



文章栏目：相关研究

DOI 10.12030/j.cjee.202301036 中图分类号 X703 文献标识码 A

黄榜, 王琼, 刘敬章, 等. 生态利用模式对油气田外排水中典型污染物在荒漠土壤中迁移和转化的影响[J]. 环境工程学报, 2023, 17(5): 1717-1725. [HUANG Bang, WANG Qiong, LIU Jingzhang, et al. Effects of ecological utilization patterns on the migration and transformation of typical pollutants from oil and gas field wastewater in desert soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(5): 1717-1725.]

## 生态利用模式对油气田外排水中典型污染物在荒漠土壤中迁移和转化的影响

黄榜<sup>1,2</sup>, 王琼<sup>1</sup>, 刘敬章<sup>1</sup>, 杜梅<sup>1</sup>, 史斌<sup>1</sup>, 刘艳伟<sup>1</sup>, 宋茂勇<sup>1</sup>, 毕磊<sup>1,✉</sup>

1. 中国科学院生态环境研究中心, 环境纳米技术与健康效应实验室, 北京 100085; 2. 江汉大学环境与健康学院, 武汉 430056

**摘要** 西北地区干旱缺水, 但油气田外排水产量却呈逐年增加的趋势, 外排水生态利用是解决西北地区水资源短缺和外排水处置矛盾的有效策略之一。为此, 探究了在湿地和灌溉生态利用模式下水中典型耗氧有机物(以 COD 计)和石油烃(petroleum hydrocarbon)在荒漠土壤中的迁移和转化规律。原位土壤分层土柱实验结果表明, 2 种利用模式均会导致土壤中总有机碳(TOC)的含量有不同程度的下降, 外排水 COD 的升高会减缓土壤 TOC 的流失, 但会改变土壤 TOC 的组成。土壤微生物可有效消减外排水中 COD, 降低其向土壤深层迁移的风险。TPH 易在土壤表层发生累积, 但低浓度 TPH 排放的灌溉模式有利于减少土层中 TPH 的累积。湿地模式下由于水流量大, 增加了 TPH 向地下水迁移的风险。土壤微生物对 TPH 的降解率可达 15%, 并导致 C<sub>25</sub> 以下的 TPH 相对含量显著降低, 但 C<sub>26</sub> 以上组分的 TPH 相对含量则有所提升, 原因在于短链 TPH 易被微生物降解, 长链 TPH 不易降解并形成累积。以上研究结果可为油气田外排水生态利用可行性提供数据参考。

**关键词** 油气田外排水; 生态利用模式; COD; TPH; 土壤微生物

西北干旱区既是我国石油天然气主产区, 又是生态环境高度脆弱区, 水资源仅占全国水资源总量的 5.7%<sup>[1]</sup>。但水资源平均开发利用率却达到了 53.3%。其中, 新疆塔里木河和准噶尔盆地的水资源利用率高达 79% 和 80%, 远高于国际用水率安全线(40%)标准<sup>[2]</sup>。水资源短缺严重制约着西北地区社会经济的可持续发展和生态恢复<sup>[3]</sup>。

随着西北地区石油和天然气的快速开发<sup>[4]</sup>, 造成对清水的需求同步增长, 废水排放量也呈逐年增加的趋势<sup>[5]</sup>。由于西北地区受纳水体少, 直排荒漠土壤又无相关标准, 只能将大量产油废水排入人工修建的蒸发池, 通过自然蒸发的方式实现污水的减量化<sup>[6-7]</sup>, 导致水资源的巨大浪费。西北地区干旱缺水<sup>[8]</sup>, 实现油气田外排水的生态利用是解决西北地区水资源短缺和外排水处置矛盾最有效的策略之一<sup>[9]</sup>。虽然油气田外排水经过了达标处理, 但其中还存在少量污染物/指标(TPH、COD、盐分)。因此, 要想实现外排水的生态利用, 就需要先明确典型污染物在荒漠土壤中的迁移转化规律。目前, 关于土壤盐分的迁移已有较多报道。虽然已有研究<sup>[10-11]</sup>报道了 TPH 在土壤中的迁移规律, 但大多数研究均是基于石油污染土壤后模拟自然降水观察石油类污染物的迁移情况, 鲜有报

收稿日期: 2023-01-10; 录用日期: 2023-03-21

基金项目: 国家重点研发计划智能人工降解体系应用技术与评估(2018YFA0901200)

第一作者: 黄榜(1994—), 女, 硕士研究生, 1321434738@qq.com; ✉通信作者: 毕磊(1984—), 男, 博士, 副研究员, leibi@rcees.ac.cn

道将油气田处理后的外排水分别模拟形成湿地和用于灌溉植物情况下研究 TPH 和 COD 在荒漠土壤中的迁移转化行为。

本研究以西部某油田外排水为研究对象,采集西北地区荒漠土壤制备土柱,模拟外排水形成湿地和用于灌溉植物(土壤含水率 20%<sup>[12]</sup>)这 2 种生态利用模式下,分别考察了外排水中不同浓度的 TPH 和 COD 在荒漠土壤中的迁移转化行为,并探究了荒漠土壤土著微生物对 2 类有机污染物/指标降解效果,本研究结果以期为油气田外排水生态利用可行性提供基础数据参考,进而为制定相应的生态利用技术规范 and 污染物控制标准提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 石油及土壤

实验用油为油田稠油,实验土样采自西北油田未受石油污染的原位分层土壤,经过前期对 3 个湿地周边土壤质地进行调研发现,排放区所在区域土壤质地均为沙质粘壤,土壤样品置于阴凉通风处风干,表层去除石块和树枝等杂物后研磨过 2 mm 筛后密封,避光保存。用于配制稠油水 COD 的液体样品采集回来后放在 4 °C 冰箱保存。

### 1.2 实验方法

1) 含 COD 外排水土柱实验。COD 外排水按照西部某油田 COD 组分进行配制:53.6% 反相破乳剂、16.8% 正相破乳剂、29.6% 聚丙烯酰胺。将各组分充分混匀,用移液枪分别移取 5.36 mL 反相破乳剂、1.68 mL 正相破乳剂、2.96 mL 聚丙烯酰胺配成 10 mL 的 COD 废水,采用逐级稀释法进行稀释,用紫外分光光度计测定其 COD 值。用于土柱实验的为直径 12 cm,高 65 cm 的有机玻璃柱,在土柱内壁薄涂上凡士林(防止淋溶水粘附在玻璃管内壁),在土柱底部铺上滤纸后填 3 cm 的石英砂防止土壤渗漏<sup>[13]</sup>,将各层土壤去除树枝和石块过 20 目筛后依次填装,在填土过程中每 10 cm 的土,静置轻微压实 1 次,以减少边际效应的影响。

根据污水综合排放标准(GB 8978—1996)中石油类排放最低限值为 10 mg·L<sup>-1</sup>,COD 最低排放限值为 100 mg·L<sup>-1</sup>。实验设置 3 个处理组,配制 0(CK)、100(油田目前排放浓度)、200 mg·L<sup>-1</sup> 的稠油水溶液,每根土柱先用自来水淋透,模拟外排水用于灌溉植物和形成湿地后的情形,模拟外排水灌溉植物的情形每周浇灌,使土壤保持植物生长所需的含水率 20% 左右;模拟外排水形成湿地的情形使土柱上层保持 10 cm 的上覆水层。土柱底部用烧杯收集渗出液。每 15 d 在侧壁 5、15、25、35、45 cm 打孔取土样进行 TOC 的测定,同时对渗出液 COD 进行测定。

2) 含石油外排水土柱实验。用成分是硬脂醇聚醚-21 的乳化剂和石油比例为 1:5 配制石油水溶液,使用匀速均质乳化机,采用 10 000 r·min<sup>-1</sup>,乳化 5 min 后,石油水溶液形成均匀的溶液。乳化后的稠油溶液设置 3 个处理组,配制 0(CK)、10、50 mg·L<sup>-1</sup> 的稠油水溶液。土柱的填装方法和淋滤同 COD 实验一样,定期对土柱各层的 TPH 和渗出液中的 TPH 测定。

3) 土著土壤微生物对 COD 和 TPH 的降解实验。0~50 cm 土壤过孔径 2 mm 筛后称取各层土壤 200 g 充分混匀。取 500 g 进行高压蒸汽灭菌,温度为 121 °C、压力为 0.105 MPa 下灭菌 3 次,每次灭菌 20 min,间隔 24 h 灭菌 1 次,灭菌土壤置于通风良好、已灭菌的无菌操作室内待用。对照组是灭菌的土壤,在 250 mL 锥形瓶中取土 30 g 与 150 mL 稠油水 COD 按 1:5 的比例混和搅拌均匀后在振荡培养箱中常温振荡,定期取 4 mL 上清液测 COD 值。

表层 0~10 cm 土壤过孔径 2 mm 筛后全部破碎过 0.25 mm 的筛,称取 5 g 和 50 g 稠油分别溶于装有一定量石油醚<sup>[14]</sup>的容量瓶中配制 0.2% 和 2% 石油污染的土壤,将其放在通风橱中使石油醚自然挥发。对 0.2% 和 2% 的石油污染土壤进行灭菌和不灭菌处理,然后在人工气候室模拟石油泄漏

的情况。用湿度计定期监测土壤湿度，以保持 20%<sup>[15]</sup>(自然含水量在 4.3%) 的含水量。每周搅拌微生物系统内部的土壤，以确保有足够的空气。

### 1.3 分析方法

有研究<sup>[16]</sup>表明，含 COD 废水进入土壤后以土壤总有机碳的形式存在。土壤中 TOC 的测定采用总有机碳分析仪 (Vario TOC)；渗出液和上清液中 COD 采用重铬酸钾消解比色法使用便捷式光度计 (DR 1900) 测定；土壤中 TPH (C<sub>10</sub>~C<sub>40</sub>) 的测定按照 HJ 1021-2019 采用气/质联用仪 (6890N GC~5975C MSD 和 FID 检测器) 测定，渗出液中 TPH (C<sub>10</sub>~C<sub>40</sub>) 按照 HJ 894-2017 测定。

### 1.4 质量控制和质量保证

使用总有机碳分析仪测定土壤中的总有机碳时，每 20 个样品分析 3 个标准土壤样品和 2 个平行样品，以保证仪器的准确性。TPH 的验证结果如表 1 所示。

表 1 TPH 的验证结果  
Table 1 Verification results of TPH

| 测定项目 | 检出限/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 测定下限/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 线性系数    | 精密度/%        | 准确度/%         | 平行样<br>精密度/% | 校准点<br>相对误差/% | 样品加标<br>回收率/% |
|------|--------------------------------|---------------------------------|---------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| 验证数据 | 0.478                          | 1.914                           | 0.999 7 | 9.692~11.179 | 92.511~97.582 | 1.051~1.362  | -6.14~2.16    | 78.24~85.24   |
| 标准方法 | 6                              | 24                              | ≥0.999  | ≤25          | 70~120        | ≤25          | ±10           | 50~140        |

## 2 结果与讨论

### 2.1 外排水不同生态利用模式下不同 COD 值对土壤 TOC 的影响

各处理组土壤中各层 TOC 变化量如图 1 所示，含耗氧有机物 (以 COD 计) 的外排水进入土壤中对土壤 TOC 含量产生以下 2 方面的影响：废水中的耗氧有机物 (以 COD 计) 排入土壤中后会转化为土壤 TOC，增加土壤 TOC 的含量；水的冲刷和流动会导致土壤中可溶性有机质的流失，进而使土壤中的 TOC 含量降低。耗氧有机物 (以 COD 计) 的主要组分为正、反相破乳剂和聚丙烯酰胺，尽管一部分含耗氧有机物 (以 COD 计) 的废水进入土壤后以土壤 TOC 的形式存在，但此部分耗氧有机物 (以 COD 计) 与流失的 TOC 不尽相同，对于湿地和植物生长的影响将有显著差别。因此，本部分主要探究不同初始 COD 值在不同灌溉模式下对土壤 TOC 累积量的影响。由图 1 可以看出，无论采用何种灌溉方式，在不同 COD 的条件下，在排放初期 (10 d) 均会导致表层 0~15 cm 土壤中 TOC 含量有不同程度的增加，伴随着废水排放时间的延长，在 45 d 时，除湿地模式 (COD=100 mg·L<sup>-1</sup>) 处理外，其余处理土柱表层 0~15 cm 土壤中 TOC 累积量均达到峰值。实验持续 55 d 后，大部分处理几乎所有土层中 TOC 的累积量均呈现出负增长的状态。总体来看，无论采用何种灌溉模式，均会导致土壤中 TOC 累积量不同程度的减少，但是，较高 COD 值 (COD=200 mg·L<sup>-1</sup>) 会减缓土壤中 TOC 的流失量。

### 2.2 外排水不同生态利用模式下对土壤渗出液 COD 含量的影响

同步开展了对土壤渗出液中 COD 含量变化的研究。土壤渗出液每 5 d 收集 1 次，对渗出液的 COD 值进行测定。如图 2 所示，在 0~15 d，各个处理渗出液中 COD 值变化量较大，且部分处理渗出液 COD 增量大于进水 COD 值，原因在于外排水导致土壤中有有机物被淋洗出来。外排 15 d 后，尽管渗出液 COD 值变化有所波动，但各个处理渗出液 COD 增量整体呈现出下降的趋势，特别是灌溉模式下，55 d 后，出水 COD 增量均低于 10，显著低于湿地模式下渗出液中 COD 的增量。可见，灌溉模式下会减少废水中 COD 向地下水的迁移。渗出液中 COD 的减少，一方面受到土壤吸附的影响，另一方面，我们推测土壤微生物参与下的有机物降解有可能起到了更为关键性的作用<sup>[17]</sup>。因此，我们又进一步探究了土壤土著微生物对外排水 COD 的消减作用。

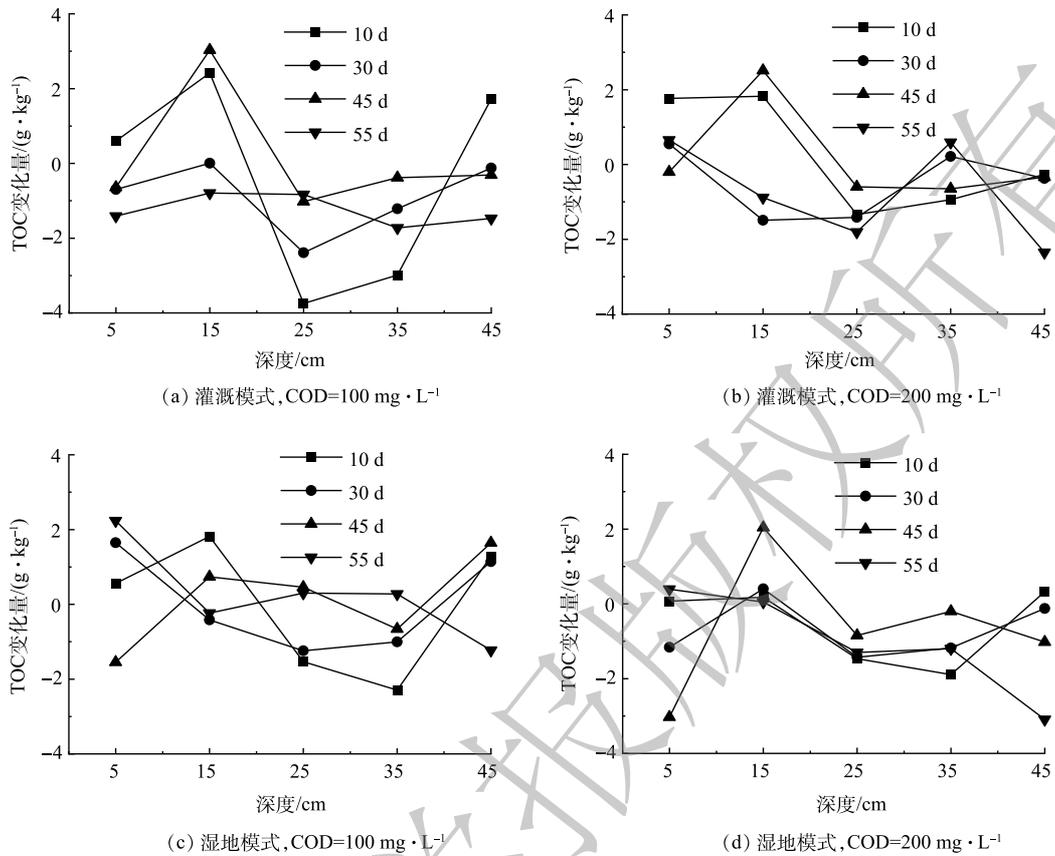


图1 外排水中不同COD在灌溉模式和湿地模式下对荒漠土壤TOC变化量的影响

Fig. 1 Effects of COD on the variation of TOC in desert soil under irrigation mode and wetland patterns

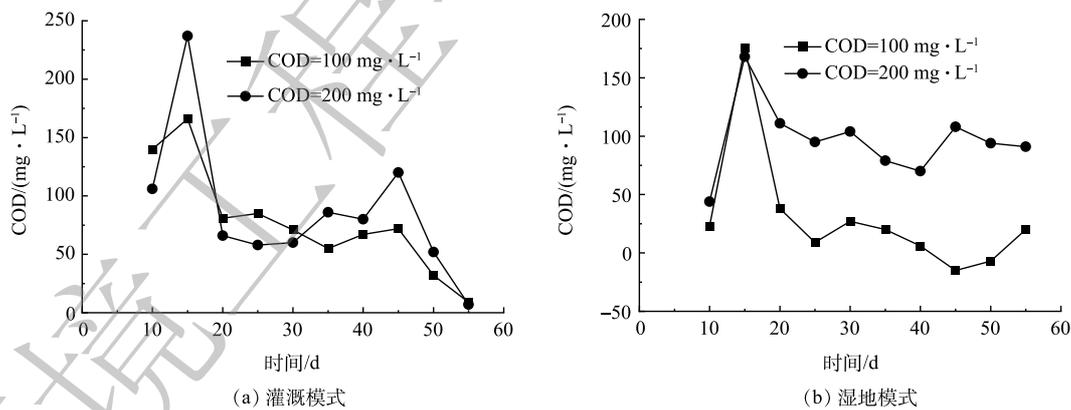


图2 灌溉模式和湿地模式下渗出液中COD随时间变化量

Fig. 2 Variation of COD with time in exudate under irrigation mode and wetland patterns

### 2.3 土壤土著微生物对外排水COD的影响

土壤土著微生物对COD的降解结果如图3所示,土壤浸出液中COD的含量在20 d内并没有出现明显的下降,观察到的COD的衰减归因于其中的有机分子吸附在粘土表面。但未灭菌处理土壤浸出液中COD在2 d后就出现了显著的下,说明土壤颗粒的吸附和微生物降解降低了浸出液中COD值,此后下降速率慢慢减缓直至不变,分析原因开始的有氧环境为微生物消减COD提供了充足的条件,随着实验的进行,氧气和其他营养物质消耗殆尽不利于微生物生长,最终20 d

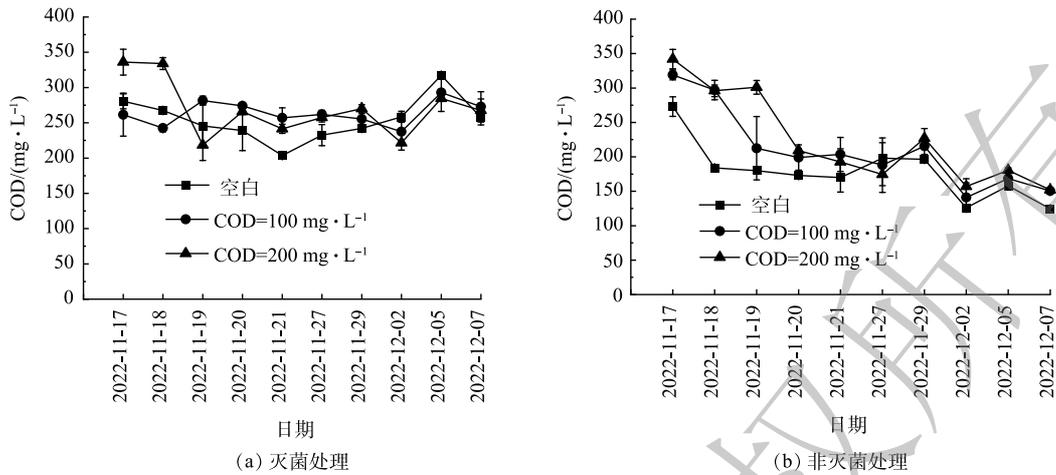


图 3 土著土壤微生物对外排水 COD 的影响  
Fig. 3 Effects of soil microorganisms on COD

后，各个处理的 COD 与初期相比分别降低了 52.82% 和 55.56%。由此可见，土壤土著微生物对外排水 COD 的消减起到了至关重要的作用。

#### 2.4 不同生态利用模式下外排水中 TPH 在土壤中的迁移和累积行为

各土层 TPH 含量如图 4 所示，无论采用哪种利用模式，各个处理 TPH 主要累积于 25 cm 以上土层，越接近表层累积量越高，土壤对 TPH 的截留率可达 90% 以上。这说明土壤对 TPH 有极强的吸附作用。随着排放时间的增加，15 cm 处 TPH 的累积量呈逐渐增加的趋势，TPH 向土壤深处迁

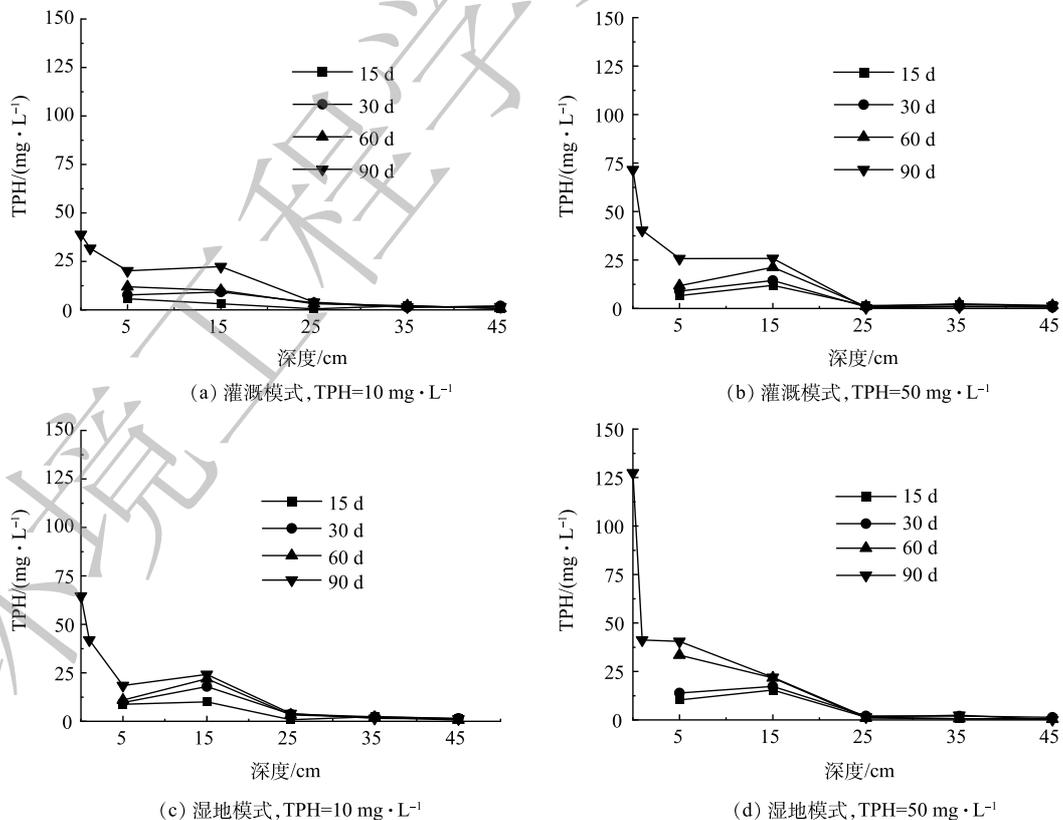


图 4 灌溉模式和湿地模式下土柱各层 TPH 的含量

Fig. 4 Content of TPH in different soil layer under irrigation mode and wetland patterns

移的能力较弱,这与文献报道相一致<sup>[18]</sup>。可以看到,在相同利用模式下,外排水中TPH浓度越高,表层土壤TPH累积量越大;在TPH排放浓度相同的情况下,湿地模式表层土壤TPH累积量高于灌溉模式。说明污染物排放浓度越高,排放强度越大,表层土截留的TPH就越多。因此,低TPH排放浓度的灌溉模式有利于减少土层中TPH的累积。

## 2.5 外排水不同生态利用模式下对土壤渗出液中TPH的影响

由图5可以看出,无论采用何种利用模式,整个实验周期内土壤渗出液中TPH浓度均处于极低的水平。这进一步证明TPH难以向土壤深层迁移的特性。原因在于TPH是疏水粘性大分子物质,不溶于水且比水轻,到达土壤表面时易粘附在土粒表面,堵塞土壤中的毛细孔,使TPH难以向下迁移。外排水TPH初始浓度对渗出液中的TPH的浓度没有明显的影响。90d后,湿地模式下渗出液中TPH浓度明显增高,且明显高于灌溉模式,虽然TPH不易在土壤中迁移,但湿地模式下由于水流量大,增加了TPH向地下水迁移的风险。

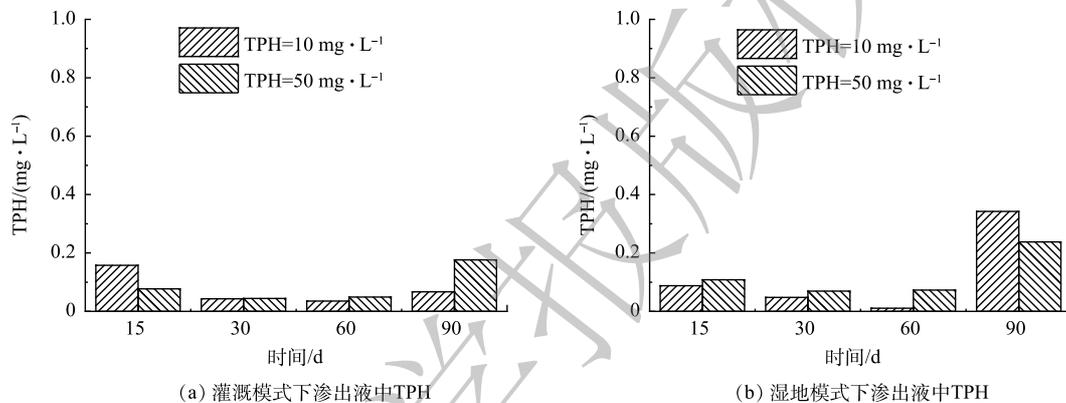


图5 灌溉模式和湿地模式下渗出液中TPH

Fig. 5 Content of TPH in leachate under irrigation mode and wetland patterns

## 2.6 外排水不同生态利用模式下对土壤中TPH组分的影响

由于TPH主要在土壤表层发生累积,因此,我们进一步探究了不同利用模式下对土壤中组分变化的影响。如图6所示,实验开展3个月后,与对照相比,2种利用模式下C<sub>25</sub>以下组分的TPH占比均在不同程度上有所降低,但C<sub>26</sub>以上组分的TPH相对含量则显著提升,暗示短链的TPH在土壤中发生了微生物降解,而长链TPH不易降解并形成累积。为了验证以上猜测,进一步开展了土壤土著微生物对TPH的降解及组分变化的情况。

## 2.7 土壤微生物对土壤中TPH的降解效果

为了探究土著土壤微生物对TPH的降解效果,持续监测了含TPH外排水污染土壤后105d土壤中TPH浓度变化。如图7所示,15d后在TPH含量为0.2%和2%的污染土壤中其降解率分别达到了15%和13%,随后降解率趋于稳定。结果表明,降解率并没有随监测时间的延长而进一步提升,说明虽然TPH可作为碳源被微生物所利用降解,但由于氮、

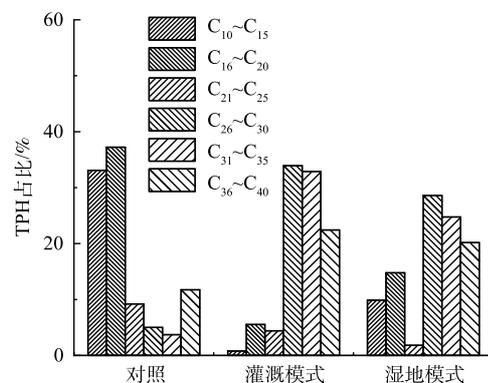


图6 外排水在灌溉模式和湿地模式实施3个月后表层土中TPH组分的变化

Fig. 6 Variations of TPH components in topsoil under irrigation mode and wetland patterns after three months

磷的缺乏成为微生物降解 TPH 的限制因素<sup>[19]</sup>。

### 2.8 土壤微生物对 TPH 组分的影响

土壤微生物对 TPH 组分的影响如图 8 所示。可见，在实验初期 (0 d)  $C_{10}\sim C_{20}$  组分的含量占比最高，达到 60% 以上。随着时间的推移， $C_{10}\sim C_{20}$  组分占比显著降低，虽然  $C_{21}\sim C_{25}$  在 15 d 时略有增高，但在 105 d 后， $C_{10}\sim C_{15}$ 、 $C_{16}\sim C_{20}$  和  $C_{21}\sim C_{25}$  的含量均明显降低，降解率分别为 78%、55% 和 59%。这可能是 TPH 碳原子成键方式和分子质量的不同<sup>[20]</sup>，使土壤微生物能够更好的利用短链烷烃。与此同时，发现  $C_{26}\sim C_{40}$  组分含量随着作用时间的延长有所增加。一方面是  $C_{26}\sim C_{40}$  组分碳链过长，微生物难以有效利用；另一方面，伴随着土壤微生物对石油污染物的生物同化作用，使土壤中的生物烃含量增加。

### 3 结论

1) 2 种利用模式均会造成土壤中 TOC 累积量的降低，导致土壤 TOC 流失，但灌溉模式下会减少外排水中 COD 向地下水的迁移，且土壤土著微生物会促进 COD 的降解，降低外排水 COD 向地下水迁移的风险。

2) 2 种利用模式都会导致 TPH 在土壤表层的累积，但低排放浓度的灌溉模式有利于减少土层中 TPH 的累积；湿地模式下，渗出液中 TPH 明显高于灌溉模式，虽然 TPH 不易在土壤中迁移，但湿地模式下由于水流量大，增高了 TPH 向地下水迁移的风险；两种利用模式下， $C_{25}$  以下的 TPH 百分比都显著降低，但是  $C_{26}$  以上 TPH 含量则显著提升。

3) 土著土壤微生物会促进土层中 TPH 的降解，0.2% 和 2% 石油污染土壤 15 d 后 TPH 降解率分别达到了 15% 和 13%；土壤微生物倾向于利用  $C_{10}\sim C_{15}$ 、 $C_{16}\sim C_{20}$ 、 $C_{21}\sim C_{25}$  短链烷烃，难以有效利用  $C_{26}\sim C_{40}$  长链烷烃。

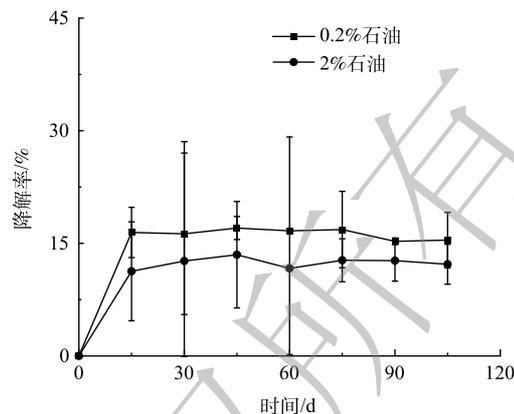


图 7 TPH 降解率随时间变化

Fig. 7 Degradation rate of TPH

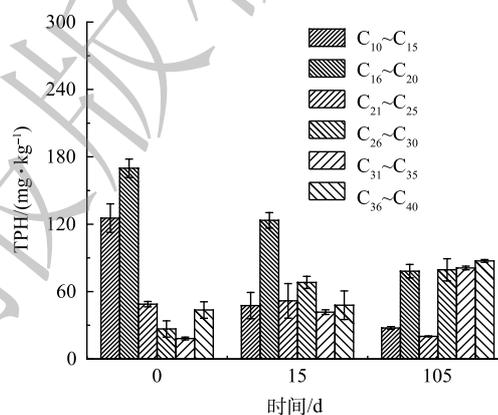


图 8 2% 石油污染 TPH 具体组分分析

Fig. 8 Components analysis of TPH under 2% petroleum pollution

## 参考文献

- [1] 贾路, 于坤霞, 邓铭江, 等. 西北地区降雨集中度时空演变及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(16): 80-89.
- [2] JIANG L W, TONG Y F, ZHAO Z J, et al. Water resources, land exploration and population dynamics in arid areas-the case of the Tarim River basin in Xinjiang of China[J]. *Population and Environment*, 2005, 26(6): 471-503.
- [3] DENG M J. Three Water Lines strategy: Its spatial patterns and effects on water resources allocation in northwest China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73: 1189-1203.
- [4] ZHU Y N, WANG J H, HE G H, et al. Water use characteristics and water footprints of China's oil and gas production[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 184: 106428.
- [5] MA J Z, PAN F, HE J H, et al. Petroleum pollution and evolution of water quality in the Malian River Basin of the Longdong Loess Plateau, Northwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(7): 1769-1782.
- [6] KAVVADIAS V, DOULA M K, KOMNITSAS K, et al. Disposal of olive oil mill wastes in evaporation ponds: effects on soil properties[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 182(1/2/3): 144-155.
- [7] STEFANAKIS A I, PRIGENT S, BREUER R. Integrated produced water management in a desert oilfield using wetland technology and innovative reuse practices[J]. *Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment*, 2018: 25-42.
- [8] ZHANG C, ANADON L D. Life cycle water use of energy production and its environmental impacts in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(24): 14459-14467.
- [9] STEFANAKIS A I, AL-HADRAMI A, PRIGENT S. Reuse of oilfield produced water treated in a Constructed Wetland for saline irrigation under desert climate[C]//7th International Symposium on Wetland Pollutant Dynamics and Control (WETPOL), Montana, USA. 2017: 21-25.
- [10] 黄廷林, 史红星, 任磊. 石油类污染物在黄土地区土壤中竖向迁移特性试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报:自然科学版*, 2001, 33(2): 108-111.
- [11] SUN X N, LIU A P, CHEN X R, et al. Research on the migration of petroleum hydrocarbon contamination in the soil in different leaching amount//Advanced Materials Research[J]. *Trans Tech Publications Switzerland*, 2012, 414: 121-125.
- [12] HAO X M, CHEN Y N, LI W H, et al. Hydraulic lift in *Populus euphratica* Oliv. from the desert riparian vegetation of the Tarim River Basin[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(8): 905-911.
- [13] 罗懿. 石油在黄土中的垂直迁移特征及生态毒性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [14] 李宝明. 石油污染土壤微生物修复的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [15] WU M L, DICK W A, LI W, et al. Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, 107: 158-164.
- [16] SCHREIBER J D, DUFFY P D. Organic carbon and oxygen demand relationships in stormflow from southern pine watersheds[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(1): 142-148.
- [17] CHEN L, HUANG M, JIANG X B, et al. Pilot tests of microbe-soil combined treatment of waste drilling sludge[J]. *Natural Gas Industry B*, 2015, 2(2-3): 270-276.
- [18] 郎梦凡. 石油烃在不同土壤中的挥发及迁移规律研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022.
- [19] 马双. 油污土壤石油降解真菌的分离、鉴定与降解效果分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [20] 翟晓波, 盛益之, 张旭, 等. 混凝—气浮工艺处理有机物污染地下水现场中试试验[J]. *化工环保*, 2018, 38(1): 33-39.

(责任编辑: 曲娜)

## Effects of ecological utilization patterns on the migration and transformation of typical pollutants from oil and gas field wastewater in desert soil

HUANG Bang<sup>1,2</sup>, WANG Qiong<sup>1</sup>, LIU Jingzhang<sup>1</sup>, DU Mei<sup>1</sup>, SHI Bin<sup>1</sup>, LIU Yanwei<sup>1</sup>, SONG Maoyong<sup>1</sup>, BI Lei<sup>1,\*</sup>

1. Laboratory of Environmental Nanotechnology and Health Effects, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. School of Environment and Health, Jiangnan University, Wuhan 430056, China  
\*Corresponding author, E-mail: leibi@rcees.ac.cn

**Abstract** Water shortage is the main limiting factor in Northwest China, however, the production of oil and gas field wastewater in northwest China is increasing year by year. The ecological utilization of discharged water is one of the effective strategies to solve the contradiction between water resources shortage and discharged water treatment in northwest China. Therefore, this study explored the migration and transformation of typical oxygen-consuming organic matter (COD) and petroleum hydrocarbon (TPH) in desert soil under wetland and irrigation ecological utilization patterns. In-situ soil column experiments showed that both of the two utilization patterns could lead to the decrease of Total organic carbon (TOC) in varying degrees, the increased COD could reduce the loss of TOC, but would change the composition of TOC. Soil microorganisms could effectively reduce COD in efflux water and reduce the migration risk of COD to deep soil. TPH could accumulate in the surface soil, but the irrigation pattern with low TPH concentration was beneficial to reduce its accumulation. In wetland pattern, large flow increased the risk of TPH migration to groundwater. The degradation rate of TPH by soil microorganisms could reach 15%, resulting in a significant decrease in the relative content of TPH below C<sub>25</sub>, but an increase in the relative content of TPH above C<sub>26</sub>. The reason is that short chain TPH can be degraded by microorganisms easily, while long chain TPH is not easily degraded. The above research results can provide basic data for ecological utilization of oil and gas field wastewater.

**Keywords** oil and gas field wastewater; ecological utilization pattern; COD; TPH; soil microorganism