

重金属与农药复合污染研究现状及展望

潘攀^{1,2}, 杨俊诚^{2*}, 邓世槐^{1*}, 姜慧敏², 张建峰², 李玲玲², 沈飞¹

(1.四川农业大学资源环境学院, 四川雅安 625014; 2.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:农业生态环境与人类生存质量息息相关,而随着工农业的发展,进入环境中的污染物种类和数量明显增加,环境污染已不再是单一污染的理想状态。在农业生态系统中,重金属和农药复合污染较为突出,尽管总体研究还较薄弱,但也逐步成为近年来农业环境科学研究的热点。本文就重金属和农药复合污染在土壤-植物系统中环境行为、交互作用及机制等方面的研究进展和动态进行综合分析,并对一些研究热点和需要强化的方向进行展望。

关键词:重金属;农药;复合污染;交互作用

中图分类号:X501 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)10-1925-05

Heavy Metals and Pesticides Co-contamination in Environment

PAN Pan^{1,2}, YANG Jun-cheng^{2*}, DENG Shi-huai^{1*}, JIANG Hui-min², ZHANG Jian-feng², LI Ling-ling², SHEN Fei¹

(1.College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China; 2.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: Life quality for human being is closely linked with agro-ecological environment, while the sort and quantity of contaminant entered into the environment have increased significantly as the development of industry and agriculture. The environmental pollution is no longer the ideal state of simple and single one. Heavy metals and pesticides co-contamination have showed up, although the overall study of this area is in the infant stage and it has been prominent as a hot-point among the combined pollution study in agricultural ecosystem. This paper synthetically reviewed the environmental behavior, interaction and mechanism of heavy metals and pesticide, and then proposed some research trends and areas in the future that are required to carry out intensively according to the present situation of environmental pollution and international research fronts.

Keywords: heavy metals; pesticides; co-contamination; interaction

在污水灌溉、矿质肥料大量使用、工业废水和汽车尾气排放、城市垃圾和工业废弃物堆放等因素影响下,土壤、水、大气等环境及人类都受到重金属污染的危害^[1-3]。与上世纪相比,环境中大部分重金属含量均有较大幅度的上升^[4-5],污染风险明显增加。而化学农药,其种类多、组合多样、施用范围广,长期不科学施用以及大量使用剧毒、高残留、难降解农药已成为当前农药污染典型特征之一^[6-8]。农药的利用率低,据报道,仅 30%~40%农药被利用,而真正作用于靶标生物

的仅有 0.1%,绝大部分农药进入环境对土壤、水、大气等环境介质产生严重的污染^[9-12]。目前,重金属和农药污染已成为环境科学领域关注的热点。

当前,环境中的污染物正趋于多元化和复杂化,进入生态系统中的污染物的种类随时间呈指数增长,环境污染不再是单一污染的理想状态,而是以由各种污染物构成的复合/混合污染为主^[13]。污染物间相互作用的环境效应无法用单一污染物的作用机理来解释,以往依赖单一效应制定的有关评价标准难以真实地反应环境质量的要求。通过对复合污染的研究,揭示环境污染过程与机理,可为制订环境污染防治与治理标准提供依据,这也体现了对复合污染研究的现实需要。而在农业环境中,农药和重金属是比较普遍的污染物种类,在此认识基础上,本文重点对农药和重金属复合污染在土壤-植物系统中的环境行为、交互作用以及复合污染机制等方面的研究进展和动态进行

收稿日期:2011-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目:水稻在镉与苯嘧磺隆胁迫下的基因应答研究(20877101);农业部公益性行业科研专项(201103007)

作者简介:潘攀(1988—),女,四川绵阳人,硕士,主要研究方向为农业环境。E-mail:michelle2528@yahoo.cn

* 通讯作者:杨俊诚 E-mail:yangjch@263.net

邓世槐 E-mail:shdeng8888@163.com

综合分析,同时对一些研究热点和需要强化研究的方向进行展望。

1 重金属-农药复合污染对土壤质量的影响

1.1 重金属-农药复合污染对土壤酶的影响

土壤酶活性是探讨生物与污染物间关系的有效途径。首先,与单一污染相比,重金属与农药复合污染对土壤酶的影响有较大的不同。有研究表明,铜与草甘膦的复合污染对过氧化氢酶的毒性大于单一污染,对淀粉酶、脲酶和磷酸酶的毒性,小于铜单一污染,但大于草甘膦^[14]。其次,重金属与农药复合污染对不同种类的酶的影响是不同的,有的表现出抑制效应,有的表现出一定的刺激效应,有的则没有影响。并且,同一种效应体现在不同酶活性的程度也不同。铜与草甘膦的复合污染研究表明,草甘膦的存在减弱了铜对土壤中淀粉酶、脲酶和磷酸酶活性的抑制作用,增强了对过氧化氢酶活性的抑制^[14]。在土壤脲酶、转化酶和酸性磷酸酶3种酶中,锈去津和Cu的交互作用仅对酸性磷酸酶有影响,其作用机理为协同效应^[15]。Cd²⁺与乐果对酶活性产生明显的协同作用,复合抑制效应顺序为蛋白酶>蔗糖酶>脲酶^[16]。另外,重金属-农药复合污染对土壤酶活性的影响受外界环境的影响较大,有研究表明,土壤有机质含量是影响复合效应的因素之一。Hg与豆磺隆同时添加对土壤转化酶产生交互作用,在有机质含量高的土壤中表现出拮抗效应,在有机质含量低的土壤中则表现出协同效应^[17]。

1.2 重金属-农药复合污染对土壤微生物的影响

暴露时间和污染浓度是影响重金属与农药复合对微生物毒害的两个重要因素。暴露时间影响了复合污染的方向和强度,这可能主要与农药降解速率和重金属离子价态变化有关。有研究表明,在镉与苄嘧磺隆除草剂复合污染条件下,微生物生物量碳和氮都呈现先降低后升高的规律^[19],相同的规律也出现在铅和苄嘧磺隆复合污染对青紫泥微生物量碳和氮的影响上^[20]。不同浓度组合下,重金属与农药的复合污染对微生物群落的影响表现不同,贾会娟等^[21]研究表明,在保持镉浓度为 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 不变的条件下,好气性自生固氮菌数量在镉与克百威复合作用下是随克百威浓度($1\sim 10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的增加而减少的。铅和苄嘧磺隆复合污染对土壤微生物活性的影响结果表明,在低浓度 $[(100+1)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 时对微生物生物量碳表现为简单加和作用,高浓度 $[(1\ 000+10)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 时则表现为拮抗作用^[22]。

除时间和浓度等外界因素以外,微生物种类也是影响重金属与农药复合污染效应的重要因素之一。Cd²⁺和乐果复合处理对土壤中不同种类微生物生长均存在着明显的抑制作用,实验期内细菌、真菌和放线菌的平均抑制率分别为50.23%、60.18%、73.38%,表现出不同程度的复合抑制效应,顺序为放线菌>真菌>细菌^[16]。在同一浓度组合复合处理下,乙草胺+Cu对自生固氮菌生长的影响是先抑制后促进,而对磷细菌和硅酸盐细菌生长的影响在整个实验期内都表现明显的加和或协同抑制效应^[23]。

2 重金属-农药复合污染对植物的毒害作用

重金属-农药复合污染对植物产生的毒害在个体、细胞及分子水平上都有所表现。在个体水平上,植物表现出发芽率降低、根茎伸长受抑制、生物量降低、酶活性和某些化学物质含量发生变化等。在镉、铜和氯嘧磺隆复合处理条件下,小麦种子发芽率、根茎伸长显著受到抑制,三者对复合污染的敏感程度顺序为:根长>茎长>发芽率^[24]。铜和氯嘧磺隆交互作用对大白菜种子的影响也表现出相似的结果^[25],这说明植物的根对重金属-农药复合污染较为敏感,也是最容易受损的部位。镉与豆磺隆复合污染对小麦辽春10号具有协同抑制作用,表现出生长迟缓、植物矮小等中毒症状,且随着镉浓度的增加,小麦生物量呈现下降的趋势^[26]。SOD、POD酶均被认为是植物体中抗氧化酶系统的组成部分,其在复合污染条件下活性发生改变:小麦在氯嘧磺隆分别与镉和铜的共同胁迫下,其SOD、POD酶活性均增加^[27-28]。植物体内各种化学物质含量在重金属-农药交互作用下也会发生变化,如水稻幼苗根茎中的硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶在镉、乙草胺和苄嘧磺隆交互作用下活性降低,游离氨基酸含量增多,可溶性蛋白含量减少^[29],镉-百草枯复合污染对浮萍体内游离氨基酸和可溶性蛋白含量的影响也表现出相同的变化^[30]。在细胞分子水平上,吴庆钰等^[31]研究表明,镉与苄嘧磺隆复合污染能破坏根尖细胞结构,使表皮细胞破裂,核仁解体,而且,细胞DNA的受损程度随镉浓度的增加而增加。

在重金属-农药复合污染的不同浓度组合和植物不同组织中,污染物质在交互作用对植物的影响中的贡献有所不同^[25,28,32]。镉与氯嘧磺隆对小麦的复合污染研究表明,当Cd浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,氯嘧磺隆对复合污染影响效应的贡献大于Cd,而当Cd浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,复合效应主要由Cd来决定。另外,小

麦叶中 SOD 活性的变化主要是由 Cd 主导,根部 SOD 活性的变化则主要归因于两者对小麦整体的影响^[27]。这说明在不同组织中,重金属-农药交互作用的机理可能不同。由此也可以看出,除污染物本身毒理性质之外,浓度组合和植物组织是影响复合污染对植物影响的两个重要因素。

3 重金属-农药复合污染中的交互作用

重金属与农药的联合毒性效应常有 3 种形式:拮抗作用、协同作用及加和作用。在两者共同作用下,其交互作用会随其中某物质的浓度的变化而改变。当 Cu^{2+} 与草甘膦复合污染时,在低草甘膦浓度条件下, Cu^{2+} 的存在在一定程度上增加了草甘膦对根伸长的抑制作用;在较高草甘膦浓度条件下, Cu^{2+} 的存在则降低了草甘膦对根伸长的抑制作用^[33]。王美娥等^[36]研究表明,低浓度豆磺隆、Cu、Cd 复合时,豆磺隆与重金属对根长抑制率具有拮抗作用;当 Cu、Cd 浓度较高时,豆磺隆与重金属对小麦幼苗芽长、根长的抑制率具有显著的协同作用。联合毒性除与浓度组合有关之外,还与时间密切相关。一般情况下,在一定时间范围内,联合毒性随时间的延长而增强。在铜与乙草胺对浮萍联合毒性效应研究中,随着时间的延迟,两者的联合毒性由最初的拮抗或相加作用转为协同抑制的作用^[35]。但时间过长,随着农药降解或重金属与其他物质络合而毒性降低,其联合毒性效应也会减弱。

当重金属与农药两者共存时,在土壤-植物系统中会发生交互作用,其主要表现为在土壤环境中的吸附竞争位点、络合螯合作用、通过改变环境条件相互影响以及植物体中的吸收迁移过程。

Cu 能降低腐植酸对异丙草胺的吸附量,可能是因为两者均能与腐植酸的羧基和酚基结合,竞争相同的吸附位点^[37]。研究表明,Zn、Cu 与草甘膦也因竞争相同位点而发生交互作用^[38-39]。草甘膦分子中部分基团,如胺基、羧基和磷酸基,很容易与金属离子结合,形成配位体,使得重金属与农药发生络合,改变两者在环境中的迁移转化^[40]。Cu 与草甘膦发生络合作用,降低蒙脱石对草甘膦的吸附^[41],两者结合也能降低富里酸对草甘膦的吸附作用^[42],但也有研究者认为 Cu 与草甘膦形成的络合物活性增强,更易被土壤吸附,土壤吸附草甘膦的量增加^[39]。在加入另一种污染物质时,往往会导致某些环境因素的变化,从而影响之前污染物的环境效应。如草甘膦能通过降低土壤溶液中的 pH,增加针铁矿表面负电荷量而促进针铁矿对 Zn

的吸附作用^[38]。重金属可通过影响微生物的活性而影响农药的降解,从而导致农药在环境中的毒性强度和时效发生改变^[43]。在植物体内,农药影响重金属的吸附迁移过程。在同一镉浓度下施入豆磺隆,小麦根和地上部的镉浓度和镉积累量都低于不施豆磺隆的处理^[26],这说明豆磺隆在一定程度上能抑制镉的吸收和运输。苄嘧磺隆(BSM)对镉向地上部迁移也有一定的抑制作用^[44]。有研究还表明,一定浓度的 BSM 对水稻吸收 Cd 有一定的刺激作用^[45]。

4 研究展望

随着环境问题日益受到重视,复合污染的研究正处于不断深入和完善之中,但仍然存在不少迫切需要加强的研究方向,特别是有机-无机复合污染中重金属和农药的复合污染机理研究,这是针对农业环境污染现状,制定污染防控与治理办法的根本依据。

(1)深化复合污染环境影响机理研究。现阶段针对单一污染机理的研究较多,但对于复合污染机理,缺乏系统性。应充分利用现代仪器分析新方法、新技术,以进一步揭示复合污染物的致毒途径及其机理,包括在分子水平上探索和挖掘一些有益功能基因。鉴于目前有关在重金属和农药共存时,对生物的复合污染毒性研究大多集中在生理生化反应等个体水平上,对其在细胞结构和分子水平上的毒害效应研究甚少,因此,在复合污染研究领域,尤其应加强重金属与农药复合污染对土壤微生物和动物及植物在分子水平上的毒害机理研究,明确复合污染的剂量-效应过程与机制。

(2)拓宽复合污染物间及不同浓度组合间的交互作用机理与毒理研究。目前对复合污染研究的对象多数为两种物质的污染,对于 3 种及 3 种以上污染物质的研究甚少。因此,围绕农业环境现状,有针对性地增加复合污染物的种类及数量对复合污染研究的深入具有重要的实际意义。在复合污染胁迫下,污染物对生物的毒害效应除了与其本身物理化学性质有关外,更重要的是取决于污染物的浓度水平的组合关系^[46],因此,对于复合污染的研究,也应重点考虑污染物的浓度组合及浓度组合间的交互作用。并且,在实际环境下,不同区域、不同种植制度,农药和重金属复合污染程度以及在不同环境条件的影响下其环境行为不尽相同,必须针对不同的污染环境开展系统研究,为制定环境污染防控与治理标准提供科学依据。

(3)短期与长期效应研究并重,建立长期定位研

究基地具有重要战略意义。环境中多数污染物质残留时间较长,特别是重金属和有机农药,它们一旦进入食物链就会产生“生物放大效应”,在生物体内富集,由此带来的环境危害更为严重^[47]。因此,对污染物长期定位试验研究十分必要。目前,国外在这方面的研究报道较多,国内相对较少,今后应从战略高度来认识和加强长期定位研究,有关政府部门应重视组织和统筹协调,建立环境污染长期定位试验研究共享平台。

参考文献:

- [1] CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, LEI Mei, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2005, 60:542-551.
- [2] MENG Wei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, et al. Heavy metal pollution in Tianjin Bohai Bay, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20:814-819.
- [3] 陈丽莉, 俄胜哲. 中国土壤重金属污染现状及生物修复技术研究进展[J]. *现代农业科学*, 2009, 16(3):139-140, 146.
CHEN Li-li, E Sheng-zhe. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the bioremediation techniques in China[J]. *Modern Agricultural Sciences*, 2009, 16(3):139-140, 146.
- [4] Gupta S, Pandotra P, Gupta A P, et al. Volatile (As and Hg) and non-volatile (Pb and Cd) toxic heavy metals analysis in rhizome of Zingiber officinale collected from different locations of North Western Himalayas by atomic absorption spectroscopy[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2010, 48:2966-2971.
- [5] TANG Wen-zhong, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, et al. Heavy metal sources and associated risk in response to agricultural intensification in the estuarine sediments of Chaohu Lake Valley, East China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 176:945-951.
- [6] Mann Reinier M, Hyne Ross V, Choung Catherine B, et al. Amphibians and agricultural chemicals: Review of the risks in a complex environment[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157:2903-2927.
- [7] 李顺鹏, 蒋建东. 农药污染土壤的微生物修复研究进展 [J]. *土壤*, 2004, 36(6):577-583.
LI Shun-peng, JIANG Jian-dong. Microbial remediation of pesticide-contaminated soil[J]. *Soils*, 2004, 36(6):577-583.
- [8] 张惠文, 周启星, 张倩茹, 等. 乙草胺、甲胺磷及组合对农田黑土细菌种群生长及多样性的毒性效应[J]. *环境科学*, 2004, 25(4):143-148.
ZHANG Hui-wen, ZHOU Qi-xing, ZHANG Qian-ru, et al. Toxic effects of acetochlor, methamidophos and their combination on bacterial amount and population richness at molecular levels in agricultural black soils[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(4):143-148.
- [9] 罗小勇. 农药残留及其对策[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(18):344-347.
LUO Xiao-yong. Residues from pesticides and countermeasures[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(18):344-347.
- [10] 王聪颖, 和文祥, 何敏超, 等. 酶在土壤农药污染修复中的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(增刊):371-374.
WANG Cong-ying, HE Wen-xiang, HE Min-chao, et al. Research advances on repairing pesticides polluted soils by enzymes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl):371-374.
- [11] Parveen Sultana, Kohguchi Testuyuki, Biswas Moloy, et al. Predicting herbicides concentrations in paddy water and runoff to the river basin[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(4):631-636.
- [12] Manuel Arias-Este' vez, Eugenio Lo'pez-Periago, Elena Martu'nez-Carballo, et al. The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 123:247-260.
- [13] 郑振华, 周培疆. 复合污染研究的新进展 [J]. *应用生态学报*, 2001, 12(3):469-473.
ZHENG Zhen-hua, ZHOU Pei-jiang. New advances in research of combined pollution[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(3):469-473.
- [14] 程凤侠, 司友斌, 刘小红. 铜与草甘膦单一污染和复合污染对水稻土酶活的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1):84-88.
CHENG Feng-xia, SI You-bin, LIU Xiao-hong. Effects of both single and combined pollution of copper and glyphosate on enzyme activity in paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):84-88.
- [15] 刘广深, 徐冬梅, 李克斌, 等. 酸雨、铜和莠去津对土壤水解酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(1):127-130.
LIU Guang-shen, XU Dong-mei, LI Ke-bin, et al. Effect of acid rain, copper, and atrazine on soil hydrolase activity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1):127-130.
- [16] 邹小明, 王能强, 张瑜敏, 等. 乐果与 Cd²⁺ 复合污染对土壤微生物生态效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(2):348-352.
ZOU Xiao-ming, WANG Neng-qiang, ZHANG Yu-min, et al. Eco-toxicological effect of cadmium and dimethoate combined and simplex pollution on soil microbe[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2):348-352.
- [17] 杨春璐, 孙铁珩, 和文祥. 汞和两种农药复合污染对土壤转化酶活性的影响[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(4):486-490.
YANG Chun-lu, SUN Tie-heng, HE Wen-xiang. Influence of joint pollution of mercury and two kinds of pesticides on invertase activity in soils[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(4):486-490.
- [18] Majier B J, Tscherko D, Paschke A, et al. Effect of heavy metal contamination of soils on micronucleus induction in tradescantia and on microbial enzyme activities: a comparative investigation[J]. *Mutagenesis Research*, 2002, 515:111-124.
- [19] 胡春邦, 汪海珍, 吴建军, 等. 镉与苄嘧磺隆除草剂单一污染和复合污染土壤的微生物生态效应 [J]. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 2005, 31(2):151-156.
HU Zhu-bang, WANG Hai-zhen, WU Jian-jun, et al. Ecological effects of both single and combined pollution of Cd and bensulfuron-methyl on soil microorganisms[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci)*, 2005, 31(2):151-156.
- [20] 贾继元, 吴建军, 徐建民. 铅与苄嘧磺隆复合污染对青紫泥微生物生物量的影响[J]. *环境污染与防治*, 2006, 28(6):415-418.
JIA Ji-yuan, WU Jian-jun, XU Jian-min. Effects of lead and bensulfuron-methyl on biomass in purple paddy topsoil[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2006, 28(6):415-418.
- [21] 贾会娟, 祝惠, 袁星, 等. 克百威与镉单一及复合污染对土壤好气性自生固氮菌数量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(增刊):529-532.
JIA Hui-juan, ZHU Hui, YUAN Xing, et al. Influence of both single and combined pollution of carbofuran and cadmium on the number of soil azotobacter[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl):529-532.
- [22] 侯宪文, 吴建军, 徐建明. 铅-苄嘧磺隆对土壤微生物活性与群落

- 结构的影响[J]. 中国环境科学, 2007, 27(6): 738-742.
- HOU Xian-wen, WU Jian-jun, XU Jian-ming. The influence of lead-bensulfuron-methyl complex pollution on soil microbial activities and community structure[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(6): 738-742.
- [23] 张惠文, 张倩茹, 周启星, 等. 乙草胺及铜离子复合施用对黑土农田生态系统土著微生物的急性毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 129-133.
- ZHANG Hui-wen, ZHANG Qian-ru, ZHOU Qi-xing, et al. Combined effects of acute toxicity of acetochlor and copper on soil microbial population and biological characteristics in maize-wheat-soybean agroecosystem[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2): 129-133.
- [24] WANG Mei-e, ZHOU Qi-xing. Single and joint toxicity of chlormuron-ethyl, cadmium, and copper acting on wheat *Triticum aestivum*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60: 169-175.
- [25] LIU T F, WANG T, SUN C, et al. Single and joint toxicity of cypermethrin and copper on Chinese cabbage (*Pakchoi*) seeds[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009(163): 344-348.
- [26] 金彩霞, 周启星, 王新. 镉-豆磺隆复合污染对小麦生物学性状与品质的胁迫[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1160-1163.
- JIN Cai-xia, ZHOU Qi-xing, WANG Xin. Stress of combined pollution of cadmium-chlormuron-ethyl on biological characteristics and quality of wheat *Triticum aestivum* L. [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6): 1160-1163.
- [27] WANG Mei-e, ZHOU Qi-xing. Joint stress of chlorimuron-ethyl and cadmium on wheat *Triticum aestivum* at biochemical levels[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144: 572-580.
- [28] WANG Mei-e, ZHOU Qi-xing, REN Li-ping. Toxicological responses in wheat *Triticum aestivum* under joint stress of chlorimuron-ethyl and copper[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72: 2121-2129.
- [29] HUANG He, XIONG Zhi-ting. Toxic effects of cadmium, acetochlor and bensulfuron-methyl on nitrogen metabolism and plant growth in rice seedlings[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2009, 94: 64-67.
- [30] 王雪琪, 李凡修, 黄河. 不同富营养化程度下 Cd 和百草枯对浮萍部分生理指标的影响[J]. 亚热带农业研究, 2009, 5(3): 184-187.
- WANG Xue-qi, LI Fan-xiu, HUANG He. Effect of paraquat and cadmium on some physiological indices of duckweed under different degree eutrophication[J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2009, 5(3): 184-187.
- [31] 吴庆钰, 杨俊诚, 张建峰, 等. 镉与苄嘧磺隆复合污染对水稻细胞、DNA 的毒害作用[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2216-2220.
- WU Qing-yu, YANG Jun-cheng, ZHANG Jian-feng, et al. Toxicity of co-contamination with bensulfuron methyl and cadmium to cell and DNA of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6): 2216-2220.
- [32] Teisseire H, Couderchet M, Vernet G. Phytotoxicity of diuron alone and in combination with copper or folpet on duckweed (*Lemna minor*) [J]. *Environmental Pollution*, 1999, 106(1): 39-45.
- [33] 王米道, 程凤侠, 司友斌. 铜与草甘膦复合污染对小麦种子发芽与根伸长的抑制作用[J]. 生态毒理学报, 2009, 4(4): 591-596.
- WANG Mi-dao, CHENG Feng-xia, SI You-bin. The inhibition of the combined pollution of copper and glyphosate to the seed germination and root elongation of wheat[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2009, 4(4): 591-596.
- [34] 杨俊诚, 张建峰, 韦东普, 等. 苄嘧磺隆对 Cd 的生物有效性影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 291-294.
- YANG Jun-cheng, ZHANG Jian-feng, WEI Dong-pu, et al. Effect of bensulfuron methyl on the bioavailability of cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2): 291-294.
- [35] 戴灵鹏, 张磊, 陈露露, 等. 铜与乙草胺对浮萍的联合毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 772-776.
- DAI Ling-peng, ZHANG Lei, CHEN Lu-lu, et al. Joint toxic effects of copper and acetochlor on *Lemna minor* L. [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4): 772-776.
- [36] 王美娥. 豆磺隆-重金属生态毒理联合效应及分子诊断 [D]. 沈阳: 中国科学院研究生院, 2006.
- WANG Mei-e. Joint ecotoxicological effects of chlorimuron-ethyl and heavy metals and their molecular diagnosis [D]. Shenyang: Graduate school of Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [37] XU Zhong-hou, HUANG Man-xiang, GU Qing-bao, et al. Competitive sorption behavior of copper (II) and herbicide propisochlor on humic acids[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, 287: 422-427.
- [38] WANG Yu-jun, ZHOU Dong-mei, SUN Rui-juan, et al. Zinc adsorption on goethite as affected by glyphosate[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151: 179-184.
- [39] Morillo E, Undabeytia T, Maqueda C, et al. Glyphosate adsorption on soils of different characteristics: Influence of copper addition [J]. *Chemosphere*, 2000, 40(1): 103-107.
- [40] Morillo E, Undabeytia T, Maqueda C, et al. The effect of dissolved glyphosate upon the sorption of copper by three selected soils [J]. *Chemosphere*, 2002, 47: 747-752.
- [41] Morillo E, Undabeytia T, Maqueda C. Adsorption of glyphosate on the clay mineral montmorillonite: effect of Cu (II) in solution and adsorbed on the mineral [J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, 31: 3588-3592.
- [42] Maqueda C, Morillo E, Undabeytia T, et al. Sorption of glyphosate and Cu (II) on a natural fulvic acid complex: mutual influence [J]. *Chemosphere*, 1998, 37(6): 1063-1072.
- [43] LIU Ting-feng, SUN Cheng, TA Na, et al. Effect of copper on the degradation of pesticides cypermethrin and cyhalothrin [J]. *Journal of Environmental Science*, 2007, 19: 1235-1238.
- [44] 吴庆钰, 杨俊诚, 张建峰, 等. 镉与苄嘧磺隆复合污染对水稻某些生物学特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5): 1789-1796.
- WU Qing-yu, YANG Jun-cheng, ZHANG Jian-feng, et al. Effects of cadmium and bensulfuron methyl co-contamination on some biological characteristics of rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5): 1789-1796.
- [45] 杨俊诚, 张建峰, 韦东普, 等. 苄嘧磺隆对 Cd 的生物有效性影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 291-294.
- YANG Jun-cheng, ZHANG Jian-feng, WEI Dong-pu, et al. Effect of bensulfuron methyl on the bioavailability of cadmium [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2): 291-294.
- [46] 周启星, 程云, 张倩茹, 等. 复合污染生态毒理效应的定量关系分析[J]. 中国科学(C辑), 2003, 33(6): 566-573.
- ZHOU Qi-xing, CHENG Yun, ZHANG Qian-ru, et al. The quantitative relation analysis of eco-toxicological effects of combined pollution [J]. *Science in China (Series C)*, 2003, 33(6): 566-573.
- [47] Manuel Arias-Estevez, Eugenio Lo'pez-Periago, Elena Mart'nez-Carballo, et al. The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 123: 247-260.