

表面活性剂 Tween80 及 DOM 对土壤中菲、芘解吸的影响

王艮梅^{1,2}, 孙成², 谢学群³

(1. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037; 2. 南京大学环境学院, 南京 210093; 3. 南京农业大学理学院, 南京 210095)

摘要:采用室内序批试验研究了水溶性有机物(DOM)及表面活性剂 Tween80 对污染土壤中菲、芘解吸行为的影响. 结果表明, DOM 能够增加土壤中菲、芘的解吸率, 且猪粪堆肥的 DOM 作用效果较好; 随着体系中 Tween80 浓度的增加, 土壤中菲、芘的解吸率也明显地增加, 当 Tween80 浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 菲、芘的解吸率分别是对照的 1.7 倍(菲)和 6.2 倍(芘); DOM 与 Tween80 联合作用时受 Tween80 浓度的影响, 低浓度时联合作用效果不明显, 当 Tween80 为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 菲、芘的解吸率显著增加且大于两者单独作用的结果之和. 试验结果还表明, 同等条件下高相对分子质量 DOM 组分(> 25000)对土壤中菲、芘的解吸作用大于低相对分子质量 DOM 组分(< 1000).

关键词:水溶性有机物; Tween80; 菲; 芘; 解吸作用

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2007)04-0832-06

Effect of Nonionic Surfactant Tween80 and DOM on the Behaviors of Desorption of Phenanthrene and Pyrene in Soil-Water Systems

WANG Gen-mei^{1,2}, SUN Cheng², XIE Xue-qun³

(1. College of Forestry Resources and Environmental Sciences, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. School of the Enviroment, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. College of Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Batch experiments were conducted to study the effects of dissolved organic matter (DOM) and nonionic surfactant (Tween80) on the desorption of phenanthrene and pyrene in soil-water systems. The results showed that DOM derived from pig manure and pig manure compost increased the desorption of phenanthrene and pyrene in soil-water systems, and the effect of pig manure compost DOM was better than that of pig manure DOM; with the increase of Tween80, the desorption rate of phenanthrene and pyrene also increased compared with the control, especially at high concentration of Tween80 ($150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). And at this concentration, the desorption rates were increased by 1.7 times for phenanthrene and 6.2 times for pyrene than that of the control. The combined effects of Tween80 and DOM on the desorption of phenanthrene and pyrene were influenced by the concentration of Tween80. When Tween80 at low concentration, the combined effects were not significant. However, with $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Tween80 in soil-water systems, the desorption rates of phenanthrene and pyrene were drastically higher than the sum of DOM and Tween80. The results also indicated that DOMs with high molecular-size fraction (> 25000) could attain a higher desorption of both phenanthrene and pyrene in soil-water systems than their low molecular-size counterpart (< 1000) under the same experiments conditions.

Key words: DOM; Tween80; phenanthrene; pyrene; desorption

普遍认为, PAHs 在土壤中极易被土壤胶体吸附^[1,2], 在土壤中活性较低, 难于迁移. 然而大量研究表明表面活性剂可以明显提高土壤中 PAHs 及其他一些疏水性有机污染物的溶解性、解吸性和生物降解性^[3~11], 并进一步影响 PAHs 在环境中的迁移转化. 但由于表面活性剂在实际应用过程中存在很多不足, 如受土壤吸附的影响, 用量太大, 花费高; 难于被土壤微生物降解, 溶解度较低, 有可能会存在土壤的二次污染问题等^[12], 在很大程度上限制了表面活性剂对有机污染土壤的修复使用.

DOM 可以充当许多微量有机或无机污染物的主要迁移载体, 促进它们在土壤和水环境中的迁移

和扩散^[13]. 研究发现, DOM 可以提高疏水性有机污染物如 PAHs 在环境中的活性^[14~17]. Raber 等研究发现, 随着施入土壤中 DOM 浓度的增加, PAH 的解吸呈线性增加^[18]; Kogel-Knabner 等也得到类似结果, 而且指出促进 PAHs 解吸的 DOM 主要是高相对分子质量组分(> 14000)^[1]; Chiou 和 Magee 报道了溶解性腐殖酸增大了一些有机污染物和农药的溶解性^[17,19]; Nelson 等报道, DOM 明显提高了草萘胺和扑

收稿日期: 2006-04-22; 修订日期: 2006-07-03

基金项目: 南京林业大学高学历人才基金项目(163010031)

作者简介: 王艮梅(1976~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为土壤环境污染化学, E-mail: wangyinmei920@yahoo.com.cn

草净向土壤深层迁移的能力^[20]。然而,目前有关 DOM 对有机污染物环境行为的影响,大部分都集中在碱浸提的有机酸和商业腐殖酸类物质上如腐殖酸(HA)和富里酸(FA)^[20],而且大多研究都集中在水环境中^[15,22,23]。DOM 对有机污染物影响机理的研究也大多借鉴腐殖酸研究的结果^[24],而且相关研究所用的这些载体类物质与土壤中自然存在 DOM 相比并不具有代表性,而从土壤中直接提取或从施用到土壤的有机物料中提取的 DOM 更具有实际意义^[18,25]。

从以往研究可知表面活性剂及 DOM 都可以提高土壤中 PAHs 的活性,然而在很多情况下表面活性剂和 DOM 可能同时存在,如未经处理的生活污水及工业废水以及污泥等的农地利用,那么它们如何影响疏水性污染物在环境中的性质及迁移转化规律,DOM 和表面活性剂的共存是否对环境中 PAHs 的行为产生联合效应,目前有关这方面的研究鲜见报道。

因此,本实验在现有研究的基础上,以农地中常用的 2 种代表性有机肥(猪粪和猪粪堆肥)的 DOM 和表面活性剂吐温(Tween80)为材料,以菲(phenanthrene)、芘(pyrene)为 PAHs 的代表,通过室

内序批试验从机理上来研究表面活性剂及 DOM 对污染土壤中 PAHs 的解吸作用及两者对 PAHs 的联合效应,从而为 PAHs 污染土壤的修复及其风险评估提供科学理论依据,并进一步了解疏水性有机污染物在环境中的归宿。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自香港绿田园农场 0~15 cm 表层土样(非污染土),样品取回后风干,磨细,过 1mm 筛,保存备用,基本性质见表 1。供试 PAHs 选用菲(分析纯)、芘(分析纯)2 种,购自 Aldrich chemical Co.,纯度都为 98%,菲、芘的分子量分别为 178.23 和 202.26,25℃纯水中溶解度为 1.2 mg·L⁻¹和 0.12 mg·L⁻¹,辛醇-水分配系数(lgK_{ow})为 4.45 和 4.88^[26],买回后直接使用。供试的表面活性剂 Tween80(分析纯)直接购于 Sigma Co., Tween80 临界胶束浓度(CMC)为 15 mg·L⁻¹。供试有机物料为猪粪和猪粪堆肥,猪粪取自香港嘉道理农场,猪粪堆肥为南京象山有机肥厂的猪粪堆制而成。

1.2 菲、芘污染土壤的制备

表 1 供试土壤的基本理化性质
Table 1 Physico-chemical properties of selected soil

土壤	pH(H ₂ O, 1:10)	EC/ μ S·cm ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹	沙粒/g·kg ⁻¹	粉沙(< 2 mm)/g·kg ⁻¹	粘粒/g·kg ⁻¹
砂壤土	5.87	26.3	28.4	509	327	164

将一定量的菲和芘溶于有机溶剂二氯甲烷(DCM)中,然后分别加入备用的土壤中,与土壤充分混匀,在室温下静置培养,待土壤中 DCM 完全挥发(约培养 48 h)后,样品保存备用。经正己烷测定,培养后的土壤中菲、芘的含量分别为 105.3 mg·kg⁻¹和 132.1 mg·kg⁻¹。

1.3 供试有机物料中 DOM 的提取

猪粪和猪粪堆肥样品都采用 1:40 的固液比例

(物料干重 g/超纯水体积 mL)浸提,在 25℃下 200 r/min 的水平振荡机上振荡 16 h 后,以 12 000 r/min 低温(4℃)离心 10 min,上清液过 0.45 μ m 的滤膜,滤液中的有机物即为 DOM,其浓度采用 TOC 仪(TOC-5000A, Shimadzu)测定^[27]。DOM 组分测定:亲水性和疏水性组分采用 XAD-8 树脂柱分离法进行^[28],表观分子量大小测定采用透析法进行^[29]。基本性质见表 2。

表 2 供试有机物料的基本性质
Table 2 Fundamental properties of the selected DOM

分类	不同相对分子质量的组成比例/%			亲水-疏水比例/%	
	< 1 000	1 000 ~ 25 000	> 25 000	Hi	Ho
猪粪 DOM	65.06	5.73	29.21	54.02	45.98
猪粪堆肥 DOM	30.95	18	51.05	46.33	53.67

1.4 试验设计

分别称取 0.50 g 培养后的菲、芘污染土样于 20

mL 广口玻璃瓶中,按照固液比为 1:20 的比例加入含 200 mg·L⁻¹ HgCl₂(微生物活动抑制剂)的猪粪

DOM(简称: PM)、猪粪堆肥(简称: PC)和 Tween80 溶液 10 mL, DOM 的浓度(以 C 计,下同)分别为 0, 50, 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Tween80 浓度分别为 0, 7.5, 75, 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 同时设计对照处理(CK), 即用含 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ HgCl_2 的超纯水代替 DOM 或 Tween80 溶液. 然后在水平振荡机上于 22℃, 250 r/min 条件下恒温振荡 24 h(根据预备试验确定)后, 取约 1.5 mL 的土壤悬液在高速(12 000 r/min)离心机(Eppendorf Centrifuge 5417C)上离心 10 min, 用 HPLC(Model no. 515; Water, St. Milford, MT)测定上清液中菲、芘的含量. 每个样品重复 3 次.

为进一步研究猪粪和猪粪堆肥 DOM 分子量大小对污染土壤中菲、芘解吸作用的影响, 分别选用了相对分子质量 < 1 000 和 > 25 000 的组分进行如下试验. 分别称取 0.50 g 培养后的菲、芘污染土样于 20 mL 广口玻璃瓶中, 按照固液比为 1:20 的比例加入含 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ HgCl_2 (微生物活动抑制剂)的溶液 10 mL, 溶液中相对分子质量 < 1 000 和 > 25 000 组分的 DOM 浓度为 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Tween80 浓度为 0 或 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 同时设计对照处理. 然后在水平振荡机上于 22℃, 250 r/min 条件下恒温振荡 24 h 后, 取约 1.5 mL 的土壤悬液在高速(12 000 r/min)离心机(Eppendorf Centrifuge 5417C)上离心 10 min, 用 HPLC(Model no. 515; Water, St. Milford, MT)测定上清液中菲、芘的含量. 每个样品重复 3 次.

1.5 色谱分析条件

样品采用高效液相色谱/荧光检测器测定, 色谱条件为: $\phi 3.6\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ 反相 C^{18} 色谱柱; 流动相为 100% 丙酮, 流速 1.5 mL/min^[30], 菲、芘的激发波长和发射波长分别为 244 nm 和 360 nm(菲), 237 nm

和 385 nm(芘). 菲、芘样品检测灵敏度为 1 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 预备试验表明, Tween80 和 DOM 不会干扰菲、芘的荧光检测精度.

2 结果与讨论

2.1 DOM 及 Tween80 对污染土壤中菲、芘解吸作用的影响

图 1 显示了猪粪、猪粪堆肥 DOM 及 Tween80 对污染土壤中菲、芘解吸作用的影响结果. 总体趋势表现为 DOM 和 Tween80 都可促进污染土壤中菲、芘解吸, 其中对菲的解吸作用强于芘, 这是由于芘具有较大的辛醇-水分配系数($\lg K_{ow} = 4.88$).

从图 1 中可以看出, 与对照相比, DOM 能够明显地增加土壤中菲、芘的解吸率, 且高浓度的 DOM 作用效果更为显著. 当 DOM 浓度为 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 菲、芘的解吸率分别是对照的 1.67 ~ 1.68 倍(菲), 1.73 ~ 2.2 倍(芘); 当 DOM 浓度为 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 菲、芘的解吸率分别比对照增加了 1.89 ~ 2.01 倍(菲), 3.14 ~ 4.59 倍(芘). 这是因为 DOM 是两性物质, 其疏水性组分部分与疏水性有机污染物的疏水相作用, 从而提高了它们的解吸率; 此外, 可能是由于 DOM 具有表面活性, 能够提高菲、芘的解吸作用. 同样有研究表明 DOM 具有表面活性剂的性质, 能够明显提高疏水性污染物的活性^[31]. 在同等条件下, 猪粪堆肥 DOM 的作用效果要比猪粪 DOM 的作用效果明显, 从表 2 可以看出, 前者的疏水性组分的比例比后者高, 因此对疏水性污染物菲、芘的作用效果要好. Kukkonen 和 Maxin 研究同样认为, DOM 中能够提高疏水性污染物活性的主要是其疏水性组分^[32, 33].

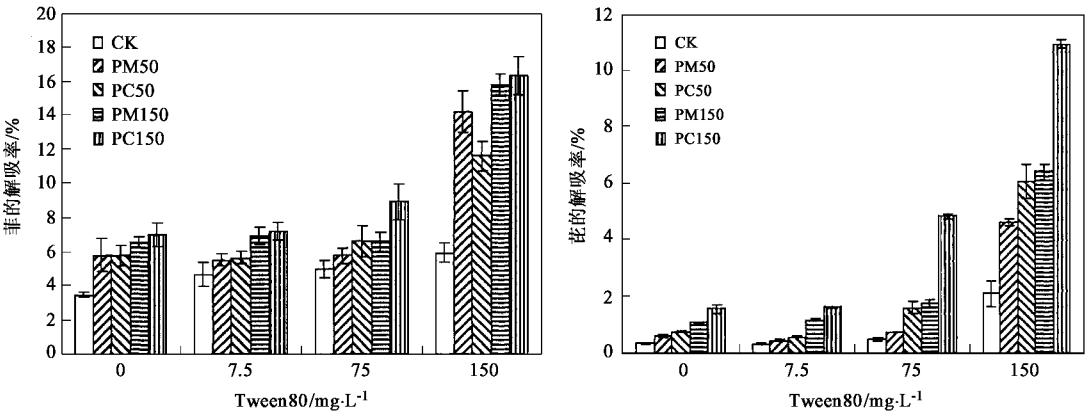


图 1 DOM 及 Tween80 对污染土壤中菲、芘解吸率的影响

Fig. 1 Effects of DOM derived from pig manure and pig manure compost and Tween80 on the desorption of phenanthrene and pyrene from soil to aqueous phase

从图 1 中还可以看出,表面活性剂 Tween80 对菲、芘的解吸受其自身浓度的影响,在小于临界胶束浓度 (critical micelle concentration, 1CMC = 15 mg•L⁻¹) 时,对菲、芘的解吸率的影响不大,随着体系中 Tween80 浓度的增加,特别当 Tween80 浓度达到 150 mg•L⁻¹ 时,菲、芘的解吸率增加显著,尤其是对芘的作用效果更为明显,此时土壤中菲、芘的解吸率分别是对照的 1.7 倍(菲)和 6.2 倍(芘). 这可能是由于 Tween80 浓度较低时,在土-水体系中形成的疏水性空间较小,因此能够提供与菲、芘作用的空间小;另一方面低浓度的 Tween80 由于其形成的胶束聚合物的外围的亲水空间远比高浓度时要小,相对来说,胶束聚合物在溶液中的溶解度相对较小,因此本身也有可能易被土壤吸附,从而使得部分被从土壤上解吸下来的菲、芘又重新被土壤吸附;或表面活性剂的吸附直接降低了其对吸附在土壤上的菲、芘的解吸作用. 而当溶液中 Tween80 浓度较高时, Tween80 分子之间形成较大的胶束团聚物 (micelles),疏水性的尾部位于胶束内部,形成疏水性很强的空间,而亲水性的头部位于外部,在其头部周围全部是水分子,土壤对整个聚合物的吸附作用很弱,胶束基本都存在溶液中,此时,菲、芘直接与内部的疏水性尾部作用,因此能够显著地降低菲、芘在土壤上的吸附,提高土壤中菲、芘的解吸率.

图 1 还表明,当 DOM 和表面活性剂 Tween80 共存于体系中,并在 Tween80 浓度较低时, DOM 与 Tween80 对菲、芘解吸作用的联合效果与体系中仅有对应的 DOM 时的作用效果基本接近. 然而,当 Tween80 为 150 mg•L⁻¹ 时, DOM 和其共存时对菲、芘解吸的联合作用效果远大于两者单独作用之和,在试验 DOM 浓度范围内菲、芘解吸率分别是 PM 及 PC 处理的 2.41 ~ 2.44 倍和 2.00 ~ 2.33(菲), 6.00 ~ 7.79 倍和 7.00 ~ 8.08 倍(芘);是 Tween80 单独作用的 1.97 ~ 2.77 倍(菲)和 2.19 ~ 5.20 倍(芘). 对于芘来说,当 Tween80 仅为 75 mg•L⁻¹ 时这种作用效果就很明显,而当 Tween80 在低浓度时不存在这种作用效果. 其原因可能是由于高浓度的 Tween80 和 DOM 之间存在某种物理或化学的反应, Tween80 加入后改变了 DOM 对土壤菲、芘的作用. 为了进一步检验 Tween80 和 DOM 对菲、芘的联合作用,选用高浓度的 Tween80 (150 mg•L⁻¹) 来研究两者对菲、芘解吸率的联合效应,通过比较 Tween80 和 DOM 单独作用时菲、芘的解吸率之和与 Tween80 和 DOM 共存体系时菲、芘解吸率(见表 3),发现 Tween80 和 DOM 共存体

系时对菲、芘解吸的联合作用效果高于两者单独作用的结果之和. 其原因可能是由于 DOM 和 Tween80 本身在土壤和溶液中存在一个平衡, Tween80 在低浓度条件下不足以和土壤竞争 DOM, 或者 DOM 在其影响下成为 Tween80 和土壤之间的桥梁, 因此, 菲、芘的解吸率变化不大. 当 Tween80 在高浓度条件下形成胶束聚合物后,一方面与土壤竞争被吸附的 DOM 能力增强,增加了 DOM 的溶解度,从而提高了 DOM 对土壤菲、芘的解吸作用;另一方面, Tween80 胶束聚合物本身和 DOM 产生反应形成的 DOM-Tween80 配合物,其疏水性环境空间可能更大,对土壤菲、芘的解吸作用很强,其机理有待进一步试验证明. 目前有关这方面的研究并无报道.

表 3 Tween80 与 DOM 单独及联合作用时对污染土壤中菲、芘解吸率的影响比较/%

Table 3 Comparison of the desorption rate for phenanthrene and pyrene influenced by DOM derived from pig manure (PM) and pig manure compost (PC) and Tween80 at 150 mg•L⁻¹ in soil-water systems/%

处理	菲	芘
PM50 ¹⁾ -Tween 80 ²⁾	14.16 ± 1.24 ⁴⁾	4.60 ± 0.13
PC50 ¹⁾ -Tween 80	15.77 ± 0.57	6.40 ± 0.26
PM150 ¹⁾ -Tween 80	11.57 ± 0.88	6.06 ± 0.58
PC150 ¹⁾ -Tween 80	16.24 ± 1.13	10.93 ± 0.14
PM50 ¹⁾ + Tween 80 ³⁾	11.68 ± 0.97	2.69 ± 0.06
PC50 ¹⁾ + Tween 80	12.41 ± 0.31	3.17 ± 0.02
PM150 ¹⁾ + Tween 80	11.95 ± 1.03	2.85 ± 0.01
PC150 ¹⁾ + Tween 80	12.84 ± 0.67	3.67 ± 0.13

1) 分别表示猪粪和猪粪堆肥 DOM 浓度为 50 或 150 mg•L⁻¹; 2) 表示 DOM 和 Tween80 共存于体系中的联合作用结果; 3) 表示 DOM 和 Tween80 单独作用结果的相加; 4) 平均值 ± 标准偏差 (n = 2)

2.2 DOM 分子量大小对污染土壤中菲、芘解吸作用的影响

在 2.1 的研究结果中发现,猪粪堆肥 DOM 对污染土壤中菲、芘解吸作用比猪粪 DOM 的作用效果好,笔者认为可能是由于 2 种 DOM 中大分子量及疏水性组分比例差异引起的,一般认为大分子量及疏水性组分对有机污染物活性的提高起主要作用. 因此,为了进一步从机理上阐述不同 DOM 作用效果的差异性,将 DOM 分组后进行研究. 根据表 2 的数据,猪粪和猪粪堆肥 DOM 中相对分子质量不同组分主要分布在 < 1 000 和 > 25 000 范围内,本试验采用了这 2 个分子量范围内组分进行研究其对土壤中菲、芘解吸效果的影响,结果见图 2. 从图 2 可以看出,与相对分子质量 < 1 000 组分相比,同等条件下猪粪和猪粪堆肥 DOM 中相对分子质量 > 25 000 的组分显

著的增加了污染土壤中菲、芘的解吸,无 Tween80 时菲、芘的解吸率分别比相对分子质量 $< 1\,000$ 的高出 2.67%,0.36% (猪粪 DOM) 和 2.34%,1.06% (猪粪堆肥 DOM),Tween80 为 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 菲、芘的解吸量分别高出 3.44%,1.59% (猪粪 DOM) 和 2.38%,2.46% (猪粪堆肥 DOM),这进一步证实,高分子量组分 DOM 对菲、芘的解吸作用起关键性的作用.这与以往很多研究结果相似^[1,2].图 2 还显示,Tween80 能够促进土壤中菲、芘的解吸(结果同 2.1),当 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Tween80 与不同分子量 DOM 共存时,菲、芘解吸效果类似 2.1 中的结果,具体原因分析见 2.1,而且高分子量组分 ($> 25\,000$) 与 Tween80 对菲、芘解吸的联合效果明显强于低分子量组分 ($< 1\,000$),这说明 DOM 中影响其与 Tween80 相互作用的成分可能主要是高分子量组分.这同样需要进一步地试验证实.图 2 还证实同等条件下,污染土壤中芘的解吸效果明显高于菲,这主要受这 2 种有机物的辛醇-水分配常数的影响.

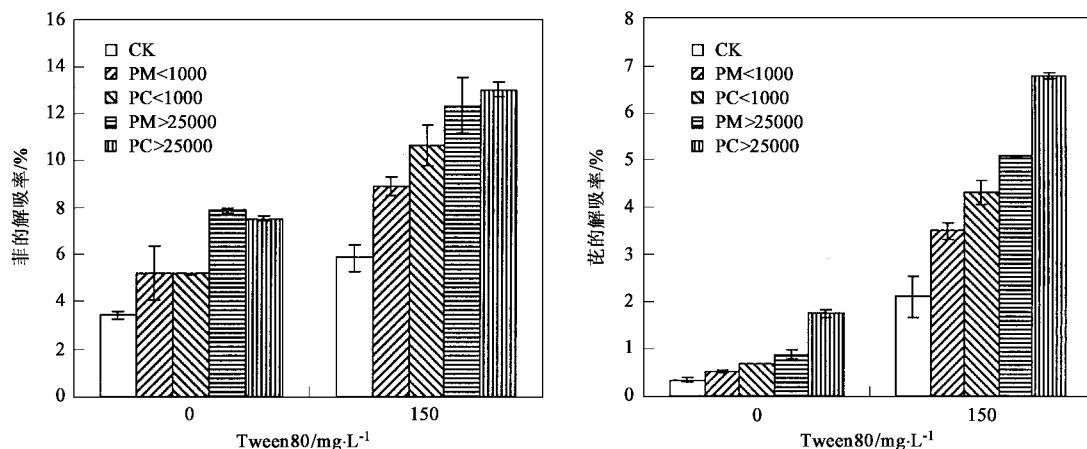


图 2 不同分子量大小的 DOM 对土壤中菲、芘解吸作用的影响

Fig.2 Desorption of phenanthrene and pyrene from soil to aqueous phase in the presence of different molecular-fractions ($< 1\,000\text{Da}$ and $> 25\,000$) of DOM derived from pig manure/pig manure compost, and 0 and $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of Tween80

从上述研究结果来看,表面活性剂 Tween80 和 DOM 都能提高污染土壤中菲、芘在水相中的溶解度,尤其是在 Tween80 和 DOM 联合作用下,效果更为显著.水相中 PAHs 量的增加为 PAHs 的微生物降解和植物吸收提供了条件,便于后期 PAHs 污染土壤的生物修复工作的进行.

3 结论

(1) 猪粪和猪粪堆肥 DOM 能够增加污染土壤中菲、芘的解吸作用,且受 DOM 浓度及性质的影响,疏水性组分含量高的猪粪堆肥 DOM 对菲、芘解吸作用的影响大于猪粪 DOM.

(2) 表面活性剂 Tween80 能增加土壤中菲、芘的解吸率,尤其在高浓度条件下作用效果更为显著.

(3) 低浓度的 Tween80 与 DOM 共存于土-水体系中时对土壤菲、芘的解吸作用的影响与对应 DOM 的作用效果相近,高浓度的 Tween80 与 DOM 共存于土-水体系中时对土壤菲、芘的解吸作用的影响大于两者单独作用的效果之和.

(4) 同等条件下高分子量 DOM 组分 ($> 25\,000$) 对土壤中菲、芘的解吸作用大于低分子量 ($< 1\,000$) DOM 组分.

参考文献:

- [1] Kogel-Knabner I, Kai U T, Bernd R. Desorption of polycyclic aromatic hydrocarbons from soil in the presence of dissolved organic matter: effect of solution composition and aging[J]. J. Environ. Qual., 2000, 29(3): 906 ~ 916.
- [2] Raber B, Kogel-Knabner I. Influence of origin and properties of dissolved organic matter on the partition on PAH[J]. Eur. J. Soil Sci., 1997, 48: 443 ~ 455.
- [3] 宋玉芳,孙铁珩,许华夏.表面活性剂 TW-80 对土壤中多环芳烃生物降解的影响[J].应用生态学报,1999,10(2): 230 ~ 232.
- [4] 赵育军,薛元英.正负离子表面活性剂混合溶液的增溶作用[J].西北大学学报,2000,30(1): 28 ~ 31.
- [5] 朱利中,冯少良.混合表面活性剂对多环芳烃的增溶作用及机理[J].环境科学学报,2002,22(6): 774 ~ 778.
- [6] An Y, Mark A. Solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons by perfluorinated surfactant micelles[J]. Water Res., 2002, 36: 300 ~ 308.

- [7] Edwards D A, Richard G L, Liu Z. Solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons in micellar nonionic surfactant solutions[J]. Environ. Sci. Technol., 1991, **25**: 127 ~ 133.
- [8] Hill A J, Ghoshal S. Micellar solubilization of naphthalene and phenanthrene from nonaqueous-phase liquids[J]. Environ. Sci. Technol., 2002, **36**: 3901 ~ 3907.
- [9] Laha S, Luthy R G. Effect of non-ionic surfactants on the solubilization and mineralization of phenanthrene in soil water systems[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1992, **40**: 1367 ~ 1380.
- [10] Zhu L, Chiou C T. Water solubility enhancements of pyrene by single and mixed surfactant solution[J]. J. Environ. Sci., 2001, **13**: 491 ~ 496.
- [11] Zhu L, Feng S. Synergistic solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons by mixed anionic-nonionic surfactants [J]. Chemosphere, 2003, **53**(5): 459 ~ 467.
- [12] Laha S, Luthy R G. Inhibition of phenanthrene mineralization by non-ionic surfactants in soil-water systems [J]. Environ. Sci. Technol., 1991, **25**: 1920 ~ 1930.
- [13] 王艮梅,周立祥.陆地生态系统中水溶性有机物动态及其环境学意义[J],应用生态学报,2003,**14**(11):2019 ~ 2025.
- [14] Dunnivant F M, Jardine P M, Taylor D L, *et al.* Cotransport of cadmium and hexachlorobiphenyl by dissolved organic carbon through columns containing aquifer material[J]. Environ. Sci. Technol., 1992, **26**: 360 ~ 368.
- [15] Johnson W P, Amy G L. Facilitated transport and enhanced desorption of polycyclic aromatic hydrocarbons by natural organic matter in aquifer sediments[J]. Environ. Sci. Technol., 1995, **29**: 807 ~ 817.
- [16] Kan A T, Tomson M B. Groundwater transport of hydrophobic organic compounds in the presence of dissolved organic matter[J]. Environ. Toxicol. Chem., 1990, **9**: 253 ~ 263.
- [17] Magee B R, Lion K W, Lemley A T. Transport of dissolved macromolecules and their effect on the transport of phenanthrene in porous media[J]. Environ. Sci. Technol., 1991, **15**: 578 ~ 587.
- [18] Raber B, Kogel-Knabner I, Stein C, *et al.* Partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons to dissolved organic matter from different soils[J]. Chemosphere, 1998, **36**: 79 ~ 97.
- [19] Chiou C T, Malcolm R I, Brinton T I, *et al.* Water solubility enhancement of some organic pollutants and pesticides by dissolved humic and folic acids[J]. Environ. Sci. Technol., 1986, **20**: 502 ~ 508.
- [20] Nelson S D, Letey J, Farmer W J, *et al.* Facilitated transport of napropamide by dissolved organic matter in sewage sludge amended soil[J]. J. Environ. Qual., 1998, **27**: 1194 ~ 1200.
- [21] Kogel-Knabner I, Totsche K U. Influence of dissolved organic and colloidal phase humic substances on the transport of hydrophobic organic contaminants in soil[J]. Phys. Chem. Earth, 1998, **23**: 179 ~ 185.
- [22] Chin Y P, Aiken G R. Binding of pyrene to aquatic and commercial humic substances: The role of molecular weight and aromaticity[J]. Environ. Sci. Technol., 1997, **31**: 1630 ~ 1635.
- [23] Schlautman M A, Morgan J J. Effects of aqueous chemistry on the binding of polycyclic aromatic hydrocarbons by dissolved organic materials[J]. Environ. Sci. Technol., 1993, **27**(5): 961 ~ 969.
- [24] 黄泽春,陈同斌,雷梅.陆地生态系统中水溶性有机质的环境效应[J].生态学报,2002,**22**(2):259 ~ 269.
- [25] Marxin C, Kogel-Knabner I. Partitioning of PAH to DOM: Implications on PAH mobility in soils[J]. Eur. J. Soil Sci., 1995, **46**: 193 ~ 204.
- [26] 高彦征. 土壤 PAHs 污染的植物修复及机制[D]. 浙江: 浙江大学, 2004.
- [27] 王艮梅,周立祥.施用有机物料对污染土壤中水溶性有机物和铜活性的动态影响[J].环境科学学报,2003,**23**(4):452 ~ 457.
- [28] Zhou L X, Wong J W C. Behavior of heavy metals in soil: Effect of dissolved organic matter. In M. Selim and W. L. Kingery (eds.) Geochemical and hydrological reactivity of heavy metals in soils[M]. New York: CRC Press LLC, 2003. 245 ~ 270.
- [29] Zhou L X, Wong J W C. Microbial decomposition of dissolved organic matter derived from organic wastes and its control during sorption experiment[J]. J. Environ. Qual., 2000, **29**: 1852.
- [30] Wong J W C, Fang M, Zhao Z, *et al.* Effect of surfactants on solubilization and degradation of phenanthrene under thermophilic conditions[J]. J. Environ. Qual., 2004, **33**: 2015 ~ 2025.
- [31] 占新华,万寅婧,周立祥.水溶性有机物对土壤中菲的生态毒性影响[J].环境科学,2004, **25**(3):120 ~ 124.
- [32] Kukkonen J, McCarthy J F, Oikari A. Effects of XAD-8 fractions of dissolved organic carbon on the sorption and bioavailability of organic micropollutants[J]. Arch. Environ. Contam. Toxicol., 1990, **19**: 551 ~ 557.
- [33] Marxin C, Kogel-Knabner I. Partitioning of PAH to DOM: Implications on PAH mobility in soils[J]. Eur. J. Soil Sci., 1995, **46**: 193 ~ 204.