植物营养与肥料学报 2012,18(2):382-389
Plant Nutrition and Fertilizer Science

可溶性磷肥对重金属复合污染土壤东南景天提取锌/镉及其养分积累的影响

黄化刚,李廷强,朱治强,王凯,杨肖娥*
(环境修复与生态健康教育部重点实验室,浙江大学环境与资源学院,浙江杭州 310058)

摘要: 施肥能显著提高植物产量,改变土壤环境中元素的生物有效性,已成为植物修复过程中必要的强化措施。针对长期自然老化的重金属复合污染土壤,采用盆栽试验研究了 KH_2PO_4、$Ca(H_2PO_4)_2$、NaH_2PO_4 和 $NH_4H_2PO_4$ 在 P_2O_5 0～352 mg/kg 时,对东南景天(*Sedum alfredii* H.)地上部锌(Zn)、镉(Cd)积累和养分元素吸收的影响。结果表明,外源施入磷酸二氢盐促进了东南景天生长,P_2O_5 352 mg/kg 显著增加了地上部干物质重;地上部磷(P)含量显著增加,Zn 含量随着 P 浓度的增加而显著升高,而 Cd 含量显著下降。磷肥降低了植物地上部氮(N)、中量元素钙(Ca)、镁(Mg)、硫(S)和微量元素锰(Mn)、铁(Fe)、铜(Cu)的含量,对钾(K)含量的影响不显著,地上部总碳(C)含量随 P 浓度增加而升高。一季收获后,东南景天地上部对 Zn 的提取量在施 P_2O_5 88 和 352 mg/kg 时显著增加,Cd 提取量仅在高浓度时显著升高。KH_2PO_4 和 $NH_4H_2PO_4$ 两种磷肥在施 P_2O_5 352 mg/kg 时对东南景天提取土壤 Zn、Cd 的效果最为明显,可在实际修复应用中使用。因此,合理磷酸盐施用能增加植物对 C 的生物固定,提高东南景天对 Zn/Cd 复合污染土壤的修复效率,缩短修复周期。

关键词: 可溶性磷肥;植物修复;锌;镉;复合污染土壤;东南景天
中图分类号: X53;S143.2+2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)02-0382-08

Effects of soluble phosphate fertilizer on Zn/Cd phytoextraction and nutrient accumulation of *Sedum alfredii* H. in co-contaminated soil

HUANG Hua-gang, LI Ting-qiang, ZHU Zhi-qiang, WANG Kai, YANG Xiao-e*
(*Ministry of Education Key Laboratory of Polluted Environment Remediation and Ecological Health/College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*)

Abstract: Improving the efficiency of phytoextraction is crucial for its successful application in phytoremediation technology practices. Fertilizer can increase plant biomass and change in phytoavailable soil elements, and is necessary strength in measurement of phytoremediation of contaminated soils. Mineral nutrition affects plant growth and metal absorption and subsequently accumulation of heavy metals through hyper-accumulator plants. This study assessed the effects of di-hydrogen phosphate [KH_2PO_4, $Ca(H_2PO_4)_2$, NaH_2PO_4 and $NH_4H_2PO_4$] applications (P_2O_5 22, 88 and 352 mg/kg soil) on growth, metal uptakes and nutrient contents of *Sedum alfredii* on aged zinc/cadmium (Zn/Cd) co-contaminated paddy soils. The addition of phosphates increase dry matter yield significantly at the phosphorus (P) supply level of P_2O_5 352 mg/kg ($P<0.05$). The shoot P and Zn concentrations are enhanced significantly ($P<0.05$), while the Cd concentration is decreased with the increase of phosphate levels. The phosphate application reduces N, the secondary nutrients (Ca, Mg and S) and micronutrients (Mn, Fe and Cu) concentrations, while the potassium (K) concentration has no significant effect except for NaH_2PO_4 treatment at P_2O_5 352 mg/kg. The total carbon concentration of shoots is increased at the high P level. The addition of P increases the amounts of Zn phytoextracted by *Sedum alfredii* at 88 and 352 mg/kg P_2O_5, significantly, and

收稿日期: 2011-08-18　　**接受日期:** 2011-10-18
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA06Z316);国家自然科学基金重点项目(30630046);上海同济高廷耀环保基金会资助。
作者简介: 黄化刚(1982—),男,四川北川人,博士研究生,主要从事污染土壤生物修复技术方面的研究。E-mail: huanghg82@gmail.com
*通讯作者 Tel: 0571-88982907, E-mail: xyang@zju.edu.cn

increases Cd significantly only at higher P levels ($P<0.05$) after one clipping. The highest phytoextraction of Zn and Cd was observed in case of KH_2PO_4 and $NH_4H_2PO_4$ treatments at P_2O_5 352 mg/kg. These results suggest that application of P fertilizers can increase bio-fixed amount of carbon, enhance removal of Zn and Cd from co-contaminated soils by *Sedum alfredii*, and shorten the time needed for accomplishing remediation goals.

Key words: soluble phosphate; phytoremediation; zinc; cadmium; co-contaminated soil; *Sedum alfredii* H.

现代农业、交通运输、矿山开采及制造工业等高强度的人类活动导致部分地区土壤中的重金属累积。低品质肥料、农药过度施用、污泥农用及污水灌溉等农事活动增加了我国农业土壤中的锌(Zn)、镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)含量，部分地区已超出了土壤安全限定标准，严重威胁到食品安全生产和人类健康[1-2]。如何恢复这些污染土壤的生产能力是目前环境和农业科学领域亟待解决的问题。

植物修复技术利用植物的生物泵及蒸腾压功能，伴随着吸收大量水分和养分的过程，提取和聚集土壤溶液中的重金属元素，被认为是最经济、实用的土壤修复方式[3]。植物提取土壤中重金属的量受超积累植物重金属含量和生物量大小的影响[4]。但是，目前的大多数重金属富集植物生长缓慢，生物量小，严重限制了超积累植物在实际植物提取过程中的应用，导致清洁土壤所需要的时间一般是 10～15 年，甚至更长。

植物提取从本质上讲是一种农业措施，其成功与否最终依赖于植物品种选择，施肥及灌溉等农艺管理措施的实施。因此，大量研究集中在利用各种化学方式获得土壤的最佳优化条件，提高重金属的植物可利用性，增加植物的重金属积累量[5]。研究最早且效果较好的为 EDTA，EDDS，EGTA 和 DTPA 等各种氨基羧酸类化合物[4-7]。然而，由于这类物质对植物生长的限制，化合物本身的毒害和环境持久性，以及伴随着重金属和营养元素渗滤等风险，其在实际大田的应用已受到越来越多的批判[8-9]。因此，寻找和研究新的环境友好型修复剂强化植物提取的工作很有必要。重金属污染土壤通常表现为肥力缺乏、酸碱度不适宜等障碍因子，限制了植物生长。施肥是土壤－植物系统中不可缺少的因素，矿质营养的交互作用关系到植物根系对元素的吸收、转运及生理活性等方面，其已成为植物修复污染土壤过程中必要的强化手段之一。但与普通作物施肥不同的是，植物修复过程中的施肥除考虑养分功能之外，还需关注肥料对植物累积重金属的影响。

国内外学者已经开展了部分肥料种类和形态对植物积累重金属的研究，但其影响规律不尽一致[10-16]。多数的结果发现，磷矿粉、钙镁磷肥等难溶性磷肥对土壤中重金属有钝化作用，磷肥施用降低了重金属在土壤中的有效性，限制了植物的吸收[13-14,17]。农业生产中磷肥种类较多，其化学性质及生理特征各不相同，并非所有磷肥对植物修复效率都有负面影响。同时，已有报道主要针对单一污染物，而对复合污染条件下磷肥效应研究较少，且大多数集中在营养液培养，脱离了土壤环境。本研究以特异的超积累植物东南景天(*Sedum alfredii*)为材料[18]，研究磷酸盐施用对长期自然老化锌/镉复合污染土壤重金属植物提取效率的影响。希望找到一种既增加植物吸收土壤重金属，又能促进植物生长，提高其生物产量的磷肥种类，为植物修复技术的强化应用提供依据。

1　材料与方法

1.1　供试土壤

盆栽试验土壤为浙江富阳市污灌区的锌、镉复合污染水稻土。其基本理化性质为：pH 值 7.8；砂粒、粉粒和粘粒含量分别为 56%、38% 和 6%；有机质含量 47 mg/kg；速效氮、磷、钾含量分别为 68.1、6.7、72.3 mg/kg；总锌、镉含量分别为 1678.6、6.4 mg/kg。土壤自然风干，磨细过 2 mm 尼龙网筛，充分混匀后备用。

1.2　试验设计

供试磷肥为分析纯的磷酸二氢钾(KH_2PO_4)、磷酸二氢钙[$Ca(H_2PO_4)_2$]、磷酸二氢钠(NaH_2PO_4)、磷酸二氢铵($NH_4H_2PO_4$)，各设置施 P_2O_5 22、88、352 mg/kg 土 3 个浓度梯度，均以不施用磷肥种植植物的土壤作为对照，共 13 个处理，每个处理重复 4 次。各处理施用 N(尿素)0.2 g/kg，K_2O(K_2SO_4)0.2 g/kg 作为基肥。称好的肥料粉末溶于蒸馏水，均匀喷施于备用土壤中，磷肥和底肥充分混匀后装入塑料盆中，每盆装土 1 kg，调节土壤吸水量至田间持水量的 65% 后，保鲜膜封闭盆钵口部，平衡 1 个月待用。

1.3　植物种植

在土壤平衡的同时，进行东南景天育苗，*Sedum*

alfredii 取至浙江省衢州市的古老铅锌矿，为锌、镉超积累生态型[18]。将东南景天用自来水冲洗干净，选择生长良好、粗细基本一致带顶芽 3 cm 长带叶枝条，预培养 2 周长出根系后，换用改良后的 Hoagland 营养液。待根系生长旺盛，苗高 6～8 cm，长出 8 片完整叶片时，选取长势一致的苗移入处理盆中，每盆 5 株。根据盆中土壤水分状况，每隔 2～3 d 浇入等量蒸馏水，使土壤含水量经常保持在田间持水量的 50%～60% 左右。植物生长 4 个月后，采用刈割的形式收获植物地上部。

1.4 元素分析

植物地上部收获后用自来水冲洗干净，再用超纯水漂洗 3 次，去除植物表面吸附的土壤及重金属颗粒；吸水纸吸干水分后，75℃烘干至恒重，记录地上部干物质重。用玛瑙球磨仪（Retsch RS100, Germany）将植物地上部磨细至 <0.25 mm，用于重金属及其他元素分析。植株锌、镉、钙、镁、钾、磷、铁、锰、铜含量采用 1∶5（v/v）$HClO_4$ –HNO_3 消煮，ICP – OES（Thermo scientific ICAP 6000 series, USA）测定；碳、氮、硫含量用元素分析仪（Elementar vario MAX CNS, Germany）测定。

1.5 数据处理

所有数据用 Excel 和 SPSS 软件（version 13.0）进行统计分析，采用 ANOVA 检验各处理在 95% 水平的显著性差异，用 origin Pro 8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 植物生长及干物质积累

施用磷肥后，植物生长良好，无任何肥害和重金属毒害现象，且在施 P_2O_5 352 mg/kg 时，东南景天的长势明显优于对照及低浓度磷肥处理（图 1）。地上部的干物质重为 2.3～4.4 g/pot，与不施磷肥的对照相比，不同磷肥种类处理下，地上部生物量均表现出随着磷肥浓度的增加而升高。KH_2PO_4、$Ca(H_2PO_4)_2$、NaH_2PO_4、$NH_4H_2PO_4$ 对生物量的增产率分别为 46%、62%、54% 和 78%，其中，$NH_4H_2PO_4$ 的增产效果最明显。

2.2 地上部重金属含量

增施磷肥后，东南景天地上部镉含量显著降低（图 2）。22 和 88 mg/kg P_2O_5 处理间镉含量差异不显著（除 KH_2PO_4），但均显著低于对照。352 mg/kg P_2O_5 处理地上部镉含量降到最低，约为 35 mg/kg，KH_2PO_4、$Ca(H_2PO_4)_2$、NaH_2PO_4、$NH_4H_2PO_4$ 与对照相比分别下降了 26%、41%、33%、39%。

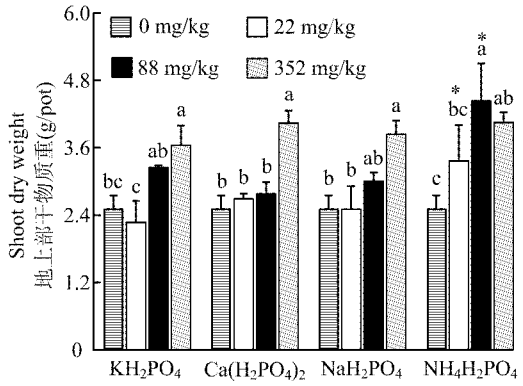

图 1 不同磷肥处理下植物地上部生物量变化

Fig. 1 Effects of phosphate treatments on shoot dry weights of *Sedum alfredii*

[注（Note）：柱上不同小写字母表示同一磷肥种类不同处理浓度间差异显著（$P < 0.05$）Different letters above the bars indicate statistically different small between treatments with different phosphorus application rates for the same phosphorus fertilizer（$P < 0.05$）. * 表示同一施肥量不同磷肥种类间差异显著（$P < 0.05$）Indicates significant difference between different phosphorus fertilizer treatments at the same application rate of P_2O_5（$P < 0.05$）.]

东南景天地上部锌含量为 1965～3631 mg/kg，且随着磷肥施用浓度的提高而增加。当 P_2O_5 施用量为 352 mg/kg 时，地上部锌含量与对照相比差异达到显著水平，KH_2PO_4、$Ca(H_2PO_4)_2$、NaH_2PO_4、$NH_4H_2PO_4$ 地上部锌含量的增幅分别为 85%、50%、46% 和 70%，其中以 KH_2PO_4 和 $NH_4H_2PO_4$ 对地上部锌含量的影响最明显。低浓度（P_2O_5 22 mg/kg）KH_2PO_4 和 $NH_4H_2PO_4$ 处理，地上部锌含量与对照无显著差异；22 和 88 mg/kg $Ca(H_2PO_4)_2$ 及 NaH_2PO_4 处理植物锌含量与对照相比增量均不明显。

2.3 地上部大量元素含量的变化

不同外源磷肥种类及用量处理植物地上部各营养元素的变化规律不尽一致（图 3）。磷肥施入对植物地上部氮含量无显著影响，仅在施 P_2O_5 352 mg/kg时，KH_2PO_4 和 NaH_2PO_4 处理显著降低了地上部氮含量。地上部磷含量随着磷肥施用量增加显著升高，22 mg/kg KH_2PO_4 和 88 mg/kg NaH_2PO_4 处理分别高出对照的 35% 和 24%；在施 P_2O_5 352 mg/kg 时，$Ca(H_2PO_4)_2$ 和 $NH_4H_2PO_4$ 处理分别高出对照 27% 和 21%。4 种磷肥及不同用量处理对东南景天地上部钾含量无显著影响（除 P_2O_5 用量为 352 mg/kg的 NaH_2PO_4 处理显著下降）。磷肥处理降低了植物地上部钙含量，在施 P_2O_5 352 mg/kg 时，

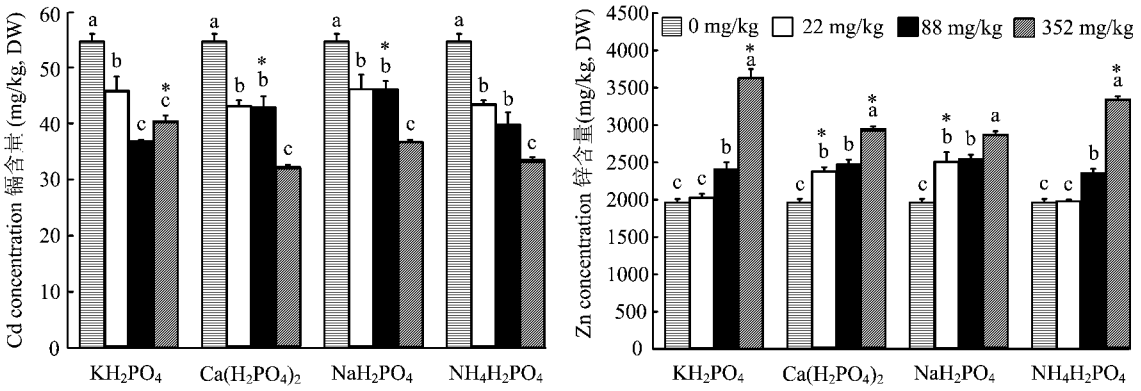

图 2　不同磷肥处理对东南景天地上部重金属含量的影响

Fig. 2　Effects of phosphate treatments on Zn/Cd concentration in shoots of *Sedum alfredii*

[注(Note)：柱上不同小写字母表示同一磷肥种类不同处理浓度间差异显著；Different small letters above the bars indicate statistically different between treatments with different phosphorus application rates for the same phosphorus fertilizer type($P<0.05$)．* 表示同一施肥量不同磷肥种类间差异显著($P<0.05$) Indicates significant difference between different phosphorus fertilizer treatments at the same application rate of P_2O_5 ($P<0.05$)．]

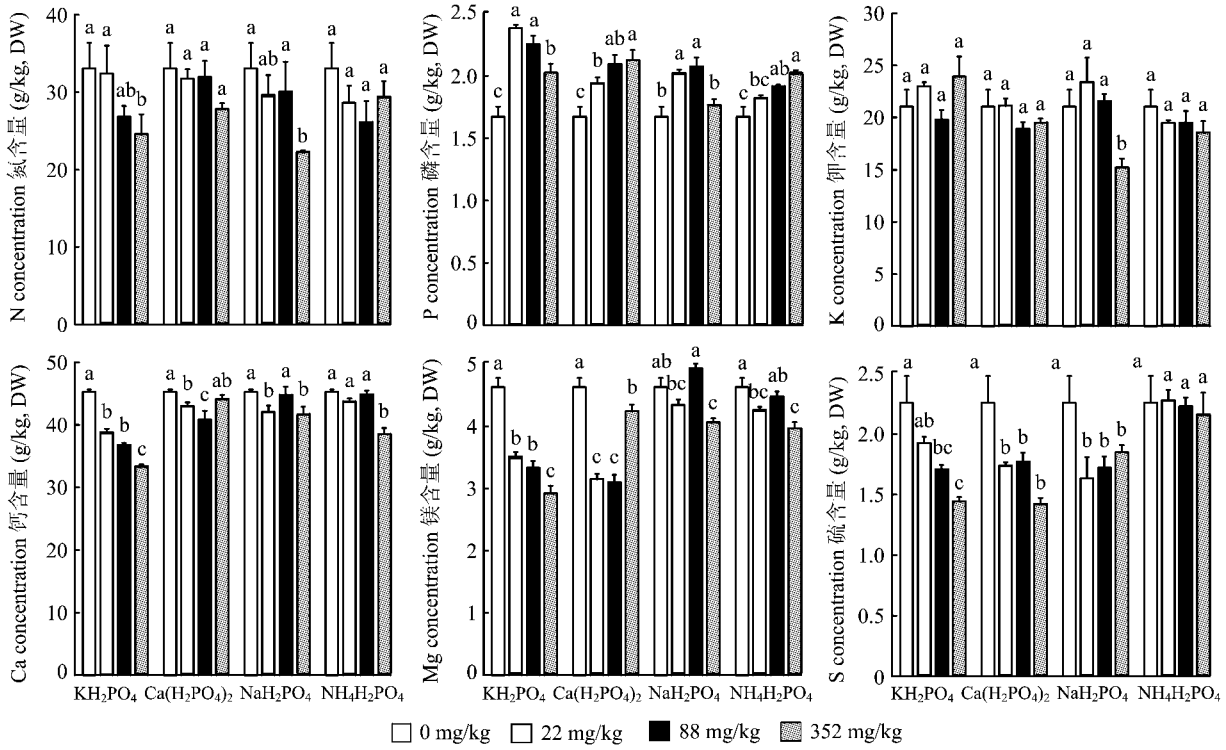

图 3　不同磷肥处理对东南景天地上部大量元素含量的影响

Fig. 3　Effects of different phosphate treatments on macronutrient concentration in shoots of *Sedum alfredii*

[注(Note)：柱上不同小写字母表示同一磷肥种类不同处理浓度间差异显著($P<0.05$) Different small letters above the bars indicate statistically different between treatments with different phosphorus application rates for the same phosphorus fertilizer type ($P<0.05$)．]

KH_2PO_4、NaH_2PO_4 和 $NH_4H_2PO_4$ 加入后，钙含量均显著下降。植物地上部镁含量下降，而 NaH_2PO_4 和 $NH_4H_2PO_4$ 仅在 P_2O_5 用量为 352 mg/kg 时表现明显。除 $NH_4H_2PO_4$ 外，其他 3 种磷肥均显著降低了地上部硫含量。

2.4　地上部微量元素含量的变化

东南景天地上部锰含量随磷肥用量增加而显著降低，施 P_2O_5 352 mg/kg 处理最为明显，KH_2PO_4、$Ca(H_2PO_4)_2$、NaH_2PO_4、$NH_4H_2PO_4$ 分别比对照下降了 33%、34%、23% 和 35%，不同肥料种类间无

明显差异。除高浓度 $Ca(H_2PO_4)_2$ 处理降低了植物铁吸收外,其余 3 种磷肥处理对此均无显著影响。KH_2PO_4 和 NaH_2PO_4处理后,东南景天地上部铜含量与对照相比无明显变化,但 $Ca(H_2PO_4)_2$ 和 $NH_4H_2PO_4$ 处理显著降低了铜含量,且各处理浓度间无显著差异(图 4)。

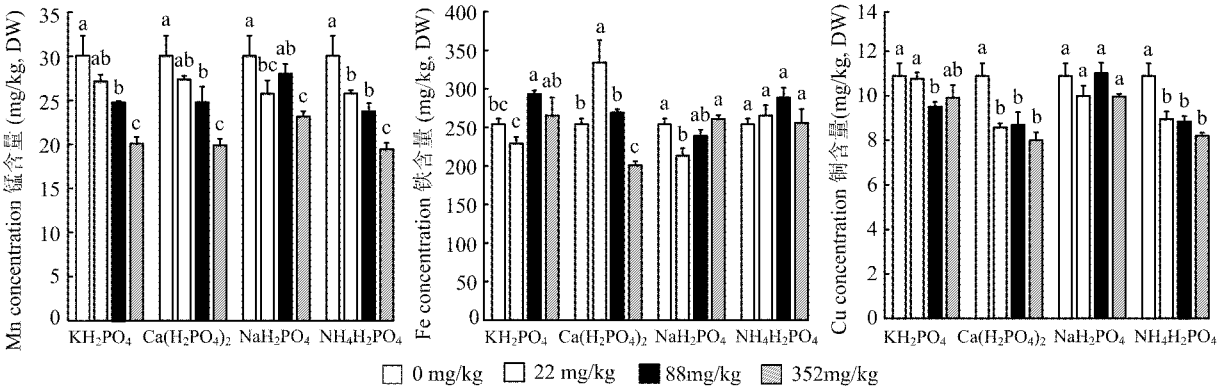

图 4 不同磷肥处理对东南景天地上部锰、铁、铜含量的影响

Fig. 4 Effects of different phosphate treatments on micronutrient concentrations (Mn, Fe and Cu) in shoots of *Sedum alfredii*

[注(Note):柱上不同小写字母表示同一磷肥种类不同处理浓度间差异显著($P<0.05$) Different small letters above the bars indicate statistically different between treatments with different phosphorus application rates for the same phosphorus fertilizer type ($P<0.05$).]

2.5 地上部总碳含量

与对照相比,施磷肥后东南景天地上部碳含量有增加的趋势,但 KH_2PO_4 和 $Ca(H_2PO_4)_2$ 处理增加量不明显(图 5)。施 P_2O_5 352 mg/kg 的 NaH_2PO_4 和 88 mg/kg 的 $NH_4H_2PO_4$ 处理,植物碳增加量与对照相比差异达显著水平,两者分别增加 4.8% 和 4.5%。这说明增施磷肥能够增加东南景天对碳的固定。

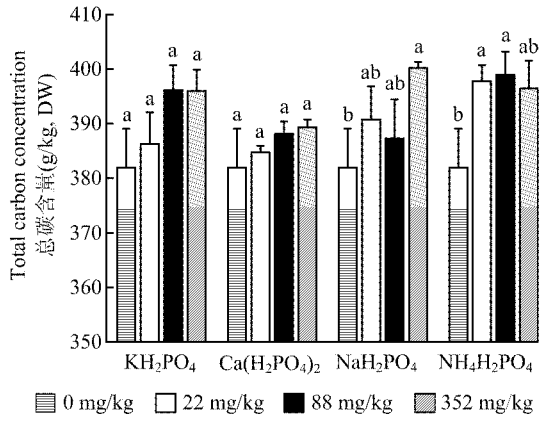

图 5 不同磷肥处理下东南景天地上部总碳含量变化

Fig. 5 Total carbon concentrations in shoots of *Sedum alfredii* under different phosphate treatments

[注(Note):柱上不同小写字母表示同一磷肥种类不同处理浓度间差异显著($P<0.05$) Different small letters above the bars indicate statistically different between treatments with different phosphorus application rates for the same phosphorus fertilizer type ($P<0.05$).]

2.6 植物锌、镉提取量的变化

超积累植物的重金属含量和干物质重决定了土壤中重金属的植物提取效率。经过收获一季东南景天,土壤中锌的提取量最高达 13.8 mg/pot,磷肥处理浓度越高,锌积累量也越大(表 1)。KH_2PO_4、$Ca(H_2PO_4)_2$、NaH_2PO_4、$NH_4H_2PO_4$ 4 种磷肥处理,植物锌的积累量分别是不施磷肥对照的 2.6、2.4、2.2 和 2.8 倍,镉的提取效率分别比对照增加了 20%、4%、11% 和 37%,施 P_2O_5 352 mg/kg 的 $NH_4H_2PO_4$ 处理对植物提取土壤中锌、镉的促进作用最为明显。

3 讨论

磷肥对植物积累重金属的研究多为负面效应,即外源施入磷肥减少了植物对重金属的吸收,蔬菜、谷类等常规作物过量磷将会导致作物锌缺乏[19-20],其在农产品安全生产中有实际的应用价值。但也有研究认为,不同小麦栽培品种锌含量随着土壤磷肥施用量增加均升高[15],5 ~50 mg/L KH_2PO_4 供应印度芥菜地上部锌含量从 580 mg/kg 增加到 674 mg/kg,高浓度磷肥显著增加了锌的积累[12],这与本研究的结果较为一致。同时,NH_4NO_3 处理也增加了印度芥菜对锌的吸收,且氮肥处理后地上部锌积累量增加了 1 倍,而磷肥处理仅增加了 20%[12]。该研究中,$NH_4H_2PO_4$ 施入后,东南景天生物量、地上部锌含量均显著高于其他处理,其原因在于磷酸盐

表 1　不同磷肥处理下东南景天地上部重金属积累量

Table 1　Zn and Cd extraction amounts from soil by shoots of *Sedum alfredii* under different phosphate treatments

磷用量 P rate (P_2O_5 mg/kg)	磷肥种类 P fertilizer type	锌积累量 Zn extraction amount (mg/pot)	镉积累量 Cd extraction amount (μg/pot)
0	KH_2PO_4	5.0 ±0.64 c	119.0 ±14.43 ab
	$Ca(H_2PO_4)_2$	5.0 ±0.64 b	119.0 ±14.43 a
	NaH_2PO_4	5.0 ±0.64 c	119.0 ±14.43 ab
	$NH_4H_2PO_4$	5.0 ±0.64 c	119.0 ±14.43 c
22	KH_2PO_4	4.5 ±0.73 cB	114.3 ±2.85 bB
	$Ca(H_2PO_4)_2$	6.4 ±0.32 bA	131.4 ±9.66 aA
	NaH_2PO_4	5.8 ±0.67bcAB	99.9 ±5.19 bC
	$NH_4H_2PO_4$	6.6 ±1.26 cA	126.9 ±4.90 bcA
88	KH_2PO_4	7.6 ±0.42 bB	128.8 ±4.03 abB
	$Ca(H_2PO_4)_2$	7.1 ±0.38 bB	114.5 ±9.05aBC
	NaH_2PO_4	7.6 ±0.61 bB	128.9 ±2.13 aB
	$NH_4H_2PO_4$	10.2 ±1.46 bA	147.8 ±6.71 abA
352	KH_2PO_4	12.8 ±1.12aAB	143.3 ±6.73 aB
	$Ca(H_2PO_4)_2$	12.1 ±0.85 aB	123.4 ±5.10 aC
	NaH_2PO_4	11.1 ±0.94 aB	132.4 ±4.74 aC
	$NH_4H_2PO_4$	13.8 ±0.69 aA	162.6 ±15.50 aA

注(Note)：结果为 4 次重复的平均值，不同小写字母表示同一肥料中不同施用量处理间在 5% 水平差异显著，不同大写字母表示同一施用量不同肥料种类间在 5% 水平差异显著 Different small letters indicate statistically different between treatments with different phosphorus application rates for the same phosphorus fertilizer ($P < 0.05$), and different capital letters indicate significant difference between different phosphorus fertilizer treatments at the same application rate of P_2O_5 ($P < 0.05$).

和铵根离子的共同作用，增施磷肥，配施一定量的氮素，能更有效地提高东南景天对锌污染土壤的修复效率。水培条件下适当增磷(0.5 ～1.0 mmol/L)极显著提高了东南景天地上部锌含量和积累量，高磷(2.0 mmol/L)则降低其含量和积累量[16]。4 种磷酸二氢盐(特别是较高浓度 P_2O_5 352 mg/kg 时)均显著增加了地上部磷和锌含量，这进一步证实了东南景天存在明显的“增磷诱导锌需求”现象，且这种现象是伴随着体内磷和锌的同时增加。但也有研究表明，磷对锌超积累植物 *Thlaspi caerulescens* 地上部生物量、锌积累量并无显著影响，甚至显著减少了根长和根系干重[10]。根系非可溶态磷和锌间存在正相关，线性回归斜率为 0.3，接近于 $Zn_3(PO_4)_2$ 化合物中 P/Zn 的比值，根系锌与无机磷酸盐沉淀抑制了锌向地上部运输[10]。增磷能显著地促进超积累植物东南景天对锌的吸收及锌由根系向地上部的运输和积累，表明增磷能够进一步满足超积累植物东南景天地上部对锌的高量需求，锌并未在根系与磷发生明显的沉淀。Ni 等[11]在矿山污染土壤中添加 NaH_2PO_4 发现，东南景天地上部锌含量和生物量仅在 P 31 mg/kg 处理时达最大值，而本研究中也发现 NaH_2PO_4 处理东南景天地上部生物量和锌含量均低于同浓度的其他肥料，但不同浓度处理锌积累量均高于对照，这可能与肥料施用方式、土壤特性、植物生长周期和水肥管理等有关，导致土壤中 P/Zn 交互机制不同。

石灰性褐土中磷锌交互作用为协同效应，土壤磷含量提高可降低其对锌离子的吸附容量和吸附能力，施磷明显提高了土壤中锌的有效性[21]。长期施用磷肥后，冬小麦根际土壤有效锌含量显著高于非根际土壤，但植株锌含量显著低于不施磷处理[20]。不同磷肥种类对植物积累重金属影响的差异与磷酸盐本身的性质及其对土壤 pH 的影响有关。磷酸二氢盐呈酸性，施入土壤后使土壤 pH 降低，消弱了土壤对锌的吸附，提高了锌有效性，能充分发挥磷与锌之间的正效应。磷酸氢二铵(DAP)施用降低了土壤 pH 值，但土壤重金属有效态更多的转化为残余态，油菜地上部 Zn/Cd 含量下降[17]。Basta 等[22]研究发现铵态氮肥施用能导致土壤酸化，2 个月培养后 DAP 使土壤 pH 从 7.1 降低到 6.5，且随培养时间延长有持续降低趋势，这进一步解释了 $NH_4H_2PO_4$ 处理地上部锌积累量最高的现象。磷酸二氢盐施入，导致土壤 pH 值下降，增加了土壤中锌的有效浓度，根系锌吸收增多；再加之东南景天强大的转运能力，使其地上部锌含量显著增加。

供试磷肥处理下，东南景天地上部镉含量变化趋势不同于锌，总体趋势是随着磷肥用量增加，镉含量下降。Dheri 等[14]也得到同样结果，施用磷肥降低了 *Spinacia oleracea* 地上部镉含量，砂土的下降量大于粉壤土。植物镉含量随可溶性磷增加持续下降，可能是镉与磷形成了复杂化合物，限制了植物对镉的吸收[23]。本研究中，磷酸盐吸附镉使镉沉淀为 $Cd(OH)_2$ 和 $Cd_3(PO_4)_2$[13]，造成镉在土壤中的原位固定。另外，镉和锌位于元素周期表中的同一主

族,它们会相互竞争根系表面的离子交换位点或在植物体内的转运子,影响元素吸收,供试土壤中较高浓度的 Zn^{2+} 限制了根对 Cd^{2+} 的吸收。但高浓度磷肥时,由于生物量的显著增加,磷肥增加了土壤镉的植物提取效率。而 Yu 和 Zhou 研究发现,$Ca(H_2PO_4)_2$ 使土壤镉有效性降低,显著降低了紫茉莉地上部镉积累量,磷肥处理降低了镉的生物富集系数,但是增加了其转移系数,植物体磷、镉沉淀减少镉毒害对植物的结构损伤[24]。但也有研究发现田间条件增施磷酸二氢铵,亚麻籽的镉含量和积累量均增加[25],这可能是由于磷酸盐的加入改变了土壤 pH 值,影响了根际环境的离子强度[25-26]。

植物体的各种营养元素参与了多种重要的生理代谢过程。Wang 等发现锌胁迫显著增加了油菜锌含量,但是降低了磷、铜、铁、锰、镁含量,这可能是植物锌毒害的一种症状[27]。磷肥施入降低了东南景天地上部大多数营养元素的含量,仅磷含量显著增加。这不同于孙琴等[16]的研究,但与 Zhao 等[10]研究一致,且地上部磷含量与 *Thlaspi caerulescens* 接近。表明东南景天体内有很强的维持正常磷素水平的能力,这可能是其在高锌条件下生长良好的原因之一。石灰性土壤上,增加锌浓度降低了 *Pistachio* 叶片铁、锰、铜含量,缺锌处理其含量增加[28]。本研究得到的结果与此类似,磷肥加入显著增加了东南景天对土壤锌的积累,植物体内高浓度锌抑制了根部的微量元素向地上部转运,造成间接影响;同时,土壤中过量磷酸盐可能与铁、锰、铜、钙等元素结合形成难溶形态,降低了其生物有效性,直接限制了植物吸收,小麦体内铜下降与高磷浓度下土壤水提取态铜含量明显降低有关[29]。磷肥极显著的增加了东南景天地上部的干物质重,生物量增加产生的"稀释效应"也可能是导致地上部大部分营养元素含量降低的原因。尽管地上部营养元素含量降低,但增施磷肥东南景天地上部大量元素和微量元素的积累量显著高于对照,这进一步从元素平衡角度解释了磷肥能增加东南景天地上部锌的积累。磷组成了植物体内核酸、辅酶Ⅰ(NAD)、辅酶Ⅱ(NADP)等许多重要化合物,这些化合物在光合作用、碳水化合物与蛋白质合成等生理过程中起着极其重要的作用[30]。施磷肥提高了紫花苜蓿根茬组织中非结构性碳水化合物的贮存量和利用效率,为刈割后的早期再生提供充足的养分,从而加快紫花苜蓿的再生[31]。本研究中,磷肥处理东南景天地上部碳含量均高于对照,这有利于刈割后地上部的快速生长,同时,增加了环境中有机碳的生物固定量,减少了 CO_2 等温室气体排放,有利于低碳农业发展,具有良好的生态环境效应。

4 结论

外源添加含不同阳离子(K^+、Ca^{2+}、Na^+、NH_4^+)的 $H_2PO_4^-$ 均促进了东南景天生长,P_2O_5 施用量 352 mg/kg 时显著增加了地上部生物量。植物地上部磷、锌含量随着磷浓度的增加而显著升高,东南景天体内存在着明显的磷、锌共积累效应。磷肥施用后植物地上部大量和微量元素总积累量显著增加,这有利于地上部对重金属的持续累积。施用磷肥增加了东南景天对环境中碳的固定,具有明显的生态效应。4 种磷肥均显著增加了东南景天地上部对锌和镉的提取量,其中,KH_2PO_4 和 $NH_4H_2PO_4$ 2 种磷肥在 P_2O_5 施用量为 352 mg/kg 时增加效果最为明显,大大提高了植物修复效率。但在实际的大田应用中,2 种肥料的具体施用量需要进一步研究。

参考文献:

[1] Tang W Z, Shan B Q, Zhang H *et al*. Heavy metal sources and associated risk in response to agricultural intensification in the estuarine sediments of Chaohu Lake Valley, East China[J]. J. Hazard. Mater., 2010, 176: 945-951.

[2] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China [J]. Microchem. J., 2010, 94: 99-107.

[3] Claus D, Dietze H, Gerth A *et al*. Application of agronomic practice improves phytoextraction on a multipolluted site[J]. J. Environ. Eng. Landsc., 2007, 15: 208-212.

[4] Bareen F E, Tahira S A. Efficiency of seven different cultivated plant species for phytoextraction of toxic metals from tannery effluent contaminated soil using EDTA [J]. Soil Sedi. Contam., 2010, 19: 160-173.

[5] Meers E, Tack F M G, Van Slycken S *et al*. Chemically assisted phytoextraction: A review of potential soil amendments for increasing plant uptake of heavy metals[J]. Int. J. Phytorem., 2008, 10: 390-414.

[6] Liu D, Islam E, Li T Q *et al*. Comparison of synthetic chelators and low molecular weight organic acids in enhancing phytoextraction of heavy metals by two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance[J]. J. Hazard. Mater., 2008, 153: 114-122.

[7] Luo C L, Shen Z G, Lou L Q *et al*. EDDS and EDTA-enhanced phytoextraction of metals from artificially contaminated soil and residual effects of chelant compounds [J]. Environ. Pollut., 2006, 144: 862-871.

[8] Di Palma L, Ferrantelli P. Copper leaching from a sandy soil: Mechanism and parameters affecting EDTA extraction [J]. J.

Hazard. Mater., 2005, 122: 85-90.

[9] Wu L H, Luo Y M, Xing X R *et al*. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil with Indian mustard and associated potential leaching risk[J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2004, 102: 307-318.

[10] Zhao F J, Shen Z G, McGrath S P. Solubility of zinc and interactions between zinc and phosphorus in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. Plant Cell Environ., 1998, 21: 108-114.

[11] Ni W Z, Sun Q, Yang X. Growth and zinc accumulation of *Sedum alfredii* Hance-a Zn hyperaccumulator as affected by phosphorus application [J]. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 2004, 72: 756-762.

[12] Hamlin R L, Schatz C, Barker A V. Zinc accumulation in Indian mustard as influenced by nitrogen and phosphorus nutrition[J]. J. Plant Nutr., 2003, 26: 177-190.

[13] Bolan N S, Adriano D C, Duraisamy P *et al*. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. I. Effect of phosphate addition[J]. Plant Soil, 2003, 250: 83-94.

[14] Dheri G S, Brar M S, Malhi S S. Influence of phosphorus application on growth and cadmium uptake of spinach in two cadmium-contaminated soils[J]. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2007, 170: 495-499.

[15] Imtiaz M, Alloway B J, Memon M Y *et al*. Zinc tolerance in wheat cultivars as affected by varying levels of phosphorus[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 2006, 37: 1689-1702.

[16] 孙琴，倪吾钟，杨肖娥，等. 磷对超积累植物-东南景天生长和积累锌的影响[J]. 环境科学学报，2003，23(6)：818-824.
Sun Q, Ni W Z, Yang X E *et al*. Effects of phosphorus on the growth, zinc absorption and accumulation in hyperaccumulator-*Sedum alfredii* Hance[J]. Acta Sci. Circumst., 2003, 23(6): 818-824.

[17] Chen S B, Xu M G, Ma Y B *et al*. Evaluation of different phosphate amendments on availability of metals in contaminated soil [J]. Ecotox. Environ. Safe., 2007, 67: 278-285.

[18] Yang X, Long X X, Ni W Z *et al*. *Sedum alfredii* H: A new Zn hyperaccumulating plant first found in China[J]. Chin. Sci. Bull., 2002, 47(19): 1634-1637.

[19] Lu Z G, Grewal H S, Grahamm R D. Dry matter production and uptake of zinc and phosphorus in two oilseed rape genotypes under differential rates of zinc and phosphorus supply[J]. J. Plant Nutr., 1998, 21(1): 25-38.

[20] 赵荣芳，邹春琴，张福锁. 长期施用磷肥对冬小麦根际磷、锌有效性及其作物磷锌营养的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2007，13(3)：368-372.
Zhao R F, Zou C Q, Zhang F S. Effects of long-term P fertilization on P and Zn availability in winter wheat rhizoshpere and their nutrition[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(3): 368-372.

[21] 刘忠珍，介晓磊，刘世亮，等. 石灰性褐土中磷锌交互作用及磷对锌吸附-解吸的影响[J]. 环境化学，2010，29(6)：1079-1085.
Liu Z Z, Jie X L, Liu S L *et al*. Interaction of phosphorus with zinc and the effects of phosphorus on the adsorption & desorption of zinc in calcareous cinnamon soil[J]. Environ. Chem., 2010, 29(6): 1079-1085.

[22] Basta N T, McGowan S L. Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil[J]. Environ. Pollut., 2004, 127: 73-82.

[23] Basta N T, Gradwohl R, Snethen K L *et al*. Chemical immobilization of lead, zinc, and cadmium in smelter-contaminated soils using biosolids and rock phosphate[J]. J. Environ. Qual., 2001, 30: 1222-1230.

[24] Yu Z G, Zhou Q X. Growth responses and cadmium accumulation of *Mirabilis jalapa* L. under interaction between cadmium and phosphorus[J]. J. Hazard. Mater., 2009, 167: 38-43.

[25] Grant C A, Bailey L D. Effects of phosphorus and zinc fertiliser management on cadmium accumulation in flaxseed[J]. J. Sci. Food Agric., 1997, 73: 307-314.

[26] Lambert R, Grant C, Sauvé S. Cadmium and zinc in soil solution extracts following the application of phosphate fertilizers[J]. Sci. Total Environ., 2007, 378: 293-305.

[27] Wang C, Zhang S H, Wang P F. The effect of excess Zn on mineral nutrition and antioxidative response in rapeseed seedlings [J]. Chemosphere, 2009, 75: 1468-1476.

[28] Shahriaripour R, Tajabadipour A. Zinc nutrition of *Pistachio*: Interaction of zinc with other trace elements[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 2010, 41: 1885-1888.

[29] 黄德明，徐秋明，李亚星，等. 土壤氮、磷营养过剩对微量元素锌、锰、铁、铜有效性及植株中含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2007，13(5)：966-970.
Huang D M, Xu Q M, Li Y X *et al*. Influence of soil N and P excess on the availability of Zn、Mn、Fe、Cu and there content in plant[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(5): 966-970.

[30] Berg W K, Cunningharm S M, Brouder S M *et al*. Influence of phosphorus and potassium on alfalfa yield and yield components [J]. Crop Sci., 2005, 45: 297-304.

[31] 姜慧新，沈益新，翟桂玉，等. 磷肥对紫花苜蓿再生过程中根茬组织非结构性碳水化合物利用的影响[J]. 草业学报，2009，18(3)：136-141.
Jiang H X, Shen Y X, Zhai G Y *et al*. Effects of phosphate fertilizer on utilization of non-structural carbohydrate in resident tissue of *Medicago sativa* during the early regrowth stage[J]. Acta Pratac. Sin., 2009, 18(3): 136-141.