夏玉米苗期主要生长指标的土壤水分临界点确定方法

麻雪艳[1,2] 周广胜[1,3*]

([1]中国气象科学研究院, 北京 100081; [2]南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; [3]南京信息工程大学气象灾害预警协同创新中心, 南京 210044)

摘 要 土壤水分不足是引起作物干旱的最主要因素。准确确定作物响应土壤水分的临界点对客观辨识、监测作物干旱的发生发展具有重要意义。本研究基于6个初始土壤水分的夏玉米持续干旱模拟试验,利用多元方差分析确定了较早响应土壤水分变化的玉米生长指标,并提出了基于正态总体统计容忍下限确定引起各指标发生显著性变化的临界土壤湿度的方法。结果表明:夏玉米苗期茎含水率、叶含水率、蒸腾速率、光合速率、气孔导度和叶面积较早响应土壤水分,其临界土壤水分(0~30 cm平均土壤相对湿度)分别为72%、65%、62%、60%、58%、46%,反映出随着土壤水分降低、干旱发生发展,玉米的茎含水率、叶含水率、蒸腾速率、光合速率、气孔导度和叶面积会依次受到影响。研究结果可为夏玉米苗期干旱发生发展的监测和定量评估提供依据,也为生态系统响应阈值的确定提供了思路。

关键词 玉米; 苗期; 统计容忍限; 土壤水分; 响应阈值

A method to determine the critical soil moisture of growth indicators of summer maize in seedling stage.

MA Xue-yan[1,2], ZHOU Guang-sheng[1,3*] ([1] *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*; [2] *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044, *China*; [3] *Collaborative Innovation Center on Forecast Meteorological Disaster Warning and Assessment*, *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044, *China*).

Abstract: Deficit in soil moisture is the main cause of drought to crops. Accurate determination of crops' responding thresholds to soil water is of great importance for identification and monitoring of the occurrence and development of crop drought. Based on the data of a progressive drought simulation experiment with six initial soil water levels on summer maize, one-way MANOVA was performed to identify maize growth indicators that respond earlier to soil water variations, and a way to identify their responding thresholds to soil water by using the statistic tolerance limits for normal populations was proposed. The results showed that the stem and leaf water content, transpiration rate, net photosynthetic rate, stomatal conductance, and leaf area of summer maize responded earlier to soil water in the seedling stage, and their corresponding critical soil moistures in terms of relative soil moisture at 0-30 cm depth were 72%, 65%, 62%, 60%, 58%, and 46%, respectively, indicating that the stem water content, leaf water content, transpiration rate, net photosynthetic rate, stomatal conductance, and leaf area would be affected successively as the soil water decreased and drought occurred. These results could provide reference to the monitoring and quantitative assessment of the development of drought to summer maize during the seedling stage, and also a way to determine responding thresholds of ecosystems.

Key words: maize; seedling stage; statistical tolerance limit; soil water content; responding threshold.

国家自然科学基金重点项目(41330531)和公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001 3)资助。
收稿日期: 2016-10-11 接受日期: 2017-02-23
*通讯作者 E-mail: gszhou@camscma.cn

干旱是世界范围内限制作物生长发育及产量形成的主要灾害。干旱造成的作物产量损失甚至超过了其他因素造成的损失之和,是威胁世界粮食安全的最主要因素(Azizi *et al.*, 2014; Farooq *et al.*, 2014)。客观辨识、监测干旱的发生发展对提高未来气候变化背景下农业防旱抗旱能力具有重要意义。

土壤水分不足是引起作物干旱的最主要因素(袁文平等, 2004; Streck, 2004; Gholipoor *et al.*, 2013)。研究指出,植物生长对土壤水分存在阈值响应,即仅当土壤水分低于某一临界点时,才会导致作物的生长状况发生显著变化(Blum, 1996; Sadras, 2002; 陈家宙等, 2007)。并且,随着土壤水分持续下降、水分胁迫加剧,植物体的各组成部分及生理生化过程会依次发生响应(Hsiao, 1973; Hsiao *et al.*, 1976)。因此,找到作物对土壤水分响应敏感的生长指标,并确定引起该指标显著改变的临界土壤水分(Shao *et al.*, 2008),就可以指示干旱的发生发展,服务于作物干旱的客观辨识与定量监测。

现有的土壤水分阈值研究多是通过设置若干土壤水分梯度的模拟实验,直接寻找指标出现显著变化的转折点,或者通过建立指标与土壤水分的关系模型,如负指数回归模型(Sadras *et al.*, 1996)和二次多项式回归模型(Xu *et al.*, 2010)等,求取模型的驻点(一阶导数为零的点)作为指标临界阈值。也有研究发现,在土壤有效水分降低至某一临界值之前,植物的生理生态指标值几乎恒定,而当土壤有效水分降至该临界值以下时,指标值会随土壤有效水分的减少呈线性下降(Ray *et al.*, 2002; Gholipoor *et al.*, 2013)。基于这一规律,众多研究采用稳定回归模型(Plateau Regression Procedure)来确定植物生长特征响应土壤有效水分的临界点(Nable *et al.*, 1999; Meir *et al.*, 2015)。但是,受田间模拟实验水分梯度设置个数及水分变化范围的限制,观测样本的数量及其代表性均较为有限,在此基础上构建的指标与土壤水分关系模型不一定能准确反映临界点,更无法从观测样本中直接获得准确的临界点。

本研究拟基于2014年夏玉米三叶期开始的6个初始土壤水分的持续干旱模拟实验资料,分析夏玉米主要生长指标对土壤水分的响应,提出基于正态总体统计容忍限、利用有限观测样本准确确定玉米各生长指标响应土壤水分临界点的方法,为夏玉米苗期干旱发生发展的客观辨识及定量监测提供依据,同时也为生态系统响应阈值的研究提供思路。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

本实验在中国气象科学研究院固城生态环境与农业气象试验站(39°08′N, 115°40′E, 海拔15.2 m)的大型可控式水分试验场开展。试验场设有大型电动遮雨棚,占地750 m^2,共设42个试验小区,小区面积8 m^2(2 m×4 m),小区之间筑有3 m深混凝土隔离墙,防止水分水平交换。试验场土壤类型为砂壤土,含有机碳13.67 g·kg^{-1},全氮0.87 g·kg^{-1},有效磷25.76 mg·kg^{-1},有效钾118.55 mg·kg^{-1},pH值8.1,平均田间持水量23.4%,平均土壤容重1.37 g·cm^{-3}(Fang *et al.*, 2013)。该站年平均气温12.1 ℃,年降水量494 mm,约70%的降水主要集中在夏季,其中以7月最多(约150 mm),但年际变异系数高达62.9%,致使正处于苗期的夏玉米受干旱影响的风险较大。

1.2 实验设计

实验供试玉米品种选择全国范围内种植面积最大的"郑单958"。2014年6月14日进行底墒调控,使各小区土壤水分完全一致。2014年6月23日播种,行距为50 cm,株距为25 cm,每小区64穴,每穴播3粒。播种后,施磷酸二铵30 g·m^{-2}并适当灌溉,保证玉米正常出苗。三叶期(7月1日)间苗并定株至64株·小区$^{-1}$。玉米全生育期内利用大型电动遮雨棚遮挡自然降水,三叶期(7月2日)按照当地7月多年平均降水量的100%、80%、60%、40%、20%和7%,即按照150、120、90、60、30和10 mm进行一次性灌水,形成6个初始土壤水分梯度(处理1~6),此后不再进行灌溉。每个水分处理设3个重复小区,共计18个小区。梯度灌水后每7~10 d进行土壤含水量和玉米生长特征(形态结构、光合生理特征、器官生物量及含水率等)的观测,其中在苗期共进行了2次观测(7月10日和7月18日)。

1.3 观测项目

1.3.1 土壤含水量 土壤含水量采用烘干法测定。每次观测时,在小区内两行玉米中间随机选取1个取样点,各小区取样位置大致相同,每个处理共3个取样点。利用土钻每10 cm分层钻取0~90 cm土样,分别放入土壤盒,随即测定湿土重,并置于烘箱内105 ℃烘干至重量恒定为止(烘干24 h左右开始

抽取上、中、下层土样3~6个,每隔2 h称重1次,相邻2次重量差异≤0.02 g即可)。然后进行干土样称重,计算绝对含水量,并除以田间持水量换算成土壤相对湿度(以下简称土壤湿度)。

1.3.2 夏玉米生长特征 每小区随机选取1~2株标准株玉米,每个处理共3~6株,依次测定夏玉米的光合生理特征、株高、叶面积、生物量及含水率。

光合生理特征:选择晴朗天气上午09:30—11:30进行观测。利用Li-6400便携式光合作用系统(Li-Cor, Lincoln, NE, USA)测定标准株玉米顶部第1片全展叶的(净)光合速率、气孔导度、蒸腾速率等光合生理特征。

株高:采用皮尺量取土壤表面至标准株玉米叶片伸直后最高叶尖的高度。

叶面积:用直尺量取样本植株每片叶的长度(L_i)和叶片最宽处的宽度(D_i)。其中,未展叶的长度以从上一片叶中露出的部分为准,宽度按照其原状(不展开)进行估计。乘以形状校正系数k(取0.75),得到单株叶面积S_1($cm^2 \cdot plant^{-1}$):

$$S_1 = \sum_{i=1}^{n} L_i \times D_i \times k \quad (1)$$

生物量及含水率:利用铁锹挖取标准株包含绝大部分根系(0~30 cm土层)的土柱,获取玉米鲜样(杨青华等,2000)。将植株茎、叶、根分开,分别测定茎、叶鲜重并装入牛皮纸袋,将根部取样的泥土冲洗干净,控水后装袋,放入烘箱105 ℃杀青1 h,80 ℃烘干24 h后称取干重,并计算茎和叶的含水率:

茎含水率=(茎鲜重-茎干重)/茎鲜重×100%

叶含水率=(叶鲜重-叶干重)/叶鲜重×100%

1.4 研究方法

1.4.1 生长指标对土壤水分的响应 本研究以梯度灌水后第1次的观测数据(7月10日)为研究对象。此时,土壤湿度的变化范围较大(45%~96%),有助于准确确定玉米生长指标响应土壤水分的临界点。选取若干较易观测且能反映玉米生长状况的指标,采用多元方差分析方法(One-way MANOVA)和Duncan多重比较方法考察玉米各生长指标的处理间差异。处理间差异达到显著水平即表明该指标已经对某一(些)处理的土壤水分产生了响应,可进一步确定其响应土壤水分的临界点。

1.4.2 生长指标响应土壤水分的临界点 生长指标响应土壤水分的临界点是其响应土壤水分而开始发生显著变化的点(Czajkowski *et al.*, 2009)。本研究拟以某一生长指标尚未响应土壤水分的全部观测值(即与处理1的指标值无显著差异的全部处理的指标值)为样本,推算其置信水平为95%(γ=0.05),至少包含总体95%(β=0.05)的统计容忍下限(式2),即找到该指标未受土壤水分亏缺影响时的最小值,也就确定了该生长指标开始响应土壤水分的临界点。

统计容忍区间(statistical tolerance interval)是由随机样本确定的、以规定的概率至少包含抽样总体规定比例的区间(GB/T 3359—2009),其实质是利用样本数据估算指定比例的总体的上下限。统计容忍区间的端点称为统计容忍限(statistical tolerance limit),包括统计容忍上限和统计容忍下限。国标《GB/T 3359—2009 数据的统计处理和解释,统计容忍区间的确定》(2009)中提供了不同类型连续分布总体的容忍区间和容忍限的计算方法。考虑到田间试验的取样性质及研究目的,在此采用总体均值和方差未知时正态总体容忍下限(T_L)的计算方法:

$$T_L = \bar{x} - \lambda \times S \quad (2)$$

式中,$\bar{x}$为样本均值,S为样本方差,λ为容忍系数,其值可由《中华人民共和国国家标准(GB/T 3359—2009)数据的统计处理和解释-统计容忍区间的确定》提供的附表查找确定。

1.4.3 玉米生长指标的临界土壤水分 本研究以0~30 cm土壤相对湿度作为土壤水分含量的参考标准,采用二次多项式对玉米各生长指标与土壤水分进行回归拟合(式3)。基于拟合方程及各指标响应土壤水分的临界点计算出相应的临界土壤湿度及其95%置信区间:

$$X = a \cdot SWC^2 + b \cdot SWC + c \quad (3)$$

式中,X为玉米某一生长指标观测值,SWC(%)是0~30 cm土壤湿度观测值,a、b、c为回归方程的拟合系数。

1.4.4 数据处理与统计 玉米主要生长指标的多元方差分析和Duncan多重比较分析、玉米生长指标与土壤湿度的回归拟合均采用SPSS 17.0(SPSS Inc., Chicago, IL, USA.)完成。采用正态总体统计容忍限估算方法时,首先要检验各指标的观测样本是否呈正态分布。为此,采用SPSS 17.0的Explore功能对各指标用于正态总体容忍限计算的观测样本进行正态性检验,鉴于样本量较小(<50),以Shapiro-Wilk方法的检验结果作为参考标准(周洪伟,

2012)。利用 Matlab (Mathworks Matlab R2010b, USA)计算玉米生长指标的临界土壤湿度及其95%置信区间;利用 Origin 8.5 (Origin Lab, USA.)绘图。

2 结果与分析

2.1 不同水分处理玉米生长指标对土壤水分的响应

梯度灌水后1周(7月10日),处理1~6的0~30 cm土壤湿度分别为96%、91%、83%、69%、61%和45%。处理1~5已达5片展开叶,处理6达4片展开叶。此时,处理间差异达到显著水分的生长指标包括茎含水率、叶含水率、光合速率、蒸腾速率、气孔导度和叶面积(表1)。其中,处理3~6玉米的茎含水率均显著低于处理1;处理5~6玉米的叶含水率显著低于处理1~4;处理4~6玉米的光合速率、蒸腾速率和气孔导度显著低于处理1;处理6玉米的叶面积与处理1~4也有显著差异(表2)。因此,选取玉米茎含水率、叶含水率、光合速率、蒸腾速率、气孔导度和叶面积这6个生长指标,确定其响应土壤水分的临界点。

表1 玉米苗期主要生长指标的多元方差分析结果(7月10日)

Table 1 One-way MANOVA results of maize growth indicators in seedling stage (July 10th)

生长指标	单位	*F* 值	显著性
土壤湿度	%	124.598	***
叶面积	$cm^2 \cdot plant^{-1}$	5.021	*
株高	cm	3.085	0.056
根冠比	–	0.191	0.960
叶干重	$g \cdot plant^{-1}$	0.693	0.639
茎干重	$g \cdot plant^{-1}$	0.756	0.599
根干重	$g \cdot plant^{-1}$	0.143	0.978
叶含水率	%	21.423	***
茎含水率	%	80.128	***
光合速率	$\mu mol\ CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	63.539	***
蒸腾速率	$mmol\ H_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	46.856	***
气孔导度	$mol\ H_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	26.187	***

*** 在0.001水平差异显著, ** 在0.01水平差异显著, * 在0.05水平差异显著。

表2 玉米苗期生长指标的 Duncan 多重比较结果(7月10日)

Table 2 Duncan multiple test of maize growth indexes in seedling stage (July 10th)

处理	土壤湿度(%)	叶面积($cm^2 \cdot plant^{-1}$)	叶含水率(%)	茎含水率(%)	光合速率($\mu mol\ CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	蒸腾速率($mmol\ H_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	气孔导度($mol\ H_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
1	96.5±1.0a	121.2±24.6a	85.0±0.4a	90.7±0.3a	36.01±3.31a	10.21±1.31a	0.28±0.05a
2	90.8±1.4b	122.0±16.1a	84.4±0.6a	90.2±0.4ab	32.46±1.42ab	9.18±0.42a	0.24±0.02ab
3	83.1±4.7c	107.9±3.2a	84.1±0.6a	89.7±0.3bc	34.28±0.64a	9.13±0.11a	0.25±0.01a
4	69.1±2.6d	114.1±2.4a	84.1±0.9a	89.1±0.4c	29.10±0.57bc	7.79±0.42b	0.20±0.02bc
5	61.3±4.5e	107.6±5.6a	81.8±0.4b	87.9±0.2d	27.25±0.90c	7.09±0.36b	0.18±0.02c
6	45.3±1.1f	76.2±3.8b	77.9±1.8c	86.0±0.4e	11.06±2.52d	2.93±0.51c	0.05±0.02d

同列数据无相同字母表示在0.05水平上差异显著。

2.2 玉米生长指标响应土壤水分的临界点

玉米各生长指标用于正态总体统计容忍下限计算的观测样本均符合正态分布($P>0.05$)(表3)。因此,依据式(2)确定各指标响应土壤水分的临界点(表4)。将所得指标响应土壤水分的临界点分别代入相应的指标与土壤湿度回归模型,即可得到各指标响应土壤水分的临界土壤湿度。结果表明,当0~30 cm土壤湿度低于72%左右时,玉米的茎含水率就会显著降低;当土壤湿度下降至约65%时,叶含水率也开始显著降低;当土壤湿度先后降至62%、60%和58%左右时,蒸腾速率,光合速率和气孔导度也开始受到显著影响。当土壤湿度降至46%时,叶面积的生长受到显著抑制作用(图1,表4)。

表3 玉米苗期生长指标观测样本正态性检验

Table 3 Normal test of the observation samples of maize growth indicators in seedling stage

指标	Shapiro-Wilk 检验结果	
	样本量	显著性 *P*
茎含水率	12	0.451
叶含水率	22	0.923
光合速率	18	0.321
蒸腾速率	18	0.356
气孔导度	18	0.152
叶面积	24	0.086

以7月18日的观测结果对各生长指标临界土壤湿度的可靠性进行检验。此时,处理1~6的土壤湿度分别为69%、68%、63%、53%、48%和41%。对照表5,处理1~6的土壤湿度均已低于茎含水率的临界土壤湿度,无法对其进行验证。处理3~6的叶含水率显著低于处理1~2,而其临界土壤湿度恰好介于处理2和处理3的土壤湿度之间,可以解释其处理间差异。处理1~3的光合速率、蒸腾速率和

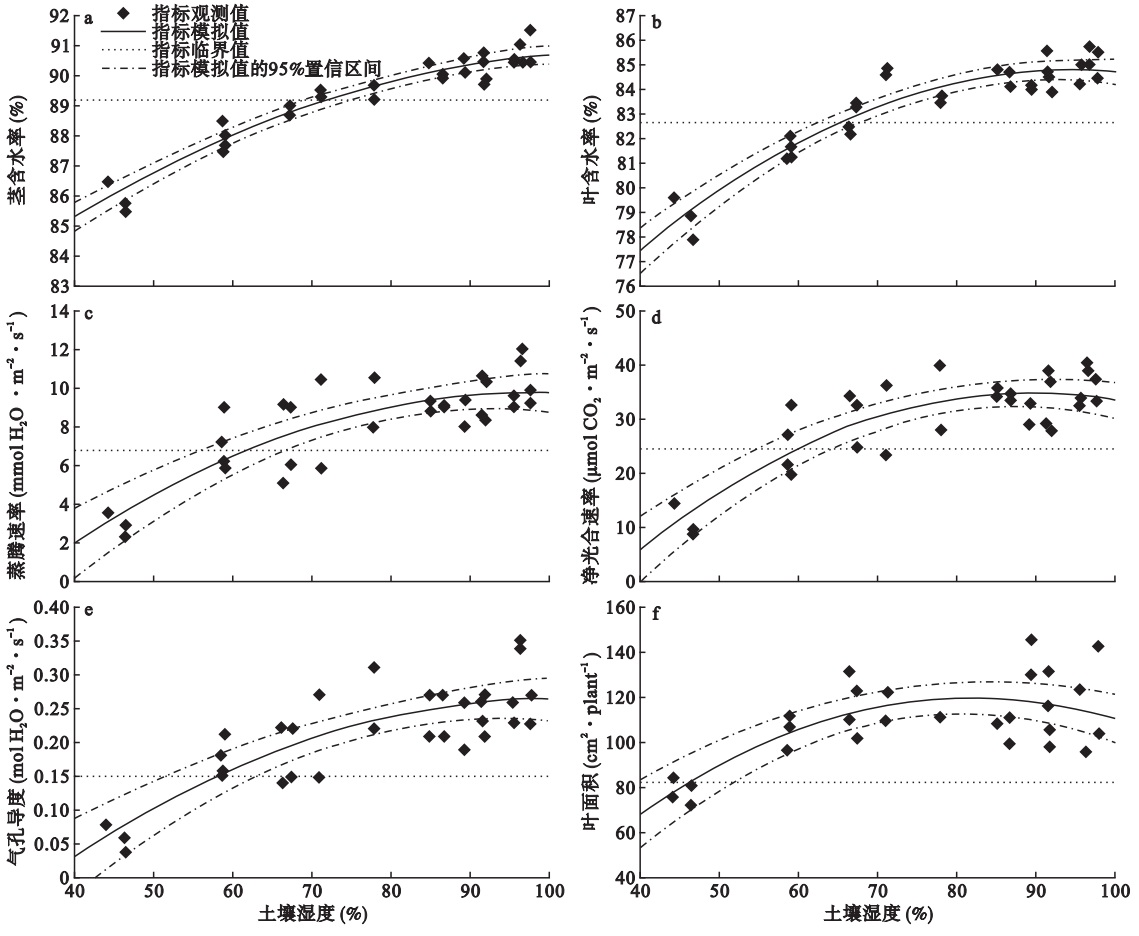


图 1　玉米生长指标与土壤湿度的关系(7 月 10 日)

Fig.1　The relationship between soil moisture and maize growth indicators (July 10th)

表 4　玉米苗期生长指标响应土壤水分的临界值及其临界土壤湿度

Table 4　The critical points and critical soil moisture of maize growth indicators in seedling stage

生长指标	回归模型系数			决定系数	指标临界值	临界土壤湿度	
	a	*b*	*c*	R^2		估计值(%)	95%置信区间
茎含水率	−0.001	0.248	77.187	0.936	89.18	72	[69%,75%]
叶含水率	−0.002	0.468	62.734	0.886	82.63	65	[62%,68%]
蒸腾速率	−0.002	0.459	−12.595	0.686	6.76	62	[56%,67%]
光合速率	−0.012	2.108	−59.197	0.711	24.60	60	[55%,64%]
气孔导度	−6.461E−5	0.013	−0.382	0.670	0.148	58	[51%,63%]
叶面积	−0.029	4.732	−74.822	0.495	82.1	46	[39%,52%]

表 5　玉米苗期生长指标的 Duncan 多重比较结果(7 月 18 日)

Table 5　Duncan multiple test of maize growth indicators in seedling stage (July 18th)

处理	土壤湿度 (%)	叶面积 (cm^2 · $plant^{-1}$)	叶含水率 (%)	茎含水率 (%)	光合速率 (μmol CO_2 · m^{-2} · s^{-1})	蒸腾速率 (mmol H_2O · m^{-2} · s^{-1})	气孔导度 (mol H_2O · m^{-2} · s^{-1})
1	69.1±3.9a	425.3±47.9a	78.9±0.6a	87.8±0.4a	29.64±5.76ab	6.02±0.92a	0.31±0.08a
2	68.3±1.8a	466.0±130.1a	78.9±0.2a	88.1±0.3a	34.04±3.54a	6.13±0.93a	0.31±0.07a
3	63.0±5.2a	349.1±58.4ab	77.8±0.4b	86.3±0.8b	31.05±2.07ab	4.93±0.38a	0.22±0.25ab
4	53.2±0.1b	232.5±51.9b	75.6±0.2c	84.5±0.2c	24.93±4.85bc	3.28±0.76b	0.13±0.33bc
5	48.0±2.9b	225.0±29.0b	75.9±0.7c	84.5±0.5c	18.79±2.50c	3.12±0.47b	0.12±0.02bc
6	41.0±2.2c	79.9±6.3c	72.2±0.3d	81.2±0.0d	18.46±1.08c	2.25±0.32b	0.08±0.00c

同列数据无相同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

气孔导度无显著性差异,而处理4~6的光合速率、蒸腾速率和气孔导度显著低于处理1~3,其临界土壤湿度均恰好介于处理3和处理4的土壤湿度之间,也能够解释其处理间差异。处理4~6的叶面积显著低于处理1~2,而处理4的土壤湿度略高于其临界土壤湿度上限(表5)。综上所述,本研究确定的临界土壤湿度基本可以准确地反映夏玉米苗期各生长指标对土壤水分的阈值响应。

3 讨 论

作物生长指标对土壤水分存在阈值响应,即当土壤水分低于某一临界点时,会导致作物的生长指标发生显著变化(Blum,1996;Sadras,2002;陈家宙等,2007)。张喜英等(2000)发现,引起夏玉米叶片水势发生显著变化的临界土壤湿度约为65%(临界体积含水量为23%),气孔导度的临界土壤湿度约为60%(临界体积含水量为20%),而光合速率在实验水分范围(体积含水量20%~30%)内随土壤水分增加而增加,不存在明显的临界点。张文丽等(2006)发现,土壤湿度在70%~90%时,玉米苗期的光合速率和蒸腾速率受土壤水分影响很小,而当土壤湿度低于70%时,光合速率和蒸腾速率会迅速下降。朱自玺等(1988)通过最优分割理论确定夏玉米灌浆期气孔阻力(气孔导度的倒数)发生突变的土壤湿度为47%,蒸腾速率发生突变的土壤湿度为44%,光合速率遭受干旱的土壤湿度为48%。可以看出,不同研究所得玉米生长指标响应土壤水分的临界值并不一致。这一方面是因为不同研究考虑的土层深度不完全相同,会直接影响土壤水分含量的衡量,而且,玉米在不同发育期对土壤水分的需求和敏感程度也不相同,所以基于不同时期观测资料所得的临界土壤水分可能不同(肖俊夫等,2008;李伶俐,2015)。即不同研究的土壤水分阈值均是基于特定的环境条件所得,其适用性均具有严格的前提条件,不能忽略这些前提条件直接进行比较。另一方面,上述研究均是基于实际观测样本确定的玉米生长指标响应土壤水分的临界值,而观测样本的代表性受实验土壤水分变化范围的限制较大,如张喜英等(2000)在其实验设置的土壤水分变化范围内就没有观测到光合速率的临界点,影响了临界土壤水分的准确性和可靠程度。本研究采用的正态总体统计容忍限方法,可以利用观测样本推断其所在总体的上下限,有效地解决目前土壤水分响应阈值研究中观测样本量较少或代表性不足导致无法准确确定阈值的问题。结果表明,夏玉米苗期不同生长指标对土壤水分响应的临界值不同。在当时的生育期和环境条件下,茎含水率的临界土壤湿度最高,为72%左右;其次是叶含水率,其临界土壤湿度为65%左右;蒸腾速率、光合速率和气孔导度的临界土壤湿度依次降低,分别为62%、60%和58%,叶面积的临界土壤湿度为46%,反映出随着土壤水分降低、干旱发生发展,玉米的茎含水率、叶含水率、蒸腾速率、光合速率、气孔导度和叶面积会依次受到影响。

茎是植物体主要的水分传输和储存器官,也是根、叶水分胁迫信号传递的纽带(员玉良,2015)。越来越多的研究发现,植物的茎较叶片对水分胁迫的响应更敏感,如Westgate等(1985)指出,茎停止生长时的水势为-0.5 MPa,高于叶片的-1.0 MPa。含水率直观反映了植物体内的水分状况,是植物生长状况的重要指示指标(刘贺等,2011;刘胜群等,2014)。本研究表明,夏玉米苗期茎含水率的临界土壤水分高于叶含水率,也反映出茎先于叶片对土壤水分亏缺做出响应。

研究表明,气孔先于蒸腾速率和光合速率受到水分胁迫影响而关闭(Hsiao,1973;Hsiao *et al.*,1976)。但本研究所得气孔导度的临界土壤湿度略低于蒸腾速率和光合速率。这可能是因为气孔导度不仅受土壤水分控制,还受叶片内外众多其他因素的影响。研究表明,水分胁迫初期,气孔开度主要受激素如脱落酸(ABA)的调节,而植物营养状况、木质部液流pH、法尼基转移酶(Farnesyltransferase)活性等其他因素均会影响气孔对ABA的敏感性(Holbrook *et al.*,2002;Medrano *et al.*,2002;武维华,2003;刘祖贵等,2006)。此外,叶片-空气水汽压亏缺增加也能导致气孔关闭,而这与土壤水分状况无关(Farooq *et al.*,2009)。本研究中,气孔导度与土壤湿度关系的回归模型决定系数较低,说明土壤湿度对气孔导度变化的解释率不高,间接反映了气孔导度变化的复杂性。

有研究指出,叶肉细胞扩张较气孔导度和光合速率对植物的水分状况更加敏感(Hsiao,1973;Hsiao *et al.*,1976;Turner *et al.*,1998;Lambers *et al.*,2008)。而本研究结果表明,叶面积对土壤水分的响应阈值低于光合生理特征,二者并不矛盾。这是因为叶肉细胞扩张的变化是一种生理响应,故其对干旱的响应速度较快,而叶面积变化更大程度上是

植株在水分胁迫条件下适应性生长的结果,它决定于单叶面积和叶片数 2 个方面。其中,单叶面积的变化是水分胁迫对叶肉细胞扩张影响在叶片尺度上的累积结果,而叶片数改变则是水分胁迫抑制了植株的展叶速率所致,故叶面积对干旱的响应速度较慢(Reddy *et al.*,2003;Bodner *et al.*,2015)。

4 结 论

基于 2014 年夏玉米三叶期 6 个初始土壤水分的持续干旱模拟实验资料,采用正态总体统计容忍限方法确定了引起夏玉米苗期茎含水率、叶含水率、蒸腾速率、光合速率、气孔导度和叶面积发生显著性变化的临界土壤湿度分别为 72%、65%、62%、60%、58%和 46%,反映出随着土壤水分降低、干旱发生发展,玉米的茎含水率,叶含水率,蒸腾速率,光合速率,气孔导度和叶面积会依次受到影响。研究结果可为夏玉米苗期干旱发生发展的客观辨识和定量监测提供依据。

参考文献

陈家宙, 王 石, 张丽丽, 等. 2007. 玉米对持续干旱的反应及红壤干旱阈值. 中国农业科学, **40**(3): 532-539.

李伶俐. 2015. 夏玉米水分胁迫敏感性及水分适宜度研究(硕士学位论文). 南京: 南京信息工程大学.

刘 贺, 赵燕东. 2011. 基于驻波原理的短探针小麦茎水分传感器. 农业工程学报, **27**(11): 140-144.

刘胜群, 郭金瑞, 张卫建, 等. 2014. 种植密度对春玉米茎秆和根系水分状况的影响. 土壤与作物, **3**(3): 93-98.

刘祖贵, 陈金平, 段爱旺, 等. 2006. 夏玉米叶片生理特性与生态因子间关系的研究. 杂粮作物, **26**(4): 288-292.

武维华. 2003. 植物生理学(第 2 版). 北京: 科学出版社.

肖俊夫, 刘战东, 陈玉民. 2008. 中国玉米需水量与需水规律研究. 玉米科学, **16**(4): 21-25.

杨青华, 高尔明, 马新明, 等. 2000. 不同土壤类型玉米根系生长发育动态研究. 华北农学报, **15**(3): 88-93.

员玉良. 2015. 基于茎直径与茎流复合测量的植物水分生理调节观测方法研究(博士学位论文). 北京: 中国农业大学.

袁文平, 周广胜. 2004. 干旱指标的理论分析与研究展望. 地球科学进展, **19**(6): 982-991.

张文丽, 张 彤, 吴冬秀, 等. 2006. 土壤逐渐干旱下玉米幼苗光合速率与蒸腾速率变化的研究. 中国生态农业学报, **14**(2): 72-75.

张喜英, 裴 冬, 由懋正, 等. 2000. 几种作物的生理指标对土壤水分变动的阈值反应. 植物生态学报, **24**(2): 280-283.

周洪伟. 2012. 正态性检验的几种常用的方法. 南京晓庄学院学报, (3): 13-18.

朱自玺, 侯建新. 1988. 夏玉米土壤水分指标研究. 气象, **14**(9): 13-16.

Azizi F, Hajibabaei M. 2014. Evaluation of drought stress on irrigation efficiency, yield and yield components in new maize hybrids. *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, **3**: 579-583.

Blum A. 1996. Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. *Plant Growth Regulation*, **20**: 135-1482.

Bodner G, Nakhforoosh A, Kaul HP. 2015. Management of crop water under drought: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **35**: 401-442.

Czajkowski T, Ahrends B, Bolte A, 2009. Critical limits of soil water availability (CL-SWA) for forest trees: An approach based on plant water status. *Landbauforsch Volkenrode*, **59**: 87-94.

Fang S, Su H, Liu W, *et al.* 2013. Infrared warming reduced winter wheat yields and some physiological parameters, which were mitigated by irrigation and worsened by delayed sowing. *PLoS ONE*, **8**: e67518.

Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, *et al.* 2009. Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, **29**: 185-212.

Gholipoor M, Sinclair TR, Raza MAS, *et al.* 2013. Maize hybrid variability for transpiration decrease with progressive soil drying. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **122**: 23-29.

Holbrook NM, Shashidhar VR, James RA, *et al.* 2002. Stomatal control in tomato with ABA-deficient roots. *Journal of Experimental Botany*, **53**: 1503-1514.

Hsiao TC, Fereres E, Acevedo E, *et al.* 1976. Water stress and dynamics of growth and yield of crop plants// Lange OL, Kappen L, Schulze ED, eds. Water and Plant Life. New York: Springer-Verlag: 281-305.

Hsiao TC. 1973. Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology*, **24**: 519-570.

Lambers H, Chapin III FS, Pons TL. 2008. Plant Physiological Ecology. New York: Springer.

Medrano H, Escalona JM, Bota J, *et al.*, 2002. Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: Stomatal conductance as a reference parameter. *Annals of Botany*, **89**: 895-905.

Meir P, Wood ET, Galbraith RD, *et al.* 2015. Threshold responses to soil moisture deficit by trees and soil in tropical rain forests: Insights from field experiments. *BioScience*, **65**: 882-892.

Nable RO, Robertson MJ, Berthelsen S. 1999. Response of shoot growth and transpiration to soil drying in sugarcane.

Plant and Soil, **207**: 59-65.

Ray JD, Gesch RW, Sinclair TR, *et al.* 2002. The effect of vapor pressure deficit on maize transpiration response to a drying soil. *Plant and Soil*, **239**: 113-121.

Reddy TY, Reddy VR, Anbumozhi V. 2003. Physiological responses of groundnut (*Arachis hypogea* L.) to drought stress and its amelioration: A critical review. *Plant Growth Regulation*, **41**: 75-88.

Sadras VO, Milroy SP. 1996. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. *Field Crops Research*, **47**: 253-266.

Shao HB, Chu LY, Jaleel CA, *et al.* 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *Comptes Rendus Biologies*, **331**: 215-225.

Streck NA. 2004. Do we know how plants sense a drying soil. *Ciência Rural*, *Santa Maria*, **34**: 581-584.

Turner NC, Kramer PJ. 1998. Adaption of Plants to Water and High Temperature Stress. New York: John Wiley & Sons.

Westgate ME, Boyer JS. 1985. Osmotic adjustment and the inhibition of leaf, root, stem and silk growth at low water potentials in maize. *Planta*, **164**: 540-549.

Xu B, Deng X, Zhang S, *et al.* 2010. Biomass partition, leaf gas exchange and water relations of alfalfa and milkvetch seedlings in response to soil drying. *Photosynthetica*, **48**: 481-487.

作者简介 麻雪艳,女,1988年生,博士研究生,主要从事农业气象方面研究。E-mail: maxueyan88@126.com

责任编辑 李凤芹