

Cr³⁺胁迫对苦草叶片活性氧清除系统和叶细胞超微结构的影响

王小平, 宋东杰, 周泉澄, 陈全战, 刘少华

(南京晓庄学院生命科学系, 江苏 南京 211171)

摘要: 研究了不同浓度 Cr³⁺ 胁迫对苦草 [*Vallisneria natans* (Lour.) Hara] 叶片活性氧清除系统及细胞超微结构的影响。结果表明, 随 Cr³⁺ 浓度的提高 (0.5 ~ 15.0 mg · L⁻¹), 苦草叶片中 O₂⁻ 和 MDA 含量、SOD 和 POD 及 CAT 活性均呈现先上升后显著下降的变化趋势, 且在 10.0 和 15.0 mg · L⁻¹ Cr³⁺ 胁迫条件下显著低于对照 ($P < 0.05$)。在 1.0 mg · L⁻¹ Cr³⁺ 胁迫条件下, O₂⁻ 的含量达到最高 (0.96 OD · g⁻¹); 在 2.0 mg · L⁻¹ Cr³⁺ 胁迫条件下, MDA 含量和 SOD、POD 及 CAT 活性最高。随 Cr³⁺ 胁迫浓度的提高, 苦草叶片细胞超微结构受损程度逐渐加深, 导致核仁和高尔基体消失; 线粒体脊突膨胀, 线粒体膜受损并出现囊泡状结构; 叶绿体变形、类囊体膨胀受损并最终导致叶绿体破损。表明高浓度 Cr³⁺ 胁迫对苦草叶片细胞产生了不可逆的伤害。

关键词: 苦草; Cr³⁺ 胁迫; 抗氧化酶; 细胞超微结构

中图分类号: Q948.116; X503.233 文献标志码: A 文章编号: 1004-0978(2008)02-0056-05

Effects of Cr³⁺ stress on scavenging system of active oxygen and cell ultrastructure of *Vallisneria natans* leaf WANG Xiao-ping, SONG Dong-jie, ZHOU Quan-cheng, CHEN Quan-zhan, LIU Shao-hua (Department of Life Science, Nanjing Xiaozhuang College, Nanjing 211171, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2008, 17(2): 56-60

Abstract: Effects of Cr³⁺ stress with different concentrations on the scavenging system of active oxygen and cell ultrastructure of *Vallisneria natans* (Lour.) Hara leaf were investigated. The results showed that the contents of O₂⁻ and MDA and the activities of SOD, POD and CAT presented a trend of increasing firstly and then decreasing with increasing of Cr³⁺ concentration (0.5-15.0 mg · L⁻¹), and in 10.0 and 15.0 mg · L⁻¹ Cr³⁺ stress conditions, these indexes were obviously lower than that of the control ($P < 0.05$). The O₂⁻ content was the highest (0.96 OD · g⁻¹) in 1.0 mg · L⁻¹ Cr³⁺ stress condition, but the MDA content and the activities of SOD, POD and CAT reached the highest in 2.0 mg · L⁻¹ Cr³⁺ stress condition. With increasing of Cr³⁺ concentration, the injury degree of cell ultrastructure of *V. natans* leaf became more severe, and resulted in the nucleolus and golgi apparatus disappeared; the cristae of mitochondria swollen and mitochondria membrane damaged and then presented vacuolar mitochondria; the chloroplast deformed, the thylakoids swollen and eventually lead to chloroplasts break. It is concluded that the Cr³⁺ stress with high concentration has an irreversible injury to *V. natans* leaf cell.

Key words: *Vallisneria natans* (Lour.) Hara; Cr³⁺ stress; antioxidant enzyme; cell ultrastructure

铬是水环境中的主要重金属污染物之一, 对植物有毒害作用^[1]。近年来, 国内外有关重金属污染对植物毒害的研究较多, 而对苦草 [*Vallisneria natans* (Lour.) Hara] 受重金属离子胁迫后细胞的超微结构和抗性机理的研究则鲜见报道^[2]。苦草是多年生沉水草本植物, 是长江中下游淡水湖泊中沉水植被的优势种之一, 对稳定湖泊生态系统的结

构和功能有重要作用。此外, 苦草还是淡水湖泊中草食性或杂食性动物喜食的饲料, 在食物链中占有

收稿日期: 2007-11-28

基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金指导项目(2004KJD180113); 南京晓庄学院自然科学基金资助项目(2004NXY10); 南京晓庄学院重点课程生态学资助项目(2004NXY01)

作者简介: 王小平(1969-), 男, 江苏南京人, 学士, 讲师, 主要从事植物形态结构及植物生理学研究。

重要地位^[3]。

作者研究了在急性 Cr^{3+} 胁迫条件下,苦草叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶活性的变化以及超氧自由基(O_2^-)和丙二醛(MDA)含量的变化,并分析了 Cr^{3+} 对叶绿体、线粒体、高尔基体、细胞核、细胞壁、细胞膜和内质网等细胞超微结构伤害的规律性,以期为水环境中重金属污染监测与预防提供理论参考,并为苦草的栽培与养殖生产提供指导依据。

1 材料和方法

1.1 材料

实验用苦草采自南京市高淳县的固城湖水域。选择生长较好、株高 15~20 cm 的苦草植株,于稀释 40 倍的 Hoagland 培养液中进行预培养。

1.2 方法

1.2.1 处理方法 实验共设 6 个 Cr^{3+} 浓度处理,分别为 0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 和 15.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Cr^{3+} 以 CrCl_3 形式加入,用蒸馏水配制处理液并作为对照。取预培养 48 h、长势较一致的植株,吸干水分并称量,等量投入装有不同浓度 Cr^{3+} 处理液的玻璃缸(30 cm × 30 cm × 45 cm)中,置于 LRH-250-GS 型人工气候箱内,于光照 12 h · d⁻¹、25 °C 的条件下处理 7 d,胁迫结束后取样进行各项指标的测定和细胞超微结构的观察。各处理均重复 3 次。

1.2.2 生理指标的测定 取苦草的叶片测定各项生理指标。 O_2^- 含量按照王爱国和罗广华的方法^[4]测定;用硫代巴比妥酸(TBA)比色法^[5]测定 MDA 含量;SOD 活性参照 Giannoplitis 的方法^[6]测定,以抑制 NBT 光化还原 50% 为 1 个酶活性单位;采用愈创木酚氧化法^[7]测定 POD 活性;采用氧电极法^[8]测定 CAT 活性。

1.2.3 细胞超微结构的观察 叶片用双蒸水洗净后,切成 1 mm × 1 mm 的小块,用体积分数 4% 的戊二醛和质量体积分数 1% 的四氧化锇双重固定,丙酮系列脱水后,用 Epon 812 进行包埋,LKB-V 超薄切片器切片,经醋酸双氧铀-柠檬酸铅染色后,使用日立(HITACHI)A-600-2 透射电子显微镜进行观察并拍照。

1.3 数据处理

实验数据采用 EXCEL 软件进行统计处理,并对

实验组与对照组间的数据进行 *t* 检验。测定结果取 3 次重复测定的平均值。

2 结果和分析

2.1 Cr^{3+} 胁迫对苦草叶片中 O_2^- 和 MDA 含量的影响

不同浓度 Cr^{3+} 胁迫对苦草叶片中 O_2^- 和 MDA 含量的影响见表 1。经过 Cr^{3+} 胁迫后,苦草叶片中的 O_2^- 含量发生明显变化。1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr^{3+} 处理组苦草叶片的 O_2^- 含量最高,达到 0.96 $\text{OD} \cdot \text{g}^{-1}$,为对照组的 200%;5.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr^{3+} 处理组苦草叶片中的 O_2^- 含量为 0.45 $\text{OD} \cdot \text{g}^{-1}$,约为对照组的 94%;而 15.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr^{3+} 处理组苦草叶片的 O_2^- 含量最低(0.08 $\text{OD} \cdot \text{g}^{-1}$),仅约为对照组的 17%。在 0~1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内,随 Cr^{3+} 浓度的提高,苦草叶片的 O_2^- 含量逐渐增加;在 2.0~15.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内,随 Cr^{3+} 浓度的提高,苦草叶片中的 O_2^- 含量逐渐减少。其中 0.5~2.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr^{3+} 处理组苦草叶片中的 O_2^- 含量明显高于对照组($P < 0.05$),10.0 和 15.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr^{3+} 处理组苦草叶片的 O_2^- 含量明显低于对照组($P < 0.05$)。

表 1 不同浓度 Cr^{3+} 胁迫对苦草叶片中 O_2^- 和 MDA 含量的影响¹⁾
Table 1 Effect of Cr^{3+} stress with different concentrations on contents of O_2^- and MDA in *Vallisneria spiralis* (Lour.) Hara leaf¹⁾

Cr^{3+} 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Conc. of Cr^{3+}	O_2^- 含量/ $\text{OD} \cdot \text{g}^{-1}$ O_2^- content	MDA 含量/ $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ MDA content
0(CK)	0.48	37.5
0.5	0.79 ± 0.05 *	59.8 ± 4.12 *
1.0	0.96 ± 0.08 *	68.3 ± 4.79 *
2.0	0.81 ± 0.07 *	81.6 ± 5.21 *
5.0	0.45 ± 0.04	42.2 ± 3.06 *
10.0	0.13 ± 0.03 *	30.5 ± 2.12 *
15.0	0.08 ± 0.01 *	14.2 ± 1.52 *

¹⁾ *: $P < 0.05$.

受 Cr^{3+} 胁迫后,苦草叶片中 MDA 含量的变化与 O_2^- 的变化相似。2.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr^{3+} 处理组苦草叶片中的 MDA 含量最高(81.6 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$),为对照组的 218%;5.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr^{3+} 处理组的 MDA 含量为 42.2 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,仅比对照组高约 12.5%; Cr^{3+} 浓度达 10.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,叶片中的 MDA 含量低于正常值,为对照组的 81%;而 15.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr^{3+} 处理

组的 MDA 含量最低($14.2 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$), 仅约为对照组的 37.9%。结果表明, 在 $0 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内, 随 Cr^{3+} 浓度的提高, 苦草叶片中的 MDA 含量逐渐增加; 在 $5.0 \sim 15.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内, 随 Cr^{3+} 浓度的提高, 叶片中的 MDA 含量逐渐减少。其中 $0.5 \sim 5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 处理组苦草叶片的 MDA 含量明显高于对照组 ($P < 0.05$), 10.0 和 $15.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 处理组的 MDA 含量明显低于对照组 ($P < 0.05$)。

2.2 Cr^{3+} 胁迫对苦草叶片中 SOD、POD 和 CAT 活性的影响

SOD 是植物体内清除自由基的关键酶之一, 能催化生物体内的超氧自由基 O_2^- 发生歧化反应, 产生 O_2 和 H_2O_2 [10]; POD 能清除植物体内的过氧化物; CAT 则是清除植物体内 H_2O_2 的另一个关键酶 [9]。在胁迫条件下, 植物体内 SOD、POD 和 CAT 活性的变化与植物受伤害的程度有关。

经不同浓度 Cr^{3+} 胁迫后, 苦草叶片中的 SOD、POD 及 CAT 活性的变化见表 2。在低浓度 ($0 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Cr^{3+} 胁迫条件下, 随 Cr^{3+} 浓度的增加, 苦草叶片中的 SOD 活性明显上升, 以 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 处理组的 SOD 活性最高, 达到 $526 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$; 随 Cr^{3+} 浓度的逐渐提高 ($5.0 \sim 15.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 苦草叶片中的 SOD 活性缓慢下降, 且 Cr^{3+} 浓度高于 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各处理组苦草叶片的 SOD 活性均低于对照。t 检验结果表明, $0.5 \sim 5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 处理组苦草叶片的 SOD 活性显著高于对照 ($P < 0.05$), 10.0 和 $15.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 处理组的 SOD 活性显著低于对照 ($P < 0.05$)。

在 $0 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 胁迫下, 随着 Cr^{3+} 浓度的逐渐增加, 苦草叶片中的 POD 活性明显上升, 以 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 处理组的苦草叶片 POD 活性最高, 为对照组的 189%; 随 Cr^{3+} 浓度的提高 ($2.0 \sim 15.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 叶片中的 POD 活性明显降低, Cr^{3+} 浓度高于 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各处理组的 POD 活性均低于对照。t 检验结果显示, $0.5 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 处理组苦草叶片的 POD 活性显著高于对照 ($P < 0.05$); $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 处理组的 POD 活性与对照组相近; 10.0 和 $15.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 处理组的 POD 活性显著低于对照 ($P < 0.05$)。

在 $0 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 胁迫条件下, 随 Cr^{3+} 浓度的逐渐增加, 苦草叶片的 CAT 活性逐渐上升,

以 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 处理组叶片中的 CAT 活性最高 ($52 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$), 为对照组的 130%; 随 Cr^{3+} 浓度的提高 ($5.0 \sim 15.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 苦草叶片的 CAT 活性持续下降; Cr^{3+} 浓度高于 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各处理组苦草叶片的 CAT 活性均低于对照, 其中 $15.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 处理组的 CAT 活性最低, 仅为对照的 25%。t 检验结果显示, $1.0 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 处理组的 CAT 活性显著高于对照 ($P < 0.05$), 0.5 和 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 处理组的 CAT 活性与对照无显著差异, 10.0 和 $15.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 处理组的 CAT 活性显著低于对照 ($P < 0.05$)。

表 2 不同浓度 Cr^{3+} 胁迫对苦草叶片中 SOD、POD 和 CAT 活性的影响¹⁾

Table 2 Effect of Cr^{3+} stress with different concentrations on activities of SOD, POD and CAT in *Vallisneria spiralis* (Lour.) Hara leaf¹⁾

Cr^{3+} 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Conc. of Cr^{3+}	SOD	POD	CAT
0 (CK)	340	82	40
0.5	$432 \pm 9.64^*$	$129 \pm 4.64^*$	43 ± 3.53
1.0	$468 \pm 9.15^*$	$144 \pm 5.25^*$	$47 \pm 4.35^*$
2.0	$526 \pm 12.03^*$	$155 \pm 6.47^*$	$52 \pm 5.17^*$
5.0	$402 \pm 8.62^*$	83 ± 3.46	38 ± 2.84
10.0	$322 \pm 7.97^*$	$65 \pm 2.53^*$	$25 \pm 2.15^*$
15.0	$206 \pm 5.46^*$	$42 \pm 2.01^*$	$10 \pm 1.53^*$

¹⁾ SOD: SOD 活性 SOD activity ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$); POD: POD 活性 POD activity ($\text{OD}_{470} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$); CAT: CAT 活性 CAT activity ($\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$). *: $P < 0.05$.

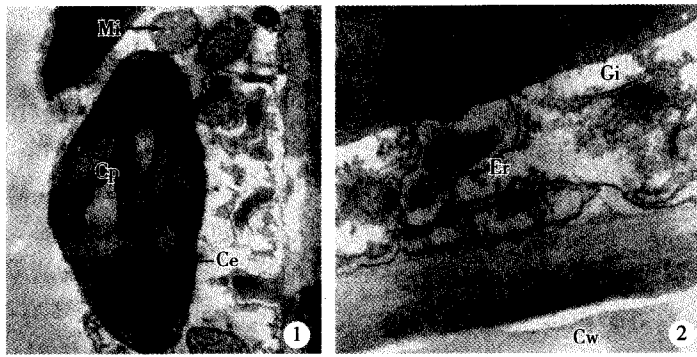
2.3 Cr^{3+} 胁迫对苦草叶片细胞超微结构的影响

正常的苦草叶片细胞的超微结构见图 1。由图 1 可见, 正常苦草叶片细胞中的叶绿体呈长椭圆形, 内部结构清晰, 基粒类囊体排列整齐紧密 (图 1-1); 线粒体呈圆形或椭圆形, 嵴突呈管状, 排列有序; 高尔基体形成较多的分泌囊泡 (图 1-2)。

不同浓度 Cr^{3+} 胁迫对苦草叶片细胞超微结构有明显损伤。 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 胁迫对苦草叶片细胞叶绿体和线粒体影响较小, 细胞超微结构无明显变化 (图 2-1); 在 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 胁迫条件下, 细胞中的细胞核受到损伤, 核仁消失, 核质不均匀, 核膜完整但边缘凸凹不平 (图 2-2); 在 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 胁迫条件下, 细胞中的高尔基囊泡松散、解体, 内质网膨胀、游离, 线粒体嵴突膨胀变形 (图 2-3); 在 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 胁迫条件下, 细胞中的线粒体嵴突紊乱且线粒体膜部分受损 (图 2-4); 在 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 胁迫条件下, 细胞中的线粒体呈囊泡

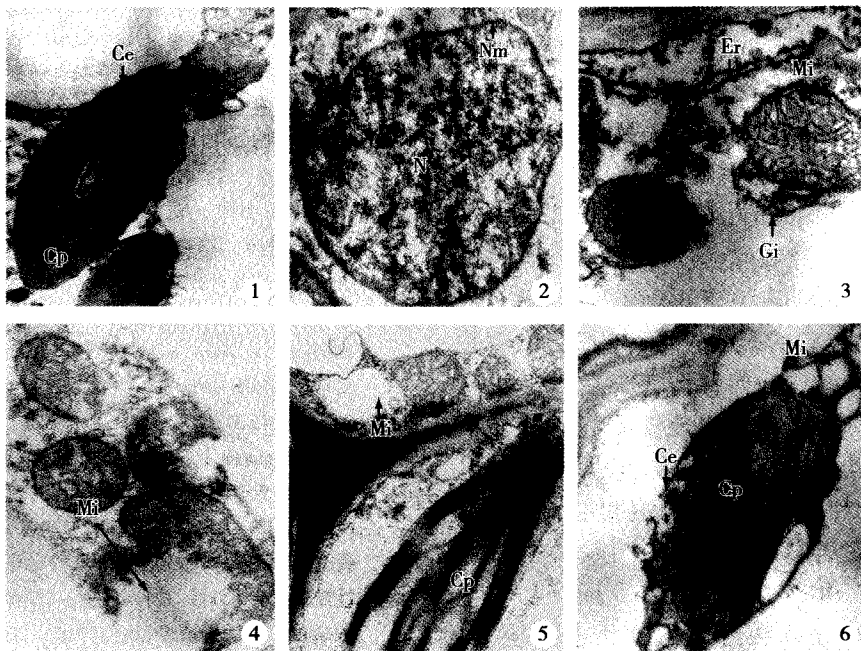
状、叶绿体变形、基粒类囊体和基质类囊体片层明显膨胀(图2-5);在 15.0 mg · L⁻¹Cr³⁺胁迫条件下,

细胞中的大多数线粒体呈囊泡状,叶绿体基粒进一步出现膨胀、解体和断裂等现象(图2-6)。



1. 叶绿体、叶绿体膜和线粒体 Chloroplast, chloroplast membrane and mitochondria (×17 000); 2. 内质网、细胞壁和高尔基体 Endoplasmic reticulum, cell wall and golgi apparatus (×35 000); Cw: 细胞壁 Cell wall; Cp: 叶绿体 Chloroplast; Ce: 叶绿体膜 Chloroplast membrane; Mi: 线粒体 Mitochondria; Gi: 高尔基体 Golgi apparatus; Er: 内质网 Endoplasmic reticulum.

图1 正常苦草叶片细胞的超微结构
Fig.1 Cell ultrastructure of *Vallisneria natans* (Lour.) Hara leaf under normal condition



1-6: 分别表示 0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 和 15.0 mg · L⁻¹Cr³⁺胁迫条件下苦草叶片细胞的超微结构 Showing the ultrastructure of leaf cells of *V. natans* under 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 and 15.0 mg · L⁻¹Cr³⁺ stress conditions. 1: 示轻微受伤的叶绿体 Showing the slight disrupted chloroplast (×17 000); 2: 示细胞核膜变形、核仁消失 Showing disrupted nucleus membrane and the disappearance of nucleolus (×15 000); 3: 示线粒体嵴突排列紊乱、膨胀的内质网和受伤的高尔基体 Showing the swollen cristae of mitochondria arranging in disorder, expansived endoplasmic reticulum and disrupted golgi apparatus (×35 000); 4: 示线粒体嵴突紊乱及膜破裂 Showing the swollen cristae of mitochondria arranging in disorder and mitochondria membrane rupture (×35 000); 5: 示线粒体呈空泡状、叶绿体基粒受损 Showing mitochondria appearing vacuolar and chloroplast grana disrupted (×25 000); 6: 示空泡状线粒体和受损变形的叶绿体 Showing vacuolar mitochondria and disrupted chloroplast (×25 000). N: 细胞核 Nucleus; Nm: 核膜 Nuclear membrane; Cp: 叶绿体 Chloroplast; Ce: 叶绿体膜 Chloroplast membrane; Mi: 线粒体 Mitochondria; Gi: 高尔基体 Golgi apparatus; Er: 内质网 Endoplasmic reticulum.

图2 不同浓度 Cr³⁺胁迫条件下苦草叶片细胞的超微结构
Fig. 2 Cell ultrastructure of *Vallisneria natans* (Lour.) Hara leaf under Cr³⁺ stress condition with different concentrations

3 讨 论

不同浓度 Cr^{3+} 胁迫对苦草叶片中的 O_2^- 和 MDA 含量均有一定的影响。 Cr^{3+} 浓度低于 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 苦草叶片中的 O_2^- 含量高于对照; Cr^{3+} 浓度高于 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 苦草叶片中的 O_2^- 含量低于对照。 Cr^{3+} 浓度低于 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 苦草叶片中的 MDA 含量高于对照; Cr^{3+} 浓度高于 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 叶片中的 MDA 含量低于对照。总之, 随 Cr^{3+} 浓度的提高, 苦草叶片中 O_2^- 和 MDA 含量均表现出低浓度时升高、高浓度时下降的变化趋势。 Cr^{3+} 浓度低于 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随 Cr^{3+} 浓度的提高, 苦草叶片中的 SOD、POD 和 CAT 活性有不同程度升高, 以便清除因 Cr^{3+} 胁迫而产生的活性氧自由基等物质, 使植物体免受伤害; Cr^{3+} 浓度高于 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随 Cr^{3+} 浓度的提高, O_2^- 含量显著增加, 苦草叶片细胞中活性氧自由基清除系统已不能有效地发挥作用, 使 O_2^- 诱发膜脂饱和和脂肪酸发生连锁的过氧化反应, 从而使苦草叶片中的 SOD、POD 和 CAT 的合成受到显著影响, 导致细胞抗氧化酶系统的损伤、酶活性显著下降。从 MDA 含量的变化也可以看出膜系统受伤害的程度。

从细胞超显微结构来看, 不同浓度 Cr^{3+} 胁迫对苦草叶片细胞的核膜、叶绿体、线粒体和细胞膜等均有影响。低浓度 Cr^{3+} (低于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 胁迫对苦草叶片细胞超显微结构的影响较小; 随 Cr^{3+} 浓度的提高, 对细胞超显微结构的伤害逐渐加大, Cr^{3+} 浓度达到 $0.5 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 细胞出现核膜变形、核质不均匀、高尔基体结构受损等损伤症状, 表明 Cr^{3+} 胁迫可能会影响苦草叶片分生细胞的分裂和生长。通过观察还发现, Cr^{3+} 对苦草叶片细胞的叶绿体和线粒体也有一定的损害。 Cr^{3+} 浓度低于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对苦草叶片细胞的叶绿体和线粒体的伤害不明显, Cr^{3+} 浓度增高, 伤害作用愈加明显。在 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr^{3+} 胁迫条件下, 苦草叶细胞的线粒体嵴突紊乱; 在 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr^{3+} 胁迫条件下, 线粒体出现囊泡状结构; Cr^{3+} 浓度高于 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 叶绿体受到严重损害, 出现基粒和基质类囊体的结构损伤, 进而使膜结构受损。

植物在受到逆境影响时, 体内产生的活性氧多集中于与植物光合作用和呼吸作用相关的叶绿体和线粒体中^[10], 随着胁迫程度的加剧, 不但使酶变性失去活力, 还会破坏内质网等结构, 影响酶的合成。随着 Cr^{3+} 胁迫浓度的进一步提高, 苦草受到的伤害不可逆转和修复, 如叶绿体膜结构的破坏等, 从而对光合作用等合成代谢过程产生严重影响。尤文鹏等发现, 经 Hg^{2+} 处理的金银莲花 [*Nymphoides indica* (L.) Kuntze] 的叶绿素总量可随 Hg^{2+} 浓度的增高而逐渐减少^[11], 这一研究结果也间接说明了重金属胁迫对植物细胞的叶绿体有明显的伤害作用。此外, Cr^{3+} 胁迫还能使细胞线粒体膜受损, 出现嵴突膨大或呈囊泡状等结构上的伤害症状, 影响植物的呼吸作用和能量供应, 最终导致植株死亡。

致谢: 南京师范大学杜开和老师 在电镜实验方面给予悉心指导, 谨此表示感谢!

参考文献:

- [1] 杨顶田, 施国新, 尤文鹏, 等. Cr^{6+} 污染对水鳖的叶绿素含量和几种酶活性的影响[J]. 南京师大学报: 自然科学版, 1999, 22(2): 92-96.
- [2] 朱增银, 陈 灿, 贾海霞, 等. 不同氮源对苦草生长及生理指标的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2006, 15(4): 48-51.
- [3] 熊秉红, 李 伟. 我国苦草属植物的生态学研究[J]. 武汉植物学研究, 2000, 18(6): 500-508.
- [4] 王爱国, 罗广华. 植物的超氧自由基与羟胺的定量关系[J]. 植物生理学通讯, 1990, 26(6): 55-57.
- [5] Heath R L, Parker L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation[J]. Arch Biophys, 1968, 25: 189-198.
- [6] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutases I. Occurrence in higher plants[J]. Plant Physiol, 1977, 59(2): 309-314.
- [7] 华东师范大学生物系植物生理教研室. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981: 143-144.
- [8] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2003: 121-123.
- [9] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 282-304.
- [10] 王爱国, 罗广华, 邵从本, 等. 植物的氧化代谢及活性氧对细胞的伤害[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 45-46.
- [11] 尤文鹏, 施国新, 常福辰, 等. Hg^{2+} 对金银莲花根和叶的伤害[J]. 植物资源与环境学报, 1999, 8(1): 56-58.