

土壤-植物体系中农药和重金属污染研究现状及展望

潘攀^{1,2}, 杨俊诚^{2*}, 邓仕槐^{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:农药、重金属已成为当今农业生态系统中重要的污染物质,国内外科学家对其进行了大量卓有建树的研究,特别是在土壤-植物系统中的研究受到较多关注。通过就农药和重金属对土壤微生物、土壤动物、土壤酶活性和植物的生理生化指标的影响进行的综合分析和阐述,系统剖析了其产生毒害机理和影响的因素,在此基础上提出今后相关研究中有待加强的重点,包括农药对非靶标生物毒害机理、农药降解中间产物的环境风险以及农药和重金属的迁移转化机理等。

关键词:农药;重金属;土壤环境

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)12-2389-10

Proceedings and Prospects of Pesticides and Heavy Metals Contamination in Soil-Plant System

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: Pesticides and heavy metals being considered as serious pollutants in agro-ecosystem, it had been studied massively over the world, especially in soil-plant system. The impact of pesticides and heavy metals on soil microbes, soil animals, soil enzymatic activity, and physiological and biochemical characters of plant were analyzed and discussed in this review, as well as their toxicological mechanism and influencing factors. Based on above, toxicological mechanism of pesticides on non-target, environmental risk of pesticides degradation products, and transformation mechanism of pesticides and heavy metals in soil-plant system were proposed as key areas in further study.

Keywords: pesticides; heavy metals; soil environment

大量研究表明土壤、水、大气等环境及人类都受到了重金属污染的危害,其来源主要有污水灌溉、工业废水、城市垃圾、汽车尾气、工业废弃物堆放及矿质肥料等^[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],重金属污染对植物、动物、微生物等生物群落带来不利影响,同时也会对人类健康形成严重威胁^[6-8]。

据统计,世界农作物的病虫草害中约有 50 000 种真菌、1 800 种杂草和 15 000 种线虫,全世界每年因此减产粮食约 50%^[9]。虽然施用化学农药是防止病虫草害的重要措施,但化学农药的种类多,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^[10-12]。据报道,仅 30%~40%农药被利用,而其中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^[13-16]。

随着工农业的发展,环境中的污染物正趋于多元化和复杂化,重金属和农药的污染是目前环境科学领域研究的热点。本文分别对农药和重金属在农业生态环境中的污染研究现状进行综合分析,在此基础上,对一些研究热点和需要强化的研究方向进行展望。

1 农药对环境的污染

为保证农业的增产增收,农药的生产和使用逐渐增加,但大部分的农药未能作用于靶标生物而是通过空气、土壤和水扩散到周围的环境中^[17-18],污染大气、水环境,甚至造成土壤板结;同时,增强环境中病菌、害虫对农药的抗性,杀伤有益生物,造成野生生物和畜禽中毒,影响农产品质量以及危害人体健康等。

收稿日期:2011-02-24

基金项目:国家自然科学基金(20877101,21107139);农业部公益性行业科研专项(201103007);环保公益性行业科研专项(200909005)

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

邓仕槐 E-mail:shdeng8888@163.com

1.1 农药在土壤环境中的行为

1.1.1 农药对土壤酶的影响

不同种类的土壤酶对于各种农药污染的敏感程度不同,因此通过研究土壤酶活性与农药之间的关系有助于了解土壤受农药污染的程度^[21]。

农药对土壤酶活性的影响既有正面效应也有负面效应,这主要取决于农药本身和环境因子。Schaffer^[22]总结了各种农药对土壤酶活性的影响,结果表明,农药对土壤酶活性的影响是无法预测的。因为一般而言,在不同土壤中试验,同一农药对同一种酶的剂量效应表现是不同的;一定浓度的农药对一种酶有抑制效应,但对另一种酶可能又是促进效应或者无作用,而且,试验条件不同,如田间试验和室内模拟试验往往得出的结论也不一样。总的来说,农药化学性质、处理浓度、残留时间、微生物群落结构、土壤类型、土壤性质等因子都可能是农药对土壤酶作用过程的影响因子^[23-24]。一般情况下低浓度农药对土壤酶表现刺激效应,高浓度则表现出抑制效应,且抑制作用随浓度的增加而加强^[25-28]。Niemi R.M.等^[29]认为除草剂赛克津和利谷隆在施用初期对多种酶都有刺激作用。在短时间内,0.5、5 mg·kg⁻¹和50 mg·kg⁻¹的杀虫剂啶虫脒对土壤脱氢酶有刺激效应,其活性增加^[30]。农药对土壤酶的影响也随时间进程而有所改变:一方面,土壤对农药吸附过程能降低其游离分子与酶接触的浓度;另一方面,在土壤一定温度水分条件下,农药的生物降解导致其毒性降低^[30]。农药对土壤酶的影响是一个长期的过程,应考虑时间的影响。杀虫剂久效磷、啶硫磷和氯氰菊酯两两复合处理时,其交互效应对土壤纤维素酶和淀粉酶活性的影响与土壤中相应降解纤维素和降解淀粉的微生物种群数量显著相关^[31]。土壤类型及其性质也起着重要作用:黑土与草甸土相比,前者有机质含量更高,对环境改变有更大的缓冲能力,故除草剂氯嘧磺隆和杀虫剂呋喃丹施用两种土壤中,黑土中脲酶活性的变化较缓慢些^[20]。

1.1.2 农药对土壤微生物的影响

农田施用农药大部分散落于土壤中,对微生物产生一定的影响,主要表现在微生物量、微生物群落结构和多样性及微生物活性等。就目前农药对微生物量的影响的研究结果差异较大,有研究认为农药对微生物有一定刺激作用,显著增加了土壤微生物量,也有研究认为农药对微生物量的影响呈不规律变化,有的则认为农药对微生物量影响不大^[32-34]。农药污染对微生物群落结构和多样性往往产生不利的影响,这种变

化与农药种类和浓度有很密切的关系^[35],同时微生物对农药的抗性也是一个值得考虑的因素^[32]。在相同浓度下,3种杀菌剂中,百菌清对土壤微生物群落结构的影响比对啉菌酯和戊唑醇两种农药的影响程度更大,时间更长^[36];同样在相同浓度处理下,草甘膦和噻唑啉能提高土壤微生物的活性和生物量,而乐果则降低微生物的活性和生物量^[37]。以上结果说明,农药种类差异是农药影响微生物群落发展的一个重要因素。农药浓度与其毒性效应直接相关,低浓度的除草剂苄嘧磺隆(BSM)对水稻土中微生物有轻微、短暂的不利影响,而高浓度BSM处理下,细菌群落数量急剧下降,该水稻土壤中微生物群落的多样性与BSM浓度显著相关^[38]。低浓度(<60 mg·kg⁻¹)甲氧菊酯(杀虫剂)对蔬菜土壤中微生物数量影响不大,高浓度(>90 mg·kg⁻¹)的甲氧菊酯在短期内对微生物有抑制作用,到后期,随着农药的降解,其影响效果也恢复到对照水平^[39]。农药对土壤微生物的影响是有选择性的,敏感类易受抑制,耐受型的优势群落则可利用农药作为碳源和能源而增殖^[32-33,40]。因此,土壤微生物对农药的抗性也是农药影响微生物过程中需要考虑的重要因素。

1.1.3 农药对土壤动物的影响

土壤动物作为生态系统中的重要组成部分,土壤污染必然会对这一类生物有所影响。农药种类和浓度是导致其对土壤动物影响产生不同效应的主要原因。一般情况,有机磷杀虫剂对土壤动物的影响比除草剂、杀菌剂等类对土壤动物的影响更显著,这是因为,有机磷杀虫剂主要是针对土壤动物,其作用速度快,毒性强,是一类急性农药,与之相比,除草剂、杀菌剂对土壤动物是慢性的,毒性也较弱^[41]。随着农药处理浓度的增加,土壤动物种类和数量呈递减变化,多样性指数 H' 值亦呈递减趋势,不同研究者分别对3种除草剂苄嘧磺隆、乙草胺和百草清的研究,均得出以上结论,同时一致认为,土壤中的优势种群——弹尾目和甲螨亚目,是对这些农药较为敏感的一类,可作为土壤环境污染的重要指示生物^[41-43]。杀虫剂呋喃丹对赤子爱胜蚓的影响呈现一定的剂量-效应关系。低浓度呋喃丹胁迫时,赤子爱胜蚓体内蛋白含量和乙酰胆碱酯酶(TChE)活性均表现升高的趋势,而在高浓度呋喃丹胁迫时,其体内蛋白质含量和TChE活性则表现出不同程度的降低^[44-45]。

1.2 农药对植物的影响

吴进才等^[47]研究了几种农药处理对不同水稻品种SOD活性的影响,结果表明,在第一次施用除草剂

后,大部分处理水稻 SOD 活性上升,而第二次施用后 SOD 活性则下降,说明第二次农药施用超过了水稻自身的抗性承受范围,最终导致伤害。丙二醛可以表征植物受损程度,研究表明农药浓度越高,丙二醛含量越高,同时叶绿素的含量越低^[48]。另外,农药也会导致水稻叶片光合产物输出率下降^[49],这一结论与叶绿素含量的下降有着密切的关系。

农药对植物细胞有一定的诱变活性,对染色体和基因结构均有一定程度的直接和间接破坏作用。唐正义等^[50]利用微核技术研究了甲胺磷(Me)、甲基硫菌灵(Th)和盐酸吗啉胍(Mo) 3 种农药对蚕豆根尖细胞的诱变效应。研究表明,农药浓度与微核率呈剂量-效应关系。从 3 种农药的作用机制看,Mo 直接干扰核酸合成,诱变作用最强;Th 是干扰有丝分裂中纺锤体的形成,间接干扰细胞核的分裂,诱变作用次之;Me 是通过抑制乙酰胆碱酯酶活性,引起细胞代谢紊乱,间接引起诱变,诱变作用较弱。细胞结构变化能够证明,当施用大量农药后,会引起作物遗传结构改变,降低品种品质性状。

1.3 影响农药生态毒理效应的因素

环境中有毒化学物质随着时间的推移而老化,其毒性会逐渐减弱^[51],因此,农药降解越快,对环境的危害越小。另外,在降解的过程中产生的中间产物也可能会造成污染,如硫丹硫酸盐,它是硫丹的初级降解产物,性质稳定,毒性与硫丹相似,存在很大的污染风险^[52]。不同土壤对农药的吸附特性不同,从而引起不同程度的毒害。据报道,在加入相同浓度农药时,粘性大的紫色稻田土壤比粘性弱的红壤稻田土在土壤颗粒周围形成的有效浓度相对较高,其反硝化细菌受到的抑制作用相对较强^[53]。Adriana 等^[54]研究发现,溶解性有机质(DOM)能够缓解百菌清和毒死蜱对尾胸刺水蚤的急性和慢性毒害效应,但能增强氟虫腈对其急性毒性。土壤温度也是影响农药毒性的因素之一^[55],如毒死蜱和卡巴呋喃在高温(26℃)条件下对蚯蚓的毒性大于低温(20℃)条件。污染对象性质的变化导致毒害效果差异:百菌清、毒死蜱和氟虫腈对雄性尾胸刺水蚤的毒性强于对雌性的毒性^[54];随着浮萍密度的增加,其对烯酰吗啉的敏感度增强,所受毒害程度也增加^[56];随着虹鳟鱼体重增加,对硫丹的抗性也增加^[48]。

2 重金属对环境的污染

近年来,工业“三废”排放量增加,固体废弃物处理不善,农业自身污染加剧,使农田土壤中有毒重金

属含量急剧增加^[57],重金属污染已成为当今污染面最广、危害最大的环境问题之一^[58]。

2.1 重金属对土壤环境的影响

2.1.1 重金属对土壤酶的影响

土壤酶活性的高低不仅反映土壤中生化反应的方向和程度,而且可以作为重金属污染生态效应的指标之一^[59-61]。因此,研究重金属对土壤酶活性的影响具有重要意义。

在重金属影响土壤酶的过程中,重金属和酶的种类差异导致了不同的影响结果。Cu、Cd、Pb、Zn 4 种重金属对土壤中蛋白酶、磷酸酶和脱氢酶的毒性效应顺序为 Cd>Cu>Pb>Zn^[62]。在 Cu 胁迫下,所测定的酶对 Cu 敏感程度大小为磷酸酶>脱氢酶> β -葡萄糖苷酶>脲酶^[63],而脲酶是对 Cd、Zn 胁迫最为敏感的一种^[64]。有研究者认为,土壤酶活性的变化是重金属与土壤理化性质综合作用的结果^[62]。不同土层理化性质存在差异,Hg、Cd 单一污染对 0~20 cm 土壤脲酶和脱氢酶的抑制作用小于对 20~40 cm 相应土壤酶活性^[65]。重金属对土壤酶的影响还受土壤 pH 等环境条件的影响,David F. C.等^[63]认为,土壤 pH 在 Cu 抑制土壤酶活性过程中起重要作用。另外,作物的种植制度也是影响重金属作用土壤酶过程的影响因素之一。Pb 胁迫能抑制脲酶活性,间种或套种条件下,这种抑制效应小于单一种植条件,前者对这一抑制过程起着一定的缓冲作用^[66]。

有关重金属污染抑制土壤酶活性的机理可从 3 个方面解释:(1)可能是其占据土壤酶的活性中心,或与酶分子中的活性部位,如巯基、胺基、羧基和含咪唑的配体等结合,形成了较稳定的络合物,产生了与底物的竞争性抑制作用;(2)由于重金属抑制了土壤微生物的生长和繁殖,减少体内酶的合成和分泌,最终导致了土壤酶活性下降;(3)重金属影响到作物的代谢活力,使根分泌、释放酶的能力受影响^[61,65,67-68]。

2.1.2 重金属对土壤微生物的影响

在重金属污染的土壤中,微生物环境相关指标发生变化,如微生物生物量碳、生物量氮,土壤基础呼吸、微生物代谢商,微生物群落结构等。重金属胁迫能引起微生物生物量碳、氮下降,土壤呼吸增加,微生物代谢商增加^[69-73],这些指标的变化被认为是微生物对逆境的一种反应机理^[74]。Zhang Fu-ping 等^[75]认为 Cu、Zn、Pb 和 Cd 胁迫均能导致微生物量碳、氮的下降及土壤基础呼吸的增加,其原因可能是微生物需要转移更多的能量以供其细胞维持相应的功能作用,进而适

应逆境环境。重金属污染会引起土壤微生物数量或群落结构改变。重金属 Cu 胁迫导致土壤中优势微生物细菌数量的下降,但没有改变整个微生物群落结构^[76]。而滕应等^[77]对铅锌银矿区重金属复合污染土壤的研究,认为重金属复合污染使土壤微生物群落功能下降,影响微生物群落的演变过程,在此环境中,土壤中土著性微生物种群可能会向发酵性微生物种群发展。重金属导致土壤条件的变化可能是使得微生物群落结构发生改变的重要原因之一^[78]。重金属对微生物的影响与微生物种群相关,不同种群的微生物,对重金属的敏感程度不同,如细菌比真菌更易受重金属毒性的影响^[79],而在长期重金属污染的土壤中,非共生固氮菌和异养细菌是属于敏感一类微生物^[78]。

2.2 重金属对植物的影响及毒性机制

2.2.1 重金属对植物的毒害表现

重金属对植物的毒害作用在个体水平上表现为生物量降低,抑制种子萌发,抑制幼苗生长,抑制根系生长,叶片失绿黄化等^[80-87]。采用水培方法,对镉胁迫小麦幼苗生长进行研究,结果表明,幼苗生长受到抑制,且随镉浓度的增加抑制作用加强,株高、分蘖显著受抑制,生物量降低^[83]。同样,玉米受镉胁迫时,也表现出以上特点^[81],但低浓度($10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)及中浓度($10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)镉胁迫对幼苗生长均有较强刺激作用,而高浓度镉($10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)胁迫下幼苗生长几乎停止^[84],镉对玉米幼苗生长表现出了“低促高抑”的特点。林伟等^[85]研究也得到相似的结论,铅在低浓度下对黄瓜幼苗生长产生促进作用,表现为激活效应,而高浓度铅对黄瓜幼苗的生长产生抑制作用,表现为毒害效应。这种现象常被解释为低浓度胁迫的积极刺激作用,这种刺激作用有一定的浓度限制,这也是重金属对植物生长影响的普遍规律。重金属对植物根的毒害主要表现在根长、根数量、根体积、根面积、根系活力等方面。以水稻秀水 63 和秀水 09 为试验材料,采用溶液培养方法,研究不同浓度镉(0.1、5、10、25、50、100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)对水稻幼苗根系形态和部分生理特性的影响。结果表明:1 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉处理对 2 个水稻品种根系生长有一定的促进作用,表现为植株干质量、根系总长度、根系表面积、根体积和根系活力均略有升高。但随着镉浓度(5~100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)增加,表现出一定的抑制效应,与对照相比,秀水 63 和秀水 09 分别在 10 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉处理时的根系干质量、根系总长度、根系表面积、根体积和根系活力明显受到抑制,而根系平均直径、质膜透性均有所增加^[86]。

重金属污染对植物影响在细胞水平上主要表现为细胞膜过氧化,破坏细胞膜的完整性,影响细胞分裂等;在亚细胞水平上表现为破坏细胞器结构,降低叶绿体 PS II 感光系统活性,叶绿素含量下降,降低氧化速率等。重金属对植物细胞膜有严重破坏作用,使得细胞膜透性增加^[86,88-91],产生这种变化与重金属导致膜脂过氧化加剧有重要关系^[58,90]。重金属胁迫会导致植物细胞分裂出现障碍或异常分裂,何俊瑜等^[92]通过研究镉(Cd)对水稻幼苗生长、根尖细胞有丝分裂及染色体畸变的影响证明了这一观点,其结果表明,随着 Cd 浓度增加和处理时间延长,水稻幼苗根的生长及根尖细胞有丝分裂指数明显降低。Cd 使有丝分裂中期细胞所占比例相对增加,前期、后期、末期细胞相对减少。Cd 能诱导染色体产生多种类型的畸变,染色体畸变率随着 Cd 处理浓度的增加和处理时间的延长而升高,呈现明显的剂量-效应和时间-效应关系。在亚细胞水平上,重金属对植物的毒害表现研究较多的是叶绿体、线粒体等细胞器。镉污染对水车前叶细胞超微结构影响的表现主要是:在毒害初期,叶绿体和线粒体膨胀,类囊体明显空泡化;高浓度镉处理使破坏程度加重,叶绿体被膜消失和叶绿体解体;线粒体间质溶解,濒临解体;细胞核染色质凝集并散入细胞质中^[93]。另有报道,镉胁迫最终导致东南景天根分生组织和叶肉细胞超微结构发生显著变化,其中叶肉细胞内叶绿体片层结构发生了改变^[94]。重金属胁迫导致植物叶片失绿黄化,从细胞水平角度研究,主要是因为重金属干扰光合作用,如使叶绿素 a、b 含量及叶绿素 a/b 的比值降低,使光反应系统 SP I 和 PS II 的参数发生改变等。研究 Cd、Pb、Cu、Zn、As 不同重金属单一污染对龙须草生长和生理生化特性影响,结果表明,龙须草叶绿素含量虽然随重金属处理浓度的增加呈现先升后降的趋势,但其总叶绿素含量和叶绿素 a/b 值均低于对照^[95]。Cd 胁迫下五节芒矿区和非矿区两种群 PS II 反应中心最大光化学效率(F_v/F_m)、PS II 潜在活性(F_v/F_o)、PS II 有效光化学效率 F_v'/F_m' 均有所下降,PS II 光化学猝灭系数(qP)、非光化学猝灭系数(NPQ)的变化表现为 Cd 胁迫下两种群 qP 值降低、 NPQ 值升高,总体上抗性强的矿区种群 qP 降幅小且 NPQ 升幅大^[96]。在镉毒害下,小麦叶片光系统 I (PS I)明显受损,气体交换参数和叶绿素荧光参数随着镉浓度的升高而显著下降。

重金属污染对植物分子生物学的影响主要是改变某些酶活性,改变可溶性蛋白的含量,导致 DNA、

RNA 的损伤。锌铜超富集植物滇苦菜碳酸酐酶(CA)活性和二磷酸核酮糖磷酸酶(Rubisco)含量分别在镉浓度为 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大,而在 $0\sim 50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉浓度范围内,CA 的活性与植物茎中镉含量呈正相关关系^[97]。植物体内一定浓度的重金属会在不同程度上损伤 DNA、RNA 等大分子。葛才林等^[98]研究重金属 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 胁迫对水稻和小麦幼苗 DNA 的损伤,结果表明, $0.1\sim 1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Cu^{2+} 及 $0.1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 、 Hg^{2+} 能引起水稻、小麦叶内 DNA 和蛋白质交联,并且这种和 DNA 交联的蛋白质易被胰蛋白酶水解, $0.1\sim 1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Hg^{2+} 及 $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 还能使水稻、小麦叶片内 DNA 链间发生交联。

2.2.2 重金属对植物产生毒害的机制

多数研究者认为,重金属对植物毒害的主要途径是引起植物体内的过氧化胁迫^[58,99],活性氧是这一过程的主要介质。活性氧(active oxygen species, AOS)是植物光合、呼吸、固氮等代谢过程不可避免的产物,重金属能直接或者间接地通过形成 AOS 使植物体内产生氧化胁迫,导致细胞膜脂质的过氧化,蛋白质、色素、酶、核酸等的氧化损伤,乃至植物死亡^[100]。植物对此的应激反应是,由过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)组成的有效活性氧清除系统,通过酶活性的改变来调节体内活性氧自由基的平衡。在一定范围内, SOD 和 CAT 共同作用,能把具潜在危害的 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 转化为无害的 H_2O 和 O_2 , 并且减少具毒性的、高活性的氧化剂羟自由基($\cdot\text{OH}$)的形成,特别是 SOD,可歧化 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 成 H_2O_2 和 H_2O ,一定程度上降低了植物体内自由基的水平,这与植物的抗逆性具有一定的相关性。CAT 和 POD 也是植物体内重要的抗氧化酶,能有效地清除 H_2O_2 。上述 3 者只有协调一致,才能将活性氧自由基控制在较低水平,使细胞免受伤害^[93]。

通常,在重金属胁迫初期,活性氧清除系统的酶活性会有所上升,但当胁迫强度增大后,最终仍会导致自由基净余量不断增加,进而对植物造成危害^[58]。在镉胁迫对萝卜幼苗活性氧产生、制止过氧化和抗氧化酶活性的影响研究中,镉胁迫使萝卜幼苗超氧化物歧化酶(SOD)活性发生改变,随着镉浓度提高,超氧化物歧化酶(SOD)活性首先明显上升,然后逐渐下降,甚至低于对照^[100]。葛才林等^[101]研究了镉、铜、汞胁迫随 3 个不同类型水稻品种幼苗叶片过氧化氢酶(CAT)活性和同工酶表达的影响,结果表明, CAT 活性随 Hg 浓度的增高表现为先下降,再略有升高,然

后明显下降。在水培和土培条件下研究不同浓度镉对胡萝卜和萝卜的影响,结果表明,试验最后过氧化氢酶(CAT),过氧化物酶(POD),多酚氧化酶(PPO),超氧化物歧化酶(SOD)的活性都有所降低^[80]。

除了酶活性的变化与重金属造成生物体内过氧化胁迫有关之外,有研究者认为,重金属对 DNA 的损害很可能与其造成生物体内的过氧化胁迫有关^[98]。

2.3 影响重金属污染毒害的因素

重金属污染程度主要取决于其浓度、形态及有效性等,而土壤类型、土壤理化性质及植物器官等是影响重金属的这些毒害作用的主要因素。

在常规分类中的土壤类型中,重金属在强淋溶土和淋溶土中有较强的移动性,有效性较高^[102]。根据重金属的来源不同可将重金属污染的土壤分为两类:外源重金属污染土壤和内源重金属污染土壤。前者重金属的活性较高,易释放进入周围环境,但释放持续时间较短;后者重金属来自成土母质,主要以残余态形式存在,主要与铝硅酸盐结合,稳定性较高,释放较慢,但持续时间较长。总的来说,外源重金属土壤有更高的环境风险^[103]。土壤中和植物体内重金属含量及浓度与土壤性质有极大的关系, pH、有机质含量、阳离子交换量、氧化还原电位、粘土矿物、土壤质地等在这一影响过程中起着重要的作用。土壤 pH 是决定重金属形态、溶解、迁移及最终的生物有效性的主要因素,有机质保证了土壤保持交换态重金属的能力^[104]。降低 pH 可显著增加重金属的释放量^[103], pH 降低导致植物体内镉积累增加^[105]。研究表明,土壤中 Cr 含量和水稻组织中 Cr 浓度与土壤 pH 呈负相关关系,与土壤有机质含量呈正相关关系^[105]。pH 和有机质对 Cu 有效性的空间分布及有效性 Cu 的浓度有影响^[106]。一般情况,质地粘重的土壤对重金属的吸附能力强,降低了重金属的迁移转化能力^[107],如重金属元素 Cd 的富集系数在砂质潮土和壤质潮土中比在粘质潮土中高^[108]。矿物质也是影响因素之一,铁锰氧化物、粘土矿物,特别是三水铝矿、绿泥石、铁针矿,这些物质含量较高的矿物土壤能在短时期内降低重金属的毒性^[109]。

重金属在植物体内的分布和积累在不同器官组织中存在差异。水稻籽粒中重金属的含量显著低于其他器官(根、茎、叶)^[110-112],对小麦不同部位重金属含量分析显示, Cd、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 6 种重金属在根部的含量最高,根部对重金属元素的富集能力最强^[108]。说明植物种类、植株部位的不同会导致重金属污染的差异性。

3 研究展望

对于农药和重金属这两种重要环境污染物的研究,不少研究者已有较全面、系统的探讨与研究,但仍存在一些问题有待进一步深入。

(1)加强农药对非靶标生物毒害机理的研究。对于农药的环境研究较多的问题之一是其对非靶标生物的影响。在农业生产实际应用中,农药利用率低,作用于靶标生物的比重少,且农药易在土壤-植物-水各界面中迁移转化,影响范围广,危害大。鉴于目前多数研究集中在农药对环境因子的毒害效应研究上,在对非靶标生物毒害机理方面研究较少。若能结合农药对非靶标生物的毒害机理,在农药施用、管理以及研发,包括分子结构方面做相应调整,可为科学管理与施用及减少环境污染提供重要基础。

(2)农药降解中间产物的环境风险有待进一步研究。农药的降解规律、影响其降解的因素是当前研究热点之一。通常,农药降解过程复杂,时间较长,在降解过程中农药结构发生改变,与原化学物质相比,降解的中间产物的毒性可能降低,可能相当或者会更高,但无论如何,都存在潜在的污染风险。今后,对农药降解中间产物的环境风险应予以更多的关注。

(3)农药和重金属的迁移转化机理尚需深入研究。国内外研究者对农药和重金属污染已有较深入的研究,在分子遗传方面探讨机理也有很多研究报道,但仍存在一些机理尚未探明,如污染物质在土壤-植物系统中的迁移转化机理。探明污染物在土壤-植物系统中的迁移转化机理有助于对污染物毒害机理的深入理解以及为污染土壤的生物修复提供依据,因此,农药和重金属的迁移转化机理的深入研究有其现实必要性。

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] Hsu M J, Selvaraj K, Agoramoorthy G. Taiwan's industrial heavy metal pollution threatens terrestrial biota[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143:327-334.
- [7] SONG Bo, LEI Mei, CHEN Tong-bin, et al. Assessing the health risk of heavy metals in vegetables to the general population in Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21:1702-1709.
- [8] ZHOU Jian-Min, DANG Zhi, CAI Mei-Fang, et al. Soil heavy metal pollution around the Dabaoshan Mine, Guangdong Province, China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(5):588-594.
- [9] 王焕校. 污染生态学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002:97-98.
WANG Huan-xiao. Pollution ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002:97-98.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Moses M, Johnson E, Anger K W, et al. Environmental equity and pesticide exposure[J]. *Toxicology and Industrial Health*, 1993, 9:913-959.
- [18] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 1999.
The National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Bei-

- jing:China Statistics Press, 1999.
- [19] Mayanglambam T, Vig K, Singh D K. Quinalphos persistence and leaching under field conditions and effects of residues on dehydrogenase and alkaline phosphomonoesterases activities in soil[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2005, 75:1067-1076.
- [20] Gianfrda L, Rao M A, Piotrowska A, et al. Soil enzyme activities as affected by anthropogenic alterations: Intensive agricultural practices and organic pollution[J]. *Science of Total Environment*, 2005, 341: 265-279.
- [21] 周世萍, 段昌群, 韩青辉, 等. 毒死蜱对土壤蔗糖酶活性的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(5):672-674.
- ZHOU Shi-ping, DUAN Chang-qun, HAN Qing-hui, et al. Effect of chlorpyrifos on soil sucrase activity[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(5):672-674.
- [22] Schaffer A. Pesticide effects on enzyme activities in the soil ecosystem [J]. *Soil Biochemistry*, 1993, 8:273-340.
- [23] Sarfeaz H, Tariq S, Muhammad S, et al. Impact of pesticides on soil microbial diversity, enzymes, and biochemical reactions [J]. *Advance in Agronomy*, 2009, 102:159-200.
- [24] Gianfreda L Rao M A. The influence of pesticides on soil enzymes[J]. *Soil Enzymology Soil Biology*, 2011, 22:293-312.
- [25] 和文祥, 闵红, 王娟, 等. 2, 4-D 对土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1):224-228.
- HE Wen-xiang, MIN Hong, WANG Juan, et al. Impacts of 2, 4-D on soil enzymatic activity [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1):224-228.
- [26] 杨敏, 李岩, 王红斌, 等. 除草剂草甘膦对土壤过氧化氢酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(6):1380-1383.
- YANG Min, LI Yan, WANG Hong-bin, et al. Effects of glyphosate on catalase activities in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(6):1380-1383.
- [27] 郑丽英, 张益良, 杨仁斌, 等. 双草醚对土壤呼吸作用及土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3):1117-1120.
- ZHENG Li-ying, ZHANG Yi-liang, YANG Ren-bin, et al. Effects of herbicide bispyribac-sodium on soil enzyme activities and soil respiration[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):1117-1120.
- [28] 闫颖, 袁星, 樊宏娜. 五种农药对土壤转化酶活性的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5):588-591.
- YAN Ying, YUAN Xing, FAN Hong-na. Influence of five pesticides on invertase activity in soil[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(5):588-591.
- [29] Niemi M R, Heiskanen I, Ahtiainen J H, et al. Microbial toxicity and impacts on soil enzyme activities of pesticides used in potato cultivation[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41:293-304.
- [30] YAO Xiao-hua, MIN Hang, LÜ Zhen-hua, et al. Influence of acetamiprid on soil enzymatic activities and respiration[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42:120-126.
- [31] Gundi V A K B, Viswanath B, Chandra M S, et al. Activities of cellulase and amylase in soils as influenced by insecticide interactions[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 68:278-285.
- [32] 张瑞福, 崔中利, 何健, 等. 甲基对硫磷长期污染对土壤微生物的生态效应[J]. 农村生态环境, 2004, 20(4):1-5.
- ZHANG Rui-fu, CUI Zhong-li, HE Jian, et al. Ecological effects of long-term methylparathion contamination on soil microflora[J]. *Rural Eco-Environment*, 2004, 20(4):1-5.
- [33] Das A C, Mukherjee D. Soil application of insecticides influences microorganisms and plant nutrients[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 14: 55-62.
- [34] 姚斌, 徐建民, 尚鹤, 等. 甲磺隆污染土壤的微生物生态效应[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(3):557-561.
- YAO Bin, XU Jian-min, SHANG He, et al. Ecological effect of met-sulfuron-methyl on microbe[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(3):557-561.
- [35] Widenfalk A, Bertilsson S, Sundh I, et al. Effects of pesticides on community composition and activity of sediment microbes responses at various levels of microbial community organization[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152:576-584.
- [36] Bending G D, Rodriguez-Cruz M S, Lincoln S D. Fungicide impacts on microbial communities in soils with contrasting management histories [J]. *Chemosphere*, 2007, 69:82-88.
- [37] Eisenhauer N, Klier M, Partsch S, et al. No interactive effects of pesticides and plant diversity on soil microbial biomass and respiration[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42:31-36.
- [38] LIN Xiao-yan, ZHAO Yu-hua, FU Qing-lin, et al. Analysis of culturable and unculturable microbial community in bensulfuron-methyl contaminated paddy soils[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20:1494-1500.
- [39] 张战泓, 张松柏, 刘勇, 等. 甲氰菊酯对蔬菜土中微生物数量的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(12):287-289.
- ZHANG Zhan-hong, ZHANG Song-bai, LIU Yong, et al. Effects of fenprothrin on soil microbial populations in a vegetable soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(12):287-289.
- [40] William V Sigler, Ronald F Turco. The impact of chlorothalonil application on soil bacterial and fungal populations as assessed by denaturing gradient gel-electrophoresis[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21: 107-118.
- [41] 李淑梅, 盛东峰, 许俊丽. 苯磺隆除草剂对农田土壤动物影响的研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(6):1369-1371.
- LI Shu-mei, SHENG Dong-feng, XU Jun-li. Effect of Tribenuron-methyl herbicide on soil animal in farmland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(6):1369-1371.
- [42] 孔军苗, 郑荣泉, 顾磊, 等. 乙草胺对中型土壤动物生物多样性影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(3):576-580.
- KONG Jun-miao, ZHENG Rong-quan, GU Lei, et al. Effect of acetochlor on biodiversity of mesofauna community in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(3):576-580.
- [43] 邱咏梅, 郑荣泉, 李灿阳, 等. 百草清除草剂对农田生态系统土壤动物群落结构的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(5):976-980.
- QIU Yong-mei, ZHENG Rong-quan, LI Can-yang, et al. Effects of glyphosate-isopropyl ammonium 41AS herbicide on the community structure of soil mesofauna in agroecosystems[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(5):976-980.
- [44] 胡玲, 林玉锁. 呋喃丹对赤子爱胜蚓体内蛋白含量、SOD 和 TChE 活性的影响[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(13):3165-3167.
- HU Ling, LIN Yu-suo. Effect of carbofuran on protein content and the SOD and TChE activity of the *Eisenia Foetida* earthworm[J]. *Journal Anhui Agricultural Science*, 2006, 34(13):3165-3167.

- [45] 孙 维, 邵托娅, 林玉锁. 两种温度条件下杀虫单对赤子爱胜蚓蛋白含量 SOD 和 AChE 活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5): 1816-1821.
- SUN Wei, TAI Tuo-ya, LIN Yu-suo. Effect of monosultap on protein content, SOD and AChE activity of *Eisenia foetida* under two different temperatures[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5): 1816-1821.
- [46] 袁树忠, 吴进才. 稻田除草剂对水稻生长生理影响的初步研究[J]. 杂草科学, 2002, 4: 12-14.
- YUAN Shu-zhong, WU Jin-cai. Preliminary research on the effect of herbicide on the growth and physiology of paddy rice[J]. *Weed Science*, 2002, 4: 12-14.
- [47] 吴进才, 刘井兰, 沈迎春, 等. 农药对不同水稻品种 SOD 活性的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(4): 451-456.
- WU Jin-cai, LIU Jing-lan, SHEN Ying-chun, et al. Effect of several pesticides on SOD activity in different rice varieties[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(4): 451-456.
- [48] 冯绪猛, 罗时石, 胡建伟, 等. 农药对水稻叶片丙二醛及叶绿素含量的影响[J]. 核农学报, 2003, 17(6): 481-484.
- FENG Xu-meng, LUO Shi-shi, HU Jian-wei, et al. Effect of pesticides on MDA and chlorophyll content rice leaves[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2003, 17(6): 481-484.
- [49] 罗时石, 王泽港, 冯绪猛, 等. 农药对水稻叶片光合产物输出速率影响的示踪动力学研究 [J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1085-1089.
- LUO Shi-shi, WANG Ze-gang, FENG Xu-meng, et al. Study on tracer dynamics of effects of pesticides on export rate of photosynthate of rice leaves[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1085-1089.
- [50] 唐正义, 胡 蓉, 卿东红, 等. 3 种农药诱发蚕豆根尖细胞微核试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(6): 788-792.
- TANG Zheng-yi, HU Rong, QING Dong-hong, et al. Experimental study on micronucleus in root-tip cells of *Vicia faba* induced by three pesticides[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2006, 41(6): 788-792.
- [51] 陆贻通, 朱 江, 周 培. 影响土壤中农药结合残留的因素及其环境效应[J]. 科技通报, 2005, 21(3): 287-301.
- LU Yi-tong, ZHU Jiang, ZHOU Pei. Factors of influence on the bound residue of pesticides in soil and its environmental impact[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2005, 21(3): 287-301.
- [52] Capkin E, Altinok I, Karahan S. Water quality and fish size affect toxicity of endosulfan, an organochlorine pesticide, to rainbow trout [J]. *Chemosphere*, 2006, 64: 1793-1800.
- [53] 陈中云, 阎 航, 吴伟祥, 等. 农药污染对水稻田土壤反硝化细菌种群数量及其活性的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1765-1769.
- CHEN Zhong-yun, HE Hang, WU Wei-xiang, et al. Effects of pesticide-contamination on population size and denitrification activity of denitrifying bacteria in paddy soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1765-1769.
- [54] Adriana C Bejarano, Thomas Chandler G, Alan W Decho. Influence of natural dissolved organic matter (DOM) on acute and chronic toxicity of the pesticides chlorothalonil, chlorpyrifos and fipronil on the meiobenthic estuarine copepod *Amphiascus tenuiremis*[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, 321: 43-57.
- [55] P Mangala C S De Silva, Asoka Pathiratne, Cornelis A M van Gestel. Influence of temperature and soil type on the toxicity of three pesticides to *Eisenia andrei*[J]. *Chemosphere*, 2009, 76: 1410-1415.
- [56] Rachel Dosnon-Olette, Michel Couderchet, Achouak El Arfaoui, et al. Influence of initial pesticide concentrations and plant population density on dimethomorph toxicity and removal by two duckweed species[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408: 2254-2259.
- [57] 程旺大, 姚海根, 张国平, 等. 镉胁迫对水稻生长和营养代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(3): 528-537.
- CHENG Wang-da, YAO Hai-gen, ZHANG Guo-ping, et al. Effect of cadmium on growth and nutrition metabolism in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(3): 528-537.
- [58] 吴 顺, 黄 杰, 罗光宇. 铅胁迫对小白菜幼苗生长的影响及不同品种耐铅差异研究[J]. 种子, 2009, 28(12): 13-15.
- WU Shun, HUANG Jie, LUO Guang-yu. Studies on the effects of lead on growth of *Brassica chinensis* seed lings and lead-tolerance differences of different varieties[J]. *Seed*, 2009, 28(12): 13-15.
- [59] 罗 虹, 刘 鹏, 宋小敏. 重金属镉、铜、镍复合污染对土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 94-96, 121.
- LUO Hong, LIU Peng, SONG Xiao-min. Effect of compound pollution of Cd, Cu and Ni on soil enzyme activities[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 94-96, 121.
- [60] 黄 峥, 闵 航, 吕镇梅, 等. 铜离子与铜镉离子复合污染对稻田土壤酶活性的影响研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(5): 557-562.
- HUANG Zheng, MIN Hang, LÜ Zhen-mei, et al. Study on the effects of mono-contamination of Cu^{2+} and associated-contamination of Cu^{2+} and Cd^{2+} on enzyme activities in flooded paddy soil[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci)*, 2006, 32(5): 557-562.
- [61] 林立金, 朱雪梅, 邵继荣, 等. 锌铬复合污染对水稻不同生育期土壤酶活性的影响[J]. 核农学报, 2007, 21(6): 623-629.
- LIN Li-jin, ZHU Xue-mei, SHAO Ji-rong, et al. Effects of compound pollution of zinc and chromium on soil enzyme activity at different growth stages of rice plant[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2007, 21(6): 623-629.
- [62] 王 涵, 高树芳, 罗 丹, 等. Cd Pb 污染土壤中蛋白酶酸性磷酸酶脱氢酶活性的变化[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 500-505.
- WANG Han, GAO Shu-fang, LUO Dan, et al. Changes of protease, acid phosphomonoesterase and dehydrogenase activities in Cd-Pb polluted agricultural soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3): 500-505.
- [63] David Fernández-Calviño, Pedro Soler-Rovira, Alfredo Polo, et al. Enzyme activities in vineyard soils long-term treated with copper-based fungicides[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42: 2119-2127.
- [64] YANG Zhi-xin, LIU Shu-qing, ZHENG Da-wei, et al. Effects of cadmium, zinc and lead on soil enzyme activities[J]. *Journal of Environmental Science*, 2006, 18(6): 1135-1141.
- [65] 卢显芝, 金建华, 郝建朝, 等. 不同土层土壤酶活性对重金属汞和镉胁迫的响应[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1844-1848.
- LU Xian-zhi, JIN Jian-hua, HAO Jian-chao, et al. Responses of soil enzyme activities in different soil layers to single and combined stress of Hg and Cd[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1844-1848.
- [66] YANG Ru-yi, TANG Jian-jun, CHEN Xin, et al. Effects of coexisting

- plant species on soil microbes and soil enzymes in metal lead contaminated soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 37:240-246.
- [67] 和文祥, 黄英锋, 朱铭我, 等. 汞和镉对土壤脲酶活性影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(3):412-420.
- HE Wen-xiang, HUANG Ying-feng, ZHU Ming-e, et al. Effect of Hg and Cd on soil urease activity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3):412-420.
- [68] Shi W, Becker J, Bischoff M, et al. Association of microbial community composition and activity with lead, chromium, and hydrocarbon contamination[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, 68(8):3859-3866.
- [69] 张玲, 叶正钱, 李廷强, 等. 铅锌矿区污染土壤微生物活性研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3):136-140.
- ZHANG Ling, YE Zheng-qian, LI Ting-qiang, et al. Studies on soil microbial activity in areas contaminated by tailings from Pb, Zn mine[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3):136-140.
- [70] WANG Yuan-peng, SHI Ji-yan, LIN Qi, et al. Heavy metal availability and impact on activity of soil microorganisms along a Cu/Zn contamination gradient[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19:848-853.
- [71] KAO Po-hsu, HUANG Cheng-chieh, HSEU Zeng-yei. Response of microbial activities to heavy metals in a neutral loamy soil treated with biosolid[J]. *Chemosphere*, 2006, 64:63-70.
- [72] ZHANG Yan, ZHANG Hui-wen, SU Zhen-cheng, et al. Soil microbial characteristics under long-term heavy metal stress: A case study in Zhangshi wastewater irrigation area, Shenyang[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(1):1-10.
- [73] WANG Yuan-peng, SHI Ji-yan, WANG Hui, et al. The influence of soil heavy metals pollution on soil microbial biomass, enzyme activity, and community composition near a copper smelter[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 67:75-81.
- [74] 王秀丽, 徐建民, 谢正苗, 等. 重金属铜和锌污染对土壤环境质量生物学指标的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, 28(2):190-194.
- WANG Xiu-li, XU Jian-min, XIE Zheng-miao, et al. Effects of Cu and Zn contamination on soil biological indicators of environmental quality[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural University(Agric & Life Sci)*, 2002, 28(2):190-194.
- [75] ZHANG Fu-ping, LI Cheng-fang, TONG Le-ga, et al. Response of microbial characteristics to heavy metal pollution of mining soils in central Tibet, China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 45:144-151.
- [76] GUO Zhao-hui, Mallavarapu Megharaj, Michael Beer, et al. Heavy metal impact on bacterial biomass based on DNA analyses and uptake by wild plants in the abandoned copper mine soils[J]. *Bioresour Technology*, 2009, 100:3831-3836.
- [77] 滕应, 黄昌勇, 骆永明, 等. 重金属复合污染下土壤微生物群落功能多样性动力学特征[J]. 土壤学报, 2004, 41(5):735-741.
- TENG Ying, HUANG Chang-yong, LUO Yong-ming, et al. Kinetic characteristics for functional diversity of microbial communities in soils polluted with mixed heavy metals[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5):735-741.
- [78] Adília Oliveira, Maria Elisa Pampulha. Effects of long-term heavy metal contamination on soil microbial characteristics[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2006, 102(3):157-161.
- [79] WANG Fei, YAO Jun, SI Yang, et al. Short-time effect of heavy metals upon microbial community activity[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173:510-516.
- [80] CHEN Y X, HE Y F, LUO Y M, et al. Physiological mechanism of plant roots exposed to cadmium[J]. *Chemosphere*, 2003, 50:789-793.
- [81] 汪洪, 赵士诚, 夏文建, 等. 不同浓度镉胁迫对玉米幼苗光合作用、脂质过氧化和抗氧化酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1):36-42.
- WANG Hong, ZHAO Shi-cheng, XIA Wen-jian, et al. Effect of cadmium stress on photosynthesis, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in maize(*Zea mays* L.) seedlings[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(1):36-42.
- [82] 程杰, 高压军. 镉毒害对小麦生理生态效应的研究进展[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6):218-221.
- CHENG Jie, GAO Ya-jun. Progress in studies on cadmium toxicity to physiology and ecology effect of wheat[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(6):218-221.
- [83] 李子芳, 刘惠芬, 熊肖霞, 等. 镉胁迫对小麦种子萌发幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊):17-20.
- LI Zi-fang, LIU Hui-fen, XIONG Xiao-xia, et al. Effect of cadmium on seed germination, seedling development and physiological and biochemical characteristics of wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(suppl):17-20.
- [84] 黄辉, 李升, 郭娇丽. 镉胁迫对玉米幼苗抗氧化系统及光合作用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2):211-215.
- HUANG Hui, LI Sheng, GUO Jiao-li. The influence of cadmium(Cd) to the antioxidant system and photosynthesis of seedling of *Zea mays* L. [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2):211-215.
- [85] 林伟, 周娜娜, 王刚, 等. 铅胁迫下黄瓜幼苗期叶片内源激素的变化[J]. 生态环境, 2007, 16(5):1446-1448.
- LIN Wei, ZHOU Na-na, WANG Gang, et al. Effect of lead pollution on the content of endogenous hormones in cucumber leaves[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(5):1446-1448.
- [86] 何俊瑜, 王阳阳, 任艳芳, 等. 镉胁迫对不同水稻品种幼苗根系形态和生理特性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5):1863-1868.
- HE Jun-yu, WANG Yang-yang, REN Yan-fang, et al. Effect of cadmium on root morphology and physiological characteristics of rice seedlings[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5):1863-1868.
- [87] 王阳阳, 任艳芳, 周国强, 等. 镉胁迫对不同抗性水稻品种幼苗生长和生理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24):450-454.
- WANG Yang-yang, REN Yan-fang, ZHOU Guo-qiang, et al. Effect of cadmium stress on seedlings growth and physiological characteristics in different rice cultivars[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(24):450-454.
- [88] 曹莹, 李建东, 赵天宏, 等. 镉胁迫对玉米生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊):8-11.
- CAO Ying, LI Jian-dong, ZHAO Tian-hong, et al. Effects of Cd stress on physiological and biochemical traits of maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(suppl):8-11.
- [89] 陈平, 余土元, 叶丽敏. 镉胁迫对弯叶画眉草幼苗生长和生理特性的影响[J]. 草地学报, 2002, 10(3):212-215.
- CHEN Ping, YU Tu-yuan, YE Li-min. Effects of Cd stress on growth and some physiological characteristics of weeping lovegrass seedlings

- [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2002, 10(3):212-215.
- [90] 张金彪, 黄维南. 镉对植物的生理生态效应的研究进展 [J]. 生态学报, 2000, 20(3):514-521.
- ZHANG Jin-biao, HUANG Wei-nan. Advances on physiological and ecological effects of cadmium on plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3):514-521.
- [91] 翟福勤, 汪晓丽, 华佳敏, 等. 铜对小麦幼苗的毒害和钙的解毒作用[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):694-698.
- ZHAI Fu-qin, WANG Xiao-li, HUA Jia-min, et al. Copper toxicity on seedlings of wheat and the detoxification of calcium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):694-698.
- [92] 何俊瑜, 任艳芳, 严玉萍, 等. 镉胁迫对水稻幼苗生长和根尖细胞分裂的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1):138-144.
- HE Jun-yu, REN Yan-fang, YAN Yu-ping, et al. Impacts of cadmium stress on the growth of rice seedlings and division of their root tip cells [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1):138-144.
- [93] 徐勤松, 施国新, 杜开和. 镉胁迫对水车前叶片抗氧化酶系统和亚显微结构的影响[J]. 农村生态环境, 2001, 17(2):30-34.
- XU Qin-song, SHI Guo-xin, DU Kai-he. Effect of Cd²⁺ on antioxidase system and ultrastructure of *Ottelia alismoides* (L.) Pers. Leaves[J]. *Rural Eco-Environment*, 2001, 17(2):30-34.
- [94] JIN Xiao-fen, YANG Xiao-e, Ejazul Islam, et al. Effects of cadmium on ultrastructure and antioxidative defense system in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 156:387-397.
- [95] 铁柏清, 袁 敏, 唐美珍, 等. 重金属单一污染对龙须草生长与生理生化特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2):99-103.
- TIE Bo-qing, YUAN Min, TANG Mei-zhen, et al. Effects of single heavy metal pollution on the growth and physiological and biochemical characteristics of *Eulaliopsis binata*[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(2):99-103.
- [96] 秦建桥, 夏北成, 赵 鹏. 五节芒不同种群对 Cd 污染胁迫的光合生理响应[J]. 生态学报, 2010, 30(2):288-299.
- QIN Jian-qiao, XIA Bei-cheng, ZHAO Peng. Photosynthetic physiological response of two *Miscanthus floridulus* populations to Cd stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2):288-299.
- [97] YING Rong-rong, QIU Rong-liang, TANG Ye-tao, et al. Cadmium tolerance of carbon assimilation enzymes and chloroplast in Zn/Cd hyper-accumulator *Picris divaricata*[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2010, 167:81-87.
- [98] 葛才林, 杨小勇, 孙锦荷, 等. 重金属胁迫引起的水稻和小麦幼苗 DNA 损伤[J]. 植物生理与分子生物学报, 2002, 28(6):419-424.
- GE Cai-lin, YANG Xiao-yong, SUN Jin-he, et al. DNA damage caused by heavy metal stress in rice and wheat seedlings [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2002, 28(6):419-424.
- [99] 葛才林, 杨小勇, 金 阳, 等. 重金属胁迫对水稻不同品种超氧化物歧化酶的影响[J]. 核农学报, 2003, 17(4):286-291.
- GE Cai-lin, YANG Xiao-yong, JIN Yang, et al. Effects of chlorobenzene on the antioxidant enzymes activities in wheat[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2003, 17(4):286-291.
- [100] 汤春芳, 刘云国, 曾光明, 等. 镉胁迫对萝卜幼苗活性氧产生、脂质过氧化和抗氧化酶活性的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2004, 30(4):468-474.
- TANG Chun-fang, LIU Yun-guo, ZENG Guang-ming, et al. Effects of cadmium stress on active oxygen generation, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in radish seedlings[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2004, 30(4):468-474.
- [101] 葛才林, 杨小勇, 朱红霞, 等. 重金属胁迫对水稻叶片过氧化氢酶活性和同功酶表达的影响[J]. 核农学报, 2002, 16(4):197-202.
- GE Cai-lin, YANG Xiao-yong, ZHU Hong-xia, et al. Effect of heavy metal stress on the catalase activity and expression of isozymes in the leaves of rice seedling[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2002, 16(4):197-202.
- [102] ZHAO Ke-li, LIU Xing-mei, XU Jian-ming, et al. Heavy metal contaminations in a soil-rice system: Identification of spatial dependence in relation to soil properties of paddy fields[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181:778-787.
- [103] 王丽平, 章明奎. 不同来源重金属污染土壤中重金属的释放行为 [J]. 环境科学研究, 2007, 20(4):134-138.
- WANG Li-ping, ZHANG Ming-kui. Release behaviors of heavy metals from polluted soils with heavy metals of different sources[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(4):134-138.
- [104] ZENG Fan-rong, Shafaqat Ali, ZHANG Hai-tao, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159:84-91.
- [105] Kirkham M B. Cadmium in plants on polluted soil: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments [J]. *Geoderma*, 2006, 137:19-32.
- [106] WU Chun-fa, LUO Yong-ming, ZHANG Li-min. Variability of copper availability in paddy fields in relation to selected soil properties in southeast China[J]. *Geoderma*, 2010, 156:200-206.
- [107] 宋书巧, 吴 欢, 黄胜勇. 重金属在土壤-农作物系统中的迁移转化规律研究[J]. 广西师院学报(自然科学版), 1999, 16(4):87-92.
- SONG Shu-qiao, WU Huan, HUANG Sheng-yong. The research of regulation of transport and transformation of heavy metal in the soil-crop system[J]. *Journal of Guangxi Teachers College (Natural Science Edition)*, 1999, 16(4):87-92.
- [108] 王祖伟, 李宗梅, 王景刚, 等. 天津污灌区土壤重金属含量与理化性质对小麦吸收重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4):1406-1410.
- WANG Zu-wei, LI Zong-mei, WANG Jing-gang, et al. Absorption to heavy metals by wheat and influencing features in sewage-irrigated soil in Tianjin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1406-1410.
- [109] Vega F A, Covelo E F, Andrade M L, et al. Relationships between heavy metals content and soil properties in minesoils [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, 524:141-150.
- [110] Kashem M A, Singh B R. Metal availability in contaminated soils: II. Uptake of Cd, Ni and Zn in rice plants grown under flooded culture with organic matter addition[J]. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 2001, 61:257-266.
- [111] LIU Hong-yu, Probst A, LIAO Bo-han. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China)[J]. *Science of The Total Environment*, 2005, 339:153-166.
- [112] Liu W X, Shen L F, Liu J W, et al. Uptake of toxic heavy metals by rice (*Oryza sativa* L.) cultivated in the agricultural soil near Zhengzhou City, People's Republic of China[J]. *Bulletin of Environment Contamination and Toxicology*, 2007, 79(2):209-213.