# 矿山生态型水蓼对施用猪粪土壤中磷的吸取净化效果

魏文静,李廷轩\*,张锡洲

(四川农业大学资源学院,四川成都 611130)

摘要: 【目的】针对猪粪不合理利用导致土壤中磷过剩和磷流失的突出问题, 明确磷富集植物矿山生态型水蓼 (Polygonum hydropiper) 对施用猪粪土壤磷的吸取净化效果,为高效提取施用猪粪土壤中的过量磷,降低磷素的 流失风险提供科学依据。【方法】采用微区模拟试验,根据农田磷肥安全用量 (< 200 kg/hm<sup>2</sup>),设1、2、3 kg/m<sup>2</sup> 共 3 个猪粪用量,以不施猪粪为对照 (CK),共 4 个处理,每处理 3 次重复。在矿山生态型水蓼收获期 (移 栽后 3 个月) 采集植物地上部,采用微波消解仪 (CEM MARS5, USA) 消解—全自动间断化学分析仪 (AQ2, UK) 测定植株磷含量,分析矿山生态型水蓼对猪粪处理土壤中磷的富集能力。在矿山生态型水蓼移栽前和收获后按 5 点采样法分别采取 0-20 cm 和 20-40 cm 土层土壤样品,测定土壤样品中的水溶性磷和有效磷含量,分析种 植矿山生态型水蓼前后猪粪处理土壤中易溶性磷含量的变化情况。【结果】不同用量猪粪处理下,矿山生态型 水蓼地上部生物量较不施猪粪处理分别显著增加了18.4、24.6和42.0g/株,最大时高达不施猪粪处理的 2.16 倍。各猪粪处理矿山生态型水蓼地上部磷含量显著高于不施猪粪处理,较不施猪粪处理分别增高了 0.60、 0.91 和 1.49 g/kg, 最高为施猪粪处理的 1.53 倍。矿山生态型水蓼地上部磷积累量随猪粪用量的增加而显著增 大,较不施猪粪处理分别增加了 P 84.0、124 和 236 mg/株,最高为不施猪粪处理的 3.32 倍。各处理下,种植矿 山生态型水蓼后 0-20 cm 土层中的水溶性磷和有效磷含量与种植前相比均显著降低,水溶性磷含量降低了 74.9%~81.5%,有效磷含量降低了 48.9%~60.0%; 20—40 cm 土层的水溶性磷和有效磷含量均无明显变化。 【结论】种植矿山生态型水蓼能显著减少表层土壤中水溶性磷和有效磷量,高效吸取净化猪粪带入土壤中磷。 因此,在高磷含量的土壤上种植、收获矿山生态型水蓼,是降低土壤磷素流失风险的有效生物手段。 关键词: 高磷土壤; 矿山生态型水蓼; 土壤富集磷; 猪粪; 生物净化

## Phytoextraction efficiency of P by mining ecotype of *Polygonum hydropiper* grown in soils amended with swine manure

WEI Wen-jing, LI Ting-xuan<sup>\*</sup>, ZHANG Xi-zhou (College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract: [ Objectives ]** Excess phosphorus (P) in soil is concerned for easy loss into environment. The phytoextraction efficiency of P by mining ecotypic *Polygonum hydropiper* (ME), a P enriching plant, was investigated for the effective remediation of excess P from soils and reduced risk of P loss. **[ Methods ]** A field plot experiment was conducted with 4 swine manure application rates of 0 (CK), 1, 2, 3 kg/m<sup>2</sup> with 3 replicates based on the safety rate of P fertilization in farmland (< 200 kg/hm<sup>2</sup>). The shoots of the ME were harvested after 3 months of transplanting and digested with a microwave digestion system (CEM MARS5, USA). The P contents in plant samples were determined by an auto discrete analyzer (AQ2, UK). Soil samples in the 0–20 cm and 20–40 cm layers before transplanting and after harvest were obtained using the five-point sampling method. The concentrations of water-soluble P and available P in soils were measured. **[ Results ]** The shoot biomasses of ME with different dosages of swine manure treatments were significantly greater than that of CK, with the increase of 18.4, 24.6 and 42.0 g/plant. The shoot biomass of ME in treatment of 3 kg/m<sup>2</sup> swine manure

收稿日期: 2018-07-13 接受日期: 2018-09-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41671323)。

联系方式:魏文静 E-mail: 2671082428@qq.com; \*通信作者 李廷轩 E-mail: litinx@263.net

1167

was 2.16 times greater than that of CK. P concentrations in the shoots of ME applied with different dosages of swine manure were significantly greater than that of CK, with the increase of 0.60, 0.91 and 1.49 g/kg respectively. The P content in shoot of ME in treatment of 3 kg/m<sup>2</sup> swine manure was 1.53 times greater than that of CK. Compared with CK, P accumulations in shoots of ME significantly increased with increasing application rate of swine manure, with the increments of P 84.0, 124 and 236 mg/plant respectively for the three manure dosage treatments. The P accumulation in shoots of ME under treatment of 3 kg/m<sup>2</sup> swine manure was 3.32 times greater than that of CK. The concentrations of water-soluble P and available P in the 0–20 cm soil layer after harvest decreased by 74.9%–81.5% and 48.9–60.0% respectively, compared with those before transplanting. However, no significant changes were observed for the concentrations of water-soluble P and available P in the 20–40 cm soil layer. **[ Conclusions ]** Mine ecotype of *Polygonum hydropiper* was proved to be an efficient plant for phytoextraction of P brought into soils by swine manure application. The significant decrease of water soluble and available P in surface soils reduce the possible P loss into environment.

Key words: high phosphorus soil; mining ecotypic *Polygonum hydropiper*; phosphorus enrichment in soil; pig manure; phytoextraction

近年来,随着我国养猪业迅速发展,猪粪排放 量不断增加。据统计,2015年我国猪粪排放量高达 16.4亿t,且成逐年增加的趋势<sup>[1]</sup>。由于猪粪中磷养 分含量丰富<sup>[2-3]</sup>,合理施用有助于土壤养分循环和维 持土壤肥力,是一种理想的肥料<sup>[4-5]</sup>。然而,在农业 生产中,通常将猪粪作为有机肥长期不合理还田, 施入土壤的磷远超过作物所需,导致磷在土壤中不 断累积,进而加剧磷素的流失风险<sup>[6-8]</sup>。研究表明, 长期施用或堆积猪粪的土壤中总磷超标 20 倍以上, 是渗漏或淋溶流失磷素的主要来源<sup>[9-10]</sup>。据报道,每 年全球大约有 30~40 万 t 的土壤磷迁移至受纳水体<sup>[2]</sup>, 该面源污染造成对水体总污染的贡献率高达 93%<sup>[11]</sup>。 因此,找到一种切实有效的方法提取猪粪处理土壤 中过量的磷,降低磷对环境的威胁具有重要的现实 意义。

利用磷富集植物提取土壤中的过量磷具有经济、环境友好、避免二次污染等优点,是降低磷素流失风险的一种切实有效措施<sup>[12-13]</sup>。已有研究表明,室内土培条件下,黑麦草在高浓度猪粪处理下,体内磷含量能达到 10 g/kg,对猪粪处理土壤中磷的积累能力较强<sup>[14]</sup>。与南瓜 (*Cucurbita moschata*)和苏丹草 (*Sorghum sudanense*)相比,向日葵 (*Helianthus annuus*)对土壤中磷的富集能力最强,是一种潜在的磷修复植物<sup>[15]</sup>。Priya和 Sahi<sup>[16]</sup>选育出一种杂交草 (*Duo festulolium*)对猪粪处理土壤中磷的磷富集特性较强。其他磷富集植物如象草 (*Pennisetum purpureum Schum*)<sup>[17]</sup>、澳洲狐尾 (*Ptilotus polystachyus*)<sup>[18]</sup>、矿山 生态型粗齿冷水花 (*Pilea sinofasciata*)<sup>[19]</sup>、蚕茧蓼 (*Polygonum japonicum*)<sup>[20]</sup>对施用猪粪土壤中磷也具有

较好的吸收积累能力。可见,目前对磷富集植物的 相关研究主要是在室内土培条件下研究它们对土壤 中磷的富集特征,极少或忽略了它们在大田应用中 对土壤中磷的吸取净化效果研究。

由于施入土壤中的磷易被固定、移动性较差, 短期内淋溶流失磷的量很小[21-22],相对于植物磷积累 量可忽略不计。因此,磷富集植物对土壤中磷的吸 取净化效果可通过种植磷富集植物后土壤中易溶性 磷含量的变化反映。土壤中的易溶性磷主要以水溶 性磷和有效磷的形式存在[23-24],种植磷富集植物后水 溶性磷和有效磷降低幅度越大,表明磷富集植物对 土壤中磷的吸取净化效果越好[25]。前期筛选出对磷富 集能力较强的水蓼<sup>[26]</sup>,在室内土培条件下对猪粪处理 土壤中磷的积累能力也很强[27-28]。由于生态型差异, 矿山生态型水蓼对磷的积累能力显著强于非矿山生 态型,其地上部磷积累量最大时达211 mg/株<sup>[29]</sup>。 因此,本研究在此基础上通过微区模拟试验,结合 猪粪处理土壤中易溶性磷含量变化,明确矿山生态 型水蓼对猪粪处理土壤中磷的吸取净化效果,为后 期合理利用矿山生态型水蓼提取猪粪处理土壤中的 过量磷、降低磷素的流失风险提供科学依据。

## 1 材料和方法

## 1.1 供试材料

供试植物: 矿山生态型水蓼 (*Polygonum hydropiper*),种子源自四川省什邡市磷矿区 (104°01′ E, 31°25′ N)。

供试土壤:灰潮土,采自四川省都江堰市蒲阳

镇双柏村,其基本理化性质为 pH 7.18、有机质 22.5 g/kg、全氮 2.54 g/kg、碱解氮 52.5 mg/kg、速效钾 25.8 mg/kg、有效磷 14.6 mg/kg 和水溶性磷 5.26 mg/kg。

供试猪粪采自都江堰市规模化养殖场,其基本 理化性质为 pH 6.89、有机质 196 g/kg、全氮 15.0 g/kg、全钾 10.3 g/kg、全磷 23.0 g/kg、无机磷 13.8 g/kg、有机磷 9.17 g/kg、有效磷 6.31 g/kg 和水溶性 总磷 4.31 g/kg。

### 1.2 试验设计与处理

采用随机区组设计,根据农田磷肥安全用量 (<200 kg/hm<sup>2</sup>),设1、2和3 kg/m<sup>2</sup>共3个猪粪用量 (相当于200、400和600 kg/hm<sup>2</sup>的磷肥施用量),以 不施猪粪为对照,共4个处理,每处理重复3次。 通过微区模拟试验,微区面积1.5 m<sup>2</sup>(1.5 m×1.0 m)。 猪粪于4月份一次性施入,并将其混入0—20 cm 土 层中,陈化一个月后移栽矿山生态型水蓼幼苗。

矿山生态型水蓼经选种育苗,待植株生长至10 cm 左右时选择生长状况良好长势一致的幼苗,按每 微区56穴(间距20 cm×15 cm),每穴1株进行移 栽。植株生长期间按常规管理,并记录其生长状况。

#### 1.3 样品采集与制备

于初花期(移栽后3个月)收获植株地上部,先 采用棋盘法每小区采集9株,每3株作为1个混合 样,称鲜重后先用自来水冲洗,再用蒸馏水润洗, 洗净后用吸水纸擦干,装到信封袋中105°C杀青30 min,75°C烘干至恒重,称重,然后粉碎过筛用于地 上部磷含量测定。

分别于矿山生态型水蓼移栽和收获当天按"S"型5点采样法分别采取0—20和20—40 cm 土层土壤, 土壤风干、磨碎、过筛后,测定土壤水溶性磷、有效磷含量。

### 1.4 测定项目与方法

土壤基本理化性质的测定采用常规分析方法<sup>[30]</sup>; 植株地上部生物量(干重)采用烘干称重法测定;植 株地上部磷含量采用微波消解仪(CEM MARS5, USA)消解—全自动间断化学分析仪(AQ2,UK)测定<sup>[30]</sup>; 土壤水溶性磷采用去离子水浸提—钼锑抗比色法测 定<sup>[30]</sup>;土壤有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提—钼 锑抗比色法测定<sup>[30]</sup>;全磷采用 NaOH 熔融—钼锑抗 比色法测定<sup>[30]</sup>;无机磷采用 0.5 mol/L (1/2 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)浸 提—钼锑抗比色法测定<sup>[30]</sup>;有机磷的含量为全磷和无 机磷的差值。

#### 1.5 数据处理

地上部磷积累量 (mg/株) = 地上部生物量×地上 部磷含量;

采用 SPSS (20.0) 进行统计分析,用 LSD 法进行 多重比较,采用 Origin (8.0) 制图。

## 2 结果与分析

## 2.1 不同猪粪用量对矿山生态型水蓼地上部生物 量的影响

随着猪粪用量的增加, 矿山生态型水蓼地上部 生物量逐渐增大, 增幅在 11.3%~51.1% 之间。各猪 粪处理下, 矿山生态型水蓼地上部生物量显著大于 不施猪粪处理, 1、2和3kg/m<sup>2</sup>猪粪处理下矿山生态 型水蓼地上部生物量分别由不施猪粪处理的 36.2 g/株 增加到 54.6、60.8和 78.2 g/株, 分别增加了 18.4、24.6和 42.0 g/株, 分别是不施猪粪处理的 1.51、1.68和 2.16倍。说明施用猪粪有利于矿山生 态型水蓼吸取净化土壤中的过量磷 (图 1)。



#### 图 1 不同猪粪用量下矿山生态型水蓼地上部生物量 Fig. 1 Biomass of shoot in mine ecotype *Polygonum hydropiper* grown under different swine manure dosages

[注(Note): 柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 Different letters above the bars indicate significant differences among treatments (*P*<0.05).]

## 2.2 不同猪粪用量对矿山生态型水蓼地上部磷含 量和积累的影响

矿山生态型水蓼地上部磷含量随着猪粪用量的 增加而增大,增幅在9.11%~21.3%之间。与不施猪 粪处理相比,各猪粪处理下矿山生态型水蓼地上部 磷含量显著增大,1、2和3kg/m²猪粪处理下矿山生 态型水蓼地上部磷含量分别由不施猪粪处理的2.82 g/kg增加到3.42、3.73和4.31g/kg,分别增高了0.60、 0.91和1.49g/kg,分别为不施猪粪处理的1.21、 1.32和1.53倍(图2)。





[42] (Note) : לבבירייה (r < 0.05) Different letters above the bars indicate significant differences among treatments (P < 0.05).]

随着猪粪用量的增加, 矿山生态型水蓼地上部 磷积累量显著增大, 增幅在 21.9%~81.5% 之间。各 猪粪处理下, 矿山生态型水蓼地上部生物量显著大 于不施猪粪处理, 1、2和3kg/m<sup>2</sup>猪粪处理下矿山生 态型水蓼地上部磷积累量分别由不施猪粪处理的 102 mg/株增加到了 186、226和 338 mg/株, 分别增加 了 84.0、124和 236 mg/株, 分别是不施猪粪的 1.45、2.22和 3.32 倍。说明种植矿山生态型水蓼能 有效吸取土壤中的过量磷 (图 2)。

## **2.3** 种植矿山生态型水蓼前后土壤中易溶性磷含 量的变化

随着猪粪用量的增加,种植矿山生态型水蓼前 0—20 cm 土层中的水溶性磷含量显著增大,种植矿 山生态型水蓼后除 3 kg/m<sup>2</sup> 猪粪处理外,0—20 cm 土 层中的水溶性磷含量均无明显变化;种植矿山生态型水蓼前后 20—40 cm 土层中的水溶性磷含量均无 明显变化。种植矿山生态型水蓼后各处理 0—20 cm 土层中的水溶性磷含量与种植前相比显著降低,分 别由种植前的 5.62、16.4、26.1 和 35.9 mg/kg 降低到 了 2.64、3.73、4.82 和 9.01 mg/kg,分别降低了 2.98、12.7、21.3 和 26.9 mg/kg。其中,猪粪处理下 0—20 cm 土层中的水溶性磷含量降低了 74.9%~ 81.5%,远大于不施猪粪处理的 53.0%。各处理下, 种植矿山生态型水蓼后 20—40 cm 土层中的水溶性 磷含量较种植前均无明显变化 (图 3)。

种植矿山生态型水蓼前后,0—20 cm 土层中的 有效磷含量均随猪粪用量的增加而显著增大, 20—40 cm 土层中无明显变化。各处理下种植矿山生





[注(Note): 柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著; \*表示同一猪粪用量种植前后差异显著。Different letters above the bars indicate significant differences among treatments (*P*<0.05); \*indicate that the P contents are significant differences before and after planting under the same swine manure dosage (*P*<0.05).]

态型水蓼后 0—20 cm 土层中的有效磷含量与种植前 相比显著降低,分别由种植前的 14.6、35.1、54.1 和 74.6 mg/kg 降低到了 6.48、14.0、27.6 和 37.3 mg/kg, 分别降低 8.12、21.1、26.5 和 37.3 mg/kg,降幅分别 为 55.6%、60.0%、48.9% 和 50.0%。各处理下,种 植矿山生态型水蓼后 20—40 cm 土层中的有效磷含 量较种植前均无明显变化 (图 3)。

## 3 讨论

#### 3.1 矿山生态型水蓼对土壤中磷的提取能力

目前,有关磷富集植物提取土壤中磷的研究较 多,但是对于磷富集植物在实际应用中对土壤中磷 提取效果的研究还很缺乏。前期通过室内土培实验 研究发现,矿山生态型水蓼对土壤中磷的耐性、活 化能力和积累能力均很强,显著强于非矿山生态 型<sup>[27-28]</sup>。因此,本研究在前期研究的基础上通过微区 模拟试验,结合土壤中易溶性磷含量的变化,探讨 矿山生态型水蓼对土壤中磷的吸取净化效果。

相关研究表明,猪粪中养分含量丰富<sup>[2-3]</sup>,合理施用猪粪有助于土壤养分循环和磷富集植物的生长,从而有利于磷富集植物提取土壤中的过量磷<sup>[18,29]</sup>。对土壤中磷吸取净化效果较好的磷富集植物如杂交草(*Duo festulolium*)<sup>[16]</sup>、黑麦草(*Lolium rigidum* Gaudin)<sup>[31]</sup>等地上部干重均随着猪粪用量的增加而增大,最大时分别为 51.0 和 46.2 g/株。

本研究中,各猪粪处理下,矿山生态型水蓼地 上部生物量显著大于不施猪粪处理,最大时高达 78.2 g/株,远大于以上磷富集植物。磷富集植物要有 效地提取土壤中的过剩磷,除了有较大的地上部生 物量外,其地上部磷含量也应较高,至少应达 10 g/kg<sup>[13,32]</sup>。虽然本研究中矿山生态型水蓼地上部磷含 量随猪粪用量的增加而增大,但最大时仍不足 10 g/kg。

相关研究发现,植物对磷的吸收在很大程度上 受根际磷素有效性的影响,土壤中有机磷占总磷的 百分比越高植物体内磷含量越低<sup>[33-34]</sup>。即使是同种植 物,在无机磷处理下其体内磷含量也显著大于有机 磷及鸡粪处理<sup>[14,20]</sup>。

本研究中施用的猪粪,有机磷占总磷的 39.9%, 施入土壤后这部分磷需经磷酸酶矿化分解为无机磷 才能被矿山生态型水蓼吸收利用。一些磷提取效果 较好的富磷植物如一年生黑麦草 (Lolium multiflorum)<sup>[35]</sup>、 马唐 (Digitaria ciliaris)<sup>[36]</sup>在猪粪处理下其地上部磷含 量也不足 10 g/kg。磷富集植物吸取净化土壤中磷的 高效率主要通过地上部带走磷的总量反映。本研究 中, 矿山生态型水蓼地上部磷积累量随猪粪用量增加显著增大, 最大时可高达 P 338 mg/株, 相比黑麦草等更有利于富集土壤中的过量磷。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)地上部磷积累量最高也仅为 80.1、38.7 和 31.7 mg/株<sup>[57]</sup>。另外,本研究还发现,在1kg/m²猪粪处理下矿山生态型水蓼地上部生物量、磷含量和磷积累量的增幅均最大,这与李青军等对棉花的研究结果相似<sup>[38]</sup>,可能与植物在苗期吸磷量较多有关, 若苗期缺磷,会影响植物后期生长。可见,猪粪处理下矿山生态型水蓼对土壤中磷的富集能力很强。

#### 3.2 矿山生态型水蓼对土壤中磷的吸取净化效果

土壤中的易溶性磷主要以水溶性磷和有效磷的 形式存在,其含量越高,磷素流失的风险越大<sup>[23-24]</sup>。 相关研究表明,猪粪中的磷养分含量丰富,当猪粪 作为有机肥不合理还田时,土壤中的水溶性磷和有 效磷含量迅速增加<sup>[39-40]</sup>。

本研究中,随着猪粪用量的增加,种植矿山生态型水蓼前,0—20 cm 土层中的水溶性磷和有效磷含量显著增加,与上述研究结果一致。种植矿山生态型水蓼后,除3 kg/m²猪粪处理外,0—20 cm 土层中的水溶性磷含量均无明显变化,这主要与水溶性磷是土壤中活性最高的磷组分,能被植物直接吸收利用有关<sup>[28]</sup>。0—20 cm 土层中的有效磷含量随猪粪用量增加而显著增加,这主要是因为施用猪粪后土壤有效磷的增加量明显大于植物吸收利用的磷含量。20—40 cm 土层中的水溶性磷和有效磷含量均无明显变化,这主要是由于施入土壤中的磷易被固定、移动性较差,短期内淋溶流失磷的量很小<sup>[21-22]</sup>。

已有研究表明,利用磷富集植物提取土壤中的 过量磷是降低磷素流失风险的一种切实有效措 施<sup>[12-13]</sup>。磷富集植物对土壤中磷的吸取净化效果,主 要通过磷富集植物对土壤中水溶性磷和有效磷的吸 取净化效果反映<sup>[25,33,41]</sup>。

本研究中,各猪粪处理下种植矿山生态型水蓼 后 0—20 cm 土层中的水溶性磷含量较种植前显著降 低,降幅高达 74.9%~81.5%,远大于不施猪粪处理 的 53.0%。相比牧草 (*Herbage*)、紫花苜蓿 (*Alfalfa*) 等磷富集植物的 30.6%~60.1% 和 40.3%~56.8%, 矿山生态型水蓼对土壤水溶性磷的吸取净化效果明 显更好<sup>[25,33]</sup>。同时,种植矿山生态型水蓼后,本研究 各处理 0—20 cm 土层中的有效磷含量较种植前均显 著降低,降幅为 48.9%~60.0%,远大于种植不同作 物和不同基因型豇豆后有效磷最大降幅 34.5% 和 22.1%<sup>[42]</sup>。另外,本研究中种植矿山生态型水蓼后, 20—40 cm 土层中的水溶性磷和有效磷含量均无明显 变化,这主要是因为水蓼是须根系植物,根系主要 生长在 0—20 cm 土层中。可见,矿山生态型水蓼较 其他磷富集植物对土壤中磷的吸取净化效果明显更 好。因此,可通过收获矿山生态型水蓼地上部,有 效降低土壤中的过量磷,减少磷素流失对环境的 威胁。

## 4 结论

1) 矿山生态型水蓼对土壤中的磷具有很强的富 集能力,且随着猪粪用量的增加其对土壤中磷的富 集能力显著增强,在3kg/m<sup>2</sup>时其地上部磷积累量最 大,高达 P 338 mg/株。

2) 种植并收获矿山生态型水蓼可显著降低 0—20 cm 土层中的水溶性磷和有效磷含量,水溶性磷含量 最大可降低 81.5%,有效磷含量最大可降低 60.0%。 可见,矿山生态型水蓼是净化猪粪带入土壤中过量 磷的高效植物。

#### 参 考 文 献:

- [1] 陈菲菲,张崇尚,王艺诺,等.规模化生猪养殖粪便处理与成本收益 分析[J].中国环境科学, 2017, 37(9): 3455–3463.
  Chen F F, Zhang C S, Wang Y N, *et al.* Patterns and cost-benefit analysis of manure disposal of scale pig production in China[J].
  China Environmental Science, 2017, 37(9): 3455–3463.
- [2] 朱建春, 张增强, 樊志民, 等. 中国畜禽粪便的能源效果与氮磷耕地 负荷及总量控制[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 435–445. Zhu J C, Zhang Z Q, Fan Z M, *et al.* Biogas potential, cropland load and total amount control of animal manure in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(3): 435–445.
- [3] Pagliari P H, Laboski C A M. Investigation of the inorganic and organic phosphorus forms in animal manure[J]. Journal of Environmental Guality, 2012, 41(3): 901–910.
- [4] Nicholson F A, Bhogal A, Chadwick D, et al. An enhanced software tool to support better use of manure nutrients: MANNER - NPK[J]. Soil Use and Management, 2013, 29(4): 473–484.
- [5] Pizzeghello D, Berti A, Nardi S, et al. Phosphorus-related properties in the profiles of three Italian soils after long-term mineral and manure applications[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2014, 189(6): 216–228.
- [6] Pagliari, Paulo H, Laboski, *et al.* Dairy manure treatment effects on manure phosphorus fractionation and; changes in soil test phosphorus[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(8): 987–999.
- [7] Duan Y, Xu M, He X, et al. Long-term pig manure application reduces the requirement of chemical phosphorus and potassium in two rice-wheat sites in subtropical China[J]. Soil Use and

Management, 2011, 27(4): 427-436.

- [8] Xue Q Y, Shamsi I H, Sun D S, et al. Impact of manure application on forms and quantities of phosphorus in a Chinese Cambisol under different land use[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(5): 837–845.
- [9] Nelson N O, Parsons J E, Mikkelsen R L. Field-scale evaluation of phosphorus leaching in acid sandy soils receiving swine waste[J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34(6): 2024–2035.
- [10] Lemaire G, Franzluebbers A, de Faccio Carvalho P C, et al. Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2014, 190(6): 4–8.
- [11] Ongley E D, Zhang X, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1159–1168.
- [12] Novak J M, Chan A S K. Development of P-hyperaccumulator plant strategies to remediate soils with excess P concentrations[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2002, 21(5): 493–509.
- [13] Van d S C, Chardon W J, Koopmans G F, et al. Phytoextraction of phosphorus-enriched grassland soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(2): 751–761.
- [14] Sharma N C, Sahi S V. Enhanced organic phosphorus assimilation promoting biomass and shoot P hyperaccumulations in *Lolium multiflorum* grown under sterile conditions[J]. Environmental Science Technology, 2011, 45(24): 10531–10537.
- [15] 吴浩, 卢志军, 黄汉东, 等. 三种植物对土壤中磷吸收和富集能力的 比较[J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 63-71.
  Hao W U, Lu Z J, Huang H D, *et al.* Comparison of phosphorus uptake and accumulation capacity among three plant species[J].
  Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(1): 63-71.
- [16] 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.
- [17] Silveira M L, Vendramini J M B, Sui X, *et al.* Screening perennial warm-season bioenergy crops as an alternative for phytoremediation of excess soil P[J]. Bioenergy Research, 2013, 6(2): 469–475.
- [18] Suriyagoda L B D, Tibbett M, Edmonds-Tibbett T, et al. Poor regulation of phosphorus uptake and rhizosphere carboxylates in three phosphorus-hyperaccumulating species of *Ptilotus*[J]. Plant and Soil, 2016, 402(1–2): 145–158.
- [19] Ye D, Li T, Zhang X, et al. P uptake characteristics and P removal potentials of *Pilea sinofasciata* grown under soils amended with swine manure[J]. Ecological Engineering, 2014, 73(45): 553–559.
- [20] Liu D, Ye D, Li T, et al. Practicability of using Polygonum japonicum, as a P accumulator for P phytoextraction from soil amended with swine manure[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 112(112): 11-17.
- [21] 区惠平,周柳强,黄美福,等.不同施磷量下稻田土壤磷素平衡及其 潜在环境风险评估[J].植物营养与肥料学报,2016,22(1):40-47. Ou H P, Zhou L Q, Huang M F, et al. Phosphorus balance in paddy soils and its environmental effect under different phosphorus application rates[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(1): 40-47.

- [22] Yan Y, Cheng H L, Feng M X, et al. Relationship between phosphorus fractions in paddy soil and phosphorus release to runoff amended with manure[J]. CLEAN-Soil Air Water, 2018, 17(2): 81–92.
- [23] Yang Y, Zhang H, Qian X, et al. Excessive application of pig manure increases the risk of P loss in calcic cinnamon soil in China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609(17): 102–108.
- [24] Faridullah F, Hafeez S, Ahmed T, et al. Characterization of phosphorus in fresh and composted manures of different livestock[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27(2): 615–622.
- [25] Missaoui A M, Young J. Genetic gain from selection and potential for improving alfalfa phosphorus uptake and removal from soils heavily amended with poultry litter[J]. Euphytica, 2016, 209(2): 495–506.
- [26] 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]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 171(1): 542–550.
- [27] Ye D, Li T, Chen G, et al. Influence of swine manure on growth, P uptake and activities of acid phosphatase and phytase of *Polygonum* hydropiper[J]. Chemosphere, 2014, 105(3): 139–145.
- [28] Ye D, Li T, Yu H, et al. P accumulation of Polygonum hydropiper, soil P fractions and phosphatase activity as affected by swine manure[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 86(86): 10–18.
- [29] Ye D, Li T, Zhang X, et al. Rhizosphere P composition, phosphatase and phytase activities of *Polygonum hydropiper* grown in excess P soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, 53(8): 823–836.
- [30] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
   Lu R K. Analytical methods of soil and agricultural chemistry[M].
   Beijing: China Agricultural Scientech Press, 2000.
- [31] Kuligowski K, Gilkes R J, Poulsen T G, et al. Ash from the thermal gasification of pig manure—effects on ryegrass yield, element uptake, and soil properties[J]. Soil Research, 2012, 50(5): 406–415.
- [32] Sharma N C, Starnes D L, Sahi S V. Phytoextraction of excess soil phosphorus[J]. Environmental Pollution, 2007, 146(1): 120–127.
- [33] Sharma N C, Sahi S V, Jain J C, et al. Enhanced accumulation of phosphate by *Lolium multiflorum* cultivars grown in phosphateenriched medium[J]. Environmental Science and Technology, 2004, 38(8): 2443–2448.

- [34] Padmanabhan P, Starnes D L, Sahi S V. Differential responses of duo grass (*Lolium×Festuca*), a phosphorus hyperaccumulator to high phosphorus and poultry manure treatments[J]. African Journal of Biotechnology, 2013, 12(21): 3191–3195.
- [35] 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*)[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2008, 46(5): 580–589.
- [36] Gotcher M J, Zhang H, Schroder J L, et al. Phytoremediation of soil phosphorus with crabgrass[J]. Agronomy Journal, 2012, 106(2): 528–539.
- [37] Yan K, Wong M H G, Zhang L, et al. Is phytoextraction efficient for remediating phosphorus-enriched soils in mountainous region? A case study of lake Dianchi watershed of southwestern China[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 448(48): 488–493.
- [38] 李青军,张炎,哈丽哈什·依巴提,等.棉花高产和磷高效的磷肥基施追施配合技术研究[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(1): 146-153.

Li Q J, Zhang Y, Harlhax Y B T, *et al.* Basal and topdressing application technology of phosphate fertilizer for high cotton yield and high phosphorous efficiency in Xinjiang[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2018, 24(1): 146–153.

- [39] Wienhold B J, Gilley J E. Runoff losses of N and P after low phosphorus swine slurry application to no-tillage sorghum[J]. Soil Science, 2010, 175(5): 201–206.
- [40] Liang X, Jin Y, He M, et al. Composition of phosphorus species and phosphatase activities in a paddy soil treated with manure at varying rates[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2017, 237(237): 173–180.
- [41] 樊红柱, 陈庆瑞, 郭松, 等. 长期不同施肥紫色水稻土磷的盈亏及有效性[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 154–162.
  Pan H Z, Zhen Q R, Guo S, *et al.* Phosphorus balance and availability in a purple paddy soil under long-term different fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2018, 24(1): 154–162.
- [42] Dadson R B, Javaid I, Hashem F M, et al. Phytoremediation of poultry manure-enriched soils for phosphorus using cowpea genotypes[J]. Journal of Crop Improvement, 2012, 26(6): 835–841.