

李 强,路雪梅. 干旱胁迫对紫丁香幼苗抗氧化系统的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(21):128-132.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.21.031

干旱胁迫对紫丁香幼苗抗氧化系统的影响

李 强,路雪梅

(东北林业大学园林学院,黑龙江哈尔滨 150040)

摘要:选用紫丁香(*Syringa oblata*)为试验材料,对紫丁香的实生苗进行4种处理:CK(土壤含水量为试验用土最大田间持水量的75%)、 W_1 (土壤含水量为试验用土最大田间持水量的60%)、 W_2 (土壤含水量为试验用土最大田间持水量的45%)、 W_3 (土壤含水量为试验用土最大田间持水量的30%),研究紫丁香抗氧化系统对不同程度土壤干旱胁迫的响应。结果表明,随着土壤胁迫时间的延长和干旱胁迫程度的加剧,紫丁香的质膜相对透性以及丙二醛(MDA)、过氧化氢(H_2O_2)含量均呈上升趋势。在 W_1 处理下,紫丁香超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)、谷胱甘肽还原酶(GR)活性均整体呈上升趋势,并提高了还原型抗坏血酸(AsA)和还原型谷胱甘肽(GSH)的含量;而在 W_2 、 W_3 处理下,随着干旱胁迫时间的延长,紫丁香的SOD、CAT、POD、APX、GR活性以及AsA、GSH含量均呈现先上升后下降的趋势。表明紫丁香可以在一定程度上有效地抵御干旱所造成的氧化胁迫,但随着胁迫程度的加强,其抵御严重干旱的能力会严重下降。

关键词:紫丁香;干旱胁迫;抗氧化系统;抗坏血酸;谷胱甘肽

中图分类号:S685.260.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)21-0128-04

水分是限制植物生长和分布的重要环境因子,随着全球气候的暖化,植物生长发育对干旱胁迫的响应和适应受到了越来越多的关注^[1]。干旱胁迫诱导植物体内发生各种生理生化反应,造成活性氧的代谢失衡,引起细胞膜脂过氧化,导致生物膜受损,破坏蛋白质、核酸等的分子结构,从而对植物产生毒害^[2-3];而增强抗氧化系统是植物体适应干旱胁迫的重要机制^[4-5]。抗氧化酶、抗坏血酸和谷胱甘肽是植物抗氧化系统的重要组成部分^[5],因此研究干旱胁迫对紫丁香(*Syringa oblata*)抗氧化系统的影响,对揭示紫丁香的抗旱能力和机制具有重要意义。

紫丁香是我国重要的城市园林绿化植物,具有广泛的应用价值。水资源匮乏是我国城市发展所面临的主要问题之一,在缺水地区紫丁香的栽培应用受到了极大限制^[6]。因此研究干旱胁迫下紫丁香抗氧化系统中主要抗氧化酶和抗氧化物的变化规律,了解紫丁香的抗旱性,促进紫丁香在干旱及半干旱地区的推广应用,提高紫丁香在生态恢复和城市园林绿化等方面的应用价值,可为合理应用紫丁香提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

紫丁香的种子于2015年在哈尔滨市第二苗圃内采收。盆钵规格为51 cm×38 cm×35 cm(上径×下径×高),盆中装入10.3 kg试验用土。试验所用土壤为黑色泥炭土,购自哈尔滨市和平园林绿化公司,经消毒和过筛处理。试验用土

pH值为7.6,有机质含量为145 g/kg,全氮含量为5.6 g/kg,全磷含量为12.3 g/kg,全钾含量为32.8 g/kg。试验前测得试验用土的最大田间持水量为46.7%。

1.2 试验设计

于2015年6月在东北林业大学苗圃内播种,于同年9月移入温室内。2016年5月15日,选择生长发育良好的紫丁香幼苗栽入盆内,每盆内移入1株幼苗,进行正常养护,每处理移植25盆。待移植的紫丁香恢复正常生长后,于2016年7月5日开始控水,试验共设4组处理,分别为对照(CK,土壤水分含量为试验用土最大田间持水量的75%)、轻度干旱胁迫(W_1 ,土壤水分含量为试验用土最大田间持水量的60%)、中度干旱胁迫(W_2 ,土壤水分含量为试验用土最大田间持水量的45%)、重度干旱胁迫(W_3 ,土壤水分含量为试验用土最大田间持水量的30%)。架设防雨棚以防止自然降水对土壤水分的影响,于每日16:00用电子天平称质量,从而控制土壤含水量。7月10日各处理的土壤含水量达到标准,分别于该日之后5、10、15、20 d时取植株中上部叶片测定各项指标。

1.3 测定方法

细胞质膜相对透性和丙二醛(MDA)含量采用孔祥生等的方法^[7]测定;过氧化氢(H_2O_2)含量采用Jiang等的方法^[8]测定;超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性采用王学奎的方法^[9]测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用李合生的方法^[10]测定;谷胱甘肽还原酶(GR)活性采用单长卷等的方法^[5]测定;还原型抗坏血酸(AsA)含量采用Hodges的方法^[11]测定;还原型谷胱甘肽(GSH)含量采用Griffith的方法^[12]测定。

1.4 数据处理

对采集的数据采用SPSS 19.0进行统计分析。采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和最小显著性差异法(LSD)检验不同土壤干旱胁迫处理间的差异显著性。

收稿日期:2018-01-13

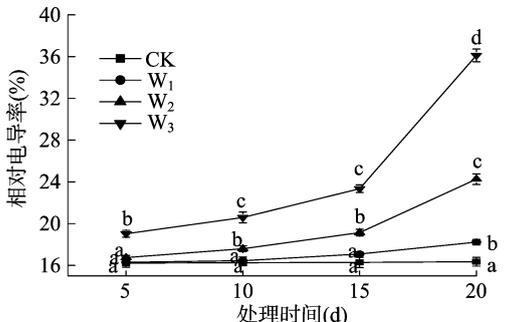
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(编号:257214BA21)。

作者简介:李 强(1979—),男,四川丰都人,博士,讲师,研究方向为园林植物的栽培养护和抗性育种。Tel:(0451)82191367;E-mail:liqiang210041@163.com。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对紫丁香细胞质膜相对透性的影响

质膜的相对透性常用相对电导率表示,电导率越高表示细胞膜伤害程度越重。如图1所示,在轻度干旱胁迫下,紫丁香的相对电导率在胁迫20 d时与CK相比显著上升($P < 0.05$),其余处理时间差异不显著。在中度干旱胁迫10~20 d时,紫丁香的相对电导率与对照处理间差异显著($P < 0.05$)。在重度干旱胁迫下,紫丁香的相对电导率在整个胁迫过程中始终与对照处理间差异显著($P < 0.05$),同时也显著高于轻度、中度干旱胁迫处理($P < 0.05$),胁迫20 d时相对电导率已经达到对照处理的2.2倍。



不同小写字母表示不同干旱处理在相同处理时间差异显著($P < 0.05$)。下同

图1 干旱胁迫对紫丁香叶片相对电导率的影响

2.2 干旱胁迫对紫丁香丙二醛、过氧化氢含量的影响

如图2、图3所示,在干旱胁迫下,紫丁香的MDA、 H_2O_2 含量随着胁迫时间的延长和胁迫程度的加剧而不断上升。在轻度干旱胁迫10~20 d时,MDA含量与对照处理间差异显著($P < 0.05$);在轻度干旱胁迫15~20 d时, H_2O_2 含量与对照处理间差异显著($P < 0.05$)。在中度、重度干旱胁迫下,紫丁香的 H_2O_2 、MDA含量在胁迫过程中始终显著高于对照处理和轻度干旱胁迫处理($P < 0.05$)。

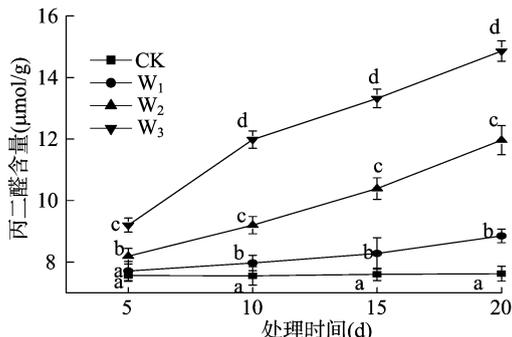


图2 干旱胁迫对紫丁香丙二醛含量的影响

2.3 干旱胁迫对紫丁香抗氧化酶活性的影响

如图4-A所示,在轻度干旱胁迫下,随着胁迫时间的延长,紫丁香SOD活性呈上升趋势,在胁迫处理10~20 d时,与对照处理间差异显著($P < 0.05$)。在中度、重度干旱胁迫下,SOD活性先上升后下降,在中度干旱胁迫下,SOD活性在胁迫15 d后开始下降,但始终显著高于对照处理($P < 0.05$);在重度干旱胁迫下,SOD活性在胁迫处理10 d时达到最高值,为 $102.5 U / (\min \cdot g)$,此后开始迅速下降,在胁迫20 d时SOD

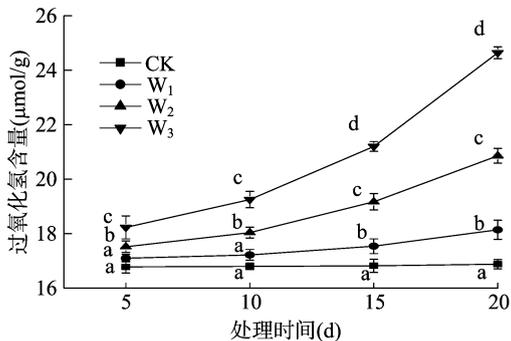


图3 干旱胁迫对紫丁香过氧化氢含量的影响

活性仍显著高于对照处理($P < 0.05$),但显著低于轻度、中度干旱胁迫处理($P < 0.05$)。

如图4-B所示,紫丁香的CAT活性在轻度干旱胁迫下始终保持上升趋势,且与对照处理间差异显著($P < 0.05$)。在中度干旱胁迫下,CAT活性先上升后下降,在处理15~20 d时高于其他各组处理($P < 0.05$)。在重度干旱胁迫下,CAT活性在处理10 d时达到最高,随后迅速下降,在胁迫20 d时显著低于轻度、中度干旱胁迫处理($P < 0.05$),但仍显著高于对照处理($P < 0.05$)。

如图4-C所示,在轻度干旱胁迫下,紫丁香的POD活性呈现上升趋势,在处理15~20 d时与对照处理间差异显著($P < 0.05$)。在中度干旱胁迫下,POD活性先上升后下降,在处理15 d时达到最高,POD活性始终显著高于对照处理与轻度干旱胁迫处理($P < 0.05$)。在重度干旱胁迫下,在处理5~10 d时,POD活性显著高于其他各组处理($P < 0.05$);在处理15 d时,POD活性仍显著高于对照处理和轻度干旱胁迫处理($P < 0.05$),但低于中度干旱胁迫处理;在处理20 d时,POD活性仍显著高于对照处理($P < 0.05$),低于中度干旱胁迫处理,且差异显著($P < 0.05$)。

2.4 干旱胁迫对紫丁香抗坏血酸过氧化物酶、谷胱甘肽还原酶活性的影响

如图5-A所示,在轻度干旱胁迫下,紫丁香APX活性在胁迫5~20 d内始终保持上升趋势,在胁迫10~20 d与对照处理差异显著($P < 0.05$)。在中度干旱胁迫下,APX活性在胁迫5~15 d呈逐渐上升趋势,在胁迫5~20 d内,APX活性均显著高于对照处理和轻度干旱胁迫处理($P < 0.05$)。在重度干旱胁迫下,APX活性在胁迫5~10 d时,显著高于其余各组处理($P < 0.05$);此后,随着胁迫时间的延长,紫丁香APX活性开始下降,在胁迫15 d时,紫丁香的APX活性已比胁迫10 d时下降6.4%,但仍与轻度干旱胁迫处理和对照处理间差异显著($P < 0.05$);在胁迫20 d时,APX活性进一步降低,已显著低于中度干旱胁迫处理($P < 0.05$),但仍显著高于对照处理($P < 0.05$)。

如图5-B所示,在轻度干旱胁迫下,紫丁香的GR活性于处理15~20 d时显著高于对照处理($P < 0.05$)。在中度干旱胁迫下,GR活性呈现先上升后下降的趋势,在胁迫15 d时达到最高;GR活性始终显著高于对照处理和轻度干旱胁迫处理($P < 0.05$);在处理15~20 d时显著高于重度干旱胁迫处理($P < 0.05$)。在重度干旱胁迫下,GR活性先上升后下降,但始终显著高于对照处理($P < 0.05$);在胁迫5~15 d时,

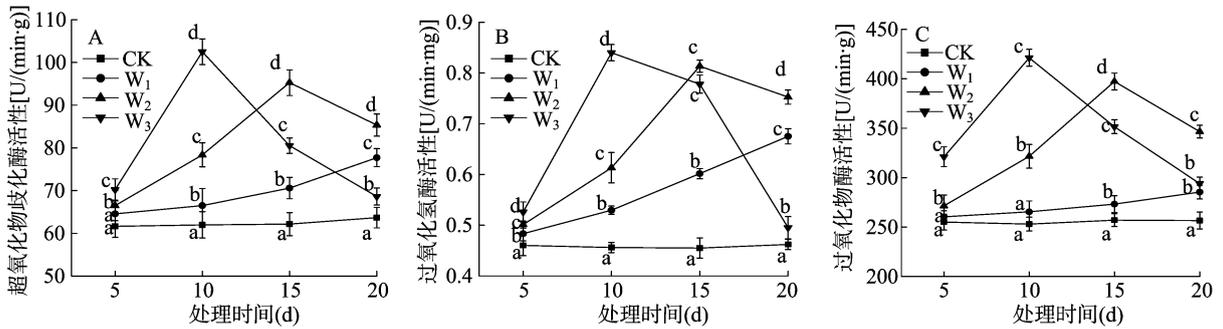


图4 干旱胁迫对紫丁香叶片SOD、CAT、POD活性的影响

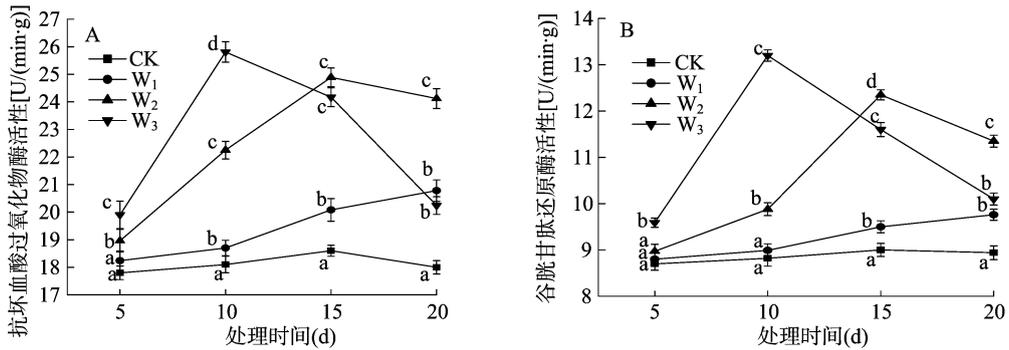


图5 干旱胁迫对紫丁香叶片 APX 和 GR 活性的影响

GR 活性显著高于轻度干旱胁迫处理 ($P < 0.05$),但在胁迫 20 d 时二者间已无显著差异;在胁迫 5~10 d 时,GR 活性随胁迫时间的延长而上升,且显著高于中度干旱胁迫处理 ($P < 0.05$);但胁迫 15~20 d 时,GR 活性迅速下降,且显著低于中度干旱胁迫处理 ($P < 0.05$)。

2.5 干旱胁迫对紫丁香还原型抗坏血酸、还原型谷胱甘肽含量的影响

如图 6 所示,在轻度干旱胁迫下,随着胁迫时间的延长紫丁香的 AsA、GSH 含量呈上升趋势,且随着胁迫时间的延长,AsA、GSH 含量上升的速度加快;在胁迫 15~20 d 时,AsA、GSH 含量均显著高于对照处理 ($P < 0.05$)。在中度干旱胁迫下,紫丁香叶片的 AsA、GSH 含量均呈现先上升后下降的趋

势;在胁迫 15 d 时,AsA、GSH 含量均达到最高值,且与其他各组处理间差异显著 ($P < 0.05$);在胁迫 20 d 时,AsA 含量显著高于对照处理与重度干旱胁迫处理 ($P < 0.05$),GSH 含量仍显著高于其他各组处理 ($P < 0.05$)。在重度干旱胁迫下,紫丁香的 AsA、GSH 含量在干旱胁迫 10 d 内呈上升趋势,随后开始迅速下降;在胁迫 10 d 时,AsA、GSH 含量显著高于其他各组处理 ($P < 0.05$);在胁迫 15~20 d 时,AsA 含量开始迅速下降,到胁迫 20 d 时,AsA 含量已显著低于其余各组处理 ($P < 0.05$);GSH 含量在胁迫 15 d 时,仍显著高于对照处理和轻度干旱胁迫处理 ($P < 0.05$),但显著低于中度干旱胁迫处理 ($P < 0.05$),在胁迫 20 d 时,仍显著高于对照处理 ($P < 0.05$),但显著低于其他 2 组胁迫处理 ($P < 0.05$)。

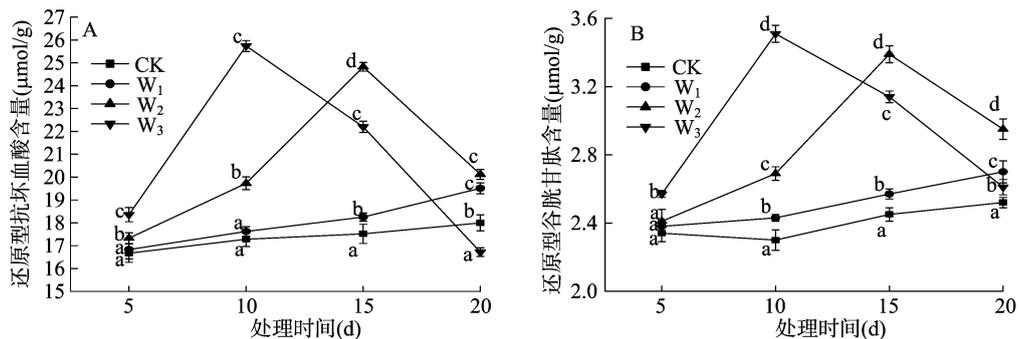


图6 干旱胁迫对紫丁香叶片 AsA、GSH 含量的影响

3 讨论与结论

在植物的生长发育过程中,干旱胁迫往往是最常见的逆境之一,植物会产生一系列的生理活动以响应和适应干旱胁迫^[13]。植物质膜相对透性是反映细胞膜结构和功能的重要指标,干旱胁迫下植物细胞质膜相对透性的增加往往是由细胞过氧化引起的^[14]。本研究中紫丁香质膜相对透性与干旱

胁迫的强度及胁迫时间长度整体呈正相关关系,表明高强度的干旱胁迫破坏了紫丁香细胞膜结构的完整性,造成质膜相对透性的增加,影响了细胞的代谢和功能,从而诱导紫丁香各器官发生不良反应。

植物体内活性氧的积累是干旱胁迫导致植物质膜损伤和质膜透性提高的根本原因^[15],因此干旱胁迫下植物细胞膜受损程度可以通过测量植物体内 MDA、H₂O₂ 含量进行衡量,质

膜过氧化程度越高,MDA、H₂O₂ 含量则越高^[16]。干旱胁迫下,植物体内的MDA、H₂O₂ 含量逐渐上升,但不同植物种类间存在差异,抗旱能力强的植物体内的这2种物质的增速较慢,增幅较小,而抗旱性弱的增加幅度较大^[17-20]。本研究在轻度干旱胁迫5 d时,紫丁香的MDA、H₂O₂ 含量均与对照处理差异不显著,而在胁迫10 d时,MDA、H₂O₂ 含量均上升,且MDA含量与对照处理间差异显著,说明此时干旱胁迫已对植物造成了一定程度的伤害;在中度、重度干旱胁迫下紫丁香损伤更严重,其体内的MDA、H₂O₂ 含量始终显著高于对照处理。

在干旱胁迫下,植物对体内活性氧的清除能力是衡量植物耐旱性的重要因素,抗氧化酶可以降低植物体内活性氧的累积,减缓氧化速度,有效抑制自由基氧化损伤^[21-22]。SOD、CAT和POD是植物细胞内重要的抗氧化保护酶,对缓解干旱胁迫下植物体内的过氧化损伤和保持细胞膜结构、功能的完整性有重要作用^[23]。干旱胁迫下,植物的抗旱能力与其体内的SOD、CAT、POD活性密切相关^[23-26],抗旱性强的植物可以维持较高SOD、CAT、POD活性以缓解干旱胁迫所造成的活性氧伤害^[27]。在一定时间和强度的干旱胁迫下植物SOD、CAT、POD活性会上升,而当胁迫时间和强度超过了植物的耐受范围则酶活性会下降^[27],这与本研究所获得的紫丁香的这3种抗氧化酶活性在不同强度干旱胁迫下的变化趋势基本一致。说明在长时间和高强度的干旱胁迫下植物的抗逆性下降,作为植物防御体系的抗氧化酶活性也随之下降。

还原型抗坏血酸(AsA)是植物体内含量最丰富的抗氧化剂之一,可以氧化还原过氧化氢,减少自由基的生成^[28-29]。APX对AsA的合成和循环代谢起重要作用,保持其代谢活性可以有效提高植物体内AsA含量,因此,APX是植物体内抗氧化酶类^[23,30]。本研究结果表明,通过提高还原型抗坏血酸的合成代谢活性,紫丁香幼苗在轻度干旱胁迫下可以有效地增强自身抗性,缓解胁迫伤害。但随着干旱胁迫程度的加剧,紫丁香的APX活性也迅速下降,并破坏了AsA的正常代谢,使其含量降低,这与马玉华等研究的苹果APX活性和AsA含量在不同强度干旱胁迫下的变化趋势^[31]相一致,进一步表明在中度、重度干旱胁迫下紫丁香抗逆性下降。

GSH是植物体内重要的抗氧化剂^[32],其功能是清除植物体内的H₂O₂,修复过氧化所致的细胞壁损伤,此外GSH对保持蛋白质或酶的活性以及细胞膜的完整性有积极作用^[33]。在植物体内,GR可以调控植物体内的GSH水平,并使细胞保持在还原状态,因此,在干旱胁迫响应中具有重要作用^[31]。本研究结果表明,在轻度干旱胁迫下紫丁香的GSH含量和GR活性均上升,但当胁迫强度加剧时,随着胁迫时间的延长GSH含量和GR活性先增加后降低。说明紫丁香幼苗只可以在一定强度和短时间内的干旱胁迫下,通过提高GR活性来增加GSH含量,从而提高紫丁香对干旱胁迫的耐受性,这与李州等研究的白三叶(*Trifolium repens*)叶片可通过提高GR活性和GSH含量来缓解其体内过氧化伤害的结果^[34]基本一致。

根据以上分析,紫丁香幼苗可以在一定时间内(20 d)有效地抵御轻度干旱胁迫(土壤水分含量为试验用土最大持水量的60%)所造成的氧化胁迫,但随着胁迫程度的加强其抗氧化系统抵御严重干旱的能力会严重下降。

参考文献:

- [1] Saini H S, Westgate M E. Reproductive development in grain crops during drought[J]. *Advances in Agronomy*, 1999, 68: 59-66.
- [2] 吴志华, 曾富华, 马生健, 等. 水分胁迫下植物活性氧代谢研究进展(综述 I)[J]. *亚热带植物科学*, 2004, 33(2): 77-80.
- [3] 李蒙. 生物源保鲜剂对樱桃番茄保鲜效果的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [4] 焦树英, 徐家林, 李红利, 等. 芒草对NaCl和PEG胁迫的生理响应及相关性分析[J]. *中国草地学报*, 2010, 32(5): 21-26.
- [5] 单长卷, 韩蕊莲, 梁宗锁. 黄土高原冰草叶片抗坏血酸和谷胱甘肽合成及循环代谢对干旱胁迫的生理响应[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(6): 653-662.
- [6] 李强, 王非, 何森, 等. 土壤水分胁迫对获光合生理特性的影响[J]. *草业科学*, 2013, 30(7): 1031-1035.
- [7] 孔祥生, 易现峰. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [8] Jiang M Y, Zhang J H. Water stress - induced abscisic acid accumulation triggers the increased generation of reactive oxygen species and up - regulates the activities of antioxidant enzymes in maize leaves[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(379): 2401-2410.
- [9] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [10] 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.
- [11] Hodges D M, Delong J M, Forney C F, et al. Improving the thiobarbituric acid - reactive - substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds[J]. *Planta*, 1999, 207(4): 604-611.
- [12] Griffith O W. Determination of glutathione and glutathione disulfide using glutathione reductase and 2 - vinylpyridine[J]. *Analytical Biochemistry*, 1980, 106(1): 207-212.
- [13] Srivalli B, Sharma G, Khanna - Chopra R. Antioxidative defense system in an upland rice cultivar subjected to increasing intensity of water stress followed by recovery[J]. *Physiologia Plantarum*, 2003, 119(4): 503-512.
- [14] Khanna - Chopra R, Selote D S. Acclimation to drought stress generates oxidative stress tolerance in drought - resistant than - susceptible wheat cultivar under field conditions[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 60(2): 276-283.
- [15] Goyal A. Effects of water - stress on glycolate metabolism in the leaves of rice seedlings (*Oryza sativa*) [J]. *Physiologia Plantarum*, 2006, 69(2): 289-294.
- [16] Sofo A, Tuzio A C, Dichio B, et al. Influence of water deficit and rewatering on the components of the ascorbate - glutathione cycle in four interspecific *Prunus hybrids*[J]. *Plant Science*, 2005, 169(2): 403-412.
- [17] 万里强, 石永红, 李向林, 等. PEG胁迫下3个多年生黑麦草品种抗性生理研究[J]. *草地学报*, 2009, 17(4): 440-444.
- [18] Pandey R, Agarwal R M, Jeevaratnam K, et al. Osmotic stress - induced alterations in rice (*Oryza sativa* L.) and recovery on stress release[J]. *Plant Growth Regulation*, 2004, 42(1): 79-87.
- [19] 刘世鹏, 刘济明, 陈宗礼, 等. 模拟干旱胁迫对枣树幼苗的抗氧化系统和渗透调节的影响[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(9):

王亮亮,高志山,宋伟杰,等. 滴灌施肥下钾肥对番茄生长及产质量的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(21):132-134.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.21.032

滴灌施肥下钾肥对番茄生长及产质量的影响

王亮亮^{1,2}, 高志山^{1,3}, 宋伟杰¹, 宋涛^{1,2,3}

(1. 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东临沭 276700; 2. 养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室, 山东临沭 276700;
3. 农业部植物营养与新型肥料创制重点实验室, 山东临沭 276700)

摘要:水、肥是限制作物增产的两大因子,不合理的灌溉与增施钾肥不仅难以增加产量,还会破坏土壤的营养结构和平衡。针对设施蔬菜灌水和施肥存在的问题,通过设置不同水、肥管理措施对比试验,探讨传统施肥和滴灌施肥条件下不同水平钾肥对设施番茄生长、产量及品质的影响。结果表明,相同施肥水平下,NPK滴灌施肥比NPK传统施肥番茄产量增加7.35%,糖酸比增加10.70%,单果质量及叶片叶绿素含量也表现出增加趋势。NP+4/5K滴灌施肥与NPK传统施肥相比,钾肥用量减少20%,但二者的产量和品质均没有显著差异。滴灌施肥在提高番茄产量、改善品质及提高钾肥利用率方面效果显著。

关键词:漫灌施肥;滴灌施肥;番茄;钾肥;产量;品质

中图分类号:S641.206 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)21-0132-03

目前水资源的紧缺与蔬菜生产用水的矛盾日益突出,一方面缺水形势严峻,另一方面,蔬菜用水浪费现象又很普遍^[1]。近年来,菜农普遍重视化肥投入,以期获得高产,但是

仍旧沿袭大水大肥的传统施肥模式,这不仅造成水资源的严重浪费,同时也导致肥料有效成分的大量流失^[2],而且长期过量使用肥料还会引起土壤环境恶化、农产品产量及品质下降等一系列问题。

滴灌施肥又称水肥一体化^[3],是20世纪70年代以来发展起来的一项先进灌溉施肥技术,该技术可使肥料与灌溉水直接进入作物根部,可定量供给农作物水分和养分^[4],实现水分和养分的时空匹配,能及时满足作物对养分的需求从而提高肥料的利用效率^[5]。目前,我国针对番茄等蔬菜作物滴灌施肥技术开展了一系列研究,但多数集中在水分利用效率与氮素、磷素的有效性方面,有关钾素对番茄等作物影响方面的报道较少,因此,本研究以大水漫灌施肥模式为对照,研究

收稿日期:2017-09-19

基金项目:山东-以色列国际科技合作专项(编号:2014GJHZ1009);
山东省重点研发计划(编号:2016ZDJQ0701)。

作者简介:王亮亮(1988—),男,山东泰安人,硕士,研发工程师,主要从事功能性肥料研发及其施肥研究。E-mail:linxungreat@163.com。

通信作者:宋涛,博士,工程师,主要从事新型肥料研发及其施肥研究。E-mail:songtao@kingenta.com。

1781-1787.

[20]张彦妮,雷蕾,夏斌. 干旱胁迫及复水对黄莲花幼苗生长和生理特性的影响[J]. 草业科学,2016,33(9):1681-1689.

[21]刘建新,王鑫,王凤琴. 水分胁迫对苜蓿幼苗渗透调节物质积累和保护酶活性的影响[J]. 草业科学,2005,22(3):18-21.

[22]王东清,李国旗,苏德喜. 干旱胁迫对两种罗布麻渗透调节物质积累和保护酶活性的影响[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(12):177-181.

[23]李强. 藜和芒对干旱胁迫的生理响应和适应性[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2013.

[24]Scandalios J G. Oxygen stress and superoxide dismutases [J]. Plant Physiology,1993,101(1):7-12.

[25]王茅雁,邵世勤,张建华,等. 水分胁迫下对玉米保护酶活力及膜系统结构的影响[J]. 华北农学报,1995,10(2):43-49.

[26]王俊刚,陈国仓,张承烈. 水分胁迫对2种生态型芦苇(*Phragmites communis*)的可溶性蛋白含量、SOD、POD、CAT活性的影响[J]. 西北植物学报,2002,22(3):561-565.

[27]Patel P K, Hemantaran A. Salicylic acid induced alteration in dry matter partitioning antioxidant defence system and yield in Chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress[J]. Asian Journal of Crop Science,2012,4(3):86-102.

[28]Asada K. Production and action of active oxygen in photosynthetic tissue[M]. Boca Raton: CRC Press,1994:77-104.

[29]Selote D S, Khanna - Chopra R. Drought acclimation confers oxidative stress tolerance by inducing co-ordinated antioxidant defense at cellular and subcellular level in leaves of wheat seedlings [J]. Physiologia Plantarum,2006,127(3):494-506.

[30]Sofa A, Tuzio A C, Dichio B, et al. Influence of water deficit and rewatering on the components of the ascorbate - glutathione cycle in four interspecific *Prunus hybrids*[J]. Plant Science,2005,169(2):403-412.

[31]马玉华,马锋旺,马小卫,等. 干旱胁迫对苹果叶片抗坏血酸含量及其代谢相关酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2008,36(3):150-154.

[32]蒋明义,郭绍川. 水分亏缺诱导的氧化胁迫和植物的抗氧化作用[J]. 植物生理学通讯,1996,32(2):144-150.

[33]Sgherri C L, Maffei M, Navari - Izzo F. Antioxidative enzymes in wheat subjected to increasing water deficit and rewatering [J]. Journal of Plant Physiology,2000,157(3):273-279.

[34]李州,王晓娟,彭丹丹,等. Na⁺对水分胁迫下白三叶抗氧化防御和有机渗透调节物质的影响[J]. 草业学报,2014,23(5):175-183.