

# 外源水杨酸对连作马铃薯生长发育 及抗性生理的影响

回振龙<sup>1,2</sup>, 王 蒂<sup>1,3</sup>, 李宗国<sup>4</sup>, 李朝周<sup>1,2</sup>, 李旭鹏<sup>4</sup>, 张俊莲<sup>1,3</sup>

(1. 甘肃省作物遗传改良和种质创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070;

4. 甘肃农垦条山集团, 甘肃 白银 730400)

**摘 要:** 探讨了不同浓度外源水杨酸处理对连作马铃薯幼苗生长发育、耐连作障碍、抗氧化能力以及块茎营养的影响。结果表明:5 年连作导致马铃薯幼苗叶片中叶绿素含量、净光合速率、细胞膜稳定指数、渗透调节物质含量、抗氧化剂含量、抗氧化酶活性显著下降,块茎产量和硬度降低,块茎淀粉、Vc、可溶性蛋白含量下降,叶片 MDA 含量、活性氧水平显著增加,植株生长发育受到显著抑制;在施用外源水杨酸处理后,马铃薯幼苗的相对含水量增高,叶绿素含量、净光合速率、根系活力和细胞膜稳定指数增强,生长得到促进,植物叶片内渗透调节物质含量、抗氧化剂含量、抗氧化酶活性提高,块茎产量、硬度以及块茎淀粉、Vc、可溶性蛋白含量增高,叶片 MDA 含量、活性氧水平显著降低;比较不同浓度的外源水杨酸处理,以  $20 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  对促进马铃薯连作幼苗生长发育及缓解连作伤害效果最佳,其中对于连作 5 年的马铃薯, $30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  外源水杨酸处理相比于对照块茎产量相对增加 64.4%,而叶片净光合速率相对增加 287.0%。可见,适宜浓度的外源水杨酸处理显著减轻了连作障碍造成的伤害,促进了马铃薯植株的生长发育,提高了马铃薯块茎的产量,并改善了块茎的营养与品质。

**关键词:** 马铃薯;水杨酸;连作;生长发育;抗性

中图分类号: S532.01 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)04-0001-08

## Influences of exogenous salicylic acid on growth and resistance physiology of continuous cropping potato

HUI Zhen-long<sup>1,2</sup>, WANG Di<sup>1,3</sup>, LI Zong-guo<sup>4</sup>, LI Chao-zhou<sup>1,2</sup>, LI Xu-peng<sup>4</sup>, ZHANG Jun-lian<sup>1,3</sup>

(1. Gansu Key Laboratory of Crop Genetics & Germplasm Enhancement, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

3. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

4. Gansu Agricultural Reclamation Group, Baiyin, Gansu 730400, China)

**Abstract:** The experiment was conducted to investigate the influences of exogenous salicylic acid (SA) on seedling growth, resistance to continuous cropping obstacles, oxidation resistance and tuber nutrition of both continuous and discontinuous cropping potato. The results indicated that 5 years of continuous cropping induced significant decrease in chlorophyll content, net photosynthetic rate, cell membrane stability index, osmoregulation substance content, antioxidant content, antioxidant enzyme activities, tuber yield, tuber hardness, and the contents of starch, Vc and soluble protein in tubers, significant increase in the contents of MDA and reactive oxygen species in leaves, and significant inhibition in plant growth of potato. However, after being treated by exogenous SA, the relative water content of potato seedlings were increased, the chlorophyll content, net photosynthetic rate, root activity and cell membrane stability index were enhanced, the growth of plants was promoted, the osmoregulation substance content, antioxidant content and antioxidative enzyme activities in leaves were improved, the tuber yield, tuber hardness and the contents of starch, Vc and soluble protein were raised, while the contents of MDA and reactive oxygen species were decreased significantly. As for the

收稿日期: 2013-09-08

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAD06B03); 国家马铃薯产业技术体系(CARS-10-P18); 甘肃省科技重大专项(1102NKDM025); 甘肃省农牧厅项目(GNSW-2012-21)

作者简介: 回振龙(1988—), 男, 辽宁黑山人, 硕士, 主要从事作物逆境生理的研究。E-mail: 632748242@qq.com。

通信作者: 张俊莲(1961—), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事植物遗传育种和栽培生理等研究。E-mail: zhangjl@gsau.edu.cn。

treatments of exogenous SA, the concentrations of  $20 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  were better than other concentrations in promoting the growth of potato seedlings and resistance to continuous cropping obstacles. For potato with 5 years continuous cropping, the treatment of  $30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  exogenous SA increased the tuber yield by 64.4% and net photosynthetic rate in leaves by 287.0% compared with the control. It is concluded that proper concentration of exogenous SA can relieve the damage caused by continuous cropping obstacles, promote the growth and development of potato plants, raise the tuber yield, and improve the nutrition and quality of tubers.

**Keywords:** potato; salicylic acid; continuous cropping; growth and development; resistance

马铃薯因可利用价值高,产业链长,产量和经济效益显著,其需求量不断增加<sup>[1-2]</sup>。正是由于马铃薯作为一种高产的粮食作物和经济作物,在我国的栽培面积也是呈逐年上升的趋势<sup>[3]</sup>。世界人口每年急剧增加,可利用的土地面积在日益减少,与水稻、小麦、玉米并称世界四大粮食作物的马铃薯正面临着轮作倒茬困难的现状,已出现连作障碍这一限制马铃薯产业发展的严重问题<sup>[4-5]</sup>。

在同一块地里连续种植同一种作物(或同一科作物)即为连作。即使在正常管理情况下,连作后也会导致作物的生育状态变差,从而引发产量降低和品质变劣等现象,由此造成了农业可持续发展中急需解决的瓶颈问题——作物连作障碍<sup>[6-7]</sup>。国内外对连作障碍的研究主要集中在水稻、茄子、玉米和部分中药材(如地黄、人参)以及连作与杂草的关系<sup>[8]</sup>,以及连作与土壤肥料的关系<sup>[9]</sup>等方面,对马铃薯连作障碍与抗连作具体措施的研究还少有报道。

水杨酸(Salicylic acid, SA)是植物体内普遍存在的内源信号分子之一,它既是植物体内产生的一种小分子酚类物质,也是植物组织中一种天然的活性物质<sup>[10]</sup>。水杨酸是苯丙氨酸代谢途径的产物,属于肉桂酸的衍生物, Raffaele 在 1838 年首先从柳树皮中提取出水杨酸后,它便被广泛地用于植物抗病的研究中, Raskin 认为水杨酸是一种新的激素<sup>[11]</sup>,

它能诱导植物产生许多生理性状,如刺激马铃薯块茎的形成<sup>[12]</sup>、刺激植物开花<sup>[13]</sup>、调节气孔功能和诱导植物系统抗病性<sup>[14-15]</sup>等,并可提高植物的抗逆性<sup>[16-17]</sup>。目前对 SA 的研究主要集中在植物的抗旱<sup>[18]</sup>、抗寒<sup>[19]</sup>、抗热<sup>[20]</sup>、抗盐<sup>[21]</sup>和抗重金属<sup>[22]</sup>等方面,然而关于水杨酸对马铃薯连作障碍中植株生长发育和抗性生理的研究还少见系统报导。

本试验以连作和非连作的马铃薯为研究对象,把水杨酸应用到马铃薯的栽培中去,探讨了通过外源喷施水杨酸后对马铃薯植株的生长发育、抗性生理及块茎品质变化的影响,旨在进一步系统了解水杨酸对马铃薯连作障碍的调控机制,为减轻连作障碍对我国马铃薯产业可持续发展的限制以及提高马铃薯产量、品质,为马铃薯连作的栽培与管理技术提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

土样采于甘肃省景泰县条山集团马铃薯种植基地( $37^{\circ}11'N$ ,  $104^{\circ}03'E$ ),海拔 1 631 m,土壤类型为灰钙土。选择种植年限分别为 0、5 a 的大田土,0 a 为近 2 a 未种植过马铃薯的土壤(前茬种植玉米)。试验用 0 a 土和马铃薯连作 5 a 土的土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 连作 5 年和非连作土壤理化性质的比较

Table 1 Soil physical and chemical properties under 5 years continuous cropping and discontinuous cropping

年限 Duration /a	pH 值 pH value	容重 Bulk density /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	含盐量 Salt content /( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	碱解氮 Alkali - hydrolyzable N /( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效磷 Available P /( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效钾 Available K /( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	有机质 Organic matter /( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
0(CK)	$8.23 \pm 0.021a$	$1.289 \pm 0.001b$	$1.237 \pm 0.049a$	$29.07 \pm 0.404b$	$23.90 \pm 0.700a$	$117.27 \pm 3.573a$	$12.47 \pm 0.473a$
5	$7.29 \pm 0.025b$	$1.336 \pm 0.001a$	$3.940 \pm 0.056b$	$69.57 \pm 0.451a$	$19.47 \pm 0.839b$	$101.17 \pm 3.166b$	$9.67 \pm 0.551b$

注:同列标不同字母者为差异显著( $P < 0.05$ ),下同

Note: Different small letters in same column mean significant differences at 0.05 probability level. The same below.

### 1.2 供试材料

普通农用马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)品种陇薯 6 号。

### 1.3 试验设计

试验材料培养采用盆栽方式,于 2012 年 5 月盆内分别放入上述非连作土和连作土。盆内各栽种含一个顶芽的马铃薯块茎。待出苗后,将上述两种土

中生长的马铃薯幼苗均分成五份,在幼苗叶正面和叶背面分别喷施不同浓度水杨酸溶液(0、10、20、30  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ),一次喷施量以叶片开始滴水为止,每隔 10 天喷施一次,一共喷施 3 次,每个处理 3 次重复。

#### 1.4 测定指标与方法

##### 1.4.1 形态、生长发育指标的测定

株高:收获前 5~7 d 测定,株高以植株茎最高部位距土面的高度为准,用直尺测量;茎粗:以植株与土面的交界处地上茎直径代表,用游标卡尺测量;地上茎分枝数:收获时统计;匍匐茎数量:收获后统计匍匐茎的数量;根长:用直尺测量 5 根最长根长度,取平均值。根茎叶组织含水量:收获后即测量,参照张永成和田丰的方法<sup>[23]</sup>。根茎叶含水量、根系活力及植株地上部分干重、地下部分干重在连作水杨酸第 3 次处理 15 d 后测定。

1.4.2 生理指标的测定 水杨酸第三次喷施 10 d 后,取马铃薯幼苗叶片进行各项生理指标的测定。叶绿素含量:乙醇提取法<sup>[24]</sup>;净光合速率:采用美国便携式 LI-6400XT 光合-荧光仪进行;丙二醛(MDA)含量:硫代巴比妥酸法<sup>[24]</sup>;细胞膜稳定指数(MSI):采用 Sairam 等<sup>[25]</sup>的方法;脯氨酸含量:茚三酮显色法<sup>[24]</sup>;可溶性糖含量:蒽酮显色法<sup>[24]</sup>;过氧化氢酶(CAT)活性:紫外吸收法<sup>[24]</sup>;超氧化物歧化酶(SOD)活性:分光光度法,以抑制氮蓝四唑(NBT)光

化还原一半的酶量为一个酶活力单位<sup>[24]</sup>;超氧阴离子( $\text{O}_2^-$ )产生速率:羟胺氧化法<sup>[26]</sup>;过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )产生速率:林植芳等<sup>[27]</sup>的方法;根系活力:TTC 法<sup>[24]</sup>。

1.4.3 块茎的测定 块茎产量:收获后用电子天平称量,取平均值;淀粉含量:碘比色法<sup>[28]</sup>;还原糖含量:3,5-二硝基水杨酸比色法<sup>[29]</sup>;维生素 C(Vc)含量:碘化钾萃取分光光度法<sup>[30]</sup>;可溶性蛋白含量:考马斯亮蓝 G-250 染色法<sup>[24]</sup>。

1.4.4 数据处理 各项实验重复 3~5 次,数据采用 EXCEL 和 SPSS 17.0 统计分析软件进行相关数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 水杨酸对连作和非连作马铃薯幼苗形态和生长发育的影响

连作马铃薯植株的株高、茎粗、地上茎分枝数、匍匐茎数、根长的生长发育状况均不如在非连作土中生长的马铃薯。经过喷施水杨酸后,非连作的马铃薯的形态和生长发育均得到提高,其中以水杨酸浓度为 20.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 30.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理效果最好;连作的马铃薯经水杨酸喷施后,各指标也均有改善,其中以浓度为 30.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理效果最佳,而 50.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水杨酸则协同连作障碍加重了对植株的伤害(表 2)。

表 2 水杨酸对连作和非连作马铃薯幼苗形态和生长发育的影响

Table 2 Influences of salicylic acid on morphology and growth of potato seedlings under continuous cropping and discontinuous cropping

年限 Duration /a	水杨酸溶液浓度 SA concentration / $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	株高 Plant height /cm	茎粗 Stem diameter /cm	地上茎分枝数 Branch number of aerial stem	匍匐茎数 Number of procumbent stems	根长 Root length /cm
0(CK)	0	37.19 ± 0.797c	0.58 ± 0.038d	9.33 ± 0.577cd	7.67 ± 1.155	7.90 ± 0.265c
	10.0	38.26 ± 0.726bc	0.59 ± 0.053d	10.67 ± 0.577c	9.33 ± 0.577	8.87 ± 0.306b
	20.0	42.30 ± 0.971a	1.13 ± 0.072a	13.67 ± 1.155a	11.33 ± 1.155	10.70 ± 0.458a
	30.0	42.37 ± 0.902a	1.12 ± 0.026a	12.33 ± 0.577b	13.67 ± 0.577	10.20 ± 0.625a
	50.0	37.2 ± 0.217c	0.58 ± 0.004d	10.33 ± 0.577c	8.33 ± 0.577	8.23 ± 0.404b
5	0	30.35 ± 0.525f	0.57 ± 0.020d	5.67 ± 0.577f	4.33 ± 0.577	5.10 ± 0.700e
	10.0	33.14 ± 0.401e	0.61 ± 0.009d	6.67 ± 0.577e	5.33 ± 0.577	6.17 ± 0.379d
	20.0	35.09 ± 0.419d	0.80 ± 0.007c	8.00 ± 1.000d	7.67 ± 0.577	6.80 ± 0.173d
	30.0	39.33 ± 0.592b	1.04 ± 0.056b	12.00 ± 1.000b	10.67 ± 1.155	7.33 ± 0.451c
	50.0	28.54 ± 0.539g	0.49 ± 0.005e	5.33 ± 0.577f	3.67 ± 0.577	4.47 ± 0.473f

连作使马铃薯根系活力降低,致使根茎叶的含水量下降(表 3),进一步导致幼苗叶片叶绿素含量和光合作用下降(图 1,表 4),而光合作用固定有机物能力减弱后,植株地上和地下部干重减少(表 3)。在非连作土壤中,植株施用不同浓度水杨酸溶液后,

以水杨酸浓度为 20.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 30.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理效果最好,而在连作土壤中,则以 30.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水杨酸处理浓度效果最显著,提高了植株的保水性与光合作用,增加了根系吸收养分的能力。

表 3 水杨酸对连作和非连作马铃薯根茎叶组织含水量、地上部分干重、地下部分干重及根系活力的影响

Table 3 Influences of salicylic acid on water content in plant tissues, dry weight of root and shoot, and root vigor of potato under continuous cropping and discontinuous cropping

年限 Duration /a	水杨酸溶液浓度 SA concentration /( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )	根组织含水量 Water content of roots /%	地上茎组织含水量 Water content of aerial stems /%	叶片组织含水量 Water content of leaves /%	地上部干重 Shoot dry weight /g	地下部干重 Root dry weight /g	根系活力 Root vigor /( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )
0(CK)	0	80.51 ± 1.595c	68.89 ± 4.259c	83.40 ± 1.393e	9.27 ± 0.230e	48.31 ± 0.716d	90.53 ± 1.594e
	10.0	81.13 ± 4.959b	69.84 ± 1.562b	85.55 ± 2.222c	9.73 ± 0.235d	52.99 ± 0.640c	106.44 ± 2.532d
	20.0	85.40 ± 4.471a	74.54 ± 1.573a	88.74 ± 0.941a	12.05 ± 0.549a	79.18 ± 1.018a	147.05 ± 7.158a
	30.0	85.81 ± 3.831a	74.64 ± 2.953a	86.45 ± 2.916b	11.48 ± 0.269b	71.13 ± 0.764ab	133.13 ± 3.291b
	50.0	80.67 ± 2.425b	69.93 ± 1.881b	84.47 ± 1.457d	9.50 ± 0.055de	50.91 ± 0.420cd	98.23 ± 2.596e
5	0	74.72 ± 2.086e	61.65 ± 1.492e	80.07 ± 2.595f	8.51 ± 0.043gh	40.65 ± 0.455e	63.94 ± 3.195
	10.0	76.14 ± 5.896d	65.09 ± 1.573f	81.85 ± 0.918ef	8.78 ± 0.081g	44.18 ± 0.224de	81.93 ± 5.798f
	20.0	76.46 ± 4.669d	67.44 ± 2.008d	82.98 ± 1.141e	9.07 ± 0.053f	50.46 ± 0.687cd	97.09 ± 2.179e
	30.0	80.20 ± 5.501c	70.07 ± 2.978b	85.45 ± 2.146c	10.00 ± 0.110c	66.05 ± 0.526b	121.51 ± 1.758c
	50.0	70.46 ± 3.355f	59.71 ± 2.275g	78.13 ± 1.640g	8.22 ± 0.091h	35.30 ± 0.645f	53.88 ± 1.925g

表 4 水杨酸对连作和非连作马铃薯幼苗光合作用的影响

Table 4 Influences of salicylic acid on photosynthesis of potato seedlings under continuous cropping and discontinuous cropping

年限 Duration /a	水杨酸溶液浓度 SA concentration /( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )	净光合速率 Net photosynthetic rate /( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	气孔导度 Stomatal conductance /( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 Intercellular $\text{CO}_2$ concentration /( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	蒸腾速率 Transpiration rate /( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
0(CK)	0	14.62 ± 0.229d	0.22 ± 0.073c	265.48 ± 9.549f	4.64 ± 0.596e
	10.0	17.05 ± 0.891c	0.29 ± 0.043b	312.42 ± 15.370b	8.92 ± 2.516c
	20.0	21.13 ± 1.923a	0.41 ± 0.120a	325.51 ± 7.204a	11.67 ± 1.216a
	30.0	18.81 ± 0.317b	0.30 ± 0.091b	306.82 ± 6.504c	10.22 ± 2.502b
	50.0	14.87 ± 0.595d	0.23 ± 0.044c	291.85 ± 16.403d	6.33 ± 0.952d
5	0	4.53 ± 0.773g	0.04 ± 0.006g	238.10 ± 16.075h	1.50 ± 0.518g
	10.0	6.38 ± 0.259f	0.06 ± 0.004f	257.40 ± 6.043g	1.58 ± 0.058g
	20.0	9.60 ± 0.139e	0.08 ± 0.016e	266.87 ± 9.617f	2.38 ± 0.374f
	30.0	17.53 ± 0.681c	0.12 ± 0.016d	285.70 ± 5.171e	4.20 ± 0.780e
	50.0	3.27 ± 0.401h	0.03 ± 0.004g	207.93 ± 1.609i	0.73 ± 0.126h

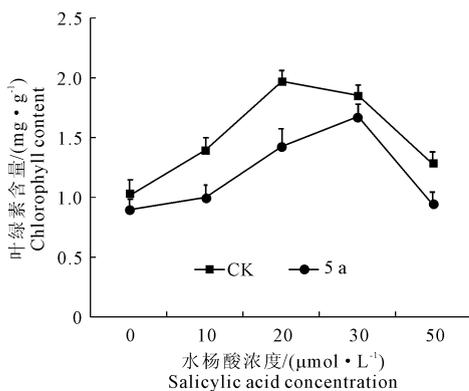


图 1 水杨酸对连作和非连作马铃薯幼苗叶片叶绿素含量的影响

Fig. 1 Influences of salicylic acid on chlorophyll content in leaves of potato seedlings under continuous cropping and discontinuous cropping

## 2.2 水杨酸对连作和非连作马铃薯幼苗叶片膜保护系统及膜透性的影响

连作后马铃薯幼苗叶片的脯氨酸、可溶性糖和谷胱甘肽含量显著降低(图 2C ~ D, 图 3C), 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和谷胱甘肽还原酶(GR)活性也显著下降(图 3A, B, D), 而叶片中  $\text{O}_2^-$  和  $\text{H}_2\text{O}_2$  产生速率和 MDA 含量显著升高, 膜稳定指数显著下降(图 2A ~ B, 图 3E ~ F)。20.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 30.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的水杨酸浓度均可提高非连作土中马铃薯幼苗叶片内渗透调节物质含量, 增强膜保护系统功能, 减少活性氧对植株的伤害, 而在连作土中尤以水杨酸浓度为 30.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  效果最佳。

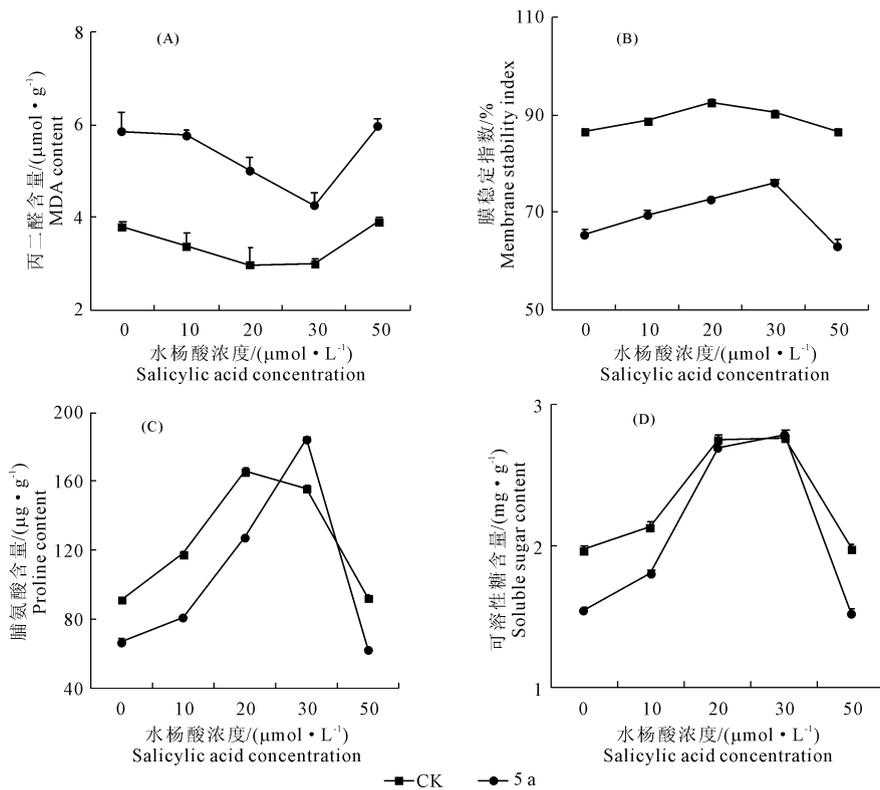


图2 水杨酸对连作和非连作马铃薯幼苗叶片丙二醛、膜稳定指数和渗透调节物质含量的影响

Fig.2 Influences of salicylic acid on MDA content, membrane stability index and osmoregulation substances in leaves of potato seedlings under continuous cropping and discontinuous cropping

### 2.3 水杨酸对连作和非连作马铃薯产量和块茎品质的影响

连作使得马铃薯产量大幅度下降(图4A),细胞组织结构发生改变,淀粉含量减少(图5A),致使块茎硬度降低(图4B),最终导致薯块品质变劣(图5B~D)。而喷施水杨酸溶液后,提高了马铃薯产量和改善了品质,在非连作土中表现为 $20.0\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30.0\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水杨酸浓度效果显著,连作土中 $30.0\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水杨酸浓度效果最优。

## 3 讨论

随着马铃薯产业的发展和集约化经营,我国马铃薯种植面积逐年加大,马铃薯连作已十分普遍,马铃薯连作导致了土壤氮、磷、钾比例失衡,土壤酸化以及土壤孔隙度变小,容重和含盐量增大(表1)。

叶绿素是一类植物体内与光合作用有关的重要色素,其含量变化不仅反映植物遭受到一定程度的胁迫,也直接影响光合效率和光合产物的累积。连作导致马铃薯幼苗叶片中叶绿素含量的下降(图1),降低了植株的保水性以及光合利用率和光合产

物的累积(表3,表4),生长发育受到抑制(表2),而经过喷施水杨酸后,马铃薯幼苗植株的含水量增高,根系活力和叶绿素含量也得到提高,植株的光合作用能力增强,促进了生长。在非连作土中以水杨酸浓度为 $20.0\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30.0\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理最好,连作土中则以 $30.0\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的浓度效果最显著,而 $50.0\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水杨酸则协同连作逆境加重了对植株的伤害,说明适宜浓度的水杨酸对正常生长及受到连作胁迫的植株都具有一定的积极作用。

丙二醛(MDA)是植物体内自由基作用于细胞内脂质的过氧化的产物,会引起蛋白质、核酸等生命大分子的交联聚合,具有细胞毒性,其累积量是反映植物遭受逆境伤害程度的重要指标。本研究表明连作会导致MDA含量的增加(图2A),加重脂质过氧化的程度,降低了细胞膜稳定指数(图2B)和渗透调节物质含量(图2C~D),而一定浓度的水杨酸处理后抑制了连作马铃薯幼苗叶片中MDA含量的上升,提高了植株的膜稳定指数并增加了脯氨酸和可溶性糖的含量,这对增强马铃薯幼苗抵御连作逆境的能力有着非常重要的意义。

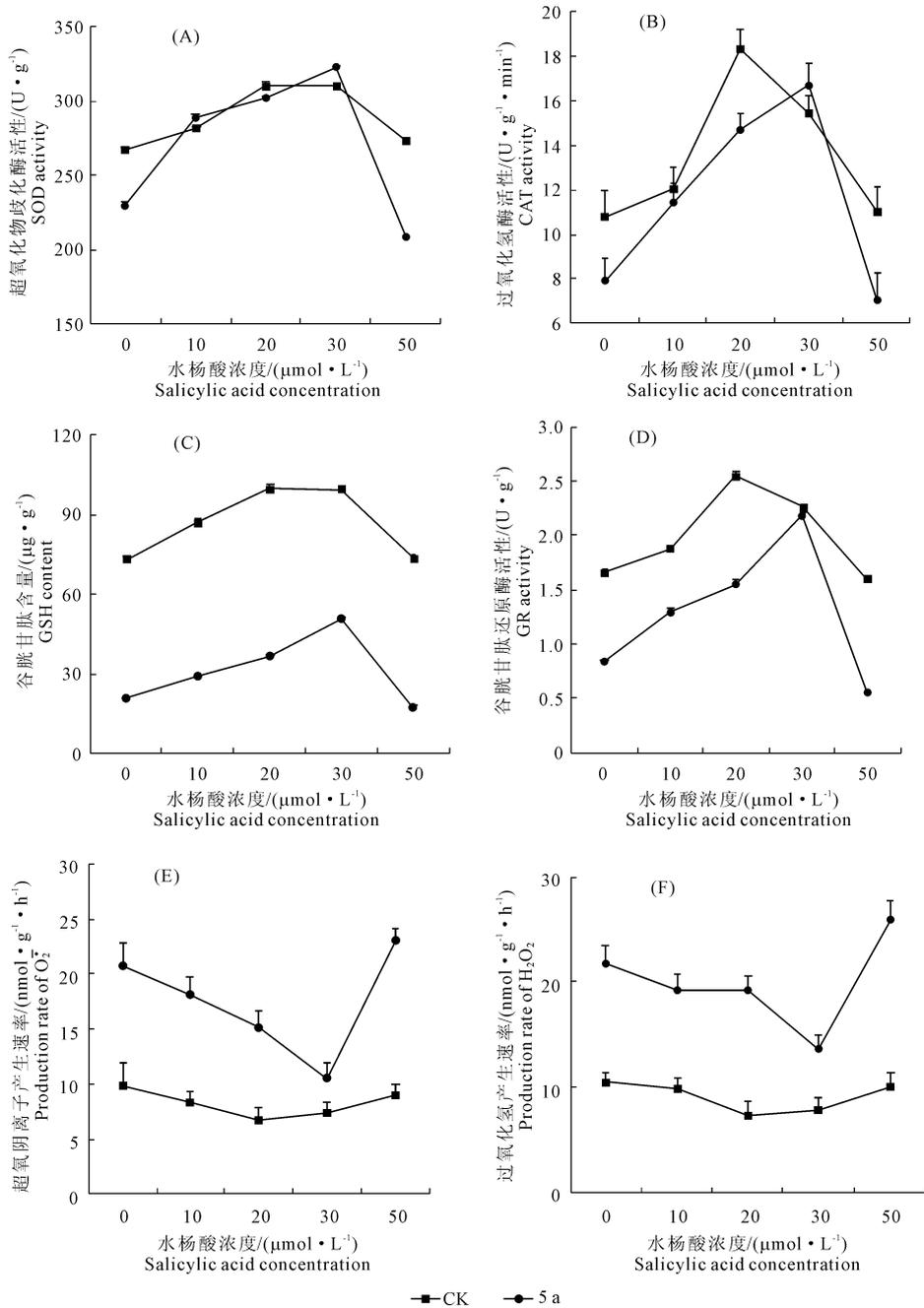


图 3 水杨酸对连作和非连作马铃薯幼苗叶片抗氧化酶活性和活性氧产生速率的影响

Fig.3 Influences of salicylic acid on activities of antioxidative enzymes and production rate of reactive oxygen species in leaves of potato seedlings under continuous cropping and discontinuous cropping

在逆境胁迫下,植株体内的超氧阴离子自由基和过氧化氢等活性氧类发生积累,导致细胞损伤甚至死亡。而在植物整体的进化过程中,形成了一套较为完善的抗氧化系统来抵抗自由基,这个系统包括抗氧化酶和非酶类抗氧化剂<sup>[31]</sup>。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽还原酶(GR)和谷胱甘肽(GSH)是植物细胞内的重要保护酶和抗氧化剂,他们能与其它抗氧化酶和抗氧化物质协同作用,共同直接或间接防御活性氧及自由基对细胞

膜系统的伤害,将超氧阴离子和  $\text{H}_2\text{O}_2$  转化为  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{O}_2$ <sup>[32-34]</sup>。本文的研究结果表明,连作降低了抗氧化系统的抵抗能力(图 3A~D),使得活性氧发生了累积(图 3E~F),而活性氧的累积会导致氧化胁迫,对细胞膜和许多生物大分子造成破坏<sup>[35-36]</sup>。一定浓度的水杨酸处理相对提高了连作和非连作土壤中马铃薯植株的 SOD、CAT 和 GR 活性以及 GSH 含量,降低了活性氧的水平,对提高植物的抗氧化能力发挥着积极的作用。

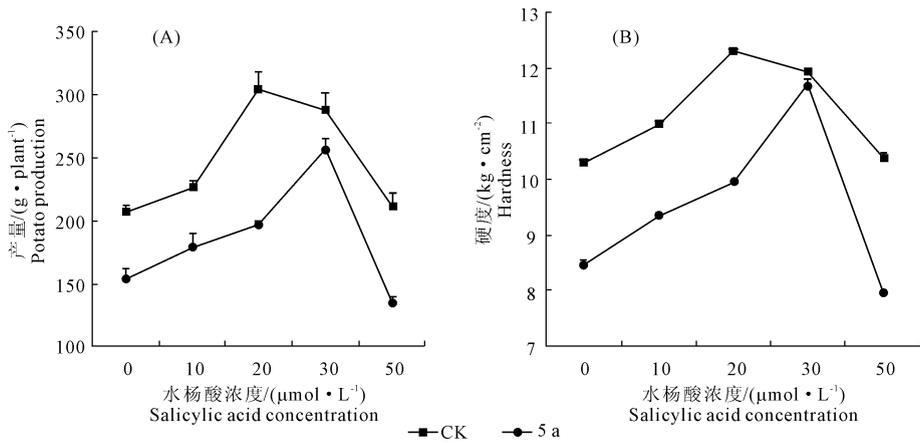


图4 水杨酸对连作和非连作马铃薯产量和硬度的影响

Fig.4 Influences of salicylic acid on output and hardness of potato tubers under continuous cropping and discontinuous cropping

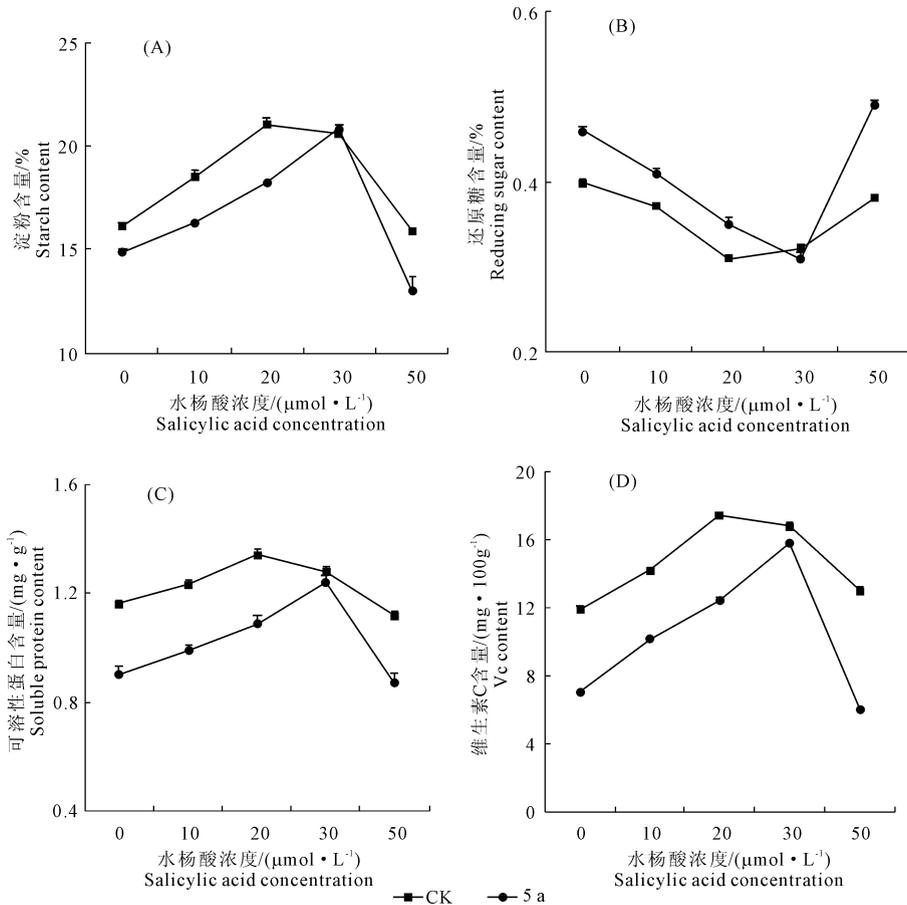


图5 水杨酸对连作和非连作马铃薯块茎品质的影响

Fig.5 Influences of salicylic acid on tuber quality of potato under continuous cropping and discontinuous cropping

还原糖指可被氧化充当还原剂的糖,还原糖含量过高会使油炸马铃薯薯片或薯条颜色变为褐色,甚至变为黑色,影响其经济价值<sup>[37]</sup>,而块茎中维生素(Vc)含量也是判别马铃薯品质好坏的重要指标之一<sup>[38]</sup>,连作使得马铃薯块茎中产量、淀粉、可溶性蛋白和Vc含量下降,还原性糖含量增高(图4A,图5A~D),喷施水杨酸后块茎产量、淀粉、可溶性蛋白

和Vc含量均有较大幅度提升,还原性糖含量下降。新鲜马铃薯的硬度决定了烘烤和切片质量,同时较坚硬的马铃薯受摩擦影响也较小,连作使马铃薯块茎硬度下降(图4B),而一定浓度的水杨酸处理后块茎硬度有所提高。可见一定浓度的水杨酸不仅可以提高马铃薯的产量,还相对提高了块茎的品质和硬度,说明水杨酸作为苯丙氨酸代谢的产物,不仅可以

影响马铃薯植株的生长发育,还影响到植株体内一系列物质代谢合成等。

总之,水杨酸处理促进了连作马铃薯的生长发育,增强了植株的防御性反应和抗胁迫能力,提高了块茎产量和营养,对马铃薯连作障碍造成的胁迫具有一定的积极作用。其中在非连作土中,20.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 30.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水杨酸溶液处理效果均较显著,而在连作土中,则以 30.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水杨酸溶液处理效果最显著。所以综合不同浓度外源水杨酸在连作与非连作土中对马铃薯生长发育及块茎产量的影响,以 30.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水杨酸溶液处理效果最优。

#### 参考文献:

- [1] 连 勇. 马铃薯脱毒种薯生产技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000: 11-2.
- [2] 裴国平, 王 蒂, 张俊莲, 等. 连作马铃薯对抗性酶及生物学特性变化的研究[J]. 湖南农业科学, 2010, (11): 34-37.
- [3] 王淑兰, 丁虎银, 柴忠良. 马铃薯连作障碍机理与防治措施试验研究[J]. 内蒙古农业科技, 2010, (5): 38-39.
- [4] 杜 茜, 卢 迪, 马 琨. 马铃薯连作对土壤微生物群落结构和功能的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(7): 1252-1256.
- [5] 裴国平, 王 蒂, 张俊莲. 马铃薯连作障碍产生的原因与防治措施[J]. 广东农业科学, 2010, (6): 30-32.
- [6] 顾美英, 徐万里, 茆 军, 等. 新疆绿洲农田不同连作年限棉花根际土壤微生物群落多样性[J]. 生态学报, 2012, 32(10): 3031-3040.
- [7] 檀国印, 杨志玲, 袁志林, 等. 药用植物连作障碍及其防治途径研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 197-204.
- [8] Murphy C E, Lemerle D. Continuous cropping systems and weed selection[J]. Euphytica, 2006, 148: 61-73.
- [9] 蔡红光, 米国华, 张 秀, 等. 不同施肥方式对东北黑土春玉米连作体系土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 89-97.
- [10] An Chuanfu, Mou Zhonglin. Salicylic acid and its function in plant immunity[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2011, 53(6): 412-428.
- [11] Raskin I. Salicylate, a new plant hormone[J]. Plant physiologist, 1992, 99(3): 799-803.
- [12] Kaihara S, Watanake K, Takimoto A. Flower inducing effect of benzoyl and salicylic acid on various strains of *Lemna paucicostata* and *Lemna minor*[J]. Plant Cell Physiol, 1981, 22: 819-825.
- [13] Koda Y, Takahashi K, Kikuta Y. Potato tuber inducing activities of salicylic acid and related compounds[J]. Plant Growth Regul, 1992, 11: 215-219.
- [14] Gaffney T, Friedrich L, Vernooij B, et al. Requirement of salicylic acid for the induction of systemic acquired resistance[J]. Science, 1993, 261: 754-756.
- [15] Rai V K, Sharma S S, Sharma S. Reversal of ABA induced stomatal closure by phenolic compounds[J]. Exp Bot, 1986, 37: 129-134.
- [16] Wu W, Ding Y, Wei W, et al. Salicylic acid-mediated elicitation of tomato defence against infection by potato purple top phytoplasma[J]. Annals of Applied Biology, 2012, 161(1): 36-45.
- [17] Delaney T P, Uknes S, Vernooij B, et al. A central role of salicylic acid in plant disease resistance[J]. Science, 1994, 266(18): 1247-1250.
- [18] 姜中珠, 陈祥伟. 水杨酸对灌木幼苗抗旱性的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 166-169.
- [19] 杨 楠, 刘培培, 白小梅, 等. 脱落酸、水杨酸和钙对黄瓜幼苗抗冷性的诱导效应[J]. 西北农业学报, 2012, 21(8): 164-170.
- [20] 王文举, 李小伟, 王振平, 等. 水杨酸对缓解红地球葡萄高温胁迫效应的研究[J]. 农业科学研究, 2008, 29(4): 13-15.
- [21] 李秀霞, 翟登攀, 崔 志, 等. 水杨酸对 NaCl 胁迫下水稻种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2003, 21(1): 49-51.
- [22] 池春玉. 喷施水杨酸缓解镉对黑麦草毒害作用的研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(19): 39-41.
- [23] 张永成, 田 丰. 马铃薯实验研究方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 190-191.
- [24] 邹 琦. 植物生理学实验指导[M]. 中国农业出版社, 2000: 72-75, 111-112, 129-130, 161-165, 168-169, 173-174.
- [25] Sairam R K, Siiukla D S, Saxena D C, et al. Stress induced injury and antioxidant enzymes in relation to drought tolerance in wheat genotypes[J]. Biologia plantarum, 1998, 40(3): 357-364.
- [26] 王爱国, 罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺的定量关系[J]. 植物生理通讯, 1990, (6): 55-57.
- [27] 林植芳, 李双顺, 林桂珠, 等. 衰老叶片和叶绿体中  $\text{H}_2\text{O}_2$  的累积与膜脂过氧化化的关系[J]. 植物生理学报, 1988, 14(1): 16-22.
- [28] 郝再彬, 苍 晶, 徐 仲, 等. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨大学出版社, 2004: 101-108.
- [29] 梅文泉, 隋启君, 仵 注, 等. 马铃薯块茎中还原糖测定的一种方法[J]. 云南农业科技, 2003, (3): 23-24.
- [30] 李向荣, 方 晓. 果蔬与饮品中 Vc 的碘化钾萃取分光光度测定[J]. 浙江农业大学学报, 1994, 20(5): 522-524.
- [31] Gill SS, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. Plant Physiol Biochem, 2010, 48: 909-930.
- [32] Jaleel CA, Riadh K, Gopi R, et al. Antioxidant defense responses: physiological plasticity in higher plants under abiotic constraints[J]. Acta Physiol Plant, 2009, 31: 427-436.
- [33] Miller G, Shulaev V, Mittler R. Reactive oxygen signaling and abiotic stress[J]. Physiol Plant, 2008, 133: 481-489.
- [34] Szalai G, Kellos T, Galiba G, et al. Glutathione as an antioxidant and regulatory molecule in plants under abiotic stress conditions[J]. J Plant Growth Regul, 2009, 28: 66-80.
- [35] Møller I M, Sweetlove L J. ROS signalling—specificity is required[J]. Trends Plant Sci, 2010, 15(7): 370-374.
- [36] Suzuki N, Miller G, Morales J, et al. Respiratory burst oxidases: the engines of ROS signaling[J]. Curr Opin Plant Biol, 2010, 14: 691-699.
- [37] 陈丽华, 李云海, 李俊良. 马铃薯新品系还原糖含量与油炸片片色关系研究[J]. 现代农业科技, 2006, (12): 23-24.
- [38] 张凤军, 张永成, 田 丰. 不同生态环境马铃薯维生素 C 含量分析[J]. 种子, 2006, 25(12): 24-27.