

两相系统在疏水性有机污染物高效降解菌富集培养中的应用研究进展

虞志强^{1,2,3,4} 陈杏娟^{2,3,4} 赵刚^{2,3,4} 许玫英^{2,3,4*}

(1. 江西农业大学生物科学与工程学院 江西 南昌 330045)

(2. 广东省微生物研究所 广东省菌种保藏与应用重点实验室 广东 广州 510070)

(3. 广东省微生物应用新技术公共实验室 广东 广州 510070)

(4. 省部共建华南应用微生物国家重点实验室 广东 广州 510070)

摘要: 环境中疏水性有机污染物(Hydrophobic organic pollutants, HOPs)的浓度日益增加, 获取 HOPs 高效降解功能微生物能有效提高 HOPs 污染治理效率。近年来, 利用两相系统促进 HOPs 微生物降解转化的研究已取得一定进展。本文重点从两相系统的结构特点及其富集 HOPs 降解功能微生物的原理、主要影响因素和应用情况等方面进行综述, 并在此基础上对两相系统在毒性 HOPs 微生物加速降解脱毒中所存在的主要问题及其应用前景进行讨论和展望。

关键词: 两相系统(两相分配生物反应器), 微生物降解, 富集培养, 疏水性有机污染物

Research progress on the application of two-phase systems to enrich highly efficient bacteria for hydrophobic organic pollutants degradation

YU Zhi-Qiang^{1,2,3,4} CHEN Xing-Juan^{2,3,4} ZHAO Gang^{2,3,4} XU Mei-Ying^{2,3,4*}

(1. College of Bioscience and Bioengineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China)

(2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou, Guangdong 510070, China)

(3. Guangdong Open Laboratory of Applied Microbiology, Guangzhou, Guangdong 510070, China)

(4. State Key Laboratory of Applied Microbiology, Southern China (The Ministry-Province Joint Development), Guangzhou, Guangdong 510070, China)

Abstract: With the increasing concentration of the hydrophobic organic pollutants (HOPs) in the environment, it is important to obtain the highly efficient HOPs-degrading bacteria. In recent years, the

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51422803, 21207019); Pearl River S&T Nova Program of Guangzhou (No. 2014J2200076); Guangdong Provincial Programs for Science and Technology Development (No. 2013B091500081)

*Corresponding author: Tel/Fax: 86-20-87683656; E-mail: xumy@gdim.cn

Received: August 03, 2015; **Accepted:** October 21, 2015; **Published online** (www.cnki.net): November 10, 2015

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51422803, 21207019); 广州市珠江科技新星专项(No. 2014J2200076); 广东省科技计划项目(No. 2013B091500081)

*通讯作者: Tel/Fax: 86-20-87683656; E-mail: xumy@gdim.cn

收稿日期: 2015-08-03; **接受日期:** 2015-10-21; **优先数字出版日期**(www.cnki.net): 2015-11-10

researches on improving HOPs microbial degradation using two-phase system have made some progresses. In this paper, the structure characteristics of two-phase systems, their enrichment principles for HOPs-degrading microorganisms, and main influencing factors, as well as their applications were reviewed. Additionally, the main challenges and new perspectives on accelerating the biodegradation and detoxification of toxic HOPs using the two-phase system were discussed.

Keywords: Two-phase system (Two-phase partitioning bioreactor), Microbial degradation, Enrichment culture, Hydrophobic organic pollutants

社会工业化的持续快速发展,一方面促进了国民经济水平提高,另一方面使环境中出现了大量有机污染物,其中大部分为难降解疏水性有机污染物(Hydrophobic organic pollutants, HOPs)。由于这些HOPs大部分具有高生物蓄积毒性和生物难降解性,不仅影响生态环境安全,而且还威胁人类健康。目前,环境中比较常见的HOPs主要包括多环芳烃(PAHs)、二噁英(PCDD/Fs)、多氯联苯(PCBs)、多溴联苯醚(PBDEs)及有机氮、磷农药等^[1-3]。如何实现这类污染物的高效降解脱毒是当前环保科技工作者共同关注的焦点。

目前有关HOPs的治理方法包括物理法、化学法和生物法,例如光催化法^[4-6]、电化学法^[7-8]、生物处理法^[9-11]等。其中,微生物处理法由于具有处理成本低、产生二次污染少、能实现污染物的彻底降解矿化等多种优点而备受关注^[12]。高效降解菌的富集培养是决定微生物处理法处理效果的关键。两相系统(Two-phase system, TPS),也叫两相分配生物反应器(Two-phase partitioning bioreactor, TPPB),是Collins等在1996年首次利用基于有机污染物在水相(Aqueous phase, AP)、有机相(Organic phase, OP)之间的热力学平衡原理构建的用于降解苯酚的生物反应器^[13]。近年来,越来越多的研究发现TPS能够有效富集HOPs高效降解菌,促进环境中HOPs的降解脱毒^[14-17]。然而,TPS作为一种新型的生物反应器,其过程机理研究和实际工程应用等方面仍有待深入开展。本文重点针对TPS的结构及其富集培养HOPs降解性功能微生物的研究和应用进展进行概述,并对其存在的主要问题及应用前景进行讨论。

1 TPS的结构特点及其富集培养高效降解菌的工作原理

1.1 TPS概述

TPS由非水相(Non-aqueous phase, NAP)、AP、HOPs和微生物等四元体系组成。HOPs在NAP、AP中的分配比例不同,降解菌主要生活在AP中,由于降解菌的降解代谢降低了AP中HOPs的浓度,使HOPs通过自由扩散进入AP而被降解菌进一步利用,从而被逐步实现彻底降解。随着对NAP、AP组成和HOPs生物降解特点的深入研究,目前TPS已经发展为“液-液”两相系统(Aqueous two-phase system, ATPS)和“固-液”两相系统(Solid-liquid two-phase system, STPS)两大类。近年来,由非离子表面活性剂水溶液组成的疏水性凝聚层相和亲水性水相构建的浊点系统(Cloud point system, CPS)^[18]作为一种新型的ATPS在强化HOPs微生物效率方面也取得很好的进展。

1.2 TPS的构建及其特点

TPS的构建首先取决于NAP和AP的组成确定。其中,NAP通过是根据不同的HOPs特性选择具有良好生物相容性、成本比较低廉、容易获得、与AP不混溶、便于分离和回收、不能被微生物降解且不会引起微生物群落排斥(无毒)的物质^[19]。目前已成功应用于TPS的NAP包括小分子有机溶剂、粘弹性低聚物液体(硅油、聚丙二醇等)和固体共聚物珠粒等^[20-22]。AP则通常是HOPs高效降解菌生长的营养需求所确定的液体培养基,将NAP和AP按适宜比例加入到反应体系中,使两者通过热力学平衡达到稳定,从而构建了TPS。由于NAP的存在,TPS中AP相HOPs的浓度处于高效降解菌的最佳生长代谢水

平, 此时再通过提供TPS中微生物适宜的生长条件如pH、温度、反应时间和转速等^[14-15], 可逐步实现HOPs在TPS中的彻底降解。

ATPS中HOPs在AP和有机萃取相之间的分配特点是由两者之间热力学平衡作用控制的。通过调节两相比例从而控制系统内AP中适合降解菌正常生长代谢的HOPs浓度。该系统常用的有机萃取溶剂有硅油、十六烷、1-癸醇、癸二酸二乙酯和2-十一烷酮等。由于有机萃取相中HOPs浓度较高, 从而使一些耐受高浓度HOPs的降解菌(菌群)在其中富集, 因此能够在有机萃取相中获得功能性和疏水性较强的降解菌。CPS作为一种ATPS, 可满足生物相容性、HOPs增溶和两相扩散传质等前提要求^[18]。

STPS中的疏水性聚合物材料可以设计成不同的形状和大小, 进而得到不同的分配比, 使吸附于聚合物材料表面的HOPs缓慢进入AP中, 从而逐步被微生物降解。疏水性高分子聚合物材料, 如热塑聚酯弹性体嵌段共聚物(Hytrel)、聚苯乙烯丁二烯共聚物和聚乙烯醋酸乙烯酯粒(EVA)等, 已被广泛用于STPS中以降解单或多环芳香烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)和酚化合物等芳香族化合物^[23]。相对于有机萃取溶剂, 疏水性聚合物材料一方面具有完全生物相容性和生物无效性^[24], 能够避免有机溶剂生物降解而导致ATPS的性能降低; 另一方面高分子聚合物材料成本较低、方便使用且易于分离回收^[25-26]; 此外, 还对微生物有较高的吸附能力且在系统中不易产生泡沫。正是疏水性聚合物材料的这些优势使得STPS在环境微生物菌种选育方面具有良好的发展空间。

1.3 ATPS的结构及其富集降解菌的工作原理

ATPS由有机萃取相、AP、HOPs及高效降解菌等四元体系组成, ATPS的结构及工作原理如图1所示。由于有机萃取相对HOPs具有较高的亲和性, 使HOPs在有机萃取相中大量富集, 并缓慢释放到含降解功能微生物细胞的AP中, 显著降低AP中HOPs污

染物浓度和生物毒性, 从而保证了微生物降解功能的顺利发挥^[21]。这种动态过程是通过AP和有机萃取相之间的相对亲和力所形成的热力学平衡, 以及对微生物生长代谢进行调节^[27-28]。HOPs在有机萃取相的溶解度比AP高, 会从AP吸收到有机萃取相中, 从而导致AP中少量HOPs被降解菌利用。随着有机萃取相的缓释作用, 有机萃取相中HOPs的浓度逐渐降低, 甚至彻底被降解。由于HOPs从有机萃取相进入AP是一个缓释过程, HOPs降解菌通常会聚集在有机萃取相和AP的分界面处, 某些疏水性较强的降解菌甚至还能进入有机萃取相中, 从而达到富集HOPs高效降解菌的目的。

1.4 STPS 的结构及其富集降解菌的工作原理

与 ATPS 类似, STPS 也是由高分子聚合物材料、AP、HOPs 及高效降解菌等四元体系组成, 其结构及工作原理如图 2 所示。由于高分子聚合物材料对 HOPs 具有较高的亲和性, 大多数 HOPs 高分子聚合物材料中, 而使 AP 中的浓度显著降低, 从而避免对降解菌功能活性的抑制作用。随着 AP 中 HOPs 的降解转化, 高分子聚合物材料中的 HOPs 通过扩散作用缓慢释放到 AP 中, 从而使 HOPs 高效降解菌聚集在疏水性聚合物材料表面, 达到富集 HOPs 高效降解菌的目的。

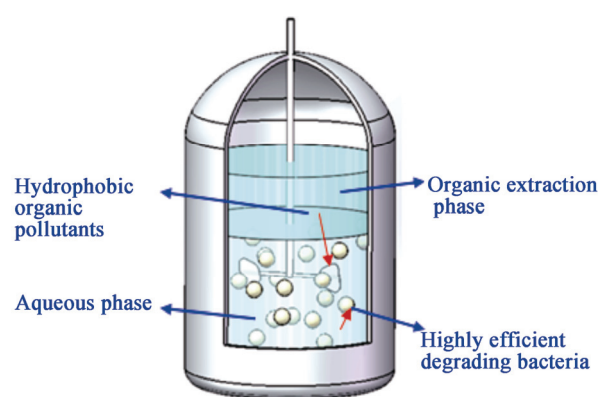


图1 ATPS 的结构及工作原理示意图^[13]

Figure 1 Structures and working principle schematic diagram of ATPS^[13]

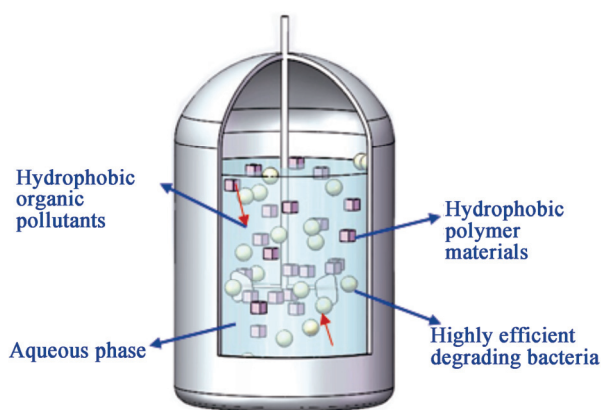


图2 STPS的结构及工作原理示意图^[13]

Figure 2 Structures and working principle schematic diagram of STPS^[13]

2 影响TPS富集培养高效降解菌的因素

2.1 HOPs及其降解产物的毒性

HOPs对高效降解菌的毒性主要是因为其降解中间产物在降解菌细胞膜中积累而影响细胞膜结构和功能,降解菌降解HOPs与HOPs对降解菌毒性之间的相互关系与相关降解酶在微生物细胞中的位置有关^[29]。当HOPs的浓度过高时将抑制降解菌的生长、代谢活性,甚至杀死降解菌。Tomei等^[30]研究发现在单相系统(Single-phase system, SPS)中当剧毒污染物2,4-双氯酚达到130 mg/L时,降解菌会被完全抑制而不能降解2,4-双氯酚。因此,选择合理的NAP并控制好两相比比例,提供降解菌生长和活性发挥的最佳条件,才能达到理想的富集效果。

2.2 NAP的特性

ATPS中选择的NAP应当是与HOPs极性相近、有利于HOPs在两相之间分配,且对降解菌的功能活性影响最小有机溶剂。HOPs在不同的有机溶剂中传质速率不同,而传质速率的高低会影响降解菌对HOPs的降解效率,从而影响高效降解菌在系统中的富集效果。

选择疏水性高分子聚合物材料作为STPS中的NAP时,不但需要考虑其极性、氢键作用力、电位、聚合物结晶度、表面基团、溶解度参数和玻璃化转

变温度(T_g)等因素^[12,31],而且还需要考虑其形状和大小^[32]。Hagesteijn和Daugulis的研究结果表明^[33],在TPS中添加少量(3%–10%)对苯酚具有高亲和性(分配系数达到39)的Hytrel 8206,可显著减小苯酚对微生物活性的抑制作用,从而使处理效率提高100%。此外,针对降解菌特性对聚合物材料表面基团进行调整改造,也可显著提高对目的菌株的富集效率。我们团队在CPS的研究也发现^[34],非离子表面活性剂的浓度将影响微生物对三苯基甲烷染料的脱色速率,以及稀相(非浊点相)中目标污染物的残余量。选择低毒性的稀相不但有利于促进功能菌株对目标污染物的降解作用,而且可以避免CPS对环境的污染。

2.3 运行参数

TPS内影响降解菌富集的运行参数主要有AP中的溶氧量(DO)、能量、HOPs的量、pH、转速、反应时间、温度等。温度和pH主要是通过影响微生物降解HOPs的相关酶活性而影响高效降解菌的富集效率;提高转速可以增加系统中溶氧量和降解菌与HOPs的接触面积,利于微生物的增殖,提高HOPs的降解效率;一些高效降解菌代谢HOPs的功能需要一些生长因子的参与,如Shimao等^[35]得到能降解聚乙烯醇(PVA)的共生细菌*Pseudomonas* sp. VM15C和*Pseudomonas putida* VM15A,其中前者提供生长因子吡咯并喹啉酮(PQQ)后者才能降解PVA,并且PQQ还影响菌株VM15A的生长率和细胞量。TPS的反应时间与系统内HOPs的量有关,反应时间过长,HOPs将被过分利用而无法给微生物提供选择压力而使目的降解菌扩散到系统中其他位置而不利于分离筛选。

3 已构建TPS富集培养高效降解菌的典型应用实例

与传统生物反应器相比,TPS对HOPs的降解时间相对较短、效率较高,且可以同时处理多种有机污染物。目前TPS的应用范围比较广泛,在水体、土壤和气体中HOPs高效降解菌的富集和污染治理等方面均表现出巨大的应用潜力^[36-39]。

3.1 ATPS 富集培养高效降解菌的典型应用实例

ATPS 富集 HOPs 高效降解菌方面已得到广泛应用。Ascon-Cabrera 和 Lebeault 最早利用有机溶剂和水构建的 ATPS 筛选到人造杀虫剂降解菌^[40]。他们发现, 经过一周的驯化培养后, 含有 6 种氯苯混合底物的 ATPS 中可以观察到微生物生长的现象。驯化 30 d 后, ATPS 中微生物比生长率从 0.070 h^{-1} 增加到 0.081 h^{-1} , 而在 SPS 的对照组中则未能观察到微生物的生长。MacLeod 等^[16]利用 *Mycobacterium* 降解 NAP 中的双(乙基己基)癸二酸酯(BES), 发现具有高疏水性的 *Mycobacterium* PYR-1 专一地集中在两相分界面上, 达到富集培养的目的。Bunge 等^[17]将 200 mmol/L 的 1,2,3-三氯苯加到十六烷(作为有机萃取相)中富集二恶英脱氯菌, 结果发现系统中 1,2,3,4-四氯-对-二恶英脱氯菌增加了 4 个数量级, 最终占全部细胞总数的 11%。Zhang 等^[41]利用硅油-水两相系统研究非降解菌(*Sphingobium* sp. PHE3 和 *Micrococcus* sp. PHE9)产生胞外多聚物强化 PAHs 的传质过程中, 发现这两种菌主要集中在油水分界面处。本研究团队在开展染料的微生物强化治理技术时发现^[34], CPS 对三苯基甲烷染料脱色菌 *Aeromonas hydrophila* DN322p 具有较高的生物相容性, 可有效降低染料对微生物细胞的毒性。经过 16 h 的培养, CPS 中的细胞生物量明显高于对照组。刘芳等^[42]利用水-硅油双相体系驯化筛选降解 PAHs 的优势菌株, 获得一株能够高效降解蒽、菲、芘、荧蒽的菌株 *Sphingobium yanoikuyae* LD29。

3.2 STPS 富集培养高效降解菌的典型应用实例

与 ATPS 相比, STPS 在环境中毒害性治理方面更具优越性, 相关的研究及应用也较多, 但在高效降解菌种选育方面的研究相对较少。Prpich 等^[43]利用聚合物微球作为 NAP 构建的 STPS, 成功地定向富集到降解酚类混合物(苯酚、邻甲酚、4-氯酚)的微生物菌群。Villemur 等^[23]在利用 Hytrel 8206 作为 NAP 构建 STPS 降解内分泌干扰素的研究过程中成功富集到一种归属于 *Sphingomonadales* 的内分泌干

扰素降解菌。Prpich 等^[44]也采用 STPS 从苯酚降解菌群(包括 *Acinetobacter baumannii*、*Acinetobacter johnsonii*、*Pseudomonas alcaligenes* 和 *Pseudomonas putida* 等 4 种菌)中定向选育到苯酚高效降解菌 *Pseudomonas putida* ATCC 11172。

4 结语及展望

TPS 可以通过 NAP 的引入, 使大部分有机污染物相对集中到 NAP 中, 从而减少 AP 中污染物浓度, 降低其对微生物的毒性, 为微生物营造一个有利的生长环境, 实现在有效富集目标降解菌的同时促进污染物的降解转化, 进而推动环境中 HOPs 微生物治理技术的发展。近年来, 随着新型疏水性高分子聚合物材料的应用与发展, STPS 逐渐被应用于高效降解菌的富集和环境污染治理中。

尽管 TPS 在 HOPs 降解菌富集培养和污染治理中的应用发展迅速, 但由于 TPS 涉及微生物学、生物化学、环境工程等多个学科, 为了进一步推进 TPS 在高效降解功能微生物富集及环境污染治理中的应用, 加速环境毒害性污染治理进程, 需要充分发挥相关领域科技工作者的学科优势, 重点解决以下几方面的科学和技术问题: (1) TPS 所富集的 HOPs 高效降解功能微生物通常是以菌群组成代谢网络的形式共同发挥作用, 但目前对于 TPS 中微生物的降解脱毒代谢网络特点仍不了解, 这在很大程度上限制了 TPS 结构和功能的改进; (2) 虽然以疏水性高分子聚合物材料为 NAP 所构建的 TPS 相对于以有机溶剂为 NAP 的成本低且易于分离回收, 但 HOPs 在以疏水性高分子聚合物材料为基质的体系中传质速率相对较慢, 疏水性高分子聚合物材料表面所富集的降解菌数量也较少。因此, 亟需深入研究和设计新型聚合物材料以利于高效降解功能微生物的富集培养; (3) 针对环境中新发现的具有高毒性、结构稳定性和低生物可利用性的 HOPs, 迫切需要结合这些新型污染物的理化特性研发和改进 TPS 的结构和组成, 加快环境中这些新型毒害性污染物的降解转化。

参考文献

- [1] Haritash AK, Kaushik CP. Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169(1/3): 1-15
- [2] Wang YF, Wu Y, Pi N, et al. Investigation of microbial community structure in constructed mangrove microcosms receiving wastewater-borne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs)[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 187: 136-144
- [3] Liu GR, Lv P, Jiang XX, et al. Identification and preliminary evaluation of polychlorinated naphthalene emissions from hot dip galvanizing plants[J]. *Chemosphere*, 2015, 118: 112-116
- [4] Ying YL, Song T, Huang HW, et al. Nanoporous ZnO nanostructures for photocatalytic degradation of organic pollutants[J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2013, 110(2): 351-359
- [5] Canle LM, Fernández MI, Martínez C, et al. (Re) Greening photochemistry: using light for degrading persistent organic pollutants[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2012, 11(3): 213-221
- [6] Sánchez-Martín J, Beltrán-Heredia J, Domínguez JR. Advanced photochemical degradation of emerging pollutants: methylparaben[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2013, 224: 1483
- [7] de Vidales MJM, Sáez C, Pérez JF, et al. Irradiation-assisted electrochemical processes for the removal of persistent organic pollutants from wastewater[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2015, 45(7): 799-808
- [8] Yu XM, Zhou MH, Hu YS, et al. Recent updates on electrochemical degradation of bio-refractory organic pollutants using BDD anode: a mini review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(14): 8417-8431
- [9] Kang JW. Removing environmental organic pollutants with bioremediation and phytoremediation[J]. *Biotechnology Letters*, 2014, 36(6): 1129-1139
- [10] Benner J, de Smet D, Ho A, et al. Exploring methane-oxidizing communities for the co-metabolic degradation of organic micropollutants[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, 99(8): 3609-3618
- [11] Castillo-Carvajal LC, Sanz-Martín JL, Barragán-Huerta BE. Biodegradation of organic pollutants in saline wastewater by halophilic microorganisms: a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(16): 9578-9588
- [12] Tomei MC, Daugulis AJ. Ex situ bioremediation of contaminated soils: an overview of conventional and innovative technologies[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2013, 43(20): 2107-2139
- [13] Collins LD, Daugulis AJ. Use of a two phase partitioning bioreactor for the biodegradation of phenol[J]. *Biotechnology Techniques*, 1996, 10(9): 643-648
- [14] Lafortune I, Juteau P, Déziel E, et al. Bacterial diversity of a consortium degrading high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons in a two-liquid phase biosystem[J]. *Microbial Ecology*, 2009, 57(3): 455-468
- [15] Wang XY, Cui YJ, Chen X, et al. Mandelic acid chiral separation utilizing a two-phase partitioning bioreactor built by polysulfone microspheres and immobilized enzymes[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2014, 38(3): 429-435
- [16] MacLeod CT, Daugulis AJ. Interfacial effects in a two-phase partitioning bioreactor: degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by a hydrophobic *Mycobacterium*[J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40(5): 1799-1805
- [17] Bunge M, Wagner A, Fischer M, et al. Enrichment of a dioxin-dehalogenating *Dehalococcoides* species in two-liquid phase cultures[J]. *Environmental Microbiology*, 2008, 10(10): 2670-2683
- [18] Pan T, Wang ZL, Xu J H, et al. Extractive fermentation in cloud point system for lipase production by *Serratia marcescens* ECU1010[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 85(6): 1789-1796
- [19] Karimi A, Golbabaee F, Neghab M, et al. Biodegradation of high concentrations of benzene vapors in a two phase partition stirred tank bioreactor[J]. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2013, 10(1): 10
- [20] Tomei MC, Annesini MC, Rita S, et al. Two-phase partitioning bioreactors operating with polymers applied to the removal of substituted phenols[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(19): 7254-7259
- [21] Poleo EE, Daugulis AJ. A comparison of three first principles methods for predicting solute-polymer affinity, and the simultaneous biodegradation of phenol and butyl acetate in a two-phase partitioning bioreactor[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2014, 89(1): 88-96
- [22] Bacon SL, Parent JS, Daugulis AJ. A framework to predict and experimentally evaluate polymer-solute thermodynamic affinity for two-phase partitioning bioreactor (TPPB) applications[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2014, 89(7): 948-956
- [23] Villemur R, dos Santos SCC, Ouellette J, et al. Biodegradation of endocrine disruptors in solid-liquid two-phase partitioning systems by enrichment cultures[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, 79(15): 4701-4711
- [24] Daugulis AJ, Tomei MC, Guieysse B. Overcoming substrate inhibition during biological treatment of monoaromatics: recent advances in bioprocess design[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, 90(5): 1589-1608
- [25] Tomei MC, Annesini MC, Daugulis AJ. Solid-liquid two-phase partitioning bioreactors (TPPBs) operated with waste polymers. Case study: 2,4-dichlorophenol biodegradation with used automobile tires as the partitioning phase[J]. *Biotechnology Letters*, 2012, 34(11): 2037-2042
- [26] Ordaz A, Quijano G, Thalasso F, et al. Pulse respirometry in two-phase partitioning bioreactors: case study of terephthalic acid biodegradation[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2013, 169(3): 810-820
- [27] Ouellette J, dos Santos SCC, Lépine F, et al. High absorption of endocrine disruptors by Hytrel: towards the development of a two-phase partitioning bioreactor[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2013, 88(1): 119-125
- [28] Tomei MC, Annesini MC, Rita S, et al. Biodegradation of 4-nitrophenol in a two-phase sequencing batch reactor: concept demonstration, kinetics and modelling[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, 80(6): 1105-1112
- [29] Heipieper HJ, Diefenbach R, Keweloh H. Conversion of cis unsaturated fatty acids to trans, a possible mechanism for the protection of phenol-degrading *Pseudomonas putida* P8 from substrate toxicity[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1992, 58(6): 1847-1852
- [30] Tomei MC, Annesini MC, Daugulis AJ. 2,4-Dichlorophenol removal in a solid-liquid two phase partitioning bioreactor (TPPB): kinetics of absorption, desorption and biodegradation[J]. *New Biotechnology*, 2012, 30(1): 44-50
- [31] Parent JS, Capela M, Dafoe JT, et al. A first principles approach to identifying polymers for use in two-phase partitioning bioreactors[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2012, 87(8): 1059-1065
- [32] Prpich GP, Daugulis AJ. A novel solid-liquid two-phase partitioning bioreactor for the enhanced bioproduction of 3-methylcatechol[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2007, 98(5): 1008-1016
- [33] Hagesteijn KFL, Daugulis AJ. Passive aggressive detoxification of continuous flow biotreatment systems using absorptive polymers: partitioning bioreactors treating transient phenol loadings[J]. *Biotechnology Letters*, 2012, 34(10): 1817-1824
- [34] Pan T, Ren SZ, Xu MY, et al. Extractive biodecolorization of triphenylmethane dyes in cloud point system by *Aeromonas*

- hydrophila* DN322p[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(13): 6051-6055
- [35] Shimao M, Ninomiya K, Kuno O, et al. Existence of a novel enzyme, pyrroloquinoline quinone-dependent polyvinyl alcohol dehydrogenase, in a bacterial symbiont, *Pseudomonas* sp. strain VM15C[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1986, 51(2): 268-275
- [36] Volckaert D, Wuytens S, van Langenhove H. Two phase partitioning membrane bioreactor: a novel biotechnique for the removal of dimethyl sulphide, n-hexane and toluene from waste air[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 256: 160-168
- [37] Béchohra I, Couvert A, Amrane A. Biodegradation of toluene in a two-phase partitioning bioreactor-impact of activated sludge acclimation[J]. Environmental Technology, 2014, 35(6): 735-740
- [38] Fam H, Daugulis AJ. Substrate mass transport in two-phase partitioning bioreactors employing liquid and solid non-aqueous phases[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2012, 35(8): 1367-1374
- [39] Darracq G, Couvert A, Couriol C, et al. Removal of hydrophobic volatile organic compounds in an integrated process coupling absorption and biodegradation-selection of an organic liquid phase[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, 223(8): 4969-4997
- [40] Ascon-Cabrera M, Lebeault JM. Selection of xenobiotic-degrading microorganisms in a biphasic aqueous-organic system[J]. Applied and Environment Microbiology, 1993, 59(6): 1717-1724
- [41] Zhang YP, Wang F, Yang XL, et al. Extracellular polymeric substances enhanced mass transfer of polycyclic aromatic hydrocarbons in the two-liquid-phase system for biodegradation[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 90(3): 1063-1071
- [42] Liu F, Liang JS, Li J. The screening and characterization of PAHs-degrading strains by water-silicone oil system[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(8): 1887-1892 (in Chinese)
刘芳, 梁金松, 李季. 水-硅油双相体系对多环芳烃降解菌的筛选及鉴定[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1887-1892
- [43] Prpich GP, Daugulis AJ. Biodegradation of a phenolic mixture in a solid-liquid two-phase partitioning bioreactor[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, 72(3): 607-615
- [44] Prpich GP, Daugulis AJ. Polymer development for enhanced delivery of phenol in a solid-liquid two-phase partitioning bioreactor[J]. Biotechnology Progress, 2004, 20(6): 1725-1732

征订启事

欢迎订阅《微生物学通报》

《微生物学通报》创刊于 1974 年, 月刊, 是中国科学院微生物研究所和中国微生物学会主办, 国内外公开发行, 以微生物学应用基础研究及技术创新与应用为主的综合性学术期刊。刊登内容包括: 基础微生物学研究, 农业微生物学研究, 工业微生物学研究, 医学微生物学研究, 食品微生物学研究, 环境微生物学研究, 微生物功能基因组研究, 微生物蛋白组学研究, 微生物模式菌株研究, 微生物工程与药物研究, 微生物技术成果产业化及微生物教学研究改革等。

本刊为中文核心期刊。曾获国家优秀科技期刊三等奖, 中国科学院优秀科技期刊三等奖, 北京优秀科技期刊奖, 被选入新闻出版总署设立的“中国期刊方阵”并被列为“双效”期刊。

据中国科学技术信息研究所信息统计, 本刊 2012、2013、2014 年以国内“微生物、病毒学类期刊”综合评价总分第一名而连续获得“百种中国杰出学术期刊奖”, 并入选 300 种“中国精品科技期刊”, 成为“中国精品科技期刊顶尖学术论文(F5000)”项目来源期刊。2014 年获得中国科学院科技期刊三等出版基金资助; 2015 年获得中国科协精品科技期刊工程项目资助。

欢迎广大读者到邮局订阅或直接与本刊编辑部联系购买, 2016 年每册定价 58 元, 全年 696 元, 我们将免邮费寄刊。

邮购地址: (100101) 北京朝阳区北辰西路 1 号院 3 号中国科学院微生物研究所《微生物学通报》编辑部

Tel: 010-64807511; E-mail: bjb@im.ac.cn, tongbao@im.ac.cn

网址: <http://journals.im.ac.cn/wwxtbcn>

国内邮发代号: 2-817; 国外发行代号: M413

Tel: 010-64807511; E-mail: tongbao@im.ac.cn; <http://journals.im.ac.cn/wwxtbcn>