

## 甘蔗灾害监测研究进展及展望\*

黄秋燕<sup>1, 3, 4</sup>, 覃志豪<sup>2\*</sup>, 覃梓洪<sup>4</sup>, 胡宝清<sup>1, 3</sup>

(1. 广西师范学院/北部湾环境演变与资源利用重点实验室, 南宁 530001; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 广西师范学院/广西地表过程与智能模拟重点实验室, 南宁 530001; 4. 广西师范学院地理科学与规划学院, 南宁 530001)

**摘要:**【目的】甘蔗是我国生产食糖的主要原料, 广泛种植于我国南方地区, 自然灾害对甘蔗生产造成严重影响。甘蔗灾害监测是精准糖业的重要研究内容。常规的地面调查方法无法满足及时、快速获取甘蔗灾情信息的现实需求, 遥感技术具有客观、动态及大面积同步观测等优势, 是开展甘蔗灾害监测的有力技术手段, 但国内对甘蔗灾害监测还缺乏较为系统的归纳总结。文章通过对甘蔗气象灾害、生物灾害及环境灾害的监测等相关研究进行系统论述, 探讨开展甘蔗多种灾害遥感监测的未来可能研究方向。【方法】文章采用文献综述法, 系统分析了国内外有关甘蔗气象灾害、生物灾害及环境污染灾害监测的研究现状及存在问题, 针对每种灾害特点结合当前遥感技术发展趋势指出了甘蔗灾害监测未来研究方向。【结果】现有甘蔗灾害监测研究主要集中在旱灾、低温冻害及病虫害监测, 甘蔗旱灾、低温冻害及病虫害的成灾机理仍十分薄弱, 甘蔗灾害遥感监测机理模型研究不足, 利用遥感技术开展甘蔗重金属污染监测、甘蔗盐胁迫监测也尚未展开。【结论】未来需要加强气象观测、地面观测、作物生长模型及遥感信息等多源数据耦合, 发展“星、云、机、站”的灾害立体防控体系, 建立针对各种灾害的遥感监测预警机理模型, 提高甘蔗防灾减灾的信息化监测与应对能力, 促进甘蔗生产向智能化、智慧化的高端方向发展。

**关键词:** 气象灾害; 遥感监测; 成灾机理; 甘蔗; 逆境胁迫

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20180303

## 0 引言

甘蔗, 学名 *Saccharum Officinarum*, 是一种对水分、温度及养分需求比较特殊的多年生高大实心草本作物。甘蔗茎秆粗壮, 富含甜汁, 是生产食糖的主要原料。我国是世界第三大甘蔗种植国, 种植面积仅次于巴西和印度。同时, 我国也是蔗糖生产及蔗糖消费

收稿日期: 2018-06-14

第一作者简介: 黄秋燕 (1973—), 女, 汉族, 广西宾阳人, 博士, 副教授。研究方向: 资源环境遥感。Email: hqiuyan@163.com

\* 通信作者简介: 覃志豪 (1962—), 男, 壮族, 广西宾阳人, 博士, 研究员。研究方向: 红外遥感 and 农业灾害遥感。Email: qinzhihao@caas.cn

\* 基金项目: 国家自然科学基金地区项目“广西甘蔗干旱灾变机理与遥感监测预警方法研究”(41661090); 国家自然科学基金地区项目“复杂环境下西江流域社会-生态系统变化及其生态风险模拟研究”(41661021); 中国农业科学院科技创新工程协同创新项目课题“空天地网农业监测大数据挖掘与深度分析关键技术研究”(CAASXTCX2016007-4); 广西自然科学基金创新团队项目“北部湾海陆交互关键带演变机制与陆海统筹发展研究”(2016JJF15001)

大国，我国的蔗糖产量居世界第三位，蔗糖消费位居世界第二位。我国甘蔗主产区位于南方的广西、云南、广东和海南 4 省（区），其中广西甘蔗种植面积及产糖量均占全国比例 60% 以上<sup>[1-2]</sup>，对全国食糖供需平衡起到决定性作用（图 1）。尽管我国南方具有种植甘蔗所需要的水分、温度等优越自然条件，然而，南方同时也是我国农业气象灾害的重灾区，极端天气状况频发，雨量分布不均，春旱、秋旱现象普遍，时有冻灾、台风影响。随着全球性的气候变暖加剧，病虫害发生的频次及危害程度也不断加剧<sup>[3]</sup>，旱灾、低温冻害、风害、洪涝及病虫害等灾害给甘蔗生产造成了严重影响。据报道，我国甘蔗主产区广西省每年因旱灾而损失的甘蔗产量在 18% 以上<sup>[4]</sup>。受地理位置与季风环流的影响，南

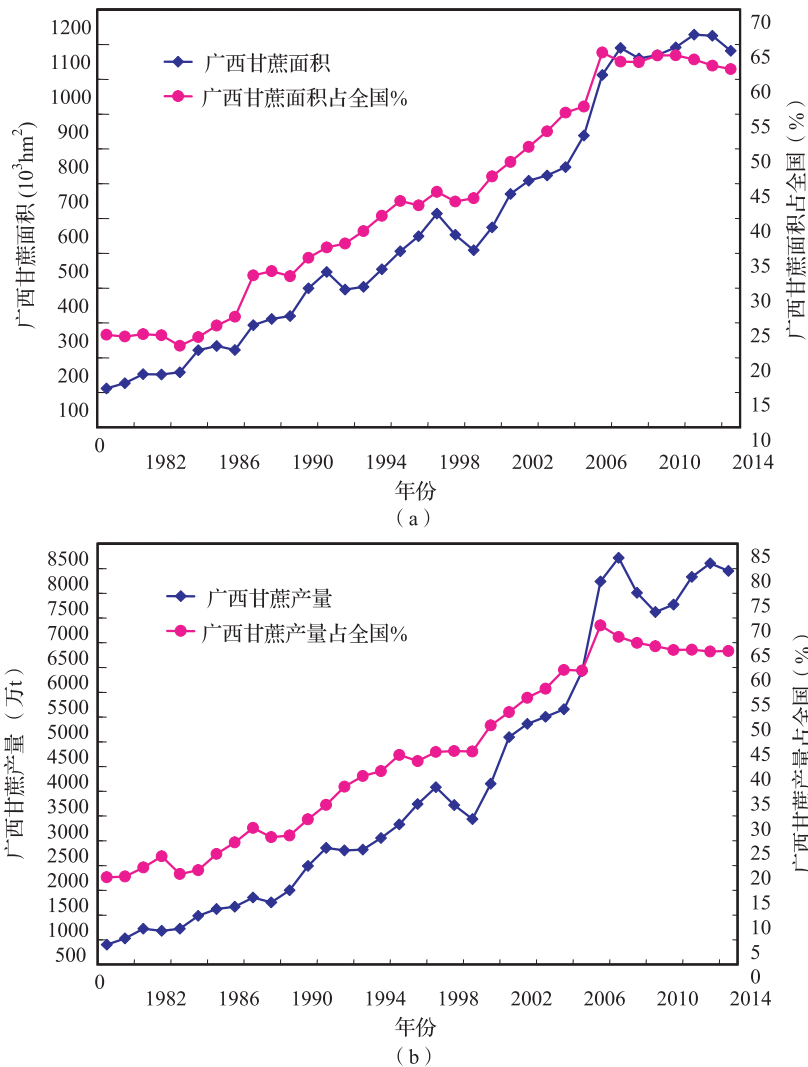


图 1 广西甘蔗生产发展 (( a )：广西甘蔗种植面积及占全国比重，( b )：广西甘蔗产量及占全国比重) (数据来源：1980—2015 年的《广西统计年鉴》及《中国统计年鉴》)

Fig.1 The production development of sugarcane in Guangxi (( a )：The area planted of sugarcane in Guangxi and its proportion of the total area planted in China, ( b ) Sugarcane yields of Guangxi and its proportion of the total yields in China ) ( Data source：Statistical yearbook of Guangxi and statistical yearbook of China from 1980 to 2015 )

2018年6月

方冬半年常受来自西伯利亚的强大寒冷空气影响,寒冷空气带来的低温往往给甘蔗生产造成重大损失。2008年1—2月,南方遭受持续性大范围的低溫雨雪冰冻天气袭击,导致广西甘蔗损失46亿元以上<sup>[5]</sup>。每年5—9月是南方地区的台风多发期,恰好是甘蔗生长的中后期,这时甘蔗植株一般较高,常造成风折或严重倒伏。统计表明,台风、季风较严重的年份,甘蔗倒伏、弯曲约30%~40%,其中甘蔗茎秆弯曲率占30%左右,倒伏角度为30°以下的占15%左右,影响轻微的年份约10%~20%<sup>[6]</sup>;甘蔗倒伏后,产量减少5%~20%,含糖量降低约10%<sup>[7]</sup>。洪涝主要使甘蔗根系生长发育受阻、蔗地的肥料流失及容易产生病虫害,造成甘蔗减产或绝收,其中以重度水淹对甘蔗影响最为严重。水淹时间越长,甘蔗减产也就越严重。2017年6月25日至7月2日,广西出现了大范围的严重致洪暴雨过程,统计表明<sup>[8]</sup>甘蔗受灾总面积有3.63万hm<sup>2</sup>,其中被水淹程度严重(淹过蔗顶)为0.43万hm<sup>2</sup>,中度(淹过蔗垄)1.27万hm<sup>2</sup>,轻度(只淹过蔗沟)1.93万hm<sup>2</sup>。病虫害是甘蔗生产上的重要生物灾害,是制约甘蔗产生双高目标(“高产高糖”)的主要因素之一。甘蔗作为多年生宿根作物,生长周期长,从生长期到收获期均有病虫害发生。目前世界上已发现甘蔗病害120种以上,甘害虫1000多种<sup>[9]</sup>。统计表明,甘蔗每年因病虫害造成的产量损失达百分之几到十几<sup>[10]</sup>,甚至更多。其次,随着环境污染和生态破坏日益严重,我国土壤重金属污染及土壤盐化也日益严峻,人为因素导致的重金属污染与盐胁迫对甘蔗生产与品质的影响也不容忽视。因此,开展甘蔗灾害监测及预警研究既是灾害学领域中研究的热点,又是当前地方政府相关管理部门及农业生产部门关注的课题。

甘蔗种植具有种类分布分散性以及地域复杂性的特点,甘蔗灾害发生又具有时空变异性与突发性等特点,常规的地面调查方法获取甘蔗灾情信息,很难满足相关部门决策管理的需求。遥感技术具有获取信息量大、多平台和多分辨率(时间和空间)、客观、快速及大面积无损观测的优势,是开展甘蔗灾害监测的有力技术手段。利用遥感技术开展甘蔗灾害监测的基本原理是通过遥感技术反演甘蔗在灾害发生或受到灾害胁迫条件下的生长参数,然后分析反演的甘蔗生长参数与甘蔗正常生长情况下的偏离程度。早期关于甘蔗灾害遥感监测的研究主要是以光谱反射率为核心的状态监测方法为主。近年来,随着我国遥感事业的发展,农业遥感信息获取已从国外遥感数据到大量应用自主国产卫星遥感数据、航空遥感、无人机、地面近距遥感的转变,形成了“天—地—网”一体化的农业遥感信息协同综合获取的技术体系,无疑会促进甘蔗灾害遥感监测研究的深入。虽然国内外对甘蔗抗灾害防灾已有一些相关报告,但国内还缺乏较为系统的归纳总结。本文在梳理近年来相关文献的基础上,分析甘蔗灾害监测已取得的成果及存在问题,针对每种灾害特点结合当前遥感技术发展趋势指出了甘蔗灾害监测未来可能研究方向,以满足政府决策部门对农业灾害事件的监测、预警及应对实践需求。

## 1 气象灾害监测

### 1.1 农业干旱监测

农业干旱是指长时间降水偏少,造成空气干燥,土壤缺水,使农作物体内水分发生亏缺,影响正常生长发育而减产的一种农业气象灾害<sup>[11]</sup>。农业干旱监测是采用干旱指标(表1)对

表 1 国内外常用的农业干旱指标

Table 1 Main agricultural drought monitoring indexes in the world

类型	指标名称与含义	优点	缺点	
气象 干旱 指标	降雨量、无雨日天数 (NRD)	简单, 资料容易获取, 能反映气候干旱的发生趋势	监测精度受限于气象站点分布数量, 空间连续性差	
	降水距平 (SRI)			
	标准降水指数 (SPI)	适于月以上尺度相对当地气候状况的干旱监测		
	标准降水蒸散指数 (SPEI)			
农业 干旱 指标	土壤含水量 土壤湿度: 土壤水分重量占干土重的百分数 (质量湿度), 常用 20 cm 深的土壤相对湿度 土壤有效水分存储量 (S) <sup>[12]</sup> : 土壤某一厚度层中存储的能被植物根系吸收的水分。 $S = (W - W_w) \times \rho \times h \times 0.1$	直观表示作物生长的供水状况 可反映土壤的缺水程度及评价农业旱情	湿度观测年代短, 湿度观测深度不够, 空间代表性差 干旱等级由作物种类、发育时段、根系的深度及土壤特性等决定, 涉及的参数较复杂	
	作物需水量 积分湿度指标 <sup>[13]</sup> : $I = \sum_{i=1}^n K \times T_i \sum_{i=1}^n T_i$	客观, 大范围比较	但只适用于月平均气温 > 0℃ 的时期, 不适用于北方地区	
	水分平衡指标 <sup>[14]</sup> : $K_d = \frac{P_0 + G + (W_1 - W_0) + I}{(W_2 - W_0) + E_T}$	物理概念明确, 与农作物需水量相联系, 时空连续较好, 在我国应用较广	参数复杂, 有些参数难以获取	
	温度指标 <sup>[15]</sup> : $s = \sum_{i=1}^N (T_c - T_d)$	能与遥感相结合, 适于区域监测	不能较准确地对农作物遭受的干旱程度作出评价	
	Palmer 干旱指数 (PDSI) <sup>[16]</sup>	物理意义明确, 能表示干旱程度及干旱发生时间	空间连续性差	
	自适应帕尔默干旱指数 (SC-PDSI) <sup>[17]</sup>	区域适应性较好, 对严重的干旱时段表示效果好	计算比较复杂, 空间连续性差	
	遥感 干旱 指标	水分供应性 热惯量指数 <sup>[18]</sup> : $ATI = \frac{2Q(1-a)}{\Delta T}$ 微波土壤温度反演法 <sup>[19]</sup>	适于裸露植被或植被覆盖度较低的情况下使用 裸土或低密度植被区, 全天候	不适用于作物覆盖度较高的地区 反演结果受多个因素影响, 高密度植被区的适用性需要验证
		水分需求性 距平植被指数 <sup>[20]</sup> $AVI = NDVI - \overline{NDVI}$ 植被状态指数 <sup>[21]</sup> $VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}}$ 植被温度指数 <sup>[22]</sup> $TCI = \frac{T_{\max} - T_i}{T_{\max} - T_{\min}}$ 植被温度状态指数 <sup>[23]</sup> $VTCI = \frac{T_{NDVI_{\max}} - T_{NDVI_i}}{T_{NDVI_{\max}} - T_{NDVI_{\min}}}$	比较简单直观 适于区域监测 适于区域监测	要求有长时序 NDVI 数据, 结果受遥感数据质量影响
	综合 性指 数	作物缺水指数 <sup>[24]</sup> $CWSI = 1 - \frac{ET_a}{ET}$ 植被供水指数 <sup>[25]</sup> $VSWI = \frac{NDVI}{T_s}$	植被覆盖的条件下, 作物缺水指数法监测土壤水分的精度高于热惯量法 物理意义明确, 适于植被覆盖较好的区域	涉及的气象、土壤等资料较多, 计算量大, 实现相对复杂 NDVI 滞后性, 植被分布差异较大区域监测结果受影响
		温度植被干旱指数 (TVDI) <sup>[26]</sup>	适于植被覆盖较好的区域	NDVI 滞后性
综合地表干旱指数 (ISDI) <sup>[27]</sup>		分时分区构建模型	计算比较复杂	



2018年6月

干旱发生时间、发展过程和影响范围进行描述。农业干旱监测方法主要有气象干旱监测法与遥感干旱监测法两大类。气象干旱监测法主要是从气象观测角度构建干旱监测方法,常用指标包括降雨距平指数(SRI)、连续无有效降雨天数(NRD)、土壤相对湿度指数(SWI)、帕尔默干旱指数(PDSI)<sup>[16]</sup>、作物水分胁迫指数(CWSI)<sup>[24]</sup>等。遥感干旱监测法是通过土壤和植被中的水分进行遥感监测反演,实现利用多源遥感数据进行区域农业干旱监测,从水分供需角度出发,所采用的指标又分水分供应性指数、需水性指数、综合性指数3类指数<sup>[28]</sup>(表1),但综合性指数仍处于起步阶段,尚未形成适合不同区域和不同尺度的有效干旱监测模型<sup>[29]</sup>。

农业干旱是影响甘蔗生产的主要限制因素之一。尽管农业干旱灾害监测已得到了较深入的研究和广泛的实际应用<sup>[30-33]</sup>,但我国研究重点是小麦等大田粮食作物<sup>[34-36]</sup>,甘蔗干旱及其遥感监测研究还很少<sup>[37]</sup>,科学研究与业务应用需求之间存在较大的差距。卢小凤等<sup>[38]</sup>、莫建飞等<sup>[39]</sup>、李莉等<sup>[40]</sup>利用气象干旱指数开展广西甘蔗秋季干旱的演变特征、干旱等级空间分布及广西秋旱灾害风险等级评估研究;苏永秀等<sup>[41]</sup>利用水分盈亏指数进行广西甘蔗旱情业务监测;匡昭敏等<sup>[42]</sup>、钟仕全等<sup>[43]</sup>、王君华等<sup>[44]</sup>利用MODIS/HJ/ETM遥感数据提取植被状态指数(VCI)和温度条件指数(TCI)开展广西甘蔗干旱遥感监测研究(表1),少见关于甘蔗干旱预警的相关报道。

甘蔗干旱成灾机理十分复杂,涉及到降水,前期降水对后期的影响程度、蒸发、土壤含水量、径流、作物自身抗旱性等多个因素,因此甘蔗干旱监测也比较复杂。现有研究初步形成了利用遥感数据或气象数据的甘蔗干旱监测应用框架,但所用的干旱监测指标仍过于简单,模型的适用性及机理性解释仍存在不足(表1)。气象干旱指标本质上属于大气层的干旱表征,而农业干旱指标本质上是研究土壤水分的变化,农业干旱并非出现在降水结束时,而是出现在植物根系不能获取到所需要水分。因此,气象干旱指数并不能完全适用于甘蔗干旱强度的表征。遥感干旱监测法具有大面积同步观测、客观、动态等优势,理论上光学遥感数据与微波遥感数据均可应用于干旱监测,但遥感信息是某个时间点上地物反映出来的综合物理信息,光学遥感数据易受天气、时相等因素影响。虽然微波遥感具有全天时和全天候观测能力,但微波遥感仅能反演土壤表层(2~5 cm)的湿度,而作物根系通常都在10~20 cm以下,导致作物水分胁迫状况往往难以得到真实反映。其次,植被生长状态指数是以植被生长状态仅受到干旱胁迫为假设,事实上植被健康状况受到多种自然灾害和人为因素的综合影响。地表温度指标能基于土壤含水量与地表(冠层)温度之间此消彼长的内在关系,但地表温度遥感反演存在较多影响因素,存在较大不确定性<sup>[45]</sup>。植被温度指数利用植被指数与地表温度的互补特性提供的作物水分亏缺信息来监测旱情,但该方法是以植被指数(NDVI)与地表温度之间存在相反的变化趋势为前提,但这一假设是当水分是植被生长的限制因素才成立,如果能量成为植被生长的限制因素时,植被指数则与地表温度呈正相关<sup>[36]</sup>;植被温度指数法对已发生旱灾的区域具有较好的解释能力,但在甘蔗干旱监测与预警方面的表现不足。现有关于甘蔗干旱的研究仍以定性描述为主,缺乏定量监测与预警评估结果,干旱成灾机理认识不充分,难以表示干旱发生对甘蔗生长过程的影响程度,也不能反映甘蔗受旱

机理以做出预警（表 2）。虽有一些研究利用盆栽或大田试验方法探索甘蔗在干旱胁迫下的生理响应和生理机制研究<sup>[46-54]</sup>，但关于干旱胁迫下甘蔗冠层光谱响应仍少见研究（表 1）。目前的研究对甘蔗干旱灾变过程和成灾机理还缺乏充分认识，尤其是不同生长季干旱对甘蔗生长发育与最终产量及其含糖率的影响，甘蔗干旱遥感监测地面观测试验仍不足。

表 2 甘蔗干旱监测方法比较

Table 2 Comparison of sugarcane drought monitoring methods

监测方法	指标优点	指标不足
气象干旱监测法 <sup>[38-41]</sup>	甘蔗生育期无雨日数，降雨量距平和少雨日数（日降水量 <5 mm 的日数），简单易用，直观	未考虑干旱胁迫对甘蔗的生理响应特征，未考虑土壤水分的动态变化特点
遥感干旱监测法 <sup>[42-44]</sup>	温度植被状态模型： $I_D = aI_V + bI_T$ 综合植被覆盖度和地表温度表征甘蔗水分胁迫状况	对甘蔗苗期、分蘖期干旱监测效果尚需验证，干旱监测精度受植被类型年际变化及地温季节变化的影响，需要长时间序列遥感数据

针对甘蔗干旱监测存在的不足，未来应加强实际需求与科研需求相结合，重点展开以下研究：一是加强甘蔗干旱成灾机理研究，辨识甘蔗干旱成灾的主要影响因素及其反馈机制，揭示不同类型甘蔗种植区干旱灾变过程，明确干旱对甘蔗生长发育及最终产量与含糖率的影响，提出甘蔗干旱遥感监测预警方法。二是加强多源数据综合利用，通过地—星—机同步观测，结合能较好地反映出甘蔗生育进程、产量与各生育阶段温度、降水量以及土壤水分动态关系的甘蔗生长模型，处理分析各种观测数据，筛选出能够有效表征甘蔗干旱变化特征的关键指示因子，建立物理机制明确及多要素、多尺度、多过程的甘蔗旱情遥感监测与预警平台，探究尽可能减轻干旱对甘蔗生产损失的有效途径。三是加强时序遥感数据的异常信息提取方法研究，探索准确旱灾识别方法，综合遥感与地面观测、模型模拟技术，提高甘蔗旱灾损失评估能力。

## 1.2 低温冻害监测

低温冻害是指农作物在生长发育过程中，当温度下降到适宜温度的下限时，作物就延迟或停止生长，又可分为零上低温冷害和零下低温冻害。甘蔗起源于热带，天生就对低温敏感，当温度低于 12℃ 时易遭受寒害，即零上低温危害。甘蔗冻害程度与低温强度关系如表 3<sup>[55]</sup> 所示。甘蔗低温冻害监测主要有地面调查法及遥感监测法（表 4）<sup>[56]</sup>，常用低温冻害指示有 5—9 月平均气温之和距平指标、生育期积温指标、热量指数及综合指标 4 种。

表 3 甘蔗冻害程度与低温强度关系

Table 3 Relationship between frost injury degree of sugarcane and low-temperature intensity

冻害程度	受害程度	最低气温 /℃	冻害程度	受害程度	最低气温 /℃
轻度	蔗叶轻微或部分受	1.0--0.4	重度	生长点及茎上部芽冻死	-1.1--2.0
中度	蔗叶全部和生长点受害	-0.5--1.0	严重	地上茎全部冻死	<-2.1

2018年6月

表4 国内外常用的低温冻害监测指标

Table 4 Main low temperature and freeze monitoring indexes in the world

指标	计算方法	优点	不足
5—9月平均气温之和距平指标 <sup>[57]</sup>	$\Delta y = 6.33 + 3.29 \sum_{i=5}^9 \Delta T$	认可度比较高, 也较为常用, 适合比较不同地区冷害发生频率的差异	指标单一, 不能与农作物的生长发育状况对热量条件的需求直接结合, 缺乏农业意义和生物学意义, 不能与一般低温冷害与严重低温冻害划分, 区域适应性较差, 需要考虑作物生育期资料
生育期积温指标 <sup>[58]</sup>	一般低温冷害: 活动积温(T)较常年少70~120℃; 严重低温冷害: T较常年少120℃以上	积温冷害指标计算简便易行, 可很好反映延迟性冷害的性质, 以及温度变化与作物产量的关系	不同时期发生冷害对作物的影响不同, 若要具体分析某地区某时段是否发生低温冷害, 要和作物生育期各阶段相联系
热量指数 <sup>[59-60]</sup>	$F(T) = 100 \times \frac{(T-T_1)(T_2-T)^B}{(T_0-T_1)(T_2-T_0)^B}$	生物学意义十分清晰	不同热量年型的热量指标差异不明显, 且不同发育时段作物对低温的敏感性不同, 在计算整个生长季的热量指数时, 也存在一定误差; 不同年型及低温冷害的发生要结合其他指标
综合指标 <sup>[61]</sup>	SPT = $\sum I_i$	计算比较简便, 准确率较高, 考虑因素比较全面, 与作物生育状况相结合, 能综合反映作物生长过程中的低温累积效应和高温补偿效应	计算比较复杂, 没有考虑微地形对气温的扰动效应

甘蔗低温冻害遥感监测的内容集中在甘蔗发育期的识别和温度异常监测上, 基本上可分为最低地面温度反演法<sup>[62-65]</sup>与植被指数差值法<sup>[66-72]</sup>两种。最低地面温度反演法利用遥感数据反演地面温度, 结合地基观测资料, 订正得到遥感的栅格最低温度, 再结合作物生育期资料, 建立受灾程度与降温幅度的相关关系, 确定受灾程度和影响范围。该方法顾及致灾因子的空间变化情况, 但低温冻害监测效果与遥感资料反演地表温度的精度直接相关。由于目前热红外遥感的空间分辨率较低, 受混合像元影响, 利用热红外遥感数据反演地表温度的精度很难达到地块尺度上的灾害评估要求<sup>[71]</sup>。植被指数差值法根据作物遭受冷冻害后, 由于作物植株保持过冷却状态导致体内绿素活性会减弱, 叶片对近红外光和红光的敏感度下降, 从而使得低温冻害前后植被指数产生变化, 比较受灾前后植被指数的差值可以判断受灾情况, 操作简单, 植被的生物学意义较为明显<sup>[71]</sup>。由于发生冷冻害时往往气象条件极差, 光学遥感受天气条件制约很难实现实时监测, 且植被指数差值法研究中较多采用MODIS中分辨率遥感影像, 空间分辨率较低, 难以满足田间尺度低温冻害监测的精度要求。

尽管低温冻害遥感监测方法研究已取得了一定进展(表5), 与地面调查法相比具有极大的潜在优势, 但是在监测机理、精度、实时性和实用化等方面还存在着较大的不足,

特别是甘蔗低温冻害遥感监测机理不足，冻害状态下的作物光谱效应与遥感信息传递机制及其不确定性尚未清楚，导致甘蔗低温冻害的关键因子也尚未明晰。

表 5 甘蔗低温冻害监测方法比较

Table 5 Comparison of low temperature and freeze monitoring methods on sugarcane

监测方法	所采用主要指标	方法优点及不足
遥感监测法	地面调查法 <sup>[55]</sup> 日内积寒： $X_n = \sum_{i=1}^n (T_c \times T_i)$	计算简便、直观，但费时费力，时效性差，主观性强，空间表征能力差，对不同甘蔗类型低温冻害的适用性尚需要验证
最低地面温度反演法 <sup>[62-65]</sup>	劈窗算法 LST 反演： $T_s = A_0 + A_1 T_{31} - A_2 T_{32}$ 被动微波地表温度反演模型（最小二乘法），NDVI	大范围、时效性强、高效，但监测精度受混合像影响，热红外遥感数据易受极端天气条件影响，被动微波遥感数据空间分辨率过低
植被指数差值法 <sup>[66-71]</sup>	$I_{Vci} = 100 \times (I_{NDVI} - I_{NDVImin}) / (I_{NDVImax} - I_{NDVImin})$	植被生态学意义明显，计算方便，适用于区域尺度监测。NDVI 存在滞后性，不能完全反映作物受害情况，作物冷冻害与特征光谱的机理性缺乏，受气象条件影响

未来需要加强甘蔗低温冻害的监测预警机理研究，利用作物生长模型机理性强的优势，结合地面同步观测与多源遥感数据，获取不同生育期正常生长状态与低温冻害胁迫状态下的甘蔗基本农学参数，是开展甘蔗低温冻害机理研究的重要内容。高光谱遥感具有精细反射地物光谱特征的能力，可有效地识别低温冻害胁迫下的甘蔗光谱信息的敏感变化特征（如叶绿素含量密切相关的红边），这为研究低温冻害机理提供了新的视角。同时，要结合地基、空基及星基多种观测手段，着力探索与甘蔗低温冻害密切相关的各影响因素，厘清低温冻害与各影响因素的相互作用机制，从而筛选出能够有效表征甘蔗低温冻害变化特征的关键指示因子，建立具有多个地理要素特征的低温冻害监测模型；重视时序数据与作物生长模型、数据同化技术的耦合，探索适合区域特点的低温冻害指示体系；基于机理研究的基础上，建立基于生理—生态机理特征的甘蔗低温冻害遥感监测预警模型，可有助于及时采取应对措施，减少灾害损失。其次，南方持续低温冻害天气与北半球大气环流异常密切相关，甘蔗主产区复杂地形对低温冻害也有一定影响，加强甘蔗关键期气候异常预测技术研究，探索地复杂地形对甘蔗低温冻害的影响机制，对于提高甘蔗低温冻害预警能力将具有重要的意义。

### 1.3 风害及洪涝灾害监测

甘蔗风害、洪涝灾害遥感监测主要作用是获取甘蔗风害、洪涝灾害的范围及灾害损失评估两个方面，因灾害类型不同，监测指标有所差别。图 2 是利用遥感技术开展风害监测的流程，利用台风过境前后研究区 NDVI 的差值提取台风影响的甘蔗 NDVI 变化值，并与正常年份该时段的甘蔗 NDVI 变化值的标准方差作比较，判断此时段甘蔗的生长变化情况，依据甘蔗的生长变化情况对甘蔗台风灾害损失等级标准进行划分。但除了 NDVI



2018年6月

外, 其他植被指数是否可应用于甘蔗风害遥感监测尚需要进一步验证。由于台风、洪涝发生时天气条件恶劣, 光学遥感很难获取监测区域高质量遥感数据, 而 SAR 数据具有不受恶劣天气和昼夜影响的特点, 随着其空间分辨率的不断提高, 已经成为风害、洪涝灾害等灾害监测中极其重要的手段。Chen 等<sup>[72]</sup>利用 SAR 数据对结构变化的敏感性应用于甘蔗倒伏监测, 以广东雷州半岛为研究区, 从 Radarsat-2 数据中提取甘蔗极化特征, 然后用极化特征的时间序列来克服甘蔗生长条件变化的影响, 监测台风前后大面积甘蔗倒伏情况。莫建飞等<sup>[73]</sup>基于 C/S 结构和 GIS 组件开发技术, 利用不同作物、不同生育期的农业气象灾害监测指标(表 3)与灾害评估模型, 研发了广西主要农业气象灾害监测预警系统, 尝试对甘蔗、玉米等作物进行干旱、洪涝灾害监测。现有关于甘蔗风害、洪涝灾害监测仍处理于起步阶段, 一些关键技术问题仍没有得到很好解决。考虑到洪涝灾害期间云雨密布、天气恶劣, 遥感影像时空分辨率有限, 单一遥感影像信息无法进行全方位监测, 未来需重视多源遥感数据复合利用的优势(图 3), 探索如何高效协同和智能化提取甘蔗淹没信息的提取方法。

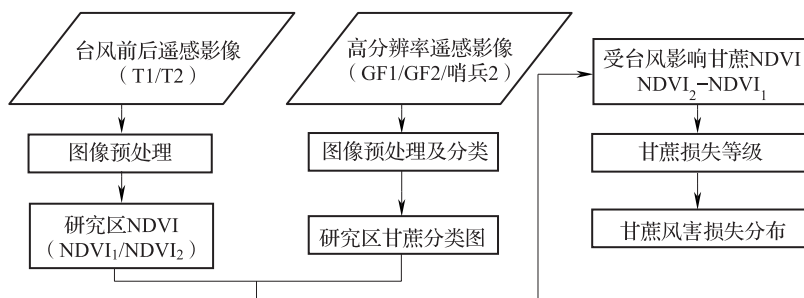


图 2 甘蔗风害遥感监测流程

Fig.2 Analysis process of effects of typhoon on sugarcane

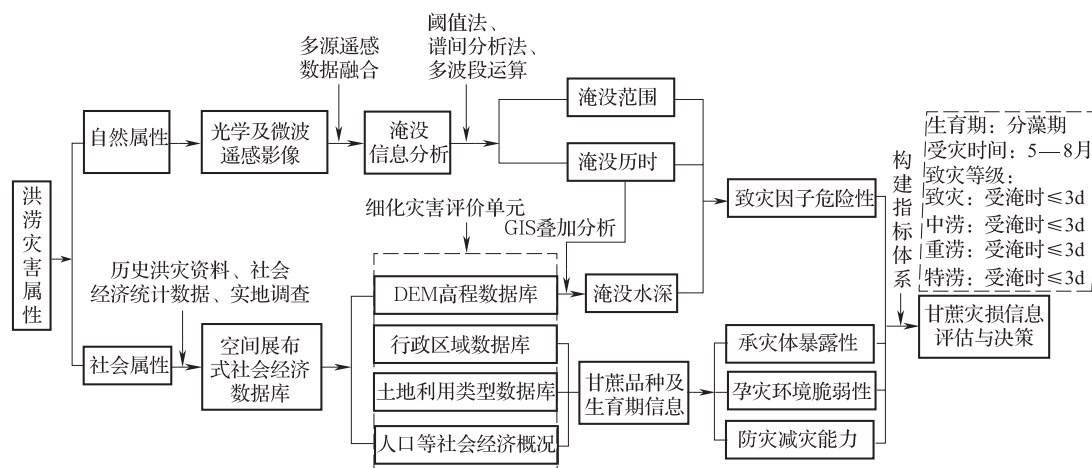


图 3 多源数据复合的甘蔗洪涝监测流程

Fig.3 The workflow of sugarcane flood disaster monitoring based on multi-source data

## 2 生物灾害监测

病虫害与田间杂草均对甘蔗生长产生影响，其中以病虫害的危害最大，虽有研究显示<sup>[74]</sup>杂草蔓延，将会使得农作物产量下降 30%，但长期以来甘蔗田间杂草监测一直被忽略。如何利用田间监测结合遥感技术控制田间杂草对甘蔗生长的危害，对于促进精准糖业发展具有重要的意义，但目前关于这方面的研究较少。因此，甘蔗生物灾害监测，重点是病虫害监测。利用遥感技术开展甘蔗病虫害监测，国外已开展较深入的研究，但国内相关研究仍较少。

病虫害遥感监测原理可分为基于光谱特征病虫害直接监测与基于生境信息反演的病虫害间接监测<sup>[75]</sup>两种。前者是在遭受病虫害的作物导致的生物量或 LAI 的减少、叶片上产生病斑虫伤、叶绿体或其他细胞器的破坏而作物色素含量（如叶绿素、类胡萝卜素和花青素）的变化、作物脱水<sup>[76-77]</sup>，等病虫害胁迫条件下作物冠层反射光谱与吸收光谱发生变化，当这些变化能引起特定传感器或传感器系统响应时，利用遥感技术获取病虫害导致的作物生理变化的光谱响应特征，并与正常生长状态的作物冠层光谱响应特征作对比，以实现作物病虫害识别。后者是基于病虫害发生需要适宜的景观格局和生境条件，通过遥感数据及田间观测数据、气象数据反演作物生长的地表温度、田间湿度及作物长势状况等生境信息，构建作物病虫害发生情况的定量指标实现作物病虫害遥感间接监测。根据数据源差异，病虫害遥感监测又可分为基于高光谱分析技术的遥感监测方法与基于航空 / 航天平台的多光谱遥感监测方法<sup>[75]</sup>。由于高光谱遥感具有更高的光谱分辨率，能够探测到植被光谱曲线在某些特定波段下的细节信息，在研究中备受关注。Apan 等<sup>[78]</sup>采用“病 - 水胁迫指数 DWSI”对甘蔗锈病进行识别，基于 EO-1 Hyperion 高光谱影像成功监测了受病害影响的区域范围。基于高光谱分析技术所用病虫害监测指标可分为可见 - 近红外光谱响应特征与荧光波段光谱响应特征两大类（表 6）。可见 - 近红外光谱响应特征包括作物病虫害胁迫下的叶片或冠层反射光谱及植被指数光谱特征（如 NDVI 等），表 7 是作物病虫害探测常用植被指数<sup>[79]</sup>。

表 6 甘蔗病虫害遥感监测方法对比

Table 6 Comparison of monitoring methods for sugarcane diseases and pests based on remote sensing

监测方法	指标适用性	指标局限性
基于高光谱分析技术	可见光 - 近红外光谱响应特征 <sup>[76-79]</sup> ，包括反射率特征与植被指数光谱特征，简易，方便	病虫害敏感光谱特征的波段位置和表现形式较多样化，需要尝试敏感波段的筛选和组合。模型适用性差，机理性研究不足
	荧光波段光谱响应特征 <sup>[80]</sup> ：蓝 - 绿荧光与叶绿素荧光，精度较高	比较复杂，仍处理于试验研究阶段
基于航空 / 航天平台的多光谱遥感监测方法	光谱特征、图像分析及图形特征，多源数据优势互补	“同谱异物”和“异谱同物”现象；模型适用性差，尺度效应问题

2018年6月

基于可见-近红外光谱响应特征的甘蔗病虫害监测计算简便,已取得了一些成效<sup>[75-79]</sup>,但病虫害发生的机理比较复杂,病虫害光谱特征的敏感波段位置和表现形式较多样化,监测模型适用性差,缺乏机理性解释。荧光对作物叶片的养分胁迫、病害胁迫、人工损坏等胁迫状态有显著的区分能力,利用荧光成像技术进行病虫害监测预警已受到关注。Bravo等<sup>[80]</sup>利用小麦背景场的图像和荧光诱导图像,获取小麦条锈病害胁迫下的荧光信号,探索了对荧光成像技术在小麦条锈病的分类和识别的效果,结果表明,健康小麦叶片和感病小麦叶片在550 nm和690 nm激光诱导下的荧光强度有明显差异,构造二次判别模型对病害样本和健康样本进行分类,分类精度达到71%,但未见有利用荧光成像技术研究甘蔗病虫害的研究报道。基于航空/航天平台的多光谱遥感监测方法是利用病虫害胁迫下的作物冠层光谱特征、图像分析特征及图形特征实现病虫害识别,这种方法的优势是可以利用可见光-近红外遥感、热红外遥感及微波遥感等多源数据互补来提高病虫害识别精度,但存在机理性研究不足与不同空间分辨率遥感数据的尺度效应等问题。由于甘蔗病虫害发生具有动态性、突发性、异质性及隐蔽性等特点,当前病虫害遥感监测机理与方法在精度、稳定性和通用性方面与实际作业和管理的监测需求之间仍存在一定的差距<sup>[78]</sup>。

表7 作物病虫害探测常用植被指数<sup>[79]</sup>

Table 7 Correlation common vegetation indices of crop diseases and pests detection

植被指数名称	表达式	植被指数名称	表达式
归一化植被指数 (NDVI)	$NDVI = (R_{Nir} - R_{Red}) / (R_{Nir} + R_{Red})$	抗大气指数 (VARI)	$VARI = (R_{Green} - R_{Red}) / (R_{Green} + R_{Red} - R_{Blue})$
比值植被指数 SR	$SR = R_{Nir} / R_{Red}$	结构不敏感植被指数 (SIPI)	$SIPI = (R_{800nm} - R_{445nm}) / (R_{800nm} + R_{680nm})$
绿度归一化植被指数 (GNDVI)	$GNDVI = (R_{Green} - R_{Red}) / (R_{Green} + R_{Red})$	花青素反射指数 (ARI)	$ARI = 1/R_{550nm} - 1/R_{700nm}$
土壤调节植被指数 (SAVI)	$SAVI = (R_{Nir} - R_{Red}) (1+L) / (R_{Nir} - R_{Red} + L), L=0.5$	转换叶绿素吸收指数 (TCARI)	$TCARI = 3 \times [(R_{700nm} - R_{670nm}) - 0.2 \times (R_{700nm} - R_{550nm}) \times R_{700nm} / R_{670nm}]$
光化学植被指数 (PRI)	$PRI = (R_{531nm} - R_{570nm}) / (R_{531nm} + R_{570nm})$	优化土壤调节植被指数 (OSAVI)	$OSAVI = 1.16 \times [(R_{800nm} - R_{670nm}) / (R_{800nm} + R_{670nm} + 0.16)]$
水分波段指数 (I <sub>WB</sub> )	$I_{WB} = R_{950nm} / R_{900nm}$	氮反射指数 (NRI)	$NRI = (R_{570nm} - R_{670nm}) / (R_{570nm} + R_{670nm})$
三角型植被指数 (TVI)	$TVI = 0.5 \times [120 \times (R_{750nm} - R_{550nm}) - 200 \times (R_{670nm} - R_{550nm})]$	改进型叶绿素吸收指数 (MCARI)	$MCARI = [(R_{700nm} - R_{670nm}) - 0.2 \times (R_{700nm} - R_{550nm})] \times R_{700nm} / R_{670nm}$
红边植被胁迫指数 (RVSI)	$RVSI = (R_{714nm} - R_{752nm}) / 2 - R_{733nm}$	植被衰老指数 (PSRI)	$PSRI = (R_{678nm} - R_{500nm}) / R_{750nm}$
水分指数 (WI)	$WI = R_{900nm} / R_{970nm}$	归一化色素比率指数 (NPCI)	$NPCI = (R_{680nm} - R_{430nm}) / (R_{680nm} + R_{430nm})$

未来需要加强甘蔗病虫害遥感监测预测机理模型研究，利用甘蔗生长模型从机理上定量描述甘蔗生长过程及其与环境因子之间关系的优势，结合遥感技术能大面积、周期性实时获取地表农作物信息的能力，将遥感信息与甘蔗生长模型同化，实现区域甘蔗长势信息的定量反演，提高病虫害监测预测的精度。其次是研究气象条件对甘蔗病虫害发生的范围、时间、强度和频次等的影响；分析甘蔗病虫害的时空变化及其规律性；研究不同气象条件下气候型甘蔗病虫害的预警预测技术；建立甘蔗病虫害发生发展的气象等级指标体系；加强多源数据融合，重视无人机遥感平台机动获取田间尺度遥感数据源的优势，深入探索实用的甘蔗病虫害气象的监测、预报、预警和评估技术方法研究。

### 3 环境污染灾害监测

重金属污染与盐胁迫主要是由于人为因素导致的环境污染灾害，两者对甘蔗生长与品质均产生影响。在重金属镍和铅胁迫下，甘蔗根的生长发育受到抑制，叶绿素含量下降，叶绿素结构遭到破坏，糖分含量减低，抗氧化酶系统代谢紊乱，且伤害程度随着重金属浓度的增加和胁迫时间的延长而加剧<sup>[81]</sup>；甘蔗生物量、茎径和茎节长随着土壤中镉浓度的增加而降低，镉浓度越高，抑制效应越明显<sup>[82]</sup>。2014 年环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示<sup>[83]</sup>，我国农田土壤点位超标率为 19.4%，其中镉、镍和铜等重金属污染最为突出。而甘蔗要求土壤含盐量小于 0.3% 才能正常生长<sup>[84]</sup>。盐胁迫条件下甘蔗株高、根长减少，生物量、叶面积下降，水分利用率降低；盐碱严重影响到甘蔗的萌发、苗期的生长及生理变化，最终导致甘蔗产量和糖分下降<sup>[85]</sup>。我国甘蔗种植区特别是广东、广西沿海的耕地盐渍化趋势日益加剧<sup>[86]</sup>。因此，开展甘蔗重金属污染遥感监测及甘蔗盐胁迫遥感监测研究，对及时了解甘蔗生产中的潜在危害，提高甘蔗品质，具有重要的意义，但目前尚未有关于甘蔗重金属胁迫或盐胁迫遥感监测的研究。

甘蔗重金属污染遥感监测与盐胁迫遥感监测反演原理相似，均是依据健康作物特征光谱与重金属胁迫或盐胁迫下的作物特征光谱的差异，建立作物冠层光谱反射率与重金属污染胁迫下或盐胁迫作物生理生态参数（叶绿素、叶面积指数和细胞结构等）之间的响应关系，利用遥感技术展开大面积土壤 / 农作物重金属胁迫信息或盐胁迫信息反演，实现重金属胁迫或盐胁迫监测。其中，反演模型是关键。目前关于重金属胁迫遥感反演模型与盐胁迫反演模型均是以基于回归统计的经验模型为主，物理模型较少。经验模型实质上是反射光谱的经验统计方法<sup>[87]</sup>，模型局限性较多，易受土壤类型和重金属种类及环境因子影响，模型普适性较差。盐分信息遥感反演机理性模型少有研究，而重金属胁迫遥感物理模型包括辐射传输模型（RTM）与几何光学模型（GOM），前者如适用于土壤重金属含量反演的 Hapke 模型<sup>[88]</sup>、SOILSPECT 模型<sup>[89]</sup>及适用于植被土壤重金属含量反演的 PROSPECT<sup>[90]</sup>、SAIL<sup>[91]</sup>、PROSAIL 模型<sup>[92]</sup>，后者最典型的是 BRDF 模型<sup>[93]</sup>。现有研究对光谱和重金属之间关系的物理机理了解不够，物理建模难度较大。



2018年6月

与多光谱遥感相比, 高光谱遥感具有波段多、连续和分辨率高的特点, 可以记录地物多个窄波段反射率, 在地物精细分类及重金属污染、盐胁迫等作物生化信息反演方面更有优势。因此, 未来研究需要加强地面观测与遥感观测, 结合甘蔗生长模型, 深入研究甘蔗产量与品质对重金属污染及盐胁迫的定量关系, 揭示光学信号与甘蔗重金属污染、盐胁迫的生理生态响应特征关系, 构建甘蔗重金属污染及盐胁迫的物理机理反演模型。

## 4 结论与展望

甘蔗是我国生产食糖的主要原料, 广泛种植于我国南方地区, 蔗糖产业一直是我国甘蔗主产区的农业支柱。但我国甘蔗生产受到多方面自然灾害的影响, 尤其是干旱灾害、低温冻害及病虫害最为严重; 同时人为因素导致的重金属污染与盐胁迫对甘蔗生产带来了潜在危害。全球气候变暖、极端天气的频发增加了甘蔗灾害监测的难度, 而当前农业信息化发展背景下, 我国农业结构与管理方式正在发生根本性变化, 这对科学防范与有效规避甘蔗灾害提出了更高的要求。遥感获取到地面真实的表观现象为甘蔗灾害管理提供了目标识别、制图和监测功能。利用遥感全域同步观测的优势, 开展甘蔗多种灾害遥感监测, 是甘蔗防灾减灾的迫切需要, 也是精准糖业的重要研究内容。

现有甘蔗灾害监测主要集中在旱灾、低温冻害及病虫害监测方面, 以遥感表观监测为主; 甘蔗旱灾、低温冻害及病虫害的成灾机理仍十分薄弱; 应用遥感技术开展风害、洪涝灾害监测仍处理于起步阶段, 一些关键技术问题仍没有得到很好解决; 甘蔗灾害遥感监测机理模型研究不足, 模型监测精度与应用需求仍有较大的差距; 利用遥感技术开展甘蔗重金属污染监测、甘蔗盐胁迫监测也尚未展开; 低空无人机遥感、传感器技术及“互联网”技术、大数据挖掘及云计算等新技术新方法应用于甘蔗灾害监测研究较少。

现有甘蔗灾害监测研究工作和成果相对比较分散, 未来甘蔗灾害监测研究在理论上及技术上还需要突破, 以应对复杂的气候变化给甘蔗产生造成的不利影响。未来需要加强以下几个方面研究: 一是甘蔗灾害成灾机理研究, 特别是甘蔗干旱成灾机理研究, 辨识甘蔗干旱成灾的主要影响因素及其反馈机制, 提高干旱监测预警模型的精度。同时, 重视甘蔗低温冻害机理及甘蔗病虫害机理研究, 发展甘蔗灾害遥感监测机理模型。二是加强甘蔗灾情监测时空信息获取和灾情时空动态发展趋势预报研究。由于甘蔗种植具有地域特性, 其生长是一个动态过程; 甘蔗灾害的发生不仅与其所处的地理环境因素有关联, 还与农业耕作制度、作物种植区域等因素有关。利用甘蔗生长模型机理性、系统性、动态性、机理性、预测性及其通用性的优势, 对甘蔗各种灾害情景动态模拟与预测, 将有助于理解甘蔗灾害形成过程及造成的影响, 提高甘蔗灾情监测预警的准确性。三是加强多源观测数据的利用, 加强气象观测、地面观测、作物生长模型及遥感信息等多源数据耦合, 发展“星、云、机、站”的灾害立体防控体系<sup>[94]</sup>, 建立针对各种灾害的甘蔗遥感监测预警模型。其次, 重视低空无人机遥感、传感器技术及“互联网”技术应用于灾害的数据采集与管理, 探索大数据挖掘、云计算及数据同化等新技术应用于甘蔗灾害时间序列数据挖掘、灾害预测模型优化等方面研究, 提高甘蔗防灾减灾的信息化监测与应

对能力, 促进农业向智能化、智慧化的高端方向发展<sup>[95]</sup>。

## 参考文献

- [1] 李杨瑞, 杨丽涛. 20 世纪 90 年代以来我国甘蔗产业和科技的新发展. 西南农业学报, 2009, 22(5): 1469~1476.
- [2] 贺贵柏. 试论广西蔗糖产业可持续发展战略. 甘蔗糖业, 2012, 12(2): 54~57.
- [3] 李祎君, 王春乙, 赵蓓, 等. 气候变化对中国农业气象灾害与病虫害的影响. 农业工程学报, 2010, 26(S1): 263~271.
- [4] 廖东声, 覃思静. 广西甘蔗产业生产成本核算及控制问题分析. 学术论坛, 2013, 36(8): 83~87.
- [5] 何燕, 谭宗琨, 丁美花, 等. 2008 年罕见低温冻害对广西甘蔗及蔗糖业的影响. 灾害学, 2009, 24(1): 68~72.
- [6] 梁兆新, 曾伯胜. 甘蔗收获机械现状、存在问题和关键技术的改进. 中国机械学会成立 40 周年庆典暨 2003 年学术年会论文集. 北京, 2003.
- [7] 杨望, 杨坚, 莫兴漫, 等. 甘蔗抗倒伏技术研究现状及发展趋势. 广西农业机械化, 2016(3): 25~26.
- [8] 广西糖网. 广西发生洪涝灾害, 超过 50 万亩甘蔗受灾, [http://www.msweet.com.cn/gxtw/\\_300518/gsmndj/djdy/zhbg/974461/index.html](http://www.msweet.com.cn/gxtw/_300518/gsmndj/djdy/zhbg/974461/index.html)(2017-07-05).
- [9] 黄应昆, 李文凤. 甘蔗主要病虫害原色图谱. 昆明: 云南科技出版社, 2002.
- [10] 李志贤, 冯远娇, 杨文亨, 等. 甘蔗间作种植研究进展. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 884~888.
- [11] 何维勋. 农业百科全书·农业气象卷. 北京: 农业出版社, 1986.
- [12] 王春乙. 重大农业气象灾害研究进展. 北京: 气象出版社, 2007: 7~11.
- [13] 亓来福, 王继琴. 从农业需水量评价我国的干旱状况. 应用气象学报, 1995, 6(3): 356~360.
- [14] 关兆涌, 冯智文. 利用水分平衡指标检验农业干旱的研究. 干旱地区农业研究, 1986(1): 1~13.
- [15] 董振国. 对土壤水分指标的研究. 气象, 1985(1): 32~33.
- [16] Palmer W. Meteorological drought. *Weather Bureau, U. S. Research Paper*, 1965, 45: 1~58.
- [17] Wells N, Goddard S. A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 2004, 17(12): 2335~2351.
- [18] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696~1718.
- [19] 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. 遥感学报, 2002, 6(6): 481~484.
- [20] 陈维英, 肖乾广, 盛永伟. 距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用. 环境遥感, 1994, 9(2): 106~112.
- [21] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous area. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11: 1405~1420.
- [22] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 1995, 15(11): 91~100.
- [23] 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. 武汉大学学报: 信息科学版, 2001, 26: 412~418.
- [24] Jackson R D. A reexamination of the crop water stress index. *Irrigation Science*. 1988, 9(4): 309~317.
- [25] 刘丽, 刘清, 周颖, 等. 卫星遥感信息在贵州干旱监测中的应用. 中国农业气象, 1999, 20(3): 43~47.
- [26] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 213~224.
- [27] Wu J J, Zhou L, Liu M, et al. Establishing and assessing the Integrated Surface Drought Index(ISDI)for agricultural drought monitoring in mid-eastern China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 397~410.
- [28] 范一大, 吴玮, 王薇, 等. 中国灾害遥感研究进展. 遥感学报, 2016, 20(5): 1170~1184.
- [29] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 农业干旱监测研究进展与展望. 地理学报, 2015, 70(11): 1835~1848.
- [30] 李强子, 闫娜娜, 张飞飞, 等. 2010 年春季西南地区干旱遥感监测及其影响评估. 地理学报, 2010, 65(7): 771~780.
- [31] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究. 遥感学报, 2003, 7(5): 420~427.
- [32] 唐巍, 覃志豪, 秦晓敏. 农业干旱遥感监测业务化运行方法研究. 遥感信息, 2007(2): 37~41.
- [33] 覃志豪, 徐斌, 李茂松, 等. 我国主要农业气象灾害机理与监测研究进展. 自然灾害学报, 2005, 14(2): 61~69.
- [34] 李柏贞, 周广胜. 干旱指标研究进展. 生态学报, 2014, 34(5): 1043~1052.
- [35] 刘晓英, 郝卫平, 张健. 农田尺度下干旱指标及应用. 中国农业气象, 2005, 26(2): 99~105.
- [36] 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. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 114~121.
- [37] 匡昭敏, 朱伟军, 丁美花, 等. 多源卫星数据在甘蔗干旱遥感监测中的应用. 中国农业气象, 2007, 28(1): 93~96.

2018年6月

- [38] 卢小凤, 匡昭敏, 李莉, 等. 气候变化背景下广西甘蔗秋旱演变特征分析. 南方农业学报, 2016, 47(2): 217~222.
- [39] 莫建飞, 钟仕全, 陈燕丽, 等. 基于 GIS 的广西甘蔗萌芽分蘖期干旱等级空间分布. 江苏农业科学, 2015, 43(3): 113~115.
- [40] 李莉, 匡昭敏, 莫建飞, 等. 基于 AHP 和 GIS 的广西秋旱灾害风险等级评估. 农业工程学报, 2013, 29(19): 193~201.
- [41] 苏永秀, 李政, 吕厚荃. 水分盈亏指数及其在农业干旱监测中的应用. 气象科技, 2008(5): 592~595.
- [42] 匡昭敏, 朱伟军, 丁美花, 等. 多源卫星数据在甘蔗干旱遥感监测中的应用. 中国农业气象, 2007, 28(1): 93~96.
- [43] 钟仕全, 罗永明, 莫建飞, 等. 环境减灾卫星数据在干旱监测中的应用. 中国农业气象, 2011, 34(4): 593~597.
- [44] 王君华, 莫伟华, 钟仕全, 等. 基于 MODIS 数据的蔗区旱情监测与评价——以广西崇左市为例. 安徽农业科学, 2010, 38(17): 9103~9105.
- [45] 李召良, 段四波, 唐伯惠, 等. 热红外地表温度遥感反演方法研究进展. 遥感学报, 2016(5): 899~920.
- [46] 周鸿凯, 叶振邦. 干旱对甘蔗叶片的细胞透性及脯氨酸积累效应的研究初报. 甘蔗糖业, 1988(4): 39~41.
- [47] 杨丽涛, 李杨瑞. 干旱条件下后期灌溉对不同品种甘蔗产量、蔗糖分和生理生化特性的效应研究. 甘蔗糖业, 1993(1): 15~20.
- [48] 钟希琼, 叶振邦. 甘蔗不同品种(种)对干旱的生理反应. 华南农业大学学报, 1993, 11(4): 138~144.
- [49] 梁远标, 谭中文. 甘蔗不同基因型幼苗对干旱胁迫及复水的反应差异研究. 甘蔗糖业, 1996(2): 11~19.
- [50] 罗俊, 林彦铨, 张木清, 等. 甘蔗叶绿素 a 荧光参数对干旱胁迫的响应. 甘蔗糖业, 2000(2): 15~20.
- [51] 郭元元, 罗海斌, 曹辉庆, 等. 土壤自然干旱胁迫对甘蔗幼苗根系保护酶系统的影响. 南方农业学报, 2012, 43(9): 1281~1286.
- [52] 何平, 程志远, 李穆, 等. 甘蔗苗期对干旱胁迫的生理响应研究. 中国农学通报, 2014, 30(31): 132~135.
- [53] Do Thanh Trung, 李健, 张凤娟, 等. 干旱胁迫下不同甘蔗品种叶片抗氧化酶活性和渗透调节物质含量的变化. 热带作物学报, 2018, 39(5): 858~866.
- [54] 刘家勇, 陈学宽, 夏红明, 等. 干旱胁迫下气温对甘蔗叶绿素荧光动力学参数的影响. 西南农业学报, 2018, 31(3): 478~482.
- [55] 谭宗琨, 黄城华, 孟翠丽, 等. 甘蔗寒冻害等级指标及之灾损指标的初步研究. 中国农学通报, 2014(28): 169~181.
- [56] 张倩, 赵艳霞, 王春乙. 我国主要农业气象灾害指标研究进展. 自然灾害学报, 2010, 19(6): 40~54.
- [57] 王书裕. 吉林省的冷害及其分布. 气象科技, 1975(8): 19~22.
- [58] 马树庆, 袭祝香, 王琪. 中国东北地区玉米低温冷害风险评估研究. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 137~141.
- [59] 高素华. 玉米延迟型低温冷害的动态监测. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 117~121.
- [60] 王石立, 郭建平, 马玉平. 从东北玉米冷害预测模型展望农业灾害预测技术的发展. 气象与环境学报, 2006, 22(1): 45~50.
- [61] 李祎君, 王春乙. 东北地区玉米低温冷害综合指标研究. 自然灾害学报, 2007, 16(6): 15~20.
- [62] 王春林, 唐力生, 陈水森, 等. 寒冷灾害监测中的全天候地表温度反演方法研究. 中国农业气象, 2007, 28(1): 80~87.
- [63] 陈修治, 陈水森, 苏泳娴, 等. 基于被动微波遥感的 2008 年广东省春季低温与典型作物寒害研究. 遥感技术与应用, 2012, 27(3): 387~395.
- [64] 刘尉, 王重洋, 李丹, 等. 结合被动微波和光学遥感的“超级寒潮”广东地表温度特征及其对马铃薯生长的影响. 热带地理, 2018, 38(1): 61~71.
- [65] 李茂松, 王道龙, 钟秀丽, 等. 冬小麦霜冻害研究现状与展望. 自然灾害学报, 2005, 29(4): 72~78.
- [66] Rundorff B F T, Aguiar D A, Adami M, et al. Frost damage detection in sugarcane crop using MODIS images and SRTM data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, New York:IEEE International*, 2012: 5709~5712.
- [67] 谭宗琨, 丁美花, 杨鑫, 等. 利用 MODIS 监测 2008 年初广西甘蔗的寒害冻害. 气象, 2010, 36(4): 116~119.
- [68] 丁美花, 谭宗琨, 何燕, 等. 基于 MODIS 数据的甘蔗冻害监测——以广西来宾市为例. 热带作物学报, 2009, 30(7): 918~922.
- [69] 匡昭敏, 李强, 尧永梅, 等. EOS/MODIS 数据在甘蔗寒害监测评估中的应用. 应用气象学报, 2009, 20(3): 360~364.
- [70] 钟仕全, 陈燕丽, 刘吉凯, 等. 基于多源遥感数据的甘蔗霜冻监测评估方法. 科学技术与工程, 2018, 18(9): 189~193.
- [71] 董燕生, 陈洪萍, 王慧芳, 等. 基于多时相环境减灾卫星数据的冬小麦冻害评估. 农业工程学报, 2012, 28(20): 172~179.

- [ 72 ] Chen J, Li H, Han Y. Potential of RADARSAT-2 data on identifying sugarcane lodging caused by typhoon. *International Conference on Agro-Geoinformatics. IEEE*, 2016: 1~6.
- [ 73 ] 莫建飞, 钟仕全, 陈燕丽, 等. 广西主要农业气象灾害监测预警系统的开发与应用. *自然灾害学报*, 2013, 22(2): 150~157.
- [ 74 ] 常海霞, 郭红亮. 除草剂对农作物影响的分析. *山西农经*, 2018(5): 70~71.
- [ 75 ] 黄文江, 张竞成, 师越, 等. 作物病虫害遥感监测与预测研究进展. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 10(1): 30~43.
- [ 76 ] Zhang M, Qin Z, Liu X. Remote sensed spectral imagery to detect late blight in field tomato. *Precision Agriculture*, 2005(6): 489~508.
- [ 77 ] Qin Z, Zhang M. Detection of rice sheath blight for in-season disease management using multispectral remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005(7): 115~128.
- [ 78 ] Apan A, Held A, Phinn S. Detecting sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(2): 489~498.
- [ 79 ] 张竞成, 袁琳, 王纪华, 等. 作物病虫害遥感监测研究进展. *农业工程学报*, 2012, 28(20): 1~11.
- [ 80 ] Bravo C, Moshou D, Oberti R, et al. Foliar Disease Detection in the Field Using Optical Sensor Fusion. *European Journal of Endocrinology*, 2004, 133(4): 467~474.
- [ 81 ] Misra P, Nath K, Tandon P K. Effect of heavy metals(Ni and Pb)stress on sugarcane. *Resource Environmental Life Science*, 2010, 3(4): 183~188.
- [ 82 ] 夏会龙, 程文伟, 池小雅. 镉胁迫对甘蔗生长及生理性状的影响. *中国土壤与肥料*, 2009(1): 42~45.
- [ 83 ] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报, 2014.
- [ 84 ] 何启钧, 林彦铨, 陈春花, 等. 甘蔗的抗盐育种技术 I. 盐分胁迫下甘蔗无性系的产量和品质性状表现. *福建农学院学报*, 1993, 22(4): 398~403.
- [ 85 ] 何春林, 陈彪, 吴元奇. 甘蔗苗期耐盐性评价指标的研究. *湛江海洋大学学报*, 1998, 18(3): 66~70.
- [ 86 ] 陈华文, 陈迪文, 黄莹, 等. 钾对盐胁迫下甘蔗苗期生长的影响. *甘蔗糖业*, 2014(3): 20~23.
- [ 87 ] 迟光宇, 郭楠, 陈欣. 重金属污染农田的高光谱遥感监测研究. *土壤与作物*. 2017, 6(4): 243~250.
- [ 88 ] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy: Theory. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(B4): 3039~3054.
- [ 89 ] Jacquemoud S, Baret F, Hanocq J F. Modeling spectral and bidirectional soil reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41(2): 123~132.
- [ 90 ] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 34(2): 75~91.
- [ 91 ] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 1984, 16(2): 125~141.
- [ 92 ] Jacquemoud S, Verhoef W, Baret F, et al. PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 56~66.
- [ 93 ] Irons J R, Campbell G S, Norman J M, et al. Prediction and measurement of soil bidirectional reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 249~260.
- [ 94 ] 覃志豪, 章力建, 高懋芳, 等. 遥感技术在农业立体污染监测中的应用. *国土资源遥感*, 2006, 18(1): 1~5.
- [ 95 ] 申格, 吴文斌, 史云, 等. 我国智慧农业研究和应用最新进展分析. *中国农业信息*, 2018, 30(2): 1~14.



## Research progress and prospect on the monitoring of sugarcane disaster

Huang Qiuyan<sup>1, 3, 4</sup>, Qin Zhihao<sup>2\*</sup>, Qin Zihong<sup>4</sup>, Hu Baoqing<sup>1, 3</sup>

(1. Beibu Gulf Environmental Evolution and Resources Utilization Laboratory at the Provincial Ministry of Education Key Laboratory, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China;

4. School of geography and planning, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China)

**Abstract:** [ **Purpose** ] Sugarcane, a widely planted cash crop in South China, is the main raw material for Chinese sugar manufacture industry. The more and more intensive and frequent occurrence of natural disasters such as drought and frozen has been believed to be the key factors affecting the stable harvest of sugarcane cropping in the sugarcane-concentrated regions in South China. Therefore, sugarcane disaster monitoring has become an important research topic in recent years in China to ensure the sustainable development of sugarcane cropping. Conventional ground methods for the monitoring cannot meet the practical needs of timely and rapidly acquisition on the useful information on sugarcane disaster dynamics in a regional scale. Remote sensing with advantage of synchronous observation over the entire region has become a powerful tool for sugarcane disaster monitoring. In this paper we provided a thorough review on the progress on sugarcane disaster monitoring in China in order to understand the development trends in the studies of sugarcane disaster monitoring. [ **Method** ] Sugarcane cropping in South China mainly encounters the challenges from the following 4 natural disasters: drought, cold temperature, biological stress (weed and pest/fungi attack) and environmental pollution. Thus we discussed the recent progress in sugarcane disaster monitoring from the above four aspects. Focus of the review was given on the approaches for the monitoring. [ **Result** ] The monitoring methods for meteorological disasters, biological disasters and environmental pollution disaster of sugarcane were systematically analyzed. Future efforts were proposed on the directions of sugarcane disaster monitoring. Remote sensing would be extensively applied in sugarcane disaster monitoring. Since drought shapes the most extensive impact on sugarcane cropping in China, the monitoring of sugarcane drought has become the most important area of sugarcane disaster monitoring. Though studies on sugarcane disaster monitoring have made great advance in recent decades, the mechanism leading to the happen of sugarcane drought still lacks sufficient and deep examination. Moreover, studies on the low temperature freeze injuries and pest/fungi monitoring is still very weak in comparison with that on cropping drought. The available approaches for sugarcane disaster monitoring on the basis of remote sensing is not so many. Furthermore, disasters such as heavy metal pollution and salt stress still lack applicable approaches with inputs mainly from

remote sensing. Therefore, the future development of sugarcane disaster monitoring would be concentrated on the following aspects. Integration of multi-sources remote sensing data with meteorological observation and ground investigation should be highly emphasized for sugarcane disaster monitoring. Combination of crop growth model with remote sensing information extraction represents another trend in sugarcane disaster monitoring in China. With remote sensing, focus should be given to the three-dimensional prevention of sugarcane disasters. Finally the advance from disaster monitoring to forecasting is very important for early warning on the change trend of sugarcane disasters in the regional scale. Therefore, a comprehensive approach for control system is urgently required to be strengthened. [ **Conclusion** ] It can be concluded that the paper provides a thorough review on sugarcane disaster monitoring in China, which is very necessary to improve the information acquirement for disaster mitigation, so that stable harvest of sugarcane cropping can be ensured for sugar industry. The review would also be helpful to promote the development of sugarcane cropping towards intelligent direction.

**Key words:** Meteorological disasters; remote sensing monitoring; disaster mechanism; sugarcane; environmental stress