

李 红,唐永金,曾 峰. 高浓度锶、铯胁迫对植物叶绿素荧光特性的影响[J]. 江苏农业科学,2013,41(9):349-352.

# 高浓度锶、铯胁迫对植物叶绿素荧光特性的影响

李 红<sup>1</sup>, 唐永金<sup>1,2</sup>, 曾 峰<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学生命科学与工程学院, 四川绵阳 621010; 2. 西南科技大学核废物与环境安全国防重点学科实验室, 四川绵阳 621010)

**摘要:**研究高浓度锶(Sr)或铯(Cs)胁迫对植物叶绿素荧光特性的影响,探索核素影响植物生长的光合机理。在含 Sr 500 mg/kg 土壤、含 Cs 500 mg/kg 土壤和对照(CK)的土壤中,种植水花生、菊苣、落葵、黄秋葵和藜,出苗 65 ~ 70 d 后测定叶绿素荧光参数和快速光合曲线参数。结果表明:(1)Sr、Cs 胁迫均降低植物 PSII 最大光化学效率( $F_v/F_m$ )和快速光曲线初始斜率 $\alpha$ ,Cs 胁迫的降低极显著。Sr 主要降低了最大荧光 $F_m$ 使 $F_v/F_m$ 降低,Cs 主要提高了最低荧光 $F_0$ 使 $F_v/F_m$ 降低;(2)Sr 胁迫使植物叶绿素最大相对电子传递速率 $ETR_{max}$ 和半饱和光强 $I_k$ 下降,Cs 胁迫使其增加,但均与 CK 没有显著差异;(3)Sr 胁迫对不同植物的 $F_v/F_m$ 没有显著影响,但 Cs 胁迫可极显著地降低菊苣和黄秋葵 PS II 的最大光化学效率 $F_v/F_m$ ,Cs 胁迫对植物最大光化学效率 $F_v/F_m$ 的降低作用大于 Sr 胁迫,菊苣和黄秋葵尤为敏感。

**关键词:**锶;铯;胁迫;植物;叶绿素荧光特性

**中图分类号:** Q945.11;Q946.116 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2013)09-0349-04

叶绿素荧光常被用来评估植物光合机构的功能和环境胁迫的效应<sup>[1]</sup>,目前在以下几方面得到广泛应用:(1)耐旱力评价。评价和筛选大麦耐旱品种<sup>[2]</sup>,油橄榄和行道植物耐旱能力的鉴定<sup>[3-4]</sup>。(2)耐辐射评价。直射光和散射光对香蕉叶的影响<sup>[5]</sup>,UV-B 辐射对大豆光合系统的影响<sup>[6]</sup>。(3)热冷害评价。不同菜豆品种 PS II 对高温的反应<sup>[7]</sup>,白花罗勒低温冷害症状与叶绿素荧光特性的关系<sup>[8]</sup>。(4)涝害评价。淹没对水稻和美洲格尼帕树(*Genipa americana*)的影响<sup>[9-10]</sup>。(5)酸雨影响评价。模拟酸雨下云杉枝叶光合色素机构的变化<sup>[11]</sup>。(6)盐胁迫评价。盐(NaCl)胁迫对绿豆、油菜、番茄和向日葵叶绿素荧光特性的影响效应<sup>[12-14]</sup>。(7)重金属影响评价。Cd 胁迫对玉米老叶和嫩叶叶绿素荧光的影响差异<sup>[15]</sup>,Cu 胁迫对水蓼、红花草豆荧光参数降低的影响<sup>[16-17]</sup>,铝对大豆光合系统的影响<sup>[18]</sup>。

锶(Sr)、铯(Cs)是核电站事故等释放的重要核素,影响环境植物的生长发育。有研究表明,高浓度 Sr、Cs 影响鸡冠花叶绿素含量、根系、株高和生物产量<sup>[19]</sup>,使苏丹草叶绿素含量和 MDA 含量降低、POD 和 CAT 活性升高<sup>[20]</sup>,Sr 胁迫使油菜 SOD、POD 和 CAT 活性降低、MDA 含量下降<sup>[21]</sup>。Sr、Cs 既是核素又是重金属,它们对植物叶绿素荧光特性有何影响,目前未见报道。本研究的目的是,研究土壤被高浓度 Sr、Cs 污染后对植物叶绿素荧光的影响特点,探寻高浓度核素污染影响植物生长的光合机制。

## 1 材料与方法

收稿日期:2013-03-16

基金项目:国防基础重点科研项目(编号:B3120110001);四川省生物物质资源利用与改性工程技术研究中心开放基金。

作者简介:李 红(1991—),女,四川仁寿人,本科生,从事重金属的生物效应与植物修复研究。E-mail:993204914@qq.com。

通信作者:唐永金,教授,研究方向为核污染环境的植物修复。E-mail:tangyongjin@swust.edu.cn。

## 1.1 供试材料

供试植物:苋科的水花生(*Alternanthera philoxeroides* Mart. Griseb.),菊科的菊苣(*Cichorium intybus* L.),落葵科的落葵(*Gynura cusimbua* D. Don S. Moore),锦葵科的黄秋葵(*Hibiscus esulentus* L.),藜科的藜(*Chenopodium album* L.)。处理药剂:Sr( $\text{NO}_3$ )<sub>2</sub>、CsNO<sub>3</sub>,均为分析纯。供试土壤:农田紫色壤土,pH 值 7.5,V(土):V(水)=1:1,有机质含量 31.6 g/kg,全氮、磷、钾含量依次为 2.57、0.985、17.9 g/kg,碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为 302、33、288 mg/kg。

## 1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 核素因素包括含 Sr 500 mg/kg 土壤、含 Cs 500 mg/kg 土壤和 CK(无核素)。每个处理种植 5 种植物,3 次重复。土壤过 1.4 cm 筛,装盆(1 kg 干土)。于 2011 年 3 月 5 日根据预备试验和设计核素用量,每盆浇施 340 mL 核素溶液或清水(CK),使土壤刚好达到饱和持水量。经核素处理的土壤在阴凉处放置 8 周<sup>[22]</sup>,于 5 月 1 日播种(水花生种植地下茎)。播种出苗后 2 周定苗(6 株/盆)。每 1~2 d 浇水 1 次,保持土壤湿度在田间持水量的 60%~70%。7 月 16 日测定植株叶片叶绿素荧光。

1.2.2 测定方法 用德国产 Dual-PAM-100 荧光仪,根据说明书和文献[6]的方法,测定叶片 PS II 的最小荧光( $F_0$ )、暗下最大荧光( $F_m$ )、最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、半饱和光强( $I_k$ )、快速光曲线的初始斜率( $\alpha$ )和相对最大电子传递速率( $ETR_{max}$ )。各参数的生物学意义参见文献[6,23-24]。暗处理 20 min 后测定,测定植物倒三展开叶,重复 3 次。

1.2.3 数据分析 测定所得数据由 Excel、DPS 9.50 软件进行分析。

## 2 结果与分析

2.1 高浓度锶、铯胁迫对植物叶绿素荧光 $F_0$ 、 $F_m$ 和 $F_v/F_m$ 的影响

2.1.1 高浓度锶、铯胁迫对植物 $F_0$ 和 $F_m$ 的影响  $F_0$ 表示植物最小荧光强度, $F_m$ 表示暗下植物最大荧光强度。表 1 显

示,高浓度 Sr、Cs 处理对植物  $F_0$  有不同影响,Sr 处理的平均  $F_0$  比 CK 低 2.86%,主要由水花生  $F_0$  降低所致;Cs 处理平均  $F_0$  比 CK 高 12.57%,使 5 种植物都有提高;高浓度 Sr、Cs 处理植物  $F_m$  都有不同程度降低,Sr 处理平均降低 5.56%,也主要为水花生  $F_m$  降低所致;Cs 处理  $F_m$  平均降低 1.63%,主要为菊苣、黄秋葵、藜  $F_m$  降低所致。方差分析表明,核素处理对  $F_0$  的影响显著( $F=3.40 > F_{0.05}=3.34$ ),但对  $F_m$  没有显著影响( $F=1.47 < F_{0.05}=3.34$ ),不同植物、核素和植物的互作对  $F_0$  影响不显著( $F=2.22 < F_{0.05}=2.71, F=0.66 < F_{0.05}=2.29$ ),但对  $F_m$  有极显著影响( $F=5.75 > F_{0.01}=4.07, F=5.02 > F_{0.01}=3.23$ )。差异显著性分析表明,Cs 处理  $F_0$  显著高于 Sr 处理,但与 CK 差异不显著。水花生与黄秋葵之间的  $F_0$  差异显著,其他植物之间差异不显著,这种差异主要是 Sr 处理所致。Sr 处理水花生的  $F_m$  极显低于其他植物,Cs 处理落葵的  $F_m$  极显著高于菊苣和水花生,但 CK 处理植物之间的  $F_m$  没有显著差异。

表 1 高浓度锶或铯胁迫对植物叶绿素荧光  $F_0$ 、 $F_m$  和  $F_v/F_m$  的影响

植物种类	$F_0$			$F_m$			$F_v/F_m$		
	Sr	Cs	CK	Sr	Cs	CK	Sr	Cs	CK
水花生	0.129	0.184	0.173	0.678	1.094	1.034	0.814	0.832	0.833
菊苣	0.176	0.220	0.172	1.031	0.868	1.029	0.829	0.753	0.832
落葵	0.176	0.194	0.178	1.133	1.176	1.109	0.845	0.834	0.840
黄秋葵	0.200	0.206	0.192	1.070	0.933	1.038	0.812	0.780	0.815
藜	0.171	0.182	0.162	1.022	1.070	1.017	0.833	0.830	0.841
平均	0.170bA	0.197aA	0.175abA	0.987a	1.028a	1.045a	0.827aA	0.806bB	0.832aA

注:同行同指标不同大写字母表示差异达 1% 显著水平,同行同指标不同小写字母表示差异达 5% 显著水平。

2.2 高浓度锶、铯胁迫对植物快速光曲线拟合参数的影响

2.2.1 高浓度锶、铯胁迫对植物快速光曲线初始斜率  $\alpha$  的影响  $\alpha$  是快速光曲线的初始斜率,可以评价植物的光能利用效率。从表 2 可知,在高浓度 Sr、Cs 处理下,植物快速光曲线平均初始斜率  $\alpha$  都有不同程度降低,Sr 处理的降低较小,平均降低 0.72%,而 Cs 处理降低了 8.30%。Sr 处理下受影响最大的是水花生,降幅达到 14.13%,落葵和黄秋葵  $\alpha$  值反而

2.1.2 高浓度锶、铯胁迫对植物  $F_v/F_m$  的影响  $F_v/F_m$  表示最大光化学效率,反映植物 PS II 光合中心内禀光能转换效率<sup>[6]</sup>,是评价植物遭受胁迫的最重要指标。植物在高浓度 Sr、Cs 处理下, $F_v/F_m$  略有下降(表 1),平均下降幅度分别为 0.60%、3.23%;但 Sr 处理落葵  $F_v/F_m$  略有提高,其他植物  $F_v/F_m$  降低;Cs 处理下 5 种植物的  $F_v/F_m$  都有降低,菊苣降幅最大,达 9.50%,水花生的  $F_v/F_m$  影响不明显。方差分析表明,不同核素处理、不同植物对  $F_v/F_m$  影响极显著( $F=7.70 > F_{0.01}=5.45, F=7.02 > F_{0.01}=5.55$ ),核素和植物的互作影响显著( $F=3.20 > F_{0.05}=2.29$ )。差异显著性分析表明,Sr 处理和 CK 的  $F_v/F_m$  没有显著差异,但极显著高于 Cs 处理。Sr 处理和 CK 之间的  $F_v/F_m$  也没有显著差异。Cs 处理的落葵、藜和水花生之间的  $F_v/F_m$  没有显著差异,但极显著高于菊苣和黄秋葵,说明高浓度 Cs 处理可极显著地降低菊苣和黄秋葵 PS II 的最大光化学效率。

增大。Cs 处理下落葵的快速光曲线初始斜率  $\alpha$  基本不受影响,其他植物  $\alpha$  值都有不同程度降低。方差分析表明,核素处理对  $\alpha$  值有显著影响( $F=4.56 > F_{0.05}=3.34$ ),植物对  $\alpha$  值影响极显著( $F=5.40 > F_{0.01}=4.07$ ),核素与植物互作对  $\alpha$  值影响不显著( $F=1.36 > F_{0.05}=2.29$ )。差异显著性分析表明,Cs 处理的  $\alpha$  值显著低于 Sr 处理和 CK,Sr 处理和 CK 间  $\alpha$  值没有显著差异。落葵的  $\alpha$  值极显著高于水花生和藜。

表 2 高浓度锶或铯胁迫对植物快速光曲线拟合参数影响

植物种类	$\alpha$			$I_k$			$ETR_{max}$		
	Sr	Cs	CK	Sr	Cs	CK	Sr	Cs	CK
水花生	0.231	0.247	0.269	144.03	183.07	134.07	36.57	44.17	35.63
菊苣	0.274	0.249	0.277	87.63	125.57	108.4	24.13	28.93	29.83
落葵	0.305	0.288	0.287	117.87	130.73	144.6	35.67	37.50	41.27
黄秋葵	0.305	0.247	0.287	109.87	192.3	88.27	33.53	47.53	25.17
藜	0.262	0.241	0.267	192.07	268.7	273.83	49.60	64.00	73.07
平均	0.275a	0.254b	0.277a	130.29b	180.07a	149.83ab	35.9a	44.43a	40.99a

注:同行同指标不同小写字母表示差异达 5% 显著水平。

2.2.2 高浓度锶、铯胁迫对植物  $I_k$  的影响  $I_k$  表示植物光合作用的半饱和光强,反映植物对光强的耐受能力。在高浓度 Sr、Cs 处理下,5 种植物的  $I_k$  都发生了变化(表 2),Sr 处理使植物  $I_k$  平均降低 13.04%,Cs 处理使植物  $I_k$  平均提高 20.18%。说明高浓度 Sr 处理将导致植物在强光下的光合作用减弱,高浓度 Cs 处理可增加植物在强光下的光合作用。不同植物  $I_k$  对高浓度 Sr、Cs 处理下的表现不同(表 2)。Sr 处理

的水花生和黄秋葵  $I_k$  增加,其他植物  $I_k$  降低;Cs 处理的水花生、黄秋葵、菊苣  $I_k$  增加,其他植物  $I_k$  降低。结果表明,高浓度 Sr、Cs 处理将增加水花生和黄秋葵在强光下的光合作用,而降低落葵和藜在强光下的光合作用。方差分析表明,核素处理对  $I_k$  的影响接近显著水平( $F=3.32 < F_{0.05}=3.34$ ),植物对  $I_k$  的影响极显著( $F=9.15 > F_{0.01}=4.07$ ),核素与植物互作对  $I_k$  的影响不显著( $F=0.84 < F_{0.05}=3.34$ )。差异显著

性分析表明, Cs 处理的  $I_k$  显著高于 Sr 处理, 但与 CK 没有显著差异, 处理的藜  $I_k$  极显著高于其他植物, 其他植物间  $I_k$  差异不显著。

2.2.3 高浓度镉、铈胁迫对植物  $ETR_{max}$  的影响  $ETR_{max}$  表示最大相对电子传递速率, 可以评价植物的光合电子传递能力。从表 2 可见, 在高浓度 Sr、Cs 处理下, 水花生和黄秋葵  $ETR_{max}$  值增加, 其他植物  $ETR_{max}$  值降低, 平均而言, Sr 处理对  $ETR_{max}$  值有降低作用, Cs 处理对  $ETR_{max}$  值有增加作用。方差分析表明, 不同核素处理间的  $ETR_{max}$  值差异不显著 ( $F = 2.25 < F_{0.05} = 3.34$ ), 但不同植物影响极显著 ( $F = 12.34 > F_{0.01} = 4.07$ ), 核素与植物互作影响不显著 ( $F = 1.32 < F_{0.05} = 2.29$ )。差异显著性分析表明, 处理的藜  $ETR_{max}$  值极显著高于其他植物, 而其他植物间差异不显著。

### 3 讨论

叶绿素荧光参数可以反映植物叶片光合系统 II (PS II) 对光能的吸收和利用情况<sup>[25]</sup>。许多因素影响叶绿素荧光参数的变化: (1) 水分影响。花后干旱使大麦敏感品种  $F_0$ 、 $F_v/F_m$  均有降低<sup>[2]</sup>, 耐旱能力强的植物  $F_v/F_m$  值都比较稳定<sup>[4]</sup>。Faraloni 等 (2011) 对离体和不离体油橄榄叶叶绿素荧光测定表明, 不同品种失水或干旱胁迫对  $F_v/F_m$  差异很大, 敏感品种下降很快 (达 90%), 耐旱品种变化较小<sup>[3]</sup>。水稻淹没后  $F_v/F_m$  降低<sup>[9]</sup>, 但美洲格尼帕树 (*Genipa americana*) 洪水淹 63 d 也未见光合机构损害<sup>[10]</sup>。(2) 温度和辐射影响。有些热敏感菜豆品种, 在温度从 26 °C 上升到 42 °C,  $F_0$  显著增加, 而  $F_m$  以及  $F_v/F_m$  显著下降, 而耐热品种的变化很小<sup>[7]</sup>。白花罗勒 (*Ocimum basilicum* L.) 在低温下光化学淬灭系数 ( $q_p$ ) 不受低温 (4 ~ 8 °C) 影响, 非光化学淬灭系数 ( $q_n$ ) 与叶的冷害症状呈正相关<sup>[8]</sup>。Tomas 等认为, 香蕉叶表面接受直射光的光化学损害大于散射光, 因为在直射光使  $F_v/F_m$  下降<sup>[5]</sup>。UV-B 辐射胁迫使大豆  $P_m$ 、 $I_k$  显著下降, 说明大豆光耐受能力和电子传递能力在 UV-B 辐射胁迫下显著减弱<sup>[6]</sup>。(3) 盐胁迫影响。氯化钠处理使向日葵叶绿素荧光降低, 主要是  $F_m$  减少<sup>[14]</sup>。NaCl 处理 1 d 后使绿豆、油菜  $F_0$  和  $F_m$  增加, 但 3 d 后使  $F_m$  降低<sup>[12]</sup>。但在 200 mmol/L NaCl 胁迫下, 番茄的  $F_0$ 、 $F_m$ 、 $F_v/F_m$  没有显著变化<sup>[13]</sup>。(4) 重金属影响。在 20 mg/L Cu 的胁迫下, 红花菜豆初期  $F_v/F_m$  的变化较小, 但随着生育进程的增加而使  $F_v/F_m$  等荧光参数降低<sup>[17]</sup>。100  $\mu$ mol/L Cd、Cu 使水藓的  $F_v/F_m$  显著下降, 但 100  $\mu$ mol/L Pb、Zn 对  $F_v/F_m$  没有明显影响<sup>[16]</sup>。铜胁迫降低植物 (*Thlaspi ochroleucum*) 的  $F_m$ , 提高了能量的非光化学反应的热耗散损失<sup>[26]</sup>。本研究表明, 含 Sr 500 mg/kg 土壤处理, 使植物尤其是水花生  $F_0$  降低, 而含 Cs 500 mg/kg 土壤处理, 使植物  $F_0$  显著提高; Sr 或 Cs 处理均使  $F_m$ 、 $F_v/F_m$  下降。由于  $F_v = F_m - F_0$ ,  $F_0$  的提高或  $F_m$  的下降, 将导致  $F_v$  和  $F_v/F_m$  的下降。俞慧娜等研究表明, 铝胁迫使  $F_v/F_m$  下降, 是提高了  $F_0$  和降低了  $F_m$  的共同结果<sup>[18]</sup>。本研究表明, Sr 胁迫降低植物最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ), 主要是降低了最大荧光 ( $F_m$ ), 这与香蕉缺水、向日葵盐害使  $F_m$  下降导致  $F_v/F_m$  下降<sup>[5, 14]</sup> 的情况相似; 而 Cs 降低植物最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 主要是提高了最

低荧光 ( $F_0$ ) 所致。同时, Sr 处理植物  $\alpha$  值比 CK 降低很少, 而 Cs 处理植物  $\alpha$  值比 CK 显著降低。 $\alpha$  值是快速光曲线的初始斜率, 反映了光能利用效率<sup>[6]</sup>, 说明同浓度 Cs 污染对植物光能利用效率的危害显著大于同浓度的 Sr 污染。有研究表明, 盐胁迫使番茄幼苗光合电子传递速率 ( $ETR$ ) 降低<sup>[27]</sup>, UV-B 辐射胁迫使大豆最大相对电子传递速率  $P_m$  (即  $ETR_{max}$ )、半饱和光强  $I_k$  显著下降<sup>[6]</sup>。本研究表明, Sr 和 Cs 对植物  $ETR_{max}$  和  $I_k$  有不同的影响, Sr 使它们降低, Cs 使其增加, 但与 CK 均无显著差异。

植物叶绿素荧光参数变化可能有不同的原因。Santos 认为, 盐 (NaCl) 胁迫抑制向日葵合成 5-氨基酮戊酸, 即叶绿素前体, 显著影响叶绿素的合成<sup>[14]</sup>。罗黄颖等认为, NaCl 胁迫使番茄叶绿素降解加剧, 叶绿素含量显著降低, 且叶绿素 b (Chlb) 比叶绿素 a (Chla) 降低幅度大, 从而影响了叶绿体对光能的吸收和传递, 光合电子传递过程受阻, 过剩激发能增加, 番茄被迫通过非辐射性热耗散释放 PS II 吸收的过多能量<sup>[27]</sup>, 这会导致叶绿素荧光的变化。Rau 等利用 EEL-光谱测定表明, 铜对水藓的危害原因是铜和细胞质中的 SH-基团形成螯合铜, 并在液泡中与磷酸盐一起沉淀<sup>[16]</sup>, 这可能会影响叶绿素荧光参数的变化。Ouzounidou 指出, Cu 对 PS II 质体醌受体的减少有影响, 这种影响也许与  $F_v$  变化有关<sup>[26]</sup>。李涵茂等认为, UV-B 辐射胁迫使大豆电子传递能力下降的可能原因是破坏了电子醌受体功能、酪氨酸氧化还原能力、放氧化合物以及 D1 蛋白<sup>[6]</sup>。Sr、Cs 胁迫引起植物叶绿素荧光参数的变化, 可能与这些 1 个或多个原因有关, 例如, 光合机构被破坏, 可能是 Cs 胁迫导致最低荧光 ( $F_0$ ) 提高的重要原因<sup>[24]</sup>。

植物叶绿素荧光参数变化可能会导致不同的后果。在高 B (硼) 浓度中, 植物叶症状部位光合活性的降低, 是在 PS II 水平上过度激发能量散失减少所致<sup>[28]</sup>, 叶绿素荧光降低严重会形成叶斑。Maksymiec 等认为, 红花菜豆在 Cu 胁迫下, 因 PS II 稳定性的丧失, 引起 Cu 在功能位点负向行为的增加, 降低了光合机构的活性, 以及使光合作用暗期酶的活性可能受到抑制<sup>[17]</sup>, 严重时会导致植物死亡。本研究表明, Sr 胁迫使植物生物产量比 CK 有所降低, Cs 胁迫使植物生物产量大大降低, 这与  $F_v/F_m$  降低的趋势相吻合。因此, Sr 或 Cs 胁迫使植物最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 降低, 将降低植物生物产量。

### 4 结论

高浓度 Sr、Cs 胁迫对植物叶绿素荧光特性有不同的影响。本研究表明: (1) Sr、Cs 胁迫均降低植物最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 和快速光曲线初始斜率  $\alpha$ , Cs 胁迫的降低极显著。Sr 主要降低了最大荧光  $F_m$  使  $F_v/F_m$  降低, Cs 主要提高了最低荧光  $F_0$  使  $F_v/F_m$  降低。(2) Sr 胁迫使植物叶绿素最大相对电子传递速率  $ETR_{max}$  和半饱和光强  $I_k$  下降, Cs 胁迫使其增加, 但均与 CK 没有显著差异。(3) Sr 胁迫对不同植物的  $F_v/F_m$  没有显著影响, 但 Cs 胁迫可极显著地降低菊苣和黄秋葵 PS II 的最大光化学效率  $F_v/F_m$ 。

### 参考文献:

[1] Shangguan Z P, Shao M, Dyckmans J. Effects of nitrogen nutrition and

- water deficit on net photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence in winter wheat[J]. J Plant Physiol, 2000, 156: 46–51.
- [2] Li R H, Guo P P, Baum M, et al. Evaluation of chlorophyll content and fluorescence parameters as indicators of drought tolerance in barley[J]. Agricultural Sciences in China, 2006, 5(10): 751–757.
  - [3] Faraloni C, Cutino I, Petruccielli R, et al. Chlorophyll fluorescence technique as a rapid tool for in vitro screening of olive cultivars (*Olea europaea* L.) tolerant to drought stress[J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 73: 49–56.
  - [4] Lai F O, Yeo T Y, Sim E K. Identification of drought – tolerant plants for roadside greening – An evaluation of chlorophyll fluorescence as an indicator to screen for drought tolerance[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2011, 10: 177–184.
  - [5] Tomas D S, Turner D W. Banana (*Musa* sp.) leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence in response to soil drought, shading, and lamina folding[J]. Scientia Horticulturae, 2001, 90: 93–108.
  - [6] 李涵茂, 胡正华, 杨燕萍, 等. UV – B 辐射增强对大豆叶绿素荧光特性的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3669–3675.
  - [7] Petkova V, Denev I D, Cholakov D, et al. Field screening for heat tolerant common bean cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.) by measuring of chlorophyll fluorescence induction parameters[J]. Scientia Horticulturae, 2007, 111: 101–106.
  - [8] Meir S, Ronen R, Lurie S, et al. Assessment of chilling injury during storage; Chlorophyll fluorescence characteristics of chilling – susceptible and triazole – induced chilling tolerant basil leaves[J]. Postharvest Biology and Technology, 1997, 10: 213–220.
  - [9] Panda D, Sharma S G, Sarkar R K. Chlorophyll fluorescence parameters, CO<sub>2</sub> photosynthetic rate and regeneration capacity as a result of complete submergence and subsequent re – emergence in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Aquatic Botany, 2008, 88: 127–133.
  - [10] Mielke M S, Almeida Alex – Alan F, Gomes F P, et al. Leaf gas exchange, chlorophyll fluorescence and growth responses of *Genipa americana* seedlings to soil flooding[J]. Environmental and Experimental Botany, 2003, 50: 221–231.
  - [11] Siffel P, Braunova Z, Sindelkova E, et al. The effect of simulated acid rain on chlorophyll fluorescence spectra of spruce seedlings (*Picea abies* L. Karst.) [J]. J Plant Physiol, 1996, 148: 271–275.
  - [12] Misra A N, Srivastava A, Strasser R J. Utilization of fast chlorophyll fluorescence technique in assessing the salt/ion sensitivity of mung bean and *Brassica* seedlings [J]. J Plant Physiol, 2001, 158: 1173–1181.
  - [13] Zribi L, Fatma G, Fatma R, et al. Application of chlorophyll fluorescence for the diagnosis of salt stress in tomato “*Solanum lycopersicum* (variety Rio Grande)” [J]. Scientia Horticulturae, 2009, 120: 367–372.
  - [14] Santos C V. Regulation of chlorophyll biosynthesis and degradation by salt stress in sunflower leaves[J]. Scientia Horticulturae, 2004, 103: 93–99.
  - [15] Drakiewicz M, Tukendorf A, Baszynski T. Age – dependent response of maize leaf segments to cadmium treatment; Effect on chlorophyll fluorescence and phytochelatin accumulation [J]. J Plant Physiol, 2003, 160: 247–254.
  - [16] Rau S, Miersch J, Neumann D, et al. Biochemical responses of the aquatic moss *Fontinalis antipyretica* to Cd, Cu, Pb and Zn determined by chlorophyll fluorescence and protein levels [J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 59: 299–306.
  - [17] Maksymiec W, Baszynski T. Chlorophyll fluorescence in primary leaves of excess Cu – treated runner bean plants depends on their growth stages and the duration of Cu – action [J]. J Plant Physiol, 1996, 149: 196–200.
  - [18] 俞慧娜, 刘 鹏, 徐根娣. 大豆生长及叶绿素荧光特性对铝胁迫的反应[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(3): 257–265.
  - [19] 张晓雪, 王 丹, 钟钊芝, 等. 鸡冠花(*Celosia cristata* Linn) 对 Cs 和 Sr 的胁迫反应及其积累特征[J]. 核农学报, 2010, 24(3): 628–633.
  - [20] 闻方平, 王 丹, 徐长合, 等. 苏丹草对<sup>133</sup>Cs 和<sup>88</sup>Sr 胁迫响应及吸收积累特征研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2009, 27(4): 212–217.
  - [21] 敖 嘉, 唐运来, 陈 梅, 等. Sr 胁迫对油菜幼苗抗氧化指标影响的研究[J]. 核农学报, 2010, 24(1): 166–170.
  - [22] Massas I, Skarlou V, Haidouti C. <sup>134</sup>Cs uptake by four plant species and Cs – K relations in the soil – plant system as affected by Ca(OH)<sub>2</sub> application to an acid soil [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2010, 101: 250–257.
  - [23] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide [J]. J Exp Bot, 2000, 51(345): 659–668.
  - [24] 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, 16(4): 444–448.
  - [25] Demmig – Adams B, Adams W W. Xanthophyll cycle and light stress in nature; Uniform response to excess direct sunlight among higher plant species [J]. Planta, 1996, 198: 460–470.
  - [26] Ouzounidou G. The use of photoacoustic spectroscopy in assessing leaf photosynthesis under copper stress; correlation of energy storage to photosystem II fluorescence parameters and redox change of P<sub>700</sub> [J]. Plant Science, 1996, 113: 229–237.
  - [27] 罗黄颖, 高洪波, 夏庆平, 等. γ – 氨基丁酸对盐胁迫下番茄活性氧代谢及叶绿素荧光参数的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(4): 753–761.
  - [28] Guidi L, Innocenti E D, Carmassi G, et al. Effects of boron on leaf chlorophyll fluorescence of greenhouse tomato grown with saline water [J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 73: 57–63.