

佳乐麝香与镉污染对土壤微生物和酶活性的影响

赵芷玉, 律泽, 魏炜, 韩晓墨

引用本文:

赵芷玉, 律泽, 魏炜, 等. 佳乐麝香与镉污染对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1738–1745.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0277>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

佳乐麝香与镉复合污染对土壤微生物群落功能和丰度的影响

律泽, 胡筱敏, 安婧, 魏炜

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 66–75 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1134>

外源Cd胁迫对红壤性水稻土微生物量碳氮及酶活性的影响

郭碧林, 陈效民, 景峰, 张晓玲, 杨之江, 刘巍, 刘文心

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1850–1855 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0344>

纳米二氧化钛对佳乐麝香所引起的沙蚕(*Perinereis aibuhitensis*)神经毒性的影响

张倩茹, 姜丽思, 牟文燕, 王建美, 李斯雯

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 665–672 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1530>

铜胁迫下磺胺嘧啶对土壤呼吸及酶活性影响分析

李明珠, 廖强, 董远鹏, 刘喜娟, 孟子霖, 李梦红, 刘爱菊

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2121–2128 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0044>

高效氟吡甲禾灵对潮土微生物呼吸及酶活性的影响

程亚南, 王振东, 任秀娟, 郭彦玲, 刘根源

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 1026–1033 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1096>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵芷玉, 律泽, 魏炜, 等. 佳乐麝香与镉污染对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1738–1745.

ZHAO Z Y, LÜ Z, WEI W, et al. Joint effects of galaxolide and cadmium on the quantity of soil microorganisms and enzyme activities[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(8): 1738–1745.



开放科学 OSID

佳乐麝香与镉污染对土壤微生物和酶活性的影响

赵芷玉, 律泽*, 魏炜, 韩晓墨

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 沈阳 110168)

摘要:为探究有机污染物与重金属复合污染对土壤中微生物的影响,以佳乐麝香(HHCB)和镉(Cd)为研究对象,研究 HHCB 与 Cd 污染对土壤中微生物数量和酶活性的影响。结果表明,HHCB 单一及与 Cd 复合污染培养时间为 1 d 时,对细菌表现为抑制作用,培养时间为 80 d 时,表现为促进作用(100 mg·kg⁻¹ HHCB 的单一污染除外);对真菌生长均表现为促进作用,对放线菌生长均表现为抑制作用。细菌基因拷贝数随着 HHCB 浓度的升高而增加,而真菌基因拷贝数和放线菌基因拷贝数随着 HHCB 浓度的升高而降低。HHCB 单一及与 Cd 复合污染对脲酶活性(1 d 时)表现为抑制作用(800 mg·kg⁻¹ HHCB 的污染除外),对脲酶活性(80 d 时)、酸性磷酸酶活性(1 d 时)和蔗糖酶活性也均表现为抑制作用。培养时间为 80 d 时,400、800 mg·kg⁻¹ HHCB 的单一及与 Cd 复合污染对酸性磷酸酶活性表现为促进作用。

关键词:佳乐麝香;镉;微生物数量;土壤酶活性

中图分类号:X53;X172 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)08-1738-08 doi:10.11654/jaes.2021-0277

Joint effects of galaxolide and cadmium on the quantity of soil microorganisms and enzyme activities

ZHAO Zhiyu, LÜ Ze*, WEI Wei, HAN Xiaomo

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: To investigate the effect of organic and heavy metal pollution on microorganisms in soil, the effects of galaxolide (HHCB) and Cd pollution on the number and activity of microorganisms in soil were investigated. The results showed that HHCB alone and combined with Cd contamination showed inhibitory effects on bacteria at 1 d of incubation and promotional effects on bacteria (except during single contamination with 100 mg·kg⁻¹ HHCB) at 80 d of incubation, promotional effects on fungal growth, and inhibitory effects on *Actinomycete* growth. Bacterial 16S rRNA gene copy number increased with increasing HHCB concentration, whereas fungal 18S rRNA gene copy number and *Actinomycete* copy number decreased with increasing HHCB concentration. HHCB contamination alone and in combination with Cd showed an inhibitory effect on urease activity (1 d and 80 d) (except for contamination with 800 mg·kg⁻¹ HHCB), sucrase activity, and acid phosphatase activity (1 d). At 80 d of incubation, 400 mg·kg⁻¹ and 800 mg·kg⁻¹ HHCB alone and in combination with Cd showed a promotive effect on acid phosphatase activity.

Keywords: galaxolide (HHCB); cadmium (Cd); microorganism count; soil enzyme activity

佳乐麝香(HHCB)是一种具有特殊香味的疏水性多环类有机物^[1],现已作为工业香料被广泛地应用

于日用化工产业,如香水、洗发水、沐浴露、肥皂和洗衣粉等产品中^[2],且随着污水灌溉和污泥农田施用,在

收稿日期:2021-03-08 录用日期:2021-06-09

作者简介:赵芷玉(1996—),辽宁鞍山人,硕士研究生,从事土壤污染研究。E-mail:1602513683@qq.com

*通信作者:律泽 E-mail:lvze_2006@163.com

基金项目:辽宁省教育厅基础研究项目(Z2219029)

Project supported: The Basic Research Project of Liaoning Provincial Educational Department, China (Z2219029)

土壤中浓度也越来越高。HORII等^[3]对美国 Kentucky 和 Georgia 的两座大型污水处理厂进水中的 HHCB 残留浓度分别进行了检测,结果表明在进水口中 HHCB 的残留浓度最高达 $7\,000\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。GUERRA 等^[4]对美国的两座大型污水处理厂排出的污泥进行检测,发现 HHCB 含量已达到 $14\,300\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。陈多宏等^[5]发现日用化妆品生产工厂排放的污泥中 HHCB 浓度已达到 $566\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随着 HHCB 在自然环境中浓度增高,生态风险也越来越大,导致其生态毒理效应增强。HHCB 是潜在的内分泌干扰物,李明等^[6]发现 HHCB 可造成斑马鱼胚胎甲状腺激素分泌和调节的紊乱。HHCB 的遗传毒性效应主要表现在生殖能力方面,MELMED^[7]发现在动物试验中,麝香酮可以使雄性动物生殖器官萎缩。HHCB 对生物的生理生态效应主要是对其生态结构有影响,姜丽思等^[8]发现较低剂量的 HHCB 胁迫就能够导致萝卜根尖基因组 DNA 损伤,且随浓度升高损伤加重。

目前,重金属污染日益严重,随着公众的环境意识提高,重金属污染受到越来越多的关注^[9]。土壤中的 Cd 可移动性强,且具有可积累性,积累到一定剂量就会影响人体健康。由于土壤中 HHCB 与 Cd 均可通过污水灌溉及污泥农田施用途径输入土壤,土壤受二者复合污染的问题也日益突出。

目前针对 HHCB 与 Cd 复合污染的研究大多集中于水生生物和陆生生物,对土壤微生物方面的研究相对较少。陈翠红^[10]研究发现多环麝香和 Cd 对小麦根伸长和芽伸长具有明显的抑制作用,且存在剂量-效应关系。ZHANG 等^[11]研究发现 HHCB 和 Cd 对斑马鱼抗氧化系统具有联合效应,试验初期为 Cd 起决定性作用,而在其余的暴露时间内,HHCB 起主要作用,斑马鱼暴露于 HHCB 时,其总蛋白减少,可能是斑马鱼损伤的重要原因。

在土壤微生物生态系统中,微生物数量、酶活性等因素是一个随着环境变化而变化的动态过程。由于土壤酶主要来自土壤微生物的生命活动,污染物的胁迫会导致土壤中微生物种群活细胞的数量和组成发生变化,因此,也影响了土壤微生物的活性。本研究以 HHCB 和 Cd 为污染物,在实验室培养 80 d 后,分

别研究二者单一及复合污染下对土壤中微生物数量和土壤酶活性的影响,进而研究二者复合污染对土壤的生态毒理效应,可为复合污染土壤的生物修复提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采集于辽宁省沈阳市石佛寺灌渠渠首 ($42^{\circ}08.611'\text{ N}$, $123^{\circ}20.705'\text{ E}$),取农田表层 (0~20 cm) 土壤。土壤理化性质如表 1 所示。

1.2 供试药品

HHCB 标准样品购于英国 Promochem 公司,纯度为 75%,其分子式均为 $\text{C}_{18}\text{H}_{26}\text{O}$ 。国产分析纯 $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 购于国药集团化学试剂有限公司。

1.3 试验方法

本试验采用微宇宙实验法,对培养 80 d 后的土壤中微生物数量以及酶活性进行研究。新鲜土壤采集并拣去植物残体后装于聚乙烯塑料袋中保鲜,带回实验室过 2 mm 筛。称取 200 g (以干土计) 土壤于 500 mL 的塑料烧杯中,调节含水量至田间最大持水量的 60% 左右,用具有透气作用的薄膜封口,防止水分过量蒸发和空气中的菌体进入,并将其置于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱中避光预培养 7 d。预培养结束后,采用土壤染毒法进行染毒。

将过 2 mm 筛后的供试土壤采用二因素分别为 4 水平 (HHCB 浓度分别为 0、100、400 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 800 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 2 水平 (Cd 浓度分别为 0 和 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的完全组合试验。分为 CK、H1、H2、H3、H4、H5、H6、H7 共 8 个处理组 (表 2),每个处理重复 3 次。

将各处理组的土样充分混匀后,以 80 d 作为培养周期,将其置于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温培养箱中,在整个过程中

表 2 不同处理中 Cd 与 HHCB 浓度情况 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 Concentrations of Cd and HHCB in different treatments ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

污染物 Contaminants	CK	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
Cd	0	0	0	0	10	10	10	10
HHCB	0	100	400	800	0	100	400	800

表 1 土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties

土壤类型 Soil type	pH	含水量 Water content/%	有机质 Organic matter/%	速效氮 Available N/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	HHCB/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Cd/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
棕壤	5.92	15.32	2.48	38	158	17.5	21.23	0.68

保持土壤湿度在最大持水量的60%左右,每2~3 d调节一次土壤含水量,使培养过程中土壤含水量保持恒定。于培养第1 d和第80 d采集土壤,分别测定土壤中细菌、真菌和放线菌的数量以及土壤脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶的活性。

1.4 测定方法

1.4.1 土壤微生物测定方法

(1)可培养微生物的测定方法:采用固体平板稀释涂布培养计数法,其中细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基,真菌采用马丁培养基,放线菌采用高氏培养基。

(2)微生物总数的测定方法采用荧光qPCR法。DNA的提取:使用Fast DNA-SPIN KitForSoil试剂盒,从0.5 g土壤中提取基因组DNA,并将其溶于50 μ L水中,保存温度为-20 $^{\circ}$ C。测定基因的拷贝数:采用荧光定量qPCR测定细菌16S rRNA、真菌18S rRNA和放线菌特异基因的拷贝数(以干土计)。制作标准曲线,样品中的基因拷贝数根据所得标准曲线计算,然后换算成每克干土的基因拷贝数。

1.4.2 土壤酶活性测定方法

土壤脲酶活性测定采用苯酚钠法;土壤蔗糖酶活性测定采用3,5-二硝基水杨酸法;土壤酸性磷酸酶活性测定采用对硝基酚比色法。

1.5 数据分析

试验数据采用DPS 7.5进行处理,结果以平均值 $\pm$ 标准差表示,利用多因素方差分析中Turkey多重比较检验不同处理间的结果差异显著性。显著性水平为 $P<0.05$,极显著水平为 $P<0.01$ 。试验作图采用Origin 8。

2 结果与分析

2.1 HHCB与Cd污染对土壤中微生物数量的影响

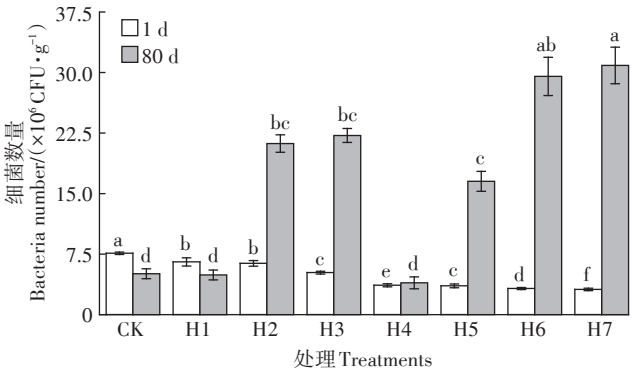
土壤微生物对土壤的改变十分敏感^[12],因此可作为土壤质量的一个重要指标,在讨论复合污染对土壤质量影响时,可通过测定微生物的数量进行土壤质量

的评定^[13]。

2.1.1 HHCB和Cd污染对可培养细菌数的影响

不同处理可培养细菌数方差分析结果见图1,培养时间为1 d时,与CK相比,所有处理可培养细菌数均表现为显著降低($P<0.05$)。HHCB单一污染对细菌生长表现为抑制作用,H1、H2和H3中细菌数分别显著低于CK 15.09%、15.99%和30.98%,且随着浓度的增加,细菌数减少。Cd单一污染对细菌生长呈现出较大的抑制效果,H4处理下细菌数显著低于CK 49.96%。HHCB与Cd复合污染对细菌生长也表现为抑制作用,H5、H6和H7中细菌数分别显著低于CK 27.24%、43.29%和59.32%。

培养时间为80 d时,与CK相比,除H1和H4外,其他处理均表现为差异显著($P<0.05$)。HHCB单一污染对细菌生长表现为促进作用,H2和H3中细菌数分别显著高于CK 3.18倍和3.34倍。HHCB与Cd复合污染对细菌生长也表现为促进作用,H5、H6和H7中细菌数分别显著高于CK 2.25、4.82倍和5.09倍,H7对细菌的促进效果最显著。培养时间为80 d时,各处



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same below

图1 HHCB与Cd污染对可培养细菌数的影响

Figure 1 The influence of HHCB and Cd pollution on the number of cultivable bacteria

表3 细菌、真菌、放线菌引物和PCR条件

Table 3 Bacteria, fungi, actinomycetes primers and PCR conditions

微生物 Microorganisms	引物名称 Primer name	引物 Primer(5'~3')	扩增长度 Amplification length/bp	退火温度 Annealing temperature/ $^{\circ}$ C	引物 Primer(10 pm)/ μ L
细菌	341F	CCTACGGGAGGCAGCAG	418	55	1
	758R	CTACCAGGTATCTAATCC			
真菌	FR1	AICCATTCATCG-GTAIT	390	50	1
	FF390	CGATAACGAACGAGACCT			
放线菌	243F	GGATGAGCCCGCGCCTA	271	56	1
	513R	CGGCCGCGGCTGCTGGACGTA			

理浓度的细菌数均高于培养时间为1 d的细菌数(CK、H1除外),H2、H3、H4、H5、H6和H7分别为培养时间为1 d时的3.33、4.25、1.09、4.64、9.13倍和9.89倍,CK和H1的细菌数分别低于培养时间为1 d时35.80%和24.60%。结果表明,培养时间为1 d时,HHCB与Cd单一及复合污染对细菌生长表现为抑制作用;培养时间为80 d时,HHCB单一及与Cd复合污染对细菌生长表现为促进作用(H1除外)。

2.1.2 HHCB和Cd污染对可培养真菌数的影响

不同处理可培养真菌数方差分析结果见图2,培养时间为1 d时,与CK相比,除H3和H7外,其他处理均表现为差异显著($P<0.05$)。HHCB单一污染对真菌生长表现为促进作用,H1和H2中真菌数分别显著高于CK 2.14倍和1.80倍。Cd单一污染对真菌生长呈现出显著的抑制效果,H4处理下真菌数显著低于CK 85.90%。HHCB与Cd复合污染对真菌生长也表现为促进作用,H5和H6中真菌数分别显著高于CK 4.32倍和3.33倍。

培养时间为80 d时,与CK相比,除H4外,其他处理浓度均表现为差异显著($P<0.05$)。HHCB单一污染对真菌生长表现促进作用,H1、H2和H3中真菌数分别显著高于CK 9.51、4.36倍和4.30倍。HHCB与Cd复合污染对真菌生长表现为促进作用,H5、H6和H7中真菌数分别显著高于CK 10.69、5.62倍和4.14倍。培养时间为80 d时,各处理浓度的真菌数均高于培养时间为1 d的可培养真菌数,CK、H1、H2、H3、H4、H5、H6和H7分别高于培养时间为1 d时的12.78%、175.00%、41.09%、169.00%、346.00%、43.70%、16.50%和431.00%。试验结果表明,HHCB单一及与Cd复合污染对真菌生长表现为促进作用。

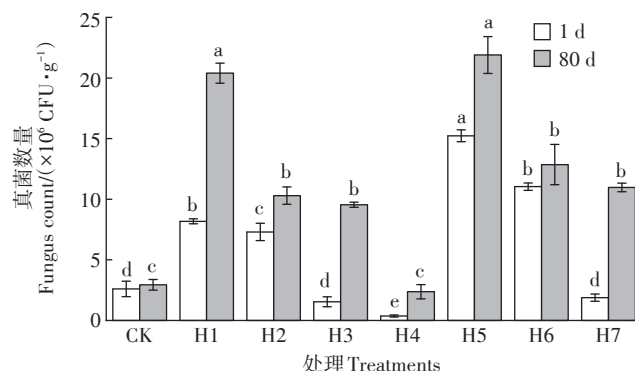


图2 HHCB与Cd污染对可培养真菌数的影响

Figure 2 The influence of HHCB and Cd pollution on the number of cultivable fungi

2.1.3 HHCB和Cd污染对可培养放线菌数的影响

不同处理可培养放线菌数方差分析结果见图3,培养时间为1 d时,与CK相比,所有处理浓度均表现为差异显著($P<0.05$)。HHCB单一污染对放线菌生长表现抑制作用,H1、H2和H3处理的放线菌数分别显著低于CK 57.22%、76.88%和91.32%。Cd单一污染对放线菌生长表现抑制作用,H4处理的放线菌数显著低于CK 80.97%。HHCB与Cd复合污染对放线菌生长也表现抑制作用,H5、H6和H7处理的放线菌数分别显著低于CK 63.38%、79.38%和90.21%。

培养时间为80 d时,与CK相比,所有的处理均表现为差异显著($P<0.05$)。HHCB单一污染对放线菌生长表现为抑制作用,H1、H2和H3处理的放线菌数分别显著低于CK 82.90%、97.10%和98.70%。Cd单一污染对放线菌生长表现为抑制作用,H4处理的放线菌数显著低于CK 78.78%。HHCB与Cd复合污染对放线菌生长表现为抑制作用,H5、H6和H7处理的放线菌数分别显著低于CK 76.50%、94.50%和98.90%。培养时间为80 d时,各处理浓度的放线菌数均低于培养时间为1 d的放线菌数,CK、H1、H2、H3、H4、H5、H6和H7分别低于培养时间为1 d时的16.50%、67.20%、89.10%、89.20%、6.67%、35.07%、67.05%和38.66%。试验结果表明,HHCB与Cd单一及复合污染对放线菌生长均表现为抑制作用。

2.1.4 HHCB和Cd污染对微生物基因拷贝数的影响

(1)细菌16S rRNA基因拷贝数

经方差分析后可知,与CK相比,只有H7表现为差异显著($P<0.05$)。由图4可知,在H7处理下,细菌16S rRNA基因拷贝数显著高于CK 76.98%。HHCB单一及与Cd复合污染(除H7外),不同浓度的HHCB

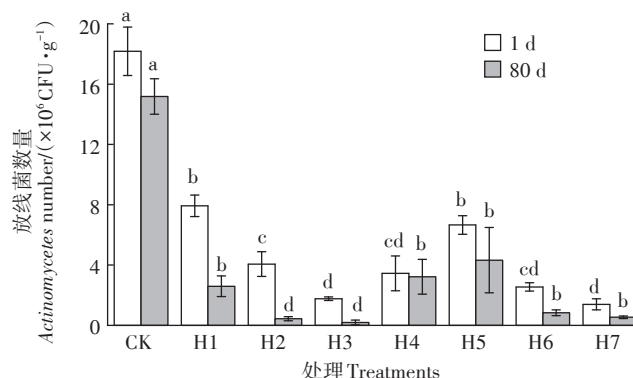


图3 HHCB与Cd污染对可培养放线菌数的影响

Figure 3 The influence of HHCB and Cd pollution on the number of cultivable Actinomycetes

处理细菌 16S rRNA 基因拷贝数均没有显著差异($P>0.05$),但细菌基因拷贝数随着 HHCB 浓度的增加而增加。

(2) 真菌 18S rRNA 基因拷贝数

经方差分析后可知,与 CK 相比,只有 H4 表现为差异显著($P<0.05$)。由图 5 可知,Cd 单一污染下,H4 处理的真菌 18S rRNA 基因拷贝数显著高于 CK 1.07 倍。HHCB 单一及与 Cd 复合污染下,不同浓度的 HHCB 处理真菌 18S rRNA 基因拷贝数均没有显著差异($P>0.05$),但真菌基因拷贝数随着 HHCB 浓度的增加而减少。

(3) 放线菌基因拷贝数

经方差分析后可知,与 CK 相比,所有的处理均表现为差异显著($P<0.05$)。由图 6 可知,HHCB 单一污染对放线菌生长表现为抑制作用,H1、H2 和 H3 处理的放线菌基因拷贝数分别显著低于 CK 38.59%、79.56% 和 84.78%。Cd 单一污染对放线菌生长表现

为抑制作用,H4 处理的放线菌基因拷贝数显著低于对照组 80.5%。HHCB 与 Cd 复合污染对放线菌生长表现为抑制作用,H5、H6 和 H7 处理的放线菌基因拷贝数分别显著低于 CK 46.80%、68.02% 和 92.29%。试验结果表明,HHCB 与 Cd 单一及复合污染对放线菌表现为抑制作用,且放线菌基因拷贝数随着 HHCB 浓度的增加而减少。

2.2 HHCB 与 Cd 污染对土壤酶活性的影响

土壤酶来源于土壤根系微生物的生命活动,能够有效地催化土壤根系活动^[14]。土壤酶能够催化土壤内复杂的生化反应,例如腐殖质的分解合成以及有机物的水解与转化等,因此土壤酶活性反映了特定土壤条件下生化过程的相对强弱^[15]。通过测定相应酶的活性,能够间接了解物质在土壤中的代谢情况,因此可通过测定土壤酶活性来判断土壤修复的程度。

2.2.1 HHCB 与 Cd 污染对脲酶活性的影响

不同处理脲酶活性方差分析结果见图 7,培养时间为 1 d 时,与 CK 相比,除 H3 和 H7 外,其他处理浓度均表现为差异显著($P<0.05$)。HHCB 单一污染对脲酶活性表现为抑制作用,H1 和 H2 处理的脲酶活性分别显著低于 CK 11.67% 和 28.08%。Cd 单一污染对脲酶活性表现为促进作用,H4 处理的脲酶活性显著高于 CK 67.17%。HHCB 与 Cd 复合污染对脲酶活性也表现为抑制作用,H5 和 H6 处理的脲酶活性的分别显著低于 CK 14.50% 和 26.24%。

培养时间为 80 d 时,与 CK 相比,所有的处理均表现为差异显著($P<0.05$)。HHCB 单一污染对脲酶活性表现为抑制作用,H1、H2 和 H3 处理的脲酶活性分别显著低于 CK 17.60%、32.25% 和 19.85%。Cd 单一污染对脲酶活性表现为促进作用,H4 处理的脲酶活

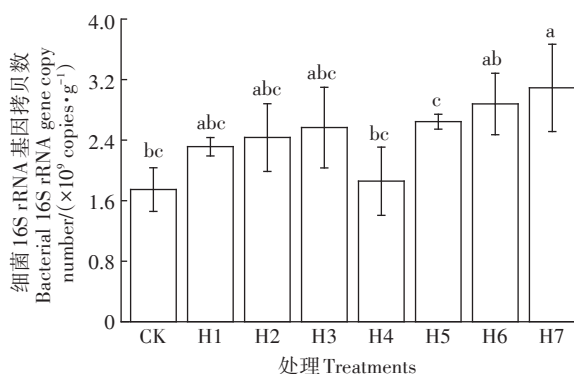


图4 HHCB与Cd污染对细菌16S rRNA基因拷贝数的影响
Figure 4 The influence of HHCB and Cd contamination on the copy number of bacterial 16S rRNA gene

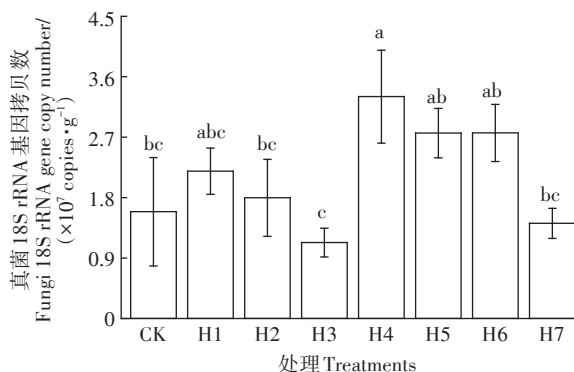


图5 HHCB与Cd污染对真菌18S rRNA基因拷贝数的影响
Figure 5 The influence of HHCB and Cd contamination on the copy number of fungi 18S rRNA gene

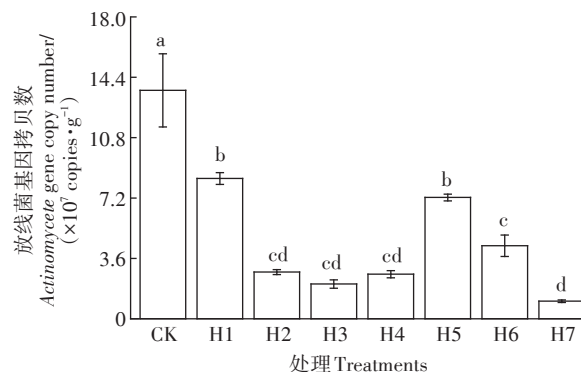


图6 HHCB与Cd污染对放线菌基因拷贝数的影响
Figure 6 The influence of HHCB and Cd pollution on gene copy number of Actinomycetes

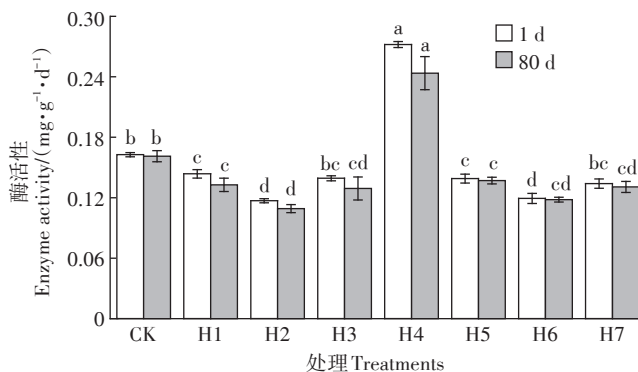


图7 HHCB与Cd污染对脲酶活性的影响

Figure 7 The influence of HHCB and Cd treatment on the enzyme activity of urease

性显著高于CK 50.42%。HHCB与Cd复合污染对脲酶活性表现为抑制作用,H5、H6和H7处理的脲酶活性分别显著低于CK 15.01%、26.70%和18.9%。培养时间为80 d时,各处理浓度的脲酶活性均低于培养时间为1 d的脲酶活性,CK、H1、H2、H3、H4、H5、H6和H7分别低于培养时间为1 d时的0.90%、7.50%、6.60%、7.20%、9.85%、1.40%、0.60%和2.46%。试验结果表明,培养时间为1 d时,HHCB单一及与Cd复合污染对脲酶活性表现为抑制作用(H3、H7除外)。培养时间为80 d时,HHCB单一及与Cd复合污染对脲酶活性表现为抑制作用。

2.2.2 HHCB与Cd污染对蔗糖酶活性的影响

不同处理下蔗糖酶活性方差分析结果见图8,培养时间为1 d时,与CK相比,所有处理浓度均表现为差异显著($P<0.05$)。HHCB单一污染对蔗糖酶活性表现为抑制作用,H1、H2和H3处理的蔗糖酶活性分别显著低于CK 22.90%、54.20%和64.13%。Cd单一污染对蔗糖酶活性表现为抑制作用,H4处理的蔗糖酶活

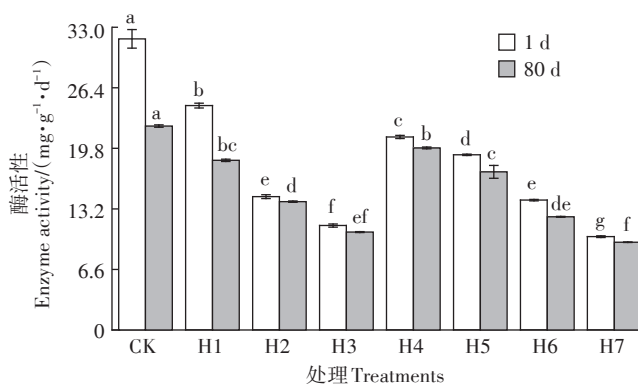


图8 HHCB与Cd污染对蔗糖酶活性的影响

Figure 8 The influence of HHCB and Cd treatment on the enzyme activity of sucrose

性显著低于CK 33.72%。HHCB与Cd复合污染对蔗糖酶活性表现为抑制作用,H5、H6和H7处理的蔗糖酶活性分别显著低于CK 39.82%、55.39%和67.90%。

培养时间为80 d时,与CK相比,所有的处理均表现为差异显著($P<0.05$)。HHCB单一污染对蔗糖酶活性表现为抑制作用,H1、H2和H3处理的蔗糖酶活性分别显著低于CK 16.80%、37.01%和51.98%。Cd单一污染对蔗糖酶活性表现为抑制作用,H4处理的蔗糖酶活性显著低于CK 10.70%。HHCB与Cd复合污染对蔗糖酶活性表现为抑制作用,H5、H6和H7处理的蔗糖酶活性分别显著低于CK 22.40%、44.49%和56.97%。培养时间为80 d时,各处理浓度下的蔗糖酶活性均低于培养时间为1 d的蔗糖酶活性,CK、H1、H2、H3、H4、H5、H6和H7分别低于培养时间为1 d时的29.90%、24.40%、3.70%、6.20%、5.60%、9.70%、12.80%和5.90%。试验结果表明,HHCB与Cd单一及复合污染对蔗糖酶活性均表现为抑制作用。

2.2.3 HHCB与Cd污染对酸性磷酸酶活性的影响

不同处理下酸性磷酸酶活性方差分析结果见图9,培养时间为1 d时,与CK相比,所有处理浓度均表现为差异显著($P<0.05$)。HHCB单一污染对酸性磷酸酶活性表现为抑制作用,H1、H2和H3处理的酸性磷酸酶活性分别显著低于CK 24.20%、22.40%和16.48%。Cd单一污染对酸性磷酸酶活性表现为抑制作用,H4处理的酸性磷酸酶活性显著低于CK 13.76%。HHCB与Cd复合污染对酸性磷酸酶活性表现为抑制作用,H5、H6和H7处理的酸性磷酸酶活性分别显著低于CK 31.13%、13.39%和12.87%。

培养时间为80 d时,与CK相比所有处理浓度均表现为差异显著($P<0.05$)。HHCB单一污染下,H1

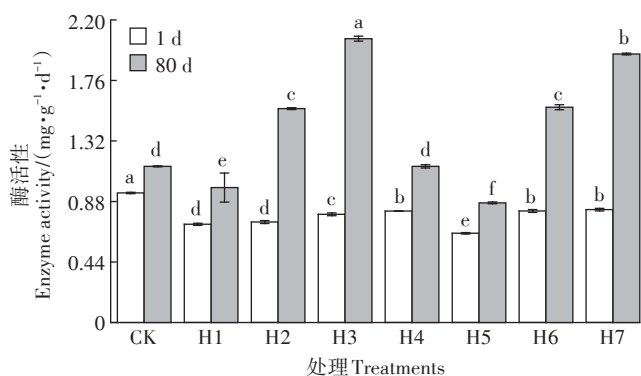


图9 HHCB与Cd污染对酸性磷酸酶活性的影响

Figure 9 The influence of HHCB and Cd treatment on the enzyme activity of acid phosphatase

对酸性磷酸酶活性表现为抑制作用,H2和H3对酸性磷酸酶活性表现为促进作用。H1处理的酸性磷酸酶活性显著低于CK 13.60%,H2和H3处理的酸性磷酸酶活性分别显著高于CK 37.00%和81.70%。HHCB与Cd复合污染下,H5对酸性磷酸酶活性表现为抑制作用,H6和H7对酸性磷酸酶活性表现为促进作用。H5处理的酸性磷酸酶活性显著低于CK 23.40%,H6和H7处理的酸性磷酸酶活性分别显著高于CK 37.80%和71.90%。培养时间为80 d时,各处理浓度的酸性磷酸酶活性均高于培养时间为1 d的酸性磷酸酶活性,CK、H1、H2、H3、H4、H5、H6和H7分别高于培养时间为1 d时的20.50%、37.40%、112.90%、162.30%、40.15%、34.09%、92.99%和137.80%。试验结果表明,培养时间为1 d时,HHCB与Cd单一及复合污染下对酸性磷酸酶活性表现为抑制作用。培养时间为80 d时,HHCB单一及与Cd复合污染对酸性磷酸酶活性表现为促进作用(H1、H5除外),H1和H5对酸性磷酸酶活性表现为抑制作用。

3 讨论

本研究中,HHCB单一及与Cd复合污染对真菌生长表现为促进作用。BARAN等^[16]发现在被有机物污染的土壤中产生的真菌具有降解污染物的能力。微生物适应后,其呼吸强度、发育程度和降解污染物的能力都有所提高。由此推测产生该结果的原因主要是微生物对污染物的适应作用或利用降解后污染物作为碳源和能量。

本研究中,培养时间为1 d时,HHCB与Cd单一及复合污染显著抑制了细菌和放线菌生长,可能是由于HHCB作为一种脂溶性化合物,使细胞膜的通透性发生改变,外部的污染物质更容易侵入微生物细胞,从而抑制微生物细胞生长;而Cd作为常见的重金属毒性物质,能够在HHCB的基础上进一步增加对微生物细胞的毒性^[17]。

本研究中,HHCB单一及与Cd复合污染显著抑制了脲酶和蔗糖酶的活性。该结果可能是由于HHCB与土壤酶分子中的活性部分结合,与底物形成了竞争作用,进而抑制了脲酶的活性^[18];而土壤蔗糖酶可增加土壤中的易溶性营养物质,HHCB作为一种疏水性物质,会降低易溶性的营养物质溶解,且有助于提高Cd²⁺生物有效性,促进土壤对HHCB的吸附固定,进而抑制蔗糖酶活性;在培养时间为80 d时,100 mg·kg⁻¹ HHCB的单一及与Cd复合污染显著抑制酸

性磷酸酶活性,而400、800 mg·kg⁻¹ HHCB的单一及与Cd复合污染则显著促进酸性磷酸酶活性。这可能是由于随着土壤中HHCB浓度的增大,激活了土壤中能够降解HHCB的那部分微生物的活性,从而加快了酶的合成,提高了酶活性^[19]。

HHCB与Cd单一及复合污染对脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶的活性产生了不同程度的影响,其主要原因可能有两点:其一,土壤酶在不同土壤环境中表现出的功能差异。脲酶与土壤中氮的转化相关,酸性磷酸酶与土壤中有机磷的分解转化有关,而蔗糖酶与土壤中有机质的转化有关,因此不同土壤酶对污染物的影响表现出不同的效应^[20]。其二,土壤酶对复合污染物的响应机制相对复杂,并非单一污染物的简单叠加作用,土壤酶会随着污染物种类、土壤类型以及自然条件下的环境因素的变化而变化^[21]。此外,其他原因也能导致HHCB单一及与Cd复合污染对土壤酶活性的作用不同,这还需进一步研究分析。

4 结论

(1)平板菌落计数结果显示,HHCB单一及与Cd复合污染培养时间为1 d时,对细菌表现为抑制作用,培养时间为80 d时,对细菌表现为促进作用(HHCB为100 mg·kg⁻¹的单一污染除外),对真菌生长均表现为促进作用,对放线菌生长均表现为抑制作用。荧光qPCR法下,细菌16S rRNA基因拷贝数随着HHCB浓度的升高而增加,而真菌18S rRNA基因拷贝数和放线菌拷贝数随着HHCB浓度的升高而降低。

(2)培养时间为1 d时,HHCB单一及与Cd复合污染对脲酶活性表现为抑制作用(HHCB为800 mg·kg⁻¹污染除外),对蔗糖酶和酸性磷酸酶表现为抑制作用;培养时间为80 d时,对脲酶表现为抑制作用。培养时间为80 d时,400、800 mg·kg⁻¹ HHCB单一及与Cd复合污染对酸性磷酸酶活性表现为促进作用。

参考文献:

- [1] BALK F, FORD R A. Environmental risk assessment for the polycyclic musks, AHTN and HHCB: II. Effect assessment and risk characterisation[J]. *Toxicology Letters*, 1999, 111(1/2): 81-94.
- [2] MARCEL K, WILLEM J L, HANNAH I. Dispersion of PAH and heavy metals along motorways in the Netherlands: An overview[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, 235: 347-349.
- [3] HORII Y, REINER J L, LOGANATHAN B G, et al. Occurrence and fate of polycyclic musks in wastewater treatment plants in Kentucky and Georgia, USA[J]. *Chemosphere*, 2007, 68(11): 2011-2020.
- [4] GUERRA P, KLEYWEGT S, PAYNE M, et al. Occurrence and fate of

- trace contaminants during aerobic and anaerobic sludge digestion and dewatering[J]. *Environ Qual*, 2015, 44:1193-1200.
- [5] 陈多宏, 胡学玲, 盛彦清, 等. 典型污水处理厂中多环麝香的污染特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1):101-105. CHEN D H, HU X L, SHENG Y Q, et al. Pollution characteristics of polycyclic musk in a typical wastewater treatment plant[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2009, 18(1):101-105.
- [6] 李明, 尹晓宇, 陈浩, 等. 佳乐麝香对斑马鱼胚胎甲状腺激素的影响[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(3):81-89. LI M, YIN X Y, CHEN H, et al. The effect of Jiale musk on zebrafish embryo thyroid hormone[J]. *Journal of Ecotoxicology*, 2020, 15(3):81-89.
- [7] MELMED S. Fertility and fragrance: Another cause of Kallmann syndrome[J]. *Journal of Clinical Investigation*, 2015, 125(6):2275-2278.
- [8] 姜丽思, 张倩茹, 王建美, 等. 佳乐麝香对萝卜种子发芽及DNA损伤的生态毒理影响[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(1):190-200. JIANG L S, ZHANG Q R, WANG J M, et al. Ecotoxicological effects of Jiale musk on the germination and DNA damage of radish seeds[J]. *Journal of Ecotoxicology*, 2018, 13(1):190-200.
- [9] 周启星, 王美娥, 范飞, 等. 人工合成麝香的环境污染、生态行为与毒理效应研究进展[J]. 环境科学学报, 2008, 28(1):1-11. ZHOU Q X, WANG M E, FAN F, et al. Research progress on environmental pollution, ecological behavior and toxicological effects of synthetic musk[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(1):1-11.
- [10] 陈翠红. 土壤典型PPCPs污染及与重金属Cd的联合毒性及机理[D]. 天津:南开大学, 2010. CHEN C H. Joint toxicity and mechanisms of typical PPCPs and Cd in soil[D]. Tianjin: Nankai University, 2010.
- [11] ZHANG L, AN J, ZHOU Q X. Single and joint effects of HHCB and cadmium on zebrafish (*Danio rerio*) in feculent water containing bedloads[J]. *Front Env Sci Eng*, 2012, 6(3):360-372.
- [12] NAKATA H, SASAKI H, TAKEMURA A, et al. Bioaccumulation, temporal trend, and geographical distribution of synthetic musks in the marine environment[J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41: 2216-2222.
- [13] WAN Y, WEI Q W, HU J Y, et al. Levels, tissue distribution, and age-related accumulation of synthetic musk fragrances in Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*): Comparison to organochlorines[J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41:424-430.
- [14] 郭明, 陈红军, 王春蕾. 4种农药对土壤脱氢酶活性的影响[J]. 环境化学, 2000, 19(6):523-527. GUO M, CHEN H J, WANG C L. The effects of four pesticides on soil dehydrogenase activity[J]. *Environmental Chemistry*, 2000, 19(6):523-527.
- [15] 和文祥, 黄英锋, 朱铭莪, 等. 汞和Cd对土壤脲酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(3):412-420. HE W X, HUANG Y F, ZHU M E, et al. The effect of mercury and Cd on soil urease activity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3):412-420.
- [16] BARAN S, BIELINSKA J E, O LESZCZUK P. Enzymatic activity in an airfield soil polluted with polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Geoderma*, 2004, 118:221-232.
- [17] 闫赛红. 恩诺沙星与镉单一及复合污染对土壤微生物群落结构和功能的影响[D]. 泰安:山东农业大学, 2015. YAN S H. Single and joint toxicity of enrofloxacin and Cd on soil microbial community structure and function[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2015.
- [18] 郭明, 尹亚梅, 何良荣, 等. 农用化学物质对土壤脲酶活性的影响[J]. 农业环境保护, 2000, 19(2):68-71. GUO M, YIN Y M, HE L R, et al. The effect of agricultural chemicals on soil urease activity[J]. *Agricultural Environmental Protection*, 2000, 19(2):68-71.
- [19] 律泽. 佳乐麝香与镉复合污染对土壤微生物生态效应的影响[D]. 沈阳:东北大学, 2017. LÜ Z. The influence of HHCB and Cd Co-contaminated on the ecological effect of microbes in soil[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [20] 李卓娜, 周群芳, 刘稷燕, 等. 多环麝香(PCMs)的环境行为及毒性效应[J]. 化学进展, 2012, 24(4):606-615. LI Z N, ZHOU Q F, LIU J Y, et al. Environmental behavior and toxic effects of polycyclic musk (PCMs)[J]. *Progress in Chemistry*, 2012, 24(4):606-615.
- [21] 冯程程, 岳中辉, 苏鑫, 等. 土壤酶对土壤多环芳烃污染响应的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(增刊2):227-234. FENG C C, YUE Z H, SU X, et al. Response of soil enzyme to PAHs pollution: A review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(Suppl 2):227-234.