

纪瑞鹏, 于文颖, 冯锐, 等. 作物对干旱胁迫的响应过程与早期识别技术研究进展[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 153–160.  
[JI Ruipeng, YU Wenying, FENG Rui, et al. Advance in the Response Process of Crops and Early Identification Technologies to Drought Stress[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 153–160. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.02.028.]

# 作物对干旱胁迫的响应过程与早期识别技术研究进展\*

纪瑞鹏<sup>1</sup>, 于文颖<sup>1</sup>, 冯 锐<sup>1</sup>, 武晋雯<sup>1</sup>, 张玉书<sup>1</sup>, 王 茜<sup>2</sup>

(1. 中国气象局沈阳大气环境研究所/辽宁省农业气象灾害重点实验室, 辽宁 沈阳 110166;

2. 辽宁省气象服务中心, 辽宁 沈阳 110166)

**摘 要:** 作物干旱是干旱灾害的主要表现形式之一, 严重影响着全球范围的粮食产量。为了积极应对干旱灾害影响, 实施对作物干旱的早期精准预警是最行之有效的。该文综述了国内外已开展的作物对干旱胁迫的响应过程研究进展, 包括干旱临近一发生阶段作物根系、气孔、叶水势等对早期干旱响应的敏感信号和指标; 干旱发生一发展阶段中光合作用、蒸腾作用、叶绿素荧光参数、同化代谢与干物质累积等对干旱的响应过程; 干旱发展一结束过程中的复水效应与干旱影响损失定量模拟评估技术等; 梳理了农业干旱监测预警综合系统的发展和应用情况、农业干旱监测和预警指标种类和应用情况、农业干旱遥感监测方法以及作物干旱地面监测与识别技术等相关成果。探讨了未来通过开展作物对干旱应激响应的生理生态过程机制研究, 进而准确捕捉到作物响应干旱胁迫的早期信号, 为实现作物干旱的早期识别、提前预警和应对作物干旱灾害的不良影响提供依据。

**关键词:** 干旱胁迫; 响应过程; 早期识别; 预警

**中图分类号:** X43; P467; S792; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)02-0153-08

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.02.028

干旱是全球最主要的自然灾害之一<sup>[1]</sup>, 在全球气候变暖的背景下, 干旱发生的强度和频率增加, 干旱灾害发生呈常态化<sup>[2]</sup>。如何科学、准确、及时预警是应对干旱的基础。针对气候变化背景下农业灾害新特点, 需要综合辨识气象灾害最优前兆信号<sup>[3]</sup>。我国水资源短缺, 干旱、半干旱地区约占国土面积的一半<sup>[4]</sup>, 在农业气象灾害中, 旱灾发生频率最高、面积最大<sup>[5]</sup>, 平均每年有 667 万~2 667 万  $\text{hm}^2$  农田遭受旱灾, 粮食因旱灾减产占总产量的 4.7% 以上, 严重威胁着我国粮食和生态安全<sup>[6-7]</sup>。《国家综合防灾减灾规划(2016–2020 年)》的主要任务中要求, “提高自然灾害早期识别能力, 加强防灾减灾救灾科技支撑能力建设。”因此, 提高干旱灾害的早期识别和预警能力是我国防灾减灾亟待解决的重要科学问题, 也是保障我国粮食安全和降低旱灾损失的迫切需求。

干旱是一种复杂过程, 首先由气象干旱引起, 发展到一定程度将引起农业干旱、生态干旱、水文干旱<sup>[8]</sup>以及社会经济干旱<sup>[9]</sup>。农业干旱是指由于土壤含水量低于作物需水量引起作物体内水分亏缺, 影响作物正常生长发育, 从而导致减产或失收的现象<sup>[10-11]</sup>。根据农业干旱的定义, 农业干旱的直接评判标准并不是降水量等气象指标, 而

是作物体内水分含量是否影响到作物的正常生长发育过程<sup>[12]</sup>。作物对干旱胁迫的响应是一个复杂的物理化学过程<sup>[13]</sup>, 其响应方式分为应激响应—主动适应—被动适应 3 种, 分别对应着干旱开始—轻度干旱—中度干旱—严重干旱—极端干旱 5 个阶段<sup>[14]</sup>。应激响应是指在胁迫的开始阶段, 作物立即做出的抑制、放慢或停止生长的反应或行为<sup>[15]</sup>。在土壤干旱达到一定程度之前, 作物为适应干旱发生调节性和适应性变化, 而其生理过程受到影响程度较小<sup>[16]</sup>; 但当土壤干旱达到一定程度后, 作物生理过程受到严重破坏, 干旱经由土壤传递到作物生理过程, 再传递到作物生态过程, 最后导致粮食减产。

在世界历史上, 干旱曾给人类造成了巨大的危害, 世界著名的古罗马文明、玛雅文明等许多人类灿烂文明的消失就与重大干旱事件有关。《NATURE》杂志的最新研究表明<sup>[17]</sup>, 1964–2007 年极端天气灾害造成全球粮食作物(玉米、水稻、小麦)大面积减产且呈增加趋势, 其中干旱和极端高温造成各国粮食产量减少 9%~10%, 而发达国家的粮食产量损失比发展中国家高 8%~11%。中国每年因气象灾害造成的损失约占整个自然灾害损失的 70%, 直接经济损失占国民生产总值的 3%

\* 收稿日期: 2018-08-07 修回日期: 2018-10-15

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0300309); 辽宁省科技厅重点研发计划指导计划项目(2017210001); 中国气象局沈阳大气环境研究所东北区域合作项目(2018SYIAEHZ1); 中国气象局沈阳大气环境研究所重点项目(2018SYIAEZD1)

第一作者简介: 纪瑞鹏(1972-), 男, 辽宁北票人, 正研级高级工程师, 主要从事农业气象研究。E-mail: jiruipeng@163.com

通讯作者: 张玉书(1963-), 女, 辽宁黑山人, 正研级高级工程师, 主要从事农业气象研究。E-mail: yushuzhang@126.com

~6%<sup>[18-19]</sup>。目前,对于作物干旱的研究方向主要集中于作物干旱过程中生理生态指标的响应和适应机制以及干旱灾害监测、损失评估等方面,特别是基于作物生理生态特性对干旱胁迫的响应及适应机理、过程研究较多,而如何准确捕捉作物响应干旱胁迫的早期信号和探讨作物对干旱应激响应的生理生态过程机制,最终实现提前预警和作物应对干旱灾害等科学问题急需解决。

## 1 作物对干旱胁迫的响应过程研究进展

作物干旱过程研究一般基于三个阶段:首先是干旱临近—发生阶段,研究的重点为作物对早期干旱的响应过程和特征规律;其次是干旱发生—发展阶段,研究成果主要集中于作物对干旱胁迫的响应机制、干旱过程的监测评价等方面;第三是干旱发展—结束阶段,重点研究干旱影响损失模拟、定量精细化评估方法等。

### 1.1 作物干旱临近—发生阶段的过程

作物生理过程对水分亏缺的敏感程度和反应顺序不同,山仑等<sup>[20]</sup>认为干旱对禾谷类作物不同生理功能影响的先后顺序为:细胞扩张(生长)→气孔运动→蒸腾作用(水分散失)→光合作用( $\text{CO}_2$ 同化积累)→物质运输(产量分配)。

#### 1.1.1 根系对干旱胁迫的响应过程

当土壤出现干旱后,根系响应干旱,合成植物激素 ABA 将干旱信息由作物根系传递到作物的地上部分,引起叶片气孔保卫细胞失水,同时调节气孔开闭<sup>[21-23]</sup>。Ionenko 等<sup>[24]</sup>通过玉米根系对干旱胁迫的响应试验,发现质膜透水性最早发生变化,水势变化信号可能被传递给水通道蛋白,在水分传输过程中,水通道蛋白对干旱做出迅速响应。干旱初期,根系产生的化学信号占主导,随着干旱的发展,叶片水势下降出现萎蔫时,根系水压信号起主导作用,驱动叶片合成更多的 ABA<sup>[25]</sup>。

#### 1.1.2 气孔对干旱胁迫的响应过程

气孔对干旱胁迫的响应过程是一项重要的生理机制。当土壤持续缺水时,为了限制作物的水分流失,气孔发生适应性变化,以防止作物受到进一步的伤害<sup>[26]</sup>。Bonyor<sup>[27]</sup>发现干旱会造成叶片气孔关闭并引起光合作用速率下降。当发生水分亏缺后,作物通过迅速关闭气孔限制气体交换<sup>[28]</sup>,以限制水分从角质层蒸腾扩散<sup>[29]</sup>,减少植物体内水分的流失<sup>[30]</sup>,降低了植物产生干旱的可能性<sup>[26]</sup>。

#### 1.1.3 叶水势和叶片含水量对干旱胁迫的响应过程

作物受旱状态下,叶片含水量和叶水势均下降,叶水势和叶片含水量是确定植物生理水分状

况的有效手段之一<sup>[31]</sup>。叶水势和叶片含水量均能定量地反映作物叶片中的水分状况,能较好地指示作物对干旱胁迫的敏感性和耐受性<sup>[32-33]</sup>。

#### 1.1.4 形态特征对干旱胁迫的响应

株高、茎粗、叶片数、叶面积等作物形态指标对干旱胁迫的反应敏感程度不一,反应敏感的形态指标可用来诊断作物水分亏缺状况。有研究表明叶片水分还没变化,叶片生长速率就已受到抑制<sup>[34]</sup>;作物缺水时由于叶水势降低,叶片卷曲,作物叶片的叶面积扩展对干旱胁迫很敏感<sup>[35]</sup>;陈家宙等<sup>[16]</sup>通过玉米在红壤中的干旱试验发现,茎粗和叶面积先于株高发生阈值反应;水分亏缺影响作物对光的拦截和将其转化为生物量的能力<sup>[36]</sup>,作物生长过程对水分亏缺极其敏感,叶片伸展量的减少会早于光合作用的下降<sup>[37]</sup>;累积叶面积决定了作物对光的截获能力,叶片为了适应水分亏缺,将减少总叶面积指数以降低蒸腾速率<sup>[38]</sup>。

### 1.2 作物干旱发生—发展过程中的响应

国内外关于作物生理生态过程对干旱胁迫的响应研究较多,包括:作物对不同干旱程度和干旱持续时间的响应,作物不同生长阶段对干旱胁迫的响应,作物不同器官对干旱胁迫的响应,干旱胁迫对作物生长过程和最终产量的影响,不同基因型或细胞类型作物对干旱胁迫的响应,作物的生理代谢过程对干旱胁迫的响应等<sup>[39-40]</sup>。

#### 1.2.1 光合作用对干旱胁迫的响应过程

作物利用土壤供应的水分进行光合作用和物质积累。国内外对干旱胁迫与植物光合作用的关系已有较多研究。干旱胁迫导致气孔的密度、大小和孔径显著减少,引起光合速率和蒸腾速率的降低<sup>[41]</sup>。轻度、中度干旱胁迫后,叶片气孔关闭,光合速率下降,植株萎蔫,生长速率下降;重度干旱胁迫将导致光合作用停止,植物体代谢遭到破坏甚至植株死亡<sup>[42-43]</sup>。光合速率、气孔导度和蒸腾速率降低,胞间  $\text{CO}_2$  浓度和水分利用效率增加,土壤水分状况影响作物光合参数峰值的高低和出现时间早晚,干旱胁迫后,光合速率、蒸腾速率和气孔导度峰值出现时间提前<sup>[44-46]</sup>。

#### 1.2.2 蒸腾作用对干旱胁迫的响应过程

蒸腾作用是光合作用产生的必要结果和前提条件,主要驱动因子为太阳辐射<sup>[47]</sup>。作物蒸腾是一个复杂的生理过程,叶片蒸腾代表了叶片瞬时蒸腾速率,植株茎流反映了整个植株从根系吸收的水分向上传输量<sup>[48]</sup>。研究发现,当作物水分充足时,茎流速率大于蒸腾速率,当作物水分亏缺时,茎流速率将小于蒸腾速率<sup>[49-50]</sup>。研究发现,干旱诱导根到叶的信号,由土壤水分通过蒸腾作用的推动,导致气孔关闭<sup>[51]</sup>。杨涛等<sup>[52]</sup>认为干旱胁迫对蒸腾作用的影响可能大于光合作用。目前普遍利用包裹式茎流计技术观测玉米等农作物植株茎流,通过测定的茎流速率反映作物体内水分

状况以及作物蒸腾量变化<sup>[53-56]</sup>。

### 1.2.3 叶绿素荧光参数对干旱胁迫的响应过程

干旱胁迫导致植物光能利用效率下降<sup>[57]</sup>,在轻度和中度干旱胁迫下,光合速率下降的主要原因是气孔限制;而严重干旱胁迫下,由于叶绿素结构被破坏、叶肉细胞光合能力下降是光合速率降低的主要原因。叶绿素负责光能的吸收、传递和转化,是作物进行光合作用的主要化学物质和必要条件。叶绿素荧光参数可以估计植物吸收光能用于光合作用或作为热量耗散的百分比<sup>[58]</sup>;最大光能利用效率( $F_v/F_m$ )被广泛应用于检测胁迫条件下光合机构的变化<sup>[59]</sup>;利用叶绿素荧光参数技术快速准确的特点,通过叶绿素荧光的变化,可以对由于土壤水分缺失造成的干旱胁迫做出快速预警<sup>[60]</sup>。

### 1.2.4 同化代谢对干旱胁迫的响应过程

干旱胁迫影响作物体内的光合产物分配倾向于根系部分,以促进根系吸水<sup>[61]</sup>。近期,德国波茨坦气候影响研究所的一项新研究表明,在干旱胁迫的情况下,植物会长出更多的根脉,还会关闭叶片中的开口以防止水分流失,从而降低 $\text{CO}_2$ 的摄入量,最终粮食产量会进一步减少。同时,植物体内活性氧增加,细胞渗透调节物质变化,光合作用、生长和代谢活动受到抑制,为了保证生存,作物会做出气孔调控、渗透调节和抗氧化防御等响应,以减轻干旱所造成的伤害<sup>[62]</sup>。

研究表明,干旱胁迫的非气孔因素限制主要表现为干旱抑制光合磷酸化、1,5-二磷酸核酮糖再生及1,5-二磷酸核酮糖羧化酶活性,如果羧化反应受到抑制,过剩光能引起光合机构的光抑制甚至光破坏<sup>[63]</sup>。随着干旱胁迫程度的增加,脯氨酸积累量和可溶性糖含量总体呈上升趋势,为玉米的主要渗透调节物质<sup>[64]</sup>。Nikolaeva等<sup>[65]</sup>认为玉米对干旱的抵御过程有一定的次序,首先是碳水化合物和脯氨酸含量的增加,以确保光合作用所需的渗透和抗氧化系统运作,其次是过氧化酶的活性增加。

### 1.2.5 作物形态指标对干旱胁迫的响应

众多学者通过干旱胁迫试验,发现遭受轻度、中度和重度干旱胁迫后,作物形态指标均发生了不同程度的抑制情况。水分充足时作物茎秆微膨胀,水分亏缺时微收缩<sup>[66]</sup>,可利用茎秆微变化诊断作物缺水状况<sup>[67]</sup>;作物持续缺水时,出现植株矮小、叶片卷曲甚至枯萎、叶面积扩展速率减小、叶片生长速率减小等现象<sup>[40]</sup>。郑盛华等<sup>[68]</sup>通过玉米苗期中度和重度干旱胁迫试验,发现株高、茎粗、叶片数和总叶面积观测值与对照相比都有不同程度的下降;中度干旱胁迫下不同玉米品种的形态指标变化不大。

作物不同生育期对干旱胁迫的响应不完全相同。例如,拔节—吐丝期是玉米全生育期中的需

水关键期,此阶段对外界不良环境条件抵抗能力较差,如遭遇干旱,最终产量可能减产接近3成<sup>[69]</sup>;干旱发生后玉米株高、叶片日生长量、绿叶面积、根系数量、重量和体积等形态指标减少<sup>[70]</sup>。拔节期开始持续的土壤水分下降引起株高显著下降、同时叶片的最大净光合速率逐步下降,直至降至不足对照的10%<sup>[71]</sup>。

### 1.3 作物干旱发展—结束过程中的响应

作物干旱发展—结束过程基本处于干旱胁迫影响过程的尾声,干旱影响的效果主要体现在遭受胁迫后作物的复水效应和作物生物量累积量,即生物产量或经济产量。此时研究重点多集中在干旱后复水恢复能力、作物干旱影响损失过程的作物生长模型模拟及损失定量化评估。

作物对干旱的响应过程还表现在复水后作物的恢复过程,干旱胁迫结束后,作物的恢复能力是评价作物抗旱能力的一个重要方面<sup>[72]</sup>。作物在遭受干旱后的复水过程中,部分弥补了由干旱胁迫造成的损伤是其对逆境适应性的重要表现<sup>[73]</sup>。Acevedo<sup>[74]</sup>等研究发现,作物对干旱胁迫后复水的响应方式表现为胁迫解除后存在着短暂的快速生长,用于补偿干旱造成的部分生长损失。复水行为在一定程度上可以弥补干旱对作物造成的损失,对作物的生长产生一种补偿甚至是超补偿效应<sup>[75]</sup>。但该效应在轻度干旱后的复水过程表现明显,而严重干旱后的复水,其补偿能力减弱<sup>[76]</sup>。当严重胁迫后,即使干旱过程已经结束,恢复正常供水,作物自身的生理生态特性仍可能表现为持续的抑制反应。如玉米遭受持续干旱后对其复水,光合作用、叶绿素荧光参数指标虽有一定的恢复,但短期内难以达到正常水平,其抑制程度与干旱的持续时间、胁迫程度和发育期均有关;胁迫时间越长、胁迫程度越重,光合作用越呈现不可逆性<sup>[46,77]</sup>。

作物生长模型的发展为作物干旱评估提供了动态的定量化分析方法,模型能够从机理上模拟作物生育期内光合、呼吸、蒸腾等重要生理生态过程及其与气象、土壤等环境条件的关系,可为作物干旱动态监测和评估提供依据<sup>[12,78]</sup>。1960年代中期,de Wit提出了作物生长数值模拟理论后,经过半个世纪的发展,作物生长数值模拟在理论和技术方面不断发展完善,同时在农业气象灾害监测和评估方面也得到广泛应用。但由于作物受到干旱胁迫后作物生理生态过程发生了错综复杂的变化,而很多生物过程模型并没有考虑在内,导致目前作物模型对于干旱胁迫下作物的生长发育过程模拟效果不尽理想<sup>[71]</sup>。如何将作物生长发育对环境变化的各种复杂生理响应行为进行准确的定量化,是作物生长模型发展的关键问题,而田间试验结果可为模型的进一步完善提供可靠依据<sup>[79-80]</sup>。因此,通过作物干旱胁迫试验确定作物生长、生理参数的响应信号、变化过程以及指标

阈值,可为改进作物生长模拟模型提供参数和依据。

## 2 作物干旱的早期识别技术研究进展

开展作物干旱研究的最终目的是为干旱灾害的防御、减灾增效提供科技支撑。有效应对作物干旱,需要完善预测预警机制,建立合理的监测预警指标体系和预测预警系统,做到早发现、早预警、早处置。

### 2.1 农业干旱监测预警综合系统

千百年来,人类就如何防御干旱灾害进行了长期探索,逐步形成了一套监测、预警、评估和防御等技术措施,而干旱预警的及时性和准确性直接影响抗旱救灾的成效<sup>[81]</sup>。国内外组织和学者针对作物干旱监测、预警和评估技术开展了一系列研究工作,以地球观测组织全球农业监测计划(GEO-GLAM)为代表的国际计划组织,进行了大量关于农业干旱监测的探索工作;美国国家干旱减灾中心联合美国农业部等相关部门研发的干旱监测系统,包含气象指标、土壤墒情指标、卫星遥感植被指数等;美国普林斯顿大学开发的非洲干旱监测系统,采用的标准化降水指数;中国“九五”至“十二五”期间,在国家科技部的支持下,气象与农业等相关部门联合运用气象灾害预测预报技术对重大农业气象灾害监测、预警、预测技术进行持续攻关<sup>[82]</sup>。

### 2.2 农业干旱监测和预警指标

国内外用于干旱监测和预警的指标主要包括三大类,一是气象指标,如降水距平百分率、Palmer 干旱指数(PDSI)、作物水分指数(CMI)和蒸发需求干旱指数(EDDI)<sup>[83-84]</sup>等,这些指标反映了大气干燥程度以及干旱发生趋势,但难以表示作物遭受干旱的影响程度和机理;二是土壤墒情指标,通过监测土壤含水量确定土壤干旱程度并预报干旱阈值,但作物干旱是一个逐步发展的动态过程,土壤含水量相同并不说明作物受旱程度一样;三是作物生理生态指标,主要包括作物生理指标和作物形态指标,能反映作物的耐旱能力。利用作物生理生态指标识别作物干旱,可以更直接、更准确地反映作物干旱程度以及适应干旱能力,但由于环境、生育期、作物类型以及品种的不同,生理生态指标的差异较大,研究结果多为定性指标,缺乏定量分析<sup>[85-86]</sup>。由于作物生理生态干旱的复杂性,国外目前用于作物干旱早期预警的指标中,仍以气象干旱指标为主,如SPI, SPEI, PDSI, EDI, SWSI 和 CMI 等<sup>[87-90]</sup>;我国的农业干旱预警以气象和土壤墒情指标为主,均没有将作物干旱与其生理生态指标结合起来考虑<sup>[85]</sup>。

### 2.3 农业干旱遥感监测方法

遥感技术具有覆盖面广、分辨率高、数据易

获取、数据连续等优点,能弥补地面站点数据的不足,是农业干旱监测中比较常用的技术手段。国内外学者发展了大量的农业干旱遥感监测指数,这些指数主要可以归为4大类:1 土壤水分指数,如垂直干旱指数(PDI)、表观热惯量(ATI)、微波反演土壤水分(SM)等,这些指数表征了地面土壤湿度的变化情况,适用于早期农业旱情预警,但是并不能反映作物的真实受旱程度;2 作物形态及绿度指数,包括归一化植被指数(NDVI)、距平植被指数(AVI)、植被条件指数(VCI)、标准植被指数(SVI)等,这些指数反映作物叶面积、覆盖度、长势以及绿度等的变化情况,水分亏缺将限制作物生长,此类植被指数能反映作物生长受损状况,但是滞后效应明显,另外,由于干旱对作物不同发育期影响结果的不同,如在抽穗开花期遭受干旱,即使植被指数减少不明显,同样因为遭遇干旱胁迫导致作物减产;3 冠层温度指数,包括温度条件指数(TCI)、归一化温度指数(NDTI)、作物缺水指数(CWSI)、温度植被干旱指数(TVDI)、条件植被温度干旱指数(VTCI)、植被供水指数(VSWI)等,此类指数反映了作物冠层温度的变化情况,由于水分亏缺引起叶片蒸腾减少,从而冠层表面温度升高,综合植被指数的变化情况,能一定程度上反映作物受胁迫的状态;4 植被水分指数,包括归一化差异水分指数(NDWI)、全球植被水分指数(GVMI)、短波红外水分胁迫指数(SIWSI)等,此类指数反映了作物叶片含水量的变化情况,但同样存在着滞后性,另外在作物生长前期由于植被覆盖度低,监测的准确性受到限制<sup>[91-92]</sup>。目前农业干旱的监测预警综合系统通常将地面站点数据与遥感指数结合在一起,利用加权平均等方法对大范围的作物干旱进行监测和评估,取得了比较好的效果,但是在小区域干旱和作物生理干旱的识别上适用性较差。

### 2.4 作物干旱地面监测与识别

利用地面设备监测识别作物干旱是最为直接的手段。研究表明,在水分亏缺造成作物的各种损伤现象出现之前,作物就已经对干旱胁迫做出包括形态、生理、基因表达在内的适应性调节反应<sup>[93-94]</sup>。还有研究认为,即使在土壤水分充足的情况下,作物体内水分亏缺也可能会发生,从而影响到光合作用、物质运输、蛋白质合成和细胞伸长等生理过程<sup>[95]</sup>。同时,作物自身通过一系列的生理响应,如减小气孔导度、减少叶面积、改变根系生长模态等进行适应性调节,以抵御干旱<sup>[96-98]</sup>。在作物干旱临近-发生阶段,作物的根系、气孔、叶片含水量、叶水势以及形态特征等已经对干旱胁迫发生了应激响应,作物的生理生态过程发生明显变化,预示着即将发生作物干旱。因此,监测作物不同生理过程对干旱的响应,可为避免或减少水分亏缺对土壤和植物组织的不利

影响提供重要信息<sup>[99]</sup>。

目前针对作物干旱的识别主要是通过仪器监测。表 1 给出了作物干旱早期识别指标和常用的监测仪器以及指标可用性。这些作物生理生态指标比测雨、测墒等传统方法更加快速和精准地检测作物自身受旱情况,但由于其指标界定的复杂性,尚未广泛应用。

### 3 问题与展望

综上所述,目前针对作物干旱的监测预警技术还未有效定量融入作物生态生理指标,还不是真正意义上的作物干旱预警。

国内外学者围绕着土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 这一基本概念,重点从水分经由土壤到达植物根系,被根系吸收经过细胞传输进入植物茎,到达叶片,最后由叶片气孔蒸腾扩散到大气几个阶段,针对作物对干旱胁迫响应过程的机制机理、干旱监测预警指标体系、干旱影响损失模拟评估等方面开展了大量深入的研究,取得了众多成果。总结作物形态、根系、光合作用、叶绿素荧光参数和作物同化代谢等过程或指标对干旱胁迫响应的研究发现,作物生理生态指标能够用于诊断干旱发生或发展阶段作物水分亏缺状况,在不同的干旱发展阶段以及作物生长时期,选择适合的生理生态指标进行快速干旱预警是可行的。而目前的干旱早期识别和预警技术和方法,还未能很好的从生理生态角度实现准确预测作物干旱,没有建立起成熟的能反映作物干旱的生理生态定量化指标体系,制约着作物干旱综合预警技术发展。

从作物干旱响应机理以及敏感性研究进展中

可以发现,利用作物生理生态指标进行干旱预警研究具有理论依据。从理论上讲,作物干旱是气象干旱的影响结果,作物干旱的发生滞后于气象干旱<sup>[100]</sup>,是渐进累积的动态变化过程<sup>[81]</sup>。如果干旱在传递到作物生理生态过程之前就缓解,基本上对作物没有实质性破坏,而越往下一阶段传递,干旱影响的效应就越难以逆转;若干旱未严重到不可逆转阶段,可通过早期预警采取有效措施避免或减轻灾害损失<sup>[6-7]</sup>。如果能在干旱的初期(临近一发生)胁迫过程准确找到作物生理生态应激响应信号,并定量表述其过程特征,是实现作物干旱提前预警的关键。作物对干旱胁迫的响应取决于植物种类、基因、年龄、干旱程度和干旱的持续时间以及土壤物理参数等<sup>[99]</sup>,用作物形态和生理指标的变化确定受旱状态存在很多的不确定性<sup>[101-102]</sup>。另外,作物生理活动如何影响到作物生长发育等方面的基础性研究薄弱,导致干旱短期预警技术的缺乏<sup>[103]</sup>。因此,亟需开展作物干旱早期识别和预警相关关键技术的研究。

作物生理生态过程的变化,对作物干旱早期精准、实时预警具有重要指示作用,一项完善的作物干旱预警技术必须要融入作物生理生态定量指标,才能更及时和准确地为抗旱救灾提供依据,最大限度地减轻干旱灾害损失。因此,如何准确捕捉作物响应干旱胁迫的早期信号,探讨作物对干旱应激响应的生理生态过程机制,是实现提前识别作物干旱和应对作物干旱灾害急需解决的科学问题。加强作物生理、形态指标与农业干旱监测指标的耦合,实现干旱监测的传统方法与微观机理过程模型的耦合,建立综合的作物干旱监测预警技术,是未来作物干旱研究主要方向之一。

表 1 作物干旱早期监测与识别指标

指标类别	观测内容	观测仪器	作物干旱的可识别性
形态指标	株高、茎粗、叶面积指数等	直尺、叶面积仪等	反应敏感的形态指标可用来诊断早期作物水分亏缺状况。
光合作用	蒸腾速率、光合速率、气孔导度等	便携式光合作用仪	对干旱缺水反应灵敏,光合作用参数迅速做出调节响应,因此能快速检测作物水分亏缺状况。
叶绿素荧光参数	最大光能利用效率 ( $F_v/F_m$ )、光合电子传递速率 ETR 等	便携式光合作用仪、叶绿素荧光仪,多通道连续监测荧光仪等	能快速检测胁迫条件下光合机构的变化,对由于土壤水分缺失造成的干旱胁迫做出快速预警。
叶水势、叶片水分含量	叶水势、茎水势、叶片水分含量	水势仪	反映作物叶片中的水分状况,能较好地指示作物对干旱胁迫的敏感性和耐受性。
植株茎秆耗水	茎流速率等	包裹式茎流计	通过测定的茎流速率反映作物体内水分状况以及作物蒸腾量变化,能快速连续监测作物水亏缺状况。
同化代谢	过氧化物酶、脯氨酸、丙二醇、可溶性蛋白等	化学试剂提取	作物做出气孔调控、渗透调节和抗氧化防御等响应,能评价作物受干旱胁迫后发生的生化反应。
根系	总根测量(根长、表面积、投影面积、体积、平均直径和数目)、化学信号(ABA)	植物根系生长监测系统、化学试剂	根系生长速率变化、作物根系能以化学信号(ABA)的形式将干旱信息传递到地上部分,通过检测 ABA 变化迅速发现干旱信息。

## 参考文献:

- [1] Ashok K M, Vijay P S. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* [J]. 2010, 391(1/2): 202–216.
- [2] IPCC. Summary for policymakers. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation[R]. A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012: 1–19.
- [3] 周广胜, 何奇瑾, 汲玉河. 适应气候变化的国际行动和农业措施研究进展[J]. *应用气象学报*, 2016, 27(5): 527–533.
- [4] 龚容, 高琼. 叶片结构的水力学特性对植物生理功能影响的研究进展[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(3): 300–308.
- [5] ZHANG J. Risk assessment of drought disaster in the maize-growing region of Songliao Plain, China [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2004, 102(2): 133–153.
- [6] 张强, 韩兰英, 张立阳, 等. 论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1): 80–91.
- [7] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(2): 196–213.
- [8] 李耀辉, 张良, 张虎强, 等. 基于 CABLE 陆面模式的干旱监测及其对典型干旱事件的效果检验[J]. *高原气象*, 2015, 34(4): 1005–1018.
- [9] 吴杰峰, 陈兴伟, 高路. 水文干旱对气象干旱的响应及其临界条件[J]. *灾害学*, 2017, 32(1): 199–204.
- [10] 温奇, 李苓苓, 马玉玲, 等. 旱灾遥感预警监测评估技术——以 2011 年长江中下游旱灾为例[J]. *灾害学*, 2013, 28(2): 51–54.
- [11] 张继权, 严登华, 王春乙, 等. 辽西北地区农业干旱灾害风险评价与风险区划研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2012, 32(3): 300–306.
- [12] 刘建栋, 王馥棠, 于强, 等. 华北地区农业干旱预测模型及其应用研究[J]. *应用气象学报*, 2003, 14(5): 593–604.
- [13] Khakwani AA, Dennett MD, Khan N, et al. Stomatal and chlorophyll limitations of wheat cultivars subjected to water stress at booting and anthesis stages [J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2013, 45(6): 1925–1932.
- [14] 安玉艳, 梁宗锁. 植物应对干旱胁迫的阶段性策略[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2907–2915.
- [15] Skirycz A, Inzé D. More from less: plant growth under limited water [J]. *Curr Opin Biotechnol*, 2010, 21(2): 197–203.
- [16] 陈家宙, 王石, 张丽丽, 等. 玉米对持续干旱的反应及红壤干旱阈值[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(3): 532–539.
- [17] Lesk C, Rowhani P, Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production [J]. *Nature*, 2016, 529(7584): 84–87.
- [18] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [19] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究[J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3): 144–148.
- [20] 山仑, 邓西平, 张岁岐. 生物节水研究现状及展望[J]. *中国科学基金*, 2006, 20(2): 66–71.
- [21] 郭安红, 冯兆忠, 刘庚山, 等. 土壤干旱胁迫下非水力根信号调控夏玉米气体交换对大气环境的响应[J]. *生态学报*, 2005, 25(12): 3161–3166.
- [22] Souza TCD, Magalhães PC, Castro EMD, et al. The influence of ABA on water relation, photosynthesis parameters, and chlorophyll fluorescence under drought conditions in two maize hybrids with contrasting drought resistance [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, 35: 515–527.
- [23] Iwai S, Shimomura N, Nakashima A, Etoh T. New fava bean guard cell signaling mutant impaired in ABA-induced stomatal closure [J]. *Plant Cell Physiol*, 2003, 44: 909–913.
- [24] Ionenko IF, Dautova NR, Anisimov AV. Early changes of water diffusional transfer in maize roots under the influence of water stress [J]. *Environmental and Experimental Botany*. 2012, 76: 16–23.
- [25] 余林辉, 蔡晓腾, 徐萍, 等. 植物抗旱节水: 从实验室到田间[J]. *中国科学(生命科学)*, 2017, 47(1): 145–154.
- [26] 高春娟, 夏晓剑, 师恺, 等. 植物气孔对全球环境变化的响应及调控防御机制[J]. *植物生理学报*, 2012, 48(1): 19–28.
- [27] Bonyor J S. Plant productivity and environment [J]. *Science*, 1982, 218(4571): 443–448.
- [28] Mutava RN, Prasad PVV, Tuinstra MR, et al. Characterization of sorghum genotypes for traits related to drought tolerance [J]. *Field Crop Research*, 2011, 123: 10–18.
- [29] Muhammad A, Riaz A, SMA Basra, et al. Response of maize (*Zea mays* L.) hybrids to drought stress at early seedling stage [J]. *Research on Crops*, 2014, 15(1): 55–61.
- [30] Atsushi M, Tsuneo K. Diurnal and seasonal variation in bulk stomatal conductance of the rice canopy and its dependence on developmental stage [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 1161–1173.
- [31] Gonzales L, Gonzales-Vilar M. Determination of relative water content [C]// Reigosa MJ, ed. *Handbook of Plant Ecophysiology Techniques*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001: 207–212.
- [32] Sanchez-Rodriguez E, Rubio-Wilhelmi M, Cervilla LM, et al. Genotypic differences in some physiological parameters symptomatic for oxidative stress under moderate drought in tomato plant s [J]. *Plant Science*, 2010, 178(1): 30–40.
- [33] Ghassemi-Golezani K, Bakhshy J, Zehab-Salmasi S, et al. Changes in leaf characteristics and grain yield of soybean (*Glycine max* L.) in response to shading and water stress [J]. *International Journal of Biosciences*, 2013, 3(2): 71–79.
- [34] 梁宗锁, 康绍忠, 高俊凤. 植物对土壤干旱信号的感知、传递及其水分利用的控制[J]. *干旱地区农业研究*, 1999, 17(2): 72–78.
- [35] 张丛志, 张佳宝, 赵炳梓, 等. 作物对水分胁迫的响应及水分利用效率的研究进展[J]. *节水灌溉*, 2007(5): 1–6.
- [36] Gouesnard B, Zanetto A, Welcker C. Identification of adaptation traits to drought in collections of maize landraces from southern Europe and temperate regions [J]. *Euphytica*, 2016, 209(3): 565–584.
- [37] Tardieu F, Granier C, Muller B. Water deficit and growth. Co-ordinating processes without an orchestrator[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2011, 14(3): 283–289.
- [38] Welcker C, Sadok W, Dignat G, et al. A common genetic determinism for sensitivities to soil water deficit and evaporative demand: meta-analysis of quantitative trait loci and introgression lines of maize[J]. *Plant Physiology*, 2011, 157(2): 718–729.
- [39] 宋凤斌, 戴俊英. 玉米茎叶和根系的生长对干旱胁迫的反应和适应性[J]. *干旱区研究*, 2005, 22(2): 256–258.
- [40] 赵鸿, 王润元, 尚艳, 等. 粮食作物对高温干旱胁迫的响应及其阈值研究进展与展望[J]. *干旱气象*, 2016, 34(1): 1–12.
- [41] ZHAO W, SUN Y, Kjellgren R, et al. Response of stomatal density and bound gas exchange in leaves of maize to soil water deficit [J]. *Acta Physiol Plant*, 2015, 37: 1704.
- [42] Smirnov N. The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation [J]. *New Phytologist*, 1993, 125:



- 27–58.
- [43] Bohnert H J, Jensen R G. Strategies for engineering water – stress tolerance in plants [J]. Trends in Biotechnology, 1996, 14: 89–97.
- [44] 刘祖贵, 陈金平, 段爱旺, 等. 不同土壤水分处理对夏玉米叶片光合等生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 90–95.
- [45] 刘帆, 申双和, 李永秀, 等. 不同生育期水分胁迫对玉米光合特性的影响[J]. 气象科学, 2013, 33(4): 378–383.
- [46] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2902–2909.
- [47] Jezik M, Blazenc M, Letts MG, et al. Assessing seasonal drought stress response in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) by monitoring stem circumference and sap flow [J]. Ecohydrology, 2014, 8(3): 378–386.
- [48] 林同保, 孟战赢, 曲奕威. 不同土壤水分条件下夏玉米蒸发蒸腾特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(5): 22–26.
- [49] Allen S J, Grime V L. Measurements of transpiration from savannah shrubs using sap flow gauges [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 75: 23–41.
- [50] Pamela L N, Edward P G, Thompson T L. Comparison of transpiration rates among saltcedar, cottonwood and willow trees by sap flow and canopy temperature methods [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 11(6): 73–89.
- [51] Ghassemi-Golezani K, Bakhshy J, Zehab-Salmasi S, et al. Changes in leaf characteristics and grain yield of soybean (*Glycine max* L.) in response to shading and water stress [J]. International Journal of Biosciences, 2013, 3(2): 71–79.
- [52] 杨涛, 梁宗锁, 薛吉全, 等. 土壤干旱不同玉米品种水分利用效率差异的生理学原因[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(2): 68–71.
- [53] Samuel G K A, Harry O L, Thierry B. Patterns of root growth and water uptake of a maize-cowpea mixture grown under greenhouse conditions [J]. Plant and Soil, 2001, 235: 85–94.
- [54] Adel T. Z, Shinichi T, Hossein D, et al. A bowen ratio technique for partitioning energy fluxes between maize transpiration and soil surface evaporation [J]. Agronomy Journal, 2008, 100(4): 988–996.
- [55] 赵娜娜, 刘钰, 蔡甲冰. 夏玉米作物系数计算与耗水量研究[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 953–959.
- [56] 郭映, 董阳, 周振方, 等. 半干旱区玉米茎流规律及其对气象因子的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 94–99.
- [57] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, (33): 317–345.
- [58] Flexas J, Medrano H. Energy dissipation in C3 plants under drought [J]. Function Plant Biology, 2002, 29: 1209–1215.
- [59] Baker NR, Rosenqvist E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55: 1607–1621.
- [60] 童小芹, 王淑智, 夏咏, 等. 应用叶绿素荧光技术快速预警乌鲁木齐典型农作物干旱胁迫[J]. 干旱区研究, 2013, 30(5): 860–866.
- [61] 平晓燕, 周广胜, 孙敬松. 植物光合产物分配及其影响因子研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 100–111.
- [62] 曲涛, 南志标. 作物和牧草对干旱胁迫的响应及激励研究进展[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 126–135.
- [63] 李耕, 高辉远, 赵斌, 等. 灌浆期干旱胁迫对玉米叶片光系统活性的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(10): 1916–1922.
- [64] 张淑勇, 国静, 刘炜, 等. 玉米苗期叶片主要生理生化指标对土壤水分的响应[J]. 玉米科学, 2011, 19(5): 68–77.
- [65] Nikolaeva MK, Maevskaya SN, Voronin PY. Activities of antioxidant and osmoprotective systems and photosynthetic gas exchange in maize seedlings under drought conditions [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2015, 62(3): 314–321.
- [66] 孟兆江, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 根据植株茎直径变化诊断作物水分状况研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 30–33.
- [67] 李会, 刘钰, 蔡甲冰, 毛晓敏, 等. 夏玉米茎流速率和茎直径变化规律及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 187–191.
- [68] 郑盛华, 严昌荣. 水分胁迫对玉米苗期生理和形态特性的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1138–1143.
- [69] 纪瑞鹏, 张玉书, 姜丽霞, 等. 气候变化对东北地区玉米生产的影响[J]. 地理研究, 2012, 31(2): 290–298.
- [70] 张玉书, 米娜, 陈鹏狮, 等. 土壤水分胁迫对玉米生长发育的影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(3): 1–7.
- [71] 米娜, 张玉书, 蔡福, 等. 土壤干旱胁迫对作物影响的模拟研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2519–2526.
- [72] 张丹, 任洁, 王慧梅. 干旱胁迫及复水对红松针叶和树皮绿色组织光合特性及抗氧化系统的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2606–2614.
- [73] Xu Z, Zhou G, Shimizu H. Plant response to drought and rewatering [J]. Plant Signaling & Behavior, 2010, 5(6): 649–654.
- [74] Acevedo E, Hsiao T C, Henderson D W. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status [J]. Plant Physiology, 1971, 48(5): 631–6.
- [75] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 523–526.
- [76] 郭相平, 刘展鹏, 王青梅, 等. 采用 PEG 模拟干旱胁迫及复水玉米光合补偿效应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 286–290.
- [77] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 干旱胁迫对玉米叶片光响应及叶绿素荧光特性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(10): 82–87.
- [78] 杨霏云, 高学浩, 钟琦, 等. 作物模型、遥感和地理信息系统在国外农业气象服务中的应用进展及启示[J]. 气象科技进展, 2012, 2(3): 34–38.
- [79] Timlin D, Bunce J, Fleisher D, et al. Simulation of the effects of limited water on photosynthesis and transpiration in field crops: can we advance our modeling approaches? [C]// International Symposium on Computer. 2008: 1–11.
- [80] Craufurd P Q, Vadez V, Jagadish SVK, et al. Crop science experiments designed to inform crop modeling[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 170: 8–18.
- [81] 张晓煜, 杨晓光, 李茂松, 等. 农业干旱预警研究现状及发展趋势[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(11): 18–22.
- [82] 陈德亮. 气候变化背景下中国重大农业气象灾害预测预警技术研究[J]. 科技导报, 2012, 30(19): 3–3.
- [83] Hobbins M, Wood A, Meevov D, et al. The Evaporative Demand Drought Index. Part I: Linking Drought Evolution to Variations in Evaporative Demand [J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(6): 1745–1761.
- [84] Meevov D J, Huntington J L, Hobbins M T, et al. The evaporative demand drought index. Part II: CONUS-Wide assessment against common drought indicators[J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(6): 1763–1779.
- [85] 李柏贞, 周广胜. 干旱指标研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1043–1052.
- [86] 石耀辉, 周广胜, 蒋延玲, 等. 贝加尔针茅响应降水变化敏感指标及阈值研究[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2620–2630.

- [87] Smakhtin V U, Hughes D A. Review, automated estimation and analyses of drought indices in South Asia [J]. IWMI Working Paper N 83-Drought Series Paper N 1, Colombo, Sri Lanka, 2004.
- [88] ZHANG Q, ZHANG J, WANG C, et al. Risk early warning of maize drought disaster in Northwestern Liaoning Province, China [J]. Nat Hazards, 2014, 72: 701–710.
- [89] Eslamian S, Ostad-Ali-Askari K, Singh VP, et al. A review of drought indices [J]. International Journal of Constructive Research in Civil Engineering, 2017, 3(4): 48–66.
- [90] Vicenteserrano S M, Beguería S, Lópezmoreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696–1718.
- [91] 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.
- [92] 黄友听, 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.
- [93] Chaves MM, Pereira JS, Maroco J. Understanding plant response to drought from genes to the whole plant [J]. Functional Plant Biology, 2003, 89: 239–264.
- [94] Jenks M A, Hasegawa P M. Chapter 2. Plant cuticle function as a barrier to water Loss [M]// Plant Abiotic Stress. Blackwell Publishing Ltd, 2007: 14–36.
- [95] 杨帆, 苗灵凤, 胥晓, 等. 植物对干旱胁迫的响应研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(4): 586–591.
- [96] Lawlor D W. Genetic engineering to improve plant performance under drought: physiological evaluation of achievements, limitations, and possibilities [J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64(1): 83–108.
- [97] Gilbert M E, Medina V. Drought adaptation mechanisms should guide experimental design [J]. Trends in Plant Science, 2016, 21(8): 639–647.
- [98] LI X, Wilkinson S, SHEN J, et al. Stomatal and growth responses to hydraulic and chemical changes induced by progressive soil drying [J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 8: 1774.
- [99] Grzesiak MT, Waligórski P, Janowiak F, et al. The relations between drought susceptibility index based on grain yield (DSIGY) and key physiological seedling traits in maize and triticale genotypes [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2013, 35: 549–565.
- [100] 张强, 张良, 崔显成, 等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战 [J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 763–778.
- [101] Lacape M J, Wery J, Annerose D J M. Relationships between plant and soil water status in five field-grown cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivars [J]. Field Crops Research, 1998, 57: 29–43.
- [102] Peiguo G, Michael B, Stefania G, et al. Differentially expressed genes between drought-tolerant and drought-sensitive barley genotypes in response to drought stress during the reproductive stage [J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(12): 3531–3544.
- [103] 郭建平. 农业气象灾害监测预测技术研究进展 [J]. 应用气象学报, 2016, 37(5): 620–630.

## Advance in the Response Process of Crops and Early Identification Technologies to Drought Stress

JI Ruipeng<sup>1</sup>, YU Wenying<sup>1</sup>, FENG Rui<sup>1</sup>, WU Jinwen<sup>1</sup>, ZHANG Yushu<sup>1</sup> and WANG Qian<sup>2</sup>

(1. *Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration/Key Laboratory of Agrometeorological Disasters, Liaoning Province, Shenyang 110166, China;*

2. *Liaoning Province Public Meteorological Service Center, Shenyang 110166, China)*

**Abstract:** Crop drought is one of the major forms of drought disaster, seriously affecting the production of food crops in China or even in the world. In order to actively addressing the adverse effects of drought disaster, it is an effective means to implement accurate early warning of crop drought. This review summarizes the domestic and foreign researchers about the response processes of crops to drought stress, including the responses of crop roots, stomata, leaf water potential and other sensitive signals and indicators to early drought during the drought proximity-occurring stage; the response of photosynthesis, transpiration, chlorophyll fluorescence parameters, assimilation metabolism and accumulation of dry matter to drought during the drought occurring-onset stage; the advances on the re-watering effects of crops during the drought onset-remove stage and the quantitative simulation of the drought effects. It reviewed the development and application of agricultural drought monitoring and early warning comprehensive systems, the types and applications of agricultural drought monitoring and early warning indicators, agricultural drought remote sensing monitoring methods, and crop drought monitoring and identification technologies. Finally, future research prospects on the accurate capture of the warning signals of crop drought based on the mechanism of physiological and ecological processes responding to drought stress, which could provide a scientific basis for early identification, early warning of crop drought and tackling the adverse effects of drought disaster.

**Key words:** drought stress; response process; early identification; early warning