植物营养与肥料学报 2010,16(5):1114-1119
Plant Nutrition and Fertilizer Science

红壤施氮对玉米水分胁迫指数的影响

陈家宙,林丽蓉,吕国安,王 双
(华中农业大学,农业部亚热带农业资源与环境重点开放实验室,湖北武汉 430070)

摘要:为了探讨干旱条件下红壤水氮管理措施,在田间遮雨小区设置连续0～32 d不灌水的7个干旱水平和N 0、140、280 kg/hm^2 3个施氮水平的试验,研究了氮肥对夏玉米作物水分胁迫指数(Crop water stress index, CWSI)的影响。结果表明,CWSI可以指示红壤干旱时玉米水分胁迫状况,但增施氮肥后,CWSI与产量的关系发生了偏移。在CWSI低于0.20时,增施氮肥对CWSI无明显影响;在CWSI大于0.20时,增施氮肥使玉米产量下降,高量氮肥还使CWSI上升,作物受旱加剧。说明增施氮肥对CWSI的影响因玉米干旱胁迫程度和施氮量而异。

关键词:红壤;氮肥;作物水分胁迫指数;夏玉米
中图分类号:S513.062　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2010)05-1114-06

Effects of nitrogen fertilization on crop water stress index of summer maize in red soil

CHEN Jia-zhou, LIN Li-rong, LÜ Guo-an, WANG Shuang
(*Key Laboratory of Subtropical Agriculture and Environment, Ministry of Agriculture/ Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*)

Abstract: Available soil water and N fertility are the primary factors limiting dryland crop yield in red soil areas of south China, where N nutrient is usually deficient and seasonal drought occurs frequently during summer and autumn. For the strategy of soil water and N fertilizer management, we investigated the effects of nitrogen fertilization on the crop water stress index (CWSI) in summer maize. The experiments were carried out in the waterproof field plots with sufficient irrigation before and after the soil drying interval of 0, 7, 12, 17, 22, 27 and 32 days in the maize growth period from 30 to 62 days after planting. Nitrogen fertilizer was broadcast as urea at N 0, 140, and 280 kg/ha for each drought treatment. The results show that CWSI is an indicator of maize crop water stress status during the soil drying course. However, the relationship between CWSI and crop yield are changed by increasing the slope of regression equation under the application of N fertilizer. Under slight and moderate soil droughts, N fertilization has less influence on CWSI, while under severe soil drought, the crop yield is decreased under N fertilization and CWSI is increased under high amount N fertilizer, which indicates crop water stress is aggravated by increasing levels of N fertility. The results suggest that the effects of N fertilization on CWSI vary as the fluctuations of soil water stress and amount of N fertilizer.

Key words: red soil; nitrogen fertilizer; crop water stress index; summer maize

我国南方红壤丘陵岗地是重要的农业资源,然而红壤农田普遍缺氮,增施氮肥成为提高红壤作物产量的重要措施。一般认为,氮肥应该施用在土壤有效水充足的地块[1],红壤地区年降水充沛,但夏秋之交也常常发生季节性干旱。如夏玉米在生长过程中有较长的时间会受到水分胁迫,有的年份因干旱减产严重。红壤丘岗旱地一般无灌溉设施,因此根据红壤自然水分状况合理施用氮肥,对增强作物御旱能力和提高产量具有重要意义。

作物在受到水分胁迫的时候,其生理过程和外部形态都会发生变化。如叶片气孔导度降低、叶水势降低、光合速率降低、叶片伸长和茎杆增粗速率减慢等,

收稿日期:2009-11-14　　**接受日期**:2010-02-01
基金项目:教育部科学技术研究重点项目(No. 108093);国家自然科学基金项目(No. 40871139)资助。
作者简介:陈家宙(1968—),男,湖北监利人,教授,主要从事土壤水分研究。Tel:027-87283960, E-mail:jzchen@mail.hzau.edu.cn

可以据此监测作物水分胁迫状况并确定灌溉时机[2-3]。在这些可以测量的作物指标中，叶片温度对水分胁迫敏感，研究者很早就以作物冠层表面温度和空气温度的差值（冠－气温差）来指示作物水分胁迫状况[4-6]。Idso 等[7]进一步提出了作物水分胁迫指数（Crop water stress index，CWSI），该指数有理论模型和经验模型两类计算方法。经验模型仅需要作物冠层温度、空气温度和相对湿度 3 个参数，就可以计算 CWSI。近年来，CWSI 在很多国家包括我国北方地区[8-10]得到了重视，在作物水分胁迫监测和产量预报方面得到了广泛的应用。但 CWSI 起源于气候干燥的美国亚利桑那州，在我国南方气候条件下是否适用还未见相关报道；施氮对 CWSI 的影响国内外也无报道，仅有零星文献涉及这个问题[11]。本研究通过不同干旱程度和施氮水平下的夏玉米试验，主要探讨了在红壤区气候条件下 CWSI 能否反映作物干旱状况；及增施氮肥如何影响 CWSI。以期为指导红壤区作物氮肥施用和水氮管理措施提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

2006 年 6 月～10 月，试验在华中农业大学红壤实验站内的田间遮雨条件下进行。该站位于湖北咸宁，年平均气温为 16.9℃，≥ 10℃的积温为 5267℃，年平均降水量为 1455 mm，平均蒸发量为 1437 mm。该地区降雨多集中在春季与夏初，夏末秋初高温少雨，常发生季节性干旱，对该区农业生产影响很大。供试土壤为红壤，土壤质地为粘土（美国制），0—40 cm 土层的平均容重为 1.28 g/cm^3，田间持水量为 0.338 cm^3/cm^3，萎蔫含水量为 0.180 cm^3/cm^3。供试土壤基本性状见表 1。试验地 0—60 cm 土层有机质和速效氮含量很低，可以体现出不同氮肥处理的效果，适合本研究。

表 1　供试土壤基本性状

Table 1　Chemical properties of the experimental soil

土层 Soil layer (cm)	速效氮 Avail. N	速效磷 Avail. P	速效钾 Avail. K	有机质 OM	pH
	(mg/kg)			(g/kg)	
0—10	22.51	2.94	143.77	3.11	6.52
10—20	21.59	8.99	134.33	2.31	6.72
20—30	23.57	6.04	64.00	1.96	6.36
30—40	24.23	5.57	47.87	2.14	5.27
40—60	22.66	1.48	50.77	2.26	5.02

小区玉米试验设 3 个施氮处理：N 0、140、280 kg/hm^2（用 N0、N1、N2 表示）和每种施氮量条件下设 7 个水分处理：分别在玉米播种出苗 30 d 之后，开始连续干旱 0、7、12、17、22、27 和 32 d（以 D0、D7、D12、D17、D22、D27 和 D32 表示）。每个处理施等量的过磷酸钙 1000 kg/hm^2 和氯化钾 240 kg/hm^2 作基肥，施氮处理用尿素也作基肥一次施入。

试验时在平整的地块用高度为 1.2 m 的防水板（垂直插入地下 1.1 m，露出地面 0.1 m）将试验地块分割成若干个小区，每个小区面积为 2.7 m × 1.2 m，小区之间互不窜水。干旱实施之前每个小区灌水量一致，每天上午用频域反射仪（FDR，型号 Delta-T Pr1）分层测定各个小区 0—60 cm 的含水量，保证各处理 0—60 cm 土壤含水量在田间持水量附近，干旱结束之后，立即复水至干旱前的土壤含水量。干旱结束复水前，7 个水分处理 30 cm 处土壤相对含水量分别为：89.13%、78.34%、71.21%、62.90%、60.94%、60.82%、60.28%。

1.2　田间观测项目与方法

试验玉米品种为掖单 13，2006 年 6 月 28 日播种，出苗后每个小区定株 3 行 8 列即 24 株/小区，玉米 10 月 2 日收获测产考种。7 月 28 日至 8 月 28 日每日观测冠层温度、空气温度、空气相对湿度和土壤水分含量。选择晴天中午 10:00、12:00 和 14:00 时利用 STProPlus 便携式红外温度计测量玉米冠层温度，每个小区在东、西、南、北 4 个不同方向分别测量，每次测量使冠层与红外温度计保持 15°左右视角并保持相同距离，随着玉米长高，红外探头随之抬高。空气温度与相对湿度通过架设于试验地玉米上方的 DT-321S 温湿度计进行观测记录。每个处理取 3 个时间、4 个方向和 3 次重复共 36 个数据的平均值作为当天测量值计算 CWSI。同时，对 3 种施氮水平下灌水充足无水分胁迫的玉米（即处理 D0），增加观测次数，在播种后第 30～62 d 之间测量了多日冠气温差和气温湿度等日变化过程（从上午 8:00 开始到下午 18:00 结束，每 2 h 测定 1 次），得到大范围空气水汽饱和差下的冠气温差，将观测数据利用回归分析获得夏玉米 CWSI 的下基线。

1.3　计算与统计分析方法

根据统计回归得到下基线的经验系数和当日测量气温和相对湿度，由 Idso 等[7]提出的公式计算上基线。作物水分胁迫指数（CWSI）的计算方法[12]：

$$CWSI = [(Tc - Ta) - D_2]/(D_1 - D_2) \quad (1)$$

$$D_2 = a + bVPD \quad (2)$$

$$D_1 = a + bVPG \quad (3)$$

式中：CWSI为作物水分胁迫指数，Tc为叶片冠层温度(℃)，Ta为空气温度(℃)，D_2为下基线，D_1为上基线，VPD为饱和水汽差(KPa)，VPG为饱和水汽压梯度(KPa)，a和b为回归经验系数[式(2)和式(3)中数值相同]。CWSI计算值在0～1之间变化，其值越大表示作物水分胁迫越严重。

回归分析和统计检验在SPSS 11中进行。对3个施氮水平下不同干旱程度的全部小区，连续观测了32 d CWSI逐日变化，以每日测量值作为一组数据，采用成组数据进行施氮处理间CWSI的差异显著性检验。

2 结果分析

2.1 氮肥对玉米CWSI下基线的影响

在充分灌水的条件下，Ehreler[4]发现棉花作物的冠层温度Tc和空气温度Ta之差(冠气温差，Tc－Ta)和空气的饱和水气压差VPD(kPa)之间存在线性关系；Idso等[7]在更多作物和更广阔的气象条件下进一步验证这种线性关系之后，将其作为计算CWSI基础(即下基线D_2)。在我国南方红壤区，充分灌溉的玉米上Tc－Ta和VPD也存在这种线性关系(图1)。试验过程中绝大多数天气条件下，玉米叶片温度Tc低于空气温度Ta。在空气湿润(水汽饱和差VPD小)的时候，玉米叶片温度与空气温度差值小，在空气非常潮湿的情况下，叶片温度甚至高于气温；而空气越干燥，叶片温度较气温越低，最小温差低于-14℃。

氮肥对玉米CWSI的下基线没有显著影响。对3个施氮处理的观测数据(冠气温差和空气饱和差)分别进行直线回归统计，得到3条下基线(图1)。结果看出，3条下基线之间均不存在显著差异，表明土壤水分充足的条件下，氮肥没有使CWSI的下基线发生偏移。因此，将3个氮肥处理的数据合并，进行回归分析得到本试验条件下玉米CWSI的下基线为：Tc－Ta = 1.777－1.737VPD ($r = -0.976$, $n = 81$, $p < 0.01$)。按照文献[12]的计算步骤，得到上基线为2.5℃，以这两条基线为基础计算各个处理的CWSI。

2.2 氮肥对玉米水分胁迫指数(CWSI)日动态的影响

图2为3个不同施氮处理的玉米在连续干旱32 d过程中，CWSI的逐日变化状况。在干旱实施过程中，施氮量和土壤干旱水平相同的处理，玉米CWSI在日与日之间存在明显波动，这一波动显然是

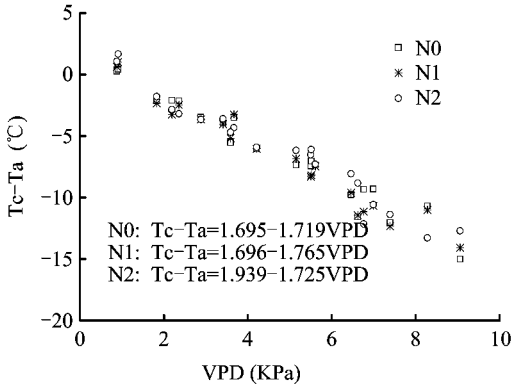

图1 充分灌水3种施氮水平下玉米水分胁迫指数CWSI的下基线

Fig. 1 The non-water-stressed baseline (lower limit) of maize under three nitrogen fertilizer levels

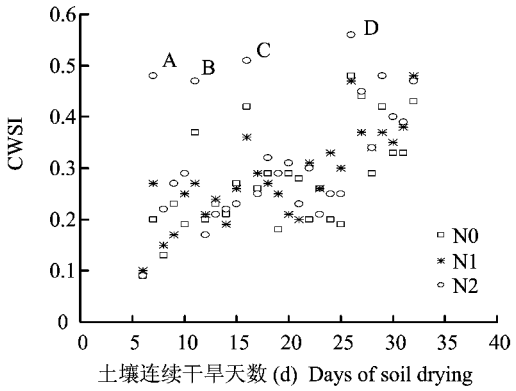

图2 不同施氮水平下连续干旱32天的玉米(处理D32) CWSI逐日过程

Fig. 2 Daily CWSI of maize of the treatment D32 under three nitrogen fertilizer levels

受到气象条件变化和玉米生育期变化的影响。但是，随着土壤干旱发展加强，玉米CWSI呈逐渐增加趋势，而且3个施氮水平处理CWSI总趋势相同。这在一定程度说明，无论是否施氮，CWSI都能够反映玉米水分胁迫状况。

图2还显示，施氮水平影响了玉米CWSI的大小。在连续干旱32 d的过程中，大多数观测日高施氮水平处理(N2)的CWSI值较高，而N0和N1处理的CWSI值较小。统计结果表明，N2的CWSI值和N0及N1间存在显著差异，而N0和N1间差异不显著。说明高量施氮可以使玉米CWSI上升，干旱胁迫加强。为了查验其它干旱天数少于32 d的处理是否有类似的结果，对3个施氮水平的所有6个干旱处理的玉米在各自干旱期间的平均CWSI值进行统计检验，结果(表2)显示，在连续干旱天数≤17 d

表 2　玉米产量与玉米干旱实施期间（出苗后 30～62 d）的 CWSI 平均值

Table 2　Maize grain yields and the average values of CWSI during soil drying course from 30–62 days after emergence

施氮水平 N level	干旱处理 Soil drying treatment						
	D0	D7	D12	D17	D22	D27	D32
	干旱期间 CWSI 平均值 Average values of CWSI						
N0	—	0.16 Aa	0.18 Ab	0.19 Ab	0.22 Bc	0.25 Bd	0.29 Be
N1	—	0.16 Aa	0.17 Aa	0.20 Ab	0.21 Bc	0.24 Bd	0.28 Be
N2	—	0.16 Aa	0.18 Aa	0.20 Ab	0.23 Ac	0.26 Ad	0.32 Ae
	玉米产量 Maize yield（kg/hm^2）						
N0	6057 Bb	7418 Aa	6465 Bb	7087 Aa	5242 Ac	3777 Ad	2222 Ae
N1	6099 Bb	6934 Ab	7631 Aa	7339 Aa	4088 Ac	3064 Bd	1038 Be
N2	8122 Aa	7466 Ab	6620 Bc	7317 Ab	3944 Bd	2032 Ce	1059 Bf

注（Note）：数值后不同大写字母表示同一列数据差异达 5% 显著；数值后不同小写字母表示同一行数据差异达 5% 显著水平 Values followed by different capital letters indicate significant difference at 5 % level in same line，and values followed by different small letters indicate significant difference at 5% level in same row.

的 3 个处理中（D7、D12、D17），施氮水平对 CWSI 没有显著影响；而在连续干旱天数≥22 d 的 3 个处理中（D22、D27、D32），高施氮水平处理 N2 增大了 CWSI 值，与 N0 和 N1 处理存在显著差异，而 N0 和 N1 之间也存在差异但统计不显著。表明在干旱程度较强的情况下，高量增施氮肥增加了玉米水分胁迫程度，不利于玉米正常生长。

在土壤干旱发展过程中，各施氮处理玉米 CWSI 波动时的差异表现也说明高量增施氮肥增加水分胁迫程度。在土壤干旱实施初期，玉米水分胁迫程度不高，但此时已经进入夏季，当遇到晴热高温天气时，作物叶片蒸腾强烈，短时间内土壤水分进入根系并运输到叶片的速率会低于蒸腾速率，玉米作物暂时受到水分胁迫，此时 CWSI 观测值向上波动。图 2 看到，CWSI 向上波动明显的观测点（图 2 中 A、B、C、D 等 4 个点）均呈现 N2 处理的 CWSI 值明显高于 N0 和 N1 处理（即此时 3 个施氮处理玉米的 CWSI 的差值较其它时候的差值明显偏大）。说明在作物水分胁迫强烈时，高量增施氮肥增加了玉米叶片水分胁迫程度。而在 CWSI 都比较低（作物水分胁迫程度轻）的观测日子里，高量增施氮肥的这一作用并不明显。总之，本试验不同干旱处理 CWSI 的总体统计结果和同一干旱处理 CWSI 波动结果都说明，作物越受到干旱胁迫，高施氮量越可能加剧干旱对植株的胁迫程度。

2.3　氮肥对玉米 CWSI 干旱阈值和产量的影响

不同干旱程度的处理，随着观测期间干旱胁迫指数 CWSI 平均值增加，玉米产量下降（图 3）。CWSI 与产量呈负相关，这与各种作物相关研究报道[13-15]一致。一些研究还表明，作物在受到轻度水分胁迫的时候，其植株生理活动并不受到明显影响，只有干旱胁迫超过一定程度的时候作物才会显著减产[16-18]（这一干旱程度称为干旱阈值）。本研究也得到类似结果，即干旱期间作物水分胁迫指数 CWSI 的平均值超过 0.20 的处理，玉米产量才显著下降。图 3 显示，以 CWSI = 0.20 为分界线，在左侧干旱程度较小的 3 个处理中，玉米产量有少许波动，总体趋势是 N2 的产量较高（平均 7467 kg/hm^2），N1 产量次之（平均 7301 kg/hm^2），不施氮处理 N0 产量最低（平均 6990 kg/hm^2），但是 CWSI 与产量没有显著相关性，轻度干旱没有使产量下降。在 CWSI = 0.20 的右侧的 3 个干旱处理，土壤连续干旱时间较长，作物生长受到了水分胁迫的影响，随着各施氮处理的 CWSI 上升，产量明显下降，CWSI 都与产量呈显著线性负相关。可见，施氮没有改变 CWSI 与玉米产量的总体负相关关系。在各种施氮水平下，仍然可以通过观测 CWSI 来监测作物水分胁迫状况和预报作物产量。

干旱超过一定程度之后，施氮增大了 CWSI 与玉米产量关系的斜率（图 3），从而使 CWSI 与产量的负相关关系发生偏移。将 6 个干旱处理的 CWSI 与玉米产量回归，得到 3 条回归方程，分别是：

$y_{N0} = 14268.5 - 41396.3\mathrm{CWSI}$（$r = -0.98^{**}$）；

$y_{N1} = 16924.6 - 56075.7\mathrm{CWSI}$（$r = -0.94^{**}$）；

$y_{N2} = 18097.4 - 60299.3\mathrm{CWSI}$（$r = -0.94^{*}$）。

从中可以看出，N2、N1 与 N0 相比，玉米产量随 CWSI 升高而下降得更快，结合表 2 的数据（在相同干旱天数下 N2 的 CWSI 值较 N1 和 N0 高），可以得

出在干旱情况下,高量增施氮肥使玉米水分胁迫指数CWSI上升,同时加快了产量随CWSI上升而降低的速度,二者作用叠加,高量增施氮肥降低了玉米御旱能力,增加了干旱条件下减产的危险。如果以CWSI作为衡量作物水分胁迫程度的指标,施氮可能降低玉米水分胁迫的干旱阈值,加快干旱阈值的提前到来。

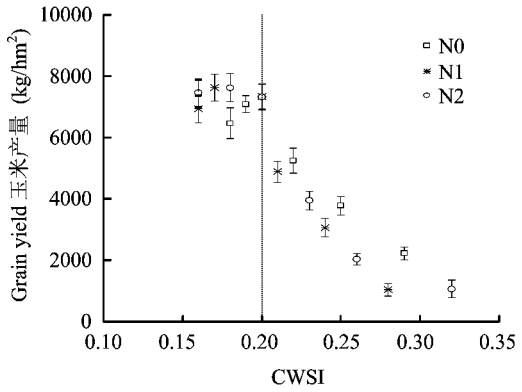

图3 不同施氮处理下各干旱处理的平均水分胁迫指数CWSI与玉米产量的关系

Fig. 3 The relationship of CWSI and maize yield under different nitrogen levels

3 讨论

氮素养分是作物产量的主要限制因子,其肥效很大程度上取决于土壤有效水分状况,因此水氮管理成为农田管理的重要内容。有研究指出,在干旱条件下,土壤增施氮肥能增加子粒的蛋白质含量,但不能增加小麦产量[19];也有报道在干旱条件下,冬小麦施氮量达到N 336 kg/hm² 时减产[20]。国内研究也看出,干旱条件下增施氮肥虽然可以提高棉株的干物质重与氮素累积量,但与正常灌水相比,干旱条件下增施氮肥增加的干物质量明显减少[21],施氮效果降低。还有研究认为,高量增施氮肥使小麦子粒灌浆期延长,从而在灌浆后期水热胁迫比低氮处理更加严重[19]。本研究结果显示,土壤干旱严重时,增施氮肥减产(表2)。综合文献报道结果可以推断,土壤干旱的时候,土壤氮素养分不再是产量主要限制因子,有效水分才是作物产量的主要限制因子;试图通过增施氮肥提高作物抗旱能力,可能效果不明显。因此,根据土壤水分和作物水分胁迫状况增施氮肥是水氮管理的关键。如何准确快速判定作物水分胁迫状况,并适应不同地区的各种情况,在水氮管理中就显得很重要。

作物水分胁迫指数CWSI获取容易,意义明确,得到了越来越多的应用,成为作物干旱监测预报和灌溉管理的有效工具。本研究表明,CWSI可以用于指导田间水氮管理。通过田间小区6种干旱程度和3种施氮量的组合试验说明,在土壤水分充足或轻微干旱条件下(D0、D7),施氮对玉米CWSI无明显影响,玉米增产;在中度干旱情况下(D12、D17),中等施氮(N1)对CWSI没有显著影响,可以使玉米生长更健壮,从而增加玉米抗旱能力和产量,而高量施氮(N2)玉米增产效果并没有增加;在土壤重度干旱(D22、D27、D32)条件下,中等施氮使CWSI轻微降低(统计不显著),产量显著降低,高量增施氮肥使CWSI显著上升,产量也显著降低。无论土壤是否干旱但大气蒸发强烈的天气条件下(图2),高量增施氮肥使CWSI显著上升。这些结果表明,土壤及大气干旱状况、施氮水平、作物水分胁迫指数CWSI、玉米产量之间的关系存在一定规律,但随条件而变,说明增施氮肥对CWSI的影响依玉米受到干旱胁迫的程度而异。在平均CWSI < 0.20时,施氮对CWSI无明显影响;在平均CWSI > 0.20时,高量增施氮肥使CWSI上升(表2)。对于单日CWSI(图2),在CWSI < 0.30时,施氮对CWSI无明显影响;在CWSI > 0.30时,施氮特别是高量增施氮肥显著增大CWSI。这一结果对干旱条件下的玉米水氮管理具有指导意义,同时还说明,氮肥改变了CWSI与作物产量的关系,在用CWSI进行作物干旱胁迫预报和测产的时候,应该在氮素水平相似的的条件下建立CWSI的测产公式。另外,关于影响氮肥作用的CWSI的临界值,需要大田条件下进一步的研究。

参 考 文 献:

[1] Tilling A K, O'Leary G J, Ferwerda J G *et al*. Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat[J]. Field Crops Res., 2007, 104(1-3): 77-85.

[2] Jones H G. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods[J]. J. Exp. Bot., 2004, 55(407): 2427-2436.

[3] 刘海隆,杨晓光. 夏玉米水分胁迫判别指标的研究[J]. 中国农业气象,2002,23(3): 22-27.
Liu H L, Yang X G. A study on diagnostic indexes of soil water stress of summer maize[J]. Chin. J. Agrometeorol., 2002, 23(3): 22-27.

[4] Ehrler W L. Cotton leaf temperature as related to soil water depletion and metorological factors[J]. Agron. J., 1973. 65: 404-409.

[5] Jackson R D, Reginato R J, Idso S B. Wheat canopy temperature:

A practical tool for evaluating water requirements[J]. Water Resour. Res., 1977, 13: 651-656.

[6] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, Pinter P J. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resour. Res., 1981, 17: 1133-1138.

[7] Idso S B, Jackson R D, Pinter P J *et al*. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability[J]. Agric. Meteorol., 1981, 24: 45-55.

[8] 张喜英,裴东,陈素英. 用冠气温差指导冬小麦灌溉的指标研究[J]. 中国生态农业学报,2002,10(2): 102-106.
Zhang X Y, Pei D, Chen S Y. Use of crop water stress index as indicators for scheduling irrigation in winter wheat[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2002, 10(2): 102-106.

[9] Yuan G F, Luo Y, Sun X M, Tang D Y. Evaluation of a crop water stress index for detecting water stress in winter wheat in the North China Plain[J]. Agric. Water Manag., 2004, 64(1): 29-40.

[10] Wang L M, Qiu G Y, Zhang X Y, Chen S Y. Application of a new method to evaluate crop water stress index[J]. Irrig. Sci., 2005, 24(1): 49-54.

[11] Nielsen D C, Halvorson A D. Nitrogen fertility influence on water stress and yield of winter wheat[J]. Agron. J., 1991, 83(6): 1065-1070.

[12] Kirkham M B. Principles of soil and plant water relations[M]. Burlington, MA, USA: Elsevier Academic Press, 2005. 437-453.

[13] Emekli Y, Bastug R, Buyuktas D, Emekli N Y. Evaluation of a crop water stress index for irrigation scheduling of bermudagrass[J]. Agric. Water Manag., 2007, 90(3): 205-212.

[14] Orta A H, Erdem Y, Erdem T. Crop water stress index for watermelon[J]. Sci. Horticul., 2003, 98(2): 121-130.

[15] Irmak S, Haman D Z, Bastug R. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn[J]. Agron. J., 2000, 92(6): 1221-1227.

[16] Sadras V O, Milroy S P. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange-A review[J]. Field Crops Res., 1996, 47: 253-266.

[17] Kacira M, Ling P P, Short T H. Establishing crop water stress index (CWSI) threshold values for early, non-contact detection of plant water stress[J]. Trans. Asae, 2002, 45(3): 775-780.

[18] Soltani A, Khooie F R, Ghassemi-Golezani K, Moghaddam M. Thresholds for chickpea leaf expansion and transpiration response to soil water deficit[J]. Field Crops Res., 2000, 68: 205-210.

[19] Saint Pierre C, Peterson C J, Ross A S *et al*. White wheat grain quality changes with genotype, nitrogen fertilization, and water stress[J]. Agron. J., 2008, 100(2): 414-420.

[20] Brown B D, Petrie S. Irrigated hard winter wheat response to fall, spring, and late season applied nitrogen[J]. Field Crops Res., 2006, 96: 260-268.

[21] 刘瑞显,郭文琦,陈兵林,等. 棉花花铃期短期干旱下氮素对干物质及氮素累积分配的影响[J]. 西北植物学报,2008,28(6): 1179-1187.
Liu R X, Guo W Q, Chen B L *et al*. Effects of nitrogen on the dry matter, nitrogen accumulation and distribution of cotton under short-term soil drought during the flowering and boll-forming stage[J]. Acta Bot. Bor.-Occid. Sin., 2008, 28(6): 1179-1187.