

引用格式: 朱秀红, 纪爽, 杨会焕, 等. 生物炭配施氮素对 Cd 胁迫‘泡桐 1201’种子萌发的影响[J]. 西北植物学报, 2025, 45(1): 0000-0000.  
[ZHU X H, JI S, YANG H H, et al. Effects of biochar combined with nitrogen application on ‘*Paulownia* 1201’ seed germination under Cd stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2025, 45(1): 0000-0000.] DOI:10.7606/j.issn.1000-4025.20240423

# 生物炭配施氮素对 Cd 胁迫 ‘泡桐 1201’种子萌发的影响

朱秀红, 纪爽, 杨会焕, 茹广欣

(河南农业大学 林学院, 郑州 450000)

**摘要** 【目的】探究生物炭配施氮素对缓解 Cd 胁迫下‘泡桐 1201’种子萌发的生理机制, 为应用生物炭及氮素修复 Cd 污染土壤提供参考。【方法】以‘泡桐 1201’种子为试验材料, 研究在 Cd 胁迫下施加不同浓度的泡桐生物炭处理液与氮素处理液对 Cd 胁迫下种子发芽特征、抗氧化水平、渗透物质及营养水平的影响。【结果】(1) 生物炭、氮素及配施均显著提升种子的发芽势、发芽率、发芽指数及活力指数。随着处理液浓度增加, 幼芽长度、根长、鲜重及游离氨基酸含量均递增, 至 5 g/L 生物炭处理时达最大值, 而淀粉含量则呈下降趋势。(2) 单施生物炭或氮素时, GR 活性、Pro、MDA 含量显著降低, 而 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量变化不显著, 但均在 5 g/L 生物炭处理下 Pro 与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量最低。SS 与 SP 含量随处理浓度增加而上升, APX 活性则随发芽时间先升后降。(3) 生物炭与氮素配施处理下, APX 与 GR 酶活性均达到最大值, MDA 与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量显著降低, Pro 含量虽有微增但不显著。整体改良效果为生物炭配施氮素 > 生物炭 > 氮素。【结论】施加生物炭和氮素可增强泡桐种子抗氧化及渗透调节能力, 促进养分积累, 显著促进种子萌发, 尤以生物炭配施氮素处理效果最佳。

**关键词** Cd 胁迫; 生物炭; 氮素; 种子萌发; 生理生化; ‘泡桐 1201’

中图分类号 Q945; S792.43

文献标志码 A

## Effects of biochar combined with nitrogen application on ‘*Paulownia* 1201’ seed germination under Cd stress

ZHU Xiuhong, JI Shuang, YANG Huihuan, RU Guangxin

(College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract** [Objective] The study aims to investigate the physiological mechanism of biochar with nitrogen application on mitigating the germination of ‘*Paulownia* 1201’ seeds under Cd stress, and to provide a reference for the application of biochar and nitrogen for remediation of the Cd-contaminated soil. [Methods] Taking the seeds of ‘*Paulownia* 1201’ as the test material, we investigated the effects of different concentrations of the *Paulownia* biochar treatment solution with nitrogen on the germination characteristics, antioxidant levels, osmotic substances, and nutrient levels of seeds under Cd stress. [Results] (1) Biochar, nitrogen, and their combinations significantly enhanced the germination potential, germination rate, germination index, and vigor index of the seeds. As the concentration of the treatment solution

收稿日期: 2024-07-25; 修改稿收到日期: 2024-09-25

基金项目: 河南省级财政林业科技推广项目(30802824)

作者简介: 朱秀红(1966—), 女, 硕士, 教授, 主要从事林业生态研究。E-mail: zhuxiuhong001@126.com

通信作者: 茹广欣, 教授, 博士生导师, 主要从事林木遗传育种研究。E-mail: ruguangxin@126.com

increased, the length of young shoots, root length, fresh weight, and free amino acid content were increased, reaching their maximum values at 5 g/L biochar, while the starch content showed a decreasing trend. (2) When biochar or nitrogen was applied alone, the contents of GR activity, Pro, and MDA were decreased, while  $H_2O_2$  did not change significantly. The lowest contents of Pro and  $H_2O_2$  were observed at 5 g/L. SS and SP were increased with the increase in treatment concentrations. Additionally, the activity of APX was initially increased and then decreased with the germination time. (3) When biochar and nitrogen were applied together, the activities of APX and GR enzymes reached their maximum values. MDA and  $H_2O_2$  were decreased, while Pro was increased slightly. The overall improvement effect was: Biochar with nitrogen > biochar > nitrogen. [Conclusion] The application of biochar and nitrogen can enhance the antioxidant and osmoregulation ability of *Paulownia* seeds, promote the accumulation of nutrients, and significantly promote seed germination. In particular, biochar combined with nitrogen is the best treatment.

**Key words** Cd stress; biochar; nitrogen; seed germination; physiology and chemistry; ‘*Paulownia* 1201’

自 20 世纪以来,世界人口增长突飞猛进,工业、农业飞速发展,大量重工业的投入使用导致土壤中重金属含量严重超标<sup>[1]</sup>。土壤中重金属超标是目前中国面临的一个重要问题,其中大部分重金属在环境中都会发生形态变化,很难被微生物降解,对人类及其他生物的毒害通常不容易被发现,潜移默化地影响着人类的生产生活<sup>[1]</sup>。Cd 以人类活动(污水灌溉、采矿冶炼)、城市建设等方式释放到环境中,致使土壤受到 Cd 污染<sup>[2-3]</sup>。Cd 胁迫环境中,植物的生长和代谢明显受到抑制<sup>[4-6]</sup>。Cd 是人体非必需元素,当自然界遭到 Cd 污染后,植物体富集大量 Cd 以食物链的途径进入人体,危害人类健康<sup>[7]</sup>。因此,重金属污染土壤的修复问题亟需解决。目前很多国家在以植物富集为基础的土壤修复技术方面均有研究,通过修剪或移除植物的方式作为土壤重金属污染治理的一个辅助手段,达到修复土壤的目的。修复污染土壤,确保其安全使用,是保证国家食品与健康安全的关键。植物修复技术具有经济、环保等优点,具有广阔的应用前景<sup>[8]</sup>。一般情况下,植物修复重金属主要考虑植物根系发育和生物量的积累,以及植物对重金属的抵抗能力。根系发达、生物量丰富且在恶劣土壤环境中快速生长的木本植物已成为超富集植物的替代品<sup>[9]</sup>。泡桐作为一种优质树种,具有生物量大、材质优良、速生、繁育便捷、丰产等优点,可作为植物修复重金属污染土地的优良候选树种。泡桐作为木本植物,在增加森林覆盖率及环境保护等方面具有重要作用,对重金属表现出较强的耐受性。然而,土壤中重金属浓度过高导致含水量和营养物质含量降低,抑制了植株的生长<sup>[10]</sup>。为促进恶劣土壤环境下植物的生长,由农林废弃物等富含生物质的原料制备的生物炭作为一种新型低成本的土壤重金属改良剂受到广泛关注<sup>[11]</sup>。生物炭是一种

有效的土壤重金属固定改良剂,可操作性高,可以通过提高土壤营养水平来增加植物生物量<sup>[12-14]</sup>。此外,在污染土壤中,施氮能够改善土壤中 Cd 的生物有效性,维持土壤酸碱平衡,极大地降低了 Cd 的溶解度和流动性<sup>[11,15]</sup>。生物炭配施氮素可以改善作物早期根系形态结构,增加根系活力,延缓上行速率,提高根系内生长素等的合成,提高养分的吸收转运能力,保障植株的旺盛代谢,达到有效利用养分和提高产量的目的<sup>[16]</sup>。因此,推测生物炭配施氮素基肥是改善土壤理化性状的可行途径,其广泛应用符合中国绿色可持续发展的主题。鉴于此,文章以‘泡桐 1201’为对象,研究施加生物炭及氮素对 Cd 胁迫下泡桐种子萌发的影响,进而探讨生物炭配施氮素在植株抵御重金属 Cd 时的作用机制,为合理利用生物炭及氮素修复 Cd 污染土壤提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试材料来自河南农业大学科教园区当年结实的‘泡桐 1201’种子;生物炭选用 550 °C 高温条件下缺氧裂解而成的泡桐叶生物炭;CdCl<sub>2</sub>、NH<sub>4</sub>Cl 为分析纯,购于国药公司。

### 1.2 种子发芽试验设计

试验在河南农业大学林学院实验室进行。根据前期泡桐 Cd 胁迫试验结果<sup>[17-18]</sup>,当 CdCl<sub>2</sub> 浓度大于 30 mg/L 时泡桐将难以存活,因此选取 30 mg/L 的 CdCl<sub>2</sub> 作为 Cd 胁迫处理。挑选籽粒饱满、大小一致的‘泡桐 1201’种子,在 1% NaClO 溶液中消毒 30 s,用去离子水冲洗 4~5 次,将冲洗干净的种子放在吸水纸上控干水分,放入培养皿内(每皿 50 粒),培养皿底部铺垫含 30 mg/L 的 CdCl<sub>2</sub> 处理溶液充分浸湿的滤纸。向培养皿中分别加入不同浓度

的处理液(5 mL 生物炭浸提液、5 mL  $\text{NH}_4\text{Cl}$  溶液、2.5 mL 生物炭浸提液+2.5 mL  $\text{NH}_4\text{Cl}$  溶液),采用正交实验方法进行培养。每 3 d 更换 1 次处理液,设置 9 个处理,如表 1 所示,每个处理 6 次重复。培养室的光强 10 000 lx,空气湿度为 70%~80%,光照周期为 8 h 黑暗/16 h 光照,昼夜温度为 23 °C/18 °C。培养期间,根据培养皿中水分消耗情况每天定时定量补充相应的处理液保持湿润,当芽长超过种子长度的 1/2 时,即认为种子萌发,统计种子的萌发数,连续 3 d 萌发数量不再增加,视为萌发结束,并测定种子各项指标。

生物炭浸提液制备:550 °C 高温条件下缺氧裂解而成的泡桐叶生物炭过 100 目筛,称取 3 g 和 5 g 分别加入 1 L 去离子水中,摇匀,200 r/min 室温振荡 24 h,再经抽滤滤除残渣,加入 1 mol/L HCl 溶液调试滤液 pH 至 6.0,得到生物炭浸提液。

表 1 试验处理

Table 1 Experimental treatments

处理 Treatment	生物炭/(g/L) Biochar	$\text{NH}_4\text{Cl}$ / (mmol/L)	$\text{CdCl}_2$ / (mg/L)
CK	0	0	30
A1	0	5	30
A2	0	10	30
A3	3	0	30
A4	5	0	30
A5	3	5	30
A6	5	5	30
A7	3	10	30
A8	5	10	30

### 1.3 测试指标与方法

#### 1.3.1 泡桐种子萌发测定

以芽长超过种子长度的 1/2 为准,即认为种子萌发,统计种子的萌发数,连续 3 d 萌发数量不再增加,视为萌发结束,第 10 天统计发芽势,第 20 天统计发芽率。发芽率=最终发芽数量/供试种子总数×100%;发芽势=10 d 发芽数量/供试种子总数×100%。

发芽指数:

$$I_g = \sum(G_t/D_t) \quad (1)$$

活力指数:

$$I_v = S \times \sum(G_t/D_t) \quad (2)$$

式中: $I_g$  为发芽指数; $I_v$  为活力指数; $G_t$  为第  $t$  天的发芽数; $D_t$  为对应的发芽时间(d); $S$  为幼芽平均长度(cm)。

#### 1.3.2 泡桐种子形态测定

种子萌发第 20 天,每个处理随机选取 6 株幼芽,吸水纸吸干表面水分,分别测定种子的芽长、根长及鲜重。

#### 1.3.3 泡桐种子抗氧化酶活性、渗透调节物质及营养物质测定

在种子萌发第 6,13,20 天分别测定种子的各项生理生化指标。谷胱甘肽还原酶(GR)活性的测定采用 NADPH 显色法<sup>[19]</sup>;抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性的测定采用抗坏血酸(AsA)还原法<sup>[19]</sup>。用硫代巴比妥酸法<sup>[20]</sup>测定丙二醛(MDA)含量;参照林植芳等<sup>[21]</sup>的方法测定过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )含量;用酸性茚三酮法<sup>[22]</sup>测定脯氨酸(Pro)含量;用考马斯亮蓝法<sup>[23]</sup>测定可溶性蛋白(SP)含量;用蒽酮比色法<sup>[24]</sup>测定可溶性糖(SS)、淀粉含量;用茚三酮比色法<sup>[22]</sup>测定游离氨基酸含量。

#### 1.4 数据统计与分析

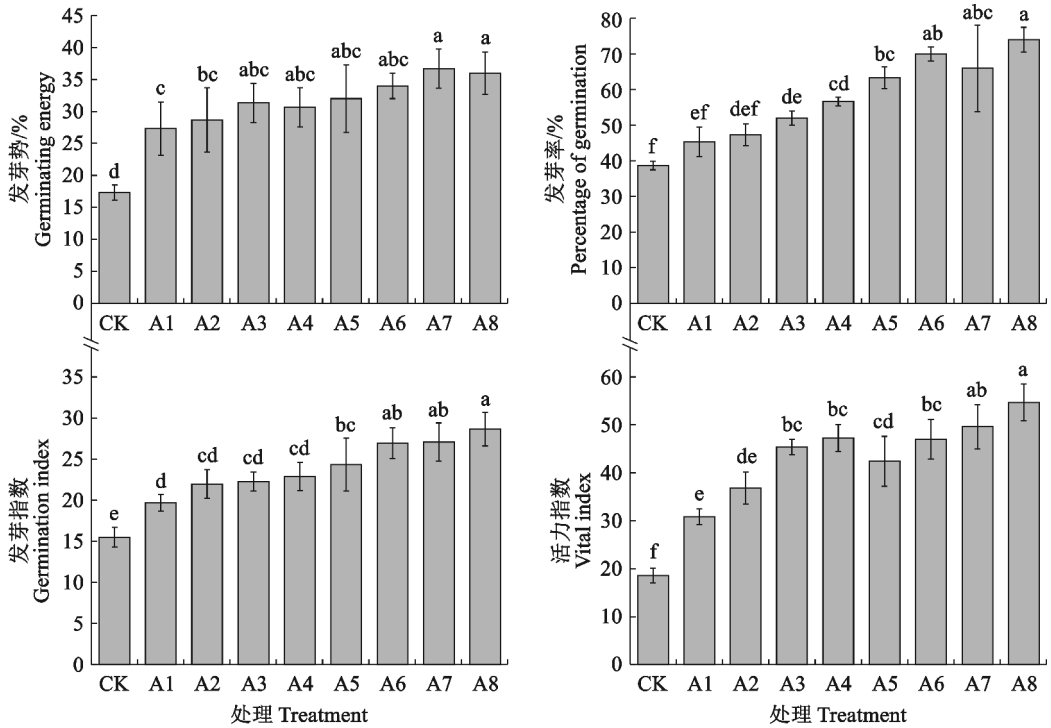
用 Excel 2019 软件对原始数据进行处理计算;用 SPSS 25.0 软件进行方差分析(ANOVA),LSD 法对数据进行多重比较;用 Origin 2021 绘图,图表中结果均以平均值±标准差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 泡桐种子萌发

如图 1 所示,Cd 胁迫下,施加生物炭和氮素均能促进种子的萌发,种子的发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数均有所提高,所有处理中,各指标的变化因施加浓度的不同而各异。与 CK 相比,单一施加氮素,在 A1 处理下,发芽势、发芽指数和活力指数均有显著提高,分别较 CK 增加 57.70%、27.10%、66.10%。单一施加生物炭,除发芽率在 A3、A4 处理下缓慢上升外,其他 3 项指标基本处于同一水平,但整体水平高于 CK。

相较于 CK 不同配比的生物炭与氮素配施条件下 A7、A8,种子各项指标均显著提高( $P < 0.05$ )。除 A7 处理下种子的发芽率略有降低外,其他处理的发芽率、发芽指数和活力指数都有所提高。种子的发芽率、发芽指数、活力指数在 A8 处理时达到最大值,分别比 CK 增加 91.36%、84.85%、194.33%,发芽势在 A7 处理达下最大值,较 CK 增加 111.60%,这可能是由于种子萌发初期对外界环境较为敏感,对外源物需要一定的时间适应。由此可见,生物炭和氮素处理单一和配施处理均可促进种子的萌发,配施处理效果更为显著。



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

图1 不同处理对Cd胁迫下‘泡桐1201’种子萌发的影响

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ( $P < 0.05$ ). The same as below.

Fig. 1 Effects of different treatments on seed germination of 'Paulownia 1201' under Cd stress

## 2.2 泡桐种子形态

如表2所示,氮素和生物炭单一处理或两者配施均能显著增加种子的各项生长指标 ( $P < 0.05$ )。氮素及生物炭单一处理下,幼芽长度、根长、鲜重均随浓度的增加而增大,在A4处理下达最大值,分别较CK增加190.91%、45.00%、61.63%。

表2 不同处理对Cd胁迫下‘泡桐1201’种子形态的影响

Table 2 Effects of different treatments on seed morphology of 'Paulownia 1201' under Cd stress

处理 Treatment	幼芽长度/cm Acrospire length	根长/cm Root length	鲜重/g Fresh weight
CK	0.22±0.02d	1.20±0.02f	1.72±0.07de
A1	0.43±0.03bc	1.57±0.02e	1.93±0.07d
A2	0.43±0.03bc	1.67±0.15d	1.98±0.02d
A3	0.57±0.09b	1.74±0.03c	2.29±0.01cd
A4	0.64±0.05b	1.74±0.05c	2.78±0.03bc
A5	0.72±0.05ab	2.04±0.03a	3.54±0.03a
A6	0.73±0.08ab	2.07±0.14a	3.62±0.14a
A7	0.79±0.07a	1.83±0.11b	3.17±0.16ab
A8	0.81±0.07a	1.91±0.10b	3.32±0.12ab

注:不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ( $P < 0.05$ ). The same as below.

两者交互处理,生物炭施加量一致的情况下,随氮素浓度增大,A5、A6处理下各生长指标随之增大;氮素施加量一致的情况下,幼芽长度随生物炭浓度增加而增大,在A8处理下达最大值,比CK增加268.18%,根长、鲜重则在A6处理下达最大值,分别比CK增加72.50%、110.47%。就整体而言,两者配施处理对种子生长的促进效果优于单一处理。

## 2.3 泡桐种子抗氧化系统

如图2所示,生物炭与氮素单一处理下,种子谷胱甘肽还原酶(GR)活性显著降低 ( $P < 0.05$ ),随着浓度增大,GR活性缓慢升高,在A4处理下达最大值,但整体水平仍低于CK,各萌发时期分别比CK降低17.64%、22.30%、1.67%。抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性随发芽时间增加呈先上升后下降的趋势,随处理浓度增大,APX活性随之增大,在第13天时,在A4处理下达最大值,较CK增加26.58%。生物炭与氮素配施,同一水平氮素不同水平生物炭处理下,种子的APX活性升高幅度较小,各阶段的APX活性均在A8处最高,分别比CK增加170.37%、56.21%、75.42%,GR活性随生物炭浓度增大缓慢升高;同一水平生物炭处理,GR活性随氮素浓度增大而显著升高,各萌发时期在A8处理



下均达最大值,分别比 CK 增加 33.52%、19.27%、21.50%。以上说明生物炭与氮素配施能有效提高 GR、APX 活性,缓解 Cd 胁迫,促进种子萌发。

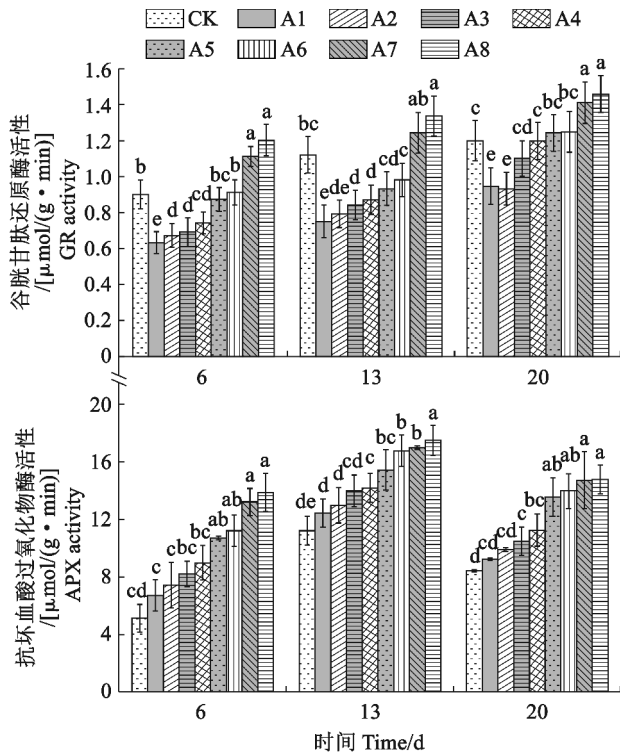


图2 不同处理对 Cd 胁迫下‘泡桐 1201’种子抗氧化系统的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on antioxidant system of ‘*Paulownia 1201*’ seeds under Cd stress

## 2.4 泡桐种子渗透调节物质

如图 3 所示,施加生物炭和氮素能够减少泡桐种子过氧化氢( $H_2O_2$ )含量和丙二醛(MDA)含量。在整个萌发阶段,种子的脯氨酸(Pro)、MDA 含量变化差异显著( $P < 0.05$ ), $H_2O_2$  含量整体先升高后降低,在第 13 天时达最大水平。氮素与生物炭单一处理下,随生物炭或氮素浓度增大,Pro、MDA 含量在各萌发时期均显著下降,在 A4 处理下最小,Pro 含量分别比 CK 减小 42.12%、141.96%、49.56%,MDA 含量在各阶段分别比 CK 减小 28.77%、40.97%、42.83%。 $H_2O_2$  含量下降不显著,但单一施加生物炭整体水平小于单一施加氮素,各萌发阶段均在 A4 处理下最小,分别比 CK 降低 48.24%、70.46%、38.23%。在生物炭与氮素配施处理下,MDA、 $H_2O_2$  含量与 CK 相比显著降低,Pro 含量虽有升高,但各处理间差异不显著。种子在萌发第 6 天时,MDA 含量在 A7 处理下最低,较 CK 减小 60.85%;在第 13 天时,MDA 在 A6 处理时最低,较 CK 减小

66.96%;在第 20 天时,MDA 在 A8 处理时最低,较 CK 减小 74.78%。 $H_2O_2$  水平最低,较 CK 减小 67.93%。各萌发阶段中 Pro 含量在 A8 处理下均为最大,但整体水平仍低于 CK,分别比 CK 降低 7.07%、23.55%、22.50%。说明生物炭与氮素配施能更有效地增加种子体内 Pro 的积累,显著降低种子体内 MDA、 $H_2O_2$  含量,进而促进植物体内渗透调节功能,缓解种子在萌发过程中对 Cd 的应激反应。

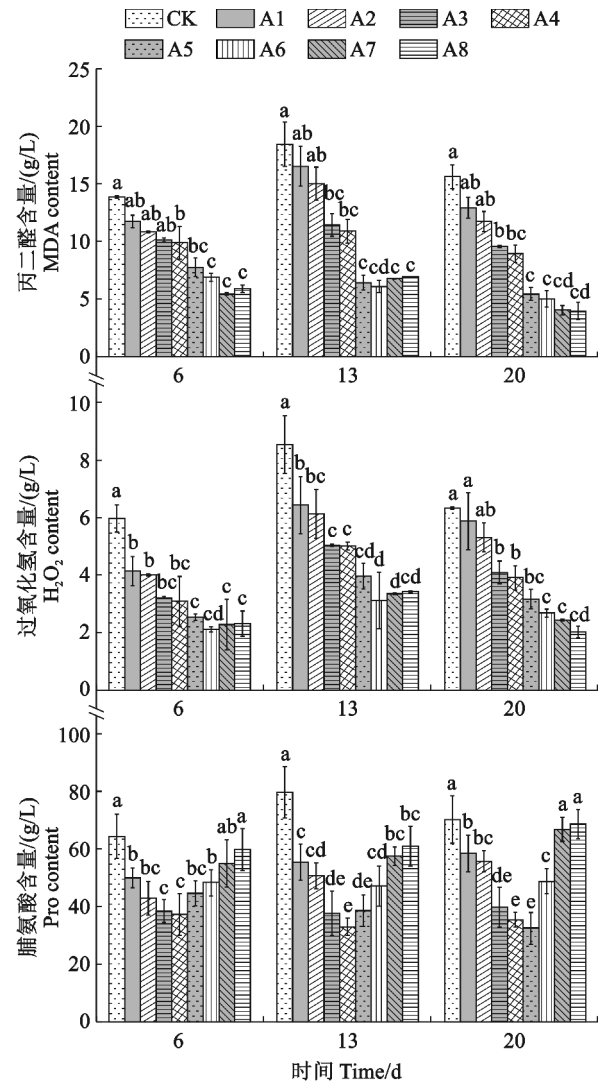


图3 不同处理对 Cd 胁迫下‘泡桐 1201’渗透调节物质的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on osmoregulatory substances of ‘*Paulownia 1201*’ under Cd stress

## 2.5 泡桐种子营养物质

如图 4 所示,单一施加生物炭或氮素,随浓度增加,种子可溶性糖(SS)含量、可溶性蛋白(SP)含量增大,各时期均在 A4 处理下最大,SS 含量分别比

CK 增加 34.96%、30.90%、56.84%，SP 含量分别比 CK 增加 63.12%、31.73%、22.17%。生物炭与氮素配施，在种子萌发第 6 天，SP 含量在 A7 处理下最大，较 CK 增加 146.84%，SS 含量变化不显著；种子萌发第 13 天，SS 含量在 A8 处理下最大，比 CK 增加 106.69%，SP 在 A6 处理最大，较 CK 增加 83.78%；第 20 天时，SS 在 A6 处理下最大，比 CK 增加 137.86%。SP 在 A8 处理下最大，较 CK 增加 55.15%。说明生物炭和氮素单施或者配施都能通过增加 SS、SP 含量调节胞内渗透势，促进种子萌发。

如图 4 所示，单施生物炭及氮素，游离氨基酸含量随浓度增大略有提高，均在 A4 处理下最大，分别比 CK 增加 30.70%、50.24%、38.54%。萌发第 20

天淀粉含量随浓度增加先上升后下降外，其余时期淀粉含量均随着浓度的增大而减少，在 A4 处理最小，分别比 CK 降低 30.00%、21.46%、23.15%。生物炭与氮素配施，种子在萌发第 6 天和第 13 天，同水平生物炭处理，随氮素处理浓度增大，游离氨基酸含量也显著增大，分别在 A8 处理下达最大值，较 CK 增加 70.74%、85.24%；萌发第 20 天，游离氨基酸含量随氮素浓度的增大略有下降，在 A6 处理下达最大值，较 CK 增加 76.47%。随浓度升高，各处理下淀粉含量均有所下降，各时期淀粉含量均在 A8 处理下最小，分别比 CK 下降 57.92%、42.22%、35.43%。说明施加生物炭和氮素能促进种子内游离氨基酸的积累，促进淀粉水解速率，进而影响种子萌发。

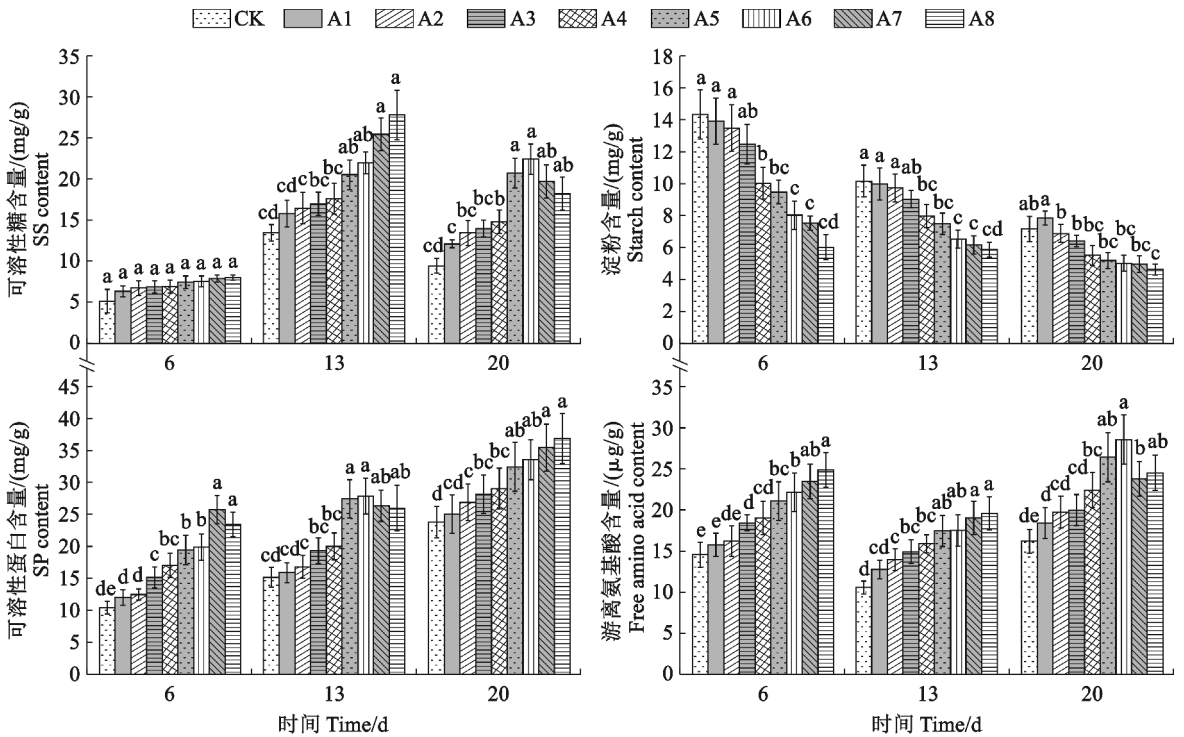


图 4 不同处理对 Cd 胁迫下‘泡桐 1201’营养物质的影响

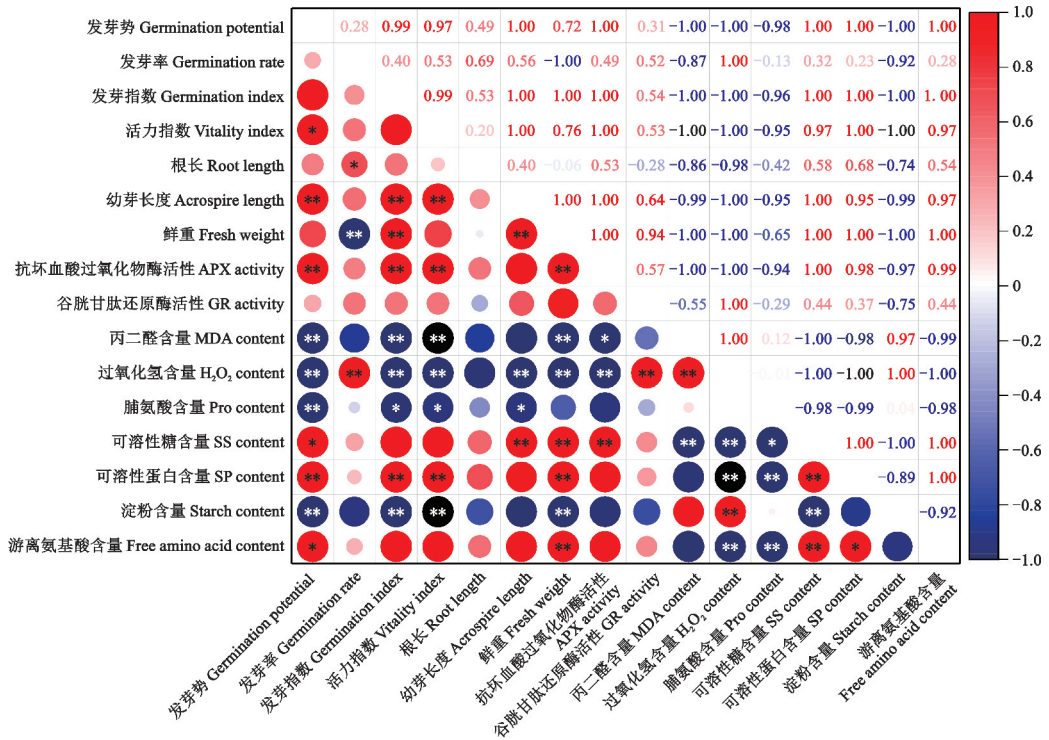
Fig. 4 Effects of different treatments on nutrients of ‘*Paulownia 1201*’ under Cd stress

## 2.6 生长指标相关性分析

为进一步探究氮素及生物炭对缓解 Cd 胁迫下泡桐种子萌发的影响，分析了种子的生长、萌发、抗氧化酶、营养物质等指标的相关性。如图 5 所示，泡桐种子的 SP 含量与发芽势、发芽指数、活力指数、鲜重、SS 含量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )，APX 活性与发芽势、发芽指数、活力指数、鲜重呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )；发芽势与活力指数、SS 含量、游离氨基酸含量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量

与发芽势、发芽指数、活力指数、幼芽长度、鲜重、APX 活性呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )，MDA 含量与发芽势、发芽指数、鲜重呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )；Pro 含量与发芽指数、活力指数、幼芽长度呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )；而 Pro 含量与淀粉、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量没有显著相关性。

以上结果说明施加生物炭及氮素对 Cd 胁迫下泡桐种子萌发的影响是多方面的，种子的萌发指标间存在相关性关系。



图中蓝色代表显著负相关,红色代表显著正相关。\*表示  $P < 0.05$ ; \*\*表示  $P < 0.01$ 。

图5 不同处理下‘泡桐 1201’种子生理指标间相关性分析

Blue represents a significant negative correlation and red represents a significant positive correlation.

\* indicates  $P < 0.05$ , \*\* indicates  $P < 0.01$ .

Fig. 5 Correlation analysis of physiological indexes of ‘Paulownia 1201’ seeds under different treatments

### 3 讨论

种子萌发是植物生长发育的起始阶段,也是衡量植物抗逆境能力强弱的关键时期。种子的萌发进程直接影响幼苗的生长发育,进而影响其产量<sup>[25]</sup>。本试验中,Cd胁迫下,泡桐的种子萌发受到抑制。原因可能是Cd浓度过高使培养液渗透势升高,植物细胞吸水困难导致种子因缺水进入强迫性休眠状态,具体表现为种子发芽速度变慢,各指标降低。本研究表明,添加不同浓度的氮素及生物炭浸提液,可有效缓解Cd对种子萌发的抑制,种子的各项萌发指标均显著升高。Cd胁迫下,泡桐种子的发芽率为38.67%,添加生物炭及氮素后,种子发芽率最高可达56.67%,推测可能是2种外源物可通过提高种子内部水解酶活性,催化贮藏物质的分解,影响生理代谢进程,促进泡桐种子萌发。不同浓度生物炭浸提液处理萌发时期辣椒种子可以使其提前进入种子萌发高峰期<sup>[26]</sup>。施加外源氮能够缓解Cd胁迫对山杨幼苗的毒害,其叶长、叶宽和茎粗较单独Cd处理显著增加<sup>[27]</sup>。适当浓度的氮肥可以提高萝卜种子的发芽势,减弱Cd胁迫对萝卜种子的毒害<sup>[28]</sup>。以

上结果均与本文研究结果一致。此外,本试验中不同处理对种子萌发的影响不同,当2种外源物交互处理时,促进种子发芽的效果最佳,种子发芽率最高达74.00%,远超过单一处理。说明生物炭浸提液与氮素有一定的协同作用,两者同时施用时可更好地缓解Cd毒害,促进泡桐种子的萌发。可能是因为生物炭在促进种子萌发的同时也借助自身孔隙度高、表面积高以及离子交换能力强等特点,在土壤中可通过离子交换形式将 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 吸收在孔隙中,在种子萌发过程中缓慢释放,从而增加氮吸收<sup>[29-30]</sup>。

过量的ROS会使植物受到氧化胁迫而引起酶失活、膜脂过氧化和核酸突变等不可逆的氧化损伤,抗氧化酶APX、GR可有效清除过量的ROS,减少对种子的伤害,从而延缓种子衰老<sup>[25,31]</sup>。本研究中,随着萌发时间延长,种子APX活性先升高后降低,GR活性呈上升趋势;在种子萌发的各个时期,不同浓度生物炭或氮素引发下,种子的APX、GR表现出不同的变化趋势,APX活性先逐渐上升,之后逐渐下降趋势,GR活性整体水平均在上升,说明随着萌发时间延长,APX和GR 2种酶相互协作阻止活性氧的积累。施加生物炭及氮素能够在种子萌发



的各个时期增强其抗氧化能力,减轻细胞膜氧化损伤,缓解 Cd 胁迫,这与外源物质提高燕麦<sup>[31]</sup>、光皮桦<sup>[32]</sup>、黄芩<sup>[33]</sup> 抗氧化能力结论一致。生物炭与氮素配施能够增强植物抗氧化能力。赵雨馨<sup>[34]</sup> 研究表明,氮沉降和生物炭处理能够显著增强香榧抗氧化酶活性,提高氮素利用率,促进香榧果实的生长。本试验中生物炭与氮素配施,种子的 APX、GR 活性均表现出增大趋势,整体水平高于单一处理。这可能是生物炭和氮素可以共同调控相关酶活性,诱导泡桐种子胞内防御体系的应答,及时对过量的氧自由基进行清除,从而抵抗逆境,促进种子萌发。

植物在胁迫条件下会产生大量的渗透调节物质。一般来说,植株的渗透调节物质增多,从而减少细胞内的渗透势,提高水分吸收率,对维持细胞的生长和保护酶的活性有很大作用<sup>[35]</sup>。在本研究中,在种子萌发的各个时期,施加生物炭及氮素能有效降低种子 MDA、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量。说明种子在萌发过程中,外源物的施加能促进植物体内大量合成积累 Pro,维持 Cd 胁迫下的渗透压平衡,促进泡桐种子对水分的吸收。类似结果在前人研究中也有报道,如周翠香等<sup>[36]</sup> 研究发现外施生物炭可以通过提高碱蓬体内 Pro 含量,提高植株对逆境的适应性。姬海月等<sup>[37]</sup> 研究发现外源芸苔素可以通过调节 Pb 胁迫下远志种子抗氧化酶活性降低 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 MDA 含量,减少活性氧等有害物质的积累,缓解种子在 Pb 胁迫下出现的膜损伤。吕芳等<sup>[38]</sup> 研究表明,一定的氮素水平能够降低海黍子体内 MDA 含量,改善渗透调节能力。此外,在本研究中,单施生物炭或氮素种子内 Pro 含量随浓度增大而减小,当两者配施下 Pro 含量有所增加。说明生物炭与氮素配施效果更为显著,这可能与两者协同参与调控 Pro 生物合成途径,修复种子生理机能有关<sup>[25]</sup>。

植物体在逆境胁迫下通常通过调节可溶性蛋白、淀粉、游离氨基酸等营养物质的合成和积累满足其代谢能力,以抵御逆境造成的伤害。大量研究表明,施加生物炭或氮素能有效提高植物营养物质含量。周洪印等<sup>[39]</sup> 研究表明,施加生物炭可以提升 Cd 胁迫下生菜植株可溶性蛋白及可溶性糖的含量,进而提高生菜品质。戴馨等<sup>[40]</sup> 研究发现,生物炭和氮素共同调控使玉米体内可溶性蛋白提高 30.3%。任晓雪等<sup>[41]</sup> 研究表明,添加 2% 的生物炭可以提高甘蓝的可溶性蛋白、可溶性糖、游离氨基酸含量,从而促进其生长发育。在本研究中,种子萌发的各个时期,无论是单施生物炭或氮素还是两者配施,泡桐

种子的可溶性糖、可溶性蛋白以及游离氨基酸含量均有所提高,这与上述学者研究结果类似。但许樊蓉等<sup>[42]</sup> 发现施加生物炭对娜塔栎容器苗可溶性蛋白含量的影响不显著,这可能是与材料不同或处理时间不同有关。此外,本研究中各个处理下种子体内淀粉含量下降,与曾红丽等<sup>[43]</sup> 认为减氮配施生物炭使稻米淀粉含量显著降低的结果一致,但沈谦等<sup>[44]</sup> 研究发现,施氮提高了逆境下桑树的淀粉含量,可能是不同物种之间对氮肥和生物炭的响应存在差异。说明施用生物炭和施用氮肥可以提高 Cd 胁迫下籽粒中可溶性糖、可溶性蛋白、游离氨基酸和淀粉等养分的合成和积累,为其代谢提供足够的基质。

## 4 结 论

以‘泡桐 1201’种子为原材料,探究施加生物炭和氮素对 Cd 胁迫下泡桐种子萌发生理机制的响应,并对种子萌发生理生化指标进行测定分析,结果表明:

(1) Cd 胁迫下,施加生物炭与氮素能促进种子的萌发,提高幼芽的长度、根长及鲜重。

(2) 单施与配施均能促进种子营养物质(SS、SP、游离氨基酸含量)的积累,各萌发时期种子 APX、GR 活性随生物炭和氮素浓度升高而升高,显著增强泡桐种子内的抗氧化酶活性,降低 MDA 含量,清除过量的活性氧自由基以缓解质膜损伤,降低细胞内渗透势,保护生物膜免受损坏。

(3) 生物炭与氮素配施,抗氧化系统的 2 种酶(APX、DR)活性整体水平最高,可通过调控 MDA、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、Pro 含量调节种子内部渗透平衡,进而促进种子萌发。

(4) 综合相关性分析,APX 活性、SP 含量与发芽势、发芽指数、活力指数、鲜重呈极显著正相关,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、MDA 含量与发芽势、发芽指数、鲜重呈极显著负相关,Pro 含量与淀粉、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量无显著相关性。大多数指标之间都存在极显著或显著相关关系,生物炭、氮素单一处理与生物炭配施氮素处理对 Cd 胁迫下泡桐种子萌发的影响为生物炭配施氮素 > 生物炭 > 氮素。

研究揭示了‘泡桐 1201’种子萌发过程中应对 Cd 胁迫的生理机制,特别聚焦于生物炭与氮素调控如何有效缓解 Cd 对‘泡桐 1201’种子的毒性影响,揭示了施加生物炭和氮素在改善种子萌发条件、增强‘泡桐 1201’对重金属耐受性方面的具体作用路径,为‘泡桐 1201’在重金属污染土壤修复方面提供了理论依据。



## 参考文献:

- [1] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692.  
CHEN N C, ZHENG Y J, HE X F, *et al.* Analysis of the Report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [2] BASHIR S, ZHU J, FU Q L, *et al.* Cadmium mobility, uptake and anti-oxidative response of water spinach (*Ipomoea aquatic*) under rice straw biochar, zeolite and rock phosphate as amendments[J]. *Chemosphere*, 2018, 194: 579-587.
- [3] NIU L L, YANG F X, XU C, *et al.* Status of metal accumulation in farmland soils across China: From distribution to risk assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 176: 55-62.
- [4] 贾茵, 刘才磊, 兰晓悦, 等. 镉胁迫对小报春幼苗生长及生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(3): 454-462.  
JIA Y, LIU C L, LAN X Y, *et al.* Effect of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of *Primula forbesii* seedlings [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(3): 454-462.
- [5] 尹国丽, 师尚礼, 寇江涛, 等. Cd 胁迫对紫花苜蓿种子发芽及幼苗生理生化特性的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(8): 1638-1644.  
YIN G L, SHI S L, KOU J T, *et al.* Seed germination and physiological and biochemical characteristics of alfalfa under cadmium stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(8): 1638-1644.
- [6] 查应琴, 潘凤, 关津. 镉胁迫对鸡冠花种子萌发及幼苗生理生化特性的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(11): 1900-1908.  
ZHA Y Q, PAN F, GUAN P. Seed germination and seedling physiological and biochemical characteristics of *Celosia cristata* L. under cadmium stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(11): 1900-1908.
- [7] 董斯琳. H<sub>2</sub>S 对镉胁迫下紫花苜蓿伤害的缓解效应及功能分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- [8] ALI H, KHAN E, SAJAD M A. Phytoremediation of heavy metals: Concepts and applications[J]. *Chemosphere*, 2013, 91(7): 869-881.
- [9] BORIŠEV M, PAJEVIĆ S, NIKOLIĆ N, *et al.* Mine site restoration using silvicultural approach[M]//Bio-geotechnologies for mine site rehabilitation. Amsterdam: Elsevier, 2018: 115-130.
- [10] GÜLERYÜ Z G, KRMZ S, ARSLAN H, *et al.* The effects of heavy metals on the seed germination and seedling growth of two endemic verbascum species[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2016, 25(4): 1134-1142.
- [11] 柴冠群, 张秀锦, 张容慧, 等. 生物炭与不同形态氮肥配施对辣椒产量、品质及镉吸收的影响[J]. 园艺学报, 2023, 50(3): 549-558.  
CHAI G Q, ZHANG X J, ZHANG R H, *et al.* Effects of simultaneous biochar and nitrogen fertilizer application on the yield, quality and Cd uptake of pepper[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2023, 50(3): 549-558.
- [12] CUI H B, BAO B L, CAO Y, *et al.* Combined application of ferrihydrite and hydroxyapatite to immobilize soil copper, cadmium, and phosphate under flooding-drainage alternations [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 292: 118323.
- [13] JIANG Y, ZHOU H, GU J F, *et al.* Combined amendment improves soil health and brown rice quality in paddy soils moderately and highly co-contaminated with Cd and As[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 295: 118590.
- [14] PALANSOORIYA K N, SHAHEEN S M, CHEN S S, *et al.* Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review[J]. *Environment International*, 2020, 134: 105046.
- [15] EGENE C E, VAN POUCKE R, OK Y S, *et al.* Impact of organic amendments (biochar, compost and peat) on Cd and Zn mobility and solubility in contaminated soil of the Campine region after three years[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 195-202.
- [16] VIGER M, HANCOCK R D, MIGLIETTA F, *et al.* More plant growth but less plant defence: First global gene expression data for plants grown in soil amended with biochar[J]. *GCB Bioenergy*, 2015, 7(4): 658-672.
- [17] 朱秀红, 张记钟, 李哲静, 等. 铅镉胁迫下‘泡桐 1201’幼苗的生理机制响应[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(20): 82-91.  
ZHU X H, ZHANG J Z, LI Z J, *et al.* The physiological response of ‘*Paulownia fortunei* 1201’ seedlings under plumbum and cadmium stress[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(20): 82-91.
- [18] 朱秀红, 李哲静, 张记钟, 等. 泡桐‘毛白 33 号’对镉的吸收及其亚细胞分布研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(7): 77-82.  
ZHU X H, LI Z J, ZHANG J Z, *et al.* Uptake and subcellular distribution of cadmium in ‘*Paulownia tomentosa* × *P. fortunei* 33’ [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(7): 77-82.
- [19] ZHANG Z Y, LIU H H, SUN C, *et al.* A C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> zinc-finger protein OsZFP213 interacts with OsMAPK3 to enhance salt tolerance in rice[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 229: 100-110.
- [20] 张嘉雯, 卢绍浩, 赵喆, 等. 外源褪黑素对低温胁迫下烟草幼苗生理指标的影响[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(9): 78-86.  
ZHANG J W, LU S H, ZHAO Z, *et al.* Influences of exog-

- enous melatonin on physiological properties of tobacco seedlings under low temperature stress[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(9): 78-86.
- [21] 林植芳, 刘楠. 活性氧调控植物生长发育的研究进展[J]. *植物学报*, 2012, 47(1): 74-86.
- LIN Z F, LIU N. Research progress in the control and regulation of plant growth and development by reactive oxygen species[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2012, 47(1): 74-86.
- [22] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [23] DEAN GOLDRING J P. Measuring protein concentration with absorbance, Lowry, Bradford coomassie blue, or the Smith bicinchoninic acid assay before electrophoresis [J]. *Methods in Molecular Biology*, 2019, 1855: 31-39.
- [24] WANG H B, GONG M, XIN H, *et al.* Effects of chilling stress on the accumulation of soluble sugars and their key enzymes in *Jatropha curcas* seedlings[J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2018, 24(5): 857-865.
- [25] 马小兰, 周华坤, 张正芳, 等. 外源 IAA 对干旱胁迫下红豆草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(3): 796-803.
- MA X L, ZHOU H K, ZHANG Z F, *et al.* The effects of exogenous IAA on seed germination and seedling growth of *Onobrychis viciifolia* Scop. under the drought stress[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(3): 796-803.
- [26] 李莹, 刘兰英, 何肖云, 等. 不同来源生物炭浸提液对辣椒种子萌发与幼苗生长的毒理效应[J]. *福建农业科技*, 2022, 53(6): 25-32.
- LI Y, LIU L Y, HE X Y, *et al.* Toxicological effects of biochar extract solutions from different sources on seed germination and seedling growth of pepper[J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2022, 53(6): 25-32.
- [27] 邓小红, 姬拉拉, 王健健. 施氮对镉胁迫下山杨幼苗叶片氮磷钾吸收及镉积累量的影响[J]. *西北植物学报*, 2020, 40(11): 1932-1939.
- DENG X H, JI L L, WANG J J. Effect of nitrogen supplement on N, P, K uptake and Cd accumulation in leaves of *Populus davidiana* under cadmium stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(11): 1932-1939.
- [28] 雷阳, 刘钊, 王生武, 等. 外源 NO 对镉胁迫下萝卜种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. *山西农业科学*, 2020, 48(11): 1746-1750.
- LEI Y, LIU Z, WANG S W, *et al.* Effects of exogenous NO on seed germination and seedling physiological characteristics of radish under cadmium stress[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2020, 48(11): 1746-1750.
- [29] 李海珀, 水清明, 贾莉. 氮肥减量配施生物炭对玉米根系生理及氮素去向的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(21): 102-109.
- LI H P, SHUI Q M, JIA L. Effects of nitrogen fertilizer reduction combined with biochar on maize root physiology and nitrogen whereabouts[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(21): 102-109.
- [30] PRENDERGAST-MILLER M T, DUVALL M, SOHI S P. Localisation of nitrate in the rhizosphere of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(11): 2243-2246.
- [31] 王勃, 夏方山, 董秋丽, 等. 外源油菜素内酯引发对劣变燕麦种子抗氧化特性的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(5): 1461-1468.
- WANG B, XIA F S, DONG Q L, *et al.* Effect of exogenous brassinosteroids priming on antioxidant characteristics of deteriorated oat seeds[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(5): 1461-1468.
- [32] 韦虹日, 苗艺明, 刘世男, 等. 外源激素对光皮桦种子萌发中抗氧化酶活性的影响[J]. *陕西林业科技*, 2022, 50(4): 1-5.
- WEI H R, MIAO Y M, LIU S N, *et al.* Effects of exogenous hormones on antioxidant enzyme activities during seed germination of *Betula luminifera* [J]. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2022, 50(4): 1-5.
- [33] 王伟杰, 管仁伟, 路俊仙, 等. GA<sub>3</sub> 浸种对盐胁迫下黄芩种子萌发抗氧化酶及内源激素的影响[J]. *中药材*, 2022, 45(2): 288-292.
- WANG W J, GUAN R W, LU J X, *et al.* Effects of soaking seeds with GA<sub>3</sub> on antioxidant enzymes and endogenous hormones in *Scutellaria baicalensis* Georgi seed germination under salt stress[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2022, 45(2): 288-292.
- [34] 赵雨馨. 氮沉降与生物炭对香榧生长和种子品质的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- [35] 王丽, 蔡景行, 罗沐欣键, 等. 镉胁迫下钝化剂对菠菜生理特征及镉累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(5): 1004-1010.
- WANG L, CAI J H, LUO-MU X J, *et al.* Effects of passivating agents on physiological characteristics and cadmium accumulation in *Spinacia oleracea* L. under cadmium stress [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(5): 1004-1010.
- [36] 周翠香, 孙军娜, 张馨文, 等. 生物炭对盐地碱蓬抗氧化酶活性及渗透调节物质含量的影响[J]. *鲁东大学学报(自然科学版)*, 2019, 35(2): 110-115.
- ZHOU C X, SUN J N, ZHANG X W, *et al.* Effects of biochar on the activities of antioxidant enzymes and the content

- of osmotic adjustmen in *Suaeda salsa* (L.)[J]. *Journal of Ludong University* (Natural Science Edition), 2019, 35(2): 110-115.
- [37] 姬海月, 胡本祥, 杨冰月, 等. 芸苔素对铅胁迫下远志种子萌发和幼苗生长生理特征的影响[J]. *西北植物学报*, 2022, 42(12): 2093-2102.
- JI H Y, HU B X, YANG B Y, *et al.* Effects of brassinolide on seed germination and seedling growth and physiological characteristics of *Polygala tenuifolia* under lead stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(12): 2093-2102.
- [38] 吕芳, 王翔宇, 辛美丽, 等. 不同氮磷营养条件对海黍子生长及抗氧化能力的影响[J]. *海洋渔业*, 2021, 43(5): 607-617.
- LYU F, WANG X Y, XIN M L, *et al.* Effect of nitrogen and phosphorus nutrients on the growth and antioxidation capacity of *Sargassum muticum*[J]. *Marine Fisheries*, 2021, 43(5): 607-617.
- [39] 周洪印, 李嘉琦, 包立, 等. 不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(9): 5196-5203.
- ZHOU H Y, LI J Q, BAO L, *et al.* Effect of different control measures on cadmium and lead accumulation and quality in lettuce [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(9): 5196-5203.
- [40] 戴馨, 刘楠楠, 夏炎, 等. 氮素调控对玉米氮素同化过程及产量的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2022, 49(4): 533-539.
- DAI X, LIU N N, XIA Y, *et al.* Effects of nitrogen regulation on nitrogen assimilation process and yield of maize[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2022, 49(4): 533-539.
- [41] 任晓雪, 曹彦辉, 曹桂芳, 等. 施用低温生物炭对甘蓝生长、品质和土壤理化性质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(15): 140-144.
- REN X X, CAO Y H, CAO G F, *et al.* Effects of low temperature biochar application on growth and quality of cabbage and soil physical and chemical properties[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(15): 140-144.
- [42] 许樊蓉, 唐盛兰, 吴文, 等. 生物炭添加对娜塔栎容器苗生长和营养状况的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(7): 76-84.
- XU F R, TANG S L, WU W, *et al.* Effects of biochar treatments on the growth and nutrient status of *Quercus nuttallii* container seedlings[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(7): 76-84.
- [43] 曾红丽, 李宇飞, 唐才宝, 等. 不同移栽方式下减氮配施生物炭对稻米品质的影响[J/OL]. *分子植物育种*, 2022(2022-03-24) [2024-04-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220323.2250.010.html>.
- ZENG H L, LI Y F, TANG C B, *et al.* Effects of nitrogen reduction and biochar application on rice quality under different transplanting methods[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 2022(2022-03-24) [2024-04-18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220323.2250.010.html>.
- [44] 沈谦, 梁正川, 余泽岑, 等. 不同施氮水平对桑树幼苗非结构性碳水化合物及其抗旱能力的影响[J]. *西北农业学报*, 2023, 32(3): 402-410.
- SHEN Q, LIANG Z C, YU Z C, *et al.* Effects of different nitrogen application levels on non-structural carbohydrates and drought resistance of *Morus alba*[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2023, 32(3): 402-410.