

IAA和GA₃强化八宝景天修复Cd污染土壤的研究

程金涛, 刘宇林

武汉工程大学, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年12月21日; 录用日期: 2023年1月22日; 发布日期: 2023年1月30日

摘要

本次研究以八宝景天为植物研究对象, 采用盆栽试验模拟镉污染土壤, 构建植物激素与超富集植物联合修复试验系统, 通过施加赤霉素(GA₃)和生长素(IAA), 考察不同浓度的植物激素和植物种类对植物吸收重金属的影响, 探究植物激素对景天植物修复镉污染土壤效果。结果表明, 与对照组相比, 施加植物激素GA₃和IAA均可以增加八宝景天的生物量、茎长、根长、叶绿素含量和减少丙二醛的含量。土壤中Cd浓度条件相同的情况下, 八宝景天的根长增长效果在叶面喷洒50 mg/L的IAA是最好的; 植物茎长增长、鲜重增长和植物叶绿素含量在叶面喷洒50 mg/L的GA₃是最多的; 植物的MDA含量在叶面喷洒100 mg/L的GA₃是最少的。施加不同浓度的植物激素GA₃和IAA时, 八宝景天对Cd富集效果有不同影响, 在土壤中Cd浓度条件相同的情况下, 八宝景天根部和地上部分Cd的含量都是在叶面喷洒25 mg/L的GA₃时最高。

关键词

植物激素, 景天植物, 植物修复, Cd污染土壤

Study on the Remediation of Cd-Contaminated Soil by IAA and GA₃ Enhanced *Hylotelephium erythrostictum*

Jintao Cheng, Yulin Liu

Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: Dec. 21st, 2022; accepted: Jan. 22nd, 2023; published: Jan. 30th, 2023

Abstract

In this study, the plant study was conducted with *Hylotelephium erythrostictum* as the plant re-

search object, and a pot experiment was used to simulate cadmium-contaminated soil, and a combined phytohormone and super-enriched plant remediation test system was constructed to investigate the effect of different concentrations of phytohormones and plant species on plant uptake of heavy metals by applying gibberellin (GA₃) and growth hormone (IAA) and investigating the effect of phytohormones on the remediation of cadmium-contaminated soil by *Sedum* plants. The results showed that the application of both phytohormones GA₃ and IAA increased the biomass, stem length, root length, chlorophyll content and reduced malondialdehyde content of Cd in *Hylotelephium erythrostickum* compared with the control group. Under the same conditions of Cd concentration in the soil, the root length growth of *Hylotelephium erythrostickum* was best with foliar spraying of 50 mg/L IAA; the plant stem length growth, fresh weight growth and plant chlorophyll content were most with foliar spraying of 50 mg/L GA₃; the plant MDA content was least with foliar spraying of 100 mg/L GA₃. The Cd enrichment effect of different concentrations of GA₃ and IAA in *Hylotelephium erythrostickum* was different. Under the same conditions of Cd concentration in soil, the highest Cd content in both roots and aboveground parts of *Hylotelephium erythrostickum* was found in foliar spraying of 25 mg/L GA₃.

Keywords

Phytohormones, *Sedum* Plants, Phytoremediation, Cd-Contaminated Soil

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 由于矿业开采、工业冶炼和污水灌溉等人为因素或其他途径导致大量重金属污染物进入土壤, 并逐渐积累, 当土壤中重金属含量超过正常范围时, 会导致土壤结构受到破坏以及土壤环境质量恶化等一系列问题, 破坏土壤的正常功能, 造成环境污染[1] [2] [3]。重金属污染由于其危害性大、治理难度较高且具有隐蔽性、长期性等特点, 成为土壤污染治理的难点和重点[4]。

土壤重金属污染会破坏土壤的正常功能, 导致土壤的组成及理化性质发生变化, 使土壤中的酶活性、微生物活性等受到抑制, 对土壤生态系统以及植物生态系统造成危害[5]。此外, 当土壤中的 Cd 浓度升高时, 也会抑制植物的生长、代谢过程, 如细胞的光合作用、呼吸作用及其他代谢活动, 使植物吸收的营养和水分减少, 植物叶片明显褪绿, 甚至枯死[6]。当环境中的 Cd 通过食物链等途径进入人体时, 还会对人体健康产生危害, 导致包括心血管疾病、癌症、肾脏损害、神经系统、大脑、皮肤和骨骼等在内的多种疾病[7] [8]。

植物修复是一种常用的重金属污染土壤的修复技术, 既不破坏土壤环境, 又能维持土壤结构和微生物条件[9] [10]。植物修复在土壤修复的应用具有成本相对较低、具有广泛应用潜力等优点。但目前已知的植物修复大多存在植株矮小、生物量低、生长缓慢、需要的修复时间较长等缺点, 限制了植物修复作为一种生物修复技术的推广和应用[11] [12]。

植物修复技术的核心载体是超富集植物, 该方法已成为控制土壤重金属污染的重要手段之一, 在清除土壤重金属污染物的过程中发挥了关键作用[13] [14] [15]。但也存在一些局限性, 例如大部分超富集植物植株矮小、生物量低、生长缓慢、需要的修复时间较长, 往往是数年甚至数十年[16] [17] [18]。

植物激素对植物生长有促进作用, 本研究采用生长素(IAA)和赤霉素(GA₃), 生长素有调节茎的生长速率、抑制侧芽、促进生根等作用[19]。赤霉素最突出的作用是加速细胞的伸长, 对细胞的分裂也有促进

作用[20]。

八宝景天(*Hylotelephium erythrostictum*)属景天科植物,是我国广泛种植的园林绿化植物,对土壤中Cd有较强的富集能力,同时兼有耐旱、适应性强、生物量较大等特点,具有应用于Cd污染土壤的潜力[21][22]。

因此,该研究通过室内盆栽试验,研究植物激素和超富集植物联合使用对土壤中Cd的修复效果,以期对Cd污染土壤的修复应用提供科学依据和技术支撑。

2. 实验材料

供试土壤:本实验所用土壤均取自武汉工程大学池塘边的泥质土壤,土壤基本理化性质为:Ph: 6.63、阳离子交换量(CEC): 19.30 cmol/kg、N: 346 mg/kg、P: 462 mg/kg、K: 2.61 mg/kg、Cu: 19 mg/kg、Zn: 53 mg/kg。

供试植物:植物为八宝景天,从武汉市南湖花木城订购。

植物激素:3-吲哚乙酸(IAA),纯度:98%;赤霉素(GA₃),纯度:高纯,98%。

3. 实验设计

将采集后的土壤中的植物根茎和石块去除,风干后经过60目筛网,然后搅动混匀,在直径15 cm × 高12.5 cm的盆内装土0.8 kg。Cd通过水溶液的形式加入土壤,将土壤均分为4份,在一份土壤中加入相应浓度Cd溶液,再将4份土壤混匀,置于阴凉干燥处稳定30天。最后得到浓度为25 mg/kg和50 mg/kg的供试土壤,另设不添加Cd的土壤。

实验所选择的植物均为生长期的幼株,将植物置于Hoagland培养液中水培培养一周,并用去离子水清洗净。之后对植物进行移栽,每个盆栽中移植5株,为了提高实验数据的准确性,并设置2组对照。本实验共设置7组处理,分别见表1。

Table 1. Experimental pot group

表 1. 实验盆栽分组

空白样	IAA (mg/L)			GA ₃ (mg/L)		
	25	50	100	25	50	100
CK	A1	A2	A3	B1	B2	B3

在八宝景天移植7天后,首次施加不同浓度的IAA和GA₃,之后每15天施加一次,共计喷洒4次,每次喷洒IAA和GA₃的量都控制在5 ml,喷洒方式采用叶面喷洒,待到植物首次喷洒激素后的第60天,取样测定其生理生化指标。先将收割的植株用蒸馏水反复冲洗,用蒸馏水将植物的根浸泡20 min,对其株高、根长及鲜重进行测定,再分别测定八宝景天的叶绿素含量、丙二醛(MDA)含量。然后所收割植物在105℃高温下杀青60 min,再降温至80℃左右烘干至恒重,然后进行地上部、根部干重测定。

实验植物种植在实验室内进行,采用日光灯模拟太阳光照,每日进行6~8小时的光照,由于实验室内空气过于干燥,可使用空气加湿器,确保植物所处环境空气湿度与外界相一致,平均3天浇一次水,确保土壤湿度保持在80%左右。

4. 样品 Cd 含量测定

取适量植物鲜叶片,用蒸馏水反复冲洗干净后用吸水纸擦干植物表面水分后,于105℃杀青1 h,再于70℃烘干至恒重,研磨过60目筛后,准确称取0.5 g样于50 mL高脚烧杯中,加HNO₃:HClO₄ (4:1,

优级纯)混合酸 5 mL, 密封静置过夜, 将混合液放入聚四氟乙烯消解罐中, 于电热炉上缓慢升温至 190℃, 继续消化至 HClO₄ 大量冒烟, 再加 5 mL 硝酸消解至剩余约 2 mL, 剩余消解液呈无色或淡黄色为止, 冷却用 0.45 μm 滤纸过滤、定容, 再用火焰原子吸收分光光度仪测定植物体内 Cd 含量。

5. 数据分析

数据统计采用 Excel 2016, 使用 SPSS 24.0 中(Duncan 法)对数据进行多重比较分析组间差异(P < 0.05)与单因素方差分析。

6. 结果与分析

6.1. 植物根长

根据图 1, 随着土壤中 Cd 浓度的增加, 八宝景天的根长增长呈下降趋势。在土壤中 Cd 浓度相同的情况下, 叶面喷洒 IAA 和 GA₃ 有益于八宝景天根部的生长。当 Cd 浓度为 0 mg/kg 时, 叶面喷洒 IAA 使得八宝景天的根部增长量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 IAA 施加使八宝景天的根长增长量较对照组分别增加了 29.17%、43.23% 和 35.94%。当 Cd 浓度为 25 mg/kg 时, 叶面喷洒 IAA 使得八宝景天的根部增长量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 IAA 施加使八宝景天的根长增长量较对照组分别增加了 21.47%、32.06% 和 27.35%。当 Cd 浓度为 50 mg/kg 时, 叶面喷洒 IAA 使得八宝景天的根部增长量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 IAA 施加使八宝景天的根长增长量较对照组分别增加了 16.30%、29.15% 和 26.96%。所以, 在土壤中 Cd 浓度条件相同的情况下, 八宝景天的根长增长效果在叶面喷洒 50 mg/L 的 IAA 是最好的, 而随着外源激素浓度的增高, 八宝景天的根长增长量反而降低, 说明施加过高的外源激素对八宝景天的根长增长有抑制作用。王金祥[23]发现在不同条件下, 生长素和赤霉素对植物根的生长都有一定促进作用, 这与本研究相符合, 表明施加 IAA 和 GA₃ 确实可以提高植物根长。

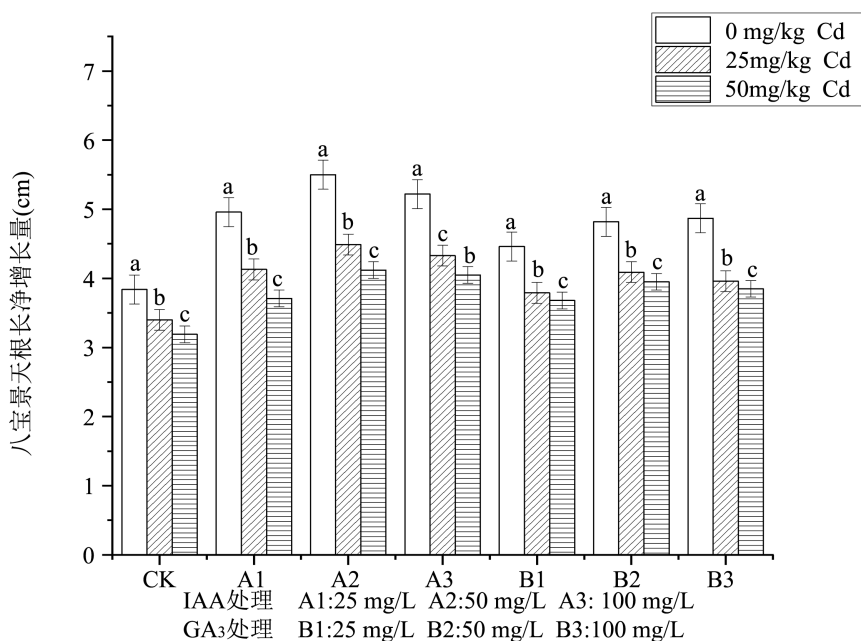


Figure 1. Plant root length growth changes (Different letters indicate significant differences under the same treatment)

图 1. 植物根长增长变化(不同的字母表示在相同处理下的显著差异)

6.2. 植物茎长

根据图 2, 随着土壤中 Cd 浓度的增加, 八宝景天的茎长增长呈下降趋势。在土壤中 Cd 浓度相同的情况下, 叶面喷洒 IAA 和 GA₃ 有益于八宝景天茎长的生长。当 Cd 浓度为 0 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA₃ 使得八宝景天的根部增长量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA₃ 施加使八宝景天的根长增长量较对照组分别增加了 61.63%、79.00% 和 66.63%。当 Cd 浓度为 25 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA₃ 使得八宝景天的茎长增长量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA₃ 施加使八宝景天的茎长增长量较对照组分别增加了 78.04%、113.64% 和 100.00%。当 Cd 浓度为 50 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA₃ 使得八宝景天的茎长增长量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA₃ 施加使八宝景天的茎长增长量较对照组分别增加了 89.04%、116.14% 和 103.40%。所以, 在土壤中 Cd 浓度条件相同的情况下, 八宝景天的茎长增长效果在叶面喷洒 50 mg/L 的 GA₃ 是最好的, 而随着外源激素浓度的增高, 八宝景天的茎长增长量反而降低, 说明施加过高的外源激素对八宝景天的茎长增长有抑制作用。陈晨[24]等研究发现, 40 mg/kg IAA + 25 mg/kg GA₃ 混合喷施后, 叶用莴苣的茎长增加显著。这表明, GA₃ 和 IAA 的施加可能延缓了重金属对植物的毒性, 促进了植物茎部增长。

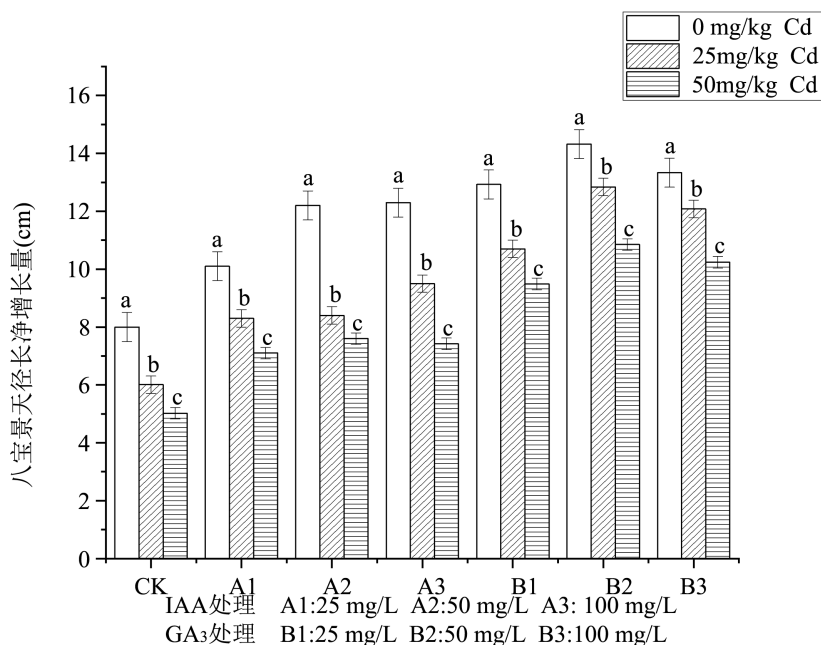


Figure 2. Plant stem length growth changes (Different letters indicate significant differences under the same treatment)

图 2. 植物茎长变化(不同的字母表示在相同处理下的显著差异)

6.3. 植物鲜重

根据图 3, 随着土壤中 Cd 浓度的增加, 八宝景天的鲜重增长呈下降趋势。在土壤中 Cd 浓度相同的情况下, 叶面喷洒 IAA 和 GA₃ 有益于八宝景天鲜重的增长。当 Cd 浓度为 0 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA₃ 使得八宝景天鲜重的增长量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA₃ 施加使八宝景天鲜重的增长量较对照组分别增加了 51.74%、78.26% 和 57.83%。当 Cd 浓度为 25 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA₃ 使得八宝景天鲜重的增长量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA₃ 施加使八宝景天鲜重的增长量较对照组分别增加了 41.75%、58.74% 和 53.88%。当 Cd 浓度为 50 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA₃ 使得八宝景天鲜重的

增长量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA_3 施加使八宝景天鲜重的增长量较对照组分别增加了 44.74%、66.84% 和 56.84%。所以, 在土壤中 Cd 浓度条件相同的情况下, 八宝景天的鲜重增长效果在叶面喷洒 50 mg/L 的 GA_3 是最好的, 而随着外源激素浓度的增高, 八宝景天的鲜重增长量也会降低, 说明施加过高的外源激素对八宝景天的鲜重增长也有抑制作用。朱振国[25]等研究发现, 水培条件下, 0.2 mg/L 赤霉素处理较其它处理地上部干重的增幅达到 78.54%~174.73%。司贺龙[26]等研究发现, 当 IAA + GA_3 的浓度为 3000 $\mu\text{mol/L}$ 时, 刺果瓜的鲜重及干重较空白对照组增加了 1 倍以上, 大于 IAA 或 GA_3 单独处理的效果。以上研究均表明, 外援 GA_3 和 IAA 的施加均能促进植物鲜重的增长。

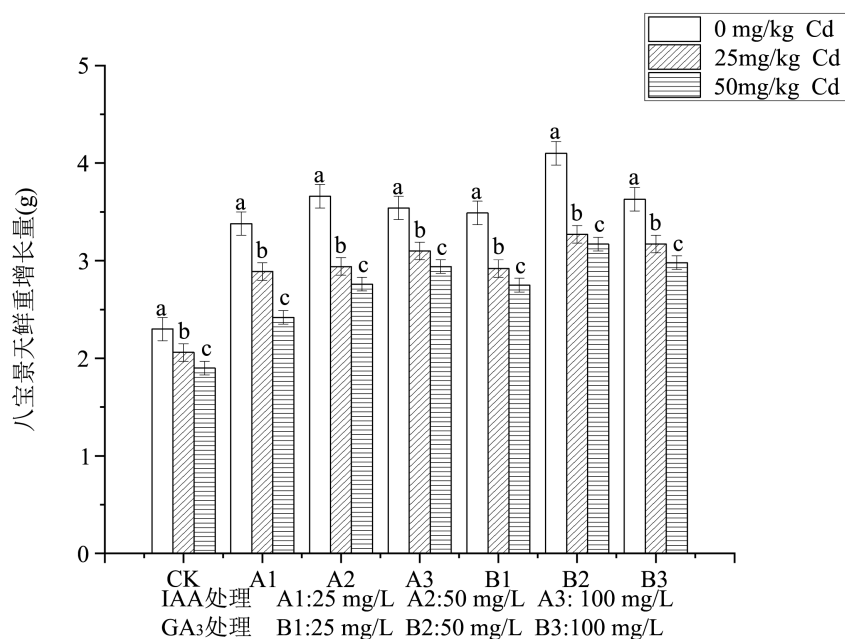


Figure 3. Plant fresh weight changes (Different letters indicate significant differences under the same treatment)

图 3. 植物鲜重变化(不同的字母表示在相同处理下的显著差异)

6.4. 植物叶绿素含量

根据图 4, 在土壤中 Cd 浓度增加的情况下, 八宝景天的叶绿素含量呈下降趋势。在土壤中 Cd 浓度相同的情况下, 叶面喷洒 IAA 和 GA_3 均提高了八宝景天的叶绿素含量。当 Cd 浓度为 0 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA_3 使得八宝景天的叶绿素含量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA_3 施加使八宝景天的叶绿素含量较对照组分别增加了 27.89%、37.92% 和 31.65%。当 Cd 浓度为 25 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA_3 使得八宝景天的叶绿素含量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA_3 施加使八宝景天的叶绿素含量较对照组分别增加了 30.30%、48.47% 和 42.43%。当 Cd 浓度为 50 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA_3 使得八宝景天的叶绿素含量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA_3 施加使八宝景天的叶绿素含量较对照组分别增加了 40.98%、47.54% 和 49.18%。所以, 在土壤中 Cd 浓度条件相同的情况下, 八宝景天的叶绿素含量在叶面喷洒 50 mg/L 的 GA_3 是最好的, 而随着外源激素浓度的增高, 植物的叶绿素含量先增后降, 说明施加过高的外源激素对八宝景天的叶绿素含量也有抑制作用。温玥[27]研究发现, 300 mg/L 赤霉素处理下, 在油茶花果实缓慢生长期第 1 节位叶片叶绿素含量相比于对照分别增加了 43.69%。刘一凡[28]等研究发现 IAA 含量与净光合速率显著正相关, 涂抹 50 mg/kg IAA 可以显著提高烟叶净光合速率 63.99%, 气孔导度 23.17%, 蒸腾速率 44.97%。以上研究表明, 赤霉素、生长素对植物光合作用具有促进作用, 这

与本研究的结果是相符的。

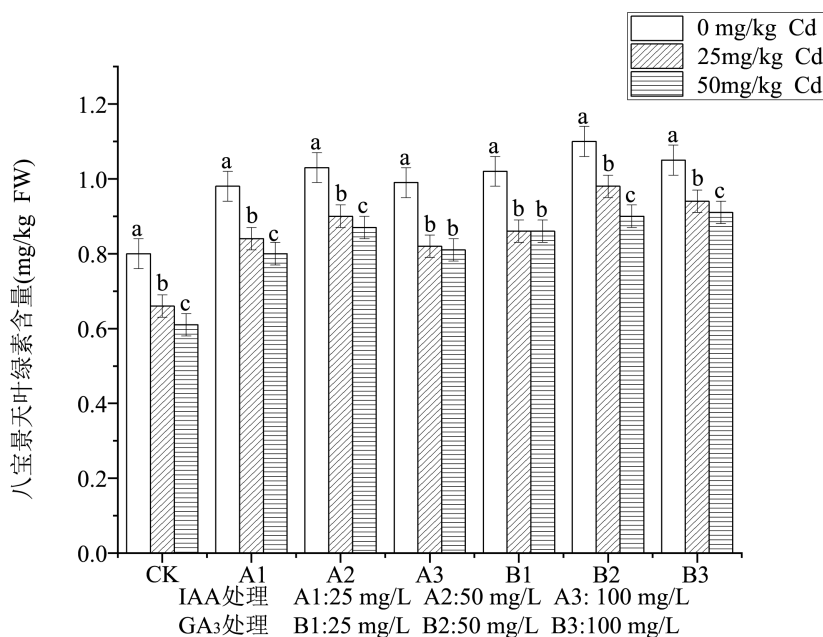


Figure 4. Effect of different treatments on plant chlorophyll content (Different letters indicate significant differences under the same treatment)

图 4. 不同处理对植物叶绿素含量的影响(不同的字母表示在相同处理下的显著差异)

6.5. 植物丙二醛(MDA)含量

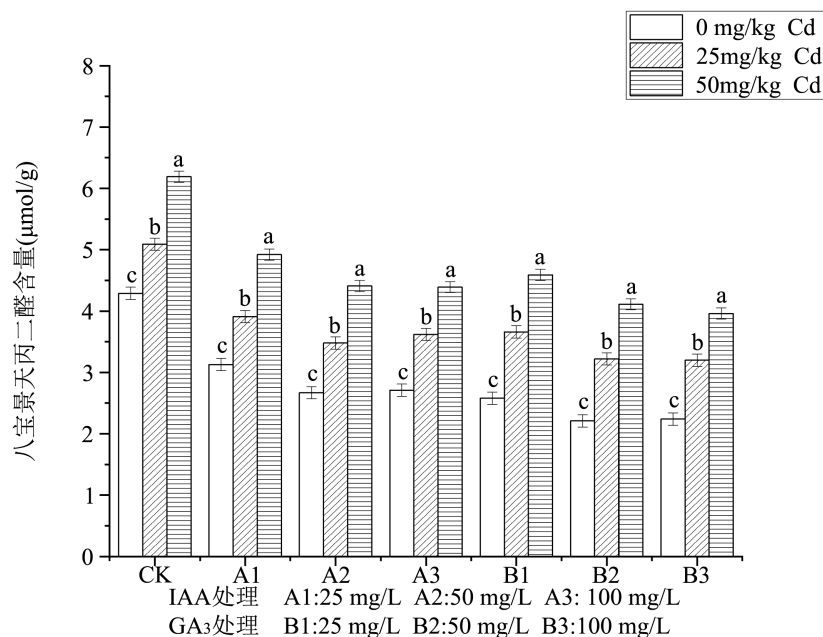


Figure 5. Effect of different treatments on plant MDA content (Different letters indicate significant differences under the same treatment)

图 5. 不同处理对植物 MDA 含量的影响(不同的字母表示在相同处理下的显著差异)

根据图 5, 在 Cd 浓度增加的情况下, 八宝景天 MDA 含量呈上升趋势。在相同 Cd 浓度的条件下,

叶面喷洒 IAA 和 GA_3 均可降低八宝景天 MDA 含量。当 Cd 浓度为 0 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA_3 使得八宝景天 MDA 含量最小, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA_3 施加使八宝景天的 MDA 含量较对照组分别降低了 39.86%、48.48% 和 47.79%。当 Cd 浓度为 25 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA_3 使得八宝景天 MDA 含量最小, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA_3 施加使八宝景天的 MDA 含量较对照组分别降低了 28.09%、36.74% 和 37.13%。当 Cd 浓度为 50 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA_3 使得八宝景天 MDA 含量最小, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA_3 施加使八宝景天的 MDA 含量较对照组分别降低了 25.85%、33.60% 和 36.03%。所以, 在土壤中 Cd 浓度条件相同的情况下, 八宝景天的 MDA 含量在叶面喷洒 100 mg/L 的 GA_3 是最少的, 说明施加外源激素能够减少八宝景天的 MDA 含量。陈晶[29]等研究发现 0.5 mg/L Cd 胁迫下添加 10 $\mu\text{mol/L}$ IAA 能显著提高玉米幼苗根和地上部生物量, 显著降低叶片 MDA 和 GSH 含量。王迎[30]研究发现当 Cd 浓度为 25 mg/kg 时, 10 $\mu\text{mol/L}$ 浓度的 GA_3 使东南景天、八宝景天体内 MDA 的含量较对照分别下降了 35%。因此, GA_3 和 IAA 的施加会提高活性氧清除剂 SOD 和 CAT 的活性, 调节脂质过氧化, 从而抑制植株衰老, 减少了植物体内 MDA 的含量, 降低了重金属对植物细胞膜的毒害作用。

6.6. 植物中的 Cd 含量

6.6.1. 植物根部 Cd 含量变化

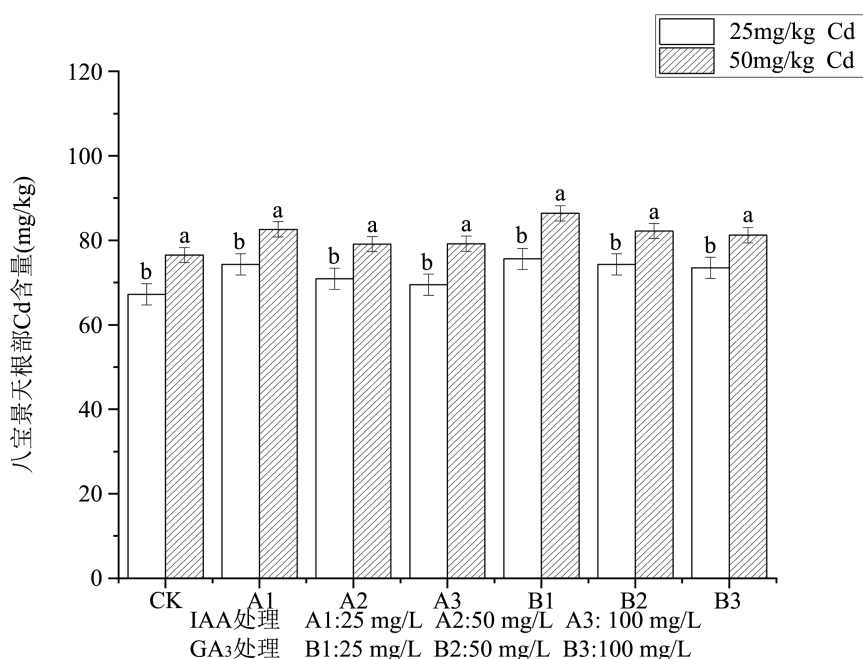


Figure 6. Changes of cadmium content in plant roots under different treatments (Different letters indicate significant differences under the same treatment)

图 6. 不同处理植物根部镉含量变化(不同的字母表示在相同处理下的显著差异)

根据图 6, 在土壤 Cd 浓度增加的情况下, 八宝景天根部 Cd 的含量总体呈上升趋势。在土壤中 Cd 浓度相同的情况下, 叶面喷洒 IAA 和 GA_3 均提高了八宝景天根部 Cd 的含量, 但随着 IAA 和 GA_3 浓度的提高, 八宝景天根部 Cd 的含量逐渐降低。当 Cd 浓度为 25 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA_3 使得八宝景天根部 Cd 的含量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA_3 施加使八宝景天根部 Cd 的含量较对照组分别增加了 12.50%、10.57% 和 9.38%。当 Cd 浓度为 50 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA_3 使得八宝景天根部 Cd 的含量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA_3 施加使八宝景天根部 Cd 的含量较对照组分别增加

了 12.88%、7.40% 和 6.09%。所以, 在土壤中 Cd 浓度条件相同的情况下, 八宝景天根部 Cd 的含量在叶面喷洒 25 mg/L 的 GA_3 时最高, 而随着相同外源激素浓度的增高, 八宝景天根部 Cd 的含量逐渐降低, 说明施加过高的外源激素对八宝景天根部 Cd 的含量增长具有抑制作用。贺群[31]研究发现, 通过施加 2 uM 和 10 uM 浓度的外源 IAA, 能够缓解茶树所受到的胁迫作用, 植物根部镉含量也显著降低, 说明外源 IAA 可以有效减轻镉对茶树的毒害作用。以上研究表明, 施加 IAA 等植物激素能有效缓解 Cd 对植物的毒害作用。

6.6.2. 植物地上部分 Cd 含量

根据图 7, 随着土壤 Cd 浓度的升高, 八宝景天地上部分 Cd 的含量总体呈上升趋势。在土壤中 Cd 浓度相同的情况下, 叶面喷洒 IAA 和 GA_3 均提高了八宝景天地上部分 Cd 的含量, 但随着 IAA 和 GA_3 浓度的提高, 大部分八宝景天地上部分 Cd 的含量逐渐降低。当 Cd 浓度为 25 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA_3 使得八宝景天地上部分 Cd 的含量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA_3 施加使八宝景天地上部分 Cd 的含量较对照组分别增加了 32.88%、30.89% 和 20.11%。当 Cd 浓度为 50 mg/kg 时, 叶面喷洒 GA_3 使得八宝景天地上部分 Cd 的含量最大, 25 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 浓度的 GA_3 施加使八宝景天地上部分 Cd 的含量较对照组分别增加了 27.31%、2.78% 和 21.27%。所以, 在土壤中 Cd 浓度条件相同的情况下, 八宝景天地上部分 Cd 的含量在叶面喷洒 25 mg/L 的 GA_3 时最高, 而叶面喷洒 IAA 和 GA_3 均提高了八宝景天地上部分 Cd 的含量, 这可能是 IAA 和 GA_3 的施加使得植物体内相关抗氧化酶活性的增加, 降低了 Cd 对植物细胞膜质的损伤, 增强了植物对 Cd 的耐受能力, 从而使得植物对 Cd 的富集能力加强, 从而对植物体内 Cd 从根部往地上部运输也有一定程度的促进作用。而随着相同外源激素浓度的增高, 八宝景天地上部分 Cd 的含量逐渐降低, 说明施加过高的外源激素对八宝景天地上部分 Cd 的含量增长具有抑制作用。

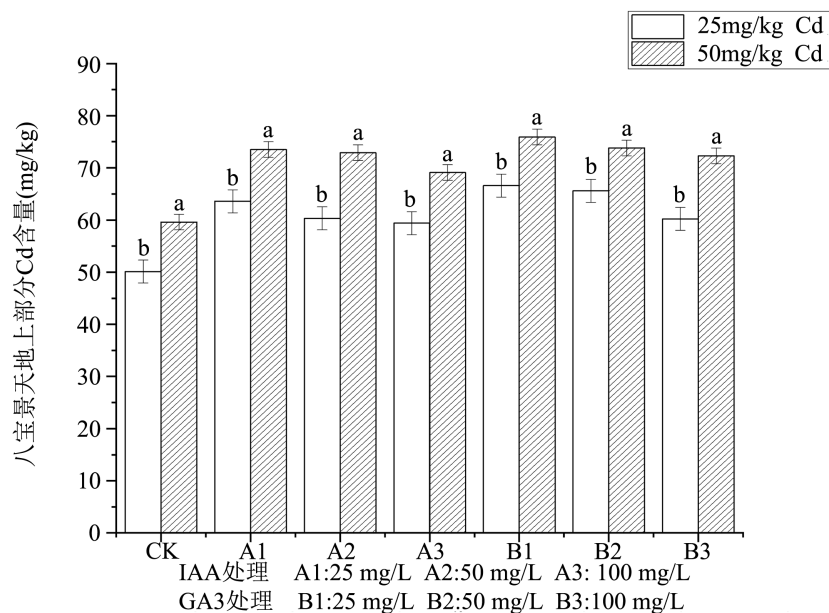


Figure 7. Changes of Cd content in the ground of plants (Different letters indicate significant differences under the same treatment)

图 7. 植物地上部分镉含量变化(不同的字母表示在相同处理下的显著差异)

7. 结论

IAA 是植物中最常见的内源激素之一, 具有促进细胞分裂、叶片扩大及顶端优势等作用, 大量研究

表明, IAA 对植物生长调节、吸收重金属有促进作用。GA₃ 能促进种子的萌发及茎的伸长, 部分研究也表明, 施加赤霉素能减轻重金属对植物的毒害作用。Liphadz 等外施 IAA 促进了重金属处理下向日葵的根系生长[32]。Hadi 等研究发现, 叶面喷施 GA₃ 极大地促进了银胶菊的生长, 增加了各部分的生物量, 同时可以使其根系对镉的富集量成倍地增长[33]。本实验研究发现, IAA 和 GA₃ 促进了八宝景天的生长, 提高了八宝景天叶绿素含量, 降低了 MDA 的含量。在土壤中 Cd 浓度条件相同的情况下, 八宝景天的根长增长效果在叶面喷洒 50 mg/L 的 IAA 是最好的; 植物茎长增长效果在叶面喷洒 50 mg/L 的 GA₃ 是最好的; 植物鲜重增长效果在叶面喷洒 50 mg/L 的 GA₃ 是最好的; 植物叶绿素含量在叶面喷洒 50 mg/L 的 GA₃ 是最多的; 植物的 MDA 含量在叶面喷洒 100 mg/L 的 GA₃ 是最少的。

超富集植物能吸收金属离子是通过细胞膜的跨膜运动, 而植物激素可以诱导激活 ATP 酶, 引起细胞膜的超极化, 促使金属离子通过细胞膜进入植物体内, 增加植物细胞对其的积累。有研究表明, 八宝景天对土壤中 Cd 具有较强的富集能力, 地上部 Cd 含量可达 35 mg/kg 以上, 具有修复 Cd 污染土壤的应用潜力[22]。本研究发现, IAA 和 GA₃ 的施加也增加了八宝景天地上部分和根部的 Cd 含量, 在土壤中 Cd 浓度条件相同的情况下, 八宝景天根部 Cd 的含量在叶面喷洒 25 mg/L 的 GA₃ 时最高, 土壤中 Cd 浓度为 25 mg/kg 时, 可达到 75.6 mg/kg, 土壤中 Cd 浓度为 50 mg/kg 时, 可达到 86.4 mg/kg; 而八宝景天地上部分 Cd 的含量也是在叶面喷洒 25 mg/L 的 GA₃ 时最高, 土壤中 Cd 浓度为 25 mg/kg 时, 可达到 66.6 mg/kg, 土壤中 Cd 浓度为 50 mg/kg 时, 可达到 75.9 mg/kg。而随着相同外源激素浓度的增高, 八宝景天根部和地上部分 Cd 的含量逐渐降低, 说明施加过高的外源激素对八宝景天根部和地上部分 Cd 的含量增长具有抑制作用。

本文只研究了 GA₃ 和 IAA 两种植物激素和八宝景天一种超富集植物, 对于其他的生长调节剂和超富集植物并未研究, 在以后实验中, 可以研究其他的外源激素的施加浓度对不同超富集植物的影响, 以探究其相互作用的机理。

基金项目

武汉工程大学化学与环境工程学院研究生教育创新基金项目。

参考文献

- [1] Mahar, A., Wang, P., Ali, A., Awasthi, M.K., Lahori, A.H., Wang, Q., Li, R. and Zhang, Z. (2016) Challenges and Opportunities in the Phytoremediation of Heavy Metals Contaminated Soils: A Review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **126**, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023>
- [2] Yang, Q., Li, Z., Lu, X., Duan, Q., Huang, L. and Bi, J. (2018) A Review of Soil Heavy Metal Pollution from Industrial and Agricultural Regions in China: Pollution and Risk Assessment. *Science of the Total Environment*, **642**, 690-700. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.068>
- [3] Nagajyoti, P.C., Lee, K.D. and Sreekanth, T.V.M. (2010) Heavy Metals, Occurrence and Toxicity for Plants: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, **8**, 199-216. <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>
- [4] Liang, J., Feng, C., Zeng, G., Gao, X., Zhong, M., Li, X., Li, X., He, X. and Fang, Y. (2017) Spatial Distribution and Source Identification of Heavy Metals in Surface Soils in a Typical Coal Mine City, Lianyuan, China. *Environmental Pollution*, **225**, 681-690. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.057>
- [5] 骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1137-1142.
- [6] Zhang, H., Xu, Z., Guo, K., Huo, Y., He, G., Sun, H., Guan, Y., Xu, N., Yang, W. and Sun, G. (2020) Toxic Effects of Heavy Metal Cd and Zn on Chlorophyll, Carotenoid Metabolism and Photosynthetic Function in Tobacco Leaves Revealed by Physiological and Proteomics Analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **202**, Article ID: 110856. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110856>
- [7] Signes-Pastor, A.J., Carey, M. and Meharg, A.A. (2016) Inorganic Arsenic in Rice-Based Products for Infants and Young Children. *Food Chemistry*, **191**, 128-134. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.078>
- [8] Shukla, O.P., Juwarkar, A.A., Singh, S.K., Khan, S. and Rai, U.N. (2011) Growth Responses and Metal Accumulation

- Capabilities of Woody Plants during the Phytoremediation of Tannery Sludge. *Waste Management*, **31**, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.08.022>
- [9] Marques, A.P.G.C., Rangel, A.O.S.S. and Castro, P.M.L. (2009) Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils: Phytoremediation as a Potentially Promising Clean-Up Technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **39**, 622-654. <https://doi.org/10.1080/10643380701798272>
- [10] He, B., Yun, Z., Shi, J. and Jiang, G. (2012) Research Progress of Heavy Metal Pollution in China: Sources, Analytical Methods, Status, and Toxicity. *Chinese Science Bulletin*, **58**, 134-140. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5541-0>
- [11] Datta, R. and Sarkar, D. (2004) Effective Integration of Soil Chemistry and Plant Molecular Biology in Phytoremediation of Metals: An Overview. *Environmental Geosciences*, **11**, 53-63. <https://doi.org/10.1306/eg.08280303014>
- [12] Maestri, E., Marmiroli, M., Visioli, G. and Marmiroli, N. (2010) Metal Tolerance and Hyperaccumulation: Costs and Trade-Offs between Traits and Environment. *Environmental and Experimental Botany*, **68**, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.10.011>
- [13] Danh, L.T., Truong, P., Mammucari, R. and Foster, N. (2014) A Critical Review of the Arsenic Uptake Mechanisms and Phytoremediation Potential of *Pteris vittata*. *International Journal of Phytoremediation*, **16**, 429-453. <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.798613>
- [14] 李双丽, 王豪吉, 王昆艳, 徐武美, 官会林. 稻壳炭对铅和镉污染的青菜种植土壤的修复效果研究[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2019, 39(6): 33-38.
- [15] 项艳, 熊鑫, 胡长江, 吴东亮. 生物炭对铜污染农田土壤重金属形态的影响[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(6): 110-112.
- [16] Wei, S., et al. (2005) A Newly-Discovered Cd-Hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. *Chinese Science Bulletin*, **50**, 33-38.
- [17] Zhang, X., Xia, H., Li, Z., Zhuang, P. and Gao, B. (2011) Identification of a New Potential Cd-Hyperaccumulator *Solanum photeinocarpum* by Soil Seed Bank-Metal Concentration Gradient Method. *Journal of Hazardous Materials*, **189**, 414-419. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.053>
- [18] 孟令阳, 辛术贞, 苏德纯. 不同惰性有机碳物料对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1531-1538.
- [19] Ben Massoud, M., Karmous, I., El Ferjani, E. and Chaoui, A. (2017) Alleviation of Copper Toxicity in Germinating Pea Seeds by IAA, GA3, Ca and Citric Acid. *Journal of Plant Interactions*, **13**, 21-29. <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1410733>
- [20] Ma, H.-Y., Zhao, D.-D., Ning, Q.-R., Wei, J.-P., Li, Y., Wang, M.-M., Liu, X.-L., Jiang, C.-J. and Liang, Z.-W. (2018) A Multi-Year Beneficial Effect of Seed Priming with Gibberellic Acid-3 (GA3) on Plant Growth and Production in a Perennial Grass, *Leymus chinensis*. *Scientific Reports*, **8**, Article No. 13214. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31471-w>
- [21] Guo, J.-M., Lei, M., Yang, J.-X., Yang, J., Wan, X.-M., Chen, T.-B., Zhou, X.-Y., Gu, S.-P. and Guo, G.-H. (2017) Effect of Fertilizers on the Cd Uptake of Two Sedum Species (*Sedum spectabile* Boreau and *Sedum aizoon* L.) as Potential Cd Accumulators. *Ecological Engineering*, **106**, 409-414. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.04.069>
- [22] Guo, J., Yang, J., Yang, J., Chen, T. and Guo, L. (2019) Subcellular Cadmium Distribution and Antioxidant Enzymatic Activities in the Leaves of Four *Hylotelephium spectabile* Populations Exhibit Differences in Phytoextraction Potential. *International Journal of Phytoremediation*, **21**, 209-216. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1524836>
- [23] 王金祥, 陈碧丽, 廖红, 严小龙. 生长素、乙烯和一氧化氮对拟南芥下胚轴插条形成不定根的调节[J]. 植物生理学通讯, 2009, 45(10): 986-990.
- [24] 陈晨, 李秉妍, 范双喜, 郝敬虹. 外源生长素和赤霉素对叶用莴苣生长的影响[J]. 北京农学院学报, 2019, 34(4): 36-39.
- [25] 朱振国, 周广苗, 谭效磊, 宋青松, 张渐隆, 温亮, 颜石, 柳浩琪, 张丽, 侯欣. 赤霉素对烟草幼苗生长发育及其生理生化特性的影响[J]. 山东农业科学, 2019, 51(4): 139-143.
- [26] 司贺龙, 刘玉卫, 张金林, 谷俊涛, 刘莉, 李明慧. 生长素和赤霉素对刺果瓜幼苗生长发育的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(27): 65-71.
- [27] 温玥. 外施赤霉素和多效唑对油茶花芽形成和果实品质的影响[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [28] 刘一凡, 李淮源, 单雪华, 雷佳, 姚强, 叶卫国, 郭维, 陈建军. 打顶涂抹生长素对烤烟上部叶内源激素和光合作用的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 47-54.
- [29] 陈晶, 庞思琪, 赵秀兰. 外源生长素对镉胁迫下玉米幼苗生长及抗氧化系统的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(8): 1191-1198.
- [30] 王迎. 赤霉素与胺鲜脂强化黑麦草修复 Cd 污染土壤[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工商大学, 2019.

- [31] 贺群. 外源吲哚乙酸对茶树响应镉胁迫的影响[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2019.
- [32] Liphadzi, M.S., Kirkham, M.B. and Paulsen, G.M. (2006) Auxin-Enhanced Root Growth for Phytoremediation of Sewage-Sludge Amended Soil. *Environmental Technology*, **27**, 695-704. <https://doi.org/10.1080/09593332708618683>
- [33] Hadi, F., Ali, N. and Ahmad, A. (2014) Enhanced Phytoremediation of Cadmium-Contaminated Soil by *Parthenium hysterophorus* Plant: Effect of Gibberellic Acid (GA3) and Synthetic Chelator, Alone and in Combinations. *Bioremediation Journal*, **18**, 46-55. <https://doi.org/10.1080/10889868.2013.834871>