



# 土壤酸化对景天三七生长、抗氧化酶活性及光合特性的影响

王一鸣, 龙胜举, 陈 延, 赵英鹏, 仰路希, 贺忠群

(四川农业大学 园艺学院, 成都 611130)

**摘 要** 结合国内可耕地土壤酸化情况逐年扩大的趋势,为探究土壤酸胁迫对景天三七生长、抗氧化酶活性及光合特性的影响,通过模拟土壤酸化,研究了景天三七在4种不同土壤pH(6.2~3.8)条件下的生长及生理生化变化。结果表明:轻度的土壤酸化(pH 5.6)会增强景天三七根系的活力,促进地下部的生长。景天三七的株高、叶厚、茎粗和根长随着土壤酸化程度的加剧会受到明显的抑制,根系的可溶性糖质量分数和相对电导率、叶片的SOD和CAT活性以及MDA质量摩尔浓度和相对电导率也随之升高,叶片渗透调节物质可溶性糖和游离脯氨酸质量分数却呈现先升高后下降的趋势;在土壤pH<4.2时,景天三七的光合参数和荧光参数会出现明显的阈值响应,其中 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 、 $C_i$ 、 $F_m$ 、 $F_v/F_m$ 、NPQ和叶绿素SPAD值迅速降低,同时 $L_s$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $q_p$ 显著升高,叶绿体的结构与功能遭到破坏,对景天三七的光合能力造成严重的影响。因此,景天三七在酸化土壤中栽培时,应注意当地土壤酸碱度不应低于pH 5.6。

**关键词** 景天三七;土壤酸化;渗透调节物质;保护酶活性;光合参数;叶绿素荧光参数

**中图分类号** S647

**文献标志码** A

**文章编号** 1004-1389(2018)08-1202-07

土壤酸化是自然界中普遍存在的过程<sup>[1]</sup>,但在大气环境污染致使酸沉降增加<sup>[2]</sup>及不当的农业措施<sup>[3]</sup>等人为因素影响下,加速或加重了这一过程。中国土壤酸化呈现出面积大、分布广及部分地区酸化程度高的特点,其中酸化土壤总面积高达 $2.04 \times 10^8$  hm<sup>2</sup>,约占全国土壤面积的22.7%<sup>[4]</sup>,并且呈逐年增加的趋势,目前酸化的土地面积已扩大到中国耕地面积的40%以上。

土壤酸化会对植株的生长发育造成诸多影响,有研究发现受到酸化伤害(铝毒)的作物通常表现为植株矮小,叶子呈墨绿色,叶尖发黄甚至枯死,生长点或叶柄萎蔫,与缺钙和缺铁的症状类似<sup>[5]</sup>,根尖和侧根变得短而坚硬,根伸长受到抑制<sup>[6]</sup>。酸化后的土壤结构差、肥力低且有毒重金属质量分数高,影响作物生长发育,降低作物产量,已经严重威胁粮食安全及农田的可持续发展<sup>[7]</sup>。

野生蔬菜的开发种植是近几年的种植热门<sup>[8]</sup>,景天三七(*Sedum aizoon* L.)又名费菜、养心菜,属景天科,景天属多年生草本植物,是从传

统稀有野菜中培育出来的一种,其株丛矮小、生长整齐、花密集鲜艳,具有较高的观赏价值,同时富含矿质元素和维生素等多种人体所需的物质<sup>[9]</sup>,常食可增强人体免疫力,具有预防高血压和心脏病等保健功效。同时景天三七具有适应性强、无病虫害及易种好管等优点,在野菜种植方面表现尤为突出,近几年成为最具有经济价值的绿色保健野菜<sup>[10]</sup>。

景天三七在生产栽培中表现出极强的抗逆性,但在酸化土壤中的种植研究较少,随着景天三七栽培面积越来越广泛以及中国可耕地土壤酸化面积的逐步增加,研究土壤酸化条件对景天三七生理生化的影响已显得很有意义,同时也能够为以后景天三七在酸化土壤中的生产栽培提供一定的参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

参试的植物材料为景天三七(*Sedum aizoon* L.),由四川农业大学园艺学院提供。所有景天

收稿日期:2017-07-24 修回日期:2017-09-09

基金项目:四川省教育厅项目(18ZB0473)。

第一作者:王一鸣,男,硕士研究生,从事生物技术与遗传育种研究。E-mail:18283584261@163.com

通信作者:贺忠群,女,教授,博士生导师,从事蔬菜逆境生理及生物改良研究。E-mail:hqun328@163.com

三七材料扦插繁殖 20 d 后得到, 扦插繁殖所使用的基质为珍珠岩、蛭石、营养土按体积比 1:1:4 混合配置。

## 1.2 方法

土壤来自四川农业大学(土壤 pH 6.2, 速效氮 16.2 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效磷 51.4 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾 49.2 mg·kg<sup>-1</sup>, 有机质 10.2 mg·kg<sup>-1</sup>), 将风干土过 2 mm 孔径筛, 取出部分土壤预调酸, 每 1 000 g 土壤分别取浓硫酸 0、1、2、3、4、5、6 mL 稀释至 1 L 后加入土壤中搅拌均匀, 保湿并静置 1 周, 再次风干测定土壤 pH, 绘制土壤 pH 变化曲线, 并得出土壤调酸公式<sup>[11]</sup>。根据得到的调酸公式对土壤进行调酸, 得到 pH 为 6.2、5.6、4.2 和 3.8 4 个梯度的土壤, 然后将长势均匀一致的景天三七(株高 5 cm 左右)移栽到调好土壤 pH 的营养钵(规格: 12 cm×13 cm)中培养, 每个营养钵移栽 1 株并加 300 g 该处理土壤, 每个处理 8 株, 重复 3 次, 共计 96 株, 用土壤参数仪测定土壤含水量, 使其保持在 75% 左右, 生长 40 d 时取样测定相关指标。

## 1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标的测定 茎粗、株高、根长和叶厚用游标卡尺进行测量; 地上部和地下部鲜质量采用万分之一电子天平进行称量; 根冠比=地上部分鲜质量: 地下部分鲜质量。

1.3.2 生理生化指标的测定 根系活力的测定采取氯化三苯基四氮唑(TTC)法; 相对电导率的测定参考王学奎<sup>[12]</sup>的方法, 伤害率=(处理电导率/煮沸电导率)×100%; 可溶性糖质量分数的测定参考熊庆娥<sup>[13]</sup>的方法; 叶绿素采用便携式叶绿素测定仪(SPAD-502Plus)测定<sup>[14]</sup>, 选取顶芽下

第 5 片叶进行测定; 叶片丙二醛(MDA)质量摩尔浓度的测定采用硫代巴比妥酸法; 游离脯氨酸质量分数的测定采用茚三酮比色法; 超氧化物歧化酶(SOD)活性采用核黄素-NBT 法测定; 过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定。

1.3.3 光合参数的测定 光合参数采用 Gene Company Limited 公司生产的 LI-6400XT 光合仪进行测定, 测定时选取顶芽下第 5 片叶进行, 分别测定净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )、蒸腾速率( $T_r$ ), 气孔限制值( $L_s$ )= $1-C_i/C_a$ ( $C_a$  为空气中 CO<sub>2</sub> 浓度)。

1.3.4 荧光参数的测定 荧光参数采用德国 Heinz Walz Company 公司所生产的 PAM-2500 进行测定, 测定时选取顶芽下第 5 片叶进行, 得到初始荧光( $F_o$ )、最大荧光( $F_m$ )、实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ )、非光化学淬灭(NPQ)、光化学淬灭( $q_p$ )和最大光化学效率( $F_v/F_m$ )。

## 1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2016 和 SPSS version 22.0 (IBM Corporation)对试验数据进行显著性分析( $P \leq 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤酸化对景天三七生长的影响

土壤酸化对景天三七生长的影响见表 1, 随着土壤酸化的加重, 景天三七的叶片厚度、茎粗、株高和地上部鲜质量基本呈现逐渐降低的趋势。其中在土壤 pH 3.8 中生长的景天三七的叶厚、茎粗、株高和地上部鲜质量分别较 CK 降低 31.7%、10.95%、42.62% 和 61.78%, 且差异显著。

表 1 土壤酸化对景天三七生长的影响

Table 1 Effect of soil acidification on growth in *Sedum aizoon* L.

pH	叶厚/cm Leaf thickness	茎粗/cm Stem diameter	株高/cm Plant height	根长/cm Root length	根鲜质量/g Fresh root mass	地上部鲜质量/g Aboveground fresh mass	根冠比 Root cap ratio
6.2(CK)	0.082 a	0.347 a	10.340 a	14.807 b	2.977 b	7.693 a	0.385 b
5.6	0.094 a	0.358 a	7.700 b	19.257 a	4.417 a	6.730 a	0.668 a
4.2	0.093 a	0.290 b	6.067 c	6.307 c	1.637 c	3.063 b	0.540 ab
3.8	0.056 b	0.309 b	5.933 c	6.623 c	1.177 c	2.940 b	0.400 b

注: 同列不同字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下表同。

Note: Different letters in same columns are significantly different between treatments( $P < 0.05$ ). The same below.

与之相反的是随着土壤 pH 的下降, 根长、根鲜质量以及根冠比均呈现先上升后下降的趋势。在 pH 5.6 的土壤中生长的景天三七的根长、根

鲜质量和根冠比分别比 CK 提高 30.05%、48.37% 和 73.51%。而随着土壤 pH 的进一步降低, 土壤 pH 降到 4.2 和 3.8 后, 与 CK 相比,

根长降低 57.41% 和 55.37%，根鲜质量降低 45.01% 和 60.46%。说明植物能通过增加地下部的生长量以应对轻度的酸胁迫危害，而强的土壤酸胁迫则会对植株的生长造成明显抑制。

### 2.2 土壤酸化对景天三七根系活力、相对电导率和可溶性糖质量分数的影响

由表 2 可以看出，随着土壤 pH 的降低，景天三七的根系活力先升高后降低，而根系可溶性糖质量分数和根系相对电导率表现逐步升高的趋势。

在 pH 5.6 的土壤中，景天三七的根系活力比 CK 提高 32.04%，在 pH 4.2 的土壤中植株根系活力与 CK 无显著差异，随着土壤进一步酸化，在 pH 3.8 的土壤中，植株的根系活力显著降低，

比 CK 降低 24.73%。

随着土壤酸化的加重，景天三七根系内的可溶性糖质量分数迅速增加以抵抗土壤酸胁迫，在 pH 5.6 的土壤中根系可溶性糖质量分数显著高于 CK，随着胁迫的继续加重，可溶性糖质量分数在 pH 3.8 的土壤中达到最大值，比 CK 提高 147.98%。

根系的相对电导率在 pH 5.6 的土壤中与 CK 相比差异不显著，在 pH 4.2 的土壤中则显著升高，随着土壤酸胁迫加重，根系质膜的通透性进步增大，在 pH 3.8 的土壤中根系电导率比 CK 提高 81.19%，表明质膜已经受到严重损伤。

表 2 土壤酸化对景天三七根系根系活力、相对电导率及可溶性糖质量分数的影响  
Table 2 Effect of soil acidification on root activity, root soluble sugar mass fraction and root relative conductivity of *Sedum aizoon* L.

pH	根系活力/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$ Root activity	$w$ (根系可溶性糖)/ $(\mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1})$ Root soluble sugar mass fraction	根系相对电导率/% Root relative conductivity
6.2(CK)	32.107 b	2.723 c	26.18 c
5.6	44.393 a	4.077 b	26.73 c
4.2	35.483 b	3.883 b	37.94 b
3.8	24.167 c	6.573 a	47.43 a

表 3 土壤酸化对景天三七叶片渗透调节物质及抗氧化酶活性的影响  
Table 3 Effect of soil acidification on osmotic adjustment substances and antioxidant enzyme activity in leaves of *Sedum aizoon* L.

pH	$w$ (叶片可溶性糖)/ $(\mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1})$ Leaf soluble sugar mass fraction	$w$ (叶片脯氨酸)/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$ Leaf free proline mass fraction	MDA 质量摩尔浓度/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1})$ MDA molality	叶片相对电导率/% Leaf relative conductivity	SOD 活性/ $(\text{U} \cdot \text{g}^{-1})$ SOD activity	CAT 活性/ $(\text{U} \cdot \text{g}^{-1})$ CAT activity
6.2(CK)	1.763 c	787.29 bc	0.805 c	11.720 c	570.85 c	564.36 c
5.6	2.670 a	1 023.08 a	0.946 bc	12.653 b	574.71 c	637.40 b
4.2	2.293 ab	969.62 ab	1.158 ab	12.840 b	586.13 b	734.71 a
3.8	2.177 b	699.99 c	1.295 a	13.997 a	599.35 a	768.63 a

### 2.3 土壤酸化对景天三七叶片渗透调节物质、相对电导率及抗氧化酶活性的影响

由表 3 可以看出，随着土壤酸化程度的加重，景天三七叶片内可溶性糖和游离脯氨酸质量分数先升高后降低，而 MDA、相对电导率、SOD 和 CAT 活性则表现持续上升的趋势。

可溶性糖和游离脯氨酸属于渗透调节物质，植物可以通过调节其质量分数应对土壤酸化<sup>[15]</sup>。在 pH 5.6 的土壤中，叶片中的可溶性糖和游离脯氨酸质量分数最高，随着土壤的进一步酸化，其质量分数逐渐下降，在 pH 3.8 的土壤中叶片的可溶性糖质量分数依然显著高于 CK 23.44%，而游

离脯氨酸质量分数则显著低于 CK 11.09%。

MDA 是脂质过氧化作用的主要产物之一，其质量摩尔浓度的高低在一定程度上反映膜脂过氧化作用水平和膜结构的受害程度。随着土壤酸化加重，叶片 MDA 质量摩尔浓度逐渐升高，与叶片的相对电导率变化一致，在 pH 3.8 的土壤中叶片 MDA 质量摩尔浓度比 CK 提高 60.91%，相对电导率比 CK 提高 19.43%，表明景天三七叶片的膜结构在酸化土壤中受到损伤，质膜透性显著增大。

轻度土壤酸胁迫(pH 5.6)对植株 SOD 活性没有显著影响。在土壤 pH 为 4.2 和 3.8 时植株

SOD 活性显著升高, 分别比 CK 提高 2.68% 和 4.99%, 而 CAT 活性随着土壤酸化逐渐升高, 在土壤 pH 3.8 时 CAT 活性相比 CK 提高 36.2%, 表明植株通过提高 SOD 和 CAT 活性来缓解土壤酸胁迫对其造成的损伤。

#### 2.4 土壤酸化对景天三七叶片光合参数的影响

由表 4 可以看出, 酸化土壤的 pH 为 4.2~6.2 时, 土壤酸化对景天三七净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )和气孔限制值( $L_s$ )并无显著影响, 但基本呈现  $P_n$  和  $L_s$  缓慢升高;  $G_s$  和  $T_r$  先升高后降低,  $C_i$  缓慢降低的趋势。但随着土壤 pH 进一步降低, 土壤酸胁迫对景天三七的光合作用造成明显的抑制作用。  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 、 $C_i$  与 CK 相比下降了 67.12%、80.44%、75.92% 和 67.07%。而  $L_s$  则

显著升高, 与 CK 相比提高 69.03%。表中  $P_n$  和  $G_s$  的变化基本一致, 说明随着土壤酸化的加剧, 植物气孔基本失去调节能力。而  $C_i$  与  $L_s$  变化趋势相反, 表明  $P_n$  的下降与在土壤酸化作用下的气孔因素有一定关系, 这种关系在土壤 pH 低于 4.2 后表现的尤为明显。

而景天三七叶片中叶绿素 SPAD 值的变化与  $P_n$  的变化相一致, 表明随着土壤酸化的加剧, 植株通过增加叶绿素 SPAD 值来提高光合能力, 以抵抗土壤酸胁迫的伤害。在土壤 pH 4.2 时叶绿素 SPAD 值比 CK 提高了 9.88%, 但当土壤 pH 降到 3.8 后, 叶片中的叶绿素 SPAD 值则开始显著降低, 与 pH 4.2 相比降低了 25.6%。表明土壤 pH 在低于 4.2 以后, 土壤酸胁迫会对植株的叶绿体造成明显的破坏。

表 4 土壤酸化对景天三七叶片光合参数及叶绿素 SPAD 值的影响  
Table 4 Effects of soil acidification on  $P_n$ ,  $G_s$ ,  $T_r$ ,  $C_i$ ,  $L_s$  and total chlorophyll SPAD value in leaves of *Sedum aizoon* L.

pH	$P_n/$ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$G_s/$ ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$T_r/$ ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$C_i/$ ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$L_s$	叶绿素 SPAD 值 SPAD value
6.2(CK)	8.579 a	0.077 a	1.857 a	199.084 a	0.494 b	52.633 b
5.6	10.160 a	0.087 a	2.214 a	187.202 a	0.523 b	53.700 ab
4.2	10.844 a	0.081 a	2.115 a	163.833 a	0.581 b	57.833 a
3.8	2.820 b	0.015 b	0.447 b	65.566 b	0.835 a	42.967 c

#### 2.5 土壤酸化对景天三七荧光参数的影响

由表 5 可知, 随着土壤酸化的加剧, 景天三七初始荧光( $F_0$ )没有显著差异, 最大荧光( $F_m$ )、最大光化学效率( $F_v/F_m$ )则呈现先升高后降低的趋势。在土壤 pH 低于 4.2 以后  $F_m$  和  $F_v/F_m$  出现显著性的降低, 表明在 pH 3.8 的土壤中, 叶片的光合电子传递能力以及光能转化效率开始受到明显的抑制。

光化学淬灭( $q_p$ )与实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ )随着土壤 pH 的降低变化趋势相一致, 在 pH 4.2 的

土壤中显著升高,  $q_p$  比 CK 提高了 5.91%, 表明土壤酸化会刺激 PS II 反应中心的电子传递活性的升高。非光化学淬灭(NPQ)则表现出先升高后降低的趋势, 在 pH 5.6 的土壤中, NPQ 达到最大值, 比 CK 高 48.18%, 表明轻度的酸胁迫可增加景天三七叶片 PS II 天线色素的热耗散, 在一定程度上缓解土壤酸胁迫对光合作用的影响。当土壤 pH 为 3.8 时, NPQ 与 CK 相比显著降低 64.31%, 表明严重的土壤酸胁迫会使 PS II 受到破坏, 降低热耗散能力。

表 5 土壤酸化对景天三七叶片荧光参数的影响

Table 5 Effect of soil acidification on  $F_0$ ,  $F_m$ ,  $F_v/F_m$ ,  $q_p$  and  $\Phi_{PSII}$  in leaves of *Sedum aizoon* L.

pH	$F_0$	$F_m$	$F_v/F_m$	$q_p$	$\Phi_{PSII}$	NPQ
6.2(CK)	0.597 a	3.891 ab	0.846 a	0.834 c	0.631 b	0.504 b
5.6	0.612 a	3.997 a	0.847 a	0.810 bc	0.584 c	0.747 a
4.2	0.584 a	3.922 ab	0.851 a	0.884 a	0.684 a	0.366 b
3.8	0.629 a	3.628 c	0.827 b	0.887 a	0.679 a	0.180 c

### 3 讨论

逆境胁迫对植株的影响可以在株高、茎叶及根冠比等形态学指标上直观地表现出来<sup>[16]</sup>。本试验结果表明,轻度的土壤酸化(pH 5.6)会增强景天三七根系的活力,促进地下部的生长。但随着土壤酸化程度的加剧,土壤 pH 达到 4.2 甚至 3.8 时,景天三七的株高、叶厚、茎粗和根长会受到明显的抑制作用,造成根系可溶性糖大量累积,相对电导率显著增加,质膜透性增大,导致根系活力显著降低,对景天三七的根系造成严重损伤,这与伍杰等<sup>[17]</sup>对康定木兰幼苗的研究结果相似。

植物抗氧化酶系统活性的变化和膜脂过氧化作用已经广泛用于对植物逆境反应机制的研究<sup>[18]</sup>。土壤酸化对景天三七地上部的影响同样显著,在轻度(pH 5.6)土壤酸胁迫下,景天三七的抗氧化酶系统启动,SOD 和 CAT 活性升高,以保护植物细胞免受自由基的影响<sup>[19]</sup>,同时叶片内可溶性糖和游离脯氨酸质量分数显著升高,维持了细胞渗透压的平衡,从而保护了光合作用的正常进行,结合景天三七荧光参数对土壤酸化的响应关系,可以认为在轻度胁迫下植株通过活性氧代谢、渗透调节物质与 PSⅡ 光能转化协同发挥作用,保证了植株正常光合作用的进行,促进植株地下部的生长。但随着土壤 pH 的降低,特别是土壤 pH 达到 3.8 时,SOD 和 CAT 活性迅速增强,渗透调节物质的质量分数显著下降,特别是 MAD 质量摩尔浓度急剧升高,叶绿素 SPAD 值急剧降低,说明细胞内活性氧的产生开始超出系统的清除能力,导致生物膜的结构和功能的破坏,叶绿素被氧化分解。光合上的表现就是出现阈值响应, $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 、 $C_i$  急剧降低,同时  $L_s$  显著升高,气孔丧失调节能力。

叶绿素荧光参数的变化可以反映光合作用的内在机制,已经被较多地应用于探索胁迫下植物光合的响应过程与机制<sup>[20-21]</sup>,土壤酸化对  $F_v$  的影响较小,其中 NPQ 反应了植物 PSⅡ 耗散过剩光能为热量的能力<sup>[22]</sup>,即光保护能力, $q_p$  反应了 PSⅡ 吸收的能量用于进行光化学反应的比例,即电子传递活性的高低<sup>[23]</sup>。在轻度土壤酸(pH 5.6)胁迫下,景天三七的  $q_p$  下降, NPQ 上升,说明植株通过降低电子传递活性,增加对过剩光能的热耗散能力对保护光合机构进行保护。但随着土壤酸化的进一步加深,特别是土壤 pH 达到

3.8 时, NPQ 的热耗散能力急剧下降,最大光化学效率( $F_v/F_m$ )显著低于其余处理,表明此时 PSⅡ 已经受到破坏,但光化学淬灭( $q_p$ )与实际光化学效率( $\Phi_{PSⅡ}$ )却显著上升又说明电子传递活性增加,结合叶绿素 SPAD 值以及  $P_n$  的急剧下降来分析,可以认为在 pH 3.8 的土壤酸胁迫下,景天三七的 PSⅡ 已经受到破坏并且发生了功能紊乱。

综上所述,景天三七属于耐酸性植物,能够适应土壤 pH 4.2 及以上的土壤环境,但过度的土壤酸化(pH<5.6)会对景天三七的生长以及生理功能造成明显的抑制。因此在酸化土壤中进行景天三七的生产栽培时,应注意当地土壤酸碱度不应低于 pH 5.6。

#### 参考文献 Reference:

- [1] 徐仁扣. 某些农业措施对土壤酸化的影响[J]. 农业环境保护, 2012, 21(5): 385-388.  
XU R K. Soil acidification as influenced by some agricultural practices[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 21(5): 385-388.
- [2] DAN B, DRISCOLL C T, ALLEN H L, *et al.* Acidic Deposition and Forest Soils[M]. New York: Realag Springer Publisher, 2012: 65-85.
- [3] CREGAN P D, SCOTT B J. Soil Acidification-an Agricultural and Environmental Problem[M]// Agriculture and the Environmental Imperative. Melbourne: CSIRO Publishing, 1998.
- [4] 赵其国, 吴志东, 张桃林. 我国东南红壤丘陵地区农业持续发展与生态环境建设 I. 优势、潜力和问题[J]. 土壤, 1998(3): 113-120.  
ZHAO Q G, WU ZH D, ZHANG T L. Red soil hilly region agriculture sustainable development and ecological environment construction southeast China I. Advantage, potential and problem[J]. *Soil*, 1998(3): 113-120.
- [5] 利容千, 王建波. 植物逆境细胞及生理学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 285-301.  
LI R Q, WANG J B. Plant Stress Cells and Physiology[M]. Wuhan: Wuhan University Publishing, 2002: 285-301.
- [6] MATSUMOTO H, HIRASAWA F, TORIKAI H, *et al.* Localization of absorbed aluminum in pea root and its binding to nucleic acid [J]. *Plant & Cell Physiology*, 1976, 17(1): 127-137.
- [7] 于天一, 孙秀山, 石程仁, 等. 土壤酸化危害及防治技术研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3137-3143.  
YU T Y, SUN X SH, SHI CH R, *et al.* Advances in soil acidification hazards and control techniques [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(11): 3137-3143.
- [8] 鲁雪林. 多功能蔬菜“养心菜”的引进与开发[J]. 廊坊师范

- 学院学报(自然科学版),2009,9(5):56-57.
- LU X L. Importing and developing of multi-function vegetable "Yangxin Vegetable (*Sedum aizoon* L.)"[J]. *Journal of Langfang Teachers College(Natural Science Edition)*, 2009,9(5):56-57.
- [9] 王 嵩,马 杰,赵 维,等. 黔西北景天三七高产栽培优化研究[J]. 北方园艺,2014(11):147-149.
- WANG S,MA J,ZHAO W, *et al.* The study of high yield cultivation optimization in northwest of Guizhou[J]. *Northern Horticulture*, 2014(11):147-149.
- [10] 董庆武. 药食蔬菜养心菜的栽培技术[J]. 现代农业,2006(11):27.
- DONG Q W. The vegetable cultivation techniques of *Sedum aizoon* L[J]. *Modern Agriculture*, 2006(11):27.
- [11] 胡广东,段云升,于 才,等. 水稻旱育过程中怎样调酸[J]. 现代化农业,1993(9):11-12.
- HU G D,DUAN Y SH,YU C, *et al.* How to adjust the acid in rice dry raising[J]. *Modern Agriculture*, 1993(9):11-12.
- [12] 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,2006:122-123.
- WANG X K. Principles and Techniques of Plant Physiology and Biochemistry[M]:Beijing: Higher Education Press, 2006:122-123.
- [13] 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 成都:四川科学技术出版社,2003:146-147.
- XIONG Q E. Tutorials on Plant Physiology[M]. Chengdu:Sichuan Science and Technology Press,2003:146-147.
- [14] 周晓冬,常义军,吴洪生,等. 甘蓝型油菜开花期 SPAD 值、叶绿素含量与氮素含量叶位分布特点及其相互关系[J]. 土壤,2011,43(1):148-151.
- ZHOU X D,CHANG Y J,WU H SH, *et al.* Distribution of SPAD value, contents of chlorophyll and nitrogen of different type leaves and their relationship in flower of *Brassica napus*[J]. *Soil*, 2011,43(1):148-151.
- [15] WU S,HU C,TAN Q, *et al.* Effects of molybdenum on water utilization, antioxidative defense system and osmotic-adjustment ability in winter wheat (*Triticum aestivum*) under drought stress[J]. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2014,83:365-374.
- [16] 王莉莉. 土壤 pH 值对牡丹生长及生理特性影响的研究[D]. 吉林:吉林农业大学,2015.
- WANG L L. Study on effect of soil pH values on growth and physiological characteristics of *Paeonia rockii*[D]. Jilin:Jilin Agricultural University,2015.
- [17] 伍 杰,刘燕云,兰常军,等. 土壤 pH 值对康定木兰幼苗生长的影响[J]. 四川林业科技,2017,38(3):88-92.
- WU J,LIU Y Y,LAN CH J, *et al.* Influences of pH values in soil on *Magnolia dawsoniana* seedling growth[J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2017,38(3):88-92.
- [18] 裴 斌,张光灿,张淑勇,等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报,2013,33(5):1386-1396.
- PEI B,ZHANG G CH,ZHANG SH Y, *et al.* Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. leaves[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,33(5):1386-1396.
- [19] YAN J Y,ZHANG Y Q,FENG X M, *et al.* Effect of drought stress and rewatering on physiological characteristics of roots in different proso millet varieties[J]. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2012,32(2):348-354.
- [20] MASSACCI A,NABIEV S M,PIETROSANTI L, *et al.* Response of photosynthesis apparatus of cotton to the onset of drought stress under field conditions by gas change analysis and chlorophyll fluorescence imaging[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2008,46(2):189-195.
- [21] EFEOGLU B,EKMEKCI Y,CICEK N. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery[J]. *South African Journal of Botany*, 2009,75(1):34-42.
- [22] GILMORE A M,YAMAMOTO H Y. Zeaxanthin formation and energy dependent fluorescence quenching in pea chloroplasts under artificially mediated linear and cyclic electron transport[J]. *Plant Physiology*, 1991,96(2):635-643.
- [23] GUO C F,SUN Y,TANG Y H, *et al.* Effect of water stress on chlorophyll fluorescence in leaves of tea plant (*Camellia sinensis*) [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009,17(3):560-564.

## Effect of Soil Acidification on Growth, Antioxidant Enzymes Activities and Photosynthetic Characteristics of *Sedum aizoon*

WANG Yiming, LONG Shengju, CHEN Yan, ZHAO Yingpeng,  
YANG Luxi and HE Zhongqun

(College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract** Based on the trend of increasing acidification of arable land in China, the effect of soil acid stress on the growth, antioxidant enzymes and photosynthetic characteristics are studied in the paper. The growth, physiological and biochemical changes under condition of 4 different soil pH (6.2–3.8) were studied by simulating soil acidification. The results indicated that root vigor was enhanced and the growth of underground part was promoted under mild soil acidification (pH 5.6). With the degree of soil acidification aggravated, plant height, leaf thickness, stem diameter and root length were significantly decreased; soluble sugar mass fraction and relative conductivity were increased in root; the activities of SOD and CAT, the molality of MDA and relative conductivity were increased in leaf; the mass fraction of soluble sugar and free proline were increased under the mild and moderate soil acidification, and were decreased under severe soil acidification in leaf. When soil pH < 4.2, photosynthetic parameters and fluorescence parameters had appeared obvious threshold response,  $P_n$ ,  $G_s$ ,  $T_r$ ,  $C_i$ ,  $F_m$ ,  $F_v/F_m$ , NPQ and chlorophyll SPAD value were decreased quickly and  $L_s$ ,  $\Phi_{PSII}$ ,  $q_P$  were significantly increased, the structure and function of chloroplast were destroyed which caused serious influence on photosynthetic capacity of *Sedum aizoon*. Therefore, during the production and cultivation of the soil in acidified soil, it should be noted that the local soil acidity should not be lower than that of pH 4.2.

**Key words** *Sedum aizoon*; Soil acidification; Osmotic adjustment substances; Antioxidant enzyme activity; Photosynthetic parameter; Chlorophyll fluorescence parameters

**Received** 2017-07-24

**Returned** 2017-09-09

**Foundation item** Project of Sichuan Education Department (No. 18ZB0473).

**First author** WANG Yiming, male, master student. Research area: biotechnology and genetic breeding. E-mail: 18283584261@163.com

**Corresponding author** HE Zhongqun, female, professor, doctoral supervisor. Research area: vegetable adversities physiology and biological improvement. E-mail: hzqun328@163.com

(责任编辑: 潘学燕 Responsible editor: PAN Xueyan)