

高磷对矿山生态型水蓼磷富集特性的影响

叶代桦, 李廷轩*, 张锡洲, 郑子成, 余海英

(四川农业大学资源环境学院, 四川成都 611130)

摘要: 采用土培试验, 以磷富集植物矿山生态型水蓼为研究对象, 研究了高磷条件下 ($P\ 800\ \text{mg/kg}$) 矿山生态型水蓼 4 周、8 周、12 周的磷富集特性, 为利用矿山生态型水蓼提取土壤或水体中过量的磷, 防治磷的非点源污染提供理论依据。结果表明, 1) 高磷处理下, 矿山生态型水蓼根干重在 4 周、8 周、12 周时分别为不施磷处理的 4.50、8.12、3.17 倍; 茎干重分别为不施磷处理的 6.83、11.47、15.14 倍; 叶干重分别为不施磷处理的 5.77、10.49、7.11 倍。矿山生态型水蓼生物量在 12 周达到最大, 增加幅度明显高于非矿山生态型。2) 高磷处理下, 矿山生态型水蓼各器官磷含量明显高于不施磷处理, 且随着生长期延长逐渐降低。矿山生态型水蓼磷富集系数均大于 1, 且在高磷处理下高于非矿山生态型。各生长期下, 矿山生态型磷迁移率均大于 50%, 且在高磷处理下分别为不施磷处理的 1.21、1.21、1.20 倍。矿山生态型水蓼地下部与地上部磷积累量在 12 周时, 分别达到 9.76、105.12 mg/plant , DW, 为非矿山生态型的 2.29、3.29 倍。3) 矿山生态型水蓼根系酸性磷酸酶活性在 8 周时达到峰值, 在 4 周和 8 周时表现为高磷处理大于不施磷处理且显著高于非矿山生态型 ($P < 0.05$)。而植酸酶活性随生长期延长逐渐降低, 在 12 周时表现为高磷处理大于不施磷处理且高于非矿山生态型。表明在高磷处理下, 矿山生态型水蓼对磷具有较强的吸收和积累能力, 是一种理想稳定的磷富集材料。

关键词: 生态型; 生长期; 磷累积; 酸性磷酸酶; 植酸酶

中图分类号: Q945.12; S171.4

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2014)01-0186-09

Effect of high phosphate supply on P accumulation characteristics of mining ecotype of *Polygonum hydropiper*

YE Dai-hua, LI Ting-xuan*, ZHANG Xi-zhou, ZHENG Zi-cheng, YU Hai-ying

(College of Resources and Environmental Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: In order to provide a theoretical basis for extracting the excess phosphorus (P) in soil or water, preventing non-point source pollution, it was necessary to determine the P accumulation characteristics in a mining ecotype (ME) of *Polygonum hydropiper* screened as P enrichment plant earlier, with a nonmining ecotype (NME) as contrast. Pot experiments were carried out in a greenhouse on the farm of Sichuan Agricultural University, Sichuan province, China in 2011. The effect of P-enriched treatment ($P\ 800\ \text{mg/kg}$) on the characteristics of P accumulation in the ME of *P. hydropiper* at different growth periods (4 weeks, 8 weeks, 12 weeks) was analysed. 1) With growth period prolonged, the biomass of root, stem and leaf in the ME of *P. hydropiper* ascended and reached a maximum in 12 weeks at P-enriched condition. The increment of the ME was significantly higher than that of the NME additionally. Dry weight of root of the ME with P-enriched treatment was 4.50, 8.12 and 3.17 times compared with control at 4, 8 and 12 weeks respectively; and that of stem was 6.83, 11.47 and 15.14 times respectively; while that of leaf was 5.77, 10.49 and 7.11 times respectively. 2) Each organ of the ME with P-enriched treatment showed a significantly higher P concentration comparing with control, and the P concentration generally showed decreasing trend with the growth period prolonged. Bioaccumulation coefficient of the ME was

收稿日期: 2013-03-01 **接收日期:** 2013-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(40901138); 四川省科技支撑项目(2013NZ0044); 四川省学术和技术带头人培养资金资助项目(2012); 四川省科技厅应用基础项目(2010JY0083)。

作者简介: 叶代桦(1990—), 女, 四川德阳人, 硕士研究生, 主要从事植物营养与环境生态方面的研究。E-mail: chu.lv@163.com

* 通信作者 E-mail: litinx@263.net

more than 1; moreover, the ME was apparently higher than the NME. While its translocation rate was more than 50%, and the ME with P-enriched treatment was significantly higher which was 1.21, 1.21 and 1.20 times of the no phosphate treatment, respectively. Besides, P accumulation in root and shoot of the ME with P-enriched treatment reached 9.76 mg/plant, DW and 105.12 mg/plant, DW respectively, which were 2.29 and 3.29 times higher than the NME at 12 weeks. 3) Activity of acid phosphatase (Apase) in the ME reached its peak at 8 weeks. Compared with control, the ME was obviously higher, and it was significantly higher than that of the NME with P-enriched condition at 4 weeks and 8 weeks ($P < 0.05$). Nevertheless, phytase activity in the ME gradually dropped with the growth period prolonged, while it showed higher with P-enriched treatment than that of control only at 12 weeks, and the ME was higher than the NME. The ME of *P. hydropiper* shows high absorption capacity and accumulation ability of P under P-enriched condition. Thus, it can be used as a kind of ideal and stable P enrichment material.

Key words: ecotype; growth period; phosphorus accumulation; acid phosphatase; phytase

土壤中含有大量的磷,但植物能直接吸收利用的磷却不足全磷的1%^[1]。为了提高土壤肥力和植物所需的有效磷含量,农业生产过程中投入了大量磷肥。然而,化学磷肥和有机肥不合理的施用加速了磷在土壤中积累,使得土壤中磷含量大大超过了植物所需^[2-3]。过量的磷随地表径流进入水体,加速了水体富营养化进程。据统计,磷造成的非点源污染对我国水体总污染的贡献高达93%^[4]。因此,寻找合适的方法减少环境中过量的磷越来越受到重视。已有研究表明,通过收获植物从磷含量丰富的环境中提取磷素是一种切实可行的治理措施^[5-9]。Marshall 和 Gulf 黑麦草在最理想的营养液、土壤或琼脂环境条件下,其体内的磷含量能达到1%,具有较强的磷积累特性^[10-12]。Priya 和 Sahi^[13]选育出一种杂交草(*Duo festulolium*),具有较强的富磷特性,其他磷富集植物如黄南瓜(*Cucurbita pepo* var. *Melopepo*)、黄瓜(*Cucumis sativus*)^[14]和象草(*Pennisetum purpureum* Schum.)^[15]对磷也具有较好的吸收积累能力,但它们在磷过剩土壤修复中的作用还有待深入研究。迄今为止,对磷富集植物的研究多集中于不同植物种类^[16-17],对同一种植物不同生态型的研究还鲜见报道。不同生态型的同种植物在忍耐高磷及富集磷方面通常有较大的差别。前期通过对四川省什邡磷矿区优势植物调查研究,筛选出了对磷具有富集作用的水蓼(*Polygonum hydropiper*)^[18],发现矿山生态型水蓼地上部磷含量在800 mg/kg处理下达到最大值,地上部磷积累量在800 mg/kg处理下达59.14 mg/plant,是非矿山生态型的3.26倍^[19],对磷显示出很强的富集能力。本研究以矿山生态型水蓼为材料,结合根系酸性磷酸酶与植酸酶活性,探明矿山生态型水蓼在高磷处

理下不同生长期的富磷特性,明确最佳收获期,以期合理利用其提取土壤或水体中过量的磷提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物为水蓼(*Polygonum hydropiper*),矿山生态型(mining ecotype, ME)采自四川省什邡磷矿区(104°50' E, 30°25' N),非矿山生态型(non-mining ecotype, NME)采自四川省雅安市雨城区(102°51'~103°12' E, 29°40'~30°14' N)。选择生长状况良好且长势一致的幼苗进行栽种。

供试土壤为潮土,采自四川省雅安市雨城区大兴镇。其基本理化性质为pH 6.29、有机质13.40 g/kg、全氮0.55 g/kg、全磷0.96 g/kg、碱解氮64.00 mg/kg、速效钾29.00 mg/kg、有效磷6.55 mg/kg。

供试肥料尿素(N 46%)在市场购买,磷酸二氢钾(P_2O_5 52%, K_2O 34%)和硫酸钾(K_2O 54%)为分析纯试剂。

1.2 试验设计与处理

试验采用土培方法。土壤风干后,压碎过筛混匀,每盆装土15 kg。试验设不添加磷(对照)和P 800 mg/kg(高磷)两个磷水平,每个水平处理重复18次,共72盆,完全随机排列。除磷外,每盆配施纯氮100 mg/kg和相应量的 K_2SO_4 以平衡土壤中因施入 KH_2PO_4 而带入的钾。肥料均以溶液形式加入到土壤中,充分混匀并平衡8周后待用。试验于2011年5月至8月在四川农业大学教学科研园区有防雨设施的网室中进行。将采回的长势一致的水蓼幼苗移栽至盆中,每盆种2株。栽种后每周浇水

5 次,按田间持水量的 70% 确定灌水量,采用自然光照。

采样于移栽后 4 周、8 周和 12 周进行,每次每个处理采 6 个重复。样品先用自来水冲洗再用蒸馏水润洗,洗净后用吸水纸擦干,将其中一株分为根、茎、叶三部分,装袋后在 105℃ 杀青半小时,75℃ 烘干至恒重,称重,粉碎后用于测定生物量和磷含量。另一株取根系经液氮迅速固定后,保存于 -80℃ (Thermo Freezer 700, USA) 超低温冰箱,用于酸性磷酸酶及植酸酶活性的测定。

1.3 测定项目与方法

土壤基本理化性质采用常规分析方法^[20];植株磷含量测定采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮—钼锑抗比色法^[20];酸性磷酸酶活性测定采用对硝基苯磷酸二钠法^[21];植酸酶活性测定采用 Starnes 等^[22]的方法。

1.4 数据处理

富集系数 = 植株磷含量/土壤磷含量

迁移率 = 地上部磷积累量/植株磷积累量 $\times 100\%$

采用 DPS 11.0 进行统计分析, LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 高磷对矿山生态型水蓼生物量的影响

高磷处理下,水蓼生物量存在显著的生态型差异(表 1)。矿山生态型水蓼根、茎、叶干重在 12 周时达到最大值。其生物量明显高于非矿山生态型,根干重在 4 周、8 周、12 周时分别为非矿山生态型的 1.50、3.10、2.84 倍;茎干重分别为 3.42、1.76、3.11 倍;叶干重分别为 8.33、2.79、4.10 倍。

在高磷处理条件下,矿山生态型根干重在 4 周、8 周、12 周时分别为不施磷处理的 4.50、8.12、3.17 倍;茎干重分别为 6.83、11.47、15.14 倍;叶干重分别为 5.77、10.49、7.11 倍。非矿山生态型生物量与矿山生态型的变化趋势一致,但茎干重在 4 周时与叶干重在 4 周和 12 周时并没有因磷浓度的增加而出现明显的增加。表明矿山生态型水蓼对高磷具有很强的耐性。

表 1 高磷处理对矿山生态型水蓼生物量的影响 (g/plant, DW)

Table 1 Effect of P-enriched condition on the biomass in the mining ecotypes of *P. hydropiper*

磷处理 P treatment (mg/kg)	生长期 Growth period (Week)	根 Root		茎 Stem		叶 Leaf	
		ME	NME	ME	NME	ME	NME
0	4	0.04 ± 0.01 b	0.05 ± 0.01 b	0.06 ± 0.03 b	0.06 ± 0.01 a	0.13 ± 0.02 b	0.09 ± 0.02 a
	8	0.16 ± 0.05 b	0.11 ± 0.01 a	0.36 ± 0.08 b	0.31 ± 0.05 b	0.59 ± 0.13 b	0.34 ± 0.01 b
	12	1.10 ± 0.24 b*	0.34 ± 0.05 b	1.39 ± 0.27 b	1.46 ± 0.36 b	2.43 ± 0.56 b	0.65 ± 0.06 a
800	4	0.18 ± 0.04 a	0.12 ± 0.02 a	0.41 ± 0.05 a*	0.12 ± 0.03 a	0.75 ± 0.02 a*	0.09 ± 0.02 a
	8	1.30 ± 0.08 a*	0.42 ± 0.07 a	4.13 ± 0.30 a*	2.35 ± 0.03 a	6.19 ± 0.40 a*	2.22 ± 0.25 a
	12	3.49 ± 0.00 a*	1.23 ± 0.21 a	21.04 ± 2.47 a*	6.77 ± 0.39 a	17.28 ± 1.47 a*	4.21 ± 0.64 a

注 (Note): ME—矿山生态型 Mining ecotypes; NME—非矿山生态型 Non-mining ecotypes; 数值后不同小写字母表示相同生态型及相同生长期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters mean significantly different ($P < 0.05$) between P treatments; * 表示同一处理相同生长期不同生态型间差异显著 ($P < 0.05$) Means significantly different ($P < 0.05$) between ecotypes.

2.2 高磷对矿山生态型水蓼磷吸收积累的影响

2.2.1 磷含量 高磷处理下,水蓼体内磷含量在处理间差异较大,但生态型间差异并不明显(表 2)。由表 2 分析可知,高磷处理下两种生态型水蓼根茎叶磷含量随着生长期延长逐渐降低。除 12 周时的高磷处理外,随着生长期延长,矿山生态型水蓼茎的磷含量始终高于非矿山生态型。除 4 周时的不施磷

处理外,随着生长期延长,矿山生态型水蓼叶的磷含量始终高于非矿山生态型。其中,在 8 周时的高磷处理和 12 周时的不施磷处理下,矿山生态型水蓼磷含量分别为非矿山生态型水蓼的 1.36、2.03 倍。在高磷处理下,矿山生态型水蓼各器官磷含量明显高于不施磷处理。其中,根部磷含量在 4 周、8 周、12 周时分别为不施磷处理的 3.71、3.14、1.57 倍;

表 2 高磷处理下矿山生态型水蓼各器官磷的含量(g/kg)
Table 2 P concentrations in different parts in *P. hydropiper* under P-enriched condition

磷处理 P treatment (mg/kg)	生长期 Growth period (Week)	根 Root		茎 Stem		叶 Leaf	
		ME	NME	ME	NME	ME	NME
0	4	1.91 ±0.51 b	1.29 ±0.16 b	1.63 ±0.14 b	1.61 ±0.16 b	2.58 ±0.49 b	3.48 ±0.38 a
	8	1.03 ±0.37 b	3.73 ±0.10 a*	1.10 ±0.86 b	0.58 ±0.05 b	2.48 ±0.55 b	1.64 ±0.27 b
	12	1.73 ±0.13 a	1.68 ±0.78 a	1.18 ±0.13 b	0.75 ±0.05 b	2.78 ±0.45 b*	1.37 ±0.13 b
800	4	7.09 ±0.61 a	4.76 ±0.49 a	5.25 ±0.26 a	4.83 ±0.37 a	5.04 ±0.17 a	4.53 ±0.38 a
	8	3.44 ±0.14 a	3.18 ±0.15 a	4.77 ±0.57 a	3.81 ±0.25 a	4.51 ±0.32 a*	3.31 ±0.08 a
	12	2.71 ±0.06 a	2.90 ±0.16 a	3.00 ±0.16 a	3.24 ±0.19 a	3.31 ±0.18 a	3.21 ±0.22 b

注(Note): ME—矿山生态型 Mining ecotypes; NME—非矿山生态型 Non-mining ecotypes;数值后不同小写字母表示相同生态型及相同生长期不同处理间差异显著($P<0.05$) Different letters mean significantly different($P<0.05$) between P treatments; *表示同一处理相同生长期不同生态型间差异显著($P<0.05$) Means significantly different($P<0.05$) between ecotypes.

茎部磷含量分别为 3.22、4.34、2.54 倍;叶部磷含量分别为 1.95、1.82、1.19 倍。

2.2.2 富集系数和迁移率 水蓼磷富集系数和迁移率差异较大,但磷富集系数均大于 1(表 3)。在不施磷处理下,两种生态型水蓼富集系数明显高于高磷处理,且随着生长期延长矿山生态型富集系数先降低后增加,而非矿山生态型则持续降低。在高磷处理下,矿山生态型水蓼富集系数高于非矿山生态型,在 4 周和 8 周时分别为非矿山生态型的 1.55 和 1.24 倍,可见,在高磷处理条件下矿山生态型水蓼对磷的富集能力强于非矿山生态型。

迁移率能很好地反映磷向水蓼地上部转移的能力。由表 3 分析可知,水蓼磷迁移率均大于 50%。在高磷处理下,矿山生态型水蓼迁移率在 4 周、8 周、12 周时分别为不施磷的 1.21、1.21、1.20 倍。此外,矿山生态型水蓼磷迁移率随生长期延长逐渐增加,而非矿山生态型则先增加后降低。其中,在 12 周时的不施磷和高磷处理下,矿山生态型磷迁移率分别为非矿山生态型的 1.04 和 1.04 倍。表明随着生长期延长,矿山生态型水蓼对磷的转移能力逐渐增强,其地上部磷的积累量显著高于非矿山生态型。

表 3 高磷处理对矿山生态型水蓼富集系数与迁移率的影响
Table 3 Effect of P-enriched condition on the bioaccumulation coefficient and translocation rate of the mining ecotypes of *P. hydropiper*

磷处理 P treatment (mg/kg)	生长期 Growth period (Week)	富集系数 Bioaccumulation coefficient		迁移率 Translocation rate(%)	
		ME	NME	ME	NME
0	4	458.38	548.91	73.53	71.83
	8	136.91	214.05	75.17	76.09
	12	250.23	157.38	76.04	73.35
800	4	11.71	7.54	88.93	65.95
	8	7.35	5.93	90.71	94.26
	12	5.24	5.39	91.50	88.01

注(Note): ME—矿山生态型 Mining ecotypes;NME—非矿山生态型 Non-mining ecotypes.

2.2.3 磷积累量 由表4分析可知,在高磷处理下,无论是水蓼地上部还是地下部磷积累量均高于不施磷处理,且两种生态型水蓼间差异显著($P < 0.05$)。其中,矿山生态型水蓼地下部磷积累量在4周、8周、12周时分别为非矿山生态型的2.02、4.67、2.29倍;地上部磷积累量则分别为非矿山生态型的8.32、2.78、3.35倍。在不施磷处理下,矿山生态型水蓼并未表现出明显的富磷优势,仅在12周时其

地上部磷积累量显著高于非矿山生态型水蓼($P < 0.05$)。在相同磷浓度处理下,随着生长期延长,水蓼磷积累量逐渐增加,且矿山生态型水蓼磷积累量的增加幅度明显高于非矿山生态型,在高磷处理下的12周时达到105.12 mg/plant, DW,是不施磷处理的17.12倍。各生长期,矿山生态型磷积累量在两个磷浓度处理间差异显著($P < 0.05$)。表明矿山生态型水蓼对磷具有较强的吸收积累能力。

表4 高磷处理对矿山生态型水蓼磷积累量的影响(mg/plant, DW)

Table 4 Effect of P-enriched condition on the P accumulation in the mining ecotypes of *P. hydropiper*

磷处理 P treatment (mg/kg)	生长期 Growth period (Week)	地下部 Root		地上部 Shoot	
		ME	NME	ME	NME
0	4	0.10 ± 0.03 b	0.18 ± 0.04 b	0.44 ± 0.27 b	0.47 ± 0.00 a
	8	0.20 ± 0.04 b	0.27 ± 0.06 a	0.60 ± 0.16 b	0.78 ± 0.01 b
	12	1.92 ± 0.02 b	0.69 ± 0.20 b	6.14 ± 0.59 b*	1.84 ± 0.05 b
800	4	0.91 ± 0.07 a*	0.45 ± 0.05 a	7.32 ± 0.34 a*	0.88 ± 0.15 a
	8	4.16 ± 0.41 a*	0.89 ± 0.03 a	40.54 ± 2.72 a*	14.60 ± 0.85 a
	12	9.76 ± 0.63 a*	4.27 ± 0.23 a	105.12 ± 0.75 a*	31.34 ± 0.89 a

注(Note): ME—矿山生态型 Mining ecotypes; NME—非矿山生态型 Non-mining ecotypes; 数值后不同小写字母表示相同生态型及相同生长期不同处理间差异显著($P < 0.05$) Different letters mean significantly different ($P < 0.05$) between P treatments; * 表示同一处理相同生长期不同生态型间差异显著($P < 0.05$) Means significantly different ($P < 0.05$) between ecotypes.

2.2.4 磷分配 由图1可知,水蓼茎叶磷分配总比例远高于根,且矿山生态型大于非矿山生态型。在高磷处理下,矿山生态型茎叶分配总比例大于80%,明显高于不施磷处理。说明,植株从土壤中吸收的磷大部分转移至地上部,更有利于水蓼从土壤中提取过量的磷。此外,矿山生态型水蓼磷主要分

配在叶中并随生长期延长逐渐降低,而茎的磷分配比例则随生长期延长逐渐增加,根的磷分配比例无明显变化趋势,说明矿山生态型水蓼体内的磷由叶向茎发生了转移。而对于非矿山生态型而言,随着生长期延长根的磷分配比例先大幅度降低而后有较小的回升,叶的磷分配比例持续降低,磷逐渐发生转

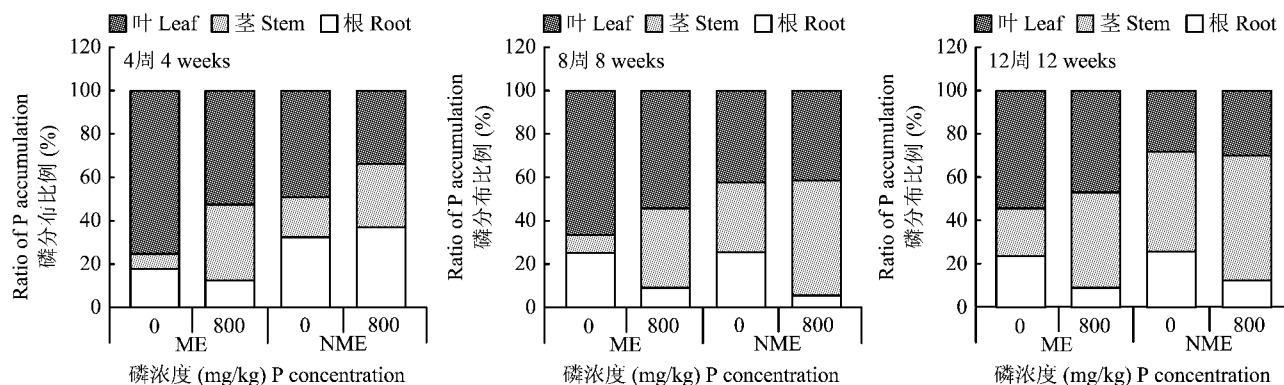


图1 高磷处理对矿山生态型水蓼磷分配的影响

Fig.1 Effect of P-enriched condition on the distribution ratio of P in the mining ecotypes of *P. hydropiper*

[注(Note): ME—矿山生态型 Mining ecotypes; NME—非矿山生态型 Non-mining ecotypes.]

移,更多积累在茎中。此外,磷素分配特征与生物量变化趋势相吻合,说明磷素分配始终围绕生长中心进行。

2.3 高磷对矿山生态型水蓼根系酸性磷酸酶与植酸酶活性的影响

由图2可知,随着生长期延长,水蓼根系酸性磷酸酶活性均在8周时达到峰值,且各生长期矿山生态型水蓼根系酸性磷酸酶活性均高于非矿山生态型,在高磷条件下尤为明显。在高磷处理下,水蓼根系酸性磷酸酶活性均高于不施磷处理,且前期矿山生态型的增加幅度明显大于非矿山生态型。此外,在高磷处理下,矿山生态型根系酸性磷酸酶活性在4周、8周、12周时分别达到6.43、9.67、3.86 pNP

$\mu\text{g}/[(\text{g} \cdot \text{min}), \text{FW}]$,分别为非矿山生态型的1.40、2.02、1.03倍,表明矿山生态型水蓼对磷具有较强的富集能力。根系植酸酶活性与酸性磷酸酶活性变化趋势并不一致。对植酸酶而言,非矿山生态型水蓼随生长期延长逐渐降低,而矿山生态型水蓼则是在8周时达到峰值。高磷处理下,水蓼根系植酸酶活性在4周和8周时小于不施磷处理,但在12周时则为高磷处理大于不施磷处理。同一磷浓度下,矿山生态型根系植酸酶活性在4周时低于非矿山生态型,但两者差异并不显著,随着生长期延长,矿山生态型水蓼逐渐高于非矿山生态型水蓼。其中,在高磷处理下,矿山生态型水蓼在8周和12周时显著高于非矿山生态型水蓼($P < 0.05$)。

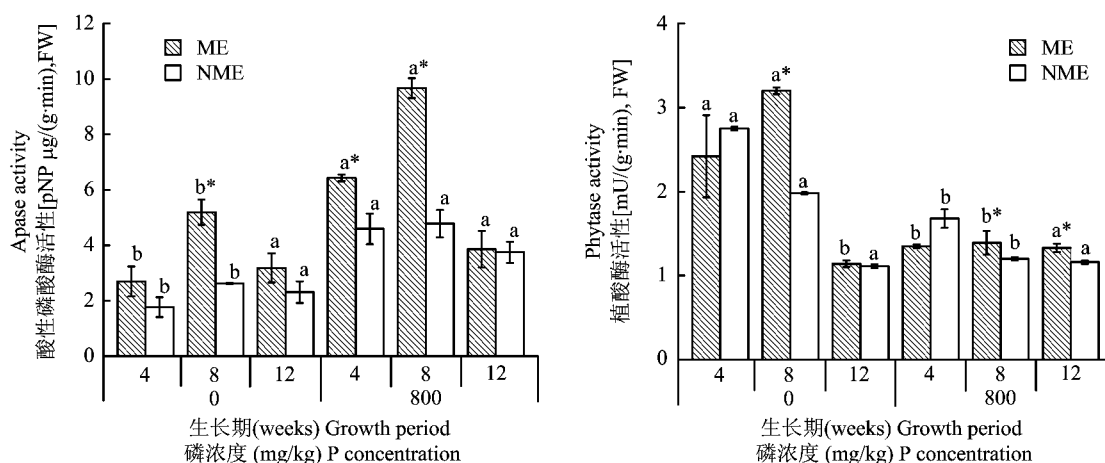


图2 高磷处理对矿山生态型水蓼根系酸性磷酸酶和植酸酶活性的影响

Fig.2 Effect of P-enriched condition on the activities of Apase and phytase in the roots of the ME of *P. hydropiper*

[注 (Note): ME—矿山生态型 Mining ecotypes; NME—非矿山生态型 Non-mining ecotypes. 柱上不同小写字母表示相同生态型水蓼及相同生长期在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters above the bars mean significantly different ($P < 0.05$) between P treatments. *表示同一处理相同生长期不同生态型间差异显著 ($P < 0.05$) Means significantly different ($P < 0.05$) between different ecotypes.]

3 讨论

3.1 高磷对矿山生态型水蓼富磷能力的影响

目前,磷富集植物的研究集中于牧草和农作物,但牧草对磷的吸收速率低,不利于对磷过剩土壤的修复^[23],况且相关报道多为陆生植物,对于既适合陆生又适合水生的磷富集植物的研究还很缺乏。水蓼分布于我国南北各省区,在朝鲜、日本、印度尼西亚等国及欧洲、北美也都有分布,能水陆两生,具有生物量大、根系深和较强的适应能力等优点。前期土培实验表明矿山生态型水蓼对磷具有较强的吸收积累能力,而土壤中过高的磷浓度对非矿山生态型水蓼的生长产生了明显的抑制作用^[19]。本研究

在此基础上进一步揭示了矿山生态型水蓼在高磷处理下对磷的富集能力。相关研究表明,植物生长及对磷的吸收均受生长期的影响^[9],而收获时期对植物磷的吸收积累及其组分也影响重大^[17]。肖光莉^[24]发现随着生长期延长,粗齿冷水花地上部磷含量均降低。Starnes等^[22]发现 Gulf 的磷含量虽高于 Marshall,但 Marshall 的生物量却明显高于 Gulf。本研究中,在高磷处理下,矿山生态型水蓼生物量和地上部磷积累量均大于非矿山生态型且随生长期延长而增加;而磷含量则随生长期延长而降低(表1、表2)。表明有较低磷含量的植株可能是由于其生物量较大而造成的稀释效应。要使植物修复技术有效地服务于磷过剩土壤中磷的去除,该植物应有较大

的生物量且其地上部磷含量至少达 $10 \text{ g/kg}^{[8]}$ 。而本研究中矿山生态型水蓼地上部磷含量不足 10 g/kg , 一些修复效果较好的水生植物体内磷含量也不足 $10 \text{ g/kg}^{[25-26]}$ 。植物修复的高效率表现在能通过地上部带走污染物的总量^[9], 矿山生态型水蓼在高磷处理下的 12 周时地上部磷积累量达到 105.12 mg/plant , 相比黑麦草等更有利于提取土壤中过量的磷。而用于修复污水的凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*)、粉绿狐尾藻 (*Myriophyllum aquaticum*) 和水浮莲 (*Pistia stratiotes* L.) 体内磷积累量最高也仅为 80.13 mg 、 38.72 mg 和 $31.74 \text{ mg}^{[27]}$ 。因此, 矿山生态型水蓼对磷具有很强的富集能力, 修复效果好。在成熟期前收获植株是一种有效去除土壤过量磷的方法^[14], 在 12 周时, 矿山生态型水蓼生物量和磷积累量均达到最大值但少数已出现开花现象进入生殖生长阶段。因此, 在此基础上延长生长期意义不大, 可以推断 12 周是收获水蓼的最佳生长期。以上表明, 矿山生态型水蓼在含磷高的土壤中生长状况更佳, 比非矿山生态型以及其他植物更具磷富集优势。

3.2 高磷对矿山生态型水蓼根系酸性磷酸酶与植酸酶活性的影响

施入土壤的化学磷肥极易被土壤吸附、固定^[28-29], 形成有机或难溶的无机态磷。然而, 植物主要吸收磷酸根以满足对磷的需要。因此, 有机磷需通过磷酸酶水解释放无机态磷才能发挥其植物有效性^[30-31]。相关研究指出植物根系分泌酸性磷酸酶是提高潜在磷吸收利用能力的重要途径之一^[32-33], 其在调控磷营养方面有着非常重要的作用。而植酸酶为肌醇与磷酸(盐)一类酶的总称, 属磷酸单酯水解酶^[11, 13-14, 22], 对植酸盐类具有高度的专一性。低磷胁迫下植物根系能够分泌酸性磷酸酶以提高土壤有机磷的有效性, 这被认为是植物对缺磷胁迫的一种适应性机制。然而, 本研究却发现水蓼根系酸性磷酸酶活性在高磷处理下大于不施磷处理。通过对一些牧草、豆科和禾本科植物在缺磷条件下的酸性磷酸酶活性研究, Hayes 等^[34]表明绝大多数植物种类酸性磷酸酶活性并没有因缺磷而提高。黄南瓜 (*Cucurbita pepo* var. *Melopepo*)、黄瓜 (*Cucumis sativus*)^[14]、*Lolium multiflorum*^[11, 12] 和 *Duo festulolium*^[13] 等植物根系酸性磷酸酶活性也同样为高磷处理大于不施磷处理。随生长期延长, 矿山生态型根系酸性磷酸酶活性始终高于非矿山生态型, 尤其在低磷处理下更为明显, 说明矿山生态型水蓼对磷的富集作用很强, 即使在低磷处理下其酸性

磷酸酶活性仍然很高。生长前期植株主要吸收土壤中的磷来满足需求, 而后期侧重于自身体内磷的利用。因此, 随生长期延长, 根系酸性磷酸酶活性先增加后降低, 在 8 周时达到峰值。植酸酶活性与酸性磷酸酶活性差异较大, 并且在各个生长期下各不相同(图 2)。在高磷处理下, 水蓼根系植酸酶活性在 4 周与 8 周时低于不施磷处理, 而在 12 周时不施磷处理却低于高磷处理, 这可能与土壤中的有效磷含量及磷形态有关。植酸及其盐类化合物约占土壤有机磷的 50%, 而植酸酶对植酸具有高度的专一性, 本研究所用磷源为无机磷, 不施磷处理前期土壤的有效磷远低于高磷处理, 促使水蓼根系分泌植酸酶来分解植酸及其盐类有机磷以满足对磷的吸收利用, 该结果与具有磷富集作用的向日葵表现一致^[14]。此外, 根系酸性磷酸酶与植酸酶活性在 12 周时均呈现降低趋势(图 2), 这是由于生长后期植株侧重于自身体内磷的代谢利用, 对外界环境磷的吸收作用减少而导致酶活性降低, 且生长后期植株成熟, 根系逐渐衰老, 根系活力降低, 从而使酶活性降低。在 12 周时, 矿山生态型根系两种酶活性均高于非矿山生态型, 表明矿山生态型水蓼根系衰老相对缓慢, 对磷的吸收积累作用较强, 其体内较高的酸性磷酸酶和植酸酶活性是富集磷的重要机理之一。

4 结论

1) 高磷处理下, 矿山生态型水蓼生物量、磷含量和磷积累量均高于非矿山生态型, 在 12 周时地上部磷积累量达到 105.12 mg/plant , DW。相对于非矿山生态型水蓼而言, 矿山生态型水蓼适应性强, 对磷具有较强的富集能力。

2) 高磷处理下, 水蓼根系酸性磷酸酶活性大于不施磷处理, 且矿山生态型水蓼显著高于非矿山生态型水蓼, 在 8 周时两者均达到峰值; 根系植酸酶活性在 12 周时大于不施磷处理, 矿山生态型水蓼在 8 周和 12 周时显著高于非矿山生态型水蓼, 且矿山生态型水蓼在 8 周时达到峰值, 而非矿山生态型水蓼随生长期延长逐渐降低。矿山生态型水蓼体内较高的酸性磷酸酶和植酸酶活性是其对磷富集的机理之一。

3) 各生长期相比较, 12 周为本研究中水蓼的最佳收获期。

参考文献:

- [1] Raghothama K G. Phosphorus and plant nutrition: an overview

- [A]. Sims J T, Sharpley A N. Phosphorus: Agriculture and the Environment [C]. Madison: American Society of Agronomy, 2005, 355-378.
- [2] Sonzogni W C, Chapra S C, Armstrong D E, Logan T J. Bioavailability of phosphorus inputs to lakes [J]. J. Environ. Qual., 1982, 11(4): 555-563.
- [3] Sims J T, Edwards A C, Schoumans O F, Simard R R. Integrating soil phosphorus testing into environmentally best agricultural management practices [J]. J. Environ. Qual., 2000, 29(1): 60-71.
- [4] Ongley E D, Zhang X L, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. Environ. Pollut., 2010, 158(5): 1159-1168.
- [5] Delorme T A, Angle J S, Coale F J, Chaney R L. Phytoremediation of phosphorus-enriched soils [J]. Int. J. Phytorem., 2000, 2(2): 173-181.
- [6] Frossard E, Condon L M, Obersonv A *et al.* Processes governing phosphorus availability in temperate soils [J]. J. Environ. Qual., 2000, 29(1): 15-23.
- [7] Koopmans G F, Chardon W J, Ehler P A I *et al.* Phosphorus availability for plant uptake in a phosphorus-enriched noncalcareous sandy soil [J]. J. Environ. Qual., 2004, 33(3): 965-975.
- [8] Novak J M, Chan A S K. Development of P - hyperaccumulator plant strategies to remediate soils with excess P concentrations [J]. Crit. Rev. Plant Sci., 2002, 21(5): 493-509.
- [9] Pant H K, Mislevy P, Rechigl J E. Effects of phosphorus and potassium on forage nutritive value and quantity: environmental implications [J]. Agron. J., 2004, 96(5): 1299-1305.
- [10] Sharma N C, Sahi S V, Jain J C, Raghothama K G. Enhanced accumulation of phosphate by *Lolium multiflorum* cultivars grown in phosphate-enriched medium [J]. Environ. Sci. Technol., 2004, 38(8): 2443-2448.
- [11] Sharma N C, Sahi S V. Characterization of phosphate accumulation in *Lolium multiflorum* for remediation of phosphorus-enriched soils [J]. Environ. Sci. Technol., 2005, 39(14): 5475-5480.
- [12] Sharma N C, Sahi S V. Enhanced organic phosphorus assimilation promoting biomass and shoot P hyperaccumulations in *Lolium multiflorum* grown under sterile conditions [J]. Environ. Sci. Technol., 2011, 45(24): 10531-10537.
- [13] Priya P, Sahi S V. Influence of phosphorus nutrition on growth and metabolism of Duo grass (*Duo festulolium*) [J]. Plant Physiol. Biochem., 2009, 47(1): 31-36.
- [14] Sharma N C, Starnes D L, Sahi S V. Phytoremediation of excess soil phosphorus [J]. Environ. Pollut., 2007, 146(1): 120-127.
- [15] Silveira M L, Vendramini J M B, Sui X L *et al.* Screening perennial warm-season bioenergy crops as an alternative for phytoremediation of excess soil P [J]. Bioenerg. Res., 2012, 1-7.
- [16] Missouri A M, Boerma H R, Bouton J H. Genetic variation and heritability of phosphorus uptake in Alamo switchgrass grown in high phosphorus soils [J]. Field Crops Res., 2005, 93(2-3): 186-198.
- [17] Marschner P, Solaiman Z, Rengel Z. Brassica genotypes differ in growth, phosphorus uptake and rhizosphere properties under P - limiting conditions [J]. Soil Biol. Biochem., 2007, 39(1): 87-98.
- [18] Xiao G L, Li T X, Zhang X Z *et al.* Uptake and accumulation of phosphorus by dominant plant species growing in a phosphorus mining area [J]. J. Hazard. Mater., 2009, 171(1-3): 542-550.
- [19] Huang X, Li T, Zhang X *et al.* Growth, P accumulation, and physiological characteristics of two ecotypes of *Polygonum hydropiper* as affected by excess P supply [J]. J. Plant Nutr. Soil Sc., 2012, 175(2): 290-302.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 146-315.
- Lu R K. Analytical methods of soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2000. 146-315.
- [21] 郭程瑾, 李宾兴, 王斌, 等. 小麦高效吸收和利用磷素的生理机制 [J]. 作物学报, 2006, 32(6): 827-832.
- Guo C J, Li B X, Wang B *et al.* Physiological mechanisms of absorption and use of phosphorus with high efficiency in wheat cultivars [J]. Acta Agron. Sin., 2006, 32(6): 827-832.
- [22] Starnes D L, Padmanabhan P, Sahi S V. Effect of P sources on growth, P accumulation and activities of phytase and acid phosphatases in two cultivars of annual ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) [J]. Plant Physiol. Biochem., 2008, 46(5-6): 580-589.
- [23] Stricker J A. High value crop potential of reclaimed phosphatic clay soil [A]. A new era of land reclamation [C]. Tampa, FL: Proc. 17th Annual Meeting American Society for Surface Mining and Reclamation, 2000. 11-15.
- [24] 肖光莉. 磷富集植物筛选及其吸收机理研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2009.
- Xiao G L. Identification of phosphorus accumulators and relevant mechanism of phosphorus uptake [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2009.
- [25] Rejmankova E, Sirova D, Carlson E. Patterns of activities of root phosphomonoesterase and phosphodiesterase in wetland plants as a function of macrophyte species and ambient phosphorus regime [J]. New Phytol., 2011, 190(4): 968-976.
- [26] Shan B, Ao L, Hu C, Song J Y. Effectiveness of vegetation on phosphorus removal from reclaimed water by a subsurface flow wetland in a coastal area [J]. J. Environ. Sci., 2011, 23(10): 1594-1599.
- [27] Polonski R F, Taylor M D, Bielenberg D G *et al.* Nitrogen and phosphorus remediation by three floating aquatic macrophytes in greenhouse-based laboratory-scale subsurface constructed wetlands [J]. Water Air Soil Pollut., 2009, 197(1-4): 223-232.

- [28] Richardson A E, Hadobas P A, Hayes J E. Extracellular secretion of *Aspergillus phytase* from *Arabidopsis* roots enables plants to obtain phosphorus from phytate[J]. *Plant J.*, 2001, 25(6): 641–649.
- [29] Xiao K, Harrison M J, Wang Z. Transgenic expression of a novel *M. truncatula* phytase gene results in improved acquisition of organic phosphorus by *Arabidopsis*[J]. *Planta*, 2005, 222(1): 27–36.
- [30] Hayes J E, Simpson R J, Richardson A E. The growth and phosphorus utilisation of plants in sterile media when supplied with inositol hexaphosphate, glucose 1–phosphate or inorganic phosphate[J]. *Plant Soil*, 2000, 220(1–2): 165–174.
- [31] Scott J T, Condron L M. Dynamics and availability of phosphorus in the rhizosphere of a temperate silvopastoral system[J]. *Biol. Fert. Soils*, 2003, 39(2): 65–73.
- [32] Richardson A E, Hadobas P A, Hayes J E. Acid phosphomonoesterase and phytase activities of wheat (*Triticum aestivum* L.) roots and utilization of organic phosphorus substrates by seedlings grown in sterile culture[J]. *Plant Cell Environ.*, 2000, 23(4): 397–405.
- [33] Ramesh A, Sharma S K, Joshi O, Khan I R. Phytase, phosphatase activity and P–nutrition of soybean as influenced by inoculation of *Bacillus*[J]. *Indian J. Microbiol.*, 2011, 51(1): 94–99.
- [34] Hayes J E, Richardson A E, Simpson R J. Phytase and acid phosphatase activities in extracts from roots of temperate pasture grass and legume seedlings[J]. *Aus. J. Plant Physiol.*, 1999, 26(8): 801–809.