

不同干旱方式和干旱程度对玉米苗期根系生长的影响

李 博,王刚卫,田晓莉,董学会,张明才,王保民,段留生,李召虎

(中国农业大学作物化学控制研究中心,农业部作物栽培与耕作学重点开放实验室,植物生理学与生物化学国家重点实验室,北京 100094)

摘 要:以玉米杂交种高油 115 为材料,研究了直接干旱和渐进干旱两种方式(各设水分充足、轻度干旱和严重干旱 3 种处理)对管栽玉米苗期根系发育的影响。结果表明,采用渐进干旱方式,根系在轻度干旱时生长最好,严重干旱时最差;而采用直接干旱方式,根系在水分充足时生长最好,轻度干旱次之,严重干旱时最差。在水分充足条件下,细根(直径 0.05~0.25 mm)的根长和根表面积及其占总根系的比例高于中等根(直径 0.25~0.45 mm)和粗根(直径 >0.45 mm),直接干旱表现出降低细根比例、增加中等根和粗根比例的趋势,说明细根受干旱的影响较中等根和粗根更大。这可能是玉米幼苗根系生长对干旱的一种适应性反映。

关键词:玉米;根系生长;干旱方式;干旱程度

中图分类号: S311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)05-0148-05

玉米是我国重要的粮食作物和饲料作物,其生育期耗水较多且对水分胁迫比较敏感^[1],干旱已经成为世界范围内限制玉米产量的最主要因素^[2]。我国玉米种植面积约为 2000 多万 hm^2 ,其中 2/3 为旱作玉米^[3]。北方是我国玉米的主产区之一,旱情主要集中在 3 个时期:春季春玉米播种到幼苗建群期、夏季春玉米开花期及穗分化期和秋季玉米籽粒灌浆期^[4]。因此,干旱胁迫对玉米生长发育的影响一直是国内外学者研究的热点。

根系与耐旱性关系十分密切^[5,6]。发生水分胁迫时,根系会改变自身形态结构和构型,干物重积累也发生相应变化,并影响地上部“光系统”的建成和产量^[7]。高世斌等研究指出,在干旱胁迫下根重与根数和产量呈显著正相关,因此根系特征可作为耐旱性鉴定的重要指标^[8]。然而,由于根系取样的难度较大、研究技术和手段也比较缺乏,因此与地上部相比,干旱对玉米根系影响的研究相对较少。

实际生产中,干旱的发生一般有两种方式,一种为“渐进干旱”,即在出苗后的某个生育阶段降雨持续稀少,不能满足玉米生长发育的需要,导致旱情发生并不断加重;另一种方式为“直接干旱”,即在春天播种时遭遇春旱(常发生于东北和华北的春玉米区),不得已需要采用各种抗旱播种措施,如催芽播种等。一般干旱胁迫研究的试验设计大多模拟生产中的“渐进干旱”,模拟“直接干旱”的研究很少,因而对春播抗旱的指导缺乏针对性。

WinRHIZO(version 4.0b, Canada 2000)根系分

析软件是一种比较先进的根系研究手段,能简便准确地获得根系的各项重要参数,并能对根系进行直径分级研究^[9]。本研究应用该方法研究了渐进干旱和直接干旱对玉米苗期根系生长的影响,以期揭示玉米幼苗的抗旱机理、指导苗期的水分运筹提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 品种和生长条件

供试材料为玉米杂交种高油 115,由中国农业大学植物遗传育种系提供。

种子经过催芽后播种到高 45 cm、直径为 16 cm 的白色 PVC 管内,管底部用塑料膜和致密的尼龙网扎紧,防止漏水。填充基质为沙子和土(体积比为 2:1)的混合物,容重为 1.2 g/cm^3 ,土壤最大持水量为 28.2%。所有的 PVC 管均埋到地下使管中土温和地温保持一致,出苗后 3 d 间苗,每管留 1 株。

1.2 试验设计和水分控制

试验于 2005 年 6~9 月在中国农业大学网室内进行,随机区组设计,每处理 5 个重复(管)。设水分充足、轻度干旱和严重干旱 3 个水分处理^[10],田间持水量分别为 $75\% \pm 5\%$, $55\% \pm 5\%$ 和 $35\% \pm 5\%$ 。

渐进干旱于播种前将各处理的田间持水量统一控制到 75%,然后,水分充足处理维持这一水平不变,轻度干旱和严重干旱则通过减扣浇水分别达到 55% 和 35% 的目标水分含量;直接干旱则于播种前就将各处理的土壤水分含量调整到设计水平。一个

收稿日期:2008-04-01

基金项目:国家自然科学基金项目(30571118)

作者简介:李 博(1981—),女,河南新乡市人,在读博士,研究方向为作物生理。E-mail:smallry@163.com。

通讯作者:田晓莉,女,教授。E-mail:tian_xiaoli@163.com。

月后试验结束时,直接干旱方式的轻度干旱和严重干旱时间均持续 30 d,而渐进干旱方式的轻度干旱和严重干旱在达到设计含水量后分别只持续了 15 d 和 10 d。

利用活动式防雨棚遮挡自然降水,采取称重法进行水分控制,浇水通过埋入 PVC 管内的 15、30 和 45 cm 细管分三层进行。受试验场地所限,渐进干旱与直接干旱试验分次进行,每试验重复 2 次。

1.3 基质水分含量的测定

试验结束后,剖开 PVC 管分 3 层(0~15、15~30 和 30~45 cm)取土样称重,120℃ 下烘干 48 h 后重新称重,计算各层土壤水分含量。

1.4 根系测定

植株生长 1 个月于 4~5 叶期取样(距最后一次浇水间隔 2 d)。根系用流水小心冲洗干净,分成若干段,用 EPSON 扫描仪(Seiko Epson Corp., Tokyo, Japan)记录根系形态,然后用 WinRHIZO (version 4.0b, Regent Instruments Inc., Quebec, Canada 2000)分析总根长(RL)、根表面积(SA)和根体积(RV)。根长密度(RLD)由根系总长/土壤体积

计算得出。WinRHIZO 软件可将根系按直径分级(分辨单位 0.01 mm)进行各性状统计,本试验将根系划分为细根、中等根和粗根 3 个等级,直径范围分别为 0.05~0.25、0.25~0.45 和大于 0.45 mm。扫描完成后,根系在 105℃ 杀青 30 min,然后在 80℃ 下烘干 48 h,称量干重(RDW)。

1.5 数据分析

所有数据用国际通用统计软件 SAS 8.0 的 Duncan 测验进行统计分析。试验共重复 2 次,所得结果趋势一致,本文用第 2 次试验数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同土层土壤水分含量

图 1 为各水分处理的分层土壤水分含量,两种干旱方式下的结果相似。无论哪种水分处理,土壤水分含量总是上层最低下层最高;无论哪一层土体,总是水分充足的土壤含水量最高,轻度干旱次之,严重干旱最低。这一结果证明了本试验水分控制的有效性。

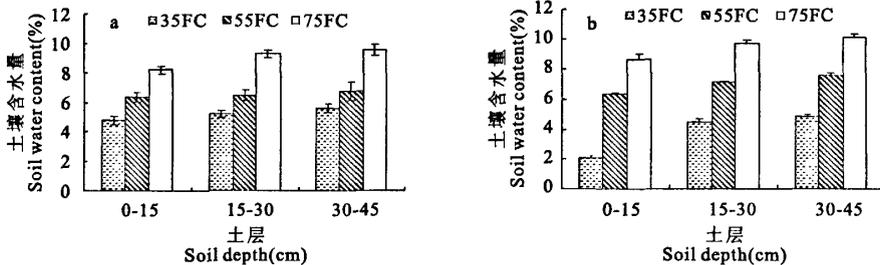


图 1 渐进干旱(a)和直接干旱(b)不同水分处理的各层土壤水分含量

Fig. 1 Soil water content of different water treatments at three depths under progressive drought(a) and direct drought(b)

注:图例 35FC、55FC 和 75FC 分别表示土壤含水量为田间最大持水量的 35%、55% 和 75%,下同。

Note: 35FC, 55FC, and 75FC: soil water content is 35%, 55%, and 75% of field capacity, respectively. The same is as below.

2.2 渐进干旱方式下不同程度水分胁迫对玉米苗期根系生长的影响

从表 1 可见,在渐进干旱方式下,轻度水分胁迫(55 FC)有利于玉米苗期根系的生长,其根长、根长密度、根表面积和根体积显著高于水分充足(75 FC)和严重干旱处理(35 FC),其中根长和根长密度较水分充足处理增加一倍左右。55 FC 的根干重也最高,但与 75 FC 的差异未达到显著水平。严重干旱处理的根系生长最差,但与水分充足处理相比差异不显著。

2.3 直接干旱方式下不同程度水分胁迫对玉米苗期根系生长的影响

表 2 结果表明,直接干旱方式下不同程度水分胁迫对玉米苗期根系生长的影响明显不同于渐进干旱方式。水分充足(75 FC)处理的根系生长最好,根干重、根长、根长密度、根表面积和根体积最大。轻度水分胁迫(55 FC)显著抑制了玉米幼苗根系的生长,各项指标下降的幅度在 24.0%~38.1%之间;严重干旱对根系生长的影响进一步加强,干物重等各项指标的下降幅度在 70.9%~81.1%之间。

表 1 渐进干旱方式下不同程度水分胁迫对玉米苗期根系生长的影响

Table 1 Effects of different water treatments on the root growth of Gaoyou 115 seedlings under progressive drought

水分处理 Water treatment	根系性状 Root traits				
	根干重 Root dry weight (g)	根长 Root length (cm)	根长密度 Root length density (cm/cm ³)	根表面积 Root surface area (cm ²)	根体积 Root volume (cm ³)
75 FC	0.83 ab	8200 b	0.9 b	780 b	7.5 b
55 FC	1.07 a	16400 a	1.8 a	1290 a	8.8 a
35 FC	0.74 b	6100 b	0.7 b	480 b	5.0 b

注:表中数据为 5 个重复的平均值,同一列内不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平下差异显著。下同。

Note: Data in the table are means of five replicates; different letters within the same column indicate significant differences at 5% level. The same is as below.

表 2 直接干旱方式下不同程度水分胁迫对玉米苗期根系生长的影响

Table 2 Effects of different water treatments on the root growth of Gaoyou 115 seedlings under direct drought

水分处理 Water treatment	根系性状 Root traits				
	根干重 Root dry weight (g)	根长 Root length (cm)	根长密度 Root length density (cm/cm ³)	根表面积 Root surface area (cm ²)	根体积 Root volume (cm ³)
75 FC	1.89 a	25000 a	2.5 a	1600 a	11.2 a
55 FC	1.17 b	17000 b	1.7 b	1100 b	8.5 b
35 FC	0.55 c	4900 c	0.5 c	360 c	3.0 c

2.4 直接干旱方式下不同程度水分胁迫对不同细度根系长度和表面积的影响

如表 3 所示,水分充足条件下(75 FC),细根(直径 0.05~0.25 mm)的根长较中等根(直径 0.25~0.45 mm)长 3.0 倍,较粗根(直径 >0.45 mm)长 10.3 倍;细根的根长比例高达 74%,而中等根和粗根的根长比例分别仅为 19%和 7%。水分胁迫使 3 种细度根系的根长同时减少,严重干旱处理(35 FC)的各细度根系长度显著小于水分充足处理,而

轻度干旱(55 FC)与水分充足处理的差异未达到显著水平。进一步分析发现,干旱胁迫对细根的影响程度大于中等根和粗根,如严重干旱使细根根长减少 84%,而中等根和粗根的减少幅度分别为 72%和 70%,这使严重干旱情况下细根的根长比例由水分充足时的 74%显著下降到 63%,而中等根由 19%显著增加到 27%、粗根由 7%显著增加到 10%(表 3)。

表 3 直接干旱方式下不同程度水分胁迫对玉米幼苗 3 种细度根系的根长及其比例的影响

Table 3 Effects of different water treatments on root length and its ratio in Gaoyou 115 seedlings under direct drought

水分处理 Water treatment	根长 Root length (cm)			比例 Ratio (%)		
	0.05~ 0.25 mm	0.25~ 0.45 mm	>0.45 mm	0.05~ 0.25 mm	0.25~ 0.45 mm	>0.45 mm
75 FC	18900 a(a)	4700 a(b)	1700 a(c)	74 a(a)	19 b(b)	7 b(c)
55 FC	11900 ab(a)	3800 a(b)	1200 ab(c)	70 a(a)	22 ab(b)	7 b(c)
35 FC	3000 b(a)	1300 b(b)	500 b(c)	63 b(a)	27 a(b)	10 a(c)

注:括号中不同字母表示同一水分处理不同细度根系的差异在 0.05 水平下显著。下同。

Note: Different letters in the bracket indicates significant difference among three diameter classes at 5% level. The same is as below.

根表面积由根长和根直径共同决定,由于细根的直径较小,因此其表面积与中等根和粗根相比的优势远不及根长。如在水分充足条件下(75 FC),虽然细根的表面积仍然显著高于中等根和粗根,但仅较后者增加 56.8%和 69.1%;细根表面积的比例也只达到 45%(表 4)。干旱对不同细度根系表面

积的影响与根长一致:即轻度干旱(55 FC)表现出减少各细度根系表面积的趋势,严重干旱(35 FC)达到差异显著水平;干旱对细根表面积的影响大于中等根和粗根,严重干旱时细根、中等根及粗根的表面积较水分充足处理分别减少 83%、71%和 72%,细根表面积的比例也由水分充足时的 45%显著下

降到33%。

表4 直接干旱方式下不同程度水分胁迫对玉米幼苗3种细度根系的根表面积及其比例的影响

Table 4 Effects of different water treatments on root surface area and its ratio in Gaoyou 115 seedlings under direct drought

水分处理 Water treatment	根表面积 Root surface area(cm ²)			比例 Ratio (%)		
	0.05~ 0.25 mm	0.25~ 0.45 mm	>0.45 mm	0.05~ 0.25 mm	0.25~ 0.45 mm	>0.45 mm
75 FC	710 a(a)	450 a(b)	420 a(b)	45 a(a)	29 a(b)	26 a(b)
55 FC	440 ab(a)	370 a(a)	330 ab(a)	39 ab(a)	32 a(b)	29 a(b)
35 FC	120 b(a)	130 b(a)	120 b(a)	33 b(a)	35 a(a)	32 a(a)

3 讨论

本研究结果表明,渐进干旱和直接干旱对玉米苗期根系生长的影响存在差异。在渐进干旱方式下,轻度水分胁迫(55 FC)较充足供水(75 FC)更有利于根系生长;而在直接干旱方式下,根系在充足条件下生长最好,轻度水分胁迫使根系生长的各项指标均显著降低。究其原因,可能与两种干旱方式下轻度胁迫的持续时间不同有关^[11],如直接干旱方式下的持续时间为30 d,而渐进干旱的仅为15 d。因此,播种伊始保证充足的土壤含水量(75 FC),然后在苗期将田间持水量控制在55%对根系发育是有利的;而播种时如果发生水分胁迫,则即使程度较轻(55 FC)也会影响玉米根系的生长。这一结果对制定苗期的灌溉措施有一定的指导意义。

两种干旱方式下,严重干旱处理(35 FC)的根系生长均最差。白莉萍等^[12]曾报道,玉米大喇叭口期前的轻度干旱胁迫对株高和产量影响不明显,但限度要保持在土壤田间持水量的55%以上,严重干旱胁迫则阻碍玉米各个阶段的生长发育。这与本文的研究结果相似。

一般认为,在逆境胁迫时细根是根系吸收的活性位点^[13],它可以扩大根系与土壤的接触面积来获取更多的养分和水分^[14-16]。而就玉米根系生长的不同指标而言,根长对植株整体水分利用效率的贡献最大,根表面积次之。本试验发现,水分充足时,细根(直径0.05~0.25 mm)与中等根(直径0.25~0.45 mm)和粗根(直径>0.45 mm)相比占有绝对优势,而且根长优势较根表面积的优势更强;而当发生干旱胁迫时,细根虽然仍表现出明显的生长优势(严重干旱时的根表面积除外),但其受影响的程度大于中等根和粗根,因此细根的根长比例和表面积比例下降,而中等根和粗根的比例相应上升。这可能是玉米幼苗根系对于干旱的一种适应性反映,即通过降低细根比例以减少对水分的吸收、从而适应干旱的土壤环境,但其机理尚待进一步研究。

关于水分胁迫对细根生长的影响,文献报道并不一致。玉米和豇豆间作时,干旱处理使豇豆的粗根增多细根减少(与本文结果一致),但对玉米没有影响^[17];Singh等发现干旱不影响三叶草细根的生长^[18],慕自新等的结果则表明玉米上层节根在干旱条件下增粗,而中下层节根却变细。不同研究结果之间的差异可能与供试作物、试验条件和研究方法有关。

参考文献:

- [1] Vamerali T, Saccamani M, Bona S, et al. A comparison of root characteristics in relation to nutrient and water stress in two corn hybrids[J]. *Plant Soil*, 2003,255:157-167.
- [2] Saini H S, Westgate M E. Reproductive development in grain crops during drought[J]. *Adv Agron*, 2000,68:59-96.
- [3] 王晓琴,袁继超,熊庆娥.玉米抗旱性研究的现状及展望[J]. *玉米科学*,2002,10(1):57-60.
- [4] 华北平原作物水分胁迫与干旱研究课题组.作物水分胁迫与干旱研究[M].郑州:河南科技出版社,1991.204-213.
- [5] 杨国虎,李建生,罗湘宁,等.干旱条件下玉米叶面积变化及地上干物质积累与分配的研究[J]. *西北农林科技大学学报*, 2005,33(5):27-32.
- [6] 韩希英,宋凤斌.干旱胁迫对玉米根系生长及根际养分的影响[J]. *水土保持学报*,2006,20(3):170-172.
- [7] 齐健,宋凤斌,刘胜群.苗期玉米根叶对干旱胁迫的生理响应[J]. *生态环境*,2006,15(6):1264-1268.
- [8] 高世斌,冯质雷,李晚忱,等.干旱胁迫下玉米根系性状和产量的QTLs分析[J]. *作物学报*,2005,31(6):718-722.
- [9] Himmelbauer M L, Loiskandl W, Kastanek F. Estimating length, average diameter and surface area of roots using two different image analyses systems[J]. *Plant Soil*, 2004,260:111-120.
- [10] 李秧秧,刘文兆.土壤水分与氮肥对玉米根系生长的影响[J]. *中国生态农业学报*,2001,9(1):13-15.
- [11] Sahnoun M, Adda A, Soualem S, et al. Early water-deficit effects on seminal roots morphology in barley[J]. *C R Biol*, 2004, 327:389-398.
- [12] 白丽萍,隋方功,孙朝晖,等.土壤水分胁迫对玉米形态发育及产量的影响[J]. *生态学报*,2004,24(7):1556-1560.
- [13] Zobel R W. Sensitivity analysis of computer-based diameter mea-

- surement from digital images[J]. *Crop Sci*, 2003, 43: 583-591.
- [14] Huang B, Eissenstat D M. Linking hydraulic conductivity to anatomy in plants that vary in specific root length[J]. *J Am Soc Hort Sci*, 2000, 125: 260—264.
- [15] Benjamin J G, Nielsen D C. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea[J]. *Field Crop Res*, 2006, 97: 248—253.
- [16] Peman J, Voltas J, Gil-Pelegrin E. Morphological and functional variability in the root system of *Quercus ilex* L. subject to confinement consequences for afforestation [J]. *Ann For Sci*, 2006, 63: 425—430.
- [17] Adiku S G K, Ozier-Lafontaine H, Bejazyet T. Patterns of root growth and water uptake of a maize-cowpea mixture grown under greenhouse conditions[J]. *Plant Soil*, 2001, 235: 85—94.
- [18] Singh D K, Sale P W G. Growth and potential conductivity of white clover roots in dry soil with increasing phosphorus supply and defoliation frequency [J]. *Ag ron J*, 2000, 92: 868—874.

Effects of different drought manners and different water availabilities on root growth of maize (*Zea Mays*) seedlings

LI Bo, WANG Gang-wei, TIAN Xiao-li*, DONG Xue-hui,

ZHANG Ming-cai, WANG Bao-min, DUAN Liu-sheng, LI Zhao-hu

(Center of Crop Chemical Control, Key Laboratory of Crop Cultivation and Farming System,

State Key Laboratory of National Plant Physiology and Biochemistry, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: The objective of this study is to investigate the effects of progressive drought and direct drought on root growth of maize seedlings subjected to well watered, moderate water stress and severe water stress, respectively, with hybrid maize Gaoyou 115. The results indicated that moderate water stress (55% FC) was the most advantages for root growth in conditions of progressive drought, while well watered (75% FC) was the most favor in conditions of direct drought. When the root system was sorted into fine roots ($0.05 \text{ mm} < \text{diameter (DA)} \leq 0.25 \text{ mm}$), middle roots ($0.25 \text{ mm} < \text{DA} \leq 0.45 \text{ mm}$) and coarse roots ($0.45 \text{ mm} < \text{DA}$) by using WinRHIZO, it was observed that fine roots contributed to 74% and 45% of the total root length and the total root surface area, respectively, which were much greater than that of middle and coarse roots. However, water stress arrested fine roots growth more than middle and coarse roots, which led to a decreased proportion of fine roots concerning length and surface area.

Keywords: maize (*Zea mays* L.); root growth; drought manner; water availability