

氮磷钾配施促进向日葵铅吸收转运的机制

郭悦^{1,2}, 杨军^{2,3}, 郭俊梅^{2,3*}, 杨俊兴^{2*}, 郑国砥^{2,3}, 李志涛⁴, 陈同斌^{2,3},
于豹^{2,3}, 倪蕾⁵, 温倩⁵, 柏志贤⁵

(1 成都理工大学旅游与城乡规划学院, 成都 610059; 2 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101;
3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 生态环境部环境规划院, 北京 100012;
5 石家庄市环境保护局栾城区分局, 河北 051430)

摘要: 【目的】向日葵 (*Helianthus annuus* L.) 具有修复土壤铅 (Pb) 污染的潜力。研究施肥措施对不同向日葵品种 Pb 吸收转运的影响机理, 有助于探明提高向日葵 Pb 修复效率的合理施肥措施, 为向日葵合理修复我国大面积中轻度 Pb 污染农田土壤提供理论依据和技术支撑。【方法】以我国北方典型 Pb 污染农田土壤 (全 Pb 含量 174 mg/kg) 为介质进行了盆栽试验。供试材料为三个向日葵品种: LD5009(食用葵)、T562(油葵) 和欢乐火炮竹(观赏葵), 均设置 CK、N、NP、NPK 四个施肥处理。待向日葵生长 40 天后收获, 调查分析了植株地上部和根部生物量、Pb 含量、亚细胞区隔化, 根际土壤 pH 和各 Pb 形态含量。【结果】供试三种向日葵的 Pb 富集能力具有显著差异, LD5009 地上部 Pb 富集量最高, 是欢乐火炮竹和 T562 的 1.6 倍和 1.7 倍。施肥处理显著促进了供试三种向日葵生长和对 Pb 的吸收转运, 其中氮磷钾肥料配施条件下 LD5009、欢乐火炮竹和 T562 地上部 Pb 富集量分别达 184.2、112.5 和 108.5 $\mu\text{g}/\text{株}$, 显著高于 CK、N 和 NP 处理 ($P < 0.05$)。对向日葵叶片中 Pb 亚细胞区隔化的研究结果表明, 向日葵叶中的 Pb 主要区隔在金属富集颗粒组分 (56.1%~86.4%) 和细胞碎屑组分 (8.1%~38.3%), 为 Pb 胁迫下向日葵在亚细胞水平上的重要富集机制, 施肥处理显著提高了 Pb 在细胞碎屑和金属富集颗粒组分的含量 ($P < 0.05$)。对向日葵根际土壤 Pb 形态的研究结果表明, NP 和 NPK 处理虽然降低了向日葵弱酸提取态 Pb 含量, 但其对向日葵根系和地上部生长的促进作用远大于对土壤 Pb 有效性的降低效果, 促进了向日葵根系对土壤中 Pb 的吸收转运。【结论】食用葵品种 LD5009 是修复中轻度 Pb 污染土壤的良好材料。氮磷钾配施可显著促进向日葵的生长和对土壤 Pb 的吸收转运, 进而提高向日葵对 Pb 的修复效率。

关键词: 向日葵; 肥料; 亚细胞区隔化; 土壤铅形态

Mechanism of nitrogen, phosphorous and potassium combined application promote absorption, transportation and accumulation of Pb in sunflower (*Helianthus annuus* L.)

GUO Yue^{1,2}, YANG Jun^{2,3}, GUO Jun-mei^{2,3*}, YANG Jun-xing^{2*}, ZHENG Guo-di^{2,3}, LI Zhi-tao⁴, CHEN Tong-bin^{2,3},
YU Bao^{2,3}, NI Lei⁵, WEN Qian⁵, BO Zhi-xian⁵

(1 College of Tourism and Urban-rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2 Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4 Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China;

5 Shijiazhuang Environmental Protection Bureau Luancheng District Branch, Shijiazhuang 051430, China)

Abstract: 【Objectives】Sunflower (*Helianthus annuus* L.) has an huge potential for phytoremediation of lead (Pb) contaminated soils. This study investigated the effect of fertilizers on the Pb absorption and transportation

收稿日期: 2018-11-26 接受日期: 2019-04-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1802604, 2018YFD0800601); 国家自然科学基金项目 (41771509, 41771510, 30570345)。

联系方式: 郭悦 E-mail: 375891358@qq.com

* 通信作者 郭俊梅 E-mail: guojw.15b@igsrr.ac.cn; 杨俊兴 E-mail: yangjx@126.com

mechanisms in different sunflower species, which helped to improve the Pb phytoextraction efficiency with rational fertilizations. The results will provide theoretical and technological support for reasonable phytoremediation of a large area of mild and moderate Pb contaminated soils in China using sunflower.

【 Methods 】 A pot experiment was conducted using a Pb-contaminated soil (total Pb 174 mg/kg) in northern China. Three sunflower cultivars, namely LD5009 (edible sunflower), T562 (oil sunflower) and Huanlehuopaozhu (Hhz, ornamental sunflower), were used as tested materials, and fertilizer treatments of CK, N, NP, NPK were setup for each cultivar. At the 40th day after transplanting, the sunflower plants were harvested, and the biomass, Pb concentration, subcellular compartmentalization were determined, at the same time the pH value and the contents of different Pb forms in rhizosphere soil of three sunflower species were measured. **【 Results 】** There were significant differences in Pb accumulation capacity among three sunflower species, and the highest shoot Pb content was in LD5009, which was 1.6 and 1.7 times as high as that in Hhz and T562. Application of fertilizers significantly promoted the growth of the three cultivars and the absorption and transportation of Pb in them. The Pb contents in shoots of LD5009, Hhz and T562 under NPK treatments were 184, 112 and 108 $\mu\text{g}/\text{plant}$, respectively, which were significantly higher than those under other treatments ($P < 0.05$). The results of Pb subcellular distribution in leaf of sunflower showed that Pb was mainly compartmented in metal-rich granule fraction (56.1%–86.4%) and cellular debris fraction (8.1%–38.3%). Application of fertilizers significantly increased the Pb concentration in cellular debris and metal-rich granule fraction ($P < 0.05$). The study on the Pb forms in rhizosphere soil of sunflower showed that although the NP and NPK fertilizers treatments lead to reduction of acid soluble Pb, the promotion effect of fertilizers application on root and shoot growth of sunflower was far greater than that on the reduction of soil Pb availability, which consequently promoted Pb absorption and transportation of sunflower. **【 Conclusions 】** LD5009 is a good candidate for phytoremediation of mild and moderate Pb contaminated soil. N, P, K combined application effectively promotes the growth of sunflower, as well as increases the Pb absorption and transportation in sunflower, therefore effectively improves the Pb phytoextraction efficiency in sunflower.

Key words: sunflower; fertilization; subcellular distribution; Pb forms

铅 (Pb) 是自然环境中最具毒性的重金属元素之一, 是一种不可降解的环境污染物质, 采矿、电镀、冶炼等工业活动排放的三废、农田污水灌溉以及化肥、农药不合理施用等因素导致我国土壤 Pb 污染问题较为严重^[1-3]。据《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国土壤中 Pb 点位超标率达 1.5%, 并且直接或间接通过食物链威胁我国粮食安全和人体健康。土壤重金属污染的治理已引起社会的广泛关注^[1-3]。植物修复技术以其修复成本低、操作简单、不造成二次污染等优点而成为国内外学者研究的热点, 被认为是最具应用潜力的绿色修复技术。

利用植物修复重金属污染土壤主要存在两种策略, 一种为利用 Pb 超富集植物对土壤 Pb 的超积累能力, 在可移除部位富集高浓度的 Pb, 从而修复污染土壤。然而, 目前对于铅超富集植物的发现和研究表明, 仅羽叶鬼针草 (*Bidens maximowicziana*)、圆叶南芥 (*Arabis paniculata* L.)、园叶遏兰菜 (*Thlaspi*

rotundifolium) 等十余种, 且多存在植株生长缓慢、生物量较低等缺点, 限制了其在土壤修复中的应用价值^[4]。另一种策略则为利用大生物量的耐性植物进行修复, 其生长迅速, 生物量较大, 对土壤中重金属具有一定的富集能力^[5]。向日葵是常见的植物类型, 分布广泛, 生长迅速, 具有悠久的栽培历史^[6-8]。有研究表明, 向日葵对 Pb 具有较强的耐性和富集能力, 地上部 Pb 含量可达 200 mg/kg 以上, 具有应用于 Pb 污染土壤修复的潜力。

然而, 从修复效率角度与 Pb 超富集植物相比, 向日葵的 Pb 富集能力仍相对较低, 需进一步促进向日葵对 Pb 的修复效率。施用化学肥料是农业生产中最重要的农艺措施, 肥料不仅可提高土壤肥力, 促进植物生长, 还可改变土壤酸碱性, 与土壤中重金属离子发生沉淀、吸附、解吸和络合等作用, 从而影响重金属的赋存形态和生物有效性^[9-10]。郭劲君等^[11]研究发现, 施用氮磷钾肥显著促进了波斯菊和硫

华菊对 Pb 的吸收。目前,关于施肥对向日葵根际土壤 Pb 形态及向日葵对 Pb 的吸收、转运和修复效率的影响仍少见报道,对 Pb 胁迫条件下不同向日葵品种对 Pb 的耐性、解毒机理也尚不明晰。

鉴于此,本研究以三个向日葵品种为研究对象,研究铅污染土壤中不同施肥措施对向日葵铅吸收、转运的影响并进一步探索向日葵对铅胁迫的耐性和解毒机制,以期探明提高向日葵铅修复效率的合理施肥措施,为向日葵合理修复我国大面积中轻度铅污染农田土壤提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究采用盆栽实验,供试土壤采自河南省某铅锌冶炼企业周边污染农田表层(0—20 cm)土壤。该地区农田长期受铅锌冶炼企业大气沉降影响,导致表层土壤中平均 Pb 含量达到 174 mg/kg,超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB15618—2018)的风险筛选值(170 mg/kg, pH > 7.5),有效态 Pb 含量达 67.8 mg/kg。土壤样品采集后自然风干并过 2 mm 筛,测定土壤基本理化性质,供试土壤 pH 为 7.7,土壤全氮、全磷、全钾含量分别为 1.18 g/kg、0.860 g/kg 和 26.6 g/kg,碱解氮 83.7 mg/kg,有效磷 23.0 mg/kg,速效钾 140 mg/kg,有机质含量为 19.4 g/kg,阳离子交换量为 20.1 mmol/kg。

通过前期田间试验,从 29 种向日葵品种中筛选出 Pb 富集能力较强的食用葵、油葵和观赏葵各一个品种作为供试植物,分别为 LD5009(食用葵)、T562(油葵)和欢乐火炮竹(观赏葵),由中国农业科学院提供。

1.2 试验设计

试验采用双因素试验设计。因素 1, LD5009、T562 和欢乐火炮竹三个不同向日葵品种;因素 2, 不施肥(CK)、单施氮肥(N)、氮磷配施(NP)和氮磷钾配施(NPK)四个不同施肥处理。共设 12 个处理,每个处理设 3 次重复。氮磷钾肥料施用参考当地农户施肥习惯,分别使用尿素、过磷酸钙和氯化钾,施肥量设为 N 150 mg/kg、P₂O₅ 250 mg/kg、K₂O 100 mg/kg。

盆栽试验于 2017 年 6 月进行,采用 25 cm × 20 cm 塑料花盆,将上述过筛土壤装入盆中,每盆装 2 kg 土壤,按不同处理将所有肥料均作为基肥一次性施入土壤中,与土壤充分混合后平衡 1 周,将向

向日葵种子播种到土壤中,待向日葵幼苗长至 10 cm 左右时进行间苗,每盆保留 2 株幼苗。整个试验周期为 40 天,期间昼夜温度为 20℃ 到 35℃,保持土壤水分在田间持水量的 70% 左右。

1.3 样品采集与指标测定

培养试验结束后,将收获的向日葵样品分为地上部和根部样品,地上部样品取一部分新鲜叶片,储存于-80℃ 冰箱中,待测叶片中 Pb 的亚细胞分布。另一部分地上部与根部样品先用清水洗净再用去离子水冲洗 3 遍,然后在 105℃ 烘箱中杀青半小时,70℃ 烘干至恒重,测定生物量,并将地上部与根部样品分别磨碎,过 0.25 mm 筛待测。同时采用抖根法采集向日葵根际土壤,土壤样品自然风干后,研磨并过 2 mm 和 0.15 mm 筛备用。

土壤样品消解方法依据美国环保局 US EPA 3050B 方法,称取过 0.15 mm 筛的土壤样品 0.2 g 到 50 mL 三角瓶中,采用 HNO₃-H₂O₂ 法进行消解,定容至 50 mL 容量瓶中,消解液中 Pb 含量采用电感耦合等离子光谱仪(ICP-OES, 5300DV, Perkin Elmer, 美国)测定,同时设置空白对照和国家标准物质(GBW07402)进行化学分析质量控制(95% ± 5%)。土壤 pH 值采用电极法(ISO 10390 2005)进行测定。

土壤中 Pb 形态分析采用改进 BCR 顺序提取法测定^[12],分别采用 0.11 mol/L HOAc、0.5 mol/L NH₂OH·HCl、8.8 mol/L H₂O₂ 和 1 mol/L NH₄OAc 顺序提取出弱酸提取态、可还原态、可氧化态三种形态,提取后残渣采用 HCl-HNO₃-HClO₄ 法进行消解,用 ICP-OES 测定。

称取 0.5 g 过 0.25 mm 筛的植物样品到 50 mL 容量瓶中,采用 HNO₃-HClO₄ (5 : 1, v : v) 法进行消解,溶液澄清后定容至 50 mL,消解液中 Pb 含量采用电感耦合等离子光谱仪(ICP-OES, 5300DV, Perkin Elmer, 美国)测定,同时设置空白对照和国家标准物质(GBW-07603)进行化学分析质量控制(95% ± 5%)。

向日葵叶片中 Pb 的亚细胞分布采用差速离心方法进行测定^[13-15],称取 0.2 g 新鲜向日葵叶片在液氮条件下研磨,加入 10 mL pH 7.5 的缓冲液(0.25 mol/L 蔗糖、50 mmol/L Tris-HCl 和 1.0 mmol/L 二硫赤藓糖醇)搅拌均匀,均浆在不同离心力条件下可分离为 5 个亚细胞组分。首先在 15000 × g 离心 15 min,所得上清液在 100000 × g 继续离心 1 h,所得

沉积物即为细胞器组分 (organelle), 上清液 80℃ 水浴 10 min 后冰冷却 1 h, 然后在 50000 × g 继续离心 15 min, 获得上清液和沉积物分别为热稳定蛋白 (heat stable protein, HSP) 和热敏感蛋白组分 (heat denatured protein, HDP)。15000 × g 离心后所得沉积物加入 2 mL 超纯水再悬浮, 于 100℃ 水浴 2 min, 再加入 2 mL 1.0 mol/L NaOH 于 70℃ 水浴 1 h, 然后在 10000 × g 离心 15 min, 获得上清液和沉积物分别为细胞碎屑 (cellular debris) 和金属富集颗粒体组分 (metal rich granule, MRG), 以上离心步骤均在 4℃ 条件下进行。所获得的 5 个亚细胞组分均按照植物样品消解方法进行消解, 采用电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS, Elan DRC-e, Perkin Elmer, USA) 测定其 Pb 含量。

1.4 数据处理

使用 Excel 软件进行数据的相关计算, 试验结果采用 SPSS Statistics 19 软件进行数据统计分析, 不同处理间采用最小显著差数法 (LSD 法) 进行差异显著性检验 ($P < 0.05$), 采用 OriginPro 2016 软件进行作图。

转运系数 (transfer factors, TF) 为植物地上部重金属与地下部重金属浓度的比值, 可用于评价植物将重金属从地下部向地上部运输和富集的能力。

重金属富集量 (heavy mental accumulation) 为植物各部位 (地上部、根部) 生物量与其重金属浓度的乘积, 表示植物各部位富集重金属的总量。

2 结果与分析

2.1 施肥对向日葵生物量的影响

由施肥对向日葵地上部和根部生物量的影响 (图 1) 可知, 3 个向日葵品种地上部生物量在 0.60~2.73 g/株之间, 地下部生物量在 0.15~0.36 g/株之间。双因素方差分析结果表明, 向日葵地上部和根部生物量受品种和施肥的极显著影响 ($P < 0.001$), 不同品种向日葵地上部与根部生物量具有显著差异, 且在各施肥处理下均遵循 LD5009 > T562 > 欢乐火炮竹。同时, 不同施肥处理均显著提高了向日葵地上部和根部生物量, 且对 3 个品种生物量的促进效果一致, 均为 NPK > NP > N > CK, 与对照相比, 施 NPK 处理下 LD5009、T562、欢乐火炮竹品种地上部生物量分别提高了 152%、126% 和 80%, 同时, NPK 处理显著高于 N 和 NP 处理 ($P < 0.05$)。

2.2 施肥对向日葵 Pb 吸收、转运的影响

由表 1 可知, 向日葵对 Pb 的吸收和转运受不同

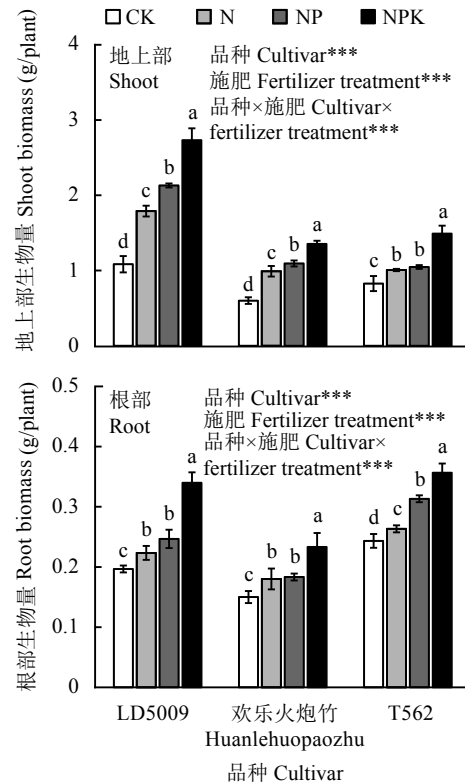


图 1 不同施肥处理下三种向日葵的生物量

Fig. 1 Biomass of three sunflower cultivars under different fertilization treatments

[注 (Note): 柱上不同字母表示同一品种不同处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平 Different letters above the bars mean significantly different among treatments ($P < 0.05$). ***— $P < 0.001$.]

品种和施肥措施的极显著影响 ($P < 0.001$), LD5009、欢乐火炮竹和 T562 地上部 Pb 富集浓度分别可达 43.77~67.41、60.71~83.10 和 62.37~72.67 mg/kg, 欢乐火炮竹在各施肥处理下地上部 Pb 富集浓度均高于 LD5009 和 T562。不同施肥处理均提高了向日葵地上部和根部 Pb 富集浓度, 且对 3 个品种的促进效果趋势一致, 均为 NPK > NP > N > CK。与对照相比, NPK 处理下 LD5009、T562 和欢乐火炮竹地上部 Pb 富集浓度分别提高了 54.0%、36.9% 和 16.5%, 同时, NPK 处理显著高于 N 和 NP 处理 ($P < 0.05$)。

施肥对向日葵 Pb 富集量的影响如图 2 所示, 三个品种向日葵 Pb 均主要富集在地下部, 分别是地下部的 7.2~8.3 倍、7.3~13.0 倍和 3.8~5.7 倍。双因素方差分析结果表明, 向日葵地上部和根部 Pb 富集量受品种和施肥处理的极显著影响 ($P < 0.05$), 三个向日葵品种地上部和根部 Pb 富集量均为 LD5009 > T562 > 欢乐火炮竹。不同施肥处理均显著提高了向日葵地上部和根部 Pb 富集量, 其中 NPK 处理对向日葵 Pb 富集量提高效应最显著, 与对照相比, NPK

表 1 施肥对三种向日葵铅吸收、转运的影响

Table 1 Effect of fertilizers on the Pb uptake and translocation in three sunflower cultivars

品种 Cultivar	处理 Treatment	Pb 含量 Pb concentrations (mg/kg)		转运系数 Transfer factor
		地上部 Shoot	地下部 Root	
LD5009	CK	43.77 ± 3.81 c	30.24 ± 4.57 c	1.46 ± 0.11 a
	N	52.57 ± 2.23 b	57.67 ± 3.08 b	0.91 ± 0.05 b
	NP	58.41 ± 4.62 b	63.64 ± 4.75 ab	0.92 ± 0.12 b
	NPK	67.41 ± 3.46 a	66.79 ± 0.68 a	1.01 ± 0.05 b
欢乐火炮竹 Huanlehuopaozhu	CK	60.71 ± 6.17 c	35.82 ± 2.70 c	1.69 ± 0.06 a
	N	66.46 ± 2.14 bc	36.04 ± 5.05 bc	1.92 ± 0.23 a
	NP	73.01 ± 2.11 b	41.57 ± 1.62 b	1.76 ± 0.11 a
	NPK	83.10 ± 2.08 a	49.30 ± 2.61 a	1.69 ± 0.13 a
T562	CK	62.37 ± 5.26 b	41.82 ± 3.54 c	1.49 ± 0.10 a
	N	66.07 ± 4.47 ab	47.09 ± 3.01 bc	1.41 ± 0.11 a
	NP	63.83 ± 3.09 ab	52.72 ± 4.85 ab	1.22 ± 0.18 a
	NPK	72.67 ± 6.83 a	59.49 ± 6.18 a	1.24 ± 0.25 a
方差分析 ANOVA				
品种 Cultivar		42.544***	42.381***	75.361***
处理 Treatment		31.926***	56.061***	6.110**
品种 × 处理 Cultivar × treatment		2.352	10.075***	4.385**

注 (Note): 同列数据后不同字母表示同一品种不同处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平 Values followed by different letters in a column mean significantly different among treatments ($P < 0.05$). **— $P < 0.01$; ***— $P < 0.001$.

处理下 LD5009、T562 和欢乐火炮竹地上部 Pb 富集量分别提高了 2.9、2.1 和 1.1 倍, 且显著高于 N 和 NP 处理 ($P < 0.05$)。

2.3 施肥对向日葵植物叶片中 Pb 亚细胞分布的影响

图 3 表明, 向日葵叶片中 Pb 在不同亚细胞组分的浓度由高到低为金属富集颗粒 > 细胞碎屑 > 热稳定蛋白 > 细胞器组分 > 热敏感蛋白。施肥显著增加了金属富集颗粒和细胞碎屑中 Pb 含量, 而对热稳定蛋白、细胞器和热敏感蛋白组分中 Pb 含量没有显著影响。

NPK 施肥处理下, LD5009 和 T562 叶片金属富集颗粒中 Pb 含量较对照分别显著提高了 30.8% 和 30.5%, 而欢乐火炮竹品种则显著降低了 21.8% ($P < 0.05$)。同时, NPK 肥料配施处理使 LD5009 和欢乐火炮竹细胞碎屑中 Pb 含量显著提高了 2.5 倍和 2.1 倍 ($P < 0.05$), 而对 T562 则没有显著影响。

三种向日葵叶中 Pb 均主要分布在金属富集颗粒组分 (56.1%~86.4%), 细胞碎屑次之 (8.1%~

38.3%), 而在其他三个亚细胞组分 (热稳定蛋白、热敏感蛋白和细胞器组分) 中的分布比例仅为 3.75%~8.66% (图 4)。施肥显著影响了 Pb 在亚细胞组分中的分布比例, 以 NPK 配施处理作用最显著。与对照相比, NPK 施肥处理下 LD5009 和欢乐火炮竹品种 Pb 在金属富集颗粒组分的分布比例分别降低了 11.5% 和 30.5%, 而在细胞碎屑组分分别提高了 134% 和 172% ($P < 0.05$)。与之相反, T562 品种中 Pb 在金属富集颗粒组分的分布比例提高了 13.4%, 而在细胞碎屑组分的分布比例略有下降。NPK 施肥处理下, LD5009 叶中 Pb 在生物解毒组分 (金属富集颗粒+热稳定蛋白) 中的分布比例显著高于欢乐火炮竹和 T562, 且欢乐火炮竹叶中 Pb 在生物解毒组分的分布比例与对照相比显著降低 30.7%, 而在金属敏感组分 (细胞器+热敏感蛋白) 中的分布比例则显著提高了 75.9% ($P < 0.05$)。

2.4 施肥对土壤 Pb 形态的影响

表 2 显示, 向日葵根际土壤 pH 值在 7.70~7.76 之间, 各施肥处理对向日葵根际土壤 pH 的影响均未达显著水平。土壤中 Pb 主要以弱酸提取态存在, 达

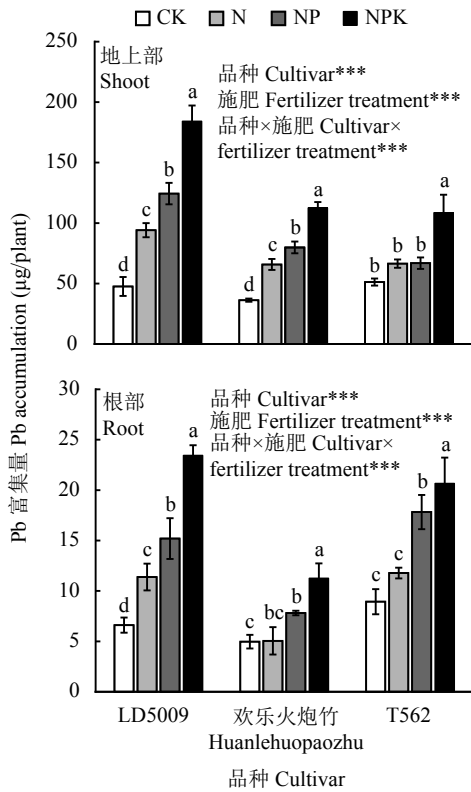


图 2 不同施肥处理下三种向日葵 Pb 的富集量

Fig. 2 Pb accumulation in three sunflower cultivars under different fertilization treatments

[注 (Note): 柱上不同字母表示同一品种不同处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平 Different letters above the bars mean significantly different among treatments ($P < 0.05$). ***— $P < 0.001$.]

38.0%~47.9%，其次是可还原态 (19.0%~25.9%) 和可氧化态 (15.7%~27.5%)，残渣态赋存比例最低 (11.5%~17.8%)。双因素方差分析结果表明，向日葵根际土壤 Pb 形态受施肥处理和向日葵品种的显著影响，与对照相比，各施肥处理均显著降低了弱酸提取态 Pb 的含量，而显著增加了可氧化态 Pb 的含量。施 NPK 肥处理下，LD5009、欢乐火炮竹和 T562 根际土壤弱酸提取态 Pb 含量较不施肥处理分别显著降低了 14.6%、17.0% 和 7.5% ($P < 0.05$)，可氧化态 Pb 含量分别显著提高了 49.1%、23.5% 和 38.5%。向日葵根际土壤可还原态 Pb 含量受施肥处理影响较小，而受向日葵品种的显著影响，LD5009 根际土壤可还原态 Pb 含量达 52.5~54.7 mg/kg，显著高于欢乐火炮竹 (40.0~44.2 mg/kg) 和 T562 (42.1~47.3 mg/kg)。

3 讨论

利用大生物量的重金属耐性植物修复污染土壤是植物修复领域的研究热点^[5]。近年来，国内外学者

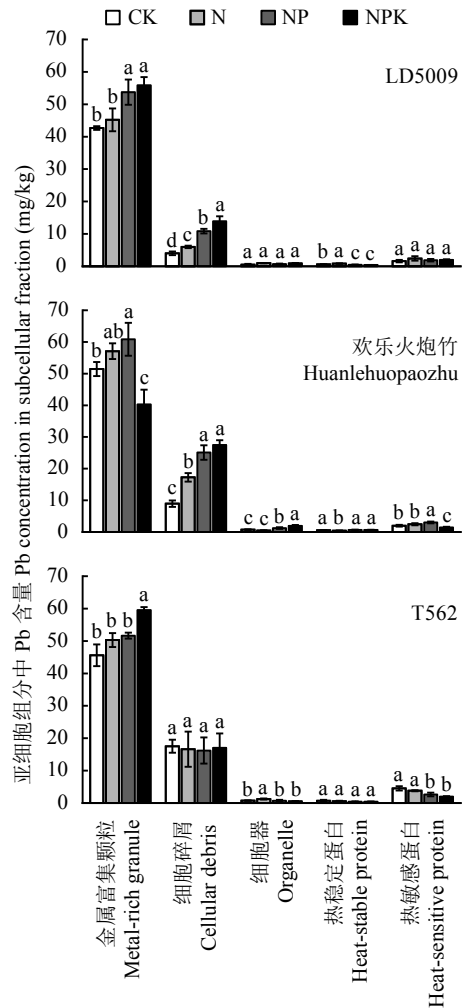


图 3 施肥对三种向日葵叶片亚细胞组分中铅含量的影响
Fig. 3 Effect of fertilizers on Pb concentrations of different subcellular fractions in leaves of three sunflower cultivars

[注 (Note): 柱上不同字母表示同一品种不同处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平 Different letters above the bars mean significantly different among treatments ($P < 0.05$).]

对许多农作物和经济作物的植物修复应用潜力进行了探索。向日葵具有适应性强、生长迅速和生物量大等特点，被认为是修复重金属污染土壤的理想材料^[16-18]。Niu 等^[19]研究发现，向日葵对 Cd、Pb、Cu 等重金属的耐性和富集能力均高于玉米、蓖麻、苜蓿和芥菜等作物。此外，Nehnevajova 等^[20]对 15 个向日葵品种进行了研究，发现 Salut 品种对 Cd、Pb、Zn 的萃取效率显著高于其他向日葵品种。本研究中，三种向日葵对 Pb 的富集能力差异明显，这与前人的研究结果一致。

施肥是传统农业生产中最重要的农艺措施之一，不仅可以提供植物生长所需的养分，促进植物生长，还会对土壤理化性质产生不同的影响，从而

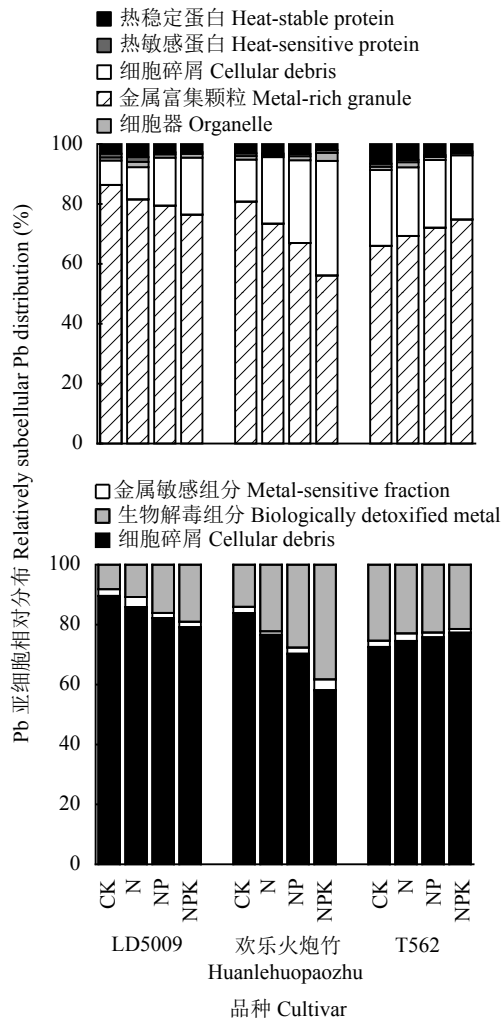


图4 施肥对三种向日葵叶片中Pb的亚细胞分布的影响
Fig. 4 Effect of fertilizers on subcellular distribution of Pb in leaves of three sunflower cultivars

进一步影响土壤中重金属形态和有效性^[9-10]。施用氮磷钾肥使硫华菊和波斯菊地上部Pb富集量显著提高了2.8倍和4.4倍^[11]。修复植物的生物量是决定其重金属富集总量的重要因素^[21]。本研究中,各施肥处理对三种向日葵生长均有明显的促进作用,其中NPK配施处理对地上部和根部生物量的提高最为显著,且显著高于N和NP施肥处理。这与Li等^[22]研究结果一致,添加氮磷钾肥料显著促进了Cd胁迫下籽粒苋的生长。Pankovic等^[23]研究发现,添加7.5 mmol/L的氮可提高向日葵叶片的光合效率,土壤中添加可溶态或难溶态的磷均可使向日葵地上部和根部生物量显著增加^[24],曹柳等^[25]研究认为钾是影响向日葵生物量的关键因子。在重金属胁迫下,植物可能因为重金属的拮抗作用影响其营养元素的吸收^[26],本研究中,添加N、P、K化学肥料后通过协同作用^[11],促进叶绿素合成、提高光合效率,促进植物根

系生长和提高植物抗逆性,从而降低Pb对向日葵的胁迫,促进向日葵生长。尽管施肥对三个向日葵品种生长均有促进作用,但在相同施肥处理下,对LD5009生物量的提高效应显著高于欢乐火炮竹和T562,可知向日葵不同品种自身生长特性以及Pb胁迫下对N、P、K养分的响应具有显著差异^[27]。

本研究中,三个向日葵品种间Pb富集能力表现出较大差异,其可能由不同向日葵品种Pb耐性机制的差异而导致的^[28]。不同施肥处理均提高了其地上部和根部Pb浓度,且NPK配施处理对向日葵Pb吸收的促进作用最为显著,且显著高于N和NP处理。Zaccheo等^[29]研究发现,施用铵态氮肥后,植物吸收 NH_4^+ 引起 H^+ 的分泌,造成根际土壤pH下降,从而提高了根际土壤中Pb的有效性,促进向日葵地上部和根部Cd吸收。而本研究中施氮处理均未对土壤pH值产生显著影响,其原因可能由于本研究供试土壤为北方褐土,pH达7.7,对酸性肥料有较强的缓冲性能,而本试验设置的施氮量参照当地农民习惯施肥量添加,不足以使土壤pH发生显著变化。一般研究结果认为施用含磷化合物可有效降低植物体内Pb吸收和向木质部的运输^[24],其作用机理主要为两个途径,一个是磷酸盐类化合物加入土壤中导致土壤颗粒表面负电荷增加进而对Pb的吸附作用增强,另一个是 H_2PO_4^- 与土壤中 Pb^{2+} 形成低溶解度的磷酸铅盐^[30]。而本研究中NP处理下三种向日葵品种地上部和根部Pb含量与施氮处理相比没有显著差异,其可能是由于本试验供试土壤Pb活性较高,DTPA提取态铅含量达67.8 mg/kg,占总量的39.1%,本试验中磷肥施用量难以使土壤中Pb活性明显下降。祁由菊等^[31]研究发现在石灰性潮土上单施钾肥降低了植株Pb的迁移总量,而钾肥与氮肥配施则显著提高了植物对Pb的吸收,这与本研究结果一致,本研究中施肥处理对向日葵Pb吸收的促进作用可能是,一方面氮磷钾肥配施促进向日葵根系生长,增加了根系与土壤中Pb的接触面积;另一方面肥料中 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 可与 Pb^{2+} 竞争黏土矿物、有机质及氧化物表面的吸附点位,从而改变了土壤中Pb的赋存形态,进一步增加了向日葵对Pb的吸收^[32]。

各施肥处理均显著提高了向日葵地上部和根部Pb富集量,氮磷钾肥配施对其促进作用最显著。尽管各施肥处理下欢乐火炮竹地上部Pb含量均显著高于LD5009和T562,但由于其地上部生物量相对较低,其Pb富集量反而显著低于LD5009和T562。因此,施肥对向日葵Pb修复效率的提高作用可通过促

表 2 施肥对三种向日葵根际土壤 pH 及 Pb 形态的影响

Table 2 Effect of fertilizers on the pH and Pb species in the rhizosphere soil of three sunflower cultivars

品种 Cultivar	处理 Treatments	pH	Pb 含量 Pb concentration (mg/kg)			
			弱酸提取态 Acid extractable	可还原态 Reducible	可氧化态 Oxidizable	残渣态 Residual
LD5009	CK	7.73 ± 0.02 a	95.31 ± 0.79 a	52.54 ± 0.97 a	31.86 ± 0.82 b	23.28 ± 0.59 b
	N	7.74 ± 0.02 a	89.18 ± 5.30 ab	53.56 ± 7.18 a	37.38 ± 1.44 b	28.55 ± 2.66 ab
	NP	7.74 ± 0.03 a	84.33 ± 4.72 b	53.71 ± 2.45 a	37.92 ± 2.25 b	36.04 ± 5.57 a
	NPK	7.72 ± 0.02 a	81.36 ± 6.45 b	54.73 ± 4.26 a	47.51 ± 6.25 a	28.40 ± 8.67 ab
欢乐火炮竹 Huanlehuopaozhu	CK	7.72 ± 0.04 a	98.44 ± 2.30 a	40.20 ± 3.20 a	41.94 ± 8.03 a	24.75 ± 11.85 a
	N	7.75 ± 0.03 a	90.25 ± 7.08 b	40.01 ± 4.48 a	47.78 ± 6.61 a	30.63 ± 3.31 a
	NP	7.76 ± 0.01 a	92.71 ± 1.84 ab	44.23 ± 4.52 a	51.90 ± 5.35 a	29.82 ± 5.90 a
	NPK	7.74 ± 0.01 a	81.71 ± 3.03 c	43.54 ± 4.43 a	51.82 ± 4.64 a	38.27 ± 7.87 a
T562	CK	7.70 ± 0.01 b	95.49 ± 4.99 a	47.29 ± 3.51 a	43.36 ± 2.52 b	27.53 ± 2.72 a
	N	7.70 ± 0.01 b	92.58 ± 4.28 a	42.18 ± 6.31 a	44.75 ± 3.44 b	35.82 ± 6.20 a
	NP	7.74 ± 0.02 a	89.15 ± 2.35 a	42.11 ± 5.70 a	56.81 ± 4.25 a	33.92 ± 5.04 a
	NPK	7.73 ± 0.02 ab	88.30 ± 4.78 a	42.22 ± 3.99 a	60.05 ± 5.37 a	28.10 ± 3.81 a
方差分析 ANOVA						
品种 Cultivar		4.137*	2.642	23.416***	23.122***	0.634
处理 Treatment		2.590	12.677***	0.241	15.260***	3.086*
品种 × 处理 Cultivar × treatment		0.922	1.142	0.766	1.376	0.216

注 (Note): 同列数据后不同字母表示同一向日葵品种不同处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平 Values followed by different letters in the same column mean significant difference among treatments ($P < 0.05$). *— $P < 0.05$; ***— $P < 0.001$.

进向日葵对 Pb 的吸收转运以及提高生物量两个方面实现, 其中, 促进向日葵生长可能是提高其修复效率的主要因素^[25]。

植物体内重金属的亚细胞区隔化是植物对重金属耐性和解毒的重要机制, 对向日葵叶中 Pb 在不同亚细胞组分中分布的研究有助于阐明向日葵对 Pb 的解毒和生物富集机制^[14, 33]。在本研究中, 三种向日葵叶片亚细胞组分中 Pb 含量分布依次为金属富集颗粒 > 细胞碎屑 > 热稳定蛋白 > 细胞器 > 热敏感蛋白。细胞壁是植物抵抗重金属胁迫的第一道屏障, 细胞壁上含有大量羟基和羧基等官能团, 提供大量带负电荷的结合位点与 Pb^{2+} 结合, 从而限制 Pb 的跨膜运输, 保障植物正常的生理代谢^[34]。本研究中, 施肥处理促进了向日葵对 Pb 的吸收, 随着向日葵地上部 Pb 含量的提高, 其在细胞碎屑组分中的含量和分布比例也随之显著提高, 其中欢乐火炮竹亚细胞组分中 Pb 含量提高幅度最大, LD5009 次之, T562 则无显著差异, 其结果与三种向日葵 Pb 富集能力差异的

研究结果一致, 进一步说明了细胞壁是植物体内 Pb 的首要结合点位, 是向日葵体内重要的 Pb 富集机制^[33]。随着进入向日葵体内 Pb 浓度的升高, 当细胞壁上结合点位饱和后, 过量的 Pb 会跨膜进入细胞内与亚细胞组分结合, 其中金属富集颗粒组分 Pb 分布比例在 56.1%~86.4%, 且不同施肥处理下, 金属富集颗粒组分中 Pb 含量也随之增加。金属富集颗粒体为重金属进入细胞后发生沉淀作用而形成的不溶性结核, 从而降低细胞中重金属离子的活性和毒性, 其主要储存在液泡中, 也可分布在其他细胞器组分^[13-14]。研究表明, 将过量的 Pb 区隔在金属富集颗粒组分可能是 Pb 胁迫下向日葵在亚细胞水平上的重要解毒机制^[35]。热稳定蛋白组分包括植物螯合肽 (phytochelatins, PCs) 与金属硫蛋白 (metallothioneins, MTs) 等, 有研究表明, Pb 胁迫诱导植物体内产生植物螯合肽, 从而与进入植物细胞内的 Pb 进行络合以减轻其毒害^[36]。而本研究中 Pb 在向日葵热稳定蛋白中的分布比例仅占 2.0%~6.6%, 且施肥处理下向日

葵体内 Pb 含量的提高也未引起热稳定蛋白中 Pb 含量的显著变化,这与 Li 等^[34]对小蓬草 Pb 胁迫下亚细胞区隔化的研究结果一致,其原因可能是向日葵体内 Pb 与金属硫蛋白结合是一个过渡机制,与金属硫蛋白结合的 Pb 被转运到金属富集颗粒形成位点,从而增加了金属富集颗粒组分中 Pb 含量^[37]。因此,金属颗粒组分和热稳定蛋白等植物体内重金属低活性组分可以整合为一个综合概念—生物解毒组分,而将对重金属敏感的组分(细胞器和热敏感蛋白)作为一个整体组分—金属敏感组分来研究,将有助于揭示植物重金属潜在毒性和解毒机制^[38]。本研究中向日葵体内 Pb 在生物解毒组分中的分布比列为 70.3%~89.6%,而在金属敏感组分中仅占 1.2%~3.3%,且在施肥促进向日葵 Pb 吸收的情况下,其金属敏感组分中 Pb 含量并没有表现出显著提高,可知向日葵体内细胞碎屑和金属富集颗粒中 Pb 的分布是导致三个向日葵品种对土壤中 Pb 富集能力差异的重要机制。

土壤中 Pb 的迁移性和有效性受土壤 pH、Eh、CEC、有机质等理化因素的影响,其本质直接影响土壤中 Pb 的赋存形态,化学肥料的添加可引起土壤中这些性质的变化,从而使土壤 Pb 形态发生改变,进一步影响植物对 Pb 的吸收^[39]。本研究通过 BCR 逐步提取法将向日葵根际土壤中 Pb 形态分为弱酸提取态、可还原态、可氧化态以及残渣态,不同形态 Pb 的生物有效性也不同,弱酸提取态主要包括可交换态和碳酸盐结合态,在土壤环境中可移动性和生物有效性最强,是土壤中植物可吸收利用的主要形态,受土壤 pH 等因素的调控;可还原态主要为铁锰氧化物结合态,当土壤环境中 Eh 降低时,部分可被还原进入土壤溶液中,具有潜在生物有效性,其有效性低于弱酸提取态;可氧化态主要为有机结合态,在土壤环境中较为稳定,难以释放到土壤溶液中被生物吸收利用,有效性仅高于残渣态。本研究中,各施肥处理下向日葵根际土壤 Pb 形态分布特征均表现为弱酸提取态 > 可还原态 > 可氧化态 > 残渣态,弱酸提取态和可还原态总量占 50%~70%,刘霞等^[40]对潮土和潮褐土中 Pb 形态的研究发现土壤中碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态占绝对优势,总和可达 40%~80%,其研究结果与本文一致。本研究中,施肥处理对土壤 pH 没有显著影响,而 NP 和 NPK 处理却显著降低了土壤弱酸提取态 Pb 含量,其主要原因可能是施肥带入的 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 和 K^+ 等阳离子将土壤胶体表面吸附的 Pb^{2+} 置换出来,再通过 H_2PO_4^- 与土壤中 Pb^{2+} 形成低溶解度的磷酸铅盐,从而

降低了弱酸提取态 Pb 含量^[30]。尽管如此,施肥处理下三种向日葵品种地上部 Pb 积累量仍较对照有显著增加,其原因可能有两方面:其一,本研究供试土壤为铅锌冶炼厂周边污染土壤,主要污染来源为大气沉降,因而其土壤中 Pb 活性较高。在 NP 和 NPK 处理下,三种向日葵根际土壤弱酸提取态 Pb 含量尽管有所降低(5.8%~17.0%),但其土壤弱酸提取态 Pb 含量仍处于较高水平(81.36~92.71 mg/kg),远高于其他形态(28.10~60.05 mg/kg);其二, NP 和 NPK 处理显著促进了三种向日葵根系生长(22.2%~72.9%),从而增加了根系与土壤颗粒表面的接触面积,促进了向日葵对根际土壤中 Pb 的吸收转运^[32]。此外,本研究还发现不同向日葵品种根际可还原态 Pb 含量有很大差异,且受施肥的影响较小,其可能是由于不同向日葵品种在 Pb 胁迫下根系分泌物的总量和组成不同,导致了不同品种根际土壤 pH、Eh 和有机酸的差异,从而反过来调节 Pb 在根际土壤中的化学过程^[41]。总体而言,本研究中,氮磷钾配施处理下,三种向日葵根际弱酸提取态 Pb 含量降低了 7.5%~17.0%,而三种向日葵根部生物量则显著提高了 46.6%~72.9%。可知,尽管施肥处理,尤其是添加磷肥使土壤中 Pb 有从生物可利用态向稳定态转化的趋势,但由于本研究供试土壤的 Pb 污染特性,其土壤 Pb 有效性降低并不显著,而施肥对向日葵根系和地上部生长的促进作用远大于对土壤 Pb 有效性的降低效果,增加了向日葵根系对土壤中 Pb 的吸收面积,从而促进土壤中 Pb 向植物系统的迁移。

4 结论

1) 供试三种向日葵品种生物量和 Pb 富集能力具有显著差异,施肥显著促进了向日葵生长和对 Pb 的吸收转运,氮磷钾肥料配施处理对三种向日葵地上部 Pb 富集量的提高作用最强。虽然欢乐火炮竹和 T562 地上部分 Cd 含量相对较高,但 LD5009 生物量较大,其地上部 Pb 富集量反而最高。

2) 三种向日葵品种体内细胞碎屑和金属富集颗粒中 Pb 的分布差异是导致其土壤 Pb 富集能力差异的重要机制。氮磷钾配施处理显著提高了 Pb 在供试三种向日葵叶片细胞碎屑和金属富集颗粒组分的含量,可能是其促进向日葵 Pb 吸收转运的重要机制。

3) 施肥处理对供试三种向日葵品种根际土壤 Pb 形态有不同的影响,土壤中弱酸提取态为植物可吸收利用的主要形态, NP 和 NPK 处理虽然降低了

向日葵弱酸提取态 Pb 含量, 但其对向日葵根系和地上部生长的促进作用远大于对土壤 Pb 有效性的降低效果, 因而可促进向日葵根系对土壤中 Pb 的吸收转运, 有效提高了向日葵对 Pb 的修复效率。

参 考 文 献:

- [1] 蔡美芳, 李开明, 谢丹平, 等. 我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(120): 223–230.
Cai M F, Li K M, Xie D P, *et al.* The status and protection strategy of farmland soils polluted by heavy metals[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(120): 223–230.
- [2] 陈同斌, 雷梅, 杨军, 等. 关于重金属污染土壤风险控制区划的研究与建议[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 321–326.
Chen T B, Lei M, Yang J, *et al.* Discussion on zoning of soil environmental risk control and remediation contaminated by heavy metals on regional scale[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 29(3): 321–326.
- [3] 骆永明, 滕应. 我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 145–152.
Luo Y M, Teng Y. Regional difference in soil pollution and strategy of soil zonal governance and remediation in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 145–152.
- [4] 王庆海, 却晓娥. 治理环境污染的绿色植物修复技术[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 261–266.
Wang Q H, Que X E. Phytoremediation—a green approach to environmental clean-up[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(2): 261–266.
- [5] Keller C, Hammer D. Alternatives for phytoextraction: biomass plants versus hyperaccumulators[J]. *Geophysical Research Abstracts*, 7(03285), 2005.
- [6] 李翠兰, 邵泽强, 王玉军, 等. 几种花卉植物对铅富集特征的研究[J]. 水土保持学报, 2010, (4): 127–130.
Li C L, Shao Z Q, Wang Y J, *et al.* Enrichment characteristics of Pb by several kinds of ornamental plants[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, (4): 127–130.
- [7] 刘家女, 周启星, 孙挺. Cd-Pb复合污染条件下3种花卉植物的生长反应及超积累特性研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(12): 2039–2044.
Liu J N, Zhou Q X, Sun T. Growing responses and hyperaccumulating characteristics of three ornamental plants to Cd-Pb combined pollution[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(12): 2039–2044.
- [8] Ok Y S, Usman A R A, Lee S S, *et al.* Effects of rapeseed residue on lead and cadmium availability and uptake by rice plants in heavy metal contaminated paddy soil[J]. *Chemosphere*, 2011, 85(4): 677–682.
- [9] 王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 等. 长期施肥对土壤重金属积累和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 257–263.
Wang T F, Tan C Y, Cao X Y, *et al.* Effects of long-term fertilization on the accumulation and availability of heavy metals in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 257–263.
- [10] 俞花美, 焦鹏, 葛成军, 等. 施肥措施对重金属污染土壤-植物系统影响的研究进展[J]. 热带农业科学, 2012, 32(2): 61–66.
Yu H M, Jiao P, Ge C J, *et al.* Effect of fertilization measures on heavy metals contamination of soils and plant system[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2012, 32(2): 61–66.
- [11] 郭劲君, 杨军, 胡健, 等. 施肥对硫华菊和波斯菊吸收积累铅的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1744–1751.
Guo J J, Yang J, Hu J, *et al.* Effects of fertilization on lead uptake and accumulation by *Cosmos sulphureus* and *Cosmos bipinnatus*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(6): 1744–1751.
- [12] Quevauviller P, Rauret G, López-Sánchez J F, *et al.* Certification of trace metal extractable contents in a sediment reference material (CRM 601) following a three-step sequential extraction procedure[J]. *Science of the Total Environment*, 1997, 205(2–3): 223–234.
- [13] Wallace W G, Lee B G, Luoma S N. Subcellular compartmentalization of Cd and Zn in two bivalves. I. Significance of metal-sensitive fractions (MSF) and biologically detoxified metal (BDM)[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, 249: 183–197.
- [14] Lavoie M, Le Faucheur S, Fortin C, *et al.* Cadmium detoxification strategies in two phytoplankton species: metal binding by newly synthesized thiolated peptides and metal sequestration in granules[J]. *Aquatic Toxicology*, 2009, 92(2): 65–75.
- [15] Zhang H, Guo Q, Yang J, *et al.* Subcellular cadmium distribution and antioxidant enzymatic activities in the leaves of two castor (*Ricinus communis* L.) cultivars exhibit differences in Cd accumulation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 120: 184–192.
- [16] Cornu J Y, Bakoto R, Bonnard O, *et al.* Cadmium uptake and partitioning during the vegetative growth of sunflower exposed to low Cd²⁺ concentrations in hydroponics[J]. *Plant and Soil*, 2016, 404(1–2): 263–275.
- [17] Laporte M A, Sterckeman T, Dauguet S, *et al.* Variability in cadmium and zinc shoot concentration in 14 cultivars of sunflower (*Helianthus annuus* L.) as related to metal uptake and partitioning[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 109: 45–53.
- [18] Shaheen S M, Rinklebe J. Phytoextraction of potentially toxic elements by Indian mustard, rapeseed, and sunflower from a contaminated riparian soil[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, 37(6): 953–967.
- [19] Niu Z, Sun L, Sun T, *et al.* Evaluation of phytoextracting cadmium and lead by sunflower, ricinus, alfalfa and mustard in hydroponic culture[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(8): 961–967.
- [20] Nehnevajova E, Herzig R, Federer G, *et al.* Screening of sunflower cultivars for metal phytoextraction in a contaminated field prior to mutagenesis[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2005, 7(4): 337–349.
- [21] 聂俊华, 刘秀梅, 王庆仁. Pb超富集植物对营养元素N、P、K的响应[J]. 生态环境, 2004, 13(3): 306–309.
Nie J H, Liu X M, Wang Q R. Effects of nutrient elements on the lead uptake by hyperaccumulators[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(3): 306–309.
- [22] Li N, Li Z, Fu Q, *et al.* Agricultural technologies for enhancing the phytoremediation of cadmium-contaminated soil by *Amaranthus hypochondriacus* L.[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2013, 224(9): 1673.

- [23] Panković D, Plesničar M, Arsenijević-Maksimović I, *et al.* Effects of nitrogen nutrition on photosynthesis in Cd-treated sunflower plants[J]. *Annals of Botany*, 2000, 86(4): 841–847.
- [24] Park J H, Bolan N, Megharaj M, *et al.* Relative value of phosphate compounds in reducing the bioavailability and toxicity of lead in contaminated soils[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, 223(2): 599–608.
- [25] 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 等. 施肥对向日葵吸收积累Cd的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(11): 5189–5197.
Cao L, Yang J X, Guo J J, *et al.* Effect of fertilizers on cadmium uptake and accumulation by sunflowers[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(11): 5189–5197.
- [26] Ahmad M S A, Ashraf M, Hussain M. Phytotoxic effects of nickel on yield and concentration of macro- and micro-nutrients in sunflower (*Helianthus annuus* L.) achenes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185(2–3): 1295–1303.
- [27] 侯文峰, 徐正伟, 李小坤, 等. 9个水稻品种对氮, 磷和钾肥的响应及差异[J]. *中国土壤与肥料*, 2015, (1): 18–23.
Hou W F, Xu Z W, Li X K, *et al.* The difference in response of nine rice varieties to nitrogen, phosphorus and potassium nutrient[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2015, (1): 18–23.
- [28] Rizwan M, Ali S, Rizvi H, *et al.* Phytomanagement of heavy metals in contaminated soils using sunflower: a review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2016, 46(18): 1498–1528.
- [29] Zaccheo P, Crippa L, Pasta V D M. Ammonium nutrition as a strategy for cadmium mobilisation in the rhizosphere of sunflower[J]. *Plant and Soil*, 2006, 283(1–2): 43–56.
- [30] 徐明岗, 曾希柏, 周世伟. 施肥与土壤重金属污染修复[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Xu M G, Zeng X B, Zhou S W. Fertilization and remediation of heavy metal contaminated soil[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [31] 祁由菊, 崔德杰. 氮钾肥对污染土壤中蔬菜生长及吸收铅的影响[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(4): 374–377.
Qi Y J, Cui D J. Influence of N, K nutrient levels on growth and Pb uptake ability of *Ipomoea Aquatica*[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(4): 374–377.
- [32] Tu C, Zheng C R, Chen H M. Effect of applying chemical fertilizers on forms of lead and cadmium in red soil[J]. *Chemosphere*, 2000, 41(1–2): 133–138.
- [33] Qiao X, Zheng Z, Zhang L, *et al.* Lead tolerance mechanism in sterilized seedlings of *Potamogeton crispus* L.: subcellular distribution, polyamines and proline[J]. *Chemosphere*, 2015, 120: 179–187.
- [34] Li Y, Zhou C, Huang M, *et al.* Lead tolerance mechanism in *Conyza canadensis*: subcellular distribution, ultrastructure, antioxidative defense system, and phytochelatin[J]. *Journal of Plant Research*, 2016, 129(2): 251–262.
- [35] Zhou G, Guo J, Yang J, *et al.* Effect of fertilizers on Cd accumulation and subcellular distribution of two cosmos species (*Cosmos sulphureus* and *Cosmos bipinnata*)[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20(9): 930–938.
- [36] Mishra S, Srivastava S, Tripathi R D, *et al.* Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) involves induction of phytochelatin and antioxidant system in response to its accumulation[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(6): 1027–1039.
- [37] Yang J, Guo J, Yang J. Cadmium accumulation and subcellular distribution in populations of *Hylotelephium spectabile* (Boreau) H. Ohba[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(31): 30917–30927.
- [38] Rainbow P S. Trace metal bioaccumulation: models, metabolic availability and toxicity[J]. *Environment International*, 2007, 33(4): 576–582.
- [39] 贺京哲, 孙慧敏, 姜延吉, 等. 不同种类化肥对壤土吸附解吸铅、镉行为的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(4): 146–152.
He J Z, Sun H M, Jiang Y J, *et al.* Effect of different type fertilizers on the adsorption and desorption of heavy metals in the loess soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(4): 146–152.
- [40] 刘霞, 刘树庆, 唐兆宏. 河北主要土壤中Cd、Pb形态与油菜有效性的关系[J]. *生态学报*, 2001, 22(10): 1688–1694.
Liu X, Liu S Q, Tang Z H. The relationship between Cd and Pb forms and their availability to rape in major soils of Hebei province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 22(10): 1688–1694.
- [41] Niu Z X, Li X D, Sun L N, *et al.* Changes of three organic acids in the process of Cd and Pb phytoextraction by *Helianthus annuus* L.[J]. *Plant Soil & Environment*, 2012, 58(11): 487–494.