

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

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

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭 (1215)

乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶 (1223)

典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣 (1230)

某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价 董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽 (1238)

基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔晓勇,许群,宋现锋 (1245)

珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 孙成玲,谢绍东 (1250)

低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山 (1256)

太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强 (1263)

一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 王燕,朱春刚,许笛,丁士明 (1271)

外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 傅玲,赵凯,王国祥,欧媛,范娟,毛丽娜,张佳,韩睿明 (1278)

基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 孙法圣,程品,张博 (1285)

重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬 (1290)

重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁 (1297)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 根系对沉积物中各形态磷的影响 李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞 (1304)

循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明 (1311)

不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 段伦超,王凤贺,纪莹雪,张帆,赵斌,王国祥 (1318)

再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 黄晶晶,汤芳,席劲璇,庞宇辰,胡洪营 (1326)

二级处理出水的 UV-TiO₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验 王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帜 (1332)

水中 C₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究 方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛 (1337)

XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 赵应许,纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽 (1343)

纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究 付融冰 (1351)

共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 王琪,刘辉,姜林,唐军 (1358)

硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 吴宣,谭科艳,胡希佳,顾远,杨宏 (1366)

基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英 (1372)

模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 陈燕,黄芳,谢鑫源 (1377)

电活性生物膜介导 Cu²⁺ 生物还原的试验研究 刘毅,周顺桂,袁勇,刘志 (1384)

模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳 (1391)

填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹 (1399)

化学合成施氏矿物与 H₂O₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥 (1407)

处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅 (1414)

剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究 董慧岭,季民 (1421)

锰氧化菌 *Aminobacter* sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋铁锋 (1428)

1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊 (1437)

碘普罗胺降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究 徐冰洁,高品,薛昱,何梦琦,吴凡 (1443)

利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化 张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛 (1449)

毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建 (1457)

缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国 (1462)

微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 王妮敏,邓琦,邹华,梁婵娟 (1468)

东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应 张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠 (1473)

生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 吴丽,张高科,陈晓国,兰书斌,张德禄,胡春香 (1479)

老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 陈丽红,刘征涛,方征,王晓南,王婉华 (1486)

土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯苓,吴国平,魏复盛 (1491)

藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞 (1498)

三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊 (1502)

浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭 (1509)

西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赞,王美娥 (1516)

生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬 (1523)

上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡 (1531)

SDBS/Na⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响 唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹 (1540)

稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎 (1548)

藻类水体 Cd²⁺ 毒性快速监测新方法研究 段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽 (1555)

用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 龙峰,施汉昌,王洪臣,盛建武 (1561)

Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO₃⁻ 吸附性能的研究 钟琼,李欢 (1566)

污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 廖晓勇,陶欢,阎秀兰,赵丹,林龙勇,李尤 (1576)

城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 杨孟,李凤英,刁一伟,吴丹 (1586)

水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志 (1597)

六价铬细菌还原的分子机制研究进展 李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧 (1602)

农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 魏源送,郁达伟,曹磊 (1613)

《环境科学》征稿简则(1427) 《环境科学》征订启事(1497) 信息(1383, 1390, 1398, 1560)

农副食品加工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术

魏源送¹, 郁达伟¹, 曹磊²

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 承德市环境科学研究院, 承德 067000)

摘要: 农副食品加工业 COD 年排放量在 41 种行业废水中排名第 2, 污染减排刻不容缓. 农副食品加工业废水 COD 浓度高达 8 000 ~ 30 000 mg·L⁻¹, 目前主要采用厌氧-好氧组合工艺处理, 存在工艺流程长、管理难和成本高等问题. 厌氧膜生物反应器 (anaerobic membrane bioreactor, AnMBR) 由于高效的膜与厌氧微生物协同作用, 具有 COD 去除率高 (92% ~ 99%), COD 负荷率高 [2.3 ~ 19.8 kg·(m³·d)⁻¹] 等工艺特征, 同时排泥少 (SRT > 40 d), 基建成本低 (HRT 为 8 ~ 12 h). 根据高浓度 COD 的不同构成, COD 甲烷化的限速步骤可分为水解酸化限速型、产甲烷限速型. AnMBR 的膜污染特征及其控制比好氧 MBR 更为复杂和困难, 现有膜污染控制措施包括错流过滤、曝气冲洗和膜松弛等. 针对我国农副食品加工业高浓度废水达标排放的技术需求, AnMBR 主要研究方向为提高 COD 去除率、控制膜污染和提高能源回收率, 从而实现短流程厌氧的出水一步达标.

关键词: 厌氧膜生物反应器; 农副食品加工业废水; 高浓度废水; 甲烷化限速步骤; 膜污染

中图分类号: X792 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1613-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.04.058

Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength

WEI Yuan-song¹, YU Da-wei¹, CAO Lei²

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Chengde Environmental Sciences Institute, Chengde 067000, China)

Abstract: As the second largest amounts of COD discharged in 41 kinds of industrial wastewater, it is of great urgency for the agricultural and food processing industry to control water pollution and reduce pollutants. Generally the agricultural and food processing industrial wastewater with high strength COD of 8 000-30 000mg·L⁻¹, is mainly treated with anaerobic and aerobic processes in series, but which exists some issues of long process, difficult maintenance and high operational costs. Through coupling anaerobic digestion and membrane separation together, anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) has typical advantages of high COD removal efficiency (92% -99%), high COD organic loading rate [2.3-19.8 kg·(m³·d)⁻¹], little sludge discharged (SRT > 40 d) and low cost (HRT of 8-12 h). According to COD composition of high strength industrial wastewater, rate-limiting step of methanation could be either hydrolysis and acidification or methanogenesis. Compared with aerobic membrane bioreactor (MBR), membrane fouling of AnMBR is more complicated in characterization and more difficult in control. Measures for membrane fouling control of AnMBR are almost the same as those of MBR, including cross flow, air sparging and membrane relaxation. For meeting discharging standard of food processing wastewater with high strength, AnMBR is a promising technology with very short process, by enhancing COD removal efficiency, controlling membrane fouling and improving energy recovery.

Key words: anaerobic membrane bioreactors; food processing wastewater; high strength; committed step; membrane fouling

农副食品加工业废水污染物浓度高、排放量大且达标排放率低, 污染减排和资源化的潜力巨大. 据年鉴统计, 2010 年农副食品加工业 (包括玉米加工、畜禽养殖等) 废水排放量 13.2×10^8 t, 在 41 个分类行业中排名第 4 位, 而排放达标率仅仅为第 37 位. 其中最为突出的污染物 COD 年排放 49.6×10^4 t, 排名第 2 位, 导致大量有机污染物因不达标排放而成为重要水污染源^[1]. 随着国家污染减排力度的加大和中央一号文件大力推动专业大户、家庭农场、农民合作社等的规模化发展, 农副食品加工废水废弃物处理与资源化的技术要求将迅速提高. 高浓度有机污染物 (chemical oxygen demand, COD) 是这类废水达标排放的关键污染物, 可通过厌氧消化工艺高

效去除^[2]并回收能源^[3].

厌氧膜生物反应器 (anaerobic membrane bioreactors, AnMBR) 是膜与厌氧消化的有机结合, 膜分离不仅取代了传统的三相分离器, 而且改变了传统厌氧消化工艺的微生物保留、污染物截留和产气释放等关键工艺特征, 大大提高了厌氧消化的效率和稳定性. 厌氧消化通过水解 (hydrolysis)、酸化 (acidogenesis)、产氢产乙酸 (acetogenesis)、产甲烷 (methanogenesis) 4 种作用^[4], 降解 COD、产生甲烷

收稿日期: 2013-06-01; 修订日期: 2013-09-05

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07203-002); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201303091)

作者简介: 魏源送 (1969 ~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: yswei@cees.ac.cn

与二氧化碳等沼气能源.但由于产甲烷菌倍增时间长达 4~6 d,保持高微生物量较为困难.因此,研究者开发了三相分离器,与 UASB (up-flow anaerobic sludge bed)、EGSB (expanded granular sludge bed) 和 IC (internal circulation) 等颗粒化反应器结合,并采用三相分离器截留大粒径污泥颗粒来保持高生物量,但仍然难以彻底解决污泥流失问题.而膜分离截留效率远高于三相分离器,不仅可直接截留厌氧污泥,还能够截留大颗粒污染物(TSS),进一步提高了厌氧消化的污染物去除效果.因此同传统厌氧消化工艺相比,AnMBR 具有 COD 去除率高、出水水质好和保留厌氧生物等优势.

综上,高浓度有机废水有可能通过 AnMBR 处理一步达到排放标准,从而缩短处理流程、提高工艺稳定性和降低处理成本.所以,本文针对农副食品加工业废水的特点,通过文献调研,总结 AnMBR 处理农副

食品加工业废水的特点和现状,剖析高浓度有机废水产甲烷的关键/限速步骤,探讨膜污染机制及其控制措施,并对今后的研究方向进行展望,以期为农副食品加工业废水的污染减排和资源化提供有益参考.

1 农副食品加工业废水特点及其处理现状

1.1 特点

农副食品加工业废水的污染物排放总量较大,首要原因是其水污染物浓度较高,并随着农副产品加工深度的延伸,污染物产生量和排放量也明显增加.以典型的淀粉加工业废水为例,淀粉通常由小麦、玉米或薯类加工而来,例如,玉米淀粉废水分为玉米粉、麦芽糖、木糖醇这 3 种加工废水以及玉米发酵废水(表 1),它们均具有高 COD 和 SS 浓度,高浓度 N、P 和 S 等营养元素,B/C 比约 0.85,可生化性好,pH 值低等特征^[5, 6].

表 1 玉米加工的污染物浓度¹⁾

Table 1 Concentration of pollutants in corn processing wastewater

项目	废水产率/ $t \cdot t^{-1}$	COD	BOD	氨氮	TP	pH	SS
玉米深加工污染物产率 ^[5] / $kg \cdot t^{-1}$	4.67	8.7	—	0.13	—	—	—
玉米精深加工污染物产率 ^[5] / $kg \cdot t^{-1}$	7.33	17.0	—	0.2	—	—	—
玉米淀粉废水水质 ^[5, 7~11] / $g \cdot L^{-1}$	5~13	8~30	5~20	1.2~3	1~3	4~6	3~5
污水排放综合标准(GB 8978-1996)三级/ $mg \cdot L^{-1}$	—	500	300	—	—	6~9	400
淀粉工业污染物排放标准(GB 25461-2010)/ $mg \cdot L^{-1}$	3	300	70	35	5	6~9	70

1)2013 年开始执行的间接排放最低标准,同时,总氮应达到 $55 mg \cdot L^{-1}$ ^[12]

农副食品加工业废水污染物排放总量较大,另一个重要原因是其达标排放率较低.图 1 显示了

2010 年我国工业废水排放量最大的 10 个行业排放和处理情况.2010 年农副食品加工业废水(以排放

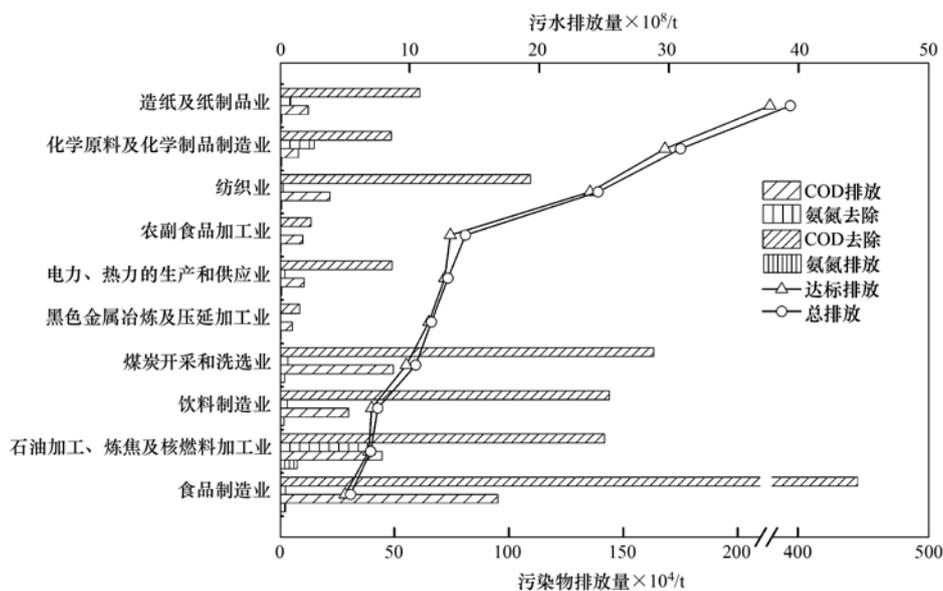


图 1 我国工业废水排放及处理现状(2010 年)

Fig. 1 Industrial wastewater discharging and treatment status in China (2010)

量计)的排放达标率 91.9%, 在 41 个行业中排名第 37 位. 如将农副食品加工业废水排放达标率提高到工业废水平均水平 95.9%, 需新建处理规模 $15 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$, 将增加 COD 去除量 $8.4 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$. 尽管需增加的规模并不大, 然而落实存在管理和技术上的难题. 一方面农副产品加工业废水的分布较为分散, 另一方面某些细分行业的排放标准提高, 达标处理有技术经济困难, 如 2010 年以来排放标准被提高的细分行业有淀粉工业^[12]、畜禽养殖业^[13]、发酵酒业^[14]和酵母工业^[15]等.

1.2 处理现状

目前农副食品加工业废水处理的主流工艺是厌氧、好氧和物化的组合工艺, 如 UASB + BAF^[16]、UASB + A/O^[17]、UBF + CASS^[18]等厌氧-好氧组合生物工艺^[19-21], 或沉淀、气浮等物化 + 生物处理^[19, 22]. 这些工艺的特点是流程长, 有时甚至比农副食品加工工艺更长, 管理复杂; 并且组合工艺的好氧段 COD 容积负荷低 [$2 \sim 8 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$]、充氧量大, 导致好氧段的池容较大、能耗较高. 而厌氧消化工艺不仅 COD 容积负荷可高达 $8 \sim 12 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 且免于充氧, 有效降低了池容和能耗; 并可通过产沼气回收能源 (沼气产率 $0.7 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[23], 甲烷产率 $0.17 \sim 0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$). 那么, 是否有可能改进厌氧工艺, 进一步提高厌氧工艺的 COD 去除效率和出水水质, 使高浓度有机废水经厌氧一步处理直接达标?

改变现有长流程的厌氧好氧组合工艺, 关键在于实现高效厌氧消化. 任南琪等^[23]认为高效厌氧消化有两个关键因素: 高生物量和充分传质. 现有厌氧消化工艺受限于三相分离器的效率, 只能在高生物量保留和充分传质之间进行平衡, 厌氧消化工艺一步处理直接达标排放较为困难. 以膜分离取代三相分离器的 AnMBR 完全符合上述两个关键: ① 基于膜截留的气-液-固体分离, 有利于维持较高生物量、较好水质和产气; ② 膜冲刷的强化曝气搅拌, 有助于加强生物与污染物的传质效率. 与 UASB、EGSB 和 IC 等第二、三代高效厌氧工艺相比, AnMBR 工艺无污泥流失, 也无 anaerobic filter (AF) 的滤床或 anaerobic fluidized bed (ABF) 的复杂结构, 具有出水水质好、污染物去除率高的特点. 因此, AnMBR 是一种极具潜力的高效厌氧工艺, 现有研究表明高浓度有机废水经 AnMBR 处理能够一步达到《污水排放综合标准》(GB 8978-1996) 中三级标准的 COD 要求^[24-26].

2 农副食品加工业废水的厌氧膜生物反应器的研究和应用现状

膜截留不仅提高了传统三相分离器的效率, 同时也提高了溶解态、颗粒态污染物的截留率. 首先, 溶解态 SCOD 的去除率提高到了 98.8%^[27], SS 的去除率高达 99%^[28]; 其次, 膜也提高了 COD 主要水解产物的 VFA 截留率, 使更多的 VFA 得以甲烷化. 因此, 与传统厌氧消化工艺相比, AnMBR 的膜截留使出水水质更好.

2.1 工艺特征

2.1.1 与传统厌氧工艺的比较

(1) COD 去除效果 膜对厌氧消化的污染物截留、三相分离的贡献提高了 COD 去除率. 尽管 AnMBR 与 UASB 等常规厌氧工艺相比污泥浓度较低, 但仍表现出更高的 COD 去除率. 主要原因包括: ① 膜能够彻底截留大颗粒有机污染物, 使其在体系内逐步解体和降解. ② 常规厌氧工艺中未被甲烷化的 VFAs 均进入出水构成出水 COD, 因此常需后接其他工艺^[29]; 而膜对 VFAs 的截留作用, 使更多的 VFAs 得以甲烷化去除. ③ 厌氧微生物增殖较慢, 易流失, 但膜截留保留了厌氧微生物.

(2) 建设成本 AnMBR 建设成本包括土建成本和膜组件等设备成本, 主要受 HRT、SRT 和膜通量的直接影响 (表 2). 与传统厌氧消化相比, AnMBR 较小的 HRT 减小了反应器容积进而降低了土建成本, 较高的 SRT 减少了污泥处理处置成本. 多数研究的 AnMBR 最小 HRT 介于 $8 \sim 12 \text{ h}$ ^[30], 小于传统厌氧消化工艺 ($1 \sim 2 \text{ d}$). 如 AnMBR 中, COD 为 $460 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的模拟废水实验室规模试验中, HRT 为 3 h 的 COD 去除率为 90%; 养猪废水的实验室规模试验中, HRT 为 6 h 的 COD 去除率为 95%^[31]. 多数研究的 SRT 介于 $200 \sim 300 \text{ d}$ ^[32], 模拟废水为 $43 \sim 50 \text{ d}$, 大于传统厌氧消化工艺的 $20 \sim 30 \text{ d}$. 但较长的 SRT 导致 SMP 富集和污泥絮体减小, 从而加速了膜污染^[33].

(3) 温度 按混合液温度, 厌氧消化过程可分为高温厌氧消化 ($50 \sim 55^\circ\text{C}$)、中温厌氧消化 ($35 \sim 37^\circ\text{C}$) 和常温厌氧消化 ($\leq 20^\circ\text{C}$). 厌氧菌 (特别是甲烷菌) 温度专性强、增殖慢, 超过 $\pm 2^\circ\text{C}$ 的波动就抑制消化速率, $\pm 5^\circ\text{C}$ 的剧烈变化就会突然停止产气并使有机酸大量积累. 因此厌氧消化温度只能选择一种并稳定运行. 温度显著影响微生物的代谢速率, 通常每增加 10°C 反应速率增加 1 倍^[23]. 因此高温厌氧

表 2 农副产品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术主要工艺参数

Table 2 Processing parameters and operating conditions of anaerobic membrane bioreactors in treatment of food processing wastewater with high strength

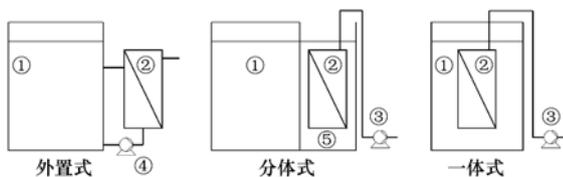
序号	废水类型	膜配置形式	工艺 ¹⁾	有效容积 /L	T/°C	HRT/h	COD 负荷 /kg·(m ³ ·d) ⁻¹	甲烷产率 /m ³ ·kg ⁻¹	膜通量 /L·(m ² ·h) ⁻¹	SRT /d	COD/mg·L ⁻¹		文献
											进水	出水	
1	畜禽粪便废水	外置式	EGSB + UF	12.2	30	91.2	2.76	0.15	20	—	9 433	—	[39]
2	畜禽粪便废水	外置式	CSTR + UF	5.0	37	144	1~3	— ³⁾	5~10	—	6 500	300	[24]
3	畜禽粪便废水	外置式	CSTR + UF	5.0	37	144	1~2	—	5~10	118	6 500	300	[31]
4	啤酒废水(剩余酵母)	外置式	CSTR + UF	4.5	30	—	12	—	10	—	2 100	200	[25]
5	啤酒废水(模拟)	一体式	SDRAnMBR	100	32	10	10.52~12.09	—	—	—	5 200	260	[40]
6	酒精/酒厂废水	分体式	KSAMBR	0~20	—	—	—	—	—	—	101 275	—	[3, 41]
7	酿酒废水	一体式	MCAB(UF)	4.6	20~25	16	3~7	—	4.6	40	7 651	—	[42]
8	豆制品废水	分体式	EGSB + UF	98	65	18	13.6	0.17	150	—	10 000	—	[43]
9	豆腐废水	分体式	CSTR + MF	5.0	60	8	—	—	4.32	—	26 000	—	[44]
10	橄榄磨房废水	外置式	PABR + UF	15	35	90	8.9	0.35	110 ²⁾	—	19 490	4 320	[45]
11	乳品/奶酪废水	外置式	两相厌氧 + MF	202	37	120	19.78	0.31	139.5	78.6	68 600	8 000 ²⁾	[46]
12	乳品/奶酪废水	一体式	CSTR + UF	40	30	48	—	—	200	—	2 500	460	[47]
13	其他高浓度食品废水	外置式	CSTR + UF	400	37	60	4.52	0.136	15.6	50	12 770	238 ²⁾	[26]
14	其他高浓度食品废水	一体式	CSTR + MF	8.0	28~39	240	5.6~7.8	0.26	~20	—	3 171	1 351	[48]
15	其他高浓度食品废水	一体式	CSTR + MF	20 000	—	24	—	—	20	—	6 000	50	[49]
16	其他高浓度食品废水	分体式	EGSB + UF	96	35	33	10	0.18	20	—	13 200	—	[49]

1) CSTR(continuous stirred-tank reactor),完全混合式反应器; EGSB(expanded granular sludge bed),膨胀颗粒污泥床; SDRAnMBR(submerged double-shaft rotary anaerobic membrane bioreactor),浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器; KSAMBR(Kubota submerged anaerobic bioreactor),久保田浸没式厌氧膜生物反应器; MCAB(membrane coupled anaerobic bioreactor),膜耦合厌氧反应器; PABR(periodic anaerobic baffled reactor),周期厌氧折板反应器; MF(microfiltration),微滤; UF(ultrafiltration),超滤。2)为根据实测数据估算,文中未明确指出。3)“—”表示为文中未提及

消化: ①有利于提高有机污染物 COD 容积负荷, 从中温的 $2.5 \sim 3.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 增至高温的 $6.0 \sim 7.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; ②有利于提高单位容积产气率, 从中温的 $1 \sim 1.3 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 增加到高温 $3.0 \sim 4.0 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 高温还有利于病毒和病原菌的灭活, 可达 99%. 但 AnMBR 的消化温度与常规厌氧消化不同, 首要的原因是较高温度下常用膜材料的性能变差, 如 Polyvinylidene Fluoride (PVDF) 等膜材料在 40°C 以上性能明显衰减. 同时, 多数研究者认为中温更有利于膜污染控制. 尽管温度每升高 1°C 清水通量增大 $5\% \sim 10\%$, 但高温厌氧消化的过滤阻力仍然比中温厌氧消化高 $5 \sim 10$ 倍^[34]. 高温下 extracellular polymeric substances (EPS) 或 soluble microbial products (SMP) 或 biopolymer clusters (BPC) 等膜污染物释放更多、污泥形态更细小和更密实的滤饼层可能是主要原因^[34,35]. 而常温下较高浓度的 soluble microbial products (SMP) 也给膜污染控制带来不利影响^[36,37]. 因此, 目前 AnMBR 的主流操作温度是中温 ($35 \sim 37^\circ\text{C}$).

2.1.2 不同膜配置形式的 AnMBR 纵向比较

按照不同膜配置形式, AnMBR 分为外置式、分体式和一体式 (图 2). 表 2 显示, 现有规模最大的 AnMBR 构型为一体式、其次为外置式; 而以案例数量计, AnMBR 试验中的膜配置形式以外置式略占优势, 报道案例数为 7 个; 分体式和一体式较少, 报告报道案例数为 5 个和 4 个.



1. 生物池; 2. 膜组件; 3. 抽吸泵; 4. 循环泵; 5. 膜池

图 2 不同膜配置形式的 AnMBR

Fig. 2 Membrane configurations of AnMBR

无论采取何种膜配置形式, 膜与厌氧消化的有机耦合是 AnMBR 的核心工艺特征. 尽管早在 20 世纪八、九十年代超滤、纳滤膜已应用于深度处理厌氧反应器出水, 如 1992 年报道的处理规模已超过 $2000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[38]. 但由于膜缺乏与厌氧生物之间的耦合, 削弱了膜分离与厌氧消化在污染物去除、生物量保留和提高甲烷化率上的协同作用, 因此它们仅仅是厌氧消化出水的深度处理工艺, 而不是本文所指的 AnMBR 工艺.

不同构型使 3 种 AnMBR 各具运行维护特点.

外置式的优势在于生物工艺较为灵活, 可以部分采用如 UASB 等传统厌氧工艺相近的构型, 缺点在于循环泵的额外能耗及其对生物相的破碎等副作用. 分体式的优势在于膜清洗维护方便、且不影响厌氧生物相, 缺点在于通常需要额外的膜池-生物池循环措施. 一体式的优势在于不需要额外设施如循环泵、膜池等, 缺点在于膜清洗维护不便、因此需要加强膜污染控制.

从表 2 来看, 3 种膜配置各有不同工艺参数特征. 首先, 分体式的生物相温度可达 60°C 或 65°C , 显示了分体式工艺的灵活性. 其次, 外置式的 HRT 介于 $60 \sim 144 \text{ h}$, 明显长于分体式的 $8 \sim 33 \text{ h}$ 和一体式的 $10 \sim 48 \text{ h}$; 同时外置式的体积 COD 负荷率 VLR 和甲烷产率也低于分体式和一体式; 这可能是由于外置式的循环影响了厌氧污泥活性. 最后, 不同膜配置 AnMBR 的 COD 去除率均可达到 $90\% \sim 95\%$, 并没有显著差异. 因此, 在有限的性能差异内, 运行管理、膜寿命和建设成本等为主的总成本优化就成为配置方式选择的关键依据.

2.2 高浓度 COD 甲烷化的限速步骤

表 2 显示, 尽管容积负荷率只有酒类废水的 $1/6 \sim 1/2$, 畜禽粪便废水厌氧消化的水力停留时间仍是酒类废水的 $8 \sim 14$ 倍, 它们的 COD 去除速率表现出明显的差异. anaerobic digestion model No. 1 (ADM1) 把 COD 分为碳水化合物、蛋白质和脂肪三大类^[4], 都大量存在于农副食品加工业高浓度废水. 从厌氧消化动力学的角度分析, 这种差异的首要原因是高浓度 COD 的不同构成. 因此, 根据甲烷化的限速步骤, 高浓度 COD 甲烷化可分为水解酸化限速型或产甲烷限速型.

(1) 水解酸化限速型 如废水中的 COD 主要由纤维素、脂肪等构成, 该类 COD 水解过程长, 限速步骤为水解酸化. 以畜禽粪便废水为例, 其中构成植物细胞壁的纤维素、构成动物细胞壁的肽聚糖, 较难水解酸化. 常规畜禽粪便废水中 COD 厌氧消化的 HRT 可长达 $91.2 \sim 144 \text{ h}$, 其高于酒类废水的主要原因是其 COD 难以被水解酸化过程降解. 为破解该难题, 现有研究或采用产酸产氢反应器作为前置工艺, 或采用微波-酸等预处理来强化水解酸化. 总之, 采用独立的酸化反应器有助于调控水解酸化过程: ①避免高浓度废水在一体化反应器中由于迅速酸化产生的 LCFA/丙酸累积导致的抑制产甲烷过程^[46]; ②提高难降解废水的厌氧消化速率. 然而, 水解酸化菌群受进水水质影响, 较为复杂, 限速机制

及操作条件还有待明确。

(2)产甲烷限速型 如进水 COD 主要由乙醇、豆类蛋白质构成,该类 COD 可直接或易于水解,限速步骤为产甲烷阶段.以酒类或豆制品类废水为例,可在 10~18 h 内完成水解酸化和产甲烷整个过程.该过程的理论值:中温甲烷菌活性为每千克 VSS 日产甲烷 $0.0129 \sim 0.1997 \text{ m}^3 \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ^[50, 51],甲烷产率为每去除 1 kg 的 COD 产生甲烷 $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,甲烷含量为沼气的 50%~60%^[3, 23].低于理论值的甲烷菌活性和甲烷产率、低含量甲烷、出水 COD 中的 VFA 浓度升高^[46, 52],是产甲烷限速的明显特征.通常,当厌氧消化运行状态稳定,如 pH 和 ORP 分别介于 6.5~8 和 -430~-360 mV,甲烷相的碱度为 $1\ 000 \sim 1\ 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,则甲烷菌的活性较高^[53, 54].

如表 2 所示,根据来水水质、工艺条件的不同,有助于提高一体式 AnMBR 产甲烷的操作参数分别如下:HRT、VLR 和 SRT 分别介于 10~240 h、1~19.78 $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 40~118 d.参数波动范围较大的另一个重要原因是消化途径.

此外,消化途径(或发酵类型)也影响 COD 甲烷化的速率和稳定性.现有研究表明,厌氧消化途径主要包括乙醇型、乙酸型、丙酸型和丁酸型等 4 种途径,可通过控制 pH 和 ORP 来实现不同的厌氧消化途径,例如,乙醇型或乙酸型厌氧消化菌落具有反应速度快、系统稳定等特征^[55].图 3 描述了 pH 和 ORP 对水解酸化最终产物构成的影响,如 pH 为 4.5~5.5 和 ORP 为 -300~-200 mV 时,产酸相产物中比例较高的为乙醇^[55].由图 3 可见,产酸段的 pH 和 ORP 范围较宽(3.0~7.0、-400~100 mV),但产甲烷段的 pH 和 ORP 范围明显较窄(如中温仅 6.5~8.0、< -350 mV),例如,如果产甲烷段的 ORP 升高(氧中毒),很容易影响产甲烷而出现丙酸积累^[56].因此,根据产酸相、产甲烷相中不同菌群对生境的不同需求^[57],可开发针对不同限速步骤的反应器类型及其操作条件,例如,不同酸化反应器(如 CSTR)和甲烷化反应器(如 UASB、EGSB)^[58, 59].

2.3 膜污染的特征及其控制

2.3.1 膜污染特征

AnMBR 的膜污染控制与好氧 MBR 有很多类似之处,但较高的污染物浓度、污泥浓度和温度等条件,却使膜污染特征更复杂.对比研究显示,厌氧污泥的胶体粒子会不断积累,而好氧污泥的 d_{50} 则稳定在 20 μm ,因此 AnMBR 的 SMP 浓度高出好氧 MBR

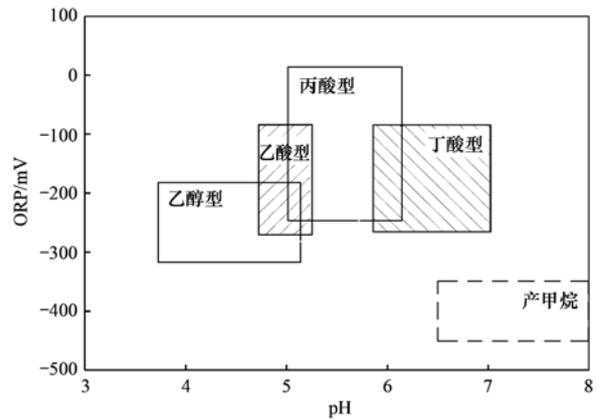


图 3 pH 和 ORP 对产酸菌群发酵产物的影响

Fig. 3 Effects of pH and ORP on major VFA type during acidification

的 500%,并导致临界通量低于好氧 MBR 50% 以上^[60].

MBR 膜污染特征的案例研究较多,尽管各因素对膜污染的影响随案例变化较大,但对于典型的膜过滤和污染过程(图 4),研究者们仍形成了较统一的框架:膜过滤过程以化学清洗为分界线,可分为短周期和长周期过滤.13 组 AnMBR 膜污染试验的拟合研究表明,长周期过滤的膜污染机制符合滤饼层模型(cake formation)^[61],Lin 等^[62]和 Drews^[63]分别在文献中分析了膜污染的滤饼层机制.但基于有限案例的经验拟合模型,在设计和运行管理中仍然存在适用范围有限、参数波动范围大和参数无法预测的问题.而短周期过滤的膜污染机制则更为复杂,普遍观察到的现象是 TMP 的快速升高、稳定和突然升高三阶段^[64],这分别对应于膜污染的初期快速阻塞、滤饼层沉积和末期滤饼层快速压实 3 个阶段.一些研究者认为膜污染由污染物附着引起,包括各种 SMP 和 EPS^[65];另一些研究者认为是物理过程,包括絮体在膜面上的孔隙压缩、部分阻塞、完全阻塞和滤饼层 4 种机制^[61];还有一些研究者关注膜污染的数学非线性混沌特征,认为短周期过滤的膜污染特征主要受该周期初期过滤的膜污染特征影响.然而各种相互耦合的复杂因素如何影响膜污染过程,仍存在大量不同甚至矛盾的研究结果,膜污染机制仍有待进一步研究^[62, 65].

2.3.2 膜污染控制

膜污染主要由附着于膜表面的滤饼层引起,滤饼层主要由 EPS 和 SMP 构成. EPS 和 SMP 是生物降解污染物过程中的产物,因此 AnMBR 不可避免地要采取膜污染控制措施,如减少 EPS 和 SMP 产生

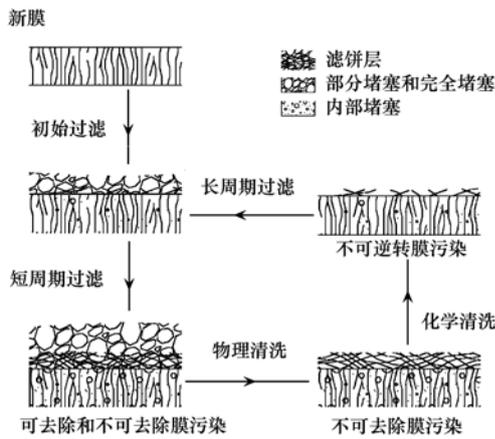


图4 膜污染过程和分类示意^[61, 64, 66]

Fig. 4 Process and classification of membrane fouling

的生物调控措施、以及减少 EPS 和 SMP 沉积的水力学措施。同时由于膜污染物质主要是生物生长、代谢和死亡过程的产物,其影响因素较多,主要包括操作条件、污泥特性^[67, 68]、水力学条件^[69, 70]和膜组件配置^[66]等。以操作条件为例,有报道系统研究了温度^[71]、pH^[72]和污泥特性^[73]等对 AnMBR 整体性能的影响,认为滤饼层的结构和不均匀性、而不是滤饼层的厚度影响膜污染速率。例如, pH > 9.1 和温度超过 10℃ 的波动都改变了滤饼层结构、增加了小颗粒污泥,增大了膜阻力。

膜污染控制的关键目标是低成本地延长 TMP 稳定阶段,其中成本包括设备能耗、物料消耗,生物特性变化和水质调理等。目前 AnMBR 膜污染控制的主要措施包括:错流过滤、间歇抽吸、曝气、临界通量、超声和投加 PAC 等。AnMBR 稳定运行的案例研究表明,连续抽吸时的过滤周期为 20.3 h,而间隙抽吸(4 min 抽/1 min 停)时的过滤周期能够延长到 52 h,且曝气冲刷将延长过滤周期 10 倍^[74]。但由于缺乏普遍验证的膜污染速率预估方法,目前膜污染控制措施多根据厂家推荐或经验来选择。

2.4 应用现状

现有研究表明, AnMBR 已成功用于造纸、养殖、垃圾渗滤液和玉米加工等高浓度有机废水处理。这些研究显示, AnMBR 的 COD 去除率为 95% ~ 99% (高温)^[28, 75], 92% ~ 99% (中温)^[76, 77], 72% ~ 95% (常温)^[78, 79], BOD₅ 去除率 99% 以上^[46]。上述案例中的高温和中温 AnMBR, 出水 COD 均稳定达到《污水排放综合标准》(GB 8978-1996)的三级标准,同时剩余污泥极少,去除 COD 的能量大部分得到了回收^[80]。COD 有机物负荷率为 2.3 ~ 19.78 kg·(m³·d)⁻¹^[28, 46], 超过常规好氧工艺的 2 ~ 8

kg·(m³·d)⁻¹、达到或超过常规厌氧工艺的 8 ~ 12 kg·(m³·d)⁻¹。

国际上目前已成功商业化的 AnMBR 主要包括 ADI-AnMBR (ADI System Inc., Canada) 和 KSAMBR (Kubota Co., Japan)。截止到 2008 年底, KSAMBR (Kubota Co., Japan) 已有 15 个工程应用案例,其中日本 14 个,北美 1 个^[3]。例如,在位于日本鹿儿岛的烧酒厂废水处理案例中, KSAMBR 的处理量为 0 ~ 20 t·d⁻¹, 产气量为 0 ~ 800 m³·d⁻¹, COD 去除率 75% ~ 92%, 日均回收能量 12 GJ·d⁻¹, 其中加热和处理能耗合计约 4 GJ·d⁻¹^[3, 41]。作为 Kubota Co. 的 AnMBR 技术在北美地区的独家供货商^[81], ADI System Inc. 设计的 AnMBR (10 × 10⁴ gallons·d⁻¹, 约 380 m³·d⁻¹) 采用了 ADI-AnMBR 技术, 处理 Ken's Foods 公司的色拉酱调料和腌泡汁废水, 该工程位于美国麻萨诸塞州马尔伯勒, 出水满足当地市政接管排放要求, 其中 COD 去除率 99.4%, 出水 BOD 25 mg·L⁻¹, TSS 1 mg·L⁻¹; 同时日产沼气 5 600 ~ 8 500 m³, 除用于废水加热还提供公司生产能耗的 50%^[82]。

国内已开展 AnMBR 应用研究的机构包括中国科学院上海应用物理研究所、同济大学和江西农业大学等。中国科学院上海应用物理研究所的周保昌等^[83]采用一体式常温 AnMBR 处理食品废水, 处理规模 20 m³·d⁻¹, 膜组件为浸没式旋转膜组件, 膜通量 20 L·(m²·h)⁻¹, 连续运行 5 个月未进行 CIP 清洗 (cleaning in place) 和离线清洗, COD 去除率 > 95%, 出水 COD < 50 mg·L⁻¹, 在环境温度 > 30℃ 时沼气中甲烷含量 > 50%。此外, 还建立了 50 L·d⁻¹ 的豆制品废水分体式 AnMBR 处理系统, 采用 EGSB (膨胀污泥床反应器) 外接管式超滤膜组件, COD 去除率为 90%^[43, 49, 84]。同济大学陆风海等^[85]采用厌氧微网反应器 (anaerobic fabric bio reactor, AnFBR) 处理曝气沉砂池出水, 处理规模 0.6 ~ 0.7 m³·d⁻¹, 采用 34 ~ 75 μm 的涤纶网, 恒通量 [20 L·(m²·h)⁻¹] 过滤形成动态膜, 可连续运行 55 ~ 65 d, 进水 COD 100 ~ 450 mg·L⁻¹, 出水 COD 80 ~ 150 mg·L⁻¹。江西农业大学的白玲等^[40, 86, 87]采用浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器 (submerged double-shaft rotary anaerobic membrane bioreactor, SDRAnMB, 有效容积 100 L) 处理人工模拟啤酒废水, 容积负荷 10 ~ 12 kg·(m³·d)⁻¹, COD 平均去除率 95.15%, 出水 COD 平均浓度 < 300 mg·L⁻¹。

通过有机耦合膜与高浓度 COD 的甲烷化, 有望

突破高浓度 COD 甲烷化的限速步骤,将利于研发出可使高浓度 COD 废水能一步处理达标排放的短流程 AnMBR 技术。

3 结论

(1)农副食品加工废水的 COD 浓度高,目前主要采用厌氧-好氧组合工艺处理。

(2)农副食品加工废水 AnMBR 工艺的 COD 去除率高,高浓度 COD 的甲烷化和膜污染控制是 AnMBR 推广应用的关键,现有研究和应用表明 AnMBR 大有潜力。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 各行业工业废水排放及处理情况(2010 年) [R]. 北京: 中华人民共和国国家统计局, 2012. 31-36.
- [2] Stuckey D C. Recent developments in anaerobic membrane reactors[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **122**: 137-148.
- [3] Kanai M, Ferre V, Wakahara S, *et al.* A novel combination of methane fermentation and MBR — Kubota Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor process[J]. *Desalination*, 2010, **250**(3): 964-967.
- [4] Batstone D J, Keller J, Angelidaki I, *et al.* The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1) [J]. *Water Science & Technology*, 2002, **45**(10): 65-73.
- [5] 高磊. 玉米深加工过程废水处理及回用模式研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2011. 21-27.
- [6] 蔡晶, 柴社立, 芮铭先, 等. 玉米淀粉废水的处理技术[J]. *环境工程*, 2007, **25**(1): 72-74.
- [7] 崔海炜, 刘俊良, 张立勇, 等. UASB-两段接触氧化工艺处理淀粉废水[J]. *给水排水*, 2008, **34**(9): 61-63.
- [8] 柴社立, 蔡晶, 周永昶, 等. 水解-好氧组合工艺处理玉米淀粉废水的机理[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2004, **34**(1): 154-157.
- [9] 李素玉, 李玉, 罗岩, 等. 玉米淀粉废水中的微生物及其净化淀粉废水的作用研究[J]. *辽宁大学学报(自然科学版)*, 2006, **33**(4): 343-345.
- [10] 李亚峰, 陈涛, 金亚斌, 等. 玉米淀粉废水处理中 UASB 反应器内颗粒污泥特性及其影响因素的研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2006, **22**(6): 962-967.
- [11] 张春艳. UASB 工艺处理玉米淀粉废水研究[J]. *市政技术*, 2008, **26**(4): 334-336.
- [12] GB 25461-2010, 淀粉工业水污染物排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [13] GB 18596-2001, 畜禽养殖业污染物排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [14] GB 27631-2011, 发酵酒精和白酒工业水污染物排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [15] GB 25462-2010, 酵母工业水污染物排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [16] 李艳春. UASB/接触氧化工艺处理玉米淀粉废水研究[J]. *气象与环境学报*, 2009, **25**(1): 68-71.
- [17] 孙晋刚, 朱茂田, 王彬. UASB-A/O 工艺处理玉米淀粉生产废水[J]. *中国给水排水*, 2008, **24**(10): 57-59.
- [18] 杨开明, 杨小林, 张华, 等. UBF-CASS 工艺处理玉米淀粉废水[J]. *给水排水*, 2009, **35**(5): 69-70.
- [19] Wang R, Wang Y, Ma G P, *et al.* Efficiency of porous burnt-coke carrier on treatment of potato starch wastewater with an anaerobic - aerobic bioreactor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, **148**(1): 35-40.
- [20] Rajbhandari B K, Annachhatre A P. Anaerobic ponds treatment of starch wastewater: case study in Thailand [J]. *Bioresource Technology*, 2004, **95**(2): 135-143.
- [21] Sun L, Wan S, Yu Z, *et al.* Anaerobic biological treatment of high strength cassava starch wastewater in a new type up-flow multistage anaerobic reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **104**: 280-288.
- [22] Cancino-Madariaga B, Aguirre J. Combination treatment of corn starch wastewater by sedimentation, microfiltration and reverse osmosis[J]. *Desalination*, 2011, **279**(1-3): 285-290.
- [23] 任南琪, 王爱杰, 等. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 352.
- [24] Padmasiri S I, Zhang J Z, Fitch M, *et al.* Methanogenic population dynamics and performance of an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) treating swine manure under high shear conditions[J]. *Water Research*, 2007, **41**(1): 134-144.
- [25] Torres A, Hemmelmann A, Vergara C, *et al.* Application of two-phase slug-flow regime to control flux reduction on anaerobic membrane bioreactors treating wastewaters with high suspended solids concentration[J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, **79**(1): 20-25.
- [26] He Y L, Xu P, Li C J, *et al.* High-concentration food wastewater treatment by an anaerobic membrane bioreactor [J]. *Water Research*, 2005, **39**(17): 4110-4118.
- [27] Vyrides I, Stuckey D C. Saline sewage treatment using a submerged anaerobic membrane reactor (SAMBR): Effects of activated carbon addition and biogas-sparging time [J]. *Water Research*, 2009, **43**(4): 933-942.
- [28] Lin H J, Xie K, Mahendran B, *et al.* Sludge properties and their effects on membrane fouling in submerged anaerobic membrane bioreactors (SAnMBRs) [J]. *Water Research*, 2009, **43**(15): 3827-3837.
- [29] Khan A A, Gaur R Z, Tyagi V K, *et al.* Sustainable options of post treatment of UASB effluent treating sewage: A review [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, **55**(12): 1232-1251.
- [30] Liao B, Kraemer J T, Bagleyb D M. Anaerobic membrane bioreactors: applications and research directions [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2006, **36**(6): 489-530.
- [31] Zhang J, Padmasiri S I, Fitch M, *et al.* Influence of cleaning frequency and membrane history on fouling in an anaerobic membrane bioreactor [J]. *Desalination*, 2007, **207**(1-3): 153-

- 166.
- [32] Skouteris G, Hermosilla D, López P, *et al.* Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: A review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **198-199**: 138-148.
- [33] Huang Z, Ong S L, Ng H Y. Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment: Effect of HRT and SRT on treatment performance and membrane fouling [J]. *Water Research*, 2011, **45**(2): 705-713.
- [34] Mahendran B, Lin H J, Liao B Q, *et al.* Surface properties of biofouled membranes from a submerged anaerobic membrane bioreactor after cleaning [J]. *Journal of Environmental Engineering - Asce*, 2010, **137**(6): 504-513.
- [35] Yang J X, Spanjers H, Van Lier J B. Pulse shear stress for anaerobic membrane bioreactor fouling control [J]. *Water Science & Technology*, 2011, **64**(2): 355-360.
- [36] Trzcinski A P, Stuckey D C. Treatment of municipal solid waste leachate using a submerged anaerobic membrane bioreactor at mesophilic and psychrophilic temperatures: Analysis of recalcitrants in the permeate using GC-MS [J]. *Water Research*, 2010, **44**(3): 671-680.
- [37] Bérubé P R, Hall E R, Sutton P M. Parameters governing permeate flux in an anaerobic membrane bioreactor treating low-strength municipal wastewaters: A literature review [J]. *Water Environment Research*, 2003, **78**(6): 887-896.
- [38] Ross W R, Barnard J P, Strohwalder N K H, *et al.* Practical application of the ADUF process to the full-scale treatment of a maize-processing effluent [J]. *Water Science & Technology*, 1992, **25**(10): 27-39.
- [39] López-Fernández R, Aristizábal C, Irusta R. Ultrafiltration as an advanced tertiary treatment of anaerobically digested swine manure liquid fraction: A practical and theoretical study [J]. *Journal of Membrane Science*, 2011, **375**(1-2): 268-275.
- [40] 白玲, 刘超, 胡侃, 等. 浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器处理啤酒废水试验 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(9): 1813-1819.
- [41] 池勇志, 习钰兰, 薛彩红, 等. 厌氧消化技术在日本有机废水和废弃物处理中的应用 [J]. *中国给水排水*, 2011, **27**(8): 27-33.
- [42] 王旭, 吴志超, 田陆梅, 等. 厌氧膜生物反应器处理酒厂废水运行特性研究 [J]. *环境污染与防治*, 2007, **29**(10): 777-780.
- [43] 孙凯, 陆晓峰, 周保昌, 等. 厌氧膜生物反应器 (AnMBR) 处理高浓度豆制品废水的研究 [J]. *膜科学与技术*, 2011, **31**(4): 65-69.
- [44] Kim M S, Lee D Y, Kim D H. Continuous hydrogen production from tofu processing waste using anaerobic mixed microflora under thermophilic conditions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, **36**(14): 8712-8718.
- [45] Stamatelatou K, Kopsahelis A, Blika P S, *et al.* Anaerobic digestion of olive mill wastewater in a periodic anaerobic baffled reactor (PABR) followed by further effluent purification via membrane separation technologies [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2009, **84**(6): 909-917.
- [46] Saddoud A, Hassaïri I, Sayadi S. Anaerobic membrane reactor with phase separation for the treatment of cheese whey [J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(11): 2102-2108.
- [47] 陈志祥, 刘振鸿, 陈季华. 浸没式厌氧膜生物反应器处理乳品有机废水的研究 [J]. *净水技术*, 2010, **29**(1): 42-46.
- [48] Chitapornpan S, Chiemchaisri C, Chiemchaisri W, *et al.* Organic carbon recovery and photosynthetic bacteria population in an anaerobic membrane photo-bioreactor treating food processing wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **141**: 65-74.
- [49] 陆晓峰, 周保昌, 沈飞, 等. 厌氧膜生物反应器在食品废水处理中的应用研究 [J]. *膜科学与技术*, 2011, **31**(3): 234-238.
- [50] McHugh S, Collins G, Mahony T, *et al.* Biofilm reactor technology for low temperature anaerobic waste treatment: microbiology and process characteristics [J]. *Water Science & Technology*, 2005, **52**(7): 107-113.
- [51] Ho J, Sung S. Methanogenic activities in anaerobic membrane bioreactors (AnMBR) treating synthetic municipal wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(7): 2191-2196.
- [52] Wijekoon K C, Visvanathan C, Abeynayaka A. Effect of organic loading rate on VFA production, organic matter removal and microbial activity of a two-stage thermophilic anaerobic membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(9): 5353-5360.
- [53] 凌雪峰, 左剑恶, 顾夏声. pH 6.0 酸性条件下产甲烷 EGSB 反应器的运行研究 [J]. *环境科学*, 2004, **25**(1): 57-61.
- [54] 许保玖, 龙腾锐. 当代给水与废水处理原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 91-109.
- [55] 任南琪. 产氢产酸发酵细菌生态学研究——群落演替与内平衡反馈调节机制 [R]. 国家地震局工程力学研究所博士后研究报告, 1998. 35-43.
- [56] 赵杰红, 张波, 蔡伟民. 厌氧消化系统中丙酸积累及控制研究进展 [J]. *中国给水排水*, 2005, **21**(3): 25-27.
- [57] Lettinga G, Field J, Van Lier J, *et al.* Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future [J]. *Water Science & Technology*, 1997, **35**(10): 5-12.
- [58] Seghezzi L, Zeeman G, Van Lier J B, *et al.* A review: The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors [J]. *Bioresource Technology*, 1998, **65**(3): 175-190.
- [59] Chong S, Sen T K, Kayaalp A, *et al.* The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment-A State-of-the-art review [J]. *Water Research*, 2012, **46**(11): 3434-3470.
- [60] Martin-Garcia I, Monsalvo V, Pidou M, *et al.* Impact of membrane configuration on fouling in anaerobic membrane bioreactors [J]. *Journal of Membrane Science*, 2011, **382**(1-2): 41-49.
- [61] Charfi A, Ben Amar N, Harmand J. Analysis of fouling mechanisms in anaerobic membrane bioreactors [J]. *Water Research*, 2012, **46**(8): 2637-2650.
- [62] Lin H J, Peng W, Zhang M J, *et al.* A review on anaerobic

- membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives[J]. *Desalination*, 2013, **314**: 169-188.
- [63] Drews A. Membrane fouling in membrane bioreactors—Characterisation, contradictions, cause and cures[J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, **363**(1-2): 1-28.
- [64] Judd S, Judd C. The MBR book [M]. (2nd ed.). United Kingdom: Elsevier Limited, 2011. 473.
- [65] Hwang B K, Lee W N, Yeon K M, *et al.* Correlating TMP increases with microbial characteristics in the bio-cake on the membrane surface in a membrane bioreactor[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(11): 3963-3968.
- [66] Meng F G, Chae S, Drews A, *et al.* Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material[J]. *Water Research*, 2009, **43**(6): 1489-1512.
- [67] Gao W J, Qu X, Leung K T, *et al.* Influence of temperature and temperature shock on sludge properties, cake layer structure, and membrane fouling in a submerged anaerobic membrane bioreactor [J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, **421-422**: 131-144.
- [68] Lin H J, Xie K, Mahendran B, *et al.* Factors affecting sludge cake formation in a submerged anaerobic membrane bioreactor [J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, **361**(1-2): 126-134.
- [69] Böhm L, Drews A, Prieske H, *et al.* The importance of fluid dynamics for MBR fouling mitigation [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **122**: 50-61.
- [70] 郁达伟. 计算流体力学在膜技术膜生物反应器中的应用研究 [D]. 北京: 中国人民大学, 2012. 10-15.
- [71] Gao W J, Leung K T, Qin W S, *et al.* Effects of temperature and temperature shock on the performance and microbial community structure of a submerged anaerobic membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(19): 8733-8740.
- [72] Gao W J J, Lin H J, Leung K T, *et al.* Influence of elevated pH shocks on the performance of a submerged anaerobic membrane bioreactor [J]. *Process Biochemistry*, 2010, **45**(8): 1279-1287.
- [73] Gao W J, Han M N, Qu X, *et al.* Characteristics of wastewater and mixed liquor and their role in membrane fouling [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **128**(1): 207-214.
- [74] Cerón-Vivas A, Morgan-Sagastume J M, Noyola A. Intermittent filtration and gas bubbling for fouling reduction in anaerobic membrane bioreactors[J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, **423-424**: 136-142.
- [75] Liao B Q, Xie K, Lin H J, *et al.* Treatment of kraft evaporator condensate using a thermophilic submerged anaerobic membrane bioreactor[J]. *Water Science & Technology*, 2010, **61**(9): 2177-2183.
- [76] Saddoud A, Sayadi S. Application of acidogenic fixed-bed reactor prior to anaerobic membrane bioreactor for sustainable slaughterhouse wastewater treatment [J]. *Journal of Hazardous Materials Pollution Prevention and Restoration of the Environment*, 2007, **149**(3): 700-706.
- [77] Zayen A, Mnif S, Aloui F, *et al.* Anaerobic membrane bioreactor for the treatment of leachates from Jebel Chakir discharge in Tunisia[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **177**(1-3): 918-923.
- [78] An Y, Wang Z W, Wu Z C, *et al.* Characterization of membrane foulants in an anaerobic non-woven fabric membrane bioreactor for municipal wastewater treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, **155**(3): 709-715.
- [79] Zhang X Y, Wang Z W, Wu Z C, *et al.* Formation of dynamic membrane in an anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **165**(1): 175-183.
- [80] 刘艳玲. 两相厌氧系统底物转化规律与群落演替的研究 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2001. 41-65.
- [81] ADI Anaerobic Treatment Technology [EB/OL], http://www.adi.ca/pdfs/ADI_AnMBR_brochure_Final.pdf, 2013-8-3.
- [82] McMahon J. Anaerobic Membrane Bioreactor System Treats High Strength Wastewater [EB/OL], <http://www.waterworld.com/articles/mem/articles/print/volume-2/issue-3/feature/anaerobic-membrane-bioreactor-system-treats-high-strength-wastewater.html>, 2013-6-3.
- [83] 周保昌, 陆晓峰, 卞晓锴, 等. 浸没式厌氧膜生物反应器的研发及其除污效能[J]. *中国给水排水*, 2011, **27**(15): 29-31.
- [84] 林红军, 陆晓峰, 梁国明, 等. 厌氧膜生物反应器的研究和应用进展[J]. *净水技术*, 2007, **26**(6): 1-6, 61.
- [85] 陆风海, 吴志超, 王志伟, 等. 微网反应器处理低含量生活污水膜污染研究[J]. *水处理技术*, 2011, **37**(2): 98-101.
- [86] 白玲, 刘超, 蓝伟光, 等. 浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器的膜污染机理研究[J]. *膜科学与技术*, 2010, **30**(2): 58-63.
- [87] 白玲, 刘超, 胡侃, 等. 浸没式厌氧双轴旋转膜生物反应器的膜污染特性研究[J]. *工业水处理*, 2009, **29**(8): 18-21.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i>	(1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i>	(1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban
.....	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i>	(1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i>	(1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i>	(1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong	(1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i>	(1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i>	(1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes
.....	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i>	(1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i>	(1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo	(1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i>	(1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i>	(1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i>	(1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i>	(1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i>	(1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i>	(1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i>	(1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i>	(1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i>	(1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing	(1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i>	(1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i>	(1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i>	(1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan	(1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i>	(1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i>	(1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i>	(1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i>	(1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i>	(1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min	(1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i>	(1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i>	(1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i>	(1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene
.....	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i>	(1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i>	(1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i>	(1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i>	(1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i>	(1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i>	(1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i>	(1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i>	(1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area
.....	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i>	(1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i>	(1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i>	(1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i>	(1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i>	(1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i>	(1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i>	(1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i>	(1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i>	(1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan	(1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i>	(1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i>	(1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i>	(1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei	(1613)

《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4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 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