

不同施磷水平下水麻(*Debregeasia orientalis*)及醉鱼草(*Buddleja lindleyana*)的生长响应与磷吸收累积特征研究

沈义畅, 张世熔*, 穆彦彤, 刘艳婷, 李 森

(四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

摘 要:通过盆栽试验,研究了水麻(*Debregeasia orientalis*)和醉鱼草(*Buddleja lindleyana*)在不同土壤磷水平下的生长响应和磷累积特征。结果表明:随着磷处理浓度(0、5、10、15、20、25、30 mg·kg⁻¹)的升高,水麻的株高、根长及生物量均升高,而醉鱼草各处理间的生物量差异不显著;水麻地上部和根部最大磷含量分别为 7.57、5.07 g·kg⁻¹,醉鱼草分别为 3.75、4.08 g·kg⁻¹;水麻地上部最大磷累积量为 103.32 mg·pot⁻¹,而醉鱼草仅为 18.07 mg·pot⁻¹;水麻和醉鱼草地上部磷富集系数分别为 7.41~12.93 和 1.95~5.06,迁移系数分别为 1.47~2.33 和 0.87~1.08。综上所述,水麻在富磷环境下表现出较强的适应能力和磷累积能力,醉鱼草也能适应富磷环境,但其磷累积能力较弱。因此,水麻和醉鱼草都具有高效移除土壤中过剩磷素的潜力。

关键词:水麻;醉鱼草;磷;植物修复;富集系数;迁移系数

中图分类号:X503.2 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)01-0043-06 doi:10.11654/jaes.2013.01.007

Growth Responses and Accumulation Characteristics of *Debregeasia orientalis* and *Buddleja lindleyana* in Different Treatment Levels of Phosphorus

SHEN Yi-chang, ZHANG Shi-rong*, MU Yan-tong, LIU Yan-ting, LI Sen

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

Abstract: A pot experiment was used to investigate growth responses of *Debregeasia orientalis* and *Buddleja lindleyana* and their uptake, accumulation characteristics in different treatment levels of phosphorus. The results showed that the plant height, root length and biomass of *D. orientalis* increase with the phosphorus concentration increased; however, the growth of *B. lindleyana* didn't change significantly. The highest phosphorus concentrations of *D. orientalis* reached 7.57 g·kg⁻¹ in shoot and 5.07 g·kg⁻¹ in root; while the phosphorus concentrations of *B. lindleyana* was lower than the former, and was only 3.75 g·kg⁻¹ in shoot and 4.08 g·kg⁻¹ in root. The highest total content of phosphorus in shoot were 103.32 mg·pot⁻¹ for *D. orientalis* and 18.07 mg·pot⁻¹ for *B. lindleyana*. The bioaccumulation factors in shoot were 7.41~12.93 for *D. orientalis* and 1.95~5.06 for *B. lindleyana*, and the translocation factors reached 1.47~2.33 for *D. orientalis* and 0.87~1.08 for *B. lindleyana* separately. Generally, the *D. orientalis* has strong tolerance to phosphorus stress and phosphorus enrichment capability; the *B. lindleyana* also has tolerance to phosphorus, but the phosphorus enrichment capability is relatively weak.

Keywords: *Debregeasia orientalis*; *Buddleja lindleyana*; phosphorus; phytoremediation; bioaccumulation factor; translocation factor

磷是植物生长发育不可缺少的大量营养元素之一,它是核酸、磷脂及磷酸糖等生命分子的组分,同时也以多种方式参与植物体内各种代谢过程。为满足植物对磷的需求,需要在农业生产过程中投入大量的磷

肥。然而,磷肥的大量施用以及施用方法不当会导致土壤中磷素大量积累^[1]。同时,居民所产生的生活垃圾部分进入周围土壤,也增加了土壤中磷的含量^[2]。由于磷素在土壤中常随径流及灌溉流失,成为水体富营养化的主要因素而引起全球关注^[3-5]。因此,寻找合适的方法减少磷素污染成为必须解决的环境问题^[6]。

目前,植物修复技术在土壤重金属修复方面已有大量研究,它具有治理过程的原位性、治理效果的永久性和治理成本的低廉性等优点^[7]。利用富集植物移

收稿日期:2012-05-17

基金项目:四川彭州市地震灾后新农村综合技术集成与示范(2008BAK51B01);四川省公益性项目(2007NGY006)

作者简介:沈义畅(1992—),女,四川广元人,主要从事土壤污染的植物修复研究。E-mail:ivankashen@yeah.net

*通信作者:张世熔 E-mail:rsz01@163.com

除土壤或水体污染物已成为当今国际生物修复研究的热点和前沿。已有研究表明,利用植物修复技术移除土壤或水体过剩磷素具有可行性^[8-12],但目前在国际上得到广泛认同的磷富集植物种类却过少,因此筛选对磷具有高效积累能力的植物十分必要。

水麻(*D. orientalis*)是荨麻科(Urticaceae)水麻属(*Debregeasia* Gaud.)的灌木或小乔木,主要分布于我国西南地区。醉鱼草(*B. lindleyana*)是马钱科(Loganiaceae)醉鱼属(*Buddleja*)的落叶灌木,主要分布于我国西南及华东地区。本文所用醉鱼草和水麻均采自四川金口河磷矿区,野外调查发现其对高磷有较强的耐性,因此取其进行室内磷处理盆栽试验,研究不同施磷水平下两种植物的生长响应以及植株对磷的累积特征,以探讨两种植物移除土壤过剩磷素的能力。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用水麻和醉鱼草植株均采自乐山市金口河区永胜乡磷矿区。

供试土壤粘粒含量 $168 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 粉砂粒含量 $390 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 砂粒含量 $425 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 土壤有机质含量为 $24.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮为 $1.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效氮为 $127.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷为 $17.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾为 $165.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 土壤 pH 为 6.35。

1.2 研究方法

1.2.1 盆栽试验

盆栽试验于 2011 年 2 月至 2011 年 8 月在四川农业大学雅安校区教学科研基地大棚内进行。供试土壤经风干、压碎、过 5 mm 筛后,放入 40 cm×30 cm 塑料盆中,每盆装土 8.0 kg。供试药品为 NaH_2PO_4 。水麻试验设置 1 个对照和 6 个处理水平,分别为 0、5、10、15、20、25、30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,每个处理重复 3 次;醉鱼草试验设置 1 个对照和 4 个处理水平,分别为 0、5、10、20、30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,每个处理重复 4 次。每盆土壤加入 NaH_2PO_4 后,反复混合均匀,放置 4 周后移栽供试植物。

野外样采回后剪其长势一致的幼枝,以节为单位切成 8 cm 的小段,然后用 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的生根粉溶液浸泡 12 h,移入土壤中生根。7~10 d 后,选择已生根的长势一致的枝条分别移栽到不同磷浓度处理的土壤中,每盆 5 株。在生长期,注意补充土壤水分。根据植株生长情况观察记录各磷浓度处理下植株的生长状况及其生理指标的变化。6 个月后收获。

1.2.2 植物样品采集与分析

将植株从泥土中取出,用自来水冲洗干净,然后用蒸馏水反复冲洗,再用去离子水多次冲洗,测量其株高、根长,并分成地上部(茎、叶)与根部两类样品。晾干后的样品在 105°C 下杀青 30 min,再在 60°C 下烘干至恒重,测定其干物质重,用不锈钢粉碎机磨细后,过 1 mm 筛备用。植物磷含量采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-钼锑抗比色法测定。

1.2.3 土壤样品采集和分析

从盆栽塑料盆中取出根袋内的植物根际土壤,经风干磨碎过筛后,土壤全磷含量采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定,速效磷含量采用 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定。

1.2.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理,利用 SPSS 17.0 统计分析软件对数据进行回归分析以及方差分析(ANOV)和 LSD 检验处理。数值用各重复的平均值±标准差表示。

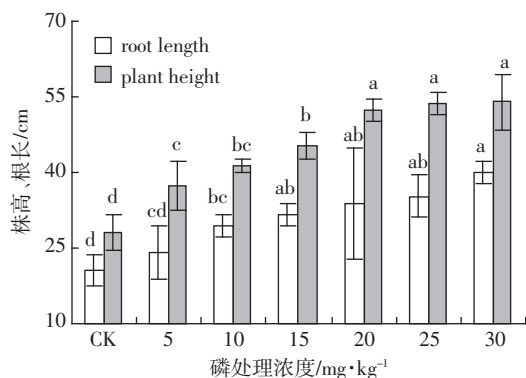
供试植物吸收土壤中的磷从而富集在各器官中的能力可分别用磷累积量、富集系数和迁移系数来表达。磷累积量=植株磷含量×植株生物量,它表示植株对土壤中磷的吸收能力,是评价植物对磷的累积能力的重要指标。富集系数(Bioaccumulation factor, BCF)=植株磷含量/土壤全磷含量,它能够反映植物将磷素从土壤中吸收转移到体内的能力大小。富集系数越高,表明植物体内磷素累积浓度越大,其累积能力也越强。迁移系数(Translocation factor, TF)=植物地上部分磷浓度/植物根部磷浓度,它可以评价植物从根部向地上部运输磷素的能力大小,也能反映出其在植物内的分布情况。

2 结果与讨论

2.1 不同浓度磷处理下水麻及醉鱼草的生长响应

在不同浓度磷处理下,水麻的株高、根长及地上部生物量均随着磷浓度的升高呈现上升趋势,但根生物量却随磷处理浓度的升高而表现出低促高抑的现象(图 1)。其中株高和生物量的增加量均极显著高于对照($P<0.01$)。在磷处理浓度为 30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,株高、根长和地上部生物量均达到最大值,分别为 54.00、40.00 cm 和 13.99 g,而根生物量在磷处理浓度为 25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达最大值,为 8.09 g。

醉鱼草株高和地上部生物量随着磷处理浓度的升高呈现低促高抑的现象(图 2)。在磷处理浓度为



注:图中同一系列柱上不同字母表示 $P < 0.05$ 水平上的差异显著。下同

图 1 不同浓度磷处理对水麻生长的影响

Figure 1 Growth responses of *D. orientalis* in treatment levels of phosphorus

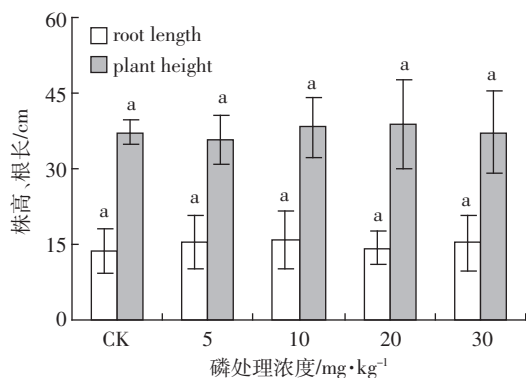


图 2 不同浓度磷处理对醉鱼草生长的影响

Figure 2 Growth responses of *B. lindleyana* in treatment levels of phosphorus

20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 株高和地上部生物量出现最大值, 分别为 39.00 cm 和 5.32 g; 同时, 在这一浓度下根部各指标达最小值, 根长 14.25 cm, 根生物量 0.98 g。

土壤磷含量过高, 会导致植物呼吸作用增强, 消耗大量糖分和能量, 并加速成熟进程, 导致营养体过小, 茎叶生长受到抑制^[13]。在磷处理浓度升高的情况下, 大部分植物的株高、根长会有显著变化, 呈现增加或低促高抑的趋势^[14]。本研究中, 水麻在设定的磷处理范围内, 株高、根长和地上部生物量呈线性变化(表 1), 虽然根生物量在最高磷处理浓度下有所降低, 但仍然极显著高于对照。土壤磷含量过高会导致植株地上部分和根系生长比例失调, 在地上部生长受抑制的同时, 根系发达^[13]。本试验中磷处理浓度较低时醉鱼草表现出这种趋势, 但随着磷处理浓度不断升高, 根部生物量逐渐降低, 地上部生物量却逐渐升高。醉鱼草在设计磷处理浓度下未产生明显的抑制生长现象; 水麻仅根生物量在最高磷处理浓度下出现了下降趋势, 但仍显著高于对照。这表明两种植物对高磷环境均有一定

的耐性, 而其耐性机理有待进一步研究。

2.2 水麻和醉鱼草的磷含量和累积量

不同植物体内磷含量差异较大^[15-16]。由图 3 可见, 不同磷处理水平下, 醉鱼草各部分磷含量在 3~4 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (DW) 之间, 各处理间差异均不显著 ($P > 0.05$)。水麻地上部及根部磷含量随着磷处理浓度的增大均呈上升趋势 (在 30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时出现的降低趋势不显著, $P > 0.05$), 其地上部和根部的磷含量与磷处理浓度分别呈现出二次和指数关系(表 1), 相关性极显著 ($R_{\text{shoot}} = 0.958^{**}$, $R_{\text{root}} = 0.930^{**}$, $P < 0.01$), 且其最大值分别为 7.57 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (DW) 和 5.07 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (DW), 具有一定的累积潜力。此外, 水麻地上部磷含量始终大于根部磷含量, 醉鱼草在磷处理浓度低于 10 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时也表现出地上部磷含量大于根部, 这与罗固源^[15]、尹毅^[17]等的研究基本一致。

在本试验设计的磷处理浓度范围内, 两种植物的地上部磷含量水麻为 4.61~7.57 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (DW), 醉鱼草为 3.15~3.75 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (DW)。与 Liu 推荐的磷修复植物大

叶烟类莓系属的牧草(*Poa pratensis*)、长牛鞭草(*Festuca arundinaceae*)和多年生黑麦草(*Lolium perenne*) (三者植物地上部磷含量 $3\sim 4.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)相比^[18],水麻对磷的累积能力更强,而醉鱼草稍弱。

随着磷处理浓度的增大,水麻地上部及根部磷累积量均呈上升趋势(表 1),而醉鱼草地上部磷累积量先升后降,但其根部磷累积量变化未呈现明显特征(表 2),表明水麻对磷的累积能力受处理浓度的影响

更为明显。由表 2 还可看出,水麻的生物量和磷含量均大于醉鱼草,故其磷累积量大于醉鱼草,且其地上部最大磷累积量达 $103.32\text{ mg}\cdot\text{pot}^{-1}$,是醉鱼草地上部最大磷累积量($18.07\text{ mg}\cdot\text{pot}^{-1}$)的 5.72 倍。可见,水麻对磷的累积能力明显大于醉鱼草。

2.3 水麻和醉鱼草的磷富集系数和迁移系数

随着磷处理浓度的增大,水麻和醉鱼草的磷富集系数均小于对照,并呈现出降低趋势(表 3)。水麻各

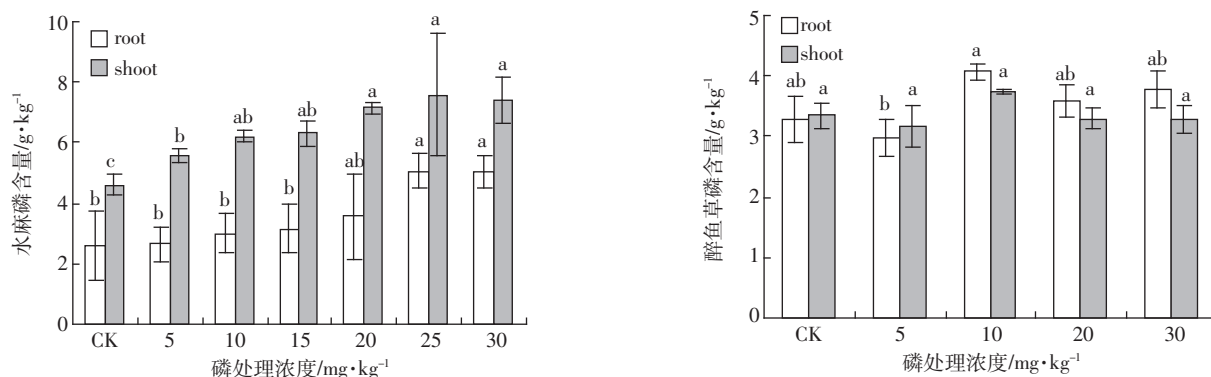


图 3 不同浓度磷处理下两种植物地上部和根部磷含量

Figure 3 Phosphorus contents in shoots and roots of two plants in treatment levels of phosphorus

表 1 水麻植株各指标(x)和土壤磷处理浓度(y)的相关性

Table 1 Relationships of growth parameters, phosphorus concentrations and accumulation of *D. orientalis* (x) with the phosphorus concentrations($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) in soil(y)

项目	回归方程	R	P
株高	$y=4.345\ 2x+27.19$	0.963	<0.01
根长	$y=3.035\ 7x+18.524$	0.987	<0.01
地上部生物量	$y=1.658\ 1x+2.805\ 2$	0.977	<0.01
根生物量	$y=-0.170\ 4x^2+2.341\ 9x-1.097\ 6$	0.946	<0.01
地上部磷含量	$y=-0.063\ 5x^2+0.980\ 4x+3.743\ 3$	0.984	<0.01
根部磷含量	$y=2.099\ 4e^{0.124\ 4x}$	0.954	<0.01
地上部磷累积量	$y=18.231x^{0.908\ 4}$	0.992	<0.01
根部磷累积量	$y=3.411x^{1.201\ 6}$	0.979	<0.01

表 2 不同浓度磷处理下两种植物地上部、根部的磷累积量($\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$)

Table 2 Phosphorus accumulations of shoots and roots of two plants in treatment levels of phosphorus($\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$)

处理	水麻 <i>D. orientalis</i>		醉鱼草 <i>B. lindleyana</i>	
	地上部	根部	地上部	根部
CK	$18.63\pm 3.78\text{e}$	$3.73\pm 2.12\text{e}$	$13.85\pm 0.52\text{a}$	$3.27\pm 1.58\text{a}$
T1	$33.67\pm 5.99\text{de}$	$7.66\pm 0.85\text{e}$	$13.35\pm 0.25\text{a}$	$4.08\pm 2.37\text{a}$
T2	$45.06\pm 1.81\text{d}$	$10.63\pm 2.95\text{de}$	$18.07\pm 1.56\text{a}$	$4.23\pm 1.76\text{a}$
T3	$68.94\pm 2.32\text{c}$	$16.86\pm 5.47\text{cd}$	—	—
T4	$83.06\pm 3.16\text{bc}$	$23.39\pm 8.64\text{bc}$	$17.58\pm 2.54\text{a}$	$3.51\pm 0.80\text{a}$
T5	$92.45\pm 29.67\text{ab}$	$41.04\pm 5.79\text{a}$	—	—
T6	$103.32\pm 11.96\text{a}$	$30.71\pm 4.58\text{b}$	$15.20\pm 0.99\text{a}$	$4.17\pm 2.26\text{a}$

注:同一列中不同字母表示 $P<0.05$ 水平上的差异显著。下同。

表 3 不同浓度磷处理下两种植物的富集系数

Table 3 Bioconcentration factor(BCF) of *B. lindleyana* and *D. orientalis* in treatment levels of phosphorus

处理	水麻 <i>D. orientalis</i>		醉鱼草 <i>B. lindleyana</i>	
	地上部	根部	地上部	根部
CK	12.93±2.30a	7.58±4.19a	5.06±1.91a	5.07±2.47a
T1	11.34±1.66a	5.50±1.81a	5.05±4.03a	5.32±5.25a
T2	10.19±0.80ab	4.93±1.08a	2.87±1.05a	3.14±1.36a
T3	8.40±0.73bc	4.16±0.93a	—	—
T4	8.49±0.38bc	4.26±1.80a	2.11±0.54a	2.32±0.74a
T5	8.31±2.42bc	5.56±0.81a	—	—
T6	7.41±1.38c	5.06±0.88a	1.95±0.78a	2.27±0.99a

部分的磷富集系数显著大于醉鱼草,其最大磷富集系数达 12.93, 是醉鱼草最大磷富集系数的 2.43 倍,表明水麻对磷的累积能力强于醉鱼草。

在不同磷处理浓度下,水麻的磷迁移系数均大于 1.0,醉鱼草的磷迁移系数为 0.87~1.08(表 4),且在磷处理浓度为 20 mg·kg⁻¹ 时降到 1.0 以下。水麻的磷迁移系数最大值达 2.33, 是醉鱼草最大磷迁移系数的 2.16 倍。Delorme^[9]推荐印度芥菜(*Brassica juncea*)、红三叶(*Trifolium pratense*)、油菜(*Brassica campestris* L.)、花椰菜(*var. botrytis* D C.)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和大豆(*Glycin max* L.)等作为磷污染土壤的修复植物,但其研究结果表明红三叶、油菜、花椰菜和大豆的磷迁移系数小于 1.0。本研究中水麻的磷迁移系数均大于 1.0, 表明它比前述几种植物更能有效地将根系吸收的磷转运到地上部器官,更能够有效地移除土壤中过剩的磷素,进而降低由于土壤磷素流失造成农业面源污染的风险。

3 结论

在本试验设计的磷处理水平内,水麻生物量随磷处理浓度的增大而增加,地上部和根部生物量最高分

别达到 13.99 g 和 8.09 g。醉鱼草的生物量随磷处理浓度的增大未呈现显著差异,但也未表现出明显的抑制生长现象。

水麻对磷的累积能力比醉鱼草强。水麻地上部和根部磷含量随磷处理浓度的升高而增加,并呈现地上部>根部的累积特征,且其地上部最大累积量为 103.32 mg·pot⁻¹,醉鱼草仅为 18.07 mg·pot⁻¹。醉鱼草各部分磷含量均极显著低于水麻。

综合分析表明,在一定磷浓度范围内,水麻对富磷环境有较强的适应能力和磷累积能力;而醉鱼草也能适应富磷环境,但对磷的累积能力较弱。因此,水麻和醉鱼草都具有高效移除土壤中过剩磷素的潜力。

参考文献:

- [1] 徐晓锋, 苗艳芳, 张菊萍, 等. 保护地土壤氮、磷积累及影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(2): 292-296.
XU Xiao-feng, MIAO Yan-fang, ZHANG Ju-ping, et al. Cumulative trend of nitrogen and phosphorus in protected soil and their impact on soil physical and chemical characteristics[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(2): 292-296.
- [2] 楼紫阳, 赵由才, 宋 玉, 等. 生活垃圾填埋场渗滤液性质随时间变化关系研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(6): 987-992.
LOU Zi-yang, ZHAO You-cai, SONG Yu, et al. Leachate composition changes over time: Data from the Laogang landfill in Shanghai[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6): 987-992.
- [3] 高 超, 张桃林. 太湖地区农田土壤磷素动态及流失风险分析[J]. 农村生态环境, 2000, 16(4): 24-27.
GAO Chao, ZHANG Tao-lin. Agricultural soil phosphorus dynamics in Taihu lake watershed and its environmental impact[J]. *Rural Eco-Environment*, 2000, 16(4): 24-27.
- [4] 盛海君, 夏小燕, 杨丽琴, 等. 施磷对土壤速效磷含量及径流磷组成的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2837-2840.
SHENG Hai-jun, XIA Xiao-yan, YANG Li-qin, et al. Effects of phosphorus application on soil available P and different P form in runoff[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2837-2840.
- [5] Sharpley A N, McDowell R W, Kleinman P J A. Phosphorus loss from

表 4 不同浓度磷处理下水麻和醉鱼草的磷迁移系数

Table 4 Translocation factor(TF) of *B. lindleyana* and *D. orientalis* in treatment levels of phosphorus

处理	迁移系数 TF	
	水麻 <i>D. orientalis</i>	醉鱼草 <i>B. lindleyana</i>
CK	2.25±1.52a	1.03±0.15a
T1	2.14±0.36a	1.08±0.24a
T2	2.12±0.34a	1.00±0.40a
T3	2.10±0.54a	—
T4	2.33±1.20a	0.93±0.10a
T5	1.48±0.22a	—
T6	1.47±0.09a	0.87±0.04a

- land to water; Integrating agricultural and environmental management[J]. *Plant and Soil*, 2001, 237: 287–307.
- [6] Chen M, Chen J, Sun F. Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 405: 140–152.
- [7] 刘小梅, 吴启堂, 李秉滔. 超累积植物治理重金属污染土壤研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 636–640.
- LIU Xiao-mei, WU Qi-tang, LI Bing-tao. Phytoremediation of heavy metal contaminated soil by hyper-accumulators: A review of researches in China and abroad[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5): 636–640.
- [8] 马牧源, 王 兰, 孙红文. 黄花鸢尾对富营养化水体净化的试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 448–452.
- MA Mu-yuan, WANG Lan, SUN Hong-wen. Purification of eutrophicated water by *Iris pseudoacorus*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2): 448–452.
- [9] Sharma N C, Sahi S V. Characteristics of phosphate accumulation in *Lolium multiflorum* for remediation of phosphorus-enriched soils[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39: 5475–5480.
- [10] Sharma N C, Sahi S V, Jain J C, et al. Enhanced accumulation of phosphate by *Lolium multiflorum* cultivars grown in phosphate-enriched medium[J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, 38: 2443–2448.
- [11] Novak J M, Chan A S K. Development of P-hyper accumulator plant strategies to remediate soils with excess P concentrations[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2002, 21: 493–509.
- [12] Pant H K, Mislevy P, Rechcigl J E. Effects of phosphorus and potassium on forage nutritive value and quantity; Environmental implications[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96: 1299–1305.
- [13] 陆景陵. 植物营养学(上册)[M]. 第二版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 48.
- LU Jing-ling. Plant nutrition[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003: 48.
- [14] 郭俊秀, 许秋瑾, 金相灿, 等. 不同磷质量浓度对穗花狐尾藻和轮叶黑藻生长的影响[J]. 环境科学学报, 2009, 29(1): 118–123.
- GUO Jun-xiu, XU Qiu-jin, JIN Xiang-can, et al. Effect of phosphorus concentration on growth of *Myriophyllum spicatum* and *Hydrilla verticillata*[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(1): 118–123.
- [15] 罗固源, 郑剑锋, 许晓毅, 等. 4种浮床栽培植物生长特性及吸收氮磷能力的比较[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 285–290.
- LUO Gu-yuan, ZHENG Jian-feng, XU Xiao-yi, et al. Comparison of the growth characteristics and nutrient uptake of four kinds of plants cultivated on a floating-bed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(2): 285–290.
- [16] 吴春笃, 沈明霞, 储金宇, 等. 北固山湿地蔺草氮磷积累和转移能力的研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(4): 674–678.
- WU Chun-du, SHEN Ming-xia, CHU Jin-yu, et al. On the capacity of accumulation and transfer of nitrogen and phosphorus in *Phalaris arundinacea* Linn in Mount Beigu Wetland[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(4): 674–678.
- [17] 尹 毅, 林 鹏. 红海榄红树林的氮、磷积累和生物循环[J]. 生态学报, 1993, 13(3): 221–227.
- YIN Yi, LIN Peng. The accumulation and biological cycle of nitrogen and phosphorus elements in *Rhizophora stylosa* community[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1993, 13(3): 221–227.
- [18] Liu H, Hull R J, Duff D T. Comparing cultivars of three cool-season turf-grasses for phosphate uptake kinetics and phosphorus recovery in the field[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1995, 18: 523–540.
- [19] Delorme T A, Angle J S, Coale F J, et al. Phytoremediation of phosphorus-enriched soils[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2000, 2: 173–181.