

# 表油菜素内酯对 NaCl 胁迫下马铃薯生长和块茎品质的影响

唐鑫华 孟欣 石忆 高红秀 曲自成 张浩 石瑛\*

(东北农业大学 农学院, 哈尔滨 150030)

**摘要** 为探究表油菜素内酯(EBR)对盐渍化土壤种植的马铃薯生长及块茎品质的影响,以‘尤金’、‘东农 310’和‘东农 312’3个马铃薯品种为试材,盆栽种植,在块茎形成期向土壤基质施加 NaCl 溶液,并对叶片喷施不同浓度(0.02 和 0.10 mg/L)表油菜素内酯,以不施加 NaCl 和不喷施 EBR 植株为对照(CK),每隔 14 d 测定叶片的 SOD 活性、MDA 含量、PSII 最大光化学量子产量( $F_v/F_m$ )和叶绿素相对含量(SPAD),成熟期测定产量和块茎品质等指标。结果表明,在 NaCl 胁迫处理下 3 个品种马铃薯植株叶片 SOD 活性、SPAD 和  $F_v/F_m$  均出现显著降低,MDA 含量显著升高;而喷施 EBR 后各指标变化相反。NaCl 胁迫处理后 3 个品种块茎中 Fe 含量较 CK 降低 22.97%~46.43%、K 含量较 CK 降低 34.84%~41.67%;而喷施 EBR 可提高 NaCl 处理植株块茎 Fe 含量 36.11%~163.66%、提高 K 含量 30.41%~257.61%。NaCl 胁迫处理后 3 个品种处理 A 的单株淀粉含量以及‘尤金’和‘东农 310’块茎干物质含量和淀粉含量较 CK 均显著下降,喷施 0.02 mg/L EBR 后 3 个品种单株淀粉含量较处理 A 提高 19.03%~27.85%。综上,喷施浓度为 0.02 mg/L EBR 可以显著降低土壤盐渍化对马铃薯生长和块茎品质的不利影响。

**关键词** 马铃薯; NaCl; EBR; 生长; 块茎

中图分类号 S532 文章编号 1007-4333(2022)12-0127-11 文献标志码 A

## Effects of epibrassinolide on growth and tuber quality of potato under NaCl stress

TANG Xinhua, MENG Xin, SHI Yi, GAO Hongxiu, QU Zicheng, ZHANG Hao, SHI Ying\*

(Agricultural College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract** In order to explore the effects of epibrassinosteroid (EBR) on the growth and tuber quality of potato planted in saline soil, three potato varieties ‘Youjin’, ‘Dongnong 310’ and ‘Dongnong 312’ were used as the research objects under potted planting condition. NaCl solution was applied to soil matrix at the tuber formation stage, and epibrassinolide with different concentrations (0.02 and 0.10 mg/L) was sprayed on the leaves, with no NaCl and no EBR treatment as CK. Then, leaf physiological indexes (SOD activity and MDA content), maximum photochemical efficiency of PSII ( $F_v/F_m$ ) and chlorophyll relative content (SPAD) of leaves were measured every fifteen days. Yield and tuber quality of potato were measured at maturity stage. The results showed that: The SOD activity, SPAD, and  $F_v/F_m$  of the leaves of the three potato varieties were significantly decreased and the MDA content was significantly increased under NaCl stress. The changes of each index were opposite after spraying EBR. Under NaCl stress, Fe content in tubers of the three varieties decreased by 22.97%–46.43% and K content decreased by 34.84%–41.67% compared with CK. Spraying EBR increased the Fe content in the tubers of plants under NaCl stress by 36.11%–163.66% and the K content by 30.41%–257.61%. Moreover, after NaCl stress treatment, the starch

收稿日期: 2021-12-30

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-09);国家留学基金项目(202006615017)

第一作者: 唐鑫华,高级实验师,主要从事马铃薯分子育种及生理研究,E-mail:tangxinhua821@sina.com

通讯作者: 石瑛,副研究员,主要从事马铃薯育种及栽培研究,E-mail:shiyineau@sina.com

quality per plant, dry matter content and starch content of ‘Youjin’ and ‘Dongnong 310’ tubers of treatment A were significantly lower than those of CK, and the starch quality per plant of the three varieties with 0.02 mg/L EBR was increased by 19.03% – 27.85% compared with that of treatment A. In conclusion, spraying 0.02 mg/L EBR could significantly reduce the adverse effects of soil salinization on the growth and tuber quality of potato.

**Keywords** potato; NaCl; EBR; growth; tuber

盐渍化土壤在世界范围分布很广,面积已达10亿 $\text{hm}^2$ ,由于全球气候变暖和农业生产方式等因素的影响盐渍化土壤面积仍在增加<sup>[1-2]</sup>。而我国盐碱地总面积达9 913万 $\text{hm}^2$ ,呈面积大、分布广和类型复杂的特点,是制约我国农业可持续发展的重要因素之一<sup>[3]</sup>。土壤含盐量在0.2%~0.5%即不利于作物的生长,含盐量超过0.6%将严重影响作物生长<sup>[4-5]</sup>。盐胁迫严重制约农作物生长,可显著影响作物种子的发芽时间、整齐度和活力<sup>[6-7]</sup>,其通过作用细胞分裂和伸长进而抑制细胞的生长,造成开花时间缩短和老化加速等,并导致作物营养发育缓慢和生殖发育受抑<sup>[8-9]</sup>;盐胁迫下作物细胞脂膜稳定性降低、活性氧积累增加、离子平衡打破,叶片光合作用下降<sup>[10-11]</sup>,并导致作物产量降低和品质下降<sup>[12-14]</sup>。

马铃薯是仅次于玉米、水稻和小麦的世界第四大粮食作物;我国已启动马铃薯主粮化战略,马铃薯将逐渐成为我国第四大主粮作物<sup>[15]</sup>。目前世界马铃薯平均单产为18.91 $\text{t}/\text{hm}^2$ ,而我国平均单产为15.41 $\text{t}/\text{hm}^2$ 仅为世界同期水平81.5%,较荷兰等马铃薯种植业强国差距很大<sup>[15-17]</sup>。马铃薯属于盐敏感型作物,盐胁迫造成马铃薯出苗率降低、生长缓慢、产量下降、品质降低<sup>[18-19]</sup>。

表油菜素内酯(Epibrassinolide, EBR)是人工合成的高活性油菜素内酯类似物,一种新型植物生长调节物质,同样具有调控植物生长和增强抗逆性的功能,能够提高作物单位面积产量和提升作物品质<sup>[20-21]</sup>。已有研究表明在盐碱胁迫下外源EBR可提高大豆、玉米和甜菜等抗氧化酶活性、降低活性氧的积累、增强幼苗耐盐碱胁迫的能力<sup>[22-24]</sup>。外源喷施EBR在一定程度上能缓解盐碱胁迫对作物生长的不利影响,抑制盐胁迫下叶片叶绿素含量和净光合速率下降幅度,避免植物受到严重的伤害<sup>[25-30]</sup>。目前,应用EBR缓解马铃薯盐害的研究鲜见报道。本研究以盆栽种植的马铃薯品种‘尤金’、‘东农310’和‘东农312’为研究材料,向基质施加NaCl模拟轻度土壤盐渍化,喷施EBR以期缓解NaCl胁迫

处理对马铃薯生长的影响,旨在对外源激素在作物抗逆响应中的功能进行评价,以期降低土壤盐渍化对马铃薯生产的影响提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及试验地点

盆栽试验马铃薯品种为早熟品种‘尤金’(出苗到成熟约70 d)、中晚熟品种‘东农310’和‘东农312’(出苗到成熟约90 d)<sup>[31-33]</sup>,种薯级别为原种1代。试验用表油菜素内酯(EBR, CAS:78821-43-9)生产于美国Amresco公司,纯度98%以上。盆栽试验地点在东北农业大学校内马铃薯盆栽场地。

### 1.2 试验设计

选取壮龄种薯、质量均匀,播种前20℃、散色光催芽15 d;2019年5月8日播种,室外通风网棚盆栽种植、每盆播种1粒整薯。盆栽所用盆规格为高26.0 cm、上部内径33.0 cm,土壤至盆上沿3.0 cm。黑钙土和草炭土按照体积比4:1均匀混合,土壤溶液的pH 6.58、裂解氮195.3 mg/kg、速效磷42.7 mg/kg、速效钾239.5 mg/kg、总铁1.172 mg/kg、有机质74.6 g/kg。基肥为尿素(N 460 g/kg)、磷酸二铵(N 180 g/kg,  $\text{P}_2\text{O}_5$  460 g/kg)和硫酸钾( $\text{K}_2\text{O}$  500 g/kg),用量分别为1.50、2.25和3.00 g/盆,播种时施入。使用土壤水分快速测定仪TZS-1K-G(杭州托普仪器有限公司)测定基质水分,人工浇灌,保持基质水分含量适当至各品种收获前10 d。

各品种选取长势一致的植株于6月28日进行试验,设置4个处理:处理A、B和C基质施加20 g/L NaCl溶液1.0 L(模拟基质轻度盐渍化)<sup>[18-19,34-35]</sup>,CK基质均匀浇灌1.0 L蒸馏水;同时,处理B和C植株叶片分别喷施0.02和0.10 mg/L EBR至叶片正反面湿润且不流淌,CK和处理A叶片喷施蒸馏水,具体用量见表1,每个品种的各处理为12盆。于处理前当日取样测定指标,6月28日记为第0天,处理后每隔14 d取样测定指标:7月13日(第15天)、7月28日(第30天)、8月12日(第45天);

并于 8 月 23 日收获‘尤金’、9 月 9 日收获‘东农 310’和‘东农 312’。

表 1 不同处理添加 NaCl 质量和喷施 EBR 浓度

Table 1 Supplemental amount of NaCl and EBR spraying concentration under different treatments

处理 Treatment	NaCl/(g/盆)	EBR 浓度/(mg/L) EBR concentration
CK	0	0
A	20	0
B	20	0.02
C	20	0.10

### 1.3 测定项目及方法

各处理于第 0、15、30 和 45 天的 7:00—11:00，选取植株最高分枝上部的第 3、4 片叶(每个品种、每个处理各取 3 株)，用 Tang 等<sup>[36-37]</sup>方法测定叶片 SOD 活性和 MDA 含量，用日本柯尼卡美能达公司 SPAD-502 叶绿素仪测定上、中和下部叶片的 SPAD，用德国 WALZ 公司 PAM-2500 叶绿素荧光仪测定叶片  $F_v/F_m$ ，用日本日立公司的 Z-2000 原子吸收分光光度计测定块茎的 Zn、Fe、Mn、Cu、K 矿物质元素含量<sup>[37]</sup>。于成熟期每个处理收获 6 株，清除块茎表面泥土等杂质，测定单株产量。将样品切成 1.5 cm×1.5 cm×1.5 cm 的小块，置于烘箱 105 ℃ 杀青，而后 80 ℃ 下加热干燥，至恒重为止<sup>[39]</sup>。

$$\text{淀粉含量(g/kg)} =$$

$$(\text{干物质含量} - 57.5) \times (1 - 0.015) \quad (1)$$

$$\text{单株淀粉含量(g)} = \text{淀粉含量} \times \text{单株产量} \quad (2)$$

式中：57.5 为干物质中纤维素、蛋白质和脂肪等含量，g/kg；0.015 为糖分所占比值。

### 1.4 数据分析处理

应用 Excel 2013 记录数据、SPSS Statistics 19 进行数据分析、GraphPad Prism 5 制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对叶片的 SOD 活性的影响

由表 2 可知，3 个品种马铃薯在 4 个取样期叶片的 SOD 活性均呈现“先升高后降低”的趋势，且处理间差异显著。处理 A 中‘尤金’叶片 SOD 活性在第 15、30 和 45 天分别较 CK 降低 10.93%、7.65%

和 26.80%；而处理 B 和 C 在第 15 d 分别较 CK 高 24.58% 和 36.56%，在第 45 天分别较 CK 高 674.96% 和 52.81%。处理 A 中‘东农 310’叶片 SOD 活性在第 15 和 45 天较 CK 分别低 6.93% 和 14.53%；而处理 B 在第 15 和 45 天分别比 CK 高 19.12% 和 155.70%。处理 A 中‘东农 312’叶片 SOD 活性在第 15、30 和 45 天分别比 CK 低 11.95%、22.82% 和 6.41%，而处理 B 在第 45 天比 CK 高 240.56%、处理 C 在第 15 和 45 天分别比 CK 高 7.35% 和 83.44%。综上，NaCl 处理后马铃薯叶片 SOD 活性下降，而喷施 EBR 可减缓叶片 SOD 活性的下降，0.02 mg/L EBR 效果更明显。

### 2.2 不同处理对叶片 MDA 含量的影响

由表 3 可知，3 个品种在取样期内叶片的 MDA 含量呈现逐渐升高的趋势。处理 A 中‘尤金’叶片 MDA 的含量在第 15、30、45 天分别较 CK 高 66.86%、77.09%、70.13%，而处理 B 在第 15、30、45 天分别比 CK 高 14.41%、29.64%、28.26%，处理 C 在第 30 和 45 天分别比 CK 高 79.36% 和 76.92%。NaCl 胁迫下，3 个品种处理 A、B、C 叶片的 MDA 含量较 CK 显著增加，但处理 B 的增幅较小。处理 A 中‘东农 310’叶片的 MDA 含量在第 15、30、45 天分别比 CK 高 13.73%、7.84%、11.79%，而处理 B 在第 15、30、45 天分别比 CK 低 18.30%、16.99%、26.24%，处理 C 在第 15 天比 CK 低 11.11%。处理 A 中‘东农 312’的叶片 MDA 含量在第 15 和 45 天分别较 CK 高 35.66% 和 81.85%，而处理 B 在第 30 天较 CK 低 28.02%、在第 45 天较 CK 高 41.94%，处理 C 在第 45 天较 CK 高 51.61%。综上，NaCl 胁迫造成马铃薯叶片的 MDA 含量上升，施用 EBR 可抑制 MDA 含量的升高，减缓 NaCl 胁迫对马铃薯叶片造成的伤害。

### 2.3 不同处理对叶片 SPAD 的影响

由表 4 可知，处理 A 中，3 个品种的叶片 SPAD 在第 15、30、45 天均低于 CK，其中‘尤金’叶片的 SPAD 在第 15、45 天分别较 CK 低 14.58%、8.73%，‘东农 310’处理 A 在第 15 天较 CK 低 5.95%，‘东农 312’处理 A 在第 15、30、45 天分别较 CK 低 9.79%、5.65%、7.03%。而 3 个品种处理 B 在第 15、30、45 天的 SPAD 均高于处理 A，其中处理 B 中‘尤金’在第 30、45 天分别较处理 A 高 26.68%、17.38%；‘东农 310’处理 B 在第 15、30 天比处理 A 高 15.03%、7.06%；‘东农 312’处理 B 在第 30 天较

处理 A 高 17.30%。综上,NaCl 处理引起马铃薯叶片 SPAD 降低,施用 EBR 可使 NaCl 胁迫下马铃薯

植株叶片 SPAD 升高,浓度为 0.02 mg/L EBR 效果更为显著。

表 2 不同处理马铃薯叶片 SOD 活性

Table 2 SOD activity of potato leaves under different treatments U/(g·min)

品种 Variety	处理 Treatment	测定时间 Time measured			
		第 0 天	第 15 天	第 30 天	第 45 天
尤金 Youjin	CK	1.812 a	2.954 c	14.649 a	0.623 c
	A	1.839 a	2.631 d	13.528 b	0.456 d
	B	1.956 a	3.680 b	12.050 c	4.828 a
	C	1.908 a	4.034 a	13.888 b	0.952 b
东农 310 Dongnong 310	CK	4.532 a	4.068 b	11.114 a	1.720 b
	A	4.423 a	3.786 c	11.035 a	1.470 c
	B	4.369 a	4.846 a	11.513 a	4.398 a
	C	4.518 a	4.336 ab	11.222 a	1.640 b
东农 312 Dongnong 312	CK	4.639 a	5.045 b	16.110 a	0.858 c
	A	4.456 a	4.447 c	12.434 b	0.803 d
	B	4.488 a	5.156 ab	12.844 b	2.922 a
	C	4.398 a	5.416 a	12.632 b	1.574 b

注:CK,处理 A,B 和 C,见表 1。采用单因素邓肯多重比较法;不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: CK, treatment A, B, C, in Table 1. Using single factor Duncan multiple comparison method; Different lowercase letters show significant differences at 0.05 level. The same below.

表 3 不同处理马铃薯叶片 MDA 含量

Table 3 MDA content in leaves of potato under different treatments mmol/g

品种 Variety	处理 Treatment	测定时间 Time measured			
		第 0 天	第 15 天	第 30 天	第 45 天
尤金 Youjin	CK	0.036 a	0.118 c	0.159 c	0.268 c
	A	0.041 a	0.197 a	0.281 a	0.456 a
	B	0.039 a	0.135 b	0.206 b	0.344 b
	C	0.038 a	0.120 bc	0.285 a	0.475 a
东农 310 Dongnong 310	CK	0.036 a	0.153 b	0.153 c	0.263 b
	处理 A	0.035 a	0.174 a	0.165 b	0.294 a
	处理 B	0.036 a	0.125 c	0.127 d	0.194 c
	处理 C	0.033 a	0.136 c	0.202 a	0.273 b
东农 312 Dongnong 312	CK	0.034 a	0.143 b	0.182 a	0.248 c
	处理 A	0.039 a	0.194 a	0.183 a	0.451 a
	处理 B	0.037 a	0.146 b	0.131 b	0.352 b
	处理 C	0.038 a	0.158 b	0.173 ab	0.376 b

表 4 不同处理下马铃薯叶片的 SPAD

Table 4 SPAD of potato leaves under different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	测定时间 Time measured			
		第 0 天	第 15 天	第 30 天	第 45 天
尤金 Youjin	CK	44.31 a	41.20 a	35.67 b	38.13 ab
	A	44.08 a	40.03 a	30.47 c	34.80 c
	B	44.56 a	39.60 a	38.60 a	40.85 a
	C	44.19 a	37.40 b	35.47 b	37.10 b
东农 310 Dongnong 310	CK	39.17 a	42.03 b	38.61 b	34.93 b
	A	39.38 a	39.53 c	38.40 b	34.89 b
	B	38.97 a	45.47 a	41.11 a	38.86 ab
	C	39.22 a	41.45 b	37.40 b	34.96 b
东农 312 Dongnong 312	CK	37.43 a	41.47 a	32.23 b	36.96 a
	A	37.56 a	37.41 b	30.41 c	34.36 b
	B	37.13 a	36.21 b	35.67 a	34.87 b
	C	37.33 a	37.76 b	27.63 d	31.93 c

#### 2.4 不同处理对马铃薯叶片的 $F_v/F_m$ 的影响

由表 5 可知,处理 A 中 3 个品种的叶片  $F_v/F_m$  在第 15、30 和 45 天均低于 CK;其中‘尤金’在第 15、30、45 天分别比 CK 低 5.96%、7.06%、4.74%;‘东农 310’在第 15 和 30 天较 CK 低 3.26%和 3.73%,‘东农 312’在第 45 天较 CK 低 2.25%。B 处理中 3 个品种的叶片  $F_v/F_m$  在第 15、30、45 天均高于处理 A;其中‘尤金’在第 15 和 30 天分别较处理 A 高 7.05% 和 10.26%,‘东农 310’在第 15、30、45 天分别较处理 A 高 8.70%、3.61%、5.55%,‘东农 312’在第 15 天比处理 A 高 3.74%。结果表明,NaCl 处理已对马铃薯植株造成非生物逆境胁迫,叶片  $F_v/F_m$  显著下降,施用 EBR 可缓解 NaCl 胁迫的不利影响,施用 0.02 mg/L EBR 可显著提高 NaCl 胁迫下马铃薯叶片的  $F_v/F_m$ 。

#### 2.5 不同处理对马铃薯块茎中矿质元素含量的影响

由表 6 可知,处理 A 中‘尤金’、‘东农 310’和‘东农 312’的块茎 Fe 含量分别比 CK 低 22.97%、46.43%和 25.53%,K 含量分别比 CK 低 35.60%、34.84%、41.67%。而喷施 EBR 后,处理 B 中块茎的 Fe 含量均高于 CK,处理 B、C 块茎的 Fe 含量均显著高于处理 A;处理 B、C 块茎的 K 含量高于处理 A,其中‘尤金’处理 C 比处理 A 高 116.17%,‘东农

310’处理 B、C 分别较处理 A 高 247.46%、257.61%,‘东农 312’处理 B、C 分别较处理 A 高 137.91%、107.14%。处理 A 中,3 个品种块茎的 Zn 含量均高于 CK,其中‘东农 310’和‘东农 312’较 CK 高 29.93%和 18.91%;处理 B、C 块茎的 Zn 含量均显著高于处理 A。3 个品种处理 A 的块茎 Mn 含量分别较 CK 高 44.20%、21.59%和 40.50%。综上,NaCl 胁迫下块茎的 Zn、Mn 含量增加,而 Fe、K 含量降低,施用 EBR 可显著提高 NaCl 胁迫下马铃薯块茎中 Fe 和 K 的含量。

#### 2.7 不同处理对单株产量和块茎品质的影响

由表 7 可知,处理 B 中,‘尤金’、‘东农 310’和‘东农 312’的单株产量分别比处理 A 高 26.19%、19.53%、7.69%;‘尤金’CK 的单株产量最高。3 个品种处理 A 的块茎干物质含量、淀粉含量和单株淀粉含量均显著低于 CK,而处理 B 的这 3 项指标均显著高于处理 A。在单株淀粉含量方面,‘尤金’、‘东农 310’、‘东农 312’处理 A 比 CK 分别下降 52.15%、32.48%、7.63%,而处理 B 比处理 A 分别提高 26.18%、19.03%、27.85%。综上,NaCl 胁迫下,块茎干物质含量、淀粉含量和单株淀粉含量均有所降低,而喷施适当浓度 EBR 可缓解盐胁迫对马铃薯块茎品质和产量的不利影响,能显著提高单株产量、块茎干物质含量、淀粉含量和单株淀粉含量。

表5 不同处理下马铃薯叶片的  $F_v/F_m$ Table 5  $F_v/F_m$  of potato leaves under different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	测定时间 Time measured			
		第0天	第15天	第30天	第45天
尤金 Youjin	CK	0.742 a	0.755 a	0.765 a	0.739 a
	A	0.745 a	0.710 b	0.711 b	0.704 b
	B	0.740 a	0.760 a	0.784 a	0.723 ab
	C	0.738 a	0.749 a	0.762 a	0.684 b
东农310 Dongnong 310	CK	0.763 a	0.737 b	0.777 a	0.741 ab
	A	0.768 a	0.713 c	0.748 b	0.721 b
	B	0.761 a	0.775 a	0.775 a	0.761 a
	C	0.759 a	0.745 b	0.718 c	0.734 b
东农312 Dongnong 312	CK	0.772 a	0.737 ab	0.769 a	0.756 a
	A	0.767 a	0.721 b	0.748 ab	0.739 b
	B	0.777 a	0.748 a	0.761 a	0.736 b
	C	0.771 a	0.723 b	0.726 b	0.745 ab

表6 不同处理下3个马铃薯品种的块茎矿质元素含量

Table 6 Mineral element contents in tubers of 3 potato varieties under different treatments  $\mu\text{g/g}$ 

品种 Variety	处理 Treatment	元素 Element				
		Zn	Fe	Mn	Cu	K
尤金 Youjin	CK	19.85 c	360.14 b	7.76 c	5.21 a	27 540.60 b
	A	20.91 c	277.42 c	11.19 ab	5.43 a	17 736.82 c
	B	26.45 b	460.62 a	13.32 a	5.23 a	20 130.52 bc
	C	33.46 a	332.05 b	9.99 b	5.39 a	38 342.05 a
东农310 Dongnong 310	CK	14.97 c	278.74 b	8.80 b	6.15 a	12 425.29 b
	A	19.45 b	149.31 c	10.70 a	6.20 a	8 095.93 c
	B	34.85 a	393.67 a	9.24 ab	6.31 a	28 129.93 a
	C	24.50 b	327.13 ab	8.67 b	6.15 a	28 951.58 a
东农312 Dongnong 312	CK	19.35 c	406.38 b	10.47 b	2.95 b	26 466.66 b
	A	23.01 b	302.63 c	14.71 a	4.75 a	15 438.08 c
	B	31.67 a	412.92 b	10.29 b	3.22 b	36 728.33 a
	C	28.47 ab	460.85 a	11.47 b	2.75 b	31 978.94 ab

表 7 不同处理下 3 个马铃薯品种的单株产量和块茎品质

Table 7 Yield per plant and tuber quality of 3 potato varieties under different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	单株产量/g Yield per plant	干物质含量/(g/kg) Dry matter content	淀粉含量/(g/kg) Starch content	单株淀粉含量/g Starch weight per plant
尤金 Youjin	CK	495.0 a	195 a	135.4 a	67.04 a
	A	352.1 c	150 b	91.1 b	32.08 c
	B	444.3 b	150 b	91.1 b	40.48 b
	C	398.8 bc	148 b	89.1 b	35.55 bc
东农 310 Dongnong 310	CK	450.0 c	248 a	187.4 a	84.35 a
	A	481.8 bc	178 b	118.2 b	56.95 c
	B	575.9 a	177 b	117.7 b	67.79 b
	C	511.9 b	192 ab	132.2 ab	67.70 b
东农 312 Dongnong 312	CK	373.6 ab	131 b	72.4 b	27.05 b
	A	358.9 b	128 b	69.4 b	24.92 c
	B	386.5 a	141 a	82.4 a	31.86 a
	C	320.3 c	143 a	84.2 a	26.97 bc

### 3 讨 论

#### 3.1 EBR 对于 NaCl 胁迫下马铃薯生理指标的影响

在盐胁迫下植物细胞的膜结构最先受到影响,盐胁迫会破坏细胞膜内外钠离子与钙离子的平衡、加速膜质过氧化、增加细胞膜通透性,导致膜系统受损<sup>[40-41]</sup>。MDA 是膜脂过氧化的主要产物,可反映植物细胞的脂质过氧化水平和生物膜损伤程度;SOD 是生物体内重要的抗氧化酶,能够清除氧自由基<sup>[21]</sup>。本研究中 NaCl 胁迫下 3 个品种处理 A 植株叶片的 MDA 含量较 CK 显著升高,表明植株遭受 NaCl 胁迫后导致处理 A 叶片细胞膜伤害程度增加、过氧化反应终产物(如 MDA)含量增加,而喷施 EBR 后 15 和 45 d 的处理 B 叶片的 SOD 含量均显著高于 CK 和处理 A,而处理 B 叶片的 MDA 含量显著低于 CK 和处理 A。因此,推测 EBR 通过提高抗氧化酶的活性(如 SOD)抑制盐胁迫下氧化基团的积累,从而提高了植株的耐盐性。

#### 3.2 EBR 对于 NaCl 胁迫下马铃薯 SPAD 和 $F_v/F_m$ 的影响

在盐胁迫下植物细胞膜质过氧化、膜系统受到破坏,将影响叶绿体类囊体膜的 PSI 和 PSII 复合体

结合叶绿素 a、b 的能力,可导致 SPAD 下降<sup>[42-43]</sup>;另一方面在盐胁迫下植株离子吸收和贮存的平衡被打破,可能导致叶绿素某些组成成分的含量下降(如铁离子参与叶绿素 a、b 的合成)<sup>[44-45]</sup>,造成 SPAD 降低。因此本研究 NaCl 胁迫下处理 A 植株的叶片 SPAD 显著低于 CK;而喷施 EBR 可以提高 SOD 的活性,从而清除由于质膜受损所产生的氧化基团,能够提高膜系统的稳定性,因此在处理 B 和 C 条件下 3 个马铃薯品种的 SPAD 较处理 A 显著提高。

$F_v/F_m$  能够反映 PS II 内光能转换效率,在逆境胁迫条件下该参数会显著下降<sup>[38]</sup>。NaCl 胁迫下 3 个品种处理 A 的植株叶片  $F_v/F_m$  均较 CK 显著降低,表明植株受到了非生物逆境胁迫,原因是当 PSI 和 PSII 受到损伤后叶绿体捕获光能的能力下降、并且 SPAD 的降低导致电子传递效率降低,造成  $F_v/F_m$  显著下降<sup>[42-43]</sup>。而 EBR 具有提高膜系统稳定性的功能,因此在喷施 EBR 后处理 B 植株叶片的  $F_v/F_m$  较处理 A 显著提高,降低了由于施加 NaCl 引起的非生物逆境胁迫的伤害程度,但处理 C (0.10 mg/L EBR)在缓解叶片  $F_v/F_m$  下降的作用方面不及处理 B(0.02 mg/L EBR)。

### 3.3 EBR 对于 NaCl 胁迫下马铃薯块茎品质和单株产量的影响

细胞内  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  浓度的平衡是保证植物在盐胁迫下进行正常生理代谢的关键<sup>[46]</sup>, James 等<sup>[41]</sup> 研究表明  $\text{K}^+$  在调节植物体内渗透压和酸碱平衡上起重要作用, 较高含量的  $\text{K}^+$  有助于维持较高的酶活性来抵御盐胁迫。本研究 NaCl 胁迫下 3 个品种马铃薯处理 A 植株成熟期块茎的 K 含量显著低于 CK, 而喷施 EBR 后处理 B 和 C 的块茎 K 含量升高且均显著高于处理 A, 推测外源 EBR 可以促进马铃薯对  $\text{K}^+$  的吸收和贮存, 通过提高马铃薯块茎 K 含量进而平衡  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  来抵御盐胁迫的伤害。在单株产量方面, ‘东农 310’ 和 ‘东农 312’ 处理 A 的单株产量较 CK 无显著变化, 这可能与盐胁迫的程度有关, 根据总含盐量划分试验中处理 A、B 和 C 基质属于轻度盐渍化土壤(施加 NaCl 后)<sup>[18-19, 34-35]</sup>, 但 3 个品种处理 A 的块茎干物质含量、淀粉含量和单株块茎淀粉含量均较 CK 显著下降, 在盐胁迫下 SPAD 和  $F_v/F_m$  显著降低, 说明在光反应阶段光能利用率和光能转化效率下降, 进而造成暗反应阶段有机物合成能力降低; 而喷施 EBR 后 3 个品种处理 B 的单株块茎淀粉含量均显著高于处理 A, 这与 SPAD 和  $F_v/F_m$  的变化较为一致。有研究表明, 植株生物积累量、SPAD 和净光合速率  $P_n$  三者间均呈正相关关系<sup>[47-48]</sup>, 而  $F_v/F_m$  可以反映植物受到的非生物逆境胁迫程度<sup>[38]</sup>, 本试验中喷施较低浓度 EBR (0.02 mg/L) 可提高 NaCl 胁迫下叶片 SPAD, 从而提高  $F_v/F_m$  和  $P_n$ , 因此减缓由于 NaCl 胁迫引起植株块茎淀粉含量积累的下降, 降低盐胁迫对单株块茎淀粉积累造成的不利影响。3 个品种中 ‘尤金’ (早熟品种) 盐胁迫后 (处理 A) 单株块茎淀粉质量降幅高于 ‘东农 310’ (中晚熟品种) 和 ‘东农 312’ (中晚熟品种), 这可能与品种的生育期和耐盐性有关, 尚有待进一步验证。

## 4 结 论

喷施 EBR 可显著减缓由 NaCl 胁迫造成的 ‘尤金’、‘东农 310’ 和 ‘东农 312’ 3 个马铃薯品种叶片 SOD 活性的下降、MDA 含量的升高, 并可显著提高生育后期叶片 SOD 活性, 显著提高 SPAD、减缓  $F_v/F_m$  下降。在块茎品质方面 NaCl 胁迫下植株块茎中 Zn、Mn 含量增加而 Fe、K 含量降低, 施用 EBR 可显著提高马铃薯块茎中 Fe 和 K 的含量。喷施

EBR 能显著提高 NaCl 胁迫下马铃薯的单株产量、块茎干物质含量、淀粉含量和单株淀粉含量。综上, 喷施浓度为 0.02 mg/L 的 EBR 能够显著缓解 NaCl 胁迫对马铃薯的生长和块茎品质的不利影响。

## 参考文献 References

- [1] 李建国, 濮励杰, 朱明, 张润森. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1233-1245  
Li J G, Pu L J, Zhu M, Zhang R S. The present situation and hou issues in the Salt-affected soil research [J]. *Acta Geographica sinica*, 2012, 67(9): 1233-1245 (in Chinese)
- [2] Lin X M, Wang Z, Li J S. Identifying the factors dominating the spatial distribution of water and salt in soil and cotton yield under arid environments of drip irrigation with different lateral lengths[J/OL]. *Agricultural Water Management*, [2021-05-01]. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106834
- [3] 刘云芬, 彭华, 王薇薇, 郑佳秋, 祖艳侠, 吴永成, 梅懿, 郭军. 植物耐盐性生理与分子机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(12): 30-36  
Liu Y F, Peng H, Wang W W, Zheng J Q, Zu Y X, Wu Y C, Mei Y, Guo J. Research progress on physiological and molecular mechanisms of plant salt tolerance [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(12): 30-36 (in Chinese)
- [4] 曾洪学, 王俊. 盐害生理与植物抗盐性[J]. 生物学通报, 2005, 40(9): 1-3  
Zeng H X, Wang J. Salt injury physiology and salt tolerance of plants [J]. *Bulletin of Biology*, 2005, 40(9): 1-3 (in Chinese)
- [5] Deinlein U, Stephan A B, Horie T, Luo W, Xu G H, Schroeder, J I. Plant salt-tolerance mechanisms[J]. *Trends in Plant Science*, 2014, 19(6): 371-379
- [6] 王文恩, 李颖, 苏农, 余文成. 盐胁迫对多花木蓝种子萌发的影响[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(2): 321-324  
Wang W E, Li Y, Su N, Yu W C. The effects of salt stress on seed germination of *Indigofera amblyantha* [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(2): 321-324 (in Chinese)
- [7] 蔺吉祥, 李晓宇, 唐佳红, 张兆军, 李卓琳, 高战武, 穆春生. 盐碱胁迫对小麦种子萌发、早期幼苗生长及  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  代谢的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(6): 1148-1152  
Lin J X, Li X Y, Tang J H, Zhang Z J, Li Z L, Gao Z W, Mu C S. Effects of salt and alkali stresses on seed germination, early seedling growth and the metabolize of  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  in shoots of Wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(6): 1148-1152 (in Chinese)
- [8] 刘莉. 盐胁迫下植物激素对水稻种子萌发及幼苗根系生长的调控机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018



- Liu L. The regulation and mechanism of phytohormone on rice seed germination and seedling root growth under salinity[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [9] 张谦, 祁虹, 冯国艺, 王树林, 李智峰, 王志忠, 林永增. 滨海盐碱地棉田土壤水盐动态变化规律及对棉花生长发育影响[J]. 河北农业大学学报, 2014, 37(1): 6-10
- Zhang Q, Qi H, Feng G Y, Wang S L, Li Z F, Wang Z Z, Lin Y Z. A study on variation of water and salinity and its influence on cotton growth and development in coastal saline fields[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2014, 37(1): 6-10 (in Chinese)
- [10] 魏国强, 朱祝军, 方学智, 李娟, 程俊. NaCl 胁迫对不同品种黄瓜幼苗生长、叶绿素荧光特性和活性氧代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(11): 1754-1759
- Wei G Q, Zhu Z J, Fang X Z, Li J, Cheng J. The effects of NaCl stress on plant growth, chlorophyll fluorescence characteristics and active oxygen metabolism in seedling of two cucumber cultivars[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(11): 1754-1759 (in Chinese)
- [11] 单长卷, 杨天佑. 谷胱甘肽对盐胁迫下玉米幼苗抗氧化特性和光合性能的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(2): 185-191
- Shan C J, Yang T Y. Effects of glutathione on antioxidant and photosynthetic properties of maize seedlings under salt stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(2): 185-191 (in Chinese)
- [12] 李红彦, 裴孝伯, 王跃. 硫酸钠盐胁迫处理对番茄产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(4): 191-194
- Li H Y, Pei X B, Wang Y. Effect of  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  treatment on yield and quality of tomato[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(4): 191-194 (in Chinese)
- [13] Shahzad B, Rehman A, Tanveer M, Wang L, Park S K, Ali A. Salt stress in Brassica: Effects, tolerance mechanisms, and management[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2022, 41(2): 781-795
- [14] van Straten G, Bruning B, de Vos A C, González A P, Rozema J, van Bodegom P M. Estimating cultivar-specific salt tolerance model parameters from multi-annual field tests for identification of salt tolerant potato cultivars [J/OL]. *Agricultural Water Management*, [2021-06-30]. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106902
- [15] 黄凤玲, 张琳, 李先德, 蔡典雄. 中国马铃薯产业发展现状及对策[J]. 农业展望, 2017, 13(1): 25-31
- Huang F L, Zhang L, Li X D, Cai D X. Development situation and countermeasures of China's potato industry[J]. *Agricultural Outlook*, 2017, 13(1): 25-31 (in Chinese)
- [16] 徐建飞, 金黎平. 马铃薯遗传育种研究: 现状与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(6): 990-1015
- Xu J F, Jin L P. Advances and perspectives in research of potato genetics and breeding[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(6): 990-1015 (in Chinese)
- [17] 刘洋, 高明杰, 何威明, 张晴, 罗其友. 世界马铃薯生产发展基本态势及特点[J]. 中国农学通报, 2014, 30(20): 78-86
- Liu Y, Gao M J, He W M, Zhang Q, Luo Q Y. Analysis on the basic trend and characteristics of world potatoes production[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(20): 78-86 (in Chinese)
- [18] 王新伟, 徐龙臣, 田中艳, 滕伟丽, 孙彦良, 李霄白. 马铃薯高淀粉资源田间抗盐鉴定[J]. 中国蔬菜, 1999(1): 25-28
- Wang X W, Xu L C, Tian Z Y, Teng W L, Sun Y L, Li X B. Testing for salinity tolerance of high starch potato genetic resources[J]. *China Vegetables*, 1999(1): 25-28 (in Chinese)
- [19] 李青, 秦玉芝, 王万兴, 胡新喜, 熊兴耀. 马铃薯盐胁迫耐受性评价方法[C]// 马铃薯产业与精准扶贫. 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2017: 329-335
- Li Q, Qin Y Z, Wang W X, Hu X X, Xiong X Y. Evaluation method for salt stress tolerance of potato [C]. In: *Potato Industry and Targeted Poverty Alleviation*. Harbin: Harbin Map Press, 2017: 329-335 (in Chinese)
- [20] 李赞堂, 王士银, 姜雯宇, 张帅, 张少斌, 徐江. 穗分化期外施 24-表油菜素内酯 (EBR) 促进水稻源、库及籽粒灌浆的生理机制[J]. 作物学报, 2018, 44(4): 581-590
- Li Z T, Wang S Y, Jiang W Y, Zhang S, Zhang S B, Xu J. Physiological mechanisms of promoting source, sink, and grain filling by 24-Epibrassinolide (EBR) applied at panicle initiation stage of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(4): 581-590 (in Chinese)
- [21] 唐鑫华, 曲自成, 张浩, 魏峭嵘, 张丽莉, 石瑛. 块茎形成期外施表油菜素内酯对马铃薯生理和产量的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(9): 1855-1863
- Tang X H, Qu Z C, Zhang H, Wei Q R, Zhang L L, Shi Y. Effect of physiology and yield by spraying ebr during potato tuber formation stage[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(9): 1855-1863 (in Chinese)
- [22] 吴杨, 高慧纯, 张必弦, 张海玲, 王全伟, 刘鑫磊, 栾晓燕, 马岩松. 24-表油菜素内酯对盐碱胁迫下大豆生育、生理及细胞超微结构的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(5): 811-821
- Wu Y, Gao H C, Zhang B X, Zhang H L, Wang Q W, Liu X L, Luan X Y, Ma Y S. Effects of 24-Brassinolide on the fertility, physiological characteristics and cell ultra-structure of Soybean under saline-alkali stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(5): 811-821 (in Chinese)
- [23] Kaya C, Aydemir S, Akram N A, Ashraf M. Epibrassinolide application regulates some key physio-biochemical attributes as well as oxidative defense system in maize plants grown under

- saline stress[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2018, 37(4): 1244-1257
- [24] 李彩凤, 刘丹, 邹春雷, 刘磊, 武沛然, 杨芳芳, 王彬, 王玉波. 盐碱胁迫下喷施 BR 对甜菜光系统 II 和氮代谢关键酶的影响[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(8): 39-47  
Li C F, Liu D, Zou C L, Liu L, Wu P R, Yang F F, Wang B, Wang Y B. Effect of spraying brassinolide (BR) on PS II and key enzymes of nitrogen metabolism in sugar beet under saline-alkali stress [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2018, 49(8): 39-47 (in Chinese)
- [25] 刘强, 王庆成, 王占武, 周晓梅. 外源油菜素内酯对苍耳盐碱胁迫的缓解效应[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(10): 34-37  
Liu Q, Wang Q C, Wang Z W, Zhou X M. Amelioration of Salt-alkaline stress by exogenously applied brassinolide in *Xanthium sibiricum* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, 42(10): 34-37 (in Chinese)
- [26] Wani A S, Ahmad A, Hayat S, Tahir I. Epibrassinolide and proline alleviate the photosynthetic and yield inhibition under salt stress by acting on antioxidant system in mustard[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 135: 385-394
- [27] Wang B L, Zhang J L, Xia X Z, Zhang W H. Ameliorative effect of brassinosteroid and ethylene on germination of cucumber seeds in the presence of sodium chloride[J]. *Plant Growth Regulation*, 2011, 65(2): 407-413
- [28] Khalid A, Aftab F. Effect of exogenous application of 24-epibrassinolide on growth, protein contents, and antioxidant enzyme activities of in vitro-grown *Solanum tuberosum* L under salt stress[J]. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 2016, 52(1): 81-91
- [29] Kolomeichuk L V, Danilova E D, Khripach V A, Zhabinsky V N, Kuznetsov V V. Ability of lactone- and ketone-containing brassinosteroids to induce priming in rapeseed plants to salt stress[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2021, 68(3): 499-509
- [30] Rattan A, Kapoor D, Kapoor N, Bhardwaj R, Sharma A. Brassinosteroids regulate functional components of antioxidative defense system in salt stressed maize seedlings[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2020, 39(4): 1465-1475
- [31] 张春强, 赵爱菊, 彭绍峰, 王胜亮, 王卉. 马铃薯尤金丰栽培技术[J]. 中国马铃薯, 2006, 20(5): 309-310  
Zhang C Q, Zhao A J, Peng S F, Wang S L, Wang H. High-yield cultivation techniques of potato Eugene [J]. *Chinese Potato Journal*, 2006, 20(5): 309-310 (in Chinese)
- [32] 中锋. 东北农业大学选育出高淀粉马铃薯新品种[J]. 农业工程, 2018, 8(8): 7  
Zhong F. New high starch potato varieties bred by Northeast Agricultural University[J]. *Agricultural Engineering*, 2018, 8(8): 7 (in Chinese)
- [33] 庄振涛. 马铃薯品种东农 312 高产栽培技术[J]. 种子世界, 2017(4): 43  
Zhuang Z T. High-yield cultivation techniques of potato variety Dongnong 312 [J]. *Seed World*, 2017(4): 43 (in Chinese)
- [34] 张光辉, 边延辉, 母成波. 黑龙江省土壤盐渍化现状分析及防治措施[J]. 水利科技与经济, 2007, 13(12): 926-929  
Zhang G H, Bian Y H, Mu C B. Analysis on the present situation of soil salinization in Heilongjiang Province[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2007, 13(12): 926-929 (in Chinese)
- [35] 黄绍文, 高伟, 唐继伟, 李春花. 我国主要菜区耕层土壤盐分总量及离子组成[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 965-977  
Huang S W, Gao W, Tang J W, Li C H. Total salt content and ion composition in tillage layer of soils in the main vegetable production regions of China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4): 965-977 (in Chinese)
- [36] Tang X H, Zou D T, Zhang L, Yang C P, Jiang T B. Difference between ferritin genes overexpressing in transgenic tobacco[J]. *Genetics and Molecular Research*, 2014, 13(2): 3176-3185
- [37] 唐鑫华, 姜廷波, 高红秀, 王敬国, 邹德堂. 烟草铁蛋白基因 *NtFer1* 对梗稻遗传转化及其基因功能研究[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(4): 73-78  
Tang X H, Jiang T B, Gao H X, Wang J G, Zou D T. Research on gene function and japonica genetic transformation of tobacco ferritin gene *NtFer1* [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2016, 47(4): 73-78 (in Chinese)
- [38] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, 34(4): 444-448  
Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 34(4): 444-448 (in Chinese)
- [39] 张永成, 田丰. 马铃薯试验研究方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007  
Zhang Y C, Tian F. *Research Methods of Potato Experiment* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007 (in Chinese)
- [40] 李晓雅, 赵翠珠, 程小军, 贾庆利, 李长圣, 刘明喆, Chaofu Lu, 张猛. 盐胁迫对亚麻荠幼苗生理生化指标的影响[J]. 西北农业学报, 2015, 24(4): 76-83  
Li X Y, Zhao C Z, Cheng X J, Jia Q L, Li C S, Liu M Z, Lu C F, Zhang M. Effects of salt stress on physiological and biochemical indexes of *Camelina sativa* seedlings [J]. *Acta*

- Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2015, 24(4): 76-83 (in Chinese)
- [41] James R A, Blake C, Byrt C S, Munns R. Major genes for Na<sup>+</sup> exclusion, Nax1 and Nax2 (wheat HKT1;4 and HKT1;5), decrease Na<sup>+</sup> accumulation in bread wheat leaves under saline and waterlogged conditions[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(8): 2939-2947
- [42] Büchel C. Evolution and function of light harvesting proteins[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2015, 172: 62-75
- [43] Pan X W, Ma J, Su X D, Cao P, Chang W R, Liu Z F, Zhang X Z, Li M. Structure of the maize photosystem I super complex with light-harvesting complexes I and II[J]. *Science*, 2018, 360(6393): 1109-1113
- [44] Tran Le Linh, 马海洋, 同延安, 路永莉, 来源, 刘芬, 陈毓君, 林文. 猕猴桃黄化病营养诊断与土壤养分相关性的研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2012(6): 41-44
- Linh T, Ma H Y, Tong Y A, Lu Y L, Lai Y, Liu F, Chen Y J, Lin W. Nutrients diagnosis of kiwi fruit chlorosis and study on relativity of soil nutrients[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(6): 41-44 (in Chinese)
- [45] 黄宗安, 徐坚, 史建磊, 苏世闻, 王燕. 缺铁胁迫对温州盘菜幼苗叶片光合特性和抗氧化酶活性的影响[J]. *浙江农业学报*, 2014, 26(6): 1495-1500
- Huang Z A, Xu J, Shi J L, Su S W, Wang Y. Effects of Fe-deficiency on the photosynthetic characteristics and the activities of antioxidant enzymes in seedling leaves of *Brassica rapa* L[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2014, 26(6): 1495-1500 (in Chinese)
- [46] 郭建荣, 王宝山. NaCl 处理对盐地碱蓬开花及 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 含量的影响[J]. *植物生理学报*, 2014, 50(6): 861-866
- Guo J R, Wang B S. Effects of NaCl treatments on flower number, Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> contents of *Suaeda salsa* [J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(6): 861-866 (in Chinese)
- [47] 唐鑫华, 王堡槐, 马佳, 李威, 张丽莉, 石瑛. 不同遮光处理对马铃薯光合作用和产量的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(2): 46-56
- Tang X H, Wang B H, Ma J, Li W, Zhang L L, Shi Y. Effects of different shading treatments on photosynthesis and yield of potato[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(2): 46-56 (in Chinese)
- [48] 王文静, 麻冬梅, 赵丽娟, 苏立娜, 李嘉文. 紫花苜蓿幼苗光合荧光特性对盐分胁迫的响应[J]. *农业与技术*, 2021, 41(20): 1-8
- Wang W J, Ma D M, Zhao L J, Su L N, Li J W. Response of photosynthetic fluorescence characteristics of alfalfa seedlings to salt stress[J]. *Agriculture and Technology*, 2021, 41(20): 1-8 (in Chinese)

责任编辑：吕晓梅