

戚琳,宋修超,沈新,等. 3-吲哚乙酸对植物修复重金属污染土壤的增效作用[J]. 江苏农业科学,2022,50(4):193-197.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.04.032

3-吲哚乙酸对植物修复重金属污染土壤的增效作用

戚琳¹, 宋修超², 沈新¹, 陈雅静¹, 张瑞敏¹, 关莹¹

(1. 江苏开放大学环境生态学院, 江苏南京 210017; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏南京 210014)

摘要:为探究植物在外源 3-吲哚乙酸(IAA)作用下对重金属[铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、镉(Cd)]污染土壤的修复效果,以江苏省某重金属复合污染区土壤为对象,通过盆栽种植紫花苜蓿和黑麦草 2 种先锋植物,研究 3-吲哚乙酸对植物修复重金属污染土壤效果的影响。结果表明:IAA 可促进植物在重金属污染的土壤中生长,紫花苜蓿和黑麦草株高、根长和生物量均比不添加 IAA 的处理显著高;相比于对照,各处理土壤重金属含量降低,其中 IAA 处理下黑麦草土壤 Cu、Zn、Cd 含量最低,IAA 处理下紫花苜蓿土壤 Pb 含量最低;IAA 作用下土壤重金属去除率和植物体内重金属含量提高,2 种植物对 4 种重金属的生物富集系数(BCF)提高,但紫花苜蓿中 Pb 和 Zn 转运系数(TF)降低,黑麦草中 Cu 和 Zn 的 TF 不受 IAA 影响。综合分析,植物激素 IAA 可促进植物生长,对植物修复土壤重金属污染具有增效作用。

关键词:3-吲哚乙酸;植物修复;重金属;去除率;富集系数;转运系数

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)04-0193-05

土壤是动植物和微生物的主要栖息场所,同时是各种污染物的最终归宿^[1]。土壤污染具有隐蔽性、滞后性、累积性和不可逆转性等特点,导致其治理难度大、耗时长、恢复代价大^[2]。作为典型的无机污染物,重金属毒性强,进入土壤后难降解,能与土壤有机质或矿物质相结合并长期留存于土壤中,最终在土壤中不断积累^[3],同时通过食物链的富集作用危及人类健康,引发生态风险^[4-5]。

植物修复(phytoremediation)是利用植物及其根际微生物群落的理化或生物过程来吸收、转化、降解、挥发或固定土壤污染物的一种原位生物修复技术^[6-7]。相较于传统理化修复方法,植物修复成本低,对环境破坏小、扰动少^[8]。然而,大多数超积累植物(hyperaccumulator)适生范围窄、根系浅、生长慢,无法达到快速处理复合污染土壤的目的^[9]。因此,植物修复的关键在于促进植物体根部生物量的增加,保证植物在污染土壤中定植并发挥作用。

植物激素 3-吲哚乙酸(IAA)是植物体内合成的、调控植物生长发育的微量有机物质,能促进植物细胞伸长、分裂和分化生长,提高植物抗逆性、促进植物根系发育和叶片生物量的增加,对植物的生长发育和生理生化有着重要影响^[10-11]。IAA 用于促进植物生长已具有一定的研究基础^[12],但应用于强化植物修复土壤重金属的报道较少。因此,本研究选取江苏省典型重金属复合污染土壤,筛选先锋

收稿日期:2021-05-14

基金项目:江苏开放大学(江苏城市职业学院)“十三五”科研规划课题(编号:18SSW-ZR-Y-17);江苏省大学生创新创业训练计划(编号:202014000008Y);江苏省环境工程重点实验室开放基金(编号:HX2017005)。

作者简介:戚琳(1987—),女,山西临汾人,硕士,实验师,主要从事环境生态学及土壤修复相关研究。E-mail:qlkatrina@163.com。

通信作者:宋修超,博士,助理研究员,主要从事农业废弃物肥料化与基质化利用相关研究。E-mail:xiuchao103@163.com。

[14]袁勇,王飞跃.区块链技术发展现状与展望[J].自动化学报,2016,42(4):481-494.

[15]杨信廷,王明亭,徐大明,等.基于区块链的农产品追溯系统信息存储模型与查询方法[J].农业工程学报,2019,35(22):323-330.

[16]孙传恒,于华竟,徐大明,等.农产品供应链区块链追溯技术研究进展与展望[J].农业机械学报,2021,52(1):1-13.

[17]孙俊,何小东,陈建华.基于区块链的农产品追溯系统架构研究[J].河南农业科学,2018,47(10):149-153.

[18]孙忠富,马浚诚,郑飞翔,等.区块链支撑农业大数据安全初探[J].农业大数据学报,2020,2(2):25-37.

[19]王云婷,庞晓琼,陈锦生,等.基于以太坊的数字权限保护系统[J/OL].计算机工程与应用,[2021-11-09].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20210316.1716.008.html.

[20]陈玥婧,周爱莲,谢能付,等.基于区块链和物联网的农产品质量安全追溯系统[J].农业大数据学报,2020,2(3):61-67.

[21]程啸.区块链技术视野下的数据权属问题[J].现代法学,2020,42(2):121-132.

植物紫花苜蓿和黑麦草,利用盆栽试验,将 IAA 应用于土壤重金属污染的植物修复领域,结合 3-吡啶乙酸与植物产生的协同效应,以期为重金属污染土壤的植物修复中引入植物激素提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 和黑麦草 (*Lolium perenne* L.) 种子购自河北景天种业有限公司;吡啶乙酸购于杭州莱钡特生物科技有限公司。

供试土壤取自苏北地区某重金属复合污染区,土壤 pH 值 6.5,有机质含量 17.3 g/kg,铜 (Cu) 含量 73.4 mg/kg,铅 (Pb) 含量 105 mg/kg,锌 (Zn) 含量 298.6 mg/kg,镉 (Cd) 含量 1.1 mg/kg。使用前风干、磨细并过 20 目筛,称取 5 kg 土壤于塑料钵中待用。取饱满的种子用 10% H_2O_2 消毒,无菌水反复冲洗干净后,均匀铺在培养皿上并覆盖湿润纱布,置于 28 °C 培养箱。3~4 d 后挑选长势健壮一致的幼苗转移至盆钵,移栽 10 株/盆,土壤水分含量调节至最大田间持水量的 60% 左右。IAA 用乙醇溶解,加蒸馏水配制成 10 mg/L 溶液备用。

1.2 试验设计

本试验于 2020 年 9—10 月在江苏城市职业学院屋顶花园进行,共设置 5 个处理:既不种植物也不添加 IAA (CK)、种植紫花苜蓿 (P1)、种植紫花苜蓿并添加 IAA (P1+I)、种植黑麦草 (P2)、种植黑麦草并添加 IAA (P2+I),每个处理重复 3 次,试验周期 60 d。添加 IAA 的处理分别于试验 10、30、50 d 灌根施用,以防止 IAA 光解。试验结束采集土壤和植物样品:以土钻随机采 8 个点/盆,混合均匀装入干净的自封袋中;随机选取 5 棵/盆整株植株,作为 1 个植株样品放入信封保存。

1.3 分析方法

1.3.1 紫花苜蓿和黑麦草株高及生物量测定 紫花苜蓿和黑麦草植株用蒸馏水充分洗净,测定其株高及根长;植株于 105 °C 杀青 30 min,80 °C 烘至恒质量,植株地上部及地下部分别称质量。

1.3.2 土壤及植物中重金属含量测定 植株样品用粉碎机磨碎过 80 目尼龙筛,土壤样品自然风干,研磨过 100 目尼龙筛,用 HNO_3-HClO_4 消解植物样, $HCl-HNO_3-HClO_4$ 消解土样^[13],通过 7500A 型 Agilent 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定植物和土壤中的 Cu、Zn、Cd、Pb 含量。

1.3.3 富集系数和转运系数 富集系数 $BCF = C_p/C_0$,式中: C_p 代表植物体内重金属含量,mg/kg; C_0 为土壤重金属的初始含量(1.1 节),mg/kg。

转运系数 $TF = C_a/C_u$,式中: C_a 代表植物地上部重金属含量,mg/kg; C_u 代表地下部重金属含量,mg/kg。

1.4 数据分析

数据经 Excel 2010 整理,SPSS 19.0 统计软件进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 和多重比较 (LSD) 检验处理间的差异以及试验数据的统计,设显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 IAA 对植物生长的影响

如图 1 所示,添加 IAA 可促进植物生长,使其株高和根长均显著高于不添加 IAA 的处理 ($P < 0.05$)。仅种植紫花苜蓿的 P1 处理、仅种植黑麦草的 P2 处理植株株高分别为 17.29、14.95 cm,在 IAA 作用下分别增加 30.0%、29.8%,而 IAA 作用下紫花苜蓿和黑麦草根长分别比不添加 IAA 的植株增加 32.6% 和 43.0%。

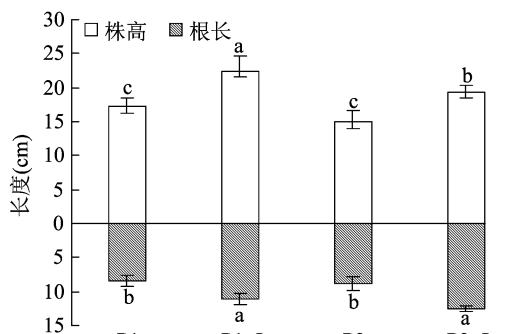


图1 不同处理植物株高和根长

如图 2 所示,IAA 处理下紫花苜蓿和黑麦草植株生物量均有所增加,且显著高于不添加 IAA 的处理。其中, P1+I 处理地上部生物量最大,达到 1.14 g/株, P2+I 地下部生物量最大,达到 0.70 g/株。

2.2 IAA 对土壤重金属的影响

由图 3 可知,所有种植植物的处理土壤重金属含量均低于 CK,不同处理对土壤 Cu、Zn 和 Cd 的去除率表现为 $CK < P1 < P2 < P1+I < P2+I$ 。在 IAA 作用下,种植黑麦草的土壤中 Cu、Zn、Cd 含量最低,分别为 37.49、192.16、0.96 mg/kg。土壤 Pb 的去除率表现为 $CK < P2 < P1 < P2+I < P1+I$, IAA 处理下紫花苜蓿土壤 Pb 含量最低,为 64.30 mg/kg。

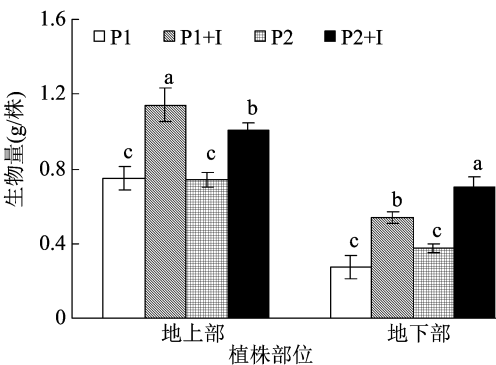


图2 不同处理植物生物量

2.3 IAA 对植物体内重金属含量的影响

由表 1 可知,2 种植物地上部和地下部均可检测出重金属,且各处理地下部的重金属含量高于地上部。所有添加 IAA 处理的植物地上部和地下部重金属含量均高于仅种植植物的处理,其中 P1 + I 处理地上部和地下部 Pb、Zn 和 Cd 含量最高,P2 + I 处理地上部和地下部 Cu 含量最高,说明外源添加 IAA 可促进紫花苜蓿对 Pb、Zn 和 Cd 的吸附以及黑麦草对土壤 Cu 的吸附。

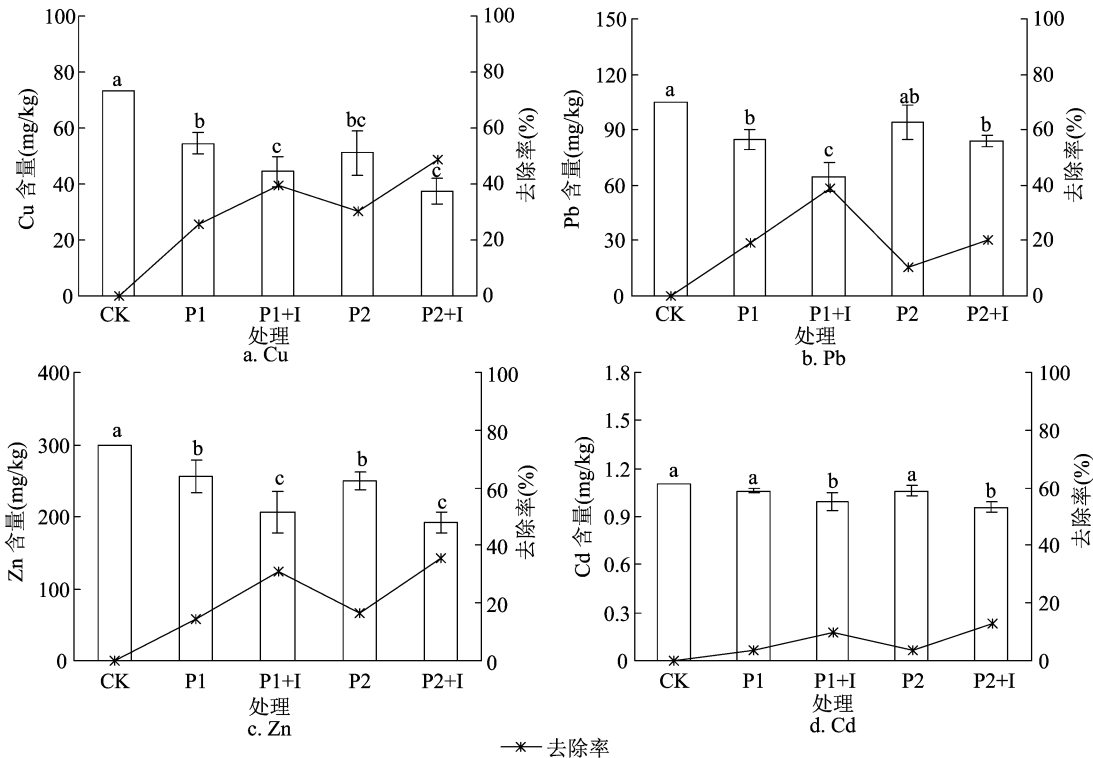


图3 不同处理土壤重金属含量和去除率

表 1 不同处理植物体内重金属含量

植株部位	处理	Cu 含量	Pb 含量	Zn 含量	Cd 含量
地上部	P1	2.75 ± 0.25c	18.78 ± 1.07b	142.29 ± 7.28b	0.23 ± 0.06b
	P1 + I	8.41 ± 0.36b	30.60 ± 2.66a	183.99 ± 6.29a	0.50 ± 0.04a
	P2	8.29 ± 0.34b	12.01 ± 1.58c	45.85 ± 5.16d	0.14 ± 0.01c
	P2 + I	15.69 ± 0.81a	24.09 ± 1.62a	74.16 ± 5.53c	0.30 ± 0.02b
地下部	P1	30.66 ± 2.23c	49.68 ± 6.01b	219.78 ± 15.00c	0.78 ± 0.08b
	P1 + I	47.75 ± 2.50b	87.48 ± 4.04a	490.27 ± 15.09a	0.96 ± 0.02a
	P2	41.58 ± 3.64b	26.41 ± 3.90c	179.11 ± 12.68d	0.53 ± 0.11c
	P2 + I	79.26 ± 7.76a	36.61 ± 3.39c	286.26 ± 13.94b	0.81 ± 0.03b

由表 2 可知,相比于仅种植植物的处理,添加 IAA 可提高 4 种重金属的生物富集系数(BCF),且 P2 + I 处理 Cu 的 BCF 最大,为 1.29,显著高于其他 3 个处理;P1 + I 处理 Pb、Zn 和 Cd 的 BCF 最大,分

别为 1.12、2.26 和 1.34,显著高于其他 3 个处理 ($P<0.05$),说明 IAA 可促进植物对土壤重金属的富集吸收。添加 IAA 对重金属在植物体内的转运系数(TF)影响随植物种类和重金属种类的不同而

变化,Cu 最大的 TF 是 P2 和 P2 + I 处理,为 0. 20;而 Pb、Zn 和 Cd 最大的 TF 分别为 P2 + I、P1 和 P1 + I 处理,分别为 0. 66、0. 65 和 0. 52。紫花苜蓿添加

IAA 降低了 Pb 和 Zn 的 TF,而黑麦草添加 IAA 对 Cu 和 Zn 的 TF 无影响。

表 2 不同处理重金属生物富集系数 (BCF) 和转运系数 (TF)

处理	BCF				TF			
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cu	Pb	Zn	Cd
P1	0. 46c	0. 65b	1. 21b	0. 92b	0. 09b	0. 38b	0. 65a	0. 30b
P1 + I	0. 77b	1. 12a	2. 26a	1. 34a	0. 18a	0. 35b	0. 38b	0. 52a
P2	0. 68b	0. 37c	0. 75c	0. 61c	0. 20a	0. 45b	0. 26c	0. 27b
P2 + I	1. 29a	0. 58b	1. 21b	1. 00b	0. 20a	0. 66a	0. 26c	0. 37b

3 讨论

重金属胁迫下植物生长会受抑制,而外源 IAA 使植株株高、根长和生物量增加,这是由于低浓度植物激素对植物生长发育产生调节作用,能够促进细胞分裂、刺激细胞伸长,在器官和整株水平对植物生长起促进作用^[14]。在本研究中,IAA 可促进紫花苜蓿和黑麦草生长,显著提高植株株高、根长和生物量。周建民等研究发现,IAA 能促进植物根系伸长,增加植株高度,促进植物的生长发育,增加地上部生物量^[15];López 等认为,IAA 能够促进植物细胞分裂和分化,增强植物根系生长,促进植物对土壤营养物质和污染物质的吸收^[16]。

紫花苜蓿和黑麦草在生长过程中,根系在土壤中迅速扩展,可为重金属提供充足的吸附点,有利于植物对重金属的吸收提取,使土壤中重金属含量降低、去除率升高。而外源 IAA 促进了植物在污染土壤中的生长,尤其是对根系生长的促进,使植物得以在污染土壤中定植并发挥修复作用。本研究发现,IAA 可显著提高 2 种植物体内的重金属含量,同时,种植紫花苜蓿的土壤中 4 种重金属和种植黑麦草的土壤中 Zn、Cd 含量显著降低。Li 等连续 3 年种植景天属植物,研究植物提取修复对土壤重金属的影响,发现土壤全量 Cd、Zn 含量显著低于对照组^[17]。吴东墨等研究了吡啶乙酸和激动素配合施用对蜈蚣草提取土壤砷效率的影响,发现 2 种激素有助于总 As 含量显著降低,但对土壤有效态 As 含量无显著影响^[18]。向言词等研究发现,单独施用 IAA 或吡啶乙酸 - 水杨酸 (IAA - SA) 联合处理可有效缓解铅对芥菜型油菜生长的抑制效应,并显著增加芥菜型油菜体内铅含量^[19]。赵书晗等用 20 mg/L IAA 处理 2 种不同砷富集能力植物,发现 IAA 可使

植物既保持正常生长又超量富集砷,植物生物量和叶片砷含量均显著增加^[20]。Fässler 等发现,低浓度 IAA 处理可有效促进向日葵生长,同时叶片中铅和锌含量显著提高^[21]。

富集系数指植物体内某重金属的含量与植物生长土壤中该重金属含量的比值,用于评价植物将重金属吸收转移到其体内的能力^[22]。在本研究中,2 种植物在 IAA 的作用下对重金属的富集能力显著提高,这是由于 IAA 可有效缓解重金属对植物的毒害,在促进植物生长的同时提高植物对重金属的耐受性和吸收提取能力^[15,23]。相比之下,黑麦草对 Cu 的富集能力更强,而紫花苜蓿对 Pb、Zn、Cd 的富集能力更强。转运系数 (TF) 指植物体内地上部重金属与地下部重金属含量的比值,用于评价植物根部向地上部转运重金属的能力^[13]。Hadi 等用吡啶乙酸喷施玉米叶片后发现,植物生长受到促进、生物量显著增加,玉米对铅的吸收和转运能力也显著增强^[24]。在本研究中,IAA 能显著提高紫花苜蓿对 Cu 和 Cd 以及黑麦草对 Pb 和 Cd 向地上部转运的能力,对紫花苜蓿转运 Pb 和 Zn 的能力反而起到抑制作用,这与郝厚叶等的研究结果^[25]一致,推测是由于外源 IAA 作用下,紫花苜蓿根部对 Pb 和 Zn 积累量远高于地上部,导致转运系数低于不添加 IAA 的处理。

4 结论

相比于仅种植植物的处理,外源 3 - 吡啶乙酸可促进紫花苜蓿和黑麦草生长,显著提高植株株高、根长和生物量,对紫花苜蓿地上部生物量的影响更明显,而黑麦草则表现为地下部影响更明显。IAA 作用下,土壤中重金属的去除率和植物体内重金属含量提高,紫花苜蓿和黑麦草对 4 种重金属

(Cu、Pb、Zn 和 Cd)的生物富集系数(BCF)显著提高,但紫花苜蓿中 Pb 和 Zn 转运系数(TF)降低,黑麦草中 Cu 和 Zn 的 TF 不受 IAA 影响。综合分析,外源添加植物激素 IAA 可强化土壤重金属的植物修复效果。

参考文献:

- [1] Mahar A, Wang P, Ali A. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 126: 111 – 121.
- [2] Duan X C, Xu L, Song J, et al. Effects of benzo[a]pyrene on growth, the antioxidant system, and DNA damage in earthworms (*Eisenia fetida*) in two different soil types under laboratory conditions[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, 34(2): 283 – 290.
- [3] 邢艳帅, 乔冬梅, 朱桂芬, 等. 土壤重金属污染及植物修复技术研究进展[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(17): 208 – 214.
- [4] 张晓东, 热沙来提·买买提, 刘志刚. 芥菜对土壤重金属镉(Cd)和铅(Pb)的修复效应[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(4): 477 – 481.
- [5] 杨亚琴. 不同园林绿化植物对土壤重金属的吸收富集研究[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(3): 364 – 368.
- [6] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(3): 409 – 417.
- [7] Sarwar N, Imran M, Shaheen M R, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives[J]. *Chemosphere*, 2017, 171: 710 – 721.
- [8] 朱阳春, 张振华, 钟小仙, 等. 牧草修复重金属污染土壤的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(4): 1 – 6.
- [9] Marques A P G C, Rangel A O S S, Castro P M L. Remediation of heavy metal contaminated soils: Phytoremediation as a potentially promising clean – up technology [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2009, 39(8): 622 – 654.
- [10] 戚琳, 宋修超, 朱秀梅, 等. 外源物质强化植物修复多环芳烃污染土壤研究[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(7): 132 – 137.
- [11] 李欣欣, 赵静, 廖红. 吡啶乙酸、吡啶丁酸和萘乙酸对大豆幼根生长的影响[J]. *植物生理学报*, 2013, 49(6): 573 – 578.
- [12] 吕剑, 喻景权. 植物植物激素的作用机制[J]. *植物生理学通讯*, 2004, 40(5): 624 – 628.
- [13] 朱剑飞, 李铭红, 谢佩君, 等. 紫花苜蓿、黑麦草和狼尾草对 Cu、Pb 复合污染土壤修复能力的研究[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(2): 303 – 313.
- [14] Chaoui A, Jarrar B, Ferjani E E L. Effects of cadmium and copper on peroxidase, NADH oxidase and IAA oxidase activities in cell wall, soluble and microsomal membrane fractions of pea roots[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161(11): 1225 – 1234.
- [15] 周建民, 党志, 陈能场, 等. 3-吡啶乙酸协同整合剂强化植物提取重金属的研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(9): 2085 – 2088.
- [16] López M L, Peralta – Vide J R, Benitez T, et al. Enhancement of lead uptake by alfalfa (*Medicago sativa*) using EDTA and a plant growth promoter[J]. *Chemosphere*, 2005, 61(4): 595 – 598.
- [17] Li Z, Wu L H, Hu P J, et al. Repeated phytoextraction of four metal contaminated soils using the cadmium/zinc hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 189(12): 176 – 183.
- [18] 吴东墨, 王宏镔, 王海娟, 等. 吡啶乙酸和激动素配合施用对蜈蚣草土壤砷提取效率的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(8): 1705 – 1715.
- [19] 向言词, 官春云, 黄璜, 等. 3-吡啶乙酸和水杨酸对芥菜型油菜耐受/积累铅的影响[J]. 2008, 4(23): 103 – 106.
- [20] 赵书晗, 王海娟, 王宏镔. 砷胁迫下吡啶乙酸对不同砷富集能力植物光合作用的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(6): 1093 – 1101.
- [21] Fässler E, Evangelou M W, Robinson B H, et al. Effects of indole – 3 – acetic acid (IAA) on sunflower growth and heavy metal uptake in combination with ethylene diamine disuccinic acid (EDDS) [J]. *Chemosphere*, 2010, 80(8): 901 – 907.
- [22] Chen Y M, Yang W J, Chao Y Q, et al. Metal – tolerant *Enterobacter* sp. Strain EG16 enhanced phytoremediation using *Hibiscus cannabinus* via siderophore – mediated plant growth promotion under metal contamination[J]. *Plant and Soil*, 2016, 413(1/2): 203 – 216.
- [23] 曾小英, 康小虎, 李师翁. 生长调节物质在重金属污染植物中的应用研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(1): 32 – 37.
- [24] Hadi F, Bano A, Fuller M P. The improved phytoextraction of lead (Pb) and the growth of maize (*Zea mays* L.): The role of plant growth regulators (GA₃ and IAA) and EDTA alone and in combinations[J]. *Chemosphere*, 2010, 80(4): 457 – 462.
- [25] 郝厚叶, 王森, 李悦. 施加外源 3-吡啶乙酸和硝酸铜胁迫下凤眼蓝和菹草生长生理指标和酶活性[J]. *湿地科学*, 2018, 6(16): 816 – 824.