MODIS; soil moisture; remote sensing monitoring

0 引言

土壤水分与干旱的遥感监测是目前遥感技术应用研究的前沿领域,是公认的世界性研究难题之一。由于土壤水分资料对于农业、水文、气象等具有很高的应用价值,因而在该领域的探索与研究一直比较活跃。旱灾是中国农业最主要的自然灾害,已成为影响中国农业生产最严重的气象灾害。与其他自然灾害相比,其出现频率最高、持续时间最长、影响的范围最大,对农业生产的直接损失也最重。探讨客观、动态、实时的土壤水分与干旱监测方法,有助于采取积极有效的防、抗措施。土壤水分与干旱监测的方法主要有两类,一类是利用地面观测站网进行土壤湿度监测,常见方法有称重烘干法、中子法、TDR法等,其主要优点是单点测量精度较高,不足是采样点有限加之土壤特性不均一性强,单点数据很难代表大面积状况,同时花费的人力、物力也较大。目前,中国最具代表性的站网是气象部门建立的土壤湿度观测站网。另一类是利用卫星遥感进行土壤水分与干旱监测。自20世纪70年代以来,国内外对遥感监测土壤水分方法进行了大量研究,取得了许多成果,相对成熟且应用较广的方法有热惯量法、热红外法、距平植被指数法、植被供水指数法、作物缺水指数法、绿度指数法等。目前,国内外监测土壤含水量研究几乎都集中在NOAA/AVHRR、FY-1数据和微波遥感上。近年来,随着卫星遥感技术的快速发展,特别是美国国家航空航天局(NASA)的地球观测系统(EOS)计划组织的实施,免费提供较高空间分辨率(250~1 000 m)、时间分辨率(0.5 d)和光谱分辨率(波谱范围0.4~14 μm , 36个光谱通道)的EOS/MODIS资料。基于EOS/MODIS资料,国内外许多科学家进行了干旱监测,取得了一些成果。本文对近年来利用EOS/MODIS资料监测干旱的方法进行比较和总结,探讨利用EOS/MODIS资料更好地监测土壤水分与干旱的途径和方法。

1 EOS/MODIS 资料监测干旱的优势

NASA自1991年开始实施EOS计划。作为该系统中对地观测卫星中的第一颗卫星Terra于1999年12月发射成功,标志着人类进入了一个全面、系统、实质性、较高精度的地球观测阶段。卫星上共载了5个对地观测传感器,其中1个是中分辨率成像光谱仪,2002年5月该计划下午星系列第一颗卫星Aqua投入运行,将EOS计划推向一个新的高潮。EOS/MODIS传感器的高时间分辨率、高光谱分辨率、适中的空间分辨率等特点使得其在干旱监测中具有突出的优势。相对于AVHRR及其他传感器而言,EOS/MODIS数据主要具有以下优点:①EOS/MODIS传感器的灵敏度和量化精度远比AVHRR高,仪器的辐射分辨率达到12 bit,温度分辨率可达0.03 $^{\circ}\text{C}$,量化等级也比其他传感器高很多,因而更易发现旱情,监测也更准确;②EOS/MODIS传感器每天至少可对中国绝大部分地区进行一次观测,解决了对旱情进行连续观测时数据源的相对一致性与可参照性;③EOS/MODIS可见光、近红外波段范围比AVHRR的范围窄,描述植被信息时所受到的干扰明显较AVHRR数据少,并且EOS/MODIS的近红外波段的水汽吸收区被剔除,而红色波段对叶绿素吸收更敏感等。由于EOS/MODIS传感器具有上述诸多优点,非常适合大范围、长时期、动态的土壤水分和干旱监测。近年来,许多科学家基于EOS/MODIS数据在干旱监测方面做了大量工作,取得了许多令人欣慰的成果^[1-2]。

2 遥感干旱监测方法

2.1 基于植被指数的遥感干旱监测方法

植被在可见光部分吸收70%~80%的红光,反射了大部分绿光,所以呈现绿色。在近红外波段,植被的反射特别强,而且不同植被类型的反射能力也不同。因此,植被指数不仅可以用来区分植被类型及其覆盖度,估计作物产量,还可以用来监测旱情。这主要反映在干旱年份,水分的多寡对作物的长势优劣起关键作用。水分供应正常,作物生长也正常;缺水作物则长势不好,叶面积指数下降,叶子内的叶绿素体减少,对太阳的近红外光的反射能力降低。绿色植被在可见光和近红外波段截然相反的强吸收和强反射的光谱特征正是作物长势监测、旱涝灾害监测动态监测的理论依据。

目前,已经开发出多种植被指数的干旱遥感研究方法,如简单植被指数、比值植被指数、归一化植被指数、条件植被指数、距平植被指数、条件植被温度指数等。其中,由于能够消除部分因太阳高度角、卫星扫描角变化以及大气削弱产生的影响,归一化植被指数使用得最广。

2.1.1 简单植被指数

简单植被指数^[2](Simple Vegetation Index, SVI)定义为

$$SVI = R_{\text{NIR}} - R_{\text{red}} \quad (1)$$

式中, R_{NIR} 、 R_{red} 分别为地面目标物在近红外波段、可见光波段的反射率。



2.1.2 比值植被指数

比值植被指数^[3](Ratio Vegetation Index, RVI)定义为

$$RVI = R_{nir} / R_{red} \quad (2)$$

式中, R_{nir} 、 R_{red} 分别为地面目标物在近红外波段、可见光波段的反射率。

2.1.3 归一化植被指数

归一化植被指数^[3](Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)定义为

$$NDVI = (R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + R_{red}) \quad (3)$$

式中, R_{nir} 、 R_{red} 分别为地面目标物在近红外波段、可见光波段的反射率。

2.1.4 增强植被指数

NDVI 指数虽然得到广泛应用,但在观测和研究中发现,当地面植被越来越茂密时,NDVI 指数出现饱和现象,无法实现同步增长;对大气干扰处理有限,大气残留噪音对 NDVI 指数影响严重;易受土壤背景干扰,特别是中等植被覆盖区,当土壤背景变暗时,NDVI 指数有增加的趋势;同时土壤与大气相互影响,其中一个噪音的减小往往会引起另一个噪音的增加。为了克服 NDVI 存在的缺陷,Liu 等^[4]引入了背景调节参数 L 和大气修正参数 C_1 、 C_2 ,在同时减少背景和大气噪音的前提下,建立了增强植被指数 (Enhanced Vegetation Index, EVI),计算公式为

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{L + C_1 \cdot \rho_{red} - C_2 \cdot \rho_{blue}} \quad (4)$$

式中, ρ_{blue} 为蓝光波段反射率,相应于 EOS/MODIS 数据的第 3 波段反射率; L 为土壤调节参数, $L=1$; C_1 为大气修正红光校正参数, $C_1=6$; C_2 为大气修正蓝光校正参数, $C_2=7.5$ 。

多项研究强调了 NDVI 在时间序列卫星资料干旱研究中的效用,提出了降雨、土壤水状况与 NDVI 之间的 $RVI=R_{nir}/R_{red}$ 相关统计分析。在每年或月的 NDVI 值与气象因子引发的旱情之间的相关性是确定的^[5]。基于一系列指数如距平植被指数 (Anomaly Vegetation Index, AVI)^[4] 和条件植被指数 (Vegetation Condition Index, VCI)^[5], NDVI 曾被用于植被动力学和干旱特征的年际变化数值图形化。尽管 NDVI 对土壤湿度和植被条件来说是一项非常有效的指标,但在干旱的发生与 NDVI 值的变化之间存在滞后性。以 NDVI 为基础的干旱监测方法不适宜目前实时监测和研究的需要^[6]。因 NDVI 存在的不足,克服了 NDVI 指数缺陷的 EVI 逐渐得到广泛应用。

2.1.5 归一化水分指数法

归一化水分指数法^[7-8](Normalized Difference Water Index, NDWI)定义为

$$NDWI = (R_{nir} - R_{swir}) / (R_{nir} + R_{swir}) \quad (5)$$

式中, R_{swir} 为近红外短波波段通道的反射率 (1.2~2.5 μm),对于 Landsat TM/ETM+ 卫星资料, R_{nir} 、 R_{swir} 分别对应于波段 4 (0.78~0.90 μm) 和波段 5 (1.55~1.75 μm)。过去因 TM 和 ETM+ 资料的连续性较差, NDWI 在应用方面未引起重视。随着 EOS/MODIS 技术的发展,资料的完整性和连续性有了极大改善,

此方法逐渐引起重视。Gao 曾建议使用 EOS/MODIS 1.24 μm 波段的 SWIR 资料,因此波段 NDWI 与近红外的大气透过率相同^[9],此技术已在干旱监测中得到了实际验证^[8]。

2.1.6 条件植被指数

VCI 是利用多年资料的第 i 个时期的 NDVI 最大值和最小值计算某一年的第 i 个时期的 NDVI 值的相对变化^[9]。相对 NDVI 而言, VCI 不仅包含 NDVI 的当前信息,还包含 NDVI 的历史信息。其计算公式为

$$VCI = 100 \times [(NDVI_i - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})] \quad (6)$$

式中, $NDVI_i$ 为当前信息, $NDVI_{max}$ 、 $NDVI_{min}$ 分别为第 i 个时期的当前历史最大值、最小值。分母为 NDVI 的多年变化范围具有一定的地域性,分子为当地的植被当前状态,比值反映了当前的植被状况。当 $NDVI_{max}$ 与 $NDVI_{min}$ 比较接近时,一般就是灾情出现的时候。

2.1.7 距平植被指数

AVI 是当前某个时期的 NDVI 测量值与常年值的偏差^[10]。常年平均值是根据多年历史资料得来,资料的时间序列越长,这个平均值的代表性就越好。当前之比平均值高为正距平,低为负距平。用当前时期每旬、每月、每年的 NDVI 值减去多年的每旬、每月、每年的 NDVI 平均值,得到植被指数正、负平均值。正距平反映植被生长状态比较好,负距平反映植被生长状态比较差。一般就是旱灾出现了,并且负值越大,旱情越严重^[2]。计算方法为

$$XTNDVI = (TNDVI - TNDVI_{ave}) \quad (7)$$

式中, $XTNDVI$ 为旬 (月、年) 距平指数, $TNDVI$ 为当前旬 (月、年) 植被指数, $TNDVI_{ave}$ 为多年旬 (月、年) 平均植被指数。其中, $TNDVI_{ave}$ 取多年每一旬 (月、年) 中 NDVI 值最大值的平均值,以尽量消除云的影响。

2.2 基于红外的遥感干旱监测方法

2.2.1 垂直干旱指数法

由于短波近红外 (SWIR) 反射率对叶片含水量较为敏感,把 NIR 和 SWIR 结合进行水分敏感指数的计算就成为可能,根据等价水分厚度 (EWT) 和发生火灾危险性的燃烧湿度值监测 (FMC),通过一些研究证明这些指数在监测植被水分含量方面是非常有效的。然而 Fensholt 等^[11]指出,植被生长初期由于植被覆盖率较低,这些因子的组合与土壤湿度并没有关系,随着植被逐渐生长,表现为一种逆相关。干旱监测方法的量化对裸地来说精度毋庸置疑,对不同生态植被覆盖度来说变化较大,特别对土壤湿度来说变化更大,这样一来就有必要针对精准化农业进行一种简单的定量监测方法研究。充分利用植被冠层和裸地近红外和红光区域的反射和吸收光谱特征, A. Ghulam 等^[12]利用 ETN+ 成像方法采用了垂直干旱指数法 (Perpendicular Drought Index, PDI),有

$$PDI = \frac{1}{\sqrt{M^2 + 1}} (R_{red} + MR_{nir}) \quad (8)$$

式中, R_{red} 和 R_{nir} 分别为大气订正后的红光与近红外波段反射率, M 为土壤直线斜率。Ghulam 等将 PDI 应用于裸地非常成功,



而在针对从裸地到茂密的植被农田 PDI 的应用则具有其局限性,主要表现为不同土壤类型表现出非平面地形特征,从而 Ghulam 等又提出了修正的垂直干旱指数法^[12](Modified Perpendicular Drought Index, MPDI)。

2.2.2 修正的垂直干旱指数法

$$MPDI = \frac{1}{\sqrt{M^2+1}} (R_{v,red} + MR_{v,nir}) \quad (9)$$

植被部分及地面的植被覆盖程度是植被冠层的重要参数,并且与叶面积系数(LAI)密切相关。植被覆盖度 f_v 值可利用 f_v 与植被光谱指数之间的密切关系计算得出。已经有多项研究发现 f_v 与NDVI之间的密切相关性,也有学者指出 f_v 与NDVI之间的均方根和幂次方变换也许更能提高 f_v 的预报精度,还有研究表明在 f_v 的计算中,土壤湿度对植被指数(SAVI)的变化敏感性高于NDVI的变化。近期,Jiang等^[13]分析了NDVI的空间尺度从属性以及植被指数与 f_v 之间不同的相关形式,发现NDVI尺度方法在多数情况下对 f_v 的估计值偏高。因此,建议不用NDVI尺度方法计算 f_v ,而采用植被指数尺度差分方法(DVI),这样可以减少由于阴影及土壤背景多样性造成的不稳定性。Ghulam等^[6]采用Baret^[14]等提出的从植被指数VI中通过对NDVI的 $x(<1)$ 次幂来求得 f_v 。

$$f_v = 1 - \left(\frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{0.6175} \quad (10)$$

式中, $NDVI_{min}$ 、 $NDVI_{max}$ 分别为植被完全覆盖($f_v=1$)与裸地($f_v=0$)的NDVI值。两者的值是通过在单张影像图或卫星图像的序列成像图中的完全植被以及裸地像素确定的。采用NDVI尺度的幂函数法可以减小大气扰动的影响,这是由于比率指数可以使大气影响最小化。 $NDVI_{min}$ 、 $NDVI_{max}$ 可以根据地理时空特征进行调整。 $NDVI$ 、 DVI 尺度方法幂函数计算 f_v 结果相近,平均误差显著减小。

假设一个像素由两个终端成员组成(裸地与植被),这样就可以把波段 R_i 的混合像素反射率认定为植被与土壤比例的综合线性函数。即

$$R_i = f_v R_{vi} + (1-f_v) R_{si} \quad (11)$$

$$R_{si} = \frac{R_i - f_v R_{vi}}{1-f_v} \quad (12)$$

合并方程(11)和方程(7),MPDI可以表示为

$$MPDI = \frac{R_{red} + MR_{nir} - f_v(R_{v,red} + MR_{v,nir})}{(1-f_v)\sqrt{M^2+1}} \quad (13)$$

这里, $R_{v,red}$ 和 $R_{v,nir}$ 分别是红光与近红外光谱区域的植被反射率。对于已知的植被生长, $R_{v,red}$ 和 $R_{v,nir}$ 可以作为一个系数,通过田间测定可以分别确定 $R_{v,red}$ 和 $R_{v,nir}$ 的值。

关于土壤水分条件下的植被生长与变化对MPDI的影响,对比方程(13)与方程(9)可以得到

$$MPDI = \frac{1}{(1-f_v)} (PDI - f_v PDI_v) \quad (14)$$

PDI对裸地的效果较好。假定PDI在同样水分条件的一种土壤类型下保持相对稳定(可以从方程(14)看出),植被生长对MPDI的影响主要改变 $(1-f_v)^{-1}$ 和 $f_v PDI_v$ 。模拟结果揭示,

$f_v PDI_v$ 随着 f_v 线性增加,尽管在 f_v 达到0.7之前 $(1-f_v)^{-1}$ 没有显著变化,直到 $f_v > 0.7$ 之后表现出曲线增加。可以得出结论:① MPDI不仅与土壤直线平行的土壤湿度适量有关,还与植被因素(斜率)有关(近红外至红光光谱区间的AD连线斜率),监测的植被(包括活动生长率、绿度和胁迫程度等)是没有固定变化的;② 植被生长早期或者植被稀疏的表面,MPDI随着叶面积指数和土壤湿度的增加而减小,但非线性变化;③ 稀疏与稠密的植被下垫面对植被动力变化影响是不同的,当 $f_v > 0.7$ 之后随着 $(1-f_v)^{-1}$ 的显著增加,MPDI减小速率显著变缓^[6]。

2.3 基于地表温度的遥感干旱监测方法

土壤水分是一个重要的环境因子,是表现植被状态的最活跃因子,也是陆面参数化的一个关键变量。土壤水分含量随时空的分布和变化对地-气间的热量平衡、土壤温度和农业墒情等都会产生显著的影响。但是大面积的观测土壤水分变化有一定困难,随着遥感技术和计算机技术的不断发展和土壤水分研究的不断深入,利用遥感技术成为测定大面积土壤含水量的最可行办法,也是现在和今后的研究热点。

目前利用遥感技术检测土壤水分的方法很多,主要有热惯量模式(热红外方法)、土壤水分光谱法、气象法、植被水分生理法、能量平衡法和微波遥感方法。其中利用土壤热特性的热红外技术在遥感监测土壤水分方面具有巨大的潜力和发展前景。中国的热红外技术监测水分研究开始于20世纪70年代,但是发展相对缓慢。

利用热惯量方法监测一定深度的土壤含水量,关键是要建立土壤含水量与土壤热惯量之间的关系模型,Price^[15]于1985年提出了表观热惯量的概念,并建立了土壤表观热惯量模型。土壤热惯量反映了土壤的热特性,是阻止其温度变化幅度的一种性质,热惯量大的土壤含水量高,其日较差小;热惯量小的土壤含水量低,其日较差大。传统的热惯量法一般使用NOAA/AVHRR作为遥感信息源,基于NOAA/AVHRR经典热惯量法在对地表综合参量的求解过程中,需要代入大量的地面实测数据作为支持,降低了这种方法的实用性。

随着EOS/MODIS系列卫星的运行,有必要将传统的热惯量遥感监测方法转移到EOS/MODIS平台。计算出热惯量只需地表反射率和昼夜温差,利用可见光-近红外通道卫星资料即可得到地表反射率,利用热红外通道即可得到昼夜温差。计算昼夜温差也是用热惯量遥感方法测定土壤水分的关键。利用卫星热红外通道资料进行定标计算,得到的辐射亮度带入普朗克方程计算出亮温,得出的亮温代入相应的分窗口算法计算出地表温度,然后得出昼夜温差。目前国内外学者在此方面取得了长足发展。

2.3.1 热惯量法

土壤的温度分布取决于土壤的热性质,即土壤的热容量和土壤的导热率。土壤的热容量指单位体积土壤增温1℃所需的热量,它由组成土壤的水、空气和固体颗粒的热容量按所占的体积加权平均求得,即

$$C = (C_s V_s + C_w V_w + C_a V_a) / V \quad (15)$$

式中, C_s 、 C_w 、 C_a 分别为固体颗粒、水、空气的容积热容量; V_s 、 V_w 、 V_a 分别为固体颗粒、水、空气所占体积; $V=V_s+V_w+V_a$, 为土壤的总体积。由于土壤中空气的 C_a 非常小, 而水的热容量约为固体颗粒的 2 倍, 因而 C 主要随土壤的容积含水量 B 而变化, 即

$$C=C_s V_s+C_w \theta \quad (16)$$

土壤中热量从温度高的部分传导到温度低的部分的过程称为土壤热传导。由 Fourier 定律, 有

$$Q_s=\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (17)$$

式中, Q_s 为热流量, λ 为土壤热导率。矿物质的导热率一般较大, 水次之, 空气最小, 因而土壤导热率的大小取决于固体颗粒的组合形态和含水量。当土壤含水量增加时, 土壤的导热率增大。根据热传导的 Fourier 定律和能量守恒定律, 可导出土壤热传导方程为

$$C \frac{\partial T}{\partial t}=\nabla \cdot(\lambda \nabla T) \quad (18)$$

式中, 左端项为单位体积土壤能量的时间变化率, 右端项为单位体积土壤能量的净输入量。对于各向同性的均质土壤, 如果土壤含水率不随深度变化或其变化对热特性参数的影响可以忽略, 此时, C 和 λ 可当作常数, 假定只有垂直方向的能量交换, 则进一步简化一般固体的热传导方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (19)$$

式中, 热扩散率 $\alpha=\lambda / C$ 。在一定的边界条件下, 通过分离变量法解方程, 可得到热惯量方程^[2]

$$p=\frac{k(1-A)}{\Delta T_0} \quad (20)$$

式中, p 为热惯量, ΔT_0 为每日温差, A 为全波段反照率, k 为常数。土壤的温度分布与土壤的热特性有直接关系, 热特性又与土壤的含水量有关, 而 NOAA/AVHRR 的可见光和热红外通道可以遥感土壤的反射率和亮度温度, 利用它可以获得地面的日反照率 A 和日温差 ΔT_0 , 进而间接获得热惯量 p , 使遥感土壤的含水量成为可能。

由 EOS/MODIS 计算全波段反射率 A 为

$$\begin{aligned} A= & 0.137 C H_1+0.071 C H_2+0.142 C H_3+0.128 C H_4 \\ & +0.099 C H_8+0.081 C H_9+0.082 C H_{10}+0.080 C H_{11} \\ & +0.037 C H_{14}+0.043 C H_{15}+0.039 C H_{17}+0.059 C H_{19} \end{aligned} \quad (21)$$

式中, $C H_1$ 、 $C H_2$ 、 $C H_3$ 、 $C H_4$ 、 $C H_8$ 、 $C H_9$ 、 $C H_{10}$ 、 $C H_{11}$ 、 $C H_{14}$ 、 $C H_{15}$ 、 $C H_{17}$ 、 $C H_{19}$ 分别为 EOS/MODIS 上述各通道的反照率。通过地表温度求取昼夜温差的方式比较复杂, 因此常采用昼夜辐射温度差代替地表温差。

2.3.2 条件温度指数

条件温度指数 (Temperature Condition Index, TCI) 与条件植被指数比较相似, 它利用多年资料的第 i 个时期传感器热波段亮温的最大值和最小值计算某一年的第 i 个时期的热波段亮温的相对变化^[2]。TCI 的计算公式为

$$TCI=\left(T_{\max }-T_i\right) /\left(T_{\max }-T_{\min }\right) \quad (22)$$

式中, T_i 为当前信息, $T_{\max }、T_{\min }$ 分别为第 i 个时期亮温的历史最大值和最小值, TCI 越小, 表示越干旱。在用 AVHRR 监测干旱的时候, 一般选用第 4 波段, 因为第 4 波段获得的辐射变化受大气中水汽的影响比较小^[16]。由于温度状态指数很难克服成像条件的影响, 又很难消除由于季节的不同所带来的地表温度的差异, 因此有学者在 TCI 的基础上提出了归一化差异温度指数 (Normalized Difference Temperature Index, NDTI) 的概念。

2.3.3 归一化差值温度指数

NDTI^[2] 定义为

$$NDTI=\left(T_{\infty}-T_s\right) /\left(T_s-T_0\right) \quad (23)$$

其中, T_{∞} 为地表粗糙无限大的理想地表表面温度, T_s 为从遥感图像中获得的实际地表表面温度, T_0 为地表粗糙无限小的理想地表表面温度。

然而, 在 NDTI 中需要的一些气象数据, 例如相对湿度、太阳辐射等在卫星过境时并不是总能及时得到。另一个问题就是根据像素值进行观测取样的人为选择上通常会进一步带来在计算 NDTI 时的不稳定性。

2.3.4 表观热惯量植被干旱指数

热惯量模型在遥感监测区域干旱中得到了广泛的应用。但是热惯量模型只适用于裸土或稀疏植被覆盖条件, 所以有必要结合热惯量和植被指数研究干旱。如果假设研究范围内气象条件一致, 表观热惯量 (Apparent Thermal Inertia, ATI) 与真实热惯量 (Real Thermal Inertia, RTI) 呈线性关系^[17], 就可以利用 ATI 和植被指数建立 NDVI-ATI 空间。在 NDVI-ATI 空间中, 旱边在下, 湿边在上。提取旱边和湿边方程为

$$\begin{cases} A T I_{\min }=a+b \cdot N D V I \\ A T I_{\max }=a'+b' \cdot N D V I \end{cases} \quad (24)$$

式中, $A T I_{\min }$ 为在相应 NDVI 下的最小表观热惯量, $A T I_{\max }$ 为在相应 NDVI 下的最大热惯量, $a、a'、b、b'$ 为回归系数, 分别为 NDVI-ATI 空间中湿边和旱边方程截距和斜率。

由 NDVI-ATI 空间计算表观热惯量植被干旱指数 (AVDI):

$$A V D I=\frac{(a+b \cdot N D V I-A T I)}{\left[\left(a'+b' \cdot N D V I\right)-\left(a+b \cdot N D V I\right)\right]} \quad (25)$$

2.4 基于植被指数和温度的遥感干旱监测方法

2.4.1 条件植被温度指数

条件植被温度指数 (Vegetation-Temperature Condition Index, VTCI) 是为了解决 VCI、TCI、AVI 3 种方法造成的某一特定时期内不同像素间监测结果的可比性较差这一问题而提出的。植被的状态和土壤含水量的关系极为密切, 又十分复杂。土壤含水量影响到植被生长状态, 而植被生长状态又影响到遥感对地表温度的探测, VTCI 是将两者结合起来实现对干旱的遥感监测^[18-19]。它定义为

$$\begin{aligned} V T C I &=\left(L S T_{N D V I, \max }-L S T_{N D V I}\right) /\left(L S T_{N D V I, \max }-L S T_{N D V I, \min }\right) \\ L S T_{N D V I, \max } &=a_1+b_1 \cdot N D V I_i \\ L S T_{N D V I, \min } &=a_2+b_2 \cdot N D V I_i \end{aligned} \quad (26)$$

式中, LST (Land Surface Temperature) 为地表温度, 它是通过计算卫星热波段亮温反演出地表面温度的。 $LST_{NDVI_i, \max}$ 、 $LST_{NDVI_i, \min}$ 分别表示在研究区域内, 当 $NDVI_i$ 等于某一确定值时, 此时的地表温度的历史最大值和最小值, LST_{NDVI_i} 表示的是 $NDVI_i$ 等于这一确定值时的当前土壤表面温度。其中 a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 为待定系数, 可以通过绘制散点图得到 $LST_{NDVI_i, \max}$ 、 $LST_{NDVI_i, \min}$ 、 $NDVI_i$ 三者之间的线性方程。 $VTCI$ 取值范围为 $[0, 1]$, 它既考虑了 $NDVI$, 也考虑了土壤表面温度。这样上式就可以理解为, 干旱发生时, $NDVI$ 值比较小, $NDVI$ 值越小, 旱情越严重, 此时地表温度最大值也越大, 所以 $VTCI$ 值越小, 表示干旱越严重。

2.4.2 植被温度梯形指数

将 VCI 、 TCI 结合起来就称之为 $VITT$ ^[19-20] (Vegetation Index/Temperature Trapezoid), 定义为

$$VITT = LST/NDVI \quad (27)$$

除了 $LST/NDVI$ 方法外, LST 对 $NDVI$ 散点图更能表达旱情信息, 1989 年 Goward 等^[21]和 Price^[22]都分别发现了 LST 对 $NDVI$ 分散点图为一个三角形形状。1994 年 Moran 等^[23]报告说 LST - $NDVI$ 的空间分布具有梯形特征, 也就是 $VITT$ ($VITT$) 具有梯形特征 (图 1)。从此, LST - $NDVI$ 的光谱空间分布特征就广泛用来陆面的分类、土壤湿度的监测、生物燃烧产生水汽量以及下垫面层的能量估测。根据 LST - $NDVI$ 三角关系已经研究出了两个干旱指数: 植被温度条件指数 ($VTCI$) 和温度植被干燥指数 ($TVDI$)。计算所有微波反射率资料, 相对于光域有限个带宽反射因子的组合而言, 下垫面层宽域反照率可以找到更多有用的信息。尽管在干旱探测中使用宽带反照率与 $NDVI$ 分散绘图的比值斜率, Ghulam^[24]尝试在 LST - $NDVI$ 中用反照率替代 LST , 并且业已得出了植被条件反照率干旱指数 ($VCADI$)。

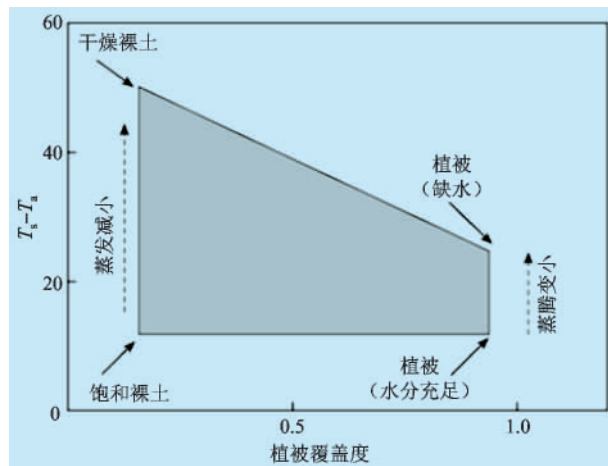


图 1 植被覆盖和地表-空气温差构成的植被指数温度

Fig. 1 T_s - $NDVI$ feature space

2.4.3 温度植被干旱指数模型

Sandholt 等^[25]发现在简化的植被指数-地表温度特征空间中有很多等值线, 提出了温度植被旱情指数 (Temperature Vegetation Dryness Index, $TVDI$)。在该特征空间中 (图 2), 湿边 ($T_{s, \min}$) 简化为与 $NDVI$ 轴平行的直线, 旱边 ($T_{s, \max}$) 与 $NDVI$ 呈线性关系^[20], 表达式为

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s, \max}}{T_{s, \max} - T_{s, \min}} = \frac{T_s - T_{s, \min}}{a + b \cdot NDVI - T_{s, \min}} \quad (28)$$

式中, T_s 为研究区像元的地表温度; $T_{s, \min}$ 为某一 $NDVI$ 值时的最低地表温度, 对应湿边时 $TVDI=0$; $T_{s, \max}$ 为某一 $NDVI$ 值时的最高地表温度, 对应干边时 $TVDI=1$ 。 $TVDI$ 越接近 1, 土壤湿度越低。

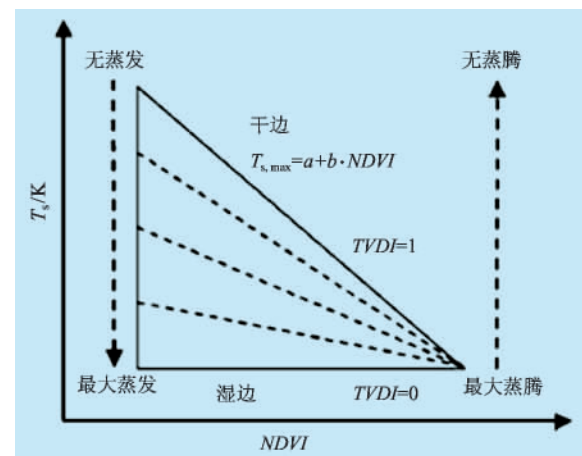


图 2 简化的 T_s - $NDVI$ 特征空间

Fig. 2 Simplified T_s - $NDVI$ Feature Space

$TVDI$ 通过统计特征空间中的数据确定顶点与干湿边, 不需要其他辅助数据, 比 WDI 方便实用, 可以定性地反映土壤湿度情况。但为了使特征空间的边界具有代表性, 影像覆盖范围必须有裸土到密闭植被的变化, 而且它在不同时间和区域不具有可比性, 不适宜大面积地区, 同时对特征空间的干湿边物理意义也缺乏严格定义, 边界拟合具有一定主观性。

2.4.4 作物缺水指数法

作物缺水指数法^[26] (Crop Water Stress Index, $CWSI$) 由 Jackson 等^[27]于 1981 年根据热量平衡原理提出的, 定义为

$$CWSI = 1 - (E_d/E_p) \quad (29)$$

式中, E_d 为实际蒸散即日蒸散, E_p 为潜在蒸散。

$$E_d = E_i \cdot \frac{2N_e}{\pi \sin(\pi t/N_e)} \quad (30)$$

式中, N_e 为日蒸散时数, 由每一区域的纬度和赤纬求得。 E_i 为瞬时蒸散, $L_n E_i = R_n - G - H$, L_n 为气化潜化常数; R_n 为净辐射, $R_n = (1 - \alpha) Q + \varepsilon_a \sigma T_a^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4$; G 为土壤热通量, $G = (0.1 - 0.042h) R_n$ 或 $G = (1 - c_v) R_n$; H 为显热通量, $H = \rho c_p \cdot \frac{T_c - T_a}{r_{ac} + r_{lh}}$, ρ 为空气密度, $\rho = 1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, c_p 为空气比热, $c_p = 1.003 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$, r_{ac} 为空气动力阻力, r_{lh} 为剩余阻力, $r_{lh} = 4/u^*$, u^* 为摩擦速度。

潜在蒸散 E_p 采用 Penman 方法计算:

$$E_p = \frac{\Delta}{\Delta + r} \times R_n + \frac{\Delta}{\Delta + r} \cdot f(u) \times 0.750062(e_b - e_a) \quad (31)$$

式中, Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率, r 为干湿球表常数, $f(u)$ 为风速和月平均最高气温 $T_{\max}$ 、月平均最低气温 $T_{\min}$ 的函数, e_b 为饱和水汽压, e_a 为实际水汽压。

在有植被覆盖情况, 作物缺水指数法计算精度高于热惯量法, 但其计算复杂, 一些要素依赖于地面气象台站, 实时性较差。

2.5 基于植被与土壤的遥感监测方法

杜晓等^[24]使用的方法基于植被和土壤或多或少都含有水分, 水分对地物的波谱反射率是有影响的, 其影响符合水的波谱曲线。通过分析水的吸收曲线可以知道, 在 $1.45 \mu\text{m}$ 波段和 $1.9 \mu\text{m}$ 波段各有一个吸收高峰区域, 而在 $1.65 \mu\text{m}$ 波段处有一个吸收低谷区。中国地区分布较广的植被(草地、针叶林、阔叶林等)和土壤(黄壤、褐土、棕壤、红壤等)的波谱反射率曲线, 在 $1.45 \mu\text{m}$ 和 $1.9 \mu\text{m}$ 波长各有一个反射率低谷, 分别对应水反射率曲线的吸收高峰点, 其中以 $1.9 \mu\text{m}$ 波长处反射率变化最为明显; $1.65 \mu\text{m}$ 波长有一个反射率高峰, 对应水反射率曲线的吸收低谷点。分析表明, 土壤和植被中的含水量是影响其波谱曲线变化幅度的一个重要因素。近似对应水反射高峰和低谷的分别为第 6 波段($1\ 628 \sim 1\ 652 \text{ nm}$)和第 7 波段($2\ 105 \sim 2\ 155 \text{ nm}$)。基于上述分析, 杜晓等提出了一种新的含水量指数方法, 即地表含水量指数 (Surface Water Capacity Index, SWCI)^[28]:

$$SWCI = \frac{b_6 - b_7}{b_6 + b_7} \quad (32)$$

式中, b_6 、 b_7 为 EOS/MODIS 数据第 6、第 7 波段反射率值。

由于 b_6 、 b_7 波段的土壤反射率普遍高于植被, 为保证不同植被覆盖区域指数的统一, 需要增加一个植被覆盖度参数 L , 以调节土壤和植被的反射率差异。由主成分分析法得知 EOS/MODIS 第 7 波段本身可以较好地反映土壤和植被的反射率差异, 且地物类型对反射率的影响较小。假设考虑植被影响的 SWCI 表达式为

$$MSWCI = \frac{b_6 - b_7}{b_6 + b_7(1 + L)} \quad (33)$$

通过对照同期 NDVI 指数, 提取同一区域内 NDVI 差别较大且距离很近的 2 个点, 认为这 2 点的 SWCI 值是近似一致的。在研究区域内提取多个点对, 对其进行相关性分析, 并利用统计方法进行非线性函数拟合, 得到 L 值, 即得到修正后的表层水分含量 (MSWCI)。

3 目前应用中存在的问题

美国、欧盟等国家较早开始利用卫星遥感技术以及作物干旱数值模式监测大面积农业干旱。20 世纪 80 年代中期以来, 气象卫星遥感监测干旱技术在中国也取得了较快发展, 但离业务实用还有较大距离。20 世纪 90 年代以来, 中国在有关农田蒸发等土壤水分遥感监测理论研究方面取得了明显

进展, 利用 NOAA/AVHRR 资料进行土壤水分或干旱的宏观监测研究工作也有了很大进展, 利用 EOS/MODIS 资料监测干旱的研究也已取得一些成果。“十五”期间, 主要利用极轨气象卫星和每旬的地面测墒资料进行土壤水分遥感监测研究和开展业务。由于受极轨气象卫星精度、周期及受云等天空状况的影响, 加之测墒资料频率较低以及监测方法没有明显突破等方面的影响, 干旱遥感监测的准确率没有明显提高。“十一五”期间, 气象部门在已建立的较完善的土壤水分地面监测网基础上, 将在全国布设 TDR 和 FDR 自动土壤水分监测仪, 同时还在国家和部门计划支持下, 利用已经投入业务中应用的高分辨率卫星资料 (如 EOS/MODIS 和中国 2008 年 5 月发射的 FY-3 极轨气象卫星 250 m 分辨率资料) 进行农业干旱监测研究将是主要的研究方向; “土壤-作物-大气”多圈层立体监测、多学科融合将是解决提高旱情定量监测精度、使之实用化和业务化的必由之路。

4 结论与展望

1) 基于 EOS/MODIS 和 FY-3 卫星高分辨率卫星遥感资料, 采用卫星遥感、航空遥感、地面气象和农业气象等多元观测资料的尺度转换技术, 卫星遥感监测土壤水分的精度检验技术, 针对不同地区的主要农作物 (如华北的小麦、玉米等), 研究垂直干旱指数法 (PDI)、改进的垂直干旱指数法 (MPDI)、温度植被干旱指数 (TVDI) 的特征空间法 (TVDI_{Ts})、作物缺水指数 (CWSI)、综合干旱监测等多种遥感监测模型, 重点是部分植被覆盖条件下的土壤水分和作物干旱监测模型和方法。同时, 在 EOS/MODIS 资料的大气订正方面 (如 MODTRAN, 6S 等) 需进一步研究, 以提高下垫面反演精度。

2) 动态监测技术是获取灾害过程信息的关键。今后的研究要综合大气-植物-土壤相互作用所涉及的多圈层信息源, 以植被下垫面野外定位观测、人工控制试验为链接, 基于卫星遥感、航空遥感、地面气象和农业气象等多元观测资料, 综合提取农业重大气象灾害的孕灾、致灾信息, 在 GIS 技术支持下, 集成建立基于天基、空基、地基的农业重大气象灾害监测体系, 实现灾害监测的立体化、动态化和无缝隙化。

3) 主动微波遥感具有空间分辨率高的优点, 随着 FY-3 卫星的业务开发应用, 主动微波遥感土壤湿度的研究将越来越受到重视。发展实用的微波遥感土壤湿度算法并用于大面积土壤湿度估测的任务还相当艰巨, 因此, 土壤湿度的微波遥感研究在当前及今后仍是热点课题。

4) 遥感监测土壤水分的精度检验问题也需要深入研究。目前台站测墒的代表性较差, 时效上也不能和卫星保持一致, 所以仅用台站测墒资料很难对遥感监测土壤水分的精度进行评价, 应深入研究更完善、更科学的精度检验方法。

参考文献 (References)

[1] 刘玉洁, 杨忠东, 等. EOS/MODIS 遥感信息处理原理与算法 [M]. 北

- 京: 科学出版社, 2001.
- Liu Yujie, Yang Zhongdong, *et al.* The theories and arithmetic of remote sensing for EOS/MODIS data[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [2] 刘良明. 基于 EOS MODIS 数据的遥感干旱预警模型研究 [D]. 武汉: 武汉大学遥感信息工程学院, 2004.
- Liu Liangming. The research of remote sensing drought prediction model based on EOS MODIS data [D]. Wuhan: School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 2004.
- [3] Seo D-J, Park C-H, Park J-H, *et al.* A search for the optimum combination of spatial resolution and vegetation indices [C]// 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS'98, Seattle, WA, 6-10 July 1998: 1729-1731.
- [4] Liu H Q, Huete A R. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33: 457-465.
- [5] Unganai L S, Kogan F N. Drought monitoring and corn yield estimation in southern Africa from AVHRR data [J]. *Remote Sensing Environment*, 1998, 63(3): 219-232.
- [6] Ghulam A, Qin Q, Teyip T, *et al.* Modified perpendicular drought index (MPDI): A real-time drought monitoring method [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2007.03.002.
- [7] Gao B. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 257-266.
- [8] 刘小磊, 覃志豪. NDWI 与 NDVI 指数在区域干旱监测中的比较分析 [J]. *遥感技术与应用*, 2007, 22(5): 608-612.
- Liu Xiaolei, Qin Zhihao. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, 22(5): 608-612.
- [9] 冯强, 田国良, 王昂生, 等. 基于植被状态指数的土壤湿度遥感方法研究[J]. *自然灾害学报*, 2004, 13(3): 81-88.
- Feng Qiang, Tian Guoliang, Wang Angsheng, *et al.* *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(3): 81-88.
- [10] 陈维英, 肖乾广, 盛永伟. 距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用[J]. *环境遥感*, 1994, 9: 106-112.
- Chen Weiying, Xiao Qianguang, Sheng Yongwei. *Journal of Remote Sensing*, 1994, 9: 106-112.
- [11] Fensholt R, Sandholt I. Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and short wave infrared data in a semi-arid environment[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(1): 111-121.
- [12] Ghulam A, Qin Q, Zhan Z. Designing of the Perpendicular Drought Index (PDI)[J]. *Environmental Geology*, 2006, doi: 10.1007/s00254-006-0544-2.
- [13] Jiang Z, Huete A, Chen J, *et al.* Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101(3): 366-378.
- [14] Baret F, Clevers J G P W, Steven M D. The robustness of canopy gap fraction estimations from red and near-infrared reflectances: A comparison of approaches[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54(3): 141-151.
- [16] 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[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2001, 26(5): 412-418.
- Wang Pengxin, Gong Jianya, Li Xiaowen. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(5): 412-418.
- [17] 张晓涛, 康绍忠, 王鹏新, 等. 估算区域蒸发蒸腾量的遥感模型对比分析[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 6-13.
- Zhang Xiaotao, Kang Shaozhong, Wang Pengxin, *et al.* *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(7): 6-13.
- [18] 王鹏新, 孙威. 条件植被温度指数干旱监测方法的研究与应用[J]. *科技导报*, 2006, 24(4): 56-58.
- Wang Pengxin, Sun Wei. *Science & Technology Review*, 2006, 24(4): 56-58.
- [19] 陈怀亮, 邹春辉, 邓伟, 等. 植被温度条件指数在土壤墒情遥感监测中的应用[J]. *气象科技*, 2005, 33(Suppl): 148-150.
- Chen Huailiang, Zou Chunhui, Deng Wei, *et al.* *Scientia Meteorologica Sinica*, 2005, 33(Suppl): 148-150.
- [20] 齐述华, 李贵才, 王长耀, 等. 利用 EOS/MODIS 数据产品进行全国干旱监测的研究[J]. *水科学进展*, 2005, 16(1): 56-61.
- QI Shuhua, LI Guicai, Wang Changyao, *et al.* *Advances In Water Science*, 2005, 16(1): 56-61.
- [23] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y. Estimating crop water deficit using the relation between surface air temperature and spectral vegetation index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49(3): 246-263.
- [24] 詹志明, 秦其明, 阿布都瓦斯提·吾拉木, 等. 基于 NIR-Red 光谱特征空间的土壤水分监测新方法 [J]. *中国科学 D 辑*, 2006, 36 (11): 1020-1026.
- Zhan Zhiming, Qin Qiming, Ghulam A, *et al.* *Science in China, Series D*, 2006, 36(11): 1020-1026.
- [26] 申广荣, 田国良. 作物缺水指数监测旱情方法研究[J]. *干旱地区农业研究*, 1998, 16(1): 123-128.
- Shen Guangrong, Tian Guoliang. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1998, 16(1): 123-128.
- [27] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, *et al.* Canopy temperature as a Crop Water Stress Indicator [J]. *Water Resources Research*, 1981, 17: 1133-1138.
- [28] 杜晓, 王世新, 周艺, 等. 一种新的基于 EOS/MODIS 的地表含水量模型构造与验证[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2007, 32(3): 205-211.
- Du Xiao, Wang Shixin, Zhou Yi, *et al.* *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(3): 205-211.
- [29] Thomas J. Jacksona, Daoyi Chenb, Michael Cosha, *et al.* Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92: 475-482.

(责任编辑 朱宇)

《科技导报》“学术不端行为举报”栏目征稿

“学术不端行为举报信箱”栏目以净化学术环境为宗旨,以打击学术不端行为,倡导老老实实、认认真真、严谨求实的科学作风为根本目的。自 2006 年第 3 期开设以来,本栏目已核正刊登学术不端行为举报信息几十条,为进一步净化我国的学术环境和科研氛围做出了应有的努力。欢迎广大读者就自然科学领域发生的论文抄袭剽窃、一稿多投、数据造假等学术不端行为,向我刊提供证据举报。栏目责任编辑:赵佳;投稿邮箱:hjy@cast.org.cn。