河北农业大学学报

第42卷第4期

2019年7月

JOURNAL OF HEBEI AGRICULTURAL UNIVERSITY

文章编号：1000-1573（2019）04-0102-07 **DOI**：10.13320/j.cnki.jauh.2019.0085

2种秸秆固定化Ml对3环PAHs污染  
土壤修复效果研究

李 岩1,张小雪打冯 煊打刘月涵1,王 伟打冯圣东1,罗治定2,杨志新1

（l. 河北农业大学 资源与环境科学学院/ 河北省农田生态环境重点实验室，河北 保定 07l000；

2. 河北省地质实验测试中心，河北 保定 07l05l）

**摘要：**试验采用“吸附-包埋-交联法”研究玉米秸秆和番茄秸秆固定化芽抱杆菌M1对河北唐山典型煤矿区 农田土壤3环PAHs的修复效果。结果表明：玉米和番茄秸秆固定化M1（Y1M1、X1M1）显著提高了芽抱杆 菌M1对煤矿区3环PAHs污染土壤的去除率，均以单体芴（Flu）降解效果最好，去除率高达95.78%和 94.97%。玉米固定化M1菌比微球基质对照的降解提升幅度（22.13%〜75.85% ）远高于番茄秸秆固定化M1 菌（13.69%〜16.33%）。进一步分析与PAHs降解有关的土壤酶活性变化发现，土壤过氧化氢酶和多酚氧化 酶活性在两种秸秆固定化M1处理之间存在着显著差异，X1M1处理土壤过氧化氢酶活性是Y1M1的1.15倍， 而土壤多酚氧化酶活性Y1M1却比X1M1提高了 29.21%。微生物多样性结果分析发现，接种固定化M1后土壤 群落多样性和丰富度明显改变，固定化M1后两种秸秆对Chao指数和Shannon指数均表现为X1M1>Y1M;添 加不同固定化M1处理的菌群在属水平的分布最广的是*Bacillus* （芽抱杆菌属），分布范围为1.31%〜2.23%， 而*Bacillus* （芽抱杆菌属）、*Kaistobacter* （幽门螺旋杆菌属）、*Balneimonas* （芽生杆菌属）、*DA101*和 *Aeromicrobium* （气微菌属）优势菌属结构变化可能是诱导土壤3环PAHs降解的重要因素。综上，番茄秸秆也 可作为固定化微生物载体材料，为原位土壤3环PAHs的修复技术应用提供理论依据，同时为作物秸秆的资源 化利用开辟新途径。

**关键词：**玉米秸秆；番茄秸秆；固定化M1； 3环PAHs; 土壤酶活性；微生物多样性

**中图分类号：**S156.99 **开放科学（资源服务）标志码**（OSID）：

**文献标志码：**A

**Study on remediation effect of immobilized M1 with two kinds of straw  
on 3**-**ring PAHs contaminated soil in coal mining area**

LI Yan1, ZHANG Xiaoxue1, FENG Xuan1, LIU Yuehan1, WANG Wei1, FENG hengdong1,  
LUO Zhiding2, YANG Zhixin1

（1. College of Resources and Environmental Science/ Hebei Key Laboratory for Farmland Ecological Environment  
of Hebei, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 2. Hebei Research Center for Geoanalysis,  
Baoding 071051, China）

Abstract: In this research, maize and tomato straws were used as the immobilized carrier materials of *Bacillus* sp. M1, and the soil contaminated by 3-ring PAHs in coal mining area of Heibei Tangshan was used as the repair object. The soil repair experiment was used to study the repair effect of two kinds of straw immobilized M1. The results

收稿日期：2018-10-10

基金项目：国家重点研发计划（2018YFD0800402）;河北省人力资源和社会保障厅项目（C2013003022 ）;河北省教育厅项 目（Z2013058）.

第一作者：李岩（1993-），女，河北石家庄人，硕士研究生，主要从事环境质量评价与监控研究.E-mail：[610903898@qq.com](mailto:610903898@qq.com)

通讯作者：杨志新（1969-），女，河北保定人，教授，主要从事生态、环境质量评价与监控研究.E-ma订：[yangzhixin@126.com](mailto:yangzhixin@126.com) 罗治定（1965-），男，湖南新化人，工程师，主要从事环境样品中元素及化合物分析.E-mail：[13070560666@163.com](mailto:13070560666@163.com)

showed that the immobilized M1 (Y1M1, X1M1) of maize and tomato straws significantly increased the removal rate of *Bacillus* sp. M1 to the contaminated soil of 3-ring PAHs in coal mining area, and the best degradation rate was achieved by single strontium (Flu), with the removal rate as high as 95.78% and 94.97%. The degradation rate of maize immobilized M1 bacteria compared with microsphere matrix control (22.13%-75.85%) was much higher than that of tomato straw immobilized M1 bacteria (13.69%-16.33%). Further analysis of soil enzyme activity changes related to PAHs degradation revealed that soil catalase and polyphenol oxidase activities were significantly different between the two straw immobilized M1 treatments. Soil catalase activit of X1M1 treatment was 1.15 times of Y1M1 treatment, while soil polyphenol oxidase activity of Y1M1 was 29.21% higher than that of X1M1. The results of microbial diversity analysis showed that the diversity and richness of soil community changed significantly after immobilized M1. After immobilized M1, the two straws showed X1M1>Y1M1 for Chao index and Shannon index. The most widely distributed genus of bacteria treated with different immobilized M1 is *Bacillus*, with a range of 1.31%-2.23%, while the structural changes in the dominant genus of *Bacillus, Kaistobacter*, *Balneimonas*, *DA101* and *Aeromicrobium* may be important factors in inducing the degradation of 3-ring PAHs in soil. In summary, tomato straw can also be used as an immobilized microbial carrier material, which provides a theoretical basis for the application of in situ soil 3-ring PAHs repair technology, and opens up new ways for the utilization of crop straw resources.

**Keywords:** corn straw; tomato straw; immobilized M1; 3-ring PAHs; soil enzyme activity; microbial diversity

多环芳 烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs )是一类由两个或两个以上苯环稠合形成的有 机化合物［1］，因其毒性和广泛传播性成为了环境污 染物质中最重要的组成部分之一⑵。PAHs产生的 主要来源为煤、石油及交通车辆柴油汽油等化石燃 料燃烧［3］，而煤矿区则因煤矿开采及耗煤燃油量大 等问题成为了 PAHs污染重灾区［4-6］，使得周围农 田土壤也遭受了 PAHs极大污染。因此，对煤矿区 PAHs污染农田土壤的修复极为迫切。

微生物修复技术是去除农田土壤环境中PAHs 的最有效手段［7］，具有污染少、成效高、成本低等 优点。在微生物修复技术中，添加游离态微生物修 复土壤，存在菌种易流失、微生物密度低［8］、并易 与土著菌形成恶性竞争等弊端［8-9］，修复达不到理 想效果。为了克服这些弊端，固定化微生物技术得 到了发展，它是将特选的微生物固定在载体上使其 高度密集并保持生物活性的一项技术［10-11］。李婧 等［12］研究表明，固定化微生物比游离态微生物显 著提高了对芘的去除效率，而且在短期内达到较高 的去除率。固定化微生物的方法有多种，如吸附法、 包埋法、交联法等，其中，固定化微生物载体材料 的选择是微生物产生重大功效的关键因素，而农业 废弃秸秆作为低成本的载体材料,其来源广、易被 生物降解，不仅对土壤结构无害，还可以改善土壤 理化性质，在土壤修复中是一种较为理想的微生物 载体。近来，已有研究将葡萄秸秆［13］和玉米秸秆［12］ 作为微生物的固定化载体，但对于蔬菜秸秆作为微 生物载体去除PAHs的研究尚未见报道。基于此， 本研究以河北唐山典型煤矿区3环PAHs农田污染 土壤为研究对象，以课题组前期筛选的芽抱杆菌M1 为降解菌，选用玉米秸秆、番茄秸秆为固定化载体， 采用“吸附—包埋—交联法”研究2 种秸秆固定化 M1对该区土壤3环PAHs修复效果的影响，分析土 壤酶活性及微生物多样性变化，以期为原位土壤3 环 PAHs 的修复技术应用提供理论依据，同时为作 物秸秆的资源化利用开辟新途径。

1材料与方法

1. 供试材料

1.1.1供试土壤 试验土壤取自河北省某典型煤矿区 长期受PAHs污染的老化农田土壤，土壤类型为潮褐 土，质地为壤土。取表层0〜10 cm的污染土壤，避 光风干后，过1 mm筛。混合均匀，在4 T的冰箱内 保藏备用。5种3环PAHs总含量占土壤16种PAHs 总含量的24.67%，其中5种3环PAHs单体Acy、 Ace、Flu、Phe 和 Anth 的含量分别为 25.29 口g/kg、 50.08 口g/kg、240.66 口g/kg、585.45 口g/kg 和 105.52 口g/kg,由于Acy和Ace含量低，故只考虑其它3 种3环PAHs。

1.1.2供试菌种本课题组前期筛选出PAHs高效 降解菌株，经鉴定为芽抱杆菌属*(Bacillus* )菌株， 命名为M1。

1.1.3供试载体玉米秸秆于河北省保定市河北业 大学试验农场采集，番茄秸秆于廊坊永清蔬菜基地 采集，洗净秸秆，105 °C烘箱中杀青30 min,然后 60 C烘干，粉碎过1 mm筛，121 C灭菌20 min, 制成2种秸秆载体材料备用。

1. 试验方案

1.2.1微球制备以玉米/番茄秸秆为载体，海藻酸 钠（SA）和聚乙烯醇（PVA）为包埋材料，硼酸和 氯化钙为交联剂制备固定化M1。按优化配比含量称 取备用玉米 /番茄秸秆放入锥形瓶中，再次灭菌，降 温后向其中加入10%的菌悬液，再加入20 mL灭菌 水，在摇床上培养3 h。将10%的PVA和0.5%的 SA混合，加入60 mL蒸馏水浸泡过夜，次日高温灭 菌，冷却至40 C左右后加入上述混合物，用无菌水 定容至100 mL,搅拌均匀，采用蠕动泵，从20 cm 高处将其缓慢匀速滴加到磁力搅拌器上的盛有的 表1

1. 土壤指标测定方法 土壤PAHs测定指标及 其分析方法：3种PAHs，分别为芴（Flu ）、菲（Phe） 和蒽（ Anth）， 测定方法参考贾海滨［3］等改进的 EPA 标准方法。

| 处理编号 Treatment number | 处理  Treatment | 微球添加量 /(%，w/w)  Microsphere addition | 接菌量 / ( cfu • kg-1)  Amount of inoculation |
| --- | --- | --- | --- |
| CK | 空白对照（不添加微球和M1） | 0 | 0 |
| Y1 | 玉米秸秆微球基质对照（不含M1） | 1 | 0 |
| Y1M1 | 玉米秸秆固定化芽孢杆菌M1 | 1 | 3.75x109 |
| X1 | 番茄秸秆微球基质对照 | 1 | 0 |
| X1M1 | 番茄秸秆固定化芽孢杆菌M1 | 1 | 3.75x109 |

固定化M1修复污染土壤的土培试验方案

Table 1 Experiment design on contaminated soil culture of immobilized M1

注：w/w为微球添加量是指微球与土壤的质量比。

土壤酶活性测定指标及其分析方法： 3种土壤酶， 多酚氧化酶活性、过氧化物酶活性和纤维素酶活性 测定方法参考关松荫［14］土壤酶及其研究方法。

土壤微生物多样性：由派森诺生物科技有限公 司进行测定。

1.4 数据统计分析

土 壤 PAHs 的去除率*（R） = （C0* — *C*J /*C*。 x100%，式中*C*。为对照土壤PAHs含量，*C*t为土 壤 PAHs 残留含量。

试验数据均采用SPSS 19.0软件进行统计分析， Excel 2003 软件制图。

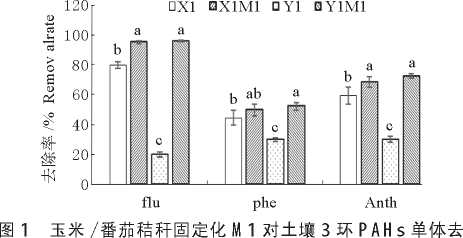
pH 6.7左右2%氯化钙饱和硼酸溶液中（用NazCOs 调pH），-20 C下保存24 h,再在4 C保存12 h。 用灭菌的去离子水冲洗3次，制成玉米/番茄秸秆 材料固定化M1微球两种（活菌数达3.75 x 108 cfu/g） 以及不接菌的空白微球两种，保存于4 C冰箱中 备用。

1. 固定化 M1 降解污染土壤 PAHs 的土培试验 方案 土培试验于河北农业大学温室大棚中进行， 选取20 cm （上缘直径）x 12 cm （底面直径）x 14 cm （高）的盆钵15个。称取1.5 kg风干土放入每 个盆钵中。按照微球与土壤的质量比为0和1%向 盆钵土壤中添加秸秆固定化M1微球和秸秆空白微 球。土壤处理类型见表2，设计5 个处理，每个处 理3个重复,共15盆。调节水分含量为田间持水量 的 60%， 每两天补水 1 次， 每次补相同水量， 4 个 月后采集土壤样品。

2结果与分析

2.1两种秸秆固定化**M 1**对**3**环**PAHs**污染土壤修 复效果的影响

在受PAHs长期污染的煤矿区土壤中添加不接 菌的玉米和番茄秸秆微球基质培养4个月后，土壤 3 环 PAHs 的去除效果如图1 所示。 在添加不接菌 的玉米秸秆微球基质对照（Y1）处理下，污染土 壤3种PAHs单体Flu、Phe、Anth的去除率范围为 19.93%〜30.05%。在添加不接菌的番茄秸秆微球 基质对照（X1）处理下，对Flu、Phe和Anth的去 除率分别为79.46%、 44.39%和59.03%。进一步对 比分析两种秸秆微球基质的作用效果发现， X1 处 理对Flu、Phe和Anth的去除率比Y1处理提高了 74.92%、32.66%和49.08%,对Flu去除率的提高 幅度最大。可见，不添加菌株的两种秸秆微球基质自身对3 环 PAHs 的去除均具有积极的作用，且两 者存在较大的去除差异，番茄秸秆的去除效果明显 高于玉米秸秆。这可能与秸秆不同成分构成带来的 吸附差异有关，也可能与因成分差异导致土壤微生 物的组成差异相关，有待于进一步深入研究与分析。



除率的影响

**Fig.1 Effect of corn and tomato straw immobilized M1 on the removal rate of single 3-ring PAHs in the soil** 在玉米秸秆微球固定化M1处理（Y1M1） 下，污染土壤3种PAHs单体的去除率范围为 52.02%〜95.78%。其中，Y1M1处理对Flu的去 除率尤为突出，高达95.78%。与Y1对照相比， 对Flu、Phe、Anth的去除率分别提高了 75.85%、 22.13%、42.21%,以Flu的增幅表现最高。在番 茄秸秆微球固定化M1处理（X1M1）下，污染土 壤Flu、Phe、Anth单体的去除率分别为94.97%、 49.52和68.39%。与X1对照相比，除Phe单体外， 对Flu和Anth的去除率有显著提咼，分别提咼了为 16.33%和13.69%。进一步对比分析两种秸秆微球固 定化M1的作用效果发现，玉米和番茄两种秸秆固 表2

* 1. 土壤微生物多样性在两种秸秆处理间的差异分析

| 处理  Treatments | 过氧化氢酶活性/ (mL\*g-1)  Catalase activity | 多酚氧化酶活性/ (mL-g-1)  Polyphenol oxidase activity | 纤维素酶活性/mg  Cellulase activity |
| --- | --- | --- | --- |
| CK | 0.28±0.01c | 15.84±1 .48a | 0.09±0.01 b |
| Y1 | 0.30±0.02bc | 17.96±1 .68a | 0.15±0.03a |
| X1 | 0.29±0.02bc | 18. 00±0 . 64a | 0.13±0.04ab |
| Y1 M1 | 0.32±0.02b | 16.50±0.63a | 0.09±0.01 b |
| X1 M1 | 0.37±0.02a | 12. 77±1 . 74b | 0.10±0.01b |

在两种秸秆处理下的土壤酶活性结果

Table2 Soil enzyme activity results under treatment with two straws

注：同列不同字母表示差异显著（ *P<*0.05）

2.3.1 Alpha多样性分析不同处理下土壤生物多 样性指数见表3。Chao指数越大，群落丰富度越 高；Shannon指数越大，群落多样性越高。可以发 现，固定化M1处理的Chao、Shannon指数均高于 对照CK,表明加入M1确实能够使土壤群落丰富度 定化M1对3种PAHs的降解效果差异并不明显，且 显著优于不接菌的秸秆基质对照，尤其对Flu单体 的降解表现最为突出。同时，玉米固定化M1比微 球基质处理降解PAHs的提升幅度远高于番茄秸秆。 2.2与**PAHs**降解有关的土壤酶活性在两种秸秆处 理间的差异分析

由表2可知，与秸秆微球基质对照相比，Y1M1 与X1M1处理土壤过氧化氢酶活性均有明显提高， 分别提高了 6.25%和21.62%，说明固定了 M1菌株 后能够激活土壤该酶活性；Y1M1处理土壤多酚氧 化酶活性变化不显著，而X1M1处理土壤多酚氧化 酶活性显著下降，降低了 40.95%；Y1M1 与 X1M1 处理土壤纤维素酶活性变化均不明显。可见，土壤 过氧化氢酶活性的表现与两种秸秆固定化M1处理 下的3环PAHs去除率相一致，而土壤多酚氧化酶 活性却与3环PAHs去除率呈现了相反的变化趋势。

进一步分析两种秸秆处理的土壤酶活性差异发 现，土壤过氧化氢酶、多酚氧化酶和纤维素酶活性 在 Y1 与 X1 处理间均无明显差异，而过氧化氢酶和 多酚氧化酶活性在Y1M1与X1M1处理之间存在着 显著差异，X1M1处理的土壤过氧化氢酶是Y1M1 的1.15倍，Y1M1处理的土壤多酚氧化酶活性比 X1M1 提高了 29.21%。综上，可以推测土壤过氧化 氢酶和多酚氧化酶活性对老化污染土壤中 3 环多 环芳烃的去除有一定的作用，这种降解效果是两 种酶共同作用的结果，其降解效果可能与秸秆特 性有关。

和多样性有明显增加。对比两种秸秆固定化M1的 作用结果发现，X1M1处理的Chao、Shannon指数 均高于Y1M1处理，分别是Y1M1处理的1.02倍和 1.01倍，说明番茄秸秆固定化M1对土壤群落的丰 富度和多样性影响均大于玉米秸秆固定化。进而对 比两种微球基质发现，从Chao指数来看X1>Y1,从Shannon指数来看，Y1>X1,说明玉米秸秆微球

基质对土壤群落丰富度影响高于番茄秸秆微球基质 而对土壤群落多样性影响低于番茄秸秆微球基质。

表3 生物多样性指数 Table 3 Biodiversity index

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 处理  Treatments | Chao指数  Chao index | 香农指数  Shannon index |
| CK | 3539.89 | 9.3875 |
| Y1 | 4028.87 | 9.6150 |
| X1 | 4108.16 | 9.4673 |
| Y1M1 | 4041.41 | 9.6589 |
| X1M1 | 4071.81 | 9.7209 |

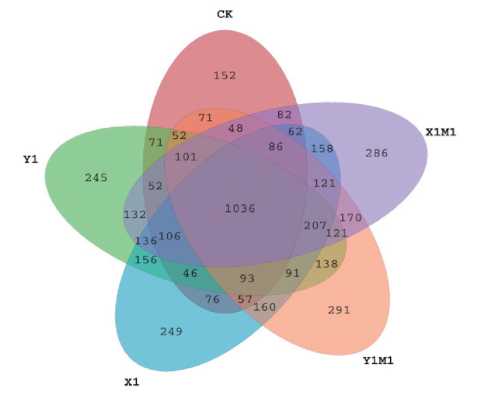
2.3.2 利用Venn程序分析不同处理之间细菌OTU 的关系 图2反映了两种秸秆固定化M1及微球基 质之间细菌OTU。可以看出，5个处理共有的OTU 数目为1 036个，此外，CK、Y1、XI、Y1M1和 X1M1特有的OTU数目分别为152、245、249、291 和286个。其中，Y1、XI、Y1M1和X1M1特有 的OTU数目分别是CK的1.61、1.64、1.91和1.88 倍。两种秸秆固定化M1处理特有OTU数目表现为 Y1M1>X1M1，Y1M1 比 X1M1 提高了 1.75%；而秸 秆微球基质处理特有的OTU数目表现为X1>Y1， X1是Y1的1.02倍，且玉米和番茄秸秆固定化M1 处理特有的OTU数目均高于秸秆微球基质，分别是 Y1 和 X1 的 1.19和 1.15 倍。表明加入两种秸秆固定 化M1和微球基质均提高了土壤微生物的多样性，且 添加M1后表现更为显著，与添加秸秆微球对土壤中 3 环多环芳烃去除率表现出高度一致性。

图2固定化M1不同处理之间OTU关系Venn图

Fig.2 Venn of OTU relationship of different treatments of immobilized M1

* + 1. 菌群种属的结构变化分析 图 3 为添加不 同固定化处理的菌群在属水平的分布情况，由图可 知，各个处理中分布最广的是*Bacillus* （芽抱杆菌 属），分布范围为1.31%〜2.23%，其次分别为 *Kaistobacter* （幽门螺旋杆菌属）、*Balneimonas* （芽 生杆菌属）、*DA101、Aeromicrobium* （气微菌属）、 *Planctomyces* （浮霉状菌属）*、Modestobacter* （贫 养杆菌属）、*Solirubrobacter* （土壤红杆菌属）、 *Pseudonocardia* （假诺卡氏菌属）和 *Geodermatophilus* （地嗜皮菌属）。Y1和X1处理在芽抱杆菌属和幽 门螺旋杆菌属的相对丰度均表现为Y1>X1，Y1分 别是X1的1.05和1.20倍；Y1M1和X1M1处理在 芽抱杆菌属和幽门螺旋杆菌属的相对丰度均表现为 X1M1>Y1M1, X1M1 分别是 Y1X1 的 1.51 和 3.43 倍，其变化规律与土壤过氧化氢酶活性变化一致， 故考虑这两种菌属可能与过氧化氢酶活性变化有关。 此外，Y1和X1处理在芽生杆菌属、*DA101*和气微 菌属的相对丰度均表现为X1>Y1，X1比Y1分别 提高了 32.64%、15.93% 和 104.42%；而 Y1M1 和 X1M1处理在芽生杆菌属、*DA101*和气微菌属的相 对丰度均表现为Y1M1>X1M1，Y1M1比X1M1分 别提高了 114.08% 、 29.03%和 17.44 %，与添加秸 秆微球对土壤中 3 环多环芳烃去除率相吻合。整体 来看，添加不同秸秆微球致使土壤菌群结构发生了 一定的改变，因此，推测菌种的变化可能是诱导土 壤PAHs降解提升的重要因素。
* Bacillus
* Kaistobacter
* Balneimonas DA101 Aeromicrobium
* Planctomyces
* Modestobacter Solirubrobacter Pseudonocardia
* Geodermatophilus Streptomyces
* Rhodoplanes Gemmata Skermanella
* Mycobacterium •Afihhe-lla

Sphmgomonas

* Ardenscatena
* Salimimicrobium
* Ochrobactrum
* Others

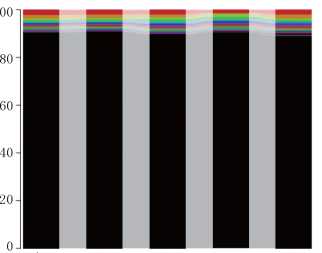
占 Q 令 扌 仝

图3 不同处理下土壤中微生物在属水平上的菌群分布图  
**Fig.3 Microorganism distribution bar plot of different  
treatments at genus level**

3讨论

本研究对比分析了两种秸秆固定化M1对农田 老化土壤3环PAHs的去除效果。结果表明，玉米 和番茄秸秆固定化M1对3环PAHs污染土壤的修 复具有显著效果，且玉米秸秆比番茄秸秆的去除效 果较好，但无显著差异，对3种PAHs的去除率均 可达到49% 以上，最高达95.78%。孙璇等[15]研究 表明玉米秸秆裂解成的生物质炭有希望成为新型吸 附材料用于去除水体PAHs污染及何娇等[16]在研 究热解炭化黄豆、芝麻、玉米3种秸秆制备的秸秆 生物质材料对水中萘和苊的去除能力中表明，玉米 ＞黄豆〉芝麻，与本文结果相似。本研究进一步比 较不接菌的番茄秸秆微球和玉米秸秆微球发现，番 茄秸秆微球对农田老化土壤3环PAHs的去除效果 显著高于玉米秸秆微球，可能由于番茄秸秆养分含 量高于玉米秸秆养分含量[17-18]，从而影响对3环 PAHs 的吸附效果。此外，颗粒物粒径和组成、初始 浓度、吸附剂用量[19]等对吸附效果均有一定的影响。 对于单体Flu来说，其溶解度大、辛醇-水分配系 数低易被降解，故降解效果较好。综上，番茄秸秆 也可作为微生物降解土壤多环芳烃的有效载体材料。

两种秸秆固定化M1修复煤矿区PAHs污染土壤 后，土壤酶活性及微生物多样性发生了改变，可能 是由于向土壤中添加了植物残体等天然有机质改善 了土壤理化性质，从而影响微生物在土壤中的产酶 能力以及微生物数量等[20]。本研究中，固定化M1 处理中土壤过氧化氢酶活性增加。这与张志远等[21] 加入L. theobromae，土壤过氧化氢酶活性增强和 Liu R[22]等种植火凤凰对PAHs的去除表明，过氧 化氢酶活性显著增加的研究结果相似。而与王洪等 [23]研究表明，加入固定化菌剂后，土壤过氧化氢 酶活性降低的结果相反。此外，接种固定化M1处 理土壤多酚氧化酶和纤维素酶活性与微球基质相比 均降低，这与党宏波[24]利用生赤壳属对油污污染 土壤的降解表明，过氧化物酶和多酚氧化酶活性均 显著增强和杨骏达[25]研究表明，添加多环芳烃抑 制了土壤纤维素酶活性且随着时间的增长，纤维素 酶的活性显著降低的结果相差加大，可能是由于土 壤酶活性除受微生物作用外，也会受到植物根际效 应的影响。此外，在污染土壤进行修复中存在的降 解菌与载体材料间的交互作用等问题以及其它不确 定性因素还有待进一步深入研究。

本研究表明，接种固定化M1，Chao和Shannon 指数均高于CK,增高了土壤群落多样性。王菲[26] 研究发现增强土著菌活性是提高土壤中PAHs降解率 的有效途径之一，与本研究结果较为一致。从Venn 图来看，添加固定化微球处理特有的OTU数目均高 于CK,且玉米秸秆固定化M1处理高于番茄秸秆， 而番茄秸秆微球基质处理高于玉米秸秆，与去除率表 现一致。菌群种属结构变化分析来看，添加不同固定 化处理的菌群在属水平的分布最广的是芽抱杆菌属， 与CK相比，固定化秸秆材料的添加促进了气微菌属 相对丰度增加，而芽抱杆菌属降低，菌群结构发生 一定变化，可能因素为外源芽抱杆菌的添加与土著 菌中芽抱杆菌形成竞争从而抑制该菌属的增长，其 根本原因还有待进一步研究分析。此外，Shanno指 数变化、芽抱杆菌属和幽门螺旋杆菌属的相对丰度 变化与土壤过氧化氢酶活性变化一致，故考虑土壤 群落多样性及两种菌群属可能影响土壤过氧化氢酶 活性，进一步影响多环芳烃降解过程；且芽生杆菌属、 DA101和气微菌属的相对丰度变化与土壤3环多环 芳烃的去除率表现高度吻合，在多环芳烃降解过程 中可能起重要作用。刘亮[27]研究表明生物炭处理中 土壤细菌群落发生了显著变化，且杨芳[28]结果显示， 添加菲与否、添加降解菌与否和根系表面除菌与否 对菌群结构的影响较大，从而影响PAHs的去除率。 可见，玉米秸秆和番茄秸秆及芽抱杆菌M1的添加可 以改变土壤微生物群落结构，从而进一步促进对多 环芳烃的降解。

参考文献：

1. Wu Y C, Teng Y, Li Z G, et al. Potential roal of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) oxidation by *Fungal laccase* in the remediation of an aged contaminated soil [J]. Biology&Bio-chemistry, 2008, 40(3): 789-796.
2. Eggen T , Majcherczyk A. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAH) in contaminated soil by white rot fungus *Pleurotus ostreatus*[J]. International Biodeterioration& Biodegradation.1998, 41(2): 111- l17.

[3 ]贾海滨，张丽秀，李岩，等.煤矿区土壤PAHs含量特 征及来源解析[J].河北农业大学学报，2017, 40(2): 24-31.

1. 刘增俊, 滕应,黄标,等.长江三角洲典型地区农田土 壤多环芳烃分布特征与源解析[J] . 土壤学报，2010, 47(6): 1110-1117.
2. Achten C, Hofmann T. Environmental impact of native polycyclic aromatic hydrocarbons from hard coals[J]. Grundwasser, 2010, 15(1): 5-18.
3. Ahrens M J, Morrisey D J. Biological effects of unburnt coal in the marine environment[M]. Oceanography

and Marine Biology-An Annual Review, 2005, 43:69­122.

1. 姜岩, 杨颖, 张贤明. 典型多环芳烃生物降解及转 化机制研究进展[J].石油学报(石油加工),2014, 30(6): 1137-1150.
2. 郑伟, 周林成, 徐艳艳,等. 高性能载体材料的设计与 制备及其固定化微生物处理污水研究进展[J].功能 材料 , 2010:185-189.
3. 钱林波, 元妙新, 陈宝梁. 固定化微生物技术修复 PAHs污染土壤的研究进展[J].环境科学，2012, 33(5): 1767-1776.

10 ] Cassidy M B, Lee H, Trevors J T. Environmental applications of immobilized microbial cells: a review[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 1996, 1(2): 79-101.

1. 贺琳, 曲洋, 刘帅, 等 . 废水生物处理中固定化微生 物技术方法与载体使用[J].内蒙古环境科学，2009, 21(6): 44-47.
2. 李婧. 以玉米秸秆吸附- 包埋-交联的复合固定化方 法固定微生物处理芘的研究[D].广州：华南理工大 学, 2013.
3. Garg U, Kaur M P, Jawa G K, et al. Removal of cadmium (II) from aqueous solutions by adsorption on agricultural waste biomass[J]. Journal of Hazardous Materials. 2008, 154(1-3): 1149-1157.

[14 ]关松荫.土壤酶及其研究方法[M].北京：北京农业 出版 , 1986:320-330.

1. 孙璇,李恋卿,潘根兴,等.不同作物原料生物质炭对 溶液芘的吸附特性[J].农业环境科学学报，2014, 33(8): 1637-1643.
2. 何娇 , 孔火良 , 韩进 , 等 . 秸秆生物质环境材料的制备 及对水中多环芳烃的处理性能[J].环境科学，2011, 32(1): 135-139.
3. Liu W, Wang S T, Zhang J, et al. Biochar influences the microbial community structure during tomato stalk composting with chicken manure[J]. Bioresource Technology, 2014, 154: 148-154.

[18]洪光.玉米秸秆还田技术要点[J].湖北农机化, 2013, (1): 54.

1. 王然, 夏星辉, 孟丽红. 水体颗粒物的粒径和组成 对多环芳烃生物降解的影响[J].环境科学，2006, 27(5): 855-861.
2. Miga R K and Firestone M K. Enhanced phenanthrene biodegradation in soil by slender oar root exudates and root debris[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(6): 1911-1918.
3. 张志远,王翠苹,刘海滨, 等. 可可毛色二抱菌对焦 化厂土壤多环芳烃污染修复[J].环境科学，2012, 33(8): 2832-2839.
4. Liu R, Xiao N, Wei S, et al. Rhizosphere effects of PAH-contaminated soil phytoremediation using a special plant named Fire Phoenix[J]. Science of the Total Environment, 2014, 473:350-358.

[23 ]王洪,李海波,孙铁珩,等.生物修复PAHs污染土壤 对酶活性的影响[J].生态环境学报，2011, 20(04): 691-695.

1. 党宏波. 土著丝状真菌的分离鉴定以及油污土壤的生 物修复[D].哈尔滨:东北林业大学，2011.
2. 杨骏达. 多环芳烃对红树植物及其土壤的生态效应

[D]. 深圳:深圳大学, 2015.

1. 王菲, 苏振成, 杨辉, 等. 土壤中多环芳烃的微生物降 解及土壤细菌种群多样性[J].应用生态学报，2009, 20(12):3020-3026.
2. 刘亮. 生物炭对土壤微生物及其强化修复多环芳烃 污染的影响与机理研究[D].上海:上海交通大学, 2015.
3. 杨芳. 浮床种植海马齿根际微生物的多样性及对多环 芳烃的降解作用研究[D].厦门：厦门大学，2013.

(编辑：梁虹)