

doi:10.11937/bfyy.20164732

# 土壤酶对环境污染响应的研究进展

崔小维, 宋雪英, 李嘉康, 李玉双

(沈阳大学 区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110044)

**摘要:**随着社会经济的快速发展,污染物种类和数量不断增加,土壤污染作为环境污染的一个重要组成部分,其污染问题日益突出,生态系统安全受到巨大的威胁。土壤酶是土壤的重要组成部分,具有稳定性,同时对污染物的响应也比较灵敏,因此,土壤酶作为土壤生态毒理学评价的重要指标之一,其活性变化可以指示土壤生态系统的健康状况。该文在总结了国内外现有文献的基础上,开展了土壤酶对重金属、石油烃类污染物、邻苯二甲酸酯类污染物、农药的指示作用的综合分析和论述,以期土壤酶在土壤生态毒理学中的广泛应用提供参考依据。

**关键词:**土壤酶;环境污染物;响应;生态毒理学评价

**中图分类号:**X 53 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2017)15-0168-06

土壤是人类赖以生存的基础,它为人类提供食物等不可或缺的物质资源。土壤中时刻进行着复杂的生化反应,这些生化反应使得土壤具有自我净化能力和可供植物生长的肥力,从而保持土壤环境的稳定,并为植物、土壤动物和微生物提供良好的生存空间,形成稳定的土壤生态系统。土壤中的生化反应都是通过土壤酶进行的,土壤酶的活性可以反映土壤生化反应的强度与方向。因此,土壤酶活性常作为土壤生态毒理学评价的重要指标之一,被用来判断污染物对生物的潜在毒性。

按照功能划分土壤酶包括水解酶(如蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶、脲酶、蛋白酶、磷酸酶等)、氧化还原酶(如脱氢酶、酚氧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶、硝酸盐还原酶等)、转移酶(如转氨酶、果聚糖蔗糖酶、转糖苷酶等)、裂合酶(如谷氨酸脱羧酶等)<sup>[1]</sup>。其大部分都是蛋白质,因此,随着土壤环境中污染物质的加入,酶的活性就会受到影响,可能被激活也可能被抑制。随着工农业的高速发展,越来越多的环境污染物进入土壤环境,如重金属、石油烃类污染物、塑化剂、农药等,这些化学物质对土壤酶活性造成影响。目前已有相当数量的文献研究了以上化学物质对土壤酶活性的影响,然而相应的综述类文献却不多。为此,该文就土壤酶对环境污染物的响应和指示作用进行了综合论述,以期土壤酶在土壤生态毒理学中的广泛应用提供参考依据。

## 1 土壤酶对重金属的响应

研究表明,重金属对土壤酶的活性主要表现为抑制作用,原因可能有 2 个方面:一是重金属与酶的活性部位配位结合,从而与底物产生竞争<sup>[2]</sup>;二是重金属通过抑制微生物的活性间接抑制酶的合成。GAO 等<sup>[3]</sup>研究发现,在 Cd 和 Pb 联合污

**第一作者简介:**崔小维(1991-),女,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为环境化学与生态毒理学。E-mail:1126318008@qq.com.

**责任作者:**宋雪英(1978-),女,黑龙江佳木斯人,博士,副教授,现主要从事土壤生态毒理学与污染环境修复技术等研究工作。E-mail:songxy2046@163.com.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(21377139, 21307084);沈阳市顶层设计资助项目(F14-133-9-00);辽宁省教育厅高校杰出青年学者成长计划资助项目(LJQ2013121)。

**收稿日期:**2017-02-17

染的情况下,磷酸酶、脲酶、脱氢酶活性都被显著降低,且在培养的 35 d 中酶活性没有恢复的迹象。ANGELOVIČOVÁ等<sup>[4]</sup>研究表明在 Cu、Pb、Zn、Hg 联合污染下,脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性都受到抑制,且随着重金属浓度的上升酶活性显著下降。CIARKOWSKA等<sup>[5]</sup>在 Zn 和 Pb 的采矿和加工地进行试验,以研究在矿场土壤的恢复过程中土壤酶活性的变化,发现脲酶和转化酶的活性被轻微地抑制了。而被污染的土样中酶活性竟然比未被污染但过度生长的森林中土样的酶活性更高,可能的原因有 2 个:一是在重金属污染后相当长的一段时间里,土壤微生物变得更加多样化,且受到重金属胁迫后最终生存下来的微生物具有了对重金属的抗性,提高了对重金属的耐受性<sup>[6]</sup>;二是土壤中含有大量的有机质且土壤趋于中性,使得重金属的生物有效性降低、毒性减弱。

某些金属对土壤酶有激活作用,如 Pb 对磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶表现为低浓度激活,高浓度抑制<sup>[7]</sup>。而季铁群等<sup>[8]</sup>研究 Cu、Zn、Pb 对紫色土壤酶活性的影响时却发现 Pb 对过氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶显示出明显的激活效应。这可能是因为不同的土壤中微生物种类有所不同,因而对污染物的响应也存在差异<sup>[9]</sup>。Ni 对于土壤酶的影响也以激活居多,但激活并不显著<sup>[10]</sup>。

实际生产中,在矿井附近的重金属污染均为多种重金属复合污染,以 Cu、Zn、Pb、Cd 复合为主。随着复合污染浓度的增加,土壤酶活性总体呈现下降的趋势,表现为随着距井口距离的加大,酶活性逐渐升高,在井口表现出显著抑制<sup>[11-12]</sup>。但是郭星亮等<sup>[13]</sup>研究表明,在某煤矿矿区,随着污染程度的增加,蔗糖酶和纤维素酶在中等污染程度以下的土壤中表现为激活效应,在重度污染的土壤中表现为抑制效应,可能是因为土壤酶对中等浓度的毒性微生物还可以承受,但为了存活需要更多的能量而释放了大量的蔗糖酶和纤维素酶。也可能是因为中等污染浓度正好处于对酶活性的激活效应范围之内,导致了二者活性的提高<sup>[14]</sup>。

## 2 土壤酶对石油烃类污染物的响应

随着石油开采、冶炼及石油产品的广泛使用,

土壤石油污染已成为世界范围的环境问题。石油烃类包括正烷烃、支链烷烃、环烷烃和芳香烃 4 种,石油烃的污染可以激活过氧化氢酶、多酚氧化酶和脱氢酶活性<sup>[15-20]</sup>。这 3 种酶均属于氧化还原酶,当烃类物质在土壤中进行降解时它们是重要的降解酶,因此这 3 种酶能够被激活<sup>[21-22]</sup>。另外,由于石油污染,被污染的土和水中含有大量的多环芳烃和多酚类物质,这些物质可以作为多酚氧化酶的基质,从而使得石油污染土壤中多酚氧化酶被激活<sup>[19]</sup>;多酚氧化酶也是土壤微生物抵抗降解有害有机物的物质,这也使得多酚氧化酶被激活<sup>[23]</sup>。磷酸酶对石油烃的响应存在分歧。吴建雄<sup>[24]</sup>认为石油污染使碱性磷酸酶活性提高,朱凡等<sup>[15]</sup>研究表明多环芳烃能够激活磷酸酶;吕桂芬等<sup>[25]</sup>发现磷酸酶活性与土壤中含油量呈显著负相关。这可能是因为磷酸酶与土壤中有效磷的含量密切相关<sup>[24]</sup>,也可能是因为土壤中与磷循环相关的微生物数量发生变化存在差异<sup>[26]</sup>。石油烃抑制脲酶和蔗糖酶的活性,王梅等<sup>[27]</sup>、吴建雄<sup>[24]</sup>等都有相似的结论。ANDREONI 等<sup>[28]</sup>发现烃类物质能够覆盖在有机物、被矿化后的物质及细胞表面,从而使得酶活性受到抑制。但随着土壤培养时间的延长,这种抑制效应会消失<sup>[26]</sup>。

土壤酶对石油烃的响应与污染物的种类和浓度有关<sup>[29]</sup>。WU 等<sup>[30]</sup>研究发现,原油对脲酶活性无明显影响,柴油在低浓度时对脲酶无明显影响,在高浓度时使酶活下降,正十六烷无论低浓度还是高浓度都对脲酶有激活效应;柴油在低浓度时使脱氢酶活性上升,高浓度时却抑制脱氢酶活性。DINDAR 等<sup>[26]</sup>研究了土壤酶活性在石油烃污染土壤中的变化,结果表明被废机油和原油污染的土壤中的酶活性整体上高于对照组。试验中被污染土壤中石油烃浓度较低,毒性较弱。酶活性被激活可能是因为污染物作为酶的基质,也可能是低浓度的石油烃充当了碳源和能源而使微生物活性提高,进而使酶活性提高<sup>[31]</sup>。

石油烃对土壤酶活性的抑制只是暂时性的,经过一段时间之后,被抑制的酶活性可能还会增强,甚至使酶活性得到激活。如潘声旺<sup>[32]</sup>研究发现,受多环芳烃污染之后,土壤酶的活性在试验的早期受到抑制,但在第 24 天酶活性就比第 12 天测得的高,之后酶活性逐渐恢复,在试验后期,酶

活性普遍高于对照组。这与葛高飞等<sup>[17]</sup>的研究结果一致。BARAN等<sup>[33]</sup>曾报道细菌、真菌、放线菌等在受到污染物影响之后,先经历一段胁迫期,但在胁迫期之后,微生物的呼吸强度会加强,酶活性会提高,微生物数量会增长,污染物也会逐渐被降解。这是因为微生物易变异,当微生物适应了污染之后,加之污染物的降解毒性降低,微生物可以利用石油烃类污染物充当碳源和能源,从而使微生物活性增强,酶活性增强。

### 3 土壤酶对邻苯二甲酸酯类污染物的响应

邻苯二甲酸酯(phthalatic acid esters, PAEs)又称酞酸酯,作为最主要的增塑剂广泛用于塑料、油漆、化妆品等行业的生产。有研究发现 PAEs 的降解过程中会产生邻苯二甲酸、醇、酮、双酚、有机酸、CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 等多种化合物<sup>[34]</sup>,因此,PAEs 作为底物刺激多酚氧化酶,使多酚氧化酶活性被激活。王志刚等<sup>[35]</sup>研究表明,多酚氧化酶活性会随 PAEs 胁迫时间的延长先被激活,10 d 之后被抑制,且低浓度 PAEs 污染比高浓度污染的激活效应更加明显,这可能是因为低浓度的 PAEs 毒性不高所致<sup>[36]</sup>。该研究认为,在污染过程中,PAEs 的毒性和底物作用同时影响着多酚氧化酶,在 PAEs 浓度较低时,底物作用强于毒性作用,酶活性被激活;当浓度更高时,底物作用与毒性作用相当,对酶活性的影响不明显;染毒时间稍长时,毒性作用强于底物作用,酶活被抑制。吴雪峰<sup>[37]</sup>研究发现,浓度为 20 mg · kg<sup>-1</sup> 的 DEHP 处理土壤对多酚氧化酶起激活作用,培养初期,中高浓度处理对酶活性无影响,但一段时间之后,酶活性开始受到抑制,且 DEHP 浓度越高,酶活性下降幅度越大,至培养末期酶活性有所上升但仍低于对照。

KURANE 等<sup>[34]</sup>研究发现,PAEs 降解产生的双酚化合物很可能会抑制脲酶活性,因此 PAEs 污染会降低脲酶的活性,但在多酚氧化酶活性被激活时对脲酶活性的抑制作用会减弱,即在染毒的初期和 PAEs 浓度较低时脲酶活性可能被激活。吴雪峰<sup>[37]</sup>发现 DEHP 的低浓度污染对脲酶活性影响不大,在 25 mg · kg<sup>-1</sup> 的污染处理中脲酶活性被微弱地激活,随着浓度升

高至 50 mg · kg<sup>-1</sup> 时 DEHP 对脲酶活性的影响又变为抑制作用。王鑫宏<sup>[38]</sup>发现在 DBP 浓度为 10 mg · kg<sup>-1</sup> 时脲酶被微弱地激活,而在 50、100、500、1 000 mg · kg<sup>-1</sup> 处理中 DBP 对脲酶活性均表现为抑制。然而,张建等<sup>[39]</sup>研究发现,PAEs 污染在试验的中后期会使脲酶活性被激活,具体原因有待进一步研究。

过氧化氢酶对 PAEs 污染的响应一般是低浓度促进高浓度抑制。过氧化氢酶能酶促过氧化氢分解,避免对生物体的氧化毒害<sup>[16]</sup>,因此,在对污染物耐受范围之内,微生物会发生应激反应,分泌大量过氧化氢酶以维持正常的生理代谢<sup>[40]</sup>。随着染毒浓度的加大毒性加强,酶的结构遭到破坏,微生物量下降,酶活性受抑制<sup>[31]</sup>。王玉荣等<sup>[41]</sup>研究表明当 DEHP 浓度小于 100 mg · kg<sup>-1</sup> 时,对过氧化氢酶表现为激活效应,当大于 100 mg · kg<sup>-1</sup> 时抑制酶活性。但 WANG 等<sup>[42]</sup>发现过氧化氢酶活性会被 DBP、DEHP 激活。戴伟等<sup>[43]</sup>认为过氧化氢酶与土壤中全氮含量和有机质含量呈显著正相关。LYU 等<sup>[44]</sup>也认为过氧化氢酶与土壤中有机质的含量有关。所以过氧化氢酶被激活可能是因为 PAEs 使得土壤中有机质含量增加<sup>[42]</sup>。过氧化氢酶是一种广泛存在于好氧菌和兼性菌的胞内酶,不存在专性厌氧菌内。有研究表明过氧化氢酶活性与土壤中好氧微生物的活性有关<sup>[45]</sup>,而 PAEs 的生物降解以好氧降解为主<sup>[46]</sup>,好氧微生物发挥着巨大的作用<sup>[47]</sup>,因此过氧化氢酶能够被激活。土壤脱氢酶对 PAEs 的响应与过氧化氢酶相似,低浓度促进,高浓度抑制,但促进作用不明显<sup>[48-49]</sup>。脱氢酶是胞内酶,只有在活的细胞内才有活性,高浓度 PAEs 能够破坏微生物细胞,使得酶活性下降<sup>[48]</sup>。

PAEs 对转化酶的影响以抑制为主<sup>[37-38,41,49-50]</sup>。转化酶是大多数微生物所固有的,因此转化酶活性与微生物数量有密切联系,PAEs 的加入使得土壤微生物环境产生变化或直接超出了微生物的承受范围,使得微生物数量降低进而使转化酶被抑制<sup>[51]</sup>。土壤磷酸酶活性与土壤有效磷含量有关<sup>[24]</sup>,不同土壤样品的酶活性变化情况不一。王鑫宏<sup>[38]</sup>、苗静等<sup>[50]</sup>认为磷酸酶活性被激活,王志刚等<sup>[35]</sup>、吴雪峰<sup>[37]</sup>认为酶活性被抑制。

#### 4 土壤酶对农药的响应

随着农业的不断发展,施加农药成为农业生产中必不可少的一个环节,这就使得农药不断地进入土壤。据统计,施入农田的农药有70%进入土壤<sup>[52]</sup>,因此,农药对土壤酶的影响变得不可忽视。农药对土壤微生物及酶活性的影响,已成为一些国家评价农药生态安全的一个重要指标<sup>[53]</sup>。

目前,关于土壤酶对农药的响应,国内外学者已经做了很多的研究,发现土壤酶对农药的响应受多种因素影响,如酶的种类、农药的种类、农药的用量、土壤的类型、土壤中有机质含量等<sup>[54]</sup>。谢慧等<sup>[55]</sup>研究发现杀虫剂吡虫啉对脲酶以及酸性磷酸酶和碱性磷酸酶表现为抑制作用,却能使脱氢酶活性得到激活。同一种农药对不同土壤酶作用机制存在差异,可能是某种酶的最适底物,也可能是另一种酶的天然抑制剂<sup>[56]</sup>。同一种酶对不同的农药响应不同,如碱性磷酸酶。严岩等<sup>[57]</sup>研究表明除草剂苄嘧磺隆能使之被激活,而杨春璐等<sup>[58]</sup>认为除草剂豆磺隆能够使之被抑制。农药的用量也会对土壤酶活性产生一定影响。江帆等<sup>[59]</sup>发现杀菌剂啶酰菌胺在低浓度时对脲酶活性有促进作用,且脲酶活性能随着时间的延长,农药对其作用的减弱而恢复到正常水平;但高浓度作用下却抑制了脲酶的活性,且在培养期内抑制作用难以消除。土壤中有机质含量的多少对土壤酶活性也有影响。土壤中的酶有游离态和吸附态2种,但吸附态的酶占绝大多数。土壤酶能够吸附在有机质和粘粒上,并受到土壤成分的保护,土壤有机质较高则吸附固定酶的能力和数量也较高;而且有机质含量高,土壤中微生物就更活跃,数量更多,其分泌的酶也更多,所以,有机质含量高的土壤酶活性更高,土壤对酶活性的保护作用也更强,肥力水平高的土壤要与肥力水平低的土壤达到相同的抑制效果,则需要农药的量要更高,浓度更大<sup>[60]</sup>。

#### 5 结论与展望

土壤酶因其具有稳定性和对环境污染物的灵敏性,可以有效地指示环境污染物对土壤生态系统的潜在威胁。不同污染物的化学结构和代谢特

征不同,土壤酶对其响应也各不相同。比较不同的研究发现,同一种土壤酶对相同污染物的响应存在差异甚至是矛盾的,其可能原因一方面是不同的土壤有机质含量的不同导致土壤酶活性响应的不一致,另一方面是不同供试土壤中的微生物种类存在差异,也会使土壤酶的活性表现不同。因此,在筛选指示酶时要依据污染物的种类、土壤的理化性质等综合因素进行具体分析。

现有研究多趋于分析在施加污染物的情况下土壤酶活性变化的规律,但土壤酶对污染物的具体反应机制的研究还较少。关于酶活性变化的机理,猜想、推理比较多,缺少相应的数据支持,因此,在酶活性变化机理方面还需进一步研究。

#### 参考文献

- [1] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 20-21.
- [2] GAO Y, WANG Y F, ZHANG G M, et al. An approach for assessing soil health: A practical guide for optimal ecological management[J]. *Environmental Earth Science*, 2012, 65(1): 153-159.
- [3] GAO Y, MIAO C Y, XIA J, et al. Plant diversity reduces the effect of multiple heavy metal pollution on soil enzyme activities and microbial community structure[J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2012, 6(2): 213-223.
- [4] ANGELOVIČOVÁ L, FAZEKAŠOVÁ D. Contamination of the soil and water environment by heavy metals in the former mining area of Rudňany (Slovakia)[J]. *Soil and Water Research*, 2014, 9(1): 18-24.
- [5] CIARKOWSKA K, SOLEK-PODWIKA K, WIECZOREK J. Enzyme activity as an indicator of soil-rehabilitation processes at a zinc and lead ore mining and processing area[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 132: 250-256.
- [6] KIZILKAYA R, ASKIN T, BAYRAKLI B, et al. Microbiological characteristics of soils contaminated with heavy metals[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2004, 40(2): 95-102.
- [7] 黄云凤, 高扬, 毛亮, 等. Cd、Pb单一及复合污染下土壤酶生态抑制效应及生态修复基准研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11): 2258-2264.
- [8] 季铁群, 王子芳, 高明, 等. 重金属Cu、Zn、Pb复合污染对紫色土壤酶活性的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(6): 293-296.
- [9] van BEELEN P, DOELMAN P. Significance and application of microbial toxicity tests in assessing ecotoxicological risks of contaminants in soil and sediment[J]. *Chemosphere*, 1997, 34(3): 455-499.
- [10] 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.
- [11] 滕应, 骆永明, 李振高. 土壤重金属复合污染对脲酶、磷酸酶

及脱氢酶的影响[J]. 中国环境科学, 2008, 28(2): 147-152.

[12] 韩桂琪, 王彬, 徐卫红, 等. 重金属 Cd、Zn、Cu、Pb 复合污染对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 238-242.

[13] 郭星亮, 谷洁, 陈智学, 等. 铜川煤矿区重金属污染对土壤微生物群落代谢和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 798-806.

[14] LI Y T, ROULAND C, BENEDETTI M F, et al. Microbial bio-mass, enzyme and mineralization activity in relation to soil organic C, N and P turnover influenced by acid metal stress[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(5): 969-977.

[15] 朱凡, 洪湘琦, 闫文德, 等. PAHs 污染土壤植物修复对酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 581-588.

[16] 焦婷婷. 多环芳烃荧蒽对植物和土壤生物毒害的剂量: 效应关系及其土壤环境基准初探[D]. 南京: 南京农业大学, 2011: 44-45.

[17] 葛高飞, 郑彬, 王景, 等. 菲不同污染方式对土壤酶活性的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(10): 1560-1566.

[18] 朱凡, 田大伦, 闫文德, 等. 四种绿化树种土壤酶活性对不同浓度多环芳烃的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4195-4202.

[19] 张晶, 张惠文, 张勤, 等. 长期石油污水灌溉对东北旱田土壤微生物量及土壤酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 67-70.

[20] 李慧, 陈冠雄, 杨涛, 等. 沈抚灌区含油污水灌溉对稻田土壤微生物种群及土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1355-1359.

[21] GRAMSS G, KIRSCH B, VOIGT K D, et al. Conversion rates of five polycyclic aromatic hydrocarbons in liquid cultures of fifty-eight fungi and the concomitant production of oxidative enzymes[J]. Mycological Research, 1999, 103(8): 1009-1018.

[22] NOVOTNY C, ERBANOVA P, SASEK V, et al. Extracellular oxidative enzyme production and PAH removal in soil by exploratory mycelium of white rot fungi[J]. Biodegradation, 1999, 10(3): 159-168.

[23] GIANFREDA L, RAO M, PIOTROWSKA A, et al. Soil enzyme activities as affected by anthropogenic alterations: intensive agricultural practices and organic pollution[J]. Science of the Total Environment, 2005, 341(1-3): 265-279.

[24] 吴建雄. 石油污染对棉花生长及土壤生物学特征的毒性效应研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2013: 47-58.

[25] 吕桂芬, 赵吉, 赵利, 等. 应用土壤酶活性评价草原石油污染的初步研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 1997, 28(5): 687-691.

[26] DINDAR E, TOPAC SAGBAN F O, BASKAYA H S. Variations of soil enzyme activities in petroleum-hydrocarbon contaminated soil[J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2015, 105: 268-275.

[27] 王梅, 江丽华, 刘兆辉, 等. 石油污染物对山东省三种类型土壤微生物种群及土壤酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 341-346.

[28] ANDREONI V, CAVALCA L, RAO M A, et al. Bacterial communities and enzyme activities of PAHs polluted soils[J]. Chemosphere, 2004, 57(5): 401-412.

[29] BOOPATHY R. Factors limiting bioremediation technologies[J]. Bioresource Technology, 2000, 74(1): 63-67.

[30] WU B B, LAN T, LU D N, et al. Ecological and enzymatic responses to petroleum contaminations[J]. Environmental Sciences(Processes and Impacts), 2014, 16(6): 1501-1509.

[31] LABUD V, GARCIA C, HERNANDEZ T. Effect of hydrocarbon pollution on the microbial properties of a sandy and a clay soil[J]. Chemosphere, 2007, 66(10): 1863-1871.

[32] 潘声旺. 多环芳烃污染土壤的生态修复研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009: 69-71.

[33] BARAN S, BIELINSKA J E, OLESZCZUK R. Enzymatic activity in an airfield soil polluted with polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Geoderma, 2004, 118(3-4): 221-232.

[34] KURANE R, SUZUKI T, TAKAHARA Y. Induction of enzyme involved in phthalate esters metabolism in *Nocardia erythropolis* and enzymatic hydrolysis of phthalate esters by commercial lipases[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1980, 44(3): 529-536.

[35] 王志刚, 赵晓松, 徐伟慧, 等. 黑土微生物量和酶活性对邻苯二甲酸二丁酯污染的响应[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(6): 199-205.

[36] CHEN H L, YAO J, WANG F. Soil microbial and enzyme properties as affected by long-term exposure to phthalate esters[J]. Advanced Materials Research, 2013, 731: 3653-3656.

[37] 吴雪峰. DEHP 污染对土壤微生物毒理效应研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014: 32-36.

[38] 王鑫宏. DBP/DEHP 单一及与 Pb 复合污染对土壤微生物量碳及土壤酶的影响研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2010: 51-61.

[39] 张建, 石义静, 崔寅, 等. 土壤中邻苯二甲酸酯类物质的降解及其对土壤酶活性的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(12): 3056-3061.

[40] 刘明明. 邻苯二甲酸二丁酯和镉复合作用对油菜生理生化指标和土壤酶活性的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014: 43.

[41] 王玉蓉, 张广才, 张昀, 等. 增塑剂邻苯二甲酸二异辛酯对土壤两种酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1405-1408.

[42] WANG X H, YUAN X, HOU Z G, et al. Effect of di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) on microbial biomass C and enzymatic activities in soil[J]. European Journal of Soil Biology, 2009, 45(4): 370-376.

[43] 戴伟, 白红英. 土壤过氧化氢酶活性及其动力学特征与土壤性质的关系[J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(1): 37-40.

[44] LYU Z H, YAO Y L, LU Z M, et al. Effect of tetrahydrofuran on enzyme activities in activated sludge[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, 70(2): 259-265.

[45] GARCIA G J C, PLAZA C, SOLER R P, et al. Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass[J]. Soil Biology and Bio-

chemistry, 2000, 32: 1907-1913.

[46] SCHMITZER J L, SCHEUNERT L, KORTE F. Fate of bis (2-ethylhexyl)[<sup>14</sup>C]phthalate in laboratory and outdoor soil-plant systems[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1988, 36 (1): 210-215.

[47] 祝惠. DEP 与 DOP 对土壤酶、土壤呼吸及土壤微生物量碳的影响研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2008: 15.

[48] 高军, 宗春琴, 周夏曦, 等. 土壤脱氢酶与蛋白酶对酞酸酯污染的动态响应[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(3): 542-548.

[49] 任旭琴, 彭莉, 章宇萍, 等. 邻苯二甲酸二丁酯对辣椒根系生理特性和土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(12): 191-193.

[50] 苗静, 祝惠, 王鑫宏, 等. DOP 与 Pb 单一及复合污染对土壤酶活性的影响[J]. 环境科学研究, 2009, 22(7): 856-861.

[51] 沈标, 李顺鹏. 几种化合物的生物毒性和致突变性[M]. 北京: 中国农药科技出版社, 1994: 294-296.

[52] 呼蕾, 和文祥, 王旭东, 等. 草甘膦的土壤酶效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 680-685.

[53] 朱南文. 乐果对微生物和酶的影响[J]. 上海环境科学, 1997, 16(4): 43-47.

[54] 和文祥, 郑粉莉, 田海霞. 氧化乐果对土壤酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(12): 4282-4287.

[55] 谢慧, 朱鲁生, 谭梅英. 呋虫啉在土壤中的降解动态及对土壤微生物的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 232-240.

[56] 杜慧玲, 吴济南, 王丽玲, 等. 苯磺隆对土壤酶活性的影响[J]. 核农学报, 2010, 24(3): 585-588.

[57] 严岩, 文波龙, 徐惠风, 等. 除草剂苄嘧磺隆对盐碱化沼泽芦苇生长及土壤酶活性影响的实验研究[J]. 湿地科学, 2016, 14 (1): 117-120.

[58] 杨春璐, 方玉帆, 王杰, 等. 豆磺隆对北方草甸棕壤土壤酶活性的影响[J]. 生态科学, 2014, 33(5): 951-954.

[59] 江帆, 胡玉福, 李亨伟, 等. 啶酰菌胺对酸性紫色土酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12): 2312-2317.

[60] 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.

## Research Advances on Response of Soil Enzyme to Environmental Pollution

CUI Xiaowei, SONG Xueying, LI Jiakang, LI Yushuang

(Key Laboratory of Regional Environment and Eco-remediation of Ministry of Education, Shenyang University, Shenyang, Liaoning 110044)

**Abstract:** With the development of social economy, the type and quantity of pollutants increases constantly. Soil pollution, as an important part of environmental pollution, has been contaminated increasing prominently. The safety of soil ecosystem is facing enormous threat. Soil enzyme is the key component of soil ecosystem and it's stable and sensitive to contaminants. Therefore, soil enzyme acts as one of the important indicators in soil ecotoxicological evaluation and indicates the health situation of soil ecosystem. In this study, we made the comprehensive analysis and discussion of soil enzyme in indicating of the soil contaminants such as heavy metals, petroleum hydrocarbons, phthalatic acid esters, and farm chemicals so as to provide theoretical support for the widely application of soil enzyme in the soil ecotoxicological evaluation.

**Keywords:** soil enzyme; environmental contaminant; response; ecotoxicological evaluation