

张琦, 杨洋, 涂鹏飞, 等. 氮肥对油菜在不同土壤中吸收积累Cd的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1): 43-52.

ZHANG Qi, YANG Yang, TU Peng-fei, et al. Effect of nitrogen fertilizer on Cd uptake by rape in different soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(1): 43-52.

氮肥对油菜在不同土壤中吸收积累Cd的影响

张琦¹, 杨洋^{2,3,4}, 涂鹏飞², 谭可夫², 罗艳丽^{1*}, 曾清如^{2*}

(1.新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; 2.湖南农业大学资源与环境科学学院, 长沙 410128; 3.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; 4.中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

摘要:以三种不同程度Cd污染土壤为材料,通过盆栽试验研究 NH_4Cl 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 两种氮肥对土壤Cd有效性及油菜吸收、转运Cd的影响,评价油菜对Cd的生物累积量,以期对油菜修复Cd污染土壤的优化施肥措施提供理论支撑。结果表明:施加 NH_4Cl 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 均显著降低了土壤的pH, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理土壤pH低于施加 NH_4Cl 处理的土壤,施肥处理下生长期非根际土pH低于根际土,成熟期非根际土pH高于根际土。施加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4Cl 均使土壤中有效态Cd含量增加。 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理有效态Cd的浓度高于 NH_4Cl 处理。油菜成熟期土壤中有效态Cd的浓度低于生长期,生长期和成熟期整体表现出根际土中Cd的总量高于非根际土。施加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4Cl 均增加油菜各部位Cd的含量,提高油菜的富集系数和转运系数,油菜从根到叶对Cd的转运系数最高。研究表明油菜作为Cd污染土壤的修复植物有一定安全保障。

关键词:油菜;施肥;镉;植物修复; NH_4Cl ; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)01-0043-10

doi: 10.13254/j.jare.2018.0053

Effect of nitrogen fertilizer on Cd uptake by rape in different soil

ZHANG Qi¹, YANG Yang^{2,3,4}, TU Peng-fei², TAN Ke-fu², LUO Yan-li^{1*}, ZENG Qing-ru^{2*}

(1.College of Grassland and Environmental Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2.College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3.Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 4.Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China)

Abstract: In this paper, three different degrees of Cd contaminated soil was used as research materials. Through pot experiment, the effect of two kinds of nitrogen fertilizers of NH_4Cl and $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ on the validity of soil Cd and the effects of rape absorption and transfer Cd were evaluated, and the bioaccumulation of Cd by rape was appraised to provide theoretical support for the optimized fertilization measures for rape remediation Cd contaminated soil. The results showed that, after applying NH_4Cl and $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, the pH of soil was significantly reduced, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ treated soil pH was lower than that of the soil under the application of NH_4Cl treatment, the pH of non-rhizosphere soil was lower than that of rhizosphere soil in the growing period, and the pH of non-rhizosphere soil was higher than rhizosphere soil in the maturation stage. The amount of effective Cd in soil increased by applying $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and NH_4Cl . The effective Cd concentration of the $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ was higher than that of NH_4Cl treatment. In the mature stage of rape, the concentration of Cd in the soil was lower than that in the growth period, and the total amount of Cd in rhizosphere soil was higher than that in the non-rhizosphere soil. The application of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and NH_4Cl increased the Cd content in different parts of rape, increased the BCF (Biological Concentration Factor) and TF (Translocation Factor) of rape, and the TF of rape from root to leaf was the highest.

Keywords: oilseed rape; fertilization; cadmium; phytoremediation; NH_4Cl ; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

收稿日期:2018-03-05 录用日期:2018-05-07

作者简介:张琦(1992—),男,新疆乌鲁木齐人,硕士研究生,主要从事环境污染控制与修复研究。E-mail:934205042@qq.com

*通信作者:罗艳丽 E-mail:luoyanlimail@sina.com; 曾清如 E-mail:qrzeng@163.com

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41701366)

Project supported: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(41701366)

镉(Cd)是一种生物毒性较强的重金属元素,在环境中有很强的化学活性和移动性,毒性持久。Cd可以通过水、大气、植物等介质危害人体健康。我国受Cd等重金属污染的土壤面积已达 $2 \times 10^5 \text{ km}^2$,占总耕地面积的1/5^[1]。植物修复是目前农田Cd污染土壤的主要修复方式之一,修复原理是利用超富集植物吸收、挥发、固定Cd,降低Cd在环境中的生态风险^[2]。Cd的植物修复常采用东南景天等超富集植物,但存在植株个体矮小、生物量低、生长缓慢等缺点^[3]。油菜是世界上最古老的一种油料作物,属十字花科芸苔属植物,是一种耐瘠薄能力较强的农作物,在我国资源十分丰富。油菜籽除了作食用油外,也大量应用于化工、能源领域,作为生产可降解塑料的原料,也可用于生产昂贵的多肽、蛋白等药物^[4]。油菜作为修复植物,其生物量大、有经济价值,便于推广利用。前人对油菜中Cd的吸收与积累特性做了大量的工作^[5-7],并通过盆栽、大田和水培试验证明了油菜可以用来修复土壤Cd污染,可以通过农艺和水肥措施来提高修复植物的生物量,但修复效率还有待进一步提高。

施肥是提高作物产量和质量的必要措施^[8],化肥不仅在增加作物产量、提高品质和保证粮食安全方面起到了不可替代的作用,还会影响作物对重金属的吸收^[9]。孙磊等^[10]研究表明 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 会增加玉米中Cd含量, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 在低浓度下($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)增加玉米中Cd含量,高浓度下($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)降低Cd含量。在研究氮肥对伴矿景天吸收积累Cd的影响时发现,铵态氮肥比硝态氮肥更能提高伴矿景天对Cd的吸收量^[11]。刘梦娇等^[12]研究发现,与 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 相比,施用 NH_4Cl 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 显著降低了土壤pH值,提升海甘蓝茎、根等部位的Cd的含量。在 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 NH_4Cl 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 4种不同氮肥处理中, NH_4Cl 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理下的小白菜吸收Cd的量最高^[13]。类似研究表明, NH_4Cl 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理下的芥菜地上部分Cd含量高于 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 NH_4NO_3 处理^[14]。由此可见,不同氮肥对植物吸收累积Cd的影响是有差异的。在氮肥对油菜的研究中,王

辉等^[15]通过小区实验研究了不同尿素施用量对油菜吸收Cd的影响,结果表明植物修复过程中适宜的施氮量不仅能显著促进油菜的生长,提高油菜的干质量,还能增加土壤Cd有效性,提高油菜对Cd的吸收积累和向地上部分的转运。随着 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 施用量的提高,油菜地上部Cd含量表现为先升高后降低的变化趋势。张洪等^[16]通过外源添加 CdCl_2 的盆栽试验发现 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 可降低根际pH值,而 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 提高了根际土壤pH值, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 相比 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 可以显著提高油菜地上部Cd含量和油菜植株Cd含量。不同氮肥施用下植物吸收Cd的差异性可能与土壤环境、肥料类型和浓度及不同植物对重金属的选择性吸收有关。本文从湖南和广西两地选取3种不同Cd污染程度的农田土壤,通过盆栽试验,研究施用两种不同浓度氮肥 NH_4Cl 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 对油菜的根际土和非根际土中pH、有效态Cd和总Cd的影响,以及油菜各部位对Cd吸收积累及转运的影响,旨在探讨通过施肥途径来提高油菜修复效率,为Cd污染土壤寻找合适的富集植物。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤来自3个不同地点,分别为广西河池市毛南族县思恩镇花欧屯农田土壤(108.288°E , 24.876°N ,标记为HO)、广西河池市毛南族县思恩镇城南社区大环江边菜园土(108.267°E , 24.839°N ,标记为CN)和湖南株洲市醴陵县黄谷村农田土(113.228°E , 27.577°N ,标记为HG)。3种土壤均采自土壤表层0~20 cm土层,采集的土壤风干后混匀。测定3种土壤的理化性质,混匀后的土壤过10目筛测定pH,过100目筛测定其他化学性质,土壤基本理化性质如表1所示。

从表1中可以看出,3种供试土壤中总Cd的浓度均超出土壤环境质量二级标准(GB 15618—1995),且3种供试土壤中pH和Cd污染程度不同,作为供试土壤具有代表性。

供试植物选取油菜(绿生一号 *Brassica napus* L.),

表1 供试土壤理化性质
Table 1 Soil physico-chemical properties

土壤 Soil	pH	有效态 Cd Avalible Cd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	总 Cd Total Cd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	总 P Total P/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	总 K Total K/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	总 N Total N/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	SOC/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
HG	4.97	0.571	0.842	0.898	16.548	2.490	28.310
CN	4.60	0.327	0.553	0.913	13.266	1.167	13.158
HO	7.02	0.205	3.780	0.782	11.927	1.224	11.455

为移栽苗,油菜苗于湖南省长沙市望城实验基地育苗,株高15~18 cm。选取两种氮肥 NH_4Cl 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$,均为分析纯(购于国药集团化学试剂有限公司),参考前人研究^[17]和大田施用量,配置成低浓度($150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和高浓度($300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)两个浓度(含N量)。

1.2 盆栽试验设计

盆栽试验于2017年2月18日(移栽)—2017年5月8日(收获)在湖南农业大学耘园试验基地进行,盆栽试验共计80 d。设5个施肥处理:(1)不施氮肥(CK);(2) NH_4Cl $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施氮量(NC150);(3) NH_4Cl $300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施氮量(NC300);(4) $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施氮量(NS150);(5) $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ $300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施氮量(NS300)。3种土壤,共计15个处理。称取3种供试土壤各15 kg于花盆中,加入磷酸二氢钾(P_2O_5) $120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和氯化钾(K_2O) $120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 作为基肥,充分搅拌、混匀,每盆移栽大棚培育的油菜苗5株,每个处理3次重复,盆栽在室外露天培养,依靠自然降水,培养期间进行追肥、除草等常规管理。在油菜生长期(第40 d)和成熟期(第80 d),分别采取油菜根际、非根际土壤及完整的油菜植株,分析测定土壤的pH值、土壤总Cd和有效态Cd以及油菜各部位Cd含量。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 样品采集及预处理

植物样品的采集及预处理:在每个处理的3个重复的盆栽中随机采取3株完整的油菜样品,带回实验室后将泥沙冲洗干净,按照不同处理的植株样品分根、茎、叶、荚和籽粒分别装入牛皮纸袋,放入烘箱中 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 杀青1 h,之后 $55\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干72 h。将样品烘干后粉碎并保存在干净的封口袋中,待测。

土壤样品的采集及预处理:采取油菜时,完整取出油菜根部(带土),抖落、收集油菜根须上的土壤作为根际土,在油菜根部以外的相同土层随机取三处不同距离的土壤混匀作为非根际土壤,土样采集装袋后带回实验室,除去杂物,风干后过100目筛,将过筛后的样品标记、编号保存在干净的封口袋中,待测。

1.3.2 样品消解及测定方法

土壤重金属总Cd采用上海屹尧科技公司WX-8000型微波消解仪消解,准确称取 0.150 g 土壤样品于微波消解罐中,加入 $2.5\text{ mL H}_2\text{O}_2$ 、 3.5 mL HNO_3 。升温程序: $130\text{ }^\circ\text{C}$ 保温1 min, $160\text{ }^\circ\text{C}$ 保温1 min, $190\text{ }^\circ\text{C}$ 保温1 min, $210\text{ }^\circ\text{C}$ 保温1 min, $220\text{ }^\circ\text{C}$ 保温25 min。消解结束后将样品定容至 50 mL ,并过滤至小白瓶中保存,待测。土壤样品中低浓度的Cd使用德国耶拿公

司700P型AAS测定,高浓度的Cd使用美国珀金埃尔默公司Optima8300型ICP-OES测定。

植物重金属总Cd采用天津莱玻特瑞公司XJS36-42W型管式消解炉消解,准确称取 1.000 g 植物样品于消解管中,加入 10 mL HNO_3 ,盖上漏斗静置过夜。升温程序: $70\text{ }^\circ\text{C}$ 保温30 min, $90\text{ }^\circ\text{C}$ 保持30 min, $120\text{ }^\circ\text{C}$ 保持120 min, $140\text{ }^\circ\text{C}$ 保持60 min,之后 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 赶酸120 min。消解结束后将样品定容至 25 mL ,并过滤至小白瓶中保存,待测。植物样品中的Cd使用美国珀金埃尔默公司Optima8300型ICP-OES测定。

测定每批样品均设置3个空白、10%的加标样品[植物标准物质GBW07602(GSV-1)、土壤标准物质GBW07428(GSS-14)],植物中Cd回收率为90.03%,土壤中Cd回收率为87.10%。数据的精度和准确度均符合要求。

1.4 数据处理与分析

植物各部分Cd的富集系数(BCF)和转运系数(TF)的计算:

$$\text{BCF} = C_{\text{organ}} / C_{\text{soil}}$$

式中: C_{organ} 为植物某一部位Cd含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_{soil} 为供试土壤中Cd含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

$$\text{根到茎 TF}(\text{TF}_{s/r}) = C_s / C_r$$

式中: C_s 为茎中Cd含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_r 为根中Cd含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

$$\text{根到叶 TF}(\text{TF}_{l/r}) = C_l / C_r$$

式中: C_l 为叶中Cd含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

$$\text{茎到荚 TF}(\text{TF}_{p/s}) = C_p / C_s$$

式中: C_p 为荚中Cd含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

$$\text{茎到籽粒 TF}(\text{TF}_{g/s}) = C_g / C_s$$

式中: C_g 为籽粒中Cd含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

$$\text{植物对Cd的提取率} = \frac{M}{C_{\text{soil}} \times m} \times 100\%$$

式中: M 为每盆植物提取土壤中Cd的总量, $\text{mg}\cdot\text{盆}^{-1}$; m 为每盆土的质量,kg。

图和表中所有实验数据使用SPSS 23进行统计分析,使用Duncan检验进行比较,用Excel 2016进行作图。

2 结果与讨论

2.1 施肥对土壤pH值的影响

由表2可知,3种土壤的pH在不同氮肥浓度下表现出差异性,且除CN土壤外,HG和HO两种土壤的pH都表现为对照组CK高于施肥处理组。其中成熟期,HG根际土和非根际土在NS150处理出现最低

pH, 分别为4.63和4.70; HO根际土在NS300处理出现最低pH 5.80, 非根际土在NS150处理出现最低pH 5.89; CN根际土和非根际土在NS300处理出现最低pH, 分别为4.38和4.53。施加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理土壤pH要低于施加 NH_4Cl 处理的土壤, 施肥处理下生长期非根际土pH低于根际土, 成熟期非根际土pH高于根际土。这一结果与赵晶等^[18]和艾绍英等^[19]的结论相似。 NH_4^+ 降低土壤pH值有两个方面的原因: 短时间内是置换作用, NH_4^+ 进入土壤中, 置换出了土壤胶体中的 H^+ ; 随着时间的延长(>15 d), 土壤pH下降主要是 NH_4^+ 的硝化/酸化作用, NH_4^+ 的数量和阴伴离子决定了pH值^[18]。除此之外, 不同处理在生长期和成熟期表现出上下波动, 这一变化可能受到植物根系分泌物、土壤中 H^+ 的置换、根际呼吸作用等根际土壤环境的影响^[20-21]。

2.2 施肥对土壤中有效态Cd及总Cd的影响

由表3可知, 3种土壤中有效态Cd浓度在不同施肥处理下表现出差异性, 与CK相比, 施用两种氮肥都增加了根际和非根际土壤中有效态Cd的含量。在酸性土壤HG和CN中, 随着施肥量的增加有效态Cd在根际和非根际土壤中只有部分处理有显著变化; 在中性土壤HO中, $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 施肥处理根际土和非根际

土有效态Cd含量都较高。总体上, 生长期根际土壤中有有效态Cd高于非根际土壤, 这可能与植物根际分泌物有关。沈丽波等^[22]研究表明伴矿景天在施氮肥处理下根际土壤溶液Cd含量高于非根际土壤, 是由于伴矿景天分泌较多根际分泌物与Cd产生络合, 提高了土壤中Cd的有效性。在油菜成熟期, 根际和非根际土壤中的有效态Cd浓度低于生长期, 这说明油菜生长过程中从土壤中吸收了一部分有效态Cd。成熟期 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理的根际和非根际土壤有效态Cd的浓度高于 NH_4Cl 处理。这可能是由施加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理使土壤中pH低于 NH_4Cl 处理引起的。影响土壤中Cd有效态的因素有很多, pH值可能是导致这一结果的主要原因。结合表2可知, 不同施肥处理下3种成熟期土壤中有有效态Cd的含量随pH升高而降低。但是也有少数 NH_4Cl 处理下有效态Cd含量高于 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理, 这可能是因为 NH_4Cl 中的Cl能与Cd形成络合物导致有效态含量增加^[23-26]。

如表4所示, 不同施肥处理下油菜生长期和成熟期土壤中Cd的总量表现出差异性。在油菜生长期, 根际土壤中的Cd总量随着施肥量的增加而上升, 非根际土壤中的Cd总量随施肥量的增加呈现下降或不显著的变化; 成熟期, 不同施肥处理下油菜的根际和

表2 土壤pH的变化
Table 2 Changes of soil pH

土壤 Soil	处理 Treatments	生长期 Growth period		成熟期 Maturation stage	
		根际土 Rhizosphere soil	非根际土 Nonrhizosphere soil	根际土 Rhizosphere soil	非根际土 Nonrhizosphere soil
HG	CK	5.05±0.05a	4.97±0.03a	5.33±0.14a	5.33±0.02a
	NCl150	4.95±0.07a	4.49±0.06bc	4.82±0.03bc	5.17±0.10b
	NCl300	4.68±0.02b	4.58±0.01b	4.90±0.01b	5.30±0.02a
	NS150	4.62±0.09b	4.42±0.07cd	4.63±0.02d	4.70±0.01d
	NS300	4.35±0.01c	4.30±0.20d	4.74±0.10c	4.89±0.01c
HO	CK	6.81±0.03a	6.85±0.04a	6.92±0.09a	6.83±0.44a
	NCl150	6.54±0.02b	6.63±0.01b	6.50±0.35b	6.56±0.18ab
	NCl300	6.39±0.04c	6.32±0.05d	6.12±0.03cd	6.19±0.06bc
	NS150	6.54±0.02b	6.43±0.02c	6.26±0.25bc	5.89±0.15c
	NS300	6.17±0.08d	6.26±0.04d	5.80±0.06d	6.30±0.01bc
CN	CK	4.89±0.14b	4.60±0.07bc	4.92±0.11a	5.02±0.05a
	NCl150	4.61±0.01c	4.51±0.03c	4.50±0.01c	4.82±0.01b
	NCl300	5.16±0.06a	5.09±0.06a	4.61±0.13b	4.76±0.05c
	NS150	4.50±0.02c	4.34±0.05d	4.43±0.01d	4.55±0.02d
	NS300	5.07±0.04a	4.67±0.02b	4.38±0.03d	4.53±0.01d

注: 表中所有数据均表示为平均值±标准偏差($n=3$), 数值后面的不同字母表示每种土壤每一列在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同。

Note: Data are mean±standard deviation ($n=3$), the letters following the values mean significant differences among treatments in the same column of each soil at $P<0.05$ the level. The same below.

非根际土壤中Cd的总量在不同土壤中规律不一致,整体表现出根际土中Cd的总量高于非根际土。这说明酸性氮肥可以促进土壤中Cd的迁移能力。Eriksson等^[27]研究也表明铵态氮肥利于增加Cd的移动性。因为施肥不仅改变了土壤中重金属的有效性,还能改变其他形态重金属的分布,活化了土壤中残渣态和铁

锰氧化物结合态的Cd^[16],再加上植物根系向上的提取作用,不断促使土壤中的Cd向根际迁移。Luo等^[28]研究发现在植物生长0~60 d根际土中重金属Zn的含量高于非根际土,与本文研究结果类似。总的来说植物的根际、土壤pH和肥料作用都是影响土壤中Cd含量变化的重要原因。

表3 土壤中有有效态Cd的浓度($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 3 The concentration of available Cd in the soil($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土壤 Soil	处理 Treatments	生长期 Growth period		成熟期 Maturation stage	
		根际土 Rhizosphere soil	非根际土 Nonrhizosphere soil	根际土 Rhizosphere soil	非根际土 Nonrhizosphere soil
HG	CK	0.28±0.08d	0.27±0.04d	0.26±0.02c	0.26±0.04c
	NCl150	0.37±0.05c	0.37±0.06c	0.26±0.03c	0.27±0.05bc
	NCl300	0.48±0.02a	0.45±0.03b	0.33±0.04ab	0.31±0.03ab
	NS150	0.41±0.01bc	0.38±0.02c	0.30±0.03abc	0.31±0.01ab
	NS300	0.45±0.05ab	0.55±0.01a	0.34±0.05a	0.34±0.01a
HO	CK	0.20±0.02c	0.21±0.05c	0.12±0.01e	0.11±0.02c
	NCl150	0.21±0.04c	0.38±0.08ab	0.20±0.02d	0.18±0.04b
	NCl300	0.35±0.07b	0.46±0.01a	0.24±0.03c	0.37±0.05a
	NS150	0.39±0.01ab	0.34±0.09b	0.28±0.02b	0.17±0.03bc
	NS300	0.41±0.03a	0.40±0.02ab	0.42±0.04a	0.33±0.03a
CN	CK	0.21±0.07b	0.24±0.04a	0.19±0.03b	0.19±0.01b
	NCl150	0.25±0.02ab	0.24±0.08a	0.19±0.03b	0.23±0.01ab
	NCl300	0.29±0.02ab	0.24±0.01a	0.25±0.05a	0.24±0.03a
	NS150	0.26±0.05ab	0.23±0.02a	0.24±0.03ab	0.23±0.01ab
	NS300	0.31±0.06a	0.29±0.06a	0.24±0.02ab	0.24±0.03a

表4 土壤中总Cd的浓度($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 4 The concentration of total Cd in the soil($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土壤 Soil	处理 Treatments	生长期 Growth period		成熟期 Maturation stage	
		根际土 Rhizosphere soil	非根际土 Nonrhizosphere soil	根际土 Rhizosphere soil	非根际土 Nonrhizosphere soil
HG	CK	0.45±0.04c	0.45±0.04bc	0.43±0.03b	0.41±0.06c
	NCl150	0.48±0.01c	0.51±0.04ab	0.43±0.01b	0.22±0.03d
	NCl300	0.64±0.13ab	0.54±0.05a	0.51±0.06a	0.46±0.05b
	NS150	0.55±0.03bc	0.50±0.02ab	0.35±0.07c	0.56±0.02a
	NS300	0.71±0.05a	0.30±0.03c	0.31±0.02d	0.43±0.04c
HO	CK	2.13±0.04c	3.17±0.30c	2.84±0.07b	1.45±0.09d
	NCl150	1.88±0.07d	3.86±0.02a	2.25±0.05c	1.64±1.16c
	NCl300	2.90±0.13a	2.82±0.03d	3.94±0.08a	1.75±0.04b
	NS150	2.62±0.15b	2.54±0.03e	2.17±0.02d	2.87±0.06a
	NS300	1.94±0.08d	3.56±0.24b	2.17±0.16d	1.76±0.02b
CN	CK	0.67±0.04c	0.48±0.03b	0.59±0.07ab	0.36±0.02bc
	NCl150	0.63±0.06c	0.53±0.03b	0.53±0.02bc	0.45±0.08a
	NCl300	0.89±0.07b	0.51±0.11b	0.64±0.03a	0.40±0.03ab
	NS150	0.53±0.02d	0.89±0.03a	0.35±0.05d	0.33±0.01c
	NS300	1.30±0.03a	0.86±0.07a	0.49±0.01c	0.38±0.02ab

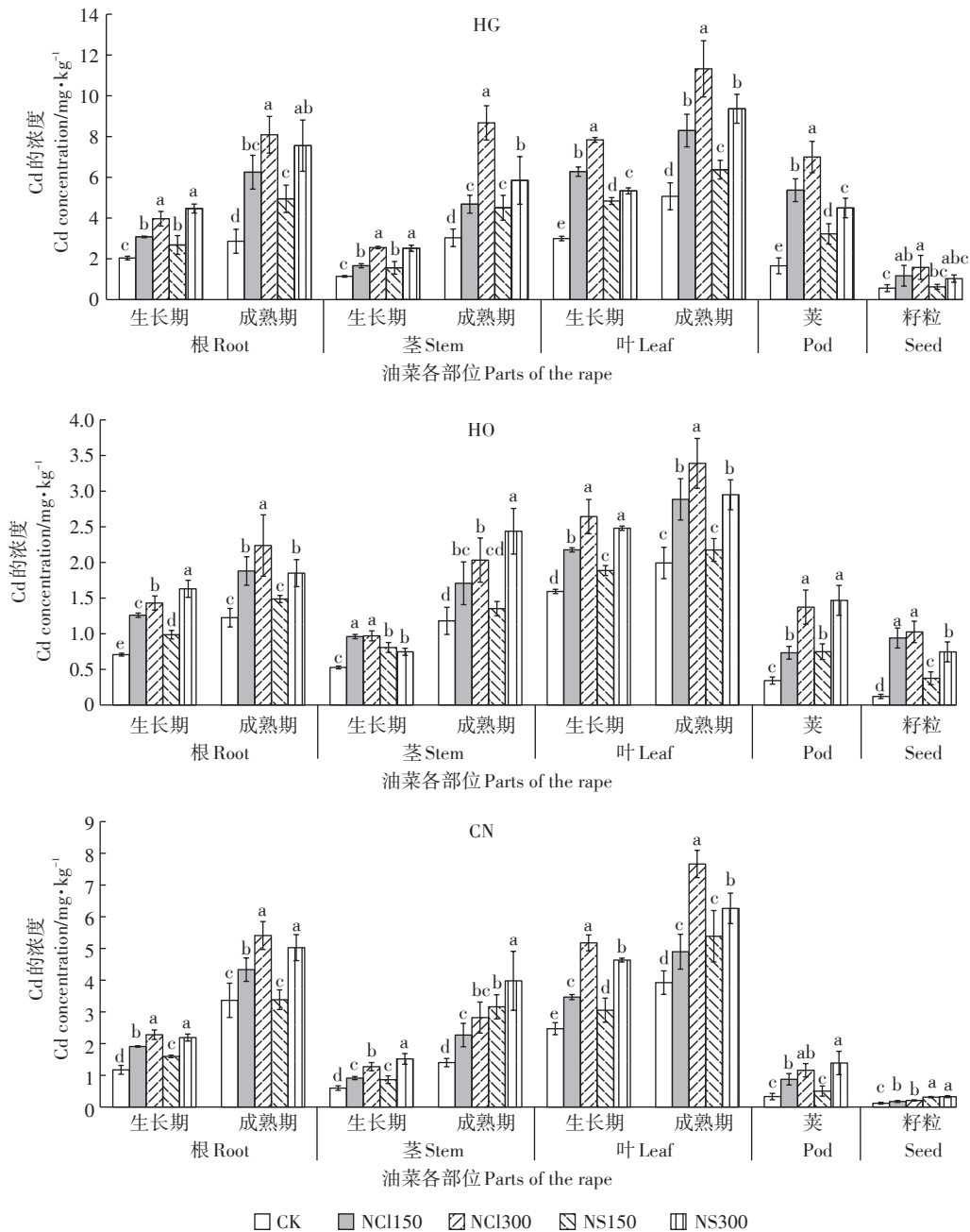
2.3 施肥对不同土壤中油菜吸收积累Cd的影响

2.3.1 不同处理下Cd在油菜中的吸收积累情况

图1为不同施肥处理下油菜在3种土壤中对Cd的吸收积累情况。对比CK,两种氮肥都促进了油菜各部位对土壤中Cd的吸收。三种土生长期油菜各部位Cd的积累顺序为叶>根>茎;成熟期油菜各部位Cd的积累顺序为叶>根>茎>荚>籽粒。生长期和成熟期

不同施肥处理下油菜富集Cd的顺序为NCI300>NS300>NCI150>NS150>CK。三种土生长期和成熟期下NCI300和NS300处理的油菜积累Cd的浓度较高,与其他处理差异较为显著。

重金属在植物中的富集系数通常用来评估一个植物是否对土壤重金属有修复潜力^[29]。由表5和表6可知,油菜对Cd的富集系数在不同施肥处理下表现



不同字母表示同一时期下不同处理Cd在 $P<0.05$ 水平差异显著

Different letters indicate significant differences among treatments in the same period ($P<0.05$)

图1 不同处理下3种土壤中油菜各部位Cd的浓度

Figure 1 The concentration of Cd in rape part in three soils

出差异性,与空白对照组相比,施肥明显提高了油菜对Cd的BCF值($P<0.05$)。油菜不同时期在HG和CN两种土中,根、茎和叶中Cd的BCF值均大于1,HO土中Cd的BCF值均小于1。总的来说,NCI300和NS300处理下油菜各部位中Cd的BCF值高于其他处理,且成熟期高于生长期;成熟期油菜在三种土中的最高富集系数均出现在NCI300处理下的叶中,BCF值分别为HG土13.48、HO土0.9、CN土13.93,其次是NS300处理。说明油菜在两种酸性的土壤(CN和HG)中表

现出对Cd较强的富集能力,在中性土壤(HO)中对Cd的吸收富集能力较弱,因为CN和HG土壤中有效态Cd含量较高,使得BCF值较高,且NCI300和NS300施肥处理都能很好地促进油菜对Cd的吸收富集。

2.3.2 不同处理下Cd在油菜中的迁移转运情况

由表7发现,3种土壤不同施肥处理下油菜中重金属Cd在各部位的转运能力表现一定的差异性。油菜生长期,HG土中施肥对Cd从根到茎中的 TF_{sr} 值没有显著影响,除NS300处理外,其他施肥处理都显著

表5 生长期油菜不同部位Cd的富集系数(BCF)

Table 5 BCF of Cd in different parts of rape during growth stage

土壤 Soil	处理 Treatments	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
HG	CK	2.43±0.11c	2.46±0.11c	3.57±0.13e
	NCI150	3.66±0.05b	3.17±0.12b	7.47±0.27b
	NCI300	4.72±0.43a	3.04±0.08b	9.33±0.15a
	NS150	3.19±0.55b	2.26±0.35c	5.75±0.20d
	NS300	5.32±0.26a	4.19±0.18a	6.35±0.17c
HO	CK	0.19±0.01e	0.14±0.01c	0.42±0.01d
	NCI150	0.33±0.01c	0.25±0.01a	0.58±0.01b
	NCI300	0.38±0.03b	0.26±0.02a	0.70±0.07a
	NS150	0.26±0.02d	0.21±0.02b	0.50±0.02c
	NS300	0.43±0.03a	0.20±0.02b	0.66±0.01a
CN	CK	2.13±0.24d	0.75±0.03c	4.49±0.35e
	NCI150	3.47±0.03b	1.00±0.22b	6.30±0.15c
	NCI300	4.14±0.27a	1.24±0.08a	9.41±0.44a
	NS150	2.90±0.07c	0.86±0.03bc	5.55±0.68d
	NS300	3.98±0.20a	0.97±0.06b	8.42±0.11b

表6 成熟期油菜不同部位Cd的富集系数(BCF)

Table 6 BCF of Cd in different parts of oilseed rape during maturity stage

土壤 Soil	处理 Treatments	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	荚 Pod	籽粒 Seed
HG	CK	3.41±0.71d	3.61±0.51d	6.03±0.78d	1.97±0.46e	0.67±0.20c
	NCI150	7.44±0.99bc	5.57±0.52c	9.87±0.95b	6.39±0.66b	1.39±0.61ab
	NCI300	9.62±1.06a	10.32±1.00a	13.48±1.64a	8.33±0.92a	1.88±0.69a
	NS150	5.89±0.80c	5.36±0.73c	7.58±0.55c	3.84±0.60d	0.75±0.15bc
	NS300	8.99±1.50ab	6.96±1.39b	11.15±0.85b	5.35±0.57c	1.23±0.21abc
HO	CK	0.33±0.04c	0.32±0.05d	0.53±0.06c	0.09±0.01c	0.03±0.01c
	NCI150	0.50±0.06ab	0.45±0.08bc	0.77±0.08b	0.20±0.02b	0.25±0.04a
	NCI300	0.59±0.11a	0.54±0.09b	0.90±0.09a	0.36±0.06a	0.27±0.04a
	NS150	0.39±0.01c	0.36±0.03cd	0.58±0.04c	0.20±0.03b	0.10±0.02c
	NS300	0.49±0.05b	0.64±0.08a	0.78±0.05b	0.39±0.06a	0.20±0.04b
CN	CK	6.12±0.98c	2.55±0.24d	7.13±0.67d	0.61±0.19c	0.22±0.06c
	NCI150	7.88±0.67b	4.13±0.68c	8.91±1.01c	1.59±0.33b	0.31±0.06b
	NCI300	9.83±0.80a	5.12±0.89bc	13.93±0.78a	2.11±0.39ab	0.38±0.05b
	NS150	6.15±0.57c	5.74±0.67b	9.79±1.48c	0.92±0.29c	0.57±0.03a
	NS300	9.13±0.75a	7.24±1.70a	11.39±0.87b	2.53±0.67a	0.59±0.06a

表7 生长期和成熟期油菜Cd的转运系数(TF)
Table 7 TF of Cd in oilseed rape at growth and maturity stages

土壤 Soil	处理 Treatments	生长期 Growth period		成熟期 Maturation stage			
		TF _{sr}	TF _{lr}	TF _{sr}	TF _{lr}	TF _{ps}	TF _{gs}
HG	CK	0.55±0.02a	1.47±0.02b	1.10±0.32a	1.85±0.54a	0.56±0.18b	0.18±0.04ab
	NCI150	0.54±0.04a	2.04±0.07a	0.75±0.07b	1.34±0.18b	1.16±0.14a	0.25±0.10a
	NCI300	0.65±0.07a	1.99±0.19a	1.08±0.15a	1.41±0.15b	0.81±0.12b	0.19±0.06ab
	NS150	0.59±0.12a	1.84±0.31a	0.92±0.11ab	1.30±0.10b	0.73±0.15b	0.14±0.04b
	NS300	0.57±0.06a	1.19±0.03b	0.80±0.22ab	1.27±0.25b	0.80±0.20b	0.18±0.02ab
HO	CK	0.74±0.04bc	2.25±0.08a	0.97±0.17b	1.65±0.33a	0.30±0.07c	0.10±0.05c
	NCI150	0.76±0.04ab	1.73±0.02bc	0.91±0.13b	1.54±0.21a	0.44±0.08bc	0.56±0.06a
	NCI300	0.68±0.06c	1.86±0.30b	0.95±0.30b	1.54±0.19a	0.68±0.05a	0.51±0.09a
	NS150	0.82±0.03a	1.92±0.19b	0.91±0.06b	1.46±0.08a	0.56±0.12ab	0.28±0.06b
	NS300	0.46±0.02d	1.52±0.11c	1.34±0.30a	1.60±0.13a	0.62±0.17a	0.31±0.06b
CN	CK	0.51±0.06b	2.12±0.27ab	0.43±0.09b	1.19±0.18b	0.24±0.09bc	0.09±0.03a
	NCI150	0.48±0.02b	1.82±0.06b	0.53±0.10b	1.14±0.21b	0.38±0.03a	0.08±0.02a
	NCI300	0.56±0.10b	2.28±0.25a	0.52±0.09b	1.43±0.19ab	0.42±0.11a	0.08±0.01a
	NS150	0.54±0.08b	1.91±0.20ab	0.94±0.14a	1.60±0.26a	0.16±0.05c	0.10±0.01a
	NS300	0.69±0.04a	2.12±0.08ab	0.79±0.15a	1.25±0.05b	0.37±0.12ab	0.09±0.03a

增加了根到叶的TF_{lr}值,且都大于1,但各处理间没有差异。HO土中,只有NS150处理显著提高了Cd从根到茎TF_{sr},其他处理不但没有显著影响,还有下降的趋势;而TF_{lr}则表现为施肥处理显著低于空白组($P < 0.05$)。CN土中,只有在NS300处理下TF_{sr}值较其他处理显著增加,但施肥并没有增加TF_{lr}的值。成熟期,Cd在油菜各部位的转运系数也在不同土壤中存在一定的差异性。其中Cd从根到叶中的TF_{lr}远高于其他部位,且在3种土壤中的TF_{lr}均大于1,但小于生长期的T_{lr}。不同施肥处理下,成熟期Cd从油菜根部到茎的转运系数TF_{sr}比生长期的值有明显提高。同样,部分处理也提高了Cd从油菜茎到果荚和籽粒的转运系数,但这些值都很低,特别是Cd从茎到籽粒的转运系数。总的来说,两种酸性氮肥可以有效提高生长期油菜地上部分的转运系数,但成熟期茎到叶的转运系数会出现明显的下降。3种土成熟期油菜各部位Cd转运系数排序为TF_{lr}>TF_{sr}>TF_{ps}>TF_{gs}。已知的相关研究也发现油菜对Cd转运率最高的是从根到叶,叶是油菜地上的主要部分,重金属转运到叶的能力是评价植物对重金属积累吸收能力的重要指标^[30]。因此,从提高Cd在茎叶中的转运能力考虑,NCI300处理更有利于提高油菜对Cd的修复效率。

3种土壤在(NH₄)₂SO₄高浓度(NS300)施肥处理下油菜Cd提取率最高,分别为HG土5.86%、HO土0.32%、CN土3.96%。3种土壤中油菜生物量最高为

107.29 g·盆⁻¹,张庆费等^[31]研究表明超富集植物东南景天对Cd提取率为16%~33%,本研究中油菜对Cd提取率与之相比存在一定差距。在3种土壤中(NH₄)₂SO₄和NH₄Cl处理的油菜籽粒中Cd含量为HG土0.56~1.17 mg·kg⁻¹、HO土0.12~1.03 mg·kg⁻¹、CN土0.12~0.31 mg·kg⁻¹。《GB 2762—2016 食品安全国家标准食品中污染物限量》中显示,籽粒中Cd的标准为≤0.5 mg·kg⁻¹。3种土壤中只有广西轻度Cd污染土壤(CN)下生长的油菜籽粒符合标准,另外两种都超过了国家食品安全标准。但黎红亮等^[30]和Yang等^[32]研究表明,即便是污染的油菜籽,提油后的Cd主要集中在粕饼中,油中的Cd含量几乎为0,符合国家菜籽油的标准;粕饼中的重金属和硫苷等有害物质也可通过有机溶酸盐的浸提得到去除,同时保留完好的粕饼蛋白进行回收利用。因此,油菜作为土壤Cd污染的修复植物在安全性上有一定保障,并可以实现修复带动经济,具有良好推广应用前景。

本研究虽然通过施肥处理提高油菜Cd提取率,但较之于超富集植物的修复效率存在差距,在今后的研究中将继续探索具有更高修复效率并且具有良好推广前景的修复植物。

3 结论

(1)施加(NH₄)₂SO₄和NH₄Cl可以降低土壤中pH,增加有效态Cd含量,其中(NH₄)₂SO₄的增加效果强于

NH₄Cl。

(2)施加(NH₄)₂SO₄和NH₄Cl能增加油菜的富集系数和转运系数,使油菜各部位Cd的含量增加。

(3)油菜用于修复Cd时,施加(NH₄)₂SO₄修复效果比NH₄Cl好,在(NH₄)₂SO₄高浓度施肥处理下3种土壤中油菜表现出较高的生物量和Cd提取率。

参考文献:

- [1] 赵其国, 黄国勤, 钱海燕. 生态农业与食品安全[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1127-1134.
ZHAO Qi-guo, HUANG Guo-qin, QIAN Hai-yan. Ecological agriculture and food safety[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6): 1127-1134.
- [2] 庹瑞锐, 赵运林, 董萌, 等. 土壤重金属镉、铅污染的植物修复技术研究进展[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(6): 216-220.
TUO Rui-rui, ZHAO Yun-lin, DONG Meng, et al. Research progress in soil phytoremediation technology polluted by cadmium and lead[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2011, 39(6): 216-220.
- [3] 郑黎明, 袁静. 重金属污染土壤植物修复技术及其强化措施[J]. 环境科技, 2017, 30(1): 75-78.
ZHENG Li-ming, YUAN Jing. Phytoremediation of soils contaminated by heavy metals and strengthening measures[J]. *Environmental Science and Technology*, 2017, 30(1): 75-78.
- [4] 谭小力, 郭嵩光, 李殿荣. 油菜应用的研究进展[J]. 中国农学通报, 2002, 18(3): 77-81.
TAN Xiao-li, GUO Ai-guang, LI Dian-rong. The progresses in the current application research on rapeseed (*Brassica napus*) [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2002, 18(3): 77-81.
- [5] Grispen V M, Nelissen H J, Verkleij J A. Phytoremediation with *Brassica napus* L.: A tool for sustainable management of heavy metal contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(1): 77-83.
- [6] László S. Cadmium accumulation and distribution in sunflower plant[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1998, 21(2): 341-352.
- [7] Ivanova R. Heavy metal accumulation and distribution in oil crops[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2005, 35(17/18): 2551-2566.
- [8] 李顺江, 李鹏, 李新荣, 等. 不同肥源、施氮量对土壤-作物系统中铬、镉含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(3): 235-241.
LI Shun-jiang, LI Peng, LI Xin-rong, et al. The influence of concentration of chromium, cadmium in soil-crop system under different fertilizers and fertilization amount[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(3): 235-241.
- [9] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 466-480.
WANG Mei, LI Shu-tian. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2): 466-480.
- [10] 孙磊, 郝秀珍, 周东美, 等. 不同氮肥对污染土壤玉米生长和重金属Cu、Cd吸收的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(3): 137-141, 147.
SUN Lei, HAO Xiu-zhen, ZHOU Dong-mei, et al. Effects of different nitrogen fertilizers on growth and heavy metals uptake by corn grown in contaminated soil[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(3): 137-141, 147.
- [11] 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.
WANG Jie, SHEN Li-bo, LI Zhu, et al. Effects of nitrogen forms on growth and Zn/Cd uptake of *Sedum Plumbizincicola* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2118-2124.
- [12] 刘梦娇, 邓清文, 胡丽, 等. 四种氮肥对海甘蓝(*Crambe abyssinica*)富集镉锌效应及根际土壤细菌群落特性的影响[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(3): 1148-1154.
LIU Meng-jiao, DENG Yu-wen, HU Li, et al. Effect of the 4 nitrogen fertilizers on the rhizospheric soil bacterial communities and the uptake of Ca and Zn by *Crambe abyssinica* [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(3): 1148-1154.
- [13] 王冰, 慕姝, 秦治家, 等. 化肥对薄层黑土中镉、铅活性及小白菜生长的影响[J]. 北方园艺, 2014(20): 168-173.
WANG Bing, MU Shu, QIN Zhi-jia, et al. Effect of fertilizers on the activity of cadmium, lead and pakchoi growth in the black thin-layer soil[J]. *Northern Horticulture*, 2014(20): 168-173.
- [14] 王艳红, 艾绍英, 李盟军, 等. 氮肥对镉在土壤-芥菜系统中迁移转化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 649-653.
WANG Yan-hong, AI Shao-ying, LI Meng-jun, et al. Effect of nitrogen fertilization on cadmium translocation in soil-mustard system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3): 649-653.
- [15] 王辉, 许超, 罗尊长, 等. 氮肥用量对油菜吸收积累镉的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 302-305.
WANG Hui, XU Chao, LUO Zun-chang, et al. Effects of nitrogen application level on cadmium uptake and accumulation in rape[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 302-305.
- [16] 张洪, 赖凡, 吕家格, 等. 氮肥对油菜根-土界面镉迁移及镉组分变化特征的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 169-172.
ZHANG Hong, LAI Fan, LÜ Jia-ke, et al. Effect of nitrogen fertilizer on Cd translocation and changes of Cd fractions at soil-root interface of rape[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(2): 169-172.
- [17] 孙治强, 张楠, 赵卫星, 等. 氮肥施用量对生菜产量、硝酸盐积累及土壤EC值、pH值的影响[J]. 江西农业学报, 2007, 19(4): 44-45.
SUN Zhi-qiang, ZHANG Nan, ZHAO Wei-xing, et al. Effects of N application rates on yield, nitrate accumulation of lettuce and EC, pH value of soil[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2007, 19(4): 44-45.
- [18] 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.
ZHAO Jing, FENG Wen-qiang, QIN Yu-sheng, et al. Effects of application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on soil pH and cadmium availability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5): 953-961.
- [19] 艾绍英, 孙自航, 姚建武, 等. 氮肥种类及用量对赤红壤pH和可溶性盐的影响[J]. 生态环境学报, 2008(4): 304-308.
AI Shao-ying, SUN Zi-hang, YAO Jian-wu, et al. Effects of different kinds and amount of nitrogen fertilizer on pH and soluble salt of laterite

- solic red soil[J]. *Ecology and Environmental*, 2008(4):304-308.
- [20] Li N Y, Fu Q L, Zhuang P, et al. Effect of fertilizers on Cd uptake of *Amaranthus hypochondriacus*, a high biomass, fast growing and easily cultivated potential Cd hyperaccumulator[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2012, 14(2):162-173.
- [21] 徐卫红, 王宏信, 刘 怀, 等. Zn、Cd单一及复合污染对黑麦草根分泌物及根际 Zn、Cd 形态的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(9):187-193.
XU Wei-hong, WANG Hong-xin, LIU Huai, et al. Effects of individual and combined pollution of Cd and Zn on root exudates and rhizosphere Zn and Cd fractions in ryegrass (*Lolium perenne* L.) [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(9):187-193.
- [22] 沈丽波, 吴龙华, 谭维娜, 等. 伴矿景天-水稻轮作及磷修复剂对水稻镉吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11):2952-2958.
SHEN Li-bo, WU Long-hua, TAN Wei-na, et al. Effects of *Sedum plumbizincicola*-*Oryza sativa* rotation and phosphate amendment on Cd and Zn uptake by *O. sativa*. [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11):2952-2958.
- [23] 曾清如, 周细红, 毛小云. 不同氮肥对铅锌矿尾矿污染土壤中重金属的溶出及水稻苗吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 1997(3):7-11.
ZENG Qing-ru, ZHOU Xi-hong, MAO Xiao-yun. Effects of different nitrogen fertilizers on the dissolution of heavy metals and rice uptake in lead-zinc mine tailings contaminated soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 1997(3):7-11.
- [24] 陈世宝, 朱永官, 杨俊诚. 土壤-植物系统中磷对重金属生物有效性的影响机制[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(8):1-7.
CHEN Shi-bao, ZHU Yong-guan, YANG Jun-cheng. Mechanism of the effect of phosphorus on bioavailability of heavy metals in soil-plant systems[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(8):1-7.
- [25] Jalil A, Selles F, Clarke J M. Effect of cadmium on growth and the uptake of cadmium and other elements by durum wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1994, 17(11):1839-1858.
- [26] 张国平, 深见元弘, 关本根. 不同镉水平下小麦对镉及矿质养分吸收和积累的品种间差异[J]. 应用生态学报, 2002, 13(4):454-458.
ZHANG Guo-ping, Motohiro Fukami, Hitoshi Sekimoto. Difference between two wheat cultivate in Cd and mineral nutrient uptake under different Cd levels[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4):454-458.
- [27] Eriksson J E. Effects of nitrogen-containing fertilizers on solubility and plant uptake of cadmium[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1990, 49(3/4):355-368.
- [28] Luo Y M, Christie P, Baker A J M. Soil solution Zn and pH dynamics in non-rhizosphere soil and in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens*, grown in a Zn/Cd-contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2000, 41(1/2):161.
- [29] 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.
YANG Yang, CHEN Zhi-peng, LI Hong-liang, et al. The potential of two agricultural cropping patterns for remediating heavy metals from soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3):688-695.
- [30] 黎红亮, 杨 洋, 陈志鹏, 等. 花生和油菜对重金属的积累及其成品油的安全性[J]. 环境工程学报, 2015, 9(5):2488-2494.
LI Hong-liang, YANG Yang, CHEN Zhi-peng, et al. Accumulation of heavy metals by peanut and rapeseed and safety of their refined oil[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(5):2488-2494.
- [31] 张庆费, 郑思俊, 田 旗. 植物修复环境新发现的土壤修复植物: 东南景天[J]. 园林, 2010(3):72.
ZHANG Qing-fei, ZHENG Si-jun, TIAN Qi. Phytoremediation environment newly discovered soil restoration plants: *Sedum alfredii*[J]. *Garden*, 2010(3):72.
- [32] Yang Y, Li H L, Peng L, et al. Assessment of Pb and Cd in seed oils and meals and methodology of their extraction[J]. *Food Chemistry*, 2016, 197(Pt A):482-488.