

Effect of Anionic-Nonionic Mixed Surfactants on Uptake of Organochlorine Pesticides from Soil by Alfalfa

Jing Lin, Rongbing Zhou*, Weihong Wu, Zhengmiao Xie

Institute of Environmental Sciences & Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou
Email: [*brz3000@163.com](mailto:brz3000@163.com)

Received: Oct. 25th, 2014; revised: Nov. 10th, 2014; accepted: Nov. 20th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The uptake of organochlorine pesticides (OCPs) by alfalfa in the presence of anionic-nonionic mixed surfactants SDBS-TX100 & SDBS-TW80 was studied in soils by pot experiment in a greenhouse. The results show that SDBS-TX100 & SDBS-TW80 mixtures with mass ratios of 0:10, 1:9, 5:5, and 9:1 could enhance the uptake of OCPs by alfalfa with the total concentration of 50 - 1000 mg·L⁻¹, according to that the removal efficiency of OCPs keeps in 50% & 45% and more by alfalfa in soil. The mixed surfactants enhanced uptake of OCPs by alfalfa was closely related to the mixed surfactant form, as well as the ratio and concentration. The SDBS-TX100 mixture with a mass ratio of SDBS to TX100 at 1:9 had the greatest capacity in enhancing the uptake of OCPs, and no harm to plant growth. The SDBS-TW80 which concentration in 50 - 300 mg·L⁻¹ promoted alfalfa's absorption and had no harm to plant. In the research, SDBS-TX100's performance is better than the SDBS-TW80.

Keywords

Mixed Surfactant, Organochlorine Pesticide, Phytoremediation

阴 - 非离子混合表面活性剂对紫花苜蓿吸收土壤中有机氯农药的影响

林 静, 周溶冰*, 吴卫红, 谢正苗

*通讯作者。

杭州电子科技大学环境科学与工程研究所, 杭州
Email: brz3000@163.com

收稿日期: 2014年10月25日; 修回日期: 2014年11月10日; 录用日期: 2014年11月20日

摘要

采用盆栽试验法, 研究了阴-非离子混合表面活性剂 SDBS-TX100、SDBS-TW80的配比与浓度对紫花苜蓿吸收有机氯农药(OCPs)的影响。结果发现, 在SDBS与TX100、SDBS与TW80质量比(以下简称“配比”)为0:10, 1:9, 5:5, 9:1时, 总浓度在50~1000 mg·L⁻¹能促进紫花苜蓿吸收积累OCPs, 土壤OCPs去除率分别保持在50%、45%以上。混合表面活性剂对增强紫花苜蓿吸收OCPs的程度与混合表面活性剂类型、配比及浓度等密切相关。SDBS-TX100配比1:9对紫花苜蓿吸收OCPs有最大促进作用, 且对植物生长无明显危害。SDBS-TW80在浓度50~300 mg·L⁻¹时促进紫花苜蓿吸收OCPs且对植物无胁迫。去除土壤OCPs的研究中, 施加SDBS-TX100系列表现优于SDBS-TW80系列。

关键词

混合表面活性剂, 有机氯农药, 植物修复

1. 引言

有机氯农药(OCPs)是一类具有“三致”效应的持久性有机污染物, 其中六六六(HCH)和滴滴涕(DDT)是其中使用最为广泛的品种, 在土壤环境中普遍存在, 严重危害农产品安全和人体健康[1]-[3]。近年来, 土壤的修复方法得到了迅速发展, 其中植物修复技术以及其环境友好、价格低廉等优点越来越受到重视[4]。植物吸收主要通过植物吸收一种或几种污染物, 并将所吸收的污染物进行转移、贮存在体内, 从而达到修复受污染环境的目的[5]-[8]。研究表明, 植物能从土壤中直接吸收有机氯农药[9]-[12]。

但由于受到酶活性和数量等的限制, 植物本身对有机污染物的降解能力较弱。对此有研究者提出了利用表面活性剂增溶作用强化植物修复技术(SEPR) [13]-[15], 然而单一表面活性剂在土壤中易发生吸附及沉淀损失从而降低了对有机污染物的增溶洗脱效率[16]。而使用阴-非离子混合表面活性剂可降低表面活性剂在土壤中的吸附及沉淀损失, 提高对有机污染物的增溶洗脱效率[17] [18], 并且在一定条件下可以促进有机污染物的微生物降解[19]。朱利中等[20]研究了阴-非混合表面活性剂对菲等多环芳烃(PAHs)的增溶作用, 发现混合表面活性剂对 PAHs 的增溶大于单一表面活性剂的增溶, 且具有协同增溶作用。周文军等[21]研究了阴-非离子混合表面活性剂对菲污染土壤的洗脱作用及机理, 发现阴-非离子混合表面活性剂可显著提高对有机污染土壤的洗脱效率, 在表面活性剂增效修复技术中具有良好的应用前景。周溶冰等[22]研究了混合表面活性剂对水培植物吸收有机氯农药的影响, 发现加入表面活性剂后, 黑麦草根中 *p*, *p'*-DDT 的含量最高达到无表面活性剂对照组的 70 倍。但迄今关于阴-非混合表面活性剂对植物吸收土壤中 OCPs 的影响的研究较为缺乏。

本文选取 HCH 和 DDT 为有机氯农药代表, 其中 HCH 包含 4 种常见异构体(α -HCH、 γ -HCH、 β -HCH、 δ -HCH), DDT 也包含 4 种常见异构体(*p*, *p'*-DDE、*o*, *p'*-DDT、*p*, *p'*-DDD 及 *p*, *p'*-DDT), 总共 8 种有机氯农药异构体, 采用土培体系模拟研究阴-非离子混合表面活性剂 SDBS-TX100、SDBS-TW80 对植物吸收 OCPs 的影响, 试图为建立经济、高效的 OCPs 污染土壤 SEPR-植物联合修复技术提供依据。

2. 材料与方法

2.1. 材料

非离子表面活性剂 Triton X-100、Tween-80 (TX100, 纯度 > 98%), 阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠(SDBS, 纯度 > 98%)购自 Tokyo Kasei Kogyo Co. Ltd.。 α -HCH、 γ -HCH、 β -HCH、 δ -HCH、 p 、 p' -DDE、 o 、 p' -DDT、 p 、 p' -DDD 及 p 、 p' -DDT 购自 Chem Service(纯度 > 99.5%)。将 SDBS 和 TX100 溶于去离子水中制备一系列不同配比(SDBS 与 TX100 质量比分别为 0:10, 1:9, 5:5, 9:1)及浓度(50、100、300、700、1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的 SDBS-TX100 混合溶液。SDBS 和 TW80 同样配比与浓度制备得 SDBS-TW80 混合溶液。

2.2. 实验方法

实验土壤采自杭州电子科技大学下沙校区内,土壤类型为滨海盐土,pH 为 8.30,有机质含量 11.9 g/Kg ,砂粒、粉砂粒和粘粒含量分别为 3.93%、86.6%和 9.50%。将已知浓度的 HCHs, DDTs 丙酮溶液与相应重量的土壤混合均匀配制为高浓度污染土,并将浸泡后的土样置于通风橱内 7 d,至丙酮完全挥发。然后按所需取相应量的高浓度污染土与盆栽土壤混合均匀,装盆待用。

设计为期 100 d 的盆栽试验,每盆土壤 500 g,土壤中各农药质量分数均为 0.25 mg/kg 。2011 年 3 月于温室内播种紫花苜蓿,每盆 9 株,3 个重复,于生长期分别施加不同配比与浓度的 SDBS-TX100、SDBS-TW80 混合溶液 800 mL。实验期间调节并保持土壤含水量为田间持水量的 50%。

另设置对照组,种植紫花苜蓿于上述污染土壤中,照管方法同上,但不施加表面活性剂。

2.3. 样品处理及测定

2.3.1. 植物样品处理

将植物样品充分剪碎,称取适量置于 50 mL 离心管中,加入 30 mL 正己烷与丙酮混合液(1:1, V:V)超声萃取 1 h。将萃取液过装有 2 g 无水 Na_2SO_4 的层析柱,收集于 50 mL 圆底烧瓶中,在 50°C 下旋转蒸发至干。用 2 mL 正己烷润洗,取 1 mL 装有 2.5 g 硅胶的层析柱净化,再用 10 mL 二氯甲烷与正己烷混合液(1:1, V:V)淋洗,收集于 50 mL 圆底烧瓶中。再次旋转蒸发至干,用 1 mL 正己烷定容,最后进 GC-ECD 分析,每个样品重复 2~3 次。

2.3.2. 土壤样品处理

称取鲜土样品 1 g,放入离心管中,并加入 2 g 无水硫酸钠并另去少量鲜土放入烘箱中 105°C, 7 h,测定含水率。向离心管中加入 20 mL 丙酮:二氯甲烷(1:1)混合液,超声萃取 30 min。在 4000 r/min 的条件下离心 15 min,取上清液。重复上述萃取、离心过程,合并提取液。用旋转蒸发器将上清液浓缩至 1~2 mL,再用 2 g 活化后的佛罗里硅土纯化,同时用 10 mL 丙酮:正己烷(1:9)混合液淋洗。再次过 2 g 无水硫酸钠柱,用 10 mL 丙酮:正己烷(1:9)淋洗。用旋转蒸发器蒸发至干。用 1 mL 色谱纯正己烷定容,最后取 1 μL 进样。

2.3.3. 样品测定

OCP 分析使用气相色谱(福立 GC-9790,浙江温岭),配备有 ^{63}Ni -ECD 检测器和毛细管柱 DB-5 (30 m \times 0.32 mm \times 0.25 μm),柱温 180°C,进样器和检测器的温度分别为 280°C 和 290°C,进样量 1 μL ;进样器和检测器的温度分别为 220°C 和 300°C,经过分子筛和氧阱的高纯氮气作载气和尾气,流速分别为 2.25 和 35.5 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,1 μL 样品进样不分流,DDTs 和 HCHs 的检测限分别为 0.20~0.50 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,回收率实验共做了 3 次,平均回收率分别为 83%~87% [22]。

3. 结果与讨论

3.1. SDBS-TX100、SDBS-TW80 对紫花苜蓿生长影响

经 100 d 培养, 不同 SDBS-TX100、SDBS-TW80 浓度与配比下紫花苜蓿生物量如图 1 所示。SDBS-TX100 浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 平均每株生物量为 $0.59\sim 1.40 \text{ g}$; SDBS-TX100 浓度为 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $700 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 平均每株生物量为 $0.5\sim 0.8 \text{ g}$; 浓度为 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 平均每株生物量为 $0\sim 0.5 \text{ g}$ 。与不施加表面活性剂的对照: 紫花苜蓿平均每株生物量为 0.73 g 相比, SDBS-TX100 浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 对紫花苜蓿生长有促进作用; 浓度为 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时生物量小于 0.7 g , 配比 9:1 时植株死亡, 显然浓度 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 对植物生长有抑制作用。同浓度相比, 配比为 0:10 及 9:1 时对紫花苜蓿生长促进作用小于配比 1:9 及 5:5。

SDBS-TW80 在浓度为 50、100、 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 平均每株紫花苜蓿生物量为 $0.5\sim 0.92 \text{ g}$, 此三组浓度中随着 SDBS 增加、TW80 减少生物量先增后减, 最高值出现在 9:1 及 5:5 上。浓度在 700、 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 随着 SDBS 增加、TW80 减少生物量逐渐减少, 9:1 时生物量为零。可见, 配比 9:1 的高浓度 SDBS-TX100 对紫花苜蓿生长有严重毒害作用, 致使植物枯萎(见图 1)。

3.2. SDBS-TX100 对紫花苜蓿根部吸收 OCPs 的影响

采用 2.3 节的处理与测定方法, 取得植物的根部与茎叶进行分析, 测出不同部位对 OCPs 的吸收量(以干重计)。当 SDBS-TX100 配比为 1:9 时, 紫花苜蓿根部对 OCPs 的吸收量在混合表面活性剂浓度为 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大, 约为 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 在浓度为 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时也达到较大的值, 约为 $80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与未加表面活性剂时相比较: 紫花苜蓿根部 OCPs 浓度为 $16.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 紫花苜蓿根部对 OCPs 的吸收效率分别提高了 6 倍, 表明阴-非离子混合表面活性剂对紫花苜蓿吸收 OCPs 有显著影响。

当 SDBS-TX100 配比为 9:1 时, 紫花苜蓿根部对 OCPs 的吸收量在混合表面活性剂浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大, 约为 $80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与未加表面活性剂时相比较, 紫花苜蓿根部对 OCPs 的吸收效率分别提高了 4.4 倍, 表明阴-非离子混合表面活性剂对紫花苜蓿吸收 OCPs 有显著影响。

SDBS-TX100 配比为 0:10 及 5:5 时, 随浓度增加紫花苜蓿根部 OCPs 先增后减, 低浓度 TX100 促进根部吸收 OCPs, 高浓度 TX100 抑制根部吸收。配比为 1:9 时, 随浓度紫花苜蓿根部吸收能力基本呈现上升趋势, 与配比 0:10 相比, SDBS 与 TX100 共同作用不仅提高相同 SDBS-TX100 浓度下根部吸收 OCPs 能力, 也在一定范围内改变了高浓度 TX100 会抑制紫花苜蓿根部吸收 OCPs; 除浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 OCPs 最高值出现在配比 9:1, 其余四个浓度 OCPs 最高均出现在配比为 1:9。可见, 配比 1:9 时, 阴-非离子表面活性剂的促进作用最优(见图 2)。

3.3. SDBS-TW80 对紫花苜蓿根部吸收 OCPs 的影响

当 SDBS-TW80 配比为 0:10 时, 紫花苜蓿根部对 OCPs 的吸收量在混合表面活性剂浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大, 约为 $62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与未加表面活性剂时相比较, 紫花苜蓿根部对 OCPs 的吸收效率分别提高了 3.2 倍, 表明阴-非离子混合表面活性剂对紫花苜蓿吸收 OCPs 有显著影响。

当 SDBS-TW80 配比为 1:9 时, 紫花苜蓿根部对 OCPs 的吸收量也在混合表面活性剂浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大, 约为 $55 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与未加表面活性剂时相比较, 紫花苜蓿根部对 OCPs 的吸收效率分别提高了 2.7 倍, 表明阴-非离子混合表面活性剂对紫花苜蓿吸收 OCPs 有较显著影响。

综合图 3 四种配比, 低浓度($50\sim 300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)SDBS-TW80 会促进紫花苜蓿根部吸收 OCPs, 高浓度则抑制其吸收行为。特别为 SDBS 抑制作用明显。

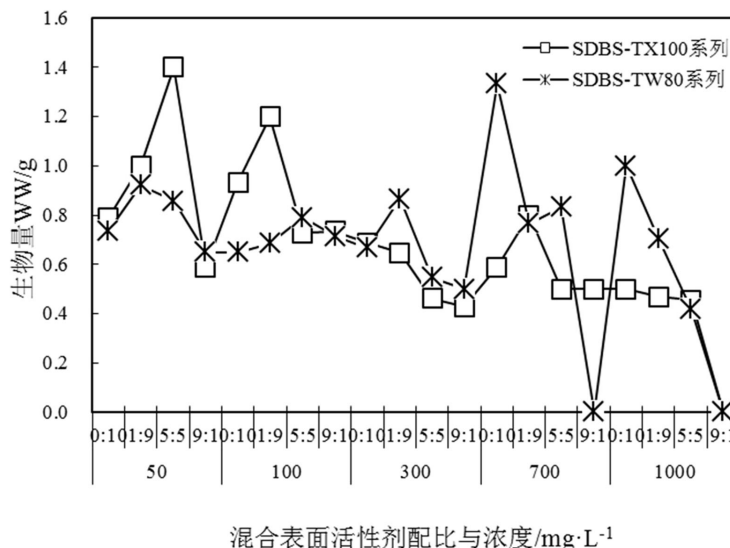


Figure 1. Biomass of alfalfa in the presence of different concentration & proportion of SDBS-TX100、SDBS-TW80
图 1. 不同 SDBS-TX100、SDBS-TW80 浓度与配比下紫花苜蓿生物量

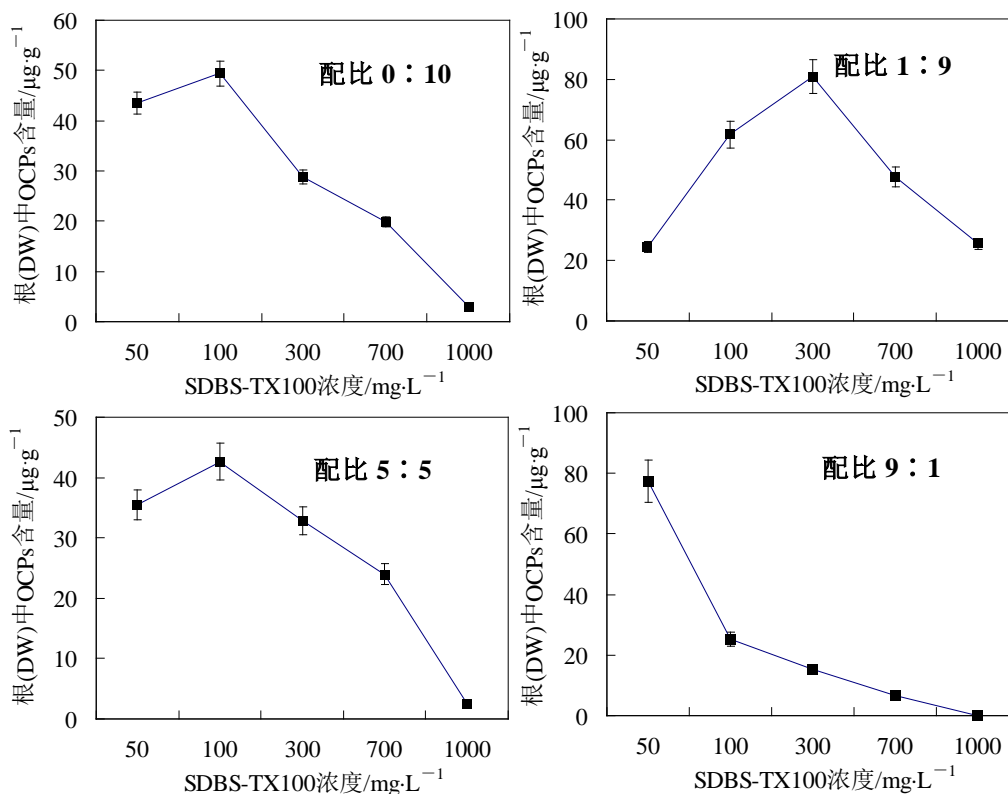


Figure 2. Effects of SDBS-TX100 on alfalfa's root uptaking of OCPs
图 2. SDBS-TX100 对紫花苜蓿根部吸收 OCPs 的影响

3.4. SDBS-TX100、SDBS-TW80 对紫花苜蓿茎叶吸收 OCPs 的影响

对植物茎叶进行处理分析得出数据图 4。当 SDBS-TX100 配比分别为 5:5 时，吸收量在混合表面活性剂浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大，约为 $82 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，与未加表面活性剂时相比较，紫花苜蓿茎叶吸收提

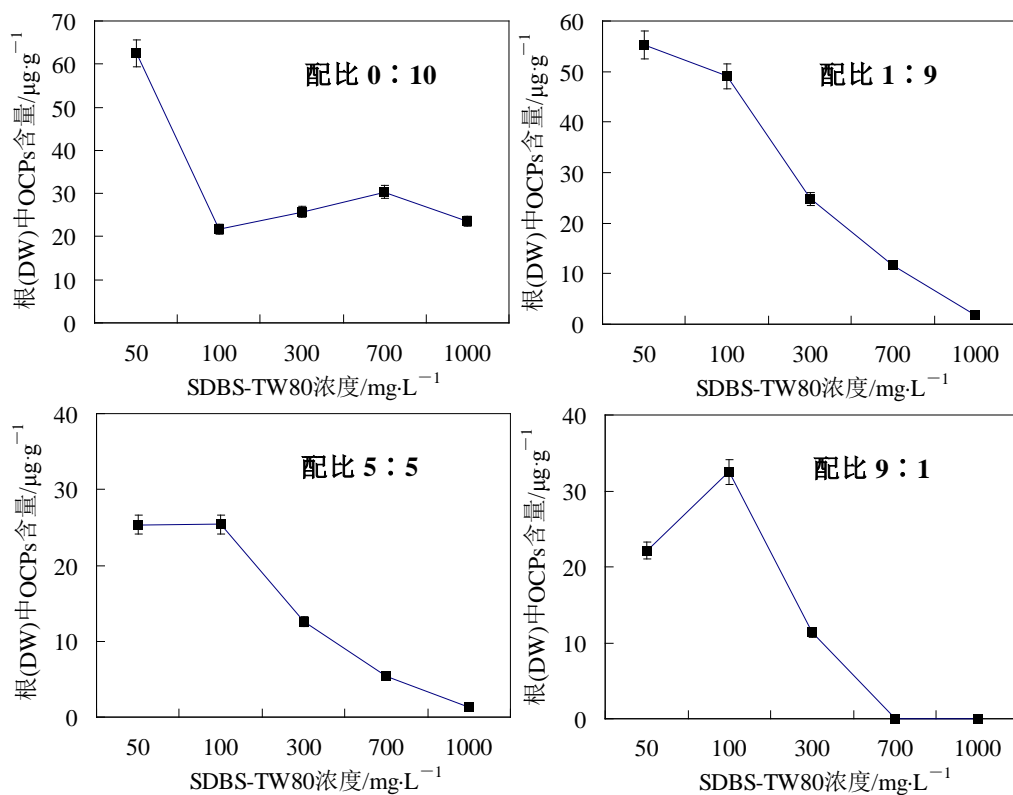


Figure 3. Effects of SDBS-TW80 on alfalfa's root uptaking of OCPs

图 3. SDBS-TW80 对紫花苜蓿根部 OCPs 的影响

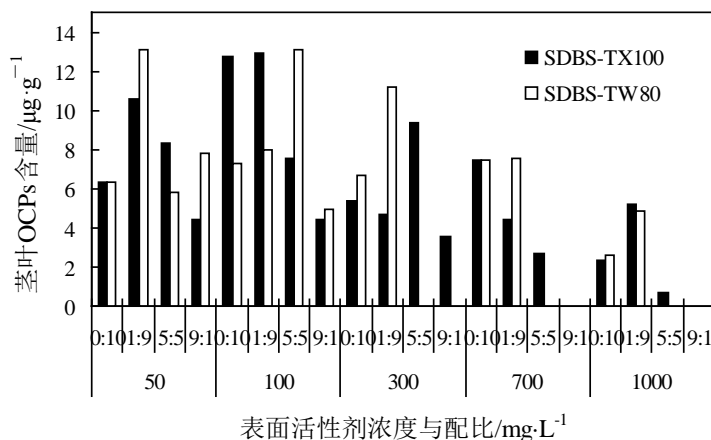


Figure 4. Effects of alfalfa's shoots uptaking of OCPs in the presence of different concentration & proportion of SDBS-TX100, SDBS-TW80

图 4. 不同配比与浓度 SDBS-TX100、SDBS-TW80 对紫花苜蓿茎叶吸收 OCPs 的影响

高了 11 倍。此两种配比中紫花苜蓿茎叶 OCPs 含量随 SDBS-TX100 浓度增加而减少。配比为 1:9 时，茎叶 OCPs 浓度呈现先增后减趋势，且均高于未加表面活性剂时的水平，在浓度为 100 mg·L⁻¹ 时达到最大，为 12.9 mg·kg⁻¹，约为未加表面活性剂时的 1.9 倍。

当 SDBS-TX100 浓度为 100 mg·L⁻¹ 时，紫花苜蓿茎叶对 OCPs 的吸收量达到平衡，配比 0:10、1:9、5:5 均高于未加表面活性剂时茎叶中 OCPs 浓度。

由图 4 可得, 总体上低浓度的 SDBS-TX100 促进紫花苜蓿茎叶吸收 OCPs, 高浓度 SDBS-TX100 抑制紫花苜蓿茎叶吸收 OCPs。且在配比 9:1 时, 紫花苜蓿茎叶吸收能力得到抑制。

当 SDBS-TW80 配比为 1:9 时, 紫花苜蓿茎叶对 OCPs 的吸收量高于未加表面活性剂时的, 浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大, 约为 $13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是未加表面活性剂时的 1.9 倍。

当 SDBS-TW80 配比为 5:5 时, 茎叶 OCPs 浓度呈现先增后减趋势, 且均高于未加表面活性剂时的水平, 浓度为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大, 约为 $13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 但在浓度高于 $700 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时表面活性剂明显抑制紫花苜蓿茎叶吸收 OCPs。

由图 4 可得, 总体上只有 SDBS-TW80 配比 1:9 和 5:5 在低浓度时促进紫花苜蓿茎叶吸收 OCPs, 配比 0:10 和 1:9 在低浓度时有微小的促进作用。四种配比在高浓度时均抑制了紫花苜蓿茎叶吸收作用。

对比对照组, 加入两种系列表面活性剂后紫花苜蓿茎叶内明显富集 OCPs, 且吸收量受培养液中表面活性剂影响, 但茎叶中 OCPs 含量远远低于根, 根部 OCPs 浓度为茎叶 4~7 倍。植物修复 OCPs 污染土壤过程中, 土壤中 OCPs 的消解主要在于植物的根际效应[10] [23]-[26]。

3.5. SDBS-TX100、SDBS-TW80 对土壤 OCPs 去除率的影响

加入 SDBS-TX100 的实验组土壤 OCPs 去除率为 51%~68%, 且不加表面活性剂种植紫花苜蓿的空白组去除率 37%, 对比施加 SDBS-TX100 系列土壤 OCPs 的去除率明显增加。

加入 SDBS-TW80 的实验组土壤 OCPs 去除率为 45%~63%, 除去 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、9:1 最高值, 总体上看, SDBS-TW80 其作用效果没有 SDBS-TX100 好, 因为紫花苜蓿对 SDBS-TW80 更为敏感, 其对植物的胁迫作用较 SDBS-TX100 早出现(见图 5)。

4. 结论

通过表面活性剂强化植物修复技术促进土壤中的有机氯农药降解是可行的, 且不同类型、不同配比与浓度的阴-非离子表面活性剂对植物去除效果存在较大差异。SDBS-TX100 对土壤 OCPs 是去除率保持在 50%以上, SDBS-TW80 去除率在 45%以上, 而不加表面活性剂只种植紫花苜蓿的去除率小于 37%。

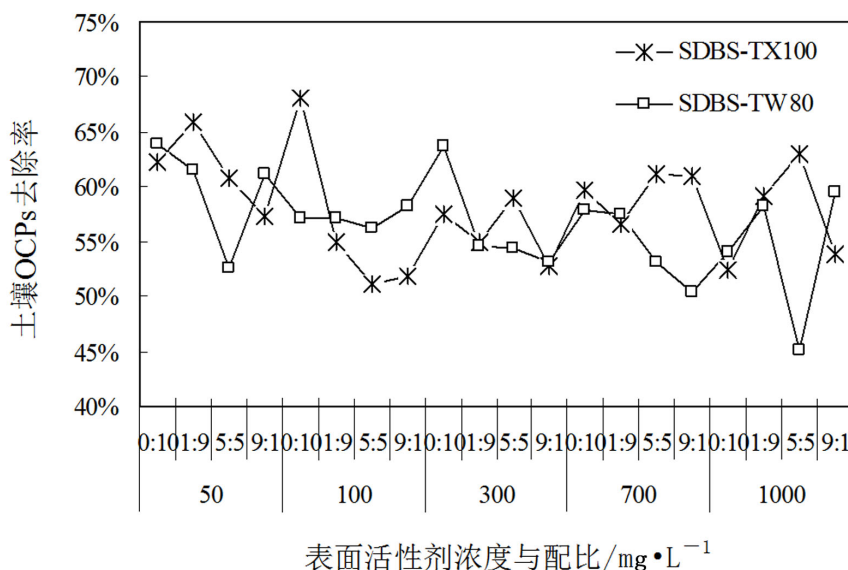


Figure 5. Removal efficiency of OCPs by alfalfa in soil in the presence of different concentration & proportion of SDBS-TX100, SDBS-TW80

图 5. 不同配比与浓度 SDBS-TX100、SDBS-TW80 土壤 OCPs 的去除率

SDBS-TX100 配比为 1:9 时对紫花苜蓿吸收 OCPs 有最大促进作用,根部 OCPs 浓度是未加表面活性剂的 4 倍,茎叶为 1.9 倍,且对植物生长无胁迫危害。SDBS-TW80 在浓度为 50、100、300 mg·L⁻¹ 时四种配比均促进紫花苜蓿吸收 OCPs 且无胁迫,但在浓度 700、1 000 mg·L⁻¹ 时配比为 5:5、9:1 随 SDBS 浓度增加胁迫危害增大。

综合紫花苜蓿生物量、根部及茎叶 OCPs 含量及土壤 OCPs 去除率,施加 SDBS-TX100 系列效果优于 SDBS-TW80。

植物修复 OCPs 污染土壤过程中,土壤中 OCPs 的消解主要在于植物的根际效应,根部 OCPs 浓度为茎叶 4~7 倍。

基金项目

国家自然科学基金(40801116, 41101213)和浙江省自然科学基金(LY14D01009)。

参考文献 (References)

- [1] Gong, Z.M., Tao, S. and Xu, F.L. (2004) Level and distribution of DDT in surface soils from Tianjin. *Chemosphere*, **54**, 1247-1253.
- [2] Zhou, R.B., Zhu, L.Z., Yang, K., et al. (2006) Distribution of organochlorine pesticides in surface water and sediment from Qiantang River. *Journal of Hazardous Materials*, **A137**, 68-75.
- [3] 章海波, 骆永明, 滕应等 (2006) 珠江三角洲地区典型类型土壤中 DDT 残留及其潜在风险. *土壤*, **38**, 547-551.
- [4] Alkorta, I. and Garbisu, C. (2001) Phytoremediation of organic contaminants in soils. *Bioresource Technology*, **79**, 273-276.
- [5] Rauch, B.J., Bellinder, R.R. and Brainard, D.C. (2007) Dissipation of fomesafen in New York State soils and potential to cause carryover injury to sweet corn. *Weed Technology*, **21**, 206-212.
- [6] Grossmann, K., Niggewg, R., Christiansen, N., et al. (2010) The herbicide saflufenacil (KixorTM) is a new inhibitor of protoporphyrinogen IX oxidase activity. *Weed Science*, **58**, 1-9.
- [7] 高彦征, 凌婉婷, 朱利中等 (2005) 黑麦草对多环芳烃污染土壤的修复作用及机制. *农业环境科学学报*, **24**, 498-502.
- [8] 张晶, 汪勇, 林先贵等 (2009) 植物间作系统在多环芳烃污染农田修复中的应用. *安全与环境学报*, **9**, 76-80.
- [9] Schnoor, J.L., Licht, L.A., Mccutcheon, S.C., et al. (1995) Phytoremediation of organic and nutrient contaminants. *Environmental Science & Technology*, **29**, 318A-323A.
- [10] 林道辉, 朱利中, 高彦征 (2003) 土壤有机污染的植物修复及影响因素. *应用生态学报*, **14**, 1799-1803.
- [11] Gao, Y.Z. and Zhu, L.Z. (2003) Phytoremediation and its models for organic contaminated soils. *Journal of Environmental Sciences*, **15**, 302-310.
- [12] Soltani, N., Shropshire, C. and Sikkema, P.H. (2010) Sensitivity of leguminous crops to saflufenacil. *Weed Technology*, **24**, 143-146.
- [13] 梁治其, 宗惠娟, 李金华 (2002) 功能性表面活性剂. 中国轻工业出版社, 北京, 1-146.
- [14] Pilon-Smits, E. (2005) Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, **56**, 15-39.
- [15] Gao, Y.Z., Ling, W.T., Zhu, L.Z., Zhao, B.W. and Zheng, Q.S. (2007) Surfactant-enhanced phytoremediation of soils contaminated with hydrophobic organic contaminants: Potential and assessment. *Pedosphere*, **17**, 409-418.
- [16] Wu, N.Y., Zhang, S.Z., Huang, H.L., Shan, X.Q., Christie, P. and Wang, Y.S. (2008) DDT uptake by arbuscular mycorrhizal alfalfa and depletion in soil as influenced by soil application of a non-ionic surfactant. *Environmental Pollution*, **151**, 569-575.
- [17] Yang, K., Zhu, L.Z. and Xing, B.S. (2006) Enhanced soil washing of phenanthrene by mixed solutions of TX100 and SDBS. *Environmental Science & Technology*, **40**, 4274-4280.
- [18] Zhou, W.J. and Zhu, L.Z. (2007) Enhanced desorption of phenanthrene from contaminated soil using anionic/nonionic mixed surfactant. *Environmental Pollution*, **147**, 350-357.
- [19] Zhao, B.W., Zhu, L.Z., Li, W. and Chen, B.L. (2005) Solubilization and biodegradation of phenanthrene in mixed anionic-nonionic surfactant solutions. *Chemosphere*, **58**, 33-40.
- [20] 朱利中, 冯少良 (2002) 混合表面活性剂对多环芳烃的增溶作用及机理. *环境科学学报*, **6**, 774-778.

- [21] Zhou, W.J. and Zhu, L.Z. (2008) Enhanced soil flushing of phenanthrene by anionic-nonionic mixed surfactant. *Water Research*, **42**, 101-108.
- [22] 周溶冰, 陈建军, 尤胜武, 谢正苗 (2011) 混合表面活性剂对植物吸收有机氯农药的影响. *环境科学学报*, **9**, 2042-2047.
- [23] Hinsinger, P. (1998) How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. *Advances in Agronomy*, **64**, 225-265.
- [24] 何艳, 徐建民, 李兆君 (2004) 有机污染物根际胁迫及根际修复研究进展. *土壤通报*, **5**, 658-662.
- [25] 赵新华, 马伟芳, 孙井梅, 张蕾 (2006) 玉米修复河道疏浚底泥重金属 - 有机复合污染的根际效应. *农业环境科学学报*, **1**, 100-106.
- [26] 王靖, 张忠智, 苏幼明, 魏小芳, 何峰, 贺伟 (2008) 石油污染土壤植物修复根际效应研究. *石油化工高等学校学报*, **2**, 36-40.