

三种植物对土壤磷吸收和富集能力的比较

吴浩^{1,2} 卢志军¹ 黄汉东¹ 江明喜^{1*}

¹中国科学院水生植物与流域生态重点实验室, 中国科学院武汉植物园, 武汉 430074; ²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 筛选磷富集植物是磷矿废弃地土壤与植被修复的关键。该文以向日葵(*Helianthus annuus*)、苏丹草(*Sorghum sudanense*)、南瓜(*Cucurbita moschata*)为研究对象, 采用盆栽试验, 设置5个磷浓度(0、100、300、500和700 mg·kg⁻¹), 分别在3个不同生长时段(4周、7周、10周)内采样, 对这3种植物的磷吸收和富集能力进行了比较。结果表明: (1)在相同生长时间内, 向日葵、苏丹草、南瓜的地上部磷含量均随磷处理浓度的升高而增大, 最大值分别为9.67 g·kg⁻¹、4.86 g·kg⁻¹、6.32 g·kg⁻¹; 相同浓度下, 向日葵地上部磷含量随着生长时间的延长呈上升趋势, 苏丹草则呈下降趋势, 南瓜无显著变化; (2) 3种植物的地上部磷累积量均在磷处理浓度为700 mg·kg⁻¹时, 生长10周后达到最大值, 分别为217.83 mg·plant⁻¹、93.92 mg·plant⁻¹、135.82 mg·plant⁻¹; (3)各浓度处理下, 向日葵、苏丹草的地上部磷富集系数和转移系数均大于1.00, 南瓜的地上部磷富集系数和转移系数波动较大; 向日葵的富集系数和转移系数最大值分别达11.39和4.09。综合比较可知, 3种植物磷吸收和富集能力的大小顺序为: 向日葵>南瓜>苏丹草。向日葵各项富磷特征基本符合磷富集植物的筛选标准, 可作为磷矿废弃地土壤与植被修复的备选物种。

关键词 地上部磷含量, 富集系数, 转移系数, 磷矿废弃地, 向日葵, 苏丹草, 南瓜

引用格式: 吴浩, 卢志军, 黄汉东, 江明喜 (2015). 三种植物对土壤磷吸收和富集能力的比较. 植物生态学报, 39, 63–71. doi: 10.17521/cjpe.2015.0007

Comparison of phosphorus uptake and accumulation capacity among three plant species

WU Hao^{1,2}, LU Zhi-Jun¹, HUANG Han-Dong¹, and JIANG Ming-Xi^{1*}

¹Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; and ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Aims Phosphorus mining wasteland is a very special kind of degraded ecosystems, where vegetation and landscape are severely damaged. Our objective was to select plants suitable for phytoremediation of phosphorus-rich soils in mining wasteland.

Methods We conducted pot experiments to investigate phosphorus uptake and accumulation capacity in *Helianthus annuus*, *Sorghum sudanense* and *Cucurbita moschata* grown in soils with different levels of phosphorus supply. The phosphorus concentrations applied are 0, 100, 300, 500 and 700 mg·kg⁻¹. Phosphorus concentration, phosphorus accumulation, bioaccumulation and translation coefficient of the plants were measured for three growth periods (4 weeks, 7 weeks, 10 weeks), respectively.

Important findings Over the same growth period, phosphorus concentration in shoots of the three plant species increased with increasing phosphorus supplies, with the maximum of 9.67 g·kg⁻¹ in *H. annuus*, 4.86 g·kg⁻¹ in *S. sudanense*, and 6.32 g·kg⁻¹ in *C. moschata*. Under the same phosphorus treatments, phosphorus concentration significantly increased with growth time in shoots of *H. annuus*, decreased in shoots of *S. sudanense*, and did not significantly change in shoots of *C. moschata*. The aboveground total phosphorus accumulation in the three plant species all reached highest values when grown for 10 weeks in soils supplied with 700 mg·kg⁻¹ phosphorus, amounting to 217.83 mg·plant⁻¹ in *H. annuus*, 93.92 mg·plant⁻¹ in *S. sudanense*, 135.82 mg·plant⁻¹ in *C. moschata*, respectively. The bioaccumulation and translation coefficients in both *H. annuus* and *S. sudanense* exceeded 1.00 under each treatment. The peak values of the two coefficients were 11.39 and 4.09 for *H. annuus*. In conclusion, the phosphorus uptake and accumulation capacity of the tested plant species were in the order of *H. annuus* > *C. moschata* > *S. sudanense*, and *H. annuus* can be a possible candidate for phytoremediation of phosphorus mining wastelands.

Key words phosphorus concentration in shoots, bioaccumulation coefficient, translation coefficient, phosphorus mining wasteland, *Helianthus annuus*, *Sorghum sudanense*, *Cucurbita moschata*

Citation: Wu H, Lu ZJ, Huang HD, Jiang MX (2015). Comparison of phosphorus uptake and accumulation capacity among three plant species. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 63–71. doi: 10.17521/cjpe.2015.0007

我国磷矿资源储量丰富,居世界第二位,但是其“粗放型”的开发利用方式造成了资源的严重浪费(刘建雄, 2009),不仅如此,大量的磷矿开采后,其周边环境还遭到破坏而沦为磷矿废弃地。磷矿废弃地主要是由磷矿开采过程中的表层剥离土和废弃矿石渣堆积而成,植被与景观受到很大程度的破坏,成为一类十分特殊的退化生态系统(蓝崇钰等, 1993)。因其地表大面积裸露,土壤中高浓度的磷极易产生淋溶和侵蚀,使大量的磷随地表径流汇入水体,从而导致水体富营养化(付登高等, 2013)。有学者认为地表径流中的水溶性磷含量过高是水体富营养化的最主要原因,这已成为全球广泛关注的环境问题(Sharpley *et al.*, 2001)。因此,对磷富集土壤进行修复是治理水体富营养化的一条有效途径(Xiao *et al.*, 2009)。

植物修复技术是利用超富集植物对土壤中的元素进行吸收和富集,并通过刈割、收获等方式转移和清除土壤中有毒或过剩元素的一种绿色生态技术,其主要用于重金属污染土壤的修复(韦朝阳和陈同斌, 2001)。鉴于其成本低、见效快、绿色环保的优点,植物修复技术近年来受到不少学者的青睐,已被应用于磷过剩土壤的修复(Novak & Chan, 2002; Xiao *et al.*, 2009),即通过在磷过剩土壤中种植植物来吸收磷,将土壤中的磷转移到植物体内,从而降低土壤磷浓度。由于磷矿废弃地的土壤基质少,磷含量高,往往对一般植物产生毒害作用,不利于其生长繁殖,所以筛选适应能力强、对磷吸收和转移能力强的超富集植物是磷矿废弃地生态修复的关键(Sharma *et al.*, 2007; 郭彦荣等, 2009)。

目前,国内外已有许多学者对磷富集植物筛选及其机理进行了相关研究,并针对磷富集植物提出了一定的筛选标准。Novak和Chan (2002)认为,植物地上部磷含量高于 $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的植物才可作为磷富集植物。有学者研究发现, Gulf和Marshall两种不同基因型的多花黑麦草(*Lolium multiflorum*)在最佳环境条件下(土壤pH 5.6, 温度20–28 °C),其地上部磷含量均可超过干质量的1%,即 $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,表现出较强

的富磷特性(Sharma & Sahi, 2005),但它却不能抵御严寒和夏季高温。Sharma等(2007)利用盆栽试验从40多种豆类、蔬菜和牧草中筛选出黄瓜(*Cucumis sativus*)、西葫芦(*Cucurbita pepo*)作为磷富集植物,因其在高磷生境下不仅具有较高的生物量,且地上部磷含量能够达到 $14 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。近年来,国内学者也开始了磷富集植物的筛选研究。Xiao等(2009)通过野外采样对矿山生态型和非矿山生态型的12种优势植物的磷富集能力进行了比较分析,发现矿山生态型粗齿冷水花(*Pilea sinofasciata*)和水蓼(*Polygonum hydropiper*)地上部磷含量最高,分别为16.23和 $8.59 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,可作为潜在的磷富集土壤修复植物;Huang等(2012)则采用室内模拟实验,对两种生态型水蓼的磷富集能力进行了验证;刘霜等(2013)进一步探讨了两种生态型粗齿冷水花的富磷特征及其根系形态差异。

然而,现已筛选出的可用于大范围推广的磷富集植物物种数甚少,并且,关于植物磷富集能力在不同生长时段的变化规律研究鲜见报道。鉴于向日葵(*Helianthus annuus*)、苏丹草(*Sorghum sudanense*)生物量大、生长迅速、易于刈割等优点,且二者均为重金属修复植物,对胁迫环境的耐受性强(郭平等, 2007; 叶文玲等, 2008),很有可能成为磷富集土壤修复的潜在物种,有研究表明葫芦科植物可作为磷富集植物(Sharma *et al.*, 2007; 徐蕾等, 2012)。本文以向日葵、苏丹草、南瓜(*Cucurbita moschata*)为研究对象,采用盆栽试验探讨其生物量与磷处理浓度之间的关系,比较3种植物地上部磷含量及其磷累积总量的大小差异,分析高磷处理对植物富集系数和转移系数的影响,并揭示3种植物磷吸收和转移能力在不同时间尺度上的变化规律,以期磷富集植物的筛选提供科学依据,并为磷矿废弃地的生态治理与植被恢复提供新的备选物种和理论基础。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试土壤取自中国科学院武汉植物园,过筛去

除土壤中的石块、杂质,与砂质土壤按1:1比例混匀后备用。供试植物为向日葵、苏丹草和南瓜。3种植物的种子在实验温室内播种出苗后,将苗床转移至试验大棚进行炼苗,供盆栽试验备用。

1.2 试验设计

盆栽试验在武汉植物园试验大棚(四周空旷,顶盖为透明玻璃)内进行,栽培所用花盆规格为:口径22 cm,深16 cm。准确称取2.5 kg供试土壤装入盆内,于2013年3月20日进行施磷处理:设置5个磷水平,以 KH_2PO_4 的形式分别按0、100、300、500和700 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度施磷,即0、0.25、0.75、1.25、1.75 $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$ 。为使各个处理的土壤钾含量一致,以磷浓度700 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下钾含量为基准,通过计算,在其他磷浓度处理下施以相应量的 K_2SO_4 进行补齐(Huang *et al.*, 2012; 徐蕾等, 2012),且各处理施入0.3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 尿素作为基肥。试验期间进行3次采样,故以上每处理9个重复,3种植物盆栽共135盆。因试验大棚四周空旷,且花盆摆放仅占地约20 m^2 ,故忽略试验大棚内微环境的影响,分5个浓度区摆放花盆,以方便管理和采样,各浓度区之间间隔30 cm,各区内随机排列,并为花盆贴上标签。施磷处理后,让花盆中的土壤静置一段时间,使磷充分扩散、溶解在土壤中,一周以后,选择长势良好、大小一致的向日葵、苏丹草、南瓜幼苗分别移栽入各试验花盆。移栽后每天傍晚浇水,待幼苗成活后,隔天进行浇水。浇水采用普通浇花水壶,每次浇水适量,以刚好润湿土壤而不从盆底滴漏为宜。植物生长期间采用自然光照。

1.3 样品采集与测定

试验期间进行3次样品采集,采样时间分别为植株生长4周(前期)、7周(中期)、10周(后期),每次每个处理采集3个重复。采样时将整个植株从花盆中取出,用剪刀将植物地上部与根系分离,获得植物地上部和地下部,分别用清水冲洗掉植物体及根系上的泥土与杂物,再转移至烘箱,105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青30 min,80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重,称量植株地上部干质量。植物样粉碎后,称取一定量样品,采用微波消解仪(Ethos One, Milestone, Italy)进行消解,制备样液,并用钼锑抗比色法测定磷(鲍士旦, 2000)。采集植物样后,将盆中土壤混合均匀,取适量土样,自然风干后过100目筛。称取0.100 0–0.150 0 g土样,进行微波消解,制备样液,并用钼锑抗比色法进行土壤

全磷的测定(鲍士旦, 2000)。

1.4 地上部磷累积量、富集系数和转移系数

植物地上部磷累积量为地上部干质量与磷含量的乘积,即磷累积量(g) = 干质量(g) \times 磷含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) $\times 1\,000$ 。

富集系数指植物地上部磷含量与相应土壤中磷含量的比值;转移系数则是植物地上部磷含量与地下部磷含量的比值,两者综合反映了植物对土壤磷的吸收和转移能力。具体计算公式如下:

富集系数=植物地上部磷含量/土壤中磷含量;

转移系数=植物地上部磷含量/地下部磷含量。

1.5 数据处理

试验数据采用Excel 2010和SPSS 16.0软件进行统计分析。各处理使用one-way ANOVA进行方差分析,并采用最小显著差法(LSD)进行多重比较,在 $p < 0.05$ 水平上比较显著性差异。

2 结果和分析

2.1 土壤磷浓度对植物生物量的影响

不同浓度磷处理对供试植物(除苏丹草)的前4周生长影响显著($p < 0.05$)。随着土壤磷处理浓度的增大,向日葵、南瓜植株地上部生物量先增加后减少,说明高浓度磷处理可能对二者的前期生长有一定的抑制作用;当供试植物生长7周,向日葵、南瓜的地上部生物量在不同磷处理间均无显著性差异($p > 0.05$),而此时苏丹草地上部生物量却受到了磷处理浓度的显著影响($p < 0.05$),呈现出随浓度增大而增加的趋势(表1),对比分析可知,苏丹草对磷处理的响应较向日葵、南瓜迟缓。当供试植物生长10周,磷处理浓度对3种植物地上部生物量的影响均不显著($p > 0.05$),也就是说在植株生长后期,其生物量的增加不受磷处理的促进或抑制,可能是因为供试植物对供磷产生了耐性。另外,相同浓度磷处理下,三种植物在4周、7周、10周的生物量均呈现出显著差异($p < 0.05$),即随着生长时间的延长,其地上部生物量不断增大。

2.2 土壤磷浓度对植物地上部磷含量的影响

相同生长时间内,随着磷处理浓度的增加,向日葵、苏丹草(除10周外)和南瓜各处理水平之间地上部磷含量均出现显著差异($p < 0.05$)。其中向日葵各处理地上部磷含量表现出随磷处理浓度增大而大幅增加的趋势(图1),当生长时间为10周,700 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

表1 五种磷(P)浓度处理下3种植物各生长时期地上部生物量(g)(平均值±标准误差, n = 3)
Table 1 The aboveground biomass of three plant species over different growth periods at five phosphorus (P) concentrations (mean ± SE, n = 3)

P处理 P treatment (mg·kg ⁻¹)	向日葵 <i>Helianthus annuus</i>			苏丹草 <i>Sorghum sudanense</i>			南瓜 <i>Cucurbita moschata</i>		
	4周	7周	10周	4周	7周	10周	4周	7周	10周
	4 weeks	7 weeks	10 weeks	4 weeks	7 weeks	10 weeks	4 weeks	7 weeks	10 weeks
0	5.43 ± 0.29 ^{Cd}	14.68 ± 0.14 ^{Ba}	18.93 ± 0.67 ^{Aa}	2.66 ± 0.45 ^{Ca}	11.00 ± 0.43 ^{Bc}	22.87 ± 1.58 ^{Aa}	5.24 ± 0.24 ^{Cc}	11.43 ± 1.16 ^{Ba}	18.02 ± 1.01 ^{Aa}
100	7.31 ± 0.38 ^{Cc}	15.05 ± 0.48 ^{Ba}	18.18 ± 0.75 ^{Aa}	3.44 ± 0.32 ^{Ca}	9.98 ± 0.49 ^{Bc}	25.90 ± 2.79 ^{Aa}	8.52 ± 0.23 ^{Ca}	13.03 ± 0.75 ^{Ba}	19.20 ± 0.64 ^{Aa}
300	9.61 ± 0.73 ^{Ca}	15.78 ± 1.47 ^{Ba}	19.78 ± 0.43 ^{Aa}	3.71 ± 0.59 ^{Ca}	15.05 ± 1.00 ^{Bb}	30.18 ± 1.69 ^{Aa}	6.29 ± 0.56 ^{Cbc}	12.43 ± 0.15 ^{Ba}	19.62 ± 1.22 ^{Aa}
500	8.09 ± 0.30 ^{Cbc}	14.48 ± 0.62 ^{Ba}	22.65 ± 1.05 ^{Aa}	2.77 ± 0.65 ^{Ca}	15.62 ± 0.84 ^{Bb}	24.68 ± 0.64 ^{Aa}	6.81 ± 0.08 ^{Cb}	12.43 ± 0.84 ^{Ba}	17.15 ± 0.73 ^{Aa}
700	8.65 ± 0.23 ^{Cab}	16.30 ± 0.48 ^{Ba}	22.50 ± 2.04 ^{Aa}	3.16 ± 0.11 ^{Ca}	18.25 ± 0.89 ^{Ba}	27.43 ± 3.42 ^{Aa}	7.53 ± 0.65 ^{Cab}	14.90 ± 0.68 ^{Ba}	21.43 ± 0.73 ^{Aa}

同一列中的不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$); 同一行中的不同大写字母表示差异显著($p < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant differences within the same columns ($p < 0.05$). Different capital letters indicate significant differences within the same rows ($p < 0.05$).

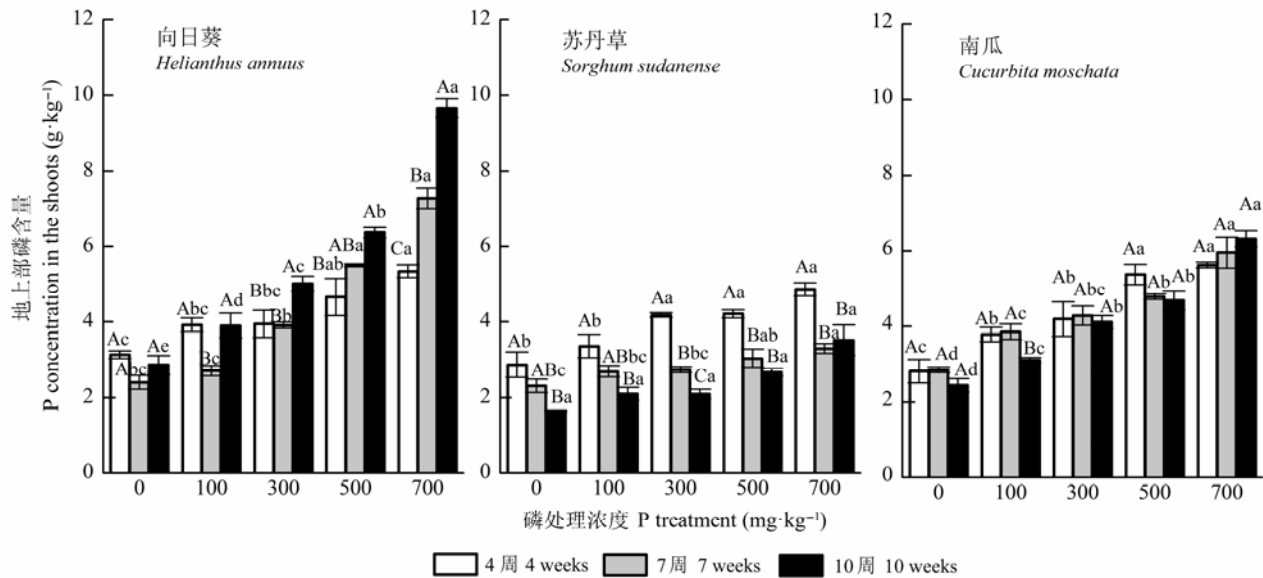


图1 五种浓度磷(P)处理下3种植物地上部磷含量随时间的变化(平均值±标准误差, n = 3)。不同小写字母表示不同磷处理间差异显著($p < 0.05$); 不同大写字母表示各生长时段差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 1 Variations of phosphorus (P) concentration in shoots of three plant species with time at five P concentrations (mean ± SE, n = 3). Different lowercase letters indicate significant differences among P treatments ($p < 0.05$). Different capital letters indicate significant differences among growth periods ($p < 0.05$).

磷处理下, 达最大值9.67 g·kg⁻¹, 约为对照组的3.37倍。对比分析, 随着磷处理浓度增大, 苏丹草、南瓜的地上部磷含量也随之增加, 但上升的趋势缓慢, 其受高磷处理的促进作用可能较小。另外, 在高浓度磷处理下, 向日葵各生长时段内的地上部磷含量均高于其他两种植物($p < 0.05$), 苏丹草、南瓜地上部磷含量的最大值分别是4.86、6.32 g·kg⁻¹, 为向日葵的50.26%、65.36%。

相同浓度磷处理下, 随着生长时间的增长, 向日葵地上部磷含量显著升高($p < 0.05$) (0、100 mg·kg⁻¹处理组除外), 说明向日葵随着生长期的延长对磷进行了一定的累积; 而苏丹草处理组与对照组地

上部磷含量均呈现明显的下降趋势($p < 0.05$), 这可能是因为苏丹草的各个生长时期对磷的需求量不同导致的; 另外, 南瓜地上部的磷含量随时间增长无显著变化($p > 0.05$) (100 mg·kg⁻¹处理组除外), 可能是因为南瓜在生长前期对磷的吸收较快, 当生长时间为4周时其地上部磷浓度已相对饱和, 之后随着生长期的延长则不再升高, 植物体内的磷含量维持在较小的波动范围内。

2.3 三种植物地上部磷累积量的比较

植物地上部磷累积量的大小受生物量和地上部磷含量差异的共同影响。相同浓度磷处理下, 三种植物地上部磷累积量均随生长期的延长而显著增加

($p < 0.05$), 其中向日葵的地上部磷累积量增长幅度最大, 南瓜次之, 苏丹草最小(图2)。在生长时间为10周, 磷浓度 $700 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下, 向日葵、苏丹草、南瓜的地上部磷累积量均达到最大值, 分别为 217.83 、 93.92 和 $135.82 \text{ mg} \cdot \text{plant}^{-1}$, 但同样条件下苏丹草的生物量却明显高于其他两种植物(表1), 这说明3种植物地上部磷累积量的差异主要是由地上部磷含量不同所致。另外, 相同生长时间内, 3种植物地上部磷累积量均受到磷处理浓度的显著影响($p < 0.05$), 即磷处理浓度越大, 其地上部磷累积量越多。3种植物中向日葵地上部磷累积量最大, 其随磷处理浓度增大而升高的幅度明显大于苏丹草和南瓜(图2)。

2.4 三种植物对土壤全磷含量的影响

不同供试植物对土壤全磷含量的变化影响差异显著($p < 0.05$)。由图3可知, 向日葵盆中土壤全磷含量随着生长时间增长而急剧下降, 其在前两个生长阶段的平均下降幅度分别为 6.68% 和 8.32% 。南瓜盆中土壤全磷含量亦呈下降趋势, 但比向日葵稍缓, 南瓜在后两个生长时间段内的平均减幅相差较大, 分别为 7.33% 和 2.07% , 说明南瓜在生长后期的磷吸收能力可能减弱。另外, 苏丹草盆中土壤全磷含量的变化趋势为先下降后上升, 说明在生长后期苏丹

草可能通过根系将植株体内的部分磷重新释放回土壤, 同时解释了苏丹草地上部磷含量为什么会随生长时间的延长而下降的现象(图1)。但方差分析结果显示, 苏丹草盆中土壤全磷含量($0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组除外)在不同生长时段内无显著性差异($p > 0.05$)。

2.5 三种植物磷富集系数和转移系数的比较

富集系数和转移系数可以反映植物对土壤磷的吸收和转移能力。研究发现, 3种植物的富集系数和转移系数均受到了磷处理浓度和生长时间的影响(表2)。相同生长时间内, 向日葵、南瓜的磷富集系数均随磷处理浓度升高而增大, 而苏丹草则无显著变化($p > 0.05$); 相同浓度磷处理下, 向日葵的磷富集系数随生长时间的延长而增大, 苏丹草则减小, 南瓜无显著变化($p > 0.05$)。向日葵、苏丹草、南瓜的最大富集系数分别为 11.39 、 5.88 、 7.90 。由表3可知, 在不同浓度磷处理下, 向日葵和苏丹草的磷转移系数均大于 1.00 , 南瓜则波动较大, 为 0.71 – 1.82 。其中向日葵的磷转移系数呈现出随时间和磷处理浓度增加而增大的趋势, 但只有生长时间为10周时, 其各浓度处理之间磷转移系数的差异才达到显著水平($p < 0.05$), 磷浓度为 $700 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 向日葵转移系数最大, 为 4.09 。苏丹草和南瓜的转移系数表现出相同的变化规律: 低浓度磷处理下随着生长时间的

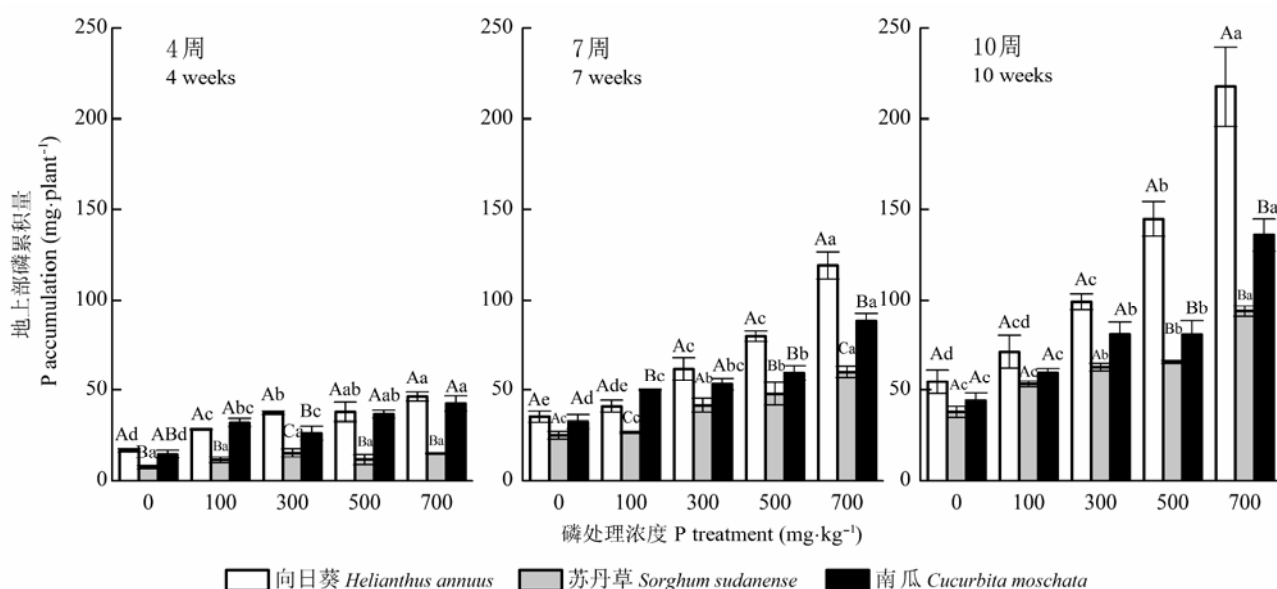


图2 三个生长时段内三种植物地上部磷累积量(平均值±标准误差, $n = 3$)。不同小写字母表示不同磷处理下差异显著($p < 0.05$); 不同大写字母表示不同物种间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 2 The aboveground total phosphorus (P) accumulations in three plant species over three growth periods (mean \pm SE, $n = 3$). Different lowercase letters indicate significant differences among P treatments ($p < 0.05$). Different capital letters indicate significant differences among plant species ($p < 0.05$).

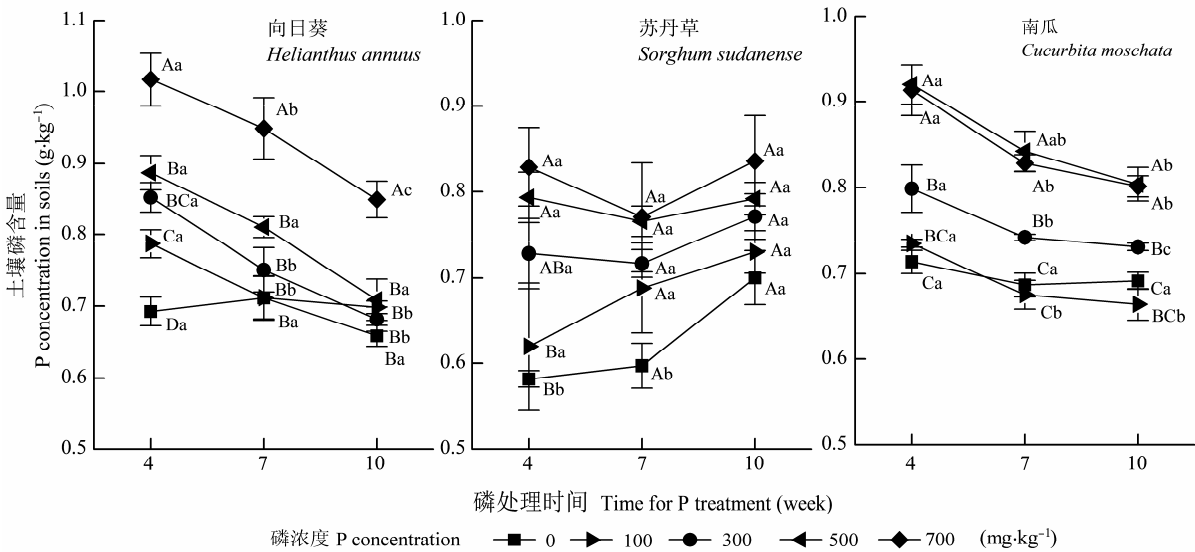


图3 三种植物盆栽土壤的全磷含量变化(平均值±标准误差, $n = 3$)。不同小写字母表示不同生长时段差异显著($p < 0.05$); 不同大写字母表示不同磷处理下差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 3 Variations of total phosphorus (P) concentration in soils of the pots containing three plant species (mean \pm SE, $n = 3$). Different lowercase letters indicate significant differences among growth periods ($p < 0.05$). Different capital letters indicate significant differences among P treatments ($p < 0.05$).

表2 五种磷浓度处理下三种植物各生长期磷(P)富集系数(平均值±标准误差, $n = 3$)

Table 2 Bioaccumulation coefficients for three plant species over different growth periods at five phosphorus (P) concentration (mean \pm SE, $n = 3$)

P处理 P treatment (mg·kg ⁻¹)	向日葵 <i>Helianthus annuus</i>			苏丹草 <i>Sorghum sudanense</i>			南瓜 <i>Cucurbita moschata</i>		
	4周 4 weeks	7周 7 weeks	10周 10 weeks	4周 4 weeks	7周 7 weeks	10周 10 weeks	4周 4 weeks	7周 7 weeks	10周 10 weeks
0	4.56 \pm 0.16 ^{Aa}	3.40 \pm 0.40 ^{Aabc}	4.35 \pm 0.29 ^{Ae}	4.92 \pm 0.50 ^{Aa}	3.87 \pm 0.26 ^{Ba}	2.37 \pm 0.15 ^{Ca}	3.96 \pm 0.45 ^{Ab}	4.16 \pm 0.17 ^{Ac}	3.54 \pm 0.31 ^{Ad}
100	4.98 \pm 0.14 ^{Aa}	3.83 \pm 0.16 ^{Bc}	5.60 \pm 0.42 ^{Ad}	5.48 \pm 0.34 ^{Aa}	3.98 \pm 0.47 ^{Ba}	2.73 \pm 0.23 ^{Ca}	5.16 \pm 0.25 ^{Aab}	5.72 \pm 0.25 ^{Ab}	4.75 \pm 0.16 ^{Ac}
300	4.65 \pm 0.41 ^{Ba}	5.23 \pm 0.11 ^{Bb}	7.36 \pm 0.45 ^{Ac}	5.78 \pm 0.31 ^{Aa}	3.84 \pm 0.19 ^{Ba}	2.86 \pm 0.07 ^{Ca}	5.30 \pm 0.74 ^{Aab}	5.77 \pm 0.33 ^{Ab}	5.66 \pm 0.24 ^{Abc}
500	5.31 \pm 0.67 ^{Ca}	6.78 \pm 0.16 ^{Ba}	9.00 \pm 0.21 ^{Ab}	5.33 \pm 0.29 ^{Aa}	3.98 \pm 0.32 ^{Ba}	3.24 \pm 0.32 ^{Ba}	5.86 \pm 0.37 ^{Aa}	5.70 \pm 0.19 ^{Ab}	5.85 \pm 0.42 ^{Ab}
700	5.28 \pm 0.27 ^{Ca}	7.79 \pm 0.63 ^{Babc}	11.39 \pm 0.31 ^{Aa}	5.88 \pm 0.16 ^{Aa}	4.32 \pm 0.22 ^{Aa}	4.47 \pm 0.60 ^{Aa}	6.19 \pm 0.28 ^{Aa}	7.20 \pm 0.57 ^{Aa}	7.90 \pm 0.32 ^{Aa}

同一列中的不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$); 同一行中的不同大写字母表示差异显著($p < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant differences within the same columns ($p < 0.05$). Different capital letters indicate significant differences within the same rows ($p < 0.05$).

表3 五种磷浓度处理下三种植物各生长期磷(P)转移系数(平均值±标准误差, $n = 3$)

Table 3 Translation coefficients for three plant species over different growth periods at five phosphorus (P) concentrations (mean \pm SE, $n = 3$)

P处理 P treatment (mg·kg ⁻¹)	向日葵 <i>Helianthus annuus</i>			苏丹草 <i>Sorghum sudanense</i>			南瓜 <i>Cucurbita moschata</i>		
	4周 4 weeks	7周 7 weeks	10周 10 weeks	4周 4 weeks	7周 7 weeks	10周 10 weeks	4周 4 weeks	7周 7 weeks	10周 10 weeks
0	1.81 \pm 0.15 ^{Aa}	1.61 \pm 0.16 ^{Aa}	1.85 \pm 0.20 ^{Ac}	3.03 \pm 0.41 ^{Aa}	2.14 \pm 0.17 ^{ABa}	1.85 \pm 0.12 ^{Bc}	0.84 \pm 0.15 ^{Aa}	0.85 \pm 0.08 ^{Aa}	0.86 \pm 0.04 ^{Aa}
100	2.18 \pm 0.21 ^{Aa}	1.75 \pm 0.12 ^{Aa}	2.55 \pm 0.24 ^{Abc}	2.90 \pm 0.15 ^{Aa}	2.07 \pm 0.19 ^{Ba}	2.08 \pm 0.22 ^{Bbc}	1.67 \pm 0.24 ^{Aa}	1.15 \pm 0.11 ^{ABa}	0.87 \pm 0.04 ^{Ba}
300	2.30 \pm 0.27 ^{Aa}	2.28 \pm 0.15 ^{Aa}	2.56 \pm 0.19 ^{Abc}	3.39 \pm 0.34 ^{Aa}	2.16 \pm 0.20 ^{Ba}	2.10 \pm 0.11 ^{Bbc}	1.61 \pm 0.52 ^{Aa}	1.01 \pm 0.14 ^{Aa}	1.00 \pm 0.06 ^{Aa}
500	1.65 \pm 0.25 ^{Aa}	2.01 \pm 0.04 ^{Aa}	3.05 \pm 0.33 ^{Ab}	3.44 \pm 0.35 ^{Aa}	2.15 \pm 0.22 ^{Ba}	2.46 \pm 0.12 ^{Bab}	1.69 \pm 0.63 ^{Aa}	0.88 \pm 0.09 ^{Aa}	0.95 \pm 0.09 ^{Aa}
700	1.86 \pm 0.14 ^{Ba}	2.43 \pm 0.41 ^{Ba}	4.09 \pm 0.30 ^{Aa}	3.54 \pm 0.15 ^{Aa}	2.35 \pm 0.14 ^{Ca}	2.92 \pm 0.15 ^{Ba}	1.82 \pm 0.36 ^{Aa}	0.71 \pm 0.05 ^{Ba}	0.95 \pm 0.04 ^{Ba}

同一列中的不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$); 同一行中的不同大写字母表示差异显著($p < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant differences within the same columns ($p < 0.05$). Different capital letters indicate significant differences within the same rows ($p < 0.05$).

延长而减小; 高浓度磷处理下随着生长时间的延长先减小后增大; 相同生长时间内, 苏丹草(10周除

外)、南瓜的转移系数在各浓度磷处理下均无显著差异($p > 0.05$)。

表4 向日葵与其他磷(P)富集备选物种各项富集指标的比较

Table 4 Comparison of accumulation indexes between *Helianthus annuus* and other candidate plant species for phosphorus (P) phytoremediation

参考文献 Reference	研究对象 Species studied	磷处理浓度 P treatment (KH_2PO_4)	生长时间 Growth period	地上部磷含量 P concentration in shoots ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	地上部磷累积量 P accumulations in shoots ($\text{mg}\cdot\text{plant}^{-1}$)	富集系数/转移系数 Bioaccumulation/ Translation coefficient
本研究 This study	向日葵 <i>Helianthus annuus</i>	$700\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	10 weeks	9.67	217.83	11.39/4.09
Ye <i>et al.</i> , 2014	水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i>	$800\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	4 weeks	5.25	7.32	11.71/0.89
Padmanabhan <i>et al.</i> , 2013	水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i>	$800\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	12 weeks	3.31	105.12	5.24/0.91
Liu <i>et al.</i> , 2013	双穗草 (<i>Lolium</i> \times <i>Festuca</i>)	$7.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	5 weeks	17.2	—	—
Sharma <i>et al.</i> , 2007	粗齿冷水花 <i>Pilea sinofasciata</i>	$800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	30 days	11.81 (stem)	—	—
			30 days	22.85 (leaf)	—	—
	黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>	$2\ 500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	8 weeks	18.80 (stem)	—	—
			12 weeks	11.00 (leaf)	—	—
	西葫芦 <i>Cucurbita pepo</i>	$2\ 500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	12 weeks	9.00 (stem)	—	—
			12 weeks	15.21 (leaf)	—	—

表中“—”表示缺失值。

The symbol “—” in the table indicates missing values.

3 讨论和结论

磷富集植物筛选是植物成功修复磷过剩土壤的关键。关于超富集植物的界定,一般有几个基本标准(Brooks *et al.*, 1979; Baker *et al.*, 1983; 韦朝阳和陈同斌, 2001; 韩少华等, 2012; 李有志等, 2012): (1)植物地上部富集目标元素的含量要高于一定临界值, 现广泛采用的磷参考值为 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Novak & Chan, 2002); (2)植物地上部的富集系数和转移系数均大于1, 即地上部元素含量要高于根部或土壤中相应的元素含量; (3)植物对高浓度生境有一定耐受性, 能正常生长, 生物量大。

本研究表明, 3种供试植物的地上部磷含量大小顺序为: 向日葵>南瓜>苏丹草。其中向日葵地上部磷含量最大值达 $9.67\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与磷富集植物标准临界值 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 极为接近, 虽然这与已有的磷富集植物地上部磷含量在其他浓度磷处理下及不同生长期可达到的最大值还相差较远(表4), 如矿山生态型粗齿冷水花磷含量可达到的最大值为 $22.85\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (刘霜等, 2013)、*Duo festulolium* (一种 *Lolium* \times *Festuca* 杂交的牧草)磷含量可达到的最大值为 $17.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Padmanabhan *et al.*, 2013)、黄瓜磷含量可达到的最大值为 $11.0\text{--}18.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 西葫芦磷含量可达到的最大值为 $9.0\text{--}15.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Sharma *et al.*, 2007)。研究还发现, 随着磷处理浓度增大, 向日葵地上部磷含量呈急剧上升趋势(图1), 说明向日葵对磷的吸收和富集还存在很大的潜力, 其地上部磷含量在更高的磷处理浓度下可能还会增加; 而且在时间尺度上的分析表明, 生长期的延长有利于向日葵体内磷的持续

累积。

Monni等(2000)和Pant等(2004)提出: 植物修复的效率主要取决于植物地上部对目标元素的累积总量, 以及植物地上部的年生物量。在本研究相同处理条件下, 向日葵的地上部磷累积量显著高于南瓜和苏丹草($p < 0.05$)。在 $700\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 高磷处理下, 向日葵生长10周, 其地上部磷累积量达最大值, 为 $217.83\text{ mg}\cdot\text{plant}^{-1}$, 远远高于叶代桦等(2014)所研究的矿山生态型水蓼($800\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 磷处理, 生长12周, 最大磷累积量仅为 $105.12\text{ mg}\cdot\text{plant}^{-1}$), 这充分表现出向日葵很强的磷吸收和累积能力。与此同时, 向日葵盆中的土壤全磷含量随生长时间延长而大幅下降, 说明向日葵对高磷土壤具有良好的修复潜力。另外, 磷富集植物对磷矿废弃地的修复效率还与该植物的单位面积生物量有关。单位面积生物产量越高, 磷累积总量就越大, 从而可提高修复效率。向日葵属于一年生草本, 生长快速, 并适合片植。有研究表明: 高水平生产条件下, 向日葵的种植密度可达 $5.85\text{--}7.35\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ (孙书蕴和陈建忠, 1985), 因此其单位面积生物量很高, 符合磷富集植物的筛选要求。

此外, 植物地上部的富集系数和转移系数也是磷富集植物筛选的重要指标(韩少华等, 2012), 两者综合反映了植物对土壤磷的吸收和转移能力(Xiao *et al.*, 2009)。富集系数和转移系数越大, 说明植物对土壤元素的吸收和转运能力越强, 越有可能作为超富集植物(李有志等, 2012)。在本试验各处理下, 向日葵、苏丹草的富集系数和转移系数均大于1, 符合磷富集植物的筛选标准。Xiao等(2009)通过野外

采样研究发现: 12种矿山生态型植物的富集系数和转移系数高于非矿山生态型植物, 在其所研究的植物中, 富集系数和转移系数的最大值分别为6.25 (川西柳叶菜(*Epilobium fangii*))和3.39 (水蓼)。与之比较, 本研究中向日葵的富集系数和转移系数则更加可观, 最大值分别为11.39和4.09, 表现出较强的磷吸收和转运能力。但叶代桦等(2014)采用盆栽试验研究发现, 矿山生态型水蓼的磷富集系数在800 mg·kg⁻¹磷处理下、生长4周时亦能达到11.71, 而此时水蓼地上部磷累积量却极低, 仅为7.32 mg·plant⁻¹ (表4), 与向日葵相差甚远。另外, 苏丹草和南瓜的富集系数与转移系数也大于1或最小值接近1, 但其地上部的磷含量均较低, 且苏丹草随着生长时间的延长, 地上部磷含量甚至呈下降趋势(图1)。总体来看, 苏丹草、南瓜对磷的富集能力较弱, 因此不能作为磷富集植物。

综上所述, 本研究中3种植物的磷吸收和富集能力的大小为: 向日葵>南瓜>苏丹草。其中向日葵的地上部磷含量最高可达9.67 g·kg⁻¹, 对磷的累积总量较高(217.83 mg·plant⁻¹), 且富集系数和转运系数均大于1, 具有较强的磷吸收和富集能力; 并能 在高磷生境下正常生长, 其地上部生物量的积累不受抑制。因此, 向日葵的这些特性在很大程度上符合磷富集植物的筛选标准, 表现出良好的植物修复潜力。另外, 向日葵还具有根系发达、抗旱耐瘠薄、生物量大等优点(郭艳丽等, 2009), 且分布范围极广, 适应性强, 生长快, 易于收割(武殿林, 1992; Ruso *et al.*, 2001)。因而向日葵较其他磷富集植物表现出更多的优势, 是一种可用于磷矿废弃地土壤与植被修复的备选物种。

基金项目 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07104-002)。

致谢 中国科学院武汉植物园郭屹立博士、王庆刚博士、鲍大川、路俊盟、徐耀粘和张奎汉, 武汉工程大学实习生刘峰、王临运在幼苗移栽和采样工作中给予大力帮助, 中国科学院广西植物研究所廖建雄老师对本论文撰写提出宝贵意见和细心指导, 在此一并致谢。

参考文献

Baker AJM, Brooks RR, Pease AJ, Malaisse F (1983). Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaïre.

Plant and Soil, 73, 377–385.

- Bao SD (2000). *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. 3rd edn. China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese) [鲍士旦 (2000). 土壤农化分析. 第3版. 中国农业出版社, 北京.]
- Brooks RR, Morrison RS, Reeves RD, Dudley TR, Akman Y (1979). Hyperaccumulation of nickel by *Alyssum linnaeus* (Cruciferae). *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 203, 387–403.
- Fu DG, He F, Guo Z, Yan K, Wu XN, Duan CQ (2013). Assessment of ecological restoration function of the *Coriaria nepalensis-Erianthus rufipilus* community in the phosphorus-enriched degraded mountain area in the Lake Dianchi Watershed, Southwestern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 326–334. (in Chinese with English abstract) [付登高, 何锋, 郭震, 阎凯, 吴晓妮, 段昌群 (2013). 滇池流域富磷区退化山地马桑-蔗茅植物群落的生态修复效能评价. 植物生态学报, 37, 326–334.]
- Guo P, Liu C, Zhang HB, Song XJ, Bao GZ (2007). Studies on enrichment and tolerance ability to Pb-Cu of sunflower seedlings. *Journal of Soil and Water Conservation*, 21(6), 92–95. (in Chinese with English abstract) [郭平, 刘畅, 张海博, 宋晓娟, 包国章 (2007). 向日葵幼苗对Pb-Cu富集能力与耐受性研究. 水土保持学报, 21(6), 92–95.]
- Guo YL, Tai PD, Han YP, Feng Q, Li PJ (2009). Effects of cadmium on the growth and physiological characteristics of sunflower seedlings. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 3, 2291–2296. (in Chinese with English abstract) [郭艳丽, 台培东, 韩艳萍, 冯倩, 李培军 (2009). 镉胁迫对向日葵幼苗生长和生理特性的影响. 环境工程学报, 3, 2291–2296.]
- Guo YR, Chen FQ, Xi GW, Zeng X (2009). Eco-physiological response of *Ficus tikoua* to different soil phosphorous content. *Ecology and Environmental Sciences*, 18, 1908–1913. (in Chinese with English abstract) [郭彦荣, 陈芳清, 郗光武, 曾旭 (2009). 铺地榕对不同土壤磷营养水平的生理生态学响应. 生态环境学报, 18, 1908–1913.]
- Han SH, Huang SF, Tang H, Wang M, Wu J (2012). A comparative study on the performance of 3 plants for remediation of cadmium contaminated farmland soil. *Environmental Pollution & Control*, 34(12), 22–25. (in Chinese with English abstract) [韩少华, 黄沈发, 唐浩, 王敏, 吴健 (2012). 3种植物对Cd污染农田土壤的修复效果比较试验研究. 环境污染与防治, 34(12), 22–25.]
- Huang X, Li TX, Zhang XZ, Zheng ZC, Yu HY (2012). Growth, P accumulation, and physiological characteristics of two ecotypes of *Polygonum hydropiper* as affected by excess P supply. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175, 293–302.

- Lan CY, Shu WS, Sun QY, Chen CD (1993). Mining land reclamation. In: Chen CD ed. *Sustainable Development and Ecology*. China Science and Technology Press, Beijing. 132–138. (in Chinese) [蓝崇钰, 束文圣, 孙庆业, 陈昌笃 (1993). 采矿地的复垦. 见: 陈昌笃编. 持续发展与生态学. 中国科学技术出版社, 北京. 132–138.]
- Liu JX (2009). Phosphate rock resource characteristic and suggestion on its exploitation and utilization. *Industrial Minerals & Processing*, (3), 36–39. (in Chinese with English abstract) [刘建雄 (2009). 我国磷矿资源特点及开发利用建议. 化工矿物与加工, (3), 36–39.]
- Liu S, Li TX, Ji L, Zhang SJ (2013). Phosphorus accumulation and root morphological difference of two ecotypes of *Pilea sinofasciata* grown in different phosphorus treatments. *Acta Prataculturae Sinica*, 22, 211–227. (in Chinese with English abstract) [刘霜, 李廷轩, 戢林, 张树金 (2013). 不同磷处理下两种生态型粗齿冷水花的富磷特征及根系形态差异. 草业学报, 22, 211–217.]
- Li YZ, Luo J, Zhang YM, Liu Q, Guo DD (2012). Plant resources investigation and hyperaccumulator screening in Xiangtan manganese mine area of Hunan Province, central-south China. *Chinese Journal of Ecology*, 31, 16–22. (in Chinese with English abstract) [李有志, 罗佳, 张灿明, 刘庆, 郭丹丹 (2012). 湘潭锰矿区植物资源调查及超富集植物筛选. 生态学杂志, 31, 16–22.]
- Monni S, Salemaa M, White C, Tuittila E, Huopalaaninen M (2000). Copper resistance of *Calluna vulgaris* originating from the pollution gradient of a Cu-Ni smelter, in south-west Finland. *Environmental Pollution*, 109, 211–219.
- Novak JM, Chan ASK (2002). Development of P hyperaccumulator plant strategies to remediate soils with excess P concentrations. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 21, 493–509.
- Padmanabhan P, Starnes DL, Sahi SV (2013). Differential responses of Duo grass (*Lolium* × *Festuca*), a phosphorus hyperaccumulator to high phosphorus and poultry manure treatments. *African Journal of Biotechnology*, 12, 3191–3195.
- Pant HK, Mislevy P, Rechcigl JE (2004). Effects of phosphorus and potassium on forage nutritive value and quantity: Environmental implications. *Agronomy Journal*, 96, 1299–1305.
- Ruso J, Zapata J, Hernandez M, Ojeda MA, Benlloch M, Prats-Perez E, Tena M, Lopez R, Jorin JV (2001). Toxic metals accumulation and total soluble phenolics in sunflower and tobacco plants. *Minerva Biotechnologica*, 13, 93–95.
- Sharma NC, Sahi SV (2005). Characterization of phosphate accumulation in *Lolium multiflorum* for remediation of phosphorus-enriched soils. *Environmental Science & Technology*, 39, 5475–5480.
- Sharma NC, Starnes DL, Sahi SV (2007). Phytoextraction of excess soil phosphorus. *Environmental Pollution*, 146, 120–127.
- Sharpley AN, McDowell RW, Kleinman PJA (2001). Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management. *Plant and Soil*, 237, 287–307.
- Sun SY, Chen JZ (1985). A preliminary study of planting density of oil sunflower. *Oil Crops of China*, (3), 45–47. (in Chinese with English abstract) [孙书蕴, 陈建忠 (1985). 油用向日葵种植密度的初步研究. 中国油料, (3), 45–47.]
- Wei CY, Chen TB (2001). Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: A review of studies in China and abroad. *Acta Ecologica Sinica*, 21, 1196–1203. (in Chinese with English abstract) [韦朝阳, 陈同斌 (2001). 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展. 生态学报, 21, 1196–1203.]
- Wu DL (1992). Exploitation and utilization of sunflower in China. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, (10), 14–15. (in Chinese with English abstract) [武殿林 (1992). 中国向日葵带及其开发之探讨. 山西农业科学, (10), 14–15.]
- Xiao GL, Li TX, Zhang XZ, Yu HY, Huang HG, Gupta DK (2009). Uptake and accumulation of phosphorus by dominant plant species growing in a phosphorus mining area. *Journal of Hazardous Materials*, 171, 542–550.
- Xu L, Shen RF, Liang LZ, Dong XY (2012). Screening of high phosphorus accumulation varieties of *Cucumis sativus*. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 40(10), 137–139. (in Chinese with English abstract) [徐蕾, 沈仁芳, 梁林洲, 董晓英 (2012). 磷高累积黄瓜品种筛选. 江苏农业科学, 40(10), 137–139.]
- Ye DH, Li TX, Zhang XZ, Zheng ZC, Yu HY (2014). Effect of high phosphate supply on P accumulation characteristics of mining ecotype of *Polygonum hydropiper*. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 20, 186–194. (in Chinese with English abstract) [叶代桦, 李廷轩, 张锡洲, 郑子成, 余海英 (2014). 高磷对矿山生态型水蓼磷富集特性的影响. 植物营养与肥料学报, 20, 186–194.]
- Ye WL, Xu XY, Chen Z, Dong XL, Wang W, Fang S (2008). Study on adaptation of *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf to copper tailing. *Research of Environmental Science*, 21(6), 193–196. (in Chinese with English abstract) [叶文玲, 徐晓燕, 陈增, 董晓玲, 王韡, 方胜 (2008). 苏丹草对铜尾矿的适应性研究. 环境科学研究, 21, 193–196.]

特邀编委: 达良俊 责任编辑: 王 葳