

# 十溴联苯醚与锌复合污染胁迫下 土壤酶和呼吸强度的响应<sup>\*</sup>

付玲芳 谢登科 符安 陈键准 李英燕 莫测辉 秦华明<sup>\*\*</sup>

(暨南大学环境学院, 广东省高校水土环境毒性污染防治与生物修复重点实验室, 广州 510632)

**摘要** 为了了解多溴联苯醚与重金属复合污染对土壤微生态的影响, 采用室内模拟土培方法研究了十溴联苯醚(decabromodiphenyl ether, BDE-209)和锌( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ )单一及复合污染处理对土壤过氧化氢酶和蔗糖酶活性及土壤呼吸强度的影响。结果表明: 短期(1~7 d)处理条件下, 土壤蔗糖酶和过氧化氢酶对BDE-209和 $Zn^{2+}$ 单一和复合污染均表现出较高的敏感性, 但随着暴露时间的延长, 酶活性有逐渐恢复至对照组水平的趋势; 最高浓度 $100\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的BDE-209与最高浓度 $1000\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 $Zn^{2+}$ 复合处理组, 蔗糖酶和过氧化氢酶活性则始终处于受抑制状态; BDE-209和 $Zn^{2+}$ 复合污染处理对土壤过氧化氢酶活性的影响在暴露前期主要为拮抗作用, 而后期以协同作用为主, 对土壤蔗糖酶的影响在不同时期分别表现出加合作用、拮抗作用和协同作用; BDE-209与 $Zn^{2+}$ 复合处理对土壤呼吸的影响呈现“促进-抑制-促进-抑制”的规律, 但无论是促进作用还是抑制作用, 其强度随时间而减弱。

**关键词** 多溴联苯醚; 锌; 土壤酶; 土壤呼吸强度; 复合污染

中图分类号 X53 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2015)8-2260-07

**Effects of combined pollution of decabromodiphenyl ether and  $Zn^{2+}$  on soil enzyme and respiration.** FU Ling-fang, XIE Den-ke, FU An, CHEN Jian-zhun, LI Yin-yan, MO Ce-hui, QIN Hua-ming<sup>\*\*</sup> (School of Environment, Jinan University, Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation of Guangdong Higher Education Institutes, Guangzhou 510632, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(8): 2260–2266.

**Abstract:** An indoor simulation method was conducted to study the effects of decabromodiphenyl ether (BDE-209) and  $Zn^{2+}$  ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ) on the activity of soil enzymes (catalase and saccharase) and soil respiration during 93-day incubation. The results indicated that catalase and saccharase showed high sensitivities to single and combined pollution of BDE-209 and  $Zn^{2+}$  in a short term (1–7 d). With the extension of exposure time, the activities of catalase and saccharase showed a trend of gradual recovery even up to control levels. But the activities of catalase and saccharase in the treatment with the highest concentration of  $100\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  BDE-209 combined with the highest concentration of  $1000\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$   $Zn^{2+}$  were always in inhibited states. The effects of combined pollution of BDE-209 and  $Zn^{2+}$  on soil catalase activities were characterized by antagonism in the early exposure and dominated by synergy in the later exposure, and the effects on soil saccharase showed additive, antagonistic and synergistic interactions at different times. The effects of combined pollution of BDE-209 and  $Zn^{2+}$  on soil respiration presented a pattern of “promotion-suppression-promotion-suppression”, and the intensity of promotion or suppression decreased as the exposure time increased.

**Key words:** polybrominated diphenyl ethers; zinc; soil enzyme; soil respiration intensity; combined pollution.

DOI:10.13292/j.1000-4890.2015.0192

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金委-广东联合基金项目(U0933002)和中央高校基本科研业务费专项(21612103)资助。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者 E-mail: huamingqin@163.com

收稿日期: 2014-12-15 接受日期: 2015-04-20

多溴联苯醚属于全球性的持久性有机污染物,十溴联苯醚是其中最主要的一类,其结构稳定且不易被降解,通过转化、运输、累积、生物放大等作用,危害人体健康(Ni *et al.* 2010)。锌是一种较为特殊的元素,一方面,它是生物体生长的必须元素,另一方面,过量的锌具有毒害作用从而对生物体的新陈代谢产生影响(Martinez *et al.* 2007)。近年来,十溴联苯醚和重金属的复合污染日益受到关注(Ni *et al.* 2010)。目前关于十溴联苯醚与重金属的复合研究多集中在 Hg、Cr、Pb、Cu 等重金属,对于多溴联苯醚与既是重金属又是生物体必须营养元素的锌之间的复合对土壤环境的影响则尚未见报道。然而,在局地环境中,十溴联苯醚和锌同时存在,共同对环境产生影响(罗勇,2007)。因此,有必要对十溴联苯醚与锌的复合污染进行研究。

污染物进入土壤后,与土壤酶产生相互作用。不同污染物对土壤酶有不同的影响,同种污染物对不同酶活性也会有所差异。许多研究表明土壤酶可以作为指示标记,检测污染物对土壤环境的影响。其中,过氧化氢酶能够促进土壤分解生物生命活动过程中产生的过氧化氢,是土壤生物抵抗不良环境的一种重要氧化还原酶,可以作为环境污染胁迫程度的指标。蔗糖酶能够水解蔗糖生成葡萄糖和果糖,对土壤中的碳素循环具有重要作用。此外,土壤呼吸强度也是表征污染胁迫下土壤生物能量代谢及生命活动的有效指标(Wardle *et al.* 1990)。因此,采用土壤酶和土壤呼吸强度作为评价指标,并根据土壤酶活性和土壤呼吸强度的变化可以用来判断污染物对土壤的毒害程度以及衡量污染物对土壤微生物生命活动强度的影响。基于此,本研究通过采用室内模拟加培养的方法考察十溴联苯醚与锌单一和复合污染条件下土壤蔗糖酶、过氧化氢酶和土壤呼吸的变化,为多溴联苯醚与重金属复合污染对土壤微生态影响的研究提供更多参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

受试土壤采自华南农业大学试验田。通过 5 点

采样法,采集 0~20 cm 土壤层。将土壤置于室温下自然风干,去除杂物后研磨,过 2 mm 标准筛备用。

### 1.2 仪器试剂

BDE-209(纯度 99%,Sigma Aldrich 公司),Zn-SO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O(AR 级,广州化学试剂厂),UVmini-1240 分光光度计,GC 9790 型气相色谱仪。

### 1.3 实验设计

将供试土壤分装于 48 个 1 L 定做的玻璃器皿,每个玻璃器皿 400 g,设置 15 个处理组和 1 个对照组,每个处理设置 3 组平行(表 1)。

配置浓度为 1000 mg·L<sup>-1</sup> 的十溴联苯醚母液和 Zn<sup>2+</sup> 浓度为 2000 mg·L<sup>-1</sup> 的含锌母液,添加母液使各处理组污染物浓度满足上述设置。将所有处理置于恒温 30℃ 暗室培养。定时添加水分,维持烧杯中土壤含水率为田间最大含水率的 60%。定时分别于第 1、7、14、28、42、56 和 93 天采样测定。

### 1.4 酶活性的测定

采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶活性、高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶活性(关松荫,1986)。

### 1.5 土壤呼吸强度测定

采用密闭容器法用 GC 9790 气相色谱仪测定,其强度以单位土壤 48 h 空气中 CO<sub>2</sub> 的浓度(%)表示(郑洪元等,1982)。

### 1.6 数据分析

所有数据均使用 SPSS 17.0 软件进行分析,并用 Excel 作图。采用二次多项式模型分析 BDE-209 和 Zn<sup>2+</sup> 的交互作用对土壤过氧化氢酶和蔗糖酶的影响。二次多项式表达式如下所示:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i X_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

式中, $Y$  为土壤酶活性的预测值, $X$  为 BDE-209 与 Zn<sup>2+</sup> 的浓度, $\beta$  是回归系数,其中  $\beta_{ij}$  为两种污染物交互作用的性质和强度。其值为正、负、零,分别表示为协同作用、拮抗作用和加和作用。该回归方程的置信度为 95%。

表 1 实验设计

Table 1 Design of experiments

污染物	处理(mg·kg <sup>-1</sup> )															
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	CK
BDE-209	1	10	100	0	0	0	1	1	1	10	10	10	100	100	100	0
Zn <sup>2+</sup>	0	0	0	200	500	1000	200	500	1000	200	500	1000	200	500	1000	0

土壤呼吸强度抑制率的计算公式为:

$$\text{抑制率}(\%) = (A - B) / A \times 100\%$$

式中,  $A$  为不加污染物土壤呼吸强度,  $B$  为加污染物土壤呼吸强度。

## 2 结果与分析

### 2.1 BDE-209 和 $Zn^{2+}$ 污染对土壤蔗糖酶活性的影响

从图 1 可以看出,在经过 93 天的暴露处理之后, BDE-209 与  $Zn^{2+}$  单一污染和复合污染处理土样的蔗糖酶活性都经历了“降低-升高-趋于稳定”的过程。在第 14 天各处理达酶活最低点,第 28 天有所升高后趋于稳定。从整体上看,短时(1~14 d)处理条

件下,土壤蔗糖酶对 BDE-209 或  $Zn^{2+}$  单一污染都表现出较高的敏感性,但随着暴露处理时间的延长,蔗糖酶活性表现出一种适应性的动态变化而趋于稳定。

从表 2 可以看出,与 CK 相比,在处理第 1 天,各浓度的 BDE-209 的处理组对蔗糖酶活性均有促进作用,且这种促进作用随浓度的增高而增强。对于  $Zn^{2+}$  污染,  $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的  $Zn^{2+}$  的处理组对土壤蔗糖酶活性有促进作用,而 500 和  $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的  $Zn^{2+}$  的处理组对土壤蔗糖酶活性则有抑制作用,且这种促进作用随浓度的增高而增强。而各复合污染处理的抑制/促进率分析表明污染物的复合效应并非污染物的简单叠加。但在处理 7 天后,除个别外,

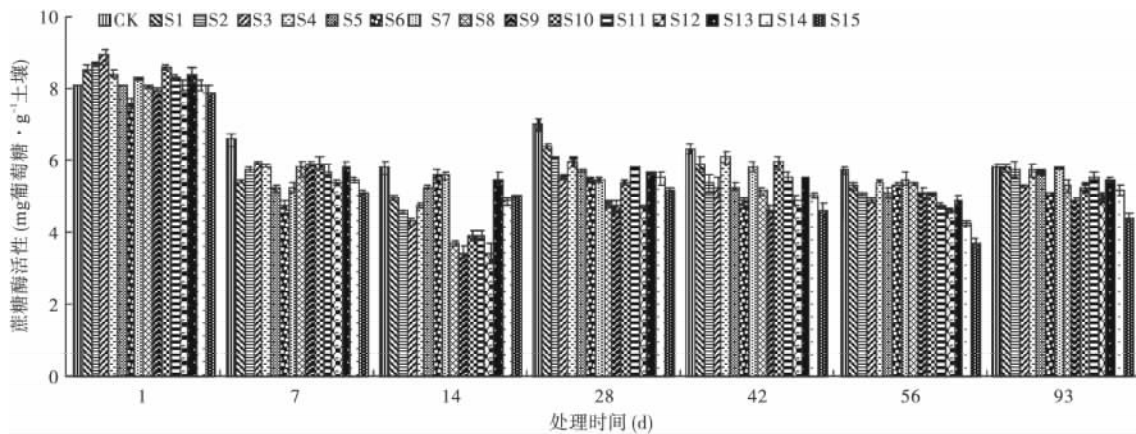


图 1 BDE-209 和  $Zn^{2+}$  复合污染对土壤蔗糖酶活性的影响

Fig. 1 Effects of combined pollution of BDE-209 and  $Zn^{2+}$  on soil saccharase activity

CK 为对照组, S1~S15 为处理组。

表 2 BDE-209 与  $Zn^{2+}$  污染对土壤蔗糖酶活性的抑制/促进率分析

Table 2 Inhibition/promotion efficiency of combined pollution of BDE-209 and  $Zn^{2+}$  on soil saccharase activity

处理	蔗糖酶活性的促进/抑制率						
	1 d	7 d	14 d	28 d	42 d	56 d	93 d
CK	0.00 ab	0.00 c	0.00 g	0.00 e	0.00 e	0.00 e	0.00 bc
S1	0.05 ab	-0.20 b	-0.17 def	-0.09 de	-0.07 cde	-0.08 cd	-0.01 bc
S2	0.07 b	-0.14 bc	-0.26 bede	-0.15 cde	-0.17 abede	-0.12 bcd	-0.01 bc
S3	0.09 b	-0.11 bc	-0.34 abcd	-0.27 abcde	-0.20 abed	-0.16 bed	-0.10 bc
S4	0.04 ab	-0.13 bc	-0.22 cdef	-0.18 cde	-0.04 de	-0.05 cd	-0.03 bc
S5	-0.01 ab	-0.25 ab	-0.10 ef	-0.22 bede	-0.20 abed	-0.12 bed	-0.04 bc
S6	-0.07 a	-0.38 a	-0.03 f	-0.28 abcd	-0.29 ab	-0.06 cd	-0.14 abc
S7	0.02 ab	-0.24 ab	-0.04 f	-0.28 abcde	-0.09 bede	-0.04 cd	-0.01 bc
S8	-0.01 ab	-0.13 bc	-0.56 a	-0.46 ab	-0.22 abed	-0.06 cd	-0.10 bc
S9	-0.01 ab	-0.12 bc	-0.69 a	-0.48 ab	-0.35 a	-0.12 bed	-0.19 ab
S10	0.06 b	-0.11 bc	-0.47 abc	-0.30 abc	-0.07 cde	-0.12 bed	-0.11 bc
S11	0.02 ab	-0.15 bc	-0.47 abc	-0.21 cde	-0.14 abede	-0.20 bed	-0.05 bc
S12	0.00 ab	-0.21 ab	-0.70 a	-0.48 a	-0.29 ab	-0.23 bc	-0.17 abc
S13	0.03 ab	-0.13 bc	-0.06 e	-0.24 abcde	-0.14 abcde	-0.16 bed	-0.06 bc
S14	0.00 ab	-0.19 bc	-0.19 cdef	-0.27 abcde	-0.25 abc	-0.34 ab	-0.12 bc
S15	-0.03 ab	-0.29 ab	-0.16 def	-0.34 abc	-0.36 a	-0.55 a	-0.32 a

同一列含不同字母者表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

各试样皆表现出抑制作用。而最高浓度  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的 BDE-209 与最高浓度  $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的  $\text{Zn}^{2+}$  复合处理组, 蔗糖酶活性始终处于受抑制状态。

### 2.2 BDE-209 和 $\text{Zn}^{2+}$ 污染对土壤过氧化氢酶活性的影响

从图 2 可以看出, 在经过 93 天的暴露处理之后, BDE-209 与  $\text{Zn}^{2+}$  单一污染和复合污染处理土样的过氧化氢酶活性与蔗糖酶活性变化一样, 也经历了“降低-升高-趋于稳定”的过程, 不同的是, 土壤过氧化氢酶活性是在第 42 天有所升高后趋于稳定。

从表 3 可以看出, 与 CK 相比, 在处理第 1 天,  $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的 BDE-209 的处理组对土壤过氧化氢酶

活性有促进作用, 而 10 和  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的 BDE-209 的处理组对土壤过氧化氢酶活性有抑制作用, 且这种抑制作用随浓度的增高而增强。对于  $\text{Zn}^{2+}$  污染, 200 和  $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的  $\text{Zn}^{2+}$  处理组对土壤过氧化氢酶活性有促进作用, 且这种促进作用随浓度的增高而增强, 而  $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的  $\text{Zn}^{2+}$  处理组对土壤过氧化氢酶活性则有抑制作用。而各复合污染处理组对土壤过氧化氢酶活性均有抑制作用。但在处理第 7 天, 各试样却均表现出促进作用。处理 28 天后, 各样本又重新表现出抑制作用, 且越到后期, 受抑制程度越轻。而最高浓度  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的 BDE-209 与最高浓度  $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的  $\text{Zn}^{2+}$  复合处理组, 过氧化氢酶

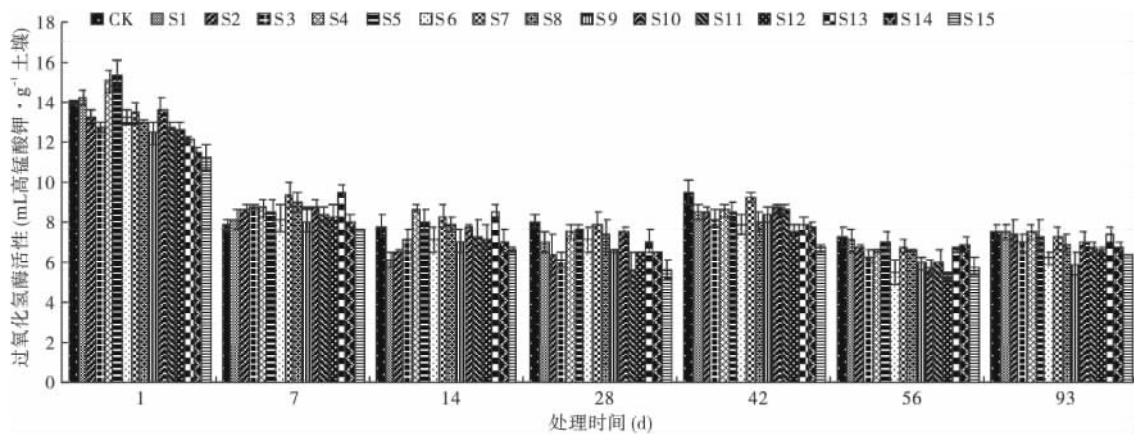


图 2 BDE-209 和  $\text{Zn}^{2+}$  复合污染对土壤过氧化氢酶活性的影响  
 Fig.2 Effects of combined pollution of BDE-209 and  $\text{Zn}^{2+}$  on soil catalase activity  
 CK 为对照组, S1 ~ S15 为处理组。

表 3 BDE-209 与  $\text{Zn}^{2+}$  复合污染对土壤过氧化氢酶活性的抑制/促进率  
 Table 3 Inhibition/promotion efficiency of combined pollution of BDE-209 and  $\text{Zn}^{2+}$  on soil catalase activity

处理	过氧化氢酶活性的促进/抑制率						
	1d	7 d	14 d	28 d	42 d	56 d	93 d
CK	0.00 gh	0.00 ab	0.00 cde	0.00 i	0.00 e	0.00 f	0.00 de
S1	0.01 h	0.03 abc	-0.29 a	-0.16 cdefg	-0.12 cd	-0.03 ef	-0.01 de
S2	-0.06 defg	0.09 abede	-0.19 ab	-0.27 abcd	-0.12 cd	-0.08 edef	-0.03 de
S3	-0.11 cdef	0.10 bede	-0.11 bc	-0.33 abc	-0.16 bc	-0.15 bede	-0.08 cde
S4	0.07 i	0.10 bede	0.10 e	-0.07 ghi	-0.10 cd	-0.10 cdef	-0.02 de
S5	0.09 i	0.08 abcd	0.03 de	-0.05 ghi	-0.12 cd	-0.04 ef	-0.03 de
S6	-0.06 defg	0.04 abc	-0.10 bcd	-0.13 defghi	-0.20 bc	-0.33 ab	-0.13 bcd
S7	-0.04 efgh	0.16 de	0.06 e	-0.02 hi	-0.03 de	-0.07 def	-0.04 de
S8	-0.08 cdef	0.12 cde	0.01 cde	-0.10 efghi	-0.19 bc	-0.10 cdef	-0.09 cde
S9	-0.13 cd	0.03 abc	-0.11 bc	-0.23 bedef	-0.13 cd	-0.22 abcd	-0.14 bcd
S10	-0.04 fgh	0.10 bede	-0.01 cde	-0.08 fghi	-0.09 cde	-0.26 abc	-0.07 cde
S11	-0.10 cdef	0.06 abc	-0.07 bed	-0.44 a	-0.10 cde	-0.22 abcd	-0.12 bed
S12	-0.11 cde	0.05 abc	-0.09 bed	-0.25 abcde	-0.27 ab	-0.38 a	-0.15 bed
S13	-0.16 bc	0.18 e	0.08 e	-0.14 defgh	-0.20 bc	-0.10 cdef	-0.03 de
S14	-0.22 ab	0.03 abc	-0.11 bc	-0.25 abcde	-0.22 bc	-0.06 def	-0.12 bcd
S15	-0.25 a	-0.03 a	-0.19 ab	-0.42 ab	-0.42 a	-0.26 abc	-0.22 a

活性始终处于受抑制状态。

### 2.3 BDE-209 与 Zn<sup>2+</sup> 复合污染对土壤酶活性的联合效应

运用拟合曲线分析 BDE-209 和 Zn<sup>2+</sup> 复合污染对土壤酶活性的联合效应(表 4),从表 4 可以看出,在暴露处理后的第 1~42 天,BDE-209 和 Zn<sup>2+</sup> 复合污染对土壤过氧化氢酶活性影响的线性回归系数均为负值,因此 2 种污染物在这个时间点的交互作用表现为拮抗作用。在后期,其系数为  $8.746 \times 10^{-6}$  和  $9.173 \times 10^{-6}$  2 种污染物的交互作用表现为协同作用。说明 BDE-209 和 Zn<sup>2+</sup> 的复合对土壤过氧化氢酶活性的影响在前期以拮抗作用为主,后期以协同作用为主。对于土壤蔗糖酶活性而言,在暴露处理后的第 1 天和第 42 天,线性回归系数均为 0,这说明复合作用在第 1 天和第 42 天时表现为加合作

用。在暴露处理后的第 7 天和第 56 天,BDE-209 和 Zn<sup>2+</sup> 复合污染对土壤蔗糖酶活性影响的线性回归系数均为负值,因此 2 种污染物在这个时间点的交互作用表现为拮抗作用。在第 14、28 和 93 天,其线性回归系数为正值,两种污染物的交互作用表现为协同作用。因此 2 种酶对 BDE-209 与 Zn<sup>2+</sup> 的响应有所不同。由此可见,BDE-209 和 Zn<sup>2+</sup> 复合污染对这 2 种土壤酶活性的联合效应性质与暴露时间有关。

### 2.4 BDE-209 和 Zn<sup>2+</sup> 污染对土壤呼吸强度的影响

总体来看,单独 BDE-209 处理对土壤呼吸表现为促进作用,但随着处理时间的延长,促进作用强度逐渐减弱,到第 93 天直至出现抑制呼吸的现象。而单独 Zn<sup>2+</sup> 处理以及 BDE-209 与 Zn<sup>2+</sup> 复合处理对土壤呼吸的作用较复杂:在处理的第 1 天,各处理组均表现出显著的促进作用;在第 7 天,200 mg · kg<sup>-1</sup>

表 4 土壤酶活性与 BDE-209 和 Zn 污染物之间的关系

Table 4 Relationship between soil enzymes activity (Y) and combined pollution of BDE-209 and Zn (X)

土壤酶	处理时间(d)	多元回归模型	R <sup>2</sup>	P
Saccharase	1	$Y = 843.938 + 0.256X_{BDE-209} - 0.580X_{Zn}$	0.680	<0.05
	7	$Y = 578.649 + 1.490X_{BDE-209} - 0.22X_{Zn} - 0.01X_{BDE-209}X_{Zn}$	0.647	<0.05
	14	$Y = 500.749 - 0.280X_{BDE-209} - 0.098X_{Zn} + 0.01X_{BDE-209}X_{Zn}$	0.681	<0.05
	28	$Y = 620.003 - 0.604X_{BDE-209} - 0.135X_{Zn} + 0.01X_{BDE-209}X_{Zn}$	0.685	<0.05
	42	$Y = 599.470 - 0.579X_{BDE-209} - 0.119X_{Zn}$	0.792	<0.05
	56	$Y = 536.976 - 0.400X_{BDE-209} - 0.033X_{Zn} - 0.01X_{BDE-209}X_{Zn}$	0.827	<0.05
	93	$Y = 603.086 - 0.564X_{BDE-209} - 0.95X_{Zn} + 1.941 \times 10^{-5}X_{BDE-209}X_{Zn}$	0.604	<0.05
Catalase	1	$Y = 14.264 - 0.018X_{BDE-209} - 0.01X_{Zn} - 1.546 \times 10^{-6}X_{BDE-209}X_{Zn}$	0.655	<0.05
	7	$Y = 8.597 + 0.006X_{BDE-209} - 1.307 \times 10^{-6}X_{BDE-209}X_{Zn}$	0.656	<0.05
	14	$Y = 7.576 + 0.01X_{BDE-209} - 8.971 \times 10^{-6}X_{BDE-209}X_{Zn}$	0.695	<0.05
	28	$Y = 7.463 - 0.09X_{BDE-209} - 0.001X_{Zn} - 6.947 \times 10^{-7}X_{BDE-209}X_{Zn}$	0.676	<0.05
	42	$Y = 8.956 - 0.007X_{BDE-209} - 0.001X_{Zn} - 4.778 \times 10^{-5}X_{BDE-209}X_{Zn}$	0.765	<0.05
	56	$Y = 7.035 - 0.004X_{BDE-209} - 0.001X_{Zn} + 8.746 \times 10^{-6}X_{BDE-209}X_{Zn}$	0.623	<0.05
	93	$Y = 7.691 - 0.005X_{BDE-209} - 0.02X_{Zn} + 9.173 \times 10^{-6}X_{BDE-209}X_{Zn}$	0.778	<0.05

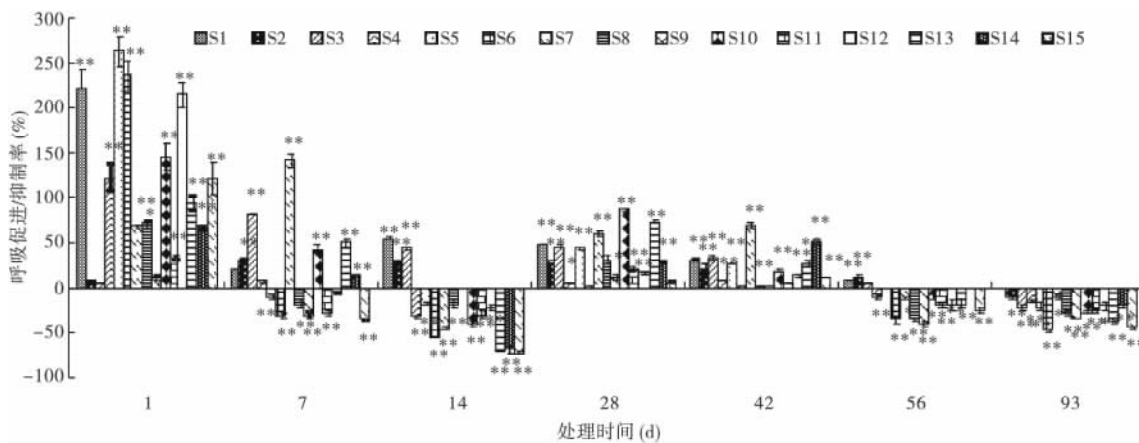


图 3 BDE-209 和 Zn<sup>2+</sup> 复合污染对土壤呼吸强度的影响

Fig.3 Effects of combined pollution of BDE-209 and Zn<sup>2+</sup> on soil respiration

\*P < 0.05; \*\*P < 0.01. CK 为对照组, S1~S15 为处理组。

土壤呼吸的作用较复杂: 在处理的第 1 天, 各处理组均表现出显著的促进作用; 在第 7 天,  $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Zn}^{2+}$  及其与不同浓度的 BDE-209 的复合处理组对土壤呼吸表现为促进作用, 而  $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Zn}^{2+}$ 、 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Zn}^{2+}$  及其分别与不同浓度的 BDE-209 的复合处理组对土壤呼吸则表现为抑制作用; 在第 14 天, 单独  $\text{Zn}^{2+}$  处理以及 BDE-209 与  $\text{Zn}^{2+}$  复合处理整体表现为显著的抑制作用; 在第 28 ~ 42 天, 各处理组整体上表现出显著的促进作用; 处理的第 56 ~ 93 天, 整体表现为显著的抑制作用(图 3)。

### 3 讨论

在本研究中, 从整体上看, 土壤蔗糖酶和过氧化氢酶活性变化与 BDE-209 与  $\text{Zn}^{2+}$  复合污染物的浓度与暴露时间有关。BDE-209 作为一种有机污染物, 有研究表明, 其在进入土壤后在光照、化学和生物因素作用下被降解, 且在代谢过程中会产生比十溴联苯醚更大毒性三、五、六等低溴同系物(万斌等 2011), 从而对微生物体产生更加严重的损伤(He *et al.* 2006), 使得土壤中的酶活发生变化(盛宇等 2010)。 $\text{Zn}^{2+}$  是生物体生长的必须元素, 但过量  $\text{Zn}^{2+}$  会对生物体的新陈代谢产生影响进而影响土壤酶活性(Cretoiou *et al.* 2013)。此外,  $\text{Zn}^{2+}$  还能够影响微生物对碳源的利用, 通过影响微生物的丰富度和均匀度改变土壤微生物的群落结构(滕应等 2003; 陈世宝等 2013) 和土壤酶活性(Kuperman *et al.* 1997)。在本研究中, 所有处理都置于  $30^\circ\text{C}$  暗室恒温培养, 除了取样时短时暴露于光下, 光降解的程度应该是非常低的。实验期间对各处理组的 BDE-209 和 Zn 的浓度进行了测定, Zn 的实际测得值在投加量 90% ~ 120% 的范围内, BDE-209 测得值为初始投加量的 75% ~ 85% 左右, 只比 78% ~ 86% 的回收率实验略低, 同时在样品中未能检测到其他低溴代的 PBDEs, 这与朱崑等(2009)的研究结果相似(添加 BDE-209 的土壤暗室培养 45 天内, 发现 BDE209 未被降解), 此外, 邹梦遥等(2010)的研究也表明, 在土壤及沉积环境中 BDE-209 的微生物可降解程度极低, 其中 BDE-209 浓度的降低主要是由于土壤有机质的吸附, 导致可抽提态的降低。而在有机物与重金属复合污染体系中, 污染物之间可能发生的复杂反应(Zhou *et al.* 2001; Martinez *et al.* 2007; 唐美珍等 2010), 以及污染物对生物体正常生理代谢相关过程的影响, 最终产生复杂的复合

效应。因此, 本研究中, 应可判断两种酶活的变化是由 BDE-209 和  $\text{Zn}^{2+}$  影响所致。而运用二次多项式拟合十溴联苯醚和锌复合污染对两种酶的影响结果与有关类似复合污染研究报道的高度拟合有所差异(Wang *et al.* 2011; Zhang *et al.* 2012), 可能是由于  $\text{Zn}^{2+}$  的毒性相比 Hg、Cu 等重金属弱, 因而具有更加复杂的复合效应。

污染胁迫会通过影响微生物的代谢功能使微生物生物量、微生物群落的大小和结构发生变化, 以致呼吸作用受到影响, 但不同污染物对土壤呼吸的影响规律并非一致, 且在不同的时期, 受到的影响不同(王秀丽等, 2003)。对于复合污染, 胡著邦等(2005)的研究结果表明, 在 90 d 的处理过程中, 除草剂苯噻磺隆和镉对土壤呼吸强度是先抑制, 处理 28 天后抑制程度才减轻, 呼吸强度开始恢复, 且在整个过程中, 始终是复合污染的影响程度最大。在本研究中, 单独 BDE-209 处理对土壤呼吸表现为促进作用, 且随着处理时间的延长其强度逐渐减弱直到第 93 天出现抑制呼吸。而单独  $\text{Zn}^{2+}$  处理、BDE-209 与  $\text{Zn}^{2+}$  复合暴露处理下土壤呼吸强度却呈现出“促进-抑制-促进-抑制”的规律, 但无论是促进作用还是抑制作用, 其强度随时间而减弱。因此, 研究结果的差异可能与污染物种类、污染物浓度以及土壤类型的差异有关。

### 参考文献

- 陈世宝, 林 蕾, 魏 威, 等. 2013. 基于不同测试终点的土壤锌毒性阈值及预测模型. 中国环境科学, 33(5): 922 - 930.
- 胡著邦, 汪海珍, 吴建军, 等. 2005. 镉与苯噻磺隆除草剂单一污染和复合污染土壤的微生物生态效应. 浙江大学学报, 31(2): 151 - 156.
- 关松荫. 1986. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社.
- 罗 勇. 2007. 电子废物不当处置环境中多溴联苯醚和重金属污染研究. 广州: 中山大学.
- 盛 宇, 徐 军, 刘新刚, 等. 2010. 氯噻磺隆对土壤微生物群落结构的影响. 应用生态学报, 21(11): 2992 - 2996.
- 唐美珍, 郭正元. 2010. 代森锰锌对土壤微生物种群及呼吸作用的影响. 土壤通报, 41(6): 1365 - 1369.
- 滕 应, 黄昌勇, 龙 健, 等. 2003. 铅锌银尾矿污染区土壤微生物区系及主要生理类群研究. 农业环境科学学报, 22(4): 408 - 411.
- 万 斌, 郭良宏. 2011. 多溴联苯醚的环境毒理学研究进展. 环境化学, 30(1): 143 - 152.
- 王秀丽, 徐建民, 姚槐应. 2003. 重金属铜、锌、铬、铅复合污染对土壤环境微生物群落的影响. 环境科学学报, 23(1): 22 - 27.

- 郑洪元,张德生. 1982. 土壤动态生物化学研究法. 北京: 科学出版社.
- 朱 崑,张 旸,俞 晟,等. 2009. 十溴联苯醚对土壤中微生物群落结构及土壤潜在硝化功能的影响. 农业环境科学学报, **28**(8): 1613 - 1617.
- 邹梦遥,冉 勇. 2010. 土壤中十溴联苯醚的厌氧、好氧降解研究//中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 中国环境科学出版社: 3883 - 3888.
- Cretoiu MS, Korthals GW, Visser JHM, *et al.* 2013. Chitin amendment increases soil suppressiveness toward plant pathogens and modulates the actinobacterial and oxalobacteraceal communities in an experimental agricultural field. *Applied and Environmental Microbiology*, **79**: 5291 - 5301.
- He J, Robrock KR, Alvarez-Cohen L. 2006. Microbial reductive debromination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs). *Environmental Science & Technology*, **40**: 4429 - 4434.
- Kuperman RG, Carreiro MM. 1997. Soil heavy metal concentrations, microbial biomass and enzyme activities in a contaminated grassland ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, **29**: 179 - 190.
- Martinez CE, Yáñez C, Yoon S, *et al.* 2007. Biogeochemistry of metalliferous peats: Sulfur speciation and depth distributions of *dsrAB* genes and Cd, Fe, Mn, S, and Zn in soil cores. *Environmental Science & Technology*, **41**: 5323 - 5329.
- Ni HG, Zeng H, Tao S, Zeng E. 2010. Environmental and human exposure to persistent halogenated compounds derived from e-waste in China Environ. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **29**: 1237 - 1247.
- Wang Q, He M, Wang Y. 2011. Influence of combined pollution of antimony and arsenic on culturable soil microbial populations and enzyme activities. *Ecotoxicology*, **20**: 9 - 19.
- Wardle DA, Parkinson D. 1990. Effect of three herbicides on soil microbial biomass and activity. *Plant and Soil*, **122**: 21 - 28.
- Zhang W, Zhang M, An S, *et al.* 2012. Ecotoxicological effects of decabromodiphenyl ether and cadmium contamination on soil microbe and enzyme. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **82**: 71 - 79.
- Zhou DM, Wang SQ, Chen HM. 2001. Interaction of Cd and citric acid, EDTA in red soil. *Journal of Environmental Sciences*, **13**: 153 - 156.

---

作者简介 付玲芳,女,1987年生,硕士,助理工程师,研究方向为环境微生物学。E-mail: 313283877@qq.com  
责任编辑 张 敏

---