

# 加速溶剂萃取法评价土壤中六氯苯和五氯苯对水稻根的生物有效性

刘翠英, 蒋新\*, 杨兴伦, 宋洋

(中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

**摘要:**采用温室盆栽实验, 选择红壤性水稻土和乌栅土, 分别设定对照及添加 1% 和 2% 有机肥的处理, 评价水稻根系对土壤中六氯苯(HCB)及其主要降解产物五氯苯(PeCB)的吸收富集能力, 并比较水稻根中富集的 HCB 或 PeCB 量与 4 种溶剂(体积比 3/1 的正己烷/丙酮、乙醇、正己烷、水)提取的土壤中 HCB 或 PeCB 量的相关性, 以评价土壤中 HCB 和 PeCB 对水稻根的生物有效性. 结果表明, 红壤性水稻土和乌栅土中, 水稻根富集的 HCB 浓度平均分别为 364.1 和 306.0 ng/g, 水稻根中 PeCB 浓度平均分别为 12.7 和 28.7 ng/g, 主要原因是 HCB 在红壤性水稻土中的降解效率低于乌栅土. 2 种土壤中添加 1% 和 2% 的有机肥抑制 HCB 降解, 因此降低水稻根中 PeCB 的浓度. 水稻根中 HCB 和 PeCB 与 4 种溶剂提取的土壤中 HCB 和 PeCB 量的相关系数大小次序均为: 乙醇 > 正己烷/丙酮 > 正己烷 > 水, 表明采用乙醇提取的土壤中 HCB 和 PeCB 量对评价其对水稻根生物有效性的效果最佳. 4 种溶剂中, 仅乙醇提取的土壤中 HCB 与水稻根中 HCB 量呈显著正相关, 而除水以外的其它 3 种溶剂提取的土壤中 PeCB 与水稻根中 PeCB 量均显著正相关. 本研究表明, 采用加速溶剂萃取法, 通过选择合适的提取溶剂, 评价土壤中 HCB 和 PeCB 对水稻根的生物有效性具有可行性.

**关键词:**水稻根系; 土壤; 提取; 生物有效性; 六氯苯; 五氯苯

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)05-1352-07

## Evaluation of Bioavailability of Hexachlorobenzene and Pentachlorobenzene to Rice Roots in Soils by Accelerated Solvent Extraction

LIU Cui-ying, JIANG Xin, YANG Xing-lun, SONG Yang

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** A pot experiment was conducted in greenhouse in two types of soils, Hydragric Acrisols (Ac) and Gleyi-Stagnic Anthrosols (An). Three treatments as control and the additions of 1% and 2% organic fertilizer were designed in each type of soil. The objective of this study was to evaluate the accumulation abilities of hexachlorobenzene (HCB) and its predominant metabolite of pentachlorobenzene (PeCB) by rice roots, and to compare the correlation between HCB or PeCB concentrations in rice roots and in soils extracted by four extraction solvents (hexane/acetone = 3/1 (V/V), ethanol, hexane, water) to evaluate the bioavailability of HCB and PeCB to rice roots. The results showed that the mean concentrations of HCB in rice roots for Ac and An were 364.1 and 306.0 ng/g, respectively, while PeCB were 12.7 and 28.7 ng/g, respectively, which was due to the higher degradation rates of HCB in An than in Ac. Both the applications of 1% and 2% organic fertilizer inhibited HCB degradation, so as to decrease PeCB concentrations in rice roots either in Ac or An. The orders of correlation coefficient of both HCB and PeCB concentrations in rice roots and in soils extracted by four extraction solvents were ethanol > hexane/acetone > hexane > water, which indicated that ethanol was the best extraction solvent of soils to evaluate the bioavailability of HCB and PeCB to rice roots. Only the HCB concentrations in soils extracted by ethanol were significantly positive correlated with the HCB concentrations in rice roots. And the PeCB concentrations in soils extracted by all solvents except for water were significantly positive correlated with the PeCB concentrations in rice roots. Our results suggested that it was feasible to evaluate the bioavailability of HCB and PeCB to rice roots using accelerated solvent extraction by choosing proper extraction solvent.

**Key words:** rice root; soil; extraction; bioavailability; hexachlorobenzene; pentachlorobenzene

六氯苯(HCB)是环境中典型的持久性有机污染物(POPs), 具有高毒性和潜在的致癌性, 被美国国家环保署列为内分泌干扰物<sup>[1]</sup>. 尽管全世界范围内 HCB 的商业化生产已被禁止, 但其作为化学中间体仍在一些国家生产. 已有报道, 污染土壤中 HCB 浓度达 340 ~ 3 300 ng/g<sup>[1,2]</sup>. 五氯苯(PeCB)作为

收稿日期: 2009-07-22; 修订日期: 2009-09-26

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-404); 国家自然科学基金委创新团队项目(40921061); 国家自然科学基金青年科学基金项目(20707028, 40801117); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(ISSASIP0714)

作者简介: 刘翠英(1982~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤环境化学, E-mail: cyliu@issas.ac.cn

\* 通讯联系人, E-mail: jiangxin@issas.ac.cn

HCB 的降解产物已被列为斯德哥尔摩公约中新增加的 9 种 POPs 之一。土壤是 POPs 的汇<sup>[3,4]</sup>,来自污泥施用和大气沉降的 HCB 对农田土壤造成污染,进而通过食物链进入人体,对人类健康造成潜在的危害<sup>[5-7]</sup>。在我国南方大部分地区,水稻是主要的粮食作物,而且水稻秸秆被用来喂养牲畜<sup>[4]</sup>,因此水稻的污染备受关注。

目前,对土壤中污染物环境效应关注的重点之一是其生物有效性。影响污染物生物有效性的因素很多,其中有机质是影响土壤中 POPs 生物有效性的重要因子<sup>[8-10]</sup>。土壤有机质可分为水溶性有机质和非水溶性有机质两大类,这两类有机质对 POPs 的生物有效性起着相反的作用<sup>[11,12]</sup>。其中,水溶性有机质能够增加 POPs 在土壤溶液中的溶解性<sup>[13,14]</sup>,从而增加土壤中 POPs 的生物有效性<sup>[15]</sup>。然而土壤中大部分的有机质为非水溶性,它能够吸附土壤中的 POPs<sup>[14]</sup>,从而降低其生物有效性<sup>[16]</sup>。另外,土壤中的有机质能够影响 POPs 的降解行为<sup>[17,18]</sup>,进而影响 POPs 的生物富集。

土壤中 POPs 生物有效性的测定和表征方法是目前研究的热点,其中对温和提取法的关注较多。若

温和提取方法能提取土壤中生物可利用的 POPs,那么就能够通过该方法预测 POPs 的生物有效性。目前,该设想的可行性已被一些研究证实<sup>[8,12,19-22]</sup>,但仍处于探索阶段。

本研究采用温室盆栽实验,分别于红壤性水稻土和乌栅土中添加 1% 和 2% 的有机肥,分析水稻根对 HCB 及其主要降解产物 PeCB 的吸收富集能力,并研究水稻根中 HCB 或 PeCB 与不同溶剂提取土壤中 HCB 或 PeCB 量(水稻生长始末土壤中 HCB 或 PeCB 浓度的平均值)的相关性,以期寻找能够反映土壤中 HCB 和 PeCB 对水稻根生物有效性的提取方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤性质及污染土的制备

供试土样选取我国南方地区 2 种理化性质差异较大的典型水稻土,分别为江西鹰潭红壤性水稻土和江苏常熟乌栅土。取 0~20 cm 表层土,风干后,过 2 mm 筛,其基本性质见表 1,具体分析方法见文献[23]。红壤性水稻土和乌栅土中 HCB 的背景值分别为 6.2 ng/g 和 4.0 ng/g,PeCB 的背景值分别为 8.6 ng/g 和 5.3 ng/g。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of soils

类型	pH	有机质/g·kg <sup>-1</sup>	可溶性有机碳/mg·kg <sup>-1</sup>	总氮/%	粘粒/%	粉粒/%	砂粒/%
红壤性水稻土	5.4	43.5	48.2	0.2	24.7	45.1	30.2
乌栅土	6.8	50.3	76.3	0.2	30.3	58.0	11.7

称取 67 mg HCB 完全溶解于 500 mL 丙酮,然后将 HCB 的丙酮溶液加入 400 g 细石英砂(100 目)中,充分搅拌至丙酮全部挥发,即得到 HCB 均匀污染的石英砂。称取 15 g 污染石英砂和 2 500 g 土壤拌匀,即得到 HCB 浓度为 1 000 ng/g 的污染土壤。最终测得各处理污染土壤中 HCB 的初始浓度为 875.3 ng/g。

### 1.2 实验仪器与化学试剂

安捷伦(Agilent, 6890)气相色谱仪-ECD 检测器<sup>63</sup>Ni;安捷伦 7683 自动进样器(Agilent, USA);加速溶剂萃取仪(ASE-2000, Dionex, USA);旋转蒸发器(RE-3000)。

各种氯代苯标样(纯度 ≥ 99.5%,德国 Ehrenstorfer 博士提供);正己烷(分析纯);丙酮(分析纯);二氯甲烷(分析纯);乙醇(分析纯);硅藻土(化学纯);有机肥(有机碳含量为 30%,可溶性有机碳含量为 1.8 g/kg,购于江苏田娘农业科技有限公司)是采用堆肥的方式,将废弃的动植物高温腐熟

后,干燥粉碎而制成。

### 1.3 实验设计

本实验采用红壤性水稻土和乌栅土,每种土壤分别设定添加 1% 和 2% 有机肥的处理和不加有机肥的对照。每个处理设 4 个重复。将 2 500 g 污染土壤按照不同处理分别加入有机肥,拌均匀后转入陶瓷盆中。加水使土壤保持淹水状态,移栽水稻秧苗,每盆 2 穴,每穴 3 株。水稻于 2008 年 6 月 8 日移栽,2008 年 10 月 12 日收获。整个实验过程使土壤保持淹水状态。

### 1.4 水稻根系的收获

将水稻根系从陶瓷盆中的土壤中小心取出,取每盆新鲜的土样保存于 4℃ 冰箱中,用于分析土壤中 HCB 及其降解产物的浓度。水稻根用自来水彻底冲洗干净后用去离子水冲洗,室温风干后粉碎,分析水稻根中 HCB 及其降解产物含量。

### 1.5 水稻根中 HCB 及其降解产物的测定

称取 5 g 水稻根与 5 g 硅藻土拌匀后装入加速

溶剂萃取仪的萃取池中,采用加速溶剂萃取仪提取,提取条件:温度为90℃,气压为10 MPa. 提取溶剂为体积比3/1的正己烷/丙酮. 将提取液用旋转蒸发器在45℃条件下旋转蒸发至大约2 mL,经过填有2 g Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和1 g 硅胶的SPE柱净化,净化时用15 mL体积比9/1的石油醚/二氯甲烷淋洗. 然后用气相色谱测定 HCB 及其降解产物的浓度. 气相色谱测定条件为:HP-5MS 柱(30.0 m × 0.32 mm × 0.25 μm),载气为N<sub>2</sub>,采用不分流进样,进样量为1 μL,进样口温度为240℃,检测器温度为290℃.

### 1.6 土壤中 HCB 及其降解产物的测定

称取5 g 土样,同时测土壤含水量以计算土壤干重. 提取方法与上述水稻根中 HCB 及其降解产物相同. 提取溶剂分别选择体积比3/1的正己烷/丙酮、乙醇、正己烷、水. 其中采用前3种溶剂提取的提取液的净化同1.5中水稻根提取液的净化方法,而采用水提取的提取液用20 mL 正己烷于分液漏斗中萃取水中的污染物,然后按上述方法浓缩净化正己烷萃取液. 采用气相色谱测定土壤中 HCB 及其降解产物的浓度,测定条件同1.5中水稻根中污染物的测定.

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤及水稻根中六氯苯和五氯苯浓度

淹水条件下,土壤中 HCB 的主要降解途径为还原脱氯<sup>[18]</sup>,本实验中 HCB 的主要脱氯产物为 PeCB,土壤中 HCB 残留和 PeCB 的生成量见表2. 可以看出,①HCB 在红壤性水稻土中的残留量显著高于乌栅土( $p < 0.05$ ),PeCB 在乌栅土中的生成量高于红壤性水稻土( $p < 0.05$ );②施用有机肥的土壤中 HCB 残留量高于对照,PeCB 生成量低于对照,但该差异对于红壤性水稻土中 HCB 残留不显著;③2种有机肥水平下,土壤中 HCB 及其降解产物的含量无显著的差异( $p > 0.05$ );④HCB 和 PeCB 的总量小于 HCB 的初始浓度,表明 HCB 及其降解产物在土壤中形成结合残留,且乌栅土中结合残留量大于红壤性水稻土. 导致乌栅土中 HCB 的降解效率高于红壤性水稻土的原因可能是乌栅土的 pH 值和可溶性有机碳(DOC)含量较高(表1). 因为脱氯微生物一般为嗜碱性厌氧微生物<sup>[17]</sup>,所以 HCB 在红壤性水稻土(pH = 5.4)中的降解效率低于乌栅土(pH = 6.8);DOC 对土壤中 HCB 具有增溶作用<sup>[13,14]</sup>,而微生物一般仅能够降解溶于土壤溶液中的 HCB<sup>[15]</sup>,所以 DOC 能够促进土壤中 HCB 的降解. 虽然我国

南方的红壤中富含铁锰氧化物<sup>[24]</sup>,其在淹水还原条件下主要为低价态,低价态 Fe、Mn 作为还原剂能够促进 HCB 脱氯反应<sup>[25]</sup>,但是 pH 和 DOC 的作用使乌栅土中 HCB 的脱氯降解率高于红壤性水稻土. 由于有机肥中碳源在厌氧条件下的分解过程能够作为电子受体,与 HCB 的脱氯反应竞争电子<sup>[18]</sup>,因此添加有机肥抑制 HCB 脱氯降解. 水稻根的泌氧能力使根际土壤的还原性减弱<sup>[26]</sup>,因此可能抑制 HCB 还原降解,进而增加水稻根部对 HCB 的吸收富集.

表2 水稻收获后不同处理土壤中六氯苯残留和五氯苯生成量<sup>1)</sup>/ng · g<sup>-1</sup>

处理	红壤性水稻土		乌栅土	
	六氯苯	五氯苯	六氯苯	五氯苯
对照	615.6a	60.7a	341.5b	79.4a
1% 有机肥	628.8a	31.9b	508.1a	69.9b
2% 有机肥	623.6a	28.7b	507.1a	66.8b

1) 同一列中,不同字母表示有显著性差异( $p < 0.05$ )

从图1可以看出,不同处理水稻根部对 HCB 的富集能力差异明显. 具体为:①红壤性水稻土中水稻根部富集的 HCB 量高于乌栅土,平均分别为364.1和306.0 ng/g,且在对照处理中该差异达到显著水平( $p < 0.05$ ). 主要原因是红壤性水稻土中 HCB 的残留量高于乌栅土(表2);另外,乌栅土的有机质含量高于红壤性水稻土(表1),而有机质能够增加土壤对 POPs 的吸持能力,降低土壤中 POPs 的生物有效性<sup>[16]</sup>;虽然乌栅土中 DOC 含量高于红壤性水稻土,而 DOC 能够增加 POPs 的生物有效性<sup>[12]</sup>,但 DOC 仅占土壤有机质的少部分,因此表现

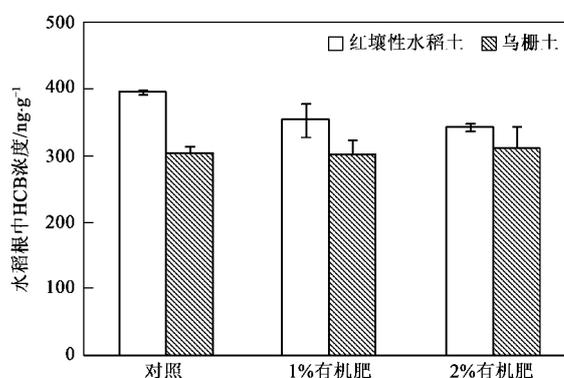


图1 红壤性水稻土和乌栅土添加不同水平的有机肥对水稻根富集六氯苯的影响

Fig. 1 Accumulation of HCB by rice roots as affected by different levels of organic fertilizer applications in Hydragric Acrisols and Gleyic-Stagnic Anthrosols

为红壤性水稻土中 HCB 的生物有效性较高。②红壤性水稻土中添加 1% 和 2% 的有机肥均显著降低水稻根中富集的 HCB 浓度 ( $p < 0.05$ ), 但该差异在 2 个有机肥水平之间不显著 ( $p > 0.05$ ), 而添加有机肥处理的土壤中 HCB 残留量高于对照 (表 2), 表明红壤性水稻土中添加有机肥抑制水稻根对 HCB 的吸收富集。③乌栅土中添加有机肥对水稻根中 HCB 富集无明显影响 ( $p > 0.05$ ), 而添加有机肥的土壤中 HCB 残留量显著高于对照 (表 2), 表明乌栅土中添加有机肥也抑制了水稻根对 HCB 的吸收能力, 其原因可能是添加有机肥主要增加了土壤中非可溶性有机质的含量, 促进土壤对 HCB 的吸附结合, 进而降低 HCB 的生物可利用性。

各处理水稻根中 PeCB 浓度见图 2。其中, 红壤性水稻土中水稻根部 PeCB 浓度显著低于乌栅土 ( $p < 0.05$ ), 平均分别为 12.7 和 28.7 ng/g, 主要原因是乌栅土中 PeCB 的生成量显著高于红壤性水稻土 (表 2)。2 种土壤中添加 1% 和 2% 的有机肥均显著降低水稻根中 PeCB 的浓度 ( $p < 0.05$ ), 且添加 2% 的有机肥效果更明显, 主要原因是添加有机肥抑制 PeCB 的生成 (表 2), 其次, 有机肥的添加也可能降低土壤中 PeCB 的生物有效性。

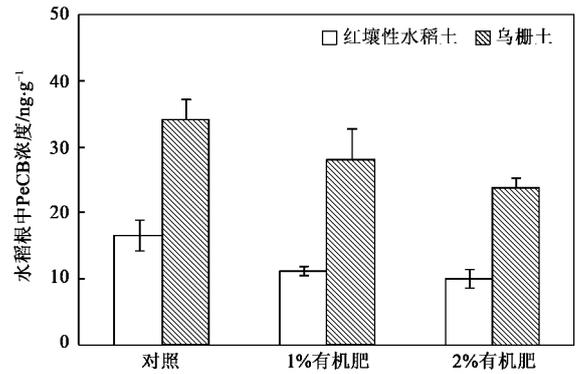


图 2 红壤性水稻土和乌栅土添加不同水平的有机肥对水稻根富集五氯苯的影响

Fig. 2 Accumulation of PeCB by rice roots as affected by different levels of organic fertilizer applications in Hydragric Acrisols and Gleyi-Stagnic Anthrosols

## 2.2 水稻根中 HCB 浓度与不同溶剂提取土壤中 HCB 浓度的相关性

为了寻找能表征 HCB 生物有效性的方法, 将体积比为 3/1 的正己烷/丙酮、乙醇、正己烷、水 4 种溶剂提取的土壤中 HCB 浓度 (水稻生长始末土壤中 HCB 浓度的平均值) 与水稻根中 HCB 的浓度进行相关性分析, 结果如图 3 所示。各溶剂对土壤中

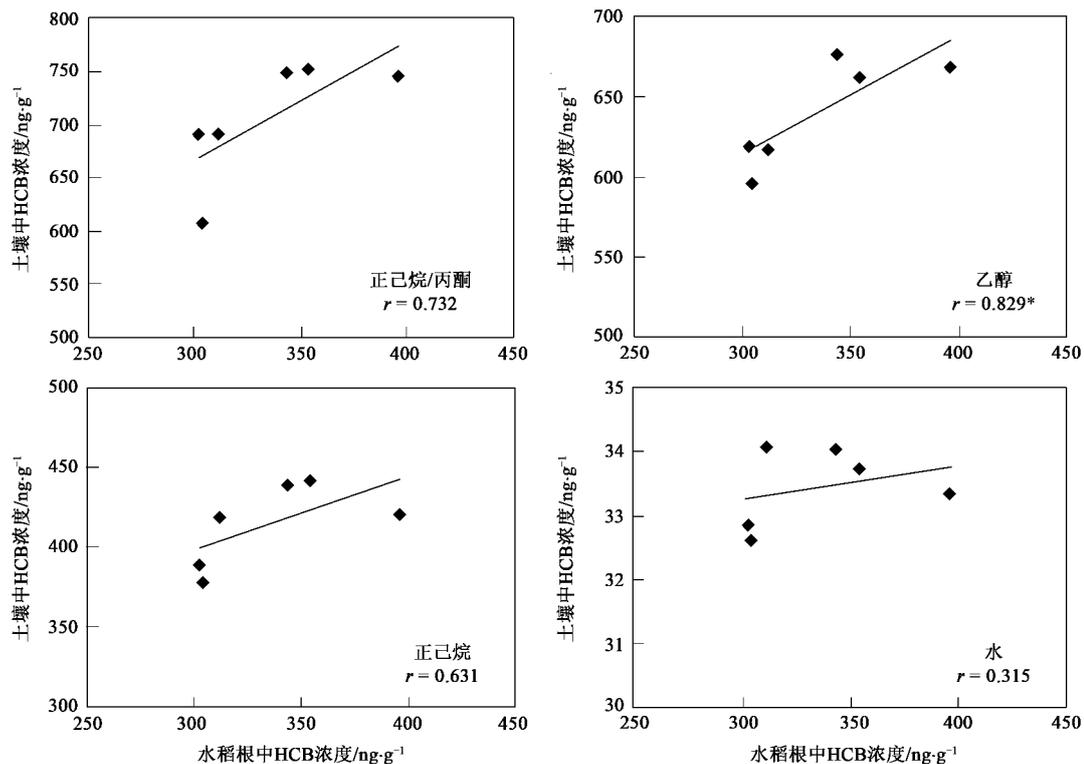


图 3 水稻根中 HCB 浓度与不同溶剂提取的土壤中 HCB 浓度的相关性

Fig. 3 Correlation of HCB concentrations in rice roots and in soils extracted by different extraction solvents

HCB 的提取能力依次为:正己烷/丙酮 > 乙醇 > 正己烷 > 水. 4 种提取溶剂中,仅乙醇提取的土壤中 HCB 与水稻根中 HCB 浓度显著正相关 ( $r = 0.829^*$ ),采用正己烷/丙酮和正己烷提取时,该相关性不显著 ( $r$  为 0.732、0.631),而水提取时该相关性最差 ( $r = 0.315$ ). 表明采用乙醇提取的土壤中 HCB 含量能够较好地反映 HCB 在水稻根中的富集能力.

研究表明,POPs 的有效态组分包括溶于土壤溶液组分和与土壤松散结合的组分<sup>[12]</sup>,因此,水稻根也可能吸收溶于土壤溶液和与土壤松散结合的 HCB. 正己烷/丙酮 = 3/1 (体积比)作为一种耗竭性提取溶剂,能够提取出除与土壤紧密结合的土壤中的其它所有 HCB<sup>[18]</sup>,因此不能反映 HCB 对水稻根的有效性. 而乙醇作为一种温和溶剂,可能正好提取出溶于土壤溶液和与土壤松散结合的 HCB,因此能够较好地反映 HCB 在水稻根中的有效性. 正己烷作为一种非极性溶剂,可能仅提取出部分有效态的 HCB,因此不能较好地反映水稻根对 HCB 的富集能

力. 而水仅能够提取出溶于土壤溶液和少部分与土壤松散结合的 HCB,因此也不能反映 HCB 在水稻根中的有效性. 研究表明,高温高压下水的性质类似于有机溶剂,能够提取出非极性的有机污染物<sup>[27]</sup>. 本研究未能得出较好的结果,可能由于温度和气压不够高.

### 2.3 水稻根中 PeCB 浓度与不同溶剂提取土壤中 PeCB 浓度的相关性

图 4 为水稻根中富集的 PeCB 与体积比为 3/1 的正己烷/丙酮、乙醇、正己烷、水 4 种溶剂提取的土壤中 PeCB 量的相关分析结果. 4 种溶剂对土壤中 PeCB 的提取能力为:正己烷/丙酮 > 乙醇 > 正己烷 > 水. 乙醇提取的土壤中 PeCB 与水稻根中 PeCB 浓度的相关性最好 ( $r = 0.960^{**}$ ),其次为正己烷/丙酮和正己烷 ( $r$  为 0.940<sup>\*\*</sup>、0.932<sup>\*\*</sup>),仅水提取时该相关性未达到显著正相关水平 ( $r = 0.728$ ). 表明正己烷/丙酮 = 3/1 (体积比)、乙醇、正己烷提取的土壤中 PeCB 含量均能反映 PeCB 在水稻根中的富集能力,其中乙醇的效果最佳.

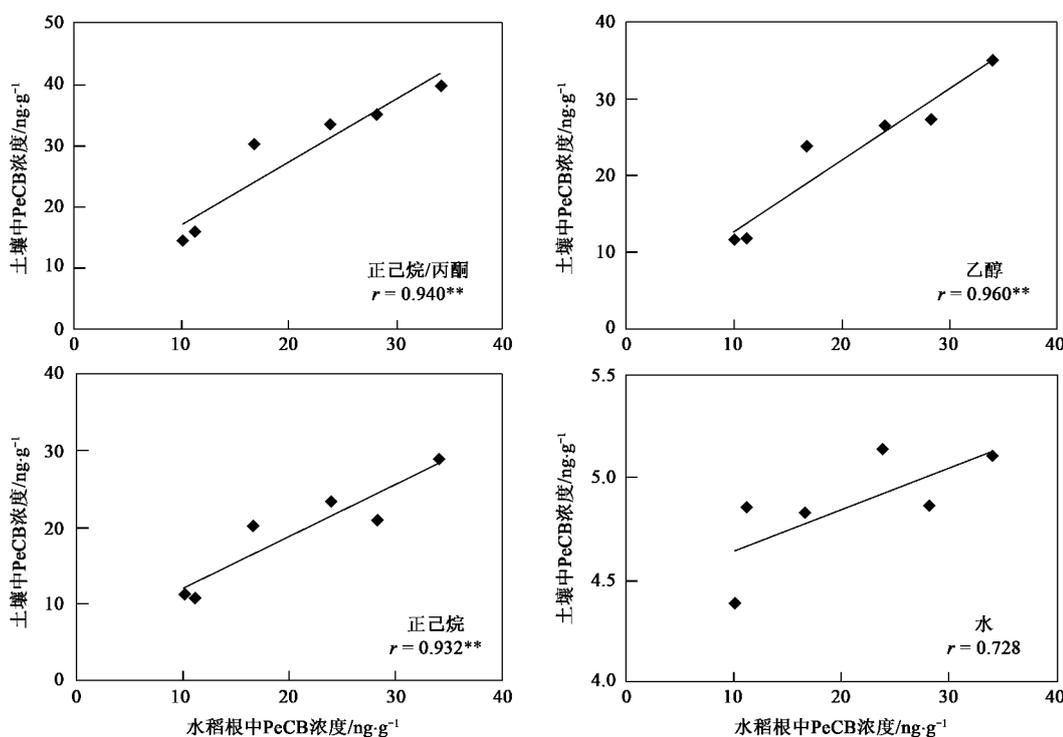


图 4 水稻根中 PeCB 浓度与不同溶剂提取的土壤中 PeCB 浓度的相关性

Fig. 4 Correlation of PeCB concentrations in rice roots and in soils extracted by different extraction solvents

水稻根中 HCB 和 PeCB 浓度与 4 种溶剂提取的土壤中 HCB 和 PeCB 浓度的相关系数大小次序均为:乙醇 > 正己烷/丙酮 > 正己烷 > 水. 而水稻根中

PeCB 浓度与各溶剂提取土壤中 PeCB 浓度的相关性均优于 HCB,其原因可能为:①乙醇作为温和溶剂,可能正好提取出土壤中有效态的 PeCB,因此能

够评价 PeCB 在水稻根中的有效性; ②可能由于 PeCB 的辛醇/水分配系数 ( $K_{ow} = 5.03$ ) 小于 HCB ( $K_{ow} = 6.18$ ), 而 PeCB 的水溶解度 ( $0.80 \text{ mg/L}$ ) 大于 HCB ( $0.02 \text{ mg/L}$ ), 因此土壤中结合态的 PeCB 较少, 大部分 PeCB 为生物可利用的, 因此耗竭性溶剂正己烷/丙酮提取的土壤中 PeCB 与水稻根中 PeCB 量显著正相关; ③由于土壤中 PeCB 含量较小, 正己烷能够提取出土壤中大部分有效态 PeCB, 因此正己烷提取时该相关性也达到显著正相关水平; ④水仅能提取出溶于土壤溶液和部分与土壤松散结合的 PeCB, 因此不能反映水稻根对 PeCB 的富集能力。

本研究表明, 采用溶剂提取方法评价同类污染物的生物有效性和生态风险具有一定的可行性。然而, 本研究仅选择了 4 种提取溶剂, 针对水稻根吸收富集 HCB 和 PeCB 来评价其生物有效性, 且仅选择在红壤性水稻土和乌栅土中进行实验, 对于其它类型的生物、土壤或污染物, 甚至是同种条件下污染物的浓度不同, 其结果都可能与本研究结果不一致, 因为化学和生物因素均可能影响土壤中污染物的生物有效性。采用溶剂萃取的方法评价土壤中 POPs 生物有效性方面的研究工作, 目前还处于探索阶段, 有必要进行进一步深入系统的研究。

### 3 结论

(1) 由于 HCB 在红壤性水稻土中的降解效率低于乌栅土, 红壤性水稻土中水稻根富集的 HCB 量较高, 乌栅土中水稻根富集的 PeCB 量较高。2 种土壤中添加 1% 和 2% 的有机肥抑制 HCB 降解并降低水稻根中 PeCB 的浓度。

(2) 4 种溶剂对土壤中 HCB 和 PeCB 的提取能力均为: 正己烷/丙酮 > 乙醇 > 正己烷 > 水。水稻根中富集的 HCB 和 PeCB 与 4 种溶剂提取的土壤中 HCB 和 PeCB 量的相关系数大小次序均为: 乙醇 > 正己烷/丙酮 > 正己烷 > 水。

(3) 4 种溶剂中, 仅乙醇提取的土壤中 HCB 与水稻根中富集 HCB 浓度显著正相关; 而正己烷/丙酮、乙醇、正己烷提取的土壤中 PeCB 与水稻根中富集 PeCB 量均显著正相关, 其中采用乙醇提取时该相关性最好, 最能反映土壤中 PeCB 对水稻根的有效性。

#### 参考文献:

[1] Barber J L, Sweetman A J, van Wijk D, *et al.* Hexachlorobenzene in the global environment: Emissions, levels,

distribution, trends and processes [J]. *Sci Total Environ*, 2005, **349**: 1-44.

- [2] Bailey R E. Global hexachlorobenzene emissions [J]. *Chemosphere*, 2001, **43**: 167-182.
- [3] Sweetman A J, Valle M D, Prevedouro K, *et al.* The role of soil organic carbon in the global cycling of persistent organic pollutants (POPs): interpreting and modelling field data [J]. *Chemosphere*, 2005, **60**: 959-972.
- [4] Yang H, Zheng M H, Zhu Y G. Tracing the behaviour of hexachlorobenzene in a paddy soil-rice system over a growth season [J]. *J Environ Sci*, 2008, **20**: 56-61.
- [5] Beck A J, Johnson D L, Jones K C. The form and bioavailability of non-ionic organic chemicals in sewage sludge-amended agricultural soils [J]. *Sci Total Environ*, 1996, **185**: 125-149.
- [6] Wang M J, Jones K C. Behaviour and fate of chlorobenzenes (CBs) introduced into soil-plant systems by sewage sludge application: A review [J]. *Chemosphere*, 1994, **28**: 1325-1360.
- [7] Su Y H, Zhu Y G. Bioconcentration of atrazine and chlorophenols into roots and shoots of rice seedlings [J]. *Environ Pollut*, 2006, **139**: 32-39.
- [8] Tao S, Xu F L, Liu W X, *et al.* A chemical extraction method for mimicking bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons to wheat grown in soils containing various amounts of organic matter [J]. *Environ Sci Technol*, 2006, **40**: 2219-2224.
- [9] Chen S H, Xu F L, Dawson R, *et al.* Adsorption and absorption of dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) and metabolites (DDD and DDE) by rice roots [J]. *Environ Pollut*, 2007, **147**: 256-261.
- [10] Yao F X, Yu G F, Bian Y R, *et al.* Bioavailability to grains of rice of aged and fresh DDD and DDE in soils [J]. *Chemosphere*, 2007, **68**: 78-84.
- [11] Conte P, Zena A, Pilidis G, *et al.* Increased retention of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils induced by soil treatment with humic substances [J]. *Environ Pollut*, 2001, **112**: 27-31.
- [12] Tao S, Guo L Q, Wang X J, *et al.* Use of sequential ASE extraction to evaluate the bioavailability of DDT and its metabolites to wheat roots in soils with various organic carbon contents [J]. *Sci Total Environ*, 2004, **320**: 1-9.
- [13] Elabd H, Jury W A, Cliath M M. Spatial variability of pesticide absorption parameters [J]. *Environ Sci Technol*, 1986, **20**: 256-260.
- [14] Sposito G, Martin-Neto L, Yang A. Atrazine complication by soil humic acids [J]. *J Environ Qual*, 1996, **25**: 1203-1209.
- [15] Lehninger A L. *Biochemistry* [M]. (2nd Edition). New York: Worth Publishers, Inc, 1975.
- [16] Dankwardt A, Hock B. Immunolocalization of non-extractable (bound) residues of pesticides and industrial contaminants in plants and soil [J]. *Chemosphere*, 2001, **45**: 523-533.
- [17] Chang B V, Zheng J X, Yuan S Y. Effects of alternative electron donors, acceptors and inhibitors on pentachlorophenol

- dechlorination in soil [J]. *Chemosphere*, 1996, **33**: 313-320.
- [18] Brahushi F, Dorfler U, Schroll R, *et al.* Stimulation of reductive dechlorination of hexachlorobenzene in soil by inducing the native microbial activity [J]. *Chemosphere*, 2004, **55**: 1477-1484.
- [19] Kelsey J W, Kottler B D, Alexander M. Selective chemical extraction to predict bioavailability of soil aged organic chemicals [J]. *Environ Sci Technol*, 1997, **31**: 214-217.
- [20] Tang J, Alexander M. Mild extractability and bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil [J]. *Environ Toxicol Chem*, 1999, **18**: 2711-2714.
- [21] Tang J, Robertson B K, Alexander M. Chemical-extraction methods to estimate bioavailability of DDT, DDE, and DDD in soil [J]. *Environ Sci Technol*, 1999, **33**: 4346-4351.
- [22] Reid B J, Stokes J D, Jones K C, *et al.* Nonexhaustive cyclodextrin-based extraction technique for the evaluation of PAH bioavailability [J]. *Environ Sci Technol*, 2000, **34**: 3174-3179.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 中国农业科技出版社, 1999.
- [24] 吴春燕, 庄顺尧, 杨浩, 等. 南方红壤处理滇池水的初步试验[J]. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(6): 669-672.
- [25] Yao F X, Jiang X, Yu G F, *et al.* Evaluation of accelerated dechlorination of *p, p'*-DDT in acidic paddy soil [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**: 628-633.
- [26] Meade T, D'Angelo E M. [14C] Pentachlorophenol mineralization in the rice rhizosphere with established oxidized and reduced soil layers [J]. *Chemosphere*, 2005, **61**: 48-55.
- [27] Latawiec A E, Swindell A L, Reid B J. Environmentally friendly assessment of organic compound bioaccessibility using sub-critical water [J]. *Environ Pollut*, 2008, **156**: 467-473.