

## 通用调理剂对土壤 PCB28 降解的效果及影响因素研究

靳韬<sup>1</sup>, 蒋佳峰<sup>1,2\*</sup>, 董元华<sup>1</sup>

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008; 2. 江苏省中国科学院植物研究所, 江苏南京 210014)

**摘要** [目的]明确施用通用调理剂对土壤 PCB28 降解的影响。[方法]土壤添加 2 mg/kg PCB28 后, 根据不同浓度通用调理剂、有机肥和含水率等设置 12 个处理, 开展培养试验, 并于培养 0、14、21、28 d 采集土样分析 PCB28 浓度。[结果]施用调理剂能够促进土壤 PCB28 的降解, 其降解率为 48.6%, 施用有机肥可以继续促进 PCB28 的降解率至 59.8%, 并且提高含水率能够进一步提高 PCB28 的降解率至 67.9%。[结论]施用 0.4 mg/g 调理剂、0.7 mg/g 有机肥和提高土壤含水率能够显著提高土壤 PCB28 的降解率。

**关键词** 土壤; 调理剂; PCB28 降解; 有机肥; 含水率

**中图分类号** S156 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)36-0091-03

## Effect of General Soil Conditioner on Soil PCB28 Degradation and Its Influencing Factors

JIN Tao<sup>1</sup>, JIANG Jia-feng<sup>1,2\*</sup>, DONG Yuan-hua<sup>1</sup> (1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008; 2. Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210014)

**Abstract** [Objective] Effect of soil general conditioner on soil PCB28 degradation was investigated. [Method] 2 mg/kg PCB28 was added to the soil, and culture experiments were carried out with 12 treatments of different concentration of general conditioner, organic fertilizer and water content. Soil samples were collected after culturing for 0, 14, 21, 28 days, and PCB28 concentration was analyzed. [Result] Application of soil conditioner could promote soil PCB28 degradation, and the degradation rate was 48.6%, and together with application of organic fertilizer could continue to promote PCB28 degradation rate to 59.8%, and what's more, increasing soil water content could further improve PCB28 degradation rate to 67.9%. [Conclusion] Application of 0.4 mg/g soil conditioner, 0.7 mg/g organic fertilizer and increasing soil moisture content could significantly improve the degradation rate of soil PCB28.

**Key words** Soil; Soil conditioner; PCB28 degradation; Organic fertilizer; Moisture content

多氯联苯(PCBs)是一类典型的持久性有机污染物(persistent organic), 被列为首批需要消减和优先控制的 12 种持久性有机污染物之一。PCBs 具有许多优良物理化学性质, 被广泛应用于电力工业、塑料加工业、印刷业和化工行业等领域, 由于焚化含 PCBs 的物质释放到大气中, 最后通过沉降作用, 大量进入土壤系统, 引起土壤环境严重污染, 还会严重危害人类健康<sup>[1]</sup>, 例如 1968 年日本北部九州县发生的震惊世界的被 PCBs 污染米糠油中毒事件。因此, 开展 PCB 的去除降解研究具有重要的现实意义。

PCB 的修复包括物理方法, 比如封存填埋法、吸附萃取法、蒸馏汽提法等<sup>[2]</sup>, 以及化学修复方法, 化学修复方法主要包括焚烧法、金属还原法、氯化法、硫化还原法、氧化氯化法和光降解法等<sup>[3]</sup>。在土壤 PCB 污染修复方面, 这些物理化学方法由于其工程量大、成本高, 往往无法很好地应用于土壤 PCB 污染修复。近年来, 生物修复方法为土壤 PCB 降解去除提供了新的方法, 主要是通过自然界中动物、植物、微生物将有机污染物降解成 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 或转化为无毒无害物质<sup>[4]</sup>。

土壤调理剂是一类新型的土壤改良剂, 能够改善土壤的理化性质, 调节土壤酸度, 进而改善土壤结构, 促进土壤养分转化, 提高土壤活性养分, 促进土壤微生物代谢和生长<sup>[5]</sup>, 进而促进土壤微生物对环境大分子有机污染物的降解<sup>[6]</sup>。但

是, 土壤调理剂对土壤 PCB 降解的效果研究还比较少, 相关的影响因素还不清楚, 因此, 探究不同浓度土壤调理剂对土壤 PCB28 降解的效果, 并分析有机肥和土壤含水量对调理剂影响土壤 PCB28 降解的影响, 以期揭示调理剂对土壤 PCB28 降解的效果及影响因素。

## 1 材料与方法

**1.1 试验材料** 供试土壤采集于南京江宁农田的表层土壤, 自然风干后, 粉碎后过 2 mm 筛, 供试土壤基本性质为全氮 1.38 g/kg, 全磷 0.73 g/kg, 有机质 1.26 g/kg。调理剂是该课题组自主研发的通用型蔬菜地改良剂。

## 1.2 试验方法

**1.2.1 土壤老化。**取一个塑料盆, 在盆内垫上塑料薄膜, 称 6 kg 磨好的土壤置于盆内, 加入 300 mL 40 mg/L 的 PCB28 丙酮溶液, 使得添加的 PCB28 浓度约为 2 mg/kg, 拌匀后, 将土壤放在通风橱中, 使丙酮完全挥发。处理后的添加土壤避光放置 10 d 左右使 PCB28 老化。称取老化后的土壤样品 6 份, 每份 1 g 于 15 mL 棕色玻璃瓶中, 加入 5 mL 正己烷进行超声萃取 30 min, 离心后取上层清液 1 mL 进行 GC-ECD 测定, 确定实际添加浓度, 并验证土壤是否拌匀。

**1.2.2 培养试验。**在容积 1L 的塑料盆中, 添加土壤 100 g, 并加入 1:1 000 稀释后的通用调理剂、植物氨基酸有机肥料和水分, 拌匀后培养, 共设置 12 个处理, 具体设置见表 1。其中, 调理剂 0.4 mg/g 为田间常规施用量, 植物氨基酸有机肥 0.7 mg/g 为田间常规施用量, 含水量 60% 为田间常规含水量。每种处理设置 4 个平行样, 样品于室温下培养, 培养期间采用重量法定期补水以保持各处理水分恒定。取样时间设为培养后的第 0、14、21、28 天。每次取样时, 先将培养样品

**基金项目** 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金(Y20160029)。  
**作者简介** 靳韬(1990—), 男, 江苏无锡人, 硕士研究生, 研究方向: 土壤有机污染物降解。\* 通讯作者, 助理研究员, 博士, 从事土壤生态学研究。

**收稿日期** 2017-05-10

用取样勺搅拌均匀后取出 1 g 土壤样品置于 15 mL 棕色玻璃瓶中,用 5 mL 正己烷超声萃取后,离心取上清液进行 GC-ECD 测定。

表 1 试验设置  
Table 1 Test design

处理 Treatment	土壤调理剂 Soil conditioner mg/g	有机肥 Organic matter mg/g	田间含水量 Soil water content // %
CK	0	0	60
T <sub>1</sub>	0.1	0	60
T <sub>2</sub>	0.4	0	60
T <sub>3</sub>	1.0	0	60
T <sub>4</sub>	0	0.7	60
T <sub>5</sub>	0.4	0.2	60
T <sub>6</sub>	0.4	0.7	60
T <sub>7</sub>	0.4	1.2	60
T <sub>8</sub>	0	0	20
T <sub>9</sub>	0	0	100
T <sub>10</sub>	0.4	0.7	20
T <sub>11</sub>	0.4	0.7	100

**1.2.3 色谱分析。**采用 Agilent 6890 N 气相色谱仪对 PCB77 进行分析,配备 ECD 检测器、BD-5 毛细管柱(30.0 m × 0.32 mm × 0.25 μm)和自动进样器。色谱分析条件:进样口温度为 250 °C,检测器温度为 300 °C,不分流进样 1 μL;使用高纯氦气(99.999%)为载气,流速为 1 mL/min,高纯氮(99.999%)作为尾吹气,流速为 60 mL/min;程序升温过程:150 °C 停留 2 min,以 10 °C/min 速率升温到 280 °C,保留 1 min;用外标法进行测定。

**1.3 数据处理** 采用 Microsoft Office 2010 excel 进行数据整理和基本运算,采用 SPSS 18 进行不同处理间差异显著性分析,并采用 origin 8.0 绘制图形。

## 2 结果与分析

**2.1 通用调理剂对土壤 PCB28 降解的影响** 前 7 d 各处理间 PCB28 降解率差异不明显(图 1),14 d 后随着培养时间的延长,调理剂处理 PCB28 降解率明显高于对照,经过 28 d 培养后,CK 中 PCB28 降解率为 35.6%,添加调理剂的 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 处理中 PCB28 降解率分别为 43.2%、48.6% 和 45.2%,都显著高于 CK,表明施用土壤通用调理剂能够显著促进土壤微生物对 PCB28 的降解。

李小龙等<sup>[7]</sup>研究表明,施用土壤调理剂能够促进微生物的生长,而土壤微生物数量的增加,其代谢酶活性的增加会促进土壤 PCB28 的降解<sup>[8]</sup>。该研究发现施用土壤调理剂能够促进土壤 PCB28 的降解,可能是由于施用调理剂改良了土壤的结构和养分供应,促进了土壤微生物的生长和代谢,进而促进了土壤中 PCB28 的降解。

**2.2 有机肥对调理剂降解土壤 PCB28 的影响** 培养 28 d 后 T<sub>4</sub> 处理中 PCB28 的降解率为 38.5%(图 2),虽然比 CK 高,但是与 CK 之间无显著性差异,表明单独施用 0.7 mg/g 植物型氨基酸有机肥,对土壤 PCB28 的降解无显著影响。

在施用 0.4 mg/g 调理剂的基础上,添加有机肥料处理 PCB28 降解率显著高于未加有机肥的 T<sub>2</sub> 处理(图 3),培养 28 d 后,T<sub>2</sub> 处理 PCB28 降解率为 48.6%,添加 1.2 mg/g 有机

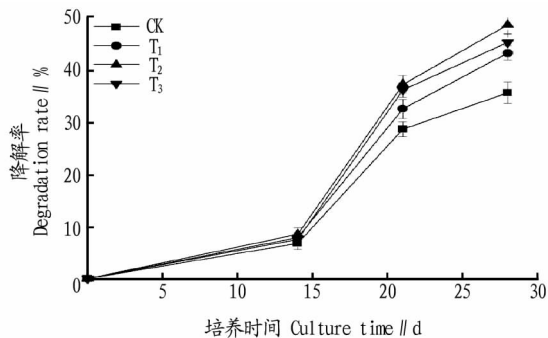


图 1 不同浓度调理剂对土壤 PCB28 降解的影响

Fig. 1 Effect of different concentration conditioner on soil PCB28 degradation

肥 T<sub>7</sub> 处理中土壤 PCB28 降解率为 59.8%,比 T<sub>2</sub> 处理显著提高 23.0%。表明添加有机肥能够协同调理剂进一步促进土壤 PCB28 的降解。

施用有机肥后会提高土壤有机质含量<sup>[9]</sup>,土壤调理剂的施用促进土壤微生物生长的同时,可能会促进其代谢产生的有机质,微生物在分泌更多的降解酶来分解有机质的同时,会协同降解土壤 PCB28<sup>[10]</sup>,研究表明施用有机肥能够加强土壤调理剂对土壤微生物对 PCB28 的降解促进效应。

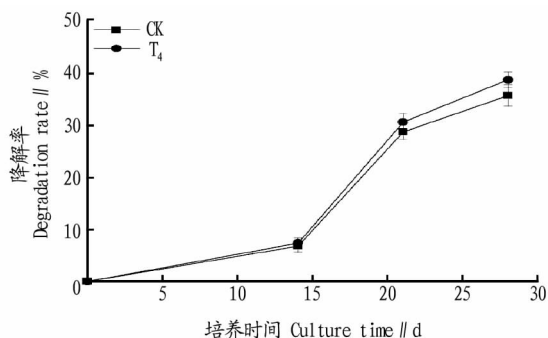


图 2 有机肥对土壤 PCB28 降解的影响

Fig. 2 Effect of organic matter on soil PCB28 degradation

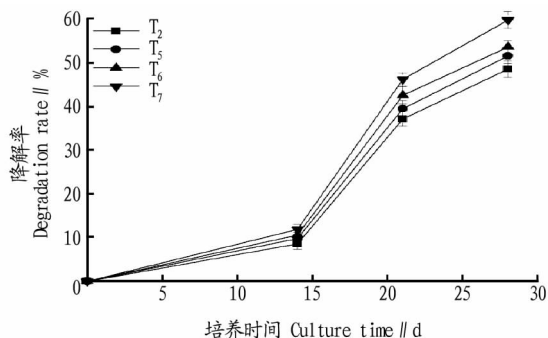


图 3 有机肥对调理剂促进土壤 PCB28 降解的影响

Fig. 3 Effect of organic matter on improving soil PCB28 degradation by conditioner

**2.3 含水率对调理剂降解土壤 PCB28 的影响** 培养 28 d 后,20% 含水量 T<sub>8</sub> 处理中 PCB28 的降解率为 30.7%(图 4),显著低于 60% 含水量 CK 的 35.6% 和 100% 含水量 T<sub>9</sub> 处理的 39.4%,T<sub>9</sub> 处理 PCB28 的降解率虽然比 CK 高,但是无显著

差异,表明土壤含水量的增加能够促进土壤微生物对 PCB28 的降解。许妍等<sup>[11]</sup>研究发现,土壤微生物 PCB28 降解过程是一个厌氧脱氯过程,厌氧环境有利于微生物对 PCB28 的降解<sup>[12]</sup>。该研究中土壤含水率的增加,使得土壤中氧气含量显著下降形成一个厌氧环境,从而有助于土壤微生物厌氧脱氯降解 PCB28。

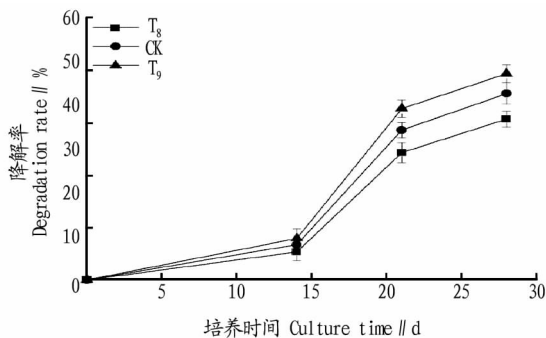


图4 含水率对土壤 PCB28 降解的影响

Fig.4 Effect of water content on soil PCB28 degradation

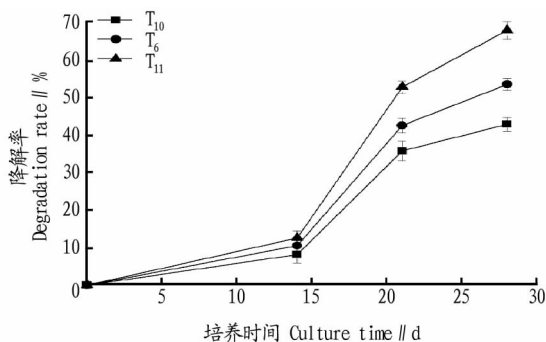


图5 含水率对调理剂促进土壤 PCB28 降解的影响

Fig.5 Effect of water content on improving soil PCB28 degradation by conditioner

在进一步加入通用调理剂和有机肥后,土壤含水率的增加对 PCB28 的降解影响效果更加显著,在培养 28 d 后,20% 含水率 T<sub>10</sub> 处理土壤 PCB28 的降解率为 42.9%,60% 含水率 T<sub>6</sub> 处理为 53.6%,100% 含水率的 T<sub>11</sub> 处理 PCB28 降解率最高为 67.9%,显著高于 T<sub>10</sub> 和 T<sub>6</sub> 处理。前面的分析已说明含水率对土壤微生物 PCB28 降解的作用,在同时加入土壤调理剂和有机肥后,在 100% 含水率处理中,PCB28 的降解率进一步提高,已达到近 70%,表明联合施用调理剂和有机肥并保持土壤的含水率,可有效促进土壤微生物对 PCB28 的降解。

### 3 结论

研究通用调理剂对土壤 PCB28 降解的影响,进一步分析

有机肥和土壤含水率对调理剂作用的影响,并初步分析相关原因,在调理剂对土壤 PCB28 降解作用方面得到以上结论:

(1) 施用通用调理剂能够显著促进土壤 PCB28 的降解,田间常用 0.4 mg/g 调理剂施用浓度对土壤 PCB28 降解促进作用最好。

(2) 单独施用有机肥对土壤 PCB28 的降解无明显影响,但是在结合施用调理剂的基础上,施用有机肥能够进一步促进土壤 PCB28 的降解,有机肥使用量 1.2 mg/g 效果最佳。

(3) 提高土壤含水率,使土壤处于厌氧状态能够显著促进土壤 PCB28 的降解,在结合施用调理剂和有机肥的前提下,提高土壤含水率能够更进一步地促进土壤 PCB28 的降解。

结合该研究的各项数据,施用 0.4 mg/g 土壤调理剂、0.7 mg/g 有机肥,并保持较高的土壤含水率,能够显著促进土壤 PCB28 的降解,其降解率能够达到 67.9%。该研究表明,施用土壤调理剂,并结合施用有机肥和提高土壤含水率等农艺措施,是一种简单易行的 PCB28 污染土壤的原位修复技术方法。

### 参考文献

- [1] WINNEKE G, BUCHOLSKI A, HEINZOW B, et al. Developmental neurotoxicity of polychlorinated biphenyls (PCBs): Cognitive and psychomotor functions in 7-month old children [J]. Toxicology letters, 1998, 102 - 103 (1): 423.
- [2] WERNER D, HALE S E, GHOSH U, et al. Polychlorinated biphenyl sorption and availability in field-contaminated sediments [J]. Environmental science & technology, 2010, 44 (8): 2809.
- [3] 赵毅, 孙伟. 化学法处理多氯联苯 [J]. 环境工程学报, 1997 (1): 43 - 49.
- [4] BORJA J, TALEON D M, AURESENIA J, et al. Polychlorinated biphenyls and their biodegradation [J]. Process biochemistry, 2005, 40 (6): 1999 - 2013.
- [5] 靳辉勇, 齐绍武, 朱益, 等. 土壤调理剂对土壤养分含量及微生物功能多样性的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2017, 19 (5): 100 - 105.
- [6] 朱健, 王平, 李捍东, 等. 河水高浓度有机污染降解菌分离、鉴定及降解特性 [J]. 生态学杂志, 2013, 32 (5): 1311 - 1318.
- [7] 李小龙, 杨春泉, 沈建平. 土壤调理剂对植根土壤微生物群落的影响 [J]. 农业科学与技术 (英文版), 2017, 56 (5): 834 - 838.
- [8] 苏嘉欣, 卓胜, 黎华寿, 等. 植物间作下根际微生物和土壤酶与土壤多氯联苯 (PCB) 降解的关系 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29 (11): 2114 - 2120.
- [9] 田小明, 李俊华, 危常州, 等. 连续 3 年施用生物有机肥对土壤有机质组分、棉花养分吸收及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18 (5): 1111 - 1118.
- [10] 孙红斌, 刘亚云, 陈桂珠. PCBs 对红树林沉积物中微生物及酶活性的影响 [J]. 生态学杂志, 2007, 27 (12): 5398 - 5407.
- [11] 许妍, 傅大放. 多氯联苯微生物厌氧脱氯研究进展 [J]. 环境化学, 2014 (6): 908 - 914.
- [12] 宋祥云, 殷月芬, 于延珍, 等. 海洋真菌厌氧降解 PCB180 的初步研究 [J]. 海洋环境科学, 2016, 35 (2): 196 - 202.

(上接第 57 页)

- [2] 李登科, 范建忠, 王娟. 基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征 [J]. 生态学杂志, 2011, 30 (12): 2776 - 2782.
- [3] 张杰, 潘晓玲. 天山北麓山地 - 绿洲 - 荒漠生态系统净初级生产力空间分布格局及其季节变化 [J]. 干旱区地理, 2010, 33 (1): 78 - 86.
- [4] 李红梅, 周秉荣, 李林, 等. 青海高原植被净初级生产力变化规律及其未来变化趋势 [J]. 生态学杂志, 2011, 30 (2): 215 - 220.
- [5] 赵东升, 吴绍洪, 尹云鹤. 气候变化情景下中国自然植被净初级生产力

分布 [J]. 应用生态学报, 2011, 22 (4): 897 - 904.

- [6] 王莺, 夏文韬, 梁天刚, 等. 基于 MODIS 植被指数的甘南草地净初级生产力时空变化研究 [J]. 草业学报, 2010, 19 (1): 201 - 210.
- [7] 王娟, 何慧娟, 卓静, 等. 基于 MODIS 数据的陕西省植被净初级生产力与实际蒸散的变化关系分析 [J]. 水土保持通报, 2017, 37 (3): 264 - 269.
- [8] 王娟, 卓静, 何慧娟, 等. 2000 - 2013 年秦岭林区植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素 [J]. 西北林学院学报, 2016, 31 (5): 238 - 245.