

Cr 胁迫对‘中山杉 406’幼苗生长和生理生化特性的影响

胡加玲^{1,2}, 於朝广³, 梁文超¹, 王晓容⁴, 谢寅峰^{1,①}

[1. 南京林业大学生命科学学院 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2. 北京市城市河湖管理处, 北京 100144;
3. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园) 江苏省植物资源研究与利用重点实验室, 江苏 南京 210014;
4. 重庆市南山植物园管理处, 重庆 400065]

摘要: 采用水培法模拟实验, 以亲本落羽杉[*Taxodium distichum* (Linn.) Rich.]为对照, 比较了不同浓度和处理时间 Cr 胁迫对‘中山杉 406’ (‘Zhongshanshan 406’) 幼苗生长、抗氧化系统和光合系统的影响。结果显示: 在中浓度 (5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 和高浓度 (20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Cr 处理 28 d 时, ‘中山杉 406’ 幼苗的相对生长速率和相对含水率以及叶片的相对电导率、叶绿素含量和丙二醛 (MDA) 含量的变幅均小于落羽杉。随着 Cr 浓度的增加和处理时间的延长, ‘中山杉 406’ 幼苗叶片的超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD) 活性总体呈升高的趋势, 而落羽杉幼苗叶片的 SOD 和 POD 活性总体呈先升高后降低的趋势, ‘中山杉 406’ 在处理后期 (28 d) 能维持较高的抗氧化酶活性。与对照 (0.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr) 相比, 在 1.25 和 5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理下, ‘中山杉 406’ 幼苗叶片的 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m)、PS II 有效光化学效率 (F_v'/F_m') 和 PS II 实际光化学效率 (Φ_{psII}) 总体变化不大, 而落羽杉的这 3 个叶绿素荧光参数在 5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理下显著降低, 且在 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理 28 d 时的降幅明显大于 ‘中山杉 406’; 随着处理时间的延长, ‘中山杉 406’ 幼苗叶片非光化学猝灭系数 (NPQ) 总体呈升高的趋势, 而落羽杉从处理 14 d 开始变化不大。Cr 胁迫下 2 种植物相对生长速率与叶片的光合系统指标 (叶绿素含量、 F_v/F_m 值、 F_v'/F_m' 值、 Φ_{psII} 值) 以及抗氧化系统指标 (SOD 活性、POD 活性和 MDA 含量) 有较高关联度, Φ_{psII} 值和叶绿素含量与抗氧化系统指标间有较强关联性。综上所述, ‘中山杉 406’ 和落羽杉对低浓度 (1.25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Cr 胁迫有一定的生长适应性, ‘中山杉 406’ 对中、高浓度 Cr 胁迫的抗性更强。Cr 胁迫下较强的 PS II 光化学性能、抗氧化能力和 PS II 热耗散能力是 ‘中山杉 406’ 维持较高生长速率以及防御光抑制和光破坏的重要机制。

关键词: Cr 胁迫; ‘中山杉 406’; 落羽杉; 生长; 抗氧化系统; 光合系统

中图分类号: Q948.11; Q945.78; S791 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)05-0022-11

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.05.03

Effects of Cr stress on growth and physiological and biochemical characteristics of ‘Zhongshanshan 406’ seedlings HU Jialing^{1,2}, YU Chaoguang³, LIANG Wenchao¹, WANG Xiaorong⁴, XIE Yinfeng^{1,①} [1. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, College of Life Sciences, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Beijing Municipal Administration of Rivers and Lakes, Beijing 100144, China; 3. Jiangsu Key Laboratory for the Research and Utilization of Plant Resources, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China; 4. Chongqing Nanshan Botanical Garden Management Office, Chongqing 400065, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(5): 22-32

Abstract: Taking the parent *Taxodium distichum* (Linn.) Rich. as the control, the effects of different concentrations and treatment times of Cr stress on growth, antioxidant system, and photosynthetic system

收稿日期: 2023-12-23

基金项目: 江苏省林业科技创新与推广项目 (LYKJ[2021]05)

作者简介: 胡加玲 (1995—), 女, 北京人, 硕士, 助理工程师, 主要从事植物修复重金属污染方面的研究。

①通信作者 E-mail: xxyff@njfu.edu.cn

引用格式: 胡加玲, 於朝广, 梁文超, 等. Cr 胁迫对‘中山杉 406’幼苗生长和生理生化特性的影响 [J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(5): 22-32.

of ‘Zhongshanshan 406’ seedlings were compared by using hydroponic simulation experiments. The results show that the variation degrees of relative growth rate and relative water content, and relative conductivity, leaf chlorophyll content and malondialdehyde (MDA) content in leaves of ‘Zhongshanshan 406’ seedlings are smaller than those of *T. distichum* under medium concentration ($5.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) and high concentration ($20.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) of Cr treatment for 28 d. With the increase of Cr concentration and the extension of treatment time, the activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) of leaves of ‘Zhongshanshan 406’ seedlings show a tendency to increase in general, while the SOD and POD activities of leaves of *T. distichum* seedlings show a tendency to first increase and then decrease, and ‘Zhongshanshan 406’ can maintain relatively high antioxidant enzyme activities in the later stage of treatment (28 d). Compared with the control ($0.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr), the variations of maximum photochemical efficiency of PS II (F_v/F_m), effective photochemical efficiency of PS II (F_v'/F_m'), and actual photochemical efficiency of PS II (Φ_{PSII}) of leaves of ‘Zhongshanshan 406’ seedlings are not great in general under the treatment of 1.25 and $5.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr, while these three chlorophyll fluorescence parameters of *T. distichum* significantly decrease under $5.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr treatment, and the decrease degree under $20.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr treatment for 28 d is obviously greater than that of ‘Zhongshanshan 406’; with the extension of treatment time, the nonphotochemical quenching coefficient (NPQ) of leaves of ‘Zhongshanshan 406’ seedlings shows a tendency to increase in general, while that of *T. distichum* remains relatively unchanged since treatment for 14 d. The relative growth rate of the two plants under Cr stress has relatively high correlation degrees with both photosynthetic system indexes (chlorophyll content, F_v/F_m value, F_v'/F_m' value, and Φ_{PSII} value) and antioxidant system indexes (SOD activity, POD activity, and MDA content) of leaves, and there are also relatively strong correlations of Φ_{PSII} value and chlorophyll content with antioxidant system indexes. In conclusion, ‘Zhongshanshan 406’ and *T. distichum* exhibit certain growth adaptability to low concentration ($1.25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Cr stress, and ‘Zhongshanshan 406’ shows stronger resistance to medium and high concentrations of Cr stress. Relatively strong PS II photochemical performance, antioxidant capacity, and PS II heat dissipation ability under Cr stress are important mechanisms for ‘Zhongshanshan 406’ to maintain a relatively high growth rate and defend against photoinhibition and photodamage.

Key words: Cr stress; ‘Zhongshanshan 406’; *Taxodium distichum* (Linn.) Rich.; growth; antioxidant system; photosynthetic system

Cr(主要为六价铬)污染是典型的重金属污染,具有转移性强、危害性大等特点,Cr极易被植物吸收,并在植物体内长期贮存和富集^[1],进而通过食物链进入人体内,危害人类身体健康^[2]。随着中国工业化步伐加快,Cr的应用范围和使用量逐年递增,导致生态环境中Cr含量逐年升高,特别是土壤中Cr含量急剧增加^[3-4]。Cr的生产制造与工业应用过程产生的废水(如Cr盐的提取、电镀、印染工业过程中产生的废水)大量排入土壤是导致土壤Cr污染的主要原因^[5-6]。土壤Cr污染治理迫在眉睫。

近年来,治理土壤Cr污染的方法主要包括物理、化学和生物修复技术^[7]。其中,生物修复技术中的植物修复法是一种具有较大优势的土壤修复方法,具有成本低、可原位修复和环境适应性强等优点^[8]。众多学者对该项技术的研究已取得一定进展。王爱云等^[9]采用3种超富集植物研究Cr胁迫对植物生长及Cr积累的影响,表明超富集植物对治理土壤Cr污

染具有较大潜力。汤茜等^[10]通过研究湿地植物再力花(*Thalia dealbata* Fraser)对Cr胁迫的生理生化响应,发现其对Cr胁迫有较强的适应力和耐污力,可作为Cr污染地区修复的植物之一。现有植物修复技术缓解土壤Cr污染的研究多集中在草本植物。但草本植物存在生物量小、种植环节复杂、难以应付复合重金属污染等难题。木本植物具有生物量大、生长能力强、能吸收多种离子等特点,在修复土壤重金属污染方面有着天然的优势^[11]。目前,有关木本植物缓解土壤Cr污染方面的报道涉及盐肤木(*Rhus chinensis* Mill.)、荆条[*Vitex negundo* var. *heterophylla* (Franch.) Rehder]和侧柏[*Platycladus orientalis* (Linn.) Franco]等^[12-13]。但关于木本植物缓解土壤Cr污染的研究仍较少^[14],不利于开展土壤Cr污染严重地区木本植物的筛选工作。

‘中山杉406’(‘Zhongshanshan 406’)是江苏省中国科学院植物研究所选育的优良新品种之一,其母

本为墨西哥落羽杉(*Taxodium mucronatum* Tenore), 父本为落羽杉(*Taxodium distichum* (Linn.) Rich.)。‘中山杉 406’已获得江苏省林木良种认定, 具有速生、耐盐碱、耐水湿、耐干旱、绿期长和扦插繁殖系数大等优点^[15], 在城市园林绿化、农田林网和滩涂造林等领域已经被广泛应用^[16]。目前, 有关‘中山杉’(‘Zhongshanshan’)耐盐碱、耐水湿等方面的研究较多^[17-19], 但在重金属抗性方面的研究, 只有Cd胁迫‘中山杉 118’(‘Zhongshanshan 118’)和‘中山杉 406’的相关报道^[20]。为进一步探究‘中山杉 406’对重金属的生理生化响应, 本研究采用水培法模拟实验, 以亲本落羽杉(具有耐水湿特性)^[21]作为对照, 探究‘中山杉 406’对Cr胁迫的生理生化响应。以期揭示‘中山杉 406’耐Cr胁迫能力及其生理生化响应机制, 并为Cr污染地区生态环境修复应用提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料

供试材料为江苏省中国科学院植物研究所提供的长势良好的‘中山杉 406’和落羽杉1年生扦插苗。2018年4月初将幼苗移至塑料盆(高40 cm、上直径30 cm、下直径25 cm)中, 每盆3株, 每盆加6 L Hoagland 营养液(pH 6.0至pH 6.5), 过渡培养6周后, 用于Cr胁迫处理。水培期间每周更换1次营养液, 每天上午、下午各通气1次, 每次2 h, 下同。

1.2 方法

1.2.1 实验设置 以南京林业大学危化品仓库提供的重铬酸钾($K_2Cr_2O_7$)为Cr源, 水培法处理。根据预实验的结果设置Cr胁迫浓度分别为0.00(对照)、1.25(低浓度)、5.00(中浓度)、20.00(高浓度) $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。每个浓度设置5盆重复。胁迫处理时间共28 d, 每周取样测定各项生理生化指标。取幼苗中上部生理状况相近的成熟叶片10枚, 装入自封袋, 带回实验室放于 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱保存, 用于生理生化指标测定。

1.2.2 生长指标测定 实验开始时(处理0 d)使用千分之一电子天平按组称量植株鲜质量。实验结束时(处理28 d)将所有植株按组分装, 带回实验室, 用去离子水冲洗、擦干, 将根与茎叶分开, 使用千分之一电子天平称量鲜质量后, 将鲜样在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中杀青30 min, 于 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干72 h至恒质量后使用千分

之一电子天平称量干质量^[22]。参考文献[23]的方法计算相对生长速率, 计算公式为相对生长速率=[(实验结束时植株鲜质量-实验开始时植株鲜质量)/实验结束时植株鲜质量] $\times 100\%$ 。参考文献[24]的方法计算相对含水率, 计算公式为相对含水率=[(实验结束时植株鲜质量-实验结束时植株干质量)/实验结束时植株鲜质量] $\times 100\%$ 。

1.2.3 生理生化指标测定 采用分光光度法^[25]测定叶绿素含量。参考王学奎的方法测定相对电导率^{[26]289}和丙二醛(MDA)含量^{[26]288}。采用氮蓝四唑(NBT)法^{[27]211-213}测定超氧化物歧化酶(SOD)活性。采用比色法^{[27]217-219}测定过氧化物酶(POD)活性。采用叶绿素荧光成像系统(英国 Technologica 公司)测定相关叶绿素荧光参数, 包括PS II最大光化学效率(F_v/F_m)、PS II有效光化学效率(F_v'/F_m')、PS II实际光化学效率(Φ_{PSII})和非光化学猝灭系数(NPQ)。

1.2.4 灰色关联度分析 灰色关联度分析适用于小样本^[28], 采用该方法对处理28 d的‘中山杉 406’和落羽杉幼苗相对生长速率与相对电导率、叶绿素含量、SOD活性、POD活性、MDA含量、 F_v/F_m 值、 F_v'/F_m' 值、 Φ_{PSII} 值和NPQ值进行灰色关联度分析。为进一步探讨‘中山杉 406’和落羽杉叶片光合系统与抗氧化系统的关联性, 选取光合系统重要指标 Φ_{PSII} 值和叶绿素含量与抗氧化系统指标SOD活性、POD活性和MDA含量分别进行灰色关联度分析。采用初始值化法进行灰色关联度分析的数据标准化, 并计算关联系数和关联度^[29]。关联度反映了特征序列对参考序列的影响程度, 关联度大于0.5说明相关性程度较大^[30-31]。

1.3 数据处理和分析

使用EXCEL 2016软件处理数据, 使用SPSS 21.0软件对数据进行统计分析。

2 结果和分析

2.1 Cr胁迫对‘中山杉 406’和落羽杉幼苗相对生长速率和相对含水率的影响

不同浓度Cr处理28 d对‘中山杉 406’和落羽杉幼苗相对生长速率和相对含水率的影响见表1。结果显示: 随着Cr浓度的增加, ‘中山杉 406’和落羽杉幼苗相对生长速率均呈先升高后降低的趋势。1.25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr处理下‘中山杉 406’幼苗相对生长速率

较对照 (0.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$) 升高了 5.0%; 5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下的相对生长速率较对照分别降低了 21.1% 和 36.0%, 且差异显著。1.25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下落羽杉幼苗相对生长速率较对照升高了 3.0%; 5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下的相对生长速率较对照分别降低了 41.6% 和 72.0%, 且差异显著。5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下‘中山杉 406’幼苗相对生长速率降幅均小于落羽杉。

随着 Cr 浓度的增加, ‘中山杉 406’幼苗相对含水率呈先升高后降低的趋势, 落羽杉幼苗相对含水率呈降低的趋势。1.25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下‘中山杉 406’幼苗相对含水率较对照升高了 3.2%; 5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下的相对含水率较对照分别降低了 8.2% 和 21.4%, 仅 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理与对照差异显著。1.25、5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下落羽杉幼苗相对含水率较对照分别降低了 13.3%、29.4% 和 48.8%, 且差异显著。5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下‘中山杉 406’幼苗相对含水率降幅均小于落羽杉。

总体上看, ‘中山杉 406’和落羽杉幼苗的相对生长速率和相对含水率随着 Cr 浓度的增加呈先升高后降低的趋势, 且中浓度 (5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 和高浓度 (20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Cr 处理下‘中山杉 406’幼苗相对含水率和相对含水率的降幅均小于落羽杉。

2.2 Cr 胁迫对‘中山杉 406’和落羽杉幼苗叶片相对电导率和叶绿素含量的影响

不同浓度 Cr 处理 28 d 对‘中山杉 406’和落羽杉幼苗叶片相对电导率和叶绿素含量的影响见表 2。结果显示: 随着 Cr 浓度的增加, ‘中山杉 406’和落羽

杉幼苗叶片相对电导率呈升高的趋势。1.25、5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下‘中山杉 406’幼苗叶片相对电导率较对照 (0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$) 分别升高了 3.1%、21.2% 和 35.1%, 仅 5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理与对照差异显著。1.25、5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下落羽杉幼苗叶片相对电导率较对照分别升高了 15.5%、46.8% 和 56.2%, 仅 5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理与对照差异显著。1.25、5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下‘中山杉 406’幼苗叶片相对电导率增幅均小于落羽杉幼苗。

随着 Cr 浓度的增加, ‘中山杉 406’和落羽杉幼苗叶片叶绿素含量均呈先升高后降低的趋势。1.25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下‘中山杉 406’幼苗叶片叶绿素含量较对照升高了 6.6%; 5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下的叶片叶绿素含量较对照分别降低了 3.3% 和 8.2%。1.25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下落羽杉幼苗叶片叶绿素含量较对照升高了 2.8%, 且差异显著; 5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下的叶片叶绿素含量较对照分别降低了 4.8% 和 14.5%, 仅 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理与对照差异显著。5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}$ 处理下‘中山杉 406’幼苗叶片叶绿素含量降幅均小于落羽杉。

总体上看, 随着 Cr 浓度的增加, ‘中山杉 406’和落羽杉幼苗叶片相对电导率呈升高的趋势, 叶片叶绿素含量呈先升高后降低的趋势, 且中浓度 (5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 和高浓度 (20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Cr 处理下‘中山杉 406’幼苗叶片相对电导率和叶绿素含量的变幅均小于落羽杉。

表 1 不同浓度 Cr 处理 28 d 对‘中山杉 406’和落羽杉幼苗相对生长速率和相对含水率的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾
Table 1 Effects of different concentrations of Cr treatment for 28 d on relative growth rate and relative water content in ‘Zhongshanshan 406’ and *Taxodium distichum* (Linn.) Rich. seedlings ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

c	相对生长速率/% Relative growth rate		相对含水率/% Relative water content	
	‘中山杉 406’ ‘Zhongshanshan 406’	落羽杉 <i>T. distichum</i>	‘中山杉 406’ ‘Zhongshanshan 406’	落羽杉 <i>T. distichum</i>
0.00	126.86±4.46a	130.14±6.13a	77.14±2.16a	83.62±2.14a
1.25	133.16±3.52a	134.04±4.15a	79.64±2.21a	72.52±2.72b
5.00	100.06±5.29b	75.94±5.14b	70.84±2.15ab	59.02±4.53c
20.00	81.16±4.55c	36.44±4.09c	60.64±3.17b	42.81±3.23d

¹⁾ c: Cr 浓度 Concentration of Cr ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$). 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$).

表 2 不同浓度 Cr 处理 28 d 对‘中山杉 406’和落羽杉幼苗叶片相对电导率和叶绿素含量的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾
Table 2 Effects of different concentrations of Cr treatment for 28 d on relative conductivity and chlorophyll content in leaves of ‘Zhongshanshan 406’ and *Taxodium distichum* (Linn.) Rich. seedlings ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

c	相对电导率/% Relative conductivity		叶绿素含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Chlorophyll content	
	‘中山杉 406’ ‘Zhongshanshan 406’	落羽杉 <i>T. distichum</i>	‘中山杉 406’ ‘Zhongshanshan 406’	落羽杉 <i>T. distichum</i>
0.00	14.67±1.32c	15.29±1.31b	2.43±0.09ab	2.49±0.16b
1.25	15.13±1.59c	17.66±1.45b	2.59±0.15a	2.56±0.23a
5.00	17.78±1.73b	22.45±1.61a	2.35±0.21b	2.37±0.17b
20.00	19.82±1.87a	23.88±1.94a	2.23±0.13b	2.13±0.15c

¹⁾ c: Cr 浓度 Concentration of Cr ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$). 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$).

2.3 Cr胁迫对‘中山杉406’和落羽杉幼苗叶片抗氧化系统的影响

不同浓度Cr处理对‘中山杉406’和落羽杉幼苗叶片抗氧化系统的影响见表3。结果显示:随着Cr浓度的增加及处理时间的延长,‘中山杉406’幼苗叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性呈升高的趋势,其中,不同处理时间1.25、5.00和20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr处理均与对照(0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr)差异显著。在处理28 d, 1.25、5.00和20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr处理下‘中山杉406’幼苗叶片SOD活性较对照分别升高了12.6%、20.7%和29.9%。随着Cr浓度的增加,不同处理时间落羽杉幼苗叶片SOD活性呈先升高后降低的趋势,5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr处理下的叶片SOD活性均最高,且与对照差异显著;随着处理时间的延长,1.25、5.00和20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr处理下落羽杉幼苗叶片SOD活性呈先升高后降低的趋势,处理21 d的落羽杉幼苗叶片SOD活性最高。在处理28 d, 1.25、5.00和20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr处理下落羽杉幼苗叶片SOD活性较对照分别升高了16.8%、39.4%和31.4%。

随着Cr浓度的增加及处理时间的延长,‘中山杉406’幼苗叶片过氧化物酶(POD)活性总体呈升高的趋势,其中,不同处理时间的1.25、5.00和20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr处理均与对照差异显著。在处理28 d, 1.25、5.00和20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr处理下‘中山杉406’幼苗叶片POD活性较对照分别升高了21.9%、25.7%和36.4%。随着Cr浓度的增加,不同处理时间的落羽杉幼苗叶片POD活性呈先升高后降低的趋势,5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr处理下的POD活性均最高,且与对照差异显著;随着处理时间的延长,1.25、5.00和20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr处理下落羽杉幼苗叶片POD活性呈先升高后降低的趋势,处理21 d的落羽杉幼苗叶片POD活性最高。在处理28 d, 1.25、5.00和20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr处理下落羽杉幼苗叶片POD活性较对照分别升高了8.0%、37.4%和31.7%。

随着Cr浓度的增加,不同处理时间‘中山杉406’和落羽杉幼苗叶片丙二醛(MDA)含量总体呈升高的趋势,其中,不同处理时间20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr处理均与对照差异显著;随着处理时间的延长,不同浓

表3 不同浓度Cr处理对‘中山杉406’和落羽杉幼苗叶片抗氧化系统的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 3 Effects of different concentrations of Cr treatment on antioxidant system of leaves of ‘Zhongshanshan 406’ and *Taxodium distichum* (Linn.) Rich. seedlings ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

c	不同处理时间‘中山杉406’的超氧化物歧化酶活性/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$) Superoxide dismutase activity of ‘Zhongshanshan 406’ at different treatment times				不同处理时间落羽杉的超氧化物歧化酶活性/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$) Superoxide dismutase activity of <i>T. distichum</i> at different treatment times			
	7 d	14 d	21 d	28 d	7 d	14 d	21 d	28 d
0.00	260.64±10.80b	270.37±10.85b	273.71±3.01b	286.71±10.65b	237.31±10.02b	235.07±10.82c	246.89±9.27b	247.00±9.52b
1.25	270.12±14.02a	282.14±10.74a	302.93±9.22a	322.93±11.03a	268.35±9.02b	306.46±10.45b	342.55±8.24a	288.48±10.16b
5.00	287.82±9.02a	300.45±10.02a	320.97±6.01a	345.97±13.02a	352.38±13.01a	383.81±9.71a	410.71±10.98a	344.21±8.75a
20.00	298.36±12.06a	334.60±12.02a	350.37±8.01a	372.37±11.42a	303.66±10.03b	343.24±8.31a	378.19±12.57a	324.67±12.36a
c	不同处理时间‘中山杉406’的过氧化物酶活性/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) Peroxidase activity of ‘Zhongshanshan 406’ at different treatment times				不同处理时间落羽杉的过氧化物酶活性/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) Peroxidase activity of <i>T. distichum</i> at different treatment times			
	7 d	14 d	21 d	28 d	7 d	14 d	21 d	28 d
0.00	288.33±6.82b	295.83±14.42b	298.67±8.04b	289.67±14.13b	266.17±13.20b	253.33±16.93c	259.50±11.96c	265.83±13.75b
1.25	301.83±10.85a	330.83±15.07a	340.17±18.44a	353.17±18.76a	275.33±11.81b	298.67±16.43b	310.00±18.03b	287.00±16.75b
5.00	312.83±14.27a	345.50±16.84a	360.00±13.92a	364.17±10.41a	325.33±11.26a	375.00±6.50a	394.17±13.05a	365.17±6.75a
20.00	333.33±10.49a	369.33±17.71a	377.33±12.15a	395.00±10.72a	293.17±18.43b	325.50±7.55b	375.00±18.03a	350.17±5.20a
c	不同处理时间‘中山杉406’的丙二醛含量($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Malondialdehyde content in ‘Zhongshanshan 406’ at different treatment times				不同处理时间落羽杉的丙二醛含量($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Malondialdehyde content in <i>T. distichum</i> at different treatment times			
	7 d	14 d	21 d	28 d	7 d	14 d	21 d	28 d
0.00	23.28±2.57c	21.65±1.95b	20.31±4.88b	20.74±0.74bc	25.35±3.29c	25.66±2.30c	22.24±1.85c	25.32±3.60c
1.25	25.59±1.47ab	22.38±3.09b	21.03±4.12ab	20.93±2.95bc	26.33±5.35b	25.30±6.17c	22.42±4.63c	28.70±1.06c
5.00	26.20±3.56a	22.75±4.99b	21.72±2.21a	21.44±6.47b	35.67±4.69ab	30.56±5.24b	32.37±1.31b	33.45±5.26b
20.00	26.85±6.58a	27.55±1.41a	22.93±6.35a	24.94±2.40a	37.86±12.61a	40.34±5.18a	40.79±3.91a	39.41±5.64a

¹⁾ c: Cr浓度 Concentration of Cr ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$). 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$).

度 Cr 处理下‘中山杉 406’和落羽杉幼苗叶片 MDA 含量变化各异。在处理 28 d, 1.25、5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理下‘中山杉 406’幼苗叶片 MDA 含量较对照分别升高了 0.9%、3.4% 和 20.3%, 1.25、5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理下落羽杉幼苗叶片 MDA 含量较对照分别升高了 13.3%、32.1% 和 55.6%。

总体上看,不同浓度和处理时间的 Cr 处理可提高‘中山杉 406’和落羽杉幼苗叶片的 SOD 和 POD 活性,同一处理时间不同浓度 Cr 处理可提高‘中山杉 406’和落羽杉幼苗叶片 MDA 含量。不同处理时间高浓度(20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)Cr 处理下‘中山杉 406’幼苗叶片的 SOD 活性、POD 活性和 MDA 含量均最高;

不同处理时间中浓度(5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)Cr 处理下落羽杉幼苗叶片的 SOD 和 POD 活性均最高,高浓度 Cr 处理下落羽杉幼苗叶片 MDA 含量均最高。1.25、5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理下,‘中山杉 406’幼苗叶片的 SOD 和 POD 活性均在处理 28 d 达到最大值,落羽杉幼苗叶片的 SOD 和 POD 活性均在处理 21 d 达到最大值。

2.4 Cr 胁迫对‘中山杉 406’和落羽杉幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

不同浓度 Cr 处理对‘中山杉 406’和落羽杉幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响见表 4。结果显示:随着 Cr 浓度的增加,不同处理时间‘中山杉 406’幼苗叶

表 4 不同浓度 Cr 处理对‘中山杉 406’和落羽杉幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 4 Effects of different concentrations of Cr treatment on chlorophyll fluorescence parameters of leaves of ‘Zhongshanshan 406’ and *Taxodium distichum* (Linn.) Rich. seedlings ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

c	不同处理时间‘中山杉 406’的 PS II 最大光化学效率 Maximum photochemical efficiency of PS II of ‘Zhongshanshan 406’ at different treatment times				不同处理时间落羽杉的 PS II 最大光化学效率 Maximum photochemical efficiency of PS II of <i>T. distichum</i> at different treatment times			
	7 d	14 d	21 d	28 d	7 d	14 d	21 d	28 d
0.00	0.82±0.02a	0.78±0.03a	0.83±0.02a	0.79±0.03a	0.79±0.04a	0.78±0.04a	0.82±0.01a	0.80±0.01a
1.25	0.71±0.04a	0.76±0.03a	0.79±0.03a	0.78±0.04a	0.76±0.07a	0.75±0.08a	0.76±0.04a	0.73±0.02a
5.00	0.69±0.03b	0.73±0.04a	0.75±0.04a	0.73±0.03b	0.73±0.05b	0.63±0.06b	0.65±0.04b	0.62±0.05b
20.00	0.68±0.02b	0.67±0.03b	0.69±0.01b	0.67±0.04b	0.70±0.08c	0.58±0.07c	0.58±0.06c	0.57±0.04c
c	不同处理时间‘中山杉 406’的 PS II 有效光化学效率 Effective photochemical efficiency of PS II of ‘Zhongshanshan 406’ at different treatment times				不同处理时间落羽杉的 PS II 有效光化学效率 Effective photochemical efficiency of PS II of <i>T. distichum</i> at different treatment times			
	7 d	14 d	21 d	28 d	7 d	14 d	21 d	28 d
0.00	0.56±0.01b	0.54±0.01b	0.54±0.01a	0.56±0.01a	0.59±0.00a	0.54±0.00a	0.55±0.00a	0.53±0.00a
1.25	0.58±0.01a	0.57±0.01a	0.54±0.01a	0.57±0.00a	0.56±0.01b	0.53±0.01ab	0.54±0.00a	0.51±0.01a
5.00	0.62±0.00a	0.56±0.00a	0.57±0.00a	0.60±0.00a	0.55±0.01b	0.47±0.00b	0.50±0.01b	0.48±0.00b
20.00	0.55±0.01b	0.53±0.01b	0.51±0.01b	0.52±0.01b	0.52±0.00c	0.46±0.01b	0.46±0.00c	0.44±0.00c
c	不同处理时间‘中山杉 406’的 PS II 实际光化学效率 Actual photochemical efficiency of PS II of ‘Zhongshanshan 406’ at different treatment times				不同处理时间落羽杉的 PS II 实际光化学效率 Actual photochemical efficiency of PS II of <i>T. distichum</i> at different treatment times			
	7 d	14 d	21 d	28 d	7 d	14 d	21 d	28 d
0.00	0.43±0.01a	0.44±0.01a	0.42±0.01a	0.42±0.01a	0.42±0.00a	0.42±0.01a	0.43±0.00a	0.38±0.00b
1.25	0.45±0.01a	0.45±0.01a	0.43±0.01a	0.43±0.00a	0.41±0.01a	0.38±0.00b	0.40±0.01a	0.43±0.00a
5.00	0.46±0.01a	0.46±0.00a	0.45±0.00a	0.43±0.00a	0.37±0.01b	0.37±0.00b	0.37±0.00b	0.34±0.01c
20.00	0.40±0.01b	0.37±0.01b	0.41±0.01b	0.36±0.01b	0.35±0.00c	0.33±0.01c	0.34±0.01c	0.32±0.01c
c	不同处理时间‘中山杉 406’的非光化学猝灭系数 Nonphotochemical quenching coefficient of ‘Zhongshanshan 406’ at different treatment times				不同处理时间落羽杉的非光化学猝灭系数 Nonphotochemical quenching coefficient of <i>T. distichum</i> at different treatment times			
	7 d	14 d	21 d	28 d	7 d	14 d	21 d	28 d
0.00	1.04±0.06b	1.02±0.20c	1.07±0.05d	1.06±0.09d	1.55±0.09c	1.39±0.09c	1.56±0.08c	1.34±0.07c
1.25	1.11±0.08b	1.17±0.23c	1.24±0.14c	1.25±0.06c	1.62±0.09c	1.42±0.09c	1.58±0.08c	1.37±0.09c
5.00	1.45±0.09a	1.55±0.07b	1.64±0.07b	1.73±0.08b	2.14±0.09b	2.38±0.09b	2.37±0.07b	2.47±0.09ab
20.00	1.47±0.08a	1.72±0.08a	1.82±0.08a	1.96±0.09a	2.36±0.07a	2.69±0.09a	2.65±0.07a	2.63±0.09a

¹⁾ c: Cr 浓度 Concentration of Cr ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$). 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$).

片 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m) 呈降低的趋势, PS II 有效光化学效率 (F_v'/F_m') 和 PS II 实际光化学效率 (Φ_{PSII}) 总体呈先升高后降低的趋势, 非光化学猝灭系数 (NPQ) 呈升高的趋势, 其中, 不同处理时间 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理总体与对照 (0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr) 差异显著。随着 Cr 浓度的增加, 不同处理时间落羽杉幼苗叶片的 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 和 Φ_{PSII} 值总体呈降低的趋势, NPQ 值呈升高的趋势, 其中, 不同处理时间 5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理与对照差异显著。随着处理时间的延长, 不同浓度 Cr 处理下 ‘中山杉 406’ 和落羽杉幼苗叶片的 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 和 NPQ 值变化各异, 但总体变化不大。在处理 28 d, 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理下 ‘中山杉 406’ 幼苗叶片的 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 和 Φ_{PSII} 值较对照分别降低了 15.2%、7.1% 和 14.3%, NPQ 值较对照升高了 84.9%; 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理下落羽杉幼苗叶片的 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 和 Φ_{PSII} 值较对照分别降低了 28.8%、17.0% 和 15.8%, NPQ 值较对照升高了 96.3%。

总体上看, 同一处理时间不同浓度 Cr 处理可降低 ‘中山杉 406’ 幼苗叶片 F_v/F_m 值, 提高 NPQ 值; 1.25、5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理可提高 ‘中山杉 406’ 幼苗叶片的 F_v'/F_m' 和 Φ_{PSII} 值, 而 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理可降低 ‘中山杉 406’ 幼苗叶片的 F_v'/F_m' 和 Φ_{PSII} 值。同一处理时间不同浓度 Cr 处理可降低落羽

杉幼苗叶片的 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 和 Φ_{PSII} 值, 提高 NPQ 值。

2.5 灰色关联度分析

不同浓度 Cr 处理下 ‘中山杉 406’ 和落羽杉幼苗相对生长速率与叶片生理生化指标的灰色关联度分析见表 5。结果显示: 总体上看, 1.25、5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理下 ‘中山杉 406’ 和落羽杉幼苗相对生长速率与叶片的相对电导率、叶绿素含量、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、过氧化物酶 (POD) 活性、丙二醛 (MDA) 含量、PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m)、PS II 有效光化学效率 (F_v'/F_m')、PS II 实际光化学效率 (Φ_{PSII}) 和非光化学猝灭系数 (NPQ) 的关联系数以 1.25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理最大, 5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理次之, 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理最小。1.25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理下 ‘中山杉 406’ 幼苗相对生长速率与叶片的相对电导率、MDA 含量、 F_v'/F_m' 值和 Φ_{PSII} 值的关联系数较大, 分别为 0.989、0.937、0.953 和 0.934; 1.25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr 处理下落羽杉幼苗相对生长速率与除叶片的叶绿素含量、SOD 活性和 MDA 含量以外的其余生理生化指标的关联系数均在 0.9 以上。

Cr 处理 28 d ‘中山杉 406’ 和落羽杉幼苗相对生长速率与叶片生理生化指标的关联度见表 6。结果显示: ‘中山杉 406’ 幼苗相对生长速率与叶片各生理生化指标的关联度排序由高至低依次为 F_v/F_m 值、

表 5 不同浓度 Cr 处理下 ‘中山杉 406’ 和落羽杉幼苗相对生长速率与叶片生理生化指标的灰色关联度分析¹⁾

Table 5 Grey correlation degree analysis on relative growth rate and leaf physiological and biochemical indexes of ‘Zhongshanshan 406’ and *Taxodium distichum* (Linn.) Rich. seedlings under different concentrations of Cr treatment¹⁾

c	‘中山杉 406’ 的相对生长速率与各生理生化指标的关联系数								
	Correlation coefficient between relative growth rate and each physiological and biochemical index of ‘Zhongshanshan 406’								
	RC	C _{chl}	A _{SOD}	A _{POD}	C _{MDA}	F_v/F_m	F_v'/F_m'	Φ_{PSII}	NPQ
0.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1.25	0.989	0.846	0.888	0.782	0.937	0.768	0.953	0.934	0.815
5.00	0.624	0.835	0.592	0.564	0.712	0.920	0.690	0.720	0.417
20.00	0.481	0.734	0.479	0.456	0.519	0.762	0.679	0.736	0.333

c	落羽杉的相对生长速率与各生理生化指标的关联系数								
	Correlation coefficient between relative growth rate and each physiological and biochemical index of <i>T. distichum</i>								
	RC	C _{chl}	A _{SOD}	A _{POD}	C _{MDA}	F_v/F_m	F_v'/F_m'	Φ_{PSII}	NPQ
0.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1.25	0.906	0.849	0.860	0.945	0.891	0.926	0.926	0.905	0.952
5.00	0.580	0.813	0.511	0.517	0.534	0.713	0.723	0.731	0.404
20.00	0.351	0.751	0.450	0.449	0.399	0.583	0.611	0.608	0.333

¹⁾ c: Cr 浓度 Concentration of Cr ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$). RC: 相对电导率 Relative conductivity; C_{chl}: 叶绿素含量 Chlorophyll content; A_{SOD}: 超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity; A_{POD}: 过氧化物酶活性 Peroxidase activity; C_{MDA}: 丙二醛含量 Malondialdehyde content; F_v/F_m : PS II 最大光化学效率 Maximum photochemical efficiency of PS II; F_v'/F_m' : PS II 有效光化学效率 Effective photochemical efficiency of PS II; Φ_{PSII} : PS II 实际光化学效率 Actual photochemical efficiency of PS II; NPQ: 非光化学猝灭系数 Nonphotochemical quenching coefficient.

叶绿素含量、 Φ_{PSII} 值、 F_v'/F_m' 值、MDA含量、相对电导率、SOD活性、POD活性、 NPQ 值,关联度均在0.6以上。落羽杉的排序略有不同,关联度排序由高至低依次为叶绿素含量、 F_v'/F_m' 值、 Φ_{PSII} 值、 F_v'/F_m' 值、POD活性、相对电导率、MDA含量、SOD活性、 NPQ 值,关联度也均在0.6以上。总体上看,‘中山杉406’和落羽杉幼苗相对生长速率与叶片光合系统指标(NPQ 值除外)的关联度较高,均达到0.8以上,与

抗氧化系统指标的关联度也均在0.7及以上。说明‘中山杉406’和落羽杉幼苗生长与叶片光合系统和抗氧化系统有较强的关联性。

进一步探讨光合系统与抗氧化系统的关联性,结果(表7)显示:‘中山杉406’和落羽杉幼苗叶片的 Φ_{PSII} 值和叶绿素含量与MDA含量、SOD活性和POD活性的关联度均达到0.5以上,说明‘中山杉406’和落羽杉幼苗叶片光合系统与抗氧化系统关系密切。

表6 Cr处理28d‘中山杉406’和落羽杉幼苗相对生长速率与叶片生理生化指标的关联度¹⁾

Table 6 Correlation degree of relative growth rate with leaf physiological and biochemical indexes of ‘Zhongshanshan 406’ and *Taxodium distichum* (Linn.) Rich. seedlings under Cr treatment for 28 d¹⁾

材料 Material	相对生长速率与各生理生化指标的关联度 Correlation degree between relative growth rate and each physiological and biochemical index								
	F_v'/F_m'	C_{Chl}	Φ_{PSII}	F_v'/F_m'	C_{MDA}	RC	A_{SOD}	A_{POD}	NPQ
‘中山杉406’ ‘Zhongshanshan 406’	0.862	0.854	0.847	0.830	0.792	0.773	0.740	0.700	0.641
落羽杉 <i>T. distichum</i>	0.815	0.853	0.811	0.805	0.706	0.709	0.705	0.728	0.672

¹⁾ F_v'/F_m' : PS II有效光化学效率 Effective photochemical efficiency of PS II; C_{Chl} : 叶绿素含量 Chlorophyll content; Φ_{PSII} : PS II实际光化学效率 Actual photochemical efficiency of PS II; F_v'/F_m' : PS II最大光化学效率 Maximum photochemical efficiency of PS II; C_{MDA} : 丙二醛含量 Malondiadehyde content; RC: 相对电导率 Relative conductivity; A_{SOD} : 超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity; A_{POD} : 过氧化物酶活性 Peroxidase activity; NPQ : 非光化学猝灭系数 Nonphotochemical quenching coefficient.

表7 Cr处理28d‘中山杉406’和落羽杉幼苗叶片PS II实际光化学效率和叶绿素含量与抗氧化系统指标间的关联度¹⁾

Table 7 Correlation degree of PS II actual photochemical efficiency and chlorophyll content with antioxidant system indexes of ‘Zhongshanshan 406’ and *Taxodium distichum* (Linn.) Rich. seedlings under Cr treatment for 28 d¹⁾

材料 Material	PS II实际光化学效率与各抗氧化系统指标的关联度 Correlation degree of actual photochemical efficiency of PS II with each antioxidant system index			叶绿素含量与各抗氧化系统指标的关联度 Correlation degree of chlorophyll content with each antioxidant system index		
	A_{SOD}	A_{POD}	C_{MDA}	A_{SOD}	A_{POD}	C_{MDA}
‘中山杉406’ ‘Zhongshanshan 406’	0.656	0.599	0.845	0.599	0.557	0.718
落羽杉 <i>T. distichum</i>	0.683	0.691	0.689	0.620	0.641	0.618

¹⁾ A_{SOD} : 超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity; A_{POD} : 过氧化物酶活性 Peroxidase activity; C_{MDA} : 丙二醛含量 Malondiadehyde content.

3 讨论和结论

生长是生理生化反应的综合体现,逆境下植物生长状况能直观地反映植物的抗逆性^[32]。叶绿素含量及含水量作为叶片生理状态的重要指标,能较好反映胁迫对叶片的生理影响^[33-34]。贺瑶等^[35]的研究结果显示:李氏禾(*Leersia hexandra* Sw.)的根长和株高随着Cr浓度的增加呈增长趋势。柳心怡等^[36]发现,5 mg · L⁻¹ Cr处理对人工湿地植物薹苳(*Coix lacryma-jobi* Linn.)的株高、茎粗和分蘖影响不显著,而20和40 mg · L⁻¹ Cr处理则显著抑制薹苳的生长。杨昕悦等^[37]的研究结果显示:50 mg · kg⁻¹ Cr处理对油桐[*Vernicia fordii* (Hemsl.) Airy Shaw]幼苗生长无

显著差异,而在100 mg · kg⁻¹ Cr处理下油桐叶片的叶绿素含量显著降低,植物光合作用受到抑制。本研究结果表明:1.25 μmol · L⁻¹ (低浓度) Cr处理对‘中山杉406’幼苗相对生长速率、相对含水率和叶片叶绿素含量的影响并不显著,说明‘中山杉406’在低浓度Cr胁迫下具有较强的生长适应性;1.25 μmol · L⁻¹ Cr处理对落羽杉幼苗相对生长速率影响也不显著,说明落羽杉幼苗在低浓度Cr胁迫下也具有一定的生长适应性。在5.00(中浓度)和20.00(高浓度) μmol · L⁻¹ Cr处理下,‘中山杉406’和落羽杉幼苗的相对生长速率、相对含水率和叶片叶绿素含量均下降,说明中、高浓度Cr胁迫会抑制植株生长。这可能是由于中、高浓度Cr胁迫能够使植物的吸收和转运功能降低,植物的光合作用效率降低,从而影响植物生长^[38]。

此外, 5.00 和 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{Cr}$ 处理下‘中山杉 406’幼苗相对生长速率和相对含水率的降幅均小于落羽杉, ‘中山杉 406’生长受抑制程度明显低于落羽杉, 表明‘中山杉 406’在中、高浓度 Cr 胁迫下具有更强的生长适应性。

许志敏等^[39]的研究结果表明: 氧化代谢失调导致的活性氧增多是叶片遭受重金属胁迫伤害的重要原因之一, 而植物可以通过调控抗氧化系统来适应胁迫环境。本研究中, 随着 Cr 浓度的增加, 处理 28 d ‘中山杉 406’和落羽杉幼苗的相对电导率和丙二醛 (MDA) 含量逐渐升高, 膜透性增加, 膜系统损伤程度加重。但‘中山杉 406’较落羽杉的变幅小, 说明‘中山杉 406’的膜系统受氧化伤害程度相对较轻。同时, 随着 Cr 浓度的增加, 处理 28 d 的‘中山杉 406’幼苗的超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD) 活性呈升高的趋势, 而落羽杉幼苗的 SOD 和 POD 活性呈先升高后降低的趋势, 体现了不同植物对 Cr 胁迫所致的氧化胁迫应激响应有一定差别。相关研究结果^[40-41]表明: SOD 在清除活性氧过程中, 可以将有氧条件下产生的超氧阴离子自由基进一步催化形成 H_2O_2 和 O_2 , 并减少有毒自由基的形成; POD 可以将 H_2O_2 催化形成 H_2O , 这一过程能够有效防止 H_2O_2 和超氧阴离子自由基在植物体内大量积累, 进而减轻其对植物体的伤害。‘中山杉 406’在 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{Cr}$ 处理初期 (7 d) 至后期 (28 d) 均能表现出相对较高的 SOD 和 POD 活性, 推测在高浓度 Cr 胁迫下, ‘中山杉 406’的 SOD 和 POD 可协同清除超氧阴离子自由基和 H_2O_2 , 以此维持活性氧代谢平衡。而落羽杉在 Cr 胁迫下虽然也能通过 SOD 和 POD 维持活性氧代谢平衡, 但在高浓度 Cr 处理初期至后期, SOD 和 POD 活性出现先升高后降低的趋势, 推测落羽杉幼苗通过增强抗氧化酶活性维持活性氧代谢平衡能力有限, 过多活性氧的累积对落羽杉幼苗抗氧化酶本身产生了抑制和伤害作用。

光合作用是植物生长的物质和能量基础, 叶绿素荧光作为光合作用的内探针可以从内在机制上反映光合机构的功能状态^[42]。邱岚等^[43]的研究结果表明: Pb 处理下榉树 [*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino] 幼苗叶片的 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m) 低于对照, 说明榉树幼苗叶片 PS II 反应中心活性受到抑制。本研究中, 与对照 (0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{Cr}$) 相比, 1.25 和 5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{Cr}$ 处理下‘中山杉 406’幼苗叶片的 F_v/F_m

值、PS II 有效光化学效率 (F_v'/F_m') 和 PS II 实际光化学效率 (Φ_{PSII}) 总体上变化不大, 而落羽杉的这 3 个叶绿素荧光参数在 5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{Cr}$ 处理下显著下降, 且在 20.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{Cr}$ 处理 28 d 的降幅明显大于‘中山杉 406’, 表明‘中山杉 406’在 Cr 胁迫下 PS II 反应中心活性受到影响较小, 而落羽杉 PS II 反应中心活性受到影响较大。灰色关联度分析结果显示: ‘中山杉 406’幼苗相对生长速率与叶片光合系统指标 (F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 和 F_v/F_m 值) 的关联度较高。进一步说明‘中山杉 406’比落羽杉具有更强的生长能力主要与其较强的 PS II 光化学性能有关, 同时也可能与其较强的抗氧化系统有关, 具体机制有待进一步研究。

有研究结果^[44]表明: 植物叶片的光抑制会随着重金属胁迫强度的增加而加强。热耗散、光能利用效率和抗氧化能力的增强均为植物防御光抑制和光损伤的重要机制, 其中热耗散是光抑制下植物体内耗散过剩激发能的主要方式^[45]。非光化学猝灭系数 (NPQ) 反映了 PS II 反应中心吸收天线色素后的散热能力^[46]。邱岚等^[43]的研究结果表明: Pb 处理下榉树幼苗叶片 NPQ 值显著高于对照, 说明榉树为减轻在胁迫下的光抑制, PS II 反应中心将过多的能量以热耗散的形式消耗。本研究结果表明: ‘中山杉 406’和落羽杉幼苗叶片 NPQ 值总体随着 Cr 浓度的增加而升高, 说明 2 种植物为提高对高浓度 Cr 的抵抗能力, 会将过多的能量转成热能进行耗散, 进而保护光系统。随着处理时间的延长, ‘中山杉 406’幼苗叶片 NPQ 值总体呈升高的趋势, 而落羽杉从处理 14 d 开始变化不大, 部分处理时间还出现降低的趋势, 表明落羽杉通过热耗散防御光破坏能力相对较弱。Chen 等^[47]认为, 活性氧是引起光破坏的主要因子, 胁迫下活性氧的增多不仅直接导致光合机构的氧化损伤, 还通过抑制 PS II 反应中心 D1 蛋白等的损伤修复间接加重光抑制。结合‘中山杉 406’幼苗叶片 SOD 活性、POD 活性和 MDA 含量等相关指标的变化趋势和灰色关联度分析结果, 推测光合系统与抗氧化系统间具有较强的关联性, 具体机制尚待进一步探讨。

综上所述, 与亲本落羽杉相比, 在 Cr 胁迫下, ‘中山杉 406’具有较强的生长适应性, 其耐 Cr 的生长特性主要与其较强的 PS II 光化学性能有关, 而其较高的抗氧化酶活性和 PS II 热耗散能力是在 Cr 胁迫下维持光化学活性、进行光保护的重要机制。有关‘中

山杉406’在Cr胁迫下吸收、累积富集特性及其耐性分子机制的研究尚待进一步探讨。

参考文献:

- [1] 贺勇,胡广,张召,等. 污染场地六价铬迁移转化机制与数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(2): 528-538.
- [2] 何雨江,陈德文,张成,等. 土壤重金属铬污染修复技术的研究进展[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(3): 126-132.
- [3] 龙颖,钱林波,李云桂,等. 酸碱改性生物质炭-纳米零价铁增强六价铬去除的机理[J]. 环境工程学报, 2022, 16(4): 1165-1174.
- [4] 周艺艺,刘存,王玉军. 不同主导晶面赤铁矿对Cr(VI)吸附与迁移行为的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1667-1674.
- [5] LI Z Y, MA Z W, VAN DER KUIJP T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2014, 468/469: 843-853.
- [6] 周靖,栾雅璐,王流通,等. 不同水肥管理稻田土壤铬生物有效性及吸收富集特征[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(2): 35-43.
- [7] 邱沙,宋景鹏,陈志国,等. 原位化学还原技术修复铬污染土壤及其工程应用[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(4): 131-139.
- [8] 王敏捷,盛光遥,王锐. 土壤重金属污染修复植物处置技术进展[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 151-159.
- [9] 王爱云,黄姗姗,钟国锋,等. 铬胁迫对3种草本植物生长及铬积累的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 2028-2037.
- [10] 汤茜,朱四喜,赵斌,等. 湿地植物再力花对铬胁迫的生理生化响应[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(35): 108-115.
- [11] 普万琴,王豹,闵金恒,等. 观赏木本植物修复重金属污染土壤研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(4): 1188-1193.
- [12] 陈晶,穆燕,陈明,等. 盐肤木对重金属铬胁迫的生理生化反应研究[J]. 生态科学, 2017, 36(2): 26-31.
- [13] 马天晓,杨阳,曹霖,等. 河南省义马市铬污染区植物群落调查及修复植物筛选[J]. 西部林业科学, 2017, 46(3): 44-50, 67.
- [14] 闫潇,王建雷,张明江,等. 土壤铬污染及生物修复技术研究进展[J]. 稀有金属, 2023, 47(9): 1302-1315.
- [15] 徐姗,万山琦,吴淑芳,等. 四株中山杉的木材和纤维特性及其制浆性能[J]. 林产化学与工业, 2021, 41(2): 93-102.
- [16] 殷云龙,於朝广,华建峰. ‘中山杉’的选育和利用及相关研究进展[J]. 植物资源与环境学报, 2019, 28(4): 99-106.
- [17] 张俊兵,叶硕. 盐胁迫对中山杉幼苗生长的影响[J]. 绿色科技, 2024, 26(1): 154-157.
- [18] 叶硕. 不同浓度盐碱胁迫对4个树种幼苗生长的影响[J]. 安徽林业科技, 2021, 47(6): 33-35.
- [19] 罗坤水,杨桦,狄岚,等. 鄱阳湖滩涂地中山杉118引种造林耐水淹试验研究[J]. 南方林业科学, 2021, 49(6): 36-38, 59.
- [20] MA Y L, WANG H F, WANG P, et al. Effects of cadmium stress on the antioxidant system and chlorophyll fluorescence characteristics of two *Taxodium* clones[J]. Plant Cell Reports, 2018, 37: 1547-1555.
- [21] 汤璐瑶,方菁,钱海蓉,等. 落羽杉和池杉功能性状随高度的变异与协同[J]. 植物生态学报, 2023, 47(11): 1561-1575.
- [22] 郭金博,施钦,熊豫武,等. 盐碱混合胁迫对‘中山杉406’生长及光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(1): 61-68.
- [23] 许浒,蒋尚明,袁宏伟,等. 受旱试验与相对生长率相结合的小麦旱灾系统敏感性识别与评估[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(8): 66-72.
- [24] 吴娟,陈欢. 饱和水汽压差和温湿度对5种药用园林植物冬季叶含水率的影响[J]. 南方农业, 2023, 17(21): 12-16.
- [25] 崔祺,吴响,李东泽,等. 彩叶桂叶片发育过程中叶色表型与色素成分变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(2): 79-86.
- [26] 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.
- [27] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [28] 米文娟,虎亚观,于艳丽. 基于扎根理论与灰色关联分析的养殖户疫病规范防治素养提升研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2024(2): 14-21.
- [29] 张睿,韩重阳,蔡家邦,等. 6个苇状羊茅(型)品种在成都平原区的生产性能评价[J]. 草业学报, 2024, 33(1): 138-148.
- [30] 张子豪,李想成,吴昊天,等. 基于灰色关联度分析和聚类分析的丰产高效小麦品种综合评价与筛选[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(10): 194-200.
- [31] 张晓东,王婷,卢志宏,等. 万山汞矿区弹琴蛙重金属富集与组织关联分析[J]. 野生动物学报, 2024, 45(3): 596-606.
- [32] KHAN M I R, ASHFAQUE F, CHHILLAR H, et al. The intricacy of silicon, plant growth regulators and other signaling molecules for abiotic stress tolerance: an entrancing crosstalk between stress alleviators[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 162: 36-47.
- [33] 王涛,蒙仲举,张佳鹏,等. NaCl胁迫对紫穗槐幼苗生长及生理特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(1): 25-30.
- [34] 刘钰,曲美桥,郑瑞杰,等. 外源谷氨酸对杨树耐旱性的影响[J]. 林业科学研究, 2023, 36(4): 59-71.
- [35] 贺瑶,林华,俞果,等. 铬处理下超富集植物李氏禾根际溶解氧时空分布特征[J]. 土壤, 2022, 54(5): 1024-1031.
- [36] 柳心怡,农宇,黄建祥,等. Cr^{6+} 对人工湿地慈苣苔光合特性和微量元素吸收的影响[J]. 广西植物, 2022, 42(11): 1959-1970.
- [37] 杨昕悦,左文中,张帆航,等. 铬胁迫对油桐幼苗生理特性及叶片结构的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(6): 11-22.
- [38] 杨小环,杨婧怡,王子然,等. 六价铬对红芸豆种子萌发和幼苗生长的毒害作用及外源NO的缓解效应[J]. 中国生态农业

- 学报(中英文), 2024, 32(8): 1366-1376.
- [39] 许志敏, 丁国昌. 铜锌复合胁迫对斑叶芒生理及富集转运特征的影响[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(11): 109-114, 124.
- [40] 吴锦程, 陈宇, 吴毕莎, 等. 钙处理对低温胁迫下枇杷幼苗 Ca^{2+} -ATPase 活性和膜脂过氧化水平的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 121-128.
- [41] 黄亚萍, 俎丽红, 沈广爽, 等. 铅胁迫对蜀葵重金属积累及抗氧化酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1746-1752.
- [42] JIANG N, YANG Z Q, LUO J, et al. Quantifying chilling injury on the photosynthesis system of strawberries: insights from photosynthetic fluorescence characteristics and hyperspectral inversion[J]. *Plants*, 2023, 12: 3138.
- [43] 邱岚, 何颀, 黄鑫浩, 等. 重金属铅对榉树幼树叶绿素荧光参数的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(6): 123-129.
- [44] ESSEMINI J, YI X, QU M, et al. Cyclic electron flow may provide some protection against PS II photoinhibition in rice (*Oryza sativa* L.) leaves under heat stress [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2017, 211: 138-146.
- [45] RAHMAN M M, MOSTOFA M G, KEYA S S, et al. Jasmonic acid priming augments antioxidant defense and photosynthesis in soybean to alleviate combined heat and drought stress effects [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 206: 108193.
- [46] 丁俊男, 王慧, 于少鹏. 叶绿素荧光分析技术在野生植物响应多环芳烃(菲)胁迫的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(7): 2207-2212.
- [47] CHEN B, WANG Z C, JIAO M J, et al. Lysine 2-hydroxyisobutyrylation- and succinylation-based pathways act inside chloroplasts to modulate plant photosynthesis and immunity [J]. *Advanced Science*, 2023, 10: 2301803.

(责任编辑: 郭严冬)

新书推介: 陌上芊芊 江苏农业野生草本植物

《陌上芊芊 江苏农业野生草本植物》于2024年7月由江苏凤凰科学技术出版社出版。主编:董晓宇、吴田乡;副主编:梁永红、周义峰。全书共199页,总计15万字,32开本;定价48.00元。

2021年,中国农业农村部组织启动了新中国历史上规模最大的农业种质资源普查,这对于实施抢救性收集保护、发掘优异新资源以及推动农业种源自主可控和种业振兴具有重大意义。江苏省横跨3个生物气候带,生态条件和资源优越。据《江苏植物志》(2015年)记载,江苏省现有高等植物297科1391属3483种25亚种251变种,其中已被利用及具有开发

前景的农业野生植物有千余种。江苏省城镇化程度高,野生植物资源的自然分布区多数毗邻城镇,且周边旅游开发普遍,植物生存压力较大。

江苏省对农业野生植物高度重视。为了加强农业野生资源的保护和可持续利用,方便民众、植物爱好者、农业工作者了解和快速识别本土农业野生植物,江苏省农业农村厅联合江苏省中国科学院植物研究所,搜集了90种较常见的农业野生草本植物及其易混淆物种,汇编成本书。本书以陆生草本野生农业植物为主,确认植物以拉丁名为准,介绍植物的别名、分布、生长环境、功用和植物识别特征等相关内容。