

# 农业干旱遥感监测指标及其适应性评价方法研究进展

黄友昕<sup>1</sup>, 刘修国<sup>1</sup>, 沈永林<sup>1\*</sup>, 刘诗诗<sup>2</sup>, 孙 飞<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)信息工程学院, 武汉 430074; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430074)

**摘 要:** 在利用遥感数据进行长时间、大范围农业干旱遥感监测过程中, 如何针对不同区域、不同作物生长阶段选取最合适的监测指标, 对于及时、准确地评估干旱对作物生长的影响, 实现合理水资源调度和有效抗旱减灾决策都具有重要意义。该文以遥感监测农业干旱的适应性为论述主线, 对常用的农业干旱遥感监测指标及其适应性评价方法, 从 4 个方面进行了系统归纳总结: 1) 国内外农业干旱监测适用的遥感卫星数据源; 2) 监测农业干旱适用的光谱敏感波段; 3) 农业干旱遥感监测指标自身的适用性与局限性; 4) 农业干旱遥感监测指标适应性的评价方法。在此基础上, 指出今后在农业干旱遥感监测指标及其区域适应性研究中, 需综合考虑作物与其生长环境之间的关系; 增加光谱信息, 降低遥感数据获取过程中的信噪比; 选择农业干旱遥感监测指标适宜的时空尺度; 重点解决部分植被覆盖时, 如何选择合适的监测指标; 加强高光谱技术在精细农业干旱遥感监测指标反演中的研究; 进一步在机理上发掘监测指标自身的敏感性和适应性等 6 方面的问题及发展趋势。

**关键词:** 农业; 干旱; 遥感; 监测指标; 适应性评价

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.025

中图分类号: S127; TP79

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-16-0186-10

黄友昕, 刘修国, 沈永林, 刘诗诗, 孙 飞. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.025 http://www.tcsae.org

Huang Youxin, Liu Xiuguo, Shen Yonglin, Liu Shishi, Sun Fei. Advances in remote sensing derived agricultural drought monitoring indices and adaptability evaluation methods[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 186—195. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.025 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

农业干旱是一种反复出现、无结构化的自然灾害<sup>[1]</sup>。在全世界所有土地上都经历过不同持续时间、不同强度、不同频率、不同空间范围的农业干旱事件, 造成农作物大面积减产绝收和巨大的经济损失<sup>[2]</sup>。如何有效地监测农业干旱, 选择适宜的监测指标, 及时准确地了解农业旱情发生、发展、消退情况已成为当地政府抗旱减灾部门和农业管理部门面临的一项紧迫的任务<sup>[3-5]</sup>。

目前, 国内在农业干旱监测预测方面主要依靠地面站点数据, 通过墒情站或气象站获取农作物的土壤湿度和降雨量等信息来划分旱情等级<sup>[5]</sup>。采用帕尔默干旱严重程度指数<sup>[6]</sup>、标准化降水指数<sup>[7]</sup>、Z 指数<sup>[8]</sup>等方法, 这些传统方法虽然真实性较高, 但监测精度受控于地面站的分布密度, 很难反映精细的农业干旱状况<sup>[9]</sup>, 且监测成本较高。近年来, 遥感技术以其客观、及时、经济、覆盖范围广、数据连续等优点, 弥补了地面站点的不足, 已

被证明是农业干旱监测中最具前景的技术手段<sup>[10-15]</sup>。目前, 国内外学者从不同的角度, 发展了大量的农业干旱遥感监测指数<sup>[10-11]</sup>, 为实现国家综合减灾与农业旱情监测奠定了基础。但是由于农业干旱遥感监测指数存在明显的时空适应性差异: 一方面在空间与时间上, 农业干旱分布与发展存在很大的差异; 另一方面在不同区域、不同作物生长阶段, 农作物所反映的农业干旱特征也不同<sup>[12-13]</sup>。2012 年, 孙灏等<sup>[10]</sup>通过比较 10 多种典型农业干旱遥感指数的适用范围, 建立了遥感干旱监测指数的分类体系; 同时指出农业干旱遥感监测指数的选取是目前遥感干旱指数应用所面临的主要难题。2013 年, 李华朋等<sup>[14]</sup>分析了 8 种植被绿度指数与植被水分指数在中国松嫩平原监测农业干旱的敏感性。2014 年, Ezzine 等<sup>[2]</sup>分析了 3 种遥感干旱指数在地中海半干旱区 2 种土地类型(雨养区和植被覆盖区)监测农业干旱的区域适应性。2015 年, 董婷等<sup>[15]</sup>比较了基于短波红外水分胁迫的 3 种指数, 在宁夏春小麦不同生长期干旱监测中的适应性。

已有研究通常采用单一遥感指数来监测区域干旱事件, 使部分地区的结果往往与实际情况大相径庭<sup>[12]</sup>。究其原因, 主要是未考虑遥感干旱监测指标的时空适应性。因此, 在利用遥感数据进行长时间、大范围农业干旱遥感监测过程中, 如何针对不同区域、不同作物生长阶段选取最合适的农业干旱遥感监测指标, 对于及时、准确地评估区域干旱对农作物生长的影响, 实现合理水资源调度和有效抗旱减灾决策都具有重要指导意义。本文以遥感监测农业干旱的适用性为论述主线, 对农业干旱遥

收稿日期: 2015-05-15 修订日期: 2015-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(41471355); 中国博士后科学基金面上资助(213M542086); 中央高校新青年教师科研启动基金(CUGL140834)

作者简介: 黄友昕, 女, 湖北天门人, 工程师, 博士生, 主要从事农业干旱遥感监测及空间信息处理的应用研究。武汉 中国地质大学(武汉)信息工程学院 430074。Email: yolandahyx@126.com

\*通信作者: 沈永林, 男, 湖北钟祥人, 讲师, 博士, 主要从事遥感应用研究。武汉 中国地质大学(武汉)信息工程学院, 430074。

Email: yonglinshen@gmail.com

感监测指标及其适应性评价方法, 从 4 个方面进行了系统归纳: 1) 国内外监测农业干旱适用的遥感卫星数据源; 2) 监测农业干旱的光谱敏感波段; 3) 农业干旱遥感监测指标自身的适用性与局限性; 4) 农业干旱遥感监测指标的适应性评价方法。在此基础上, 通过分析研究中存在的问题, 探讨了今后在农业干旱遥感监测指标及其适应性研究中应重点解决的问题及发展趋势。

## 1 国内外农业干旱监测适用的遥感卫星数据源

随着航空航天技术的发展, 国内外适用于农业干旱监测的遥感卫星数据源越来越丰富(表 1), 其对应的观测卫星及相应的传感器常用的有: 美国国家海洋和大气局气象观测卫星搭载的改进型甚高分辨率辐射仪(advanced very high resolution radiometer, AVHRR); 美国国家航空航天局的 Terra 和 Aqua 卫星上搭载的中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS); 陆地卫星(Landsat)系列搭载的多光谱扫描仪(thematic mapper, TM)、增强型专题制图仪(enhanced thematic mapper Plus, ETM+)、陆地成像仪(operational land imager, OLI)和热红外传感器(thermal infrared sensor, TIRS)等; 法国地球观测卫星系统(SPOT)搭载的宽视域植被探测仪(vegetation, VGT); 热带降雨测量卫星(tropical rainfall measuring mission satellite, TRMM)搭载的降雨雷达(precipitation radar, PR)、微波成像仪(TRMM microwave image, TMI)、可见光和红外扫描仪(visible and infrared scanner, VIRS)等 5 个传感器; 地球观测卫星(earth observing 1, EO-1)搭载的高光谱成像光谱仪(Hyperion); ALOS 卫星(advanced land observing satellite)搭载的相控阵型 L 波段合成孔径雷达(PALSAR); 欧空局对地观测卫星 ENVISAT 上搭载的先进的合成孔径雷达(advanced synthetic aperture radar, ASAR)传感器; 中国环境减灾卫星 HJ-1A/B 搭载的宽覆盖多光谱 CCD(charge coupled device)相机、超光谱成像仪(hyper spectral imager, HSI)和红外相机(infrared scanner, IRS)等。

农业干旱遥感监测数据源的选择主要是依据实用、经济、精度需求等因素而决定。AVHRR、MODIS、TM/ETM+、VGT、SAR 传感器数据, 以及 HJ 和 TRMM 卫星数据等被广泛应用于农业干旱监测与预测<sup>[16-22]</sup>。Fensholt 等<sup>[16]</sup>指出 AVHRR 的全球植被指数变化数据、Terra-MODIS 和 SPOT-VGT 的光谱波段是专门被设计服务于农业监测的。Toukiloglou 等<sup>[17]</sup>比较了 AVHRR、MODIS 和 SPOT-VGT 等传感器在农业干旱监测中的应用, 研究表明: MODIS 传感器最优, 其次是 SPOT-VGT 传感器, 最后是 AVHRR 传感器。鲍艳松和杨涛等<sup>[18-19]</sup>指出 SAR 对于下垫面土壤湿度反演, 以及全天候农业干旱监测是一种不可或缺的重要数据源。冯海霞等<sup>[20]</sup>指出 HJ-1A/B 数据在中国西南地区旱情变化监测中具有很好的应用潜力。Nichol 和 Du 等<sup>[21-22]</sup>指出整合 AVHRR、MODIS 数据与基于微波雷达遥感技术的 TRMM 降水数据, 可以弥补基于单一影像图参数带来的

潜在不确定性, 综合多源遥感数据源监测农业干旱是很有潜力的。

表 1 主要应用于农业干旱监测的遥感卫星数据源  
Table 1 Satellite remote sensing data sources used mainly in agricultural drought monitoring

传感器 Sensor	卫星 Satellite	空间分辨率 Spatial resolution	数据时间 Data time	重访周期 Revisit period
AVHRR	NOAA	1 km	1989 年至今	1 d
AVHRR	NOAA	8 km	1982—2006	1 d
MODIS	Terra	250 m, 500 m, 1 km	2000 年至今	1~2 d
MODIS	Aqua	250 m, 500 m, 1 km	2002 年至今	1~2 d
TM	Landsat5	30 m	1982—2011	16 d
ETM+	Landsat7	15 m, 30 m, 60 m	1999 年至今	16 d
OLI/TIRS	Landsat8	15 m, 30 m	2013 年至今	16 d
VGT	SPOT4-5	1.15 km	1999 年至今	1~2 d
PR/TMI/VIRS	TRMM	0.25°, 0.5°, 1°, 5°	1997 年至今	按纬度计算
Hyperion	EO-1	30 m	2000 年至今	16 d
PALSAR	ALOS	10 m	2006 年至今	>24 h
ASAR	ENVISAT-1	10 m, 30 m, 150 m, 1 km	2002—2012	1~3 d
CCD/HSI/IRS	HJ-1A/B	30 m, 100 m, 150 m, 300 m	2008 年至今	2~4 d

## 2 国内外农业干旱监测适用的光谱敏感波段

作物波谱反射是农业干旱遥感监测的基础。国内外学者, 基于适用于农业干旱监测的遥感卫星传感器接收的光谱信息, 进行了大量研究, 以寻找反映农业干旱的敏感光谱波段(表 2)。农业干旱遥感监测通常可从大气降雨量、土壤含水量、作物干旱生理与形态以及综合信息等 4 方面来观测。

1) 大气降雨量方面: 星载测雨雷达通过发射微波信息, 接收降雨层反射的回波信息而间接得到被测地区的降雨率, 在 Ku 和 Ka 频率波长范围内对降雨探测灵敏<sup>[23]</sup>。TRMM-PR 设计为 13.8 GHz, 双频的 PR 设计为 13.6 和 35.5 GHz, 被广泛应用于干旱降水监测<sup>[23-24]</sup>。

2) 土壤含水量方面: 土壤水分吸收光谱反射率曲线在 400~2500 nm 区间随波长增加变化明显<sup>[25-30]</sup>, 并且在 1400、1900 和 2100 nm 附近达到峰值<sup>[25]</sup>。Prices<sup>[26]</sup>研究指出红光(Red, R)、近红外(near infrared reflection, NIR)、短波红外(short-wave infrared reflection, SWIR)可描述土壤光谱变化 99.6%的信息。Liu 等<sup>[27]</sup>选择了 7 个波段, 探讨了土壤光谱和土壤水分的关系, 发现在低于一定的土壤水分临界值时, 土壤光谱反射率随土壤湿度的增加而降低, 高于临界值后反射率随土壤水分的增加而增加, 二者之间存在非线性关系。另外, SAR 的 C 波段与 L 波段在土壤含水量监测与反演中也具有很好的应用潜力<sup>[18,28]</sup>。

3) 作物干旱生理与形态变化方面: ①冠层植被含水量(vegetation water content, VWC)变化: 主要的敏感波段集中在强叶绿素吸收区域 R 波段, 植被冠层水分强反射的 NIR 和 SWIR 波段, 即 0.7~2.5  $\mu\text{m}$  之间<sup>[31-36]</sup>。Tucher<sup>[31]</sup>首次提出了在 1.5~1.75  $\mu\text{m}$  光谱区间, 最适合监测 VWC 状况; Gao 和 Ceccato 等<sup>[32-34]</sup>指出在 NIR 和 SWIR 波段对 VWC 有超过 50%的变化响应; ②作物冠层温度变

化:敏感波段范围集中在热红外波段(8~14  $\mu\text{m}$ ), 通常 AVHRR 的第 4、5 波段和 MODIS 的第 29、31、32 波段常被用于监测冠层温度的变化<sup>[37-39]</sup>; 而且 AVHRR 的第 4 波段受大气的水蒸汽影响较小<sup>[39]</sup>, 被选择应用更多; ③作物形态及绿度变化:敏感波段主要集中在 VIS(450~680 nm) 和 NIR(725~110 nm) 附近<sup>[40-44]</sup>, 先前的研究证明这 2 个波段不同的线性组合方式与植被叶面积指数、植被绿度的覆盖程度(在不同地域的地理资源特征下)<sup>[40]</sup>是紧密相关的。也有研究表明微波 6.9、10.7、18.7 GHz 频率波段也能较好地反映植被因干旱而发生的形态变化<sup>[43-44]</sup>。

4) 综合观测多参量信息方面:由于农业干旱是一种复杂的现象, 目前大量的研究还集中在结合多波段信息, 综合观测作物与其生长环境等多参量来监测作物干旱。Kogan、Sandholt 和王鹏新等<sup>[45-47]</sup>基于 NOAA 数据, 结合 VIS、NIR 和 TIR 信息, 综合观测冠层温度与植被形态变化; Du 等<sup>[49]</sup>结合 MW、R、NIR 和 TIR 信息, 综合观测降雨量、冠层温度与植被形态变化; Gu 等<sup>[48]</sup>基于 MODIS 数据, 发现综合 R、NIR 和 SWIR 波段信息, 观测植被形态与冠层含水量变化具有很好的潜力。

表 2 监测农业干旱的相关敏感光谱波段

Table 2 Relevant sensitive spectral bands of agricultural drought monitoring

观测参量 Observed parameter	光谱敏感波段 Sensitive spectrum wave/nm	作者(时间) Author (publication date)
大气降雨量	MW(13.6 35.5 GHz)	商建(2012) <sup>[23]</sup>
	MW(13.8 GHz)	Naumann(2014) <sup>[24]</sup>
	SWIR(1400, 1900, 2200)	Bowers(1965) <sup>[25]</sup>
土壤含水量	R(630~740), NIR(930~1130), SWIR(1610~1800, 2030~2310)	Prices(1990) <sup>[26]</sup>
	VIS(450, 574), NIR(986), SWIR(1400, 1672, 1998, 2189)	Liu(2002) <sup>[27]</sup>
	R(620~670), NIR(841~876)	Ghulam(2007) <sup>[29-30]</sup>
	MW(1.1~1.7 GHz)	Jackson(1999) <sup>[28]</sup>
	MW(4~8 GHz)	鲍艳松(2010) <sup>[18]</sup>
	SWIR(1500~1750)	Tucher(1980) <sup>[31]</sup>
作物冠层 含水量	NIR(860), SWIR(1240)	Gao(1996) <sup>[32]</sup>
	NIR(820), SWIR(1600)	Ceccato(2002) <sup>[33-34]</sup>
	VIS(630~690, 580~680), NIR(780~900, 720~1100), SWIR(1550~1750)	Jackson(2004) <sup>[35]</sup>
	R(648), NIR(858), SWIR(1640, 2130)	Chen(2005) <sup>[36]</sup>
	TIR(10500~11300, 11500~12500)	Jackson(1981) <sup>[37]</sup>
	TIR(8600, 11000, 10780~11280, 11770~12270)	Kogan(1995) <sup>[38]</sup> 孙亮(2011) <sup>[39]</sup>
作物冠层 温度	VIS(550~680), NIR(725~1100)	Kogan(1990) <sup>[40]</sup>
	B(469), R(645), NIR(858)	Son(2012) <sup>[41]</sup>
	R(620~670), NIR(841~876), B(459~479), G(545~565)	王先伟(2014) <sup>[42]</sup>
	MW(6.9, 10.7, 18.7 GHz)	Shi(2008) <sup>[43]</sup> 王永前(2014) <sup>[44]</sup>
	VIS(550~680), NIR(725~1100), TIR(10 300~11 300)	Kogan(2001) <sup>[45]</sup> Sandholt(2002) <sup>[46]</sup> 王鹏新(2003) <sup>[47]</sup>
	R(645), NIR(857), SWIR(2130)	Gu(2007) <sup>[48]</sup>
综合信息	MW(13.8 GHz), B(469), R(645), NIR(858), TIR(11003, 12020)	Du(2013) <sup>[49]</sup>

注: VIS 指可见光谱, B 指蓝光, G 指绿光, TIR 指热红外波段, MW 指微波; 除了带有 GHz 的波段, 其他波段单位均为 nm。

Note: VIS denotes visible spectrum, B denotes blue light, G denotes green light, TIR denotes thermal infrared reflection, and MW denotes microwave; Except for the bands with unit of GHz, unit of other bands is nm.

### 3 农业干旱遥感监测指标自身的适用范围

农业干旱是由于长时间降水异常短缺、土壤水分不能满足农作物水分需求, 致使农作物正常生长受到胁迫, 进而导致作物生物量和产量减少的现象<sup>[1]</sup>。因此, 农业干旱主要是由于环境供水与作物需水不平衡导致<sup>[11]</sup>。本文仅对基于遥感技术的农业干旱监测指标的自身适用性及局限性进行讨论, 包括如下 3 类: 环境供水指标(降雨量和土壤含水量指标)、作物需水指标(作物生理和形态指标)以及综合干旱指标<sup>[5, 10-11]</sup>。

#### 3.1 降雨量遥感监测指标

降水是农田水分的主要来源, 是影响干旱的主要因素之一<sup>[5]</sup>。干旱区降水明显地影响甚至支配着农作物的布局及其产量的高低。降雨量指标一般从地面站获取, 但随着微波雷达遥感技术的发展, 特别是测雨雷达的发展, 从卫星传感器上便可连续地对大气降水情况进行估测, 许多学者开始把遥感降雨量数据应用到干旱监测研究领域<sup>[49-51]</sup>。嵇涛等<sup>[50]</sup>认为 TRMM 卫星降雨量数据的精度已基本接近气象站点观测的雨量数据, 完全可用于降水有关的研究与分析。Du 等<sup>[49]</sup>基于 TRMM 3B43 数据提出了条件降雨指数(precipitation condition index, PCI), 它可用于农业干旱降水量亏缺程度监测。另外, 基于 TRMM 数据的标准降雨指数(standardized precipitation index, SPI), 在 1~3 个月小尺度常被用于农业干旱监测<sup>[7]</sup>; 基于 TRMM 逐月降水量数据和单站干旱监测 Z 指数方法构建的 TRMM-Z 指数, 适用于大范围干旱时空变化监测<sup>[51]</sup>。

#### 3.2 土壤含水量遥感监测指标

农作物生长的水分主要是靠根系直接从土壤中吸取的, 土壤含水量不足或过剩都会直接影响农作物的正常发育, 农业干旱常以实时监测的土壤含水率来判定旱情的程度<sup>[5, 10]</sup>。土壤含水量遥感监测指标常用的有 4 种: ①基于热红外波段的热惯量方法: Prices<sup>[52]</sup>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, 提出了表观热惯量法(apparent thermal inertia, ATI); 它利用卫星热红外辐射温度差计算热惯量, 从而估算土壤水分。ATI 在每年的 11 月到次年的 3 月间是最佳观测时间, 它的缺点是只适用于裸露土壤或植被覆盖度低的时候, 且需要该地区昼夜两次的晴空卫星资料。②基于归一化植被指数(normalized different vegetation index, NDVI)与地表温度(land surface temperature, LST)的特征空间方法: Price<sup>[53]</sup>发现遥感资料获得的 NDVI 和 LST 为纵横坐标的散点图呈三角形, Carlson 等<sup>[54]</sup>基于特征空间 LST-NDVI 提出了植被供水指数(vegetation supply water index, VSWI); Moran 等<sup>[55]</sup>从能量平衡双层模型的理论角度分析, 认为 NDVI 与 LST 的散点图呈梯形关系, 提出了水分亏缺指数; Sandholt<sup>[46]</sup>发现 LST-NDVI 的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); 王鹏新等<sup>[47]</sup>为了解决在某一特定时期内, 不同指数在像素尺度上监测结果的可比性差的问题, 基于 LST-NDVI 特征空间, 提出了条件植被温度指数(vegetation temperature condition

index, VTCI), 但研究区域要求满足土壤表层含水量从萎焉含水量到田间持水量条件。LST-NDVI 特征空间方法的缺点是受到如地表土壤类型等诸多因素影响; 在 LST 与 NDVI 计算过程中, 当数据来源于多个传感器 (如 AVHRR、MODIS、TM/ETM+、SPOT-VGT、SAR 等) 时, 许多有用的信息可能在重采样、大气校正、混合像元分解等过程中丢失, 导致干旱定量监测结果可能会夸大<sup>[46]</sup>。③基于反射率光谱特征空间方法: Ghulam 等<sup>[29]</sup>直接利用 R 与 NIR 波段在植被冠层和裸土的强吸收与强反射优势, 构建基于 NIR-R 光谱特征空间的垂直干旱指数 (perpendicular drought index, PDI)。PDI 被广泛应用于土壤水分的空间分布特征分析, 尤其适用于裸土, 但对农田地表覆盖类型发生变化, 即从裸土变化到浓密植被过程中的监测土壤水分存在一定局限性。为此, Ghulam 等<sup>[30]</sup>在 PDI 的基础上, 综合考虑土壤水分和植被生长过程, 提出了改进的垂直干旱指数 (modified perpendicular drought index, MPDI)。试验证明 MPDI 比 PDI 与原始干旱值 (同步于卫星过境时的农田实测数据) 的相关系数更高, 且在不同植被覆盖度下的监测效果更好。④微波遥感监测土壤湿度法: 热惯量和特征空间方法都是基于 VIS、NIR 及 TIR 波段, 但当地球表面被云层覆盖时, 这些方法则变得无能为力。而微波对云层有较强的穿透力, 且土壤的介电特性和土壤含水量密切相关, 因此微波遥感在土壤水分监测中具有某些独特的优越性。目前有 2 种常用的测量方法: 一是采用成像雷达的主动微波方法: Moereman 等<sup>[56]</sup>利用欧空局遥感卫星的 SAR 影像, 监测了田间和区域 2 个尺度的土壤含水量, 认为裸地及植被稀疏地区的近地表土壤含水量与后向散射系数有很高的相关性; 鲍艳松等<sup>[18]</sup>基于 ASAR 数据和地面调查数据, 研究 ASAR 后向散射数据与土壤湿度及冬小麦结构参数之间的关系, 构建了冬小麦不同生育期的土壤湿度反演模型, 但该方法监测土壤水分常受地表粗糙度影响很大。二是基于微波辐射计的被动微波方法: Richard<sup>[57]</sup>提出了微波极化差指数 (microwave polarization difference index, MPDI), 它可直接利用微波辐射计获得亮度、温度反演土壤水分, 提高了在中等植被覆盖地区的土壤水分反演能力。王磊等<sup>[58]</sup>改进了 Richard 提出的 MPDI 指数中的植被消光系数, 提出了一种自动区分地面植被覆盖度的方法, 从而提高了反演精度。但由于微波复杂的理论模式, 需要许多的输入参数, 使得微波反演实用化变得困难<sup>[4]</sup>。

### 3.3 作物需水遥感监测指标

作物干旱需水往往通过作物的形态和生理变化来反映<sup>[5]</sup>。基于作物生理和形态特征的突变而建立的农业干旱遥感监测指标大致可分为 2 类 (见表 3): ①作物形态与绿色遥感监测指标: 它利用作物长势、长相来定性诊断作物缺水情况; ②作物生理指标: 包括冠层含水量、冠层温度、气孔导度、产量等生理特征来反映。目前, 冠层含水量与冠层温度遥感反演研究得到了人们的普遍关注。

#### 3.3.1 作物形态与绿色遥感监测指标

当植被受水分胁迫时, 作物绿色特征 (叶绿素含量、叶面积指数及植被活力等) 均会发生相应的变化<sup>[14]</sup>。作物形态与绿色遥感监测指数一般基于 VIS 和 NIR 的组合构建, 其原理是植被活性叶片在 VIS 波段吸收 70%~90% 红光, 在 NIR 波段有强反射, 建立这两个波段的线性或非线性关系, 可定量描述绿色作物的丰度、覆盖度等<sup>[47]</sup>。因此, 这些遥感监测指数与反演的土地表面绿色度与植被生长状态密切相关, 可用于对作物生长不利的干旱环境条件监测<sup>[40,59-63]</sup>。其中 NDVI 是使用最为广泛的植被绿色遥感监测指数。Gutman 等<sup>[59]</sup>通过研究全球的 NDVI 年际间的变化规律与降雨量、大气循环之间的关联关系, 发现 NDVI 的月尺度变化可以对极端的天气 (如旱灾与洪涝) 进行监测。Peters 等<sup>[60]</sup>对北美大草原 1989—2000 年的 NDVI 值分析表明, NDVI 与每月或每年的干旱因素 (降雨量) 有很高的相关性; 且能很好地对旱情范围和强度进行动态监测。基于 NDVI 还衍生了许多植被遥感监测指数, 包括土壤校正植被指数 (soil adjusted vegetation index, SAVI)<sup>[61]</sup>、增强植被指数 (enhanced vegetation index, EVI)<sup>[62]</sup>、距平植被指数 (anomaly vegetation index, AVI)<sup>[63]</sup>、条件植被指数 (vegetation condition index, VCI)<sup>[40]</sup>、标准植被指数 (standardized vegetation index, SVI)<sup>[60]</sup>等。应用研究表明, 这些植被指数常被应用于制作年际间植被动态和干旱监测图。

#### 3.3.2 作物冠层含水量遥感监测指标

冠层 VWC 与水分胁迫有直接关系, 可用作表征作物旱情的指标<sup>[31-36]</sup>。由于 SWIR 对 VWC 的敏感, 结合 NIR 与 SWIR 波段的线性组合方法常被用于监测 VWC。Gao 等<sup>[32]</sup>基于 NIR 与 SWIR 波段, 提出了归一化差异水分指数 (normalized difference water index, NDWI), 因这 2 个波段均位于植被冠层的高反射区, 可灵敏地反映 VWC。Chen 等<sup>[36]</sup>利用 NDWI 监测玉米和大豆的 VWC, 结果显示玉米的 VWC 与 NDWI 有较好线性关系, 而大豆的 VWC 与 NDWI 的线性关系相对较差, 虽然 NDWI 能有效地指示植被的 VWC, 但不同作物冠层含水量有较大的差别。Ceccato 等<sup>[33-34]</sup>将 VWC 敏感性研究从区域尺度扩展到全球尺度, 提出了全球植被水分指数 (global vegetation moisture index, GVMI)。该指数被证明在监测全球 VWC 时具有及时、可操作性强的特点。

#### 3.3.3 作物冠层温度遥感监测指标

冠层温度作为作物旱情的生理指标的理论基础是: 当植物受到水分胁迫时, 气孔将关闭, 以减少蒸腾失水, 这将导致潜热通量减少<sup>[38-39]</sup>。根据能量平衡原理, 显热通量增加, 从而导致叶片温度增加, 最终导致冠层温度升高<sup>[54]</sup>。因此, 基于 TIR 通道信息可构建作物冠层温度遥感监测指标。Kogan<sup>[39]</sup>认为在某种情况下, 仅用 VCI 监测干旱的精确度是不够的, TIR 通道也可以接收额外的干旱信息, 然后提出了条件温度指数 (temperature condition index, TCI)。Idso 等<sup>[37]</sup>认为作物在潜在蒸发条件的冠层 (叶片) 温度与空气温度差, 与空气饱和水汽压差具有线性关系, 提出了

作物缺水指数 (crop water stress index, CWSI), 但是不同作物之间这种线性关系存在差异。McVicar 等<sup>[64]</sup>为了去除季节性变化影响, 提出了归一化差异温度指数

(normalized difference temperature index, NDTI)。基于冠层温度的方法主要缺点是很难正常化每日气象条件, 如净辐射、气温、风速度等影响每天冠层温度的测量。

表 3 农业干旱作物需水遥感监测指标自身的适用性和局限性

Table 3 Adaptations and limitations of agricultural drought monitoring indices derived from remote sensing of crop water requirement

干旱监测参量 Drought monitoring parameter	遥感指标名称 Remote sensing indicator	光谱波段 Spectral band	指标适用性描述 Adaptations described	指标局限性描述 Limitations described	文献 Reference
作物形态及绿度	归一化植被指数 (NDVI)	R, NIR	能定量描述绿色植被的丰度、覆盖度和作物长势, 适用于有植被覆盖地区。	受植被、土壤类型、地形与大气等因素影响; 在高生物量覆盖区存在探测饱和问题; 有时时间滞后性。	[59-63]
	土壤校正植被指数 (SAVI)	R, NIR	去除了土壤背景信息的影响。	需研究不同植被冠层和植被覆盖度下土壤校正系数的变化。	[61]
	增强植被指数 (EVI)	R, NIR	考虑了植被辐射量和植被生物量密度两方面, 能解决 NDVI 在高生物量覆盖区易饱和问题。	仅适合于有植被覆盖度区域监测, 不适用于裸土。	[62]
	标准植被指数 (SVI)	R, NIR	描述了植被生长状况偏离正常值的概率, 适用于短期监测植被对气候条件响应。	缺乏对于干旱灾害或其他灾害的区分判断能力。	[60]
	距平植被指数 (AVI)	R, NIR	适合于旬、月、年尺度监测, 可反映植被年际间的变化, 及短期天气对植被的影响。	存在不同时间、不同地点获得的光谱数据同化问题。	[63]
	条件植被指数 (VCI)	R, NIR	消除了 NDVI 的空间变异, 具有不同地区间的可比性; 适用于有植被覆盖的区域。	对农业干旱有不同的滞后效应, 需长时间序列的遥感数据。	[40]
作物冠层含水量	归一化差异水分指数 (NDWI)	NIR, SWIR	能较好反演植被冠层的水分含量。	不适用于作物生长前期或植被覆盖度低的情况, 有时时间滞后性。	[32]
	全球植被水分指数 (GVMI)	NIR, SWIR	该指数不易受到大气噪声的影响; 当 LAI $\geq 2$ 时, 冠层 EWT 在 0~2100g/m <sup>2</sup> 之间时, 对冠层 EWT 敏感, 易于获取冠层植被含水量。	对 LAI 与 EWT 的阈值有要求; 不适用于小尺度区域旱情监测。	[33-34]
作物冠层温度	条件温度指数 (TCI)	TIR	强调温度与植物生长的关系, 只需要某一时间序列白天热红外遥感数据。	未考虑气象条件对热红外的影响及地面温度的季节性变化。	[39]
	作物缺水指数 (CWSI)	TIR	综合考虑了冠层温度及冠层与大气的微气象条件, 适于植被覆盖度高及部分覆盖区旱情监测。	冠层上空的气象资料依赖于地面站提供 (要求同步于卫星过境时的实测数据), 计算中的参数难于获取。	[37]
	归一化差异温度指数 (NDTI)	TIR	与 CWSI 类似, 去除了气象条件季节变化的影响, 适用于部分及高植被覆盖度地区。		[64]

注: LAI 指叶面积指数; EWT 指等价水厚度。

Note: LAI refers to the leaf area index; EWT refers to the equivalent water thickness.

### 3.4 作物综合旱情遥感监测指标

作物综合旱情遥感指标是综合降雨量、土壤含水量、作物冠层含水量、冠层温度及作物形态与绿度等遥感指标衍生的指标, 综合反映作物干旱的多特征性。目前, 有更多的学者从融合各遥感指标的特色与优点出发, 综合考虑作物生长环境 (土壤、气候等)、作物形态和作物生理 (冠层温度和含水量等) 相关指标来反映农作物干旱的状况。如: Kogan 等<sup>[45]</sup>结合作物形态指标 (VCI) 与冠层温度指标 (TCI) 二者的优势, 提出健康植被指数 (vegetation health index, VHI), 它适用于监测与预测干旱对作物生长的影响。VHI 可提前约 4~6 周预测干旱状况, 从而诊断作物收成情况。Gu 等<sup>[48]</sup>结合了作物形态指标 (NDVI) 与冠层含水量指标 (NDWI) 二者的优势, 提出了归一化干旱指数, 它适用于植被整个生长期的长势与冠层含水量变化监测; Du 等<sup>[49]</sup>综合了降雨量指标 (PCI)、植被形态指标 (VCI) 与冠层温度指标 (TCI), 提出了综合干旱指数 (synthesized drought index, SDI); 且 SDI 在中国山东省的区域农业干旱监测中执行效果较好。还有很多学者, 不仅综合多遥感指标的特色, 还引入气象参数、作物生物量或生理模型等, 提出了许多综合性农业干旱遥感指数<sup>[65-67]</sup>, 这些指数被证明更适用于不同区域的农业干旱监测。

## 4 农业干旱遥感监测指标的适应性评价方法

农业干旱遥感监测指数往往是建立在特定的地域或时间范围内, 具有明显的时空适应性差异<sup>[12-13]</sup>。如何根据不同区域、不同作物生长阶段选取适合的指标, 是精确评估和监测农业干旱的基础<sup>[65]</sup>。目前, 对农业干旱遥感指数适应性评价方法已有大量的研究, 大致可归纳为 2 类: (1) 基于光谱特征匹配的适应性评价方法, 它主要针对单一农业干旱遥感监测指数的适应性评价。(2) 基于作物生长影响因子的多元统计分析评价方法, 它主要针对多个遥感指数的适应性评价。其中, 这些环境影响因子主要包括气象因子<sup>[2,68]</sup> (如降雨量、水平衡参数)、土壤水分因子<sup>[4,12]</sup>以及大气特征因子等。

### 4.1 基于遥感指数自身的光谱特征匹配评价方法

农业干旱遥感监测模型的建立均来源于 VIS、NIR、SWIR、TIR 和 MW 等多种波段信息, 这些监测指数或模型都有各自的适应条件 (参见表 2)。因而, 评价单个遥感指数的区域适应性时, 国内外学者常常基于遥感指数自身的光谱特征匹配方法来评价。Gao 等<sup>[32]</sup>采用光谱匹配法, 研究指数 NDWI 对不同深度液态水传输变化、不同植被的覆盖度、大气的水蒸汽、叶片层数、不同土地类型 (裸地、草地、灌溉区作物等) 的光谱波段变化特



征, 来分析该指数监测研究区农业干旱的适应性。Kogan 等<sup>[39-40]</sup>基于时间序列的植被绿度与冠层温度光谱信息, 来评价 VCI 与 TCI 指数在监测区域干旱的持续时间、强度、影响范围、频率以及对农作物产量的影响上的不同。Huete 等<sup>[61-62]</sup>根据植被光谱特征随不同植被覆盖度、不同土壤含水量的变化, 来评价 SAVI 监测干旱的区域适应性。Ghulam 等<sup>[29-30]</sup>基于 NIR-R 光谱特征空间, 分析土壤水分的分布特征, 从而评价 PDI 与 MPDI 在不同植被覆盖度下和不同区域的干旱监测适应性。Sandholt 和王鹏新等<sup>[46-47]</sup>基于 LST-NDVI 光谱特征空间, 分析表层土壤水分变化趋势, 从而评价 TVDI 与 VTCI 在农业干旱监测中的区域适应性。

#### 4.2 基于作物生长影响因子的多元统计评价方法

基于作物生长环境影响因子的多元统计方法, 即根据研究区的不同时空区划, 比较与分析多个农业干旱遥感监测指数与作物生长环境影响因子的紧密联系。国内外学者常利用多元统计方法, 分析两者的显著性与相对误差的值来评价指标的区域适应性。

##### 4.2.1 基于土壤水分因子的多元统计分析

冯海霞等<sup>[20]</sup>以站点实测的土壤含水率为基准, 利用相关分析, 探讨了基于 HJ-1A/1B CCD 数据的 PDI、MPDI 指数在西南喀斯特地区监测旱情的潜力。结果表明: PDI 与 MPDI 可实现对旱情变化的快速监测, 且 MPDI 对干旱变化的响应比 PDI 更敏感。张洁等<sup>[68]</sup>基于线性回归分析, 对比分析 VSWI、E-VSWI (基于 EVI 的 VSWI)、归一化多波段指数等 3 个指数, 在华北平原中部地区的冬小麦从返青到成熟期内, 通过“显著性”检验, 判断哪个指数更适合该区域该时段的农业干旱监测。郑有飞等<sup>[69]</sup>利用回归拟合方法, 以不同深度 (10、20、50 cm) 的土壤相对湿度为基准, 讨论了 ATI、VSWI 和能量指数等 3 个指数在黑龙江干旱监测中的适应性。结果表明能量指数在高植被覆盖和低植被覆盖 2 个时段监测效果均较好。Son 等<sup>[41]</sup>基于相关分析, 以改进型微波辐射扫描仪地球观测系统的土壤水分数据和 TRMM 降雨量为基准, 得出 TVDI 相比 CWSI 与这 2 个数据集的相关性更高; 且对土壤水分的胁迫更敏感, 能更好地适应于湄公河盆地农业干旱的季节性监测。刘宗元等<sup>[70]</sup>利用相关分析, 在不同的 6 个试验区, 针对玉米的不同生长阶段, 分析农业干旱参考指数与实测土壤相对湿度、作物蒸散量等的关系, 检验了该指数在西南地区玉米生育期监测干旱的适应性。牟伶俐等<sup>[12]</sup>利用相关性分析, 以实测土壤湿度为基准, 根据土壤类型、气候区划、农业区划等划分不同的试验基本单元, 比较了 VCI、TCI、NDWI、VHI 与作物健康指数等 5 个指数在全国不同区域不同时段时空适应性。

##### 4.2.2 基于气象因子的多元统计分析

Ezzine 等<sup>[2]</sup>利用相关性分析, 以实测降雨量 SPI 和谷物产量为基准, 比较 SVI、TRMM-SPI 和标准水分指数等 3 个农业干旱遥感指数, 在摩洛哥 2 种不同土地上 (雨养区和植被覆盖区) 的适应性; 同时利用 T 检验方法, 评价了 SVI、TRMM-SPI 与标准水分指数在不同的监测

干旱的空间一致性。研究结果表明: 这 3 个指数在雨养区的空间一致性较高; 其中标准水分指数在该研究区适应性最好。杜灵通等<sup>[51]</sup>基于相关分析方法, 以气象数据 SPI 为基准, 来评价 TRMM-Z 指数在黄淮海平原冬小麦主产区监测干旱的适应性。王先伟等<sup>[42]</sup>利用相关分析, 以多尺度的 SPI 为基准, 比较了基于 MODIS 反射率数据提取的 8 种干旱指数 (NDVI、NDWI、EVI、大气阻抗植被指数、标准红外差异指数、简单比例指数等) 对中国西南四省市 (四川、重庆、云南和贵州) 干旱事件监测的适应性。研究结果表明: 3 个月和 6 个月尺度的 SPI 对该区的典型干旱事件监测效果较好; 而且 MODIS 标准红外差异指数的距平值与 3 个月尺度的 SPI 相关性最高。Shahabfar 等<sup>[71]</sup>为了研究 PDI、MPDI、VCI 与 EVI 等指数在伊朗的 6 个不同气候区域的适应性, 将这 4 个指数与 5 个水平衡参数 (包括气候水平衡、作物水平衡、每月参考作物蒸散、作物蒸散和灌溉水需求) 做相关性分析, 研究表明 PDI 和 MPDI (相比 VCI 与 EVI) 与水平衡参数在统计上具有重要的相关性, 尤其是夏季更明显; Shahabfar 等<sup>[72]</sup>在进一步研究 PDI、MPDI 与气象干旱指数的相关性表明: PDI、MPDI 与区域地面干燥度和干旱状况在统计上有重要的相关性; 且 PDI 在裸地或早期植被生长阶段执行较好, MPDI 则在植被覆盖区监测效果更好。

## 5 问题与发展趋势

综上所述, 国内外学者在针对农业干旱遥感监测指标的适应性研究方面, 从适用的遥感数据源、光谱敏感波段、到指标自身机理的适用性, 再到适应性的评价方法, 都进行了大量的探索, 并取得了一定进展与成果。但是, 在实用化与业务化方面指标适应性研究还存在一定距离, 分析其原因主要存在以下问题, 仍需深入研究。

1) 根据不同区域、不同作物生长时期, 综合考虑作物与其生长环境之间的关系

当作物受旱时, 常通过一定的生理和形态变化来反映, 但造成作物生理和形态变化的原因不仅仅是干旱。因此, 农业干旱监测之前, 需首先判断农作物是否受旱。同时, 农业干旱主要取决于土壤的供水能力和作物的生理特征<sup>[11]</sup>, 这一特征需综合考虑区域、作物与生长阶段 3 个重要因素。因而, 需根据不同区域特征、不同作物的不同生长阶段 (或季节性), 综合考虑作物与其生长环境之间的关系。针对这一问题, 需要深入研究各不同农业干旱遥感监测指标与所处生长环境属性 (如: 降雨量、土壤湿度、作物物候期、作物产量等) 之间的密切关系, 进而研究指标的区域适用性。

2) 增加光谱信息, 降低遥感数据获取过程中的信噪比  
在获取遥感数据时, 常存在许多不确定因素 (如: 传感器信息接收受到云层、水汽、汽溶胶、大气等<sup>[12]</sup>的影响), 尤其是在有云区域, 使得基于遥感技术的光谱信息并不一定能正确反映旱情程度<sup>[2]</sup>。因此, 在农业干旱遥感监测时, 可增加其他光谱信息或波段 (为了去除云、大气相关因子的影响等), 从而降低遥感数据获取过程

中的信噪比。否则基于光谱特征的农业干旱遥感监测指标,在监测农业旱情时精度将下降;而且也将无法精确地评价这些遥感监测指标的区域适应性。目前,2013 年发射的 Landsat8 的短波红外波段 Band 9 (1.36~1.39  $\mu\text{m}$ ) 可监测水汽强吸收特征,可用于云检测。

3) 重点解决部分植被覆盖时如何选取合适的监测指标  
下垫面的植被条件大致可分为 3 类:裸土、部分植被覆盖和全植被覆盖。对于裸土或植被生长早期,热惯量法、微波遥感和基于光谱特征空间的方法(如 PDI 等)都能得到较好的结果<sup>[29,52,58]</sup>;在全植被覆盖条件下,CWSI 和 VSWI 也比较适用<sup>[3,54]</sup>。但是,在部分植被覆盖条件下,如何选取合适的农业旱情遥感监测指标仍是一个值得研究的问题<sup>[3]</sup>,因为在农作物生长过程中,大部分时间均处于部分植被覆盖条件下。针对这一问题,需基于冠层能量平衡原理,进一步分析土壤和植被的热特性,界定在不同植被覆盖程度下,农业干旱遥感指标不同的适应性。

#### 4) 选择农业干旱遥感监测指标适宜的时空尺度

现在大多数农业干旱遥感监测指标的时间尺度为月或季(1~3 个月),少数的以旬、周或日为时间尺度。时间尺度越小,其所反映的干旱状况越精细,但计算量较大。因此,需根据研究目的寻求适宜的时间尺度。同时由于农业干旱在时空维上,存在持续渐进式的发展,没有明显的边界,每个地理网格中包含着作物学、气候学、地学等多种要素信息<sup>[12]</sup>。农业干旱在不同空间大小范围(如:样点尺度、区域尺度、全球尺度)适用的农业干旱遥感监测指数也不同。

针对这一问题,在选取或比较各农业干旱遥感监测指标的适应性时,需要根据研究目的,充分考虑各遥感指标蕴含的物理机理,合理选择农业干旱遥感监测指标的时间与空间尺度。

#### 5) 加强高光谱数据在精细农业干旱监测指标反演中的研究

高光谱遥感技术可以准确获得作物的精细光谱信息,从而能够精确地监测农作物的类型、长势、生长环境及生理生化特征等。当作物受到水分胁迫时,可利用高光谱技术监测作物的生理与形态变化,从精细的角度反演农业干旱监测指标和建立模型方法,对农业干旱监测的发展起到了积极的推进作用。因此,需要加强高光谱遥感技术在农业干旱监测指标反演中的研究。

#### 6) 进一步在机理上发掘监测指标自身的敏感性和适用性

农业干旱是一个受降水、土壤属性、温度、地形、作物自身的特性等多自然因素影响的自然现象<sup>[12]</sup>,但每类农业干旱遥感监测指标只是从某一侧面,如作物冠层含水量、作物冠层温度、作物形态及绿度或土壤含水量等方面对农业干旱的认知及相关致旱机理加以研究,而不能完整地表达农业干旱程度。因此,针对这一问题,需进一步在机理上发掘农业干旱遥感监测指标的敏感性与适用性。同时,今后可把遥感监测方法与多学科方法相结合<sup>[3,67]</sup>,综合考虑如何合理融合气象资料、土壤属性

及作物类型等辅助数据,以便更好地为农业旱情定量监测提供参考。

## 6 结 论

精确评估和监测农业干旱在某种程度上取决于选择合适的监测指标。尽管现在已开发了大量可行的农业干旱遥感监测指数,但由于农业干旱事件在不同区域的环境属性不同,没有一种单独的遥感监测指数能够充分反映所有区域的时空干旱状况。本文以遥感监测农业干旱的适应性为论述主线,对目前国内外农业干旱遥感监测指标及其适应性评价方法研究进展进行了系统总结,并将其归纳为 4 个方面,首先介绍了国内外监测农业干旱适用的遥感卫星数据源、以及光谱敏感波段;然后重点对 4 类农业干旱遥感监测指标自身的适用范围(适用的时间尺度、适用的植被覆盖度、适用的干旱监测参量等)进行了系统总结,包括环境供水指标(降雨量指标、土壤含水量指标)、作物需水指标(作物干旱形态和生理指标),以及综合干旱指标等;同时,总结了国内外农业干旱遥感监测指标的适应性评价方法。在此基础上,指出今后在农业干旱遥感指标的适应性研究中,需要重点解决的 6 个关键问题及发展趋势。

致谢:感谢评审专家及《农业工程学报》编辑部老师提出的许多宝贵意见,以及对问题的及时沟通;感谢中国地质大学(武汉)胡茂胜老师和徐世武老师给予的细心指导。

## [参 考 文 献]

- [1] Wilhite D A. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions[J]. Drought, A Global Assessment, 2000, 1: 3—18.
- [2] Ezzine H, Bouziane A, Ouazar D. Seasonal comparisons of meteorological and agricultural drought indices in Morocco using open short time-series data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 26: 36—48.
- [3] 李纪人. 旱情遥感监测方法及其进展[J]. 水文, 2001, 21(4): 15—17.  
Li Jiren. Method and advances of drought monitoring by remote sensing[J]. Hydrology, 2001, 21(4): 15—17. (in Chinese with English abstract)
- [4] 闫峰, 覃志豪, 李茂松, 等. 农业旱灾监测中土壤水分遥感反演研究进展[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 114—121.  
Yan Feng, Qin Zhihao, Li Maosong et al. Progress in soil moisture estimation from remote sensing data for agricultural drought monitoring[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(6): 114—121. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王密侠, 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, Cai Huanjie. Research progress in agricultural drought index[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998, 16(3): 119—124. (in Chinese with English abstract)
- [6] Palmer W C. Meteorological drought Research Paper No. 45[R]. Washington, DC: U.S. Weather Bureau, 1965: 1—58.
- [7] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// Boston: American Meteorological Society, 1993: 179—184.

- [8] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 523—529.  
Yuan Wenping, Zhou Guangsheng. Comparison between standardized precipitation index and Z-Index in China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(4): 523—529. (in Chinese with English abstract)
- [9] Heim J, Richard R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1149—1165.
- [10] 孙灏, 陈云浩, 孙洪泉. 典型农业干旱遥感监测指数的比较及分类体系[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 147—154.  
Sun Hao, Chen Yunhao, Sun Hongquan. Comparisons and classification system of typical remote sensing indexes for agricultural drought[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 147—154. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨绍镔, 闫娜娜, 吴炳方. 农业干旱遥感监测研究进展[J]. 遥感信息, 2010, 21(1): 103—109.  
Yang Shao'e, Yan Nana, Wu Bingfang. Advances in agricultural drought monitoring by remote sensing[J]. Remote Sensing Information, 2010, 21(1): 103—109. (in Chinese with English abstract)
- [12] 牟伶俐. 农业旱情遥感监测指标的适应性与不确定性分析[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006.  
Mu Lingli. Suitability and uncertainty analysis of agricultural drought indicator with remote sensing[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [13] 柳钦火, 辛晓洲, 唐聘, 等. 定量遥感模型、应用及不确定性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [14] 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.  
Li Huapeng, Zhang Shuqing, Gao Ziqiang, et al. Evaluating the utility of MODIS vegetation index for monitoring agricultural drought[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(3): 756—761. (in Chinese with English abstract)
- [15] 董婷, 孟令奎, 张文. MODIS 短波红外水分胁迫指数及其在农业干旱监测中的适用性分析[J]. 遥感学报, 2015, 19(2): 319—327.  
Dong Ting, Meng Linghui, Zhang Wen. Analysis of the application of MODIS shortwave infrared water stress index in monitoring agricultural drought[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(2): 319—327. (in Chinese with English abstract)
- [16] Fensholt R, Sandholt I. Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 87(1): 111—121.
- [17] Toukiloglou P. Comparison of AVHRR, MODIS and VEGETATION for land cover mapping and drought monitoring at 1 km spatial resolution[D]. Bedfordshire: Cranfield University, 2007.
- [18] 鲍艳松, 刘利, 孔令寅, 等. 基于 ASAR 的冬小麦不同生育期土壤湿度反演[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 224—232.  
Bao Yansong, Liu Li, Kong Lingyin, et al. Soil moisture estimation at various growth stages of winter wheat based on ASAR data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(9): 224—232. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杨涛, 宫辉力, 李小娟, 等. 土壤水分遥感监测研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6264—6277.  
Yang Tao, Gong Huili, Li Xiaojuan, et al. Progress of soil moisture monitoring by remote sensing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(22): 6264—6277. (in Chinese with English abstract)
- [20] 冯海霞, 秦其明, 蒋洪波, 等. 基于 HJ-1A/1B CCD 数据的干旱监测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(13): 358—365.  
Feng Haixia, Qin Qiming, Jiang Hongbo, et al. Drought monitoring based on HJ-1A/1B CCD data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(13): 358—365. (in Chinese with English abstract)
- [21] Nichol J E, Abbas S. Integration of remote sensing datasets for local scale assessment and prediction of drought[J]. Science of the Total Environment, 2015, 505: 503—507.
- [22] 杜灵通, 田庆久, 王磊, 等. 基于多源遥感数据的综合干旱监测模型构建[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 126—132.  
Du Lingtong, Tian Qingjiu, Wang Lei, et al. A synthesized drought monitoring model based on multi-source remote sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(9): 126—132. (in Chinese with English abstract)
- [23] 商建, 杨虎, 尹红刚, 等. 中国星载降水测量雷达首次校飞试验, 雷达性能指标分析[J]. 遥感学报, 2012, 16(3): 435—447.  
Shang Jian, Yang Hu, Yin Honggang, et al. First results from field campaign of spaceborne precipitation radar in China: Radar performance analysis[J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(3): 435—447. (in Chinese with English abstract)
- [24] Naumann G, Barbosa P, Carrao H, et al. Monitoring drought conditions and their uncertainties in Africa using TRMM data[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012, 51(10): 1867—1874.
- [25] Bowers S A, Hanks R J. Reflection of radiant energy from soils[J]. Soil Science, 1965, 100(2): 130—138.
- [26] Price J C. On the information content of soil reflectance spectra[J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 33(2): 113—121.
- [27] Liu W D, Baret F, Gu X F et al. Relating soil surface moisture to reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2—3): 238—246.
- [28] Jackson T J, Le Vine D M, Hsu A Y, et al. Soil moisture mapping at regional scales using microwave radiometry: The southern great plains hydrology experiment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2136—2151.
- [29] Ghulam A, Qin Q, Zhan Z. Designing of the perpendicular drought index[J]. Environmental Geology, 2007, 52(6): 1045—1052.
- [30] 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, 62(2): 150—164.
- [31] Tucker C J. Remote sensing of leaf water content in the near infrared[J]. Remote sensing of Environment, 1980, 10(1): 23—32.
- [32] Gao Bocai. 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.
- [33] Ceccato P, Gobron N, Flasse S, et al. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1: Theoretical approach[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82(2): 188—197.
- [34] Ceccato P, Flasse S, Gregoire J M. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82(2): 198—207.
- [35] Jackson T J, Chen D, Cosh M, 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(4): 475—482.



- [36] Chen D, Huang J, Jackson T J. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near-and short-wave infrared bands[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(2): 225—236.
- [37] Idso S B, Jackson R D, Pinter Jr P J, et al. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability[J]. *Agricultural Meteorology*, 1981, 24(81): 45—55.
- [38] Sun Liang, Sun Rui, Li Xiaowen, et al. Estimating evapotranspiration using improved fractional vegetation cover and land surface temperature space[J]. *Journal of Resources and Ecology (English Edition)*, 2011, 2(3): 225—231.
- [39] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection[J]. *Advances in Space Research*, 1995, 15(11): 91—100.
- [40] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(8): 1405—1419.
- [41] Son N T, Chen C F, Chen C R, et al. Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 18(2): 417—427.
- [42] 王先伟, 刘梅, 柳林. MODIS 光谱指数在中国西南干旱监测中的应用[J]. *遥感学报*, 2014, 18(2): 432—452.  
Wang Xianwei, Liu Mei, Liu Lin. Responses of MODIS spectral indices to typical drought events from 2000 to 2012 in southwest China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(2): 432—452. (in Chinese with English abstract)
- [43] Shi J, Jackson T, Tao J, et al. Microwave vegetation indices for short vegetation covers from satellite passive microwave sensor AMSR-E[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(12): 4285—4300.
- [44] 王永前, 施建成, 刘志红, 等. 微波植被指数在干旱监测中的应用[J]. *遥感学报*, 2014, 18(4): 843—867.  
Wang Yongqian, Shi Jiancheng, Liu Zhihong, et al. Application of microwave vegetation index in drought monitoring[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(4): 843—867. (in Chinese with English abstract)
- [45] Kogan F N. Operational space technology for global vegetation assessment[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(9): 1949—1964.
- [46] 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.
- [47] 王鹏新, 王 Zhengming, 龚健雅, 等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 527—533.  
Wang Pengxin, Wan Zhengming, Gong Jianya, et al. Advances in drought monitoring by using remotely sensed normalized difference vegetation index and land surface temperature products[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 527—533. (in Chinese with English abstract)
- [48] Gu Y, Brown J F, Verdin J P, et al. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central great plains of the united states[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(6): L06407.
- [49] Du Lingtong, Tian Qingjiu, Yu Tao, et al. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23(1): 245—253.
- [50] 嵇涛, 杨华, 刘睿, 等. TRMM 卫星降水数据在川渝地区的适用性分析[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(10): 1375—1386.  
Ji Tao, Yang Hua, Liu Rui, et al. Applicability analysis of the TRMM precipitation data in the Sichuan-Chongqing region[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 33(10): 1375—1386. (in Chinese with English abstract)
- [51] 杜灵通, 田庆久, 黄彦, 等. 基于 TRMM 数据的山东省干旱监测及其可靠性检验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2): 121—126.  
Du Lingtong, Tian Qingjiu, Huang Yan, et al. Drought monitoring based on TRMM data and its reliability validation in Shandong province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(2): 121—126. (in Chinese with English abstract)
- [52] Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: The limited utility of apparent thermal inertia[J]. *Remote sensing of Environment*, 1985, 18(1): 59—73.
- [53] 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.
- [54] 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(1/2): 161—173.
- [55] 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(3): 246—263.
- [56] Moeremans B, Dautrebande S. Soil moisture evaluation by means of multi-temporal ERS SAR PRI images and interferometric coherence[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 234(3): 162—169.
- [57] De Jeu R A M. Retrieval of land surface parameters using passive microwave remote sensing[D]. Amsterdam: Vrije Universiteit, 2003.
- [58] 王磊, 李震, 陈权. MPDI 在微波辐射计植被覆盖区土壤水分反演中的应用[J]. *遥感学报*, 2006, 10(1): 34—38.  
Wang Lei, Li Zhen, Chen Quan. The applications of MPDI during the soil moisture retrieval from radiometer in the region with vegetation cover[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(1): 34—38. (in Chinese with English abstract)
- [59] Gutman G, Ignatov A, Olson S. Global land monitoring using AVHRR time series[J]. *Advances in Space Research*, 1996, 17(1): 51—54.
- [60] Peters A J, Walter-shea E A, Ji L, et al. Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2002, 68(1): 71—75.
- [61] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI)[J]. *Remote sensing of environment*, 1988, 25(3): 295—309.
- [62] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. *Remote sensing of environment*, 2002, 83(1): 195—213.
- [63] 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.  
Chen Weiying, Xiao Qianguang, Sheng Yongwei. Application of the anomaly vegetation index to monitoring heavy drought in 1992[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1994, 9(2): 106—112. (in Chinese with English abstract)
- [64] McVicar T R, Jupp D L. The current and potential operational uses of remote sensing to aid decisions on drought exceptional circumstances in Australia: A review[J]. *Agricultural Systems*, 1998, 57(3): 399—468.
- [65] Mokhtari M H, Adnan R, Busu I. A new approach for developing comprehensive agricultural drought index using satellite-derived biophysical parameters and factor analysis method[J]. *Natural Hazards*, 2013, 65(3): 1249—1274.
- [66] 李海亮, 戴声佩, 胡盛红, 等. 基于空间信息的农业干旱综合监测模型及其应用[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 181—188.  
Li Hailiang, Dai Shengpei, Hu Shenghong, et al. Comprehensive monitoring model for agricultural drought

- and its application based on spatial information[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 181—188. (in Chinese with English abstract)
- [67] Wu Jianjun, Zhou Lei, Liu Ming, et al. Establishing and assessing the Integrated Surface Drought Index (ISDI) for agricultural drought monitoring in mid-eastern China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 23(8): 397—410.
- [68] 张洁, 武建军, 周磊, 等. 基于 MODIS 数据的农业干旱监测方法对比分析[J]. 遥感信息, 2012, 27(5): 48—54. Zhang Jie, Wu Jianjun, Zhou Lei, et al. Comparative study on remotely sensed methods of monitoring agricultural drought based on MODIS data[J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(5): 48—54. (in Chinese with English abstract)
- [69] 郑有飞, 刘茜, 王云龙, 等. 能量指数法在黑龙江干旱监测中的适用性研究[J]. 土壤, 2012, 44(1): 149—157. Zheng Youfei, Liu Xi, Wang Yunlong, et al. Application of energy index method on drought monitoring in Heilongjiang[J]. Soils, 2012, 44(1): 149—157. (in Chinese with English abstract)
- [70] 刘宗元, 张建平, 罗红霞, 等. 基于农业干旱参考指数的西南地区玉米干旱时空变化分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 105—115. Liu Zongyuan, Zhang Jianping, Luo Hongxia, et al. Temporal and spatial distribution of maize drought in southwest of China based on agricultural reference index for drought[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(2): 105—115. (in Chinese with English abstract)
- [71] Shahabfar A, Eitzinger J. Agricultural drought monitoring in semi-arid and arid areas using MODIS data[J]. The Journal of Agricultural Science, 2011, 149(4): 403—414.
- [72] Shahabfar A, Ghulam A, Eitzinger J. Drought monitoring in Iran using the perpendicular drought indices[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 18: 119—127.

## Advances in remote sensing derived agricultural drought monitoring indices and adaptability evaluation methods

Huang Youxin<sup>1</sup>, Liu Xiuguo<sup>1</sup>, Shen Yonglin<sup>1\*</sup>, Liu Shishi<sup>2</sup>, Sun Fei<sup>1</sup>

(1. Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Remote sensing technology is a promising means for agricultural drought monitoring in large area, and can continuously obtain long-term time series of crop drought information. Currently, quite a few agricultural drought monitoring indices based on remote sensing technology have been developed from different perspectives. However, different agricultural drought monitoring indices derived from remote sensing have obviously different temporal and spatial adaptability. Selecting the appropriate drought monitoring indices based on different regions and crop growth stages is vital for timely and accurate evaluation of drought impact on crops. It is also important for effective water resource management and drought mitigation. This paper focused on adaptability of the agricultural drought monitoring based on remote sensing, and systematically summarized agricultural drought monitoring indices and their adaptability evaluation methods. Firstly, the satellite data sources and the corresponding sensors that are commonly used for agricultural drought monitoring were summarized. Secondly, the relevant sensitive spectral bands of agricultural drought monitoring parameters were reviewed from 4 aspects, including the atmospheric rainfall, the soil moisture, the change of crop physiology and morphology (such as crop canopy temperature, vegetation water content, and crop morphology and green degree) due to water stress, and the comprehensive parameter information. Thirdly, the adaptations and limitations of various agricultural drought monitoring indices derived from remote sensing were fully discussed which involved 4 aspects: the precipitation monitoring indices based on active and passive radar satellite, such as TRMM (tropical rainfall measuring mission satellite) and SAR (synthetic aperture radar); the soil moisture monitoring indices based on the inversion method of thermal inertia, spectral feature space and microwave remote sensing; the crop water requirement monitoring indices based on the physiological and morphological characteristics of crop mutation; and the comprehensive drought monitoring indices based on integrated reflection of crop drought multiple characteristics. Lastly, the current literature revealed much valuable information about the sensitivity and adaptability evaluation methods for diverse agricultural drought indices derived from remote sensing, which included the spectral feature matching evaluation methods and the multivariate statistical analysis methods considering environmental impact factors of crop growth. Domestic and foreign scholars have achieved great progress on the adaptability of agricultural drought monitoring indices, including the application of multi-source remote sensing data, the sensitive spectral band, the applicability of the indices' own mechanism, and the adaptability evaluation methods. Nevertheless, how to select the most suitable agricultural drought remote sensing monitoring index, according to different regions and crops growth stage, is still a problem. Finally, this paper discussed the highlights, the existing difficulties and the future research trends. 1) The relationship between crop and its growth environment should be considered according to different regions and different crop growth stages; 2) The spectral bands information ought to be increased in order to reduce the ratio of signal to noise in the process of remote sensing data acquisition; 3) The appropriate drought monitoring indices derived from remote sensing should be confirmed, especially in the areas with part of vegetation coverage, because most of the crop growth period is under the condition of partial vegetation fraction; 4) The appropriate spatial and temporal scale for these agricultural drought monitoring indices should be determined according to the research purpose; 5) The study of hyperspectral data and technology in the inversion of precision agriculture drought monitoring indices need to be strengthened; 6) The sensitivity and adaptability of the agricultural drought monitoring indices derived from remote sensing in accordance with its own mechanism is supposed to be further explored.

**Key words:** agriculture; drought; remote sensing; monitoring index; adaptability evaluation