

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

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

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思 (1225)
鼎湖山 PM ₁₀ 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全 (1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思 (1236)
深圳市 PM ₁₀ 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武 (1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽 (1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干 (1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平 (1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇 (1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰 (1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军 (1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国 (1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆 (1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健 (1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美 (1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚 (1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶华香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红 (1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅 (1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平 (1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非 (1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞 (1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华 (1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉 (1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾 (1374)
咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅 (1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿 (1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏 (1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟 (1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙 (1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥 (1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛 (1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞 (1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影 (1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿 (1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪助 (1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新 (1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东 (1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱 (1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维 (1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽 (1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢 (1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军 (1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎 (1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳 (1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲 (1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生 (1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生 (1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新 (1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君 (1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水 (1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠 (1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新 (1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提 (1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅 (1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志 (1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增 (1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华 (1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞 (1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰 (1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来 (1636)
《环境科学》征订启事 (1283) 《环境科学》征稿简则 (1332) 信息 (1350, 1509, 1582, 1644) 专辑征稿通知 (1523)	

活性污泥絮体的分形结构分析

阮晓东, 刘俊新*

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 通过小角光散射 (small-angle light scattering, SALS) 实验确定出活性污泥絮体的分形区域, 对絮体粒径分布进行了拟合分析, 采用原子力显微镜 (AFM) 和激光共聚焦扫描显微镜 (CLSM) 对絮体在不同尺度下的形貌进行了观测。结果显示, 污泥絮体是由一系列的絮团结合而成, 絮体表面凹凸不平, 有各种“孔洞”, “缝隙”, 絮体内部存在一系列的孔隙。较大尺度的絮体同时存在多种孔道结构, 构成絮体中营养物和水流的运输通道; 污泥絮体在 $0.5 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间具有明显的分形结构, 表明活性污泥絮体在较小的粒径时已经具有一定的分形特征, 活性污泥的粒度分布属于 Gamma 分布方式, 证明污泥絮体的成长过程是一种絮团-絮团的凝聚过程。

关键词: 活性污泥; 分形结构; 小角光散射; Gamma 分布; 絮团-絮团凝聚

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1457-07

Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs

RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin

(Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The small-angle light scattering (SALS) experiment was executed to calculate the fractal region, and the data of particle size distribution was fitted by Gamma equation. Besides, the atomic force microscope (AFM) and confocal laser scanning microscopy (CLSM) were used to observe the morphology of the microstructure of the sludge flocs under different scales. The results showed that the sludge floc was constituted by a series of clusters with different sizes. The surface of the floc was unsmooth with various “holes” and “gaps” and there were a range of pore structures within the sludge floc. For sludge flocs at large scales, a variety of pore texture coexisted, forming a transport channel for the nutrients and water in the sludge. The results also showed that the fractal structure was present in sludge flocs in the size range of $0.5 \sim 50 \mu\text{m}$ and the particle size distribution was fitted to the Gamma equation distribution model, indicating that the sludge floc formation process is a process dominated by Cluster-Cluster flocculation.

Key words: activated sludge; fractal structure; small-angle light scattering; gamma distribution; cluster-cluster aggregation

污水处理生物反应器内的活性污泥是复杂的聚集体, 主要由微生物及其胞外聚合物 (EPS) 和从废水中吸附或者絮凝的无机颗粒和有机颗粒等物质组成^[1,2]。活性污泥的絮体结构对污泥的净化能力和后续固液分离过程具有重要影响, 因此多年来一直是研究的热点。分形理论的提出, 为活性污泥絮体结构的解析提供了一种新的方式^[3~5]。按照分形理论, 絮体分形结构量度可用分形维数表征, 而絮体分形维数大小主要与形成絮体的颗粒表面性质、絮体类型、水力条件、絮体形成机制等因素有关^[6]。例如, 不同泥龄下的污泥絮体形态结构不同, 随着泥龄的增大, 絮体结构变得紧凑, 相应絮体分形维数增加^[7]。研究显示, 分形维数可以作为评估絮体混凝沉淀性能的重要参数之一^[8]。如宣科佳等^[9]发现分形维数较低的污泥具有高的剪切敏感性和低絮体强度, 相应的污泥稳定性低。朱哲等^[10]研究了进水基质种类对污泥絮体分形维数的影响, 发现以乙酸钠为基质的活性污泥絮体的分形维数最低, 而以苯酚为基质的活性污泥絮体的分形维数最高, 相对应的

是苯酚污泥沉降性能最好, 而乙酸钠污泥最差。此外, 由于活性污泥絮体是由极小的生物细胞和非生物的颗粒逐级碰撞黏附而成, 污泥絮体的分形结构也体现了絮体的孔隙特征, 应用分形结构分析可以综合表征污泥的密实程度和规则程度, 可为研究污泥的传质、吸附、底物降解等提供依据^[11]。但目前关于絮体的分形结构的描述基本是理论分析和计算机模拟技术的应用^[12~14], 大多数实验观测结果还仅仅限于对分形维数的计算, 还有一些是对絮体的自相似 (self-similar) 和自仿射性 (self-affine) 的探讨, 而对污泥絮体的分形结构的理论意义及其内涵还缺乏实验的测量结果来形成完整的表达体系。本文在前人研究的基础上, 对活性污泥絮体分形结构的意义、形成的动态过程进行了深入地分析, 并采用现代仪器手段对絮体的微观结构和形貌进行了观测,

收稿日期: 2012-06-02; 修订日期: 2012-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50921064)

作者简介: 阮晓东 (1982~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为污水及污泥相关处理, E-mail: ruxido@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jxliu@rcees.ac.cn

以期完善活性污泥絮体分形结构方法提供科学数据。

1 质量分形原理

通常,絮体的分形体系分为质量分形和表面分形。分形体系具有统计自相似性和标度不变性。质量分形是指物体的质量以其半径的指数函数变化;表面分形是指物体的质量按欧氏空间方式变化。质量分形和表面分形采用的分析方法不同。质量分形对应于 $I(Q) \propto Q^{-D_m}, 1 \leq D_m < 3$; 表面分形对应于 $I(Q) \propto Q^{D_s-6}, 2 \leq D_s < 3$ 。而对于实测的光散射数据,作散射强度(I)与散射矢量(Q)之间的曲线,当 $1 \leq -d < 3$, 则为质量分形, $D_m = -d$; $3 \leq -d < 4$, 则为表面分形, $D_s = 6 + d$ 。本研究主要利用小角光散射等方法研究活性污泥絮体的质量分形,小角光散射是按照 Rayleigh-Gans-Debye (RGD) 散射理论进行计算的^[15,16]。激光束通过样品池,样品池中的颗粒粒度与散射光呈比例关系,散射强度(I)与散射矢量(Q)存在一定的函数关系。散射矢量(Q)是介质中入射光和散射光的差值,可以表示为:

$$Q = \frac{2\pi}{L} \quad (1)$$

而在小角光散射实验中:

$$Q = \frac{4\pi n \sin(\theta/2)}{\lambda} \quad (2)$$

式中, L 为光程差, n 为介质的折射指数, θ 为散射角, λ 为入射光在真空中的波长。由小角光散射计算的质量分形维数可通过散射强度与散射矢量对数间的直线关系得到,而粒径大小和分布基于米氏定理(Mie theory)而得^[14]。

2 材料与方法

2.1 实验样品及制备方法

实验所用活性污泥取自北京市某污水处理厂的 UCT 处理工艺好氧池。污泥样品置于 2 L 聚乙烯样品瓶中在 2 h 内 4℃ 冷藏送至中国科学院生态环境中心进行污泥分形结构分析。

用于原子力显微镜 (AFM) 的样品制备方法: AFM 用弹性微悬臂来检测样品表面特征,可用于不脱水的、活的生物样品的检测。为了研究更接近自然状态的污泥絮体,本实验只对云母片基质进行了阳离子化处理,这样便于 EPS 分子之间和云母片基质结合。样品的具体制备方法为:取 2 mmol·L⁻¹ NiCl₂ 溶液 5 μL 滴在新鲜解理的云母片上,保持 1

min 后水洗,干燥,使云母表面带正电;将取得的絮体样品稀释 1 000 倍,取絮体溶液 10 μL,将样品沉积在经过 Ni²⁺ 处理的云母表面,然后在环境温度和常压下晾干,即得到原子力显微镜成像需要的样品。

用于共聚焦激光扫描显微镜 (CLSM) 的样品制备方法:使用被荧光染料异硫氰酸荧光素 (FITC) 和被 Texas Red (Molecular Probes, Eugene, Oregon, USA) 标记的稀释比例 1:10 的伴刀豆球蛋白 A (Con A) 对污泥中蛋白和多糖成分进行染色。Con A + Texas Red 可将多糖显示为红色,而 FITC 可将蛋白质显示为绿色。污泥样品先用蒸馏水冲洗 3 次,然后将污泥样品置于 1.5 mL Eppendorff 管中并重新分散于 1 mL MES [2-(N-吗啉代)乙磺酸] 缓冲液,加入新鲜配制、溶于 MES 的 0.1 mol·L⁻¹ 的 FITC 溶液 100 μL,再加入新鲜配制、溶于 MES 的 0.1 mol·L⁻¹ Con A + Texas Red 的充分混合,以铝箔包裹避光,在室温下反应 2 h 后用去离子水冲洗,污泥重新分散于 1 mL MES 并于 4℃ 下保存。

2.2 分析方法

活性污泥絮体粒径采用激光粒度仪 (Mastersizer 2000, UK) 测定,其中激光器配置为 5 mW He-Ne 激光 ($\lambda = 632.8$ nm), 散射角度为 0.01° ~ 32.1°。活性污泥絮体的分形维数是根据激光粒度仪的测量数据按照光散射法计算确定,即通过散射强度 I 随波矢的变化 q 来获取所测物质的结构信息,然后对光散射分析得到的分形区域进行了分析,并对絮体的端点值进行计算。

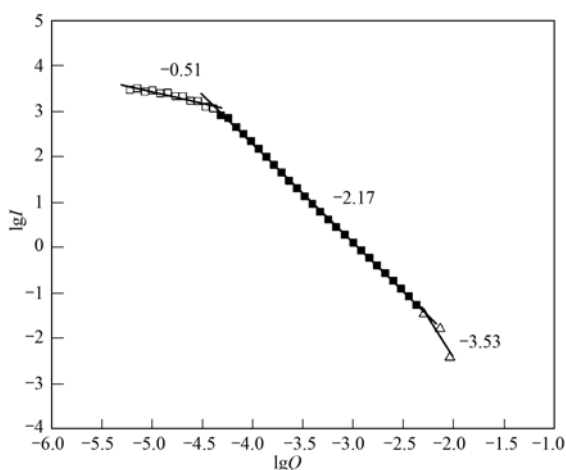
活性污泥絮体的超微结构采用 AFM (Nanoscope (IIIa) 型扫描探针显微镜,美国 DI 公司) 观测。在室温下 (20℃) 及大气环境中对絮体形态进行扫描观测,图像均在 Tapping 模式下获得,探针为 Si₃N₄ (微悬臂长: 200 μm, 弹性系数 0.12 N·m⁻¹), 接触作用力控制在 3 ~ 4 nN 量级以内,原子力显微镜图像的形态学特征 (如高度、宽度等) 均采用原子力显微镜附带的软件 (Nanoscope v531R1) 进行分析。

活性污泥絮体的结构采用激光共聚焦扫描显微镜 (TCSP5, 德国 Leica 公司) 观测。激光光源为 12 W 氩离子激光器,输出波长为 488 nm 和 514 nm 激光。激发光为 485 nm, 发射光 530 nm。将 100 倍、200 倍和 800 倍镜下观测,并用激光共聚焦显微镜附带的数码相机拍照。荧光图像处理采用显微镜自带的软件处理。

3 结果与分析

3.1 光散射法测量分形区域分析

光散射法是测量活性污泥分形维数的常用方法. 但由于在实际的分形结构中, 自相似性只在一定的标度空间内成立, 反映在测量结果展现的倒易空间中, $\lg I - \lg Q$ 曲线也只在一定的测量波数范围内呈直线, 并且在不同的波数范围内可以有不同斜率的直线, 它们分别对应于不同标度空间内不同分形结构的维度. 图 1 是活性污泥中的粒子絮体散射法测量的 $\lg I - \lg Q$ 曲线, 通过对曲线进行分析, 可以将图 1 的曲线可分成 3 个区域: 大波矢区域、中间波矢区域和小波矢区域.



图中从上到下分别为: 小波矢区域、中间波矢区域与大波矢区域

图 1 小角光散射得到的典型活性污泥絮体的分形维数曲线

Fig. 1 Typical fractal dimension plot obtained by small angle light scattering method

在大波矢区域, 散射强度 I 随波矢 Q 的增加衰减加快, 这时散射反映的是污泥絮体颗粒的表面情况, 表面分形维数 (D_s) 的趋势线的斜率 $D_s = 3.53$, 接近于表面分形维数的最大值 4, 这说明在大波矢区域絮体表面是光滑的.

在中间波矢区域, 散射反映的是污泥絮体 EPS 的立体网络结构的信息, 具有分形时, $I \propto Q^{-D}$, 从图 1 中的趋势线的斜率可以得出质量分形维数 $D = 2.17$; 这也反映了絮体的表面结构粗糙. 目前根据光散射法计算的分形维数一般都使用中间波矢区域作为常用的计算区域, 通过计算其中数据的线性斜率即可确定絮体的分形维数.

而在小波矢区域, 散射强度趋于饱和, 接近一定值, 而小波矢区域反映的是絮体大尺度范围的信息, 这说明污泥絮体在大尺度范围内是均匀的.

图 1 中两个拐点分别与污泥絮体的平均颗粒尺度 $\alpha = 2\pi/q\alpha$ (大波矢端) 和关联长度 $\varepsilon = 2\pi/q\varepsilon$ (小波矢端) 相对应, 其中 q 的单位是 10 nm^{-1} , 这里的

污泥絮体指结构均匀的小团簇, 关联长度 ε 与最大分形团簇的尺度相当, 一般在 ε 尺度以上, 可以认为是均匀的分形结构只存在于 α 与 ε 之间, 根据计算 $\alpha = 50 \text{ }\mu\text{m}$, $\varepsilon = 0.5 \text{ }\mu\text{m}$ 左右, 反映了污泥絮体拥有的分形结构尺度范围较大. 由于活性污泥中的微生物的尺寸都在 $1 \sim 2 \text{ }\mu\text{m}$, 表明吸附在絮体上的污染物颗粒的聚集形态已经具有分形结构.

3.2 絮体粒径分布的 Gamma 方程模拟

活性污泥絮体是一种典型的微生物絮体, 而在絮体的形成过程中, 随着絮体粒径的不断增加, 最终形成了一定的粒径分布, 这是一种从最小粒径到最大粒径的分布模式, 一般是通过激光粒度仪来进行测量计算. 通过对其粒径分布模式的说明, 可以进一步理解其分形结构形成的原因. 本研究对活性污泥絮体的分布模式进行测量, 发现其分布规律大多遵循如图 2 所示的规律. 而对这种分布形态进行拟合, 发现用 Gamma 方程可以取得较好的拟合效果. Gamma 方程分布属于偏态分布^[17], 方程如下式所示:

$$y = kx^a e^{-bx}$$

式中, k 、 a 、 b 均为参数, x 为絮体的粒径, y 为不同粒径的絮体所占的比例.

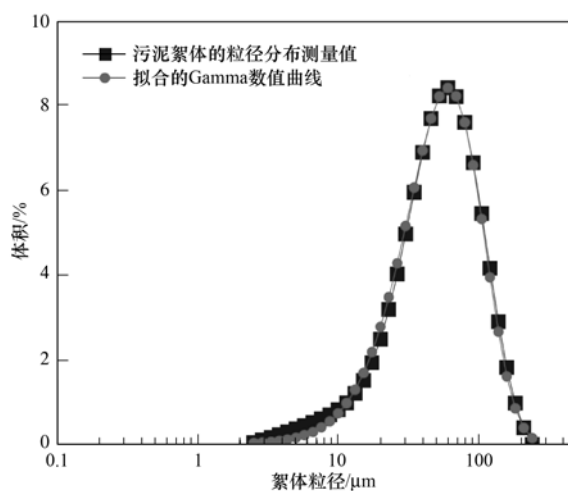


图 2 活性污泥絮体粒径分布与 Gamma 方程拟合

Fig. 2 Size distribution of activated sludge flocs and its fitting to Gamma equation

通过对实验测量数据的拟合, 可求出各参数的数值. 由图 2 可见, 粒径分布的 Gamma 方程拟合的拟合度很好, 各参数分别为 $k = 0.330 029$; $a = 2.525 483$; $b = 0.041 737$. Gamma 分布方式来源于斯莫卢霍夫斯基 (Smoluchowski) 动力学方程的结果, 而斯莫卢霍夫斯基动力学方程在絮体的构建方面体现的是絮团-絮团 (cluster-cluster) 的动力学凝

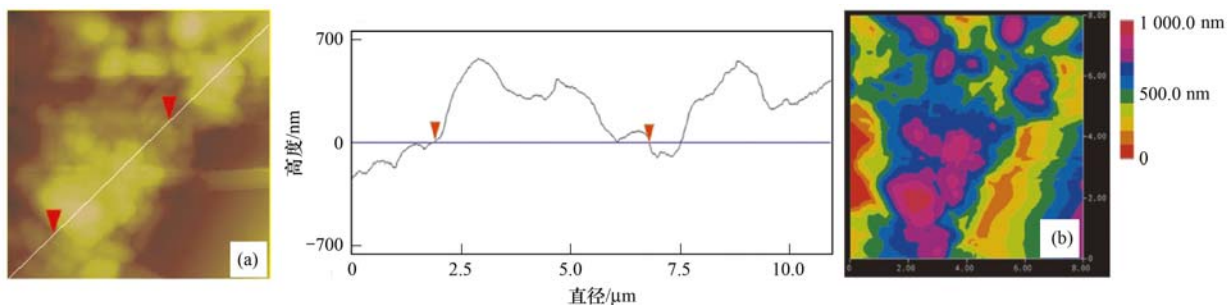
聚过程^[18],因此,污泥絮体的粒径分布与 Gamma 方程较好地拟合度说明活性污泥的絮凝过程是一种絮团-絮团的凝聚过程.也就是说,活性污泥絮体分形结构的形成过程,并不是絮体粒径逐渐增加的过程,而是小絮体与小絮体之间通过碰撞结合形成中等絮体,之后中等絮体再次碰撞而长大的过程.这种絮团-絮团的凝聚过程所形成絮体的粒度分布是一系列不同等级的分布,如图 2 所示.絮团-絮团的凝聚过程也可用扩散限制凝聚(diffusion limited aggregation, DLA)模型的生长过程来表示^[19].由于活性污泥絮体的粒度分布在 $0.5 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间,所以絮体的分形结构特性可以从不同的尺度进行观测分析.

3.3 AFM 对微絮体及其结构的观测

为了解小尺度污泥絮体的分形结构,本研究首先利用 AFM 对活性污泥絮体的微观结构进行了观测分析.图 3(a)为切片分析结果,图 3(b)为等效色彩转换图像.根据对所测量的污泥絮体的原子力扫描图像的切片分析,其高度在 $700 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$ 之间,而絮体的大小(直径)在 $5 \mu\text{m}$ 左右,这种较小的絮体可以认为与絮粒的大小比较接近.从絮体的边缘可以看到 EPS 的过渡层,其过渡层的分布可以从图

3(b)的高度图的色彩转换等效图像观察到.图 3(b)中绿色部分清晰地显示了紧密结合的胞外聚合物的存在状态,构成了活性污泥的外层空间的绝大部分,也成为了活性污泥絮体发挥界面吸附和絮凝作用的活性物质.而部分 EPS 则向外延伸,成为微絮体的外界面.

前文通过光散射方法计算出的污泥絮体的分形维数,一方面说明污泥絮体具有分形特征,另一方面说明污泥絮体表面并不平整,有各种“孔洞”,“缝隙”,凹凸不平.图 4 是活性污泥絮体表面的 AFM 观测图像,从中可以更清楚地了解这种空洞和缝隙的存在特征.从中可以观测到 $1 \sim 4 \mu\text{m}$ 范围内絮体表面的结构特征,可以发现污泥絮体中有许多的 $10 \sim 100 \text{ nm}$ 的微小颗粒存在于絮体的表面,而且絮体表面并不平整,有许多的空洞,样式很粗糙.这些微小颗粒从粒径上分析主要是絮体吸附的胶体颗粒.由于絮体在 $0.5 \mu\text{m}$ 范围内便已经产生了分形结构,而一般的微生物的长度都在 $1 \mu\text{m}$ 左右,所以可以看到絮体中最小的分形结构来自于吸附的污染物颗粒.这些被吸附的污染物颗粒的聚集首先形成了粗糙的、有多种孔道结构的分形体,然后这种小絮体进一步与微生物结合形成了更复杂的絮体结构.



(a) AFM 观测及切片分析; (b) 等效色彩转换图像

图 3 污泥絮体的 AFM 观测及切片分析和等效色彩转换图像

Fig. 3 AFM observation of sludge flocs with section analysis and equivalent color convert image

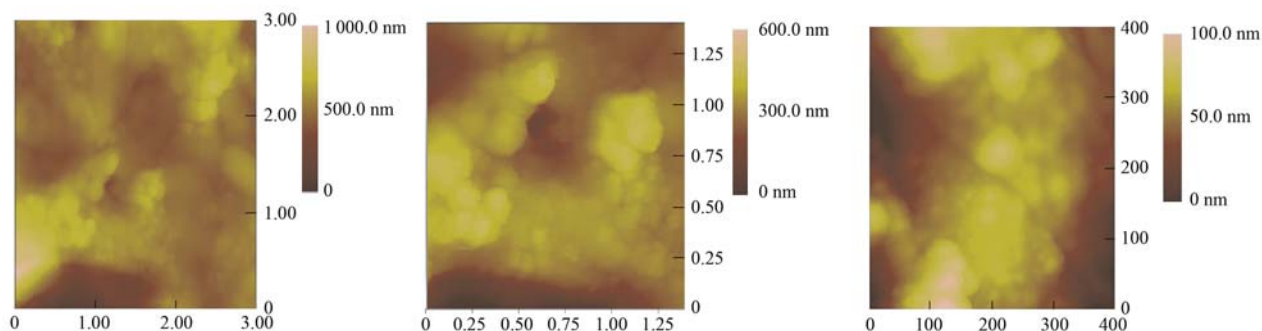


图 4 活性污泥絮体表面的 AFM 观测图像

Fig. 4 AFM images of the surface of activated sludge flocs

3.4 絮体微观结构的 CLSM 观测

为了能在更大的尺度范围内说明絮体的分形特征,对污泥絮体进行了共聚焦激光扫描显微镜(CLSM)观测. 在污泥絮体研究中存在一个很大的障碍,就是很难获得不脱水样品的清晰的显微照片,而共聚焦激光扫描显微镜则恰好克服了困难,可在微米水平上对絮体进行原位检测,并可对 $0.3\ \mu\text{m}$ 厚度的区域进行聚焦,这就大大降低了背景噪声的干扰.

图5为污泥絮体的激光共聚焦扫描显微镜(CLSM)图像,其中红色和绿色分别表示多糖和蛋白质的分布区域. 在激光共聚焦扫描显微镜下,分别以 $488\ \text{nm}$ 波长激光激发 FITC 和用 $543\ \text{nm}$ 波长激光激发 Con A 来观测污泥絮体,结果发现絮体的多糖和蛋白质均可显示出絮体的形貌. 从图5可以

看出,絮体是由一系列的絮团结合而成的,而絮团中还可以辨认出更小粒径级别的絮体. 在絮体的内部,可以看到一系列的孔隙存在,这与 Chu 等^[20]采用计算机构建的三维模型是一致的. 根据絮团的大小标记,粒径为 $30\ \mu\text{m}$ 大小的絮体中包含了很多粒径在 $1\sim4\ \mu\text{m}$ 不等的较致密的小絮体,小絮体之间则有比较疏松的絮体填充,中间还有很多的孔隙. CLSM 的观测结果一方面证实了 Gamma 分布方程所推测的结果,即絮体的形成过程为絮团-絮团的凝聚过程,这种小的絮团根据图5的显示得到其分布在 $1\sim5\ \mu\text{m}$ 之间;另一方面,也证实了较大的尺度上絮体同时存在多种孔道结构,这种孔道结构与图4所示的微小孔道结构可能共同构成絮体中营养物和水流的运输通道^[21].

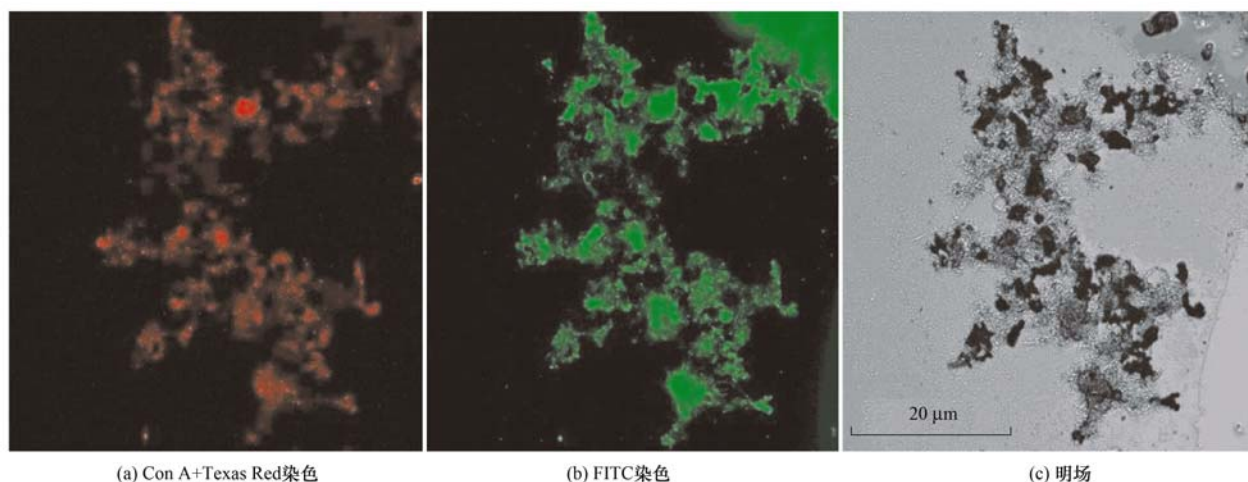


图5 活性污泥絮体的 CLSM 图谱

Fig. 5 CLSM images of flocculated sludge flocs

4 讨论

活性污泥絮体是一种亚稳态的物质,是由微生物、胞外聚合物、吸附的污染物以及其他组分如丝状菌等共同组成的聚集结构,这种聚集结构在远离平衡系统的情况下形成了有序结构,从而表现出分形特征. 由于絮凝体的成长是一个随机过程,具有非线性的特征,而这一生长过程决定了絮凝体在一定范围内具有自相似性和标度不变性,这正是分形的2个重要特征. 但是目前大多数研究还仅仅将污泥的分形结构作为一个指标来研究,主要是将分形维数与污泥的其他特征一起作为参量来对絮体的沉降性、脱水性等进行分析,而没有深入地探讨分形结构所代表的深层次含义. 通过对图1所示结果的分析,将活性污泥絮体具有分形区域的端点值计算出来,结果显示污泥絮体在 $0.5\sim50\ \mu\text{m}$ 之间都具有

分形结构. 这种较大的分布区域显示了活性污泥絮体在较小的粒径范围中已经具有一定的分形特征,为研究和理解絮体的结构提供了新的角度. 此外,目前大多数关于絮体结构的研究还仅限于对一些静态的参数进行分析,如絮体的表面电荷、Zeta 电位、SVI、疏水性、丝状菌指数、胞外聚合物含量等,没有将絮体结构的形成动力学过程做具体的描述. 图2显示了絮体的粒度分布可以用 Gamma 方程进行较好地拟合,并且根据这个结果分析得到了污泥絮体形成的絮团-絮团(cluster-cluster)聚集的动力学过程,而这种聚集过程同时也是扩散限制凝聚的生长过程,并且最终导致了絮体的分形结构的形成. 图3~5中的 AFM 和 CLSM 对微絮体进行的观测结果显示,微絮体的粒径的范围在 $3\sim5\ \mu\text{m}$ 之间,而由小絮体进一步生长的絮体粒径在 $25\sim100\ \mu\text{m}$ 之间. 此外,采用 CLSM 对絮体进行分析的结果也指

向了絮体形成过程是絮团-絮团的聚集过程. 这些结论都有助于深入理解絮体的分形结构特征以及构建精确的絮体生长的模型.

另外,本研究也通过 AFM 和 CLSM 技术手段对絮体中的孔道结构进行了分析,这种孔道结构是分形结构所特有的表现,很多学者都认为这种孔道结构对絮体的营养传递和稳定性等非常重要,如 Biggs 等^[22]报道称孔隙平均直径为 $0.01\ \mu\text{m}$, Wu 等^[23]证明了由于孔道的存在造成了絮体外部的松散,而松散的外部区域正是分形结构所构建的基础,并认为这种分形结构的组成有可能对于维持絮体中好氧厌氧区域的分布,且对于絮体中的微生物获得营养物质和氧气是有益的. 目前 AFM 与 CLSM 主要应用在对微生物絮体胞外聚合物的形貌、分布以及其中蛋白质和多糖物质的定性研究中^[24,25],此外,目前 CLSM 在研究颗粒污泥 EPS 的分布特征以及借助于不同探针对其中多糖和蛋白质的分布有一定的应用^[26]. 由于胞外聚合物附着在污泥中微生物表面或围绕在絮体周围,是形成水道、孔隙结构的主要物质,传统的分形维数的计算手段还不能对这些孔道结构进行分析和表征,所以,本研究提出的综合表征方法有助于深入研究活性污泥分形结构中微区域和微结构的特点,可以弥补分形维数在表征污泥分形特征中的不足,在分析絮体孔隙的渗透速率、剪切流携带营养和氧气对絮体的影响等方面可能具有一定的应用价值.

5 结论

(1)污泥絮体在 $0.5 \sim 50\ \mu\text{m}$ 之间具有明显的分形结构,活性污泥的粒度分布属于 Gamma 分布方式,表明污泥絮体的成长过程是一种絮团-絮团的凝聚过程.

(2)AFM 能够显示出在纳米尺度下分形絮体中空洞和缝隙的存在特征,用 CLSM 可以观测较大尺度范围内污泥絮体的形态,验证了絮体的絮团-絮团凝聚过程.

(3)絮体中的孔道结构可通过 AFM 与 CLSM 进行分析,AFM 与 CLSM 的观测结果显示,分形絮体的小尺度分布在 $3 \sim 5\ \mu\text{m}$ 之间,而由小絮体进一步生长的絮体粒径在 $25 \sim 100\ \mu\text{m}$ 之间.

参考文献:

- [1] Yang S F, Li X Y. Influences of extracellular polymeric substances (EPS) on the characteristics of activated sludge under non-steady-state conditions[J]. *Process Biochemistry*, 2009, **44** (1): 91-96.
- [2] Pan X L, Liu J, Zhang D Y, *et al.* Binding of dicamba to soluble and bound extracellular polymeric substances (EPS) from aerobic activated sludge: A fluorescence quenching study[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, **345**(2): 442-447.
- [3] Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature* [M]. New York: Freeman, 1983.
- [4] Torfs E, Dutta A, Nopens I. Investigating kernel structures for Ca-induced activated sludge aggregation using an inverse problem methodology[J]. *Chemical Engineering Science*, 2012, **70**: 176-187.
- [5] Tambo N, Watanabe Y. Physical characteristics of flocs—I. The floc density function and aluminium floc [J]. *Water Research*, 1979, **13**(5): 409-419.
- [6] Hriberšek M, Zajdel B, Hribernik A, *et al.* Experimental and numerical investigations of sedimentation of porous wastewater sludge flocs[J]. *Water Research*, 2011, **45**(4): 1729-1735.
- [7] 朱哲, 李涛, 王东升, 等. 不同泥龄下活性污泥絮体性状的研究[J]. *环境化学*, 2009, **28**(1): 10-15.
- [8] Wilén B M, Jin B, Lant P. The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties[J]. *Water Research*, 2003, **37**(9): 2127-2139.
- [9] 宣科佳, 王毅力, 魏科技, 等. A^2/O 工艺中好氧污泥絮体的分形结构与理化特征分析[J]. *环境科学*, 2009, **30**(7): 2013-2021.
- [10] 朱哲, 李涛, 王东升, 等. 基质种类对活性污泥絮体性状的影响[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(1): 88-94.
- [11] 高景峰, 苏凯, 张倩, 等. 不同碳源培养的成熟好氧颗粒污泥的分形表征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(8): 1871-1876.
- [12] He W P, Nan J, Li H Y, *et al.* Characteristic analysis on temporal evolution of floc size and structure in low-shear flow [J]. *Water Research*, 2012, **46**(2): 509-520.
- [13] Forster C F. Factors involved in the settlement of activated sludge—I: nutrients and surface polymers [J]. *Water Research*, 1985, **19**(10): 1259-1264.
- [14] Magara Y, Nambu S, Utosawa K. Biochemical and physical properties of an activated sludge on settling characteristics[J]. *Water Research*, 1976, **10**(1): 71-77.
- [15] Xu W Y, Gao B Y, Wang Y, *et al.* Effect of second coagulant addition on coagulation efficiency, floc properties and residual Al for humic acid treatment by Al_{13} polymer and polyaluminum chloride (PACl) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, (215-216): 129-137.
- [16] Serra T, Logan B E. Collision frequencies of fractal bacterial aggregates with small particles in a sheared fluid [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(13): 2247-2251.
- [17] Chaignon V, Lartiges B S, Samrani A E, *et al.* Evolution of size distribution and transfer of mineral particles between flocs in activated sludges: an insight into floc exchange dynamics[J]. *Water Research*, 2002, **36**(3): 676-684.
- [18] Sposito G. Scaling invariance of the von Smoluchowski rate law

- [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1997, **120**(1-3): 101-110.
- [19] Cohen R D. The self-similar cluster size distribution in random coagulation and breakup [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1992, **149**(1): 261-270.
- [20] Chu C P, Lee D J. Structural analysis of sludge flocs [J]. Advanced Powder Technology, 2004, **15**(5): 515-532.
- [21] Li D H, Ganczarczyk J J. Structure of activated sludge flocs [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1990, **35**(1): 57-65.
- [22] Biggs C A, Lant P A. Activated sludge flocculation: On-line determination of floc size and the effect of shear [J]. Water Research, 2000, **34**(9): 2542-2550.
- [23] Wu J, He C. Experimental and modeling investigation of sewage solids sedimentation based on particle size distribution and fractal dimension [J]. International journal of Environmental Science and Technology, 2010, **7**(1): 37-46.
- [24] Verawaty M, Pijuan M, Yuan Z, *et al.* Determining the mechanisms for aerobic granulation from mixed seed of floccular and crushed granules in activated sludge wastewater treatment [J]. Water Research, 2012, **46**(3): 761-771.
- [25] Sweity A, Ying W, Ali-Shtayeh M S, *et al.* Relation between EPS adherence, viscoelastic properties, and MBR operation: Biofouling study with QCM-D [J]. Water Research, 2011, **45**(19): 6430-6440.
- [26] Wagner M, Ivleva N P, Haisch C, *et al.* Combined use of confocal laser scanning microscopy (CLSM) and Raman microscopy (RM): Investigations on EPS-Matrix [J]. Water Research, 2009, **43**(1): 63-76.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 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