

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, 武丽娟, 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, 郭玉龙, 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, 陈小峰, 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)	

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¹, 马俊伟^{1*}, 刘彦忠¹, 杨娅¹, 岳东北², 王洪涛²

(1. 北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 从活性污泥中筛选分离得到可产生微生物絮凝剂的克雷伯氏菌 C11, 对微生物絮凝剂 M-C11 的培养基碳源、氮源、无机盐等条件进行优化. 探讨将微生物絮凝剂应用于活性污泥脱水时, pH、CaCl₂ 投加量、M-C11 投加量等因素对污泥脱水效果的影响, 并与常规化学絮凝剂的调理效果对比分析. 结果表明, 絮凝剂 M-C11 生产的最优培养条件: 30 g·L⁻¹ 葡萄糖、2 g·L⁻¹ NaNO₃、0.5 g·L⁻¹ MgSO₄ 分别作培养基碳源、氮源、无机盐, 在 37℃, 150 r·min⁻¹ 振荡培养 48 h, 絮凝活性高达 91.70%. M-C11 在 pH 为 4~8、温度为 20~60℃ 的范围内具有良好的絮凝稳定性. 克雷伯氏菌产絮凝剂 M-C11 应用于调理污泥脱水, 在 pH 为 6、3 mL M-C11、4 mL CaCl₂ (1%) 的最佳投加组合下, 调理后污泥比阻 (SRF) 和含水率分别由原泥的 $11.64 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 98.86%, 降低至 $4.66 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 83.74%, 调理后的污泥脱水效果显著优于硫酸铝、聚合氯化铝 (PAC) 等无机絮凝剂. 微生物絮凝剂具有成本低廉、易生物降解、无二次污染等优点, 且对污泥 pH、盐度等条件具有良好的适应性, 可作为新型高效的污泥脱水调理剂.

关键词: 微生物絮凝剂; 克雷伯氏菌; 优化培养; 絮凝稳定性; 污泥脱水

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1183-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.052

Optimized Cultivation of a Biofloculant M-C11 Produced by *Klebsiella pneumoniae* and Its Application in Sludge Dewatering

LIU Jie-wei¹, MA Jun-wei¹, LIU Yan-zhong¹, YANG Ya¹, YUE Dong-bei², WANG Hong-tao²

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A biofloculant-producing *Klebsiella pneumoniae* strain C11 was screened out from activated sludge and the optimal medium conditions for the production of microbial flocculant M-C11 were determined. The biofloculant was used in activated sludge dewatering and compared with conventional chemical conditioners. Effects of pH, CaCl₂ dosages and M-C11 dosages on sludge dewaterability were investigated. The optimized conditions for M-C11 production indicated that the optimal medium carbon, nitrogen, metal ion were 30 g·L⁻¹ glucose, 2 g·L⁻¹ NaNO₃ and 0.5 g·L⁻¹ MgSO₄, respectively. The flocculating rate with kaolin suspension was as high as 91.70%, when incubated in a rotary shaker at 150 r·min⁻¹ and 37℃ for 48 h. The microbial flocculant showed excellent pH and thermal stability over a pH range of 4-8 and a temperature range of 20-60℃. Then the biofloculant M-C11 produced by *Klebsiella pneumoniae* was employed to enhance the sludge dewaterability. The sludge resistance to filtration (SRF) and cake moisture decreased from $11.64 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ and 98.86% to $4.66 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ and 83.74%, respectively. Sludge dewatering performance was more significantly improved with the optimal conditioning dosages (pH=6, 3 mL M-C11, 4 mL CaCl₂), than inorganic flocculating reagents such as aluminum sulfate and polymeric aluminum chloride (PAC). The microbial flocculant has advantages over traditional sludge conditioners for its lower cost, benign biodegradability and ignorable secondary pollution. In addition, it was favorably adapted to the sludge pH and salinity. The novel biofloculant could be used as a potential conditioner for sludge dewatering.

Key words: biofloculant; *Klebsiella pneumoniae*; optimized cultivation; flocculating stability; sludge dewatering

伴随活性污泥法在工业和城市污水处理中的应用, 废弃活性污泥的处置日益成为严峻问题. 污泥含水率高是制约其减量化、资源化的关键, 采取物理或化学手段调理可改善污泥脱水性能^[1]. 已有研究的电解^[2]、酸处理^[3]、冷融^[4]等物理方法能耗成本过高, 化学调理剂 (铝盐、聚丙烯酰胺^[5]、表面活性剂^[6]等) 会引发二次污染和生态健康风险等问题^[7]. 微生物絮凝剂 (microbial flocculants, MBF) 指

微生物代谢过程中分泌的具有絮凝活性的天然高分子物质, 包括酸性多糖、蛋白质、脂质和核酸等成分, 由于其具有成本低廉、高效安全等优势, 成为受

收稿日期: 2013-07-29; 修订日期: 2013-10-29

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07313-002)

作者简介: 刘杰伟 (1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废物处置与资源化, E-mail: liujw123@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: jwma2003@163.com

到普遍关注的环境友好型水处理剂^[8]。

诸多文献借助光谱、色谱等分析化学手段,研究微生物絮凝剂的纯化、官能团及组分鉴定,根据絮凝剂官能团、活性组分等对絮凝机制作出推测^[9, 10],或以 Logistic 方程等数学模型拟合为切入点,研究絮凝剂发酵动力学特征^[11, 12],有关微生物絮凝剂活性碳源、氮源、无机盐优化的研究相对较少。国内外报道的絮凝剂产生菌多分离自土壤、湖泊、废水等环境介质^[13],提取纯化后的微生物絮凝剂在重金属废水、厌氧废水、低温废水、印染废水等应用均达到良好的处理效果^[13~16],但在调理污泥脱水稳定性和效果方面缺乏深入研究。Bartley 等^[17]学者证实,盐度与产絮菌生长代谢和胞内脂质合成密切相关,活性污泥的高盐度会间接影响微生物絮凝剂分泌过程和絮凝效果^[18]。分离自其它环境介质的微生物絮凝剂对污泥盐度、pH 等条件适应性差,会制约污泥絮凝脱水性能的改善,目前鲜有直接从活性污泥中筛选微生物絮凝剂,并将其应用在调理污泥脱水的报道。

本研究从活性污泥中筛选得到可产生微生物絮凝剂的克雷伯氏菌 C11,优化微生物絮凝剂 M-C11 的培养碳源、氮源、无机盐等条件,探讨了 pH、CaCl₂ 投加量、M-C11 投加量对污泥脱水效果的影响,并与常规化学絮凝剂的调理效果进行比较。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

试剂:牛肉膏、蛋白胨、琼脂、酵母浸粉、尿素、蔗糖、葡萄糖、淀粉、高岭土、硫酸铝、聚合氯化铝(PAC)、阳离子型聚丙烯酰胺(CPAM)等。

仪器:高压蒸汽灭菌锅,无菌超净台,Sanyo MIR-154 生化培养箱,LXJ-IIB 离心机,THZ-D 台式恒温振荡器,HH-2 数显恒温水浴锅,HJ-6B 磁力搅拌器,海尔 BCD-256KFB 冰箱,Sartorius BS-124S 分析天平,Leici PHS-3C 型 pH 计,DHG-9030A 型电热恒温鼓风干燥箱,Shimadzu UV-2550 紫外可见分光光度计,FEI Quanta 200 型扫描电镜。

1.2 菌种来源及筛选

污泥样品采自江苏省某污水处理厂浓缩池,污泥稀释 10⁴~10⁸ 倍后,用涂布平板法富集培养微生物,经反复分离、纯化和筛选得絮凝剂产生菌 C11,其生长代谢过程中产生的微生物絮凝剂命名为 M-C11。菌种鉴定采用 16S rDNA 扩增及序列测定,菌体形态在 FEI Quanta 200 型扫描电镜下观察。

1.3 培养基组分优化

培养基组成:KCl 0.5 g·L⁻¹、NaNO₃ 2 g·L⁻¹、FeSO₄ 0.01 g·L⁻¹、K₂HPO₄ 1 g·L⁻¹、MgSO₄ 0.5 g·L⁻¹、蔗糖 30 g·L⁻¹,120℃ 高压蒸汽灭菌 30 min。菌体接种至装有 50 mL 培养基的锥形瓶,置于 37℃ 恒温摇床发酵,150 r·min⁻¹ 的转速下振荡培养 48 h。发酵液 4 000 r·min⁻¹ 离心 30 min,上清液即为液体微生物絮凝剂。

1.4 絮凝活性测定

参考文献^[19]的测定方法,将过 60 目筛的 0.4 g 高岭土、5 mL 的 CaCl₂ (1%) 溶液和 2 mL 发酵上清液混合于 250 mL 烧杯,加去离子水至 100 mL,磁力搅拌器 400 r·min⁻¹ 快搅 1 min,150 r·min⁻¹ 慢搅 5 min,转移至 100 mL 量筒内静置 5 min。在紫外分光光度计 550 nm 波长下测定上层清液吸光度(optical density, D_{550}),选取新鲜培养基代替发酵液,测定处理后的高岭土悬浊液吸光度作为对照(D'_{550})。絮凝率(flocculating rate, Fr)计算公式如式(1):

$$Fr = \frac{D'_{550} - D_{550}}{D'_{550}} \times 100\% \quad (1)$$

式中,Fr 为絮凝率,% ; D_{550} 为发酵上清液处理后高岭土悬浊液的吸光度; D'_{550} 为新鲜培养基处理后高岭土悬浊液的吸光度。

1.5 污泥脱水实验

研究微生物絮凝剂调理污泥脱水的效果,考察 pH 值,CaCl₂ 投加量和 M-C11 投加量对污泥脱水性能的影响,并与常规有机和无机调理剂的脱水效果进行对比。选取污泥比阻(specific resistance in filtration, SRF)、泥饼含水率和过滤曲线表征污泥脱水效果。SRF 采用污泥比阻仪(图 1)测定,含水率采用重量法测定,过滤曲线以真空抽滤的时间(t)为横坐标,以对应的滤液体积(V)为纵坐标,可有效表征污泥脱水效果^[20]。

25 mL 待测污泥样品投加絮凝剂后,磁力搅拌器 400 r·min⁻¹ 快搅 1 min,150 r·min⁻¹ 慢搅 5 min,移至污泥比阻测定仪,在恒定真空度 0.05 MPa 的条件下过滤,记录过滤时间 t 和相应的滤液体积 V 。污泥比阻表示恒定压力下过滤时,单位质量污泥在单位过滤面积上的阻力。污泥比阻愈大,过滤性能愈差,污泥比阻计算见式(2):

$$SRF = \frac{2bPA^2}{\mu C} \quad (2)$$

式中, P 为过滤压强, $N \cdot m^{-2}$; A 为过滤面积, m^2 ; μ 为滤液黏度, $N \cdot s \cdot m^{-2}$; b 为过滤方程 $t/V = bV + a$

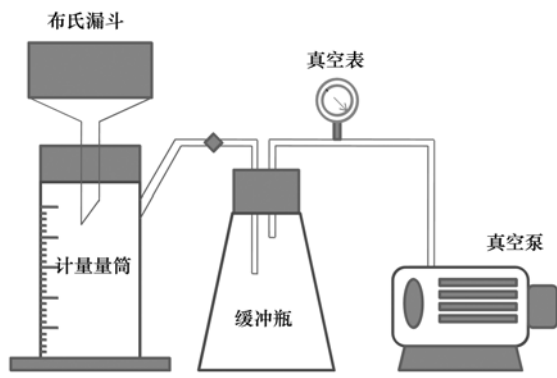


图1 污泥比阻测定装置示意

Fig. 1 Device for examining specific resistance in filtration (SRF)

所示直线的斜率, t 为过滤时间, s ; V 为滤液体积, m^3 ; C 为单位体积滤液在过滤介质上截留的干固体重量, $kg \cdot m^{-3}$, $1/C = C_i / (100 - C_i) - C_f / (100 - C_f)$; C_i 为原泥含水率, %; C_f 为抽滤后泥饼含水率, %.

2 结果与讨论

2.1 菌种分离与鉴定

微生物絮凝剂产生菌筛选分为初筛和复筛两个阶段,初筛得到 4 株高絮凝活性的菌种 A3、A12、C11、C16,再对其进行复筛的结果见图 2. 不同菌种产生的絮凝剂活性和稳定性差异明显,其中菌株 A3、A12 对高岭土悬浊液絮凝效果不明显 ($Fr < 40\%$). C11 菌种在第 1 周时絮凝率为 85.05%,第 2、3 周时絮凝率亦保持在 75% 以上,说明菌株 C11 生产的 M-C11 絮凝活性随时间变化稳定;相比之下,C16 菌种的絮凝稳定性差,菌株变异性强,不适合絮凝剂产生菌.

高活性絮凝剂产生菌 C11 在琼脂培养基上呈乳白色菌落,过氧化氢酶反应呈阳性. 扫描电镜下

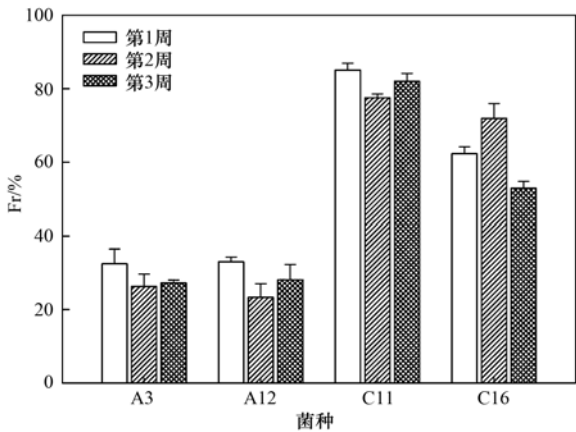


图2 絮凝剂产生菌种的分离筛选

Fig. 2 Screening for bioflocculant-producing strains

的 C11 菌体形态为规则的短杆状 (图 3), 经 16S rDNA 基因序列及菌株形态, 菌株鉴定为克雷伯氏菌 (*Klebsiella pneumoniae*), GenBank 序列号为 CP000647, 同源度高达 99%.

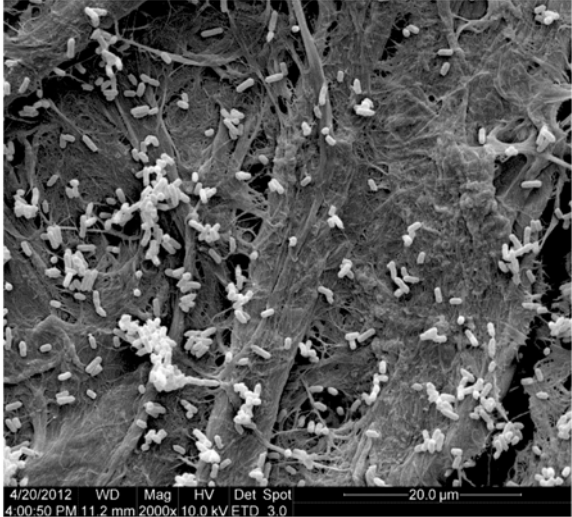


图3 絮凝剂产生菌株 C11 的扫描电镜 (SEM) 形态

Fig. 3 Scanning electron microscope (SEM) image of strain C11

2.2 M-C11 培养条件优化

将 1 mL 菌株 C11 的发酵液接种至 50 mL 不同组分的培养基中,振荡培养后以絮凝率 (Fr) 和吸光度 (D_{550}) 为指标,分别考察培养基碳源、氮源、无机盐等成分对 M-C11 絮凝活性的影响.

2.2.1 碳源

分别以 $30 g \cdot L^{-1}$ 葡萄糖、淀粉、复合碳源 (葡萄糖: 淀粉 = 1: 1)、牛肉膏替代 1.3 节培养基中的蔗糖组分,研究碳源对 M-C11 培养和絮凝活性的影响,空白未投加碳源,不同碳源培养条件下 M-C11 絮凝效果见图 4. 培养基碳源促进微生物细胞生长,为代谢产物合成提供能源. 在葡萄糖、蔗糖为碳源的培养条件下,M-C11 保持较高的絮凝活性;在牛肉膏、淀粉、复合碳源为碳源时絮凝效果不显著. 细胞外分布的多糖水解酶较少,葡萄糖是易分解的单糖,其作为克雷伯氏菌生长代谢的碳源时,产生的 MBF 絮凝活性最高达 86.95%. 与芽孢杆菌产絮凝剂 ZS-7 的最佳培养碳源不同^[16], 后者的最佳碳源淀粉是相对不易分解的多糖. 而淀粉作 M-C11 碳源时絮凝活性较低,这是因为部分淀粉降解产生葡萄糖酸,导致发酵液酸化,抑制细菌生长代谢过程. 培养基碳源优化结果表明,克雷伯氏菌产生的絮凝剂活性与碳源的可分解利用性密切相关.

2.2.2 氮源

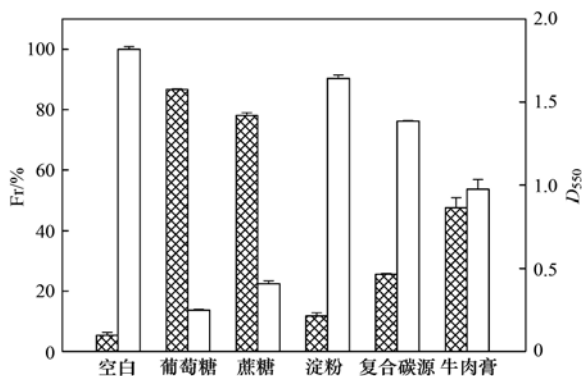


图4 不同碳源培养基生产的 M-C11 絮凝活性

Fig. 4 Flocculating activity in medium different carbon sources

分别以 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NH_4Cl 、酵母浸粉、尿素替代 1.3 节培养基中的 NaNO_3 组分,研究氮源对 M-C11 培养和絮凝活性的影响。微生物絮凝剂多由多糖、糖蛋白、核酸等组成,培养基氮源为微生物絮凝剂合成分泌提供营养。如图 5 所示, M-C11 絮凝活性从高到低分别为: $\text{NaNO}_3 >$ 酵母浸粉 $>$ 尿素 $>$ $\text{NH}_4\text{Cl} >$ 空白, NaNO_3 作为氮源时絮凝活性高于 NH_4Cl , 说明硝态氮比铵态氮更易被菌株吸收利用。克雷伯氏菌 C11 对有机氮源(酵母浸粉、尿素)吸收不完全,絮凝剂 M-C11 的合成受抑制,导致有机氮培养下絮凝活性低于硝态氮,与周礼等^[21]的研究结论不同。最佳氮源 NaNO_3 培养条件下, M-C11 絮凝活性为 82.63%。

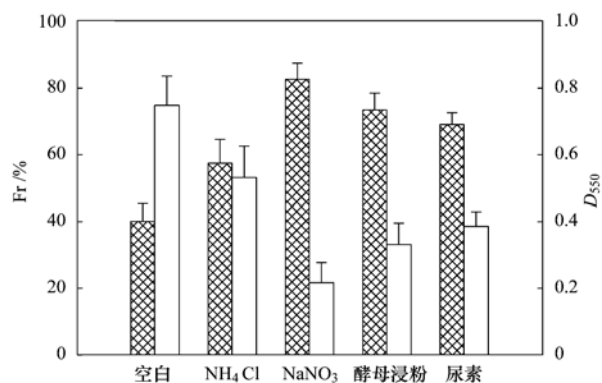


图5 不同氮源培养基生产的 M-C11 絮凝活性

Fig. 5 Flocculating activity in medium with different nitrogen sources

2.2.3 无机盐

分别以 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 、 CaCl_2 、 FeSO_4 、 CuSO_4 、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 替代 1.3 节培养基中的 MgSO_4 组分,研究无机盐对 M-C11 培养和絮凝活性的影响(图 6)。带正电荷的无机盐能中和悬浮颗粒表面负电荷,以及絮凝剂分子羧基等基团上的负电荷,减弱颗粒间的静电斥力,促进絮体形成^[22]。培养基不同阳离子

类型对 M-C11 合成分泌量和絮凝活性影响不同,除 Cu^{2+} 对絮凝剂的产生和活性具有一定抑制作用外,其它无机盐类型均可促进絮凝率的提高。按絮凝率从高到低排序: $\text{MgSO}_4 > \text{CaCl}_2 > \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 > \text{NaCl} > \text{FeSO}_4 >$ 空白 $> \text{CuSO}_4$ 。 MgSO_4 易于被克雷伯氏菌吸收合成微生物絮凝剂^[23],是促进絮凝剂 M-C11 合成和分泌的最佳无机盐, CaCl_2 次之,作培养基无机盐时絮凝率 $\text{Fr} = 81.23\%$ 。已有研究证实,无机盐对絮凝活性改善效果还与阳离子价态、离子强度等因素有关,且与一价、三价离子相比,二价阳离子可更有效地促进絮凝剂对高岭土颗粒的吸附^[24]。

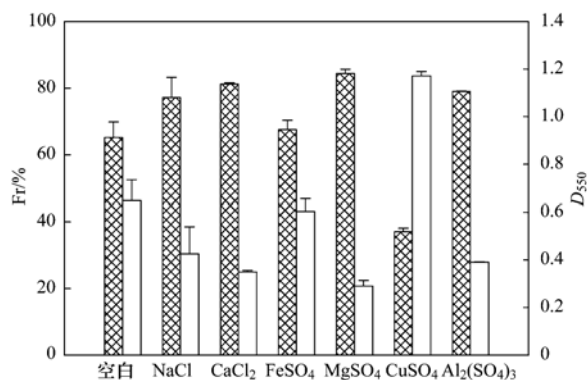


图6 不同无机盐培养基生产的 M-C11 絮凝活性

Fig. 6 Flocculating activity by different medium metal ions

2.3 M-C11 絮凝稳定性

在葡萄糖、 NaNO_3 、 MgSO_4 分别作为碳源、氮源、无机盐的培养条件下, M-C11 应用于处理不同 pH、不同温度的高岭土悬浊液,以考察 M-C11 絮凝稳定性。

2.3.1 pH 稳定性

酸碱度能够改变颗粒表面的电荷性质和氧化还原电位,影响酶促反应速率和菌体对胞外营养物质的吸收^[25]。不同菌株产生的絮凝剂对 pH 值的耐性范围不同,莫海威芽孢杆菌产絮凝剂 pH 耐性范围偏中性($\text{pH } 5 \sim 9$)^[22],罗思氏菌属絮凝剂 MBF4-13 仅在 pH 为 7~9 的耐性范围内絮凝率保持 85% 以上^[13]。中性条件下 Ca^{2+} 对絮凝作用的调理效果最明显^[26],絮凝剂 M-C11 的 pH 稳定性实验表明,克雷伯氏菌产絮凝剂 M-C11 处理高岭土悬浊液时,在 pH 4~8 的范围内活性在 82.77% 以上,且 pH = 7 时的絮凝率最高 ($\text{Fr} = 91.70\%$),在 $\text{pH} < 4$ 的强酸性溶液中絮凝率低,由于 H^+ 浓度过高会改变酶蛋白的解离度和荷电性质,抑制酶蛋白活性及酶促反应的进行,干扰微生物生长代谢过程中絮凝剂的分泌量和絮凝效果^[27]; $\text{pH} > 8$ 时 M-C11 絮凝率迅速

降低,大量 OH^- 存在造成悬浊颗粒表面负电荷密度升高,阻碍 Ca^{2+} 对 M-C11 和高岭土颗粒的电中和作用,导致高岭土颗粒分散程度提高,阻碍絮体凝聚沉降。

2.3.2 热稳定性

M-C11 置于 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 恒温水浴加热 30 min,测定其絮凝率(图 7),在 $20 \sim 60^\circ\text{C}$ 范围热稳定性良好,可能与 M-C11 以多糖为主的组分有关;温度高于 60°C 的条件下,微生物絮凝剂分子中的蛋白质类物质发生降解,且部分蛋白质变性失活^[26],分子表面可吸附高岭土颗粒的结合位点减少,导致絮凝活性变差,与多种 MBF 热稳定性有类似规律^[22, 28]。

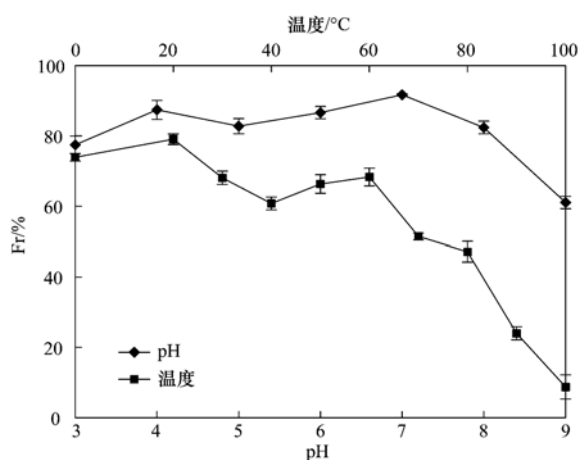


图 7 微生物絮凝剂的 pH 和热稳定性

Fig. 7 The pH and thermal stability of biofloculant

2.4 M-C11 调理对污泥脱水性能的影响

2.4.1 pH 值对污泥脱水的影响

调节污泥至不同 pH 值($2 \sim 11$),投加 3 mL M-C11 和 3 mL CaCl_2 (1%),研究 pH 值对微生物絮凝剂调理污泥效果的影响。如图 8 所示,投加微生物絮凝剂调理可有效改善脱水性能,pH 在 $4 \sim 8$ 的范围内污泥比阻值低,与 M-C11 处理高岭土悬浊液的 pH 耐受性范围一致。在 pH 为 6 时污泥比阻(SRF)和含水率分别降至 $5.95 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 87.93%,弱酸性条件下污泥脱水效果显著,可能是由于少量的氢离子存在,可中和污泥絮体表面的负电荷,减弱污泥颗粒间静电斥力并促进絮体稳定性^[29],还可能与弱酸性 pH 条件下污泥阳离子(Al^{3+} 、 Fe^{3+})的溶解促进絮凝效果有关^[30],但在强酸性条件下($\text{pH} < 4$),阳离子 H^+ 浓度过高反而阻碍絮凝脱水效果的改善。碱性条件下污泥脱水效果有一定程度的下降,微生物絮凝剂 M-C11 分子上的 $-\text{COO}-$ 、 $-\text{CONH}_2$ 、 $-\text{NH}-$ 等活性基团通过氢键和范德

华力吸附污泥颗粒,形成絮体凝聚沉降,pH 值过高导致羟基自由基数量降低,阻碍污泥脱水性能的提高^[31]。

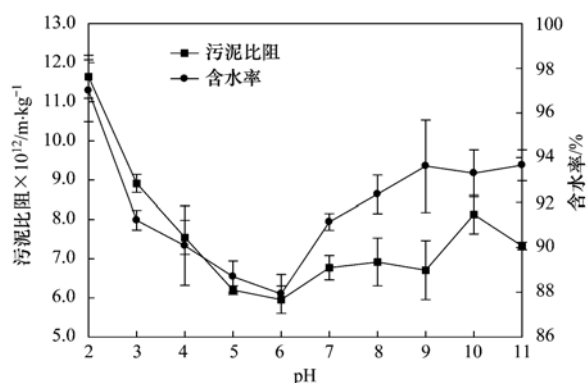


图 8 不同 pH 条件下污泥脱水效果

Fig. 8 Sludge dewatering performance at different pH

2.4.2 CaCl_2 投加量对污泥脱水性能的影响

调节污泥 pH 为 6,投加 5 mL 絮凝剂调理污泥,相对未投加 CaCl_2 的对照组,助凝剂 CaCl_2 可通过压缩双电层和电中和作用,减弱颗粒间静电斥力^[32]。絮凝剂分子中蛋白质浓度上升,为 Ca^{2+} 提供吸附结合位点,促进污泥絮体间的架桥作用^[33]。过滤曲线显示 CaCl_2 的最佳投加量为 4 mL,在 $0 \sim 4$ mL 投加量范围内,SRF 和含水率呈不断下降趋势并在 4 mL 时达到架桥平衡(图 9、图 10),SRF 由 0 mL 投加量时的 $11.64 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 4 mL 时的 $6.94 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$;此后随投加量增加污泥脱水性能变差,由于 Ca^{2+} 投加量过高反而导致体系正电荷浓度上升,脱稳后的悬浮污泥颗粒和絮凝剂分子重新分散稳定,阻碍污泥脱水效果的进一步提高^[34],与文献[35, 36]的研究结论一致。

2.4.3 M-C11 投加量对污泥脱水影响

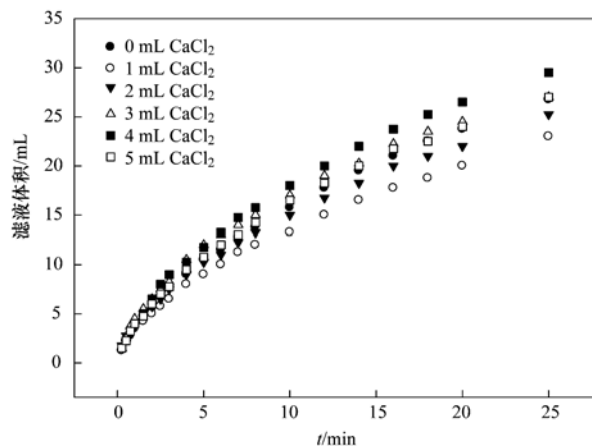
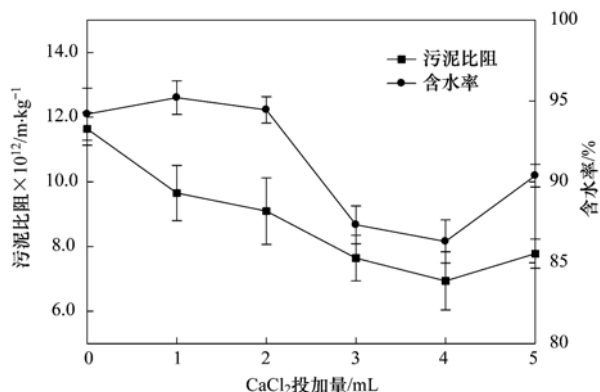


图 9 CaCl_2 不同投加量下污泥过滤曲线

Fig. 9 Sludge filtrate curve at different CaCl_2 dosages

图 10 CaCl_2 不同投加量下污泥脱水效果Fig. 10 Sludge dewatering performance at different CaCl_2 dosages

调节污泥 pH 为 6, 投加 4 mL CaCl_2 和 0 ~ 5 mL 絮凝剂调理污泥, 图 11 过滤曲线在 3 mL 的 M-C11 投加量下滤液体积最大, 与图 12 中污泥比阻和含水率变化规律类似。微生物絮凝剂分子含带负电官能团, 通过范德华力和氢键作用压缩污泥表面双电层, 使表面胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 脱落^[37], 释放部分结合水并提高活性污泥脱水效果。MBF 为污泥颗粒提供吸附结合位点^[38], 投加量不足影响吸附架桥的效果。污泥比阻和泥饼含水率均呈先下降而后上升的趋势, 3 mL M-C11 投加量条件下, 污泥比阻和含水率分别由原泥的 $11.64 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 98.86%, 降低至 $4.66 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 83.74%, 污泥脱水性能显著改善。此后随着投加量增加, 污泥比阻和含水率有所上升, 这是因为过多带负电的絮凝剂分子存在, 使污泥颗粒间的静电斥力和竞争吸附加强, 不利于絮体稳定和沉淀^[39]。

2.4.4 M-C11 与其他絮凝剂对改善污泥脱水效果的比较

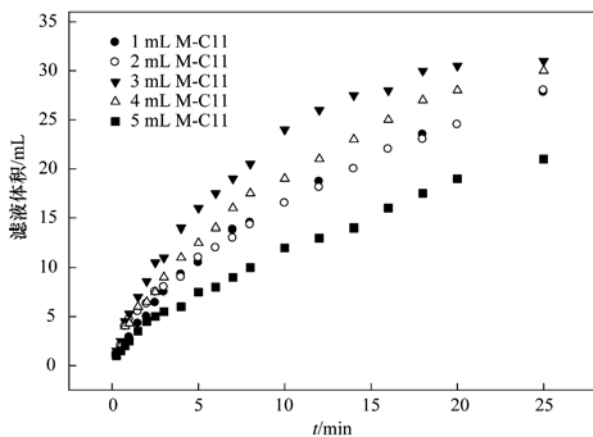


图 11 M-C11 不同投加量下污泥过滤曲线

Fig. 11 Sludge filtrate curve at different M-C11 dosages

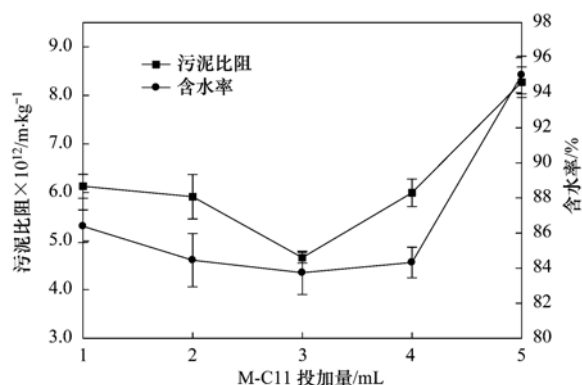


图 12 M-C11 不同投加量下污泥脱水效果

Fig. 12 Sludge dewatering performance at different M-C11 dosages

图 13、图 14 为微生物絮凝剂 M-C11 和化学絮凝剂在调理污泥脱水方面的对比, 调节活性污泥 pH 为 6, 加入硫酸铝、聚合氯化铝 (PAC)、阳离子型聚丙烯酰胺 (CPAM) 和微生物絮凝剂 M-C11 调理, 均可不同程度地改善污泥脱水性能。各类污泥调理剂 (1%) 在 3 mL 投加量下的污泥比阻如图 13 所示。其中, 3 mL M-C11 (pH 6、4 mL CaCl_2) 调理下污泥比阻由原泥的 $11.64 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 $4.66 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比阻降低率高达 59.97%, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 PAC 调理污泥比阻分别为 $6.04 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.25 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明微生物絮凝剂调理后污泥脱水效果明显优于无机絮凝剂。无机絮凝剂调理污泥脱水机制主要是电中和作用^[40], 微生物絮凝剂 M-C11 和有机高分子絮凝剂 CPAM 具有链状结构, 分子上的活性基团 (羧基、羟基、氨基等) 为污泥颗粒提供吸附位点^[41], 破坏污泥胶体分散的稳定结构, 颗粒凝聚并相互结合成较大絮体。相对无机絮凝剂, M-C11 可以更有效地提高污泥脱水效果。

3 mL 投加量下各类污泥调理剂的过滤曲线如

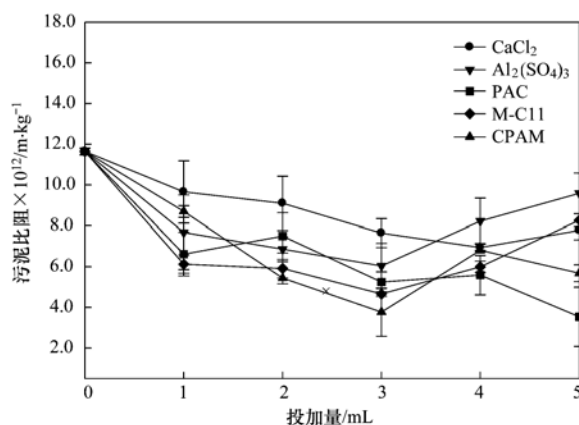


图 13 M-C11 与常规絮凝剂的污泥脱水效果比较

Fig. 13 Comparison of M-C11 and conventional flocculants

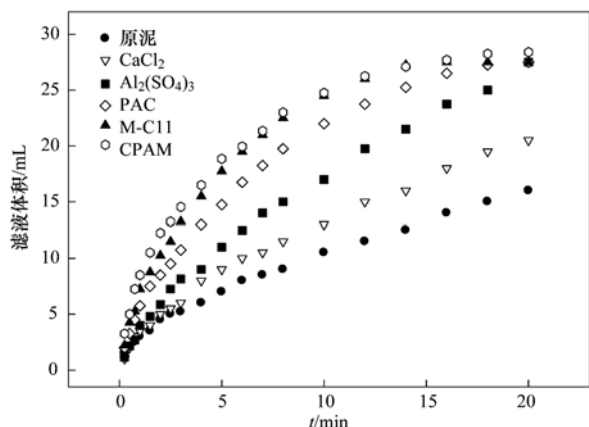


图 14 M-C11 与常规絮凝剂的污泥过滤曲线比较

Fig. 14 Sludge filtrate curve of bioflocculant M-C11 and conventional conditioners

图 14, 微生物絮凝剂脱水效果与有机絮凝剂 CPAM 接近, 均可显著提升调理后的污泥脱水效果. 污水处理厂大规模应用无机絮凝剂如聚合氯化铝会引发健康风险^[16], 有机絮凝剂聚丙烯酰胺等在实际水处理中, 会产生难降解的中间产物, 造成水体的二次污染^[42]. 微生物絮凝剂 M-C11 来自从活性污泥样品中分离、筛选得到的克雷伯氏菌, 絮凝剂对如污泥 pH 值、盐度等特性, 具有良好的适应性, 应用于污泥脱水时絮凝活性明显高于传统的无机絮凝剂, 且具有易生物降解、高效无毒等突出优点, 是具有广阔的应用前景的新型高效絮凝剂.

3 结论

(1) 从活性污泥中筛选分离得到克雷伯氏菌 C11, 微生物絮凝剂 M-C11 培养的最佳碳源、氮源、无机盐分别为葡萄糖、 NaNO_3 、 MgSO_4 , 且其絮凝活性与碳源的可分解利用性密切相关, 硝态氮比铵态氮更易被菌株利用, 不同培养基阳离子类型中, Cu^{2+} 对絮凝剂 M-C11 的合成和絮凝活性起抑制作用, 其它无机盐类型均可不同程度地提高絮凝活性. 在最优培养基条件下, 摇床发酵 (37°C , $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 培养 48 h 后, 絮凝活性高达 91.70%.

(2) 高岭土悬浊液的絮凝稳定性实验表明, 克雷伯氏菌属絮凝剂 M-C11 的 pH 稳定性和热稳定性良好, 在 pH 为 4~8、温度为 20~60℃ 的范围内保持稳定的高絮凝活性.

(3) pH、 CaCl_2 投加量和 M-C11 投加量对活性污泥脱水效果影响显著, 其絮凝机制为电中和、吸附架桥、压缩双电层等, 优化后的污泥调理参数为: pH 为 6, 3 mL M-C11 + 4 mL CaCl_2 (1%). 微生物絮

凝剂调理后活性污泥脱水性能显著改善, M-C11 调理效果明显优于无机絮凝剂, 且 M-C11 对污泥 pH 值、盐度等表现出良好的适应性.

参考文献:

- [1] Yuan H P, Zhu N W, Song F Y. Dewaterability characteristics of sludge conditioned with surfactants pretreatment by electrolysis [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(3): 2308-2315.
- [2] Yuan H P, Cheng X B, Chen S P, et al. New sludge pretreatment method to improve dewaterability of waste activated sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(10): 5659-5664.
- [3] Chen C Y, Zhang P Y, Zeng G M, et al. Sewage sludge conditioning with coal fly ash modified by sulfuric acid [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **158**(3): 616-622.
- [4] 李恺, 叶志平, 王凤英, 等. 冷融技术联合化学调理对污泥脱水性能的影响及其机理[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(3): 536-543.
- [5] 汪毅恒, 范艳辉, 柳海波. 阳离子聚丙烯酰胺 (PAM) 改善污泥脱水性能的研究[J]. *北方环境*, 2012, **24**(2): 105-108.
- [6] 甄广印, 周海燕, 宋玉, 等. 十二烷基苯磺酸钠 (SDBS)-氢氧化钠耦合污泥脱水技术研究[J]. *环境化学*, 2010, **29**(6): 1106-1110.
- [7] Dearfield K L, Abernathy C O, Otley M S, et al. Acrylamide: its metabolism, developmental and reproductive effects, genotoxicity, and carcinogenicity [J]. *Mutation Research*, 1988, **195**(1): 45-77.
- [8] Ni F, Peng X J, He J S, et al. Preparation and characterization of composite bioflocculants in comparison with dualcoagulants for the treatment of kaolin suspension [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **213**(12): 195-202.
- [9] 张媛媛, 杨朝晖, 曾光明, 等. 微生物絮凝剂 MBFGA1 的结构鉴定及絮凝机理研究[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(2): 278-285.
- [10] 黎忠, 张修玉, 秦建桥, 等. 微生物絮凝剂 ZS-7 的纯化及其结构特征研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(9): 2184-2190.
- [11] 裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 等. 养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群 B-737 及发酵特性[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1951-1957.
- [12] 周长胜, 杨朝晖, 曾光明, 等. 絮凝剂产生菌 GA1 的营养优化及发酵动力学[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(4): 324-328.
- [13] Gao Q, Zhu X H, Mu J, et al. Using *Ruditapes philippinarum* conglutination mud to produce bioflocculant and its applications in wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(21): 4996-5001.
- [14] Salehizadeh H, Shojasoadati S A. Removal of metal ions from aqueous solution by polysaccharide produced from *Bacillus firmus* [J]. *Water Research*, 2003, **37**(17): 4231-4235.
- [15] 郭俊元, 杨春平, 邱国良. 生物絮凝剂与改性沸石复配处理猪场废水厌氧消化液的响应面优化[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(11): 1999-2005.
- [16] Li Z, Zhong S, Lei H Y, et al. Production of a novel

- biofloculant by *Bacillus licheniformis* X14 and its application to low temperature drinking water treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(14): 3650-3656.
- [17] Bartley M L, Boeing W J, Corcoran A A, *et al.* Effects of salinity on growth and lipid accumulation of biofuel microalga *Nannochloropsis salina* and invading organisms[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, **54**: 83-88.
- [18] Lo I M C, Lai K C K, Chen G H, *et al.* Salinity effect on mechanical dewatering of sludge with and without chemical conditioning[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(23): 4691-4696.
- [19] Kurane R, Hatamochi K, Kakuno T, *et al.* Production of a biofloculant by *Rhodococcus erythropolis* S-1 grown on alcohols [J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 1994, **58**(2): 428-429.
- [20] Zhang Z Q, Xia S Q, Zhang J. Enhanced dewatering of waste sludge with microbial flocculant TJ-F1 as a novel conditioner [J]. *Water Research*, 2010, **44**(10): 3087-3092.
- [21] 周礼, 张永奎, 陈晓, 等. 一种高效微生物絮凝剂产生菌的筛选及培养基优化[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(4): 584-588.
- [22] Elkady M F, Farag S, Zaki S, *et al.* *Bacillus mojavensis* strain 32A, a biofloculant-producing bacterium isolated from an Egyptian salt production pond [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(17): 8143-8151.
- [23] Liu W J, Wang K, Li B Z, *et al.* Production and characterization of an intracellular biofloculant by *Chryseobacterium daeguense* W6 cultured in low nutrition medium [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(3): 1044-1048.
- [24] Salehizadeh H, Vossoughi M, Alemzadeh I, *et al.* Some investigations on biofloculant producing bacteria [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2000, **5**(1): 39-44.
- [25] Xia S Q, Zhang Z Q, Wang X J, *et al.* Production and characterization of a biofloculant by *Proteus mirabilis* TJ-1 [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(14): 6520-6527.
- [26] Li W W, Zhou W Z, Zhang Y Z, *et al.* Flocculation behavior and mechanism of an exopolysaccharide from the deep-sea psychrophilic bacterium *Pseudoalteromonas* sp. SM9913 [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(15): 6893-6899.
- [27] 杨阿明, 夏四清, 王学江, 等. 奇异变形杆菌 TJ-1 产絮凝剂的培养基优化研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(12): 1988-1993.
- [28] 张新建, 李红梅, 黄玉杰, 等. 高效絮凝剂产生菌的筛选及絮凝活性研究[J]. *微生物学杂志*, 2008, **28**(6): 10-13.
- [29] Raynaud M, Vaxelaire J, Olivier J, *et al.* Compression dewatering of municipal activated sludge: Effects of salt and pH [J]. *Water Research*, 2012, **46**(14): 4448-4456.
- [30] Kwon J H, Park K Y, Park J H, *et al.* Acidic and hydrogen peroxide treatment of polyaluminum chloride (PACL) sludge from water treatment [J]. *Water Science and Technology*, 2004, **50**(9): 99-105.
- [31] Tony M A, Zhao Y Q, Fu J F, *et al.* Conditioning of aluminium-based water treatment sludge with Fenton's reagent: Effectiveness and optimising study to improve dewaterability [J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(4): 673-677.
- [32] Chang G R, Liu J C, Lee D J. CO-conditioning and dewatering of chemical sludge and waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2001, **35**(3): 786-794.
- [33] Guan B H, Yu J, Fu H L, *et al.* Improvement of activated sludge dewaterability by mild thermal treatment in CaCl_2 solution [J]. *Water Research*, 2012, **46**(2): 425-432.
- [34] Neyens E, Baeyens J, Dewil R, *et al.* Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, **106**(2-3): 83-92.
- [35] Deng S B, Bai R B, Hu X M, *et al.* Characteristics of a biofloculant produced by *Bacillus mucilaginosus* and its use in starch wastewater treatment [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, **60**(5): 588-593.
- [36] Zheng Y, Ye Z L, Fang X L, *et al.* Production and characteristics of a biofloculant produced by *Bacillus* sp. F19 [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(16): 7686-7691.
- [37] 王树芹, 罗松涛, 李国忠, 等. 阴离子型聚丙烯酰胺相对分子质量和水解度对污泥脱水性能影响的研究[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(8): 1706-1713.
- [38] Prasertsan P, Dermilim W, Doelle H, *et al.* Screening, characterization and flocculating property of carbohydrate polymer from newly isolated *Enterobacter cloacae* WD7 [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2006, **66**(3): 289-297.
- [39] Zhang Z Q, Xia S Q, Zhao J F, *et al.* Characterization and flocculation mechanism of high efficiency microbial flocculant TJ-F1 from *Proteus mirabilis* [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2010, **75**(1): 247-251.
- [40] 刘欢, 李亚林, 时亚飞, 等. 无机复合调理剂对污泥脱水性能的影响[J]. *环境化学*, 2011, **30**(11): 1877-1882.
- [41] 于荣丽, 孙丽娜, 孙铁珩. 微生物絮凝剂絮凝机理的研究概况及例证[J]. *安全与环境学报*, 2012, **12**(1): 24-26.
- [42] Yuan H P, Yan X F, Yang C F, *et al.* Enhancement of waste activated sludge dewaterability by electro-chemical pretreatment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **187**(1-3): 82-88.

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