

镉和模拟酸雨胁迫对桑幼苗根系特性的影响

周燕¹, 吕惠飞¹, 高海力², 鲍跃群¹, 王金忠¹

(1. 建德市林业总场, 浙江 建德 311600; 2. 浙江省公益林和国有林场管理总站, 浙江 杭州 310016)

摘要: 土壤镉(Cd)污染和酸雨(AR)是全球性的环境问题, 研究酸雨对木本植物Cd污染修复的影响具有重要意义。本研究采用盆栽法研究了模拟酸雨对Cd污染条件下桑 *Morus alba* 幼苗根系表型、活力和元素含量的影响。结果表明: 低浓度Cd(25 mg·kg⁻¹)处理下, 桑的根系表型指标和生物量积累下降, 但是地上部分生长没有显著变化, 高浓度Cd(50 mg·kg⁻¹)处理下, 这些指标均显著低于对照(CK); 轻度酸雨(pH4.5)处理对各指标影响不显著, 但是重度酸雨(pH3.0)处理显著降低了这些指标以及根系Mg、Fe含量。酸雨和Cd交互作用显著, 轻度酸雨使得低浓度Cd处理下的株高、根系表型、根系活力以及根系Mg、Fe含量显著低于相同Cd浓度的无酸处理(pH7.0), 而根系Cd含量显著升高。说明桑对轻度酸雨和低浓度Cd有一定的耐受性, 但是酸雨会降低桑对Cd的耐受性, 可能的原因是酸雨对桑生长不仅产生了直接伤害, 而且导致桑根系吸收和积累了更多的Cd。

关键词: 桑; 酸雨; 镉; 根系表型; 养分元素

中图分类号: Q945.78 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776(2022)03-0042-07

Stress of Simulated Acid Rain on Root Properties of *Morus alba* var. Nongsang 14 in Cadmium Contaminated Soil

ZHOU Yan¹, LU Hui-fei¹, GAO Hai-li², BAO Yue-qun¹, WANG Jin-zhong¹

(1. Jiande Forest Farm of Zhejiang, Jiande 311600, China; 2. Zhejiang Ecological Forest and State Forest Farm Administration, Hangzhou 310016, China)

Abstract: In the spring 2019, cuttings of *Morus alba* var. Nongsang 14 were potted in Cadmium contaminated soil in Lin'an, Zhejiang province. 60 days of recovering later, experiment of two factors (simulated acid rain, cadmium contaminated soil) with 3 levels were conducted on seedlings. By the end of September, determinations were implemented on seedling height, ground diameter, root system indicators. The results showed that root phenotype and biomass accumulation of *M. alba* var. Nongsang 14 seedlings decreased under 25 mg/kg of Cd, but the growth of aboveground part did not change significantly. Under treatment of 50 mg/kg of Cd, these tested indicators were significantly lower than that of the control (0 mg/kg of Cd & pH7.0). Treatments with pH 4.5 had no significant effect on these indicators, but that with pH 3.0 significantly reduced, as well as Mg and Fe contents in roots. The interaction between treatment of AR and Cd was significant. Compared to those under low concentration of Cd without AR (pH 7.0) treatment, plant height, root phenotype, root activity and root Mg and Fe contents under low concentration Cd with AR (pH4.5) treatment were significantly lower, and root Cd content was significantly higher.

Key words: *Morus alba*; acid rain; cadmium; root phenotype; nutrient

现代化发展中的废弃物排放、农药和化肥的施用、矿物开采, 以及大气沉降等使得土壤镉(Cd)污染成为了全球性的环境问题^[1-2]。植物修复技术因具有绿色环保、费用经济等优点, 一直以来是土壤重金属污染修复的

收稿日期: 2021-11-25; 修回日期: 2022-03-24

作者简介: 周燕, 工程师, 从事森林资源经营管理工作; E-mail:124276107@qq.com。通信作者: 高海力, 工程师, 从事森林资源监测管理、林业信息化工作; E-mail:285339380@qq.com。

重要手段^[3]。过去, 相关研究主要集中在对重金属吸收和转运能力非常强的草本植物, 如景天属 *Sedum* 植物^[4]。近十几年来, 快速生长的木本植物因为成活率高、抗逆性强等优点受到越来越多的关注, 与草本植物相比, 速生木本植物的重金属吸收和积累能力虽然相对较低, 但是其巨大的地上生物量积累可以大大提高重金属的总积累量, 例如目前已知的柳树 *Salix* sp.和杨树 *Populus* sp.等^[5-6]。另一方面, 植物在自然环境中往往受到多种生态因子的综合作用, 例如酸雨 (acid rain, AR) 沉降等。我国是继欧洲、北美之后的第三大酸雨区。虽然近年来我国酸沉降逐年减轻, 但酸雨前体物质 (SO₂、NO_x) 的排放仍在增加, 酸雨的防治问题任重道远^[7]。

桑 *Morus alba* 是我国的传统植物, 为桑科 Moraceae 桑属 *Morus* 落叶乔木或灌木, 因为具有较强的适应能力和经济价值, 在我国东北至西南, 西北至新疆均有栽培。桑生长快速, 抗逆性强, 近年来在防沙治沙、水土保持、盐碱地治理、土壤重金属修复等方面的功能都在被逐渐发掘。前人研究表明, 桑对土壤 Cd 胁迫具有很强的耐受性, 当土壤 Cd 浓度低于 37 mg·kg⁻¹ 时, 植株生长几乎不受影响; 当土壤 Cd 浓度达到 145 mg·kg⁻¹ 时, 植株才会死亡^[8]。陈露等研究发现低浓度 Cd 溶液 (5 mg·kg⁻¹) 甚至可以促进桑幼苗总生物量积累, 而且不同桑品种对 Cd 的耐受性差异较大^[9]。胡月等发现 pH3.5 的酸雨抑制了桑的光合作用, 但是 pH4.5 以上的模拟酸雨对桑的光合作用具有明显的促进作用^[10]。而臧畅、毛晓瑜等分别研究了酸雨和 Cd 对桑的复合影响, 发现酸雨会降低桑对 Cd 的耐受性^[11-12]。可见酸雨和 Cd 对桑生长的影响已受到一定关注, 但是研究焦点主要集中在地上部分, 对根系的探索较少, 因此, 本研究通过盆栽受控试验, 比较在 Cd 污染环境生长的桑幼苗根系指标在模拟酸雨处理下的变化特征, 揭示酸沉降背景下桑对 Cd 的响应特性及机理。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在浙江省杭州市临安区 (119°44' E, 30°16' N) 开展, 该区域气候类型为亚热带季风气候, 区域年平均气温为 16.6℃, 其中, 月均最高温度为 29.1℃, 月均最低温度为 4.1℃; 年均降水日约为 158 d, 年均降水量为 1 628.6 mm, 年均蒸发量为 1 450 mm, 年均无霜期约为 237 d, 年均日照总时长为 1 825.7 h, 土壤为红黄壤^[13]。

1.2 试验材料与试验设计

试验材料为我国南方地区栽培较广的 ‘农桑 14 号’, 该品种具有适应性广, 抗逆性强的特点。2019 年春季, 选取大小、长短均一的健康枝条进行扦插培养。待生根后移栽至直径为 30 cm、高为 40 cm 的塑料花盆中 (每盆 1 株), 花盆中装有土壤质量约为 5 kg, 放置于温室大棚内, 常规管理。土壤为当地红黄壤, 养分和 Cd 背景值分别为: 土壤 pH 5.43、速效 K 含量 65.0 mg·kg⁻¹、速效 N 含量 67.3 mg·kg⁻¹、速效 P 含量 2.091 mg·kg⁻¹、Cd 含量 0.009 mg·kg⁻¹。缓苗 60 d 后, 挑选长势基本一致的植株 81 株, 随机分成 9 组, 每组 9 株, 用于试验。

设置 Cd 和 AR 的 2 因素和 3 梯度水平交互试验, 共计 9 个处理。Cd 处理浓度分别为: 0 (A₁)、25 (A₂)、50 (A₃) mg·kg⁻¹, AR 处理梯度分别为 pH7.0 (B₁)、pH4.5 (B₂)、pH3.0 (B₃), 试验处理具体设置见表 1, 其中 0 mg·kg⁻¹ Cd 和 pH7.0 的组合 (A₁B₁) 为对照 (CK)。试验初期先进行模拟 Cd 污染土壤处理, 将 CdCl₂·2.5H₂O 分别配制成 Cd 浓度为 35.7 和 71.4 mg·L⁻¹ 的溶液, 每 2 d 向花盆土壤中均匀喷洒 (每盆 500 mL, 反复回浇至不再流出, 以确保 Cd 与土壤充分混合均匀), 一共添加 7 次, 稳定 15 d 后测定土壤中的 Cd 含量分别达到了 25 和 50 mg·kg⁻¹。而后进行模拟酸沉降 (酸雨) 处理, 根据我国南方地区目前的平均离子组成, 使用浓 H₂SO₄ (浓度为 98%, 密度为 1.84 g·mL⁻¹) 与浓 HNO₃ (浓度为 68%, 密度为 1.4 g·mL⁻¹) 以 1 : 3 的体积比配制母液^[14]。用蒸馏水将母液分别稀释为 pH4.5 和 pH3.0 的模拟酸沉降溶液, 喷洒量根据当地

表 1 试验处理设置
Table 1 Test design

处理	内容	说明
A ₁ B ₁ (CK)	0 mg·kg ⁻¹ Cd+pH7.0	无镉、无酸雨处理
A ₁ B ₂	0 mg·kg ⁻¹ Cd+pH4.5	无镉、轻度酸雨处理
A ₁ B ₃	0 mg·kg ⁻¹ Cd+pH3.0	无镉、重度酸雨处理
A ₂ B ₁	25 mg·kg ⁻¹ Cd+pH7.0	低镉、无酸雨处理
A ₂ B ₂	25 mg·kg ⁻¹ Cd+pH4.5	低镉、轻度酸雨处理
A ₂ B ₃	25 mg·kg ⁻¹ Cd+pH3.0	低镉、重度酸雨处理
A ₃ B ₁	50 mg·kg ⁻¹ Cd+pH7.0	高镉、无酸雨处理
A ₃ B ₂	50 mg·kg ⁻¹ Cd+pH4.5	高镉、轻度酸雨处理
A ₃ B ₃	50 mg·kg ⁻¹ Cd+pH3.0	高镉、重度酸雨处理

各月平均降水量,折算后为每周 2 次,每次 300 mL,无酸雨处理喷淋等量蒸馏水 (pH7.0),直至试验结束。试验时间为 2019 年 6 月 1 日至 9 月 30 日。

1.3 测定方法

株高、地径和根系生物量测定:测定试验前后的株高和地径,并根据测定值分别计算株高增长量和地径增长量。试验完成后,将试验桑整株取回,用蒸馏水洗净后将根部取下,于 105℃ 烘箱中杀青 5 min 后,置于 60℃ 下烘干至恒质量,称取根干质量。

植株表型测定:使用根系扫描仪 (LA2400, Seiko Epson Corp, Japan) 扫描根系图像,图像分辨率为 800 dpi,存储格式为 TIFF; 并使用 WinRHIZO 软件 (Version 2012a, Regent Instruments, Canada) 计算总根长、总根表面积、总根体积、根尖数等指标。

根系 Cd、Fe 和 Mg 元素含量和活力测定:将桑幼苗根系样品粉碎过 100 目筛,称取 0.20 g 粉末置于三角烧瓶中,加入 2 mL 蒸馏水和 5 mL HNO_3 (浓度为 68%) 并混匀,浸泡过夜后加入 1 mL H_2O_2 (浓度为 30%),放入微波消解仪 (CEM-MARS 6, CEM, USA),在 1 200 W 功率下消解 15 min,而后用蒸馏水定容至 50 mL,使用电感耦合等离子体质谱仪 (XSERIES 2 ICP-MS, Thermo Fisher, USA) 测定植株各器官 Cd、Fe 和 Mg 元素含量^[15]。根系活力采用 TTC 法测定^[14]。

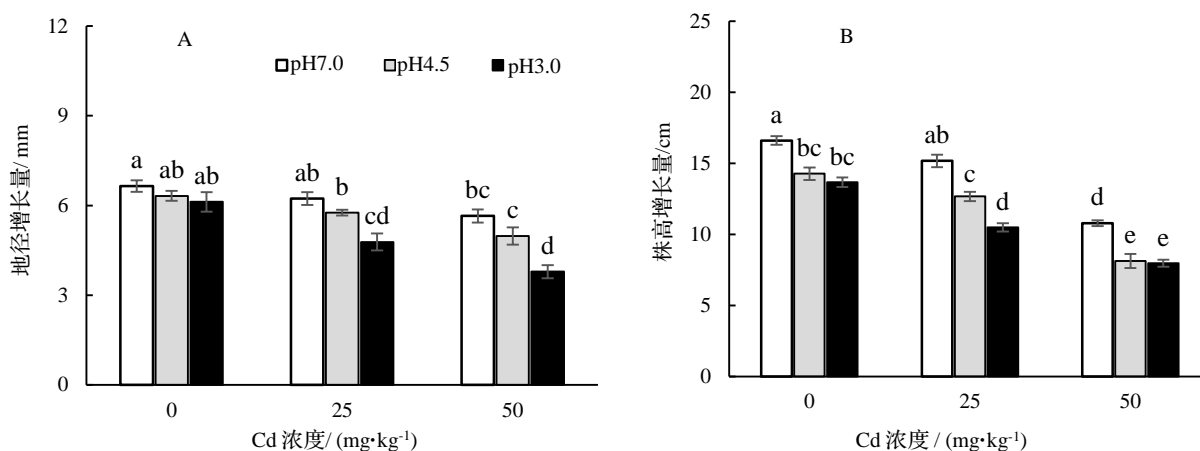
1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析,各处理间的差异使用单因素方差分析 (One-way ANOVA), Cd 和 AR 对生物量、根系表型等的交互影响采用双因素方差分析 (Two-way ANOVA),显著性采用 Student's 检验 ($P < 0.05$),并用 Excel 2010 软件作图。

2 结果与分析

2.1 Cd 和 AR 对桑幼苗株高和地径生长的影响

由图 1 可知, A_1B_2 处理和 A_1B_3 处理的桑株高增长量均显著低于 CK (A_1B_1) 的,可见 AR 处理显著抑制了桑的株高生长。 A_2B_1 处理的桑株高增长量与 CK 的相比没有显著差异,而 A_3B_1 处理的桑株高增长量显著低于 CK 的,可见低浓度 Cd ($25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 对桑株高生长的影响不大,但是高浓度 Cd ($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 显著抑制了桑株高生长。 A_2B_2 处理和 A_2B_3 处理的桑株高增长量显著低于 A_2B_1 , A_3B_2 和 A_3B_3 处理的桑株高增长量显著低于 A_3B_1 处理的,结合表 3 可知,AR 加强了 Cd 对桑株高生长的抑制。



注: 图中不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

图 1 不同处理对桑株高和地径增长量的影响

Figure 1 Growth of height and ground diameter of seedlings under different treatments

由图 1 可知, Cd 和 AR 处理对桑幼苗地径生长的影响与对株高生长的影响不完全一致, A₁B₂、A₁B₃ 处理对桑地径生长并没有显著影响, 说明 AR 对桑地径生长几乎没有影响。与 CK 相比, A₂B₁ 处理的桑地径增长量变化不显著, A₃B₁ 处理的桑地径增长量显著减低, 说明低浓度 Cd (25 mg·kg⁻¹) 对桑地径生长的影响不大, 但是高浓度 Cd (50 mg·kg⁻¹) 显著抑制了桑地径生长。A₂B₂ 处理的桑地径增长量与 A₂B₁ 处理的相比, A₃B₂ 处理的桑地径增长量与 A₃B₁ 处理的相比, 均无显著差异; 但 A₂B₃ 处理的桑地径增长量显著低于 A₂B₁ 处理的, 且 A₃B₂ 处理的桑地径增长量显著低于 A₃B₁ 处理的。以上分析结果表明, 重度 AR (pH3.0) 显著加剧了 Cd 对桑地径生长的抑制, 但是轻度 AR (pH4.5) 作用不明显。

2.2 Cd 和 AR 对桑幼苗根系生物量积累的影响

由表 2 可知, Cd 处理显著抑制了桑幼苗根生物量的积累, 且抑制程度随着 Cd 浓度的增加而升高。A₂B₁ 和 A₃B₁ 处理的桑根系生物量积累仅分别为 CK 的 77% 和 55%。与 CK 相比, 轻度 AR 对桑根系生物量积累的影响不显著, 但是重度 AR 显著降低了桑根系生物量积累。Cd 和 AR 对桑根系生物量积累的交互作用显著, 与单独 Cd 处理相比, 轻度和重度 AR 均显著降低了桑根系生物量积累 (表 3)。

表 2 不同处理对桑根系表型、生物量积累和活力的影响
Table 2 Root phenotype, biomass accumulation and vigor of seedlings under different treatments

处理	总根长/cm	总根表面积/cm ²	总根体积/cm ³	根尖数/个	根干质量/g	根系活力/(μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)
A ₁ B ₁ (CK)	2 976 ± 86a	594 ± 17a	9.66 ± 0.33a	6 917 ± 200a	7.48 ± 0.30a	41.67 ± 1.45b
A ₁ B ₂	2 798 ± 43ab	577 ± 9ab	8.75 ± 0.58ab	6 415 ± 99ab	6.92 ± 0.13ab	51.06 ± 0.58a
A ₁ B ₃	2 678 ± 77bc	534 ± 15b	8.14 ± 0.58bc	6 018 ± 174b	5.81 ± 0.25bc	37.67 ± 3.45bc
A ₂ B ₁	2 429 ± 73c	505 ± 14b	7.50 ± 0.48c	5 879 ± 170b	5.74 ± 0.21c	29.67 ± 2.88c
A ₂ B ₂	2 002 ± 71d	425 ± 13c	6.11 ± 0.56d	5 087 ± 150c	4.53 ± 0.78d	23.22 ± 1.16de
A ₂ B ₃	1 883 ± 60d	416 ± 12c	5.67 ± 0.33d	4 842 ± 140c	4.44 ± 0.51de	21.33 ± 1.20def
A ₃ B ₁	1 380 ± 52e	214 ± 12d	3.05 ± 0.48e	3 386 ± 196d	4.10 ± 0.23e	24.01 ± 2.44d
A ₃ B ₂	1 082 ± 43f	135 ± 7e	2.31 ± 0.33ef	3 724 ± 108e	3.04 ± 0.68f	20.67 ± 1.88ef
A ₃ B ₃	943 ± 27f	149 ± 4e	2.08 ± 0.29f	2 370 ± 68f	3.16 ± 0.60f	18.67 ± 1.41f

2.3 Cd 和 AR 对桑幼苗根系表型和活力的影响

由表 2 可知, Cd 处理显著降低了桑幼苗根系表型参数, 其影响程度随着 Cd 浓度的增加而升高。其中, A₂B₁ 处理的桑的总根长、总根表面积、总根体积和根尖数分别比 CK 的降低了 20% 左右, A₃B₁ 处理的这些指标分别比 CK 的降低了 46% ~ 68%。轻度 AR 对桑幼苗根系表型参数的影响不显著, 重度 AR 显著降低了根系表型参数。A₂B₂ 处理的总根长、总根表面积、总根体积和根尖数显著低于 A₂B₁ 处理的, 与 A₂B₃ 处理的结果类似; A₃B₂ 处理的这些指标分别比 A₃B₁ 处理降低了约 20%, A₃B₃ 处理比 A₃B₁ 处理降低了约 30%, Cd 和 AR 对根系表型影响的交互作用显著 (表 2, 表 3)。

由表 2 可知, Cd 处理显著抑制了桑幼苗根系活力, 且抑制程度随着 Cd 浓度的增加而升高。A₂B₁ 和 A₃B₁ 处理的根系活力分别为 CK 的 71% 和 58%。A₁B₂ 处理显著提高了桑幼苗的根系活力, 比 CK 的增加了 23%, 但是 A₁B₃ 处理的提高作用不显著。Cd 和 AR 对桑根系活力影响的交互作用显著 (表 3)。A₂B₂ 和 A₂B₃ 处理的根系活力比 A₂B₁ 处理的分别降低了 22% 和 28%; A₃B₂ 和 A₃B₃ 处理的根系活力比 A₃B₁ 处理的分别降低了 14% 和 22% (表 2)。

表 3 AR 和 Cd 污染对桑各指标的交互作用
Table 3 Interaction of acid rain and Cd contamination on tested indicators

处理	株高 增长量	地径 增长量	总根长	总根 表面积	总根 体积	根尖数	根干 质量	根系 活力	Cd 含量	Fe 含量	Mg 含量
Cd	*	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**
AR	*	ns	*	*	*	*	*	*	ns	*	*
Cd × AR	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

注: 表中*表示差异显著 (P<0.05), **表示差异极显著 (P<0.01)。

2.4 Cd 和 AR 对桑幼苗根系元素含量的影响

由图 2 可知, 桑幼苗根系 Cd 含量随着 Cd 处理浓度的增加而增加, 而且 AR 处理显著促进了根系对 Cd 的

吸收。 A_2B_1 和 A_3B_1 处理的根系 Cd 含量分别为 56.70 和 $170.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ； A_2B_2 和 A_2B_3 处理的根系 Cd 含量分别比 A_2B_1 处理的增加了 44% 和 50%； A_3B_2 和 A_3B_3 处理的根系 Cd 含量分别比 A_3B_1 处理的增加了 13% 和 24%。

Cd 处理显著降低了桑幼苗根系 Fe 和 Mg 的含量（图 2）。 A_2B_1 处理的根系 Fe 和 Mg 含量分别比 CK 的降低了 20% 和 9%， A_3B_1 处理的根系 Fe 和 Mg 含量分别比 CK 的降低了 44% 和 48%。 A_1B_3 处理亦显著降低了根系的 Fe 和 Mg 含量，而 A_1B_2 处理对根系 Fe 和 Mg 含量的影响不显著。Cd 和 AR 对根系 Fe 和 Mg 含量影响的交互作用显著（表 3）。与 A_2B_1 处理相比， A_2B_2 处理的根系 Fe 含量， A_2B_3 处理的根系 Fe、Mg 含量显著下降；和 A_3B_1 相比， A_3B_2 处理的根系 Fe 含量， A_3B_3 处理的根系 Fe、Mg 含量显著下降。

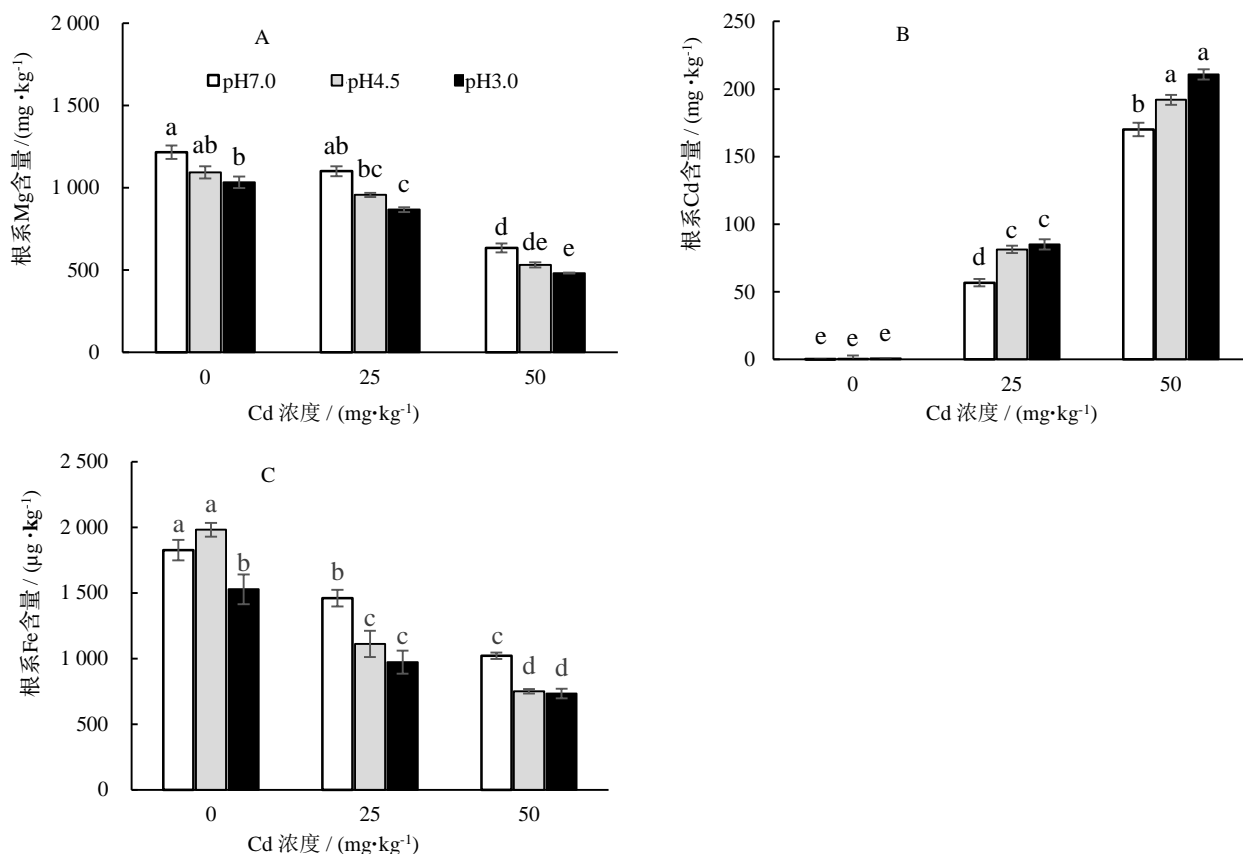


图 2 不同处理对桑根系 Cd、Fe 和 Mg 含量的影响

Figure 2 Cd, Fe and Mg contents in seedlings root under different treatments

3 讨论与结论

Cd 是植物生长的非必需元素，土壤中 Cd 过高会导致根系变短变粗、根系活力下降，影响水分和养分吸收^[16]。本研究中，Cd 处理显著改变了桑幼苗的根系表型特性、降低了根生物量和根系活力，这与前人的研究结果一致，可见两种浓度的 Cd 均显著抑制了桑根系的生长，而且随着 Cd 浓度的增加，抑制程度显著增加。但是在低浓度 Cd 处理下，桑幼苗地上部分生长与 CK 的差异不显著；而在高浓度 Cd 处理下，桑幼苗地上部分生长显著低于 CK 的，说明桑幼苗对 $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd 浓度有一定的耐受性，而 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd 浓度已经对地上部分生长产生了胁迫。同时，Cd 处理还显著降低了桑根系对 Fe 和 Mg 元素的吸收，且根系 Cd 含量越高，这两种元素的含量越低。这是因为 Cd 占据了 Fe 等元素的转运蛋白和通道，使得这些元素无法进入植物体^[17]。这与卢倩云等发现的油菜 *Brassica napus* 毛状根中 Cd 含量超出一定范围后，Fe 含量降低的结论一致^[18]。

酸沉降主要通过两方面干扰植物正常生长，一是 AR 中含有的 H^+ 和 N、S 化合物会紊乱植物体的氮代谢平

衡, 干扰叶绿素的合成和分解, 同时导致植物体内活性氧的过量积累, 从而降低光合能力^[19]。二是 AR 会导致植物根系质膜受损, 影响养分元素的吸收和转运, 造成植物体内养分失衡, 并且 AR 还会增加土壤活性铝离子的溶出量, 对植物产生铝毒^[20]。根据本研究中桑幼苗的地径生长状况、根系表型和活性、根系 Fe 和 Mg 含量变化等可知轻度 AR 对桑幼苗生长的影响不大, 即桑对 pH>4.5 的 AR 有一定的耐受性, 但是重度 AR 对桑幼苗生长有一定的抑制作用, 可能是因为根系活力受抑制, 养分吸收受到干扰。

前人研究表明 AR 与 Cd 对植物生长的影响具有协同作用^[11-12]。这是因为一方面酸沉降自身对植物生长具有伤害作用, 另一方面是酸沉降会促进植物对 Cd 的吸收。本研究发现低浓度 Cd 和轻度 AR 的交互作用显著, 即 AR 导致 25 mg·kg⁻¹ Cd 处理对桑幼苗产生了明显的胁迫, 具体表现为两者复合处理的桑地上部和根系指标均显著低于 CK, 而且随着 Cd 浓度的增加, 抑制程度升高。这与 AR 与 Cd 复合处理对楝 *Melia azedarach*、玉蜀黍 *Zea mays* 的影响类似^[21-22], 即酸沉降会加剧 Cd 污染对这些植物的胁迫。

酸沉降会促进植物对 Cd 的吸收、积累和转运, 这是因为根际对 Cd 的吸收能力主要取决于土壤中的 Cd 交换容量 (CEC) 和 Cd²⁺ 的电化学电位, AR 中的 H⁺、N 能显著提高这两个指标, 从而向土壤中释放足够的生物有效态 Cd^[23]。本研究中, 轻度 AR 使得桑根系的 Cd 含量显著高于单独 Cd 处理, 说明酸沉降很有可能通过增加土壤有效 Cd 加剧了对桑的胁迫。这与 AR 导致镉对大豆 *Glycine max* 根系生长产生抑制、AR 导致锌对杨树 *Populus sp.* 根系生长产生危害有类似的机理^[24-25]。另一方面, Cd 跨膜运输进入细胞需要转运蛋白和通道蛋白的参与, 在无 Cd 环境中这些蛋白主要用于运输 Ca²⁺、Zn²⁺、Fe²⁺ 等二价阳离子。Cd 因为与这些离子具有相似的特性, 通过竞争与转运蛋白和通道蛋白结合后亦可进入植物细胞, 而 AR 中的 N 可以诱导更多转运蛋白的产生, 促进了 Cd 从植物细胞壁向细胞、根系向地上部分的转移^[26]。本研究发现 AR 不仅提高了根系的 Cd 含量, 而且降低了根系中的 Fe 和 Mg 含量。一方面, AR 可以直接影响植物对养分的吸收, 另一方面, AR 引起的根系 Cd 含量增加间接影响了植物对养分的吸收, 因为 Cd 占据了 Fe 等元素的转运蛋白和通道^[17]。

综上所述, 桑对轻度 AR 和低浓度 Cd 有一定的耐受性, 但是酸沉降会加强 Cd 对桑根系的胁迫, 因此在酸沉降区域采用桑进行土壤 Cd 污染修复时, 需要考虑 AR 的协同作用, 综合分析复杂环境对桑耐受性和修复效率的影响。

参考文献:

- [1] KHANAM R, KUMAR A, NAYAK A K, et al. Metal(loid)s (As, Hg, Se, Pb and Cd) in paddy soil: Bioavailability and potential risk to human health[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 699: 134–144.
- [2] 韦继康, 余晓霞, 王保欣, 等. 浙江东部沿海典型地区土壤重金属赋存形态、生物有效性及其影响因素研究[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43 (10): 1231–1237.
- [3] ZHANG J, CAO X, YAO Z, et al. Phytoremediation of Cd-contaminated farmland soil via various *Sedum alfredii*-oilseed rape cropping systems: Efficiency comparison and cost-benefit analysis[J]. *J Hazard Mater*, 2021, 419: 126–139.
- [4] 邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 等. 巨大芽孢杆菌对伴矿景天修复镉污染农田土壤的强化作用[J]. *应用生态学报*, 2020, 31 (9): 3111–3118.
- [5] ZHANG S, YANG C, CHEN M, et al. Influence of nitrogen availability on Cd accumulation and acclimation strategy of *Populus* leaves under Cd exposure[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2019, 180: 439–448.
- [6] 谢探春, 王国兵, 尹颖, 等. 柳树对镉-砷复合污染土壤的修复潜力与耐受性研究[J]. *南京大学学报 (自然科学)*, 2019, 55 (2): 282–290.
- [7] QU Y, AN J L, HE Y J, et al. An overview of emissions of SO₂ and NO_x and the long-range transport of oxidized sulfur and nitrogen pollutants in East Asia[J]. *J Environ Sci*, 2016, 44 (6): 13–25.
- [8] JIANG Y B, JIANG S M, LI Z B, et al. Field scale remediation of Cd and Pb contaminated paddy soil using three mulberry (*Morus alba* L.) cultivars[J]. *Ecol Engin*, 2019, 129: 38–44.
- [9] 陈露, 张芳, 罗泽虎, 等. 不同桑树品种幼苗对镉的耐受性[J]. *贵州农业科学*, 2021, 49 (1): 7–15.
- [10] 胡月, 张倩, 孙东彬, 等. 模拟酸雨对桑树叶片光合日变化的影响[J]. *草业科学*, 2015, 32 (11): 1862–1870.
- [11] 臧畅, 吕志强, 董莲春, 等. 不同性别桑树幼苗对镉与酸雨复合处理的生长响应及镉积累差异[J]. *应用生态学报*, 2018, 29 (3): 969–975.
- [12] 毛晓瑜, 楼艳笑, 戴超, 等. 镉和酸雨对不同性别桑树幼苗光合生理的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26 (1): 117–124.
- [13] 陈圣贤, 董莲春, 伊力塔, 等. 秃瓣杜英幼苗对模拟酸雨的荧光响应及养分元素分配特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36 (3): 451–458.

