

## 基于层次决策分析法构建多环芳烃高效降解菌群的研究

李瑞凤, 陈茜蓓, 林苏丹, 麻微微, 施雪卿\*

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525)

**摘要:**以潮间带沉积物为菌源分离出 5 株多环芳烃高效降解菌, 基于层次决策分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 构建了多环芳烃高效降解菌群。利用层次决策分析法, 对细菌的降解率及代谢活性进行比较, 并通过不同的赋值方式, 构建了 3 组多环芳烃降解菌群: AHP-1 (主观温和赋值组)、AHP-2 (主观极端赋值组)、AHP-3 (客观赋值组)。实验结果表明, 菌群的降解速率显著高于单菌的降解速率。在此基础上, 以等比例方式混合细菌作为对照组, 研究了以上 4 组菌群的降解率和代谢活性。结果表明, 1 d 内, AHP-3 取得了较高的 PAHs 降解率 (64.02%), 高于 AHP-1 (58.75%)、AHP-2 (55.17%) 及对照组 (54.98%)。利用层次决策分析法这种尚未报道过的新型构建菌群的手段, 可以提高 PAHs 的降解速率, 因此, 可以作为一种方法, 为菌群的构建提供理论基础。

**关键词:**多环芳烃; Biolog 生态板; 层次决策分析法; 菌群构建

**中图分类号:**X741 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2024)05-0086-08

## Microbial mixed culture for efficient degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons using analytical hierarchy process

LI Ruifeng, CHEN Xibei, LIN Sudan, MA Weiwei, SHI Xueqing\*

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** Five strains of efficient polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) degrading bacteria were isolated from intertidal zone sediments, and the efficient PAHs degrading bacteria group was constructed based on the analytical hierarchy process (AHP). The AHP was used to compare the degradation rate and metabolic activity of bacteria in pairs, and three groups of PAHs degrading bacteria were constructed through different evaluation methods, namely AHP-1 (subjective mild evaluation group), AHP-2 (subjective extreme evaluation group) and AHP-3 (objective evaluation group). The experimental results indicate that the degradation rate of the microbial community is significantly higher than that of a single bacterium. On this basis, a control group was constructed by mixing bacteria in an equal proportion, and the degradation performance and metabolic characteristics of the above four bacterial groups were studied. The results showed that within one day, AHP-3 achieved a high degradation rate of PAHs (64.02%), which was higher than that of AHP-1 (58.75%), AHP-2 (55.17%) and the control group (54.98%). The AHP, a new method of constructing flora

收稿日期: 2023-05-08

基金项目: 山东省自然科学基金青年基金资助项目 (ZR2020QE236)

作者简介: 李瑞凤 (1998—), 女, 山东潍坊人。硕士, 研究方向为污水处理与资源化。E-mail: 2269271794@qq.com。

\* 通信作者: 施雪卿 (1985—), 男, 浙江杭州人。博士, 教授, 主要从事污水处理与资源化方面的研究。E-mail: shixq85@163.com。

that has not yet been reported, can improve the degradation rate of PAHs. Therefore, it can be used as a model method to provide a theoretical basis for the construction of flora.

**Key words:** polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs); Biolog-ECO plate analysis; analytic hierarchy process (AHP); construction of strain

多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)是一类由两个及两个以上苯环稠和而成的有机污染物<sup>[1]</sup>。由于PAHs毒性强且结构稳定难降解,易对人体产生“三致”危害,因此对其加强治理刻不容缓<sup>[2]</sup>。目前,PAHs的降解方法主要包括物理法、化学法和生物法等,由于生物法与其他两种方法相比具有经济高效、绿色环保等优点,近年深受研究者的青睐<sup>[3]</sup>。环境中PAHs污染通常以多种组分共同存在,呈现复合污染的特点,增加了降解的复杂性,影响了微生物的代谢活性,进而影响其对PAHs的降解速率,且单菌难以完成对多种化合物的降解<sup>[4-5]</sup>。与单菌相比,菌群可以利用微生物之间的协同作用,提高酶活性,形成稳定的微生物系统,实现PAHs的高效降解<sup>[6]</sup>。因此,筛选环境适应性强且降解更加高效的细菌构建PAHs高效降解菌群具有重要的现实意义。目前,构建菌群的方法大多为正交法<sup>[7-9]</sup>,构建过程需要进行多次实验和数据分析,过程繁琐。层次决策分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)是在决策中处理多个目标和标准的有用方法之一,基本思路是将一个复杂的决策问题分解成不同的层次,然后逐层进行判断和评价,最终确定各个因素的权重,得出最终的评价结果<sup>[10]</sup>。层次决策分析法被广泛应用于环境影响评价、经济效益评价、社会发展评价等领域<sup>[11-12]</sup>,但运用此方法进行优化混合菌配比鲜有报道。面对不同的细菌对PAHs的降解率及代谢活性等功能上的不同,细菌在复杂环境中的降解能力就变得难以比较<sup>[13]</sup>。AHP可对细菌的PAHs降解率和代谢活性进行综合比较,通过计算得到不同细菌PAHs降解能力和复杂碳源的代谢活性的综合权重,根据综合权重构建菌群,过程方便快捷<sup>[10]</sup>。因此,可以利用这种新型方法优化混合菌配比,为菌群的配伍提供一种策略。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

1) 实验菌株:以潮间带沉积物为菌源,以菲、蒽、芘为唯一碳源,筛选出了5株PAHs高效降解菌,经鉴定分别属于 *Gordonia*、*Brevibacterium*、*Phycococcus*、*Erythrobacter*、*Microbacterium*, 分别命名为 Gor-1、Bre-2、Phy-3、Ery-4、Mib-5。

2) 高盐 LB(Luia-Betani, LB)培养基:10 g 胰蛋白胍,5 g 酵母提取物,30 g NaCl,加去离子水定容至1 L, pH 为 7.4, 固体培养基添加 1.5% 的琼脂粉。

3) MMC 培养基:  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  7 g, NaCl 30 g,  $NH_4NO_3$  1 g,  $Na_2HPO_4$  3 g,  $KH_2PO_4$  2 g, KCl 0.7 g, 加去离子水定容至1 L, 调 pH 为 7.4, 121 °C 高压蒸汽灭菌 20 min。灭菌后补加适量微量元素混合液 0.1 mL/L。

4) 微量元素混合液:  $H_3BO_3$  0.05 g、 $ZnCl_2$  0.05 g、 $CuCl_2$  0.05 g、 $MnSO_4 \cdot H_2O$  0.05 g、 $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$  0.05 g、 $AlCl_3$  0.05 g、 $CoCl_2$  0.05 g、 $NiCl_2$  0.05 g, 加去离子水定容至1 L, 微量元素经 0.22  $\mu m$  滤膜过滤除菌。

5) 含 PAHs 的 MMC 培养基:准确称取菲、蒽、芘各 0.05 g 置于 25 mL 棕色容量瓶中,加入丙酮定容至 25 mL,制成 6 g/L 的菲蒽芘混合丙酮母液,将菲蒽芘混合丙酮溶液过 0.22  $\mu m$  有机相滤膜除菌后加入到锥形瓶中,置于超净台中,待瓶中的丙酮挥发完全后,将灭菌后的 MMC 液体培养基加入锥形瓶中,制成含 PAHs 的 MMC 培养基。

6) 培养条件:28 °C、200 r/min 的恒温培养箱中避光培养。

### 1.2 细菌拮抗性研究

将不同的细菌分别在高盐 LB 固体平板上进行两两交叉划线培养,相交于一点,随后置于 28 °C 恒温培养箱中避光培养 48 h,观察交叉点处是否有细菌生长。

### 1.3 利用 AHP 开展 PAHs 高效降解菌群的构建

#### 1.3.1 建立层次结构模型

采用 AHP 建立层次结构模型,分为 3 个层次<sup>[14]</sup>。A 层为目标层,旨在对比分析不同细菌对 PAHs 的降解能力及对 31 种碳源的代谢活性,得到 PAHs 降解细菌综合权重。B 层为指标层,分别为 PAHs 的降解能力 B1、Biolog 生态板代谢活性 B2。C 层为方案层,分别为不同 PAHs 降解菌。建立层次分析结构模型如图 1 所示。

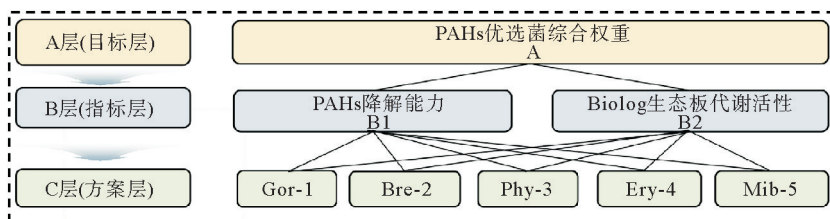


图 1 层次分析结构模型

#### 1.3.2 构造判断矩阵及一致性检验

构造判断矩阵。对于目标层,PAHs 的降解能力 B1 的重要性高于碳源的代谢活性 B2,因此 B1 与 B2 两两比较赋值为 5(1-9,取中间数值)。方案层细菌对于指标 B2 的相对重要程度参考颜色平均变化率(Average Well Color Development,AWCD)值(表 1),并通过 1-3 标度法进行赋值;方案层细菌对于指标 B1 的相对重要程度参考 7 d 内 PAHs 的降解率(表 1),根据不同的赋值方法,构建 3 个成对比较矩阵:①AHP-1(主观温和赋值组),通过 1-7 标度范围进行赋值;②AHP-2(主观极端赋值组),通过 1-9 标度范围进行赋值;③AHP-3(客观赋值组),通过比值法进行赋值。根据 AHP,将成对比较矩阵归一化为判断矩阵,相对权重值根据每一组判断矩阵进行计算,计算方法参考文献[15-16]。通过计算得到各细菌相应的权重值(表 2)。

表 1 不同细菌降解率及 AWCD 值

B 层(指标层)	Gor-1	Bre-2	Phy-3	Ery-4	Mib-5
B1(7 d 内 PAHs 的降解率)/%	70.82	72.71	81.08	83.90	59.95
B2(AWCD 值)	0.646 27	0.654 54	0.715 48	0.724 57	0.555 50

表 2 不同细菌相对权重值

组别	Gor-1	Bre-2	Phy-3	Ery-4	Mib-5
AHP-1	0.1068	0.1289	0.2808	0.4335	0.0500
AHP-2	0.0828	0.1383	0.2665	0.4686	0.0438
AHP-3	0.1865	0.1908	0.2330	0.2393	0.1504

进行一致性检验。引入一致性判定指标 CI(Consistency Index)与随机一致性指标 RI(Random Index)来判断矩阵是否合理。计算公式如(1)(2)所示,若一致性比率 CR 小于 0.1,则一致性检验通过,说明可按照相对权重表示的结果进行决策,否则需要重新考虑成对比较矩阵的赋值。

$$C_1 = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \tag{1}$$

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \tag{2}$$

式中: $C_1$  为一致性判定指标; $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征值; $n$  为因素个数; $C_R$  为一致性比率; $R_1$  为随机一致性指标。

经计算,菌群的 CR 值如表 3 所示,由表 3 可知,3 组菌群的 CR 均小于 0.1,说明可按照相对权重表示的结果进行决策。

复合菌群的构建:将不同细菌按比例混合得到对照组菌群;基于 AHP 计算得到的权重将细菌混合,分别得到菌群 AHP-1、AHP-2、AHP-3,菌群中各细菌所占比例(单菌占菌群的比例)如表 4 所示。

#### 1.4 细菌悬浊液制备及生长曲线测定

将细菌接种于高盐 LB 液体培养基中,置于 28 ℃、200 r/min 的恒温培养箱中避光富集培养 48 h。在 4000 r/min、4 ℃ 的条件下离心 10 min,弃去上清液,收集沉淀的菌体。加入 6 mL 生理盐水(8.5%)重悬细胞沉淀以清洗细胞,重复 2 次获得目的菌体。最后加入

MMC 培养基重悬细胞至细胞悬液在 600 nm 波长出的吸光值(Optical Density, OD)值为 0.2。为了探究菌群与细菌在降解 PAHs 过程中生长状况的不同,使用紫外分光光度计测量不同菌液在 600 nm 处的吸光度值,连续测定 7 d,做出不同细菌及菌群组合的生长曲线。

#### 1.5 多环芳烃测定

采用高效液相色谱法对多环芳烃进行测定。检测条件:流动相选用甲醇和水(80%甲醇+20%水),流动相流量为 1.0 mL/min。色谱柱为 C18 反向色谱柱,柱温 25 ℃,采用自动进样器进样,每次进样 10 μL。菲、葱、芘的检测波长分别为:254、254、250 nm。PAHs 降解率的计算:以不接种菌剂的培养液为对照,根据式(3)计算各细菌或菌群对 PAHs 的降解率( $\eta$ ):

$$\eta = \frac{W_0 - W_x}{W_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\eta$  为降解率,%; $W_0$  为初始 PAHs 浓度,mg/L; $W_x$  为测得的 PAHs 浓度,mg/L。

#### 1.6 代谢活性研究

利用 Biolog 生态板评价菌群的碳源代谢活性。Biolog 生态板中包含 31 种碳源,可以分为 6 类,分别为单糖/糖苷/聚合糖、酸类、氨基酸类、酯类、醇类和胺类。对于 Biolog 生态板数据的分析,采用 AWCD 表征微生物碳源代谢活性,评估微生物群落碳源利用能力的指标。AWCD 计算公式为

$$A_{WCD} = \frac{\sum (C_i - R)}{n} \quad (4)$$

式中: $A_{WCD}$  为颜色平均变化率; $C_i$  为不同碳源的孔吸光度值在 590 和 750 nm 处的差值,数值小于 0.06 按 0 处理; $R$  为对照孔吸光度值,若  $C_i - R$  为负值则按 0 处理; $n$  为微孔板中碳源的数量, $n = 31$  (Biolog 生态板有 31 种碳源)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 细菌拮抗性分析

拮抗作用是指一种细菌通过产生抑制另一种细菌生长的物质,从而限制后者的生长和繁殖<sup>[17]</sup>。如果两种细菌之间不存在拮抗关系,它们在交叉点处应该能够自由地生长并扩展。将细菌两两进行拮抗关系研究,结果如图 2 所示。交叉点处没有受到抑制,表明细菌之间不存在拮抗关系,可以进行混合构建 PAHs 降解菌群。

### 2.2 细菌与菌群的生长曲线比较分析

为探究菌群与细菌在降解 PAHs 过程中生长情况的不同,测定了细菌与菌群的生长曲线(图 3)。由

表 3 一致性检验参数 CR

组别	指标层 B-A 判断矩阵	方案层 C-B1 判断矩阵	方案层 C-B2 判断矩阵
AHP-1	0	0.08	0
AHP-2	0	0.08	0.05
AHP-3	0	0.08	0

表 4 不同细菌比例参数

组别	Gor-1	Bre-2	Phy-3	Ery-4	Mib-5	%
对照组	20	20	20	20	20	
AHP-1	11	13	28	43	5	
AHP-2	8	14	27	47	4	
AHP-3	19	19	23	24	15	



图 2 不同种细菌拮抗关系

图3可知,菌群在第1天内生长迅速,OD<sub>600</sub>达到了0.15以上,远远高于任一细菌在600 nm处的吸光值。说明菌群在第1天的生长速率远远高于细菌的生长速率,原因可能是细菌之间具有协同作用,提高了酶活性和代谢活性,使菌群可以迅速适应高PAHs环境,利用PAHs进行生长代谢<sup>[18]</sup>。

### 2.3 细菌与菌群第1天对PAHs降解率分析

为探究菌群的降解速率,测定了细菌与菌群在第1天对PAHs降解率(图4)。培养1 d后,菌群对PAHs的降解率远远高于单菌的降解率,对菲、蒽、芘的降解率均在50%以上。其中,AHP-3对混合PAHs中菲、蒽、芘的降解率最高,分别为66.71%、65.22%、60.13%;对照组降解率最低,对菲、蒽、芘的降解率分别为52.24%、58.61%、54.09%,但仍高于降解效果最好的细菌Mib-5(菲47.27%、蒽45.37%、芘28.21%)。结果表明,菌群可以提高PAHs的降解速率,使PAHs在短时间内得到快速地降解。原因可能是菌群具有高效协同作用,可以迅速适应环境,在短时间内生物量迅速增加,对PAHs的降解速率显著提高<sup>[18]</sup>。细菌对芘的降解率较低,原因可能是芳香环的增加导致芘的抗降解性和疏水性增强,使细菌生物利用性变差<sup>[18]</sup>。细菌Mib-5在1 d内对芘的降解率最高,可达29.21%,但是仍然低于菌群对芘的降解能力,说明菌群促进了对高环芘的降解。原因可能是菌群组合中,各细菌提供了不同的功能酶(氧化酶、脱氢酶、环氧化酶等),使PAHs得到更高效的降解<sup>[19]</sup>。

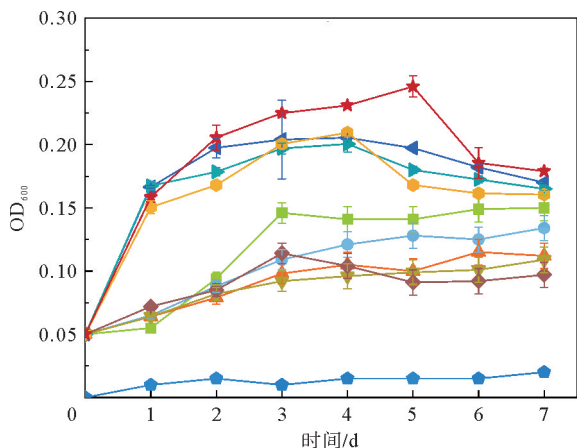


图3 细菌与菌群的生长曲线

— Gor-1; — Bre-2; — Phy-3; — Ery-4; — Mib-5;  
— 对照组; — AHP-1; — AHP-2; — AHP-3; — 空白组

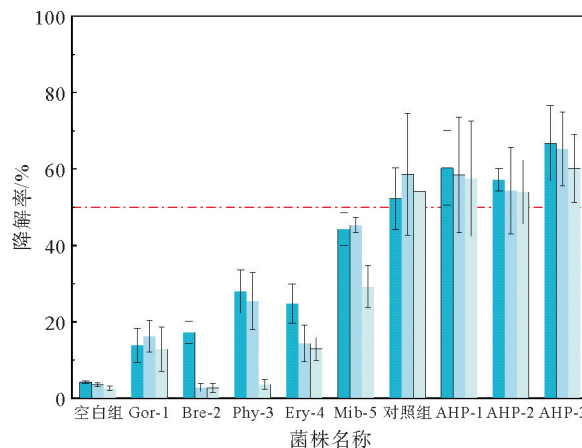


图4 不同种细菌与菌群1 d内对PAHs降解率

■ 菲; ■ 蒽; ■ 芘

### 2.4 多环芳烃降解菌群对PAHs降解率分析

为探究菌群对PAHs的降解能力,测定了7 d后细菌与菌群对PAHs的降解率(图5)。由图5可知,菌群对PAHs的降解率范围为79.86%~88.33%,AHP-3对PAHs的降解率最高,可达88.33%,高于细菌对PAHs的降解率(59.95%~83.90%)(见表1)。原因可能是菌群较单菌存在不同的降解途径,高效协同作用和菌株之间的共代谢作用使菌群对PAHs的降解速率显著提高<sup>[18]</sup>。

由上述结果可知,将细菌复合构建菌群后,提高了PAHs降解速率及降解率;通过客观赋值法构建的菌群AHP-3,其PAHs降解能力高于其他菌群组合。

### 2.5 多环芳烃降解菌群Biolog代谢活性分析

为探究菌群在复杂环境中的代谢活性,测定了菌群对Biolog生态板中31种碳源的代谢活性(图6)。由图6(a)可知,随着培养时间的增加,4组菌群的AWCD值均逐渐增加,说明其可以利用31种碳源进行代谢。达到稳定后,AHP-3的AWCD值最高,说明其代谢活性最强,更容易适应不同的自然环境。根据平衡后的AWCD值,分析不同降解菌对6类碳源的利用情况(图6(c))。菌群对6类碳源均有代谢能力,这意味着它们在不同的环境中具有生态适应性,并且可能在多种环境中被应用于降解PAHs等复杂有机化合物<sup>[20]</sup>。通过细菌与菌群对31种碳源的AWCD值比较可知,菌群对31种碳源的代谢活性更强(图6(a)(b))。

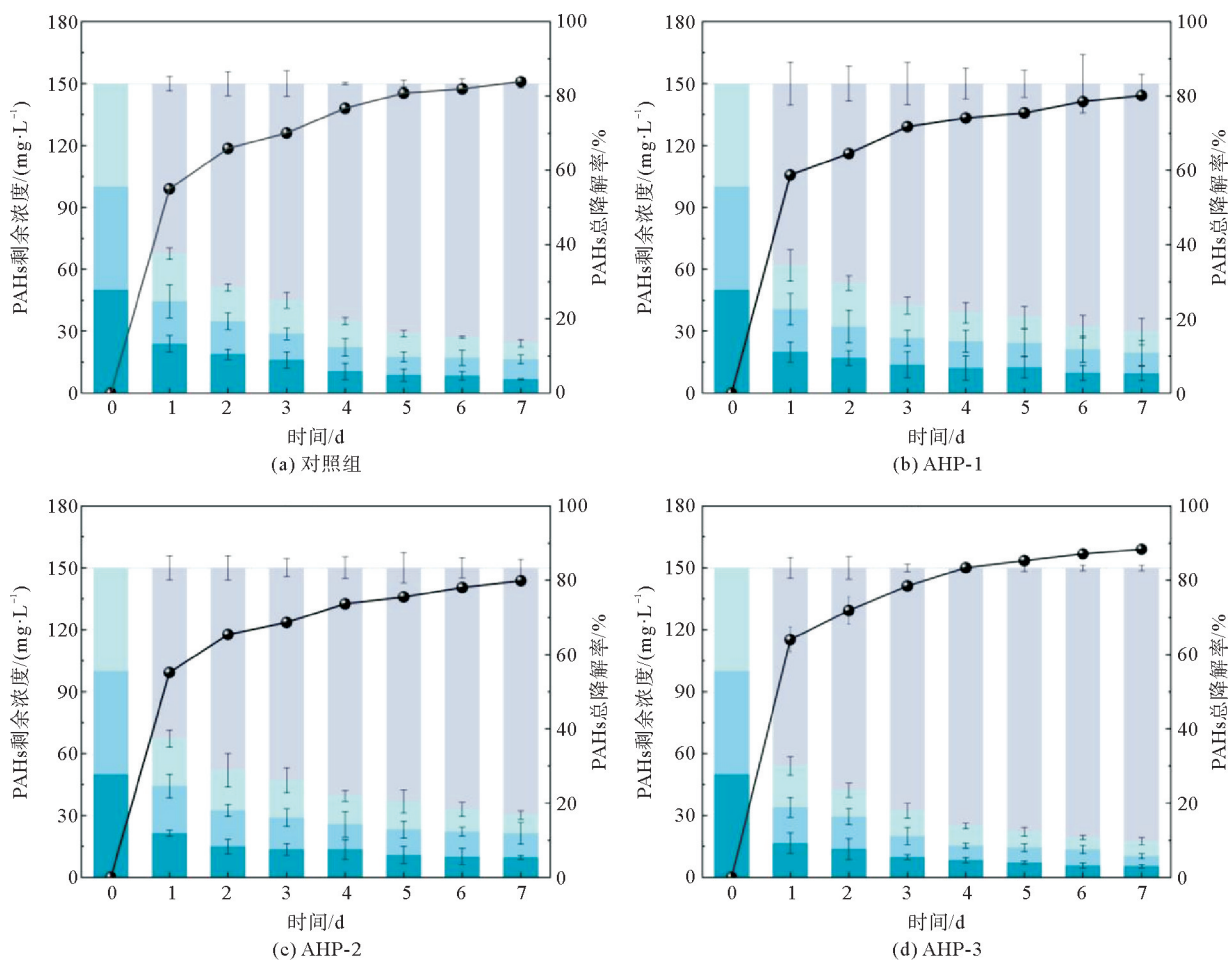


图 5 不同菌群 7 d 内对混合 PAHs 的降解率及剩余浓度

■ 菲; ■ 萘; ■ 芘; ■ 已被降解的 PAHs; —●— PAHs 总降解率

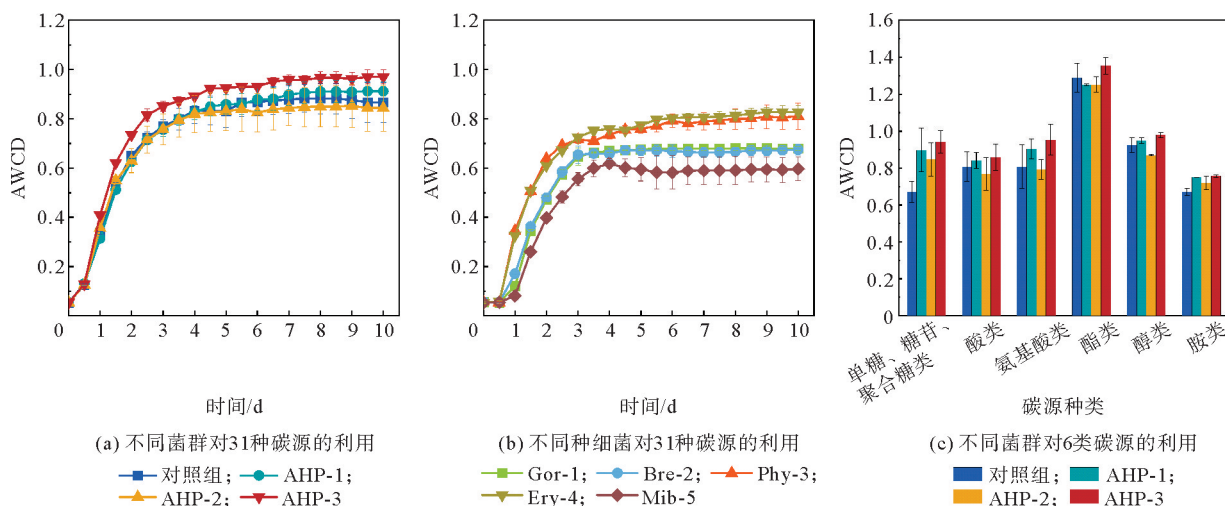


图 6 不同种细菌与菌群对不同类碳源的利用

### 3 结论

目前构建菌群常用的比较系统的方法主要为正交法,构建菌群需要进行多次实验和数据分析,过程繁琐。因此,本文提出了一种基于 PAHs 降解率和 31 种碳源代谢活性 2 种指标的新型方法 AHP,用于菌群

的构建,方便快捷。针对不同菌群的降解率和代谢活性进行分析讨论,结果如下:

1) 菌群配伍后促进了 PAHs 的降解,第 1 天菌群对 PAHs 的降解率远高于单菌的降解率(图 4)。

2) 基于 AHP 方法,按照客观赋值法构建的菌群 AHP-3,其降解率及代谢活性都高于主观赋值法及等比例混合法。

因此,基于 AHP,通过客观赋值方式优化菌群配比,可以作为一种新型方法,为菌群的构建提供理论基础。在后续研究中,可进一步探究 31 种碳源在菌群共代谢中发挥的作用效应及作用机制,利用宏基因组学和转录组学探究高效降解菌群的代谢机制,为 PAHs 耐盐高效降解菌群的实际应用提供理论指导。

### 参考文献(References):

- [1] 李静. 土壤微生物对芘的协同降解机理研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.  
LI Jing. Study on the mechanism of pyrene synergistic degradation by soil bacteria[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2020.
- [2] 叶志波,杨乐,邓瑞杰,等. 消油剂对海洋溢油中多环芳烃环境行为的影响[J]. 青岛理工大学学报,2017,38(6):89-94.  
YE Zhibo, YANG Le, DENG Ruijie, et al. Influence of dispersants on the environmental behavior of polycyclic aromatic hydrocarbons derived from marine spilled oil[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2017, 38(6): 89-94.
- [3] 白净,徐晓芳,黄文慧,等. 细菌在多环芳烃降解中的应用及修复增效策略[J]. 环境科学与技术,2023,46(2):202-214.  
BAI Jing, XU Xiaofang, HUANG Wenhui, et al. Application of bacteria in the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons and strategies for remediation and efficiency enhancement[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 46(2): 202-214.
- [4] ZHAO Z Y, SELVAM A, WONG J W-C. Effects of rhamnolipids on cell surface hydrophobicity of PAH degrading bacteria and the biodegradation of phenanthrene[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(5): 3999-4007.
- [5] ZHANG X H, GAO J, ZHAO F B, et al. Characterization of a salt-tolerant bacterium *Bacillus* sp. from a membrane bioreactor for saline wastewater treatment[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(6): 1369-1374.
- [6] 苏梦缘,王红旗,李艺,等. 多环芳烃降解菌菌群构建及其适宜降解环境条件的确定[J]. 环境工程学报,2017,11(2):1192-1198.  
SU Mengyuan, WANG Hongqi, LI Yi, et al. Construction of microbial consortia for pahs degradation and appropriate environmental condition for degradation[J]. Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(2): 1192-1198.
- [7] 王佳琪. 芘降解菌株的分离、鉴定及降解特性的研究[D]. 长春:长春理工大学,2021.  
WANG Jiaqi. Screening and identification of pyrene-degrading bacteria and its degradation characteristics[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2021.
- [8] 李宝明,阮志勇,姜瑞波. 石油降解菌的筛选、鉴定及菌群构建[J]. 中国土壤与肥料,2007(3):68-72.  
LI Baoming, RUAN Zhiyong, JIANG Ruibo. Screen and identification of oil degrading bacteria and community construction[J]. Chinese Soil and Fertilizers, 2007(3): 68-72.
- [9] 许琪. 一株石油源 *Bacillus firmus* 对蒽的降解特性及蛋白组学研究[D]. 沈阳:辽宁大学,2022.  
XU Qi. Study on the degradation characteristics and proteomics of anthracene by a petroleum source *Bacillus firmus*[D]. Shenyang: Liaoning University, 2022.
- [10] DANESHFAR M A, ARDJMAND M. Selecting a suitable model for collecting, transferring, and recycling drilling wastes produced in the operational areas of the Iranian Offshore Oil Company (IOOC) using analytical hierarchy process (AHP)[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 259: 109791.
- [11] 张诗. 基于 AHP-模糊综合评价法的农村生活污水治理技术评价研究[D]. 昆明:云南师范大学,2022.  
ZHANG Shi. Research on the evaluation of rural domestic sewage treatment technology based on AHP fuzzy comprehensive evaluation method[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2022.
- [12] MOLINOS-SENANTE M, MUÑOZ S, CHAMORRO A. Assessing the quality of service for drinking water supplies in rural settings: A synthetic index approach[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 247: 613-623.
- [13] 冯清敏. 高分子量多环芳烃降解菌的筛选及其共代谢机理研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2021.  
FENG Qingmin. Isolation and characterization of the co-metabolism mechanism of a high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbon degrading strain[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2021.
- [14] 金菁,祝新. 基于层次分析法的江苏省绿色物流 SWOT 分析[J]. 物流工程与管理,2022,44(4):17-19.  
JIN Jing, ZHU Xin. SWOT analysis of green logistics in Jiangsu Province based on analytic hierarchy process[J]. Logistics Engineering and Management, 2022, 44(4): 17-19.
- [15] KIM M, JANG Y C, LEE S. Application of Delphi-AHP methods to select the priorities of WEEE for recycling in a waste management decision-making tool[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 128: 941-948.

- [16] 张静怡. 城镇供水厂生物预处理工艺运行管理技术评估研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.  
ZHANG Jingyi. Research on evaluation of operation and management technology of biological pretreatment process in urban water supply plant[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2020.
- [17] ZAFRA G, ABSALÓN Á E, ANDUCHO-REYES M Á, et al. Construction of PAH-degrading mixed microbial consortia by induced selection in soil[J]. *Chemosphere*, 2017, 172:120-126.
- [18] 李康. 多环芳烃降解微生态菌系的构建及其对菲和芘的降解研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.  
LI Kang. Construction of PAHs-degrading microecological bacteria flora and its biodegradation to phenanthrene and pyrene[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2020.
- [19] 邹晓爽. 苯并[a]芘好氧降解菌 *Acinetobacter* XS-4 的分离筛选、降解性能及机理研究[D]. 贵阳:贵州大学,2022.  
ZOU Xiaoshuang. Isolation and screening of benzo [a] pyrene aerobic degrading bacteria *Acinetobacter* XS-4 and study on its degradation performance and mechanism[D]. Guiyang:Guizhou University,2022.
- [20] RUTGERS M, WOUTERSE M, DROST S M, et al. Monitoring soil bacteria with community-level physiological profiles using Biolog<sup>TM</sup> ECO-plates in the Netherlands and Europe[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 97:23-35.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)

### (上接第 85 页)

- [27] 刘斌,李孟斌,王红华. 水中染料在活性炭上的动态吸附行为研究[J]. *工业水处理*, 2018, 38(5):21-24.  
LIU Bin, LI Mengbin, WANG Honghua. Dynamic adsorption behavior of activated carbon on dyes in water[J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, 38(5):21-24.
- [28] 安强,朱胜,缪乐,等. 碱改柚子皮生物炭对水体中 Mn(II) 的动态吸附研究[J]. *重庆大学学报*, 2021, 44(6):96-108.  
AN Qiang, ZHU Sheng, MIAO Yue, et al. The dynamic adsorption of Mn(II) in water by alkali modified pomelo peel biochar[J]. *Journal of Chongqing University*, 2021, 44(6):96-108.
- [29] 袁林,陈滢,刘敏,等. 改性纳米纤维素对磷的动态吸附及再生[J]. *化工进展*, 2020, 39(7):2907-2914.  
YUAN Lin, CHEN Ying, LIU Min, et al. Dynamic adsorption of phosphorus by modified nano cellulose and its regeneration[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(7):2907-2914.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)