

冯锐, 张玉书, 武晋雯, 等. 基于多光谱和高光谱的干旱遥感监测研究进展[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 162–166. [FENG Rui, ZHANG Yushu, WU Jinwen, et al. Advances in drought remote sensing monitoring based on multispectral and hyperspectral data [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 162–166. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.030.]

基于多光谱和高光谱的干旱遥感监测研究进展^{*}

冯 锐¹, 张玉书¹, 武晋雯¹, 纪瑞鹏¹, 于文颖¹, 王培娟²

(1. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要: 对近年来国内外利用多光谱卫星数据和近地面高光谱数据进行干旱监测研究进展及其适用性进行了归纳总结, 得出以下结论: 基于地表土壤水分和能量平衡理论、基于特征空间的干旱监测模型更适用于低植被或裸土地区; 基于作物植被指数的干旱监测模型更适用于高植被覆盖区, 并且需要长时间的序列数据; 基于近地面高光谱数据的干旱监测光谱敏感波段在不同作物不同发育期存在着差异, 为有效利用多光谱和高光谱卫星数据进行干旱监测提供借鉴。

关键词: 干旱; 多光谱; 高光谱; 遥感监测; 研究进展

中图分类号: X43; TP79; S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)01-0162-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.030

随着气候与环境的变化, 未来中国的极端天气气候事件如极端高温、热浪、干旱等愈发频繁^[1-2], 中国华北和东北地区干旱趋势严重, 中国西北部、华北大部和东北南部干旱面积呈增加趋势^[3-4]。同时, 随着工业化提高、经济发展和人口增长, 水资源显得日益短缺, 干旱化程度越来越严重, 干旱发生区域不断扩大。1970年代, 我国每年有1 133万hm²农田受旱, 到1990年代, 增加到2 667万hm², 近年来, 每年干旱灾害的发生频率在49%左右^[5], 已成为我国面临的最为严峻的环境问题之一。

遥感技术为作物长势、地物分类等提供了有效、可靠手段, 可快速实现大面积下垫面状况动态变化的定量化监测, 是进行大面积干旱监测的有利手段^[6-9]。而地物光谱特征是遥感技术应用的物理基础, 是利用遥感信号识别地物、提取地表信息的重要参考数据^[10], 1980年代已有研究者指出作物的水分胁迫状况能够在光谱反射率数据中有所体现^[11-12]。本文基于地表土壤水分和能量平衡理论、基于作物植被指数、基于特征空间、基于地面光谱数据等方面进行了干旱遥感监测梳理总结, 对有效利用多光谱和高光谱卫星数据进行

干旱监测提供借鉴。

1 基于多光谱数据的干旱监测

1.1 基于地表土壤水分和能量平衡理论研究

基于地表土壤水分平衡的方法应用最为广泛、理论比较成熟的是热惯量方法, 由于土壤热惯量是引起土壤温度变化的内在因素, 与土壤水分有着密切的关系^[13], 早在1970年代初就出现热惯量方法研究, 该方法是基于能量平衡方程, 通过地表温度的日变化计算热惯量, 从而获得土壤表层水分定量反演^[14-15]。由于热惯量模型计算参数复杂, Price^[16]提出了表观热惯量的概念, 因其计算简单易行, 很多学者利用表观热惯量替代热惯量来进行土壤含水量的计算。张仁华^[17]利用地面观测数据分别对模型中的显热通量和潜热通量进行计算订正, 优化了热惯量计算模型。杨树聪等^[18]利用地表净辐射替代全波段反射率改进了表观热惯量模型, 并对其适用性进行了分析, 得到 $NDVI = 0.35$ 是模型适用的阈值, 当 $NDVI > 0.35$ 时, 模型失效^[19]。但表观热惯量受蒸发影响较大, 当下垫面植被覆盖情况复杂、湿度变化较大时,

^{*} 收稿日期: 2018-05-31 修回日期: 2018-08-01

基金项目: 中央级基本科研事业费项目(2018SYIAEZD1, 2018SYIAEHZ1); 国家自然科学基金项目(31771672); 辽宁省农业攻关及产业化项目(2017210001)

第一作者简介: 冯锐(1972-), 女, 辽宁凌海人, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要从事农业定量遥感. E-mail: fengrui_k@126.com

表观热惯量的可用性大大降低^[20]。近年来, 利用日落和日出间的夜晚地表温度差异^[21]、模型反演法^[22]、引入地球旋转角速度的 4 次过境 *LST* 平均^[23]等方法来改进地表温度计算, 通过减少模型的输入参数^[24], 或者通过增强空间分辨率^[25]和时间分辨率^[26]来提高热惯量反演精度, 同时, 将植被因子引入热惯量模型中^[27-28], 增加热惯量模型在中高植被覆盖区域的监测精度。

基于蒸散的干旱监测也是以地表能量平衡方程为基础的监测方法, 包括单层模型和双层模型^[29]。单层模型常用的有 *BEBAL* 模型^[30]、*BEBS* 模型^[31]、*SSEBop* 模型^[32]等, 由于单层模型将下垫面看做均一过程来描述, 因此在地表植被部分覆盖时, 模拟结果不理想^[33-34]。为解决这一问题, 将冠层蒸腾与土壤蒸发分开, *Shuttleworth*^[35]提出了双层模型, 为蒸散量估算精度的提高奠定了理论基础, 随后对该模型进行了简化和改进^[36-38]。考虑到双层模型部分参数遥感获取较难, 将地面实测数据引入模型中^[39-41], 从而提高模型监测精度。

1.2 基于作物植被指数的土壤含水量监测研究

植被指数是遥感数据对地表绿色植被生长信息的有效表达^[42]可以动态监测作物长势信息, 与植被蒸散量、土壤水分是密切相关的^[43], 当作物缺水时, 生长受到影响, 植被指数也会随之变化, 因此, 可以用来间接反映旱情^[44-45]。这种类型方法一般适合植被覆盖区或植被覆盖度较好的地区。

利用作物植被指数来进行干旱监测主要包括距平方法和归一化方法^[13], 距平植被指数是用于干旱监测比较早的一种方法^[46-47], 通过对旬、月植被指数求取最大值, 并将其与同时段的旬、月多年平均值进行比较, 判断作物是否遭到干旱灾害, 比只用 *NDVI* 的瞬时值优越^[48]。归一化方法即植被状态指数方法^[49], 是利用同时段多年最大最小植被指数与当前植被指数进行归一化计算得到的, 可以进行宏观动态干旱监测^[50-51], 与气象干旱指数存在着较高的相关性^[52], 同时, 在进行干旱监测时, 也存在着一定的滞后性^[43,53]。

利用植被指数方法进行干旱监测时最初使用的是归一化植被指数, 后期发展了增强植被指数 *EVI*、土壤调节植被指数 *SAVI*、比值植被指数 *RVI* 等植被绿度指数, *NDWI*、*NMDI*、*NDII6*、*NDII7* 等植被水分指数, 以及 *EWT* 等植被水含量指数^[54], 在干旱监测敏感性方面, 植被水分指数明显要优于植被绿度指数^[55], 植被水含量指数与植被覆盖、地表温度和蒸发蒸腾有密切关系, 在中度至重度干旱监测中效果不佳^[56]。

1.3 基于特征空间的土壤含水量监测研究

近年来, 综合考虑陆地表面温度、地表植被和光谱反射率等反映地表多种参数信息, 通过构建特征空间来监测地表水分状况的研究越来越多,

主要包括 *LST-NDVI* 特征空间法、*NIR-Red* 特征空间法和 *NIR-SWIR* 特征空间法等^[57]。*Moran*^[58]从理论角度分析, 发现 *Price*^[59]提出以 *NDVI* 和 *LST* 为横纵坐标轴的 *LST-NDVI* 特征空间散点图呈梯形, 存在着干湿边, 能够监测地表植被和其水分变化状态^[60]。*Sandholt*^[61]对 *LST-NDVI* 空间进行简化, 构建温度植被干旱指数 (*TVDI*), 仅利用遥感数据即可实现大范围农田、湖区、流域等不同下垫面的土壤水分监测^[62-64], 也可以实现长时间序列的干旱时空变化监测^[65]。在 *LST-NDVI* 空间基础上, 利用植被条件指数和温度条件指数取二者最大值构建 *MTVI* 指数^[66], 将 *LST* 归一化处理后与多年平均值进行比较构建 *SWDI* 指数^[67], 结合降水等气象数据构建 *SVDI* 指数^[68]或者经验模型^[69], 实现从空间和时间尺度上进行干旱监测, 反映干旱分布范围与受灾程度。利用 *NIR-Red* 特征空间中任意一点到土壤基线的垂直距离可以表征干旱状况^[70], 用 *EVI* 替代 *NDVI* 对 *NIR-Red* 空间进行改进, 精测精度提高 30% 左右^[71]。*NIR-SWIR* 特征空间模型适合用于植被冠层叶片含水量遥感监测, 对于旱灾害的反映存在滞后情况^[72]。

2 基于高光谱数据的干旱监测

地物波谱特征是遥感技术应用的物理基础, 是利用遥感信号识别地物、提取地表信息的重要参考数据^[10], 作物冠层光谱是农业干旱遥感监测的基础, 针对小麦、水稻、玉米等作物^[73-76]研究表明, 不同植被冠层光谱对于水分的存在着敏感性^[77-78], 利用不同光谱反射率可以反映作物水分状况^[79-80], 不同地物在水分胁迫下, 在可见光-近红外均有光谱反射率变化, 1 400 nm-2 500 nm 波段的光谱特别是 1 530 nm 和 1 720 nm 的 *SWIR* 波段非常适于对作物水分的估测^[81]。*Filella* 等人^[82]对 400 nm 波段处, 红边位置 700 nm 处, 以及 *NDVI* 等植被指数的研究也发现了水分含量对叶片反射率的间接影响。*田庆久*等^[83]、*王纪华*等^[84]、*谷艳芳*等^[85]、*丛建鸥*等^[86]对于旱胁迫下的冬小麦进行了光谱分析, 结果表明通过光谱反射率可以诊断小麦缺水状况, 此外, 针对玉米生长过程中的光谱变化及特征参数诊断开展的研究^[87-89], 或者针对玉米生长中后期开展遥感作物水分识别研究^[90-91]也表明, 不同作物发育期干旱胁迫的光谱敏感波段也存在着差异^[92-95]。

3 结论

国内外许多学者已经利用可见光、近红外、红外等不同光谱波段, 从土壤热容量、能量平衡、水分平衡等角度建立了多种土壤水分遥感监测模型, 但是, 由于作物生长过程的干旱是个复杂过程, 进行农田干旱监测时, 存在很多不确定性,

每种干旱监测方法都有其适用性,应用各种成熟方法进行土壤含水量反演的结果并不总是得到理想效果^[13,96-97],应用某一干旱反演方法在作物不同发育期反演结果也不尽相同^[98-99]。热惯量方法对于裸土或低植被覆盖区域有较好的反演结果^[100-101],对于植被覆盖度较高区域,此方法计算的结果不理想,甚至不可用^[98,102]。植被指数方法需要长期的、能代表正常年份的历史遥感数据,由于天气状况对遥感数据的影响以及不同卫星间植被指数的差异致使其在实施上较为困难。基于特征空间的干旱监测方法适用于低植被或裸土地地区,当地表覆盖类型差异较大时,可比性差^[103]。

因此,利用不同的监测方法在作物发育的不同时期进行干旱灾害监测可以提高监测效果,但是作物干旱是个复杂问题,与下垫面地形地貌、土壤类型、作物类型及生长状态等因素均有关系,在未来的应用中还需要通过使用更高分辨率卫星数据、地面光谱与卫星数据结合、加大微波和雷达数据的应用等方面来提高干旱监测的精度。

参考文献:

- [1] 秦大河. 全球气候变化对中国可持续发展的挑战[J]. 中国发展观察, 2007 (4): 38-39.
- [2] IPCC. Climate change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects[R]. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. 2014.
- [3] 王闪闪, 王素萍, 冯建英. 2015 年全国干旱状况及其影响与成因[J]. 干旱气象, 2015, 33(2): 382-389.
- [4] 冯建英, 张宇, 王素萍. 2016 年夏季全国干旱分布及其影响与成因[J]. 干旱气象, 2016, 34(5): 912-917.
- [5] ZHANG Z, CHEN Y, WANG P, et al. Spatial and temporal changes of agro-meteorological disasters, affecting maize production in Chins since 1990[J]. Nat Hazards, 2014, 71: 2087-2100.
- [6] 徐希孺. 遥感物理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 1-50.
- [7] HUANG H, FAN Y D, YANG S Q, et al. Drought Monitoring Based on Multi-Sources Remote Sensing Data[J]. Sensor Letters, 2014, 12: 659-666.
- [8] Legesse G, Suryabhagavan K V. Remote sensing and GIS based agricultural drought assessment in East Shewa Zone, Ethiopia[J]. Tropical Ecology, 2014, 55(3): 349-363.
- [9] Tadesse T, Demisse G B, Zaitchik B, et al. Satellite-based hybrid drought monitoring tool for prediction of vegetation condition in Eastern Africa: a case study for Ethiopia[J]. Water Resources Research, 2014, 50(3): 2176-2190.
- [10] 王锦地, 张立新, 柳钦火, 等. 中国典型地物波谱知识库[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-9.
- [11] Jackson R D, Idso S B, Reginato P J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1133-1138.
- [12] Jackson R D, Ezra C E. Spectral response of cotton to suddenly induced water stress[J]. International Journal of Remote Sensing, 1985, 6(1): 177-185.
- [13] 郭锐, 王小平. 遥感干旱应用技术进展及面临的技术问题与发展机遇[J]. 干旱气象, 2015, 33(1): 1-18.
- [14] Watson K, Rowen L C, Offield T W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images[J]. Remote Sensing of Environment, 1971, (3): 2017-2041.
- [15] Watson K. Periodic heating of a layer over a semi-infinite solid[J]. Journal of Geophysical research, 1973, 78: 5904-5910.
- [16] 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.
- [17] 张仁华. 改进的热惯量模式及遥感土壤水分[J]. 地理研究, 1990, 9(2): 101-112.
- [18] 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, 19(5): 1157-1161.
- [19] 吴黎, 张有智, 解文欢, 等. 改进的表观热惯量法反演土壤含水量[J]. 国土资源遥感, 2012, 25(1): 44-49.
- [20] 张霄羽, 毕于运, 李召良. 遥感估算热惯量研究的回顾与展望[J]. 地理科学进展, 2008, 27(3): 166-172.
- [21] Anne V. Remote estimation of thermal inertia and soil heat flux for bare soil[J]. Agricultural and forest meteorology, 2004, 123(3/4): 221-236.
- [22] 肖志峰, 赵之重, 徐剑波, 等. HJ-1B 卫星三种反演地表温度模型的分析与验证[J]. 测绘科学, 2015, 40(2): 52-58, 131.
- [23] Sohrabinia A M, Rack W, Zawar-Reza P. Soil moisture derived using two apparent thermal inertia functions over Canterbury, New Zealand[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(8): 222-223.
- [24] Grey S, Nearing, M, Susan M, et al. Coupling diffusion and maximum entropy models to estimate thermal inertia[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 119: 222-231.
- [25] LEI S G, BIAN Z F, Daniels J L, et al. 2014. Improved spatial resolution in soil moisture retrieval at arid mining area using apparent thermal inertia Transactions of Nonferrous Metals Society of China[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2012, 24(6): 1866-1873.
- [26] DI A J, XUE Y, LI C, et al. Estimation of soil thermal inertia from geostationary Meteosat Second Generation (MSG) data[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(8): 763-772.
- [27] 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, 22(3): 380-385.
- [28] 王艳姣, 闫峰. 旱情监测中高植被覆盖区热惯量模型的应用[J]. 干旱区地理, 2014, 37(3): 539-547.
- [29] 刘雅妮, 武建军, 夏虹, 等. 地表蒸散遥感反演双层模型的研究方法综述[J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 65-71.
- [30] Bastiaansen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation[J]. Journal of Hydrology, 1998, 212: 198-212.
- [31] SU Z. The Surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent fluxes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6(1): 85-99.
- [32] Senay G B, Bohms S, Singh R K, et al. Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2013, 49(3): 577-591.
- [33] Kustas W P. Estimates of evapotranspiration with a one- and two-layer model of heat transfer over partial canopy cover[J]. Journal of Applied Meteorology, 1990, 29: 704-715.
- [34] Verhoef A, Bruin H D, Hurk V D, et al. Some practical notes on the parameter k_{B1} for sparse vegetation[J]. Journal of Applied Meteorology, 1997, 36: 560-572.
- [35] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops an energy combination theory[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111(469): 839-855.
- [36] Shuttleworth W J, Gurney R J. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crop[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1990, 116(492): 497-519.

- [37] Norman J M, Kustas W P, Humes K S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1995, 77(3): 263–293.
- [38] 刘振华, 赵英时, 李笑宇, 等. 基于蒸散发模型的定量遥感缺水指数[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2): 114–120.
- [39] 宋小宁, 赵英时. 改进的区域缺水遥感监测方法[J]. *中国科学(地球科学)*, 2006, 36(2): 188–194.
- [40] 李新, 刘绍民, 马明国, 等. 黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验总体设计[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(5): 481–498.
- [41] 王莹, 吴荣军, 郭照冰. 基于实际蒸散构建的干旱指数在黄淮海地区的适用性[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1603–1610.
- [42] 李喆, 胡蝶, 赵登忠, 等. 宽波段遥感植被指数研究进展综述[J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(1): 125–130.
- [43] YAN J W, CHEN B Z, FANG S F, et al. The response of Vegetation Index to Drought: Taking the extreme drought disaster between 2009 and 2010 in Southwest China as an example[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(4): 720–737.
- [44] Beurs K M, Henebry G M. Land surface phenology, climatic variation, and institutional change: analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 497–509.
- [45] GUO R, GAO T P, QIAN G Q. Using Normalized Difference Vegetation Index for Drought Monitoring in the Loess Plateau of China[J]. *Sensor Letters*, 2014, 12: 897–900.
- [46] 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.
- [47] 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, 11(4): 25–29.
- [48] 晏明, 张磊. 距平植被指数在吉林省农作物干旱监测中的应用[J]. *现代农业科技*, 2010(11): 15–16.
- [49] Liu W T, Kogan F N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(14): 2761–2782.
- [50] Yagci A L, Di L, Deng M. The influence of land cover-related changes on the ndvi-based satellite agricultural drought indices[J]. *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, 2014: 2054–2057.
- [51] 吕潇然, 尹晓天, 宫阿都, 等. 基于植被状态指数的云南省农业干旱状况时空分析[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(12): 1634–1644.
- [52] 慈晖, 张强. 遥感手段及气象干旱指数在新疆干旱监测过程中的应用[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(10): 1653–1662.
- [53] 沙莎, 郭锐, 李耀辉, 等. 植被状态指数 VCI 与几种气象干旱指数的对比—以河南省为例[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(4): 990–998.
- [54] Ceccato P, Flasse S P, Gregoire J M. Designing a Spectral index to Estimate Water Content from Remote Sensing Data: Part 2. Validation and Applications[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82(2–3): 198–207.
- [55] 李华朋, 张树清, 高自强, 等. MODIS 植被指数监测农业干旱的适宜性评价[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(3): 756–761.
- [56] GAO Z Q, WANG Q X, CAO X M, et al. The responses of vegetation water content (EWT) and assessment of drought monitoring along a coastal region using remote sensing[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2014, 51(1): 1–16.
- [57] 李喆, 谭德宝, 秦其明, 等. 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): 37–41.
- [58] Moran 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.
- [59] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(5): 940–948.
- [60] Goetz S J. Multisensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(1): 71–94.
- [61] 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(2/3): 213–224.
- [62] 张喆, 丁建丽, 李鑫, 等. TVDI 用于干旱区农业旱情监测的适宜性[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 220–227.
- [63] 杨玲, 杨艳昭. 基于 TVDI 的西辽河流域土壤湿度时空格局及其影响因素[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(2): 76–81.
- [64] 曹雷, 丁建丽, 牛增懿. 基于 TVDI 的艾比湖地区土壤水分时空变化分析[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 43–47.
- [65] CAO X, FENG Y, WANG J. An improvement of the Ts-NDVI space drought monitoring method and its applications in the Mongolian plateau with MODIS, 2000–2012[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(6): 1–14.
- [66] 牟伶俐, 吴炳方, 闫娜娜, 等. 基于植被与温度条件的农业旱情遥感监测研究[J]. *世界科技研究与发展*, 2006, 28(3): 26–31.
- [67] Mohammad R K, Majid V, Amin A. Drought monitoring using a Soil Wetness Deficit Index(SWDI) derived from MODIS satellite data[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 132: 37–45.
- [68] Patel N R, Yadav K. Monitoring spatio-temporal pattern of drought stress using integrated drought index over Bundelkhand region, India[J]. *Nat Hazards*, 2015, 77: 663–677.
- [69] 虞文丹, 张友静, 陈立文, 等. 基于 TVDI 与气象因子的土壤含水量估算[J]. *地理空间信息*, 2015, 13(1): 137–139.
- [70] 詹志明, 秦其明, 阿布都瓦提·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.
- [71] 郭兵, 姜琳, 杨光, 等. 一种基于 NIR-RED 光谱特征空间的干旱监测新方法[J]. *亚热带水土保持*, 2015, 27(1): 10–14.
- [72] 阿布都瓦提·吾拉木, 李召良, 秦其明. 全覆盖植被冠层水分遥感监测的一种方法: 短波红外垂直失水指数[J]. *中国科学(D 辑)*, 2007, 37(7): 957–965.
- [73] Gutierrez M, Reynolds M P, Raun W R, et al. Spectral water indices for assessing yield in elite bread wheat genotypes under well-irrigated, water-stressed, and high-temperature conditions[J]. *Crop Science*, 2010, 50(1): 197–214.
- [74] 胡祖庆, 亢菊侠, 罗晨, 等. 麦长管蚜胁迫下不同小麦品种冠层光谱特征及其预测模型[J]. *南京农业大学学报*, 2015, 38(2): 267–272.
- [75] Elsayed S, Rischbeck P, Schmidhalter U. Comparing the performance of active and passive reflectance sensors to assess the normalized relative canopy temperature and grain yield of drought-stressed barley cultivars. *Field Crops Research*, 2015, 177: 148–160.
- [76] 王树文, 赵越, 王丽凤, 等. 基于高光谱的寒地水稻叶片氮素含量预测[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(20): 187–194.
- [77] 赵钊. 新疆荒漠植物含水率高光谱特征分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2011.
- [78] 付彦博, 范燕敏, 盛建东, 等. 紫花苜蓿冠层反射光谱与叶片含水率关系研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(3): 766–769.
- [79] Penuelas J, Filella I, Biel C, et al. The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(10): 1887–1905.
- [80] Linke R, Richter K, Haumann J, et al. Occurrence of repeated

- drought events; can repetitive stress situations and recovery from drought be traced with leaf reflectance[J]. *Periodicum Biologorum*, 2008, 110(3): 219–229.
- [81] 张佳华, 姚凤梅, 李莉, 等. 基于遥感和地面试验的水分指数与土壤湿度及生理指标关系[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 151–154.
- [82] Filella I, Penuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(7): 1459–1470.
- [83] 田庆久, 宫鹏, 赵春江, 等. 用光谱反射率诊断小麦水分状况的可行性分析[J]. *科学通报*, 2000, 45(20): 2645–2650.
- [84] 王纪华, 赵春江, 郭晓维, 等. 用光谱反射率诊断小麦叶片水分的研究[J]. *中国农业科学*, 2001, 34(1): 1–4.
- [85] 谷艳芳, 丁圣彦, 陈海生, 等. 干旱胁迫下冬小麦(*Triticum aestivum*)高光谱特征和生理生态响应[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2690–2697.
- [86] 丛建鸣, 李宁, 许映军, 等. 干旱胁迫下冬小麦产量结构与生长、生理、光谱指标的关系[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 67–71.
- [87] 文瑶, 李民赞, 赵毅, 等. 玉米苗期冠层多光谱反射率反演与叶绿素含量诊断[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(S2): 193–199.
- [88] 刘桂鹏, 贺婷, 王国骄, 等. 玉米 LAI 和 FPAR 的高光谱遥感预测模型研究[J]. *玉米科学*, 2016, 24(2): 115–119, 128.
- [89] 吕杰, 汪康宁, 李崇贵, 等. 基于高光谱遥感的玉米叶绿素含量估测模型[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(2): 405–410.
- [90] Andi B, Vagn O M, Christian R J. Water stress detection in field-grown maize by using spectral vegetation index[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2003, 34(1/2): 65–79.
- [91] Weber V S, Araus J L, Cairns J E, et al. Prediction of grain yield using reflectance spectra of canopy and leaves in maize plants grown under different water regimes[J]. *Field Crops Research*, 2012, 128: 82–90.
- [92] 王宏博, 冯锐, 纪瑞鹏, 等. 干旱胁迫下春玉米拔节-吐丝期高光谱特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3358–3362.
- [93] 赵俊芳, 房世波, 郭建平. 受蚜虫危害与干旱胁迫的冬小麦高光谱判别[J]. *国土资源遥感*, 2013, 25(3): 153–158.
- [94] FENG R, ZHANG YS, YU WY, et al. Analysis of the relationship between the spectral characteristics of maize canopy and leaf area index under drought stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33: 301–307.
- [95] 林毅, 李倩, 王宏博, 等. 干旱条件下春玉米高光谱特征及土壤含水量反演[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1323–1329.
- [96] Coates A, Dennison P, Roberts D, et al. Monitoring the Impacts of Severe Drought on Southern California Chaparral Species using Hyperspectral and Thermal Infrared Imagery. *Remote Sensing*, 2015, (11): 14276–14291.
- [97] 黄友昕, 刘修国, 沈永林, 等. 农业干旱遥感监测指标及其适应性评价方法研究进展[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 186–195.
- [98] Murray T, Verhoef A. Moving towards a more mechanistic approach in the determination of soil heat flux from remote measurements I. A universal approach to calculate thermal inertia[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2007, 147(1/2): 80–87.
- [99] 冯锐, 张玉书, 纪瑞鹏, 等. 基于 MODIS 数据的作物苗期干旱监测方法研究[J]. *气象科技*, 2008, 36(5): 606–608.
- [100] 于健, 杨国范, 王颖, 等. 基于 MODIS 数据反演阜新地区土壤水分的研究[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(4): 413–419.
- [101] 马春锋, 王维真, 吴月茹, 等. 基于 MODIS 数据的黑河流域土壤热惯量反演研究[J]. *遥感技术与应用*, 2012, 27(2): 197–207.
- [102] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 436–456.
- [103] Raghavendra B J, Binayak P M. Enhancing PTFs with remotely sensed data for multi-scale soil water retention estimation[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 399: 201–211.

Advances in Drought Remote Sensing Monitoring Based on Multispectral and Hyperspectral Data

FENG Rui¹, ZHANG Yushu¹, WU Jinwen¹, JI Ruipeng¹, YU Wenying¹ and WANG Peijuan²

(1. *Institute of Meteorological Sciences of Liaoning Province, Shenyang 110166, China*;

2. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: Drought is one of the main meteorological disasters in china, under the background of global climate and environment change, the frequency of extreme drought is on the rise. In this paper, the recent progress and applicability of drought monitoring using multi spectral satellite data and near ground hyperspectral data at home and abroad are summarized. On the basis of those studies, we can reach the following conclusions: (1) The drought monitoring model based on the theory of surface soil water and energy balance, and feature space are more suitable for low vegetation or bare soil area; (2) The drought monitoring model based on crop vegetation index is more suitable for the high vegetation coverage area, and needs long time series data; (3) There are differences in the spectral sensitive bands of drought monitoring based on the near ground hyperspectral data in the different developmental stages and different crops. The conclusions of this paper can provide reference for drought monitoring using multispectral and hyperspectral data.

Key words: drought; multispectral; hyperspectral; remote sensing monitoring; research progress