

作物水分亏缺诊断研究进展^{*}

张瑞美^{1,2}, 彭世彰¹, 徐俊增^{1,2}, 吴宏霞^{1,2}

(¹ 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; ² 河海大学现代农业工程系, 江苏 南京 210098)

摘 要: 水分胁迫是影响作物生产最为普遍的环境威胁, 水分亏缺的诊断对农田灌溉和精确农业的发展具有重要意义。植物本身具有一种适应土壤水分胁迫的生理生态调节机制, 以度过不良的生长环境, 这为水分亏缺诊断提供了信号和依据。本文从土壤指标、气象指标和作物指标角度综述了作物水分亏缺诊断的研究进展, 讨论了各种方法指标的利弊, 并从应用研究角度分析了应用尺度存在的问题。

关键词: 作物; 水分亏缺; 诊断

中图分类号: S 311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006) 02-0205-06

1 研究概况

随着水资源的“瓶颈”约束和水资源转为非农问题的日益严重, 现代农业生产模式由传统的“丰水高产”转向“节水高产”, 作物生理需水与用水、精确控制灌溉等领域成为现代节水农业的研究热点, 即根据作物需水量和需水规律, 实时诊断、定点定位、适时适量、处方供水。

水分亏缺是农业生产中存在的普遍问题, 受自然环境的影响, 绝大部分植物都不同程度地经受着土壤水分胁迫的威胁。大量研究表明, 轻度(适度)水分亏缺不但不会减产, 而且可以增加产量、提高品质, 重度水分亏缺则会影响作物生长发育从而最终影响产量。基于适度水分亏缺基础上灌溉制度(非充分灌溉、调亏灌溉、控制灌溉等)的发展, 对现代农业的发展和精确农业的应用具有重要意义。诊断水分亏缺、寻求适度水分胁迫阈值以谋求最高的水分利用效率一直备受关注, 国内外学者在作物水分监测和水分亏缺诊断方面做了大量的研究。从诊断指标出发, 对作物水分亏缺诊断的研究正在深入。

2 作物水分亏缺诊断指标

作物水分监测可以分为间接估算和直接测定两大类, 前者根据引起作物水分亏缺的环境因素(如土壤水分、空气温度等)的测定来估算作物水分状况,

后者直接测定作物生理指标(如叶水势、蒸腾速率等)来衡量作物水分状况。根据研究对象的不同, 作物水分亏缺诊断指标可以分为: 土壤指标、气象指标和作物指标等^[1]。

2.1 土壤指标

土壤指标是诊断作物缺水的一种最古老的方法, 最早是肉眼观察、经验判断, 发展到现在用各种方法测定土壤水分状况, 尤其是近年来, 遥感技术的发展为大面积评价和监测植物水分状况提供了一种新的有效途径^[1]。

2.1.1 土壤含水量 土壤含水量以变化显著、测定简便、直观性强等优点作为作物灌溉决策的诊断指标, 在生产中发挥着重要作用, 通常认为土壤相对有效含水量大于 0.75~0.80 时作物不受土壤水分胁迫。自 Philips(1966)提出土壤-植物-大气连续体 SPAC(Soil Plant Atmosphere)以来, 节水农业研究不断深入, 以土壤水分运动和平衡为中心, 建立了从简单的水均衡模型到复杂的水动力学机理模型, 并逐步应用于农田灌溉管理。长期以来, 土壤水分测量已形成了较成熟的测定方法体系, 主要有称重法、中子水分探测法、电阻法、时域反射仪 TDR(Time Domain Reflectometry)法等。遥感技术迅速发展, 多时相、多光谱遥感等可以定位定量地反映土壤水分状况, 大范围、实时监测土壤水分成为可能, 为农田土壤水分监控提供了更为有利的条件。

2.1.2 土水势 土壤有效水通常以田间持水量为

* 收稿日期: 2005-09-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)“南方季节性缺水灌区节水农业综合技术体系集成与示范”课题(2002A A 2 433); 江苏省研究生创新计划“水稻精准灌溉调控指标研究”课题(xm 04-43)

作者简介: 张瑞美(1980-), 女, 河北衡水人, 博士, 从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: zrm19811212@163.com

上限、凋萎系数为下限。但不同土壤的水分参数差异很大,难以用于自动灌溉指标控制和科研成果的推广,一般用土水势界定土壤有效性,为SPAC 中水分运动提供了统一尺度。在美国、巴基斯坦、比利时等国家,用土水势指导小麦、玉米和番茄等灌溉已相当普及。国内邱泽森(1993)首次从土壤水分能量观点出发,提出可以将土水势作为水稻间歇灌溉控制指标。其他学者^[2-3]也试验研究了不同土水势下水稻的生长发育,得到了合适的土水势指标,为建立水稻高产高效灌溉模式提供了依据。随着水稻无土层灌溉技术的发展,土水势的测控以操作简单、易于掌握等特点,成为重要的灌溉控制指标。但目前提出的土水势指标均与作物生理指标和形态指标相结合,理论研究中具有重要意义,生产实践仍较难应用。

2.2 气象指标

以影响作物生长的气温、空气湿度、日照、降水和风力等气象信息为输入变量,计算时段内的蒸发蒸腾量,累积到一定量,即可认为作物缺水。设施农业发达的国家对其研究应用程度较高,我国研究较多的是相对蒸散法,与水分亏缺敏感度结合成功地用于优化灌溉决策,为SPAC 系统中水分诊断提供了有效途径。该方法早在20世纪60年代已开始研究应用,较成熟,近年主要探讨相对蒸散与其它指标的关系^[4]。

2.3 作物指标

许多研究认为土壤水分状况和气象信息不能确切反映植物水分亏缺状况,需要直接监测作物本身的生理变化来确定水分状况,主要包括植株外观、叶水势、茎水势、生理特性、群体冠层、内源激素和细胞变化等。

2.3.1 叶指标 叶片是光合作用的器官,是有机营养物质的供应者,干旱胁迫下作物功能叶维持一定的水势和渗透调节是适应缺水环境的重要特性。

(1) 叶片外观 叶面积指数可以反映棉花生长发育状态,水分亏缺下叶片狭小。学者研究认为植株叶子的叶尖运动状况能反映缺水状况,只要保证测量时叶尖轨迹在控制区内,用计算机视觉技术可实现对叶尖实时、有效的监测。缺水条件下作物出现叶片增厚、下垂、颜色变深、变暗,下部叶子叶尖枯死,不易折断,叶片卷曲等萎蔫现象。叶片卷曲由叶片细胞膨压降低所引起,是内部水势状况和渗透调节结果的外部形态表现,能直观地反映作物对土壤水分

胁迫的敏感程度^[5]。水稻叶片卷曲度与土壤、植株含水量、水势和叶片表皮细胞的膨压的关系已有相关研究,作为鉴定水稻抗旱能力的指标在育种和栽培上已有应用。

(2) 叶片(相对)含水量 叶片相对含水量与土壤含水量呈线性相关^[6],与叶片温度及生理功能等关系密切,并且易于观测,作为田间监测植株水分状况的指标,有着不可替代的优势。王纪华等^[7]试验发现叶片含水量由75%下降到70%是叶片光合生理活性的一个重要转折点。水分胁迫下,叶片相对含水量下降,束缚水与自由水的比值急剧增大^[8],这种水分在体内的重新分配是对环境胁迫的积极调整和适应。国外学者提出植被在0.97、1.45和1.94 μm 附近的光谱反射率吸收峰可以反映植物的水分状况^[9],遥感技术的发展将进一步推动该方法在水分亏缺诊断上的应用。

(3) 叶水势 叶水势是植物水分状况的最佳度量,可广泛用于水分亏缺诊断。叶水势除了受土壤条件影响外,还随气象条件变化,与午后叶水势最低值相比,凌晨叶水势受大气变化影响较小、较稳定,可以更好地反映作物水分亏缺^[10]。张英普等^[11]和Rana^[12]分别定性和定量研究了作物凌晨叶水势临界值与土水势、土壤含水量的关系;胡继超等^[13]用阻滞方程描述了凌晨叶水势和土壤含水量的关系,用模糊聚类方法确定了冬小麦不同生育阶段的凌晨叶水势临界值。但也有学者认为叶水势对作物缺水并不十分敏感,建议将受短暂天气影响较小的茎水势,作为确定植物水分亏缺的敏感指标^[14];杨朝选等(1999)则提出,茎、叶水势之差更能反应水分状况变化,但测量中时有负值反常,还有待进一步研究。

(4) 气孔特性 气孔是 CO_2 和水分进出植物体的通道。水分亏缺下气孔的响应,国内外已有大量的报道。水分胁迫下气孔器体积变小,气孔密度增大,输导组织发达,利于水分及营养物质的交换和水分的保持。在前人研究基础上,申双和等^[15]进一步探讨了气孔阻力与土水势的关系,陈家宙等^[16]研究了土壤水分对作物叶片气孔导度 G_s 和蒸腾速率 T_r 的影响,建议将 G_s 和 G_s/T_r 变化相结合作为水分胁迫程度的一个参考指标。但气孔阻力变化较大,其测定一直是个难点,不能单以叶片某一部位为代表,杨建昌^[17]提出每2cm取一观察点测量较为准确。

(5) 光合特性 光合作用是绿色植物生命活动的能量和物质基础,水分胁迫下光合作用普遍受到

抑制。许多研究指出,轻度胁迫下植物光合作用降低主要是气孔导度下降所致,中度胁迫下主要是非气孔因素限制^[18-19]。气孔和非气孔限制常用来判断水分对植物的胁迫程度,前者通过叶片气孔保卫细胞的运动调节来实现,后者由叶片组织细胞的生化变化造成。结合光合变化特点国内外学者已经做了大量的工作,研究了非气孔限制出现的临界点变化动态,实现了光合气孔限制因子的定量分析,并建立了模拟农田 SPAC 系统中土壤水分动态、蒸发蒸腾、CO₂ 通量和光合作用的模型^[20]。水分胁迫程度不同,光合速率下降机理可能不同,有关水分胁迫如何影响光合电子传递及光合磷酸化,还需进一步的研究。

(6 蒸腾特性 蒸腾是植株必不可少的代谢环节,在SPAC 水热传输过程中占有极重要的地位。有研究指出蒸腾速率比光合速率对水分胁迫的反应更为敏感,更易受气孔调节影响。蒸腾速率与气孔阻力负相关,水分胁迫下植株主要通过降低气孔导度使蒸腾强度下降。彭致功等^[21]验证了气孔对植株蒸腾的调控作用,建立了以太阳辐射、气温和大气湿度为主要因子的植株蒸腾方程。

除气孔因素外,蒸腾速率还与叶片内部结构和作物品种等因素有关,其直接测量结果一般只反映叶片单位面积上水分的瞬间消耗,野外受外界因素影响大,以蒸腾速率变化来诊断作物缺水效果不明显。侯加林等^[22]采用热平衡原理,以恒定功率的热源作用于果树树干,测量热源上下不同处的温差来计算蒸腾速率的方法解决了这一问题。

2 3 2 茎秆指标

(1 茎秆直径变化 植株茎膨胀、收缩与作物体内水分状况有密切关系,能实时、准确地反映植株体内水分状况。20世纪 60年代后期学者就开始了相关试验研究,验证了茎直径变化与作物水分状况间的关联性。之后的定性研究重点探讨了茎直径变化与植株其它部位的水分信号之间的关系,发现茎直径与叶水势之间存在滞后效应。对水分胁迫导致茎秆直径变化的机理研究,许多学者得到了不同的结论。Molz 和 Klepper^[23]研究证明水分胁迫条件下茎秆发生的任何可测变化都归因于韧皮部及相关组织内活细胞的失水。SO HB 等^[24]针对茎直径变化与叶水势之间的滞后效应,提出了利用茎直径变化推求叶水势的方法,并在多种作物上验证了较高的精度。茎直径微变化法以简便、稳定、无损、连续自动监测

等特点,受到越来越多的关注。国外将茎直径变化作为一个监测作物水分状况的指标,与灌溉自动控制系统相联结,实现作物水分管理的自动化。

(3 茎 流 茎流指蒸腾作用在植物体内引起的上升液流,与蒸腾间存在着必然的联系,当蒸腾速率大于茎液流速时,将产生不同程度的水分亏缺^[25-26]。李国臣等^[27,28]认为相同的气象条件下充分供水与水分亏缺的茎流变化曲线间相关系数 ρ 的大小可以反映作物水分亏缺程度,并以 ρ 为决策指标应用神经网络技术开发了作物水分亏缺诊断系统。茎流的测定方法有重量法和热量法等,由于热量法不影响蒸腾过程,较多地应用于实践。用热量示踪茎流的技术始自 1932年,主要有热波速法和热平衡法两类。前者研发的历史较长,技术比较成熟,主要适用于果林等木本植物;后者在 20世纪 80年代后才有了较大的发展,多用于园艺、农作物等草本植物。目前,热量法茎流测试技术已经在田间或林区的科学试验中发挥作用^[29]。

2 3 3 群体指标

(1 冠层温度 冠层温度由 SPAC 连续体内的热量和水汽流决定,基于冠层温度的作物缺水指标研究始于 20世纪 70年代早期。作物缺水指标包括胁迫积温 SDD(Stress Degree Day)、冠层温度变率 CTV(Canopy Temperature Variability) 和温度胁迫日 TSD(Temperature Stress Day) 等,其共同特点是仅考虑作物冠层温度在时间上(如 SDD、TSD) 或空间上(如 CTV) 的变化特征来反映作物的水分状况,通过单一冠层温度建立起来的指标在实际应用中并不理想。Idso 等^[30]考虑影响冠层温度变化的主要环境因子空气湿度,提出了作物水分胁迫指数 CWSI(Crop water stress index), Jackson 等^[29,31]用冠层能量平衡的单层模型对 Idso 的冠气温差上下限方程进行了理论解释。随着 CWSI 的 Idso 经验模式精度的改善和 Jackson 理论模式的简化研究,作物缺水指标的研究从单纯研究冠层温度本身发展到考虑冠层的微气象条件。为了克服 CWSI 低植被覆盖下效果较差等缺点, Moran 等^[32]在能量平衡双层模型基础上,采用地表混合温度信息,引入植被覆盖率变量,提出了水分亏缺指数 WDI(Water Deficit Index)。近年来,随着探测方法的发展,通过作物冠层温度来诊断作物缺水已在国外形成了相对成熟的灌溉技术。

(2 作物光谱反射率 利用红外与红光反射的

比值或差值可以监测植被状况,主要是估算叶面积、作物缺水状况等。学者对多种作物的大量研究论证了光谱反射率诊断作物水分胁迫的可行性,并建立了诊断模型,田庆久等^[33]利用地物光谱反射率吸收峰的归一化量化描述技术建立了小麦叶片水分含水量与 1 450 nm 附近水的反射率特征吸收峰深度和面积的定量线性回归模型。张佳华等^[34]利用遥感信息和作物生理参数,建立了以作物气孔导度为显参的遥感-光合水分胁迫作物产量模型。但由于作物需水临界期大都地面植物覆盖度较大,精确获取地表光谱数据难度太大,尚需进一步研究。

2.3.4 内源激素变化 一般认为脱落酸 ABA 是对干旱胁迫最敏感的激素,是根源逆境感应信号^[35]。范晓荣等^[36-37]指出水分胁迫下,除 ABA 外,生长素 IAA 和细胞分裂素 CTKs 等多种激素也主导和参与调控植株的生理生化适应性反应。外源 ABA 处理会增强叶片的保水能力,缓解细胞膜的破损程度,但对叶绿体具有破坏作用,作为化学调控物质使用应当慎重。

2.3.5 细胞变化 细胞变化是一种对水分亏缺最为敏感的涉及生物化学和物理学的复杂过程。许多情况下,叶片本身的水分状况并未发生改变,而叶片生长已经受到抑制,可能与细胞壁发生硬化有关,细胞壁硬化实质是对水分亏缺的一种主动适应性反馈机制。干旱使胞壁变薄,失去弹性,减弱细胞对干旱的调节能力,膨压消失^[38]。中度土壤水分胁迫条件下冬小麦旗叶叶肉细胞的胞质浓缩,中央液泡增大,严重胁迫下出现小囊泡。细胞质膜是植物细胞与外界环境相互作用的界面层,细胞膜系统的损伤是植物干旱胁迫的重要原因。干旱条件下细胞内会大量积累一些生物自由基,通过一系列反应,最后导致细胞膜系统发生变性。

2.4 其它方法

物体的碳稳定同位素组成主要由植物本身的生物学特性决定,但环境胁迫对其影响也十分明显。水分胁迫通过影响气孔和光合羧化酶对碳同位素的分馏效应 α 、 β 和细胞内 CO_2 浓度来影响植物碳同位素比例 ($\delta^{13}\text{C}$),运用质谱仪测定少量植物样品的碳同位素比率,可综合植物长期的光合特性及多种生理和形态指标使胁迫效应得以量化^[39]。此外意大利萨恩福发现一种能破译植物“喝水”的声音,借助现代仪器加拿大科学家发现马铃薯会发出很小的啪啪响声,如果声音是从运送水分到叶子的细胞管发出,就

表示“我要喝水了”。杨世凤等^[40]研究和开发了利用声波技术检测作物水胁迫信号、实施自动灌溉的系统。缺水时植物体液浓度增高,导电率增加,电阻下降,因此可以用作物生理电阻反映植株体内的水分状况。金树德等^[41]发现用套针式电阻传感器测玉米茎秆生理电阻,介电常数变化型平行平板电容传感器测玉米叶片生理电容,都能实时准确反映植株水分状况。

3 应用研究与问题

土壤水分和作物生理指标都从本质上反映了作物缺水程度,具有明显的农学意义,但考虑农业生态环境的多维空间变异性,利用作物水分状况比土壤水分状况作为灌溉依据更可靠。近年来,与作物茎秆、叶片等植物器官有关的生理信息一直成为作物需水信息指标的研究重点^[42-43],有关指标用于诊断水分亏缺日益广泛,但是众多诊断指标都由于其基本原理和操作可行性有其特定的适用性和局限性。气孔阻力法比较适合用于小麦和大豆,冠层温度和叶片卷曲度法是最适合于水稻的方法;以叶水势作为植物供水状况的基本度量已得到公认,但叶水势受气象条件影响较大,同一植株不同部位叶片和同一叶片不同位置的叶水势差异性表现显著,又不能实现植物活体连续测量,难以普遍采用;采用热量法测定茎流不会由于自然环境破坏而影响蒸腾过程,但基本原理和制作工艺相对复杂,尽管已有小批量商品问世,由于产品规格和价格原因,目前仅在园艺作物、温室栽培、果木等方面应用较多;通过作物的冠层温度来反映作物缺水的研究,具有较好的代表性,克服了土壤指标和植物生理指标取样烦琐并且不具代表性的缺点,可以快速测定较大面积农田的作物水分状况,随着探测方法的进展越来越深入并已在海外形成了相对成熟的灌溉技术,大量的研究集中在田间应用尺度上;但是通过作物水分胁迫指数来确定灌水时间与灌水量,如何去除作物水分胁迫指数中气象因子造成的波动性影响尚需进一步研究,或者将作物水分胁迫指数和其它方法结合来实现灌水时间和灌水量的双重标识。

常规方法由于受到人力、物力和财力等多种因素的制约,难以迅速及时获得大面积土壤水分和作物水分信息,从而使作物水分监测和评估缺乏实际需要的时效性和代表性。基于适度亏缺的灌溉制度的研究大田试验和应用研究还刚刚起步。我国虽针

对作物水分胁迫和调控进行了较多研究,但由于农学、植物生理和农田水利各学科研究相互渗透和结合不够,测试条件和分析手段受到限制,试验成果缺乏系统性和综合性,不能适应节水高效农业发展的需求,需要进一步加大科研力度。

植物的需水信息很多,判断水分亏缺的指标也很多,互相之间存在着一定联系。目前有些指标比较容易观测,有些指标的监测还存在一定难度,可以根据实际情况对作物、土壤、气象复合系统综合分析,将多个指标结合判断。预计未来几年内,我国直接在一些生产管理体系中使用高新科技手段还是较少,但在研究领域内将会更多采用高新科技手段,以探索水分利用方面的规律,拓宽现有的知识领域。

参考文献:

[1] 康绍忠,蔡焕杰. 农业水管理学[M]. 北京:中国农业出版社, 1996 1- 496

[2] 杨建昌,王 维,王志琴,等. 水稻早秧大田期需水特性与节水灌溉指标研究[J]. 中国农业科学, 2000 33 3 : 34- 42

[3] 李亚龙,崔远来,李远华,等. 以水土势为灌溉指标的水稻节水灌溉研究[J]. 灌溉排水学报, 2004 23 5 : 14- 17.

[4] 王 靖,李湘阁,刘恩民,等. 华北平原冬小麦相对蒸散与叶面积指数及表层土壤含水量的关系[J]. 中国生态农业学报, 2003 11 3 : 32- 34

[5] Lilley J M, Ludlow M M. Expression of osmotic adjustment and dehydration tolerance in diverse rice lines. Field Crops Res, 1996 48: 185- 197.

[6] 中国农业科学院. 中国农业气象学[M]. 北京:中国农业出版社, 1999 74- 75

[7] 王纪华,赵春江,黄文江,等. 土壤水分对小麦叶片含水量及生理功能的影响[J]. 麦类作物学报, 2001 21 4 : 42- 47.

[8] 牟筱铃,鲍 啸. 土壤水分胁迫对棉花叶片水分状况及光合作用的影响[J]. 中国棉花, 2003 30 9 : 9- 10

[9] Raymond F K, Roger N C. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band - depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression[J]. Remote Sens, 1999 67: 267- 287.

[10] Mastrorilli M, Katerji N, Rana G. Productivity and water use efficiency of sweet sorghum as affected by soil water deficit occurring at different vegetative growth stages [J]. European Journal of Agronomy, 1999 11: 207- 215

[11] 张英普,何武全,韩健. 玉米不同时期水分胁迫指标[J]. 灌溉排水, 2001 20 4 : 18- 20

[12] Rana G, Katerji N, Mastrorilli M. Environmental and soil - plant parameters for modeling actual crop evapotranspiration under water stress conditions [J]. Ecological Modelling, 1997 101 363- 371

[13] 胡继超,曹卫星,姜东,等. 小麦水分胁迫影响因子的定量研究 I . 干旱和渍水胁迫对光合、蒸腾及干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2004 30 4 : 315- 320

[14] Naor A. Relationship between leaf and stem water potential and stomatal conductance in three field grown woody species [J]. Hort Sci & Biotechnology, 1998 73: 431- 436

[15] 申双和,徐为根,吴洪颜. 作物冠层气孔阻力与土壤水势关系的研究[J]. 气象科学, 2002 22 3 : 218- 222

[16] 陈家宙,吕国安,何圆球. 土壤水分状况对花生和早稻叶片气体交换的影响[J]. 应用生态学报, 2005 16 1 : 105- 110

[17] 杨建昌,乔纳圣·威而斯,朱庆森,等. 水分胁迫对水稻叶片气孔频率、气孔导度及脱落酸含量的影响[J]. 作物学报, 1995 21 5 : 533- 539

[18] 付芳婧,赵 致,张卫星. 水分胁迫下玉米抗旱性与光合生理指标研究[J]. 山地农业生物学报, 2004 23 6 : 471- 474

[19] 覃 鹏,杨志稳,孔治有,等. 干旱对烟草旺长期光合作用的影响[J]. 亚热带植物科学, 2004 33 3 : 5- 7.

[20] 罗 毅,于 强,欧阳竹,等. SPAC 系统中的水热 CO₂ 通量与光合作用的综合模型 I . 模型建立[J]. 水利学报, 2001 (3): 90- 97.

[21] 彭致功,杨培岭,段爱旺,等. 日光温室条件下番茄植株蒸腾规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004 22 1 : 62- 65

[22] 侯加林,刘海波,丁启胜,等. 果树水分动态参数的计算机测量系统[J]. 农业机械学报, 2001 32 3 : 71- 74

[23] Fred J Molz , Betty Klepper. On the mechanism of water - stress - induced stem deformation [J] . Agron· Journal , 1973, 65: 304~ 306

[24] So H B. An analysis of the relationship between stem diameter and leaf water potentials [J]. Agron· Journal , 1979 71: 675- 679

[25] All En S J , Grime V L. Measurements of transpiration from savannah shrubs using sap flow gauges [J] . Agri and for Meter , 1995, 75: 23- 41.

[26] Pamela L Nagler , Edward P Glenn , Thompson T Lewis. Comparison of transpiration rates among saltcedar, cotton wood and willow trees by sap flow and canopy temperature methods[J]. Agri and for Meter, 2003 116: 73- 89.

[27] 李国臣,于海业,马成林,等. 作物茎流变化规律的分析及其在作物水分亏缺诊断中的应用[J]. 吉林大学学报, 2004 34 (4): 573- 577.

[28] 罗中岭. 热量法茎流测定技术的发展及应用[J]. 中国农业气象, 1997 18 3 : 52- 57.

[29] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resource Research, 1981 17: 1133~ 1138

[30] Idso S B, Jackson R D, Pinter P J Jr, et al. Normalizing the stress degree-day for environmental variability [J]. Agricultural Meteorology, 1981 24: 45~ 55

[31] Jackson R D, Kustas W P, Choudhury B J. A reexamination of the crop water stress index[J]. Irrigation Science, 1988 9: 309~ 317.

[32] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface - air temperature and spectral vegetation index [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49: 246~ 263

[33] 田庆久, 宫 鹏, 赵春江, 等. 用光谱反射率诊断小麦水分状况的可行性分析[J]. 科学通报, 2000, 45 (24): 2045- 2050

[34] 张佳华, 王长耀. 以气孔导度为显参的遥感 - 光合水分胁迫作物产量模型研究[J]. 水利学报, 1999, (8): 35- 39

[35] Jeffery D. Stomatal closure of maize hybrids in response to drying soil[J]. Crop Sci, 1997, 37: 803- 807.

[36] 范晓荣, 沈其荣, 崔国贤, 等. 旱作水稻内源激素变化及其与水稻形态和生理特性的关系[J]. 土壤学报, 2002, 39 (3): 206 - 213

[37] 范晓荣, 沈其荣. ABA、IAA 对旱作水稻叶片气孔的调节作用[J]. 中国农业科学, 2003, 36 (13): 1450- 1455

[38] 许振柱, 于振文, 董庆裕, 等. 水分胁迫对冬小麦旗叶叶细胞质膜及叶肉细胞超微结构的影响[J]. 作物学报, 1997, 23 (3): 370- 375

[39] 陈英华, 胡 俊, 李裕红, 等. 碳稳定同位素技术在植物水分胁迫研究中的应用[J]. 生态学报, 2004, 24 (5): 1027- 1033

[40] 杨世风, 钱东平, 霍晓静, 等. 作物水分胁迫声发射检及视情灌溉系统的研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17 (5): 150- 152

[41] 金树德, 张世芳, 郑荣良. 从玉米生理电特性诊断旱情[J]. 农业工程学报, 1999, 15 (3): 91- 95

[42] Xavier Chone , Cornelis Van Leeuwen . Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status[J]. Annals of Botany , 2001, 87: 477- 483

[43] A O Anyia, H Herzog . Water use efficiency, leaf area and leaf gas exchange of cowpeas under mid season drought [J] . Europ J Agronomy , 2004, 20: 327- 339

Research advance in diagnosis of crop water deficit

ZHANG Rui mei^{1, 2}, PENG Shi zhang¹, XU Jun zeng^{1, 2}, WU Hong xia²

(¹ State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; ² Department of Agriculture Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Water stress is the most popular environment menace that affects crop production, and diagnosis of water deficit is very important to the development of irrigation and precision agriculture. In plants, there is an ecological and physiological mechanism of adaptability to soil water stress, which provides the signal and basis for the diagnosis of water deficit. In this paper, the research advance in diagnosis of crop water deficit is summarized from the aspects of soil index, meteorology index and crop index, the advantages and disadvantages of different methods are discussed, and the problems faced in the study application are also analyzed.

Key words: crop; water deficit; diagnosis