

基于地表温度和植被指数特征空间的农业 干旱遥感监测方法研究综述

赵广敏, 李晓燕, 李宝毅

(吉林大学 地球科学学院, 长春 130010)

摘 要: 遥感技术以其便捷、反映迅速、大范围监测等优点在农业旱情监测中得到广泛使用。通过遥感资料反演的地表温度(T_s)和植被指数(NDVI)不仅可以表征绿色植被的生理和生长状况,还能揭示植被土壤水分信息,反映作物受旱状况,但两者单独使用时存在缺陷。而基于地表温度和植被指数特征空间的干旱监测方法有利于统一定量标准来判别植被干旱情况,同时还解决了植物在受水分胁迫时短期内仍能保持原有绿色的时间滞后的问题,提高了旱情监测的准确度和实用性。该文以地表温度和植被指数特征空间干旱监测方法为基础,较为详细地阐述了各个方法的基本原理和适用范围,并结合实例归纳总结了与之相关的四种方法的优、缺点,进一步探讨了今后研究的重点。

关键词: 地表温度; 植被指数; 干旱监测; 遥感

中图分类号: P426.616; T P79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)05-0245-06

An Overview on Agricultural Drought Monitoring Methods Based on Land Surface Temperature and Vegetation Index Feature Space

ZH AO Guang min, LI Xiao-yan, LI Bao-yi

(College of Earth Sciences of Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: Remote sensing technology used in agriculture drought sensing frequently for advantage, quickly reaction, wide scope and so on. Both the land surface temperature(T_s) and the vegetation index(NDVI) derived from the data of remoting sensing can not only reveal information of physiology and growth of green vegetation, but also indicate information of soil water and display drought suffering content of green vegetation. Nevertheless, there still exists some limitations when only one of the two parameters is used. The two dimensional feature space based on T_s and NDVI is good at unifying rational standards of drought distinction, and effectively improve the problem that the green vegetation turns slowly in the water heat threat environment when drought occurs, the feature space also enhances the precision and the utility of agricultural drought monitoring. Based on the LST-NDVI approach, this paper makes a detailed description of the principle and serviceable range of the methods, and sums up the advantages and disadvantages in application of the 4 methods with examples. Some problems worthy of further attention in this field are also discussed.

Key words: surface temperature; vegetation index; drought sensing; remote sensing

农业干旱一般指由于作物体外环境因素(主要指土壤、大气等)改变引起的作物周围土壤供水不足,引起作物生长非正常的现象,且伴随着会造成减产或绝收等经济损失。由于它是给人类带来巨大破坏的自然灾害之一,所以对农业干旱监测的研究一直都是人类广泛关注的领域。传统的农业干旱监测方法是以土壤含水量与作物适宜含水量比较得到的土壤墒情

特征作为农业干旱指标,由于土壤墒情信息受到站点分布的影响,存在数据精准性低、随机性大和即时性差等弊端。单个土壤墒情站点资料虽可重复监测,但也只能代表本区域的研究成果,不利于更大范围的干旱研究工作。长期运行该监测模式不仅耗费大量的人力财力和物力,更无法满足干旱动态监测的要求,表现为监测数据带有明显的滞后性,不利于对农业干

收稿日期: 2010-06-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(40801208); 吉林大学博士后基金; 吉林大学基本业务经费项目

作者简介: 赵广敏(1984-),男,在读研究生,从事资源环境遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: zhaogm09@mails.jlu.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

旱的预防和监测。相对于传统的农业干旱监测方法,遥感技术具有空间宏观性、多分辨率(光谱和空间)、周期性和信息丰富等特点,能实现信息的快速收集和定量分析,大幅度减少野外工作量,提高工作效率,对于以点监测为基础的对地观测手段是非常大的提高^[1]。遥感的多光谱信息更为陆表过程的研究提供了各种空间尺度和时间尺度的植被指数(可见光、近红外)和地表温度(热红外)^[2]。现有研究表明,地表温度和植被指数在区域干旱遥感监测中与植被生理、生长联系密切,地表温度综合反映表层土壤含水量的变化,进而揭示植物覆盖量的潜力,其敏感的热反应能力更有助于及时发现干旱发生时地表温度的异常升高^[3-4]。植被指数与绿色植物的密度和活力关系密切,有利于植物数量和覆盖度的反映^[5-8]。但单独依据植被指数或地表温度监测干旱时存在缺陷,有必要将二者结合起来使用,所以基于地表温度和植被指数两项基本监测参数特征空间的监测方法成为目前研究的重点。

本文以地表温度和植被指数特征空间为基础,较详细的阐述了相关的 4 种干旱监测方法、基本原理以及适用范围,并总结各种方法的优缺点,进一步探讨今后研究的重点。

1 地表温度和植被指数的特征空间特性

根据遥感数据成功反演出的地表温度和植被指数已被证实是农业干旱监测中非常重要的两项基本参数^[9-10]。地表温度是地球表面能量平衡和温室效应的一个很好的指标,它反映了土壤湿度状况,是区域和全球尺度地表物理过程中的一个关键因子^[11]。植被指数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,能够提供绿色植被的生长状况和覆盖度信息的一个指标^[11]。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。但由于两者单独使用存在缺陷,使得监测的动态变化不能全面、及时地显现出来,且两者又表现为显著的负相关性,故国内外许多研究人员都对基于地表温度和植被指数特征空间相结合的干旱监测方法做了大量的研究。研究发现将两者结合的干旱监测方法较好地改变了单纯基于植被指数或单纯基于陆面温度进行土壤水分状态监测的不足,有效地减小了植被覆盖度对干旱监测的影响,提高了旱情遥感监测的准确度和实用性,不仅有利于统一定量标准来判断作物长势和干旱情况,还可以起到解决植物在受水分胁迫时短期内仍能保持原有绿色的时间滞后的问题^[12]。该方法有助于建立土壤-植被-大气间能

量相互作用和交换的研究系统,还对认知旱情时空动态演变规律起到很大的帮助作用。现有研究表明,基于地表温度和植被指数的特征空间存在两种表现形式:一种是 Price^[13]、Carlson 等^[14] 研究发现利用遥感资料获得的地表温度与植被指数所构成的散点分布图呈三角形;另一种是 Nemani 等^[15]、Moran 等^[16] 通过理论分析认为 LST-NDVI 特征空间呈梯形分布,实际应用中究竟采用三角形特征空间还是梯形特征空间,需要根据研究对象的植被覆盖状况和遥感数据的获取方式来确定。在早期植被覆盖度比较低的情况下,特别是航空遥感数据,应该采用三角形特征空间,随着植被覆盖度的增加,特别是卫星遥感来讲,采用梯形特征空间较好^[17]。

2 相关干旱监测方法

2.1 植被供水指数法

植被供水指数是以植被指数和地表温度为监测指标的一种监测干旱的方法。其原理是当没有干旱发生时,作物生长良好;当发生干旱时,由于供水不足,会同时出现两种情况,一种情况是部分作物由于缺水死亡导致归一化植被指数下降(NDVI 减小);另一种情况是作物为避免过多失水死亡而部分关闭叶片的气孔以减少蒸腾量,从而导致叶表面温度升高(T_s 升高)。基于此,植被供水指数综合考虑了 NDVI 和植被冠层温度,定义为植被指数与植被冠层温度的比值。其表达式为

$$VSWI = NDVI / T_s$$

式中:VSWI——植被供水指数;NDVI——植被指数; T_s ——植被冠层温度(由于遥感反演冠层温度的困难性,暂时以反演的地表温度近似为植被的冠层温度)。该方法适用于有植被覆盖的下垫面类型,主要应用于作物生长的旺盛期,表现为 VSWI 越小,旱情越严重^[18]。这种方法综合考虑了作物受到干旱影响时在不同反射波段上的反应且物理意义明确,参数取得易于实现等特点,在我国应用较多。杨丽萍等^[19] 应用植被供水指数法对内蒙古地区进行了干旱监测研究,研究表明植被供水指数法适用于内蒙古地区高植被覆盖的生长季大范围的干旱监测。刘丽等^[20] 利用植被供水指数监测模型确定了贵州省的干旱面积和干旱指标,并建立了植被供水指数估计地面干旱指数的回归方程。邓玉娇等^[21] 在 2004 年广东省干旱监测中运用植被供水指数法对干旱灾害进行了监测,并结合土地利用类型实现了干旱分类信息的提取。赵伟等^[22] 不仅利用 VSWI 指数计算的 2006 年重庆市特大干旱时期的土壤相对含水量时空分布图,还对

研究区干旱发生的时空变化特征进行了有效的分析。随着遥感技术应用的进一步发展, 冯锐等^[23]综合考虑 NDVI 和冠层温度两种干旱监测指标, 将植被供水指数定义为

$$VSWI = B \cdot NDVI / T$$

式中: NDVI ——归一化植被指数; T ——作物冠层温度; B ——图像增强系数。肖国杰等^[24]在辽西干旱监测中的应用表明, 研究结果与实地的旱情分布基本一致。使得卫星遥感在干旱监测中的发挥更明显, 能较好地监测生长季干旱动态。此外, 李新辉等^[25]考虑到半干旱地区植被覆盖度较低时土壤背景对植被指数的影响, 采用改进型土壤调整植被指数(MSAVI)代替归一化植被指数(NDVI), 修正后的植被供水指数不仅能更详细地反映旱情分布情况, 而且对于一些植被覆盖稀少的荒漠区也有一定程度的反映。该方法在体现所需资料少, 物理意义明确, 可操作性强等优点的同时也出现一些问题, 如研究区域只适合植被覆盖度较好或很好的地区($NDVI \geq 0.3$), 否则会夸大植被的作用; 其次, 监测结果在受研究区内云干扰、下垫面差异或垂直地带性等因素影响时会增大误差, 同时监测结果给出的干旱指数只是人为划分的相对干旱等级; 第三, 植被供水指数法反演土壤含水量受土壤物理特性、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), 以及光照强度和生产措施等因素影响^[26-27]。这些因素都不利于该方法大范围的客观评价, 需进一步研究各种条件下的稳定模型。

2.2 水分亏缺指数法

水分亏缺指数是由作物缺水指数发展而来的, Moran 等^[16]在综合考虑了作物缺水指数(CWSI)中多数理论参数与植被覆盖度有近线性关系, 以及完全植被覆盖和裸土条件下的很多参数相对容易获取两方面内容的基础上, 对其应用范围进行扩展, 建立了水分亏缺指数(WDI), 在一定植被覆盖度下定义为:

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

式中: ΔT ——某一植被覆盖度下地表与空气的温差; ΔT_{BD} ——湿边上的地表与空气的温差; ΔT_{AC} ——干边上的地表与空气的温差。如图 1 所示, 从图中可以看出 WDI 实际上就是线段 EF 与 EG 长度的比值。

齐述华^[28]通过 MODIS 数据以水分亏缺指数(WDI)作为干旱指标对我国 2000 年 4-5 月干旱发生情况进行研究, 发现 WDI 作为干旱指标的可行性, 其使用范围可由作物缺水指数法(CWSI)只适合的植被覆盖度较高的区域扩大到裸地地区、高植被覆盖或部分植被覆盖条件的区域, 并且它还能克服作物缺水

指数法(CWSI)只能用于郁闭植被冠层的限制^[29]。另外, 齐述华等^[30]还根据此方法原理利用 1982-2001 年 NOAA-AVHRR 遥感数据, 提取我国 1982-2001 年间各年份农田受旱面积和受旱成灾面积, 其结果与统计结果基本一致。黄晚华等^[31]考虑盈余降水对水分亏缺指数的影响, 修正了水分亏缺指数计算方法, 并依据玉米的水分亏缺指数, 分析了季节性干旱发生频率的时空特征。但当炎热干旱季节, 在稀疏植被覆盖条件下的土壤背景温度与冠层温度相差较大时, 忽略土壤与冠层之间的感热通量会导致水分亏缺指数(W_{DI})的适用性会降低。

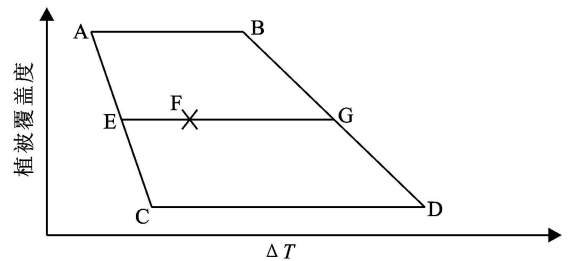


图 1 W_{DI} 梯形特征空间

2.3 条件植被温度干旱指数法

条件植被温度指数的定义为:

$$VT CI = [LST_{max}(NDVI) - LST(NDVI)] / [LST_{max}(NDVI) - LST_{min}(NDVI)]$$

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

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

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土地表面温度的最大值和最小值; $LST(NDVI)$ ——NDVI 等于这一确定值时的当前土地表面温度; 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, 如图 2 所示, 是在假设研究区域内土壤表层含水量从萎蔫含水量到田间持水量的基础上进行干旱监测的, 适用于区域尺度的干旱监测^[32-33]。

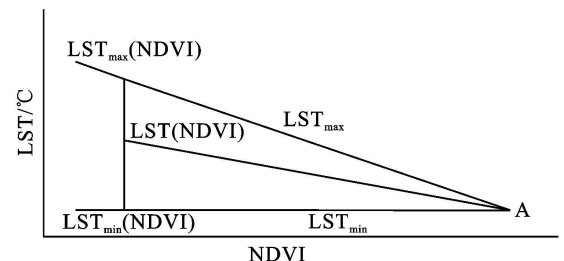


图 2 条件温度植被指数模型

该模型在理论上综合应用 NDVI 和 LST 特征空间的特性, 且 VTCI 既考虑了区域内 NDVI 的变化, 又强调了 NDVI 值相同时 LST 的变化。VTCI 的取值范围为[0, 1], 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。实践中,该模型则解决了因各地干旱发生时空变异以及其他方法(如条件植被指数、条件温度指数、距平植被指数等方法)由于对同一地物上求取参数不同而造成的在不同像素间可比性差的问题。适用于监测某一特定年内某一时期区域级的相对干旱程度。王鹏新等^[34]利用 NOAA-AVHRR 数据对陕西省关中平原地区 2000 年 3 月下旬干旱的监测结果表明,条件植被温度指数能较好地监测该区域的相对干旱程度,并可用于研究干旱程度的空间变化特征。此外,王鹏新等^[35]还运用 MODIS 数据对美国大平原南部地区进行了监测,同样取得较理想的效果。但以往工作中对 VTCI 方法中冷、热边界的确定方法研究不深,且应用的是单时段卫星遥感数据。孙威等^[36]针对此问题应用多时段卫星遥感数据,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。

与此同时 VTCI 方法使用时还存在受时空分布影响较大的局限性,模型中 NDVI 值和土壤表层含水量均需要处于大范围的动态变化,且现实中仍需进一步完善对土壤表层含水量有效的判别以及对 LST/NDVI 特征空间的冷、热边界科学合理的判定方式。

2.4 温度植被指数法

Goetz^[37]、Carlson 等^[14]研究发现单独运用地表温度或植被指数做参数进行监测,会受到不完全植被覆盖条件下土壤背景或植被对于暂时的水分胁迫不能敏感反映的影响而不能有效监测土壤湿度。Lambin 等^[38]系统地分析了两者间的关系,发现陆地地表温度与植被指数呈显著的负相关性,所以两者可以结合使用,建立 LST-VI 的特征空间,既可消除土壤背景的影响,又可使两者信息互补,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缺点。基于 LST-NDVI 特征空间的基础上,Sandholt 等^[39]提出的温度植被干旱指数为

$$TVDI = [(T_s - T_s(\min)) / (T_s(\max) - T_s(\min))] \\ T_s(\min) = a_1 + b_1 NDVI \\ T_s(\max) = a_2 + b_2 NDVI$$

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。

Price^[13]、Carlson 等^[14]研究发现利用遥感资料获得的植被指数与地表温度所构成的散点分布图呈三角形。如图 3 所示,图中的 A、B、C 三个点代表了

NDVI- T_s 特征空间中的三种极端情况。在植被生长的某一特定时期,各种地表类型对应 NDVI- T_s 关系都分布在 ABC 这个多边形的区域内。当植被状况与土壤墒情存在较大幅度变化时,即植被覆盖状况从裸地 A 和 B,到完全植被覆盖区 C,其中 A 点为干燥裸地(NDVI 小, T_s 高),B 点为湿润裸地(NDVI 和 T_s 都最小),C 点为植被完全覆盖区域(NDVI 大, T_s 低),所以 A→C 表示土壤水分的有效性很低,地表蒸散小,被认为是“干边”;B→C 表示土壤水分充足,不是植物生长的限制因素,地表蒸散等于潜在蒸散,被认为是“湿边”。完全缺水的干边之上的像元干旱指数为 1;干边和湿边之间的像元干旱指数为 0~1。所以温度-植被指数法可以有效克服土壤背景的影响,在不完全覆盖地区可以取得较佳效果^[40]。

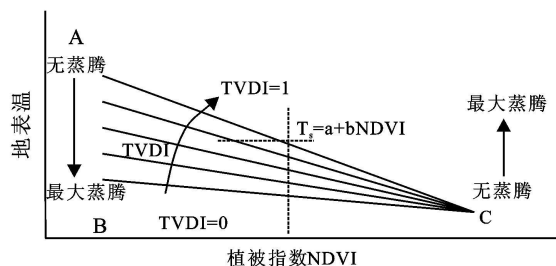


图 3 温度植被指数模型

姚春生等^[41]利用 TVDI 方法反演了 2003 年 8-9 月两个月的新疆地表土壤湿度,通过定量分析验证了 TVDI 与土壤湿度呈显著相关,可以用来反演地表的土壤湿度。吴孟泉等^[11]对云南省红河地区的地表干旱监测结果表明该方法不仅可以用来对大区域干旱进行检测,而且对山区的干旱预警监测也能起到很好的效果。此外,杨曦等^[42]针对 NDVI 易达到饱和的问题,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 T_s /EVI 特征空间来提高 TVDI 与土壤湿度的相关性,还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。闫峰等^[43]同样采用 T_s /EVI 特征空间较好的估算土壤表层水分状况,以及 TVDI 与不同土壤深度的相关性在不同时期的差异状况。陈艳华等^[44]则考虑到植被类型对土壤湿度反演精度的影响,利用修正的土壤调整植被指数 MSAVI 替换 NDVI,比较研究了植被类型对 TVDI 提取结果的影响。张学艺等^[45]同时改进地面温度和植被指数,获得改进型温植被旱情指数(MTVDI),对宁夏作物生长季的干旱进行了遥感监测,其监测精度可控制在 90% 左右。李红军等^[46]对影响 TVDI 旱情指数的地表能量平衡因素(如忽略地表反射率、纬度等)进行研究,通过进一步对植被指数-地表温度特征空间的生态

学内涵分析,将地表温度作为下垫面蒸散的函数,提出了温度蒸散旱情指数法(TEDI),推导出了TEDI旱情指数。通过实际研究表明TEDI旱情指数能够更准确地反映下垫面土壤墒情状况。目前通过对TV-DI的研究已经取得了较好的效果,但是在特征空间干湿边的确定方面还没有严格的定义式的判别标准,尤其是在未考虑降水量、蒸散作用等方面对监测结果的影响,尽管可以进行质量控制(如云检测等),但现有水平下还会出现质量较差的像元,仍会影响到线性拟合干湿边的精度。

3 结论

随着遥感技术的不断发展,基于NDVI- T_s 特征空间的干旱监测模型在干旱监测工作中已取得了良好的效果,不仅改变了单纯基于植被指数或单纯基于陆面温度进行土壤水分状态监测的不足,有效地减小了植被覆盖度对干旱监测的影响,提高了旱情遥感的准确度和实用性,且对干旱情况的监测效果显著,能较好地反映区域旱情空间分布和旱情动态发展过程,监测结果具有一定的实用价值,有助于遥感监测业务工作的进行。但同时此类模型还存在不足之处,主要表现为:在研究对象上,大多要求研究区域具有较高的植被覆盖度和较大表层含水量范围,且归一化植被指数存在饱和问题,对大气影响的纠正不彻底和时间上的滞后性,在干旱初期,很难通过植被指数监测出来,而地表温度作为与之互补的水分胁迫指标的确具有良好的时效性,但在相关模型所要求获取的最高和最低温度上存在困难,且获取的温度或昼夜温差信息受植被覆盖的影响,与实际值相比存在偏差;在技术水平上,因简化反演参数(如植被指数、冠层温度等)的取得过程和干湿边的判别工作等造成监测结果的精准性和客观性不足。由于农业干旱是一个受降水、土壤属性、地形等多因素影响的自然现象,因此此类监测方法应加强综合大气、作物和土壤环境等各个方面因素的业务能力,增强或改进相关研究参数的同时,加强不同方法的交叉融合使用,使得干旱监测方法从监测角度和内容上加以丰富。随着卫星遥感的发展,今后可采用更高分辨率的影像进行分析,这样有助于不同空间尺度研究参数的统一和比较,且减小参数因空间变异而导致的精度下降。

综上所述,基于地表温度和植被指数特征空间的干旱监测方法在实际监测工作中已得到广泛认可,且在实际工作中也取得了非常好的效果,随着监测方法的不断成熟以及遥感技术的不断发展,此类模型在对农业干旱动态监测的应用中将会起到更好的效果。

参考文献:

- [1] 胡红武,胡梅,龙玲,等.区域干旱遥感监测研究综述[J].安徽农业科学,2008,36(33):14817-14819.
- [2] 张红卫,陈怀亮,申双和,等.NDVI-ST特征空间及干湿边变化特征[J].气象科技,2010,38(1):86-95.
- [3] Christelle V, Pietro C, Tufa D, et al. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 449-465.
- [4] Tang Ronglin, Li Zhaoliang, Tang Bohui. An application of the Ts-VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi arid regions: Implementation and validation[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 540-551.
- [5] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79: 213-224.
- [6] Wang Xianwei, Xie Hongjie, Guan Huade, et al. Different responses of MODIS derived NDVI to root zone soil moisture in semi arid and humid regions[J]. Journal of Hydrology, 2007, 340: 12-24.
- [7] Kalma J D, McVicar T R, McCabe M F. Estimating Land Surface Evaporation: A Review of Methods Using Remotely Sensed Surface Temperature Data[J]. Surv. Geophys., 2008, 29: 421-469.
- [8] Kimura R. Estimation of moisture availability over the Liudaogou river basin of the Loess Plateau using new indices with surface temperature[J]. Journal of Arid Environments, 2007, 70: 237-252.
- [9] Kaniska M, Bhattacharya B K, Patel N K. Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149: 1327-1342.
- [10] Krishna T M, Ravikumar G, Krishnaveni M. Remote Sensing Based Agricultural Drought Assessment in Palar Basin of Tamil Nadu State, India[J]. J. Indian Soc. Remote Sens., 2009, 37: 9-20.
- [11] 吴孟泉,崔伟宏,李景刚.温度植被干旱指数(TVDI)在复杂山区干旱监测的应用研究[J].干旱区地理,2007,30(1):30-35.
- [12] 韩丽娟,王鹏新,王锦,等.地植被指数-地表温度构成的特征空间研究[J].中国科学D辑:地球科学,2005,35(4):371-377.
- [13] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration[J]. IEEE Transactions

- on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28: 940-948.
- [14] Carlson T N, Gillies R R, 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[J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 9: 161-173.
- [15] Nemain R R, Running S W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal IR AVHRR data[J]. Journal of Applied Meteorology, 1989, 28: 276-284.
- [16] 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[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49: 246-263.
- [17] 高磊, 覃志豪, 卢丽萍. 基于植被指数和地表温度特征空间的农业干旱监测模型研究综述[J]. 国土资源遥感, 2007, 73(3): 1-7.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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): 237-240.
- [22] 赵伟. 基于 VSWI 的重庆市农业干旱评价研究[J]. 安徽农业科技, 2009, 37(23): 11070-11072.
- [23] 张友水, 谢元礼. MODIS 影像的 NDVI 和 LSWI 植被水分含量估算[J]. 地理科学, 2008, 28(1): 72-76.
- [24] 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.
- [25] 李新辉, 宋小宁, 周霞. 半干旱区土壤湿度遥感监测方法研究[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(1): 90-93.
- [26] 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.
- [27] 杨丽萍, 隋学艳, 杨洁. 山东省春季土壤墒情遥感监测模型构建[J]. 山东农业科学, 2009(5): 17-20.
- [28] 齐述华. 干旱监测遥感模型和中国干旱时空分析[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2004.
- [29] 余万明, 叶彩华. MODIS 资料遥感监测土壤水分与干旱研究进展[J]. 河南气象, 2006(1): 44-46.
- [30] 齐述华, 李召良, 王长耀. 1982-2001 年间我国受旱和受旱成灾耕地的遥感提取研究[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(6): 43-48.
- [31] 黄晚华, 杨晓光, 曲辉辉, 等. 基于作物水分亏缺指数的春玉米季节性干旱时空特征分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 28-34.
- [32] 胡荣辰, 朱宝, 孙佳丽. 干旱遥感监测研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(17): 8289-8291.
- [33] Han Ping, Wang Pengxin, Zhang Shuyu, et al. Drought forecasting based on the remote sensing data using ARIMA models[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 51: 1398-1403.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(1): 71-94.
- [38] Lambin E F, Ehrlich D. The surface temperature vegetation index for land cover and land cover change analysis[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17: 463-487.
- [39] Sandhol T I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79: 213-224.
- [40] 李喆, 谭德宝, 秦其明. 基于特征空间的遥感干旱监测方法综述[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(1): 37-40.
- [41] 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, 19(6): 473-478.
- [42] 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.
- [43] 闫峰, 王艳姣, 武建军. 基于 TS-EVI 特征空间的春旱遥感监测: 以河北省为例[J]. 干旱区地理, 2009, 32(5): 769-775.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.