

## 氮肥用量对油菜吸收积累镉的影响

王辉<sup>1</sup>, 许超<sup>2</sup>, 罗尊长<sup>3</sup>, 王帅<sup>2</sup>, 熊婕<sup>2</sup>, 朱奇宏<sup>2</sup>, 朱捍华<sup>2</sup>, 黄道友<sup>2</sup>

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 3. 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125)

**摘要:** 为了探明油菜用于植物修复时其适宜的氮肥用量, 采用大田试验研究了 0, 90, 120, 150, 180 kg/hm<sup>2</sup> 5 个氮肥用量水平对油菜 (*Brassica campestris* L.) 湘杂油 743 和沔油 682 地上部生物量和吸收积累镉的影响。结果表明, 施用氮肥显著提高了油菜地上部生物量; 与对照相比, 施氮处理湘杂油 743 和沔油 682 地上部生物量分别提高了 473.9%~1 055.5% 和 412.4%~1 164.6%。施氮提高了油菜根系对镉的吸收和镉向地上部转运积累。施氮处理湘杂油 743 和沔油 682 根系镉含量分别增加 1.5%~21.9% 和 6.0%~26.3%, 地上部镉含量分别显著增加 22.2%~82.8% 和 19.5%~45.8%, 地上部镉累积量分别显著增加 598.5%~1 912.4% 和 518.6%~1 571.3%, 镉转移系数分别增加 18.5%~65.1% 和 1.7%~19.3%。油菜根系镉含量与土壤 CaCl<sub>2</sub>-Cd 含量显著正相关。施氮下土壤镉有效性和镉转移系数的提高是油菜镉吸收积累增加的主要原因。本试验条件下, 油菜用于植物修复时其适宜氮肥用量为 150 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 氮; 油菜; 镉; 产量; 转移系数

中图分类号: Q948.116

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)06-0302-04

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.06.047

## Effects of Nitrogen Application Level on Cadmium Uptake and Accumulation in Rape

WANG Hui<sup>1</sup>, XU Chao<sup>2</sup>, LUO Zunchang<sup>3</sup>, WANG Shuai<sup>2</sup>,

XIONG Jie<sup>2</sup>, ZHU Qihong<sup>2</sup>, ZHU Hanhua<sup>2</sup>, HUANG Daoyou<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128;

2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125; 3. Institute of Soils and Fertilizers of Hunan Province, Changsha 410125)

**Abstract:** In order to find out the suitable amount of nitrogen fertilizer for rapeseed for phytoremediation, a field experiment was conducted to study the effect of five nitrogen levels (0, 90, 120, 150 and 180 kg/hm<sup>2</sup>) on the yield, cadmium (Cd) uptake and accumulation of rape (*Brassica campestris* L.) (Xiangzayou 743 and Fengyou 682). Results showed that the application of nitrogen fertilizer significantly increased shoot biomass of rape. Compared with the control treatment, the shoot biomass of 'Xiangzayou 743' and 'Fengyou 682' was significantly increased by 473.9%~1 055.5% and 412.4%~1 164.6%, respectively. Nitrogen application increased the uptake of Cd by rape roots and the transportation of Cd from root to shoot. With nitrogen treatments, Cd concentrations in root of 'Xiangzayou 743' and 'Fengyou 682' were increased by 1.5%~21.9% and 6.0%~26.3%, respectively, while Cd concentrations in shoot increased significantly by 22.2%~82.8% and 19.5%~45.8%, respectively. Cd accumulation in shoot were increased significantly by 598.5%~1 912.4% and 518.6%~1 571.3%, and the Cd transfer coefficients increased by 1.7%~19.3% and 18.5%~65.1%, respectively. Cd concentration in roots was significantly negatively correlated with soil CaCl<sub>2</sub>-Cd concentration. The main reason for increasing Cd accumulation in shoot of rape was the increase of bioavailability and the transfer coefficient of Cd. Under this experimental condition, the suitable nitrogen application level for rape for phytoremediation was 150 kg/hm<sup>2</sup>.

**Keywords:** nitrogen; rape; cadmium; yield; transfer coefficient

收稿日期: 2017-05-24

资助项目: 农办财函(2016-6 号); 国家科技支撑计划项目(2015BAD05B02); 湖南省自然科学基金项目(2015JJ2081); 博士后基金(2014M562110)

第一作者: 王辉(1991—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事重金属污染农田安全利用研究。E-mail: 1368878103@qq.com

通信作者: 罗尊长(1963—), 男, 研究员, 主要从事土壤污染控制研究。E-mail: 1650862241@qq.com

许超(1978—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事重金属污染土壤安全利用研究。E-mail: xuchao1388@126.com

近年来,随着工农业的迅速发展,我国农田土壤中 Cd 污染程度日益加重,严重影响了生态环境与农产品安全。植物提取修复技术因其费用低廉、不破坏土体结构、绿色环保等优势被广泛关注<sup>[1-2]</sup>。施肥是提高强化植物修复效率的重要农艺措施之一<sup>[3-4]</sup>。氮是植物生长必需的营养元素之一,施用氮肥显著提高植物修复镉污染土壤的效率<sup>[3,5]</sup>。室外盆栽试验结果表明,(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 显著提高了龙葵地上部镉积累量,随着氮肥用量的增加其地上部镉积累量增加,施氮 400 mg/kg 时地上部镉积累量提高 2.8 倍<sup>[3]</sup>。盆栽试验研究表明,施用铵态氮肥伴矿景天镉总吸收量增加率为 123%<sup>[6]</sup>。盆栽试验表明,随着施氮量的增加,五星花(*Pentas lanceolata*) 镉积累量增加,32 mmol/L 施氮量下镉积累量最大<sup>[7]</sup>。以上室内盆栽试验表明,施氮对富集植物镉吸收积累的影响与氮素形态和氮水平有关,田间条件下研究施氮对富集植物镉吸收积累的影响可为利用氮肥强化镉污染土壤的植物修复效率提供依据。

油菜是一种对镉具有较强富集能力的作物,具有生物量大、易种植、抗胁迫能力强等特征,在镉污染土壤的植物修复中具有较大的修复潜力<sup>[8]</sup>。本研究采用田间试验,探讨不同施氮水平对土壤镉有效性及油菜镉吸收积累的影响,以期对镉污染土壤的植物修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试油菜为湘杂油 743 和沔油 682,种子购自长沙芙蓉区农科院种子市场;供试土壤为湖南省长沙市长沙县北山镇荣和桥社区镉污染土壤,其基本理化性质为:pH 4.96,有机质 33.80 g/kg,CEC 7.90 cmol/kg,全氮 3.35 g/kg,总镉 1.51 mg/kg,CaCl<sub>2</sub>-Cd 0.35 mg/kg。

1.2 试验设计

试验共设计 5 个氮肥用量处理,施氮量分别为 0,90,120,150,180 kg/hm<sup>2</sup>,分别记为 CK、N1、N2、N3、N4。氮肥用尿素(含 N 46%),磷肥采用过磷酸钙,钾肥用硫酸钾。所有处理均施磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)90 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥(K<sub>2</sub>O)120 kg/hm<sup>2</sup>。氮、磷、钾肥均作基肥于油菜移栽前 1 天施入。每小区面积 2.4 m<sup>2</sup>,每处理重复 3 次。

油菜栽培管理措施与正常生产一致。2015 年 10 月 24 日移栽生长一致的油菜于小区中,每小区 54 株,2016 年 3 月 11 日收获采样。采用“五点法”分别对各小区进行样品的采集,即每个小区采 5 株油菜,所采油菜尽量保持长势一致,同时“点对点”原位采集土壤样品。将植株根系和地上部分离、洗净,在 105

℃杀青 30 min,70 ℃烘干至恒重,用不锈钢粉碎机粉碎,充分混匀,备用。土壤样品风干后,用圆木棍磨细,过 20 目筛,保存备用。

1.3 样品分析

土壤 pH 值采用 PHs-3C 酸度计测定,土水比为 1:2.5(W:V)<sup>[9]</sup>。有机质含量采用重铬酸钾容量法—外加热法测定<sup>[9]</sup>;CEC 采用乙酸铵交换法测定<sup>[9]</sup>;总氮含量采用半微量开氏法测定<sup>[9]</sup>;土壤总 Cd 采用 HCl—HNO<sub>3</sub>—HClO<sub>4</sub>(V<sub>HCl</sub>:V<sub>HNO<sub>3</sub></sub>:V<sub>HClO<sub>4</sub></sub>为 15:5:3)消煮,定容过滤后用电感耦合等离子光谱发生仪(ICP-OES,720ES)测定<sup>[9]</sup>;土壤有效态镉含量采用 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液浸提<sup>[10]</sup>,滤液用电感耦合等离子光谱发生仪(ICP-OES,720ES)测定;油菜地上部和根系镉含量采用混酸 HNO<sub>3</sub>—HClO<sub>4</sub>(V<sub>HNO<sub>3</sub></sub>:V<sub>HClO<sub>4</sub></sub>为 5:1)消解,滤液用电感耦合等离子光谱发生仪(ICP-OES,720ES)测定。

转移系数=地上部镉含量/根系镉含量

地上部镉积累量=地上部生物量×地上部镉含量

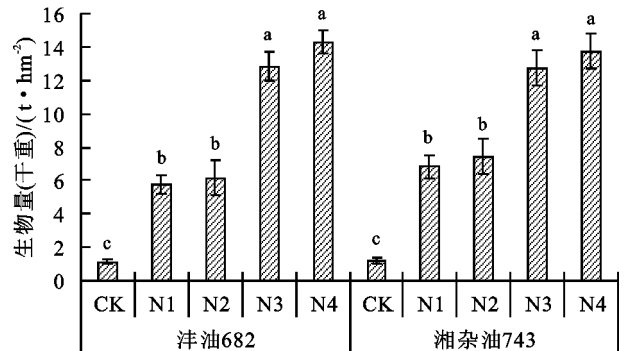
1.4 数据处理

运用 Excel 2007 软件进行数据处理及表格制作,SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析,LSD 法做多重比较和差异显著性检验,数据以平均值±标准差来表示。

2 结果与分析

2.1 施氮量对油菜地上部生物量的影响

油菜湘杂油 743 和沔油 682 地上部生物量均随着施氮量的增加而增加(图 1)。与不施氮(CK)处理相比,N1、N2、N3 和 N4 处理湘杂油 743 地上部生物量分别显著提高 473.9%,524.4%,986.9%和 1 055.5%,相应地沔油 682 地上部生物量分别显著提高 412.4%,443.4%,1 034.5%和 1 164.6%(图 1)。N3 和 N4 处理油菜地上部生物量显著高于 N1 和 N2 处理,而 N1 与 N2 处理和 N3 与 N4 处理之间无显著差异(图 1)。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异达到 5%显著水平。下同。

图 1 不同处理油菜生物量

2.2 施氮量对土壤 pH 和有效态镉含量的影响

尿素施入土壤后,使土壤 pH 降低(表 1)。土壤 pH 随着氮肥用量的增加逐渐降低,但各处理间均无显著差异(表 1)。

土壤  $\text{CaCl}_2\text{—Cd}$  含量随着施氮量的增加逐渐升高,两品种油菜土壤  $\text{CaCl}_2\text{—Cd}$  含量对不同施氮量的响应存在差异(表 1)。种植湘杂油 743 各处理间土壤  $\text{CaCl}_2\text{—Cd}$  含量无显著差异,而种植沔油 682 各处理之间土壤  $\text{CaCl}_2\text{—Cd}$  含量存在显著差异(表 1)。与不施氮(CK)处理相比,种植沔油 682 的 N1、N2、N3 和 N4 处理土壤  $\text{CaCl}_2\text{—Cd}$  含量分别提高 6.5%, 9.7%, 25.8%和 29.0%(表 1)。

表 1 不同处理土壤 pH 和  $\text{CaCl}_2\text{—Cd}$  含量

| 处理 | pH         |            | $\text{CaCl}_2\text{—Cd}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ |             |
|----|------------|------------|----------------------------------------------------------|-------------|
|    | 湘杂油 743    | 沔油 682     | 湘杂油 743                                                  | 沔油 682      |
| CK | 4.98±0.01a | 4.99±0.04a | 0.35±0.01a                                               | 0.31±0.01c  |
| N1 | 4.96±0.03a | 4.94±0.03a | 0.36±0.02a                                               | 0.33±0.01bc |
| N2 | 4.87±0.03a | 4.94±0.03a | 0.36±0.03a                                               | 0.34±0.01b  |
| N3 | 4.86±0.03a | 4.90±0.03a | 0.37±0.02a                                               | 0.39±0.01a  |
| N4 | 4.84±0.01a | 4.86±0.00a | 0.38±0.04a                                               | 0.40±0.01a  |

注:同一列不同小写字母表示各处理间 5%差异显著性水平,多重比较采用 LSD 法检验。下同。

2.3 施氮量对油菜镉含量及累积量的影响

随着施氮量的增加两品种油菜根系 Cd 含量均

表 2 不同处理油菜镉含量及地上部镉累积

| 处理 | 根系 Cd 含量/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ |             | 地上部 Cd 含量/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ |            | 镉累积量/ $(\text{g}\cdot\text{hm}^{-2})$ |              |
|----|--------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------|------------|---------------------------------------|--------------|
|    | 湘杂油 743                                    | 沔油 682      | 湘杂油 743                                     | 沔油 682     | 湘杂油 743                               | 沔油 682       |
| CK | 2.65±0.13a                                 | 2.32±0.06b  | 3.79±0.08e                                  | 5.39±0.04d | 4.53±0.38c                            | 6.03±0.42c   |
| N1 | 2.69±0.08a                                 | 2.46±0.11b  | 4.63±0.04d                                  | 6.44±0.06c | 31.64±1.77b                           | 37.30±0.74b  |
| N2 | 2.71±0.16a                                 | 2.75±0.05ab | 6.05±0.07c                                  | 7.17±0.12b | 44.95±2.17b                           | 44.02±0.90b  |
| N3 | 2.88±0.08a                                 | 2.84±0.07a  | 6.93±0.02a                                  | 7.86±0.08a | 88.17±2.10a                           | 100.78±0.95a |
| N4 | 3.23±0.13a                                 | 2.93±0.00a  | 6.63±0.04b                                  | 6.95±0.08b | 91.16±0.92a                           | 99.33±2.19a  |

2.4 施氮量对油菜镉转移系数的影响

施氮提高了油菜对 Cd 的转运,随着施氮量的提高,油菜 Cd 转移系数呈先升高后降低的变化趋势,在施氮量为  $150\text{ kg}/\text{hm}^2$  下油菜 Cd 转移系数最大(图 2)。与不施氮(CK)处理相比,N1、N2、N3 和 N4 处理湘杂油 743 Cd 转移系数分别显著提高 18.5%, 57.5%, 65.1%和 41.8%,相应地沔油 682 Cd 转移系数分别提高 14.2%, 12.0%, 19.3%和 1.7%(图 2)。由此说明,施氮提高了 Cd 从油菜根系向地上部的转运,施氮量对油菜 Cd 转移系数的影响因油菜品种不同存在一定差异。

3 讨论

本研究结果表明,与对照相比,施用尿素土壤 pH 值略有降低,研究结果与其他研究结果<sup>[11-12]</sup>是一致的。尿素施入土壤后在土壤脲酶的作用下,先转变成  $\text{NH}_4^+\text{—N}$ ,油菜吸收  $\text{NH}_4^+\text{—N}$ ,为了维持细胞正常的 pH 值和电荷平衡,根系向土壤中分泌  $\text{H}^+$ ,从

升高。施氮量对油菜根系 Cd 含量的影响因品种存在较大差异,湘杂油 743 各处理间根系 Cd 含量无显著差异;施氮量 $\geq 150\text{ kg}/\text{hm}^2$  时,沔油 682 根系 Cd 含量显著高于不施氮和施氮  $90\text{ kg}/\text{hm}^2$  处理(表 2)。施氮显著提高了油菜地上部 Cd 含量( $p<0.05$ ),随着施氮量的提高油菜地上部 Cd 含量表现为先升高后降低的变化趋势,在  $150\text{ kg}/\text{hm}^2$  处理时地上部 Cd 含量最大(表 2)。与不施氮(CK)处理相比,N1、N2、N3 和 N4 处理湘杂油 743 地上部 Cd 含量分别显著提高 22.2%, 59.6%, 82.8%和 74.9%,相应地沔油 682 地上部 Cd 含量分别显著提高 19.5%, 33.0%, 45.8%和 28.9%(表 2)。施氮显著提高了油菜地上部 Cd 累积量( $p<0.05$ ),随着施氮量的提高油菜地上部 Cd 累积量表现为升高的变化趋势(表 2)。与不施氮(CK)处理相比,N1、N2、N3 和 N4 处理湘杂油 743 地上部 Cd 累积量分别显著提高 598.5%, 892.3%, 1 846.4%和 1 912.4%,相应地沔油 682 地上部 Cd 累积量分别显著提高 518.6%, 630.0%, 1 571.3%和 1 547.3%(表 2)。N3 和 N4 处理油菜地上部 Cd 累积量显著高于 N1 和 N2 处理,而 N1 与 N2 处理和 N3 与 N4 处理之间地上部 Cd 累积量无显著差异(表 2)。由此可见,施氮促进了油菜对镉的吸收积累。

而使根际周围酸化,尿素用量逐渐增加,土壤 pH 逐渐降低。

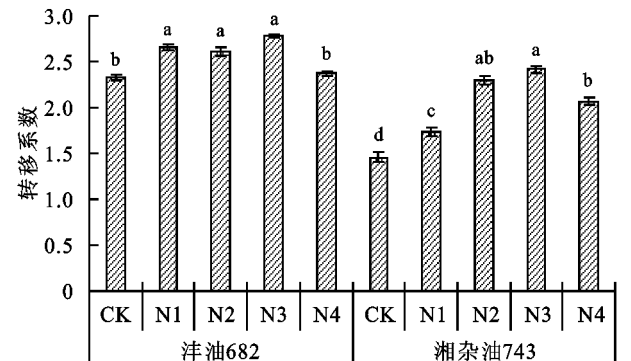


图 2 不同处理油菜镉转移系数

氮肥施用会影响土壤 pH 和其他性状指标,从而影响土壤中镉的有效性<sup>[12-14]</sup>。本研究中土壤 pH 与土壤  $\text{CaCl}_2\text{—Cd}$  含量呈极显著负相关( $p<0.01$ )(表 3),说明 pH 值是影响土壤镉有效性的重要因素。除 pH 外,土壤可溶性有机碳、水溶性  $\text{SO}_4^{2-}$ 、铵态氮和硝态

氮等也影响土壤镉有效性<sup>[11,15-16]</sup>, 这些因素的影响如何, 还有待于进一步的研究。

表 3 土壤 pH、CaCl<sub>2</sub>—Cd 含量与油菜镉含量及镉转移系数之间的关系

| 项目                       | pH | CaCl <sub>2</sub> —Cd<br>含量 | 根镉<br>含量 | 地上部<br>镉含量 | 转移<br>系数 |
|--------------------------|----|-----------------------------|----------|------------|----------|
| pH                       | 1  | -0.791**                    | -0.806** | -0.636*    | -0.414   |
| CaCl <sub>2</sub> —Cd 含量 |    | 1                           | 0.853**  | 0.450      | 0.264    |
| 根镉含量                     |    |                             | 1        | 0.417      | 0.073    |
| 地上部镉含量                   |    |                             |          | 1          | 0.822**  |
| 转移系数                     |    |                             |          |            | 1        |

注: \* 和 \*\* 表示在 0.05 和 0.01 水平的显著性。

供试两个油菜品种镉含量以地上部大于根部, 可见油菜对镉转移能力较强, 此结果与前人研究相符<sup>[17-18]</sup>。本试验中, 土壤 CaCl<sub>2</sub>—Cd 含量与油菜根系镉含量呈极显著正相关( $p<0.01$ ) (表 3), 同时土壤 CaCl<sub>2</sub>—Cd 含量与油菜地上部镉含量也呈正相关, 说明土壤中 CaCl<sub>2</sub>—Cd 含量的增加是油菜根系和地上部镉吸收量增加的重要原因, 而且转移系数越大, 油菜地上部对镉的累积能力越强。田间试验条件下超富集植物东南景天在土壤 pH 6.62、总镉 2.04 mg/kg 的土壤中地上部镉累积量为 41.75 g/hm<sup>2</sup><sup>[19]</sup>, 本试验湘杂油 743 和沔油 682 在施氮 150 kg/hm<sup>2</sup> 下其地上部镉累积量分别为 88.17 和 100.78 g/hm<sup>2</sup>, 因此利用油菜修复本试验土壤可行。

4 结论

本研究表明, 施氮显著促进油菜的生长, 提高其干物质产量, 同时促进了油菜对镉的吸收、积累及向地上部的转运。同时得出本试验土壤类型下其适宜的氮肥用量为 150 kg/hm<sup>2</sup>。因此, 在生产实践中应考虑油菜地上部生物量及其与镉含量之间的平衡, 施用适量氮肥从而提高植物修复效率。

参考文献:

[1] 胡鹏杰, 李柱, 钟道旭, 等. 我国土壤重金属污染植物吸取修复研究进展[J]. 植物生理学报, 2014, 50(5): 577-584.

[2] Sarwar N, Imran M, Shaheen M R, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives[J]. Chemosphere, 2017, 171(1): 710-721.

[3] 王林, 周启星, 孙约兵. 氮肥和钾肥强化龙葵修复镉污染土壤[J]. 中国环境科学, 2008, 28(10): 915-920.

[4] Baudh K, Singh R P. Effects of organic and inorganic amendments on bio-accumulation and partitioning of Cd in *Brassica juncea* and *Ricinus communis* [J]. Ecological

Engineering, 2015, 74(1): 93-100.

[5] Liu W, Zhang C, Hu P, et al. Influence of nitrogen form on the phytoextraction of cadmium by a newly discovered hyperaccumulator *Carpobrotus rossii* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(2): 1246-1253.

[6] 汪洁, 沈丽波, 李柱, 等. 氮肥形态对伴矿景天生长和锌镉吸收性的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2118-2124.

[7] Chang Y, Chang Y, Lin C, et al. Nitrogen fertilization promotes the phytoremediation of cadmium in *Pentstemon emarginatus* [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013, 85(7): 709-714.

[8] 杨洋, 陈志鹏, 黎红亮, 等. 两种农业种植模式对重金属土壤的修复潜力[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 688-695.

[9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[10] 胡宁静, 骆永明, 宋静, 等. 土壤中植物有效态镉提取方法比较[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(3): 64-68.

[11] 孙磊, 郝秀珍, 范晓晖, 等. 不同氮肥处理对污染红壤中铜有效性的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1033-1039.

[12] 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 953-961.

[13] 刘安辉, 赵鲁, 李旭军, 等. 氮肥对镉污染土壤上小油菜生长及镉吸收特征的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(2): 77-81.

[14] 李旭军, 赵鲁, 史胜红, 等. 氮肥对镉污染土壤镉氮含量变化的影响研究[J]. 中国农学通报, 2014(6): 163-168.

[15] 梁佩筠, 许超, 吴启堂, 等. 淹水条件下控释氮肥对污染红壤中重金属有效性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2919-2929.

[16] 向倩, 许超, 张杨珠, 等. 控释尿素对污染土壤镉有效性的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(12): 3150-3156.

[17] Wang N, Nan Z, Wang S, et al. Distribution, enrichment and migration characteristics of heavy metals in rape under Cd/Pb stress[J]. Journal of Lanzhou University Natural Science, 2012, 48(3): 18-22.

[18] Yang Y, Li Y, Zhang J. Chemical speciation of cadmium and lead and their bioavailability to *Brassica campestris* L. from multi-metals contaminated soil in north western China[J]. Chemical Speciation & Bioavailability, 2016, 28(1/4): 33-41.

[19] Wu Q T, Wei Z B, Ouyang Y. Phytoextraction of metal-contaminated soil by *Sedum alfredii* H: Effects of chelator and co-planting[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2007, 180(1/4): 131-139.