

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展 刁海玲,赵三平,周文 (1645)

环境损害评估:国际制度及对中国的启示 张红振,曹东,於方,王金南,齐霖,贾倩,张天柱,骆永明 (1653)

不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示 徐猛,颜增光,贺萌萌,张超艳,侯红,李发生 (1667)

蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展 张志剑,刘萌,朱军 (1679)

基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究 刁晓君,席北斗,何连生,邓祥征,吴锋,王鹏腾 (1687)

我国东北地区地表水酸化现状 徐光仪,康荣华,罗遥,段雷 (1695)

西安市对渭河水质的影响分析 于婕,李怀恩 (1700)

极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究 叶丰,黄小平,施震,刘庆霞 (1707)

应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准 韩超南,秦延文,郑丙辉,张雷,曹伟 (1715)

长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法 蔡文倩,孟伟,刘录三,朱延忠,周娟 (1725)

温州城市降雨径流中BOD₅和COD污染特征及其初始冲刷效应 王骏,毕春娟,陈振楼,周栋 (1735)

影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究 余小龙,沈芳,张晋芳 (1745)

香溪河库湾春季pCO₂与浮游植物生物量的关系 袁希功,黄文敏,毕永红,胡征宇,赵玮,朱孔贤 (1754)

紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究 雷雨,龙天渝,伞磊,安强,黄宁秋 (1761)

高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究 马晓雁,张泽华,王红宇,胡仕斐,李青松 (1767)

纳米Fe₃O₄-H₂O₂非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚 何洁,杨晓芳,张伟军,王东升 (1773)

水中萘普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究 马杜娟,刘国光,吕文英,姚锬,周丽华,谢成屏 (1782)

酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究 康雅凝,李华楠,徐冰冰,齐飞,赵伦 (1790)

镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究 柳王荣,魏清伟,杨仁斌,许振成,曾东 (1797)

基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法 金鹏康,冯永宁,王宝宝,王晓昌 (1802)

不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究 王金泉,胡梦蝶,马邕文,黄明智 (1808)

壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果 张璐璐,胡筱敏,英诗颖,王芳 (1815)

城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究 孟晓荣,张海珍,王磊,王旭东,赵亮 (1822)

倒置A²/O-MBR处理城市污水的中试研究 张健君,邹高龙,杨淑芳,丁星,王莉,毛乾庄,杨丹 (1828)

不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究 袁莹,周伟丽,王晖,何圣兵 (1835)

短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N₂O释放特性 梁小玲,李平,吴锦华,王向德 (1845)

基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化 张明全,李锋民,吴乾元,胡洪营 (1851)

多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响 陈春,刘潇威,郑顺安,周启星,李松 (1857)

浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价 徐志荣,王浙明,许明珠,何华飞 (1864)

苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应 赵伟荣,廖求文,杨亚楠,戴九松 (1871)

四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征 邵敏,陈永亨,李晓宇 (1877)

咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究 赵继红,赵永升,张宏忠,张香平 (1882)

宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征 樊新刚,米文宝,马振宁,王婷玉 (1887)

内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征 郭伟,付瑞英,赵仁鑫,赵文静,郭江源,张君 (1895)

福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究 郑桢,杨冰玉,吴水平,王新红,陈晓秋 (1901)

重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究 王玉玲,能昌信,王彦文,董路 (1908)

丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响 郭伟,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,郭江源,张君 (1915)

海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应 史荣君,黄洪辉,齐占会,胡维安,田梓杨,戴明 (1922)

1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究 刘玉娇,杨新萍,王世梅,梁银 (1930)

1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性 蔡瀚,尹华,叶锦韶,常晶晶,彭辉,张娜,何宝燕 (1937)

2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解 张姝,Giulio Franco,李晓豹,卢晓霞,侯珍,杨君君 (1945)

养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性 裴瑞林,信欣,张雪乔,周迎芹,姚力,羊依金 (1951)

1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析 陈圆圆,田贺忠,杨懂艳,邹本东,鹿海峰,林安国 (1958)

黄山降水酸度及电导率特征分析 石春娥,邓学良,吴必文,洪杰,张苏,杨元建 (1964)

夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析 文彬,银燕,秦彦硕,陈魁 (1973)

广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征 谭吉华,赵金平,段菁春,马永亮,贺克斌,杨复沫 (1982)

福建省三大城市冬季PM_{2.5}中有机碳和元素碳的污染特征 陈衍婷,陈进生,胡恭任,徐玲玲,尹丽倩,张福旺 (1988)

上海市含碳大气颗粒物的粒径分布 袁宁,刘卫,赵修良,王广华,姚剑,曾友石,刘邃庆 (1995)

上海市浦东新区二次气溶胶生成的估算 崔虎雄,吴迺名,段玉森,伏晴艳,张懿华,王东方,王茜 (2003)

沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义 钱鹏,郑祥民,周立旻 (2010)

厦门秋季近郊近地面CO₂浓度变化特征研究 李燕丽,穆超,邓君俊,赵淑惠,杜可 (2018)

GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b 郭立峰,姚波,周凌晔,李培昌,许林 (2025)

城市居家环境空气真菌群落结构特征研究 方治国,欧阳志云,刘芄,孙力,王小勇 (2031)

城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究 郭薇,王伯光,唐小东,刘舒乐,何洁,张春林 (2038)

内河多点分散码头大气污染叠加影响特征 刘建昌,李兴华,徐洪磊,程金香,王忠岱,肖杨 (2044)

义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究 刘瑞卿,王钧伟 (2051)

基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究 谢元博,李巍 (2057)

《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807,1821,1881,1987) 专辑征稿通知(1863)

养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群 B-737 及发酵特性

裴瑞林, 信欣*, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金

(成都信息工程学院资源环境学院, 成都 610225)

摘要: 用养猪废水作为产絮菌群 B-737 的廉价替代培养基, 研究了养猪废水 COD 浓度、外加草酸铵、磷酸盐的量对 B-737 菌群生长和产絮效果的影响, 并在最优培养基下进行发酵动力学模型拟合. 结果表明, 该养猪废水本身具有较合适的碳氮比 (COD 约为 $3\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN 约为 $170\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 无需外加碳、氮源, 只添加 $1.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ K}_2\text{HPO}_4$, $0.8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KH}_2\text{PO}_4$ 时, 菌群 B-737 在其中发酵 18~24 h 便能达到 $1.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 产絮量, 同时对废水本身 COD、TN 削减率分别为 61.9% 和 53.6%. 不仅将微生物絮凝剂的培养基成本降低 90% 左右, 也为养猪废水提供了一条新的资源化途径. 用 Logistic 和 Luedeking-Piert 方程分别研究产絮菌群 B-737 分批发酵的生长和产絮动力学, 获得了相应的动力学模式.

关键词: 养猪废水; 微生物絮凝剂; 复合菌群 B-737; 培养基优化; 动力学

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1951-07

Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics

PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, ZHOU Ying-qin, YAO Li, YANG Yi-jin

(College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Piggery wastewater was used as a cheap alternative medium for a biofloculant-producing bacterial flora B-737. Effects of COD content, addition of ammonium oxalate or phosphate on the cell growth and biofloculant yield were investigated, and the fermentation kinetics was studied in the optimal culture media. The results showed that the piggery wastewater (COD was about $3\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN was about $170\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) had a suitable C/N ratio for the growth and fermentation of flora B-737, with addition of only $1.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ K}_2\text{HPO}_4$ and $0.8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KH}_2\text{PO}_4$, flora B-737 grew well and the biofloculant yield reached $1.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, in the meantime, the COD and TN of the wastewater was reduced by 61.9% and 53.6%, respectively. Not only was the medium cost reduced by over 90%, but it was a new way to recycle piggery wastewater. In addition, the dynamic models on cell growth and flocculants formation in the fermentation process of B-737 were established according to the equation of Logistic and Luedeking-Piret, respectively.

Key words: piggery wastewater; biofloculant; flora B-737; optimization of culture media; dynamics

微生物絮凝剂以其高效、安全、无毒、可生物降解、无二次污染等特点受到广泛关注^[1,2], 在给水、工业废水、城市污水及污泥脱水、发酵工业后续处理、食品工业等领域中具有广阔的应用前景^[3,4]. 但目前, 微生物絮凝剂还没有实现大规模工业化, 原因是利用传统培养基制备微生物絮凝剂成本过高^[5,6], 相比于化学絮凝剂仍然不具备竞争优势. 近几年, 为絮凝剂产生菌寻找廉价替代培养基已取得了一定进展. 如 Kurane 等^[7]考察了多种廉价替代碳源对 *Rhodococcus erythropolis* S-1 细胞生长和絮凝剂产生的影响, 其研究发现, 用 1% 的乙醇作为替代碳源, 另添加 0.5% K_2HPO_4 , 0.2% KH_2PO_4 , 0.02% $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.01% NaCl , 0.05% 酵母膏, 0.05% 尿素, pH 值为 8.0, 对 *Rhodococcus erythropolis* S-1 细胞的生长和絮凝剂的产生都有很好的促进效果, 能絮凝高岭土、酸性土壤、碱性土壤以及墨水等物质. 余莉萍等^[8]利用豆芽汁作为廉价氮源, 在以葡萄糖为碳源、pH 值为 6.0、温度为

30~34℃, 对 1 株黑曲霉菌 (*Aspergillus niger*) 培养 50~60 h 后, 菌体生长良好, 絮凝剂产率高, 絮凝率可达 90% 以上. 毛艳丽等^[9]用糖蜜废水作为 *Pseudomonas alcaligenes* PS-25 产絮菌的碳源和能源, 在适宜的条件下对高岭土悬浊液絮凝率达 96.75%, 并且对多种废水都有较好的净化效果. 此外, 还有研究者用味精废水^[10]、酱油废水^[11]、啤酒废水^[12]、淀粉废水^[13]等高浓度有机废水廉价制备微生物絮凝剂, 结果表明对高岭土悬浊液都有较好的处理效果.

近年来, 随着党中央积极推行“大力普及农村沼气”的政策, 养猪业经营方式日趋规模化, 猪场废水带来的环境问题也日益严重, 是形成农业面源污

收稿日期: 2012-08-17; 修订日期: 2012-09-27

基金项目: 四川省教育厅资助科研项目 (11ZB090); 中华环境保护基金会 TOTO 水环境基金项目 (12H304)

作者简介: 裴瑞林 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染控制与资源化, E-mail: 371424003@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: xx@cuit.edu.cn

染主要因素之一。目前规模化养猪废水处理方式主要有:①还田模式;②自然处理模式;③工业处理模式等^[14]。养猪废水主要来源于猪粪、猪尿和饲养场地冲洗水。污水中富含氮磷、有机物,是一种高浓度有机废水^[15],使其作为微生物替代培养基成为可能。目前将养猪废水用于微生物替代培养基的尝试还很少。

本研究利用养猪废水培养复合产絮菌群 B-737,对其进行废水培养基的优化,并在最佳培养环境下进行产絮菌群生长和产絮动力学研究,以期为微生物絮凝剂寻找一种新的廉价替代培养基,也为养猪废水提供一条新的资源化途径。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 养猪废水培养基

实验所用养猪废水取自成都市郊某养猪场,为猪粪和猪舍冲洗水组成的综合废水,其水质特征如表 1。通过稀释或外加一定量营养源调配成适合产絮菌群生长的养猪废水培养基。

表 1 养猪废水水质特征

名称	COD /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	pH
量值	2 500 ~ 5 000	150 ~ 300	30 ~ 90	30 ~ 70	6 ~ 8

1.1.2 种子培养基

蔗糖 30 g, KH₂PO₄ 2 g, K₂HPO₄ 3 g, (NH₄)₂C₂O₄ 1 g, NaCl 0.1 g, MgSO₄ 0.1 g, 蒸馏水 1 L, 自然 pH, 在 0.1 MPa、120℃ 下灭菌 30 min。

1.1.3 菌种来源

实验所用菌种为本课题组从土壤中分离筛选出的 2 株高效絮凝剂产生菌,编号分别为 B-7^[16]、B-37。将这两菌株以 1:1 的配比复配成新型复合产絮菌群 B-737^[17]。

1.2 实验方法

1.2.1 产絮菌群 B-737 生长量的测定

取不同时间段的发酵液以蒸馏水作空白对照,于 721 型分光光度计在 600 nm 处测定其吸光度,对细胞密度较大的培养液用蒸馏水适当稀释,使其吸光度在 0.1 ~ 1.0 之间。

1.2.2 絮凝率的测定

在 200 mL 烧杯中加入 4 g·L⁻¹ 的高岭土悬浊液 100 mL, 1% CaCl₂ 溶液 1 mL, 不同时间段发酵液 0.2 mL, 用 10% NaOH 溶液将 pH 值调至 7.0 左右,

在六联混凝搅拌机上以快速 320 r·min⁻¹, 1 min; 慢速 120 r·min⁻¹, 2 min 进行搅拌, 静置 10 min 后, 吸取上清液以蒸馏水作空白于 721 型分光光度计在 550 nm 处测定其吸光度。絮凝率计算公式为:

$$\text{絮凝率} = \frac{A - B}{A} \times 100\% \quad (1)$$

式中, A 为对照样上清液在 550 nm 处的吸光度; B 为絮凝后上清液在 550 nm 处的吸光度。

1.2.3 复合微生物絮凝剂的制备

取不同时间段发酵液于 10 000 r·min⁻¹ 下离心 10 min, 再在离心上清液中加入 2 倍体积在 4℃ 冰箱预冷 12 h 的乙醇(95%) 混合。搅拌均匀后于 10 000 r·min⁻¹ 下离心 10 min, 收集沉淀用质量分数 75% 乙醇反复洗涤 3 遍后, 置于 80℃ 干燥后得到絮凝剂粗品^[18], 编号 MBF-737。

1.2.4 培养基优化

将 1 mL 产絮菌群 B-737 接种于种子培养基中进行活化, 在 30℃, 160 r·min⁻¹ 摇床转速条件下培养 24 h 后, 取 2 mL 活化液接种于 100 mL 养猪废水培养基中, 30℃, 160 r·min⁻¹ 条件下培养, 采取逐步优化的原则, 分别考察养猪废水 COD 浓度、外加氮源、磷源量对产絮菌群 B-737 生长和产絮能力的影响。

1.2.5 养猪废液水质指标测定

化学需氧量(COD)采用重铬酸钾法测定; 总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定; 总磷(TP)采用钼酸铵分光光度法测定。

1.2.6 菌体生长动力学模型研究

目前, 细胞生长动力学模型主要有 Monod 模型和 Logistic 模型。分析生物絮凝剂的发酵过程可知, Monod 方程假设与生物絮凝剂发酵过程有冲突, 不宜用其来描述菌体生长过程。Logistic 模型是一个典型的 S 型曲线, 能很好地反映分批发酵过程中因菌体浓度的增加对自身生长存在的抑制作用, 能较好地拟合分批发酵过程中的菌体生长规律。本研究采用 Logistic 来描述产絮菌群 B-737 的生长, 其方程见式(2):

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m X \left(1 - \frac{X}{X_m} \right) \quad (2)$$

式中, μ_m 为最大比生长率, h⁻¹; X_m 为最大菌体浓度, g·L⁻¹; X 为菌体浓度, g·L⁻¹; $\frac{dX}{dt}$ 为细胞生长速度。

对式(2)进行积分可得式(3):

$$X_t = \left(\frac{X_0 X_m e^{\mu_m t}}{X_m - X_0 + X_0 e^{\mu_m t}} \right) \quad (3)$$

1.2.7 絮凝剂产物生成规律动力学模型研究

产物主要指的是细胞培养过程中代谢生成的细胞量以外的产物。按照其生成特点,可分为3类:①产物形成与菌体生长偶联型:只是菌体生长时才有产物生成;②产物形成与菌体生长部分偶联型:在菌体生长阶段有部分产物形成,而部分或大部分产物是在菌体处于生长稳定期形成的;③产物形成与菌体生长非偶联型:只要细胞存在,产物就会生成。一般选用 Luedeking-Pierrt 提出的数学表达式描述,如式(4):

$$\frac{dp}{dt} = \alpha \frac{dX}{dt} + \beta X \quad (4)$$

当 $\alpha \neq 0$ 、 $\beta = 0$ 时为类型①相关模型;当 $\alpha \neq 0$ 、 $\beta \neq 0$ 时为类型②相关模型;当 $\alpha = 0$ 、 $\beta \neq 0$ 时为类型③相关模型。

式中, α 为生长相关系数; β 为非生长相关系数; P 为产物浓度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; $\frac{dp}{dt}$ 为产物生成速度。

絮凝剂的生成与菌体生长属于部分生长偶联

型,将方程(3)代入(4)积分后得产物生成积分式(5):

$$P(t) = P_0 + \alpha(X_t - X_0) + \frac{\beta X_m}{\mu_m} \ln \left(\frac{X_m - X_0 + X_0 e^{\mu_m t}}{X_m} \right) \quad (5)$$

2 结果

2.1 养猪废水培养基优化

2.1.1 养猪废水 COD 浓度对产絮菌群 B-737 生长和产絮能力的影响

图1中,随着养猪废水 COD 浓度从 $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $750 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 菌液 D_{600} 值逐渐减小,从 1.44 降低到 0.60 左右(以 12 h 计),用酒精粗提取的产絮量从 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $0.38 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (以 18 h 计),这是由于养猪废水经稀释后,废水中营养源的匮乏,COD 浓度越低,菌群生长和产絮越不充分。养猪废水为高浓度有机废水,其中富含氮源、有机物,能够为菌群 B-737 提供生长代谢所需的营养物质。原废水水质更适合 B-737 的生长和产絮,在其基础上进行外加草酸铵或磷酸盐的优化。

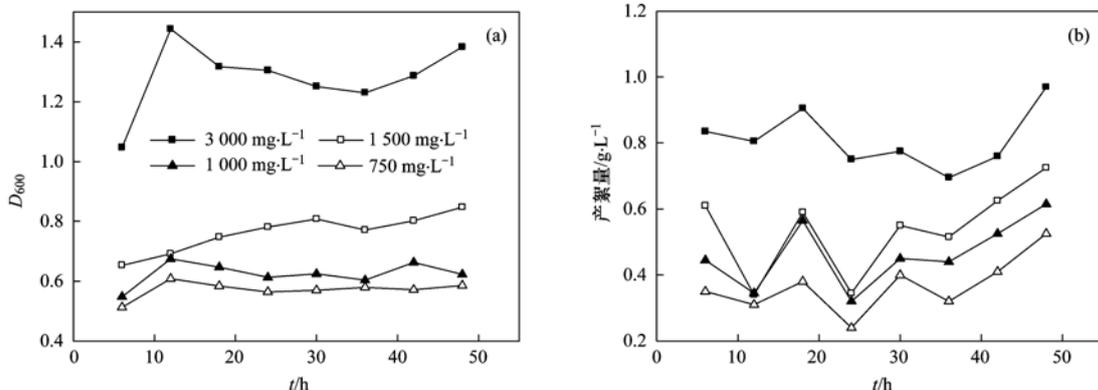


图1 COD 浓度对 B-737 生长光密度值 D_{600} 、产絮量的影响

Fig. 1 Effects of COD concentration on the D_{600} value and biofloculant yield of B-737

2.1.2 外加草酸铵量对产絮菌群 B-737 生长和产絮效果的影响

在养猪废水中添加不同量的草酸铵,考察不同 C/N 对菌群 B-737 在养猪废水培养基中生长和产絮的影响。图2中,随着草酸铵添加量从 0 增大到 $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, C/N 逐渐减小,菌液生长光密度值 D_{600} 逐渐增大,从 1.45 增大到 1.75(以 12 h 计);而产絮量却逐渐降低,从 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $0.32 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (以 18 h 计)。可见 C/N 对菌群生长和絮凝剂合成有调节作用,一般说来,高氮低糖的培养基有利于细胞的

增长,但会降低絮凝剂产量^[19]。Norberg 等^[20]也发现在固定葡萄糖浓度为 $25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时降低 C/N (< 38),能够增加菌胶团的絮凝剂产量。

2.1.3 外加 K_2HPO_4 量对产絮菌群 B-737 产絮效果的影响

图3中,产絮量随着 K_2HPO_4 质量浓度的增大而增大,相比未投加 K_2HPO_4 时,产絮量由 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增长到 $1.36 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (以 18 h 计)以上。可见磷是产絮菌群 B-737 必不可少的营养元素,而废水中本身的磷含量较少,不能满足菌群的生长代谢需要,

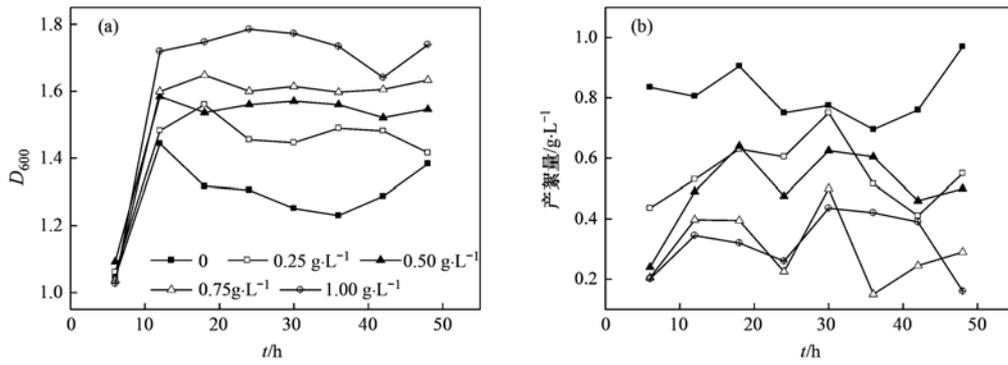


图2 草酸铵质量浓度对 B-737 生长光密度值 D_{600} 、产絮量的影响

Fig. 2 Effects of ammonium oxalate concentration on the D_{600} value and biofloculant yield of B-737

因此必须通过添加外源磷的方法为其补充营养源. 磷是核酸和蛋白质的必要成分,也是重要的能量传递者三磷酸腺苷的成分. 在代谢途径的调节方面,磷起着很重要的作用,其有利于糖代谢的进行,因此能促进微生物的生长. K_2HPO_4 的添加量在 $1.6 \sim 2.4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,菌群的产絮量维持在较高水平,本研究选取 $1.6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,在其基础上完成外加 KH_2PO_4 量的优化.

2.1.4 外加 KH_2PO_4 量对产絮菌群 B-737 产絮效果的影响

在养猪废水中添加 $1.6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} K_2HPO_4$ 的基础再添加一定量的 KH_2PO_4 作为培养基培养菌群 B-737,其产絮量和对高岭土悬浊液絮凝率结果见图 4. 由图 4(a)可知 KH_2PO_4 质量浓度也会影响菌群 B-737 的产絮能力,随着 KH_2PO_4 质量浓度从 0 增长到 $1.6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,产絮量均有所增大但增幅较小,从 $1.20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增长到 $1.50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 24 h 计),间接表明 KH_2PO_4 对 B-737 产絮能力的影响不如 K_2HPO_4 显著, KH_2PO_4 能够辅助 K_2HPO_4 起到提供磷源和作为缓冲物质调节 pH 的作用. KH_2PO_4 添加量为 0.8

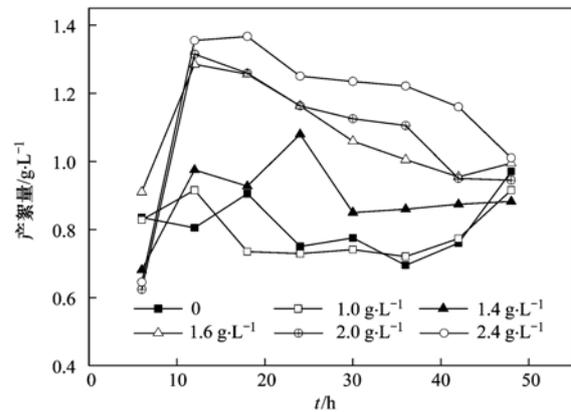


图3 K_2HPO_4 质量浓度对产絮量的影响

Fig. 3 Effects of K_2HPO_4 concentration on the biofloculant yield

$\sim 1.6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时产絮量都较高. 图 4(b)中,菌液对高岭土的絮凝率均比较稳定,对应于图 4(a)中的产絮量,可见二者不存在严格的一一对应关系,即絮凝率不一定随着产絮量的增大而增大. 这是由于在养猪废水中添加不同量的 KH_2PO_4 ,菌群 B-737 在其中的生长状态有差异,每个时间段的产絮量都有差异. 大量实验研究表明,各种絮凝剂都有在相应条件下的最佳投加量,低于或超过这个用量都会使絮凝效

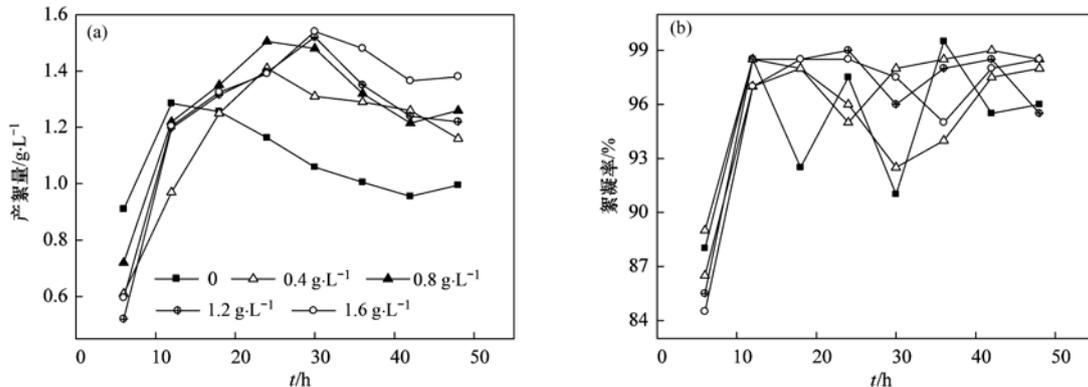


图4 KH_2PO_4 质量浓度对产絮量、絮凝率的影响

Fig. 4 Effects of KH_2PO_4 concentration on biofloculant yield and flocculating rate

果下降. 用量不足时, 絮凝作用不彻底; 过量则会导致“再稳”现象^[21]. 所以图 4 中出现产絮量高, 但对于一定量的高岭土悬浊液投加量已经过量, 产生“再稳”现象, 絮凝率反而降低.

2.2 产絮菌群 B-737 在养猪废水培养基中的发酵动力学特性

以养猪原水 (COD 约为 $3\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN 约为 $170\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 外加 $1.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ K}_2\text{HPO}_4$, $0.8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KH}_2\text{PO}_4$ 为发酵基质, 每隔 2~3 h 测定 B-737 在其中生长的光密度值 D_{600} 、产絮量以及菌液 COD、TN、TP、pH 变化, 结果如图 5 所示.

由图 5(a) 可知, 菌体的生长和产絮有较大的关联性但并不统一, 这与 Unz 等^[22]对 *Zoogloea* MP6 的研究一致. 产絮菌群 B-737 在 18 h 达到其生长高峰期, 产絮量在培养 24 h 出现一个高峰, 后期 45 h 又会有一个新的高峰. 由于养猪废水成分复杂, B-737 菌群首先利用废水中简单易吸收的小分子进行生长和合成絮凝剂, 当小分子利用完后, 培养基中营养匮乏, 菌群继续利用废水中剩余的成分合成絮凝剂, 出现一个新的产絮高峰.

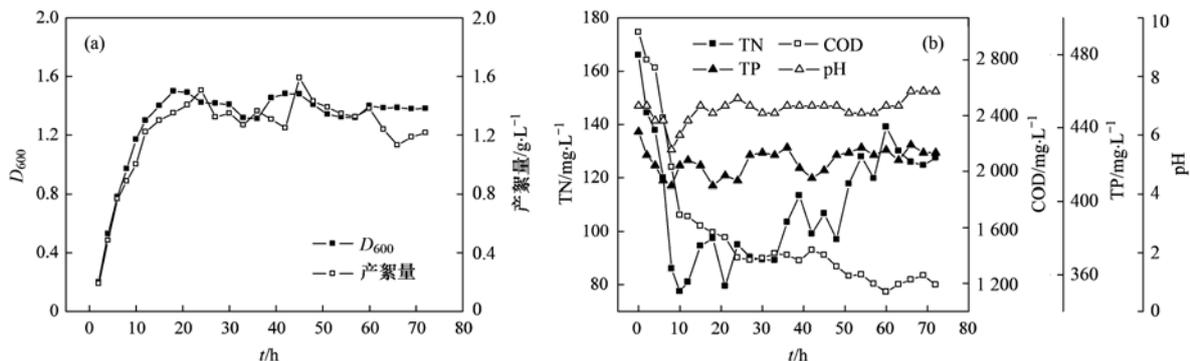


图 5 发酵过程中 D_{600} 、产絮量、TN、COD、TP、pH 的变化

Fig. 5 Change of D_{600} , biofloculant yield, TN, COD, TP and pH during the fermentation process

2.3 菌群 B-737 生长和产絮动力学模型

用 Origin 7.5 软件对菌群生长和产絮动力学模型进行非线性拟合, 拟合结果见图 6.

图 6(a) 拟合结果中, $\mu_m = 0.3898\text{ h}^{-1}$, 将实验数据 $X_0 = 0.087$, $X_m = 1.49$ 代入式 (3), 得出产絮菌群 B-737 生长动力学模型方程如式 (6):

$$X_t = \left(\frac{0.1296e^{0.3898t}}{1.403 + 0.087e^{0.3898t}} \right) \quad (6)$$

由于初始生物量较低, 导致絮凝物质产量较低, 故认为 $P_0 = 0$, 然后将 $\mu_m = 0.3898\text{ h}^{-1}$, $X_0 = 0.087$, $X_m = 1.49$ 代入到方程 (4), 可得到产物生成模拟方程 (7):

$$P(t) = 0.087\alpha \frac{1.49e^{0.3898t}}{1.403 + 0.087e^{0.3898t}} + 3.8225\beta \ln\left(\frac{1.403 + 0.087e^{0.3898t}}{1.49}\right) \quad (7)$$

图 6(b) 拟合结果中 $\alpha = 0.7878$, $\beta = 0.0148$, 得出 B-737 菌群产絮动力学模型方程如下式 (8):

$$P(t) = \frac{0.1229e^{0.3898t}}{1.403 + 0.087e^{0.3898t}} + 0.0566 \ln\left(\frac{1.403 + 0.087e^{0.3898t}}{1.49}\right) \quad (8)$$

从拟合结果来看, 所选的模型能较好地拟合以养猪废水为主要基质培养产絮菌群 B-737 时, 菌体的生长和生物絮凝剂 MBF-737 的生成情况.

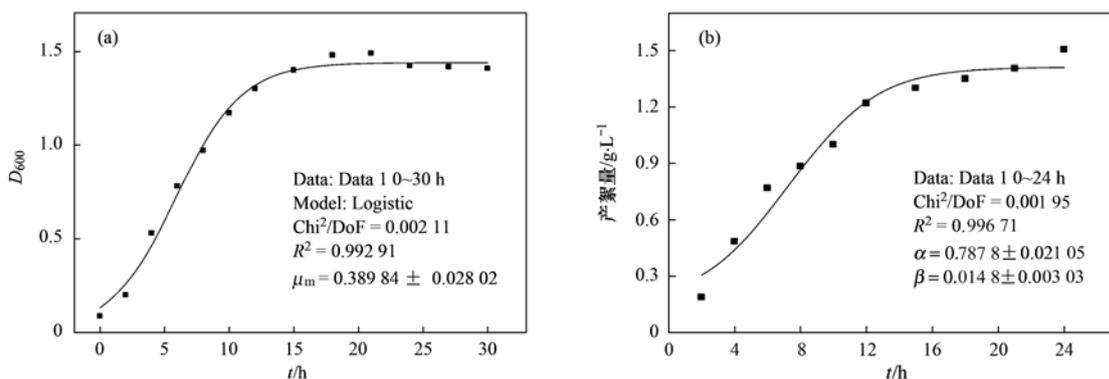


图6 复合菌群 B-737 生长和生产动力学模型拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of growth and producing kinetics model of the bacterial flora B-737

3 讨论

3.1 产絮量与絮凝率之间的关联

多数学者对产絮菌培养基的优化都采用单点优化法,即只对产絮菌生长稳定期某一时间点的产絮情况进行表述,且多采用固定絮凝剂添加量的方法,用高岭土悬浊液的絮凝率来表示其产絮量的高低.图4中,絮凝率并不严格随着产絮量的增大而增大,正如多数研究^[24,25]结果表明,培养过程中絮凝剂产量与对高岭土悬浊液絮凝率并不存在严格的正相关关系,随着絮凝剂产量的增大,絮凝率先增大后维持不变或逐渐减小.南开大学王兰^[26]研究发现,在固定絮凝剂添加量的情况下仅仅比较絮凝率的大小,从而对絮凝活性进行评价的方法是不科学的.因此只测定某一点的絮凝率来表述产絮量的高低具有一定的局限性,本研究采取测定发酵过程中多点生长量、产絮量、絮凝率的方法,能更科学地综合比较选出最优培养基配方.

3.2 养猪废水制备生物絮凝剂的可行性和成本概算

养猪废水中含有丰富的氮磷、挥发性脂肪酸,还有许多种有机化合物如酚类、固醇类、含氮杂环化合物和纤维素、半纤维素等^[15].以养猪废水(COD约为 $3\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TN约为 $170\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),外加 $1.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ K}_2\text{HPO}_4$, $0.8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KH}_2\text{PO}_4$ 为发酵基质时,产絮菌群 B-737 发酵 18~24 h 能达到 $1.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 产絮量,絮凝率可达 98.5%.一方面说明养猪废水能够为产絮菌群 B-737 提供必需的营养和能源物质;另一方面也说明菌群 B-737 有较强的环境适应能力,能够在含有多种复合化合物的养猪废水中生长并产生絮凝剂.进一步说明产絮菌群 B-737 不仅能够利用葡萄糖、蔗糖等简单的单糖或双糖小分子,也能够利用高浓度有机废水中的复杂的大分子

化合物进行生长和产絮.

相比其他研究者优化出的产絮菌廉价替代培养基,如敖黎鑫^[27]用养猪废水(COD约为 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),外加 $4.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 葡萄糖, $0.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$,pH为7.0,培养48 h对高岭土絮凝率达93.21%;李大鹏等^[10]利用稀释后的味精废水,添加 $6.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 葡萄糖、 $5.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ K}_2\text{HPO}_4$, $2.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KH}_2\text{PO}_4$,在pH为7.0,摇床转速 $140\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 30°C 条件下培养复合产絮菌 F2-F6,发现培养20 h絮凝效果最好,絮凝率可达95.4%;Wang等^[28]利用稀释后的乳品废水(COD约为 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),外加2%的工业乙醇作为补充碳源,于 30°C , $120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 培养 *Klebsiella mobilis* KLE-1 18 h后可获得 $2.58\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 絮凝剂初品,絮凝活性可达95.4%;张迎明等^[12]利用稀释后的啤酒废水,外加 $1.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 尿素,pH值为5.0条件下培养48 h,絮凝效果可达96.8%.本研究得出的培养基配方需添加的外源物质较少,产絮周期较短就能达到与其他研究同等或者更高的产絮水平,符合以最少的培养基成本,最短的生产周期,获得较高絮凝剂产量的目的,具有较强的实用性,然而如何将此方法应用于工业化,还需进一步深入研究.

目前,产絮菌培养基中普遍使用葡萄糖($10\sim 20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)或蔗糖($10\sim 20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)作为其碳源,酵母膏、硫酸铵、蛋白胨等作为氮源.它们的大量使用导致了絮凝剂培养成本的居高不下.按照大多数报道中使用的培养基来制备微生物絮凝剂的成本是 $110\sim 150\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$ 液体絮凝剂粗品^[27].其中碳源的费用占到总成本的2/3,酵母膏费用约占1/4,而磷酸盐费用仅占1/10左右或更少.本实验所使用的养猪废水培养基,无需外加碳、氮源,只需添加少量磷酸盐,就能达到较好的生长和产絮效果,使微生物

絮凝剂的培养基成本降低到原来的 10% 左右, 达到廉价培养的目的。

4 结论

(1) 以养猪原水(即 COD 为 $3\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN 为 $170\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 外加 $1.6\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{K}_2\text{HPO}_4$, $0.8\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{KH}_2\text{PO}_4$ 为发酵基质时, 产絮菌群 B-737 发酵 18 ~ 24 h 能达到 $1.5\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 产絮量, 且只需 0.2 mL 液体絮凝剂样品, 对高岭土悬浊液絮凝率达 98.5% 以上。

(2) 产絮菌群 B-737 能够有效利用养猪废水培养基中的有机物和含氮物质, COD 和 TN 降解率分别达 61.9% 和 53.6%, 而 TP 在整个发酵过程中变化不大。

(3) 利用养猪废液培养基制备微生物絮凝剂, 大量降低培养基中碳源和氮源的使用量, 使微生物絮凝剂的培养基成本降低到原来的 10% 左右, 大大节约了成本, 也为养猪废水提供一条新的资源化途径, 达到变废为宝的目的。

参考文献:

- [1] Jia B J, Yu J M. The research status and development trend of microbial flocculants[A]. In: 2012 International Conference on Applied Physics and Industrial Engineering. Physics Procedia [C]. Holland: Elsevier, 2012. 425-428.
- [2] Salehizadeh H, Shojaosadati S A. Extracellular biopolymeric flocculants: Recent trends and biotechnological importance[J]. Biotechnology Advances, 2001, **19**(5): 371-385.
- [3] Koizumi J I, Takeda M, Kurane R, et al. Synergetic flocculation of the bioflocculant FIX extracellularly produced by *Nocardia amarae* [J]. Journal of General and Applied Microbiology, 1991, **37**(5): 447-454.
- [4] Yim J H, Kim S J, Ahn S H, et al. Characterization of a novel bioflocculant, p-KG03, from a marine dinoflagellate, *Gyrodinium impudicum* KG03[J]. Bioresource Technology, 2007, **98**(2): 361-367.
- [5] Bo X W, Gao B Y, Peng N N, et al. Coagulation performance and floc properties of compound bioflocculant-aluminum sulfate dual-coagulant in treating kaolin-humic acid solution [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, **173**(2): 400-406.
- [6] Kim D G, La H J, Ahn C Y, et al. Harvest of *Scenedesmus* sp. with bioflocculant and reuse of culture medium for subsequent high-density cultures [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 3163-3168.
- [7] Kurane R, Hatamochi K, Kakuno T, et al. Production of a bioflocculant by *Rhodococcus erythropolis* S-1 grown on alcohols [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 1994, **58**(2): 428-429.
- [8] 余莉萍, 尹华, 彭辉. 一株产微生物絮凝剂菌株的筛选及特性[J]. 上海环境科学, 2002, **21**(8): 459-462.
- [9] 毛艳丽, 朱涛, 裴中芳, 等. 利用糖蜜废水生产微生物絮凝剂及条件优化和效果实验研究[J]. 环境工程学报, 2010, **4**(1): 86-90.
- [10] 李大鹏, 马放, 侯宁, 等. 味精废水资源化制备复合型生物絮凝剂[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, **36**(9): 78-82.
- [11] 任宏洋, 王新惠, 刘达玉. 复合菌利用酱油废液制备生物絮凝剂及其絮凝特性分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(8): 1050-1055.
- [12] 张迎明, 赵继红, 伊三梯, 等. 利用啤酒废水制备微生物絮凝剂研究[J]. 安徽农业科学, 2008, **36**(34): 15200-15201, 15244.
- [13] 王有乐, 张宝茸, 范志明, 等. 淀粉废水培养复合型微生物絮凝剂产生菌研究[J]. 工业水处理, 2009, **29**(10): 55-59.
- [14] 段妮娜, 董滨, 何群彪, 等. 规模化养猪废水处理模式现状和发展趋势[J]. 净水技术, 2008, **27**(4): 9-15, 39.
- [15] 李平. 养猪废水中有机物厌氧生物降解机理的分子生物学解析[D]. 武汉: 中国地质大学, 2009. 1-3.
- [16] 崔钊, 信欣, 羊依金, 等. 絮凝剂产生菌 B-7 的培养条件优化及生长动力学研究[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(10): 2375-2379.
- [17] 夏丽容, 信欣, 周迎芹, 等. 生物絮凝剂产生菌群发酵特性及动力学[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(8): 2909-2912.
- [18] Zheng Y, Ye Z L, Fang X L, et al. Production and characteristics of a bioflocculant produced by *Bacillus* sp. F19 [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(16): 7686-7691.
- [19] 赵晓祥, 赵军, 彭瑶. 菌种培养条件对微生物絮凝剂合成影响的研究[J]. 上海环境科学, 2008, **27**(3): 117-120.
- [20] Norberg A B, Enfors S O. Production of extracellular polysaccharide by *Zoogloea ramigera* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1982, **44**(5): 1231-1237.
- [21] 郑怀礼. 生物絮凝剂与絮凝技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 37-40.
- [22] Unz R F, Farrah S R. Exopolymer production and flocculation by *Zoogloea* mp6 [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1976, **31**(4): 623-626.
- [23] Shih I L, Van Y T, Yeh L C, et al. Production of a biopolymer flocculant from *Bacillus licheniformis* and its flocculation properties[J]. Bioresource Technology, 2001, **78**(3): 267-272.
- [24] Yokoi H, Natsuda A, Hirose J, et al. Characteristics of a biopolymer flocculant produced by *Bacillus* sp. PY-90 [J]. Journal of Fermentation and Bioengineering, 1995, **79**(4): 378-380.
- [25] Takeda M, Kurane R, Koizumi J, et al. A protein bioflocculant produced by *Rhodococcus erythropolis* [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1991, **55**(10): 2663-2664.
- [26] 王兰. 生物絮凝剂絮凝活性评价方法的探讨[J]. 生物技术, 2005, **15**(5): 57-59.
- [27] 敖黎鑫. 微生物絮凝菌的筛选及应用养殖废水制备生物絮凝剂的研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2010. 30-36.
- [28] Wang S G, Gong W X, Liu X W, et al. Production of a novel bioflocculant by culture of *Klebsiella mobilis* using dairy wastewater [J]. Biochemical Engineering Journal, 2007, **36**(2): 81-86.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

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