

文章编号:1006 - 7639(2003) - 04 - 0076 - 06

遥感监测干旱的方法及研究进展

王小平, 郭 锐

(中国气象局 兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020)

摘要:文中回顾了干旱监测研究的国内外进展,总结了目前干旱监测的方法,并对未来进行干旱监测的发展方向谈了自己的认识,同时指出了在干旱监测方面应该走多学科综合的道路。

关键词:干旱监测;研究方法;进展

中图分类号: TP79

文献标识码: B

引言

干旱是世界各地主要的自然灾害之一,在各种自然灾害中,以旱灾对农业生产的影响最大。我国因干旱每年平均受灾面积达 2 000 万 hm^2 , 损失粮食占全国因灾减产粮食的 50%^[1]。受干旱灾害影响最严重的地区是我国主要产粮区、严重持续的干旱还直接影响工业生产、人民生活 and 生态环境,甚至引发土地荒漠化、地面沉降等多种自然灾害。干旱已成为社会、经济可持续发展的严重制约因素。干旱是涉及多学科的复杂问题,对干旱的大范围实时监测是世界公认的难题。如何利用有效手段及时了解旱情的发生、发展一直是各国政府部门关注的焦点,也是科学界致力解决的关键问题。随着遥感技术的发展,遥感以其客观、动态、宏观、实时、迅速、廉价的优势,为旱情监测开辟了新的途径,随着“3S”技术的发展,近年来更是有了较大的进展。本文在查阅了相关资料的基础上,就遥感监测干旱的方法及研究进展进行了总结。

1 遥感监测干旱的主要方法及现状

目前,遥感监测干旱主要以气象卫星、侧视雷达等为主,随着遥感技术的发展,可获取的多源遥感数据不断增加,通过遥感数据计算可直接或间接反映干旱状况的指数已有很多,形成了很多方法。主要有热惯量法、植被缺水指数法、植被距平指数法、温

度法等,各种方法各有其利弊,可结合使用。

1.1 热惯量法

土壤热惯量(TI)是土壤的一种热特性,它是引起土壤表层温度变化的内在因素,它与土壤含水量密切相关,同时控制土壤温度日较差的大小,用 NOAA 卫星 AVHRR 资料可以获得土壤温度的日较差,推算土壤湿度的热惯量表达式:

$$P = \frac{C(1-A)}{T_0}$$

其中, P 为热惯量, T_0 为昼夜温差, A 为全波段反照率, C 为常数。

土壤的温度分布与土壤的热特性有直接的关系,热特性又与土壤的含水量有关,不同土壤的热惯量值不同,土壤类型和土壤质地对之有直接的影响,土壤的空间结构也有影响,不过较难客观的确定。热惯量法较为简单实用,应用热惯量法在每年的 11 月到次年的 3 月间是最佳观测时间。该方法也具有很大的局限性:(1)只适用于裸露土壤或植被覆盖度低的时候;(2)要求该地区昼夜两次的晴空卫星资料^[2]。

Watson^[3~4]等最早成功地应用了热惯量模型, Rosema^[5]等进一步发展了他们的工作,提出了计算热惯量、每日蒸发的模型。Price^[6~8]等在能量平衡方程的基础上,简化潜热蒸发(散)形式,引入地表综合参数概念,系统地阐述了热惯量方法及热惯量的成像机理,并提出了表观热惯量的概念,利用卫星红外辐射温度差计算热惯量,然后估算土壤水分。这个方法已经得到普遍认可。隋洪智等^[9]在考虑

收稿日期:2003 - 11 - 25;改回日期:2003 - 12 - 29

作者简介:王小平(1975 -),女,山西保德人,硕士,主要从事气候变化和环境演变研究。

了地面因子和大气因子的情况下,进一步简化能量平衡方程,使直接利用卫星资料推算得到地表热特性参量成为可能。余涛等^[10]提出了一种改进的求解土壤表层热惯量的方法,发展了地表能量平衡方程的一种新的化简方法。经过这样的处理,可从遥感图像数据直接得到热惯量值,进而得到土壤水分含量分布。马蔼乃^[21]等均从不同角度、在不同的区域利用 NOAA/AVHRR 资料进行热惯量法遥感土壤水分的监测试验。日本学者宇都宫阳二郎与中国科学院长春净月潭遥感实验站合作^[11]以中国东北吉林省为中心进行区域土壤水分调查,采用 NOAA 卫星资料,结合近地层小气候及地下热流量观测资料,进行热惯量计算,并与同步测定的 0~15cm 土壤水分资料建立统计模式,绘成土壤水分分布图。随着热惯量法遥感土壤水分理论的日臻成熟,对于在裸露或植被覆盖度较低时土壤水分遥感采用热惯量法的效果已得到认可,但在实际应用中,仍需根据当地的状况对模型参数的求解和某些因子的省略做一些必要的调整。

1.2 作物缺水指数法

作物缺水指数(Crop Water stress Index CWSI)是土壤水分的一个度量指标,它是由作物冠层温度值转换来的,是利用热红外遥感温度和常规气象资料来间接的监测植被条件下的土壤水分,是遥感监测土壤水分的一种很重要的方法。该方法最初是由 T.J.Jackson 以能量平衡为基础提出的。该指数是以植物叶冠表面温度(T_c)和周围空气温度(T_a)的测量差值,以及太阳净辐射的估算值计算出来的,实质上反映出植物蒸腾与最大可能蒸发的比值。因此,在较均一的环境条件下可以把作物脱水指数与平均日蒸发量联系起来,作为植物根层土壤水分状况的估算指标。作物缺水指数(CWSI)模型定义为^[12]:

$$CWSI = 1 - E_d / E_p$$

其中 E_d 为实际蒸散即日蒸散量; E_p 为潜在蒸散量,采用鼓曼方法计算^[13]。 E_d 由每一区域的纬度即赤纬求得的日出日落时间 N 及瞬时蒸散 E_i 求得:

$$E_i = (R_n - G - H) / L_m$$

其中, R_n 为净辐射,由经过大气辐射订正后的图像反演得到的总辐射,通过 NOAA/AVHRR 图像通道 1、2 反演得到的反照率百分比及大气长波辐射和地表长波辐射计算;

G :土壤热通量,可通过绿度指数由遥感图像求得的地表覆盖率及 R_n 求得;

H :显热通量,由冠层温度、空气动力阻力及中性情况下空气阻力求得;

L_m :气化潜化常数

在有植被覆盖的条件下,作物缺水指数法监测土壤水分的精度高于热惯量法,但是其计算复杂,需要较多的常规气象和地面观测资料的配合,实时性不能够完全保证,对投入业务应用有一定影响。

Jackson^[13]等提出了作物缺水指数的概念,定义缺水指数 $CWSI = 1 - ET / ET_p$,显然 $CWSI$ 的值在 0~1 之间变动。田国良等在“七五”国家攻关项目中,利用卫星一次过境观测的辐射温度值,计算每小时的地表辐射温度以及蒸散,结合当地气象台站的气象数据计算出 $CWSI$ 。并建立了土壤湿度与作物缺水指数的回归方程。作物缺水指数以蒸散为基础,物理意义明确,这种方法的精度取决于地面气象数据的代表性,如用县气象站(点)的观测数据代表整个县范围的情况往往不尽合理。申广荣等^[12]和武晓波等^[14]在 GIS 支持下,建立了黄淮海平原旱情监测系统。将进行作物缺水指数计算所需要的 8 个气象要素进行插值处理,建立了融遥感图像、图形、数据为一体的 $CWSI$ 模型。使旱情监测由点到面,结果清晰明了。

1.3 植被指数法

植被指数(Vegetation Index VI)是遥感监测地面植被生长状况的一个指数,它是由卫星传感器可见光和近红外通道探测数据的线性或非线性组合形成的,可以较好地反映地表绿色植被的生长和分布状况。一般来讲,当作物缺水时,作物的生长将受到影响,植被指数将会降低。

归一化植被指数($NDVI$)

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

对于 NOAA 卫星, $NDVI$ 定义为归一化植被指数。 $NDVI$ 是目前应用最广的一种植被指数,可用于旱情的分析和监测,在这方面,国外的很多科学家在应用 NOAA/AVHRR 资料方面做了很多探索^[15~16],取得了很多突破性的进展,常用的与植被指数有关的指数还有相对距平植被指数 $RNDVI$, 条件植被指数 VCI , 条件温度指数 TCI , 距平植被指数 AVI , 条件植被温度指数 $VTCI$, 植被供水植被指数 VSW 等。

Prout^[17]等用 NOAA/AVHRR 的植被指数

(NDVI)与气象资料(降水等)预报加拿大东部地区的农田干旱,准确地预报了1985年的干旱对农业产量的影响。陈乾^[18]用NOAA卫星的NDVI监测甘肃省的干旱,结果表明,植被指数的相对变率分布与相应时期的20cm土壤相对湿度和降水量的偏差均一致。晏明^[19]等用植被指数法监测吉林省1997年的旱灾,将1997年的NDVI与正常年份1996年的同期NDVI进行对比,确定当年受旱的情况。陈维英^[20]等用NOAA/AVHRR距平植被指数,对1992年特大干旱进行了监测。居为民^[21]等用NOAA/AVHRR相对距平植被指数,成功地对1994年江苏省的严重干旱进行了监测。普布次仁^[22]分别对中国北部干旱半干旱地区的NDVI与降水量和中国华北、西南地区的NDVI与土壤绝对湿度的关系进行分析,结果表明:同期累积NDVI与累积降水量及同期累积NDVI与0~50cm平均土壤绝对湿度值均存在着显著的非线性关系。张军涛^[23]等在中国东北对典型地月平均NDVI值与月平均降水量和月平均温度进行相关分析,得出NDVI与月平均降水量和月平均温度均存在明显的相关关系,但其与降水量的相关大于其与温度的相关程度。Cogan^[24]将在多年极端天气条件(干旱和非干旱)下计算出的NDVI绝对最大、最小值作为量化气候影响(区域分异)的指标,并提出了条件植被指数(VCI)的概念,他认为VCI不仅描述了土地覆盖和植被时空变化,而且反映了天气气候条件对植被的影响。蔡斌^[25]等利用VCI研究我国土壤湿度状况,应用VCI结合常规资料进行综合分析,对我国的干旱状况进行宏观动态监测。Uganda^[26]等利用VCI对南部非洲的干旱进行监测并进行了玉米估产试验。中国国家卫星气象中心^[27]提出植被供水植被指数(VSWI)监测干旱的方法,这种方法适用于植被蒸腾较强的季节。Jackson^[28]等用手持式模拟 Landsat/MSS 光谱仪在干旱的麦田和充分灌溉的麦田,测得包括NDVI在内的多种植被指数对小麦受旱的敏感程度,结果表明,在土壤缺水不足以引起植被发育明显受阻的情况下,所有植被指数都无法检测出土壤缺水。应用研究表明,在植被生长茂盛的阶段,利用距平植被指数和条件植被指数(VCI)来检测作物的缺水状况,效果较好。但需要有较长年代的资料积累。用植被指数法检测作物缺水要在土壤缺水已引起植被生长受阻的情况下才能实现,如果与降水条件结合分析,效果会更好。

距平植被指数 (Anomaly Vegetation Index, AVI)

引入距平植被指数概念的目的是将NDVI的变化与天气、气候研究中“距平”的概念联系起来,对比分析NDVI的变化与短期的气候变化之间的关系。AVI的定义为:

$$AVI = NDVI_i - \overline{NDVI}$$

式中, $NDVI_i$ 为某一特定年某一时期(如旬、月等)NDVI的值, \overline{NDVI} 为多年该时期NDVI的平均值。AVI作为监测干旱的一种方法,它以某一地点某一时期多年的NDVI平均值为背景值,用当年该时期的NDVI减去背景值,即可计算出AVI的变化范围,即NDVI的正、负距平值。正距平反映植被生长较一般年份好,负距平表示植被生长较一般年份差。一般而言,距平植被指数为-0.1~-0.2表示旱情出现,-0.3~-0.6表示旱情严重。对1992年河南省的旱情(大旱)研究后认为,在山区应用距平植被指数的效果比降水距平好,并认为是由于山区降水容易流失所致^[29]。

条件植被指数 (Vegetation Condition Index, VCI)

条件植被指数的定义为^[30]:

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \times 100$$

在该式中, $NDVI_i$ 为某一特定年第*i*个时期的NDVI值, $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 分别代表所研究年限内第*i*个时期NDVI的最大值和最小值。上式的分母部分是在研究年限内第*i*个时期植被指数的最大值和最小值之差,它在一定意义上代表了NDVI的最大变化范围,反映了当地植被的生境;分子部分在一定意义上表示了某一特定年第*i*个时期的当地气象信息,若 $NDVI_i$ 和 $NDVI_{min}$ 之间差值小,表示该时段作物长势很差^[31~32]。

1.4 温度法

条件温度指数

条件温度指数 (Temperature Condition Index TCI)的定义与VCI的定义相似,但它强调了温度与植物生长的关系,即高温对植物生长不利^[33]。

TCI的定义:

$$TCI = \frac{BT_{max} - BT_i}{BT_{max} - BT_{min}} \times 100$$

式中, BT_i 为某一特定年第*i*个时期的AVHRR第4波段(10.3~11.3 μ m)亮度温度的值, BT_{max} 和 BT_{min} 分别表示所研究年限内第*i*个时期亮度温度

的最大值和最小值。 TCI 愈小,表示愈干旱。 TCI 的优点是只需要某一时间系列的白天热红外遥感数据,它的缺点是未考虑白天的气象条件,如净辐射、风速、湿度等对热红外遥感的影响及土地表面温度的季节性变化^[15]。

归一化温度指数 $NDTI$ (Normalized Difference Temperature Index)

归一化温度指数的定义^[15]

$$NDTI = (T - T_s) / (T - T_0)$$

其中, T 表示的是当地表阻抗无限大时模拟的表面温度,此时实际蒸散 $ET = 0$, T_s 是从 AVHRR 传感器上观测的地表温度, T_0 是当地表阻抗是零时模拟的表面温度,此时实际蒸散 $ET =$ 潜在蒸散 ET_p 。这种方法的优点在于,首先, $NDTI$ 和土壤湿度非常接近, $NDTI_{max}$, $NDTI$ 可以发展成为一种标准产品,它能够很容易的计算出来,代替土壤湿度的获得;其次,当 $NDVI$ 增高时, $NDTI$ 值也增大,这对于遥感产品的综合利用非常有好处。这种方法消除了地表面温度季节变化的影响, T 和 T_0 可通过能量平衡 - 空气动力学阻抗模型计算,需要卫星过境时刻的气温、太阳辐射、相对湿度、风速和叶面积指数等数据。而这些数据在卫星过境时刻不易获得,加之还存在着从点测量数据向遥感数据的转化问题,因而使得模型在实际中的应用变得有难度。

1.5 条件植被温度指数法 (Vegetation Temperature Condition Index, $VTCI$)

$VTCI$ 的定义为:

$$VTCI = \frac{LST_{NDVI_i, max} - LST_{NDVI_i}}{LST_{NDVI_i, max} - LST_{NDVI_i, min}}$$

$$LST_{NDVI_i, max} = a + bNDVI_i$$

$$LST_{NDVI_i, min} = a - bNDVI_i$$

$LST_{NDVI_i, max}$ 和 $LST_{NDVI_i, min}$ 分别表示在研究区域内,当 $NDVI_i$ 值等于某一特定值时的土地表面温度的最大值和最小值。 a 、 b 、 a 、 b 为待定系数,可通过绘制研究区域的 $NDVI$ 和 LST 的散点图近似地获得。 $VTCI$ 是在 $NDVI$ 和 LST 的散点图(特征空间)是三角形的基础上提出的,是在假设研究区域内土壤表层含水量应从萎焉含水量到田间持水量的基础上进行干旱监测的,适用于研究一特定年内某一时期这一区域的干旱程度。 $VTCI$ 的取值范围为 $[0, 1]$,一般地说, $VTCI$ 的值越小,干旱程度越严重。王鹏新等通过试验证实了 $VTCI$ 是一种近实

时的干旱监测模型。它的缺点是对研究区域选择的要求较高,必须满足土壤表层含水量应从萎焉含水量到田间持水量的条件,对于研究区域环境背景如气象条件、地表覆盖类型、土壤属性、水系分布和灌溉状况以及作物栽培等的充分了解有助于判别是否满足该条件^[31~33]。

1.6 微波遥感法

尽管用可见光与近红外及热红外遥感土壤水分是可行的,但当地球表面被云层覆盖时,它们则变得无能为力。微波对云层有较强的穿透力,因此微波遥感在土壤水分监测中具有某些独特的优越性,是未来遥感监测干旱的一个前景很好的方法。

微波遥感土壤湿度具有坚实的物理基础,即土壤的介电特性和土壤水分含量有密切关系,水的介电常数大约为 80,干土仅为 3,它们之间具有较大的反差。土壤的介电常数随土壤湿度变化而变化,国内外研究者对此进行了大量的实验研究和理论计算。田国良在对比分析了几种遥感土壤湿度方法后,认为微波遥感可能最终解决遥感土壤湿度问题。

微波遥感法有被动微波遥感土壤水分和主动微波遥感土壤水分两种。与主动微波遥感相比,被动微波遥感土壤湿度开展的较早,已发展了一些较成熟的算法。Shutko^[34]指出,对于裸露的各向同性土壤,在波长为 2.25cm 和 18cm 时观测和实验得到的土壤水分含量与其发射率为线性关系。根据辐射传输理论,来自土壤的向上辐射取决于表层土壤的介电性质,而这一表层土壤的厚度是微波波长的十分之几,因此使用微波长波段的传感器更适合于收集厚层土壤的信息。被动微波遥感主要是通过微波辐射计获得土壤的亮度温度,然后通过物理模型反演土壤水分或与土壤湿度建立经验/统计关系。主动微波遥感发射一束经调制的电磁波能量,并且接收后向散射回波,通过后向散射系数 σ^0 ,建立起目标物的形态和物理特征与后向散射回波的关系。许多模式建立起来用于独立地估算这些项,半经验的模式容易反演,但是不够可靠;而复杂的理论模式需要许多的输入数据,使得反演变得困难。如果土壤上有植被覆盖,问题就更复杂,模式也必须考虑植被和粗糙度的影响。目前有两种模式正在使用:连续和离散模式。Ulaby^[35~36]等的研究发现,对土壤表层 5cm 的土壤湿度最敏感的频率是 4.5 GHz (C 波段),水平极化,入射角为 10°。实验结果显示,土壤湿度对裸露土壤的敏感度是 0.15dB;对有植被的土壤是

0.13dB。田国良^[37]利用 1987 年 11 月在河南省封丘县取得的 X 波段机载合成孔径雷达水平极化 (HH) 图像进行麦田土壤含水量监测,将土壤水分分为 8 个等级。李杏朝^[38]于 1994 年 10 月 22 日根据微波后向散射系数法,用 X 波段散射计测量土壤后向散射系数,与同步获取的 X 波段、HH 极化的机载 SAR 图像一起,进行了一次用微波遥感监测土壤水分的试验,监测相对误差率仅 12%。主动微波遥感的最大进步在于一系列带有微波传感器的卫星(如 ERS 系列、Radarsat、ADEOS、被动微波)的发射和即将发射升空,将极大地推动主动微波遥感土壤湿度的研究^[39-40]。

微波遥感土壤湿度虽经过近 30a 的研究,但由于其应用的广泛性及卫星反演算法实用化的难度,使其依然成为当前的一个研究热点和难点。

2 遥感监测干旱的发展趋势

经过多年的研究,在遥感监测干旱方面,前人从不同角度做了很多工作,从土壤质地、地形、裸地、植被覆盖等影响土壤水分的很多方面,利用可见光、近红外、红外、微波等多种波段,建立了很多模型,应用了很多方法。总的来看,干旱监测是一个涉及很多相关学科的复杂问题,这给监测干旱带来了难度,没有一种方法是完美的,在不同时段和不同区域要多种方法结合,多学科综合,才能够有较好的结果。在卫星资料的应用方面,以往的研究以用美国国家海洋与大气管理局(NOAA)的高级甚高分辨率辐射仪(AVHRR)资料监测干旱应用最为广泛。随着对地观测技术的日益提高,更多卫星上天,传感器的改进,将使监测更为容易和方便。如 EOS - MODIS 卫星携带了 490 个探测器,分布在 36 个光谱波段,覆盖从可见光到红外波段,最高空间分辨率为 250m,这为将来的监测提供了极为有利的条件。我国将于 2006 年发射的“风云三号”极轨气象卫星增加了微波传感器,这将为遥感监测进一步实现全天候、多光谱、定量化和三维遥感提供了可能。未来在遥感监测方面会将各种卫星资料综合应用,多波段综合,卫星遥感和地面遥感结合,同时结合 GIS 和 GPS 技术,建立一个精度更高的,立体的遥感监测干旱系统。

目前笔者所在的课题组正在利用地面遥感辐射仪开展地面遥感监测干旱的研究,相信这一研究会为遥感监测干旱提供更为丰富的地面观测资料和数

据,为实现遥感监测干旱的三维化,动态化及高精度,从而更好地为农业生产提供科学的指导,为防灾减灾作出相应的贡献!

参考文献:

- [1] 中国农科院资源区划所. 减轻旱灾危害的设想和对策[Z]. 中国灌溉排水发展中心, 2002.
- [2] 马蔼乃, 薛勇. 土壤含水量遥感信息模型的研究[A]. 田国良. 黄河流域典型地区遥感动态研究[C]. 北京: 科学出版社, 1990. 133 - 140.
- [3] Watson K, Rowen L C, Offield T W. Application of Thermal Modeling in the Geologic Interpretation of IR Images[J]. Remote Sens Environ, 1971, (3): 2017 - 2041.
- [4] Watson K, Pohn H A. Thermal Inertia Mapping from Satellites Discrimination of Geologic Units in Oman[J]. J Res Geol Surv, 1974, 2 (2): 147 - 158.
- [5] Rose ma A. Result of the group agromet monitoring project[J]. ESA Journal, 1986, (10): 17 - 41.
- [6] Price J C. The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer surface soil moisture and evaporation[J]. Water Resources Research, 1980, 16(4): 787 - 795.
- [7] Price J C. On the use of satellite data to infer surface fluxes at meteorological scales[J]. Journal of Application Meteorology, 1982, (21): 1111 - 1122.
- [8] Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: The limited utility of apparent thermal inertia[J]. Remote Sensing of Environment, 1985, (18): 59 - 73.
- [9] 隋洪智, 田国良, 李建军, 等. 热惯量法监测土壤水分[A]. 田国良. 黄河流域典型地区遥感动态研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 122 - 131.
- [10] 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分中的研究[J]. 遥感学报, 1997, 1(1): 24 - 31.
- [11] 宇都宫阳二郎, 赵化昌, 华润葵, 等. 利用 NOAA 卫星遥感编制中国东北土壤水分分布图[J]. 遥感技术动态, 1990, (4): 27 - 30.
- [12] 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.
- [13] Jackson R D, Idso S B. Canopy temperature as a crop water stress indicator [J]. Water Resources Research, 1981, (17): 1133 - 1138.
- [14] 武晓波, 阎守邕, 田国良, 等. 在 GIS 支持下用 NOAA/AVHRR 数据进行旱情监测[J]. 遥感学报, 1998, 2(4): 280 - 283.
- [15] Tim R, Cicada, David L B, et al. The Current and Potential Operational Uses of Remote Sensing to Arid Decisions on Drought Exceptional Circumstance in Australia: a Review[J]. Agricultural Systems, 1998, 57(3): 399 - 468.
- [16] Salinas - Zavala C A, Doughlasb A V, Diaz H F. Interannual variability of NDVI in northwest Mexico. Associated climatic mechanisms and ecological implications[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, (82): 417 - 430.

- [17] 刘志明,张柏,晏明,等. 土壤水分与干旱遥感研究的进展与趋势[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 576 - 583.
- [18] 陈乾. 用植被指数监测干旱并估算冬麦产量[J]. 遥感技术与应用, 1994, 9(3): 12 - 18.
- [19] 晏明,刘志明. 用植被指数对 1997 年吉林省旱灾的监测[A]. 吉林省科学技术协会编. 吉林省青年学术年会论文集[C]. 长春: 吉林大学出版社, 1998.
- [20] 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(2): 106 - 112.
- [21] 居为民,孙涵,汤志成. 气象卫星遥感在干旱监测中的应用[J]. 灾害学, 1996, (4): 25 - 29.
- [22] 普布次仁. 归一化植被指数与降水量、土壤湿度的关系[J]. 气象, 1995, 21(12): 8 - 12.
- [23] 张军涛,李哲,郑度. 东北农牧交错区水分条件及其对植被分布的影响[J]. 地理科学, 2001, 21(4): 297 - 300.
- [24] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non - homogenous areas[J]. International of Remote Sensing, 1990, (11): 1045 - 1419.
- [25] 蔡斌,陆文杰,郑新江. 气象卫星条件植被指数监测土壤状况[J]. 国土资源遥感, 1995, (4): 45 - 50.
- [26] Uganda L S, Cogan F N. Drought monitoring and corn yield estimation in southern Africa from AVHRR data[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 63(3): 219 - 232.
- [27] 董超华. 气象卫星业务产品释用手册[M]. 北京: 气象出版社, 1999. 155 - 159.
- [28] Jackson R D, Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres[J]. Remote Sensing of Environment, 1983, (13): 187 - 208.
- [29] 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(2): 106 - 112.
- [30] LEI Ji *, Albert J, Peters. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices[J]. Remote sensing of Environment, 2003, (87): 85 - 98.
- [31] 王鹏新,龚健雅,李小文. 条件温度植被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.
- [32] 王鹏新, WAN Zheng - ming, 龚健雅, 等. 基于植被指数和地表温度的干旱监测模型[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 527 - 533.
- [33] 蔡斌,陆文杰,郑新江. 气象卫星条件植被指数监测土壤状况[J]. 国土资源遥感, 1995, 7(4): 20 - 25.
- [34] Shutko A. Microwave radiometry of lands under natural and artificial moistening[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1982, (20): 18 - 26.
- [35] Ulaby F, Sarabandi K, Whitt M, et al. Michigan microwave canopy scattering mode[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(7): 1223 - 1253.
- [36] Ulaby F, Aslam A, Dobson C. Effect of vegetation cover on the radar sensitivity to soil moisture[J]. IEEE Transactiona on Geoscience and Remote Sensing, 1982, 20(4): 476 - 481.
- [37] 田国良,李长乐,杨习荣,等. 机载合成孔径雷达图像监测土壤水分的初步研究[A]. 田国良. 黄河流域典型地区遥感动态研究[C]. 北京: 科学出版社, 1990. 102 - 110.
- [38] 李杏朝. 微波遥感监测土壤水分的研究初探[J]. 遥感技术与应用, 1995, 10(4): 1 - 8.
- [39] Kustas W P, Zhan X, Schmugge T J. Combining Optical and Microwave Remote Sensing for mapping energy fluxes in a semiarid watershed[J]. REMOTE SENS ENVIRON, 1998, (64): 116 - 131.
- [40] Engman E T. Progress in microwave remote sensing of soil moisture, Canadian[J]. Journal of Remote sensing, 1990, 16(3): 6 - 14.

Some Research Advances and Methods on Drought Monitoring By Remote Sensing

WANG Xiao - ping, GUO - Ni

(Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China)

Abstract: In this paper, some research advances on drought monitoring method by remote sensing are introduced. meanwhile, some views are pointed out and indicated that the drought monitoring should carry out a new way which combine many subjects in the future.

Key words: drought monitoring; method; advance