

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势	杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)
交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测	郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)
基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素	张江艳 (1888)
基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例	李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)
高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例	曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)
北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素	俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)
碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据	吴雪萍 (1926)
中国城市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 时空分布特征和影响因素分析	李江苏, 段良苏, 张天娇 (1938)
2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM _{2.5} 和O ₃ 时空变化特征及影响因素	陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)
疫情管控期西安PM _{2.5} 和O ₃ 污染特征及成因分析	原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)
苏南五市秋冬季PM _{2.5} 化学组成特征和空间差异	冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)
湖北咸宁细颗粒物PM _{2.5} 来源	罗怡, 朱宽广, 陈璞琰, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)
邢台氨减排对京津冀PM _{2.5} 改善的溢出效益	边泽君, 闻超玉, 郎建奎, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)
聊城市冬季PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析	张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)
高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征	郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)
北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响	王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海林, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)
高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析	雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)
水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险	葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)
黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险	王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤峰 (2054)
藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素	李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)
西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源	张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)
基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程	孟令华 (2096)
丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素	张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)
金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素	王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)
德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价	刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)
典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征	许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)
抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析	王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)
过氧化钙/海泡石海藻酸钠凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能	曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲予, 李大鹏, 黄勇 (2160)
矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应	刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张勇 (2171)
生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展	孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)
微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制	练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠华, 陈波 (2195)
紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制	马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)
土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应	郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)
鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度	喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)
典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系	刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琮, 周瑞娟, 李霖 (2233)
污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响	郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)
宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能	胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)
大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制	郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)
基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演	叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)
秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响	叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林权 (2292)
长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响	王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)
土壤盐分变化对N ₂ O排放影响:基于Meta分析	黄艺华, 余冬立, 史祺琦, 胡磊, 潘永春 (2313)
基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测	郑慧玲, 郑辉峰 (2321)
基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟	张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)
防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系	徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)
长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力	赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)
冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响	鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)
辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应	周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)
高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征	张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)
生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响	柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)
太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征	马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)
基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法	张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 邹允兵 (2417)
基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)
西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估	张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)
重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析	廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)
金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)
赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果	刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)
施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响	张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展

孙漱玉¹, 黄梦鑫¹, 孔强^{1,2}, 张焕新^{1,2}, 刘继伟^{1,2*}

(1. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250358; 2. 山东师范大学东营研究院, 东营 250300)

摘要: 随着工业和农业的快速发展, 环境污染日益严重, 对生态安全 and 人体健康形成严重威胁. 微生物修复是一种低价、绿色和易操作的技术, 但微生物对高浓度污染物耐性低, 造成修复效果差和周期长. 由于生物炭的孔隙率高、官能团丰富和比表面积大, 被认为是一种良好的吸附剂和固定化载体. 通过微生物固定化技术将菌群定植于生物炭上而制备生物炭固定化菌复合材料, 结合了二者优势又克服菌群的缺点, 展现了巨大的应用前景. 通过系统论述生物炭固定化菌复合材料的制备方法和特征, 评价生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的效能, 讨论环境因素对生物炭固定化菌复合材料去除水中污染物和修复污染土壤的效果影响, 阐明生物炭固定化菌复合材料对废水处理与土壤修复的作用机制.

关键词: 菌群; 生物炭; 微生物固定化技术; 去除效果; 修复机制

中图分类号: X52; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2185-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305016

Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation

SUN Shu-yu¹, HUANG Meng-xin¹, KONG Qiang^{1,2}, ZHANG Huan-xin^{1,2}, LIU Ji-wei^{1,2*}

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China; 2. Dongying Institute, Shandong Normal University, Dongying 250300, China)

Abstract: With the rapid development of industry and agriculture, environmental pollution has become increasingly serious, threatening ecological security and human health. Microbial remediation is a cheap, green, and easy-operation technology, but the tolerance of microorganisms to high concentrations of pollutants is low, resulting in low remediation efficacy and a long cycle. Biochar is a good adsorbent and immobilized carrier because of its high porosity, abundant functional groups, and large surface area. Biochar-immobilized bacteria composites were prepared by immobilizing bacteria on biochar, which combined their advantages and overcame the disadvantages of the bacteria, displaying a huge application prospect. In this study, the preparation methods and characteristics of biochar-immobilized bacteria composites were reviewed, their effectiveness in environmental remediation was evaluated, the effects of environmental factors on the removal of pollutants in water and the remediation of contaminated soil were discussed, and their mechanism for wastewater treatment and soil remediation was clarified.

Key words: bacteria; biochar; microbial immobilization technology; removal efficiency; remediation mechanism

随着我国经济的快速发展, 工、矿、农业等行业产生的废水和废渣不合理处置导致水和土壤环境污染问题日益严重^[1,2]. 针对重金属、有机污染物和营养盐污染, 微生物可以通过新陈代谢以及吸附、迁移、转化等活动降解或去除此类污染物. 微生物修复技术具有环境友好型、成本低和效果好的优点^[3]. 然而, 加入到环境中的游离微生物易受到温度、氧气和水等因素以及土著微生物竞争的影响, 导致游离微生物在实际环境中的存活能力以及活性有所降低, 致使其修复效果不佳^[4].

微生物固定化是解决上述问题的技术之一, 通过化学或物理方法将游离微生物固定在载体材料上, 从而提高微生物的活性^[5,6]. 微生物固定化技术的关键要素是固定化方法和载体的选择. 根据载体与微生物之间的作用力和结合形式的不同, 固定化方法主要有吸附法、包埋法、交联法、共价结合法和复合固定法^[7]. 按照固定化载体特性和组成不同, 载体材料可分为无机载体、有机高分子载体和复合

载体等^[8]. 近几年来, 生物炭被认为是一种固定微生物的优良载体.

生物炭具有大比表面积、丰富官能团和多孔结构, 可用于微生物的固定化载体^[9]. 大比表面积和多孔结构的生物炭可以富集微生物, 为微生物提供栖息地, 提高微生物的活性^[10]. 生物炭多孔结构和丰富的官能团的吸附作用, 固定微生物的同时吸附污染物, 使得污染物与微生物的接触几率增加, 从而促进微生物对污染物的降解^[11]. 另外, 生物炭中的有机质、氮、磷和钾等可为微生物生长繁殖提供所需营养物质. 生物炭表面的活性官能团对重金属的还原和有机物的氧化降解方面也表现出巨大的潜力^[12]. 所以, 生物炭不仅是理想的固定微生物的载

收稿日期: 2023-05-03; 修订日期: 2023-07-08

基金项目: 山东省高等学校青年创新团队发展计划项目 (2021KJ015)

作者简介: 孙漱玉 (1999 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生物炭固定化微生物在环境修复中的应用, E-mail: 17861508297@163.com

* 通信作者, E-mail: liujiwei_zyw@163.com

体,而且是一种优良的修复剂。

本文将总结生物炭固定化菌复合材料的制备方法、表征技术及其在环境修复中的应用,以期在今后其在废水处理与污染土壤修复中的应用提供一定参考。

1 生物炭固定化菌复合材料的制备

1.1 生物炭的制备

生物炭是生物炭固定化菌复合材料的主要构成之一,其制备条件(热解温度、热解时间和氮气条件等)与原材料(秸秆、木屑和污泥等)会对生物炭的特性(比表面积、孔隙结构、官能团和稳定性等)产生影响,进而影响菌群的固定化量。Liu等^[13]利用不同热解温度(200、300、400、500和600℃)下制备的生物炭固定化石油烃降解菌,其对石油烃的降解率分别为43.04%、72.79%、80.54%、83.95%和85.81%;600℃下获得的生物炭作为载体,对石油烃的降解率最大。因此,生物炭作为菌群载体,其制备条件和原材料需考虑。

1.2 菌群的优选

菌群也是生物炭固定化菌复合材料的主要组成之一,参与污染物的修复,显著影响生物炭固定化菌复合材料对污染物的降解效果。针对目标污染物,筛选和驯化特异菌群,将其定殖于生物炭上,将会极大提高生物炭固定化菌复合材料对污染物的降解效率。针对地下水环境中石油烃 $C_{10} \sim C_{40}$ 成分,沈若非等^[14]筛选出了两株高效降解石油烃的菌株(赖氨酸芽孢杆菌属和杆菌属),将其固定化于生物炭上制备复合材料,对石油烃的降解率可达70.51%。因此,特异菌群的筛选和驯化对制备高效生物炭固定化菌复合材料尤为重要。

1.3 固定化方法

微生物固定化方法将直接影响固定到载体上的微生物量及间接影响对污染环境的修复效果。目前,主要采用吸附法、包埋法和吸附-包埋复合法制备生物炭固定化菌复合材料^[15]。

吸附法是依靠微生物和生物炭表面的作用力(氢键、范德华力和电荷作用力等)而吸附结合在一起。首先通过热解生物质制备生物炭,然后生物炭与菌液按照一定的比例混合,吸附固定化一定时间,最后离心而得到生物炭固定化菌复合材料(图1)。陈壮^[16]将改性芦苇生物炭置于接入2%铬耐性菌的液体培养基中,在30℃下吸附固定18h,然后离心、过滤和洗涤后获得改性生物炭固定化铬耐性菌复合材料。吸附法操作简单、环保经济和传质性能好,但稳定性差且细胞容易解吸而泄漏。

包埋法是利用聚乙烯醇和海藻酸盐等高分子聚合物等将微生物和生物炭包裹在凝胶网状结构中而形成黑色微珠(图1)。Teng等^[17]利用纳米零价铁/生物炭复合材料作载体,与溶磷菌液同时添加到海藻酸钠/聚乙烯醇溶液中,之后将上述混合溶液滴入 $CaCl_2$ 溶液中而获得了生物炭负载纳米零价铁复合材料固定化溶磷菌微珠。包埋法是一种不可逆、低成本和易操作的方法,既能减少微生物在固定化过程中的泄漏,又能使微生物不受外界因素影响而能保持高活性。但是,固定微生物量过高时,影响微生物的物质交换,降低传质效率。

复合固定化法是通过不同固定化方法联合负载微生物到载体上的过程。目前,最常用的复合固定法为吸附-包埋法:首先将生物炭与菌群充分混合,菌群被吸附到生物炭后,再将其加入到聚乙烯醇/海藻酸盐进行包埋固定化(图1)。杨雅茜^[18]以制备的矿物-生物炭为固定化载体,首先将其与筛选的耐铬菌混合进行吸附固定化,离心取出后将其加入到海藻酸钠溶液中,最后将上述混合液滴到 $CaCl_2$ 溶液中,即可获得生物炭固定化菌微珠。根据不同的污染情况,选择不同的固定化方法结合,使其优势互补,可得到性能优异和廉价易得的固定化微生物复合材料。

2 生物炭固定化菌复合材料的表征

为更好地了解生物炭固定化菌复合材料的理化特性以及去除污染物的机制,对其进行表征分析具有重要意义。常用表征技术有:扫描电镜(SEM)、比表面积分析测试仪(BET)、傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)、X射线衍射仪(XRD)和磁共振仪(NMR)等。

2.1 SEM分析

SEM可以观察生物炭固定化菌复合材料表面形貌和微观结构。Wang等^[19]利用SEM观察铜绿假单胞菌、铁改性生物炭以及铁改性生物炭固定化菌微球。通过SEM观察到铜绿假单胞菌长度约为2 μm ,呈杆状且有鞭毛;固定化的菌群在铁改性生物炭表面繁殖良好,这是因为优选的铁改性生物炭表面的官能团和粗糙结构为菌群生长提供了良好的生存环境;微球表面存在大量孔隙,为污染物的传质和降解创造了有利条件;图中显示菌群在球体内繁殖良好,表明铜绿假单胞菌与铁改性生物炭复合成功。

2.2 FTIR分析

FTIR可用来鉴别生物炭固定化菌复合材料表面官能团的种类及分析官能团的变化。Huang等^[20]采用FTIR分析了生物炭固定化蜡芽孢杆菌复合材料吸

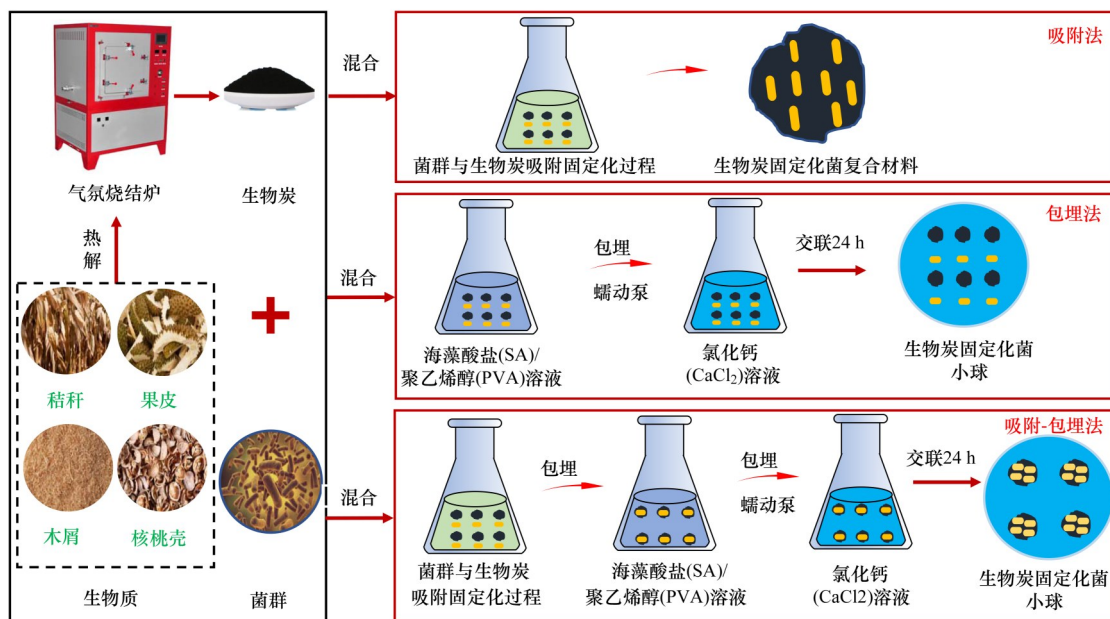


图1 吸附法、包埋法和吸附-包埋法制备生物炭固定化菌复合材料的流程

Fig. 1 Schematic diagram of biochar-immobilized bacteria composites prepared using the adsorption method and embedding method and combining the adsorption and embedding method

附镉前后其表面官能团的变化. FTIR 光谱分析表明: $3\ 400\text{ cm}^{-1}$ 来自 —OH 的伸缩振动, 吸附镉后谱峰发生显著的变化; $1\ 253$ 、 $1\ 313$ 和 $2\ 927\text{ cm}^{-1}$ 代表 —CH 官能团的伸缩振动, 894 cm^{-1} 和 823 cm^{-1} 处的谱峰归因于呋喃的 $\gamma\text{—CH}$ 和吡啶的 β 环, 吸附镉后谱峰显著强度增加或消失; $1\ 632$ 、 $1\ 082\text{ (C=O)}$ 和 $1\ 434\text{ cm}^{-1}\text{ (C=C)}$ 在吸收镉后也发生了明显的改变; 吸附镉后, —CN 吸附峰由 $2\ 140\text{ cm}^{-1}$ 处转变为 $2\ 700\text{ cm}^{-1}$, 表明镉与 π 电子发生了配位. FTIR 光谱分析证明 —OH 、 —CH 、 C=O 、 C=C 和 —CN 的络合作用在镉的吸附过程中起着重要作用.

2.3 BET 分析

BET 可以测定生物炭固定化菌复合材料的孔径大小、比表面积以及分析孔径分布. 任静等^[21] 采用 BET 来测定杉木、秸秆、稻壳和竹炭生物炭的孔容和比表面积, 以此来优选固定化多环芳烃高效降解菌的载体. BET 分析表明: 稻壳生物炭的总孔孔容 ($0.032\text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$) 和比表面积 ($51.34\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$) 最大, 选择稻壳生物炭作为固定化载体. 生物炭的大孔隙有利于体积小且生长快的菌群进入生物炭繁殖, 大比表面积可以提供更多的空间供菌群附着, 为其繁殖提供栖息地, 定殖菌群的效果更好.

2.4 XRD 分析

XRD 可以表征生物炭固定化菌复合材料的晶体结构. Yin 等^[22] 通过吸附法和包埋法获得了稻壳生物炭固定化菌 (CFI-RHB) 和稻壳生物炭固定化菌珠粒 (CFI-RHB/SA) 并采用 XRD 表征其结晶结构. XRD 图

谱表明: RHB 与 CFI-RHB 在 $22.1^\circ \sim 22.4^\circ$ 处的 2θ 衍射峰, 与标准石墨碳相对应; 海藻酸钠为半晶体结构, CFI-RHB/SA 珠粒显示为无定形结构, 可能是因为真菌以无定形状态存在于珠粒中而导致其晶体状态发生变化, 另外原因是凝胶化过程使海藻酸盐的空间结构发生了改变.

2.5 NMR 分析

NMR 可以测定生物炭的芳香性和质子化或非质子化碳的含量, 从而预测生物炭的稳定性^[23]. Chen 等^[24] 利用 NMR 分析了大豆秸秆、木屑和小球藻生物炭的芳香性, 其图谱分析表明, 生物炭由烷基碳、芳香碳和羰基碳构成, 其光谱都以 130 ppm 为中心的芳香族峰为主; 生物炭芳香化程度随热解温度升高呈上升趋势, 但超过一定温度, 生物炭的芳香化程度有所下降. 生物炭的芳香化程度越高, 其稳定性越强, 反之亦然. 生物炭的稳定性对生物炭固定化菌复合材料在环境中的寿命至关重要.

3 生物炭固定化菌复合材料在废水处理中的应用

生物炭固定化菌复合材料因具备生物炭的吸附、还原作用又兼具微生物降解污染物的能力而备受关注, 可应用于水中氨氮、磷、重金属和有机污染物的去除与降解.

3.1 生物炭固定化菌复合材料对废水中污染物的去除性能

生物炭固定化菌复合材料已在重金属、有机

物、氨氮和磷等污染废水的处理中得到广泛应用。An等^[25]通过吸附法制备了花生壳生物炭固定化假单胞菌复合材料应用于电镀废水的处理,其研究发现,复合材料对Cu(Ⅱ)、Zn(Ⅱ)、氨氮、Ni(Ⅱ)和Cr(VI)的去除率分别为94.92%、91.46%、79.90%、

77.02%和34.40%;与生物炭相比,其去除率提高了64.12%、79.32%、73.84%、24.80%和75.49%;与菌株相比,其去除率提高了36.74%、7.98%、12.86%、17.2%和20.23%。邹宇等^[26]以花生壳生物炭为载体,通过包埋法将耐镉细菌定殖在生物炭上而制备固定

表1 生物炭固定化菌复合材料对水中污染物的去除性能

Table 1 Removal performance of biochar-immobilized bacteria composites for pollutants in water

复合材料	生物炭类型	微生物	固定化方法	污染物	处理条件 ¹⁾	去除率或去除量	文献
生物炭负载纳米零价铁材料固定化溶磷菌微珠	稻壳生物炭	非脱羧鞘克菌	包埋法	Pb(Ⅱ)	pH=5、 <i>t</i> =24 h、 <i>c</i> ₀ =200 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =5 g·L ⁻¹ 和 <i>T</i> =30 ℃	93%	[17]
生物炭固定化活蜡样芽孢杆菌RC-1	稻壳、鸡粪和污泥生物炭	活蜡样芽孢杆菌	包埋法	Cd(Ⅱ)	pH=7、 <i>t</i> =30 h、 <i>c</i> ₀ =100 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =5 g·L ⁻¹ 和 <i>T</i> =30 ℃	158.77 mg·g ⁻¹	[20]
花生壳生物炭固定化假单胞菌L1	花生壳生物炭	假单胞菌	吸附法	Cu(Ⅱ)、Zn(Ⅱ)、NH ₄ ⁺ -N、Ni(Ⅱ)和Cr(VI)	pH=7、 <i>t</i> =120 h、 <i>c</i> ₀ 为1.016、1.708、4.021和4.597 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =1 g·L ⁻¹ 和 <i>T</i> =30 ℃	94.92%、91.46%、79.90%、77.02%和34.40%	[25]
生物炭负载微生物	花生壳生物炭	耐Cd菌群	包埋法	Cd(Ⅱ)	pH=6、 <i>t</i> =7 h、 <i>c</i> ₀ =100 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =3 g·L ⁻¹ 和 <i>T</i> =30 ℃	96%	[26]
生物炭基硫酸盐还原菌	稻草、小麦和玉米秸秆生物炭	硫酸盐还原菌	吸附法	Cr(VI)	pH=5、 <i>t</i> =8 h、 <i>c</i> ₀ =100 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =0.6 g·L ⁻¹ 和 <i>T</i> =30 ℃	286.54 mg·g ⁻¹	[29]
生物炭固定化紫链霉菌SBP1	桉树叶生物炭	紫链霉菌	吸附法	Mn(Ⅱ)	pH=7、 <i>t</i> =72 h、 <i>c</i> ₀ =5 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =2 g·L ⁻¹ 和 <i>T</i> =30 ℃	74.8%或1.15 mg·g ⁻¹	[30]
生物炭固定化硫酸盐还原菌	稻草、小麦和玉米秸秆生物炭	硫酸盐还原菌	吸附法	Cd(Ⅱ)	pH=8、 <i>t</i> =8 h、 <i>c</i> ₀ =40 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =0.6 g·L ⁻¹ 和 <i>T</i> =30 ℃	77.93 mg·g ⁻¹	[31]
玉米秸秆生物炭-细菌复合体	玉米秸秆生物炭	代尔夫特菌	吸附法	Cd(Ⅱ)和As(V)	pH=5、 <i>t</i> =8 h、 <i>c</i> ₀ =100 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =0.6 g·L ⁻¹ 和 <i>T</i> =30 ℃	75.38 mg·g ⁻¹ 和34.03 mg·g ⁻¹	[32]
Triton X-100-生物炭固定化铜绿假单胞菌	稻秆生物炭	铜绿假单胞菌	吸附法	苡	pH为4.5~10.5、 <i>t</i> =72 h、 <i>c</i> ₀ 为0~300 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =1 g和 <i>T</i> 为0~30 ℃	76%~78%	[27]
生物炭固定化菌	加拿大一枝黄花茎生物炭	肠杆菌菌株	吸附法	吡啶	pH=7、 <i>t</i> =36 h、 <i>c</i> ₀ =200 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =2 g·L ⁻¹ 和 <i>T</i> =28 ℃	91.7%	[33]
中药渣生物炭固定化蜡样芽孢杆菌LZ01	中药渣生物炭	蜡样芽孢杆菌	吸附法	氯四环素	pH=7.84、 <i>t</i> =36h、 <i>c</i> ₀ =73.75 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =0.51(质量分数)和 <i>T</i> =33.98 ℃	83.83%	[34]
海藻酸钠-生物炭固定化菌群GYB1	玉米秸秆生物炭	多氯联苯降解菌	包埋法	五氯联苯	pH=8、 <i>t</i> =5 d、 <i>c</i> ₀ =1 mg·L ⁻¹ 、 <i>T</i> =35 ℃和 <i>D</i> (SA)+ <i>D</i> (GYB1)+ <i>D</i> (BC)=2%+2%+1.5%	50.50%	[35]
生物炭固定化生物表面活性剂生产细菌LQ2	玉米秸秆生物炭	弧菌	吸附法	柴油	<i>t</i> =7 d、 <i>c</i> ₀ =1% (体积比)、 <i>D</i> =0.1 g和 <i>T</i> =30 ℃	94.7%	[36]
生物炭固定化荧光假单胞菌MC46	桉树枝生物炭	荧光假单胞菌	吸附法	三氯二苯脲	pH=7、 <i>t</i> =36 h、 <i>c</i> ₀ =10 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =1 g和 <i>T</i> =30 ℃	83%	[37]
中药渣生物炭固定化蜡样芽孢杆菌	中药渣生物炭	蜡样芽孢杆菌	吸附法	氯四环素	pH=7、 <i>t</i> =48 h、 <i>c</i> ₀ =50 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =1 g·L ⁻¹ 和 <i>T</i> =30 ℃	(85.42 ± 0.82)%	[38]
磁性漂生物炭凝胶珠固定化微生物联合体	浒苔生物炭	复合降解菌	包埋法	芘、苯并芘和茚并[1,2,3-cd]芘	pH=8、 <i>t</i> =20d、 <i>c</i> ₀ 为20、10和10 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =5 mL和 <i>T</i> =30 ℃	89.8%、66.9%和78.2%	[39]
生物炭基异养硝化细菌	稻壳生物炭	异养硝化细菌	吸附法	NH ₄ ⁺ -N	<i>t</i> =48 h、 <i>c</i> ₀ =100 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =1 g·L ⁻¹ 和 <i>T</i> =30 ℃	90.93%	[28]
生物炭固定化鞘氨单胞菌	玉米秸秆生物炭	鞘氨单胞菌	吸附法	NH ₄ ⁺ -N、NO ₃ ⁻ -N、NO ₃ ⁻ -N和TP	pH=7、 <i>t</i> =120 h、 <i>c</i> ₀ =270 mg·L ⁻¹ 、N+130 mg·L ⁻¹ P、 <i>D</i> =4 g·L ⁻¹ 和 <i>T</i> =25 ℃	63%、38%、25%和35%	[40]
生物炭/粘土复合颗粒固定化苍白杆菌	芦苇秸秆生物炭	苍白杆菌	包埋法	NH ₄ ⁺ -N	pH=7、 <i>t</i> =168 h、 <i>c</i> ₀ =50 mg·L ⁻¹ 、 <i>D</i> =1 g·L ⁻¹ 和 <i>T</i> =25 ℃	79.39%	[41]

1) *t*:反应时间; *T*:反应温度; *D*:复合材料投加量; *c*₀:污染物初始浓度

化生物炭小球(IBP)用于吸附水中 Cd^{2+} . 当 Cd^{2+} 初始浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、IBP投加量为 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH为6、温度为 30°C 和吸附平衡时间为7 h条件下, IBP对 Cd^{2+} 吸附率为96%; 灭活与未灭活的IBP对 Cd^{2+} 吸附率分别为95%和98%, 证明微生物在 Cd^{2+} 的吸附中发挥着作用. Lu等^[27]通过吸附法制备了表面活性剂-生物炭固定化铜绿假单胞菌(TFBIP)复合材料应用于水中茺的去除, 其研究表明, 24 h处理后, TFBIP对水中茺的去除率可达76%~78%. Wang等^[28]采用吸附法获得了生物炭基固定异养硝化细菌并研究其对水中氨氮的去除效果, 其研究发现, NaOH和NaOH+Mg(II)修饰的稻壳生物炭固定化异养硝化细菌对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效率分别为88.66%和90.93%, 异养硝化细菌以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为氮源, 硝化生成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$; 二者对P的吸附量分别为 $773.75 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $941.17 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$. 表1显示了以前研究报告的生物炭固定化菌复合材料对水中污染物的去除性能.

3.2 实验参数对生物炭固定化菌复合材料去除水中污染物的影响

实验参数会影响生物炭固定化菌复合材料表面电荷以及微生物的生长繁殖, 选择最优的实验参数将会增强其去除水中污染物的效果. 污染物初始浓度影响生物炭的活性位点以及微生物的活性; 溶液pH影响生物炭表面电荷和活性位点、微生物的生长和活性以及污染物的化学形态; 温度影响生物炭的孔隙大小和微生物的活性; 投加量影响复合材料的活性位点等. 朱晓丽等^[29]探究了溶液pH对秸秆生物炭固定化硫还原菌去除水中 Cr(VI) 的影响. Cr(VI) 的去除随着pH的增加而先增加后减小; 当 $\text{pH}=5$ 时, Cr(VI) 去除率达到最大值; 当 $\text{pH}<7$ 时, OH^- 与阴离子 Cr(VI) 竞争吸附位点能力弱; 当 $\text{pH}>7$ 时, OH^- 与阴离子 Cr(VI) 竞争吸附位点能力强, 导致 Cr(VI) 去除率下降; 同时, 硫还原菌的生长繁殖受到碱性环境的抑制也会致使 Cr(VI) 去除率下降. 王梓婷^[42]探讨了生物炭固定化希瓦氏菌的添加量对水中 Cr(VI) 去除的影响. Cr(VI) 去除率随着添加量的增加而增加, 当添加量为 $4 \text{ 颗} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时, Cr(VI) 去除率最高(90.41%); 当添加量从 $1.2 \text{ 颗} \cdot \text{mL}^{-1}$ 增加至 $2 \text{ 颗} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时, Cr(VI) 的去除率增加了43.77%; 当添加量从 $2 \text{ 颗} \cdot \text{mL}^{-1}$ 增加至 $4 \text{ 颗} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时, 去除率仅增加了10.47%. 这是由于添加量低于 $2 \text{ 颗} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时, Cr(VI) 浓度高, 复合材料能够发挥最大的吸附和还原作用; 当添加量大于 $2 \text{ 颗} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时, 复合材料过量, Cr(VI) 去除率接近平衡, 导致 Cr(VI) 去除率增加不明显. Nie等^[33]研究了吡啶初始

浓度、溶液pH和反应温度对生物炭固定化吡啶降解混合菌去除水中吡啶的影响, 其研究发现, 当吡啶初始浓度从 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 固定化菌对吡啶的去除呈下降趋势但保持高的效率, 主要因为高浓度吡啶对降解菌的毒害作用, 但是生物炭为降解菌提供了稳定环境使固定化菌对吡啶的去除保持高的效率; 当 $\text{pH}=7$ 时, 固定化菌对吡啶的去除率最大; 当 pH 大于7或小于7时, 酸性或碱性破坏了降解菌的酶分子结构, 导致降解菌降解吡啶的能力下降. 随着温度从 15°C 升高到 30°C 时, 固定化菌对吡啶的去除率增加, 这与温度升高而降解菌细胞的代谢加快有关; 高于 30°C 时, 吡啶的去除率呈下降趋势, 这是因为过高温度使降解菌细胞内的酶失活而导致降解菌代谢能力降低. Sun等^[41]以生物炭/黏土复合颗粒为载体, 将苍白杆菌固定到复合颗粒上, 考察温度对氨氮去除的影响. 当温度从 15°C 升高到 30°C 时, 固定化菌对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率逐渐增加; 当温度为 35°C , $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率急剧下降. 温度过低, 影响细胞的酶促反应, 限制细菌的生长; 温度过高, 致使细胞内蛋白质失活, 降低细菌活性.

综上所述, 相比于游离菌+生物炭组合, 生物炭固定化菌复合材料在去除水中污染物的性能方面有明显的提高. 通过微生物固定化技术将生物炭与菌群相结合构成的生物炭固定化菌复合材料, 在废水处理中展现出巨大的应用潜力. 同时, 水环境较为复杂, 优化环境因素对生物炭固定化菌复合材料去除水中污染物的影响是必要的.

4 生物炭固定化菌复合材料在污染土壤修复中的应用

生物炭固定化菌复合材料作为一种用于固定土壤中重金属和有机污染物的修复剂, 可以有效降低土壤中重金属和有机污染物的毒性、生物利用性和迁移性而受到关注^[43].

4.1 生物炭固定化菌复合材料对土壤中污染物的修复性能

生物炭固定化菌复合材料对修复土壤污染物的研究起步较晚, 且主要集中于实验室规模, 在实际场地中的应用研究较少. 朱晓丽等^[44]制备了小麦秸秆生物炭固定化硫酸盐还原菌应用于Cd污染土壤的修复, 结果表明, 生物炭(XM700)、硫酸盐还原菌(SRB)和生物炭固定化硫酸盐还原菌(IBXM700)对 Cd^{2+} 的钝化效果分别为: $\text{IBXM700} > \text{SRB} > \text{XM700}$; 与IBXM700和SRB相比, IBXM700显著降低可交换态的Cd和提高残渣态的Cd. Ji等^[45]利用玉米秸秆

生物炭为载体固定化磷酸盐溶菌应用于土壤中 Pb^{2+} 的钝化, 研究发现, 其固化率可达 70%, 与磷酸盐溶菌相比约提高了 1.5 倍, 与生物炭相比约提高了 3 倍. Chen 等^[46]通过吸附法将铬还原菌固定到浒苔生物炭协同修复铬污染土壤, 其研究发现, 与生物炭和铬还原菌相比, 生物炭固定化菌对铬的还原率(94.22%)提高了约 11% ~ 23%. 顾玲峰^[47]开展了生物炭固定化芽孢杆菌对 Cr(VI) -苾污染土壤的修复. 结果表明, 修复 28 d, 对土壤中苾和 Cr(VI) 的去除率分别为 82.32% 和 55.64%. Qi 等^[48]将镉、铀耐性混合菌负载到生物炭应用于镉-铀污染土壤的修复, 结果表明: 75 d 后, 3% 复合材料的施用使得 DTPA 可提取态的镉和铀分别降低了 69% 和 56%. 张秀霞等^[49]研究了污泥生物炭固定化菌修复石油污染土壤, 其研究发现, 90 d 的修复, 污泥生物炭固定化菌组对总石油烃降解率为 58.80%, 比污泥生物炭、添加污泥生物炭+游离降解菌对总石油烃降解率提高了 33.73% 和 13.66%. Xiong 等^[50]开展了稻壳生物炭固定化菌修复多环芳烃污染土壤的研究, 结果显示, 生物炭、游离菌和生物炭固定化菌对荧蒽的去除率分别为 0、0 和 52.1%, 对菲的去除率分别为 0、47.3% 和 62.6%, 对苾的去除率分别为 13.5%、19.7% 和 62.1%, 固定化菌对荧蒽、菲和苾的降解率提高了 52.1%、15.3% 和 42.5%. Liu 等^[51]采用壳聚糖改性生物炭固定化复合菌剂应用于石油污染土壤的修复. 经过 60 d 的油污染土壤修复, 壳聚糖改性生物炭固定化菌对原油的去除率为 45.82%, 比天然修复高了 21.26%. 表 2 总结了生物炭固定化菌复合材料修复污染土壤的案例.

4.2 环境因素对生物炭固定化菌复合材料修复污染土壤的影响

土壤 pH、温度、湿度、污染物初始浓度和材料施用量等会对生物炭固定化菌复合材料修复污染土壤的效果产生影响, 不仅影响微生物的生长代谢, 而且影响生物炭的吸附作用. 牟珍珍^[60]利用生物炭固定化镉耐性菌修复镉污染土壤并开展了修复时间、土壤 pH 和材料施用量等对修复镉污染土壤的影响研究, 结果证明, 生物炭固定化菌对镉的去除随着 pH 的升高而先增高后降低, 最佳 pH 为 7; 随着修复时间, 生物炭固定化菌对镉去除逐渐升高; 随着施用量的增加, 镉去除率先上升后趋于稳定. 姜庆宏等^[61]研究了土壤湿度对玉米秸秆生物炭固定化铬还原菌修复 Cr(VI) 污染土壤的影响, 结果表明, 当土壤湿度为 14% 时, Cr(VI) 去除最大; 当土壤湿度为 23% 时, Cr(VI)

去除最小; 这是因为土壤含水率过低, 抑制微生物的代谢生长, 影响 Cr(VI) 的去除; 含水量过高, 限制微生物的好氧呼吸, 降低了 Cr(VI) 的去除. Yin 等^[22]研究了柴油初始含量对稻壳生物炭和海藻酸钠固定化复合真菌修复柴油污染土壤的影响. 随着柴油初始含量从 $5\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加到 $20\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 游离的复合真菌和固定化的复合真菌对柴油降解率呈下降趋势, 这是因为高浓度柴油对微生物的毒害作用以及土壤成团导致细胞窒息死亡, 致使柴油的去除率下降. 相比游离复合真菌, 固定化的复合真菌对柴油降解率下降趋势缓慢, 这与生物炭和海藻酸盐为微生物提供了必需的营养物质和稳定的环境有关.

4.3 生物炭固定化菌复合材料对植物生长和土壤理化性质的影响

生物炭固定化菌复合材料对污染土壤修复的同时还会影响土壤酶活性、pH、微生物活性、营养元素、有机质、阳离子交换量和植物生长等的影响(图 2). Song 等^[53]利用生物炭固定化芽孢杆菌(PBM4)修复多环芳烃和重金属污染土壤, 结果发现, PBM4 处理可有效提高猪毛蒿生物量, 降低多环芳烃和重金属在其内的积累, 明显提高了能去除多环芳烃和重金属的微生物丰度. Zhang 等^[54]研究了磷酸球磨生物炭固定化耐镉溶磷菌的应用对植物生长和镉形态变化的影响, 结果表明, 复合材料的施用显著提高了小白菜生物量和磷含量, 降低了镉在小白菜叶和根的积累量, 降低了 25.90% ~ 43.46%. Wang 等^[55]发现磁性生物炭固定化微生物复合材料的应用明显提高了土壤的 pH、降低了可利用 Cd 和提高了微生物数量(700%). 胡松柏^[62]探究了铁改性生物炭负载节杆菌(bFeMBC)降解阿特拉津过程中对土壤微生物群落的影响, 结果发现: bFeMBC 施用有效去除污染物的同时增加了土壤微生物的多样性和丰度. 李瑞等^[63]开展了生物炭负载微生物对镉-石油烃污染土壤修复的研究并探讨了其对土壤微生物、酶活性和 pH 的影响, 结果表明, 固定化微生物组的土壤 pH 轻微下降, 显著提高了土壤多酚氧化酶活性、过氧化氢酶活性、脱氢酶活性和微生物数量.

综上所述, 生物炭固定化菌复合材料克服了游离菌生长缓慢和对土壤变化敏感等缺点, 富集污染物的同时保持菌群的高活性, 对污染土壤具有良好的修复作用, 有效改良土壤环境, 促进植物生长. 因此, 生物炭固定化菌复合材料是一种低成本和高效的污染土壤的修复剂, 可用于污染场地的大规模修复.

表 2 生物炭固定化微生物复合材料对污染土壤的修复性能
Table 2 Remediation performance of biochar-immobilized bacteria composites for contaminated soil

复合材料	生物炭	微生物	固定化方法	污染物	修复条件 ¹⁾	修复效果	文献
生物炭固定化蜡样芽孢杆菌 WHX-1	浒苔生物炭	蜡样芽孢杆菌	吸附法	Cr(VI)	$t=28\text{ d}$ 、 $D=20\text{ g}$ 、 $c_0=50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $T=28\text{ }^{\circ}\text{C}$	94.22%的Cr(VI)转为Cr(III)	[46]
混合细菌负载的生物炭	玉米秸秆生物炭	枯草芽孢杆菌、蜡样芽孢杆菌和柠檬酸杆菌	吸附-包埋法	U 和 Cd	$\text{pH}=6.9$ 、 $t=75\text{ d}$ 、 $D=3\%$ 、 c_0 为 $28.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	U 和 Cd 的固化率分别 69 %和 56 %	[48]
生物炭固定化菌	菠萝皮生物炭	芽孢杆菌 W1、W2 和 Y2	吸附-包埋法	芘和 Cr(VI)	$t=28\text{ d}$ 、 $D=2.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 c_0 为 $42.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $6.95\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$	芘和 Cr(VI)浓度从 $42.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $6.95\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 减为 $7.48\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.58\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	[52]
生物炭固定化芽孢杆菌 KSB7	花生壳生物炭	芽孢杆菌	吸附法	多环芳香烃、Zn(II)、Pb(II)、Cr(VI)和 Cu(II)	$t=90\text{ d}$ 、 $D=200\text{ mL}$ (悬浮液)、 c_0 为 50.3 、 241 、 217 、 106 和 $94\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $T=28\text{ }^{\circ}\text{C}$	去除率 94.17%、58.46%、53.42%、84.94% 和 83.15%	[53]
磷酸球磨改性生物炭固定化抗镉溶磷菌(MPBC)	玉米秸秆生物炭	抗镉溶磷菌	吸附法	Cd(II)	$t=30\text{ d}$ 、 $D=1\%$ (质量比)、 $c_0=43.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $T=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$	降低土壤中 20.12% Cd 含量和叶片中 25.90% Cd 积累量	[54]
磁性生物炭-微生物复合材料	稻壳生物炭	芽孢杆菌 K1	包埋法	Cd(II)	$t=30\text{ d}$ 、 $D=1\%$ (质量比)、 $c_0=43.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $T=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$	提高了土壤的 pH、降低了可利用 Cd 和提高了微生物的数量	[55]
茶叶生物炭固定化雷尔氏菌	茶叶废料生物炭	雷尔氏菌	吸附法	Cr(VI)和 Cd(II)	$\text{pH}=4.96$ 、 $t=30\text{ d}$ 、 $D=40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 c_0 为 $16.93\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 M 为 60%~80%	促进了菌群生长、改变无机氮形态、增加 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 供应、降低 Cd 和 Cr 生物有效性和降低植物组织 Cd 和 Cr 含量	[56]
生物炭固定化混合菌	玉米秸秆生物炭	猪粪肠杆菌 G3、烟粉肠杆菌 I12 和水痘克雷伯菌 J2	吸附-包埋法	Pb(II) 和 Cd(II)	$t=45\text{ d}$ 、 $D=3\%$ 、 c_0 为 $492\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $M=70\%$	DTPA 可提取 Cd 和 Pb 含量降低了 22.05%~55.84% 和 31.64%~48.13%、小白菜茎部 Cd 和 Pb 降低了 28.68%~51.01% 和 24.18%~52.87%	[57]
生物炭固定化黄分枝杆菌	稻壳生物炭	分枝杆菌	吸附法	菲、蒽蒽和芘	$t=18\text{ d}$ 、 $D=0.25\text{ g}$ 、 $c_0=677\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$	去除率分别为 $(62.6\pm3.2)\%$ 、 $(52.1\pm2.3)\%$ 和 $(62.1\pm0.9)\%$	[50]
壳聚糖-生物炭固定化微生物	甘蔗渣生物炭	铜绿假单胞菌和地衣芽孢杆菌	吸附法	原油	$\text{pH}=7$ 、 $t=60\text{ d}$ 、 $D=2\text{ g}$ 、 $c_0=8\text{ }000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $M=20\%$	去除率为 45.82%	[51]
生物炭固定化适度嗜盐菌	棉秆生物炭	地中海马特尔氏菌 AD-3	吸附法	菲	$\text{pH}=8.35$ 、 $t=40\text{ d}$ 、 $D=1\%$ 、 $c_0=52.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $M=20\%$	去除率为 91.67%	[58]
生物炭固定化鞘氨单胞菌 PJ2	松针生物炭	鞘氨单胞菌 PJ2	吸附法	PAHs	$\text{pH}=7.59$ 、 $t=60\text{ d}$ 、 $D=50\text{ mL}$ 、 $c_0=1\text{ }939.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $T=28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $M=50\%$	去除率为 58.64%	[59]
生物炭固定化菌微球	铁改性稻壳生物炭	环芳香族碳氢化合物	包埋法	菲	$t=6\text{ d}$ 、 $D=2\text{ g}$ 、 $c_0=41.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $M=60\%$	去除率为 30%	[19]
稻壳生物炭固定化真菌复合材料	稻壳生物炭	柴油降解微生物	吸附-包埋法	柴油	$t=60\text{ d}$ 、 $D=4\%$ (质量比)、 $c_0=10\text{ }000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $M=25\%$	去除率为 64.10%	[22]

1) t : 修复时间; T : 反应温度; D : 复合材料投加量; c_0 : 污染物初始浓度; M : 土壤湿度

5 生物炭固定化菌复合材料对环境 中污染物的去除机制

生物炭固定化菌复合材料对环境 中污染物的去

除机制主要涉及生物炭的吸附、还原以及菌群的生物降解(图 3)^[64]。

生物炭固定化菌复合材料对环境 中重金属、氨氮和磷等无机物的去除机制主要涉及^[65]: ①生物炭的孔

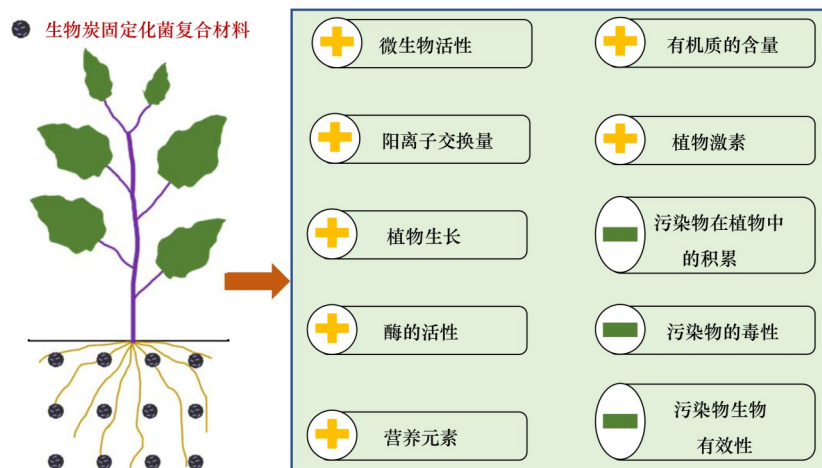


图2 生物炭固定化菌复合材料对植物生长和土壤理化性质的有利影响

Fig. 2 Beneficial effects of biochar-immobilized bacillus on plant growth and physicochemical properties of soil

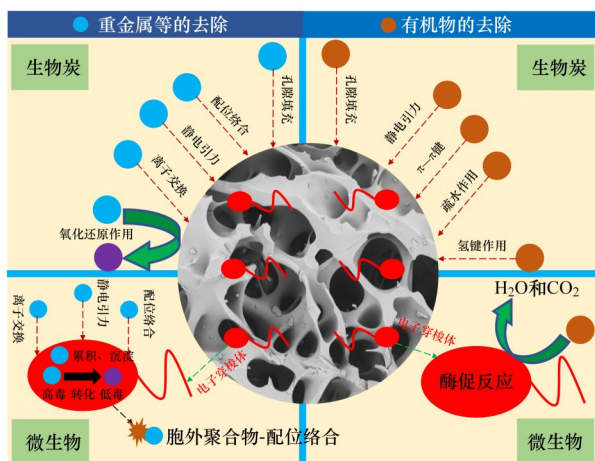


图3 生物炭固定化菌复合材料对环境中污染物的去除机制

Fig. 3 Mechanism of biochar-immobilized bacteria composites for the removal of pollutants in environment

隙填充、静电吸引、离子交换和配位络合等作用来吸附重金属等无机物；②菌群细胞表面官能团的静电吸引、配位络合和离子交换等吸附重金属等无机物；生物炭介导下菌群对重金属的氧化还原转化、胞内积累、沉淀去除以及胞外聚合物的络合固定。

生物炭固定化菌复合材料对环境中有机物的去除机制主要包括^[66]：①生物炭的静电引力、 $\pi-\pi$ 键、疏水作用、氢键和孔隙填充等吸附有机污染物；②生物炭介导下菌群将有机污染物作为自身生长代谢的碳源，通过酶促反应将有机污染物降解为 CO_2 和 H_2O 等。

6 展望

目前，生物炭固定化菌复合材料在环境修复中大规模应用仍存在局限性，许多问题需要进一步研究：

(1)针对固定化方法是微生物固定化技术的核

心，开发新型固定化法或采用联合固定化法是提高微生物固定化量的有效方法之一。

(2)针对复合污染物和新兴污染物污染土壤，为提高生物炭固定化菌复合材料修复复合污染物和新兴污染物污染土壤效果，优选高活性和易培养的混合菌和特异菌是必要的。

(3)研发生物炭的改性技术来增加生物炭官能团数量、改变生物炭表面电荷以及生物炭比表面积，从而提高生物炭对微生物负载量。

7 结论

通过微生物固定化技术制备的生物炭固定化菌复合材料具有生物炭与微生物的双重修复作用，在处理废水及修复污染土壤领域展现出广阔应用前景。本文详细论述了生物炭固定化菌复合材料的制备方法和表征技术；评价了其治理污水和修复污染土壤的效能、影响其修复效果的因素及其应用对植物生长和土壤理化性质的影响；阐明了其修复污染物的机制。以期为生物炭固定化菌复合材料在环境污染治理中的广泛应用提供理论和实践参考。

参考文献：

- [1] Shi J D, Zhao D, Ren F T, *et al.* Spatiotemporal variation of soil heavy metals in China: the pollution status and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **871**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161768.
- [2] Wagner M, Lin K Y A, Oh W D, *et al.* Metal-organic frameworks for pesticidal persistent organic pollutants detection and adsorption—a mini review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **413**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125325.
- [3] Pant P, Pant S. A review: advances in microbial remediation of trichloroethylene (TCE)[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(1): 116-126.
- [4] Jiang Y T, Yang F, Dai M, *et al.* Application of microbial immobilization technology for remediation of Cr(VI) contamination: a review[J]. *Chemosphere*, 2022, **286**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131721.
- [5] 杨宗政, 许文帅, 吴志国, 等. 微生物固定化及其在环境污染治理中的应用研究进展[J]. *微生物学通报*, 2020, **47**(12):

- 4278-4292.
- Yang Z Z, Xu W S, Wu Z G, *et al.* Microbial immobilization in environmental pollution treatment: a review [J]. Microbiology China, 2020, **47**(12): 4278-4292.
- [6] 刘维涛, 李剑涛, 郑泽其, 等. 微生物固定化技术修复石油烃污染土壤[J]. 应用技术学报, 2021, **21**(4): 339-347.
- Liu W T, Li J T, Zheng Z Q, *et al.* Microbial immobilization technology for bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil [J]. Journal of Technology, 2021, **21**(4): 339-347.
- [7] Mehrotra T, Dev S, Banerjee A, *et al.* Use of immobilized bacteria for environmental bioremediation: a review [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, **9**(5), doi: 10.1016/j.jece.2021.105920.
- [8] 金建勇, 孙玉焕. 固定化微生物技术在重金属污染土壤修复中的研究进展[J]. 湖南生态科学学报, 2021, **8**(2): 90-96.
- Jin J Y, Sun Y H. Research progress of immobilized microorganism technology in remediation of heavy metal contaminated soil [J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2021, **8**(2): 90-96.
- [9] Wang Y, Li B L, Li Y, *et al.* Research progress on enhancing the performance of autotrophic nitrogen removal systems using microbial immobilization technology [J]. Science of the Total Environment, 2021, **774**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145136.
- [10] Huang J, Tan X, Ali I, *et al.* More effective application of biochar-based immobilization technology in the environment: understanding the role of biochar [J]. Science of the Total Environment, 2023, **872**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162021.
- [11] Mukherjee S, Sarkar B, Aralappanavar V K, *et al.* Biochar-microorganism interactions for organic pollutant remediation: challenges and perspectives [J]. Environmental Pollution, 2022, **308**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119609.
- [12] Mishra R K, Kumar D J P, Narula A, *et al.* Production and beneficial impact of biochar for environmental application: a review on types of feedstocks, chemical compositions, operating parameters, techno-economic study, and life cycle assessment [J]. Fuel, 2023, **343**, doi: 10.1016/j.fuel.2023.127968.
- [13] Liu F J, Liu H W, Zhu H, *et al.* Remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated groundwater by biochar-based immobilized bacteria [J]. Biochemical Engineering Journal, 2023, **197**, doi: 10.1016/j.bej.2023.108987.
- [14] 沈若非, 肖娟, 涂保华, 等. 生物炭固定化复合菌群修复石油烃污染地下水[J]. 环境化学, 2022, **41**(10): 3435-3446.
- Shen R F, Xiao X, Tu B H, *et al.* Remediation of petroleum hydrocarbon contaminated groundwater by biochar immobilized bacterial consortia [J]. Environmental Chemistry, 2022, **41**(10): 3435-3446.
- [15] 杜兆林, 陈洪安, 姚彦坡, 等. 生物炭固定化微生物修复污染土壤研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2022, **41**(12): 2584-2592.
- Du Z L, Chen H A, Yao Y P, *et al.* Research progress of biochar immobilized microorganism in soil pollution remediation [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, **41**(12): 2584-2592.
- [16] 陈壮. 生物炭固定化微生物复合材料吸附 Cr(VI) 特性及机理研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2021.
- Chen Z. Adsorption characteristics and mechanism of Cr(VI) on biochar immobilized microbial composite [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2021.
- [17] Teng Z D, Shao W, Zhang K Y, *et al.* Enhanced passivation of lead with immobilized phosphate solubilizing bacteria beads loaded with biochar/ nanoscale zero valent iron composite [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **384**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121505.
- [18] 杨雅茜. 矿物-生物炭固定化微生物去除土壤中 Cr(VI) 的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2020.
- Yang Y Q. Study on removal of soil Cr(VI) by mineral-biochar immobilized microorganisms [D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- [19] Wang K, Sun Y, Chen D Y, *et al.* Enhanced remediation of phenanthrene in water and soil by novel biochar-immobilized bacterial microspheres [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, **462**, doi: 10.1016/j.cej.2023.141932.
- [20] Huang F, Li K, Wu R R, *et al.* Insight into the Cd²⁺ biosorption by viable *Bacillus cereus* RC-1 immobilized on different biochars: roles of bacterial cell and biochar matrix [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **272**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122743.
- [21] 任静, 沈佳敏, 张磊, 等. 生物炭固定化多环芳烃高效降解菌剂的制备及稳定性[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(12): 4517-4523.
- Ren J, Shen J M, Zhang L, *et al.* Preparation and stability of biochar for the immobilization of polycyclic aromatic hydrocarbons degrading-bacteria [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(12): 4517-4523.
- [22] Yin C, Yan H, Cao Y C, *et al.* Enhanced bioremediation performance of diesel-contaminated soil by immobilized composite fungi on rice husk biochar [J]. Environmental Research, 2023, **226**, doi: 10.1016/j.envres.2023.115663.
- [23] Leng L J, Huang H J, Li H, *et al.* Biochar stability assessment methods: a review [J]. Science of the Total Environment, 2019, **647**: 210-222.
- [24] Chen J F, Wang P Y, Ding L S, *et al.* The comparison study of multiple biochar stability assessment methods [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2021, **156**, doi: 10.1016/j.jaap.2021.105070.
- [25] An Q, Ran B B, Deng S M, *et al.* Peanut shell biochar immobilized *Pseudomonas hibiscicola* strain L1 to remove electroplating mixed-wastewater [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, **11**(2), doi: 10.1016/j.jece.2023.109411.
- [26] 邹宇, 沙海超, 向茹滢, 等. 生物炭负载微生物处理含镉废水的效能与机理[J]. 工业水处理, 2023, **43**(7): 135-143.
- Zou Y, Sha H C, Xiang R Y, *et al.* Efficacy and mechanism of biochar loaded microorganisms in the treatment of cadmium-containing wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2023, **43**(7): 135-143.
- [27] Lu L, Li A A, Ji X Q, *et al.* Removal of acenaphthene from water by Triton X-100-facilitated biochar-immobilized *Pseudomonas aeruginosa* [J]. RSC Advances, 2018, **8**(41): 23426-23432.
- [28] Wang C X, Ren J, Qiao X, *et al.* Ammonium removal efficiency of biochar-based heterotrophic nitrifying bacteria immobilization body in water solution [J]. Environmental Engineering Research, 2021, **26**(1), doi: 10.4491/eer.2019.451.
- [29] 朱晓丽, 李雪, 寇志健, 等. 生物炭基硫酸盐还原菌(SRB)对 Cr(VI) 的吸附效应及作用机制[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(4): 866-875.
- Zhu X L, Li X, Kou Z J, *et al.* The adsorption effects and mechanisms of biochar immobilized sulfate-reducing bacteria (SRB) on Cr(VI) [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(4): 866-875.
- [30] Youngwilai A, Kidkhunthod P, Jearanaikoon N, *et al.* Simultaneous manganese adsorption and biotransformation by *Streptomyces violaceus* strain SBP1 cell-immobilized biochar [J]. Science of the Total Environment, 2020, **713**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136708.
- [31] 朱晓丽, 寇志健, 王军强, 等. 生物炭固定化硫酸盐还原菌对 Cd²⁺ 吸附及作用机制分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(7): 2682-2690.
- Zhu X L, Kou Z J, Wang J Q, *et al.* Adsorption of Cd²⁺ by sulfate reducing bacteria immobilized biochar [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(7): 2682-2690.
- [32] 刘玉玲, 朱虎成, 彭鸥, 等. 玉米秸秆生物炭固定化细菌对镉砷吸附[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4322-4332.
- Liu Y L, Zhu H C, Peng O, *et al.* Adsorption of cadmium and arsenic by corn stalk biochar solidified microorganism [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4322-4332.
- [33] Nie Z M, Yan B H, Xu Y H, *et al.* Characterization of pyridine biodegradation by two *Enterobacter* sp. strains immobilized on *Solidago canadensis* L. stem derived biochar [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **414**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125577.
- [34] Zhang S N, Wang J H, Wang S H, *et al.* Effective removal of chlortetracycline and treatment of simulated sewage by *Bacillus cereus* LZ01 immobilized on erding medicine residues biochar [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2022, doi: 10.1007/s13399-022-02359-7.
- [35] Ouyang X F, Yin H, Yu X L, *et al.* Enhanced bioremediation of 2, 3', 4, 4', 5-pentachlorodiphenyl by consortium GYB1 immobilized on sodium alginate-biochar [J]. Science of the Total Environment, 2021, **788**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147774.

- [36] Zhou H H, Jiang L J, Li K L, *et al.* Enhanced bioremediation of diesel oil-contaminated seawater by a biochar-immobilized biosurfactant-producing bacteria *Vibrio* sp. LQ2 isolated from cold seep sediment[J]. Science of the Total Environment, 2021, **793**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148529.
- [37] Sonsuphab K, Toomsan W, Supanchaiyamat N, *et al.* Enhanced triclocarban remediation from groundwater using *Pseudomonas fluorescens* strain MC46 immobilized on agro-industrial waste-derived biochar: optimization and kinetic analysis[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, **10** (3), doi: 10.1016/j.jece.2022.107610.
- [38] Zhang S N, Wang J H. Removal of chlortetracycline from water by *Bacillus cereus* immobilized on Chinese medicine residues biochar[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, **24**, doi: 10.1016/j.eti.2021.101930.
- [39] Qiao K L, Tian W J, Bai J, *et al.* Removal of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons by a microbial consortium immobilized in magnetic floating biochar gel beads[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, **159**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111489.
- [40] Shao Y L, Zhong H, Mao X Y, *et al.* Biochar-immobilized *Sphingomonas* sp. and *Acinetobacter* sp. isolates to enhance nutrient removal: potential application in crab aquaculture[J]. Aquaculture Environment Interactions, 2020, **12**: 251-262.
- [41] Sun P F, Huang X, Xing Y X, *et al.* Immobilization of *ochrobactrum* sp. on biochar/clay composite particle: optimization of preparation and performance for nitrogen removal[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, **13**, doi: 10.3389/fmicb.2022.838836.
- [42] 王梓婷. 生物炭固定化 *Shewanella Putrefaciens* CN32 对 Cr(VI) 的去除性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- Wang Z T. Study on Cr(VI) removal performance by *Shewanella Putrefaciens* CN32 immobilized with biochar[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [43] Wu C C, Zhi D, Yao B, *et al.* Immobilization of microbes on biochar for water and soil remediation: a review[J]. Environmental Research, 2022, **212**, doi: 10.1016/j.envres.2022.113226.
- [44] 朱晓丽, 张娟娟, 张星, 等. 生物炭固定化硫酸盐还原菌对铜污染土壤的钝化修复[J]. 环境科学学报, 2023, **43** (5): 421-429.
- Zhu X L, Zhang C J, Zhang X, *et al.* Remediation of Cd²⁺ contaminated soil by biochar immobilized sulfate reducing bacteria[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, **43** (5): 421-429.
- [45] Ji X W, Wan J, Wang X D, *et al.* Mixed bacteria-loaded biochar for the immobilization of arsenic, lead, and cadmium in a polluted soil system: effects and mechanisms[J]. Science of the Total Environment, 2022, **811**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152112.
- [46] Chen Y Y, Wu H X, Sun P, *et al.* Remediation of chromium-contaminated soil based on *Bacillus cereus* WHX-1 immobilized on biochar: Cr(VI) transformation and functional microbial enrichment[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, **12**, doi: 10.3389/fmicb.2021.641913.
- [47] 顾玲峰. 生物炭固定化菌群研制及其修复砷-Cr(VI)复合污染土壤研究[D]. 上海: 上海大学, 2016.
- Gu L F. Preparation of biochar immobilized consortium and its remediation of pyrene and Cr(VI) co-contaminated soils[D]. Shanghai: Shanghai University, 2016.
- [48] Qi X, Gou J L, Chen X M, *et al.* Application of mixed bacteria-loaded biochar to enhance uranium and cadmium immobilization in a co-contaminated soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **401**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123823.
- [49] 张秀霞, 任文海, 丁明山, 等. 污泥生物炭固定化微生物强化石油污染土壤修复[J]. 石油学报(石油加工), 2023, **39** (4): 892-899.
- Zhang X X, Ren W H, Ding M S, *et al.* Enhanced remediation of petroleum contaminated soil by sludge biochar immobilized microorganisms[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2023, **39** (4): 892-899.
- [50] Xiong B J, Zhang Y C, Hou Y W, *et al.* Enhanced biodegradation of PAHs in historically contaminated soil by *M. gilvum* inoculated biochar[J]. Chemosphere, 2017, **182**: 316-324.
- [51] Liu Q Y, Wang Y R, Sun S, *et al.* A novel chitosan-biochar immobilized microorganism strategy to enhance bioremediation of crude oil in soil[J]. Chemosphere, 2023, **313**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.137367.
- [52] Wang C H, Gu L F, Ge S M, *et al.* Remediation potential of immobilized bacterial consortium with biochar as carrier in pyrene-Cr(VI) co-contaminated soil[J]. Environmental Technology, 2019, **40** (18): 2345-2353.
- [53] Song L C, Niu X G, Zhou B, *et al.* Application of biochar-immobilized *Bacillus* sp. KSB7 to enhance the phytoremediation of PAHs and heavy metals in a coking plant[J]. Chemosphere, 2022, **307**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136084.
- [54] Zhang T R, Li T, Zhou Z J, *et al.* Cadmium-resistant phosphate-solubilizing bacteria immobilized on phosphoric acid-ball milling modified biochar enhances soil cadmium passivation and phosphorus bioavailability[J]. Science of the Total Environment, 2023, **877**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162812.
- [55] Wang L, Chen H R, Wu J Z, *et al.* Effects of magnetic biochar-microbe composite on Cd remediation and microbial responses in paddy soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **414**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125494.
- [56] Huang J Q, Ye J, Gao W H, *et al.* Tea biochar-immobilized *Ralstonia Bcul-1* increases nitrate nitrogen content and reduces the bioavailability of cadmium and chromium in a fertilized vegetable soil[J]. Science of the Total Environment, 2023, **866**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.161381.
- [57] Wei T, Li X, Li H, *et al.* The potential effectiveness of mixed bacteria-loaded biochar/activated carbon to remediate Cd, Pb co-contaminated soil and improve the performance of pakchoi plants[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **435**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129006.
- [58] Cui C Z, Shen J M, Zhu Y, *et al.* Bioremediation of phenanthrene in saline-alkali soil by biochar-immobilized moderately halophilic bacteria combined with *Suaeda salsa* L.[J]. Science of the Total Environment, 2023, **880**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163279.
- [59] Song L C, Niu X G, Zhang N W, *et al.* Effect of biochar-immobilized *Sphingomonas* sp. PJ2 on bioremediation of PAHs and bacterial community composition in saline soil[J]. Chemosphere, 2021, **279**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130427.
- [60] 牟珍珍. 生物炭固定化微生物钝化土壤重金属镉效果研究与机理初探[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
- Mu Z Z. Study on the effect and mechanism of biocharcoal immobilized microorganism passivating heavy metal cadmium in soil[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019.
- [61] 姜庆宏, 宋玉艳, 韩剑宏, 等. 生物炭-微生物复合材料修复 Cr(VI) 污染土壤条件优化及促生效果[J]. 环境污染与防治, 2020, **42** (8): 964-970.
- Jiang Q H, Song Y Y, Han J H, *et al.* Conditions optimization of biochar-microbial composites for repairing Cr(VI) contaminated soil and its promoting growth effects[J]. Environmental Pollution & Control, 2020, **42** (8): 964-970.
- [62] 胡松伯. 铁改性生物炭负载杆杆菌 DNS32 强化降解阿特拉津[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- Hu S B. Iron-modified biochar loaded *Acinetobacter lwoffii* DNS32 for enhanced degradation of atrazine[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.
- [63] 李瑞, 王雅璇, 罗廷, 等. 利用生物炭负载微生物修复石油烃-镉复合污染土壤[J]. 环境工程学报, 2021, **15** (2): 677-687.
- Li X, Wang Y X, Luo T, *et al.* Remediation of petroleum hydrocarbon-cadmium co-contaminated soil by biochar loaded microorganisms[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, **15** (2): 677-687.
- [64] Li R, Wang B, Niu A P, *et al.* Application of biochar immobilized microorganisms for pollutants removal from wastewater: a review[J]. Science of the Total Environment, 2022, **837**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155563.
- [65] Schommer V A, Vanin A P, Nazari M T, *et al.* Biochar-immobilized *Bacillus* spp. for heavy metals bioremediation: a review on immobilization techniques, bioremediation mechanisms and effects on soil[J]. Science of the Total Environment, 2023, **881**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163385.
- [66] Wu P, Wang Z Y, Bhatnagar A, *et al.* Microorganisms-carbonaceous materials immobilized complexes: synthesis, adaptability and environmental applications[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **416**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125915.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seeding Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)