

水分胁迫对华北春玉米生育进程及物质生产力的影响

袁淑芬¹ 陈源泉¹ 闫鹏¹ 陶志强¹ 崔吉晓¹ 李超² 隋鹏^{1*}

(1. 中国农业大学 农学与生物技术学院,北京 100193;

2. 中国农业大学 吴桥实验站,河北 沧州 061800)

摘要 为明确华北地区特定区域与气候条件下春玉米对不同生育期水分胁迫的响应,从而为制定该区域春玉米的高产节水调控技术提供参考依据,利用遮雨棚开展了盆栽春玉米的全程水分控制的试验研究。试验设置了1个全生育期适水对照(CK)和1个全生育期供水充足(AW)处理,另外设置了苗期干旱(SD)、拔节期干旱(JD)、大喇叭口期干旱(LD)、抽穗期干旱(HD)和灌浆期干旱(FD)5个不同时期的干旱处理。主要研究了不同生育期干旱对春玉米生育进程、部分形态生理特征的影响。分析结果表明:春玉米不同生育阶段对水分胁迫的敏感程度大小依次为抽穗期>大喇叭口期>灌浆期>拔节期。与CK相比,SD处理由于持续的重度干旱,所以严重抑制了其植株的生长,复水后其单株叶面积虽然上升幅度更大,但依然最小,且灌浆期光合速率也最小,说明苗期重度干旱后,复水后的恢复力是有限的。AW处理可以减慢生育后期叶片的衰老速度,使整个生育期延长了1d,即充足水分供给利用时玉米生育期延长。营养生长阶段的SD、JD和LD处理分别使整个生育期延长了3、1和1d,而生殖生长期的HD、FD处理均使整个生育期缩短了2d,说明营养生长期干旱可以延缓玉米的生长发育,而生殖生长期干旱会加速玉米的衰老速度,缩短生育进程。

关键词 春玉米;水分胁迫;生育期;形态;生理

中图分类号 S 513

文章编号 1007-4333(2014)05-0022-07

文献标志码 A

Effects of water stress on growth of spring maize and the morphological and physiological reaction during different growth stages in North China Plain

YUAN Shu-fen¹, CHEN Yuan-quan¹, YAN Peng¹, TAO Zhi-qiang¹, CUI Ji-xiao¹, LI Chao², SUI Peng^{1*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Wujiao Experimental Station, China Agricultural University, Cangzhou 061800, China)

Abstract In order to clarify the drought response at different growth stages of spring maize under the specific areas and the climate conditions in North China Plain, so as to provide a reference for the development of a high-yielding and water-saving irrigation system in North China Plain, a field experiment with pots was conducted under rain preventing condition with water controlled throughout the whole growth period. The growth stages of spring maize were divided into seedling, jointing, large bell, heading and filling stages, and set up five different periods of drought correspondingly, which were represented by SD, JD, LD, HD, FD, respectively. The other two treatments were a proper water supply as control(CK) and an adequate water supply(AW) during the whole growth period. The primary research showed the effects on growth process, morphological and physiological changes between different drought treatments. The results showed the sensitivity to water stress during the growth period were heading stage> large bell stage> filling stage> jointing stage. Compared with CK, SD inhibited the growth of their plants severely due to the ongoing severe drought, although its greater increase of leaf area per plant after rehydration, (as a whole the increased leaf area was still

收稿日期: 2014-01-17

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011AD16B15); 国家行业科技项目(201103001)

第一作者: 袁淑芬, 硕士研究生, E-mail: 289292741@qq.com

通讯作者: 隋鹏, 副教授, 主要从事农田生态健康和循环农业研究, E-mail: suipeng@ufl.edu

minimal) and its photosynthetic rate was the smallest in the filling stage. These indicated that the plant restoring capacity was limited after severe drought in seedling stage. While AW could slow down the aging speed of the blades, the entire growth period extended one day, which suggested that AW could extend corn growing period. The vegetative stages after SD, JD, LD treatments were extended 3, 1, 1 days during the entire growth period respectively, while reproductive stage after HD, FD treatments were both shortened two days. In conclusion, the vegetative growth period under drought could delay the process of growth of spring maize, while reproductive stage was just the opposite, which would accelerate the aging speed and shorten the growth process.

Key words spring maize; water stress; growth period; morphology; physiology

玉米是重要的饲料和工业原料,随着社会发展和生活水平的提高,对其需求量越来越大。从2010年开始到随后几年玉米的进口量一直保持着持续攀升的趋势^[1-2]。2012年玉米已取代稻谷成为我国第一大粮食作物,因此提高玉米产量对保证中国粮食安全意义重大。

土壤水分是影响春玉米生长发育及产量的主要因素之一,目前有关干旱胁迫对于玉米生育进程影响的研究也不少,白莉萍等^[3]认为玉米生育前期干旱胁迫将使生育进程明显延缓,并引起成熟期推迟。宋凤斌等^[4]认为干旱胁迫使灌浆持续时间的缩短是植株子粒重降低的原因之一。白向历等^[5]的研究表明干旱可导致散粉至吐丝期间隔(ASI)加大,致使花期不遇。纪瑞鹏等^[6]的研究结果显示东北春玉米在不同生育期遭受干旱胁迫后,对生育进程的影响不一样。南纪琴等^[7]2012年的试验认为由于南方地区雨热资源比较丰富导致不同水分处理生育期出现日期基本一致。关于水分胁迫对玉米整个生育进程的影响还没有很系统的研究。

目前,关于不同生育期水分胁迫对玉米生长发育、形态生理影响的研究也较多^[8-13],多数试验表明,在任何生育期较严重的水分胁迫均可抑制玉米生长发育,产生形态及生理变化,导致玉米减产,只是影响大小不一样。并且研究的试验地点主要集中在东北地区^[14-17],而关于其他地区的研究较少。另外,用形态和生理指标来解释生育进程加速或延缓原因的论文较少。本试验针对华北春玉米,利用遮雨棚盆栽,在全生育期控水条件下,研究不同生育期水分胁迫对春玉米生育进程及物质生产力的影响,为制定各个生育期适宜的水分供给、实现华北春玉米的节水增产提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 地点及材料

本试验于2013年在中国农业大学吴桥实验站的防雨棚中进行。采用盆栽试验,所用塑料盆规格

为高50 cm,盆内径45 cm,盆内装均质扰动土,取自玉米田耕层(0~20 cm)的表层壤土。装土高度45 cm,每盆装风干土40 kg,桶底打孔。试验前预先测定得到该均质扰动土的田间持水量为25%,容重1.54 g/cm³。供试品种为金海5号,播种期5月22日,收获期9月中旬。本试验以40 kg土为基准,每盆施用尿素12 g、磷酸二铵8 g、硫酸钾4 g,折合纯养分量为土壤中N 0.17 g/kg、P 0.09 g/kg、K 0.05 g/kg。将化肥与土壤充分混匀后装盆。播种时每盆浇灌相同水量,以保证出苗齐全。三叶期至成熟期进行全程水分控制,并以占田间持水量的百分比计算。

1.2 处理方法

将春玉米的生育时期划分为V3(苗期)、V6(拔节期)、V12(大喇叭口期)、VT(抽穗期)、R2-R3(灌浆期)和R6(成熟期),除了成熟期外,其他时期均设置干旱处理,处理代号依次用SD、JD、LD、HD、FD表示。每个生育期干旱的土壤水分控制上下限(田间持水量的百分比)和干旱持续天数如表1。另外设置1个对照(全生育期适水)处理和1个充分供水处理,分别用CK和AW表示。2个处理整个生育期的土壤水分控制上下限不变,如表1所示。各个干旱处理只在对应时期设置如表1土壤水分控制,其他时期水分控制同对照处理。土壤水分含量采用称重法来测定。苗期和拔节期每7 d测定1次,大喇叭口期到灌浆期每5 d测定1次,并与测定当天及时浇水,各处理每次浇水量按 $W = \text{计划土重} - \text{实测土重}$,计划土重=干土重+干土重×田持× $W_{\text{上}}$, $W_{\text{上}}$ 为各个处理对应的土壤水分控制上限。每个处理5个重复。

1.3 测定方法

用常规方法测定每个生育期的株高、叶面积,记录每个时期的时间和天数。用SPAD-502叶绿素仪测定叶绿素含量(SPAD值),用Li-6400型便携式光合仪测定灌浆期光合速率,用硫代巴比妥酸法测定穗位叶丙二醛(MDA)含量。

表1 各干旱处理的水分控制上下限及干旱持续期

Table 1 Moisture control limit and arid duration of each drought treatment

处理 Treatment	控水上限(田持)/% Water control upper limit	控水下限(田持)/% Water control lower limit	干旱持续期 Arid duration	干旱持续时间/d Arid days
CK	85	65		0
AW	100	70		0
SD	75	40	6月1日—6月29日	29
JD	80	45	6月30日—7月20日	21
LD	80	45	7月21日—7月31日	11
HD	80	45	8月1日—8月10日	10
FD	80	45	8月11日—8月31日	21

注:CK代表全生育期适水对照;AW代表全生育期充分供水处理;SD、JD、LD、HD、FD分别代表苗期、拔节期、大喇叭口期、抽穗期、灌浆期的干旱处理。下表和图同。各个干旱处理只在对应时期设置如表土壤水分控制,其他时期水分控制同对照。

Note:CK and AW mean proper water supply and adequate water supply during the whole growth period respectively. SD, JD, LD, HD and FD represent seedling, jointing, large bell, heading and filling stages of drought, respectively. The same as below tables and figures. Each drought treatment sets up such soil water control only in the corresponding period, the moisture control standard is the same with the control in other growth periods.

采用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据统计;采用 SPSS 11.0 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 对春玉米生育进程的影响

由表2可知,与对照相比,SD处理可以使玉米以后各时期的生长发育滞后,使大喇叭口期、抽穗期、吐丝期和成熟期出现的时间分别推迟了6、7、9和3d。由于SD处理水分控制下限只有田持的40%,而且干旱持续天数在几个处理中最长,达到29d,属于重度干旱胁迫,所以后期复水并没有使生

育进程滞后的现象缓解。而且,SD处理重度干旱使抽穗与吐丝的间隔天数增大,不利于玉米的授粉,降低结实率;使灌浆期的天数减少,不利于籽粒有机物的积累,从而减产。

营养生长阶段的JD和LD处理一定程度上延缓了生育进程。JD处理可以使其随后的时期(大喇叭口、抽穗期和吐丝期)生育期出现比对照晚(2、2和4d),LD处理使其随后的时期(抽穗期和吐丝期)生育期出现比对照晚(3和5d)。另外,与SD处理一样,JD、LD和HD处理均可以将抽穗与吐丝的间隔天数延长2d。

表2 2013年春玉米到达生育期所需时间

Table 2 Survey of spring maize growth period in 2013

处理 Treatment	出苗 Seedling	三叶展 Three leaves	七叶展 Seven leaves	大喇叭口 Large bell	抽穗 Heading	吐丝 Spinning	成熟 Maturity
CK	6	16	40	61	72	74	116
AW	6	16	40	61	72	74	117
SD	6	16	46	67	79	83	119
JD	6	16	40	63	74	78	117
LD	6	16	40	61	75	79	117
HD	6	16	40	61	75	79	114
FD	6	16	40	61	73	75	114

与 CK 相比,SD、JD 和 LD 处理使玉米成熟期分别延长 3、1 和 1 d,而 HD 和 FD 均可以使玉米的灌浆初始期延后,成熟期提前 2 d,即灌浆期明显缩短。可以推出营养生长期干旱可以延缓玉米的生长发育,而生殖生长期干旱会加速玉米的衰老速度,缩短生育进程。AW 与 CK 相比只有成熟期延缓了 1 d,说明充足的水分供应可以保证玉米正常的生长发育速度,并且对后期玉米的衰老有一定的延缓作用。

2.2 对春玉米形态指标的影响

2.2.1 对春玉米各生育期株高的影响

玉米生育期间,株高随着生育期的推进而增长,但是不同水分处理各生育期的株高增长速率有差异(图 1)。由图 1 可见,SD 的株高从苗期到抽穗期,一直在所有处理中处于最低水平,并且在拔节期和大喇叭口期与 CK 都有显著差异($P < 0.05$),但是从大喇叭口期到灌浆期,其株高一直保持最高的增长速率,大喇叭口期到抽穗期、抽穗期到灌浆期的增长速率分别比对照高了 62.9% 和 134.6%。这说明苗期干旱会抑制株高的生长速度,但是复水后株高的生长会慢慢恢复过来,并且有一定的补偿效应,表现为后期的株高增长与 CK 相比更加快速,到灌浆期甚至超过对照的株高。

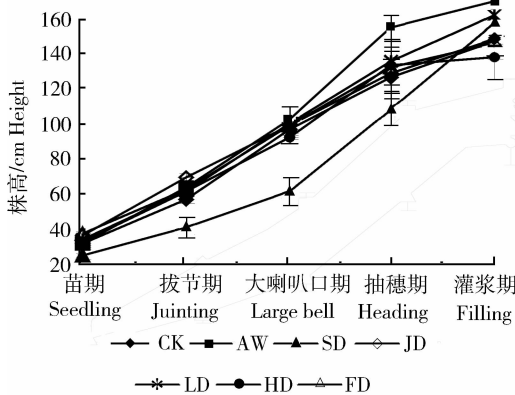


图 1 各个处理生育期株高变化

Fig. 1 Plant height changes with growth process in each treatment

JD、LD 和 FD 处理复水后,株高与 CK 相比没有显著差异。对于 HD 处理,抽穗期干旱使得其株高在抽穗到灌浆期的增长速率比对照低了 75.1%,这可能是因为水分胁迫抑制了雄穗的生长和延缓抽出的时间。最终的株高是 AW 处理最大,HD 处理最低,且两者之间有显著差异($P < 0.05$)。

2.2.2 对春玉米各生育期单株叶面积及叶片衰老的影响

从苗期到抽穗期,SD 处理的叶面积一直最低,并且与其他各处理间有显著差异($P < 0.05$),其他各处理之间差异不明显。到了灌浆期,SD 处理的叶面积增长到最大,而其他处理由于叶片衰老叶面积不断下降,各处理间差异不显著,但是 HD 处理的叶面积变为最小。

从图 2 各个生长区间的斜率来看,各处理大喇叭口期到抽穗期斜率均最大,说明这个生育时期叶面积增长速率最大,植物生长快速,需要大量养分、水分供应,这也解释了大喇叭口期和抽穗期对水分胁迫很敏感的原因。从灌浆期到灌浆末期,叶面积下降最快的为 FD 处理,其下降速率比 CK 大了 2.4%;最慢的为 AW 处理,其下降速率比 CK 小 28.7%。结合表 3,FD 处理灌浆期枯叶数增长的速度

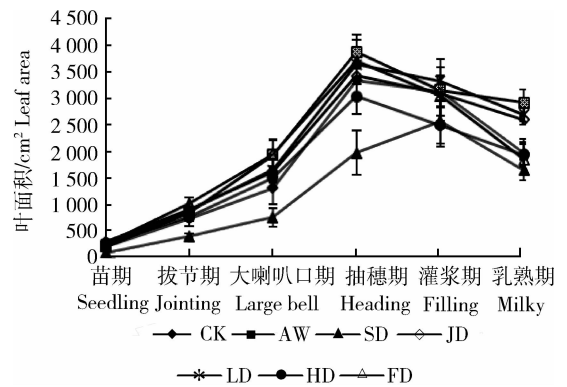


图 2 各处理生育期叶面积变化

Fig. 2 Plant leaf area changes with growth process in each treatment

表 3 灌浆期各处理单株平均枯叶数统计

Table 3 Statistical average of withered leaves per plant in filling stage of each treatment

处理 Treatment	灌浆期(R2) Filling stage	乳熟期(R3) Milky stage
CK	6.0 a	6.2 a
AW	5.2 a	5.3 a
SD	6.0 a	6.6 a
JD	5.6 a	6.2 a
LD	5.4 a	5.8 a
HD	6.6 a	7.4 a
FD	5.0 a	7.0 a

注:同一列内字母相同代表处理间差异不显著($P > 0.05, n = 5$)。
Note: Same letters in the same column represent no significant difference at 0.05 level between treatments.

率比CK大了36.7%，而AW处理的枯叶数增长率比对照小了1.4%。与其他处理相比，HD处理使得灌浆中后期的枯叶数最多。由此可见，抽穗期、灌浆期干旱可以加速叶片衰老速度，而充分供水可以延缓叶片的衰老。

2.3 对春玉米生理指标的影响

2.3.1 对叶片各个生育期 SPAD 的影响

从整个生育期 SPAD 的动态变化来看(图3)，苗期到抽穗期的 SPAD 呈增加的趋势，到抽穗期达到最大值(除了 JD 处理)，而后随着生育期推进呈下降趋势，这与叶面积的变化趋势类似。苗期各处理之间差异不显著。在大喇叭口期，JD 处理的 SPAD 值最小，并且与 AW 处理有显著差异($P < 0.05$)，说明在拔节期水分胁迫可以降低叶片的叶绿素含量。在抽穗期，JD 处理 SPAD 值依然最低，且与 FD、AW 处理都有显著差异($P < 0.05$)。在灌浆期，各处理间差异不显著，但是由图3可以看出 AW 处理 SPAD 值最大，HD 处理的 SPAD 值变为最小，从其抽穗期到灌浆期斜率也可以看出，其 SPAD 值下降最快，复水后(灌浆期-乳熟期)其下降速率明显变小。同样，FD 处理使得其 SPAD 值在灌浆到乳熟阶段下降最快，而 AW 处理的 SPAD 值从抽穗期到灌浆期的下降速率一直最小。

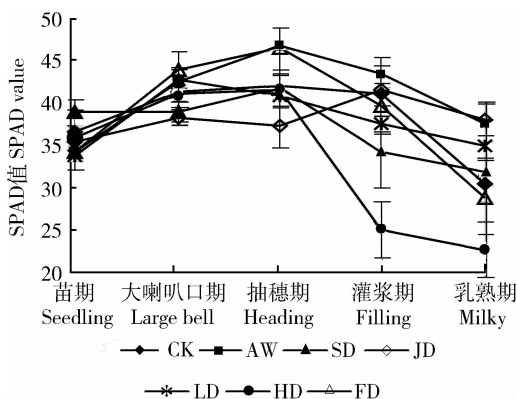


图3 各处理不同生育期的 SPAD 动态

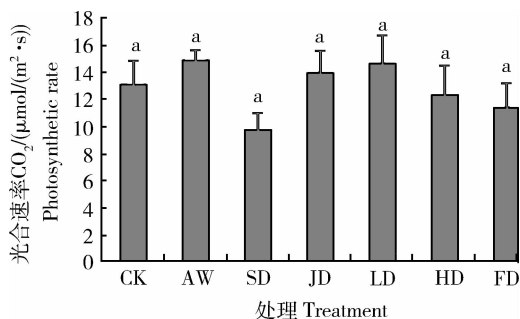
Fig. 3 Plant SPAD changes with growth process in each treatment

可知，在拔节期干旱可以降低叶片的叶绿素含量，抽穗期干旱和灌浆期干旱会使叶绿素含量急剧下降，以抽穗期更加剧烈。而充足的供水可以使叶绿素含量下降速率降低，延缓叶片衰老速度。

2.3.2 对灌浆期光合作用的影响

由图4可知，春玉米灌浆期各处理之间光合速

率差异不显著($P > 0.05$)。SD处理的光合速率最低，比对照小了25.7%，其次较低的是FD和HD处理，分别比对照小了13.2%和6.1%，这是因为SD处理由于干旱持续期长、干旱时控制的土壤水分下限最低，对植株的伤害最大，复水后的恢复力较弱，所以在灌浆期其叶片偏黄、叶绿素含量低，光合速率最低。FD和HD处理较低是因为对应时期的水分胁迫导致叶片加速衰老，叶绿素含量较低，光合速率降低。



灌浆期 8月19日 9:00—11:00。字母相同代表处理间差异不显著($P > 0.05, n = 5$)。

Filling period August 19 9:00—11:00. Same letters represent no significant difference at 0.05 level between treatments.

图4 春玉米灌浆期穗位叶光合速率

Fig. 4 Photosynthetic rate in ear leaf of spring maize in filling period (August 19 9:00—11:00)

光合速率最高的为AW处理，比对照高了13.5%，其次是LD和JD处理，分别比对照高了11.5%和6.6%。这是因为AW处理在灌浆期一直维持较高的叶绿素含量，利于植物蒸腾作用和气孔呼吸，使光合速率较大。后2个处理较高是因为前期的水分胁迫使生育期有一定延迟，且胁迫解除后复水有一定的补偿生长作用。

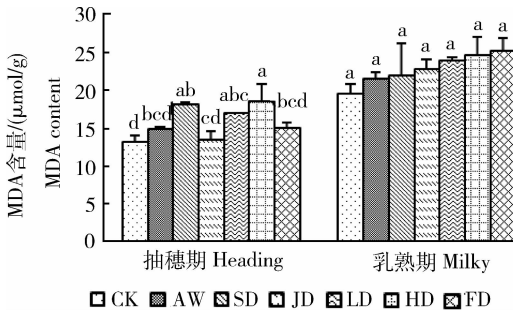
2.3.3 对抽穗期及乳熟期 MDA 的影响

植物器官衰老或在逆境下遭受伤害，往往发生膜脂过氧化作用，MDA是膜脂氧化的最终分解产物，其含量可以反映植物遭受逆境伤害的程度。另外，MDA的积累可能对膜和细胞造成一定的伤害。

由抽穗期到乳熟期，所有处理MDA的含量是上升的，这符合植物的生长规律，因为植物衰老体内MDA会增加。在抽穗期，HD处理的MDA含量最高，其次是SD处理，而后是LD处理，并且3者与CK相比均有显著差异($P < 0.05$)。说明在该生育

期,HD 处理对水分胁迫的反应最大,受的伤害较大;SD 处理复水后虽然一定程度恢复了生长,但是受水分胁迫的影响依然存在,可见苗期持续的较严重干旱胁迫对植株的伤害是无法通过复水后的补偿效应完全修复的。对于 LD 处理,大喇叭口期干旱造成的伤害在抽穗期也还没有消失,相反,JD 处理的 MDA 含量几乎与 CK 持平,说明所受的胁迫作用已解除。

在乳熟期,各处理之间的 MDA 含量差异不显著,但由图 5 可以看出 FD 处理的 MDA 含量最高,其次是 HD 处理,分别比对照高了 29.4% 和 26.2%,说明 HD 处理在此阶段对胁迫的反应还在持续。



不同字母表示每个时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05, n=5$)。下同。

Different letters represent significant difference at 0.05 level between treatments. The same as below.

图 5 抽穗期和乳熟期穗位叶 MDA 含量变化

Fig. 5 MDA content at ear leaf in heading and filling stages

2.4 不同水分处理的最终生物量比较

对于成熟期的生物量,从图 6 可以看出最大的依然是 AW 处理。但是最小的是 HD 处理,其次是 SD 处理,并且 HD 与 CK 相比有显著差异 ($P < 0.05$)。

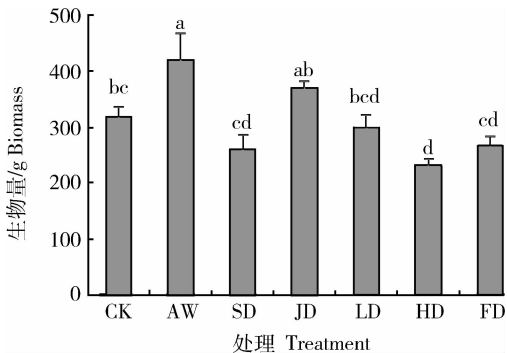


图 6 成熟期单株春玉米生物量

Fig. 6 Biomass per plant in maturity

这是因为苗期干旱使生育期延迟,到了成熟期依然保持较大的绿叶面积,而抽穗期是玉米水分最敏感的时期,干旱使植株叶片绿叶面积和叶绿素含量迅速降低,抑制了植株的生殖生长,加速了植株的衰老速率。

3 结论与讨论

本试验表明,玉米在生长发育过程中,因遭遇水分胁迫而造成植株生育期变化、形态和生理变化、植株生长受限和产量形成受阻,最终导致成熟期生物量较低。一般认为玉米苗期干旱利于根系的生长和下扎,由本试验可知,这种干旱必须是适度 and 持续较短的时间,若是土壤水分控制下限为田间持水量的 40%,且干旱时期长(达 29 d),对玉米以后的生长发育会造成不可恢复的影响。对不同生育期干旱下的春玉米生育进程、形态生理特征变化的综合分析表明,春玉米受水分胁迫的影响程度与所处的发育期、土壤含水量、持续时间都有关,这与张淑杰等^[18]的研究结果一致。受旱越重,持续时间越长,对生育进程影响越大,抽穗与吐丝的间隔时间也越长,因此用上面 3 个因素之一无法用来判断确切的受旱轻重程度。

从对生育进程的影响来看,营养生长期水分胁迫可以延缓植株的生育进程,即苗期、拔节期、大喇叭口期干旱均可以延缓其后期的生育进程,只是由于水分胁迫所处的发育期和持续时间不同而显示出差异。苗期干旱处理土壤水分控制上下限分别为 75% 和 40%,持续干旱时间为 29 d,拔节期与大喇叭口期干旱的土壤水分控制上下限为 80% 和 45%,持续干旱时间分别为 21 和 11 d,可见苗期干旱处理为持续重度干旱胁迫,使生育期延迟时间最长,复水后株高、叶面积、叶绿素含量虽然显示了一定补偿生长的作用,但仍然无法恢复到正常水平,并且苗期干旱处理使开花散粉期与吐丝期时间间隔变大了 2 d (与对照相比),灌浆期时间缩短,不利于受精及产量形成。因此通过控制苗期长时间水分胁迫而延长生育期的水分调控路径不可取。

与苗期干旱或大喇叭口干旱处理不同,抽穗期干旱处理干旱持续期仅 10 d,但是春玉米的反应很迅速。在生育期方面,与 CK 相比可使抽穗出现的时间延迟 3 d,抽穗与吐丝的时间间隔延长 2 d,并且使灌浆期缩短,成熟期提前 2 d,对生育进程的影响更敏感。在形态生理方面,在抽穗期和灌浆期干旱

均可以加速叶面积、叶绿素含量的降低,使灌浆期光合速率较低,MDA含量升高,并且抽穗期干旱使叶面积、叶绿素含量降低的速率比灌浆期干旱的更大。可见抽穗期是玉米对土壤水分胁迫反应最敏感的时期,验证了前人的研究结论^[5]。抽穗期是加速玉米早熟(或早衰)的因素之一,要延长春玉米灌浆期的时间而实现高产,就必需保证此时期充足的水分供应。单从生育阶段敏感性来说,玉米对水分胁迫的敏感性为抽穗期>大喇叭口期>灌浆期>拔节期,这与白向历等^[5]和鲍巨松等^[19]的结果相同。

总的来说,营养生长期水分胁迫可以延缓生育进程,这与白莉萍等^[3]和张淑杰等^[18]的研究结果一致。另一方面,生殖生长期水分胁迫可以通过加速形态指标的衰老速率、生理的变化,从而加速玉米衰老速率,使成熟期提前,这一点之前的研究没有提到。

在华北平原,水资源日益匮乏,应该充分利用降雨来补水。对于春玉米来说,华北平原4—6月中旬降雨量很少,而此时为春玉米的苗期到大喇叭口期。苗期和拔节期可以适量控水,但应有限度,即保持土壤相对含水量下限为55%较好^[3]。大喇叭口期是玉米对水分胁迫比较敏感的时期,也是玉米营养生长向生殖生长过度、需水较大的时期,必须保证充足的供水,土壤相对含水量下限为70%较好。6月下旬是春玉米抽穗吐丝期,对水分胁迫最敏感,此时如果降雨量不足,必须通过灌溉保证充足的供水。到了7、8月份,降雨量很丰富,一般无需灌溉,但要做好田间管理,防洪排涝。

参 考 文 献

- [1] 蔡海龙. 2010年中国玉米进口形势及后市展望[J]. 世界农业, 2011(4):49-52
- [2] 毛爽,高庆鹏,朱丰超. 未来国际市场对中国玉米进口的适应性分析[J]. 世界农业, 2012(5):57-62
- [3] 白莉萍,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
- [4] 宋凤斌,戴俊英. 干旱胁迫对玉米雌穗生长发育和产量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2000, 22(1):18-22
- [5] 白向历,孙世贤,杨国航,等. 不同生育时期水分胁迫对玉米产量及生长发育的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(2):60-63
- [6] 纪瑞鹏,车宇胜,朱永宁,等. 干旱对东北春玉米生长发育和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11):3021-3026
- [7] 南纪琴,刘战东,肖俊夫,等. 不同生育期干旱对南方春玉米生长发育及水分利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(3):55-59
- [8] Recep C. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn[J]. Field Crop Res, 2004, 89:1-16
- [9] 梁涛,刘景利. 水分胁迫对玉米生长发育和产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(35):17436-17437, 17472
- [10] Grant R E, Jackson B S, Kiniry J R. Water deficit timing effects on yield components in maize[J]. Argon, 1989, 81:61-65
- [11] 徐世昌,戴俊英,沈秀瑛,等. 水分胁迫对玉米光合性能及产量的影响[J]. 作物学报, 1995, 21(3):356-363
- [12] 张维强,沈秀瑛. 水分胁迫和复水对玉米叶片光合速率的影响[J]. 华北农学报, 1994, 9(3):44-47
- [13] 赵天宏,沈秀瑛,杨德光,等. 水分胁迫及复水对玉米叶片叶绿素含量和光合作用的影响[J]. 杂粮作物, 2003, 23(1):33-35
- [14] 赵先丽,张玉书,纪瑞鹏,等. 辽宁春玉米出苗期水分胁迫试验初探[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(4):35-39
- [15] 刘玉涛,邱振英,王宇先,等. 春玉米抗旱性鉴定指标比较研究[J]. 玉米科学, 2006, 14(4):117-120
- [16] 马树庆,王琪,吕厚荃,等. 水分和温度对春玉米出苗速度和出苗率的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(11):3378-3385
- [17] 王琪,马树庆,徐丽萍,等. 东北地区春旱对春玉米幼苗长势的影响指标和模式[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(5):141-147
- [18] 张淑杰,张玉书,纪瑞鹏,等. 水分胁迫对玉米生长发育及产量形成的影响研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(12):68-72
- [19] 鲍巨松,杨成书,薛吉全,等. 不同生育时期水分胁迫对玉米生理特性的影响[J]. 作物学报, 1991, 17(4):261-166

责任编辑:袁文业