

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.01.2016052405

周耀红, 马晓净, 吕辉雄. 六溴环十二烷对土壤酶活性、种子发芽率及根伸长的影响[J]. 环境化学, 2017, 36(1): 100-105.

ZHOU Yaohong, MA Xiaojing, LYU Huixiong. Effect of hexabromocyclododecane (HBCDs) on soil enzyme activity, seed germination rate and root elongation[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(1): 100-105.

六溴环十二烷对土壤酶活性、种子发芽率及根伸长的影响^{*}

周耀红 马晓净 吕辉雄^{**}

(华南农业大学资源环境学院, 广州, 510642)

摘 要 以水稻土配制不同浓度(0.2%、0.5%和1%)的六溴环十二烷污染土壤,采用容量法和磷酸苯二钠比色法测定土壤中过氧化氢酶和磷酸酶的活性,研究六溴环十二烷对土壤酶活性(过氧化氢酶、磷酸酶)的影响,并通过配制不同浓度梯度的六溴环十二烷培养液,研究六溴环十二烷溶液对玉米、菜心、白菜和萝卜种子发芽和根伸长的影响.结果表明,土壤过氧化氢酶活性随着六溴环十二烷浓度的增大呈现先促进后抑制的趋势,0.2%处理对其活性促进作用最大;而土壤磷酸酶的活性随着六溴环十二烷浓度的增大而增大.六溴环十二烷对菜心种子发芽表现出先抑制后促进的影响规律;玉米种子发芽率差异性不显著,萝卜种子发芽受六溴环十二烷的影响不大;对白菜种子发芽表现出明显的抑制作用.当处理浓度超过 90 mg·L⁻¹时,与对照处理相比,六溴环十二烷对 4 种种子的根伸长均表现出明显的促进作用.总之,白菜种子发芽和根伸长对 HBCDs 最敏感,受其抑制程度较高.虽然高浓度 HBCDs 促进菜心和萝卜种子发芽,但其根伸长受抑制.HBCDs 对土壤磷酸酶活性呈现激活作用,对过氧化氢酶呈现抑制作用.

关键词 六溴环十二烷, 酶活性, 种子发芽, 根伸长, 土壤生态质量.

Effect of hexabromocyclododecane (HBCDs) on soil enzyme activity, seed germination rate and root elongation

ZHOU Yaohong MA Xiaojing LYU Huixiong^{**}

(College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China)

Abstract: Polluted paddy soil samples were prepared by adding hexabromocyclododecane at different concentrations (0.2%, 0.5% and 1%). The activity of catalase and phosphatase in soil was determined by volumetric method and disodium phenyl phosphate colorimetric method respectively to study the effects of HBCDs on soil enzyme activities (catalase, phosphatase). At the same time, the different concentration gradient culture medium of HBCDs was prepared to study the effect of HBCDs on seed germination rate and root length of *Zea mays* L, *Brassica parachinensis*, Chinese cabbage and *Raphanus sativus* L. The results indicated that activity of catalase in soil showed an initially enhancing and then inhibiting trend with the increasing concentration of HBCDs, and 0.2% treatment was of the largest effect on activity promotion, while the activity of soil phosphatase was boosting with the increase of HBCDs. The germination effect of HBCDs on *Brassica parachinensis* seed prohibited at first and then promoted. The difference of seed germination rate of *Zea mays* L was not significant and HBCDs had little effect on the germination of *Raphanus sativus* L seeds. HBCDs had obvious inhibitory impact on Chinese cabbage seed germination. When the treatment concentration was higher than 90 mg·L⁻¹, compared with the control treatment, HBCDs showed

2016 年 5 月 24 日收稿(Received: May 24, 2016).

^{*} 国家自然科学基金(41471265),广东省自然科学基金(2015A030313418),广州市科技计划(2014J4100184)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41471265), the National Natural Science Foundation of Guangdong (2015A030313418), Science and Technology Program of Guangzhou (2014J4100184).

^{**} 通讯联系人, Tel: 15920497102, E-mail: huixiong@scau.edu.cn

Corresponding author, Tel: 15920497102, E-mail: huixiong@scau.edu.cn

evident promoting effect on root elongation of 4 seeds in question. In a word, the germination and root elongation of Chinese cabbage were the most sensitive to HBCDs, and the degree of inhibition was higher. Although the high concentration of HBCDs stimulated *Raphanus sativus* L and *Brassica parachinensis* seed germination, but its root elongation was suppressed. The activity of soil phosphatase

Keywords: HBCDs, enzyme activity, seed germination, root elongation, soil ecological quality.

六溴环十二烷(Hexabromocyclododecanes, HBCDs)因具有良好的热稳定性,常作为添加型阻燃剂用于聚丙烯塑料、聚乙烯泡沫塑料的阻燃剂,也应用于室内装潢、纺织品和电子产品的阻燃。HBCDs作为一种阻燃剂,可以通过多种途径如产品的生产、使用和处理等过程释放到周围环境中去。商品化的 HBCDs 由 3 种非对映异构体 α -HBCDs、 β -HBCDs、 γ -HBCDs 组成,其中 γ -HBCDs 总量最多,约占混合物总量的 78%^[1]。有研究发现,莱州河流表层沉积物中 γ -HBCDs 占 HBCDs 异构体含量的主导地位^[2]。此类化合物属于稳定性化合物,能长期存在于环境中,很难被降解,会发生迁移和转化,对环境及生物具有一定的毒害作用^[3]。2009 年 10 月在瑞士日内瓦举行的 POPs 公约审查员通过了 HBCDs 关于公约附件 D 的审核^[4]。从 2013 年起, HBCDs 被列入《关于持久性有机污染物(POPs)的斯德哥尔摩公约》受制物质名录,但在 2019 年前,六溴环十二烷仍可用在建筑用聚苯乙烯领域^[5]。

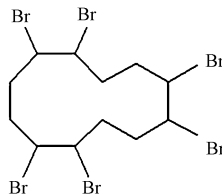
HBCDs 在生物体、土壤、水体和空气等环境介质中均有检出^[6-12],有学者报道了 HBCDs 的毒理作用、植物吸收和人体暴露等研究^[13-17]。但是,有关 HBCDs 对土壤酶活性和植物早期生长的影响却鲜有报道。种子萌发和根伸长是指示污染物植物毒性较为敏感的指标。土壤中的污染物会影响植物种子的萌发和根伸长,进而影响其生长。在自然界中,生物代谢及有机物的生化反应都会产生一定量的过氧化氢,其大量地积累会对植物及土壤产生毒害作用;但生物体受到污染胁迫时会产生过氧化氢酶,用于促进过氧化氢分解为氧气和水,从而减少过氧化氢的积累,维持体系稳定^[18]。同时,磷酸酶可以分解土壤中的有机磷,促进植物生长。但目前尚未有关于 HBCDs 对土壤酶活性影响和植物种子早期生长影响的报道。

本文以不同作物(菜心、白菜、玉米和萝卜)种子为研究对象,探讨不同浓度的 HBCDs 溶液对种子发芽及根伸长生长的影响。同时配制不同浓度的 HBCDs 污染土壤,研究其对土壤酶活性的影响,为 HBCDs 污染土壤的风险评价提供科学依据。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 实验材料

试验所用的 HBCDs 购自 Adamas Reagent 有限公司,纯度 > 99%,其结构式如下:



供试的土壤为水稻土,采自华南农业大学(广州)实验农场水稻田,风干磨碎后过 1 mm 筛,备用。发芽率试验所用的白菜、玉米、菜心和萝卜种子分别购自广州长合种子有限公司、云南春喜农业科技集团有限公司和广州市张水江菜种店。

1.2 土壤酶活性试验

HBCDs 采用丙酮溶解后,添加到水稻土(1 mm)中,配制成浓度为 0.2%、0.5% 和 1% 的污染土,同时设置对照组。

采用容量法^[19]测定土壤过氧化氢酶活性,以单位土重消耗的 0.02 mol·L⁻¹高锰酸钾毫升数(对照与试验测定的差)表示土壤过氧化氢酶活性。采用磷酸苯二钠比色法^[19]测定土壤磷酸酶活性,以 24 h 后 1 g 土壤中释放出的酚的质量(mg)表示土壤磷酸酶活性。

1.3 种子发芽率及根伸长实验

试验的处理过程参照侯俊杰等^[20]的处理方法,且在此基础上做适当的调整。

选取大小均匀,粒径饱满的菜心、萝卜、玉米和白菜种子,用75%的酒精消毒,然后用蒸馏水清洗3—4次,之后用蒸馏水浸泡种子(菜心种子、萝卜种子和白菜种子浸泡1 h,玉米浸泡12 h)。通过预试验最后确定配制浓度梯度为10、30、90、270 mg·L⁻¹的HBCDs培养液,以蒸馏水为对照。

将泡好的种子放入铺有滤纸的培养皿中,每个处理设置3个平行,每个培养皿内放20粒种子,分别加入不同浓度的HBCDs培养液或蒸馏水。玉米种子加入15 mL,其余种子加入7 mL培养液或蒸馏水,以保证种子充分湿润淹没而又不完全淹没。将上述培养皿放入培养箱中恒温(28℃)恒光(常亮)培养48 h。

每天观察种子的萌发情况,适当调换培养箱中培养皿的位置,采用恒重法来维持培养液含量。2 d后计算种子发芽率,5 d后测量根伸长。同时计算不同浓度的HBCDs对根伸长的抑制率和种子发芽率:抑制率=(A-B)/A×100%,其中:A为对照处理根长,B为污染处理根长,单位均为mm。

1.4 数据分析

本文的数据为3个平行的平均值,采用SPSS19进行相关性分析(Person, Two-tailed)和多重比较检验处理间差异程度,用Microsoft Excel软件做实验数据的简单处理及线性回归图,显著水平P为0.05。

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 六溴环十二烷对土壤酶活性的影响

付玲芳等^[21]研究表明当DBE-209(十溴联苯醚,另外一种阻燃剂)的浓度超过100 mg·kg⁻¹时,随着浓度增大,其对土壤磷酸酶活性抑制变大。由图1可知,随着HBCDs质量浓度增加,其对土壤过氧化氢酶活性表现出显著的先促进后抑制的作用。当HBCDs浓度为0.2%时,过氧化氢酶活性比对照高2.57%;当HBCDs活性增大至0.5%时,HBCDs对土壤过氧化氢酶活性的促进作用开始减弱(仅增强1.02%)。当浓度增至1%时,出现明显抑制作用(活性减弱11.3%)。相关性分析表明,HBCDs对土壤过氧化氢酶的活性呈显著相关(P=0.05)。由于过氧化氢酶是在生物呼吸和有机物的生物化学氧化反应过程中形成的,对土壤有机质分解和转化起着重要作用,同时它能促进H₂O₂分解。因而当加入低浓度的HBCDs时,对土壤微生物产生一定的毒害作用,从而使其产生应激反应,土壤微生物产生大量的过氧化氢酶,从而表现出过氧化氢酶活性增强。但是当随着HBCDs浓度的增大,HBCDs开始对其活性产生抑制作用。类似地,付玲芳等^[21]研究表明,低浓度(1 mg·kg⁻¹)的十溴联苯醚对土壤过氧化氢酶活性有促进作用,但中、高浓度处理(10、100 mg·kg⁻¹)对土壤过氧化氢酶活性有抑制作用。但也有研究发现,土壤过氧化氢酶受全氟辛酸铵盐胁迫不敏感,其活性易受土壤类型等影响^[22]。

磷酸酶能够提高土壤有机磷的水解矿化速度,促进土壤磷素的有效性,是评价土壤磷素生物转化强度与方向的重要指标^[23]。由图2可知,土壤磷酸酶的活性随着HBCDs浓度的增大而逐渐增强,HBCDs对磷酸酶有激活作用。

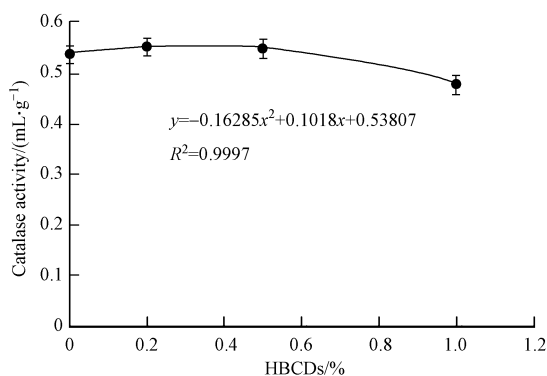


图1 HBCDs浓度与过氧化氢酶活性的关系
Fig.1 Relationship between the concentration of HBCDs and the activity of catalase

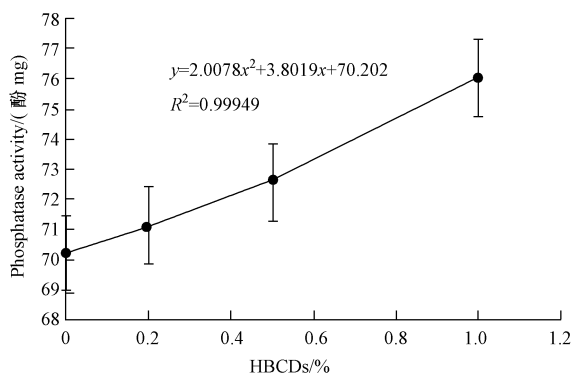


图2 HBCDs浓度与磷酸酶活性的关系
Fig.2 Relationship between the concentration of HBCDs and the phosphatase activity

处理浓度为 0.5% 时,其活性比空白的增强 3.4%;当处理浓度达到 1% 时,活性增强 8.3%。相关性分析表明,HBCDs 对土壤磷酸酶的影响作用呈显著相关($P=0.01$),相关系数 $R^2=0.999$ 。类似的,高秀丽等^[24]研究发现,碱性磷酸酶活性随土壤有效态镍含量的增加而增加。污染物进入土壤后,会对磷酸酶产生直接影响^[25],但产生影响的浓度可能存在一定阈值。在本研究中,六溴十二烷对土壤磷酸酶活性具有显著的激活效应。可能原因是土壤加入 HBCDs 后,土壤微生物受到毒害作用。微生物活性受到抑制,导致了土壤有机酸的减少,从而增大了土壤磷酸酶活性。

2.2 HBCDs 对种子发芽率及根伸长的影响

从整体看,随着 HBCDs 处理浓度的增大,菜心、玉米种子的发芽率都出现了下降的弱趋势,影响并不显著。对萝卜种子发芽率影响也不明显,但对白菜种子却表现出明显的抑制作用(图 3)。处理浓度为 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,菜心和白菜种子的发芽率相比对照处理分别下降 24.4% 和 28.1%。当处理浓度达 $270 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,玉米种子的发芽率最小,发芽率相比对照处理降低 26.7%。菜心种子发芽率却出现了反弹。

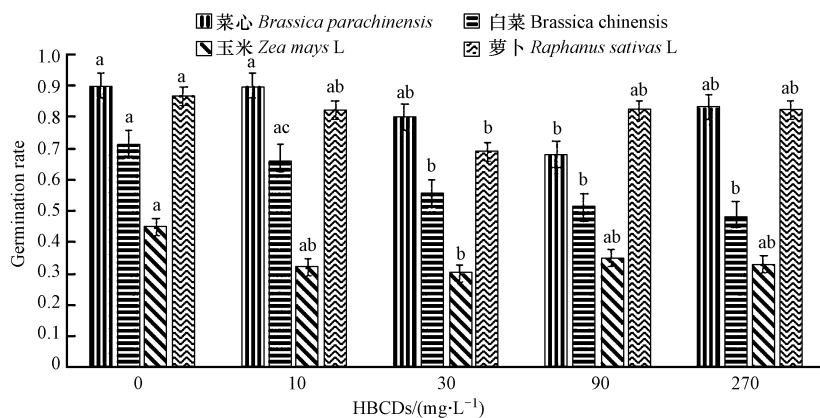


图 3 HBCDs 浓度对种子发芽率的影响

注:图中不同小写字母表示相同种子不同浓度间各处理间的差异显著($P<0.05$)。

Fig.3 Effect of HBCDs on seed germination rate

如表 1 所示,HBCDs 对菜心和萝卜种子的根伸长具有一定的促进作用,而对玉米和白菜种子则表现出低浓度抑制高浓度促进的变化规律。当处理浓度为 $10\text{—}30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,HBCDs 对白菜种子根伸长显示抑制作用,对菜心和萝卜种子根伸长却表现出促进作用。当处理为 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,白菜种子根伸长开始出现促进作用,促进率达 62%,而玉米种子根伸长的抑制率达 31%。当处理浓度达到 $270 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,HBCDs 对玉米种子根伸长出现了促进作用,促进率达 7%;菜心种子平均根伸长为 1.63 cm,显著长于空白处理(0),促进率达 55%;萝卜种子平均根伸长为 4.83 cm,促进率达 34%。

表 1 HBCDs 对种子根伸长的影响

Table 1 Relationship between the concentration of HBCDs and the root elongation of seed

HBCDs/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	根伸长 Root elongation (根伸长促进率 Promote rate of root elongation)			
	菜心	白菜	玉米	萝卜
0	$1.05 \pm 0.06\text{b}(0)$	$1.53 \pm 0.34\text{b}(0)$	$1.80 \pm 0.13\text{a}(0)$	$3.61 \pm 0.23\text{a}(0)$
10	$1.20 \pm 0.07\text{b}(0.14)$	$1.43 \pm 0.15\text{b}(-0.07)$	$1.85 \pm 0.26\text{a}(0.03)$	$3.74 \pm 0.24\text{a}(0.04)$
30	$1.10 \pm 0.06\text{b}(0.05)$	$1.38 \pm 0.21\text{b}(-0.10)$	$1.54 \pm 0.19\text{a}(-0.14)$	$4.75 \pm 0.77\text{a}(0.32)$
90	$1.14 \pm 0.08\text{b}(0.09)$	$2.48 \pm 0.09\text{a}(0.62)$	$1.24 \pm 0.11\text{a}(-0.31)$	$4.76 \pm 2.23\text{a}(0.32)$
270	$1.63 \pm 0.07\text{a}(0.55)$	$2.29 \pm 0.18\text{ac}(0.50)$	$1.92 \pm 0.23\text{a}(0.07)$	$4.83 \pm 0.66\text{a}(0.34)$

注:根伸长为平均值 \pm 标准误差($n=3$),单位 cm;根伸长促进率中“-”表示根伸长抑制率;根伸长促进率为平均值,单位为%,标准误差均小于 0.1;同行数据中含有相同字母者表示差异不显著($P>0.05$)。

Note: the root elongation was the mean \pm standard error ($n=3$), “-” in root elongation promotion rate showed inhibition rate of root elongation; root elongation promotion rate was the average value and standard error was less than 0.1; data in the same line with the same letter showed there was no significant difference ($P>0.05$).

总体来看,HBCDs 对 4 种种子发芽率的抑制作用由强到弱依次为玉米 > 白菜 > 萝卜 > 菜心。白菜种

子的发芽率与 HBCDs 浓度呈负相关,随着 HBCDs 浓度的增大而降低.但是处理浓度为 30—270 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,差异不显著,却与对照处理有显著差异($P<0.05$).HBCDs 对玉米种子发芽率在 10—270 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度内表现出轻微的抑制作用,这与武彤等^[26]的研究结果相似.但本研究中不同处理浓度与对照间的差异性不显著(除了 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理),可以看出其对 HBCDs 浓度的变化不太敏感;HBCDs 对萝卜种子发芽影响不大,其根伸长也表现出相似的规律.有研究表明,由于植物体内复杂多样的同工酶系统的存在,一定浓度的 HBCDs 会刺激植物种子的适应和调节能力,略微促进其生理作用^[27],从而表现出对菜心种子在处理浓度为 90—270 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时发芽率反弹升高,其根长也受到 HBCDs 高浓度的激活而表现出一定的促进作用.这可能与菜心和萝卜种子对 HBCDs 的耐受性有关.

植物在生长过程中离不开生长素,植物生长素能够促进细胞的纵向生长,从而对根的伸长能够表现出明显的促进作用;同时,植物生长素又具有双重效应,低浓度能够促进生长,高浓度则抑制生长^[28],同时植物生长素的合成受各种酶的作用^[29].不同植物器官对生长素不同浓度的敏感性有很大差异,根对生长素最敏感,极低浓度下即可促进生长,在较高浓度下受抑制.但在本研究中,当处理浓度超过 90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,与对照处理相比,六溴环十二烷对 4 种种子的根伸长均表现出明显的促进作用(表 1).这可能是因为对照处理的植物种子刚刚萌发,其他植物器官还未形成,其根部产生并积累较多生长素.受 HBCDs 污染的处理中,发芽种子的根正常生长;但当六溴环十二烷增大到一定浓度,其毒性影响到生长素合成有关酶的活性^[29],从而抑制了种子对生长素的分泌,使种子根部生长素浓度降低,从而表现出高浓度的 HBCDs 促进种子根伸长.

综上,中低浓度的 HBCDs 对玉米根伸长有一定抑制作用,而高浓度处理呈现促进作用.高浓度 HBCDs 对菜心和萝卜种子发芽呈现促进作用.HBCDs 对土壤磷酸酶活性呈现激活作用,对过氧化氢酶活性却呈现抑制作用.同时 HBCDs 抑制白菜和玉米的种子发芽率,抑制菜心、白菜和萝卜的根伸长.这说明 HBCDs 对不同土壤酶活性及不同植物种子的毒性效应存在差异.4 种种子相比,总体上看,白菜种子发芽和根伸长对 HBCDs 最敏感,受抑制程度较高.虽然高浓度 HBCDs 促进菜心和萝卜种子发芽,但其根伸长受抑制.所以,白菜、菜心和萝卜不宜种在 HBCDs 污染的土壤.玉米的根伸长受抑制程度较小,但种子发芽对 HBCDs 较敏感.因此,仍需要进一步研究 HBCDs 对其他作物和土壤酶活性的影响,为污染土壤的生态毒理评价提供更全面的科学依据.

3 结论(Conclusion)

在本次实验中,研究了六溴环十二烷对土壤酶活性的影响,实验结果显示 HBCDs 对土壤磷酸酶活性呈现激活作用,对过氧化氢酶活性呈现抑制作用,可以用来指示土壤受六溴环十二烷的污染情况,间接评价土壤生态系统质量.总的来说,白菜种子发芽和根伸长对 HBCDs 最敏感,受其抑制程度较高.虽然高浓度 HBCDs 促进菜心和萝卜种子发芽,但其根伸长受抑制.所以,白菜、菜心和萝卜不宜种在 HBCDs 污染的土壤.玉米的根伸长受抑制程度较小,但种子发芽对 HBCDs 较敏感.因此,仍需要进一步研究 HBCDs 对其他作物和土壤酶活性的影响,为 HBCDs 污染土壤的生态毒理评价提高更全面的科学依据.

参考文献(References)

- [1] MARVIN C H, TOMY G T, ALAEE M, et al. Distribution of hexabromocyclododecane in Detroit River suspended sediments [J]. *Chemosphere*, 2006, 64: 268-275.
- [2] 刘艺凯, 王景芝, 唐建辉, 等. 莱州湾河流表层沉积物中六溴环十二烷的含量水平, 分布及组成特征 [J]. *地球化学*, 2014, 43(1): 55-63.
LIU Y K, WANG J Z, TANG J H, et al. Levels, distributions and isomer profiles of hexabromocyclododecanes in the riverine sediments of the Laizhou Bay area, North China [J]. *Geochemistry*, 2014, 43(1): 55-63 (in Chinese).
- [3] YU Z Q, PENG P A, SHENG G Y, et al. Determination of hexabromocyclododecane diastereoisomers in air and soil by liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2008, 1190: 74-79.
- [4] 李红华, 王亚韡, 王璞, 等. 六溴环十二烷(HBCDs)的环境污染现状及分析方法进展 [C]. 中国化学会第 27 届学术年会第 2 分会场摘要集. 2010.
LI H H, WANG Y W, WANG P, et al. Environmental pollution and Progress of method study on HBCDs [C]. The 27th academic annual conference of the Chinese chemical society, abstracts of Section 02 sub-venues, 2010 (in Chinese).
- [5] 郭桦. 六溴环十二烷列入 POPs 黑名单 [EB/OL]. [2013-5-24]. <http://www.ccin.com.cn/ccin/news/2013/05/24/263875.shtml>.
GUO H. HBCDs included in the POPs blacklist [EB/OL]. [2013-5-24]. <http://www.ccin.com.cn/ccin/news/2013/05/24/263875.shtml>

- (in Chinese).
- [6] XIANG N, CHEN L, MENG X Z, et al. Occurrence of hexabromocyclododecane (HBCD) in sewage sludge from Shanghai; Implications for source and environmental burden[J]. *Chemosphere*, 2015, 118: 207-212.
- [7] POMA G, BINELLI A, VOLTA P, et al. Evaluation of spatial distribution and accumulation of novel brominated flame retardants, HBCD and PBDEs in an Italian subalpine lake using zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21 (16): 9655-9664.
- [8] BARGHI M, SON M H, CHOI S D, et al. Hexabromocyclododecane (HBCD) in the Korean food basket and estimation of dietary exposure [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 213: 268-277.
- [9] 邹梦遥, 陶雪琴, 邓金川, 等. 分散固相萃取-超高效液相色谱-串联质谱法测定城市污水中 2 种溴代阻燃剂[J]. *环境化学*, 2016, 35(1): 42-48.
ZOU M Y, TAO X Q, DENG J C, et al. Determination of HBCD and TBC in municipal sewage by disperse solid phase extraction-high performance liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35 (1): 42-48 (in Chinese).
- [10] LI L, WEBER R, LIU J G, et al. Long-term emissions of hexabromocyclododecane as a chemical of concern in products in China [J]. *Environment International*, 2016, 91: 291-300.
- [11] ZHANG Y Q, LI Q F, LU Y L, et al. Hexabromocyclododecanes (HBCDDs) in surface soils from coastal cities in North China: Correlation between diastereoisomer profiles and industrial activities [J]. *Chemosphere*, 2016, 148: 504-510.
- [12] 施致雄, 仝彤, 焦扬, 等. 食品中四溴双酚 A 和六溴环十二烷的检测技术, 污染水平与膳食暴露研究进展 [J]. *食品安全质量检测报*, 2015, 6(4): 1333-1341.
SHI Z X, TONG T, JIAO Y, et al. Determination methodologies, contamination levels and dietary exposure of tetrabromobisphenol A and hexabromocyclododecane in diet: A review of recent studies [J]. *Journal of Food Safety And Quality Testing*, 2015, 6(4): 1333-1341 (in Chinese).
- [13] 李亚宁, 冯秀娟, 刘庆余, 等. 六溴环十二烷在土壤中的归趋及植物吸收研究 [J]. *环境污染与防治*, 2013, 35(11): 5-9.
LI Y N, FENG X J, LIU Q Y, et al. The fate of HBCD in soil and its uptake by plants [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2013, 35(11): 5-9 (in Chinese).
- [14] ZHANG Y W, SUN H W, LIU F, et al. Hexabromocyclododecanes in limnic and marine organisms and terrestrial plants from Tianjin, China: Diastereomer- and enantiomer-specific profiles, biomagnification, and human exposure [J]. *Chemosphere*, 2013, 93: 5611-1568.
- [15] CATO A, CELADA L, SIMMONS N, et al. Brominated flame retardants, tetrabromobisphenol A and hexabromocyclododecane, activate mitogen-activated protein kinases (MAPKs) in human natural killer cells [J]. *Cell Biology and Toxicology*, 2014, 30 (6): 345-360.
- [16] ZHU H, SUN H W, ZHANG Y W, et al. Uptake pathway, translocation, and isomerization of hexabromocyclododecane diastereoisomers by wheat in closed chambers [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(5): 2652-2659.
- [17] WU T, HUANG H L, ZHANG S Z. Accumulation and phytotoxicity of technical hexabromocyclododecane in maize [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 42: 97-104.
- [18] 周礼恺. 土壤酶学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 228-230.
ZHOU L K. *Soil enzymology* [M]. Beijing: Science Press, 1987: 228-230 (in Chinese).
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 309-313.
GUANG S Y. *Soil enzyme and its research method* [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986: 309-313 (in Chinese).
- [20] 侯俊杰, 吕辉雄, 曾巧云, 等. 茶皂素对种子发芽, 根伸长及土壤酶活性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(4): 660-665.
HOU J J, LÜ H X, ZENG Q Y, et al. Effects of tea saponin on seed germination, root elongations and soil enzyme activities [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4): 660-665 (in Chinese).
- [21] 付玲芳, 李妙玲, 秦华明, 等. 十溴联苯醚对两种土壤酶活性的影响 [J]. *土壤*, 2014, 46(4): 689-696.
FU L F, LI M L, QIN H M, et al. Effects of decabromodiphenyl ether on enzyme activities of two type soils [J]. *Soil*, 2014, 46(4): 689-696 (in Chinese).
- [22] 田海霞, 和文祥, 孔龙, 等. 全氟辛酸铵盐 (PFOA) 对土壤酶活性影响的初步研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5): 936-941.
TIAN H X, HE W X, KONG L, et al. The effect of perfluorooctanoic acid ammonium salt on soil enzyme activities [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5): 936-941 (in Chinese).
- [23] 曹伟鹏, 吴发启, 雷金银, 等. 毛乌素沙地南缘不同耕作措施土壤酶和微生物区系的特征 [J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(1): 88-95.
CAO W P, WU F Q, LEI J Y, et al. Characters of different tillage treatments on soil enzymes and microflora Muus desert [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(1): 88-95 (in Chinese).
- [24] 高秀丽, 邢维芹, 冉永亮, 等. 重金属积累对土壤酶活性的影响 [J]. *生态毒理学报*, 2012, 7(3): 331-336.
GAO X L, XING W Q, RAN Y L, et al. Effects of accumulation of heavy metals in soils on enzyme activities [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(3): 331-336 (in Chinese).
- [25] 邬晓丹, 张凤杰, 陈鹏, 等. 2,4-D 对土壤酶活性的影响 [J]. *天津农业科学*, 2014, 20(8): 32-34.
WU X D, ZHANG F J, CHEN P, et al. Effects of 2,4-D on soil enzyme activities [J]. *Tianjin Agricultural Science*, 2014, 20(8): 32-34 (in Chinese).
- [26] 武彤, 张淑贞. 六溴环十二烷非对映体的植物吸收和毒性效应 [C]. 中国化学会第 28 届学术年会第 2 分会场摘要集. 2012.
WU T, ZHANG S Z. Plant uptake and toxicity effect of hexabromocyclododecane diastereoisomers [C]. The 28th academic annual conference of the Chinese chemical society, abstracts of Section 02 sub-venues (in Chinese).
- [27] 彭诚, 丁莉, 王军. 硒对白菜种子发芽率及幼苗生长的影响 [J]. *湖北民族学院学报*, 2006, 24(1): 91-93.
PENG C, DING L, WANG J. The physiological effects on the germinating of cabbage seeds [J]. *Journal of Hubei Institute for Nationalities*, 2006, 24(1): 91-93 (in Chinese).
- [28] 吴国辉. 植物生长素的作用机理 [J]. *农机化研究*, 2004(6): 288.
WU G H. Mechanism of auxin action [J]. *Journal of Agricultural Mechanization*, 2004(6): 288 (in Chinese).
- [29] 倪迪安, 许智宏. 生长素的生物合成、代谢、受体和极性运输 [J]. *植物生理学通讯*, 2001, 37(4): 346-352.
NI D A, XU Z H. Auxin biosynthesis, metabolism, receptor and polar transport [J]. *Plant Physiology Journal*, 2001, 37(4): 346-352 (in Chinese).