DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.05.024

李力, 陈明茹, 张久红, 等. 外源添加作物秸秆对 PAHs 污染土壤有机碳矿化和污染物降解的影响. 土壤, 2022, 54(5): 1058–1063.

外源添加作物秸秆对 PAHs 污染土壤有机碳矿化和污染物降解的影响①

李 力[1,2], 陈明茹[1,2], 张久红[3], 张 军[3], 黄应平[1,2], 袁 喜[1,2], 李 萌[1,2*]

(1 三峡大学生物与制药学院, 湖北宜昌 443002; 2 三峡库区生态环境教育部工程研究中心(三峡大学), 湖北宜昌 443002; 3 宜昌市森林资源监测站, 湖北宜昌 443000)

摘 要: 本文通过土壤腐解试验研究外源添加水稻或玉米秸秆对多环芳烃(PAHs)污染土壤 CO_2-C 释放和污染物去除率的影响, 同时清晰秸秆腐解中间产物溶解性有机碳(DOC)与土壤 PAHs 降解的关系。结果表明: 秸秆添加处理促进了 PAHs 污染土壤 CO_2-C 的释放, 以玉米秸秆提升效果较好。外源添加秸秆显著增加了土壤 DOC 含量, 且增加幅度随秸秆添加量的增加而增大; 水稻秸秆对土壤 DOC 含量的提升幅度较大。与对照相比, 秸秆添加处理下土壤菲、芘残留量均显著降低, 菲、芘去除率显著增加, 去除效果: 玉米>水稻, 高量>低量, 菲>芘; 与对照相比, 添加高量玉米秸秆处理(PY_{15})对土壤菲、芘去除率的增加幅度分别为 91.7% 和 182%。此外, 在一定范围内土壤 DOC 含量与 PAHs 去除率呈正相关关系。可见, 农作物秸秆, 尤其是玉米秸秆添加可提升 PAHs 污染土壤有机碳矿化, 亦可在提升土壤 DOC 含量的同时促进污染土壤 PAHs 的降解。

关键词: 秸秆腐解; 有机碳矿化; 可溶性有机碳; PAHs 去除率

中图分类号: X53 **文献标志码:** A

Effect of Straw Addition on Organic Carbon Mineralization and Pollutant Degradation in PAHs Contaminated Soil

LI Li[1,2], CHEN Mingru[1,2], ZHANG Jiuhong[3], ZHANG Jun[3], HUANG Yingping[1,2], YUAN Xi[1,2], LI Meng[1,2*]

(1 *College of Biology* and *Pharmacy*, *China Three Gorges University*, *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*; 2 *Engineering Research Center of Eco-Environment in Three Gorges Reservoir Region*, *Ministry of Education*, *China Three Gorges University*, *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*; 3 *Forest Resources Monitoring Station*, *Yichang*, *Hubei* 443000, *China*)

Abstract: A soil incubation experiment was conducted to investigate the effect of corn or rice straw addition on CO_2-C release and pollutant removal in polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soil, and examine the relationship between soil dissolved organic carbon (DOC) and PAHs degradation. The results show that the release of CO_2-C is increased by straw added treatment in PAHs polluted soil, and the effect of corn straws is better. Soil DOC concentration is significantly increased by straw supplement, and the increase amplitude is further improved by the increasing level. Compared to corn straws, rice straws cause the higher level of soil DOC. Meanwhile, soil residual PAHs concentrations are significantly decreased by straw added treatments compared with CK, and the removal rate of pollutants is correspondingly increased. The removal efficiency follows as: corn straw better than rice straw, high addition rate better than low level, phenanthrene better than pyrene. Compared to CK, the removal rate of phenanthrene and pyreneare respectively increased by 91.7% and 182% with high level of corn straw addition. In addition, soil DOC concentration is positively correlated with the removal rate of PAHs in a certain range. Consequently, high addition amount of corn straws can promote soil organic carbon mineralization, increase soil DOC concentration and the degradation of PAHs in PAHs polluted soils.

Key words: Straw decomposition; Organic carbon mineralization; Dissolved organic carbon; PAHs removal rate

随着能源需求量的增加,化石燃料或生物质燃烧导致多环芳烃(PAHs)污染日趋严重,由此对周边农田土壤质量造成严重威胁。全国土壤污染调查结果表明, PAHs 是造成我国土壤污染最主要的有机污染物

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42107441, 21972073)、宜昌市森林抚育效益监测项目(SDHZ2020313)和 111 引智项目(D20015)资助。

* 通讯作者(renyaxi520@126.com; chem_ctgu@126.com)

作者简介: 李力(1998—), 男, 湖北十堰人, 硕士研究生, 主要从事有机污染物降解及资源化利用研究。E-mail: 2425420181@qq.com

之一[1]。其具有强烈的致癌、致畸和致突变效应，可在植物组织中累积并进入食物链循环[2-3]。因此，寻求能够促进土壤 PAHs 降解的技术或方法成为众多研究关注的焦点。与物理或化学修复相比，生物修复是去除土壤 PAHs 最具潜力和经济有效的方法[4-5]。其中，生物刺激法通过改变微生物的栖息环境使其更利于微生物繁殖和生长，进而促进 PAHs 降解。C、N、P 等营养元素是微生物生长所必需的矿质元素，研究表明，外源添加碳源和氮源能够通过促进共代谢提升 PAHs 的降解[6-7]。然而，PAHs 水溶性低、吸附力强及分配和滞留等特性导致其生物有效性较低，有效降解较为困难[8]。

农业废弃物是一类经济、绿色、环保的有机材料，可增加土壤有机质，改善土壤结构，疏松土壤，增强孔隙度，降低容重，促进土壤微生物活性[9-11]。有研究表明，农业废弃物能够提升土壤质量，增加烃类化合物的去除率[12]。而作物秸秆腐熟过程产生的大量可溶性有机质(DOM)，亦可促进重金属由可提取态向残渣态的转变，从而降低其有效性；还能抑制土壤对重金属离子的吸附固定，促进螯合物的形成，增加植物对重金属离子的吸收[13-15]。此外，土壤 DOC 含量与土壤 PAHs 降解之间亦存在一定的相关性[1]。可见，秸秆腐解过程中间产物会影响土壤污染物的迁移和吸收，从而影响污染物的去除率。

我国秸秆年产量达 8 亿 t 以上，秸秆富含大量 C、N 等营养元素及有机物质，为避免资源浪费和环境污染，近年来有关秸秆再利用的研究备受关注[16]。其中，秸秆还田是现代化农业改革后资源可持续及高效利用的重要方式之一。研究发现水稻秸秆可作为有机肥施入土壤，通过微生物群落与污染物降解之间的邻近相关性成功去除土壤 PAHs[17]。此外，小麦秸秆和牛粪复合堆肥亦被证实可显著降低土壤菲含量，促进 PAHs 分解微生物的代谢活性[18]。然而，不同作物秸秆碳氮比(C/N)不同，使得其加入土壤后矿化/腐解速率不尽相同，进而影响其对 PAHs 的去除效果。

本文采用室内模拟试验，研究在控制温度和土壤水分含量条件下不同作物秸秆及添加量对 PAHs 污染土壤碳矿化、DOC 含量和 PAHs 降解的影响，以期为农业废弃物的循环利用及土壤 PAHs 降解措施的探寻提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验共设 9 个处理，分别为：只添加 PAHs(菲和芘，记为 P)、添加低量玉米秸秆(Y_5)、添加高量玉米秸秆(Y_{15})、添加低量水稻秸秆(S_5)、添加高量水稻秸秆(S_{15})、添加 PAHs+低量玉米秸秆(PY_5)、添加 PAHs+高量玉米秸秆(PY_{15})、添加 PAHs+低量水稻秸秆(PS_5)、添加 PAHs+高量水稻秸秆(PS_{15})，每个处理重复 3 次。秸秆的用量为 10 和 30 g/kg，菲和芘的添加量均为 200 mg/kg，纯度为 98%(Sigma–Aldrich，中国)。

1.2　培养方法

采用室内模拟恒温(25 ℃)培养的方法。试验土壤采自三峡大学植物园，土壤的基本理化性质为：砂粒含量 32%，粉粒含量 57%，黏粒含量 11%，土壤 pH 7.41，土壤有机质 2.79 g/kg，全氮 316 mg/kg，全磷 445 mg/kg。具体操作如下：将 500 g 风干过筛土(2 mm)置于直径 11.5 cm、高 15 cm 的带盖硬质塑料圆瓶中，添加 PAHs 时，先将其溶于少量丙酮，倒入盆中与土壤搅拌混匀，放置过夜待丙酮挥发。

玉米和水稻秸秆经清洗、烘干和粉碎处理后先与培养土混匀。培养过程中保持田间持水量的 70%。为了收集培养过程中产生的 CO_2，将装有 30 ml 1 mol/L NaOH 溶液的 50 ml 烧杯固定在培养瓶内侧，之后将培养瓶加盖密封，放置在恒温培养箱中。在培养开始第 2、4、7、10、16、22、28、38 和 48 天测定 CO_2 的释放量，每次测定完后换入新的 NaOH 溶液并用称量法补充所损失的水分。

1.3　指标测定和分析

称取 5 g 土壤样品放入玻璃离心管中，加入 5 g 无水硫酸钠后再加入 10 ml 二氯甲烷，超声 30 min 后离心 10 min(3 000 r/min)，将上清液倒入圆底烧瓶，如此重复 3 次。之后将盛有收集液的圆底烧瓶放入旋转蒸发仪至少于 1 ml 后倒入已活化好的层析柱中，之后一次性倒入 70 ml 正己烷和二氯甲烷(4∶7, *V*/*V*)的混合液冲洗柱子，洗脱液收集至圆底烧瓶后再次放入旋转蒸发仪蒸至快干后用氮吹仪吹干，最后用液相流动相溶解定容至 2 ml。该溶液经微膜过滤(0.22 μm)后置于高效液相色谱仪(HPLC，Waters 2695)专用测样瓶中待测。PAHs 测定所用的色谱柱为 PAHs 专用色谱柱，根据 PAHs 保留时间定性，PAHs 标准曲线线性良好，相关系数 r 均在 0.99 以上，样品重复间 PAHs 浓度的变异系数<10%，PAHs 加标回收率为 78.1%～108.3%。测定条件如表 1 所示。

土壤可溶性有机碳(DOC)含量的测定：称取 2 g 风干过筛土壤样品，加入 20 ml 超纯水，25 ℃ 振荡 18 h 经离心、过滤后通过 TOC 分析仪(Multi N/C 3000)进行测定。

表 1 HPLC 的测定条件设置
Table 1 HPLC setting of determination conditions

项目内容	参数设置
洗脱梯度	5 min 50% 乙腈/水；20 min 100% 乙腈；28 min 100% 乙腈；32 min 50% 乙腈/水
流速	1.5 ml/min
温度	30 ℃
测定波长	UV254 nm
进样量	20 μl

CO_2-C 矿化速率的计算公式如下[19]：

C 或 $CO_2(mg)=(B_v-S_v)\times N\times E$

式中：B_v 为滴定空白所用的 HCl 体积(ml)，S_v 为滴定样品所用的 HCl 体积(ml)，N 为 HCl 的浓度(mol/L)，E 为权重(CO_2-C=6，CO_2=22)。

1.4 数据处理

采用 SPSS 20.0 统计软件进行了处理间的方差分析，均值之间的多重比较采用最小显著差数法(LSD)，差异显著性水平为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 秸秆添加对 PAHs 污染土壤碳矿化的影响

各处理秸秆腐解过程中土壤有机碳矿化动态变化规律基本一致，均在秸秆腐解的第 2 ~ 4 天出现 CO_2-C 释放速率峰值；CO_2-C 矿化速率随培养时间延长而逐渐下降，并在秸秆腐解 18 d 后趋于稳定(图 1)。只添加 PAHs 处理(P)土壤在培养过程中 CO_2-C 矿化速率始终处于最低值，且随时间波动较小；低量水稻秸秆添加处理(PS_5 和 S_5)下 CO_2-C 矿化速率显著低于其他秸秆添加处理；玉米秸秆+PAHs 处理下 CO_2-C 的矿化速率高于单纯添加玉米秸秆，而水稻秸秆与此相反。

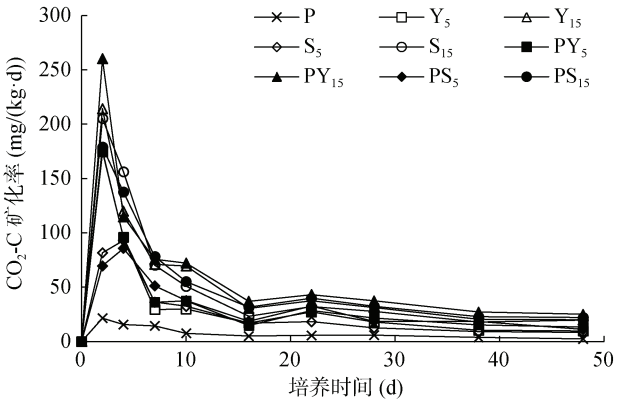


图 1 秸秆腐解过程中 CO_2-C 的矿化速率
Fig. 1 Mineralization rates of CO_2-C during straw decomposition under different straw types and addition rates

由培养过程中 CO_2-C 累积释放量结果可见，各处理 CO_2-C 累积释放量的变化趋势一致，均随培养时间的延长而增加(图 2)；在 0 ~ 10 d 内，各处理 CO_2-C 累积释放量急剧增加，后逐渐趋于平缓；添加秸秆处理下 CO_2-C 累积释放量明显增加；除添加高量水稻秸秆(S_{15})处理外，秸秆+PAHs 组合处理下 CO_2-C 累积释放量高于单独添加秸秆处理；此外，无论添加量高低，玉米秸秆添加后土壤 CO_2-C 累积释放量均高于水稻秸秆。

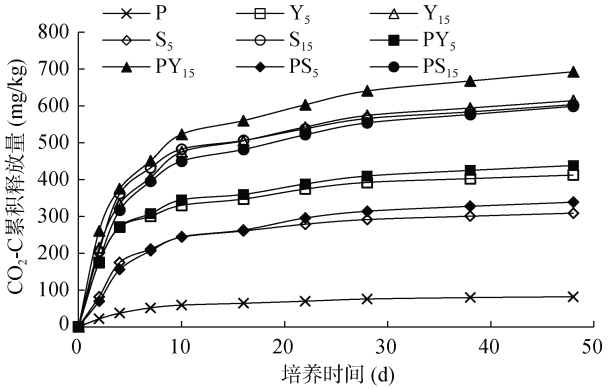
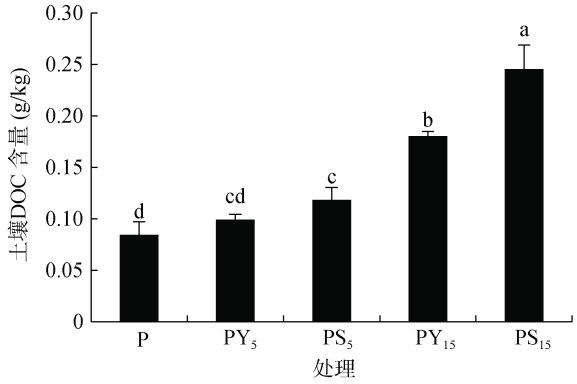


图 2 秸秆腐解过程中 CO_2-C 的累积释放量
Fig. 2 Cumulative releases of CO_2-C during straw decomposition under different straw types and addition rates

2.2 秸秆添加对土壤 DOC 含量的影响

土壤 DOC 含量受秸秆添加量的影响较大(图 3)。与对照(P)相比，秸秆添加提升了土壤 DOC 含量；高量秸秆添加处理较低量秸秆对土壤 DOC 含量的提升幅度更大；其中，高量玉米、水稻秸秆对土壤 DOC 含量的提升幅度分别为 51.8% 和 52.8%；此外，水稻秸秆添加处理土壤 DOC 含量均高于玉米秸秆。



(图中小写字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$)，下同)

图 3 不同作物秸秆和添加量对土壤 DOC 含量的影响
Fig. 3 Soil DOC concentrations under different straw types and addition rates

2.3　秸秆添加对土壤 PAHs 含量和去除率的影响

与对照相比，秸秆添加处理显著降低了土壤菲和芘的残留量，且土壤菲、芘残留量随秸秆添加量的增加而显著降低(图 4)。此外，同一添加量水平下，玉米秸秆添加对土壤菲、芘残留量的降低幅度更大。其中，高量玉米秸秆添加处理(PY_{15})较对照对土壤菲、芘残留量的降低幅度分别为 39.3% 和 21.8%。

土壤菲、芘去除率在秸秆添加后明显增加，且提升幅度随秸秆添加量的增加而增大(图 5)。玉米秸秆对菲、芘去除的效果更好，其中，添加高量玉米秸秆处理(PY_{15})对土壤菲、芘去除率的增加幅度分别为 91.7% 和 182%。

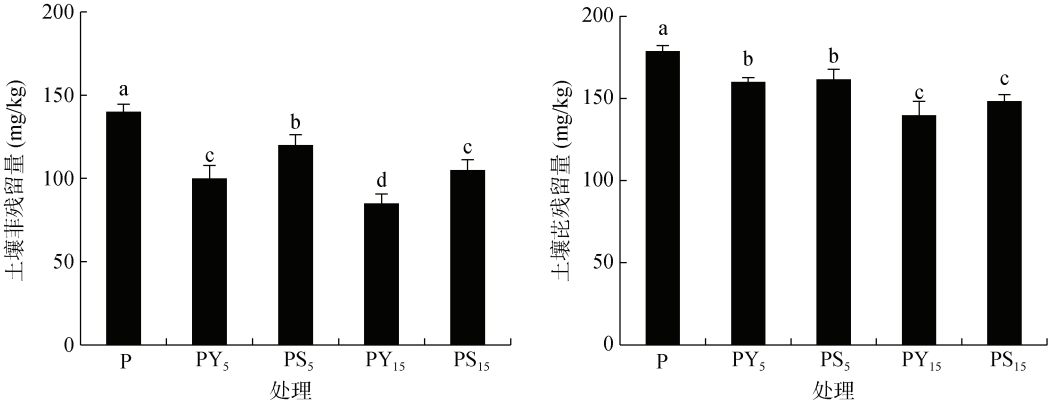


图 4　不同作物秸秆和添加量对土壤 PAHs 残留量的影响

Fig. 4　Soil PAHs concentrations under different straw types and addition rates

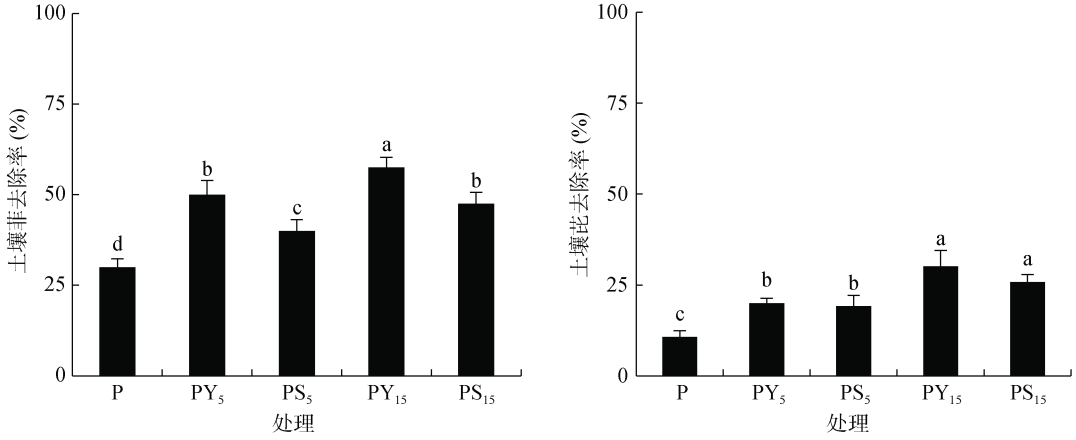


图 5　不同作物秸秆和添加量对土壤 PAHs 去除率的影响

Fig. 5　PAHs removal rates under different straw types and addition rates

2.4　土壤 PAHs 去除率和 DOC 含量的相关性

土壤 PAHs 去除率随土壤 DOC 含量的增加呈先增加后降低趋势(图 6)。当土壤 DOC 含量低于 0.20 g/kg 时，土壤 PAHs 去除率与 DOC 含量呈正相关关系；当土壤 DOC 含量高于 0.20 g/kg 后，土壤 PAHs 去除率反而降低。

3　讨论

本研究 48 d 培养试验结果表明，在 PAHs 污染土壤中添加玉米秸秆后土壤中有机碳的矿化速率高于单纯加 PAHs 或单纯添加玉米秸秆的处理(图 1)。由此可见，玉米秸秆的添加能够促进 PAHs 污染土壤中有机碳的矿化。其原因可能是：土壤中存在的 PAHs 亦为一种有机物，其降解的最终产物为 CO_2 和 H_2O，

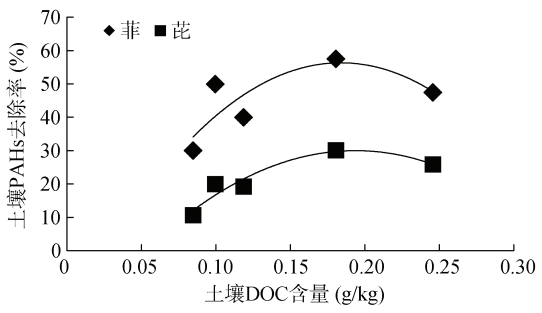


图 6　土壤 PAHs 去除率与土壤 DOC 的相关性

Fig. 6　Relationship between PAHs removal rate and soil DOC concentration

玉米秸秆加入土壤后，引发了正激发效应，在微生物暴增的同时促进了土壤中有机物的矿化，包括玉米秸秆和 PAHs 的共降解，从而增加了 CO_2 释放速率和释放量。然而，外源有机物料的加入也可能会导致土壤有机碳矿化作用的减缓，即产生负激发效应[20]。负激发效应主要发生在高 C/N、低微生物活性和酶活及吸附作用强的土壤上[21]。而本试验在开始时加入了一定量的氮肥，从而降低了土壤的 C/N，且试验一直在恒温培养箱中进行(25 ℃)，保证了微生物的活性。尽管如此，本研究中水稻秸秆的添加并未增加 PAHs 污染土壤的有机碳矿化速率，其原因可能是本试验所用水稻秸秆为水稻成熟期刚收获的秸秆，其木质化程度较高，不易被微生物矿化和利用。

生物刺激法是最为广泛使用的 PAHs 污染土壤的微生物修复方法[22]。本研究发现，外源添加秸秆能够促进菲和芘的降解，但是不同作物秸秆和添加量对土壤 PAHs 残留量和去除率的影响不尽相同。同时，不同环数 PAHs 对各处理的响应亦不同(图 4、图 5)。Han 等[7]研究了不同农业废弃物对土壤 PAHs 消耗和 PAHs 降解基因的影响，结果表明不同农业废弃物的添加均增加了微生物对 PAHs 的消耗，而土壤介质中合适的 C/N 可能是影响微生物对 PAHs 降解程度的重要因素。本研究中所用玉米秸秆和水稻秸秆的 C/N 不同，而添加量的不同也会直接影响基质中的 C/N，因此导致了 PAHs 去除效果的不同。此外，诸如玉米秸秆类的农业废弃物含有大量的纤维素和木质素，可作为烃类微生物的生长基质，这些微生物产生的高效酶促进了烃类化合物的生物降解[9, 23]。研究表明，与土壤中 PAHs 降解密切相关的微生物群落包括变形菌门、放线菌门及鞘脂单胞菌属、溶杆菌属和交替赤杆菌属等[24-26]。而农业废弃物(如秸秆类)正是有效地提高了此类 PAHs 降解细菌的丰度，同时亦改变了真菌的群落结构[7,9]。此外，本研究结果发现，秸秆添加对菲的降解效果优于芘，可见秸秆对 PAHs 的降解效果亦受 PAHs 自身物理化学特性(如苯环数)的影响。

秸秆类有机物质除了对微生物活性的提升，其自身在腐解过程中会产生大量可溶性有机质(DOM)。本文研究结果表明，秸秆添加能够提升土壤可溶性有机碳含量(图 3)，且在一定范围内，土壤 DOC 含量与 PAHs 去除率呈正相关关系(图 6)。研究证实 DOM 能够通过 NH-π 以及 π-π 间的相互作用与 PAHs 形成复合物，从而增加 PAHs 的扩散[27]；同时，土壤 DOC 含量被证实与有机酸溶性 PAHs 呈显著正相关关系，土壤 DOC 能够促进 PAHs 的生物降解[1, 28]。此外，土壤 DOC 含量与 PAHs 降解细菌和真菌的丰度亦呈显著正相关关系[9]。可见，农作物秸秆，无论是其自身还是腐解中间产物 DOM 均对土壤 PAHs 降解具有促进作用。

4 结论

外源添加玉米秸秆能够促进 PAHs 污染土壤中有机碳的矿化，且添加量越大，矿化速率越大，但水稻秸秆对有机碳的矿化速率影响不大；秸秆添加能够明显降低土壤 PAHs 残留量，从而提高污染土壤 PAHs 去除率，且玉米秸秆对 PAHs 的降解效果优于水稻秸秆，而本试验条件下秸秆添加量越大，PAHs 去除率越高；此外，秸秆添加能够提升土壤 DOC 含量，秸秆添加量越大 DOC 含量越高，而玉米秸秆腐解过程可产生更多 DOC，且在一定范围内，土壤 DOC 含量与 PAHs 去除率呈正相关关系。

参考文献：

[1] Bao H Y, Wang J F, Zhang H, et al. Effects of biochar and organic substrates on biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons and microbial community structure in PAHs-contaminated soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 385: 121595.

[2] Ramesh A, Archibong A E, Hood D B, et al. Global environmental distribution and human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons[M]//Global Contamination Trends of Persistent Organic Chemicals. New York: CRC Press, 2011: 115–146.

[3] Balasubramaniyam A. The influence of plants in the remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated sites[J]. Pharmaceutical Analytical Chemistry: Open Access, 2015, 10.4172/2471-2698.1000105.

[4] Šmídová K, Kim S, Hofman J. Bioavailability of five hydrophobic organic compounds to earthworms from sterile and non-sterile artificial soils[J]. Chemosphere, 2017, 179: 222–231.

[5] Pelaez A I, Lores I, Sotres A, et al. Design and field-scale implementation of an “on site” bioremediation treatment in PAH-polluted soil[J]. Environmental Pollution, 2013, 181: 190–199.

[6] Cai D, Yang X H, Wang S Z, et al. Effects of dissolved organic matter derived from forest leaf litter on biodegradation of phenanthrene in aqueous phase[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 324: 516–525.

[7] Han X M, Hu H W, Shi X Z, et al. Effects of different agricultural wastes on the dissipation of PAHs and the PAH-degrading genes in a PAH-contaminated soil[J]. Chemosphere, 2017, 172: 286–293.

[8] Yu L B, Duan L C, Naidu R, et al. Abiotic factors controlling bioavailability and bioaccessibility of

polycyclic aromatic hydrocarbons in soil: Putting together a bigger picture[J]. Science of the Total Environment, 2018, 613/614: 1140–1153.

[9] Wang J F, Bao H Y, Pan G D, et al. Combined application of rhamnolipid and agricultural wastes enhances PAHs degradation via increasing their bioavailability and changing microbial community in contaminated soil[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 294: 112998.

[10] 黄薇, 吴凉萍, 宋路遥, 等. 配施不同腐秆剂对还稻田麦秸腐解和水稻产量的影响[J]. 土壤, 2022, 54(1): 40–46.

[11] 张红, 曹莹菲, 徐温新, 等. 植物秸秆腐解特性与微生物群落变化的响应[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1482–1492.

[12] Shahsavari E, Adetutu E M, Taha M, et al. Rhizoremediation of phenanthrene and Pyrene contaminated soil using wheat[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 155: 171–176.

[13] 张庆沛, 李冰, 王昌全, 等. 秸秆还田配施无机改良剂对稻田土壤镉赋存形态及生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2345–2352.

[14] 高瑞丽, 朱俊, 汤帆, 等. 水稻秸秆生物炭对镉、铅复合污染土壤中重金属形态转化的短期影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 251–256.

[15] Weng L P, Temminghoff E J M, Lofts S, et al. Complexation with dissolved organic matter and solubility control of heavy metals in a sandy soil[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(22): 4804–4810.

[16] 张文艺, 陈婕, 朱雷鸣, 等. 腐解稻草 DOM 提取液洗脱六价铬污染土壤试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 196–202.

[17] 雅米尼. 蚯蚓和水稻秸秆对复合污染土壤中的镉修复、土壤微生物群落和菲的降解的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.

[18] Leech C, Tighe M K, Pereg L, et al. Bioaccessibility constrains the co-composting bioremediation of field aged PAH contaminated soils[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2020, 149: 104922.

[19] Kirkby C A, Richardson A E, Wade L J, et al. Nutrient availability limits carbon sequestration in arable soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 68: 402–409.

[20] Kuzyakov Y. Review: Factors affecting rhizosphere priming effects[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2002, 165(4): 382–396.

[21] Fierer N, Schimel J P, Cates R G, et al. Influence of balsam poplar tannin fractions on carbon and nitrogen dynamics in Alaskan taiga floodplain soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(12/13): 1827–1839.

[22] Sayara T, Borràs E, Caminal G, et al. Bioremediation of PAHs-contaminated soil through composting: Influence of bioaugmentation and biostimulation on contaminant biodegradation[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2011, 65(6): 859–865.

[23] Dashti N, Ali N, Khanafer M, et al. Oil uptake by plant-based sorbents and its biodegradation by their naturally associated microorganisms[J]. Environmental Pollution, 2017, 227: 468–475.

[24] 蒲丽蓉, 蔡月, 王星皓, 等. 有机黏土对污染土壤中苋菜生理和吸收积累菲、芘的影响[J]. 土壤, 2022, 54(1): 128–135.

[25] Cheng H, Wu Y H, Huo Y Y, et al. Complete genome sequence of *Altererythrobacter* dongtanensis KCTC 22672T, isolated from a tidal flat[J]. Marine Genomics, 2017, 34: 11–14.

[26] Wang Q L, Hou J Y, Yuan J, et al. Evaluation of fatty acid derivatives in the remediation of aged PAH-contaminated soil and microbial community and degradation gene response[J]. Chemosphere, 2020, 248: 125983.

[27] Haftka J J H, Parsons J R, Govers H A J, et al. Enhanced kinetics of solid-phase microextraction and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the presence of dissolved organic matter[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, 27(7): 1526–1532.

[28] 方文雯, 李晓宁, 吴仕希, 等. 腐殖酸对 *Mycobacterium sp.* NJS-1 降解芘的影响[J]. 土壤学报, 2022. DOI: 10.11766/trxb2021070030341