

## 淹水对大豆生长和产量的影响

韩亮亮, 周 琴, 陈卫平, 田一丹, 邢兴华, 邢 邯, 江海东

(南京农业大学 农业部南方作物生理生态重点开放实验室, 国家大豆改良中心, 江苏 南京 210095)

**摘要:**以南农 99-6 为材料, 通过盆栽试验研究了淹水胁迫(水面淹至大豆子叶节部位)对大豆生长与产量的影响。结果表明:淹水抑制了大豆的生长, 随淹水时间延长大豆的主、侧根逐渐腐烂, 茎淹水部分产生大量不定根, 为大豆适应淹水环境提供条件。在淹水处理 0~10 d 内, 植株的生物量、叶面积、光合参数较对照有一定增加, 但 10 d 以后随时间延长呈下降趋势; 叶片中的色素含量降低, 随时间延长与对照差异显著; 叶片丙二醛、过氧化氢含量随胁迫时间延长呈上升趋势, 显著高于对照。淹水胁迫最终导致单株荚数和产量明显降低, 淹水时间越长, 降低幅度越大。综合各指标来看, 光合参数、丙二醛和过氧化氢含量等生理指标在 0~10 d 与对照差异不显著, 而 10 d 后差异显著, 可以推断该大豆品种的淹水胁迫临界期为 10 d。

**关键词:**大豆; 淹水胁迫; 生长; 产量

**中图分类号:** S565.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-9841(2011)04-0589-07

## Effects of Flooding on Growth and Yield of Soybean

HAN Liang-liang, ZHOU Qin, CHEN Wei-ping, TIAN Yi-dan, XING Xing-hua, XING Han, JIANG Hai-dong

(Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology in Southern China, Nanjing Agricultural University, National Center for Soybean Improvement, Nanjing 210095, Jiangsu, China)

**Abstract:** Effects of flooding stress on growth and yield of soybean (*Glycine max* var. Nannong99-6) was studied by pot experiment. The results showed that flooding stress (water level up to cotyledon node of soybean) inhibited the growth of soybean. The main roots and lateral roots of soybean gradually decayed with prolonging of flooding time. Adventitious roots produced from the flooded part of stem, which helped soybean to adapt to flooding environmental conditions. Biomass, leaf area, photosynthetic rate ( $P_n$ ), and other photosynthetic parameters increased within 10 days after treatment, but decreased with the lasting of flooding stress time. Chlorophyll content decreased to the end of the experiment. While malonyldialdehyde (MDA) and hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) contents increased with prolonging of flooding time, and were significantly higher than those of control. As a result, pod number per plant and yield decreased. In sum, photosynthetic parameters, MDA and  $H_2O_2$  contents, etc., had no significant differences as compared with control within 10 days after treatment. It could be concluded that 10 d might be the critical time of flooding for this soybean cultivar.

**Key words:** Soybean; Flooding stress; Growth; Yield

近年来, 由于全球生态环境恶化, 极端性天气经常出现, 造成雨水分布不均, 干旱、洪涝等自然灾害频繁出现<sup>[1]</sup>。涝渍造成植株根际缺氧, 导致根系对水分和养分的吸收能力降低, 影响根系生长<sup>[2]</sup>, 产生大量的乙烯、氧自由基等有害物质<sup>[3-5]</sup>, 诱导气生根的形成<sup>[6-10]</sup>。同时, 淹水导致土壤中  $CO_2$  浓度增加<sup>[11]</sup>, 影响了植株的生物量<sup>[12]</sup> 和根系的扩展<sup>[13]</sup>。随胁迫时间延长, MDA 含量呈上升趋势, 根系腐烂变黑<sup>[14-16]</sup>, 根系的吸收功能减弱, 叶片枯黄脱落, 光合作用下降<sup>[17-19]</sup>, 最终导致生物量和产量

的降低<sup>[20]</sup>。涝渍对作物的影响是国内抗性领域研究中较薄弱的环节<sup>[21]</sup>。大豆是我国最重要的油料作物, 在我国各地都有栽培, 南方大豆其主要生育期往往处于多雨的季节, 容易遭受淹水的危害。涝渍常常导致大豆产量和品质的降低, 涝渍严重的大豆减产高达 90% 以上。大豆对水分的反应比较敏感, 淹水对大豆生长和光合特性的影响报道较少, 该试验以大豆为材料, 人工模拟淹水胁迫环境, 研究了不同淹水时间对大豆光合特性及产量的影响, 旨在为大豆抗涝栽培提供理论依据。

收稿日期: 2011-05-12

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点资助项目(2009BADA8B02)。

第一作者简介: 韩亮亮(1985-), 女, 在读硕士, 研究方向为作物逆境生理。E-mail: 2008101058@njau.edu.cn。

通讯作者: 江海东(1968-), 男, 副教授, 主要从事作物生理生态研究。E-mail: hdjiang@njau.edu.cn。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于2010年6月在南京农业大学牌楼试验站进行,供试大豆品种为南农99-6(*Glycine max* var. Nannong99-6),由南京农业大学国家大豆改良中心提供。采用盆栽的方法,将大豆种子播于内径25 cm,高15 cm的塑料盆中,每盆6粒。试验用土壤N、P、K施肥量分别是0.05、0.25、0.15 g·kg<sup>-1</sup>,

于三叶期定苗,每盆留苗3株。于五叶期取长势一致的大豆幼苗进行淹水处理(水面淹至大豆子叶节部位),以正常管理的大豆植株作为对照,每个处理3次重复。分别于处理的0、5、10、20、30、40、60、80 d的上午取样测定各项指标,每次取样分析测定的同时,取出3盆停止淹水处理,正常管理至收获,用于后期测产。试验期间记录的最高、最低温度如图1所示(图中所标均为测定日期的最高、最低温度,两条竖线为测定开始日期与结束日期)。

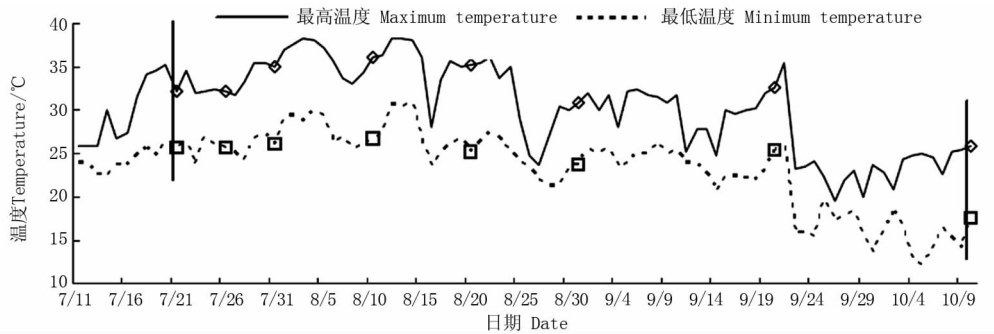


图1 试验期间的最高温度和最低温度

Fig. 1 Maximum and minimum temperature of experimental duration

### 1.2 测定项目与方法

生物量测定:每处理选取3株大小一致的植株,按根、茎、叶分样,称鲜质量后105℃杀青30 min,80℃烘干至恒重后称干物质量。茎粗测定:每处理选取3株大小一致的植株,用游标卡尺测定大豆子叶节处的直径。叶面积测定:用LI-3100(Li-Cor Inc,美国)叶面积仪进行测定。

色素含量的测定参照李合生<sup>[22]</sup>的方法,光合参数采用Li-6400(Li-Cor Inc,美国)便携式光合作用测定系统测定。选择晴天上午测定顶部往下第二片完全展开叶的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $Tr$ )。

丙二醛含量测定采用赵世杰等<sup>[23]</sup>改进方法,过氧化氢含量的测定采用试剂盒(南京建成生物)

方法。

产量构成因素:在成熟期测定单株荚数、每荚粒数和百粒重。

### 1.3 数据分析

采用Excel 2003软件处理试验数据,采用DPS软件的LSD法对试验数据进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 淹水对大豆生物量和形态指标的影响

2.1.1 根系形态 在淹水条件下,大豆的主根和侧根随淹水时间延长逐渐腐烂,而在茎淹水部分逐渐产生大量不定根。淹水处理的第5天时茎淹水部分皮孔膨大(A1)、茎部变粗、表皮开裂(A2),之后膨



A、B、C、D 分别为淹水后5、10、30、40 d。

A, B, C, D represent 5, 10, 30 and 40 days after flooding, respectively.

图2 淹水对不定根的影响

Fig. 2 Effects of flooding on adventitious root

大的皮孔处开始长出不定根。随着淹水时间的延长,不定根逐渐长长,数量逐渐增多。这些不定根漂浮在水面上,为根系的生长提供氧气,为大豆适应淹水环境提供条件。

**2.1.2 生物量** 由图3可以看出,对照处理根、茎和叶干重均随生育进程推进逐渐上升,根和茎在处理60 d达到最大值,此后变化平缓。淹水处理的根和叶干重在处理前期(0~10 d)逐渐上升,其中叶片干重在5、10 d时分别较对照增加了43.04%、5.1%,但随淹水时间延长,根和叶干重逐渐下降,并

明显低于对照,在80 d时对照处理的根、叶干重分别是淹水处理的11.19倍和6.38倍。与根、叶变化规律不同,随淹水时间延长茎干重仍不断增加,直到处理后60 d才开始下降。在处理前期(0~30 d)淹水处理茎干重和对照处理接近,处理40 d时二者才出现较大差异。

对照处理的总生物量随时间呈上升趋势,淹水植株的生物量前期略有上升,在处理5、10 d时分别较对照增加了24.21%、2.44%,此后增长几乎停滞,与对照差异逐渐增大。

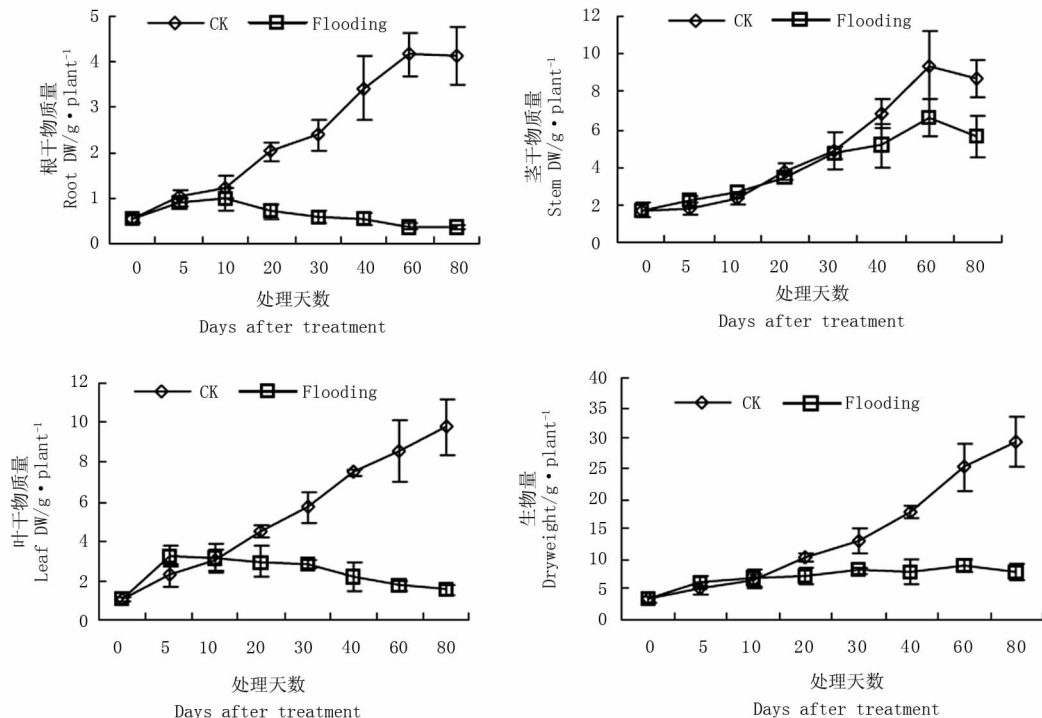


图3 淹水对大豆生物量的影响

Fig. 3 Effects of flooding on biomass of soybean

**2.1.3 茎粗和叶面积** 由图4可知,对照处理的叶面积随时间延长先呈上升趋势,处理后40 d保持稳定。淹水处理的叶面积随时间呈先上升后下降的趋势,在处理10 d叶面积达到最大。淹水处理的叶面积在处理0~10 d与对照接近,10 d以后随

时间延长与对照之间的差异逐渐增大,在20、30、40 d时分别较对照减少了37.91%、50.23%、70.14%,与对照之间的差异达到显著水平。对照处理的茎粗随生育进程呈上升趋势,淹水处理大豆的茎粗在前期(0~10 d)与对照接近,在处理10 d时茎

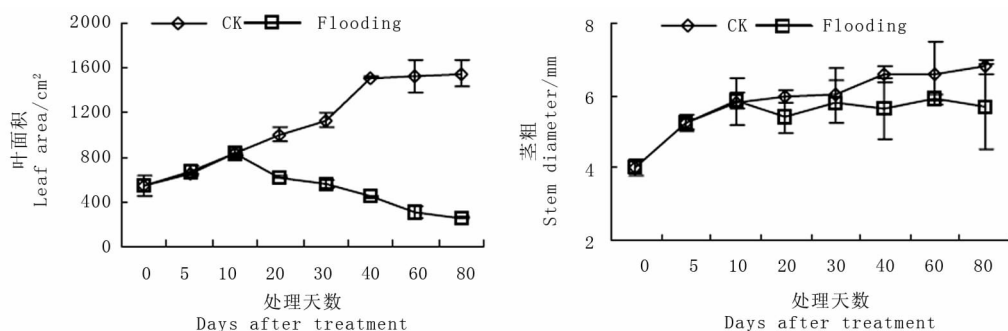


图4 淹水对大豆叶面积和茎粗的影响

Fig. 4 Effects of flooding on leaf area and stem diameter of soybean

粗达到最大值,此后总体低于对照处理,在不同取样时间略有波动。

## 2.2 淹水对大豆叶片中色素含量的影响

如图 5 所示,对照处理的叶绿素含量和类胡萝卜素含量总体下降,但在不同取样时间有一定的波动,可能是由于气温的冷、热变化引起的。淹水处理

理的叶绿素含量和类胡萝卜素含量也随淹水时间延长不断下降,且下降幅度远超过对照,可见淹水导致叶片发黄,功能下降。

## 2.3 淹水对大豆叶片光合参数的影响

由图 6 可以看出,对照处理的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率随生育进程推进呈先上升后下降的

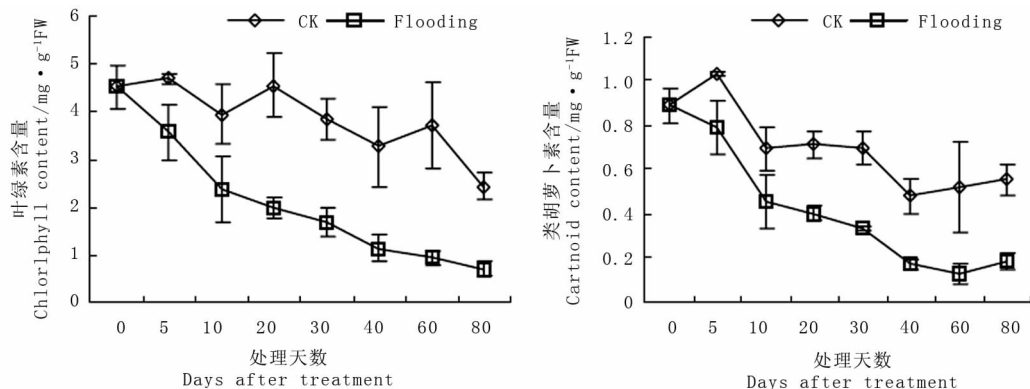


图 5 淹水对大豆叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

Fig. 5 Effects of flooding on chlorophyll and carotenoid contents of soybean

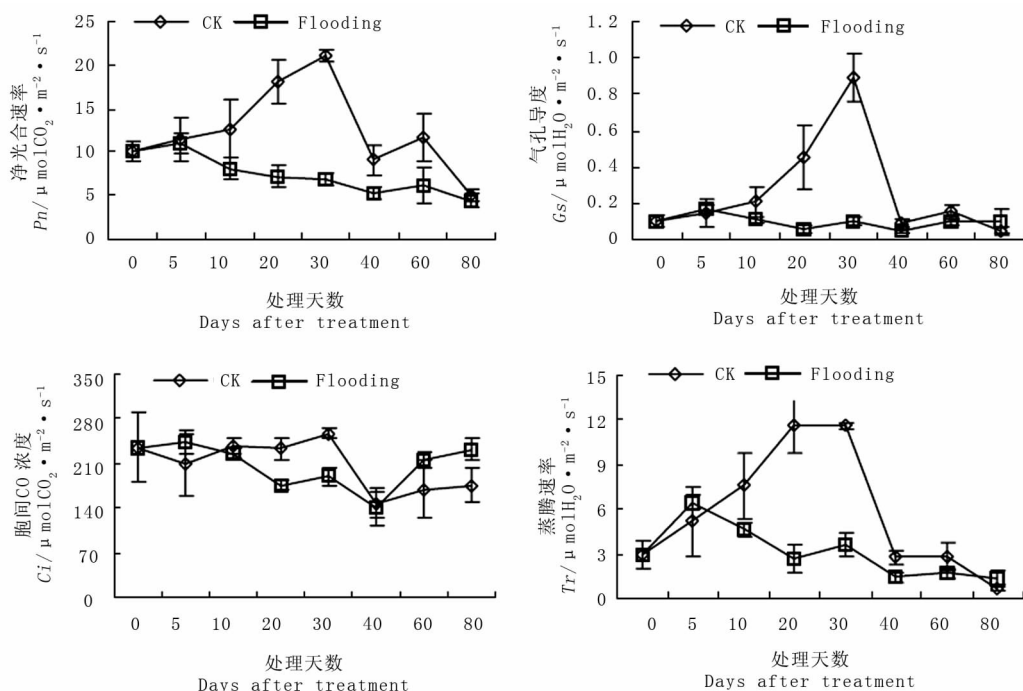


图 6 淹水对大豆净光合速率、气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度和蒸腾速率的影响

Fig. 6 Effects of flooding on  $P_n$ ,  $G_s$ ,  $C_i$  and  $Tr$  of soybean

趋势,净光合速率和气孔导度在处理 30 d 时达到最大值,分别是淹水处理的 3.07 倍、8.84 倍;蒸腾速率在处理 20 ~ 30 d 维持较高水平,是淹水处理的 4.28 倍、3.21 倍,此后逐渐降低。淹水处理的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $Tr$  仅在淹水处理前期 (0 ~ 5 d) 与对照接近,此后随淹水时间延长呈现下降趋势,与对照差距增大,淹水处理后期又与对照接近。

与  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $Tr$  变化不同,胞间  $\text{CO}_2$  浓度变化较为平缓,对照处理随时间呈先上升后下降的趋势,在

30 d 时达到最大值,40 d 时下降,与淹水处理接近,随后上升平缓。淹水处理的胞间  $\text{CO}_2$  浓度随淹水时间延长呈先下降后上升的趋势,在淹水 40 d 时达到最小值,随后又逐渐上升。

## 2.4 淹水对大豆叶片中丙二醛含量和过氧化氢含量的影响

由图 7 可知,淹水胁迫下,膜脂过氧化终产物 MDA 在大豆叶片内逐渐积累。在淹水处理初期,淹水植株的 MDA 含量略高于对照,但与对照无显著

差异;随处理时间延长,进行淹水处理大豆植株的MDA 含量与对照之间的差异逐渐增大,在处理 40 d 时淹水处理较对照上升了 93. 23%,此时与对照之间差异达到最大。

进行淹水处理后,植株叶片内积累了较多的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,从而使淹水处理的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量高于对照,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

含量随处理时间延长呈现上升趋势。在处理 5 d 时淹水处理的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量略高于对照,从 10 d 开始淹水处理的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量显著高于对照处理,此后随淹水处理时间的延长,淹水植株的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量与对照之间的差异逐渐加大。

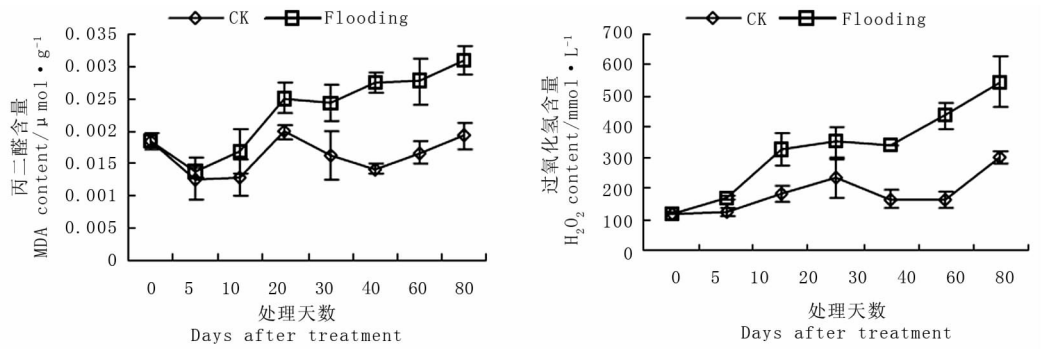


图7 淹水对大豆丙二醛和过氧化氢含量的影响

Fig. 7 Effects of flooding on MDA and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> contents of soybean

2.5 淹水对大豆产量及产量构成因素的影响

淹水形成低氧的根际环境,抑制了大豆主、侧根的正常生长,且淹水时间越长,主、侧根受损越严重。在淹水条件下,由于一定量的不定根的存在,能维持生命,但淹水处理停止后,不定根短时间内死亡,而主根侧根由于长期淹水已经腐烂死亡,失去吸收功能,因此淹水 60 d 和 80 d 的处理缺少测产数据(表 1)。

淹水 0~40 d,淹水处理的单株荚数和单株经济产量随胁迫时间延长呈降低趋势。淹水 5、10 d 的

处理与对照之间差异不显著,淹水 20、30、40 d 的处理其单株荚数和产量显著低于对照,分别较对照下降了 50.00%、75.94%、80.56% 和 44.90%、74.58%、83.12%。每荚粒数随处理时间延长呈先上升再下降的趋势,在淹水 20 d 时达到最大,较对照上升了 14.62%,但差异不显著,淹水 40 d 的处理则显著下降。百粒重也随时间延长呈先上升再下降趋势,淹水 30 d 时百粒重达到最大值,较对照上升了 26.06%,但各处理间的百粒重差异不显著。这可能是因为荚数下降较多,库小因而粒数和粒重略有增加。

表 1 淹水对大豆产量及产量构成因素的影响

Table 1 Effects of flooding on yield and yield components of soybean

处理天数	单株荚数	每荚粒数	百粒重	单株产量
Days after treatment/d	Pods number per plant	Seeds number per pod	100-seed weight/g	Yield per plant/g
CK	18.0a	2.1ab	13.93a	5.39a
5	16.9a	2.1ab	14.42a	5.00ab
10	12.3ab	2.1ab	17.20a	4.44ab
20	9.0bc	2.4a	16.13a	2.97bc
30	4.3c	1.9ab	17.56a	1.37c
40	3.5c	1.8b	15.23a	0.91c
60	—	—	—	—
80	—	—	—	—

不同小写字母表示同列不同处理差异显著(P<0.05),—表示没有数据。  
Different small letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level,— means no data.

3 结论与讨论

植物为适应淹水环境,形态上发生了明显变化。淹水会造成土壤缺氧,缺氧是涝害发生的重要原因,植物通过形成发达的通气组织来缓解缺氧伤害<sup>[24]</sup>。该研究结果显示,淹水处理一定时期后,大豆茎基部皮孔增生,产生大量不定根。在一定时间

内随着淹水时间延长,不定根逐渐增加,因此在淹水环境下能够维持生命。淹水时间超过 40 d 后,如果解除淹水胁迫,不定根死亡,而主、侧根由于长期淹水,生长衰退,功能下降,从而导致植株死亡。  
水分胁迫往往会造成植物根际环境的低氧,而植物在根系低氧胁迫下会发生一系列的生理生化反应。随淹水时间延长,有毒物质在植株体内不断

积累,导致大豆主、侧根变黑腐烂。植株氧化胁迫加剧, $H_2O_2$ 和MDA含量上升,这与蔡金峰等<sup>[25]</sup>对喜树幼苗的研究结果一致。

在淹水条件下,根吸收水分能力大大降低,从而导致植物生理性缺水而使气孔关闭<sup>[26]</sup>,因此该试验中,淹水处理植株气孔导度显著下降,从而减少了蒸腾和 $CO_2$ 吸收,进而使得胞间 $CO_2$ 浓度下降。同时淹水影响了光合色素含量,导致净光合速率下降,显著低于对照,这与曹福亮等<sup>[27]</sup>、曹晶等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。可见淹水明显降低大豆光合性能,而叶面积的减少还降低了光合面积,导致有机物质合成减少,从而使得淹水处理大豆各器官生物量明显低于对照处理,尤其是根系和叶片。

淹水胁迫导致MDA和 $H_2O_2$ 含量显著增加,影响了光合色素含量和光合参数,引起生物量下降,进而影响到大豆的器官发育,降低了大豆单株荚数,长期淹水还降低每荚粒数,从而降低最终产量。但百粒重由于单株总粒数的下降而呈增加趋势。

在淹水处理初期(0~10 d)植株的各生理指标与对照之间的差异不显著,随着淹水时间延长,差异逐渐增大,经济产量随淹水时间延长呈下降趋势,但淹水5、10 d植株的经济产量与对照之间无显著差异,其它各处理的产量均显著低于对照。因此可以推断10 d是大豆淹水胁迫的临界期。

综上所述,淹水胁迫抑制了大豆生长,但大豆通过形态和生理的适应性变化能够耐一定时期的淹水环境,短期淹水( $\leq 10$  d)不会对该大豆品种的生长和产量产生明显影响,但淹水时间过长,则器官生长、光合性能等显著下降,MDA和 $H_2O_2$ 含量增加,引起植株生物量和产量的降低,甚至死亡。

## 参考文献

- [1] 魏和平,利容千.淹水对玉米不定根形态结构和ATP酶活性的影响[J].植物生态学报,2000,24(3):293-297. (Wei H P, Li R Q. Effect of flooding on morphology, structure and ATPase activity in adventitious root apical cells of maize seedlings[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(3): 293-297. )
- [2] Shimamura S, Mochizuki T, Nada Y, et al. Formation and function of secondary aerenchyma in hypocotyl, roots and nodules of soybean (*Glycine max*) under flooded conditions[J]. Plant and Soil, 2003, 251: 351-359.
- [3] Black T J, Reid D M. Ethylene, water relations and tolerance to waterlogging of three *Eucalyptus* species[J]. Australian Journal of Plant Physiology. 1981, 8(6): 497-505.
- [4] Tang Z C, Kozlowski T T. Water relations, ethylene production, and morphological adaptation of *Fraxinus pennsylvanica* seedlings to flooding[J]. Plant and Soil, 1984, 77(2-3): 183-192.
- [5] Tang Z C, Kozlowski T T. Ethylene production and morphological adaptation of woody plants to flooding[J]. Canadian Journal of Botany, 1984, 62(8): 1659-1664.
- [6] Huang B, Johnson J W, Box J E, et al. Root characteristics and hormone activity of wheat in response to hypoxia and ethylene[J]. Crop Science, 1997, 37: 812-818.
- [7] Drew M C, Jackson M B, Giffard S. Ethylene-promoted adventitious rooting and development of cortical air spaces (aerenchyma) in roots may be adaptive responses to flooding in *Zea mays* L. [J]. Planta, 1979, 147: 83-88.
- [8] Drew M C, Jackson M B, Giffard S C, et al. Inhibition by silver ions of gas space (aerenchyma) formation in adventitious roots of *Zea mays* L. subjected to exogenous ethylene or to oxygen deficiency [J]. Planta, 1981, 153: 217-224.
- [9] Gunawardena A H L A N, Pearce D M, Jackson M B, et al. Characterisation of programmed cell death during aerenchyma formation induced by ethylene or hypoxia in roots of maize (*Zea mays* L. ) [J]. Planta, 2001, 212: 205-214.
- [10] Bacanamwo M, Purcell L C. Soybean root morphological and anatomical traits associated with acclimation to flooding[J]. Crop Science, 1999, 39: 143-149.
- [11] Jackson M B. Rapid injury to peas by soil waterlogging[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1979, 30(2): 143-152.
- [12] Boru G, VanToai T T, Alves J D. Flooding injuries in soybean are caused by elevated carbon dioxide levels in the root zone[M]. Ohio: In Proceedings of the Fifth National Symposium on Stand Establishment, 1997: 205-209.
- [13] Grable A, Danielson R E. Effect of carbon dioxide, oxygen, and soil moisture suction on germination of corn and soybeans[J]. Soil Science Society of America Journal, 1964, 29(1): 12-18.
- [14] 刘华山, 孟凡庭, 杨青华, 等. 土壤渍涝对芝麻根系生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 植物生理学通讯, 2005, 41(1): 45-47. (Liu H S, Meng F T, Yang Q H, et al. Effect of waterlogging on the growth and anti-oxidative enzyme activity of sesame root system [J]. Plant Physiology Communications, 2005, 41(1): 45-47. )
- [15] 张志远, 郭巧生, 邵青松. 淹水胁迫对药用菊花苗期生理生化指标的影响[J]. 中国中药杂志, 2009, 34(18): 2285-2289. (Zhang Z Y, Guo Q S, Shao Q S. Effects of waterlogging stress on physiological and biochemical characteristics of medicinal *Chrysanthemum morifolium* during seedling stage [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2009, 34(18): 2285-2289. )
- [16] 李金才, 魏凤珍, 王成雨, 等. 孕穗期土壤渍水逆境对冬小麦根系衰老的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(9): 1355-1360. (Li J C, Wei F Z, Wang C Y, et al. Effects of waterlogging on senescence of root system at booting stage in winter wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(9): 1355-1360. )
- [17] 衣英华, 樊大勇, 谢宗强, 等. 模拟淹水对枫杨和栓皮栎气体交换、叶绿素荧光和水势的影响[J]. 植物生态学报, 2006, 30(6): 960-968. (Yi Y H, Fan D Y, Xie Z Q, et al. Effects of waterlogging on the gas exchange, chlorophyll fluorescence and water potential of *Quercus variabilis* and *Pterocarya stanoptera* [J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(6): 960-968. )
- [18] Wagner P A, Dreyer E. Interactive effects of waterlogging and irradiance on the photosynthetic performance of seedlings from three oak species displaying different sensitivities (*Quercus robur*, *Q. petraea* and *Q. rubra*) [J]. Annales of Forest Science, 1997, 54

- (5):409-429.
- [19] Smith M, Moss J S. An experimental investigation, using stomatal conductance and florescence, of the flood sensitivity of *Boltonia decurrens* and its competitors[J]. Journal of Applied Ecology, 1998, 35(4):553-561.
- [20] 宋丰萍,胡立勇,周广生,等. 渍水时间对油菜生长及产量的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(1):170-176. (Song F P, Hu L Y, Zhou G S, et al. Effects of waterlogging time on rapeseed (*Brassica napus* L.) growth and yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(1):170-176.)
- [21] 倪君蒂,李振国. 淹水对大豆生长的影响[J]. 大豆科学, 2000, 19(1):42-48. (Ni J D, Li Z G. Effect of flooding on growth of soybean seedlings[J]. Soybean Science, 2000, 19(1):42-48.)
- [22] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:134-137. (Li H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000:134-137.)
- [23] 赵世杰,许长成,邹琦,等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯, 1994, 30(3):207-210. (Zhao S J, Xu C C, Zou Q, et al. Improvements of method for measurement of malonyldialdehyde in plant tissues[J]. Plant Physiology Communications, 1994, 30(3):207-210.)
- [24] 樊明寿,张锁福. 植物通气组织的形成过程和生理生态学意义[J]. 植物生理学通讯, 2002, 38(6):615-618. (Fan M S, Zhang S F. Aerenchyma formation in plant and its physiological and ecological significance[J]. Plant Physiology Communications, 2002, 38(6):615-618.)
- [25] 蔡金峰,曹福亮,汪贵斌. 淹水胁迫对喜树幼苗 LDH 及保护酶的影响[J]. 福建林学院学报, 2008, 28(1):65-68. (Cai J F, Cao F L, Wang G B. Effects of waterlogging on LDH and protective enzyme in *Camptotheca acuminata* seedling[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2008, 28(1):65-68.)
- [26] 刘瑞仙,靖元孝,肖林,等. 淹水深度对互叶白千层幼苗气体交换、叶绿素荧光和生长的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(19):5113-5120. (Liu R X, Jing Y X, Xiao L, et al. Effects of flooding depth on gas exchange, chlorophyll fluorescence and growth of *Melaleuca alternifolia* seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(19):5113-5120.)
- [27] 曹福亮,蔡金峰,汪贵斌,等. 淹水胁迫对乌桕生长及光合作用的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(10):57-61. (Cao F L, Cai J F, Wang G B, et al. Effects of waterlogging stress on the growth and photosynthesis of *Sapium sebiferum* [J]. Scientia Sylvae Sinicae, 2010, 46(10):57-61.)
- [28] 曹晶,姜卫兵,翁忙玲,等. 夏秋季旱涝胁迫对红叶石楠光合特性的影响[J]. 园艺学报, 2007, 43(1):163-172. (Cao J, Jiang W B, Weng M L, et al. Effects of drought and flooding stress on photosynthetic characteristics of *Photinia fraseri* in summer and autumn[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2007, 43(1):163-172.)

(上接第 588 页)

- [9] Cui Z L, Thomas E, Carter J, Burton J W. Genetic base of 651 Chinese soybean cultivars released during 1923 to 1995[J]. Crop Science, 2000, 40:1470-1480.
- [10] 赵团结,盖钧铭,李海旺. 超高产大豆育种研究的进展与讨论[J]. 中国农业科学, 2006, 39(1):29-37. (Zhao T J, Gai J Y, Li H W. Advances in breeding for super high-yielding soybean cultivars[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(1):29-37.)
- [11] Frederick J R, Woolley J T, Hesketh J D, Peters D B. Seed yield and agronomic traits of old and modern soybean cultivars under irrigation and soil water-deficit[J]. Field Crops Research, 1991, 27:71-82.
- [12] Luedders V D. Genetic improvement in yield of soybeans[J]. Crop Science, 1977, 17:971-972.
- [13] Morrison M J, Voldeng H D, Cober E R. Physiological changes from 58 years of genetic improvement of short season soybean cultivars in Canada[J]. Agronomy Journal, 1999, 91:685-689.
- [14] Jones B P, Holshouser D L, Marcus M A, et al. Double-crop soybean leaf area and yield responses to mid-Atlantic soil and cropping systems[J]. Agronomy Journal, 2003, 95:436-445.
- [15] 杨秀红,吴宗璞,张国栋. 不同年代大豆品种根系性状演化的研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(3):292-295. (Yang X H, Wu Z P, Zhang G D. Evolution of root characters of soybean varieties of different ages[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2001, 34(3):292-295)
- [16] Specht J E, Hume D J, Kumudini S V. Soybean yield potential: A genetic and physiological perspective[J]. Crop Science, 1999, 39:1560-1570.
- [17] Buttery B R. Some differences between soybean cultivars observed by growth analysis[J]. Canadian Journal Plant Science, 1972, 52:13-20.
- [18] Wilcox J R, Schapaugh W T, Bernard R L. Genetic improvement of soybeans in the Midwest[J]. Crop Science, 1979, 19:803-805.
- [19] Ustun A, Allen F L, English B C. Genetic progress in soybean of the U. S. Midsouth[J]. Crop Science, 2001, 41:993-998.
- [20] 邱丽娟,王曙明. 中国大豆品种志(1993-2004)[M]. 北京:中国农业出版社, 2007. (Qiu L J, Wang S M. Soybean flora in China(1993-2004)[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 2007)
- [21] 张子金. 中国大豆品种志[M]. 北京:农业出版社, 1985. (Zhang Z J. Soybean flora in China[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1985)
- [22] 胡明祥,田佩占. 中国大豆品种志(1978-1992)[M]. 北京:农业出版社, 1995. (Hu M X, Tian P Z. Soybean flora in China(1978-1992)[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1995.)
- [23] 李卫东,张孟臣. 黄淮海夏大豆及品种参数[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2006:32-41. (Li W D, Zhang M C. The summer soybean and variety parameter[M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 2006:32-41)
- [24] 徐冉,张礼凤,王彩洁. 山东省审定大豆品种的产量、品质及株型演变[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(3):242-247. (Xu R, Zhang L F, Wang C J. Development of yield, quality and plant type of released and registered summer-sowing soybean varieties in Shandong province[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007, 29(3):242-247.)