

孙向平, 严理, 曾粮斌. 不同镉污染水平下氮肥对稻田土壤中镉迁移转化的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23): 318–320, 328.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.079

不同镉污染水平下氮肥对稻田土壤中 镉迁移转化的影响

孙向平, 严理, 曾粮斌
(中国农业科学院麻类研究所, 湖南长沙 410205)

摘要:稻田镉污染已经成为严重影响粮食安全生产的问题。农艺措施调控是修复镉污染土壤最经济直接的手段, 施肥作为重要的农艺措施对土壤镉的生物有效性有重要影响。氮肥对土壤镉的影响已有大量报道, 但关于氮肥施入对不同镉水平条件下, 尤其是高镉土壤中镉迁移转化及其生物有效性的报道还比较少。通过设置不同的镉污染水平[低水平(LT)为 5 mg/kg, 中水平(MT)为 10 mg/kg, 高水平(HT)为 20 mg/kg], 以稻田土壤为对象, 通过氮肥的施入研究土壤镉的形态转化特征以及水稻各器官对镉吸收的影响。结果表明, 镉污染土壤中施用氮肥降低了土壤中的 pH 值。pH 值在污染土壤中的变化趋势要大于没有污染的土壤。施用氮肥在高镉污染土壤中的氧化还原电位(Eh)值在水稻生育期的变化要大于其他处理。镉的吸收主要集中在水稻的根部。高镉污染没有提高水稻中镉的转运系数。在镉污染条件下, 施用氮肥对各污染水平条件下土壤中镉形态的变化趋势影响较小。在施用氮肥处理条件下, 中高度污染水平(≥ 10 mg/kg)水稻收获后土壤中残余态镉比重要大于低度污染土壤。

关键词:水稻; 镉污染; 氮肥; 生物有效性

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)23-0318-03

2014 年 4 月国家环境保护部和国土资源部公布的全国土壤污染状况调查公报显示, 镉(Cd)的点位超标率最高, 正式被确定为我国土壤的首要污染物^[1]。镉是一种很容易被水稻累积的重金属元素, 具有很强的迁移性而且有严重的危害性^[2]。据报道, 我国每年由于土壤 Cd 污染的农产品超标达 14.6 亿 kg^[3], 水稻是我国最重要的粮食作物之一, 稻谷产量占全国谷物总产量的 40% 以上^[4]。目前, 稻田镉污染已经成为严重影响粮食安全生产的问题。Cd 在土壤中因其高毒性和高移动性, 采用传统物理或化学方法治理不仅成本高、周期长, 且更易造成二次污染^[5]。施肥作为农业生产中的增产措施, 对土壤中重金属的生物有效性有显著的影响。水稻(*Oryza sativa* L.) 由于具有生物量大、适应性强、栽种技术成熟及遗传性状稳定等特点, 也有国外学者利用水稻 Cd 高积累材料进行 Cd 污染农田修复^[5]。有报道显示, 高镉条件可以抑制植物生长导致减产, 镉还会通过营养元素影响植物的气孔开放、蒸腾和光合作用, 进入植物体后与相关酶结合抑制植物对水分的吸收和运输, 抑制光合作用、呼吸作用及其他生理功能等^[6], 也有报道称镉在低浓度下, 能刺激作物的生长和发育^[7]。氮素是作物生长和产量品质形成所必需的重要元素。采取有效措施减少污染土壤中镉进入植物的可食部位是关系到人体健康及农业持续发展的重要问题。

氮肥对土壤镉的影响已有大量研究报道, 但关于氮肥施

入对不同镉水平条件下土壤镉迁移转化及其生物有效性的报道还比较少。尤其是关于高 Cd 条件下施用氮肥对水稻生长以及重金属 Cd 在水稻植株中分布趋势的影响的报道较少。本研究通过设置不同的镉污染水平, 以稻田土壤为对象, 通过氮肥的施入研究不同梯度浓度 Cd 条件下, 土壤镉的形态转化特征以及水稻各器官对镉吸收的影响。为通过农艺措施调控对重金属污染稻田实现边修复边利用的原则提供重要的参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻品种为湘晚粳 13 号。试验用土壤采自中国农业科学院麻类研究所 10 hm² 试验基地的黄泥土(酸性土壤)。试验时间为 2015 年 4—10 月, 试验用肥料为市场上常规的商品肥料。试验用土壤和肥料基本化学性质及总 Cd 含量见表 1。

表 1 供试土壤和肥料主要理化性质

项目	pH 值	有机质 含量(%)	N 含量 (%)	P ₂ O ₅ 含量 (%)	K ₂ O 含量 (%)	总 Cd 含量 (mg/kg)
基础土壤	6.3	1.8	1.2	0.9	0.6	0.215
尿素			46.0			
磷肥				52.0	34.0	
钾肥					62.0	

1.2 试验设计

试验采用室外盆栽试验, 设置 5 个处理: CK(对照)、NT(模拟镉污染浓度为 5 mg/kg)、LT(模拟镉污染浓度为 5 mg/kg)、MT(模拟镉污染浓度为 10 mg/kg)、HT(模拟镉污染浓度为 20 mg/kg)。每个处理设 3 个重复, 共 15 盆。CK、

收稿日期: 2017-08-12

基金项目: 湖南省自然科学基金(编号: 2015JJ3129)。

作者简介: 孙向平(1985—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 助理研究员, 主要从事农业生态环境保护及内生菌资源利用研究。Tel: (0731) 88998529; E-mail: sunxiangping@caas.cn。

NT 不施肥,其他处理施氮 150 kg/hm²、磷(P₂O₅) 67.5 kg/hm²、钾(K₂O)225 kg/hm²。土壤和有机肥分别风干并过 4 mm 筛,每盆装土 16 kg,把土壤和相应肥料充分混合均匀,同时用 CdCl₂ 配制成溶液加入土壤中。盆栽过程中灌浆成熟期晒田 7 d,其他时间保持盆栽土壤中 1~2 cm 水位高度。分别在分蘖期、拔节期、抽穗开花期、灌浆成熟期采取土壤样品。土壤样品风干后分别过 1、0.149 mm 筛备用。

表 2 重金属 BCR 连续化学提取法

步骤	重金属形态	提取剂	提取方法
1	可交换态	30 mL 0.1 mol/L CH ₃ COOH	25 ℃ 水浴振荡 16 h,离心 20 min
2	可还原态	30 mL 0.5 mol/L NH ₂ OH·HCl (pH 值为 2)	25 ℃ 水浴振荡 16 h,离心 20 min
3	可氧化态	10 mL 8.8 mol/L H ₂ O ₂ (pH 值为 2.5)	室温轻微振荡 1 h,85 ℃ 水浴振荡 1 h
		10 mL 8.8 mol/L H ₂ O ₂ (pH 值为 2.5)	85 ℃ 水浴振荡 1 h
		30 mL 1.0 mol/L CH ₃ COONH ₄ (pH 值为 2.0)	25 ℃ 水浴振荡 16 h,离心 20 min
4	残渣态	HNO ₃ -HClO ₄	消解

1.4 数据分析

采用 SPSS 20.0 及 Excel 2007 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 施用氮肥对不同镉污染水平下 pH 值的影响

由图 1 可知,镉污染土壤中施用氮肥降低了土壤的 pH 值。pH 值在污染土壤中的变化幅度要大于没有污染的土壤,其中中度污染土壤中 pH 值的变化趋势与其他处理不同。水稻收获后土壤 pH 值的大小为 LT > HT > MT > CK = NT。

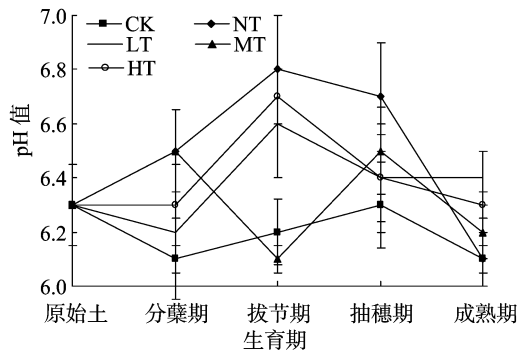


图1 不同处理对水稻土 pH 值的影响

2.2 施用氮肥对不同镉污染水平下 Eh 值的影响

由图 2 可知,镉污染土壤在水稻的拔节期前,土壤 Eh 值都高于没有污染土壤,但在水稻生育后期,污染土壤的 Eh 值要低于没有污染土壤,施用氮肥的高镉污染土壤中的 Eh 值在水稻生育期的变化要大于其他处理。中低镉污染水平 Eh

1.3 测定项目及方法

1.3.1 氧化还原电位(Eh)值、pH 值测定方法 Eh 值用氧化还原电位测定仪(ORP)原位测定。取过 1 mm 筛的土壤样品测定土壤 pH 值,测定方法采用去离子水浸提 pH 计法(水土比 2.5 mL : 1.0 g)。

1.3.2 重金属形态提取及测定方法 Cd 形态的提取方法见表 2。镉含量的测定采用原子吸收光谱法。

值的变化趋势与 CK 一致。水稻收获后,土壤 Eh 值的大小顺序为 NT > CK > LT > MT > HT。高镉污染土壤中的 Eh 值比 CK 处理低 16.9%。

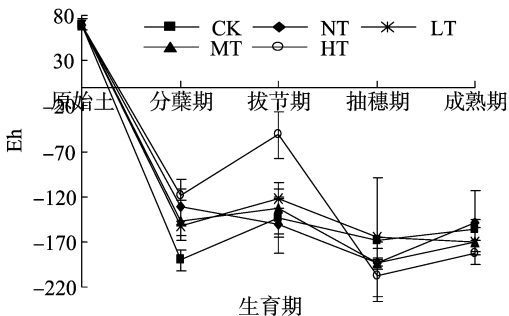


图2 不同处理对水稻土 Eh 值的影响

2.3 不同处理对水稻各部位含镉量的影响

水稻收获后,根、茎、籽粒中镉的浓度及含量如表 3 所示,整个生育期施用化学氮肥后发现水稻根、籽粒中镉的浓度随着镉污染程度的增加而增加。在低镉污染水平下,籽粒中镉的浓度是没有污染土壤中的籽粒镉浓度的近 3 倍,根中镉的浓度达到了未污染土壤的 10 倍。镉污染浓度为 20 mg/kg 的土壤中,水稻收获后,籽粒中镉的浓度达到了 0.731 mg/kg。镉的吸收主要集中在水稻的根部。高镉污染没有提高水稻中镉的转运系数。水稻收获后,各部位镉的含量,以根部截留最为明显。在本研究中,在高镉污染水平条件下,施用氮肥对水稻的产量变化幅度影响较小,镉对水稻生长的毒害作用并没有体现出来。

表 3 不同处理对水稻各部位镉含量的影响

水稻部位	水稻不同处理镉浓度 (mg/kg)					水稻不同处理含镉量 (μg/株)				
	CK	NT	LT	MT	HT	CK	NT	LT	MT	HT
根	0.300 ± 0.02	6.300 ± 0.15	3.060 ± 0.05	6.120 ± 0.10	8.190 ± 0.10	4.830 ± 0.08	81.020 ± 1.02	69.770 ± 1.28	128.520 ± 8.00	218.670 ± 16.51
茎	0.029 ± 0.01	1.000 ± 0.06	0.083 ± 0.01	0.145 ± 0.01	0.119 ± 0.01	1.520 ± 0.03	50.200 ± 0.07	7.810 ± 0.10	12.460 ± 0.400	10.500 ± 1.00
籽粒	0.120 ± 0.03	0.232 ± 0.01	0.310 ± 0.05	0.478 ± 0.05	0.731 ± 0.01	2.870 ± 0.10	8.400 ± 0.00	7.690 ± 0.10	11.190 ± 0.100	17.690 ± 0.30

土壤中镉的形态变化如图 3 所示,可见外源镉的添加增加了水稻土壤中可交换态镉的含量。在镉污染条件下,施用氮肥对各污染水平条件下土壤中镉形态的变化趋势影响较小。但污染土壤中镉的形态变化趋势与没有污染土壤中镉的

形态变化趋势不同,水稻收获后,CK 处理土壤中残余态镉的比重重要大于其他处理。施用氮肥处理条件下,中高度镉污染水平(≥10 mg/kg)水稻收获后土壤中残余态镉比重重要大于低度镉污染土壤。

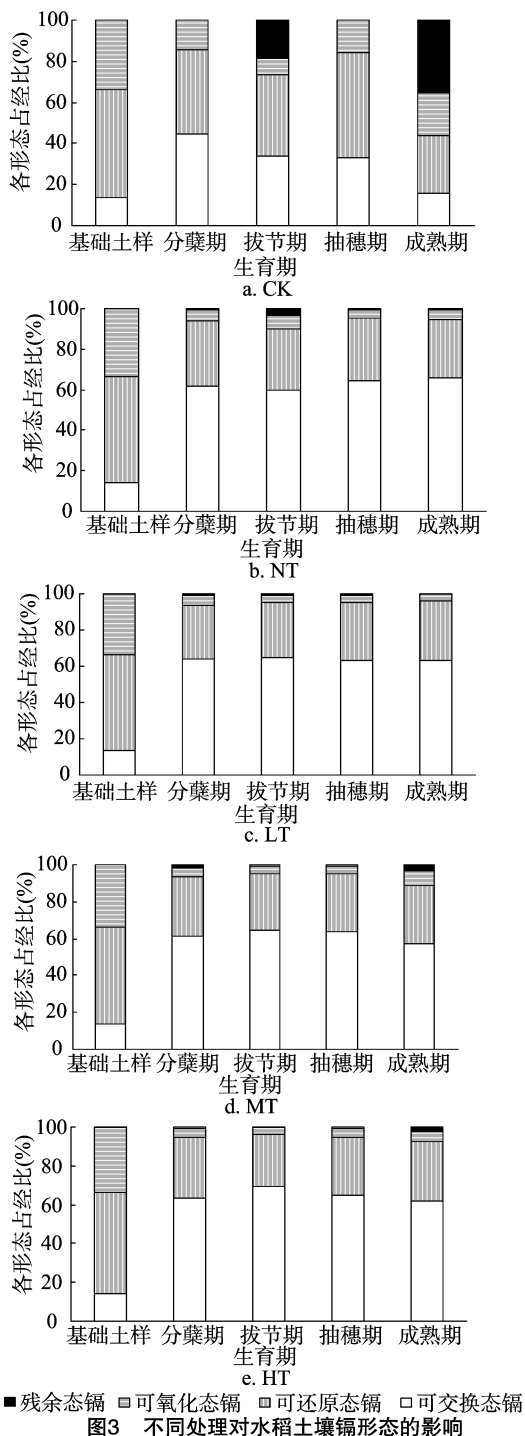


图3 不同处理对水稻土壤镉形态的影响

3 讨论

土壤中 Cd 的生物有效性受多种因素的影响,土壤中镉含量、土壤 pH 值和氧化还原电位等都会影响植物对镉的吸收。研究表明,施用氮肥能改变土壤中的理化性质,明显增加植物中重金属的浓度^[8]。本研究在水稻的生育后期,污染土壤的 Eh 值要低于没有污染的土壤。选取不同水稻品种,根据 GB 2762—2005《食品中污染物限量》对大米中 Cd 的限量标准(≤ 0.2 mg/kg),水稻土土壤总 Cd 含量临界值分别为 2.0、3.1 mg/kg,其中土壤中 Cd 含量是影响作物 Cd 吸收的主要因子^[9]。绝大多数作物对 Cd 的吸收随土壤中 Cd 浓度的

升高而增加,作物体内 Cd 浓度与土壤中总 Cd 含量和有效 Cd 含量都呈显著正相关^[10]。本研究中水稻根、茎、籽粒镉含量随土壤镉浓度的增加而增加。大量研究认为,低浓度重金属对植物有积极的“刺激作用”,但这种刺激作用受到浓度的限制^[11]。曾翔等报道,有些水稻品种在镉处理浓度为 10 mg/L 时,处理组根系数量、最大根系长度和发芽率等指标高于对照组,表明此处理浓度对种子的萌发具有促进作用^[12]。当镉浓度为 3 mg/L 时,植物发芽率显著降低,根短、根少,根尖的颜色略呈红褐色,对植物根系生长产生毒害作用^[13]。水稻根系吸收土壤环境中的镉并最终积累在稻米中,在镉含量为 20 mg/kg 的土壤中,水稻根系的生长并没有受到镉的毒害作用。水稻收获后,镉吸收主要集中在根部。镉浓度的增加使得蔬菜中的镉浓度也增加,但差异性不显著^[14]。研究表明,水稻品种的镉耐性与其吸收镉相对较少或向地上部运输比例较低有关^[15]。高镉污染没有提高水稻中镉的转运系数。施入生物炭在中低镉污染水平下,根际与非根际土壤中镉形态变化趋于一致但镉形态含量存在差异。在高镉污染水平下,生物炭引起根际与非根际土壤中镉形态变化但不显著^[16]。施用氮肥处理条件下,中高度污染水平(≥ 10 mg/kg)水稻收获后土壤中残余态镉比重重要大于低度污染土壤。

4 结论

施用氮肥在高镉污染土壤中的 Eh 值在水稻生育期的变化要大于其他处理。镉的吸收主要集中在水稻的根部。施用氮肥在中高度污染水平(≥ 10 mg/kg)水稻收获后土壤中残余态镉比重重要大于低度污染土壤。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17)[2017-08-01]. http://www.sdpc.gov.cn/fzgggz/ncjj/zhd/201404/t20140418_607888.html.
- [2] 茹淑华,苏德纯,王激清. 土壤镉污染特征及污染土壤的植物修复技术机理[J]. 中国生态农业学报,2006,14(4):29-33.
- [3] 宋文恩,陈世宝,唐杰伟. 稻田生态系统中镉污染及环境风险管理[J]. 农业环境科学学报,2014,33(9):1669-1678.
- [4] 张福锁,马文奇,陈新平. 养分资源综合管理理论与技术概论[M]. 北京:中国农业出版社,2006:48-54.
- [5] 唐皓,李廷轩,张锡洲,等. 水稻镉高积累材料的筛选及其镉积累特征研究[J]. 生态环境学报,2015,24(11):1910-1916.
- [6] Liu C F, Guo J L, Cui Y L, et al. Effects of cadmium and salicylic acid on growth, spectral reflectance and photosynthesis of castor bean seedlings[J]. Plant and Soil, 2011, 344(1/2):131-141.
- [7] Naik S K, Pandit T K, Patra P K, et al. Effects of graded levels of cadmium on spinach and cabbage grown in an inceptisol[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2013, 44(10):1629-1642.
- [8] Liu M H, Sun J, Li Y, et al. Nitrogen fertilizer enhances growth and nutrient uptake of *Medicago sativa* inoculated with *Glomus tortuosum* grown in Cd-contaminated acidic soil[J]. Chemosphere, 2017, 167:204-211.
- [9] 赵雄,李福燕,张冬明,等. 水稻土镉污染与水稻镉含量相关性研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(11):2236-2240.

(下转第 328 页)

时间-剂量效应:随着 BDE-99 浓度的增大,抑制作用显著增强。绿色巴夫藻表现为随着处理浓度的增大,出现缓慢生长的趋势,波动性较大,抑制作用较低。由此可见,BDE-99 对各种海洋微藻的致毒胁迫效应存在种属差异。

本研究设计添加固定浓度(6.68 $\mu\text{g/L}$)BDE-99 处理 2 种微藻,随着培养时间的递增,2 种微藻的 ACP 活性变化趋势不明显,巴夫藻和塔玛亚历山大藻的 ACP 的活性均于处理后 72 h 达到最高值,与对照组相比,分别提高 18%、15%。随着 BDE-99 暴露时间的增加,巴夫藻、塔玛亚历山大藻的 AKP 活性逐渐升高,巴夫藻于 BDE-99 处理后 72 h 达到最高值,与对照组相比提高了 43%,塔玛亚历山大藻的 AKP 活性变化趋势同巴夫藻,AKP 活性在 BDE-99 处理后 48 h 达到最大值,与对照组相比,提高了 40%。在同一时间条件下,BDE-99 对 2 种微藻 CAT 活性的影响有差异,处理后 96 h 巴夫藻、塔玛亚历山大藻的 CAT 活性分别增加 47%、31%;2 种微藻体内的 CAT 活性增加与 BDE99 的暴露时间呈正相关趋势,CAT 活性在高位持续至处理后 96 h,ACP、AKP、CAT 活性的变化反而说明 2 种海洋微藻对 BDE-99 的致毒胁迫产生应激响应,在短时间内刺激 ACP、AKP 和 CAT 活性升高,特别是 CAT 活性的剧烈变化程度明显,结果与生长量的变化一致。

张智华等指出,小新月菱形藻的 CAT 活性和 MDA 含量在萘菲苾作用下会有不同程度的升高,细胞损伤加剧^[9]。任加云等指出,进入生物体中的污染物在分解代谢过程中能够形成多种中间产物,并产生大量活性氧物质,造成生物体的氧化损伤,一些抗氧化防御系统能够转化超氧阴离子自由基,从而使得机体免受损伤^[10-11]。在本研究中,用 BDE-99 胁迫 2 种微藻,结果显示,2 种微藻 MDA 含量随着 BDE-99 暴露时间的增加而升高,特别是塔玛亚历山大藻的升高趋势非常明显,巴夫藻在处理 120 h 达到最高值,与对照组相比,提高了 56%,经 t 检验分析,差异极显著($P < 0.01$);塔玛亚历山大藻同样在处理 120 h 达到最高值,与对照组相比,提高了 95%,经 t 检验分析,差异极显著($P < 0.01$)。本研究结果显示,塔玛亚历山大藻对 BDE-99 的响应较巴夫藻强烈,与上述生长量变化结果一致。本研究设定时间为 120 h,由于 BDE-99 对巴夫藻和塔玛亚历山大藻致毒效应较强,120 h 后由于藻体本身的活性减弱,死亡率加剧而导致 MDA 含量

仍然维持在高位。王丽平等也指出,萘菲苾胁迫对藻细胞的膜脂质过氧化作用有明显增强的迹象,藻细胞的 MDA 含量对萘菲苾毒性较为敏感,是个潜在的有价值的参考指标^[5]。

本研究从浮游藻类的视角,通过研究绿色巴夫藻和塔玛亚历山大藻的生长、部分抗氧化酶活性及 MDA 含量对 BDE-99 的致毒胁迫的响应,旨在揭示多环芳烃化合物对水环境污染的重要性,并研究了海洋微藻在水环境污染治理及修复中的潜在应用价值。

参考文献:

- [1] Martin M, Lam P K, Richardson B J. An Asian quandary; where have all of the PBDEs gone? [J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, 49(5/6): 375-382.
- [2] Alaae M, Arias P, Sjödin A, et al. An overview of commercially used brominated flame retardants, their applications, their use patterns in different countries/regions and possible modes of release [J]. Environment International, 2003, 29(6): 683-689.
- [3] 黄加乐, 朱军山, 洪在地, 等. 电子电气设备中塑料阻燃剂 PBDE 使用的危害性[J]. 家电科技, 2005, 10(7): 41-43.
- [4] 周政懋. 国内外阻燃剂现状及进展[J]. 渔业科学进展, 2009, 30(4): 142-146.
- [5] 王丽平, 郑丙辉, 孟 伟. 萘菲苾对两种海洋硅藻生长、SOD 活力和 MDA 含量的影响[J]. 海洋通报, 2008, 27(4): 53-58.
- [6] 胡 恒, 于 腾, 孟范平, 等. 5 种多溴联苯醚同系物对海洋饵料藻(亚心型扁藻和盐生杜氏藻)的急性毒性[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(5): 654-660.
- [7] 李卓娜, 孟范平, 赵顺顺, 等. 2,2',4,4'-四溴联苯醚(BDE-47)对 4 种海洋微藻的急性毒性[J]. 生态毒理学报, 2009, 4(3): 435-439.
- [8] 杜青平, 黄彩娜, 贾晓珊, 等. 1,2,4-三氯苯对 3 种海洋微藻的毒性效应[J]. 生态环境学报, 2007, 16(2): 352-357.
- [9] 张智华, 蔡恒江, 张俊新. 萘、菲、苾对小新月菱形藻的毒性研究[J]. 广州化工, 2015, 43(19): 95-97.
- [10] 任加云, 潘鲁青, 苗晶晶. 苯并(a)苾和苯并(k)萘混合物对栉孔扇贝毒理学指标的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1180-1186.
- [11] 沈 忱. 苯并(a)苾对海洋微藻毒性和生理的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [12] 王玉山. 镉胁迫对不同水稻根系分泌有机酸和氨基酸及根系 Cd 含量的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2011.
- [13] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British population of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl (Brassicaceae) [J]. The New Phytologist, 1994, 127(1): 61-68.
- [14] 肖美秀, 林文雄, 陈祥旭, 等. 镉在水稻体内的分配规律与水稻镉耐性的关系[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 379-381.
- [15] 赵青青, 王海波, 夏运生, 等. 生物质炭对根际土壤中镉形态转化及水稻镉累积的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(9): 1534-1539.

(上接第 320 页)

- [10] Guttormsen G, Singh B R, Jeng A S. Cadmium concentration in vegetable crops grown in a sandy soil as affected by Cd levels in fertilizer and soil pH[J]. Fertilizer Research, 1995, 41(1): 27-32.
- [11] Gussarsson M, Asp H, Adalstrinsson S, et al. Enhancement of cadmium effects on growth and nutrient composition of birch (*Betula pendula*) by buthionine sulfoximine (BSO) [J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47(2): 211-215.
- [12] 曾 翔, 张玉烛, 王凯荣, 等. 镉对水稻种子萌发的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1665-1668.