

# 锶对菠菜幼苗生长、光合和抗氧化酶活性的影响

姚 凯\* 牛晓娟 徐 僊 敖家林

(贵州师范大学生命科学学院,贵州 贵阳 550025)

**摘 要:**为探究锶对植物生长生理的影响,以菠菜幼苗为试验材料,研究不同浓度(0、0.1、0.5 和 2.5 mmol·L<sup>-1</sup>) 锶处理对菠菜幼苗的叶片鲜重、叶片锶浓度、光合指标和抗氧化酶活性的影响。结果表明,0.1 mmol·L<sup>-1</sup> SrCl<sub>2</sub> 处理对菠菜幼苗生长和各项生理指标均未产生明显影响,叶片锶浓度在 35 mg·kg<sup>-1</sup> 左右。0.5 mmol·L<sup>-1</sup> SrCl<sub>2</sub> 处理对菠菜幼苗生长表现为先促进后抑制;处理 20 d 后,抗氧化酶活性明显上升,丙二醛(MDA)、净光合速率(Pn)和叶片鲜重相较于对照组分别增加了 24%和降低了 15%、10%,叶片锶浓度达到 318.33 mg·kg<sup>-1</sup>。2.5 mmol·L<sup>-1</sup> SrCl<sub>2</sub> 处理下,植株生长受到明显抑制,抗氧化酶系统的响应更为强烈,处理 20 d 后 MDA 增加了 68%,Pn 和叶片鲜重分别降低了 30%和 48%,叶片锶浓度达到 857.51 mg·kg<sup>-1</sup>。综上,低浓度锶处理对菠菜生长未产生明显影响,但随着锶处理浓度的增加和胁迫时间的延长,植物生长受到的胁迫作用加剧。本研究为明确锶对菠菜生长生理的调控机理提供了理论依据。

**关键词:**菠菜; 锶处理; 光合; 抗氧化酶系统; 生长

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.06.1225

锶(Sr)元素主要以化合物的形态出现在自然界,含锶元素的矿石主要有天青石(SrSO<sub>4</sub>)和菱锶矿(SrCO<sub>3</sub>)。锶是土壤所含有的碱土元素中丰度最小的化学元素,但随着核工业<sup>[1]</sup>和现代交通<sup>[2-3]</sup>的快速发展,其含量在特定区域的土壤中呈较大幅度增加。光合作用是植物生长和积累的基础生理过程,外部环境的变化会对其产生影响。研究表明,重金属会抑制抗氧化酶活性,破坏质膜系统,抑制光合电子传递,影响光系统Ⅱ活性等<sup>[4-5]</sup>。钙元素在光合反应过程中具有重要的作用,是光合系统和一些光合酶的结构成分<sup>[6]</sup>。而锶和钙在化学物理性质上非常相似,因此在植物细胞内的一些代谢过程中锶能够替代钙的功能<sup>[7-8]</sup>。土壤中的锶不但会影响农作物的产量与品质,还能够在生物体内富集并通过食物链累积放大<sup>[9]</sup>。锶被人体摄入后,取代钙集聚在骨骼上,可诱导白血病或其他肿瘤的发生<sup>[10]</sup>,过多的锶摄入会对人类健康产生危害。研究发现植物可通过根系对锶进行吸收,且吸收能力与其种属有关<sup>[11-12]</sup>。姜晓燕等<sup>[10]</sup>研究表明,相同条件下,不同种属植物对锶富集的能力存在差异,表现为葫芦科>豆科>禾本科。此外,植物对锶的吸收还受土壤物理化学性质的强烈影响<sup>[13-14]</sup>。锶通过根系吸收后随着木质

部的蒸腾流而转运,最后固定在植物的韧皮部<sup>[15]</sup>。研究表明,植物不同器官对锶的富集能力存在差异,一般表现为根部>叶片>茎部<sup>[16-17]</sup>。

菠菜(*Spinacia oleracea* L.)是我国常见的藜科蔬菜之一,以叶片作为主要的食用部位。Soudek 等<sup>[18]</sup>研究发现植物对锶的放射性同位素(<sup>90</sup>Sr)和稳定性同位素(<sup>88</sup>Sr)的吸收无明显差异。本研究以菠菜幼苗为试验材料,用不同浓度稳定锶同位素化合物 SrCl<sub>2</sub> 对其进行处理,测定其生长参数、光合指标和抗氧化酶系统的响应情况,以期阐明锶环境对植物的生长生理的影响机制提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料 with 处理

供试材料:圆叶型菠菜(春新超全),购自贵阳市种子分公司。

选取籽粒饱满的种子,置于装有一定体积珍珠岩的育苗盒中,种子上覆盖珍珠岩的薄层,向育苗盘的盛水盒中注入一定量的蒸馏水,以不浸泡种子为宜,保持

收稿日期:2018-01-15 接受日期:2018-06-03

基金项目:贵州省社会发展攻关项目(黔科合 SY 字[2012]3056),贵州省农业科技计划项目(黔科合 NY 字[2011]3077)

作者简介:姚凯,男,副教授,主要从事环境生物学研究。E-mail:slowman71@hotmail.com

\* 通讯作者:同第一作者。

培养室温度 25℃、光照 14 h, 光照强度 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  PPFD。约 7 d 后, 种子开始萌发, 待幼苗长出 4 片叶片时, 选取生长茁壮的幼苗移植到 12 孔育苗盒中, 每个育苗盒栽培 2 株幼苗以保持适当间距, 保证幼苗在试验过程中互不影响光照。移苗后, 将种植有植株的育苗盒置于人工气候室内, 设置光周期为 12 h, 光照强度为 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$  PPFD, 温度为 25℃, 相对湿度为 55%~65%。菠菜幼苗采用水培方式培养, 以 1/2 浓度的 Hoagland 营养液为植物幼苗提供营养和水分。

萌发后约 30 d, 植株生长至 8 叶龄时, 去除生长差异较大的植株后, 在营养液中分别加入 0 (CK)、0.1、0.5 和 2.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ , 用 0.2  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaOH 将处理液 pH 值调至 7.8。每天在取样和测试各指标后对处理液进行更换。分别于第 5、第 10、第 15 和第 20 天对植株地上部分鲜重和光合指标进行测量, 并采集宽度为 30 mm 左右的叶片, -80℃ 保存, 用于测量植株叶片在模拟镉胁迫下的各项生理生化指标。每个处理均设 3 次生物学重复。

## 1.2 植株地上部分鲜重测定

本试验选取植物地上部分鲜重作为衡量植物生长情况的参数。收获后立即分离植株地上部分和地下部分, 用蒸馏水将植株地上部分洗净, 用吸水纸擦干后立即称量。

## 1.3 植株叶片光合指标测定

采用 LI-6400XT 便携式光合测量系统 (LI-COR 公司, 美国) 测定植株叶片的净光合速率 (net photosynthetic rate,  $P_n$ )、胞间二氧化碳浓度 (intercellular  $\text{CO}_2$  concentration,  $C_i$ ) 等光合参数, 每次平行测定同一处理条件下的 3 株植株, 每株测定 2 片叶片宽度为 30~40 mm 的叶片, 每个叶片重复测定 3 次。采取人工设定测定条件的方式, 设置测定光照强度为 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  PPFD, 温度 25℃,  $\text{CO}_2$  浓度为 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。测定时间为 14:00–16:00, 避开植物可能产生午休现象的时间。

## 1.4 叶绿素含量测定

参照王学奎等<sup>[19]</sup>的方法测定菠菜叶片的叶绿素含量。称取 0.1 g 叶片加液氮研磨为碎片, 加 10 mL 80% 丙酮混匀, 4 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心 15 min, 取上清液 1 mL, 加入 3 mL 丙酮, 分别于 663、645 nm 波长下测定 OD 值, 按照公式计算叶绿素 a 浓度 ( $C_a$ ) 和叶绿素 b 浓度 ( $C_b$ ):

$$C_a = 12.21 A_{663} - 2.81 A_{645} \quad (1)$$

$$C_b = 20.13 A_{645} - 5.03 A_{663} \quad (2)$$

## 1.5 植株叶片相关抗氧化酶活性测定

参照彭方仁等<sup>[20]</sup>的方法并稍作修改。称取植物叶片鲜重 0.1 g 于预冷研钵中, 加入 1 mL 预冷的 0.05  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  pH 值 7.8 的磷酸缓冲液, 在冰浴条件下研磨至匀浆, 离心管收集匀浆后用缓冲液定容至 2 mL, 4℃ 下 1 000×g 离心 20 min, 取上清液冷藏待测。

1) 超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性测定: 参照 Zhang 等<sup>[21]</sup>的方法并稍做修改。通过测量抑制硝基四氮唑蓝 (nitroblue tetrazolium, NBT) 的光化学还原能力来测定 SOD 活性, 测定缓冲液含有 0.3 mL 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  核黄素、0.3 mL 150  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  L-蛋氨酸、0.3 mL 600  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NBT 和 0.1 mL 酶提取液, 最后形成 1 mL 酶反应体系。采用 BlueStar 紫外可见分光光度计 (LABTECH 公司, 美国) 测定 560 nm 波长下吸光度值。整个酶反应在强度为 170  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  PPFD 的光照下持续反应 20 min。以抑制 50% NBT 发生光化学还原为 1 个酶活性单位。

2) 过氧化物酶 (peroxidase, POD) 活性测定: 参照郝建军等<sup>[22]</sup>的方法并稍做修改。将 0.2 mL 酶提取液和 40  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  愈创木酚、3%  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、100  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  pH 值 6.5 磷酸钾缓冲液形成 2 mL 酶反应体系, 采用紫外可见分光光度计测定 470 nm 波长下吸光度。

3) 过氧化氢酶 (catalase, CAT) 活性测定: 参照郝建军等<sup>[22]</sup>的方法并稍作修改。将 0.1 mL 酶提取液和 50  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸缓冲液、3%  $\text{H}_2\text{O}_2$  形成 1 mL 酶反应体系, 采用紫外可见分光光度计于 240 nm 波长下测定吸光度值, 连续测定 5 min。

## 1.6 丙二醛含量测定

参照 Zheng 等<sup>[23]</sup>的方法测定丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量: 称取植物叶片 0.1 g, 加入 2 mL 0.1% (w/v) 三氯乙酸研磨为匀浆, 4℃ 下 5 000×g 离心 10 min。取上清液 1 mL, 加入 1 mL 0.5% (w/v) 硫代巴比妥酸制成混合液, 100℃ 反应 20 min, 然后在冰浴中迅速冷却, 8 000×g 离心 10 min, 取上清液分别于 450、532 和 600 nm 波长下测定吸光度值。按照公式计算 MDA 含量 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ):

$$\text{MDA 含量} = 6.45 (\text{OD}_{532} - \text{OD}_{600}) - 0.56 \text{OD}_{450} \quad (3)$$

## 1.7 叶片镉浓度测定

称取采集的植物样本 5 g, 60℃ 充分烘干。烘干后研磨成细末, 过 100 目筛。采用湿法消解法 [ $\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$  (3:1, v/v)] 消解, 然后采用 AA320 火焰原子吸收分光光度计 (上海仪电科学仪器股份有限公司) 测量样品中 Sr 含量。

1.8 数据处理

所有数据均为平均值±标准差。采用 SPSS 22.0 进行 ANOVA 分析,组间差异进行显著性 *t* 检验,以 *P*<0.05 作为显著性依据;Origin 9.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 Sr<sup>2+</sup>对菠菜幼苗生长的影响

由表 1 可知,0.1 mmol·L<sup>-1</sup> SrCl<sub>2</sub> 处理下,随着处

理时间的延长,菠菜地上部分生物量与 CK 均无显著差异。0.5 mmol·L<sup>-1</sup> SrCl<sub>2</sub> 处理对植株的生长先表现出促进作用,在处理第 10 天较 CK 显著上升 16%;随着处理时间的延长,菠菜幼苗生长受到一定的抑制,在第 20 天较 CK 显著下降 10%。2.5 mmol·L<sup>-1</sup> SrCl<sub>2</sub> 处理对菠菜幼苗生长表现出明显的抑制作用,第 5 天较 CK 下降 12%,且随着处理时间的延长,抑制效果越明显,第 20 天时较 CK 显著下降 48%。

表 1 不同 Sr<sup>2+</sup> 处理浓度下菠菜幼苗(单株)地上部分生物量  
Table 1 The aboveground part biomasses of *Spinacia oleracea* L. seedlings (individual plant) under different Sr<sup>2+</sup> treatments / (g FW)

Sr <sup>2+</sup> 处理浓度 Sr <sup>2+</sup> treatment concentrations/(mmol·L <sup>-1</sup> )	时间 Time/d				
	0	5	10	15	20
0(CK)	0.70 ± 0.04a	1.75 ± 0.01ab	3.11 ± 0.08b	4.87 ± 0.16b	6.93 ± 0.18a
0.1	0.74 ± 0.10a	1.81 ± 0.04ab	3.07 ± 0.11b	5.02 ± 0.20b	6.78 ± 0.12a
0.5	0.72 ± 0.11a	1.98 ± 0.05a	3.62 ± 0.06a	5.17 ± 0.03a	6.23 ± 0.08b
2.5	0.69 ± 0.05a	1.54 ± 0.03b	2.54 ± 0.13c	3.20 ± 0.07c	3.62 ± 0.05c

注:同列不同小写字母表示差异显著(*P*<0.05)。下同。  
Note: Different lowercase letters in the same colum indicate significant difference at 0.05 level. The same as following.

2.2 Sr<sup>2+</sup>对菠菜幼苗光合指标的影响

由图 1-A 可知,0.1 mmol·L<sup>-1</sup> SrCl<sub>2</sub> 处理的 P<sub>n</sub> 与 CK 相比,未表现出显著的差异。随着处理时间的延长,0.5 mmol·L<sup>-1</sup> SrCl<sub>2</sub> 处理下,P<sub>n</sub> 呈先升高后降低的趋势,处理第 5 天达到最高,较 CK 上升 5%,随后逐渐下降,处理第 20 天时较 CK 降低 15%。2.5 mmol·L<sup>-1</sup> SrCl<sub>2</sub> 处理下,菠菜幼苗的 P<sub>n</sub> 急剧下降,处理第 15 天趋于稳定,较 CK 下降 35%。Ci 与 P<sub>n</sub> 为相对应关系,P<sub>n</sub> 高时,胞间 CO<sub>2</sub> 被快速消耗;P<sub>n</sub> 低时,CO<sub>2</sub> 在细胞间积累。由图 1-B 可知,0.1 mmol·L<sup>-1</sup> SrCl<sub>2</sub> 处理下,

Ci 迅速下降,在处理第 5~第 10 天略有上升,处理第 10 天后 Ci 随着处理时间的延长逐渐降低,在处理第 20 天达到最低,较 CK 下降 21%;0.5 mmol·L<sup>-1</sup> SrCl<sub>2</sub> 处理下,Ci 呈先下降后升高的趋势,在处理第 5 天最低,为 CK 的 87%,在处理第 20 天最高,较 CK 上升 13%。2.5 mmol·L<sup>-1</sup> SrCl<sub>2</sub> 处理下,菠菜幼苗的 Ci 随着处理时间的延长持续上升,处理第 20 天较 CK 上升 38%。结果表明,低浓度的 Sr<sup>2+</sup> 对菠菜光合能力有一定促进作用,而高浓度的 Sr<sup>2+</sup> 会抑制植株的光合作用。

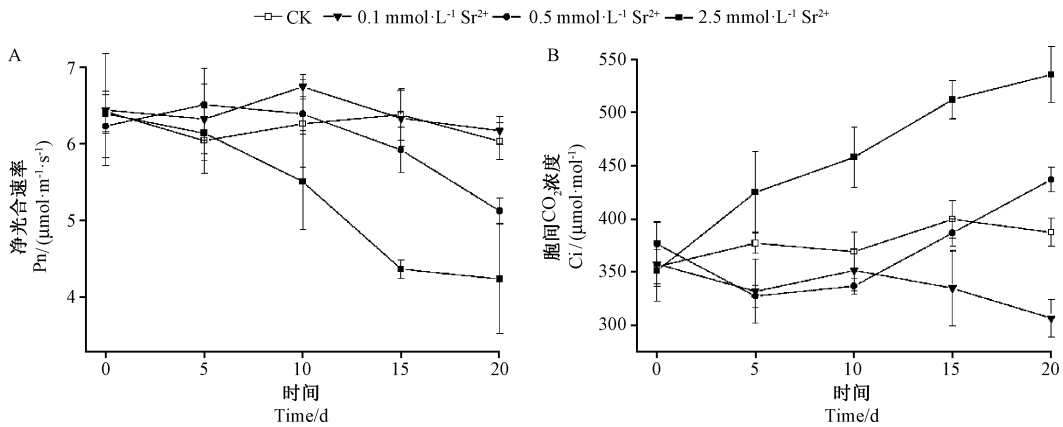


图 1 Sr<sup>2+</sup> 处理对菠菜幼苗的光合参数的影响  
Fig.1 Effect of Sr<sup>2+</sup> treatments on photosynthetic parameters of *Spinacia oleracea* L. seedlings

### 2.3 $\text{Sr}^{2+}$ 对菠菜幼苗叶绿素含量的影响

由图2可知, $\text{SrCl}_2$ 处理下,菠菜叶片中叶绿素a和叶绿素b整体变化趋势有一定差异。但随着处理时间的延长,叶绿素a和叶绿素b含量与CK相比均明显下降且 $\text{Sr}^{2+}$ 处理浓度越高下降幅度越大。在处理第20

天,0.1、0.5和2.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理下,叶绿素a含量CK分别下降5%、9%和22%,叶绿素b含量较CK分别下降6%、21%和40%。结果表明, $\text{Sr}^{2+}$ 处理对菠菜叶片中叶绿素a和叶绿素b含量均有抑制作用,且对叶绿素b的抑制效果要高于叶绿素a。

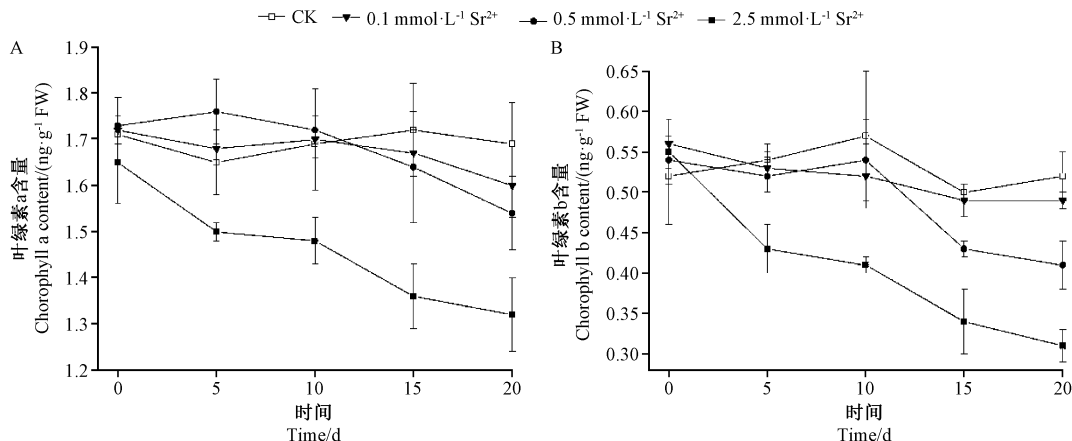


图2  $\text{Sr}^{2+}$ 处理对菠菜幼苗的叶绿素含量的影响

Fig.2 Effect of  $\text{Sr}^{2+}$  treatments on chlorophyll contents of *Spinacia oleracea* L. seedlings

### 2.4 $\text{Sr}^{2+}$ 对菠菜幼苗抗氧化酶活性的影响

由图3-A可知,0.1  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理的SOD活性与CK相比无明显差异;0.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理的SOD活性从处理第5天开始逐渐上升,在处理第20天达到最高,较对照增加56%;2.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理的SOD活性呈先上升后下降的趋势,在处理第15天达到最高,较CK增加102%,随后急剧下降。由图3-B可知,0.1  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理下,POD活性与CK相比无明显差异;0.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理的POD活性呈先下降后上升的趋势,在处理第20天达到最高,较CK增加37%;2.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理下,POD活性呈先上升后下降的趋势,在处理第15天达到最高,较CK增加128%,随后急剧下降。由图3-C可知,0.1  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理下,CAT活性与CK相比无明显差异;0.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理下,CAT活性在处理第5天后逐渐上升,在处理第20天达到最高;2.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理下,CAT活性呈先上升后下降的趋势,在第15天达到最高,较CK增加54%,随后急剧下降。结果表明,环境中 $\text{Sr}^{2+}$ 浓度的升高增强了对植物的氧化胁迫。SOD、POD和CAT活性对 $\text{Sr}^{2+}$ 胁迫表现出较为一致的变化规律。

### 2.5 $\text{Sr}^{2+}$ 对菠菜幼苗MDA含量的影响

MDA是细胞膜脂过氧化的产物,其含量能够反映植物细胞在胁迫下受到伤害的程度。由图4可知,0.1

$\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理下,菠菜叶片中的MDA含量较CK无明显变化;0.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理下,MDA含量在处理第5天后开始升高,在处理第20天达到最高;2.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理下,MDA含量快速上升,处理第20天的MDA含量较CK增加68%。结果表明,环境中 $\text{Sr}^{2+}$ 浓度越高,处理时间越长,植物细胞膜受到的氧化伤害越强。

### 2.6 不同浓度 $\text{Sr}^{2+}$ 处理下菠菜叶片中 $\text{Sr}^{2+}$ 的积累浓度

环境中的锶能够被植物通过根系吸收并在体内积累。由图5可知,0.1  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理下,菠菜叶片中的 $\text{Sr}^{2+}$ 积累浓度未随着时间的延长发生明显变化,基本保持在 $35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右;0.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理下, $\text{Sr}^{2+}$ 积累浓度随着处理时间的延长逐渐上升,在处理第20天达到最高,为 $318.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;2.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理下,植物叶片中 $\text{Sr}^{2+}$ 积累浓度随着处理时间的延长不断上升,在处理第20天达到最高,为 $857.51\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

## 3 讨论

研究表明,叶片是吸收与富集 $\text{Sr}^{2+}$ 的主要器官<sup>[24, 16]</sup>,也是植物进行光合生长的重要器官。本研究中,0.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SrCl}_2$ 处理初期,菠菜叶片的Pn有所



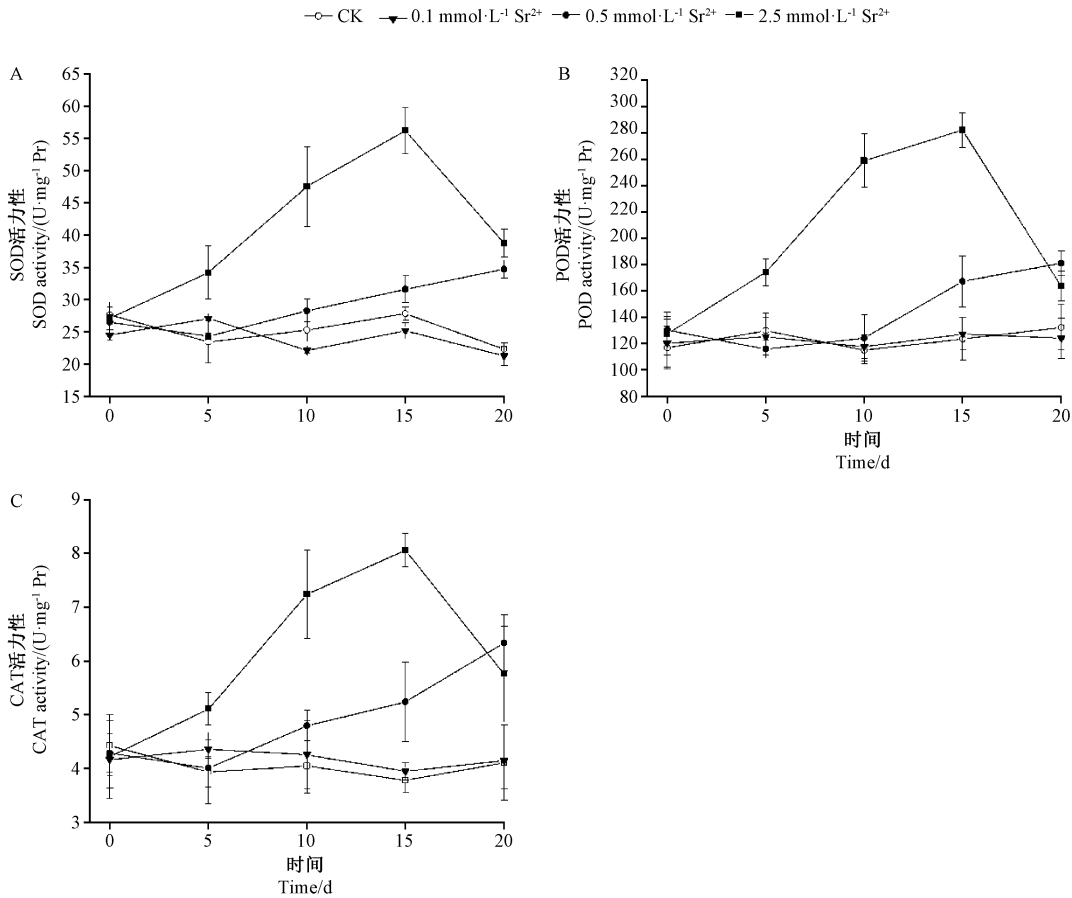


图 3  $\text{Sr}^{2+}$  处理对菠菜幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig.3 Effect of  $\text{Sr}^{2+}$  treatments on antioxidative enzyme activities of *Spinacia oleracea* L. seedlings

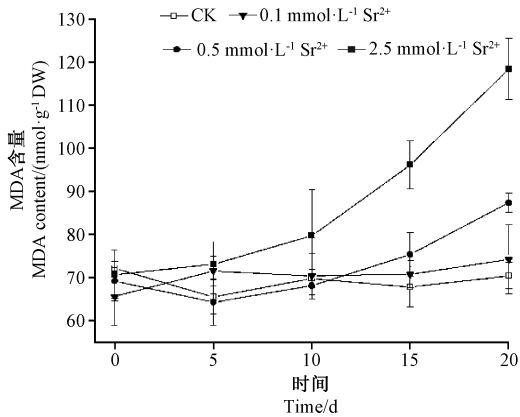


图 4  $\text{Sr}^{2+}$  处理对菠菜幼苗的 MDA 含量的影响

Fig.4 Effect on  $\text{Sr}^{2+}$  treatments of of *Spinacia oleracea* L. seedlings

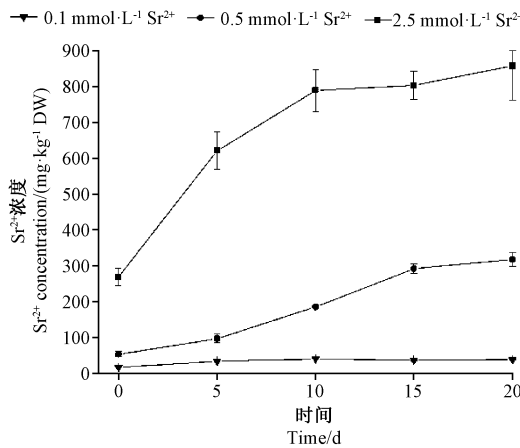


图 5 菠菜叶片中  $\text{Sr}^{2+}$  的积累浓度

Fig.5  $\text{Sr}^{2+}$  concentrations in *Spinacia oleracea* L. leaves

上升。这与前人研究发现较低浓度的  $\text{Sr}^{2+}$  处理能够增强植物光合能力的结论一致<sup>[25]</sup>。本研究中,  $\text{Sr}^{2+}$  处理对菠菜叶片中叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均有抑制作用, 其中叶绿素 b 对  $\text{Sr}^{2+}$  处理更为敏感, 这与前人研究

结果相同<sup>[26-27]</sup>。此外, 本研究还发现植物光合能力的变化与叶绿素 a 和叶绿素 b 含量的变化趋势并不完全一致, 表明  $\text{Sr}^{2+}$  处理可能对光合作用的其他过程产生了影响, 具体情况还有待进一步研究。

环境胁迫可破坏植物体内活性氧产生和清除的平衡机制,从而使活性氧簇(reactive oxygen species, ROS)过量积累,导致植物体发生一系列氧化胁迫现象。植物体内的抗氧化酶系统对清除 ROS 具有重要的作用,SOD、POD 和 CAT 是生物体内重要的抗氧化酶,其活性能够影响逆境下叶绿素、蛋白质的降解速度及叶片功能,与植物的抗逆性密切相关。本研究中, $\text{Sr}^{2+}$ 处理下的 SOD、POD 和 CAT 活性的变化规律较为一致,均随着  $\text{Sr}^{2+}$ 处理浓度的增加明显上升,表明  $\text{Sr}^{2+}$ 处理对植物产生了氧化胁迫的作用;且在  $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{SrCl}_2$  处理后期,SOD、POD 和 CAT 活性均出现大幅度下降,这可能是在长时间高浓度的  $\text{Sr}^{2+}$ 处理下,氧化胁迫导致植物整体的生理功能下降所致。ROS 对不饱和脂肪酸氧化或过氧化,生成脂质过氧化物,脂质过氧化物进一步降解成 MDA<sup>[28]</sup>。MDA 是植物细胞膜脂过氧化伤害的主要产物之一,具有较强的细胞毒性,其含量能够反映膜脂过氧化水平和膜结构的伤害程度<sup>[29]</sup>。本研究中,高浓度长时间的  $\text{Sr}^{2+}$ 处理使细胞内 MDA 含量明显上升,这可能是由于植物根系不断吸收  $\text{Sr}^{2+}$ ,导致  $\text{Sr}^{2+}$ 在植物体内富集量增加,从而对植物的伤害作用也随之增强。

本研究还发现随着  $\text{Sr}^{2+}$ 处理浓度的增加和处理时间的延长,其对植物生长的抑制作用不断增强,但  $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{SrCl}_2$  处理对植物生长及生理指标均未产生明显影响,这可能与  $\text{Sr}^{2+}$ 处理的浓度较低及试验材料处于快速生长期有关。生物量的快速增加稀释了  $\text{Sr}^{2+}$ 在植物叶片内的浓度,使其对植物产生的生理影响降低;而在较高浓度的铯处理下, $\text{Sr}^{2+}$ 在植物叶片中快速积累,并对植物的生长生理产生了较大影响。

## 4 结论

本研究结果表明,低浓度的  $\text{Sr}^{2+}$ 处理对菠菜的光合能力表现出一定的促进作用,但是随着  $\text{Sr}^{2+}$ 处理浓度的增强和处理时间的延长, $\text{Sr}^{2+}$ 对菠菜的生长产生明显的抑制作用,这种抑制作用也同时体现在菠菜的光合能力和氧化胁迫响应上。同时, $\text{Sr}^{2+}$ 处理浓度越高、处理时间越长、 $\text{Sr}^{2+}$ 在菠菜叶片内的富集量越多,对植物生长的抑制作用也越强,但植物叶片内低浓度的  $\text{Sr}^{2+}$ 富集对菠菜生长的影响并不明显。

## 参考文献:

- [1] 张晓雪,王丹,闻方平. 低放核素污染土-水介质的植物修复研究进展[J]. 西北植物学报, 2009, 28(12): 2571-2574
- [2] berg G E. Tracing pollution and its sources with isotopes[J]. Water Air and Soil Pollution, 2001, 130(4): 1577-1582
- [3] Barcan V S, Kovnatsky E F, Smetannikova, M S. Absorption of heavy metals in wild berries and edible mushrooms in an area affected by smelter emissions[J]. Water Air and Soil Pollution, 1998, 103(4): 173-195
- [4] 朱靖,刘建芹,杨叶,陈珂. 铯胁迫对垂柳光合生理的影响[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(10): 32-35
- [5] 周璐璐,唐运来,陈霞,陈梅,王丹. 铯对油菜幼苗叶片光合作用的影响[J]. 植物学报, 2013, 48(3): 313-319
- [6] White P J, Broadley M R. Calcium in plants[J]. Annals of Botany, 2003, 92: 487-511
- [7] Moyen C, Roblin G. Occurrence of interactions between individual  $\text{Sr}^{2+}$ -and  $\text{Ca}^{2+}$ -effects on maize root and shoot growth and  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  contents, and membrane potential: Consequences on predicting  $\text{Sr}^{2+}$ -impact[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 260(6): 770-779
- [8] 杨叶,陈珂,朱靖. 施加钙对铯胁迫下麻疯树生长及生理生化的影响[J]. 核农学报, 2015, 9(2): 405-411
- [9] 张渊,杨叶,李海洋,陈珂. 铯及柴油胁迫下 3 种杨树对土壤铯的富集特征[J]. 核农学报, 2017, 31(6): 1159-1165
- [10] 姜晓燕,刘淑娟,闫冬,何映雪,丁库克. 植物对核素铯的吸附与富集作用研究现状[J]. 癌变·畸变·突变, 2014, 26(6): 463-466
- [11] 唐永金,罗学刚,曾峰,江世杰. 不同植物对高浓度 Sr、Cs 胁迫的响应与修复植物筛选[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 960-965
- [12] Neil J W. Soil to plant transfer of radionuclides: predicting the fate of multiple radioisotopes in plants[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2013, 133: 31-34
- [13] 石雷,丁保君. 切尔诺贝利核事故对白俄罗斯生态环境的影响[J]. 环境与可持续发展, 2012(1): 93-96
- [14] Tsialtas J T, Matsi T, Barbayiannis N, Sdrakas A, Veresoglou D S. Strontium absorption by two Trifolium species as influenced by soil characteristics and liming[J]. Water Air and Soil Pollution, 2003, 144(1/2/3/4): 363-373
- [15] 赖金龙,杨垒滢,付倩,何娇,陶宗娅,罗学刚.  $\text{Sr}^{2+}$ 在印度芥菜幼苗中的富集、亚细胞分布及贮存形态研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2055-2062
- [16] Chen M, Tang Y L, Ao J, Wang D. Effects of strontium on photosynthetic characteristics of oilseed rape seedlings[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2012, 59(6): 772-780
- [17] 亓琳,王庆,王晓凌,赵威,田晓玉. 向日葵对铯的富集特征与耐受机制研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(12): 4779-4786
- [18] Soudek P, Valenova S, Vavrikova Z, Tomas V.  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  uptake by sunflower cultivated under hydroponic conditions[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2006, 88(3): 236-250
- [19] 王学奎,黄见良. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015
- [20] 彭方仁,杨玉珍,朱振贤. 干旱胁迫对不同种源香椿叶片膜脂过氧化和保护酶系统的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(2): 44-47

- [21] Zhang S, Chen L H, Duan B L, Korpelainen H, Li C. Population differences in water-use efficiency of *Eucalyptus microtheca* seedlings under different watering regimes[J]. *Physiologia Plantarum*, 2000, 108(2): 134-139
- [22] 郝建军, 康宗利, 于洋. 植物生理生态学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006
- [23] Zheng X, Tian S. Effect of oxalic acid on control of postharvest browning of litchi fruit[J]. *Food Chemistry*, 2006, 96(4): 519-523
- [24] 李云桂, 武彩霞, 杨慧敏, 王彬, 张志贵, 夏焜, 廖阳, 罗湘, 张清东. 气孔开闭与锆叶面吸收的相互影响. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1613-1619
- [25] Choi Y H, Kang H S, Jun I, Keum D K, Park H K, Choi G S, Lee H, Lee C W. Transfer of  $^{90}\text{Sr}$  to rice plants after its acute deposition onto flooded paddy soils[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2007, 93(3): 157-169
- [26] 董袁媛, 孙竹, 杨洋, 徐小逊, 张世熔, 杨懿德, 张雨豪, 霍庆霖, 邓玉兰. 镉胁迫对黄麻光合作用及镉积累的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(8): 1640-1646
- [27] 曾淑华, 刘峰, 周昌贵, 林宁, 蒋萍, 刘欢. 镉胁迫对烤烟生长和生理生化指标的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(3): 526-531
- [28] Murphy T. Membranes as targets of ultraviolet radiation [J]. *Physiologia Plantarum*, 1983, 58(3): 381-388
- [29] Babbs C F, Pham J A, Coolbaugh R C. Lethal hydroxyl radical production in paraquat-treated plants[J]. *Plant Physiology*, 1989, 90(4): 1267-1275

## Effects of Strontium on Growth, Photosynthesis and Antioxidant Enzyme Activities in *Spinacia oleracea* L. Seedlings

YAO Kai\* NIU Xiaojuan XU Hui AO Jialin

(School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550025)

**Abstract:** This study was conducted to test effects of different concentrations for Sr (0, 0.1, 0.5 and 2.5 mmol·L<sup>-1</sup>) on the growth physiology parameters of *Spinacia oleracea* L. seedling, spinach. Fresh leaf weights, Sr<sup>2+</sup> concentrations in leaves, photosynthesis indices and antioxidant enzyme activities were recorded and analyzed. The results suggested that there was no effect on spinach growth and physiological parameters and Sr<sup>2+</sup> concentrations in leaves were stabilized at about 35 mg·kg<sup>-1</sup> under 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> SrCl<sub>2</sub> level. In comparison with the control, the growth of spinach was promoted at the initial stage but decreased afterwards under treatment of 0.5 mmol·L<sup>-1</sup> SrCl<sub>2</sub>, and antioxidant enzyme activities increased significantly after 20 d. MDA content was increased 24% and PN and fresh leaf weight were decreased 15% and 10% respectively, and Sr<sup>2+</sup> concentrations in leaves reached 318.33 mg·kg<sup>-1</sup>. The growth of spinach was intensely inhibited under treatment of 2.5 mmol·L<sup>-1</sup> SrCl<sub>2</sub>, MDA content was increased 68%; PN and fresh leaf weight were decreased 30% and 48%, respectively; Sr<sup>2+</sup> concentrations in leaves reached 857.51 mg·kg<sup>-1</sup>. In conclusion, low strontium concentration has no significant effects on growth and physiology of spinach, however, spinach growth was inhibited and the effect increases with increasing Sr<sup>2+</sup> concentration level and treatment duration. This study presents theoretical and experimental basis for clarifying the regulation mechanism of strontium on the growth and physiology of spinach.

**Keywords:** *Spinacia oleracea* L., strontium treatment, photosynthesis, antioxidant enzyme system, growth