

Cd、Pb 胁迫对银杏光合特性的影响*

朱宇林, 曹福亮*, 汪贵斌, 张往祥, 郝明灼

(南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘 要:采用温室盆栽试验方法,研究了 Cd、Pb 胁迫对银杏光合特性的影响。结果表明:(1)单一 Cd 和 Cd、Pb 的复合胁迫均可导致银杏 chl_a、chl 及叶绿素 a/b 值的显著下降。银杏 chl_a 和 chl 与 Cd 胁迫浓度表现出显著的负相关。而复合胁迫下, Cd 与较高浓度 Pb 呈现出一定的协同作用。(2)在单一 Cd 和 Cd、Pb 的复合胁迫下,银杏的最大光化学效率 F_v/F_m 均明显下降,重金属胁迫使银杏叶片产生了光抑制现象。(3)在重金属胁迫条件下,银杏 P_n 、 G_s 和 T_r 均随胁迫浓度的增加而下降,而 C_i 则趋于增加。 P_n 随胁迫浓度的提高而下降主要由非气孔限制所致。

关键词:银杏; Cd; 复合胁迫; 叶绿素; 光合特性

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

文章编号: 1001-7461(2006)01-0047-04

Effects of Cd Single and Combined Stress on Chlorophyll Content and Photosynthetic Characteristics of *Ginkgo*

ZHU Yu-lin, CAO Fu-liang, WANG, Gui-bin, ZHANG Wang-xiang, HAO Ming-zhuo
万方数据 (College of Forest Resources and Environment of Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract Effects of cadmium single and combined stress of cadmium and lead on chlorophyll content and photosynthetic characteristics of *Ginkgo* were studied in a pot under greenhouse conditions. The main results are as follows: (1) The content of chlorophyll (a), chlorophyll and a/b value gradually decreased by Cd single and combine stress. It was significantly negative correlation between chlorophyll (a), chlorophyll and the concentration of Cd. The coordinate effect of combined Cd and high concentration Pb was manifested under the combined treatments. (2) The F_v/F_m of *Ginkgo* obviously decreased by Cd single and combined stress, the phenomenon of photoinhibition of *Ginkgo* leaf was induced by heavy metal stress. (3) The net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate decreased with the increasing stress concentration, but the intercellular CO₂ concentration increased. The decreasing of net photosynthetic rate of *Ginkgo* under heavy metal stress was caused by nonstomatal limitation.

Key words: *Ginkgo*; cadmium; combined stress; chlorophyll; photosynthetic characteristics

随着我国经济的高速发展及对能源需求的剧增,极大地加剧了土壤、水体、和大气环境中的重金属胁迫问题,进入环境中的重金属可通过迁移、转化、富集过程和食物链的“生物放大”作用,将对生物造成极大的危害,已日益受到人类的广泛关注^[1~3]。Cd、Pb 是环境中最普遍和危害性较强的重金属,对植物生长和代谢的各个方面都有影响,尤其是抑制植物的光合作用而导致植物生物量的下降^[4]。众多

研究表明 Cd、Pb 对植物光合作用的影响是多方面的。杨居荣等^[5]报道 Cd 处理的几种植物叶片内叶绿体含量显著降低。徐红霞等^[6]研究认为在一定浓度的 Cd 胁迫下,水稻 PS II 受到伤害,某些能量耗散途径受阻,并引起叶绿体结构的破坏。彭鸣等^[7]研究发现 Cd、Pb 处理导致了玉米叶绿体膜系统和叶绿体功能的破坏。Siedlecka 等^[8]认为 Cd 主要是通过降低光合色素含量来抑制植物的光合作用。目前关

收稿日期:2005-10-20 修回日期:2005-10-29

基金项目:江苏省高科技项目(BG2004314)。

作者简介:朱宇林(1975-),男,广西博白县人,博士生,从事森林培育学和林木抗性生理方面的研究。Email: gxzyl@163.com。

*通讯作者:曹福亮,男,教授,博士生导师。

于植物对土壤重金属效应的研究多集中于农作物、经济作物等草本植物或水生植物,而对木本植物的研究报道相对缺乏。银杏是一种抗性强的经济木本植物^[9]。在逆境条件下有关银杏的叶绿素和光合特性的研究报道并不多^[10~11]。本文通过研究重金属胁迫对银杏的光合特性的影响,以阐明 Cd、Pb 对银杏光合作用影响的生理机制,并为银杏的遗传选育和转基因等生物技术及重金属植物修复研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料 with 处理

选用生长均匀的 2 年生无污染的大佛指银杏品种实生苗为供试材料(苗木来自江苏泰兴市银杏种质资源圃)。采用温室盆栽控制的试验方法,每盆 2 株,每个处理 7 个重复。试验在南京林业大学树木园温室进行,盆栽基质选用无重金属污染的沙壤土,每盆(25 cm(径)×30 cm(高)装土为 10 kg(干重)。基质土壤速效 N 为 8.6 mg·kg⁻¹,速效 P 为 4.5 mg·kg⁻¹,速效 K 11.3 mg·kg⁻¹,有机质含量为 3.5%,pH 值为 6.2。

2005 年 4 月 1 日完成苗木移植,4 月 25 日移入温室培养。5 月 28 日对各供试苗木进行处理,共 16 个处理水平(表 1)。其中 Cd 处理浓度 50、100、150 mg·kg⁻¹分别以 Cd50、Cd100、Cd150 表示,Pb 处理浓度 0、300、600、1 000 mg·kg⁻¹分别以 W₀、W₁、W₂、W₃ 表示。

表 1 Cd、Pb 复合处理的实验设计
Table 1 Experimental design of Cd and Pb treatments

Pb/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹			
	0	50	100	150
0	0	50	100	150
300	300	300+50	300+100	300+150
600	600	600+50	600+100	600+150
1000	1000	1000+50	1000+100	1000+150

1.2 测定方法

处理后 30 d 后进行各项生理指标的测定,测定的时间分别为 6 月 28 日、7 月 20 日、8 月 12 日、9 月 11 日、10 月 10 日。其中叶绿素含量采用丙酮乙醇混合液分光光度法^[12];净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和细胞间 CO₂ 浓度(C_i)采用 Ciras-I 型光合测定系统测定,每个指标 5 个重复;叶绿素荧光采用 FMS-2 便携调制式荧光仪测定,

每次测定 12 个重复,结果计算采用 5 次测定结果的平均值进行分析。

2 结果与分析

2.1 Cd、Pb 胁迫对银杏叶绿素含量的影响

由图 1 可看出,在单一 Cd 胁迫下,银杏叶绿素 a 和叶绿素含量均低于对照,且随着胁迫浓度的增加而显著下降(相关系数 $r_{chl a} = -0.981\ 5, P < 0.05; r_{chl} = -0.964\ 9, P < 0.05$)。在 Cd 各处理中加入 Pb 的复合处理,银杏叶绿素 a 和叶绿素含量的变化趋势(除 Pb 浓度为 300 mg·kg⁻¹外)与单一胁迫相同,且均低于相应的单一 Cd 处理,并随 Pb 浓度的增加而显著下降($P < 0.05$),表现出 Cd 与较高浓度 Pb 复合胁迫的协同作用。银杏叶绿素 b 在单一和复合胁迫下的变化趋势与叶绿素 a 和叶绿素含量相同,但各处理间差异不显著,显示出银杏叶绿素 b 的重金属胁迫响应程度明显低于叶绿素 a。叶绿素 a/b 值的减小是植物叶片衰老的重要表征之一^[13]。分析结果表明,单一 Cd(除浓度 50 mg·kg⁻¹外)和复合胁迫均能引起叶绿素 a/b 值的显著减少($P < 0.000\ 1$),显示出 Cd 单一和复合胁迫具有加速银杏叶片老化的作用。

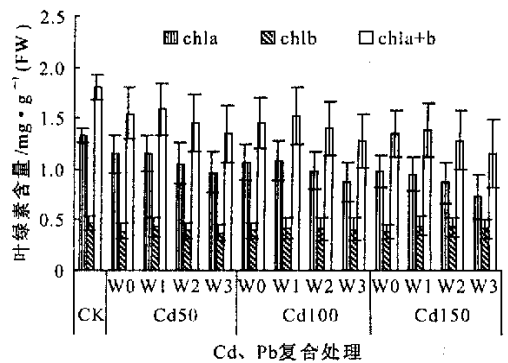


图 1 Cd、Pb 胁迫对银杏叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of Cd and Pb combined stress on the content of chlorophyll (mg·g⁻¹ FW)

2.2 Cd、Pb 胁迫对银杏叶绿素荧光特性的影响

F_v/F_m 是 PSII 反应中心内原初光能转化效率(最大光化学效率),是表征 PS I 利用光能的能力^[14]。从图 2 可看出,在单一 Cd 胁迫下,银杏最大光化学效率低于对照 11.9%~24.4%,且随着胁迫浓度的增加而显著下降(相关系数 $r = -0.985\ 6, P < 0.05$)。在 Cd、Pb 复合胁迫下,银杏的最大光化学效率均呈现逐渐下降的趋势,且随着复合胁迫浓度

的增加而显著下降($P<0.05$),这表明重金属胁迫使银杏叶片的 PS II 反应中心受到了伤害。

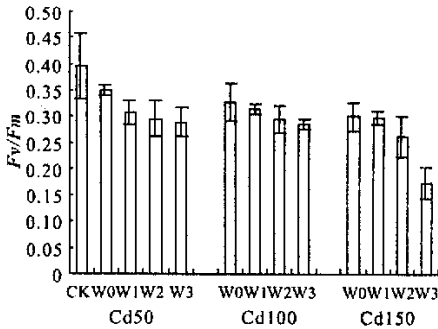


图2 Cd、Pb 胁迫对银杏叶片 F_v/F_m 的影响

Fig. 2 effects of Cd and Pb combined stress on F_v/F_m of the leaf

2.3 Cd、Pb 胁迫对银杏净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s)的影响

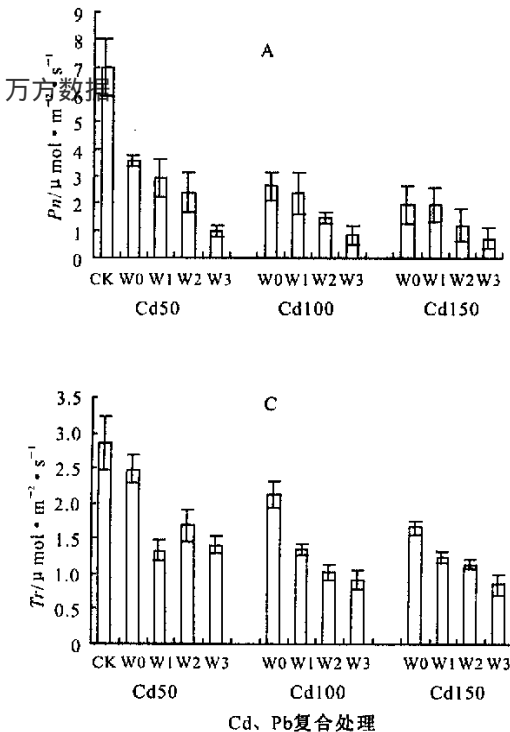


图3 Cd、Pb 胁迫对银杏叶片光合特性的影响

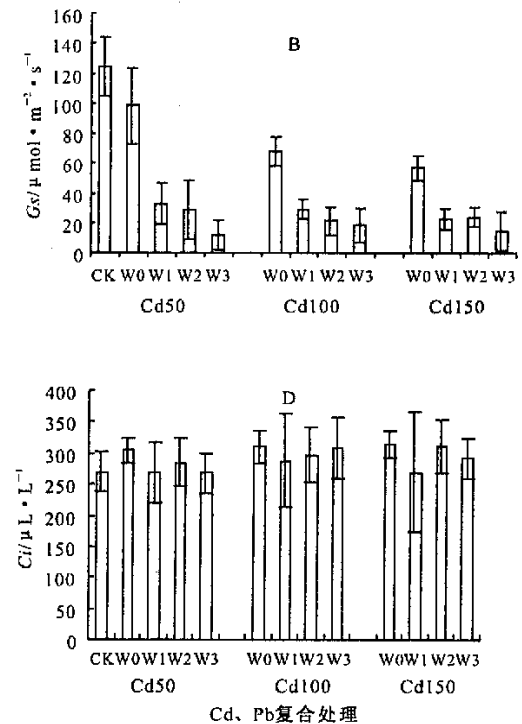
Fig. 3 Effects of Cd and Pb combined stress on photosynthesis characteristics of the leaf

2.4 Cd、Pb 胁迫对银杏蒸腾速率(Tr)和细胞间 CO_2 浓度(C_i)的影响

由图 3C 表明,在 Cd 单一胁迫下,银杏随 Cd 浓度的增加而呈现出明显的下降趋势,其中 Cd50、Cd100、Cd150 处理的蒸腾速率(Tr)分别是对照的 12.67%、25.47%、41.38%,表现出显著的负相关关

系($r=-0.9453$, $P<0.05$)。在 Cd 各处理中加入 Pb 的复合胁迫,银杏 P_n 的变化趋势与单一胁迫相同,表现出随 Pb 浓度的增加而逐渐下降的现象,且不同胁迫浓度间均达到极显著的水平($P<0.01$)。

银杏叶片气孔导度(G_s)随单一 Cd 处理浓度和各 Cd 处理中 Pb 浓度的增加有不同程度的下降趋势(图 3B)。其中单一 Cd 处理的(G_s)与浓度的相关系数 $r=-0.9852$,随 Cd 浓度的增加而显著下降。在 Cd 各处理中加入 Pb 的复合胁迫,各相关系数分别为 $r_{Cd50}=-0.7881$, $r_{Cd100}=-0.8620$, $r_{Cd150}=-0.9441$, G_s 呈现出复合胁迫浓度的越高受到的抑制作用越强的趋势。



系($r=-0.9984$, $P<0.01$)。在 Cd 各处理中加入 Pb 的复合胁迫后,银杏蒸腾速率(Tr)均明显低于对照和相应的单一 Cd 处理,但不同的处理变化趋势有差异。其中在 Cd100 和 Cd150 的复合处理, Tr 随 Pb 浓度的增加而下降,相关系数 $r_{Cd100}=-0.9094$,差异不显著; $r_{Cd150}=-0.9683$ ($P<0.05$),差异显

著,显示出协同作用增强趋势。而在 Cd 浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的处理, Tr 随 Pb 浓度略有增加但差异性不明显。

由图 3D 显示,在 Cd 单一处理下,银杏细胞间 CO_2 浓度(C_i)随着浓度的增加而增加,高于对照 12.58%~16.61%。在 Cd 各处理中加入 Pb 的复合处理,也呈现出增加的变化趋势,但统计分析表明,不同处理间的差异不显著。Cd 单一和复合胁迫对银杏细胞间 CO_2 浓度(C_i)尚没有产生明显的影响作用。

3 结论与讨论

许多研究表明,重金属胁迫可引起植物叶片褪绿^[15~16]及叶绿素含量的下降^[6,17]。其原因可能是重金属影响了叶绿素生物合成的相关酶活性和抑制了叶绿素的合成^[18],也可能是重金属胁迫下活性氧自由基作用,使叶绿体结构功能遭破坏或叶绿素分解^[15]。本实验研究结果表明,在单一 Cd 和 Cd、Pb 的复合胁迫均可导致银杏叶绿素 a、叶绿素含量及叶绿素 a/b 值的显著下降。单一 Cd 胁迫浓度与银杏叶绿素 a 和叶绿素含量表现出显著的负相关(相关系数 $r_{\text{chl}a} = -0.9815$; $r_{\text{chl}b} = -0.9649$)。而复合胁迫下, Cd 与较高浓度 Pb 呈现出一定的协同作用。这可能是重金属对银杏叶绿体的合成和代谢有明显影响和抑制作用的结果。

叶绿素荧光变化反映了植物光合机构的运转状况,荧光参数值 F_v/F_m 的变化表明了光合系统 II 原初光能转换效率能力的大小。 F_v/F_m 在非逆境胁迫下比较稳定^[14],但在逆境胁迫下变化明显,如果 F_v/F_m 降低则表明植物受到了光抑制^[19]。本实验研究结果显示,在单一 Cd 胁迫下及在 Cd、Pb 复合胁迫下,银杏的最大光化学效率均明显下降,且随着胁迫浓度的增加而显著下降,这表明重金属胁迫使银杏叶片产生了光抑制现象。

植物光合作用能力变化的原因既有气孔因素也非气孔因素^[20]。从此次试验结果看,在 Cd 单一处理及 Cd 各处理中加入 Pb 的复合胁迫下,银杏净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(Tr)均随着胁迫浓度的增加而下降,而细胞间 CO_2 浓度(C_i)随着浓度的增加而趋于增加,这表明在重金属胁迫的条件下,银杏净光合速率随着胁迫浓度的提高而下降主要由非气孔限制所致。

参考文献:

- [1] 孙铁珩,宋启星. 污染生态学的研究前沿与展望[J]. 农村生态环境,2000,16(3):42-45,50.
- [2] 周启星,宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京:科学出版社 2004.
- [3] Fakayode S O, Onianwa P C. Heavy metal contamination of soil and bioaccumulation in Guinea grass (*Panicum maximum*) around Lkeja industrial Estate, Lagos, Nigeria [J]. Environmental Geology, 2002, 42: 145-150.
- [4] Kastori R, Petrovic M, Petrovic N. Effects of excess lead, cadmium, copper and zinc on water relations in sunflower [J]. J Plant Nutr, 1992, 15: 2427-2439.
- [5] 杨居荣,贺建新,蒋婉茹. Cd 污染对植物生理生化的影响[J]. 农业环境保护, 1995, 14(5): 193-197.
- [6] 徐红霞,翁晓燕,毛伟华,等. 镉胁迫对水稻光合、叶绿素荧光特性和能量分配的影响[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(4): 338-342.
- [7] 彭鸣,王焕校,吴玉树. Cd、Pb 处理对玉米幼苗超显微结构的变化[J]. 中国环境科学, 1991, 11(6): 426-431.
- [8] Siedlecka A, Krupa Z. Interaction between cadmium and iron and its effects on photosynthetic capacity of primary leaves of *Phaseolus vulgaris* [J]. Plant Physiol Biochem, 1996, 34: 833-841.
- [9] 曹福亮. 中国银杏[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 2002. 120-132.
- [10] 张往祥,曹福亮,吴家胜,等. 遮荫对银杏光合性能及其叶片产量的影响(英文)[J]. 南京林业大学学报, 2000, 24(4): 11-15.
- [11] 景茂,曹福亮,汪贵斌等. 土壤水分含量对银杏光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报, 2005, 29(4): 83-86.
- [12] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 1990. 154~156.
- [13] 齐敏. 土壤-烟草系统中烟草叶绿素对 Hg、Cd、Pb 胁迫的响应[J]. 中国农业生态学报, 2001, 9(4): 82-84.
- [14] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海:上海科学出版社, 2002.
- [15] 孙赛初,王焕校,李启任. 水生维管束植物受镉污染后的生理变化及受害机理初探[J]. 植物生理学报, 1985, 11(2): 113-121.
- [16] Burton K. W, King J B, Morgan E. Chlorophyll as an indicator of upper critical tissue concentration cadmium in plants [J]. Water Air Soil Pollu. 1986, 27(1,2): 147-154.
- [17] 李德明,朱祝军,刘永华,等. 镉对小白菜光合作用特性影响的研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005, 31(4): 459-464.
- [18] Truong P N V, Claridge J. Effects of heavy metals toxicities on vetiver growth [J]. Vetiver Newsletter, 1996, 15: 32-36.
- [19] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics [J]. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 1991, 42: 313-317.
- [20] Farquhar G D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 317-345.