

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

长江经济带PM<sub>2.5</sub>空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期

Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM<sub>2.5</sub>质量浓度演变及驱动因子分析 ..... 蔡子颖, 郝团, 韩素芹, 唐颖潇, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨(1129)

天津市PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub>复合污染特征及来源分析 ..... 肖致美, 徐虹, 高璟寰, 蔡子颖, 毕温凯, 李鹏, 杨宁, 邓小文, 戴运峰(1140)

基于随机森林模型的武汉市城区大气PM<sub>2.5</sub>来源解析 ..... 张志豪, 陈楠, 祝波, 陶卉婷, 成海容(1151)

华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析 ..... 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 胡偲豪, 高娜娜, 张崇崇, 岳亮, 王金喜, 樊景森, 牛红亚(1159)

“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征 ..... 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 李金建, 叶秋麟, 吴涛, 肖智丹, 刘子锐, 王跃思, 张小玲, 张军科(1170)

郑州市典型污染过程PM<sub>10</sub>中重金属浓度、来源及健康风险评估 ..... 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝因, 杨洁茹, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(1180)

长江经济带PM<sub>2.5</sub>空间异质性和驱动因素的地理探测 ..... 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦(1190)

长三角地区PM<sub>2.5</sub>浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 ..... 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞, 解雪峰(1201)

“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析 ..... 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 刀谔, 王帅, 陈善荣(1212)

基于小波变换的山西省PM<sub>2.5</sub>污染特征及影响因素 ..... 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 段小琳, 尹浩, 王凯, 邓萌杰(1226)

中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 ..... 赵楠, 卢毅敏(1235)

湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 ..... 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 泽仁央宗, 黄志烟, 杨俊, 赵鹏, 韩静磊, 贾文超, 袁自冰(1246)

山东半岛近地面O<sub>3</sub>浓度时空变化及潜在源区解析 ..... 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐(1256)

COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 ..... 刘新军, 王淑娟, 刘程, 范莉茹, 付翠轻, 齐莹, 宿文康(1268)

淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析 ..... 王帅, 王秀艳, 杨文, 王雨燕, 白瑾丰, 程颖(1277)

淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较 ..... 秦涛, 徐勃, 王信梧, 李丽明, 杨文, 王晓丽, 耿春梅(1286)

四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 ..... 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 王斌, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波(1296)

餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征 ..... 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷(1307)

堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构 ..... 于奥园, 邢礼军, 孙兴滨, 仇天雷, 王旭明, 高敏(1315)

城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路 ..... 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会(1323)

黄河干流水质评价与时空变化分析 ..... 刘彦龙, 郑易安(1332)

典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例 ..... 王超, 叶秋, 贾伯阳, 何文战, 党超军, 黄焱, 杜浪(1346)

三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 ..... 黄伟, 张研, 罗晓佼, 张磊(1356)

派河及其支流溶解性有机质分子组成特征 ..... 詹亚, 尹浩, 冯景伟, 冯艾荣, 胡艳云, 张刘, 郑刘根(1365)

粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素 ..... 崔新月, 莫武秋, 廖建波(1375)

骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评估 ..... 龚润强, 赵华璋, 高占欣, 胡冠九, 卜元卿, 张圣虎, 邱惠(1384)

宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估 ..... 李富娟, 高礼, 李凌云, 卜兰香, 陶红, 杨桂钦(1394)

百年来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应 ..... 龚雄虎, 赵中华, 丁琪琪, 张路, 姚书春, 薛滨(1404)

长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异 ..... 胡愈忻, 张静, 黄杰, 段春建, 李天翠, 刘威, 王英才, 胡圣(1414)

河套平原灌溉间歇期乌梁素海水体细菌群落结构特征 ..... 史玉娇, 李文宝, 张博尧, 姚国旺, 史小红(1424)

不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响 ..... 舒旺, 王鹏, 丁明军, 张华, 黄高翔, 聂明华(1434)

鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 ..... 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 胡启武(1447)

微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响 ..... 陶辉, 戚怡婷, 于多, 杨兰, 顾颖, 厉彦辉(1455)

乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 ..... 刘禹, 史小红, 张生, 郝若男, 孙标, 赵胜男(1463)

老化前后微塑料对富里酸的吸附 ..... 宋亚丽, 俞娅, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)

天津市滨海河流N<sub>2</sub>O扩散通量及控制因子 ..... 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承(1481)

铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 ..... 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 胡剑, 江长胜(1492)

降雨径流污染风险等级识别与优化方法 ..... 齐小天, 张质明, 赵鑫, 胡文翰, 刘迪(1500)

基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析 ..... 江杉杉, 王臻宇, 高权, 杨愿愿, 高方舟, 华佩, 应光国(1512)

聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(III)的选择性吸附效果与机制 ..... 赵文金, 张顺, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 曲久辉(1521)

F/M对活性污泥微生物生态网络的影响 ..... 张冰, 孙展翔, 文湘华(1529)

城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例 ..... 刘书准, 王德伟, 施泽明, 唐亮, 章凤英, 廖程, 李晓雨, 徐文斌(1535)

基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估 ..... 王蕊, 陈楠, 张二喜(1546)

湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转换特征及污染评价 ..... 张龙, 宋波, 黄凤艳, 肖乃川, 顿梦杰(1558)

生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应 ..... 杨士, 刘祖文, 龙培, 毕永顺, 林苑, 左华伟(1567)

溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤 ..... 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华(1577)

铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制 ..... 连斌, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱, 袁峰(1584)

不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 ..... 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙均兵, 赵立杰(1596)

镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性 ..... 任超, 任或仲, 王浩, 朱利文, 李竞天, 杜倩倩, 李萍(1606)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响 ..... 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 徐飞, 朱志豪, 张拓, 张富斌(1620)

蚯蚓/钾改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响 ..... 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 耿兵, 田云龙, 黄晓雅(1630)

DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响 ..... 罗洋, 孙丽, 刘方, 任军, 郭金梅, 闫修民(1641)

地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响 ..... 胡志娥, 肖谋良, 王双, 董瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达(1649)

增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响 ..... 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(1657)

秸秆还田、地膜覆盖及施肥对冬小麦田N<sub>2</sub>O和N<sub>2</sub>排放的影响 ..... 彭毅, 李惠通, 张少维, 阳婷, 王筱斐, 周春菊, 王林权(1668)

基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤挥发性的影响 ..... 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 蔡焕杰(1678)

施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析 ..... 冉继伟, 肖琼, 黄敏, 蔡岸冬, 张文菊(1688)

《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

# 微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响

陶辉<sup>1,2</sup>, 戚怡婷<sup>1,2</sup>, 于多<sup>1,2</sup>, 杨兰<sup>1,2</sup>, 顾颖<sup>1,2</sup>, 厉彦辉<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学环境学院, 南京 210098)

**摘要:** 微塑料对生物膜的影响现阶段主要集中于对成熟生物膜群落组成结构变化的研究, 缺乏对不同发育阶段生物膜的研究。为探究微塑料对不同发育阶段生物膜的影响, 选用环境中广泛存在的变形杆菌和 1  $\mu\text{m}$  聚苯乙烯微塑料 (PS-MPs) 作为研究对象, 通过暴露实验研究 PS-MPs 对生物膜生物量、胞外聚合物 (EPS) 组成和胞外酶活性的影响。结果表明, PS-MPs 对不同阶段生物膜的影响存在显著差异, 其抑制效应随生物膜的发育显著减轻。不同生长发育阶段的生物膜对微塑料敏感度不同。可逆附着期生物膜 EPS 组成、活性氧 (ROS) 生成和胞外酶活性的抑制效应临界浓度 (NOEC) 明显低于其他发育阶段, 但总抗氧化能力 (T-AOC) 和乳酸脱氢酶 (LDH) 活性 NOEC 值与其他阶段相当。这可能是 ROS 介导的蛋白质氧化的结果, 其他阶段生物膜较为完整的 EPS 可以减少但不会完全消除这种作用, 说明 PS-MPs 对生物膜存在低毒性作用。

**关键词:** 微塑料 (MPs); 变形杆菌; 生物膜; 发育阶段; 胞外聚合物 (EPS); 酶活性

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1455-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202107084

## Influence of Microplastics on the Development of Proteus Biofilm

TAO Hui<sup>1,2</sup>, QI Yi-ting<sup>1,2</sup>, YU Duo<sup>1,2</sup>, YANG Lan<sup>1,2</sup>, GU Ying<sup>1,2</sup>, LI Yan-hui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Currently, research on the effects of microplastics (MPs) in biofilms has mainly been focused on the mature biofilm communities, with a lack of sufficient details on the influence on different development stages of biofilms. *Proteus* and 1  $\mu\text{m}$  polystyrene microplastics (PS-MPs), which are widely found in the environment, were selected as the research objects to explore the effects of microplastics on biofilms at different developmental stages. In our study, the effects of PS-MPs on biofilm biomass, extracellular polymer composition (EPS), and extracellular enzyme activity were investigated using an exposure test. Our results showed that the effect of PS-MPs on biofilms at different stages was similar, but the effect was significantly reduced with the development of biofilms. Biofilms at different development stages had different sensitivities to microplastics. In the reversible attachment stage, the no observed effect concentration (NOEC) of EPS composition, reactive oxygen species (ROS) production, and extracellular enzyme activity were significantly lower than those in other stages; however, the NOEC of total antioxidant capacity (T-AOC) and lactate dehydrogenase (LDH) activity were similar. This may be the result of ROS-mediated protein oxidation, which can be reduced but not completely eliminated by EPS in other stages of biofilm. This indicates that PS-MPs has a low toxic effect on biofilm.

**Key words:** microplastics (MPs); *Proteus*; biofilm; development stage; extracellular polymeric substance (EPS); enzyme activity

据文献[1]的报道, 2016 年全球进入水生生态系统的塑料废物约为 19 ~ 23 Mt, 占废物总量的 11%。据此预测, 如果废物产生趋势不变且没有改善管理措施, 到 2030 年进入世界水生生态系统的塑料废物量将达到 90 Mt·a<sup>-1</sup>。这些进入水体中的塑料在光照、化学氧化以及微生物分解等作用下被逐渐分解为粒径小于 5 mm 的微塑料 (microplastics, MPs)<sup>[2]</sup>。在我国, 微塑料污染极为严重, 河口海岸和长江人口密集流域的水样中 MPs 浓度甚至达到了发达国家的 30 ~ 50 倍<sup>[3]</sup>。在现有研究中, 水体中最常检测到的 MPs 之一是聚苯乙烯 (polystyrene, PS)<sup>[4, 5]</sup>。PS 由于其耐化学腐蚀性和透明度, 在包装和技术项目中具有广泛的适用性, 因而在工业中广泛使用。

生物膜是环境中微生物最普遍的一种存在形式<sup>[6]</sup>。生物膜的形成是一个多步骤过程<sup>[7]</sup>, 微生物从浮游生长模式转变为固着生长模式<sup>[8]</sup>。与游离态细胞相比, 生物膜具有稳定的三维结构<sup>[9]</sup>, 这是因为生物膜不是通过细胞简单聚集而形成的, 在生物

膜中存在大量胞外物质, 即胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS)。EPS 可以为包裹在生物膜内的细胞提供营养、抵御外界环境变化, 也可以作为细胞的外部消化系统, 增强细胞的代谢能力。对大多数细菌而言, 生物膜的形成可使自身在环境中占据有利生态位, 从而有利于自身的生存发展<sup>[6]</sup>。在 EPS 内, 蛋白质、多糖、DNA、RNA 和脂质等大小分子物质同时存在, 其中多糖和蛋白质是大多数细菌生物膜 EPS 的主要成分<sup>[10]</sup>。MPs 上微生物组成丰富, 存在真菌、细菌和藻类等多种微生物, 其中细菌为优势物种<sup>[11]</sup>。MPs 上微生物源于周围环境, 但群落结构却与周围环境或者其他介质上的大不相同<sup>[12-14]</sup>。据文献[15]报道, MPs 由于对特定生物类群具有潜在的代谢适应性, 能够提供特殊的生态位,

收稿日期: 2021-07-09; 修订日期: 2021-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52070068, 52070068); 苏州科技计划项目 (SS201846)

作者简介: 陶辉 (1981 ~), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为饮用水处理理论与技术、膜科学与技术和环境微生物生态, E-mail: taohui@hhu.edu.cn

如变形菌、拟杆菌、厚壁菌和蓝细菌的某些细菌类群.在我国长江口采集的微塑料上也发现变形杆菌为主要的优势菌属<sup>[16]</sup>.

MPs 为微生物提供了生存空间的同时,也可能对生物膜产生负面影响.据文献<sup>[17]</sup>报道,MPs 会对微生物的生长发育、EPS 分泌、活性氧自由基(reactive oxygen species, ROS)生成和酶活性产生影响.且随着粒径的减小,环境中 MPs 的数量明显增多<sup>[18]</sup>,生物膜受 MPs 的影响也更加明显<sup>[19]</sup>.目前关于 MPs 对生物膜群落的影响信息较少,主要集中在对天然生物膜群落的研究.但天然生物膜在培养过程中存在暴露在微塑料中的风险,且研究往往选取成熟生物膜而忽略了 MPs 对生物膜发育阶段的形态和形成的影响.

为了解微塑料对细菌生物膜发育的影响,本文以变形杆菌生物膜为研究对象,微塑料选择数量和赋存最广泛的 1  $\mu\text{m}$  聚苯乙烯微塑料(PS-MPs),通过对细胞生长、生物膜发育、EPS 成分和胞外酶活性分析深入探究 1  $\mu\text{m}$  PS-MPs 对生物膜发育的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

变形杆菌冻干粉(BNCC-107965)购自北京北纳创联生物技术研究院.

1  $\mu\text{m}$  聚苯乙烯微球(乳白色悬浮液, 10  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )购于天津倍思乐色谱技术开发中心. PS 原液中含 0.25% 的十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS; 防止颗粒聚集的表面活性剂).

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 菌株和生物膜培养

细菌冻干粉活化后接种在牛肉膏蛋白胨液体培养基中,在 26 $^{\circ}\text{C}$  的黑暗环境下培养 12 h. 4 $^{\circ}\text{C}$ , 5 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  条件下离心 15 min 将细菌细胞与培养基分离,细胞用磷酸盐缓冲溶液(phosphate buffered saline, PBS; pH 7.2)冲洗两次以去除残留的培养基,最终重悬于 0.85% 的生理盐水中<sup>[20]</sup>,细胞密度约为  $10^8\text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ . 在无菌、未经处理的 12 孔板各孔加入 2 000  $\mu\text{L}$  培养基和 20  $\mu\text{L}$  菌液,每板 A 行不加入菌液作为该板的空白对照. 将 12 孔板在 26 $^{\circ}\text{C}$  黑暗培养箱中培养 0~72 h,观察生物膜生长情况.

#### 1.2.2 暴露实验

依据文献<sup>[19]</sup>的方法对 PS 原液进行透析处理去除 SDS 后,用无菌培养基稀释得到不同浓度的 PS 悬液. 每次使用前超声 30 min (100 W) 使 MPs 均匀分散在体系中.

取不同发育阶段的生物膜孔板,用 PBS 洗涤微

孔 3 次后,在各孔中按组别加入 0.1、10、30 和 40  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  不同浓度微塑料培养液,继续将微孔板在 26 $^{\circ}\text{C}$  黑暗培养箱中培养 24 h,观察 MPs 对生物膜不同阶段发育的影响.

#### 1.2.3 生物量测定

将待测孔用 PBS 洗涤 3 次后加入 2 000  $\mu\text{L}$  0.1% 结晶紫溶液染色 20 min,再次用 PBS 冲洗 3 次. 最后加入 1 600  $\mu\text{L}$  33% 的冰醋酸溶解染料,使用酶标仪(Infinite 200 PRO NanoQuant, TECAN) 测量 540 nm 下的光密度( $D_{540}$ ). 用含菌微孔的读数减去空白孔读数平均值来表示生物膜发育情况,即微量滴度板壁上的生物膜中细胞的总量. 绘制生长曲线将生物膜发育分为 5 个阶段<sup>[21]</sup>.

#### 1.2.4 胞外聚合物分析

EPS 的提取方法采用乙二胺四乙酸(EDTA)法<sup>[22]</sup>. 由于细菌生物膜 EPS 75%~90% 的成分为蛋白质和多糖<sup>[19]</sup>,本研究仅测定 EPS 中的蛋白质和多糖含量及其比例变化来探究变形杆菌生物膜对微塑料的应激反应.

蛋白质的测定采用南京建成生物工程研究所提供的基于考马斯亮蓝法的微板蛋白测定试剂盒;多糖的测定采用苯酚-硫酸法<sup>[23,24]</sup>.

#### 1.2.5 氧化应激程度测定

微生物在生命过程中会不断产生 ROS,同时又形成一个清除 ROS 的防御系统,包括酶促系统和非酶促系统,使生物膜内 ROS 的产生与清除之间维持在一个动态平衡状态<sup>[25,26]</sup>. 酶促系统包括超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和谷胱甘肽过氧化物酶等;非酶促系统包括谷胱甘肽和抗坏血酸等. 总抗氧化能力(total antioxidative capacity, T-AOC)是一个用于衡量抗氧化系统功能状况的综合性指标<sup>[27]</sup>. 乳酸脱氢酶(lactate dehydrogenase, LDH)是一种在氧化应激条件下容易变性的线粒体酶,胞外 LDH 水平是细胞膜完整性的一个指标<sup>[28]</sup>. 本文选择 ROS、T-AOC 和 LDH 水平作为氧化应激程度的评判指标,测定采用南京建城生物研究所的试剂盒.

#### 1.2.6 统计分析

所有实验重复 3 次,数据以平均标准偏差表示. 生化测量的数据被转换成与对照组的百分比形式以便比较. 在 Origin 2018 版本中,使用单因素方差分析(one-way ANOVA)和事后 LSD 检验分析了各组的显著性差异( $P < 0.05$ ).

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物膜不同发育阶段

细菌在生物膜中的共生作用增强了它们的生存

能力和获得营养物质的能力. 生物膜发育过程包括: ①可逆附着到表面; ②不可逆附着; ③通过细胞外基质产生形成微生物落; ④形成成熟的三维生物膜结构; ⑤成熟的生物膜分解这 5 个阶段<sup>[29]</sup>.

图 1 是变形杆菌生物膜的生长曲线, 其中, 生物膜在 0~4 h 生物量几乎为 0, 处于生物膜初始附着阶段, 这个过程是可逆和动态的<sup>[30]</sup>; 4~12 h 生物量有少量增长, 处于不可逆附着阶段, 这个阶段细菌借助鞭毛和菌毛等物理附属物抵御剪切排斥力并保持与表面的强相互作用<sup>[31]</sup>; 12~36 h 生物膜的生物量快速增长并达到最大值, 生物膜进入生长期, 在这个阶段生物膜变成多层, 厚度也明显增加; 36~60 h 生物膜生物量较为稳定, 这说明生物膜进入成熟阶段, 这个阶段生物膜发展三维结构, 并建立异质环境, 对外界环境的耐受能力最强<sup>[32]</sup>; 随着养分的耗竭以及有害物质的积累, 生物膜进入衰落阶段 (60 h 以后).

本实验依据变形杆菌生物膜生长曲线, 选取培养了 2、8、24 和 48 h 的生物膜代表其发育的可逆附着期、不可逆附着期、生长期和成熟期, 并对这些发育阶段的生物膜进行进一步的微塑料暴露实验.

## 2.2 生物量的变化

将处于不同发育阶段的生物膜暴露在不同浓度 PS-MPs 中 24 h, 其生物量变化情况如图 2 所示. 与对照组 [ $\rho(\text{MPs})$  为  $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ] 相比,  $\rho(\text{MPs})$  为  $0.1 \sim 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 各阶段的生物膜生物量均有增加, 其中  $\rho(\text{MPs})$  为  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 生物量增量最大, 分别为对照组的  $(46.67 \pm 12.12)\%$ 、 $(49.18 \pm$

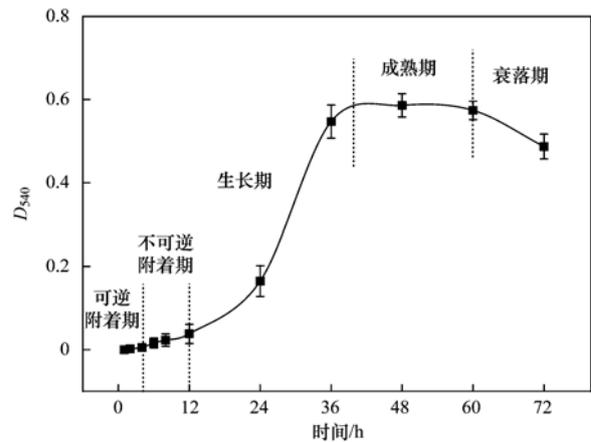


图 1 变形杆菌生物膜生长曲线

Fig. 1 Growth curve of *Proteus* biofilm

$13.66)\%$ 、 $(16.55 \pm 4.27)\%$  和  $(17.84 \pm 3.81)\%$ . 说明  $\rho(\text{MPs}) \leq 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 对变形杆菌增殖和生物膜发育起促进作用. 当  $\rho(\text{MPs})$  为  $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时对生物膜前 3 个阶段的发育起抑制作用, 生长抑制率分别为  $(20.61 \pm 10.91)\%$ 、 $(16.39 \pm 6.39)\%$  和  $(2.73 \pm 5.28)\%$ , 但对于成熟期生物膜, MPs 仍起到了一定的促进作用, 增量为  $(8.69 \pm 4.57)\%$ . 同时, 从图 2 可以发现, 生物膜越成熟, 变化率波动越小, 受环境的影响越小.

在  $\rho(\text{MPs}) \leq 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 各阶段生物膜生物量均升高, 可能是因为微塑料并非剧毒物质<sup>[33]</sup>, 低浓度和小粒径的 MPs 反而为变形杆菌的定植提供了极大的定植表面<sup>[20]</sup>, 从而生物量随 MPs 浓度的增加而上升. 当  $\rho(\text{MPs}) \geq 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时生物膜发育受到抑制, 可能是生物膜内活性氧失衡或营养循环受

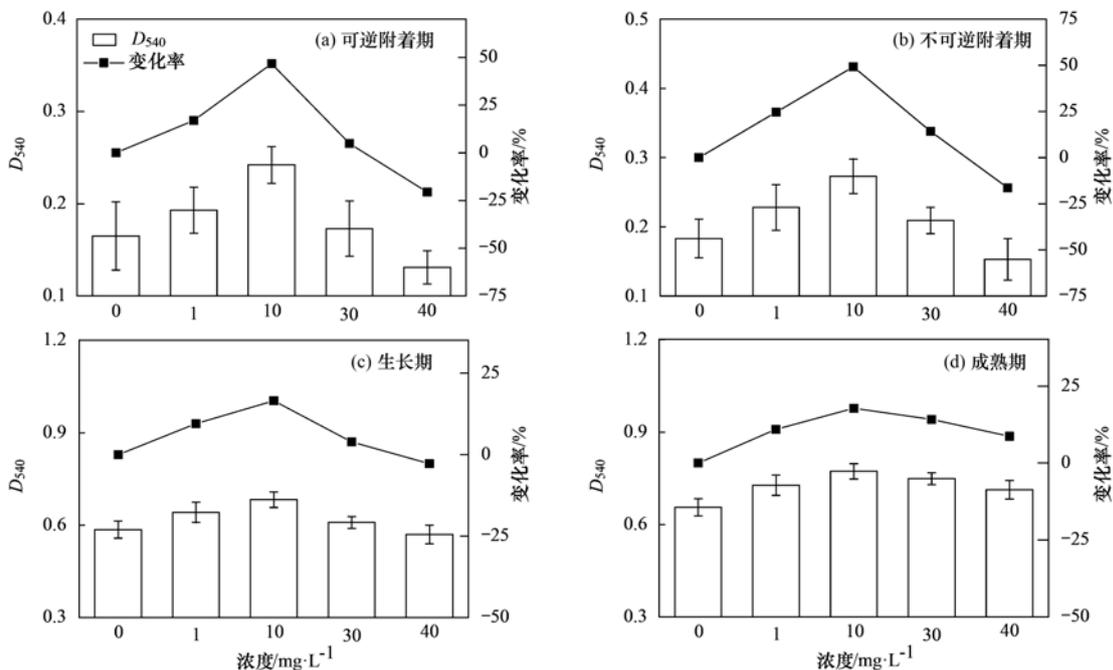


图 2 变形杆菌不同阶段生物膜在不同浓度 PS-MPs 中暴露 24 h 后生物膜发育情况

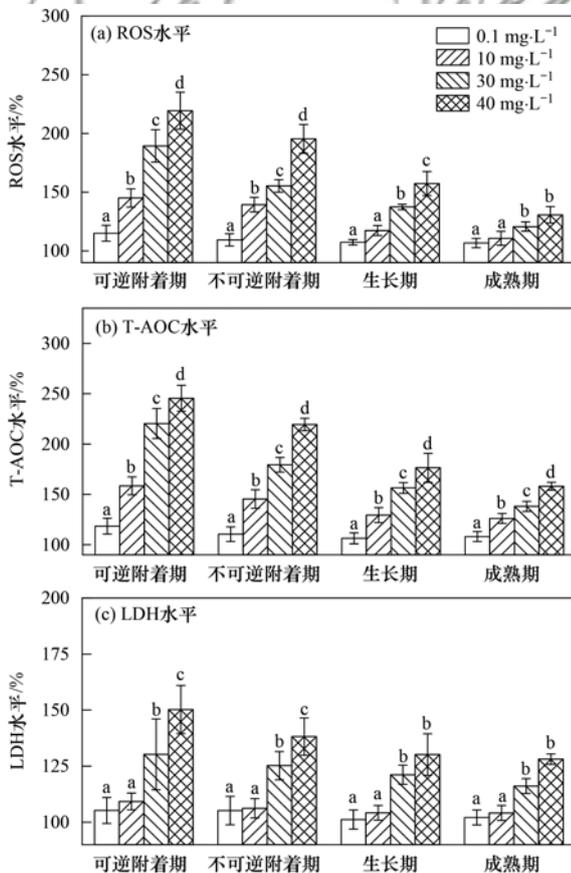
Fig. 2 Biofilm development of different stages of *Proteus* biofilms exposed to different concentrations of PS-MPs for 24 hours

到影响,本文将进行深入研究.

### 2.3 氧化应激反应程度的变化

有研究表明,纳米粒子(如 PS-NPs、TiO<sub>2</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)对微生物的毒性主要归因于氧化损伤<sup>[34]</sup>. 本实验中 1 μm PS-MPs 对普通变形杆菌生物膜也表现出了与纳米粒子相似的毒性. 从图 3 中可以发现, ROS、T-AOC 和 LDH 水平的变化呈现一致性,即随着 MPs 浓度的上升而上升. 且生物膜发育越成熟,受 MPs 的影响越小.

氧化应激反应程度分为 3 类:抗氧化反应、氧化抑制和抗氧化失活<sup>[35]</sup>,当  $\rho(\text{PS-MPs})$  为 0.1 ~ 30 mg·L<sup>-1</sup> 时, T-AOC 的水平随 ROS 的升高而升高,生物量相对对照组也有增长,表明 PS-MPs 在实验期间并没有破坏微生物抗氧化系统,氧化应激水平相对较低<sup>[36]</sup>,也说明在此浓度下 MPs 对普通变形杆菌各阶段生物膜仅有低毒性. 在这一阶段,ROS 可以通过酶和非酶的作用来减轻,保护生物膜中的细胞免受氧化应激<sup>[37]</sup>.  $\rho(\text{MPs}) > 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,生物膜生物量逐渐减少,可能是因为累积的 ROS 使呼吸系统损伤,坏死细胞增多,减缓了生物膜发育.



不同小写字母表示不同 PS 浓度下的显著差异 ( $P < 0.05$ ), 下同

图 3 不同 PS-MPs 浓度下不同阶段生物膜的相对氧化应激反应水平

Fig. 3 Relative oxidative stress response levels of biofilms at different stages under different PS-MPs concentrations

$\rho(\text{MPs}) > 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, ROS 的持续积累可能破坏了抗氧化防御系统,导致氧化抑制,从而导致细胞死亡,生物膜发育受到抑制<sup>[38]</sup>.

### 2.4 胞外聚合物组分的变化

除了抗氧化作用的响应机制外,也可以通过 EPS 的 2 种主要成分,即蛋白质和多糖,与自由基发生反应保护膜内微生物<sup>[39]</sup>. 图 4 所示为生物膜各阶段 EPS 主要成分的变化. 与对照组相比,  $\rho(\text{MPs})$  为 0.1 ~ 10 mg·L<sup>-1</sup> 时, EPS 中蛋白含量明显上升; 当  $\rho(\text{MPs}) > 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,附着期生物膜 EPS 中蛋白质含量明显减少,而多糖含量在各组中基本不变,在  $\rho(\text{MPs})$  为 40 mg·L<sup>-1</sup> 时附着期生物膜 EPS 中多糖含量明显上升.

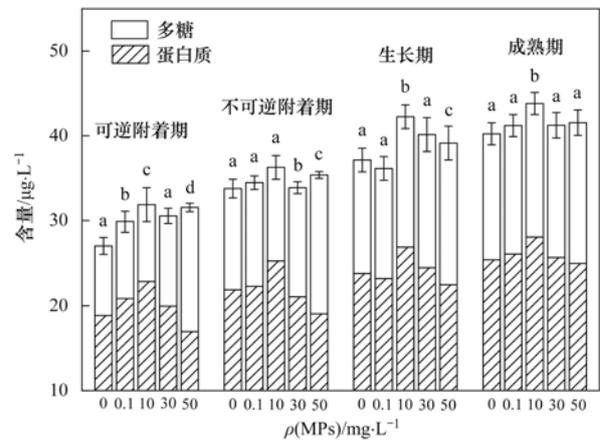


图 4 不同 PS-MPs 浓度下各阶段生物膜 EPS 组分变化

Fig. 4 Changes in biofilm matrix secreted by biofilms at different stages under different PS-MPs concentrations

根据文献<sup>[39]</sup>的报道,微生物暴露在 MPs 中时,会改变自身分泌的 EPS 组成来积极应对环境压力. 而蛋白质可以提高生物膜表面的疏水性和黏性来加速微生物的聚集和定植,也可以增厚细菌自身细胞壁,提高个体在环境中的存活能力抵御环境危害<sup>[40]</sup>. 本实验中  $\rho(\text{MPs})$  为 0.1 ~ 10 mg·L<sup>-1</sup> 时变形杆菌很可能释放了富含蛋白质的 EPS,减轻氧化应激反应,物理阻断危险性物质. 当  $\rho(\text{MPs})$  为 30 mg·L<sup>-1</sup> 时,变形杆菌氧化应激反应增强,ROS 与蛋白发生反应,导致蛋白含量减小,细菌形态和聚集能力都被抑制,也解释了生物膜发育抑制现象. EPS 中多糖可以保护膜内细胞免受外部侵害,并作为各种小分子扩散的屏障<sup>[41]</sup>. 本实验中各阶段生物膜多糖含量在暴露后基本不变,说明微塑料对多糖的影响不显著,而附着期多糖含量的上升尚无法解释. 相同暴露浓度下,生物膜成熟度越高所受到的影响越小. 成熟期生物膜的 EPS 受 PS-MPs 的影响明显减少. 说明生物膜形成初期较为脆弱,成熟生物膜对 MPs 有更强的抗性<sup>[42]</sup>.

## 2.5 胞外酶活性的变化

EPS 中的蛋白质包括酶蛋白和非酶蛋白. 酶蛋白可以将溶解的高分子量化合物水解成更小的生物分子, 只有这些物质才会被微生物吸收. 本研究选取了 3 种对营养循环起重要作用的水解酶 [ $\beta$ -葡萄糖苷酶 ( $\beta$ -d-glucosidase, GLU; 碳循环)、亮氨酸氨基肽酶 (leucine arylamidase, LAP; 氮循环) 和碱性磷酸酶 (alkaline phosphatase, AKP; 磷循环)] 进行进一步探究.

### 2.5.1 $\beta$ -葡萄糖苷酶

GLU 可以降解多糖, 并通过碳水化合物结合蛋白将复合物定位到纤维素表面和细胞膜上<sup>[43]</sup>. 各阶段生物膜 GLU 相对活性如图 5 所示, 在生物膜成熟期 GLU 活性较对照组的变化较小, 但在附着期 GLU 活性随浓度升高受到了明显的抑制. GLU 活性随暴露浓度的升高而降低, 生物膜发育越成熟受到的影响越小. 而在  $\rho$ (MPs) 为  $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时附着期生物膜中多糖含量有上升情况, 结合 GLU 活性明显降低的情况, 猜测是由于细胞死亡破裂离开细胞外基质所导致<sup>[44]</sup>.

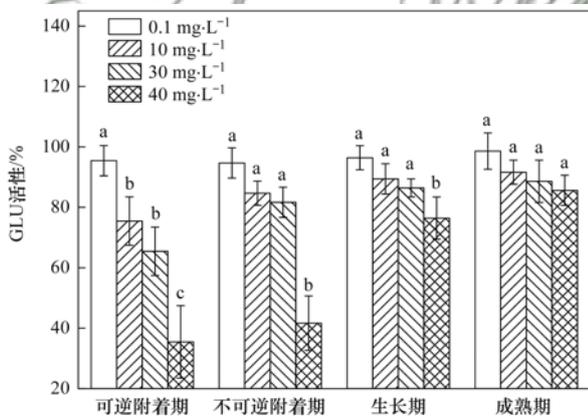


图 5 不同 PS-MPs 浓度下各阶段生物膜 GLU 的相对活性

Fig. 5 Relative activity of GLU in biofilms at different growth stages under different PS-MPs concentrations

### 2.5.2 亮氨酸氨基肽酶

LAP 是一种金属肽酶, 它将蛋白质和肽的 n 端残基裂解, 在肽循环中起关键作用<sup>[45]</sup>. LAP 相对活性如图 6 所示, LAP 活性与 GLU 变化趋势一致但幅度较小.  $\rho$ (MPs) 为  $0.1 \sim 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 对 LAP 活性并无显著影响, 但  $\rho$ (MPs) 为  $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 可逆附着期 LAP 活性有明显地下降, 降至对照组的  $(29.9 \pm 8.3)\%$ . LAP 活性与 EPS 中蛋白质含量的变化趋势较为一致, 高浓度 MPs 中, 蛋白质含量的减少可能因为胞外氮循环有关酶活性受到抑制, 从而抑制了蛋白质的表达.

### 2.5.3 碱性磷酸酶

AKP 是由细菌 *phoD* 编码的, 参与有机磷向无

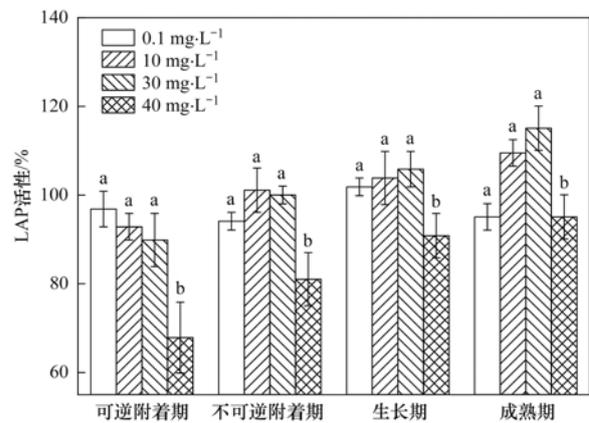


图 6 不同 PS-MPs 浓度下各阶段生物膜 LAP 的相对活性

Fig. 6 Relative activity of LAP in biofilms at different growth stages under different PS-MPs concentrations

机磷的矿化<sup>[46]</sup>. 本实验中除了  $\rho$ (MPs) 为  $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时附着期生物膜 AKP 活性降低了  $(20.7 \pm 7.1)\%$ , AKP 的活性一直较为稳定, 不受 MPs 的影响(图 7).

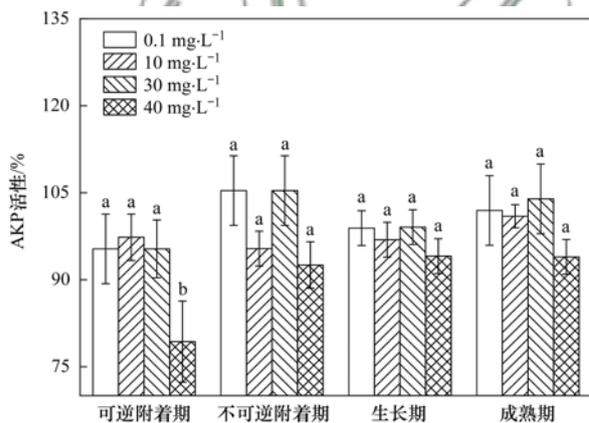


图 7 不同 PS-MPs 浓度下各阶段生物膜 AKP 的相对活性

Fig. 7 Relative activity of AKP in biofilms at different growth stages under different PS-MPs concentrations

本研究结果与 Miao 等<sup>[19]</sup>所研究的 PS-MPs 对淡水生物膜胞外酶活性的影响相似,  $\rho$ (MPs) 为  $0 \sim 100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 生物膜中 GLU 活性先升后降, LAP 活性显著下降而 AKP 活性相对稳定. GLU 在低浓度 PS-MPs 中活性增强可能是因为淡水生物膜对 PS 的抵抗能力优于单菌种生物膜, 使得 GLU 在低浓度 PS 中被刺激提升活性, 但随着浓度的升高, GLU 和 LAP 的活性均受到抑制. 3 种胞外酶对 PS-MPs 敏感性的差异可能是 3 种酶不同的定位模式造成的. 有研究表明, 大部分 GLU 位于 EPS 外层, 因此, GLU 可能更容易被 MPs 和 ROS 影响<sup>[47]</sup>. 而 LAP 和 AKP 主要与不溶性组分有关, 与 GLU 相比受影响较小. GLU 和 LAP 活性的降低表明 MPs 在生物膜形成初期对碳氮循环有负面影响, 该负面影响在成熟期生物膜中均有所降低, 这表明较为

完整的 EPS 起到了部分屏障的作用,防止了 MPs 的毒性,清除了产生的 ROS,并保持了胞外酶的活性.

## 2.6 敏感性分析

表 1 总结了各指标抑制效应的临界浓度 (no observed effect concentration, NOEC)<sup>[48]</sup>. 可以发现可逆附着期生物膜对 PS-MPs 最敏感,随着生物膜的发育,其对 PS-MPs 的耐受性明显增强. 不同阶段生物膜敏感程度的不同主要与 EPS 有关,EPS 分泌量、胞外酶 GLU 和 AKP 活性在可逆附着期 NOEC

值相较其他时期生物膜低. 氧化应激相关指标受 MPs 影响较小,ROS 在生长期对 MPs 耐受度增强,T-AOC 和 LDH 在生物膜不同阶段 NOEC 值不变. 这可能是 ROS 介导的蛋白质氧化的结果. 生物膜发育初期,EPS 分泌量较少,ROS 可能与胞外酶蛋白结合使其失活,成熟期生物膜完整的 EPS 可减少但不会完全消除这种作用. 总体而言,可逆附着期生物膜对 PS-MPs 的敏感性可能会对生物膜养分获取产生不利影响,并可能对养分循环和环境系统中污染物的降解产生影响.

表 1 PS-MPs 对各阶段变形杆菌生物膜各指标抑制效应的 NOEC 值

Table 1 NOEC of PS-MPs inhibitory effect on each index of *Proteus* biofilm at each stage

项目	NOEC/mg·L <sup>-1</sup>						
	EPS	ROS	T-AOC	LDH	GLU	LAP	AKP
可逆附着期	0	0.1	0.1	10	0.1	30	30
不可逆附着期	10	0.1	0.1	10	30	30	>40
生长期	0.1	10	0.1	10	30	30	>40
成熟期	0.1	10	0.1	10	>40	30	>40

## 3 结论

(1) 1 μm 的 PS-MPs 为低毒性物质.

(2) 不同生长发育阶段的生物膜对 MPs 敏感度不同. 可逆附着期生物膜对 PS-MPs 最敏感,随着生物膜成熟度的提高,MPs 对生物膜的影响明显减弱. 成熟生物膜 EPS 可以有效减轻 MPs 的负面影响,清除 ROS,并保障功能酶的活性.

(3) 变形杆菌生物膜暴露在 MPs 中时会提高氧化应激水平,高浓度 MPs 会导致生物膜改变 EPS 的多糖和蛋白质的含量和比例,抑制生物膜功能酶特别是 GLU 和 LAP 的活性,导致变形杆菌生物膜生物量降低,对营养循环产生不利影响.

### 参考文献:

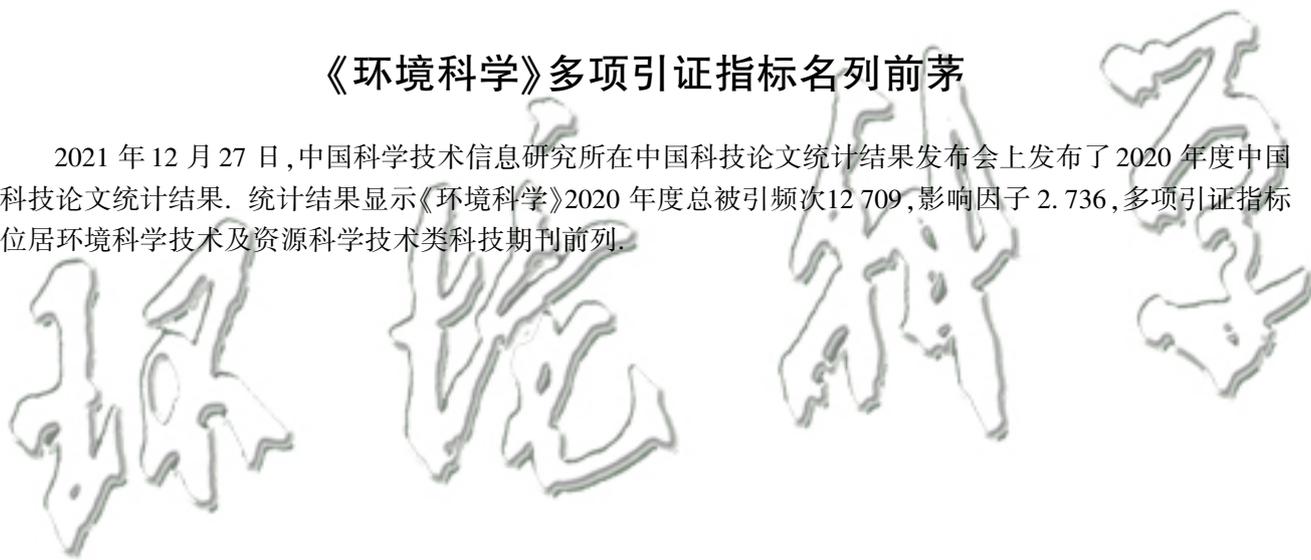
- [1] Borrelle S B, Ringma J, Law K L, *et al.* Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution [J]. *Science*, 2020, **369**(6510): 1515-1518.
- [2] 林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 等. 微塑料 PES 与 2,4-DCP 复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1946-1955.  
Lin X M, Xu C Y, Wu S M, *et al.* Effects of PES and 2,4-DCP on the extracellular polymeric substances and microbial community of anaerobic granular sludge [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1946-1955.
- [3] 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 等. 长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2067-2074.  
Zhu X T, Yi J, Qiang L Y, *et al.* Distribution and settlement of microplastics in the surface sediment of Yangtze Estuary [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2067-2074.
- [4] 丁剑楠, 张闪闪, 邹华, 等. 淡水环境中微塑料的赋存、来源和生态毒理效应研究进展[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(9): 1619-1626.  
Ding J N, Zhang S S, Zou H, *et al.* Occurrence, source and
- ecotoxicological effect of microplastics in freshwater environment [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2017, **26**(9): 1619-1626.
- [5] Sun J, Dai X H, Wang Q L, *et al.* Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal [J]. *Water Research*, 2019, **152**: 21-37.
- [6] O'Toole G A, Pratt L A, Watnick P I, *et al.* Genetic approaches to study of biofilms [J]. *Methods in Enzymology*, 1999, **310**: 91-109.
- [7] Schembri M A, Givskov M, Klemm P. An attractive surface: gram-negative bacterial biofilms [J]. *Science's STKE*, 2002, **2002**(132), doi: 10.1126/STKE.2002.132.RE6.
- [8] 李宁, 金朝晖, 李铁龙, 等. 生物膜对纳米铁-微生物去除地下水中的 N 的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1620-1626.  
Li N, Jin Z H, Li T L, *et al.* Effect of biofilm on nanoscale zero-valent iron-microorganism removing-N in groundwater [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(6): 1620-1626.
- [9] Kobayashi K, Iwano M. BslA (YuaB) forms a hydrophobic layer on the surface of *Bacillus subtilis* biofilms [J]. *Molecular Microbiology*, 2012, **85**(1): 51-66.
- [10] 陈哲, 张斌, 谌志强, 等. 1 株异养硝化菌胞外聚合物的研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1318-1322.  
Chen Z, Zhang B, Zhan Z Q, *et al.* Characteristics of the extracellular polymeric substances of a heterotrophic nitrifying bacterium strain [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1318-1322.
- [11] Balasubramanian V, Natarajan K, Hemambika B, *et al.* High-density polyethylene (HDPE)-degrading potential bacteria from marine ecosystem of Gulf of Mannar, India [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2010, **51**(2): 205-211.
- [12] De Tender C A, Devriese L I, Haegeman A, *et al.* Bacterial community profiling of plastic litter in the Belgian part of the North Sea [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(16): 9629-9638.
- [13] Bryant J A, Clemente T M, Viviani D A, *et al.* Diversity and activity of communities inhabiting plastic debris in the north Pacific gyre [J]. *Msystems*, 2016, **1**(3), doi: 10.1128/MSYSTEMS.00024-16.

- [14] Arias-Andres M, Kettner M T, Miki T, *et al.* Microplastics: New substrates for heterotrophic activity contribute to altering organic matter cycles in aquatic ecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **635**: 1152-1159.
- [15] 季梦如, 马旖旎, 季荣. 微塑料圈: 环境微塑料对微生物的载体作用[J]. *环境保护*, 2020, **48**(23): 19-27.
- Ji M R, Ma Y N, Ji R. Plasticsphere: The vector effects of microplastics on microbial communities [J]. *Environmental Protection*, 2020, **48**(23): 19-27.
- [16] Jiang P L, Zhao S Y, Zhu L X, *et al.* Microplastic-associated bacterial assemblages in the intertidal zone of the Yangtze Estuary [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **624**: 48-54.
- [17] Shiu R F, Vazquez C I, Chiang C Y, *et al.* Nano-and microplastics trigger secretion of protein-rich extracellular polymeric substances from phytoplankton [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **748**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141469.
- [18] Wang Z F, Lin T, Chen W. Occurrence and removal of microplastics in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP) [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, **700**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134520.
- [19] Miao L Z, Hou J, You G X, *et al.* Acute effects of nanoplastics and microplastics on periphytic biofilms depending on particle size, concentration and surface modification [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113300.
- [20] 张永吉, 周玲玲, 李伟英, 等. 氯对模拟管壁生物膜的氧化特性研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1381-1385.
- Zhang Y J, Zhou L L, Li W Y, *et al.* Oxidization characteristic of chlorine on the biofilm in simulated drinking water distribution system [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(5): 1381-1385.
- [21] Ouyang K, Walker S L, Yu X Y, *et al.* Metabolism, survival, and gene expression of *Pseudomonas putida* to hematite nanoparticles mediated by surface-bound humic acid [J]. *Environmental Science: Nano*, 2018, **5**(3): 682-695.
- [22] Liang Z W, Li W H, Yang S Y, *et al.* Extraction and structural characteristics of extracellular polymeric substances (EPS), pellets in autotrophic nitrifying biofilm and activated sludge [J]. *Chemosphere*, 2010, **81**(5): 626-632.
- [23] Frølund B, Palmgren R, Keiding K, *et al.* Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin [J]. *Water Research*, 1996, **30**(8): 1749-1758.
- [24] Basuvaraj M, Fein J, Liss S N. Protein and polysaccharide content of tightly and loosely bound extracellular polymeric substances and the development of a granular activated sludge floc [J]. *Water Research*, 2015, **82**: 104-117.
- [25] Tang J, Wu Y H, Esquivel-Elizondo S, *et al.* How microbial aggregates protect against nanoparticle toxicity [J]. *Trends in Biotechnology*, 2018, **36**(11): 1171-1182.
- [26] Das K, Roychoudhury A. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2014, **2**, doi: 10.3389/fenvs.2014.00053.
- [27] 高李李, 郭沛涌, 苏光明, 等. 化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 156-162.
- Gao L L, Guo P Y, Su G M, *et al.* Effects of allelochemicals ethyl cinnamate on the growth and physiological characteristics of *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 156-162.
- [28] 王艳艳, 姚俊杰, 梁正其, 等. Pb<sup>2+</sup>对建鲤幼鱼抗氧化酶活性和总抗氧化能力的影响[J]. *淡水渔业*, 2013, **43**(1): 55-58.
- Wang Y Y, Yao J J, Liang Z Q, *et al.* Effects of Pb<sup>2+</sup> on activities of antioxidant enzymes and total antioxidant capacity of juvenile *Cyprinus carpio* var. Jian [J]. *Freshwater Fisheries*, 2013, **43**(1): 55-58.
- [29] Schug H, Isaacson C W, Sigg L, *et al.* Effect of TiO<sub>2</sub> nanoparticles and UV radiation on extracellular enzyme activity of intact heterotrophic biofilms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(19): 11620-11628.
- [30] 郑亚萍. 微藻生物膜成膜过程强化及生长调控[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- Zheng Y P. Enhancement of microalgae biofilm formation and growth regulation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [31] 熊富忠, 赵小希, 廖胤皓, 等. 材料表面特征对生物膜形成的影响及其应用[J]. *微生物学通报*, 2018, **45**(1): 155-165.
- Xiong Z F, Zhao X X, Liao Y H, *et al.* Effects of surface properties on biofilm formation and the related applications [J]. *Microbiology China*, 2018, **45**(1): 155-165.
- [32] Dubois M, Gilles K A, Hamilton J K, *et al.* Calorimetric method for determination of sugar and related substance [J]. *Nature*, 1951, **4265**: 167-168.
- [33] Wu B, Wu X M, Liu S, *et al.* Size-dependent effects of polystyrene microplastics on cytotoxicity and efflux pump inhibition in human Caco-2 cells [J]. *Chemosphere*, 2019, **221**: 333-341.
- [34] Tang J, Zhu N Y, Zhu Y, *et al.* Responses of periphyton to Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles: A physiological and ecological basis for defending nanotoxicity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(18): 10797-10805.
- [35] Zhu N Y, Wang S C, Tang C L, *et al.* Protection mechanisms of periphytic biofilm to photocatalytic nanoparticle exposure [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(3): 1585-1594.
- [36] Nel A, Xia T, Mädler L, *et al.* Toxic potential of materials at the nanolevel [J]. *Science*, 2006, **311**(5761): 622-627.
- [37] Khan S, Mohammed R P, Rizvi A, *et al.* ROS mediated antibacterial activity of photoilluminated riboflavin: A photodynamic mechanism against nosocomial infections [J]. *Toxicology Reports*, 2019, **6**: 136-142.
- [38] Han X M, Wang Z W, Chen M, *et al.* Acute responses of microorganisms from membrane bioreactors in the presence of NaOCl: Protective mechanisms of extracellular polymeric substances [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(6): 3233-3241.
- [39] Coburn K M, Wang Q Z, Rediske D, *et al.* Effects of extracellular polymeric substance composition on bacteria disinfection by monochloramine: Application of MALDI-TOF/TOF-MS and multivariate analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(17): 9197-9205.
- [40] Tang L, Pillai S, Revsbech N P, *et al.* Biofilm retention on surfaces with variable roughness and hydrophobicity [J]. *Biofouling*, 2011, **27**(1-2): 111-121.
- [41] Bermúdez-López M, Ceschia A, De Piccoli G, *et al.* The Smc5/6 complex is required for dissolution of DNA-mediated sister chromatid linkages [J]. *Nucleic Acids Research*, 2010, **38**(19): 6502-6512.
- [42] Nichols C A M, Guezennec J, Bowman J P. Bacterial exopolysaccharides from extreme marine environments with special

- consideration of the southern ocean, sea ice, and deep-sea hydrothermal vents: a review[J]. *Marine Biotechnology*, 2005, **7**(4): 253-271.
- [43] Flemming H C, Wingender J. The biofilm matrix[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, **8**(9): 623-633.
- [44] Wang J P, Li G Y, Yin H L, *et al.* Bacterial response mechanism during biofilm growth on different metal material substrates: EPS characteristics, oxidative stress and molecular regulatory network analysis[J]. *Environmental Research*, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109451.
- [45] Cairns J R K, Esen A.  $\beta$ -glucosidases [J]. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2010, **67**(20): 3389-3405.
- [46] Matsui M, Fowler J H, Walling L L. Leucine aminopeptidases: diversity in structure and function [J]. *Biological Chemistry*, 2006, **387**(12): 1535-1544.
- [47] Karaguler T, Kahraman H, Tuter M. Analyzing effects of ELF electromagnetic fields on removing bacterial biofilm [J]. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 2017, **37**(2): 336-340.
- [48] 熊丽, 吴振斌, 况琪军, 等. 氯氰菊酯对斜生栅藻的毒性研究[J]. *水生生物学报*, 2002, **26**(1): 66-73.
- Xiong L, Wu Z B, Kuang Q J, *et al.* Studies on the toxicity of cypermethrin to *scenedesmus obliquus*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, **26**(1): 66-73.

## 《环境科学》多项引证指标名列前茅

2021年12月27日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上发布了2020年度中国科技论文统计结果。统计结果显示《环境科学》2020年度总被引频次12709,影响因子2.736,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列。



## CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM <sub>2.5</sub> Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020 .....	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> Compound Pollution in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM <sub>2.5</sub> in Wuhan City Based on Random Forest Model .....	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China .....	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i> (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan .....	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i> (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM <sub>1</sub> Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou .....	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i> (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM <sub>2.5</sub> in the Yangtze River Economic Belt .....	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i> (1190)
Spatial Heterogeneity of PM <sub>2.5</sub> Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region .....	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i> (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2 + 26" Cities .....	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> in Shanxi Province Based on Wavelet Transform .....	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China .....	ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province .....	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i> (1246)
Temporal and Spatial Variation in O <sub>3</sub> Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas .....	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i> (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an .....	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i> (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City .....	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo .....	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province .....	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking .....	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants .....	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China .....	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin .....	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing .....	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i> (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment .....	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries .....	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guanglong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors .....	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers .....	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia .....	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years .....	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin .....	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain .....	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River .....	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake .....	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm .....	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake .....	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics .....	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N <sub>2</sub> O from Coastal Rivers in Tianjin City .....	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland .....	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level .....	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network .....	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(III) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism .....	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shen, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge .....	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District .....	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i> (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas .....	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province .....	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i> (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide .....	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM .....	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(II) and As(III) .....	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties .....	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress .....	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River .....	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil .....	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure .....	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland .....	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions .....	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N <sub>2</sub> O and N <sub>2</sub> Emission in a Winter Wheat Field .....	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis .....	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis .....	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)