

盐碱胁迫对黑麦草幼苗3种保护酶同工酶谱及活性的影响分析

杨新宇^{1,2}, 王佳文¹, 于爽^{1*}, 刘秋月¹

(1. 牡丹江师范学院生命科学与技术学院, 黑龙江 牡丹江 157011; 2. 牡丹江恒丰纸业股份有限公司, 黑龙江 牡丹江 157011)

摘要:以多年生黑麦草(*Lolium perenne* L.)幼苗为材料,用不同浓度的NaCl(A)、NaHCO₃(B)、NaCl和NaHCO₃混合溶液(C)进行胁迫处理,探究盐碱胁迫下黑麦草幼苗3种保护酶的分布,为研究黑麦草幼苗适应盐碱胁迫的响应机制提供理论依据。在2种单盐(NaCl、NaHCO₃)处理浓度分别为100、200、300、400 mmol/L(A1、A2、A3、A4)和30、60、90、120 mmol/L(B1、B2、B3、B4),1种混合盐(NaCl+NaHCO₃)处理浓度为100、200、300、400 mmol/L(C1、C2、C3、C4),胁迫后采用聚丙烯酰胺凝胶电泳法,对黑麦草植株SOD、POD、CAT进行分离并建立电泳图谱,结果表明:3种酶在黑麦草植株内均有表达,在不同盐碱胁迫下酶谱带分布和活性均有不同,以适应盐胁迫环境下细胞内特殊的生化反应。

关键词:黑麦草;盐碱胁迫;SOD;POD;CAT;同工酶谱

中图分类号:S543.6

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2023)03-0062-04

Analysis on Isozymograms and Activities of Three Protective Enzymes in Ryegrass Seedlings under Saline-Alkali Stress

YANG Xinyu^{1,2}, WANG Jiawen¹, YU Shuang^{1*}, LIU Qiuyue¹

(1. School of Life Science and Technology, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang 157011; 2. Mudanjiang Hengfeng Paper Co., Ltd., Heilongjiang Province, Mudanjiang 157011, China)

Abstract: Perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) seedlings were treated with various of concentrations of NaCl (A), NaHCO₃ (B), NaCl and NaHCO₃ (C) to investigate the distribution of three protective enzymes in *Lolium perenne* L. When the concentration of two kinds of single salt (NaCl, NaHCO₃) were 100, 200, 300, 400 mmol/L (A1, A2, A3, A4) and 30, 60, 90, 120 mmol/L (B1, B2, B3, B4), and the concentrations of one mixed salt (NaCl + NaHCO₃) were 100, 200, 300, 400 mmol/L (C1, C2, C3, C4), respectively. After stressed, polyacrylamide gel electrophoresis was used to separate SOD, POD and CAT from ryegrass plants and establish electrophoresis pattern. The results showed that 3 enzymes were expressed in ryegrass plants, with variations in zymogram distribution and enzyme activity under different saline-alkali stress conditions, allowing the plants to adapt to the unique biochemical reactions occurring within cells under salt stress.

Key words: *Lolium perenne*; Saline-alkali stress; SOD; POD; CAT; Isozymogram

黑麦草属禾本科黑麦草属。广泛分布于欧、亚、北非等地区,是具有多种价值的经济作物。黑麦草适口性好、消化率高,是畜牧饲料的重要

组成部分^[1];且耐践踏,成坪速度快,品质优良,耐磨性好,管理粗放,抗病虫害及分蘖能力强^[2-3],又具有适应性强、生物量大和根系发达等特点,常作为园林绿化建造草坪的优选材料^[4-5]。在我国现有的耕地中,盐碱地主要分布在23个省、市、自治区,面积约667万hm²^[6],研究盐碱胁迫下黑麦草幼苗的适应机制和耐受性对我国盐碱地城市绿化和畜牧养殖业有重要意义。

关于黑麦草的相关研究已有诸多报道,国内外对黑麦草幼苗的逆境生长生理方面的研究多数集中在对形态发育结构、生长特性、生理特性等

收稿日期:2020-06-27

基金项目:牡丹江师范学院博士科研启动项目(MNUB202001);牡丹江师范学院“十四五”双一流学科建设揭榜挂帅项目(MSYSL2022018);2019年度黑龙江省省属高等学校基本科研业务费项目(1354MSYQN025)

作者简介:杨新宇(1995-),女,在读硕士,从事植物的逆境生理研究。

通讯作者:于爽,女,博士,教授,E-mail: swxys@126.com

方面^[7-11]。逆境条件下,植物通过调节多种抗氧化酶的活性来抑制自由基氧化损伤,抵抗逆境对植物造成的损害^[12-14]。NaCl胁迫下,红豆与白扁豆SOD活性均显著升高,红豆POD活性显著升高,白扁豆POD活性显著下降,以降低细胞膜氧化伤害^[15]。NaCl盐胁迫下,黑麦草幼苗中SOD、POD和CAT酶活性大体呈先升后降的趋势^[16]。目前利用聚丙烯酰胺凝胶电泳技术(PAGE)对短花针茅^[17]、柳枝稷^[18]、藜麦^[19]、辣椒^[20]等物种进行盐碱胁迫后保护酶同工酶的表达状况的研究,但有关盐胁迫下黑麦草SOD、POD、CAT同工酶的分布还未见报道。本试验采用聚丙烯酰胺凝胶电泳法,对黑麦草3种主要保护酶进行分离并建立电泳图谱,为后续开发利用黑麦草资源提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试材料为黑麦草(冬牧70)种子,由牡丹江园林种子公司提供。

1.2 试验方法

1.2.1 黑麦草幼苗的培养

黑麦草幼苗培养选择蛭石砂培法,选取籽粒饱满的黑麦草种子播于盛有蛭石的塑料盆中,每盆30枚种子。将塑料盆置于植物培养温室中,每2天浇灌一次1/2 Hoagland营养液。培养4周后进行胁迫处理。

1.2.2 胁迫处理

选择生长良好、长势一致的幼苗放置于遮光广口瓶中,用1/2 Hoagland营养液配制不同浓度的盐碱溶液,2种单盐(NaCl、NaHCO₃)处理浓度分别为100、200、300、400 mmol/L(A1、A2、A3、A4)和30、60、90、120 mmol/L(B1、B2、B3、B4),1种混合盐(NaCl+NaHCO₃,摩尔比1:1混合)处理浓度为

100、200、300、400 mmol/L(C1、C2、C3、C4),1/2 Hoagland营养液处理的幼苗作为对照组。为防止盐冲击现象发生,先从低浓度盐碱溶液培养,然后以每2天递增溶液浓度的方式逐渐加大盐碱浓度,直到达到最终设定的处理浓度。处理持续2周后开始测定,期间每2天17:00~18:00更换一次胁迫处理液。

1.2.3 粗酶液的制备

取各处理黑麦草幼苗于冰浴的研钵中,以(黑麦草:磷酸缓冲液)1:10的比例向研钵中加入磷酸缓冲液进行研磨,将研磨好的匀浆倒入1.5 mL离心管中,4 000 r/min,4℃离心20 min,上清液即为粗酶液。

1.2.4 电泳

试验采用聚丙烯酰胺垂直板凝胶(PAGE)不连续体系电泳的方法,以1/2 Hoagland营养液为对照组,对黑麦草植株中SOD、POD、CAT3种保护酶进行分离,SOD、POD、CAT染色方法参照参考文献[21-22]。

2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫下黑麦草SOD电泳图谱与分析

由表1可以看出,盐碱胁迫下黑麦草超氧化物歧化酶(SOD)分离出SOD₁~SOD₁₁共11条谱带,迁移率范围为0.08~0.82,其中对照组分离出8条谱带,A组中A1~A4分别分离出8、9、7、8条谱带;B组中B1~B4分别分离出8、8、9、7条谱带;C组中C1~C4分别分离出9、7、3、3条电泳谱带。

SOD₁是B组中浓度为60~120 mM和混合盐处理浓度为100 mM时的共有带,其SOD活性比较为:B2=B3>C1>B4。SOD₂~SOD₄是3种盐所有处理浓度的共有谱带,SOD活性表现为:A3>CK>A1>A4>A2; B2=CK>B3>B4>B1; C2=CK>C1>C4>C3。

表1 盐碱胁迫下黑麦草SOD酶电泳谱带迁移率

迁移率	谱带 编号	NaCl+NaHCO ₃				NaHCO ₃				NaCl				CK
		C4	C3	C2	C1	B4	B3	B2	B1	A4	A3	A2	A1	
0.08	SOD ₁₁													
0.13	SOD ₁₀													
0.27	SOD ₉													
0.32	SOD ₈													
0.41	SOD ₇													
0.45	SOD ₆													
0.48	SOD ₅													
0.7	SOD ₄													
0.74	SOD ₃													
0.78	SOD ₂													
0.82	SOD ₁													
谱带数		3	3	7	9	7	7	9	8	8	7	9	8	8

注:酶谱带从上到下为从负极到正极,酶谱带颜色越深和越宽表示酶带的活性越强,表中空白处表示无酶谱带分布,下同

SOD₅是对照组与A1、A2、A4共有谱带,SOD活性表现为:A2=A4>CK=A1。SOD₆是对照组与A1~A4、B1、B2、C1、C2共有谱带,SOD活性表现为:CK=A2=A3=A4>A1,CK=B2>B1,C组中SOD活性与对照组一致。SOD₇是对照组与A1~A4、B1~B4、C1、C2共有,且是SOD的主带区,SOD活性表现为:A3>CK=A1=A4>A2,B2>CK=B3>B1=B4,C组中SOD活性一致。SOD₈是对照组与A1~A4、B1~B4、C1共有谱带,其中:A1~A4、B1、B2的SOD活性与对照组一致,B3、B4、C1的SOD活性一致且高于CK、A1~A4、B1、B2。SOD₉是A1~A4、B1、B2的共有谱带,其SOD活性一致。SOD₁₀是B2、B3、B4、C1、C2所共有,其SOD活性一致。SOD₁₁是对照组与A2、B1、C1、C2的共有谱带,其SOD活性一致。

2.2 盐碱胁迫下黑麦草CAT电泳图谱与分析

由表2可见,盐碱胁迫下黑麦草过氧化氢酶

(CAT)分离出CAT₁~CAT₇共7条电泳谱带,迁移率范围为0.10~0.40,其中对照组分离出2条谱带,A组中A1~A4分别分离出2、2、2、1条谱带,B组中B1~B4分别分离出2、3、4、3条谱带;C组中C1~C4分别分离出4、3、2、4条电泳谱带。CAT₁和CAT₄是混合盐NaCl+NaHCO₃特有谱带,其余为共有谱带。CAT₁是B2、B3、B4、C1、C2、C4共有谱带,酶活性为:B4>B3=B2,C1>C2>C4。CAT₃是A4、B3、B4、C1~C4的共有谱带,CAT酶活性为:B3>B4,C1=C4>C2>C3。CAT₅是B2~B4、C1~C4的共有谱带,CAT活性为:B2=B3>B4,C1=C2>C3>C4。CAT₆是CK、A1~A3、B1~B3的共有谱带,且是CAT的主带区,酶活性为:CK=B2>B1>B3,C组中CAT酶活性与CK一致。CAT₇是CK、A1~A3、B1的共有谱带,其中A组中CAT活性与CK比较为:CK=A1>A2>A3。

表2 盐碱胁迫下黑麦草CAT电泳谱带迁移率

迁移率	谱带 编号	NaCl+NaHCO ₃				NaHCO ₃				NaCl				CK
		C4	C3	C2	C1	B4	B3	B2	B1	A4	A3	A2	A1	
0.10	CAT ₇													
0.18	CAT ₆													
0.24	CAT ₅													
0.28	CAT ₄													
0.31	CAT ₃													
0.37	CAT ₂													
0.40	CAT ₁													
谱带数		4	2	3	4	3	4	3	2	1	2	2	2	2

2.3 盐碱胁迫下黑麦草POD电泳图谱与分析

由表3可见,盐碱胁迫下黑麦草过氧化物酶(POD)分离出POD₁~POD₁₇共17条电泳谱带,迁移率范围为0.07~0.74,其中对照组分离出15条谱带,A组中A1~A4分别分离出15、13、10、12条谱带;B组中B1~B4分别分离出14、13、12、11条谱带;C组中C1~C4分别分离出12、11、10、10条电泳谱带。POD₁是A4特有谱带,POD₁₀是CK特有谱带,其余为共有谱带。POD₂和POD₃是3种盐胁迫下黑麦草POD的主带区,POD活性在整个电泳图谱中最强,且POD₃的活性高于POD₂。在POD₂中,POD活性为:A1=A2=A3=A4,B2>B1=B3=B4,C2=C4>C3>C1。在POD₃中,POD活性为:A1=A3=A4>A2,B2>B1>B3=B4,C2=C4>C3>C1。POD₄为对照组、A1、A2、B1~B4、C1、C2共有谱带,POD活性为:A1>A2,B1=B2=B4>B3,C1=C2=C3。POD₅为对照组、A1、A2、B1~B4、C1所共有,POD酶活性为:A1>A2,B1=B2=B4>B3。POD₆为对照组、A1、A2、B1、

B2共有谱带,其POD活性比较为:A1=B1=B2>CK>A2。POD₇为对照组、A1、A2、A4、B1~B4、C1~C4共有谱带,POD活性为:A1>A2>A4,B1=B2=B3=B4,C1=C2=C4>C3。POD₈是A1~A4、B1~B4、C1~C4共有谱带,POD活性为:A1=A2=A3>A4,B1=B2>B3=B4,C1>C2=C3=C4。POD₉为对照组、A1、A3、A4、B1所共有,其POD活性比较为:CK=A3>A1>B1>A4。POD₁₁为对照组与A1所共有,POD活性比较为:CK>A1。

POD₁₂、POD₁₃各处理组中POD活性表现为:A组、B组各处理POD活性一致,C组POD活性为:C2=C4>C1=C3。POD₁₄为CK、A1~A4、B1~B3、C1~C4共有谱带,POD活性为:A1=A2=A3=A4,B1=B2>B3,C2>C4>C1>C3。POD₁₅、POD₁₆、POD₁₇各处理组中POD活性变化一致,POD活性为:A1=A2=A3=A4;B2>B1=B4>B3;C2=C4>C1>C3;3种盐胁迫下POD₁₇活性总体比较为:B2=C2>CK=A1=A2=A3=A4=B1=B4>C1=B3=C4。

表3 盐碱胁迫下黑麦草 POD 电泳谱带迁移率

迁移率	谱带编号	NaCl+NaHCO ₃				NaHCO ₃				NaCl				CK
		C4	C3	C2	C1	B4	B3	B2	B1	A4	A3	A2	A1	
7	POD ₁₇	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.09	POD ₁₆	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.10	POD ₁₅	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.12	POD ₁₄	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.14	POD ₁₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.16	POD ₁₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.19	POD ₁₁	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.21	POD ₁₀	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.23	POD ₉	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.26	POD ₈	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.30	POD ₇	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.35	POD ₆	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.37	POD ₅	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.39	POD ₄	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.42	POD ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.46	POD ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.74	POD ₁	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
谱带数		10	10	11	12	11	12	13	14	12	10	13	15	15

3 讨论与结论

同工酶是植物体内最活跃的酶之一,可通过酶谱直接判断基因的存在及表达^[23]。逆境常引起基因变异使酶结构及其活性发生变化,导致同工酶酶谱发生变化^[24]。SOD的主要作用就是清除超氧化物,研究表明盐胁迫导致水稻幼苗SOD活性显著降低,并且这种降低在不同水稻品种间存在显著差异,对盐碱耐性较好的枸杞和白榆SOD活性随盐碱浓度升高而升高,但对盐碱耐性较差的丁香和樟子松SOD活性逐渐降低^[25],对罗布麻的研究发现,SOD活性随不同程度盐分胁迫强度的提高表现出波动性降低的变化趋势,且相邻盐浓度处理间具有明显差异^[26]。POD可清除植物体内SOD催化反应的产物H₂O₂,从而使需氧生物体免受H₂O₂的毒害。CAT主要分布于过氧化物酶体中,能有效降低植物体内的过氧化氢对细胞的氧化作用。

环境中的高浓度盐可诱导某些同工酶的产生,从而调整代谢,以适应盐胁迫环境下细胞内特殊的生化反应。本试验结果表明,3种抗氧化酶在黑麦草幼苗体中均有表达,但活性、主带区的分布以及特有带的分布存在明显差别。混合盐C2(200 mmol/L)处理组SOD酶活性高于CK,C3(300 mmol/L)、C4(400 mmol/L)胁迫效果更加明显,SOD₂~SOD₄是3种盐所有处理浓度的共有谱带,SOD₇是SOD的主带区,由此可见,随盐胁迫液浓度升高会出现酶活性也随之升高的现象;仅

NaHCO₃ B2处理(60 mmol/L)浓度下CAT酶活性等于CK,其他处理组酶活性均低于CK表现为不同程度的抑制,其中A4、B4、C3、C4抑制作用明显;POD酶同工酶条带均表现为下降的趋势,POD₂和POD₃是3种盐胁迫下黑麦草POD的主带区,活性在整个电泳图谱中最强,且POD₃的活性高于POD₂。说明盐胁迫使黑麦草积累大量H₂O₂,为了消除过多过氧化物造成的毒害,植物本身产生一些清除毒害的同工酶,以此来维持黑麦草幼苗的生长。当盐碱胁迫的浓度过高时,有些处理组酶活性呈现明显降低趋势,这可能是黑麦草应对逆境的一种生理适应机制。

参考文献:

- [1] 刘春英,孙学映,朱体超.不同黑麦草品种生产性能比较与优势品种筛选[J].草业学报,2014,23(4):39-48.
- [2] 徐青山,常杰,蒋跃平.菩提子/美人蕉-黑麦草人工湿地生态工程净化效果研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2005(5):561-566.
- [3] 任勇翔,杨春辉,孙军峰.冬小麦和黑麦草作为寒冷季节人工湿地栽培作物处理城市污水效果研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2012,44(5):714-719,735.
- [4] 徐胜,何兴元,陈玮.热锻炼对高羊茅(*Festuca arundinacea*)和多年生黑麦草(*Lolium perenne*)抗高温能力的影响[J].生态学报,2008(1):162-171.
- [5] 刘公社,张晶,于兴旺.国际牧草与草坪草育种新动向[J].草学,2019(3):76-80.
- [6] 赵秀芳,谢志远,张涛.我国盐碱地修复技术的现状与特点[J].环境卫生工程,2017,25(2):94-96.
- [7] 叶小丽.高温胁迫下多年生黑麦草生理生化特性研究[D].南昌:江西农业大学,2012.

(下转第70页)

- [2] Ramayo-Caldas Y, Mach N, Esteve-Codina A, et al. Liver transcriptome profile in pigs with extreme phenotypes of intramuscular fatty acid composition[J]. BMC Genomics, 2012, 13: 547.
- [3] Hunt M C, Yamada J, Maltais L J, et al. A revised nomenclature for mammalian acyl-CoA thioesterases/hydrolases[J]. Journal of Lipid Research, 2005, 46(9): 2029–2032.
- [4] Bekeova C, Anderson-Pullinger L, Boye K, et al. Multiple mitochondrial thioesterases have distinct tissue and substrate specificity and CoA regulation, suggesting unique functional roles[J]. Journal of Biology Chemistry, 2019, 294(50): 19034–19047.
- [5] Kirsanova E, Heringstad B, Lewandowska-Sabat A, et al. Identification of candidate genes affecting chronic subclinical mastitis in Norwegian Red cattle: combining genome-wide association study, topologically associated domains and pathway enrichment analysis[J]. Anim Genet, 2020, 51(1): 22–31.
- [6] Murata Y, Yamashiro T, Kessoku T, et al. Up-Regulated MicroRNA-27b Promotes Adipocyte Differentiation via Induction of Acyl-CoA Thioesterase 2 Expression[J]. Biomed Research International, 2019, 2019: 2916243.
- [7] 廖辉. *ADAMTS2* 和 *ADAMTS4* 基因对牛前体脂肪细胞分化及脂质沉积的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.
- [8] 于永生, 李兆华, 罗晓彤, 等. 松辽黑猪肌肉脂肪沉积相关基因的筛选[J]. 东北农业科学, 2016, 41(1): 91–94.
- [9] 胡成华, 张国梁, 于洪春, 等. 草原红牛导入丹麦红牛血的研究[J]. 东北农业科学, 2005, 30(2): 43–47.
- [10] 于洪春. 草原红牛产肉性能的观察[J]. 中国畜牧杂志, 1997(6): 30–31.
- [11] Zhang H M, Xia H L, Jiang H R, et al. Longissimus dorsi muscle transcriptomic analysis of Yunling and Chinese simmental cattle differing in intramuscular fat content and fatty acid composition[J]. Genome, 2018, 61(8): 549–558.
- [12] 黄兴, 柴志欣, 王会, 等. 西藏牦牛 *MyoD1* 基因多态性及与生长性状的关联性分析[J]. 西南农业学报, 2019, 32(2): 439–445.
- [13] 张娟, 母童, 蔡正云, 等. *UCP* 基因多态性及与黑安格斯牛生长性状的关联分析[J]. 农业生物技术学报, 2018, 26(7): 1195–1202.
- [14] Basoli V, Santaniello S, Cruciani S, et al. Melatonin and Vitamin D Interfere with the Adipogenic Fate of Adipose-Derived Stem Cells[J]. International Journal of Molecular Science, 2017, 18(5): 1464–1466.
- [15] Moffat C, Bhatia L, Nguyen T, et al. Acyl-CoA thioesterase-2 facilitates mitochondrial fatty acid oxidation in the liver[J]. Journal of Lipid Research, 2014, 55(12): 2458–2470.
- [16] Sun S S, Wu Y X, Cheng M L, et al. Experimental study of silybin-phospholipid complex intervention on amiodarone-induced fatty liver in mice[J]. Zhonghua Gan Zang Bing Za Zhi, 2019, 27(1): 45–50.

(责任编辑: 王昱)

(上接第65页)

- [8] Xian Q, Hu L, Chen H. Removal of nutrients and veterinary antibiotics from swine wastewater by a constructed macrophyte floating bed system[J]. Journal of Environmental Management, 2010, 91(12): 2657–2661.
- [9] 郭童天, 刘博文, 汤学友, 等. 干旱预处理对一年生黑麦草耐盐性的影响[J]. 草地学报, 2018, 26(2): 435–440.
- [10] 范燕. 黑麦草种子萌发、幼苗生长及建植耐盐性的比较研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [11] 刘璐, 张跃群, 王婧, 等. 重度盐胁迫下12个地被草种萌发期的耐盐性比较[J]. 草业科学, 2019, 36(11): 2806–2819.
- [12] 张磊, 侯云鹏, 王立春. 盐碱胁迫对植物的影响及提高植物耐盐碱性的方法[J]. 东北农业科学, 2018, 43(4): 11–16.
- [13] Kimberly A Green, Carla J Eaton, Matthew S. A homologue of the fungal tetraspanin Pls1 is required for *Epichloë festucae* expression formation and establishment of a mutualistic interaction with *Lolium perenne*[J]. Molecular Plant Pathology, 2019, 20(7): 961–975.
- [14] 郭园, 张玉霞, 于华荣, 等. 13个油菜品种苗期生长、生理指标比较及抗盐碱性分析[J]. 东北农业科学, 2016, 41(4): 32–36.
- [15] 邓小红, 姬拉拉, 王锐洁, 等. 红豆和白扁豆种子萌发和生长对盐胁迫的响应及其生理机制[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1218–1225.
- [16] 陈彬, 秦楚, 张喜斌. 盐胁迫下五种禾本科牧草幼苗生理生化变化研究[J]. 宁夏农林科技, 2016, 57(11): 11–13, 21.
- [17] 王静, 自红州, 李黄维, 等. 盐胁迫对短花针茅幼苗生长及抗氧化同工酶的影响[J]. 北方园艺, 2018(14): 77–82.
- [18] 李冉, 郭鑫, 王倩南, 等. 盐胁迫下三种柳枝稷生理特性及同工酶研究[J]. 中国草地学报, 2019, 41(6): 43–52.
- [19] 赵颖, 魏小红, 赫亚龙, 等. 混合盐碱胁迫对藜麦种子萌发和幼苗抗氧化特性的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(2): 156–167.
- [20] 隋益虎, 吴雪艳, 胡能兵, 等. NaCl胁迫下4种辣椒POD同工酶谱及活性分析[J]. 基因组学与应用生物学, 2018, 37(12): 5414–5420.
- [21] 陈毓荃. 生物化学实验方法和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 6.
- [22] 周国权, 巫光宏, 黄翠颜, 等. 聚丙烯酰胺凝胶电泳的快速脱色方法[J]. 植物生理学通讯, 2006(1): 95–97.
- [23] Chowdhury M A, Slinkard A E. Genetic diversity in grasspea (*Lathyrus sativus* L.) [J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2000, 47(2): 163–169.
- [24] Toyomasu T, Zenryozi A. On the application of isozyme electrophoresis to identification of strains in *Lentinus edodes*[J]. Mushroom Science, 1981, 11: 675–684.
- [25] 刘强, 王庆成, 王占武. 抗氧化酶活性作为植物抗盐性评价指标的有效性[J]. 广东农业科学, 2014, 41(24): 49–53.
- [26] 方婧雯, 邹燕, 刘志华. 盐胁迫对罗布麻种子萌发及生理特性的影响[J]. 作物杂志, 2018(4): 167–174.

(责任编辑: 王昱)