

# Progress on Agricultural Drought Monitoring by Remote Sensing\*

Fuqiang Wang<sup>1</sup>, Fenglin Huo<sup>2</sup>, Gongjin Zhang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>North China University of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou

<sup>2</sup>Beijing Municipal People's Government Office of Flood Control and Drought Relief Headquarters, Beijing

Email: fortunewang@163.com

Received: Apr. 19<sup>th</sup>, 2013; revised: May 2<sup>nd</sup>, 2013; accepted: May 14<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Fuqiang Wang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** Compared with the traditional agricultural drought monitoring method, remote sensing monitoring soil moisture has irreplaceable advantages. Based on the bare ground, the part of the vegetation and the vegetation cover the surface, this paper reviewed the method, scope, advantages and disadvantages on different underlying surface of remote sensing monitoring on agriculture drought, introduced the future development direction and application of agricultural drought remote sensing monitoring, and analyzed the present situation and development prospect of remote sensing monitoring soil moisture in our country.

**Keywords:** Agricultural Drought; Remote Sensing Monitoring; Soil Moisture; Research Progress

## 我国农业干旱遥感监测方法研究进展\*

王富强<sup>1</sup>, 霍风霖<sup>2</sup>, 张功瑾<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华北水利水电学院, 郑州

<sup>2</sup>北京市人民政府防汛抗旱指挥部办公室, 北京

Email: fortunewang@163.com

收稿日期: 2013年4月19日; 修回日期: 2013年5月2日; 录用日期: 2013年5月14日

**摘要:** 相对于传统的农业干旱监测手段, 遥感技术监测土壤水分的方法在农业干旱监测中有着不可替代的优势。基于裸露地表、部分覆盖度地表和全植被覆盖地表3种不同下垫面类型, 评述了不同下垫面下农业干旱遥感监测方法的研究进展、适用范围和其优缺点, 提出了未来农业干旱遥感监测的发展方向和应用前景, 并对我国土壤水分遥感监测现状和发展前景进行了展望。

**关键词:** 农业干旱; 遥感监测; 土壤水分; 研究进展

### 1. 引言

频繁的干旱已成为世界范围内最为严重的气候灾害之一, 它严重的影响着农业布局和农田产量进而直接阻碍了社会经济的可持续发展, 对农业经济

和农民生活造成了严重影响。农业干旱是多种因素共同作用的结果, 水文条件、气象条件、农作物布局、作物品种及生长状况、耕作制度及耕作水平都可对农业干旱的发生与发展起到重要影响<sup>[1]</sup>, 因此对农业干旱的实时动态监测势在必行。随着农业干旱预测、评价工作的不断发展和完善, 农业干旱监测方法也有了较大的发展, 相对于传统农业干旱监测手段, 遥感监测方法具有范围广、宏观、动态监测的优势。但对于

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(51009065)、国家科技支撑计划项目(2012BAC19B03)和河南省重点科技攻关计划项目(112102110033)资助。

作者简介: 王富强(1979-), 男, 河南济源人, 博士, 副教授, 主要从事洪涝、干旱及减灾等方面研究。

不同下垫面类型, 农业干旱遥感监测方法也不同, 一般可分为基于裸露地表、部分覆盖度地表和全植被覆盖地表3种监测方法。

## 2. 基于裸露地表的遥感监测

### 2.1. 热惯量法

热惯量是物质对温度变化热反应的一种量度, 反映的是物质与周围环境能量交换的能力。水的热惯量比土壤高, 因此含水量较高的土壤昼夜温差较小。1971年 Watson<sup>[2]</sup>最早应用了基于热惯量法的模型。1975年 Price<sup>[3]</sup>、Kahle A.B.<sup>[4]</sup>根据热量平衡和热传导理论, 改进了土壤热惯量模式, 将感热通量( $H$ )、潜热通量( $E$ )以及地表热通量( $G$ )综合为地表辐射能量。1985年 Price<sup>[5]</sup>根据能量平衡理论, 引入了一个关于相对湿度、温度及土壤辐射率函数的地表综合参量  $\beta$ , 进而提出了表观热惯量法(ATI), 如公式(1)所示:

$$ATI = \frac{2Q \cdot (1-A)}{T_{\text{日}} - T_{\text{夜}}} \quad (1)$$

其中, ATI 为土壤表观热惯量,  $T_{\text{日}}$  为昼最高温度,  $T_{\text{夜}}$  为夜最低温度,  $A$  为全波段反照率,  $Q$  为常数, 那么  $Q(1-A)$  表示地面所吸收的太阳净辐射。

热惯量法对于植被覆盖率比较高的地区会导致其误差较大<sup>[6]</sup>, 该方法适合干旱、半干旱的裸土或低覆盖率地区的旱情监测<sup>[7]</sup>。近些年热惯量法研究常用表观热惯量代替热惯量进行研究, 研究重点一般包括热惯量模式的解析表达式、温度植被指数法以及热惯量与土壤水分的统计模型等。从上世纪 90 年代初开始, 我国在热惯量模型的理论 and 试验研究方面取得了较大的进展, 如表 1 所示。

### 2.2. 微波遥感法

微波遥感法克服了传统测量方法测点少、耗时耗力、光学遥感精度低和受天气状况限制等缺点, 具备全天时、全天候并有一定穿透能力的优势, 因此运用微波遥感进行土壤湿度监测逐渐成为土壤湿度监测的热门方法之一<sup>[20]</sup>。2000年 Koike 等<sup>[21]</sup>首次提出了土壤湿度指数(ISW)的概念。Moereman 等<sup>[22]</sup>利用卫星雷达监测田间和区域两个不同空间尺度的土壤含水量, 分析了裸地或植被稀疏地区的近地表土壤含水量与后向散射系数的相关性。2001年 Bindlish<sup>[23]</sup>在积分模型基础上提高了实测土壤水分与遥感获取数据的相关系数。目前在裸土条件下微波遥感测定土壤表层的土壤含水量已有较高精度, 主要的研究重在是如何考

Table 1. The advances of thermal inertia in our country  
表 1. 我国热惯量模型研究进展

时间	研究人员	主要研究结论
1984	朱永豪等 <sup>[8]</sup>	提出土壤光谱反射特性与土壤含水量的关系特性并非只是线性关系, 为热惯量模式的进一步修正提供了依据。
1987	刘兴文等 <sup>[9]</sup>	建立了“真实热惯量”与日夜温差、地表反照率之间的二元三次回归模型, 并对河南地区进行了应用性实验研究, 将热惯量模型的应用领域扩展到了大范围的旱涝监测中。
1990	马蕊乃等 <sup>[10]</sup>	根据表观热惯量用 NOAA/AVHRR 数据应用复合的指数模型推导出真实热惯量, 并利用热惯量与土壤含水量的关系计算出裸土的土壤含水量。
1994	肖乾广等 <sup>[11]</sup>	从土壤的热性质出发, 在求解热传导方程的基础上引入了“遥感土壤水分最大信息层”概念, 建立了多时相的综合土壤湿度统计模型。
1997	余涛等 <sup>[12]</sup>	对热惯量模型中的热惯量值、地表综合参量以及地表温差之间的关系进行了简化。
1998	张晓煜 <sup>[13]</sup>	引入了植被覆盖和土壤类型信息进而对热惯量遥感监测线性模型进行了订正。
1998	陈怀亮等 <sup>[14]</sup>	应用 GIS 建立了不同土壤质地条件下的热惯量模型, 并引入了地形参数 $F$ 和 $R$ 来描述风场对地面热通量的影响。
2002	张仁华等 <sup>[16]</sup>	以微分热惯量为基础建立了地表蒸发全遥感信息模型, 通过净辐射通量和表观热惯量对土壤热通量的参数进行比较, 实现了以全遥感信息反演裸地蒸发(潜热)的目标。
2005	刘振华等 <sup>[17]</sup>	将显热通量和潜热通量引进了热传导方程的边界条件, 并考虑了植被因素的影响, 改进了热惯量模型提出了双层模型, 使得可以监测有植被覆盖地区的干旱状况。
2008	张霄羽等 <sup>[18]</sup>	提出了利用 MSG 的 SEVIRI 传感器数据估算裸土区热惯量及地表热通量的方法。并用此方法分别计算了固定时间段及变化时间段的热惯量并结合地表温度的余弦周期函数估算了地表热通量。
2011	杨树聪等 <sup>[19]</sup>	提出了一个改进的表观热惯量模型, 并通过地面验证试验了对该模型的适用性进行了分析。得出了 NDVI 为 0.35 可以作为热惯量法监测土壤水分状况是否可行的判断条件的结论。

考虑植被影响以及如何估算土壤剖面含水量的问题,即微波遥感监测干旱状况比较适用于裸地地表,对植被覆盖度高的下垫面应须另作处理。国内也积极展开了微波遥感监测技术的理论和试验研究,其进展如表2所示。

### 3. 基于全植被覆盖的遥感监测

#### 3.1. 距平植被指数(AVI)及标准植被指数(SVI)

距平植被指数(AVI)及标准植被指数(SVI)的原理都是通过当年该时刻该地区的植被指数与多年平均值的差异来判断当年作物长势,进而判断出作物受旱程度。标准植被指数是对距平植被指数进一步延伸,通过研究区每个研究像元Z值

$(Z_i = (I_{NDVi} - \overline{I_{NDV}}) / \sigma_i)$ ,  $Z_i$ 表示某个时期的Z值,  $\sigma_i$ 表示多年NDVI的标准差<sup>[28]</sup>。即该时期该地区的植被指数( $I_{NDVi}$ )相对于多年平均值( $\overline{I_{NDV}}$ )的偏离度的归一化数值。但无论是距平植被指数还是标准植被指数都只是对区域植被情况的定性分析,不能够建立和干旱无关的定量分析,而且计算大尺度的干旱监测需要大量的样本,因此其只适用于小尺度或小范围干旱监测的定性分析。

#### 3.2. 植被状态指数(VCI)

鉴于距平植被指数、标准植被指数等方法需要足够的样本,数据收集困难,且不能对干旱监测做出定量分析,1990年Kogan<sup>[29]</sup>在此基础上改进性的建立了植被状态指数(VCI)算法,如公式(2)所示:

$$I_{VC} = \frac{I_{NDVi} - I_{NDV\min}}{I_{NDV\max} - I_{NDV\min}} \times 100 \quad (2)$$

其中  $I_{VC}$  为植被状态指数,  $I_{NDV\min}$  和  $I_{NDV\max}$  为最小、最大NDVI值。

植被状态指数能够定量的反映出植被的空间变化特征,尤其针对构造复杂的地形更为有效,可有效定量地监测区域干旱的时空变化。但是由于地表覆盖类型的年际变化会影响干旱监测的准确性,以及最大和最小NDVI值的确定比较困难,需要长时间的连续数据,因而只能适用于植被生长的中后期,播种和成熟期不适合用此方法确定地表旱情。

#### 3.3. 作物缺水指数(CWSI)及水分亏缺指数法(WDI)

在能量平衡理论的基础上, Jackson<sup>[30]</sup>等最早定义了作物缺水指数(CWSI),定义如下:

$$CWSI = 1 - \frac{ET}{ET_p} \quad (3)$$

式中,  $ET$  为实际蒸散,  $ET_p$  为潜在蒸散。

作物缺水指数法具有物理意义明确、精度高、可靠性强的优点,但因涉及到的参数较多,计算量大,实现起来比较困难;同时由于遥感反演地表参数的精度目前还很难达到模型量化计算的要求,这在一定程度上限制了该模型的推广应用。Moran等<sup>[31]</sup>分析了作物缺水指数中的理论参数与植被覆盖度的近线性关系,对作物缺水指数进一步研究建立了在一定植被覆盖度下的水分亏缺指数(WDI),定义为:

$$WDI = (\Delta T - \Delta T_{AC}) / (\Delta T_{BD} - \Delta T_{AC}) \quad (4)$$

式中:  $\Delta T$  某一植被覆盖度下地表与空气的温差;  $\Delta T_{BD}$  湿边上的地表与空气的温差;  $\Delta T_{AC}$  干边上的地表与空气的温差。

Table 2. The advances of microwave remote sensing in our country  
表2. 我国微波遥感监测干旱技术研究进展

时间	研究人员	微波遥感监测方法研究进展
2002	李震等 <sup>[24]</sup>	通过半经验公式计算体散射项,综合时间序列的微波数据来消除植被覆盖影响,提出了一种综合主动和被动微波数据的土壤水分变化监测方法。
2002	施建成等 <sup>[25]</sup>	利用协方差矩阵将极化雷达后向散射测量值分解为单向散射、双向散射和交叉极化散射3个分量,据此建立一阶物理离散散射模型,推求出了土壤水分估算的方法。
2004	张钟军等 <sup>[26]</sup>	提出了一种基于辐射传输理论的离散模型,分析了组成植被的散射个体对植被的发射率、传输率的影响,准确地描述植被对下垫面的影响。
2011	郭英等 <sup>[27]</sup>	将被动微波与主动微波相联系,利用简单散射模型(SSM)和几何光学模型(GOM),建立了主被动微波遥感相结合的土壤水分变化反演算法。

### 3.4. 植被供水指数法(VSWI)

植被供水指数是以地表温度和植被指数为监测指标的一种综合监测干旱的方法。其原理是当植物供水不足导致作物由于缺水死亡时, 归一化植被指数会急剧下降而叶表面温度迅速升高。其定义如公式(5)所示:

$$VSWI = NDVI/T_s \quad (5)$$

式中: VSWI——植被供水指数; NDVI——植被指数;  $T_s$ ——植被冠层温度(以反演的地表温度近似为植被的冠层温度)。

植被供水指数法(VSWI)由于在大尺度或大范围的干旱监测中会受到土壤物理特性、植被生理特性(如土壤含水量的滞后效应、植被气孔的闭合、植被种类等)、以及光照强度等因素的影响<sup>[32,33]</sup>, 因而不适合用于大范围的干旱客观评价。但是其利用作物缺水时在不同反射波段上的反应, 在植被覆盖率比较高的地域上尤其是在作物生长期更为适用<sup>[34]</sup>, 且操作简单, 资料容易获取, 因而在我国得到了较为广泛的应用, 如表3所示。

## 4. 基于部分植被覆盖的遥感监测

### 4.1. 条件植被温度指数法(VTCI)

条件植被温度指数在理论上综合了植被指数(NDVI)和地表温度(LST)的空间特性, 既考虑了区域内NDVI的变化, 又强调了NDVI值相同时LST的变化。即VTCI值越小, 干旱程度越严重; 反之, 干旱程度越轻或没有旱情发生。其定义为:

$$VTCI = \frac{[LST_{max}(NDVI) - LST(NDVI)]}{[LST_{max}(NDVI) - LST_{min}(NDVI)]}$$

$$LST_{max}(NDVI) = a_1 + b_1 NDVI \quad (6)$$

$$LST_{min}(NDVI) = a_2 + b_2 NDVI$$

式中:  $LST_{max}(NDVI)$ ,  $LST_{min}(NDVI)$ ——表示当NDVI等于某一确定值时研究区域内地表温度的最大值和最小值;  $LST(NDVI)$ ——表示NDVI等于这一确定值时的当前地表温度;  $a_1, b_1, a_2, b_2$ ——待定系数, 可以通过绘制研究区域的NDVI和LST的散点图近似获得。

条件植被温度指数法解决了在干旱发生时时空变异参数的稳定性问题, 尤其适合对区域级的干旱监测。在我国得到了广泛应用, 如王鹏新<sup>[40]</sup>等利用NOAA-AVHRR数据监测了陕西省关中平原地区的相对干旱程度, 分析了该地区干旱程度的空间变化特征; 孙威等<sup>[41]</sup>重点研究了归一化植被指数和地表温度特征空间中冷、热边界的确定方法, 并验证了该方法进行干旱监测的可行性。

### 4.2. 温度植被指数法(TVDI)

Goetz<sup>[42]</sup>、Carlson<sup>[43]</sup>等研究发现通过单一参数(地表温度或植被指数)进行干旱监测会造成水分胁迫反映不够敏感而不能有效监测土壤湿度。Lambin等<sup>[44]</sup>研究发现地表温度与植被指数呈显著的负相关性, 在干旱监测中结合使用既可消除土壤的影响, 又可消除植被指数只有在水分胁迫严重受阻不利于作物生长时才会变化的滞后性。在此基础上, Sandholt等<sup>[45]</sup>提

Table 3. The advances of vegetation supply water index in our country  
表3. 我国植被供水指数法应用于干旱监测研究进展

时间	研究人员	基于植被供水指数法的干旱监测研究进展
1999	刘丽等 <sup>[35]</sup>	通过植被供水指数建立了计算地面干旱指数的回归方程并确定了贵州省的干旱面积和干旱指标。
2006	邓玉娇等 <sup>[36]</sup>	通过分析不同土地利用类型对干旱分类信息进行了提取并对广东省干旱灾害进行了监测。
2006	肖国杰等 <sup>[37]</sup>	进一步运用遥感卫星对干旱进行监测, 较好的监测了辽西地区生长季的干旱动态。
2008	杨丽萍等 <sup>[38]</sup>	对内蒙古地区高植被覆盖的生长季进行了大范围的干旱监测。
2009	赵伟等 <sup>[39]</sup>	对重庆市特大干旱时期的土壤相对含水量进行监测并绘制了时空分布图, 对干旱发生的时空变化特征进行了有效的分析

Table 4. The advances of temperature-vegetation index in our country  
表 4. 我国温度植被指数法应用于干旱监测的研究进展

时间	研究人员	温度植被指数法的研究进展
2004	姚春生等 <sup>[46]</sup>	反演了新疆地表土壤湿度, 定量分析了温度植被指数与土壤湿度的关系并验证了其呈显著相关。
2006	李红军等 <sup>[47]</sup>	对影响 TVDI 旱情指数的地表能量平衡因素进行研究, 提出了温度蒸散旱情指数法(TEDI), 并推导出了 TEDI 旱情指数。
2007	陈艳华等 <sup>[48]</sup>	考虑到植被类型对土壤湿度反演精度的影响, 采用了修正的土壤调整植被指数(MSAVI), 比较研究了植被类型对 TVDI 提取结果的影响。
2009	杨曦等 <sup>[49]</sup>	运用增强型植被指数(EVI)代替归一化植被指数(NDVI)与地表温度构建 Ts/EVI 特征空间来提高 TVDI 与土壤湿度的相关性, 改进了计算特征空间的干湿边的方法, 对于反映土壤湿度的时空差异起到很好的效果。
2009	张学艺等 <sup>[50]</sup>	改进了温度植被指数并对宁夏地区的作物干旱进行了遥感监测并将监测精度提高至了 90% 左右。
2011	聂建亮等 <sup>[51]</sup>	结合温度降尺度方法和温度反演方法解决了通过卫星遥感技术来监测地表温度存在着空间分辨率和时间分辨率上的矛盾。

出了温度植被干旱指数, 其定义为:

$$\begin{aligned} \text{TVDI} &= \frac{[T_s - T_s(\min)]}{[T_s(\max) - T_s(\min)]} \\ T_s(\min) &= a_1 + b_1 \text{NDVI} \\ T_s(\max) &= a_2 + b_2 \text{NDVI} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: TVDI——温度植被指数;  $T_s$ ——任意像元的地表温度;  $T_s(\min)$  和  $T_s(\max)$ ——地表最低和最高温度,  $T_s(\min)$  和  $T_s(\max)$  可以通过线性回归分析提取湿边和干边获取;  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ——待定系数。由于在特征空间干湿边的确定方面缺乏对降水量、蒸散作用等对监测结果影响的判别标准, 会影响到线性拟合干湿边的精度。我国目前通过对 TVDI 的研究已经取得了较好的效果, 在干旱监测中得到了广泛的应用, 如表 4 所示。

## 5. 结论与展望

1) 裸露地表下的干旱监测, 应加强主、被动微波遥感的综合利用, 进一步研究有植被影响情形下如何估算土壤剖面含水量的问题。

2) 全植被覆盖地表下的干旱监测, 由于单层模型前提下的热力学机制不明确, 完全植被覆盖度的界定不清楚, 不适合全生育期的监测, 有一定的局限性。一般采用植被状态指数(VCI)、水分亏缺指数法(WDI)及植被供水指数法(VSWI)等广义的、适合于植物各时期的模型方法。

3) 对于部分植被覆盖地表的干旱监测一般采用综合指数评价, 如条件植被温度指数法(VTCI)、温度植被指数法(TVDI)等双层模型, 但一般涉及过多的非遥感参数如气象要素、叶面指数等, 未来应将研究方

向重点放在模型的简化上。

4) 干旱现象涉及多方面影响因素, 应加强对新型遥感数据源在干旱监测中的应用研究以及土壤水分的微波遥感反演技术研究, 进而建立一个有效的干旱遥感监测与预报系统。

## 参考文献 (References)

- [1] 王蜜侠, 马成军, 蔡焕杰. 农业干旱指标研究与进展[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(3): 119-124.  
WANG Mixia, MA Chengjun and CAI Huanjie. Research progress in agriculture drought index. Agriculture Research in the Arid Areas, 1998, 16(3): 119-124. (in Chinese)
- [2] WATSON, K., ROWNEN, L. C. and OFFICELD, T. W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images. Remote Sensing of Environment, 1971, 3: 2017-2041.
- [3] PRICE, J. C. Thermal inertia mapping: A new view of the earth. Journal of Geophysical Research, 1977, 82(18): 25.
- [4] KAHLE, A. B. A simple thermal model of the earth's surface for geologic mapping by remote sensing. Journal of Geophysical Research, 1977, 82(11): 1673.
- [5] PRICE J. C. On the analysis of thermal infrared imagery: The limited utility of apparent thermal inertia. Remote Sensing of Environment, 1985, 18(1): 59.
- [6] 孙丽, 陈焕伟, 赵立军, 等. 遥感监测旱情的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 202-206.  
SUN Li, CHEN Huanwei, ZHAO Lijun, et al. The advances of drought monitoring by remote sensing. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23 (1): 202-206. (in Chinese)
- [7] 路京选, 曲伟, 付俊娥. 国内外干旱遥感监测技术发展动态综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, 7(2): 265-270.  
LU Jingxuan, QU Wei and FU Jun'e. Review on drought monitoring using remote sensing. Journal of China Institute of Water Resource and Hydropower Research, 2009, 7(2): 265-270. (in Chinese)
- [8] 朱永豪, 邓仁达, 卢亚非, 等. 不同湿度条件下黄棕壤光谱反射率的变化特征及其遥感意义[J]. 土壤学报, 1984, 21(2): 194.  
ZHU Yonghao, DENG Renda, LU Yafei, et al. Varying characteristics of spectral reflectivity in different humidities of yellow-brown earth and its significance in remote sensing. Acta Pedologica Sinica, 1984, 21(2): 194. (in Chinese)
- [9] 刘兴文, 冯勇进. 应用热惯量编制土壤水分图及土壤水分探测效果[J]. 土壤学报, 1987, 24(3): 272-273.

- LIU Xingwen, FENG Yongjin. Compilation of soil moisture map by means of soil thermal inertia image. *Acta Pedologica Sinica*, 1987, 24(3): 272-273. (in Chinese)
- [10] 马蔼乃, 薛勇. 黄河流域典型地区遥感动态研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 133-139.  
MA Ainai, XUE Yong. Dynamic study of remote sensing in the typical area of the Yellow River basin. Beijing: Science Press, 1990: 133-139 (in Chinese)
- [11] 肖乾广, 陈维英, 盛永伟, 等. 用气象卫星监测土壤水分的试验研究[J]. 应用气象学报, 1994, 5(3): 312-317.  
XIAO Qianguang, CHEN Weiyang, SHENG Yongwei, et al. A study on soil moisture monitoring using NOAA satellite. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1994, 5(3): 312-317. (in Chinese)
- [12] 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究[J]. 遥感学报, 1997, 1(1): 24-32.  
YU Tao, TIAN Guoliang. The application of thermal inertia method to the monitoring of soil moisture of North China Plain based on NOAA-AVHRR data. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(1): 24-32. (in Chinese)
- [13] 张晓煜. 宁夏土壤湿度遥感监测热惯量模型的建立[J]. 宁夏农林科技, 1998, 3: 17-19.  
ZHANG Xiaoyu. The establishment of thermal inertia model of soil humidity monitoring by remote sensing in Ningxia. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 1998, 3: 17-19. (in Chinese)
- [14] 陈怀亮, 陈艳霞. GIS支持下的冬小麦干旱 NOAA/AVHRR 遥感监测方法研究[J]. 河南气象, 1998, 4: 23-25.  
CHEN Huailiang, CHEN Yanxia. The study of drought NOAA/AVHRR monitoring by remote sensing of GIS based winter wheat. *Meteorology Journal of Henan*, 1998, 4: 23-25. (in Chinese)
- [15] 刘良明, 李德仁. 基于辅助数据的遥感干旱分析[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 4: 300-305.  
LIU Liangming, LI Deren. Drought analysis based on remote sensing and ancillary data. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1999, 4: 300-305. (in Chinese)
- [16] 张仁华, 孙晓敏. 以微分热惯量为基础的地表蒸发全遥感信息模型及在甘肃沙坡头地区的验证[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(12): 1041-1050.  
ZHANG Renhua, SUN Xiaomin. Surface evaporation model of remote sensing information based on the differential thermal inertia and proved in the Shapotou area of Gansu. *Science in China*, 2002, 32(12): 1041-1050. (in Chinese)
- [17] 刘振华, 赵英时. 一种改进的遥感热惯量模型初探[J]. 中国科学院研究生院学报, 2005, 3: 380-385.  
LIU Zhenhua, ZHAO Yingshi. An improved thermal inertia model. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Science*, 2005, 3: 380-385. (in Chinese)
- [18] 张霄羽, 赵长森. 利用 MSG 数据估算裸土热惯量及地表热通量[J]. 自然资源学报, 2008, 6: 1078-1087.  
ZHANG Xiaoyu, ZHAO Changsen. Estimation of thermal inertia and ground heat flux for bare soil from MSG-SEVIRI data. *Journal of Natural Resources*, 2008, 6: 1078-1087. (in Chinese)
- [19] 杨树聪, 沈彦俊, 郭英, 等. 基于表观热惯量的土壤水分监测[J]. 中国生态农业学报, 2011, 5: 1157-1161.  
YANG Shucong, SHEN Yanjun, GUO Ying, et al. Monitoring soil moisture by apparent thermal inertia method. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 5: 1157-1161. (in Chinese)
- [20] 袁文平, 周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 982-991.  
YUAN Wenping, ZHOU Guangsheng. The theoretical study and research prospect on drought indices. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(6): 982-991. (in Chinese)
- [21] KOIKE, T., FUJII, H., OHTA, T. and TOGASHI, E. Development and validation of TMI algorithms for soil moisture and snow. *Remote Sensing & Hydrology 2000, Proceedings of the 2011 Santa Fe Bone symposium, Santa Fe, April 2000: 390-393.*
- [22] MOEREMANS, B., DAUTREBANDE, S. Soil moisture evaluation by means of multi-temporal ERSSAR PRI images and interferometric coherence. *Journal of Hydrology*, 2000, 234(3-4): 162-169.
- [23] BINDLISH, R. Parameterization of vegetation backscatter in radar-based, soil moisture estimation. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(1): 130-137.
- [24] 李震, 郭华东, 施建成. 综合主动和被动微波数据监测土壤水分变化[J]. 遥感学报, 2002, 6(6): 481-484.  
LI Zhen, GUO Huadong and SHI Jiancheng. Measuring the change of soil moisture with vegetation cover integration passive and active data. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(6): 481-484. (in Chinese)
- [25] 施建成, 李震, 李新武, 等. 目标分解技术在植被覆盖条件下土壤水分计算中的应用[J]. 遥感学报, 2002, 6(6): 412-413.  
SHI Jiancheng, LI Zhen, LI Xinwu, et al. Evaluate usage of decomposition technique in estimation of soil moisture with vegetated surface by multi-temporal measurements data. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(6): 412-413. (in Chinese)
- [26] 张钟军, 孙国清, 朱启疆. 植被层对被动微波遥感土壤水分反演影响的研究[J]. 遥感学报, 2004, 8(3): 207-213.  
ZHANG Zhongjun, SUN Guoqing and ZHU Qijiang. The study of vegetation effect on passive microwave soil moisture retrieval. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(3): 207-213. (in Chinese)
- [27] 郭英, 沈彦俊, 赵超. 主被动微波遥感在农区土壤水分监测中的应用初探[J]. 中国生态农业学报, 2011, 5: 1162-1167.  
GUO Ying, SHEN Yanjun and ZHAO Chao. Soil moisture monitoring in agriculture lands via active-passive microwave remote sensing. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 5: 1162-1167. (in Chinese)
- [28] 江东, 付晶莹, 庄大方, 等. 2008-2009 年中国北方干旱遥感动态监测[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(3): 92-101.  
JIANG Dong, FU Jingying, ZHUANG Dafang, et al. Dynamic drought-remote sensing monitoring in north China from 2008 to 2009. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(3): 92-101. (in Chinese)
- [29] KOGAN, F. N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(8): 1405-1419.
- [30] JACKSON, R. D., KUSTAS, W. P., et al. A reexamination of the crop water stress index. *Irrigation Science*, 1988, 9(4): 309-317.
- [31] 齐述华. 利用 NDVI 时间序列数据分析植被长势对气候因子的响应[J]. 地理科学进展, 2004, 3: 91-99.  
QI Shuhua. SVI and VCI based on NDVI time-series dataset used to monitor vegetation growth status and its response to climate variables. *Progress in Geography*, 2004, 3: 91-99. (in Chinese)
- [32] 郭虎, 王瑛, 王芳. 旱灾灾情监测中的遥感应用综述[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(1): 111-116.  
GUO Hu, WANG Ying and WANG Fang. Overview of remote sensing approaches to drought monitoring. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(1): 111-116. (in Chinese)
- [33] 肖斌, 沙晋明. 基于 MODIS 数据的水热指数及其 DEM 订正[J]. 遥感信息, 2007, 5: 35-38.  
XIAO Bin, SHA Jinming. The moisture and temperature index and its DEM correction based on MODIS data. *Remote Sensing Information*, 2007, 5: 35-38. (in Chinese)
- [34] MORON, M. S., CLARKE, T. R., INOUE, Y., et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49(3): 246-263.
- [35] 刘丽, 刘清, 周颖. 卫星遥感信息在贵州干旱监测中的应用[J]. 中国农业气象, 1999, 20(3): 43-47.  
LIU Li, LIU Qing and ZHOU Ying. The application of satellite remote sensing information for drought monitoring in Guizhou. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1999, 20(3): 43-47. (in Chinese)
- [36] 邓玉娇, 肖乾广, 黄江. 2004 年广东省干旱灾害遥感监测应

- 用研究[J]. 热带气象学报, 2006, 22(3): 37-240.  
DENG Yujiao, XIAO Qianguang and HUANG Jiang. Application study on drought remote sensing monitoring in Guangdong Province, 2004. Journal of Tropical Meteorology, 2006, 22(3): 237-240. (in Chinese)
- [37] 肖国杰, 李国春, 赵丽华, 等. 植被供水指数法在辽西干旱监测中的应用[J]. 农业网络信息, 2006, 4: 106.  
XIAO Guojie, LI Guochun, ZHAO Lihua, et al. Application of vegetation supply water index to monitoring of drought in the west of Liaoxi. Agriculture Network Information, 2006, 4: 106. (in Chinese)
- [38] 杨丽萍, 杨晓华, 张存厚. 植被供水指数法在内蒙古干旱监测中的应用[J]. 内蒙古农业科技, 2008, 1: 58-59.  
YANG Liping, YANG Xiaohua and ZHANG Cunhou. Application of the method for vegetation supply water index to monitor drought condition in Inner Mongolian. Inner Mongolia Agriculture Science and Technology, 2008, 1: 58-59. (in Chinese)
- [39] 赵伟. 基于 VSWI 的重庆市农业干旱评价研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(23): 11070-11072.  
ZHAO Wei. Research on agriculture drought evaluation in Chongqing based on VSWI. Journal of Anhui Agriculture Science, 2009, 37(23): 11070-11072. (in Chinese)
- [40] 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, 2001, 26(5): 412-418.  
WANG Pengxin, GONG Jianya and LI Xiaowen. Vegetation-temperature condition index and its application for drought monitoring. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(5): 412-418. (in Chinese)
- [41] 孙威, 王鹏新, 韩丽娟, 等. 条件植被温度指数干旱监测方法的完善[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 22-26.  
SUN Wei, WANG Pengxin, HAN Lijuan, et al. Further improvement of the approach to monitoring drought using vegetation and temperature condition indexes from multi-years' remotely sensed data. Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2006, 22(2): 22-26. (in Chinese)
- [42] GOETZ, S. J. Mutisensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(1): 71-94.
- [43] CARLSON, T. N., GILLIES, R. R. and PERRY, E. M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. Remote Sensing Reviews, 1994, 9(1): 161-173.
- [44] LAMBIN, E. F., EHRLICH, D. The surface temperature vegetation index for land cover and land cover change analysis. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(3): 463-487.
- [45] SANDHOL, T. I., RASMUSSEN, K. and ANDERSEN, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. Remote Sensing of Environment, 2002, 79: 213-224.
- [46] 姚春生, 张增祥, 汪潇. 使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度[J]. 遥感技术与应用, 2004, 9(6): 473-478.  
YAO Chunsheng, ZHANG Zengxiang and WANG Xiao. Evaluation soil monitoring status in Xin Jiang using the temperature vegetation dryness index (TVDI). Remote Sensing Technology and Application, 2004, 9(6): 473-478. (in Chinese)
- [47] 李红军, 郑力, 雷玉平, 等. 植被指数-地表温度特征空间研究及其在旱情监测中的应用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 170-174.  
LI Hongjun, ZHENG Li, LEI Yuping, et al. Vegetation index-surface temperature feature space and its application in the regional drought monitoring. Transaction of the CSAE, 2006, 22(11): 170-174. (in Chinese)
- [48] 陈艳华, 张万昌. 植被类型对温度植被干旱指数(TVDI)的影响研究: 以黑河绿洲区为例[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(6): 700-706.  
CHEN Yanhua, ZHANG Wanchang. Evaluating effects of vegetation types on temperature vegetation drought index (TVDI) in the Heihe oasis region. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(6): 700-706. (in Chinese)
- [49] 杨曦, 武建军, 闫峰, 等. 基于地表温度植被指数特征空间的区域土壤干湿状况[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1205-1216.  
YANG Xi, WU Jianjun, YAN Feng, et al. A review of retrieving of land surface parameters using the land surface temperature-vegetation index feature space. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1205-1216. (in Chinese)
- [50] 张学艺, 李剑萍, 秦其明, 等. 几种干旱监测模型在宁夏的对比应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 18-23.  
ZHANG Xueyi, LI Jianping, QIN Qiming, et al. Comparison and application of several drought monitoring models in Ningxia, China. Transaction of the CSAE, 2009, 25(8): 18-23. (in Chinese)
- [51] 聂建亮, 武建军, 杨曦, 等. 基于地表温度-植被指数关系的地表温度降尺度方法研究[J]. 生态学报, 2011, 17: 4961-4969.  
NIE Jianliang, WU Jianjun, YANG Xi, et al. Downscaling land surface temperature based on relationship between surface temperature and vegetation index. Acta Ecologica Sinica, 2011, 17: 4961-4969. (in Chinese)