

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展

闫海¹, 王华生^{1,2}, 刘晓璐¹, 尹春华¹, 许倩倩¹, 吕乐¹, 马万彪¹

(1. 北京科技大学化学与生物工程学院, 北京 100083; 2. 江西理工大学建筑与测绘工程学院, 赣州 341000)

摘要: 随着大量含氮和磷的废水流入湖泊和江河, 导致淡水蓝藻水华污染现象日趋严重. 蓝藻水华污染的最主要危害是产生和释放以微囊藻毒素 (microcystins, MCs) 为主的多种藻毒素. 由于 MCs 对动植物具有很强的毒性, 且其在水体中很难被传统的处理方法有效去除, 因此如何有效控制蓝藻水华污染和去除 MCs 是摆在中外环境科学领域的一个难题. 针对 MCs 的结构与毒性、降解菌株、酶催化降解、降解基因和生物降解途径与分子机制的研究进展进行了综述, 并对今后微生物降解 MCs 的研究方向进行了展望, 以期为解决我国日益严峻的湖库水体 MCs 污染和饮用水安全问题提供参考.

关键词: 微囊藻毒素; 微生物降解; 降解途径; 分子机制; 研究进展

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1205-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.03.055

Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins

YAN Hai¹, WANG Hua-sheng^{1,2}, LIU Xiao-lu¹, YIN Chun-hua¹, XU Qian-qian¹, LÜ Le¹, MA Wan-biao¹

(1. School of Chemistry and Biological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: With increasing discharge of wastewater containing nitrogen and phosphorus into rivers and lakes, harmful cyanobacterial blooms have become more frequent worldwide. The main harm of cyanobacterial blooms is producing and releasing a great amount of algal toxins mainly containing microcystins (MCs). Since MCs are extremely harmful to plants and animals and difficult to be removed efficiently by the traditional processing methods, how to control harmful cyanobacterial blooms and remove MCs have become an unsolved problem in the field of environmental science all over the world. This paper summarized the structure and toxicity of MCs, the MCs-biodegrading bacterial strains, the enzymes, the genes, and the biodegradation pathway and molecular mechanism of MCs. The further research subjects were also proposed. It was hoped that this review could provide a reference for restoring MCs-polluted lakes and reservoirs and ensuring drinking water safety.

Key words: microcystins; microbial degradation; biodegradation pathway; molecular mechanism; review

随着经济的快速发展,越来越多的含氮、磷废水以及生活污水排入水体,使湖泊和水库等富营养化现象日益加剧,由此引发的蓝藻水华现象日趋严重. 当蓝藻水华严重时,水面形成厚厚的蓝绿色湖靛,散发出难闻的气味,不仅破坏了健康平衡的水生生态系统,而且还因藻细胞产生并释放多种藻毒素而对人和动物的饮用水安全构成了严重的威胁. 目前,水华蓝藻可以产生多种藻毒素,其中微囊藻毒素 (microcystins, MCs) 是一类在蓝藻水华污染中检出率最高、危害最严重和产生量最大的藻毒素种类. 面对天然淡水水体富营养化程度日益加剧和蓝藻水华暴发越来越频繁的局势,如何控制蓝藻的过量繁殖生长和有效去除 MCs 已成为我国乃至世界环境科学领域的一个难题. 本文针对在淡水中的主要藻毒素类型 MCs 的结构与毒性、降解菌株、酶催化降解、降解基因、生物降解途径与分子机制方面的研究进展进行综述,以期为解决我国日益严峻的湖库水体 MCs 污染和饮用水安全问题提供参考.

1 MCs 的结构与毒性

MCs 是一类单环七肽化合物 (图 1), 相对分子量在 1 000 左右, 其一般结构是: D-丙氨酸在 1 位置, 2 个不同 L-氨基酸在 2 和 4 位置, D-谷氨酸在 6 位置. 另外 3 个特殊的氨基酸分别为: 3 位置的 D-赤-β-甲基天冬氨酸 (Masp), 5 位置的 (2S, 3S, 8S, 9S)-3-氨基-β-甲氧基-2, 6, 8-三甲基-10-苯十基-4, 6-二烯酸 (Adda), 7 位置的 N-脱氢丙氨酸 (Mdha). 由于 Adda 基团和 Masp 基团的甲基化和去甲基化差异, 以及在 2 和 4 位置的两个可变 L-氨基酸的不同, 造成了多种类型的 MCs. 2 和 4 位置的两个可变 L-氨基酸 X 和 Z 的代表字母被用来区分不同的 MCs 种

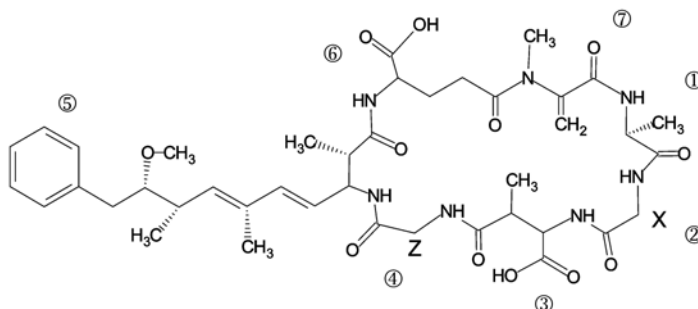
收稿日期: 2013-07-18; 修订日期: 2013-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21177009, 11071013); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20120006110001)

作者简介: 闫海 (1962 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为藻类和环境微生物学, E-mail: haiyan@ustb.edu.cn

类. 目前, 已经从不同的微囊藻中分离鉴定了 80 多种 MCs^[1,2]. 但产生量最大、分布最广泛和造成危

害最严重的是 MC-LR 和 MC-RR(L、R 分别代表亮氨酸和精氨酸).



X 和 Z 分别代表可变氨基酸

图 1 MCs 的化学分子结构通式

Fig. 1 Chemical structure of MCs

MCs 由于携带 Adda 特殊结构而具有很强的毒性^[3], 其不仅使植物的幼苗发生变形、重量减少、叶片的光合作用效率降低^[4,5], 而且能干扰鱼类胚胎的发育, 引起胚胎孵化率降低, 还对胚胎有致畸作用. 动物若直接接触或饮用含有 MCs 的水会造成昏迷、肌肉痉挛、呼吸急促和腹泻等中毒症状. 人若直接接触含 MCs 的水华蓝藻, 会造成皮肤、眼睛过敏、发烧、疲劳以及急性肠胃炎. 如果经常接触或饮用含 MCs 水体, 则会引发皮肤癌、肝炎和肝癌等病症^[6]. 长期饮用含有 MCs 水的人群中, 肝癌的发病率明显高于饮用深井水的人群^[7]. 因此, 世界卫生组织推荐饮用水中 MC-LR 的浓度不高于 $1.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[8].

2 MCs 降解菌株

由于 MCs 具有环状结构和间隔双键, 在水体中相当稳定, 混凝、沉淀和过滤及其组合单元工艺对蓝藻细胞分离效果好, 而对溶解性 MCs 的去除效果差; 高锰酸钾、臭氧和氯等化学药剂氧化法对降解溶解性 MCs 效果明显, 但容易带来“三致”物质以及消毒副产物等, 造成二次污染; 光催化降解以及活性炭吸附在减少水中 MCs 效果较好, 光催化降解工艺操作复杂, 活性炭吸附难于二次回收利用等缺点制约其在这方面的进一步应用. 而生物处理 MCs 具有高效、运行成本低、无二次污染等优点, 目前主要采用混合菌和纯菌种对 MCs 进行生物降解.

2.1 混合菌降解 MCs

具备降解 MCs 能力的土著菌在天然水体及其沉积物中均有所发现. 吴振斌等^[9]研究了人工湿地系统对 MCs 的去除效果及影响因素, 发现以含蓝藻

水华的鱼塘水为原水, 当进水含 MCs ($0.117 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 去除率 50% 左右, 其中对 MC-YR 的去除效果最好. 吕锡武等^[10]考察了 MC-LR、MC-RR 和 MC-YR 经序批式膜生物反应器的处理效果, 经 24 h 处理后发现 3 种 MCs 的去除率均高于 90%. 金丽娜等^[11]发现沉积物的用量以及反应体系温度对滇池沉积物生物降解 MCs 影响较大, 经过初步筛选分离得到了能够在 3 d 内完全降解 MC-RR ($50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 MC-LR ($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的混合菌群微生物^[12]. 在暴发蓝藻水华污染的水体以及水体沉积物中发现存在具备降解 MCs 能力的微生物^[13~15]. Inamori 等^[16]利用需氧菌对水体中的 MCs 进行降解研究, 结果发现该菌能够在 10 d 内将 MCs ($40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 完全降解. 污水厂排污口也存在能够快速降解 MCs 的微生物, 其在 2 d 之内将 MC-LR ($182 \sim 837 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 完全降解^[17].

由此可见, 对 MCs 有降解能力的微生物菌种普遍存在于天然水体中, 筛选分离出具有高效降解 MCs 的纯菌种, 可以为进一步研究及其应用奠定良好基础.

2.2 纯菌种降解 MCs

目前, 国外有关分离降解 MCs 纯菌种的报道较多. Jones 等^[18]最早从天然水体中分离出 1 株对 MC-LR 有一定降解能力的纯菌种 ACM-3962, 并将其分类为鞘氨醇单胞菌 (*Sphingomonas*). 随后, 日本学者在此方面开展了大量研究. Takenaka 等^[19]从天然水体中分离出 1 株对 MC-LR 有降解能力的铜绿假单胞菌 (*Pseudomonas aeruginosa*), 它能在 20 d 内将 MC-LR (初始浓度 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 去除 90% 以上. Park 等^[20]和 Ishii 等^[21]分别从日本 Suwa 湖中

分离出了 1 株对 MCs 具备较高降解能力的纯菌种 Y2 和 7CY, 其中 Y2 菌对 MC-RR 和 MC-LR 的最大日降解速率分别达到 $13.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 通过 16S rDNA 分析发现, 二者均属鞘氨醇单胞菌, 并且 7CY 与 Y2 之间有较高的同源性. Tsuji 等^[22] 从日本的 Tsukui 湖中分离出 1 株对 MCs 有降解能力的微生物纯菌种 B-9, 1 d 内可将一定浓度的 MCs 全部降解, 最后通过 16S rDNA 分析发现, B-9 与鞘氨醇单胞菌 Y2 的同源性高达 99%. Saito 等^[23] 从中国贵阳市某发生水华的湖泊和日本 Kasumigaura 湖中分别分离了 1 株具有降解 MCs 能力的鞘氨醇单胞菌 (*Sphingomonas*) C-1 和 MD-1. 2005 年, 德国学者 Valeria 等^[24] 从阿根廷的水库中筛选出 1 株鞘氨醇单胞菌 CBA4, 该菌 36 h 内就能将浓度为 $200 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 MC-RR 完全降解. 2007 年, Ho 等^[25] 从生物沙滤器分离出 1 株能够降解 MC-LR 和 MC-LA 的菌种 LH21, 经 16S rDNA 鉴定为 *Sphingopyxis* sp., 后经 PCR 扩增发现该菌株具有降解 MCs 完整的 *mlr* 基因簇.

进入 21 世纪后, 国内在 MCs 降解菌种筛选方面开始进行研究. 2002 年, 笔者从滇池底泥中分离出 1 株纯菌种青枯菌 (*Ralstonia solanacearum*), 该菌 3 d 内可将初始 $50.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 MC-RR 和 $30.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 MC-LR 全部降解, 日均降解速率分别达 $16.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $9.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[26]. 周洁等^[27] 从滇池底泥中筛选出 1 株对 MCs 有着更强的降解能力的食酸戴尔福特菌 (*Delftia acidovorans*), 在 2 d 内可将初始 $90.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 MC-RR 和 $39.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 MC-LR 全部降解, 日均降解速率分别提高到 $45.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $19.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Wang 等^[28] 从滇池底泥中分离出 1 株鞘氨醇单胞菌 (*Sphingopyxis* sp. USTB-05), 其在 36 h 内将初始 $42.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 MC-RR 全部降解, 而该菌的无细胞提取液 ($350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 蛋白) 则在 10 h 内将初始 $42.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 MC-RR 全部降解. 宦海琳等^[29] 从南京发生水华的水体中筛选分离出了 5 株降解 MCs 能力较强的细菌, 经过鉴定发现分别属于芽孢杆菌属 (*Bacillus*)、肠杆菌属 (*Enterobacter*)、不动杆菌属 (*Acinetobacter*)、弗拉特氏菌属 (*Frateriuria*) 和微杆菌 (*Micro bacterium*). 刘海燕等^[30] 从南京发生水华的水体中分离出对 MC-LR 有显著降解能力的菌株 S3, 经 16S rDNA 序列比对分析显示, 该菌与类芽孢杆菌 (*Paenibacillus validus*) 的相似性达 98%. 苑宝玲等^[31] 研究了假单胞菌 (*Pseudomonas*) M-5、M-6 及气单胞菌

(*Aeromonas*) M-7 混合培养与单菌株培养对 MC-LR 的降解效率, 结果表明, 混合菌株对 MCs 的降解效果明显优于单菌株, 说明混合菌株之间具有协同生长效应. 但同时认为菌株之间的组合具有很大的随机性, 还需从菌株的生理生化特性及对污染物的降解过程和机理的研究入手, 探讨具有协同作用菌株的组合过程.

此外, 在 *Stenotrophomonas*^[32]、*Sphingosin-cellula*^[33]、*Poterioochromonas*^[34]、*Burkholderia*^[35]、*Brevibacterium*^[36]、*Rhodococcus*^[36] 和 *Kurthia gibsonii*^[37] 等菌属中也发现了可降解 MCs 的菌种. 目前, 国内外报道能降解 MCs 的菌种多达 50 多种 (部分可降解 MCs 的菌种见表 1 所示), 涵盖的菌属较广, 但主要为鞘氨醇单胞菌属的菌种.

3 MCs 降解途径及分子机制

3.1 酶催化降解 MCs

酶催化降解 MCs 发挥至关重要的作用. 文献 [41, 42] 研究了假单胞菌 (*Pseudomonadaceae*) M-6 细胞内外提取液对 MC-LR 的降解效率, 结果表明, 细胞外提取液对藻毒素没有降解作用, 胞内酶粗提液能在 24 h 内降解 MC-LR, 日均 MC-LR 降解率是纯菌株 M-6 的 4.7 倍, 从而得出假单胞菌 M-6 降解 MCs 的酶属于胞内酶, 并且认为 MC-LR 快速降解主要归于细胞内酶的催化作用. 通过降解产物的分析, 得出至少有 3 种酶参与了 MC-LR 的降解. 王俊峰^[43] 也认为鞘氨醇单胞菌 USTB-05 降解酶属于胞内酶, 并发现酶催化降解远远高于菌细胞降解 MC-RR 的速率.

3.2 MCs 微生物降解基因

从分子水平上研究微生物降解 MCs 基因的功能, 可以为弄清 MCs 降解途径及其分子机制奠定基础. Bourne 等^[44] 对鞘氨醇单胞菌 ACM-3962 降解 MC-LR 的基因簇进行了详细的研究. 通过 HPLC 检测 MC-LR 降解产物出现的个数, 判断 ACM-3962 至少有 3 种酶 (*MlrA*、*MlrB*、*MlrC*) 依次参与了 MC-LR 的催化降解, 对应 *mlrA*、*mlrB*、*mlrC* 和 *mlrD* 这 4 段降解基因 (图 2), 其中 *mlrD* 为转运基因. 通过降解基因的克隆与异源表达, 发现该 4 段基因包含在 1 段相邻长度为 5.8 kb 的 DNA 片段中, 其中 *mlrA* 所编码的第一个 MCs 酶 (*MlrA*) 属于一种金属蛋白酶, 由 336 个残基组成的肽链内切酶; 位于 *mlrA* 下游且具有相同翻译方向的是基因 *mlrD*, 是一个寡肽转运子; *mlrB* 则位于它们的下游并具有相反翻译方

向; 基因 *mlrC* 位于 *mlrA* 上游具有相反的翻译方向, 也是一种金属蛋白酶.

表 1 部分可降解 MCs 的菌种及详细信息

Table 1 Part of MCs-degrading strains and its information			
菌株	来源	GenBank 登录号 ¹⁾	可降解种类
<i>Sphingomonas</i> sp. ACM-3962 ^[18]	澳大利亚 Murrumbidgee 河	AF401172	MC-LR, MC-RR
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ^[19]	日本 Japan		MC-LR
<i>Sphingosinicella</i> sp. Y2 ^[20]	日本 Suwa 湖	AB084247	MC-LR, MC-RR, MC-YR, 6(Z)-Adda-MCLR
<i>Sphingomonas</i> sp. 7CY ^[21]	日本 Suwa 湖	AB076083	MC-LR, MC-RR, MC-LY, MC-LW, MC-LF
<i>Sphingosinicella</i> sp. B-9 ^[22]	日本 Tsukui 湖	AB159609	MC-LR, MC-RR
<i>Sphingomonas</i> sp. MD-1 ^[23]	日本 Kasumi gaura 湖	AB110635	MC-LR, MC-RR, MC-YR
<i>Sphingopyxis</i> sp. C-1 ^[23]	中国 贵阳		MC-LR, MC-RR
<i>Sphingomonas</i> sp. CBA4 ^[24]	阿根廷 San Roque 水库	AY920497	MC-RR
<i>Sphingopyxis</i> sp. LH21 ^[25]	澳大利亚 Myponga 水库	DQ112242	MC-LR, MC-LA
<i>Ralstonia solanacearum</i> ^[26]	中国 滇池		MC-LR, MC-RR
<i>Delftia acidovorans</i> ^[27]	中国 滇池		MC-LR, MC-RR
<i>Sphingopyxis</i> sp. USTB-05 ^[28]	中国 滇池	EF607053	MC-LR, MC-RR
<i>Paenibacillus</i> sp. S3 ^[30]	中国 南京	DQ836314	MC-LR
<i>Pseudomonas</i> sp. M-5 ^[31]	中国 福建		MC-LR
<i>Pseudomonas</i> sp. M-6 ^[31]	中国 福建		MC-LR
<i>Aeromonas</i> sp. M-7 ^[31]	中国 福建		MC-LR
<i>Stenotrophomonas</i> sp. EMS ^[32]	中国	FJ712028	MC-LR, MC-RR
<i>Burkholderia</i> ^[35]	巴西 Brazil	DQ459360	MC-LR
<i>Brevibacterium</i> sp. F3 ^[36]			MC-LR
<i>Bacillus</i> sp. M6 ^[37]	中国 巢湖	JN717163	MC-LR, MC-RR
<i>Pseudomonas</i> sp. DHU-38 ^[38]	中国 淀山湖	HM047515	MC-RR
<i>Novosphingobium</i> sp. THN1 ^[39]	中国 太湖		MC-LR
<i>Morganella morganii</i> (LAAFP-C25216) ^[40]	澳大利亚		MC-LR
<i>Pseudomonas</i> sp. C25459 ^[40]	澳大利亚		MC-LR
<i>Sphingomonas</i> sp. C25358 ^[40]	澳大利亚		MC-LR
<i>Arthrobacter</i> sp. F7			MC-LR
<i>Rhodococcus</i> sp. C3			MC-LR
<i>Novosphingobium aromaticivorans</i> DSM 12444		CP000248	MC-LR

1) GenBank 登录号对应的是该菌株 16S rDNA 序列

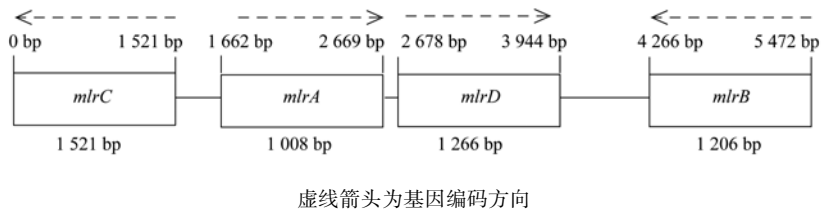


图 2 ACM-3962 菌 *mlr* 基因簇信息^[44]

Fig. 2 Information about the *mlr* gene cluster of ACM-3962 strain

Saito 等^[45]通过 PCR 技术对具有降解能力的鞘氨醇单胞菌 Y2 菌和鞘氨醇单胞菌 MD-1 菌进行检测,在它们的 DNA 中均发现 *mlrA* 基因的存在,并且与菌 ACM-3962 具有很高的同源性;另一方面,在 1 株与鞘氨醇单胞菌属非常相近的菌种中却未检测到 *mlrA* 基因的存在. 因此, Saito 等^[45]推测 *mlrA* 基因存在于 3 种不同的菌属中,该独特的 MCs 降解基因并不一定存在于鞘氨醇单胞菌属中. Jiang 等^[39]对 *Novosphingobium* sp. THN1 的 *mlr* 簇基因异源表达进行了研究,发现

mlrA 具有降解 MC-LR 的活性. Shimizu 等^[46]发现 Adda 对 *mlrA* 和 *mlrB* 的诱导表达发挥重要作用,MC-LR 的环状结构与 *mlrC* 的诱导有着紧密的联系. 王俊峰^[43]在分子水平上对 *Sphingopyxis* sp. USTB-05 菌降解 MC-RR 的活性进行了研究,发现该菌中含有 4 段类似于 *mlr* 的基因(表 2),该基因簇与 ACM-3962 菌中 *mlr* 簇基因具有很高的同源性.

尽管国内外对 MCs 降解基因进行了研究,但总体来说仍处于起步阶段. 目前的研究大部分集中在

鞘氨醇单胞菌 *mlr* 簇 4 段降解基因上,但根据 Hashimoto 等^[47]的研究结果可以推测,参与降解 MCs 的基因远不止这 4 段基因,至于这些降解基因

的功能特性研究基本上还没涉及.而其它菌属降解 MCs 的研究却仍停留在菌种或粗提酶的降解特性上,还没有进入分子水平上的研究.

表 2 USTB-05 菌降解 MCs 基因序列信息^[43]

Table 2 Information about the <i>mlr</i> gene cluster of USTB-05 strain				
项目	USTB-05-A	USTB-05-B	USTB-05-C	USTB-05-D
基因长度	1 008 bp	1 209 bp	1 521 bp	1 269 bp
编码方向	正向	反向	反向	正向

3.3 MCs 微生物降解途径及分子机制

对于 MCs 的降解途径,多肽类化合物的生物降解途径一般遵循由多肽到二肽,再到氨基酸和氨的转化过程^[26,48].因为 MCs 属于环状七肽化合物,因此推测其生物降解中至关重要的一步是环状 MCs 转化为线型 MCs 的过程. Cousins 等^[13]研究了微生物降解 MC-LR 的作用机制,推测 MC-LR 降解途径可能有两种,一种是通过裂开其中的一个肽键来开环,形成的七肽直链又通过打开肽键形成更小的多肽;另外一种是 Adda 基团侧链在生物酶的作用下共轭双键被破坏,或者是精氨酸侧链被降解. Bourne 等^[44,49]研究认为 MlrA 首先负责打开位于

Adda 与精氨酸之间的肽键,使环状的 MC-LR 变成线型的 MC-LR; MlrB 负责将线型 MC-LR 肽链上连接丙氨酸与亮氨酸的肽键进一步断裂,生成四肽化合物;而 MlrC 则负责将四肽化合物更进一步降解,产物是更小的氨基酸和多肽(图 3). Yan 等^[50]对鞘氨醇单胞菌 USTB-05 降解 MC-LR 的途径进行了研究,认为 USTB-05 菌降解 MC-LR 的第一步是打开 MC-LR 环上连接(Adda 与精氨酸的肽键,同时加上一个氢和羟基,将环状 MC-LR 转化为线型 MC-LR). 王俊峰^[43]认为 MCs 中 Adda 与精氨酸之间的肽键首先被打开的原因是因为该肽键键能比其它的要小,容易受到攻击而断裂. Shimizu 等^[51]对 *Sphingopyxis* sp.

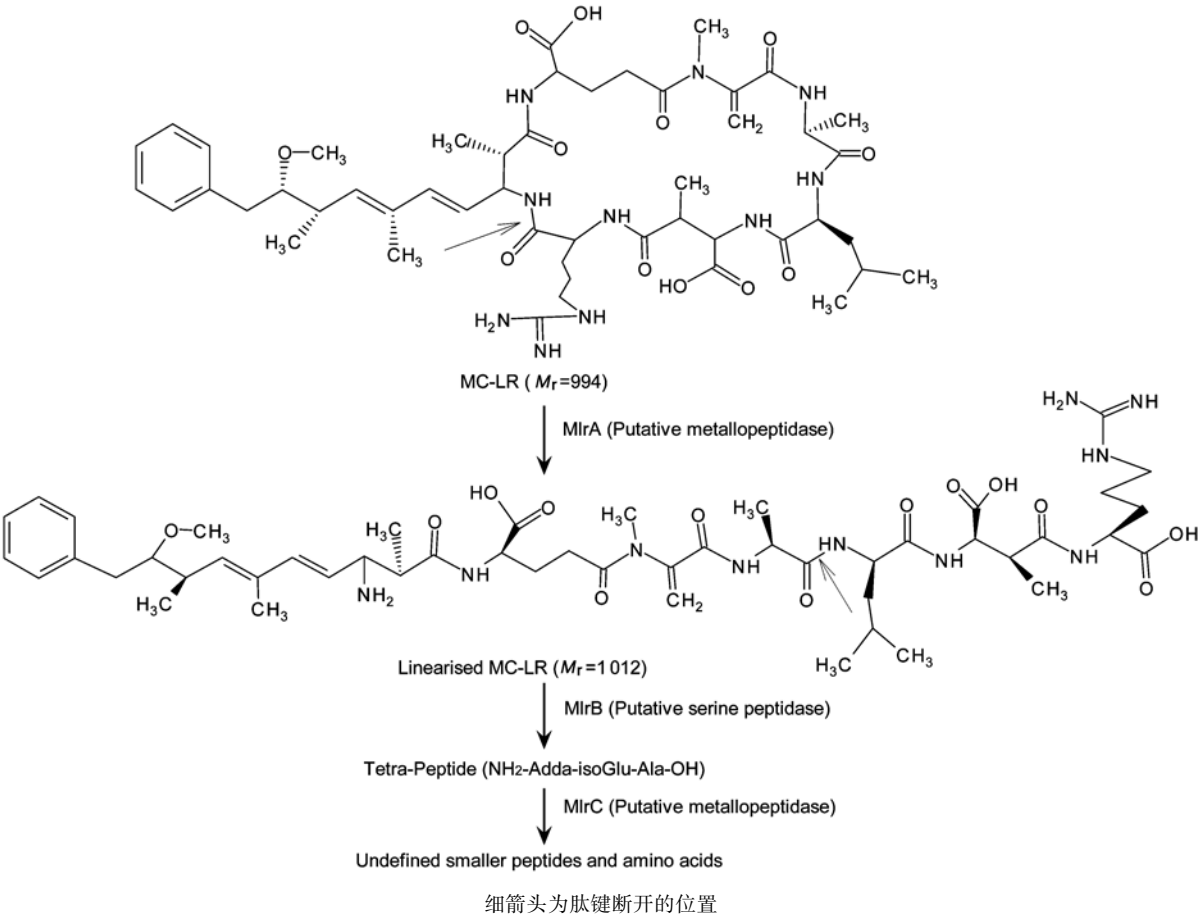


图 3 ACM-3962 菌酶催化降解 MC-LR 途径^[44,49]

Fig. 3 Proposed degradation pathway of microcystin LR by ACM-3962 strain

C-1 菌的 *mlrB* 及 *mlrC* 进行了克隆与表达,发现 *MrB* 能把线性的 MC-LR 降解成四肽,而 *MrC* 既能把线性的 MC-LR 降解成 Adda,也能把生成的四肽降解成 Adda (图 4). Hashimoto 等^[47] 却用“Marfey”方法在

B-9 菌降解 MC-LR 的过程中检测出除线性 MC-LR、四肽 (Adda-Glu-Mdha-Ala) 及 Adda 以外的其它 7 种降解产物,并推测出了 *mlr* 簇基因降解 MC-LR 与文献^[44,46] 不同的可能途径 (图 5).

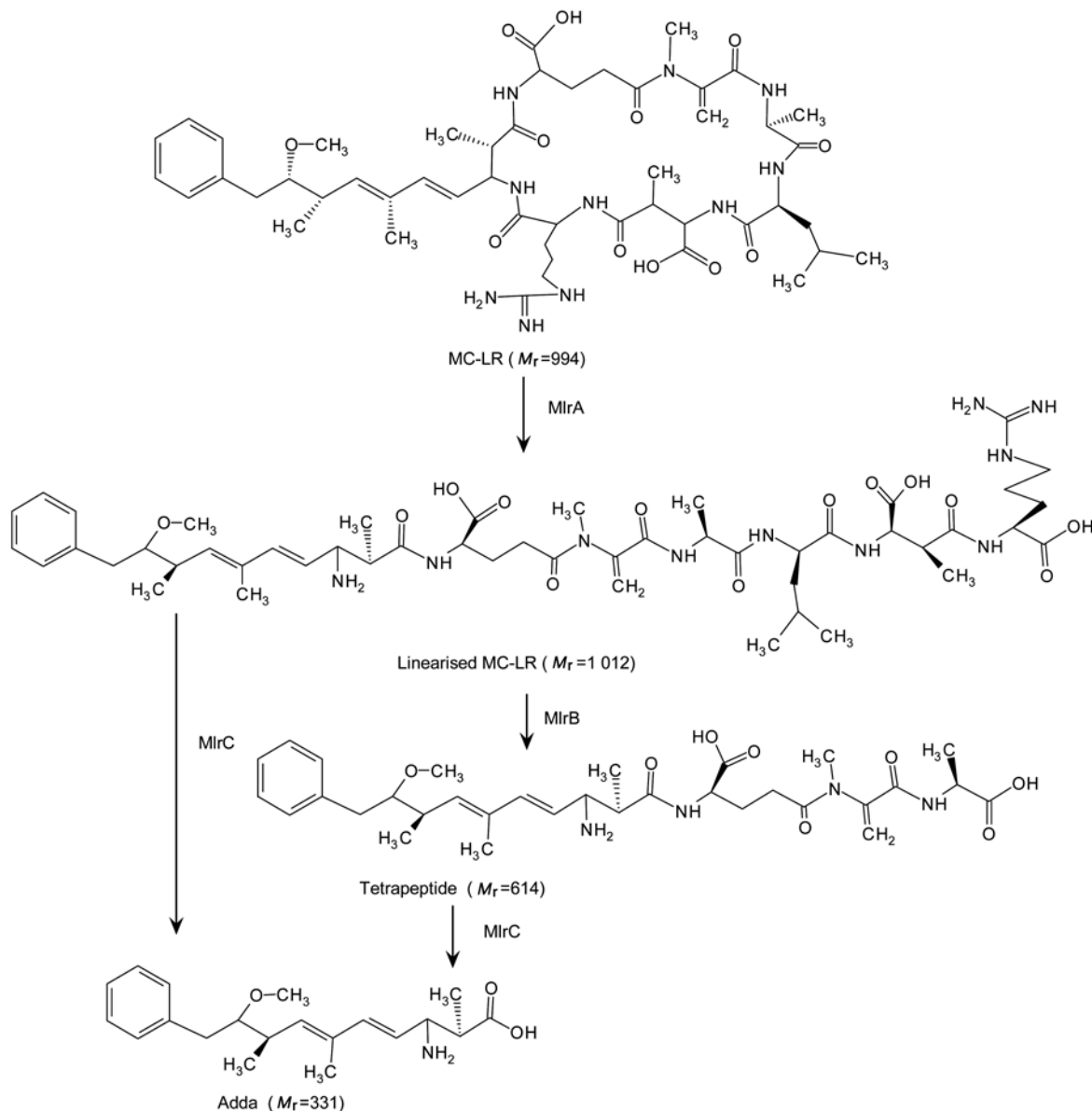


图 4 *mlr* 基因簇降解 MC-LR 的可能途径^[51]

Fig. 4 Microcystin degradation pathway mediated by the *mlr* gene cluster

闫海^[26]在筛选出高效降解 MC-RR 菌——青枯菌 (*Ralstonia solanace arum*, RS) 的基础上,对 MC-RR 的生物降解分子途径进行了推测,发现至少有 2 种酶参与了 MC-RR 的降解过程,环状 MC-RR 的 Adda 与精氨酸之间的肽键在第 1 种酶的作用下被断裂,变成线型 MC-RR,接着线型 MC-RR 在第 2 种酶的催化下进一步脱水缩合,形成具有 2 个小肽链环的线型 MC-RR 作为酶催化降解的最终产物 (图 6). 周洁等^[27]对食酸戴尔福特菌 (*Delftia*

acidovorans, DA 菌)降解 MC-RR 的途径进行了初步研究,发现有 3 种酶参与了 MC-RR 的酶促反应,分别生成了 3 个代谢产物,其中 2 个中间代谢产物和 1 个最终产物. 何宏胜等^[52]发现铜、锰、锌等金属离子对 DA 菌酶促反应均没有促进作用.

综上所述,目前国内外提出了 4 种 MCs 微生物的降解途径,但仍然还不够全面. 要探明每种微生物降解 MCs 的途径,首先要弄清楚 MCs 在降解过程中究竟产生了多少种产物,但是由于检测方法的局

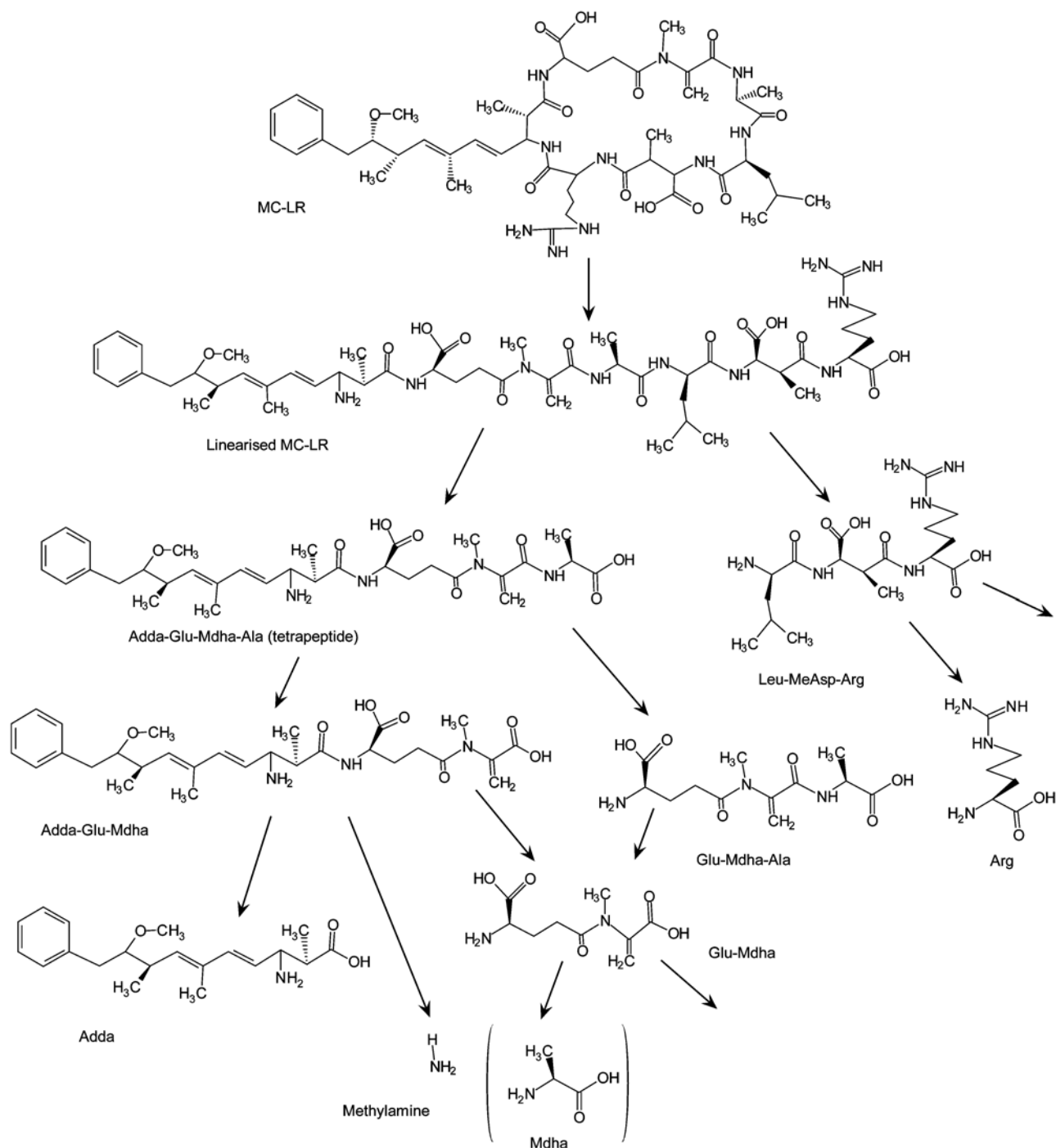
图5 B-9 菌酶催化降解 MC-LR 途径^[47]

Fig. 5 Proposed degradation pathway of microcystin LR by B-9 strain

限,目前还不能检测出所有 MCs 酶催化降解的中间和最终产物,故不能推测究竟有多少酶参与了 MCs 的降解过程,也就无从弄清微生物降解 MCs 的确切途径. 由于降解途径还只是推测,故 MCs 微生物降解的分子机制也就很难进行深入研究,因此在 MCs 的降解途径及分子机制方面仍然需做大量的研究工作.

4 展望

随着全球气候变化引起的温度升高和大量含氮磷废水排入天然水体,蓝藻水华污染的形势依然非常严峻. 虽然采用物理和化学等方法能够去除 MCs,但目前发现生物降解法是最有效的 MCs 去除方法. 虽然国内外在 MCs 的生物降解领域已经取得

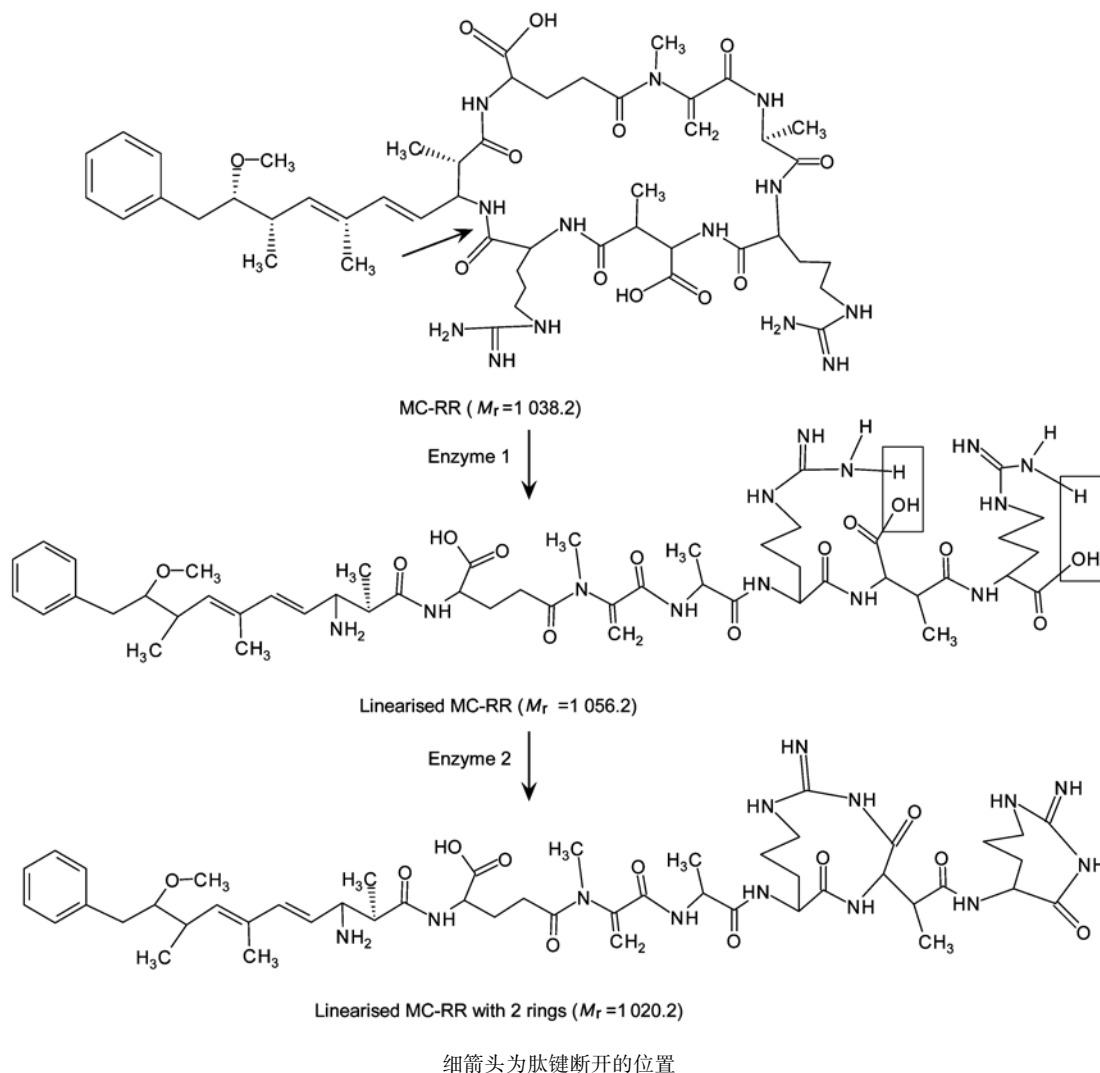


图 6 RS 菌酶催化降解 MC-RR 途径^[26]

Fig. 6 Proposed degradation pathway of microcystin RR by *Ralstonia solanace arum*

了很大的进展,但在如下方面还有待于进一步加强.

(1)MCs 的生物降解途径与分子机制 不同的微生物菌种可能采用不同的途径对 MCs 进行生物降解,因此随着高效降解 MCs 新菌种的不断发现,对于丰富和发展 MCs 生物降解途径与理论具有重要的意义.

(2)MCs 降解基因的克隆与表达 研究发现酶催化比微生物细胞降解 MCs 具有更高的速率,因此通过构建高效基因工程菌,提高降解 MCs 酶的表达量并应用,在基础和应用研究方面都具有重要的意义与价值.

(3)高效降解 MCs 菌的高密度发酵培养与应用 采用现代发酵工程技术,通过超高细胞浓度降解 MCs 菌的发酵培养控制,生产出对应的微生物制剂和酶制剂,通过投加可以高效去除水体中的 MCs. 目前,国内外尚未发现此领域的研究报道,是一项环

境微生物技术的重要发展方向.

参考文献:

- [1] Botes D P, Kruger H, Viljoen C C. Isolation and characterization of four toxins from the blue-green alga, *Microcystis aeruginosa* [J]. *Toxicon*, 1982, **20** (6): 945-954.
- [2] Hoeger S J, Hitzfeld B C, Dietrich D R. Occurrence and elimination of cyanobacterial toxins in drinking water treatment plants[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2005, **203** (3): 231-242.
- [3] Abdel-Rahman S, El-Ayouty Y M, Kamael H A. Characterization of heptapeptide toxins extracted from *Microcystis aeruginosa* (Egyptian isolate). Comparison with some synthesized analogs [J]. *International Journal of Peptide and Protein Research*, 1993, **41** (1): 1-7.
- [4] Abe T, Lawson T, Weyers J D B, et al. Microcystin-LR inhibits photosynthesis of *Phaseolus vulgaris* primary leaves: implications for current spray irrigation practice[J]. *New Phytologist*, 1996, **133** (4): 651-658.
- [5] Kurki-Helasma K, Meriluoto J. Microcystin uptake inhibits

- growth and protein phosphatase activity in mustard (*Sinapis alba* L.) seedlings[J]. *Toxicon*, 1998, **36**(12): 1921-1926.
- [6] 李效宇, 宋立荣, 刘永定. 微囊藻毒素的产生、检测和毒理学研究[J]. *水生生物学报*, 1999, **23**(5): 517-523.
- [7] 俞顺章, 赵宁, 资晓林, 等. 饮用水中微囊藻毒素与我国原发性肝癌关系的研究[J]. *中华肿瘤杂志*, 2001, **23**(2): 96-99.
- [8] WHO. Guidelines for drinking water quality (3rd ed.) [M]. Geneva: World Health Organization, 2004. 407-408.
- [9] 吴振斌, 陈辉蓉, 雷腊梅, 等. 人工湿地系统去除藻毒素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2000, **9**(2): 242-247.
- [10] 吕锡武, 稻森悠平, 丁国际. 有毒蓝藻及藻毒素生物降解的初步研究[J]. *中国环境科学*, 1999, **19**(2): 138-140.
- [11] 金丽娜, 张维昊, 郑利, 等. 滇池水环境中微囊藻毒素的生物降解[J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(2): 189-192.
- [12] 周洁, 何宏胜, 闫海, 等. 滇池底泥微生物菌群对微囊藻毒素的生物降解[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006, **7**(4): 30-34.
- [13] Cousins I T, Bealing D J, James H A, *et al.* Biodegradation of microcystin-LR by indigenous mixed bacterial populations [J]. *Water Research*, 1996, **30**(2): 481-485.
- [14] Christoffersen K, Luck S, Winding A. Microbial activity and bacterial community structure during degradation of microcystins [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2002, **27**(2): 125-136.
- [15] Hyenstrand P, Rohrkack T, Beattie K A, *et al.* Laboratory studies of dissolved radiolabelled microcystin-LR in lake water [J]. *Water Research*, 2003, **37**(14): 3299-3306.
- [16] Iinamori Y, Sugiura N, Iwami N, *et al.* Degradation of the toxic cyanobacterium *Microcystis viridis* using predaceous micro-animals combined with bacterial [J]. *Phycological Research*, 1998, **46**(S2): 37-44.
- [17] Lam A K Y, Prepas E E, Spink D, *et al.* Chemical control of hepatotoxic phytoplankton blooms: implications for human health [J]. *Water Research*, 1995, **29**(8): 1845-1854.
- [18] Jones G J, Orr P T. Release and degradation of microcystin following algicide treatment of a *Microcystis aeruginosa* bloom in a recreational lake, as determined by HPLC and protein phosphatase inhibition assay [J]. *Water Research*, 1994, **28**(4): 871-876.
- [19] Takenaka S, Watanabe M F. Microcystin LR degradation by *Pseudomonas aeruginosa* alkaline protease [J]. *Chemosphere*, 1997, **34**(4): 749-757.
- [20] Park H D, Sasaki Y, Maruyama T, *et al.* Degradation of the cyanobacterial hepatotoxin microcystin by a new bacterium isolated from a hypertrophic lake [J]. *Environmental Toxicology*, 2001, **16**(4): 337-343.
- [21] Ishii H, Nishijima M, Abe T. Characterization of degradation process of cyanobacterial hepatotoxins by a gram-negative aerobic bacterium [J]. *Water Research*, 2004, **38**(11): 2667-2676.
- [22] Tsuji K, Asakawa M, Anzai Y, *et al.* Degradation of microcystins using immobilized microorganism isolated in an eutrophic lake [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(1): 117-124.
- [23] Saito T, Itayama T, Kawauchi Y, *et al.* Biodegradation of microcystin by aquatic bacteria [A]. In: 3rd Int. Symp. Strategies Toxic Algae Control Lakes Reserv. Establ. Int. Network [C]. Wuxi: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2003. 455-460.
- [24] Valeria A M, Ricardo E J, Stephan P, *et al.* Degradation of Microcystin-RR by *Sphingomonas* sp. CBA4 isolated from San Roque reservoir (Córdoba - Argentina) [J]. *Biodegradation*, 2006, **17**(5): 447-455.
- [25] Ho L, Hoefel D, Saint C P, *et al.* Isolation and identification of a novel microcystin-degrading bacterium from a biological sand filter [J]. *Water Research*, 2007, **41**(20): 4685-4695.
- [26] 闫海. 微囊藻毒素的产生与生物降解[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002.
- [27] 周洁, 闫海, 何宏胜, 等. 食酸戴尔福特菌 USTB04 生物降解微囊藻毒素的活性研究 [J]. *科学技术与工程*, 2006, **6**(2): 166-170.
- [28] Wang J F, Wu P F, Chen J, *et al.* Biodegradation of microcystin-RR by a new isolated *Sphingopyxis* sp. USTB-05 [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2010, **18**(1): 108-112.
- [29] 宦海琳, 韩岚, 李建宏, 等. 五株微囊藻毒素降解菌的分离与鉴定 [J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(2): 184-188.
- [30] 刘海燕, 宦海琳, 汪育文, 等. 微囊藻毒素降解菌 S3 的分子鉴定及其降解毒素的研究 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(7): 1145-1150.
- [31] 苑宝玲, 李艳波, 赵艳琳, 等. 高效藻毒素降解菌的筛选及其降解藻毒素的效能研究 [J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2005, **21**(3): 48-51.
- [32] Chen J, Hu L B, Zhou W, *et al.* Degradation of microcystin-LR and RR by a *Stenotrophomonas* sp. strain EMS isolated from Lake Taihu, China [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2010, **11**(3): 896-911.
- [33] Maruyama T, Kato K, Yokoyama A, *et al.* Dynamics of microcystin-degrading bacteria in mucilage of *Microcystis* [J]. *Microbial Ecology*, 2003, **46**(2): 279-288.
- [34] Ou D Y, Song L R, Gan N Q, *et al.* Effects of microcystins on and toxin degradation by *Poteroiochromonas* sp. [J]. *Environmental Toxicology*, 2005, **20**(3): 373-380.
- [35] Lemes G A F, Kersanach R, Pinto L da S, *et al.* Biodegradation of microcystins by aquatic *Burkholderia* sp. from a South Brazilian coastal lagoon [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, **69**(3): 358-365.
- [36] Manage P M, Edwards C, Singh B K, *et al.* Isolation and identification of novel microcystin-degrading bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(21): 6924-6928.
- [37] 王光云, 吴涓, 谢维, 等. 微囊藻毒素降解菌的筛选、鉴定及其胞内粗酶液对藻毒素 MC-LR 的降解 [J]. *微生物学报*, 2012, **52**(1): 96-103.
- [38] 刘凯英, 薛罡, 程起跃, 等. 微囊藻毒素-RR 高效降解菌的

- 分离鉴定及降解特性[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(4): 22-26.
- [39] Jiang Y G, Shao J H, Wu X Q, *et al.* Active and silent members in the *mlr* gene cluster of a microcystin-degrading bacterium isolated from Lake Taihu, China [J]. FEMS Microbiology Letters, 2011, **322**(2): 108-114.
- [40] Eleuterio L, Batista J R. Biodegradation studies and sequencing of microcystin-LR degrading bacteria isolated from a drinking water biofilter and a fresh water lake [J]. Toxicon, 2010, **55**(8): 1434-1442.
- [41] 苑宝玲, 陈彩云, 李云琴, 等. 假单胞菌胞内酶粗提液对藻毒素 MCLR 的降解[J]. 环境化学, 2009, **28**(6): 854-858.
- [42] 陈彩云, 苑宝玲, 李艳波, 等. 假单胞菌降解微囊藻毒素的效能及酶作用机理[J]. 水生生物学报, 2009, **33**(5): 951-956.
- [43] 王俊峰. 鞘氨醇单胞菌 USTB-05 降解微囊藻毒素 RR 第一个基因的克隆与表达[D]. 北京: 北京科技大学, 2011. 104-105.
- [44] Bourne D G, Riddles P, Jones G J, *et al.* Characterisation of a gene cluster involved in bacterial degradation of the cyanobacterial toxin microcystin LR [J]. Environmental Toxicology, 2001, **16**(6): 523-534.
- [45] Saito T, Okano K, Park H D, *et al.* Detection and sequencing of the microcystin LR-degrading gene, *mlrA*, from new bacteria isolated from Japanese lakes [J]. FEMS Microbiology Letters, 2003, **229**(2): 271-276.
- [46] Shimizu K, Masada H, Okano K, *et al.* How microcystin-degrading bacteria express microcystin degradation activity[J]. Lakes & Reservoirs: Research & Management, 2011, **16**(3): 169-178.
- [47] Hashimoto E H, Kato H, Kawasaki Y, *et al.* Further investigation of microbial degradation of microcystin using the advanced marfey method[J]. Chemical Research in Toxicology, 2009, **22**(2): 391-398.
- [48] 徐亚同, 史家梁, 张明. 污染控制微生物工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. 93-101.
- [49] Bourne D G, Jones G J, Blakeley R L, *et al.* Enzymatic pathway for the bacterial degradation of the cyanobacterial cyclic peptide toxin microcystin LR [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, **62**(11): 4086-4094.
- [50] Yan H, Wang H S, Wang J F, *et al.* Cloning and expression of the first gene for biodegrading microcystin LR by *Sphingopyxis* sp. USTB-05 [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(10): 1816-1822.
- [51] Shimizu K, Masada H, Okano K, *et al.* Enzymatic pathway for biodegrading microcystin LR in *Sphingopyxis* sp. C-1 [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2012, **114**(6): 630-634.
- [52] 何宏胜, 闫海, 周洁, 等. 筛选菌种酶催化降解微囊藻毒素的特点[J]. 环境科学, 2006, **27**(6): 1171-1175.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行