

外源 SNP 对干旱胁迫下不同马铃薯品种 叶片抗氧化酶活性的影响

贾 慧, 其力木格, 李特日根, 贺学勤*, 蒙美莲

(内蒙古农业大学 农学院, 呼和浩特 010019)

摘 要:以正常水分状态、轻度干旱胁迫、中度干旱胁迫和重度干旱胁迫下的马铃薯抗旱品种‘底西瑞’和干旱敏感品种‘大西洋’植株为材料,于现蕾期采用 0(对照)和 0.01 mmol · L⁻¹ SNP 分别喷施各处理植株,对不同处理下 2 个品种的植株形态、叶片超氧阴离子和 H₂O₂ 含量以及抗氧化酶活性进行比较分析,探讨外源 SNP 对干旱状态下马铃薯的生理应答机制,为马铃薯的抗旱栽培提供新的技术理论支持。结果显示:(1)SNP 喷施对重度水分胁迫下马铃薯植株的正常生长具有一定的保护作用。(2)在干旱胁迫条件下,马铃薯叶片 POD 活性在品种‘底西瑞’中增加而在品种‘大西洋’中降低,超氧阴离子含量和 H₂O₂ 含量以及 CAT 和 APX 活性在各品种中均增加,但超氧阴离子含量和 H₂O₂ 含量增加程度与胁迫程度无关。(3)抗旱品种‘底西瑞’在干旱胁迫下的超氧阴离子含量低于干旱敏感品种‘大西洋’,而其 POD、CAT 和 APX 活性则高于‘大西洋’;0.01 mmol · L⁻¹ SNP 处理未改变马铃薯叶片中超氧阴离子和 H₂O₂ 含量随土壤水分的变化趋势,但改变了‘大西洋’叶片中 SOD、POD、CAT 活性以及‘底西瑞’叶片中 APX 活性的变化趋势。(4)外源喷施 0.01 mmol · L⁻¹ SNP 降低了‘底西瑞’在中度和重度胁迫下以及‘大西洋’在轻度和中度胁迫下超氧阴离子含量,提高了干旱胁迫下‘底西瑞’和‘大西洋’的 POD 和 APX 活性。研究表明,POD、CAT 和 APX 可作为马铃薯水分胁迫下的应答以及品种抗旱性的筛选指标,外源 SNP 可通过诱导增强干旱胁迫下马铃薯的抗氧化酶活性来提高其抗旱性。

关键词: 马铃薯;干旱;硝普钠;抗氧化酶;活性氧自由基

中图分类号: Q945.78;S513.01

文献标志码: A

Sodium Nitroprusside Role on Antioxidant Enzymes Activities in Leaves of Different Potato Cultivars under Drought Stress

JIA Hui, QILI Muge LITE Rigen, HE Xueqin*, MENG Meilian

(Agronomy Faculty, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China)

Abstract: In order to elucidate effect of SNP on the parameters response to drought and relate to drought resistance of cultivars and to supply the new method and theory for drought resistant cultivation in processed potato, we firstly treated drought-resistant potato cv. ‘Desiree’ and drought-sensitive potato cv. ‘Atlantic’ with 0 (control) and 0.01 mmol · L⁻¹ SNP at bud, and then analyzed plant morphology, the contents of superoxide anion and H₂O₂, as well as activities of antioxidant enzymes under normal water, light water-stress, medium water-stress and heavy water-stress, respectively. The results showed that: (1) SNP treatment could maintain the normal growth of potato under heavy water-stress. (2) The contents of superoxide anion and H₂O₂, as well as activities of CAT and APX increased under water stress, but increases of superoxide anion content and H₂O₂ content were not related to the levels of stress. (3) The activity of POD

收稿日期: 2015-11-04; 修改稿收到日期: 2016-03-13

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-10-P17); 内蒙古农业大学博士启动基金(BJ04-46)

作者简介: 贾 慧(1989—), 男, 硕士, 主要从事园艺植物逆境栽培生理研究。E-mail: Jiahui-1987@qq.com

* 通信作者: 贺学勤, 副教授, 硕士生导师, 主要从事园艺植物逆境栽培生理研究。E-mail: xueqinhe2013@163.com

rose in Desiree but lowered in Atlantic under drought stress. Compared with Atlantic drought resistant cultivar of Desiree possessed low content of superoxide anion and high activities of POD, CAT and APX under drought stress. Along with the levels of stress $0.01 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SNP treatment did not change the tendency of superoxide anion content and H_2O_2 content but changed the tendency of SOD, POD and CAT activities in Atlantic and of APX activity in Desiree. (4) The content of superoxide anion decreased in Desiree under normal water and heavy drought stress and in Atlantic under light drought stress and heavy drought stress by $0.01 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SNP. Additionally, SNP increased activities of POD and APX in both Desiree and Atlantic under drought stress. In conclusion, the parameters responded to drought and drought resistance cultivars in potato were POD, CAT and APX activities. SNP could enhance the drought resistance of potato under drought stress.

Key words: potato; drought; SNP; antioxidant enzymes; reactive oxygen species

干旱可打破作物体内活性氧的动态平衡,破坏植物正常代谢^[1]。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)等对活性氧有清除作用,可维持活性氧动态平衡,保护正常细胞膜结构,最终增强作物的抗逆性^[2-4]。一氧化氮(NO)作为信号分子和抗氧化剂,参与了调节植物多种逆境胁迫下的生理过程^[5-6]。硝普钠(Sodium Nitroprusside, SNP)是NO供体,干旱胁迫下适宜浓度的SNP通过改变或增强植物体内的生理生化途径有效提高植物的耐受能力。如研究发现SNP处理可通过显著提高干旱胁迫下小麦叶片中SOD活性,降低超氧阴离子含量和POD活性,增强幼苗的抗氧化水平^[7-8];或通过恢复干旱胁迫下小麦的叶片蒸腾速率、气孔开展度以及离子渗漏水平,增加植株的耐受程度^[9];或通过诱导干旱胁迫下玉米亚细胞中的抗氧化防御系统,清除体内积累的 H_2O_2 ,从而增强作物的抗逆性^[10]。

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是全球四大粮食经济作物之一^[11]。内蒙古自治区是中国最大的马铃薯种植区,但由于该地区水资源严重短缺,造成种植面积大但单产低的现状^[12]。‘底西瑞’和‘大西洋’均为中晚熟的马铃薯加工品种,其中‘底西瑞’为抗旱品种^[13]。在对马铃薯干旱胁迫的研究中发现,采用SNP处理PEG模拟干旱胁迫下的‘底西瑞’幼苗根部,能提高植株的叶片含水量及抗氧化酶活性^[14]。但喷施SNP对不同干旱胁迫程度下抗旱性不同的马铃薯品种抗氧化酶活性的影响目前尚不清楚。因此,本研究采用0和 $0.01 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的SNP溶液喷施‘底西瑞’和‘大西洋’马铃薯品种幼苗叶片,通过对不同土壤含水量下叶片中超氧阴离子和 H_2O_2 含量以及主要抗氧化酶活性的测定、分析,明确SNP喷施对马铃薯干旱胁迫应答以及与品种抗旱相关指标的影响,以期马铃薯加工品种在干旱条件的栽培技术完善提供新的方法和技术理论支持。

1 材料和方法

1.1 材料及种植

‘底西瑞’和‘大西洋’种薯由内蒙古农业科学研究院提供。试验在内蒙古农业大学基地温室内进行。在温室中挖25 cm深的沟,将长、宽、高为 $62 \text{ cm} \times 37 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 的泡沫箱埋于沟中,共6条沟,沟间距为1 m,每沟中放4箱,箱间距为20 cm(图1)。每个泡沫箱内填入 0.05 m^3 的营养土(园土:基肥:蛭石=3:1:1),浇透水后,采用土壤烘干法测定该营养土最大田间持水量为 $(25.16\% \pm 0.56\%)$ 。

马铃薯块茎用酒精消毒的刀切块,每块留2~3个芽眼,切好的块茎用含硫磺的代森锰锌拌种晾干,于2014年4月20日种植于泡沫箱内。每品种3条沟共12个泡沫箱,每箱2列,每列2株。然后正常浇水管理直到现蕾期。

1.2 SNP预处理及干旱胁迫

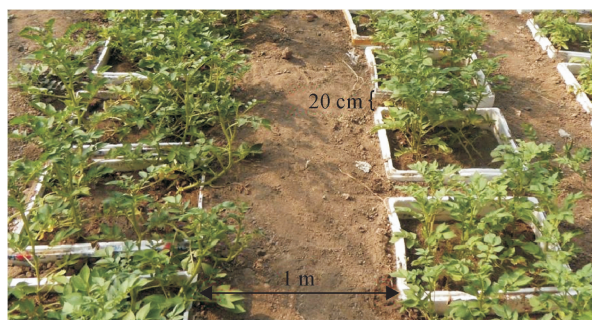
植株现蕾后进行控水,待植株顶叶出现中午萎蔫且傍晚恢复时,采用SNP进行处理,SNP采用蒸馏水配制。每箱中2株喷施蒸馏水(对照),2株喷施 $0.01 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SNP,每条沟中的4箱为1个重复,即每品种每个处理8株为1个重复,共3次重复。喷施SNP后浇透水,随后采用不浇水自然干旱控水,并持续测定土壤含水量,各喷施处理植株在正常水分状态(田间最大持水量的70%~80%,浇透水后的第2天)、轻度胁迫(田间最大持水量的60%~70%,浇透水后的第5天)、中度胁迫(田间最大持水量的50%~60%,浇透水后的第7天)、重度胁迫(田间最大持水量的30%~40%,浇透水后的第10天)时取顶叶向下数第4、5复叶,包于锡箔纸中,置冰盒内立即拿回实验室液氮速冻,保存于 -80°C 冰箱内备用。

1.3 测定项目及方法

取 0.2 g 样品在液氮中研磨后加入预冷的 50 mmol · L⁻¹ 磷酸缓冲液(pH 7.8), 6 500 g 离心 10 min, 取上清液, 参照高俊凤^[15]的方法进行超氧阴离子含量测定。再取 0.2 g 样品中加入 4℃ 预冷的丙酮, 研磨成匀浆, 3 000 g 离心 10 min, 取上清液, 参照刘俊等^[16]的方法进行过氧化氢含量测定。最后取 0.2 g 样品在液氮中研磨后, 加入预冷的 50 mmol · L⁻¹ 磷酸钾缓冲液(pH 7.8), 4℃ 12 000 g 离心 10 min, 上清液即为粗酶液, 参照高俊凤的方法进行 SOD、POD、CAT 和 APX 活性测定^[15]。蛋白质含量测定采用 Bradford 方法^[17]。

1.4 数据处理

采用 Excel 对数据进行统计分析和作图, 采用 SAS 9.0 用 Duncan 法进行差异显著性分析。



左为‘底西瑞’, 右为‘大西洋’

图 1 温室中马铃薯种植示意图

Left is Desiree, right is Atlantic

Fig. 1 Planting map of different varieties of potato in greenhouse

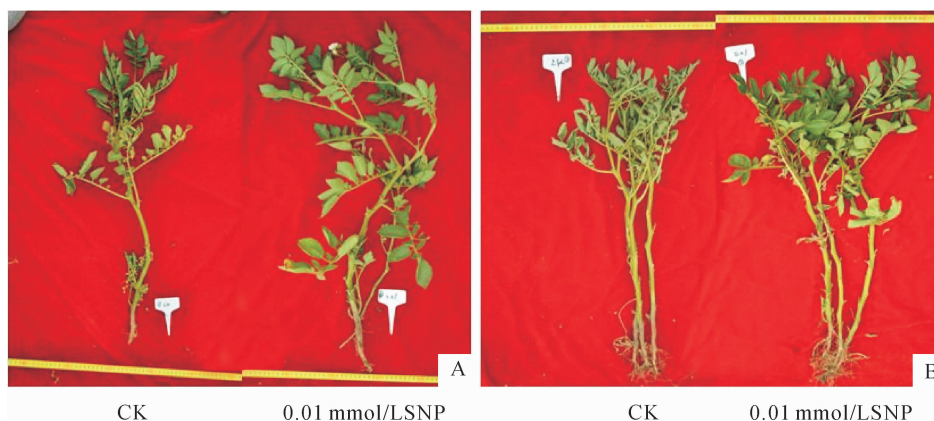
2 结果与分析

2.1 SNP 处理对重度水分胁迫下马铃薯植株形态的影响

重度干旱胁迫下, 即土壤水分在田间最大持水量的 30%~40% 的状态下, 马铃薯‘底西瑞’和‘大西洋’的对照植株均表现为上部大部分叶片卷曲, 而喷施 SNP 后的植株则上部叶片大部分开展, 卷曲少(图 2)。表明喷施 SNP 对维持水分胁迫下马铃薯品种‘底西瑞’和‘大西洋’植株的正常生长具有一定的作用。

2.2 SNP 处理对干旱胁迫下马铃薯叶片中超氧阴离子含量的影响

与正常土壤水分状态下相比, ‘底西瑞’对照和 SNP 处理下叶片中的超氧阴离子含量在中度干旱胁迫下升高, 且对照的差异显著, 而在轻度和重度水分胁迫下未表现出明显差异; ‘大西洋’对照叶片中超氧阴离子含量在轻度和中度胁迫下升高, 且在中度胁迫下差异显著, 其 SNP 处理下叶片中超氧阴离子含量在中度和重度水分胁迫下显著升高(图 3)。在同一土壤水分状态下, 除正常水分状态外, ‘底西瑞’对照叶片中的超氧阴离子含量在各程度干旱胁迫下均低于‘大西洋’对照, 且在轻度和中度胁迫下达差异显著水平, 分别降低 40.44% 和 40.30%; SNP 处理一定程度提高了正常水分状态下‘底西瑞’和‘大西洋’叶片中的超氧阴离子含量, 但差异不显著; 同时, SNP 显著降低了‘底西瑞’在中度胁迫下的超氧阴离子含量, 以及‘大西洋’在轻度和中度胁迫下的超氧阴离子含量, 分别降低 56.01% 和

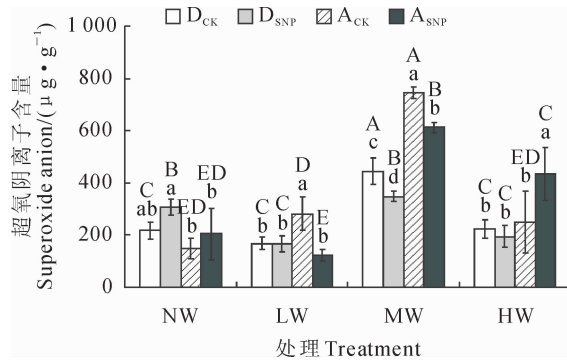


A. 大西洋; B. 底西瑞

图 2 不同处理对重度水分胁迫下马铃薯植株形态的影响

A. Atlantic; B. Desiree

Fig. 2 Plant morphology of different potato varieties under heavy drought stress



DCK和DSNP分别表示‘底西瑞’的对照和SNP处理，
ACK和ASNP分别表示‘大西洋’的对照和SNP处理；
NW、LW、MW和HW分别表示正常水分状态、轻度胁迫、
中度胁迫、重度胁迫处理；大写字母表示同一马铃薯品种
SNP处理在不同水分状态下的差异显著性，小写字母表示
同一水分状态下不同马铃薯品种SNP处理间的
差异显著性($P < 0.05$)。下图同

图3 SNP处理下不同马铃薯品种在不同水分状态下
叶片中超氧阴离子含量的变化

DCK和DSNP meant control and SNP treatment of ‘Desiree’,
ACK and ASNP meant control and SNP treatment of ‘Atlantic’;
NW, LW, MW and HW meant Normal Water, Light Water-stress,
Medium Water-stress and Heavy Water-stress; Capital letters meant
significant difference on same potato variety with different
treatments among different water states, while lowercase letters
meant significant differences among different varieties with different
treatments under same water states ($P < 0.05$). The same as below.

Fig. 3 Content of superoxide anion in different potato
varieties treated with SNP under different water states

17.83%，但显著提高了重度胁迫下‘大西洋’的超氧阴离子含量(图3)。上述结果表明，SNP处理未改变马铃薯叶片中超氧阴离子含量随土壤水分变化的趋势；土壤水分胁迫程度和马铃薯品种不同，SNP处理对超氧阴离子含量的影响不同；相同水分胁迫程度下，抗旱品种的超氧阴离子含量低于不抗旱的。

2.3 SNP处理对干旱胁迫下马铃薯叶片中 H_2O_2 含量的影响

‘底西瑞’对照和SNP处理叶片中 H_2O_2 含量在不同程度干旱胁迫下均比各自正常水分状态下不同程度增加，对照在轻度胁迫下差异显著，SNP处理在轻度和重度胁迫下差异显著；与各自正常水分状态下相比，‘大西洋’对照和SNP处理下 H_2O_2 含量均在重度胁迫下显著增加，其余水分胁迫状态下增加但不显著(图4)。在同一土壤水分状态下，‘底西瑞’对照的 H_2O_2 含量在正常水分和轻度胁迫下高于‘大西洋’对照，在重度胁迫下则显著低于‘大西洋’28%；SNP处理对各水分状态下‘底西瑞’叶片

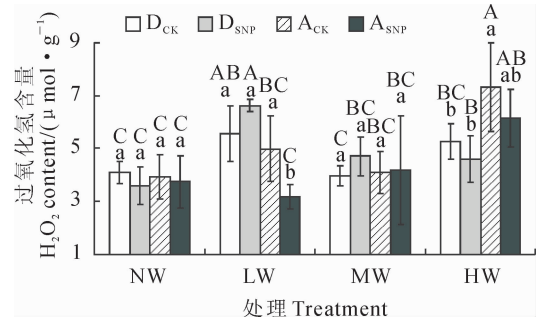


图4 SNP处理下不同马铃薯品种在不同水分状态下
叶片中 H_2O_2 含量的变化

Fig. 4 Content of H_2O_2 in different potato varieties
treated with SNP under different water states

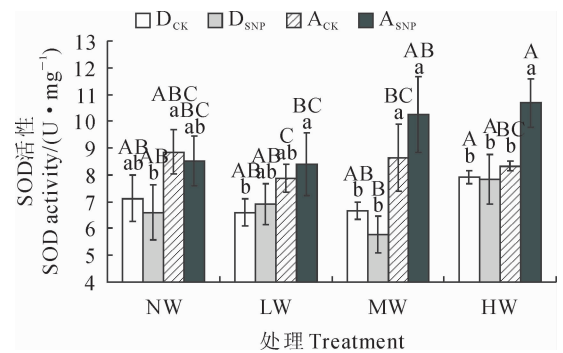


图5 SNP处理下不同马铃薯品种在不同水分状态下
叶片中SOD活性的变化

Fig. 5 SOD activity of different potato varieties treated
with SNP under different water states

中的 H_2O_2 含量均无显著影响，也对正常水分下‘大西洋’的 H_2O_2 含量无显著影响，但却降低了轻度和重度胁迫下‘大西洋’叶片中的 H_2O_2 含量，且在轻度胁迫下达显著水平(图4)。上述结果表明水分胁迫导致马铃薯叶片中 H_2O_2 含量增加，但其含量变化与干旱胁迫程度无关；SNP处理未改变马铃薯叶片中 H_2O_2 含量随土壤水分的变化趋势，对于干旱胁迫下 H_2O_2 含量的影响与胁迫程度及品种抗旱性有关。

2.4 SNP对干旱胁迫下马铃薯叶片中SOD活性的影响

与各自正常水分状态下相比，‘底西瑞’对照和SNP处理以及‘大西洋’对照叶片的SOD活性在不同土壤水分胁迫状态下无显著变化，SNP处理下‘大西洋’的SOD活性随水分胁迫程度的增加而增加，且在重度胁迫下达显著水平(图5)。同一土壤水分状态下，‘大西洋’对照叶片中的SOD活性均高于‘底西瑞’，分别高出24.31%、19.58%、29.64%和5.51%，且在中度干旱胁迫下达到显著水平；除

轻度干旱胁迫外,SNP 处理降低了‘底西瑞’SOD 活性,但差异不显著,提高了干旱胁迫下‘大西洋’叶片的 SOD 活性,且在重度胁迫下达到显著水平(图 5)。这表明马铃薯叶片 SOD 活性变化与干旱胁迫关系不显著;SNP 处理对‘大西洋’叶片中 SOD 活性随土壤水分变化的趋势有一定改变,对 SOD 活性的影响与干旱胁迫程度及品种有关;SOD 活性表现与品种抗旱性无关。

2.5 SNP 处理对干旱胁迫下马铃薯叶片中与 H_2O_2 清除相关酶活性的影响

2.5.1 POD 活性

在 3 种土壤水分胁迫状态下,‘底西瑞’对照和 SNP 处理下叶片的 POD 活性均比各自正常水分状态下增加,且均在轻度和重度胁迫下达显著水平;‘大西洋’对照叶片的 POD 活性在各干旱胁迫下均显著低于正常水分状态,其 SNP 处理下的 POD 活性在轻度水分胁迫状态下显著低于正常水分状态,其余均无显著差异(图 6)。在同一水分状态下,‘底西瑞’对照的 POD 活性均高于‘大西洋’的,且在轻度和重度胁迫下达显著水平;与同一水分胁迫下各自对照相比,SNP 处理均提高了‘底西瑞’和‘大西洋’叶片中的 POD 活性,‘底西瑞’在重度胁迫下达显著水平,‘大西洋’在中度胁迫下达显著水平(图 6)。以上结果表明马铃薯叶片中 POD 活性与水分应答有关,但与胁迫程度无相关性;SNP 处理对‘大西洋’叶片 POD 活性随土壤水分变化的趋势有一定改变,对干旱胁迫下马铃薯的 POD 活性有增强作用,但增强幅度与胁迫程度有关;POD 活性在各处理的表现与品种抗旱性有关。

2.5.2 CAT 活性

与各自正常水分状态相比,干旱胁迫下‘底西瑞’对照叶片中的 CAT 活性均不同程度上升,并在重度干旱胁迫下达显著水平,且有随土壤干旱程度的增加而上升的趋势,SNP 处理下的 CAT 活性在干旱胁迫下也不同程度的增加,但均未达到显著水平;‘大西洋’对照的 CAT 活性在重度胁迫下比正常水分状态显著升高,在其余 2 种水分胁迫下变化平缓,其 SNP 处理的 CAT 活性与正常水分状态相比均差异不显著(图 7)。同一水分胁迫状态下,‘底西瑞’对照的 CAT 活性均高于‘大西洋’,但差异不显著;在相同水分状态下,SNP 处理的‘底西瑞’和‘大西洋’叶片 CAT 活性与相应对照均无显著差异(图 7)。以上结果表明马铃薯抗旱品种叶片中 CAT 活性与水分胁迫程度有关;SNP 处理对‘大西洋’叶片中 CAT 活性随土壤水分变化的趋势有一定改变,但对各水分胁迫状态下 CAT 的活性

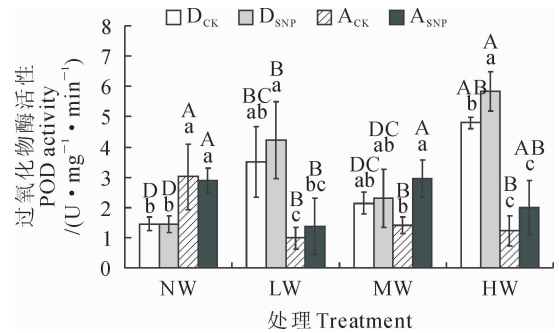


图 6 SNP 处理下不同马铃薯品种在不同水分状态下叶片中 POD 活性的变化

Fig. 6 POD activity of different potato varieties treated with SNP under different water states

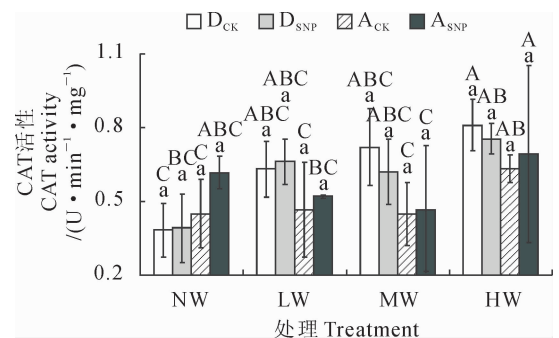


图 7 SNP 处理下不同马铃薯品种在不同水分状态下叶片中 CAT 活性的变化

Fig. 7 CAT activity of different potato varieties treated with SNP under different water states

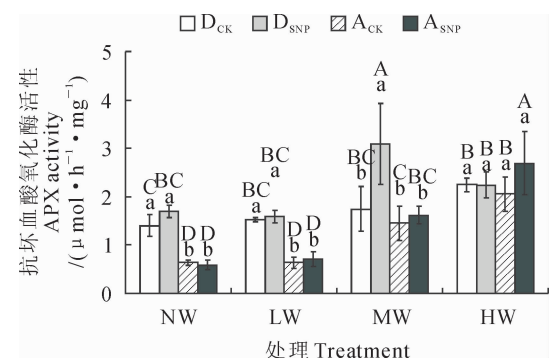


图 8 SNP 处理下不同马铃薯品种在不同水分状态下叶片中 APX 活性的变化

Fig. 8 APX activity of different potato varieties treated with SNP under different water states

无显著影响;叶片 CAT 活性表现与品种抗旱性有关。

2.5.3 APX 活性

与各自正常水分状态下相比,‘底西瑞’对照的 APX 活性均随土壤干旱胁迫程度的增加而增强,且在重度胁迫下达显著水平,其 SNP 处理 APX 活性仅在中度水分胁迫下显著增

加,其余干旱处理下变化未达到显著水平;‘大西洋’对照和 SNP 处理叶片的 APX 活性均随土壤干旱胁迫程度的增加而增强,且在中度和重度水分胁迫下与正常水分状态差异显著(图 8)。同一水分状态下,‘底西瑞’对照的 APX 活性均高于‘大西洋’,且在正常水分和轻度水分胁迫下差异显著;SNP 处理显著提高了中度干旱胁迫下‘底西瑞’的 APX 活性,比对照提高了 76.57%;SNP 处理也提高了干旱胁迫下‘大西洋’的 APX 活性,分别比对照提高 12.40%、10.79%和 31.31%,但差异不显著(图 8)。以上结果表明马铃薯叶片中 APX 活性与水分应答有关,且与干旱胁迫程度相关;SNP 处理对‘底西瑞’叶片 APX 活性随土壤水分变化的趋势有一定改变,且对干旱胁迫下马铃薯的 APX 活性有提高作用,但提高程度与胁迫程度和品种有关;抗旱性强的品种 APX 活性相对较高。

3 讨 论

逆境胁迫导致作物体内大量积累超氧阴离子和 H_2O_2 [18-19]。POD 和 CAT 能够清除植物体内过量的 H_2O_2 ,APX 也可以特异性地催化 H_2O_2 反应,最终达到清除 H_2O_2 的目的 [20-21]。本研究中干旱胁迫下叶片超氧阴离子含量在马铃薯品种‘大西洋’中升高且在中度胁迫下达显著水平, H_2O_2 含量在品种‘底西瑞’和‘大西洋’中也均增加,表明马铃薯叶片中超氧阴离子含量与土壤水分胁迫的关系和品种有关,而 H_2O_2 含量与水分胁迫应答有关,但二者均与胁迫程度无关。植物在受到适度的逆境胁迫时,其体内 SOD、POD、CAT 和 APX 等抗氧化酶活性增强,提高了植物的抗逆性,且 CAT 和 APX 活性随水分胁迫加深而增强 [22]。本研究中马铃薯叶中 SOD 活性在干旱胁迫下未呈现规律性变化,POD 活性在品种‘底西瑞’中增加而在品种‘大西洋’中降低,CAT 和 APX 活性在‘底西瑞’和‘大西洋’中均增加,且 APX 随干旱程度的增加而增加,这与范苏

鲁等的研究结果一致 [22-23]。因此, H_2O_2 含量以及 POD、CAT 和 APX 均可作为干旱胁迫下马铃薯水分胁迫的应答指标。同时,抗旱品种‘底西瑞’在干旱胁迫下的超氧阴离子含量低于干旱敏感品种‘大西洋’,而其 POD、CAT 和 APX 活性则高于‘大西洋’,表明这些指标可作为马铃薯抗旱品种的筛选指标;在干旱胁迫条件下,马铃薯抗旱品种抗氧化酶活性高,有利于逆境胁迫下维持活性氧动态平衡、增强作物的抗逆性,这也是干旱胁迫下‘底西瑞’比‘大西洋’抗旱的原因之一。

外源 NO 可以在逆境胁迫下抑制超氧阴离子的产生和清除 H_2O_2 ,也可提高逆境胁迫下黑麦草、黄瓜、小麦等的 SOD、POD 和 CAT 的活性 [24-26]。本研究中 NO 供体 SNP 处理也可减轻重度土壤干旱胁迫下马铃薯品种‘底西瑞’和‘大西洋’植株上部叶片的卷曲程度,对维持水分胁迫下马铃薯品种‘底西瑞’和‘大西洋’植株的正常生长有一定作用。通过研究 SNP 处理对马铃薯干旱应答指标和抗旱品种筛选指标的影响发现,SNP 处理降低了‘底西瑞’在中度和重度胁迫下以及‘大西洋’在轻度和中度胁迫下超氧阴离子含量,提高了干旱胁迫下‘底西瑞’和‘大西洋’的 POD 和 APX 活性,证明外源 SNP 能诱导增强干旱胁迫下马铃薯抗氧化酶活性。而逆境胁迫下植物体内 SOD、POD、CAT 和 APX 等抗氧化酶活性的提高可以增加植物的抗逆性 [22-23]。因此,喷施外源 SNP 可以提高干旱胁迫下马铃薯的抗旱性,这与前人结果一致 [23-25],但提高的程度与品种、胁迫程度有关。

综上所述, H_2O_2 含量及 POD、CAT 和 APX 活性均可作为马铃薯干旱胁迫下的应答指标,可将干旱胁迫下超氧阴离子含量低,而同时 POD、CAT 和 APX 活性高作为马铃薯抗旱品种的筛选指标;外源 SNP 对干旱胁迫下马铃薯抗氧化酶活性有提高作用,因此可增强马铃薯对于干旱胁迫的抗性,但增强的程度与品种抗性和胁迫程度有关。

参考文献:

- [1] YIN C, DUAN B, WANG X, *et al.* Morphological and physiological responses of two contrasting Poplar species to drought stress and exogenous abscisic acid application[J]. *Plant Science*, 2004, **167**(5): 1 091-1 097.
- [2] BABITHA M P, BHAT S G, PRAKASH H S, *et al.* Differential induction of superoxide dismutase in downy mildew resistant and susceptible genotypes of pearl millet[J]. *Plant Pathology*, 2002, **51**(4): 480-486.
- [3] ALONSO R, ELVIRA S, CASTILLO F J, *et al.* Interactive effects of ozone and drought stress on pigments and activities of antioxidative enzymes in *Pinus halepensis* [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2001, **24**(9): 905-916.
- [4] KUKAVICA B, JOVANOVIĆ S V. Senescence-related changes in the antioxidant status of ginkgo and birch leaves during autumn yellowing[J]. *Physiologia Plantarum*, 2004, **122**(3): 321-327.

- [5] ARASIMOWICZ M, FLORYSZAK-WIECZOREK J. Nitric oxide as a bioactive signalling molecule in plant stress responses [J]. *Plant Science*, 2007, **172**(5): 876-887.
- [6] DUBOLSKAYA L V, KOLESNEVA E V, KNYAZEVA D M, *et al.* Protective role of nitric oxide during hydrogen peroxide-induced oxidative stress in tobacco plants [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2007, **54**(6): 755-762.
- [7] 刘鹏程, 王 辉, 等. NO 对小麦叶片干旱诱导膜脂过氧化的调节效应 [J]. 西北植物学报, 2004, **24**(1): 141-145.
LIU P C, WANG H, *et al.* Regulation of Nitric Oxide on drought-induced membrane lipid preoxidation in wheat leaves [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, **24**(1): 141-145.
- [8] SANG J, JIANG M, FAN L, *et al.* Nitric oxide reduces hydrogen peroxide accumulation involved in water stress-induced subcellular anti-oxidant defense in maize plants [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, **50**(2): 231-243.
- [9] GARCÍA-MATA C & LORENZO L. Nitric oxide induces stomatal closure and enhances the adaptive plant responses against drought stress [J]. *Plant Physiology*, 2001, **126**(3): 196-204.
- [10] SANG J R, JIANG M Y, LIN F, *et al.* Nitric oxide reduces hydrogen peroxide accumulation involved in water stress-induced subcellular anti-oxidant defense in maize plants [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, **50**(2): 231-243.
- [11] 谢从华. 马铃薯产业的现状与发展 [J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2012, (1): 1-4.
XIE C H. Potato industry: status and development [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2012, (1): 1-4.
- [12] 隋启君, 李先平, 杨万林. 中国马铃薯生产情况分析 [J]. 西南农业学报, 2008, **21**(4): 182-188.
SUI Q J, LI X P, YANG W L. Situation analysis of potatoes production in China [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2008, **21**(4): 182-188.
- [13] AMBROSONE A, GIACOMO M D, LEONE A, *et al.* Identification of early induced genes upon water deficit in potato cell cultures by cDNA-AFLP [J]. *Journal of Plant Research*, 2013, **126**(1): 169-178.
- [14] HE X Q, MA D, MENG M L. Exogenous nitric oxide enhances root activity, decreases H_2O_2 accumulation by increasing activities of CAT and GR in root of potato cv. Desiree under water-stress [J]. *Advance Journal of Food Science & Technology*, 2013, **5**(2): 148-152.
- [15] 高俊风. 植物生理学实验技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 211-217.
- [16] 刘 俊, 吕 波, 徐朗莱. 植物叶片中过氧化氢含量测定方法的改进 [J]. 生物化学与生物物理进展, 2000, **27**(5): 548-551.
LIU J, LÜ B, XU L L. An improved method for the determination of hydrogen peroxide in leaves [J]. *Progress Biochemistry Biophysics*, 2000, **27**(5): 548-551.
- [17] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, **72**(72): 248-254.
- [18] 刘建新, 胡浩斌, 王 鑫. 硅对盐胁迫下黑麦草幼苗活性氧代谢和光合参数的影响 [J]. 中国草地学报, 2008, **30**(5): 25-31.
LIU J X, HU H B, WANG X. Effects of exogenous silicon on active oxygen metabolism and photosynthetic parameters of *Lolium perenne* L. seedlings under salt stress [J]. *Chinese Journal of Grassland* (中国草地学报), 2008, **30**(5): 25-31.
- [19] 丁海东, 朱晓红, 等. Cr^{6+} 胁迫诱导玉米根尖细胞的氧化损伤 [J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2011, **32**(4): 28-32.
DING H D, ZHU X H, *et al.* Hexavalent chromium (Cr^{6+}) induced oxidative damage to maize (*Zea mays* L.) root tip cells [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2011, **32**(4): 28-32.
- [20] 刘家忠, 龚 明. 植物抗氧化系统研究进展 [J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 1999, (6): 1-11.
LIU J Z, GONG M. Advances in antioxidant systems of plants [J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 1999, (6): 1-11.
- [21] 张义凯, 崔秀敏, 等. 外源 NO 对镉胁迫下番茄活性氧代谢及光合特性的影响 [J]. 应用生态学报, 2010, **21**(6): 1432-1438.
ZHANG Y K, CUI X M, *et al.* Effects of exogenous nitric oxide on active oxygen metabolism and photosynthetic characteristics of tomato seedlings under cadmium stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(6): 1432-1438.
- [22] 范苏鲁, 苑兆和, 等. 干旱胁迫对大丽花生理生化指标的影响 [J]. 应用生态学报, 2011, **22**(3): 651-657.
FAN S L, YUAN Z H, *et al.* Effects of drought stress on physiological and biochemical parameters of *Dahlia pinnata* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(3): 651-657.
- [23] 桑子阳, 马履一, 陈发菊. 干旱胁迫对红花玉兰幼苗生长和生理特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2011, **31**(1): 109-115.
SANG Z Y, MA L Y, CHEN F J. Growth and physiological characteristics of *Magnolia wufengensis* seedlings under drought stress [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, **31**(1): 109-115.
- [24] 孙立荣, 郝福顺, 等. 外源一氧化氮对盐胁迫下黑麦草幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 生态学报, 2008, **28**(11): 5714-5722.
SUN L R, HAO F S, *et al.* Effects of exogenous nitric oxide on growth and physiological characteristics of ryegrass seedlings under salt stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(11): 5714-5722.
- [25] 樊怀福, 郭世荣, 段九菊, 等. 外源 NO 对 NaCl 胁迫下黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 幼苗生长和谷胱甘肽抗氧化酶系统的影响 [J]. 生态学报, 2008, **28**(6): 2511-2517.
FAN H F, GUO S R, DUAN J J, *et al.* Effects of nitric oxide on the growth and glutathione dependent antioxidative system in cucumber (*Cucumis Sativus* L.) seedlings under NaCl stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(6): 2511-2517.
- [26] 郑春芳, 姜 东, 等. 外源一氧化氮供体硝普钠浸种对盐胁迫下小麦幼苗碳氮代谢及抗氧化系统的影响 [J]. 生态学报, 2010, **30**(5): 1174-1183.
ZHANG C F, JIANG D, *et al.* Effects nitroprusside a nitric oxide donor on carbon and nitrogen metabolism and the activity of the antioxidation system in wheat seedlings under salt stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(5): 1174-1183.