

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	习海玲, 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BOD ₅ 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pCO ₂ 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, 黄允秋 (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Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 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)
水中茶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, 姚锐, 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	万金泉, 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	张聪璐, 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A ² /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N ₂ O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, 刘遂庆 (1995)
上海市浦东城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)
厦门秋季近郊地面CO ₂ 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, 刘芃, 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)	

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

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院,西安 710055)

摘要:以PDA在线监测混凝过程和絮凝体形态学分析为基础,建立了絮凝体强度的分析评价方法。为了计算某一特定絮凝条件下形成絮凝体的黏结力,进行混凝实验并运用图像解析法及粒子图像测速技术研究絮凝体形态学特征。实验过程中将水样引入与光散射颗粒分析仪(PDA2000)相连的透明橡胶管内,并通过准确控制橡胶管内的水流速度梯度来改变作用于絮凝体上的剪切力,这样就可以在线监测絮体的破碎情况,然后根据PDA输出的FI曲线来确定絮凝体的临界破碎条件。根据临界破碎条件下剪切力、破碎力和黏结力的等量关系,确定黏结力系数 k_1 ,进而计算出可以表征絮凝体强度的黏结力 B 。该方法的有效性已经被大量以硫酸铝为混凝剂的腐殖酸混凝实验所证实。

关键词:絮凝体;形态学;光学在线监测;临界破碎条件;絮体强度

中图分类号:X703.5 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2013)05-1802-06

Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring

JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, WANG Xiao-chang

(School of Environmental & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on morphological analysis and PDA online monitoring, a method was established for the evaluation of floc strength. In order to calculate the binding force of flocs formed under a given flocculation condition, a jar test was conducted. The morphological characteristics of flocs were studied by image analysis and the particle image velocimetry technology. A shear force was exerted on the flocs by introducing the flocculated suspension through a transparent tube where the velocity gradient value of the flow could be accurately controlled. As the tube was connected with a particle dispersion analyzer (PDA), the condition of floc breakage was monitored online and the critical condition was identified by analyzing the PDA outputs (FI curves). According to the equivalent relationship among shear force, breaking force and binding force under the critical breaking condition, the binding force coefficient k_1 could thus be determined, and the binding force B which represented the floc strength was evaluated. The validity of this method was proved by a series of experiments using aluminium sulphate as the coagulant for the flocculation of humic acid.

Key words: flocs; morphology; optical online monitoring; critical broken condition; floc strength

絮凝体强度作为表征絮凝体特征参数之一,是水处理固液分离过程中的重要控制参数。絮凝体的强度取决于絮凝体各组成部分之间内部的黏结力,这包括絮凝体内部单个黏结力的数量强度。如果作用于絮凝体表面的力大于絮凝体内部的黏结力时,絮凝体将会发生破碎,影响水质处理效果^[1~3]。所以,在水处理工艺设计中应当以尽量减少絮体破碎为目的。事实上,絮体强度与其结构有直接的关系,而絮体结构又取决于絮凝体的形成过程^[4]。混凝过程中,在一定剪切条件作用下,微小粒子相互碰撞凝聚形成更大的颗粒。当絮凝体达到一个稳定状态的尺寸后,就不再继续成长。絮体的成长过程受到絮体破碎的约束,普遍认为凝聚速率是絮凝体形成与破碎之间的一个动态平衡^[5~9]。因此,最终形成絮凝体的尺寸取决于剪切力或应力条件。为了避免发生破碎变成更小的颗粒,絮凝体就必须抵抗这些外力的作用。

所以,如何分析计算絮凝体强度并从测定絮凝体强度的实验中得出一些表征絮凝体特征的信息显得十分重要。目前絮凝体强度分析计算基本方法有两种。一种是在宏观上衡量系统中絮凝体破碎时所需要的能量^[10,11]。另一个方法是在微观上检测絮凝体内部颗粒之间的黏结力^[12,13]。两种方法均是间接得到絮凝体强度,而且没有考虑到絮凝体的形态学特性,例如分形结构。本研究的目的是建立一个基于光学在线监测和形态学分析的絮凝体强度分析评价方法,在考虑絮凝体形态学特征的基础上,通过推导絮凝体黏结力和剪切力表达式来直接计算出表征絮凝体强度的黏结力,同时探明絮凝体强度与其形态结构之间的关系。

收稿日期:2012-06-13; 修订日期:2012-10-13

基金项目:国家自然科学基金项目(50978211)

作者简介:金鹏康(1974~),男,博士,教授,主要研究方向为水和废水的深度处理技术,E-mail: pkjin@hotmail.com

1 絮凝体强度分析计算方法与原理

在一定搅拌条件下,絮凝体最大粒径由两个相反的力决定,即絮凝体颗粒内部的黏结力和流体对絮凝体的湍流破碎力.黏结力 $B(\text{g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$ 与絮凝体的净截面积 $A_n(\text{cm}^2)$ 呈正比关系^[14],如式(1):

$$B = \sigma A_n \quad (1)$$

式中, σ 为常数,表示与絮凝体净截面积有关的平均黏结强度 $[\text{g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{s})^{-2}]$. 对于一个直径为 $d(\text{cm})$ 的絮凝体净体积 $V_n(\text{cm}^3)$ 一般有:

$$V_n \propto d^3(1-e) \quad (2)$$

式中, e 为孔隙率,同时,絮凝体的净截面积 A_n 可表示为:

$$A_n \propto d^2(1-e)^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

由公式(1)和(3)可推导出黏结力:

$$B \propto \sigma d^2(1-e)^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

孔隙率 e 可以通过絮体密度函数(5)推导出^[15]:

$$\rho_e = \rho_s - \rho_w = \frac{a}{d^{k_p}} \quad (5)$$

絮体物料平衡为:

$$\rho_w V_e + \rho_0(1-e)V = \rho_s V \quad (6)$$

式中, ρ_e 为絮体有效密度; ρ_s 和 ρ_w 分别为絮体和水的密度; ρ_0 为初级颗粒的密度; V 为絮体体积; V_e 为絮体中水的体积. 其中 $V_e = eV$, 结合公式(5)和(6)整理得:

$$1-e = \frac{a}{d^{k_p}(\rho_0 - \rho_w)} \quad (7)$$

在相同的混凝条件下,可认为 $\rho_0 - \rho_w$ 、 k_p 、 a 均为常数. 因此,絮凝体的黏结力 B 可以表示为:

$$B \propto \sigma d^2(1-\frac{k_p}{3}) \quad (8)$$

通常,絮凝体有分形的特性,根据分形的定义,质量 m 和特征长度 d 之间的关系可以表示为^[16]:

$$m \propto d^{D_f} \quad (9)$$

式中, D_f 是絮体的分形维数,质量 m 可以表示为如

下形式:

$$m = \rho_e V_n \propto \rho_e d^3(1-e) \quad (10)$$

式中, α 为絮凝体几何因子(球体 $\alpha = 4\pi/3$), 结合公式(5)和(7)可得:

$$m \propto d^{3-K_p} \quad (11)$$

比较公式(9)与(11)可得:

$$D_f = 3 - K_p \quad (12)$$

将公式(12)代入公式(8)中,则絮体黏结力为:

$$B = k_1 d^2(1-\frac{k_p}{3}) = k_1 d^2(1-\frac{3-D_f}{3}) = k_1 d^{\frac{2D_f}{3}} \quad (13)$$

式中, k_1 为黏结力系数. 所以,黏结力可以通过测定絮凝体粒径和分形维数来确定.

在层流状态下,将絮凝体引入管道中,通过调节水流速度值来改变施加在絮体上的剪切力. 在层流条件下,剪切力为^[17]:

$$\tau = \mu \frac{dx}{dy} = \mu G \quad (14)$$

式中, μ 为动力粘滞系数, G 为管道中水流速度梯度. 对于特定直径的管道, G 值为:

$$G = 8Q/3\pi R^3 \quad (15)$$

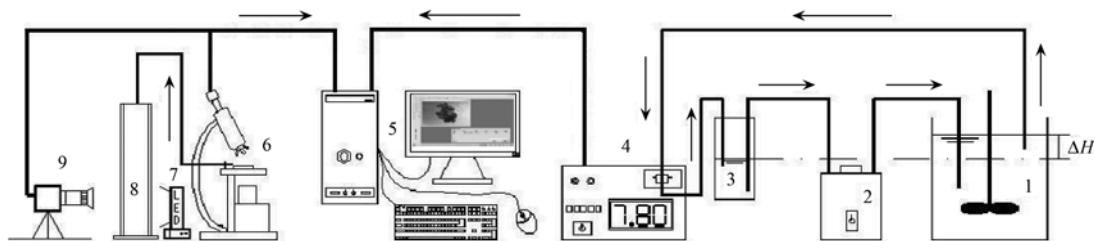
式中, Q 为管中的流速, R 为管道的半径. 在絮凝体发生临界破碎的时刻,其破碎力与剪切力相等,则:

$$F = \tau \quad (16)$$

同时在临界条件下,破碎力又与絮凝体黏结力相等,故可以得出黏结力系数 k_1 . 从而精确计算出黏结力的大小,即絮凝体强度^[18].

2 絮凝体强度分析系统建立

根据上述絮凝体强度分析计算方法,设计如图1所示的实验系统. 在投加混凝剂开始搅拌后,混凝罐内的水样在虹吸作用下通过与光散射颗粒分析仪(PDA2000)相连的内径为3 mm的透明管道流入取样器,然后再通过蠕动泵被抽回混凝罐中,最终在混凝罐和取样器之间形成恒定的水位差 ΔH . 调节蠕动泵的转速就可以改变水位差 ΔH ,进而改变管道内的流速和速度梯度 G 值,以获取实验所需施加



1. 混凝罐; 2. 蠕动泵; 3. 取样器; 4. PDA2000; 5. 计算机; 6. 显微摄像仪; 7. LED 光源; 8. 沉降柱; 9. CCD 相机

图1 实验系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

在絮凝体上的不同剪切力。

PDA 在整个实验系统中的作用是通过不同 G 值下混凝实验 FI 曲线的变化情况,指示出絮凝体的临界破碎条件。光散射颗粒分析仪(PDA)在线监测的原理为:当 PDA 橡胶软管中有颗粒物通过,光线透过软管时会被水中的颗粒散射,光强就会减小。这时 PDA 就会将入射光强和经过液体后光强变化的脉动信号转化为电压波动信号输出。而 PDA 最终输出信号是电压波动的标准偏差值,该值为管内颗粒物粒径和浓度的函数,常称为混凝指数 FI。因此,FI 曲线能够直观地将剪切力变化所引起的絮凝体粒径和浓度

的变化反映出来。混凝水样通过透明管道流经 PDA 时,透射光强度值(FI 值)就被计算机记录下来,生成 FI 曲线图。FI 曲线的平衡高度反映的是最终形成絮凝体的尺寸。图 2 为不同剪切力条件下絮凝体 FI 曲线的变化情况。图 2(a)为较小剪切力下絮凝体 FI 曲线,其平衡高度在 0.75 左右浮动。增加剪切力,FI 曲线的平衡高度会明显变小,平衡高度只有 0.2 左右,如图 2(b)所示。说明在剪切力较大情况下絮凝体发生破碎,尺寸变小。所以可以通过 PDA 在线监测不同 G 值条件下絮凝体结构尺寸的变化情况,从而精确灵敏地指示出絮凝体的破碎^[19,20]。

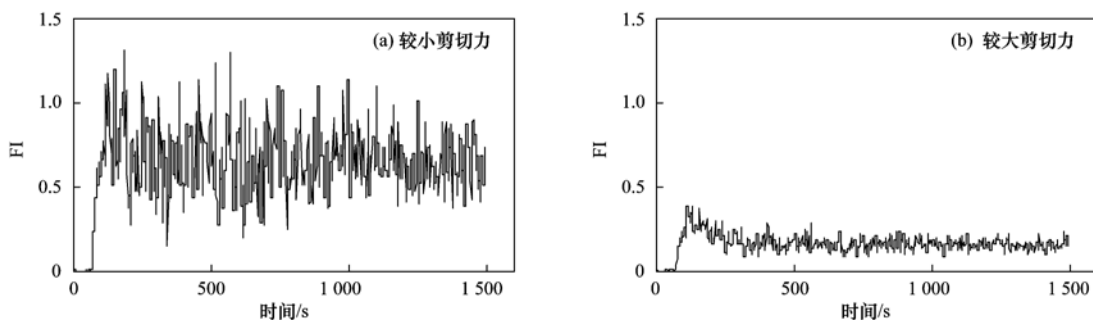


图 2 不同剪切力条件下 FI 曲线的变化

Fig. 2 Variation of FI curve under different shear force

按照絮凝体黏结力计算公式(13),除需在确定絮凝体临界破碎条件的基础上得出黏结力系数 k_1 以外,还要测定絮凝体的粒径和分形维数,方能完成絮凝体强度的计算。因此,混凝过程结束时,从取样器中采集絮凝体样本,通过显微摄像机捕捉絮凝体图像并运用图像处理软件对其进行图像解析。根据分形理论中絮凝体的投影面积 A 与其最大长度 L 的函数关系 $\ln A = D_2 \ln L + \ln \alpha$,在双对数坐标上作图,所得直线的斜率即为絮凝体的二维分形维数 D_2 ^[21~23]。同时运用基于粒子图像测速技术的自由沉淀法,根据絮凝体沉速 U 与其粒径 d 之间的关系 $U \propto d^{(D_f - D_2 + 1)}$,在双对数坐标上作图,所得直线的斜率为 $(D_f - D_2 + 1)$,结合二维分形维数计算结果,分

析计算出絮凝体三维分形维数 D_f ^[24]。

3 絮凝体强度分析计算示例

3.1 腐殖酸絮凝体的形态学特征

以从湖底底泥中提取出的天然腐殖酸为研究对象,将其配制成 TOC 浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水样。在 $\text{pH} = 5$,混凝剂投加量 $[m(\text{Al})/m(\text{TOC})]$ 为 0.20 $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ 条件下进行混凝实验。混凝操作条件为快速搅拌($200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)1 min,慢速搅拌($40 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)30 min。实验过程中不将混凝水样引入 PDA 橡胶管内,慢速搅拌结束后直接从混凝罐中采集絮凝体样本进行形态学分析^[25,26]。图 3(a)为絮凝体投影面积与最大长度的双对数坐标曲线,从中可以得出絮

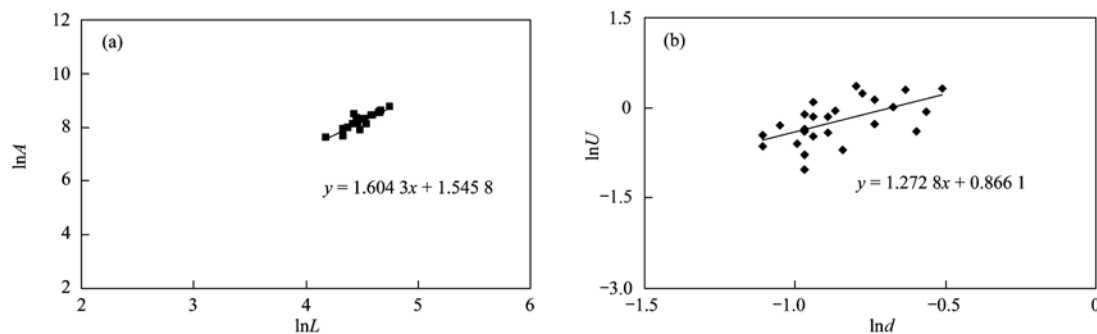


图 3 腐殖酸铝盐絮凝体形态学特征

Fig. 3 Morphological characteristics of Al-humic flocs

凝体二维分形维数为1.6043. 图3(b)为絮凝体沉降速度与粒径的双对数坐标曲线,结合二维分形维数可以得出絮凝体三维分形维数为1.8771.

3.2 光学在线监测絮凝体破碎过程

同样在 $\text{pH} = 5$, 混凝剂投加量 $[m(\text{Al})/m(\text{TOC})]$ 为 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ 的条件下进行混凝实验. 实验过程中将混凝水样引入 PDA 橡胶管内,在不同水流速度梯度值(G 值)下重复相同的混凝实

验. 以 PDA 输出的 FI 曲线来表征不同剪切力场下絮凝体形态结构的变化情况,结果如图4(a)所示. 从中可以得出,当 G 值 $\leq 150 \text{ s}^{-1}$ 时,混凝过程中 FI 曲线的变化趋势及最终达到稳定时的 FI 指数的平均高度几乎是相同的,表明在该 G 值下将混凝杯罐内的絮凝体引入橡胶管后没有破碎. 但是,当 G 值增大到 180 s^{-1} 时,FI 值明显变小,说明此时絮体已经发生了破碎. 因此,可以得出 G 值等于 150 s^{-1} 就

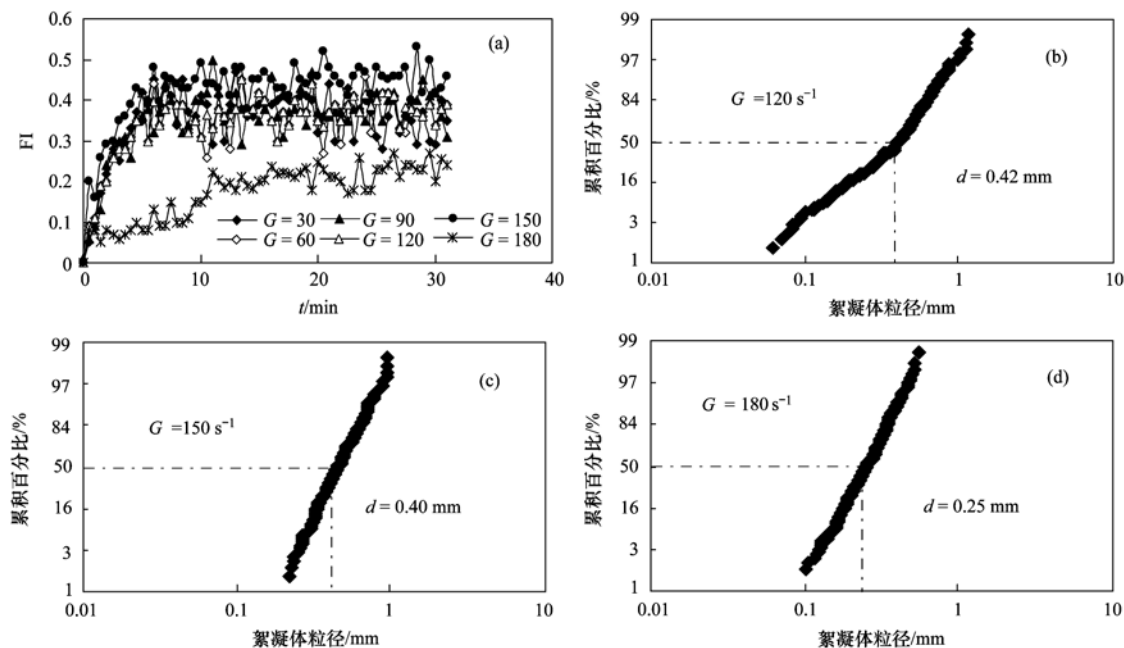


图4 G 值对絮凝体 FI 值及粒径分布的影响

Fig. 4 Effects of G value on FI curve and particle size distribution

是絮凝体破碎的临界条件.

絮凝体粒径是其结构尺寸的直接表征,能够很直观地反映絮凝体结构的变化. 慢速搅拌结束后从取样器中采集絮凝体样本进行粒径分布统计分析. 图4(b)~4(d)为不同 G 条件下经统计分析得出的絮凝体粒径分布情况. 从中可看出絮凝体粒径分布在对数正态坐标上呈现较好的线性关系,遵循对数正态分布. 累计50%的对应粒径即为絮凝体的平均粒径. 同时可以得出随着 G 值的增大,絮凝体平均粒径有减小的趋势.

图5为不同 G 值条件下形成絮凝体的三维分形维数和平均粒径的变化情况. 从图5可以得出,当 G 值在 $30 \sim 150 \text{ s}^{-1}$ 之间时,絮凝体的三维分形维数几乎不发生变化保持在1.8771左右,而粒径也没有发生较大的改变,维持在 0.40 mm 左右. 然而,当 G 值增加到 180 s^{-1} 时,絮凝体的粒径突然减小为 0.25 mm ,而三维分形维数也瞬间增大至1.9523. 这说明 G 值增加到 180 s^{-1} 时,作用在絮凝体上的剪

切力过大,导致絮凝体发生破碎,絮凝体形态结构也随之发生了明显的改变. 结合 PDA 在线监测结果可以得出, G 值等于 150 s^{-1} 即为絮凝体的临界破碎条件.

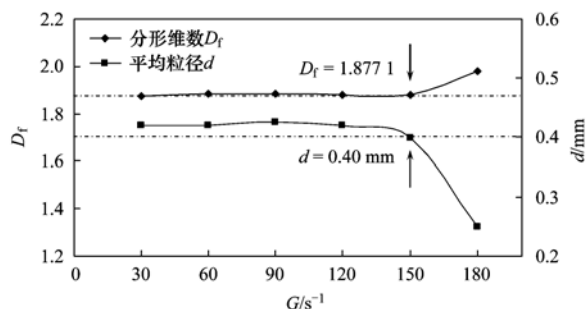


图5 G 值对絮凝体形态结构的影响

Fig. 5 Effects of G value on morphological structure of flocs

3.3 絮凝体黏结力和破碎力分析

从 PDA 在线监测结果中得出絮凝体临界破碎条件后,絮凝体的黏结力和破碎力就可以通过方程(13)~(16)计算出来,结果如图6所示. 从中可以

看出絮凝体的黏结力几乎不随 G 值的变化而变化,保持在 $0.126 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,这说明某一特定混凝条件下形成絮凝体的黏结力是一定的,即絮体强度是不变的.但是絮凝体受到的破碎力会随着 G 值的增

大而增大,而且破碎力和 G 值之间存在着一定的比例关系.当 G 值小于 150 s^{-1} 时,絮凝体所受破碎力小于其黏结力,如继续增大 G 值,破碎力将大于黏结力,絮凝体就会发生破碎.

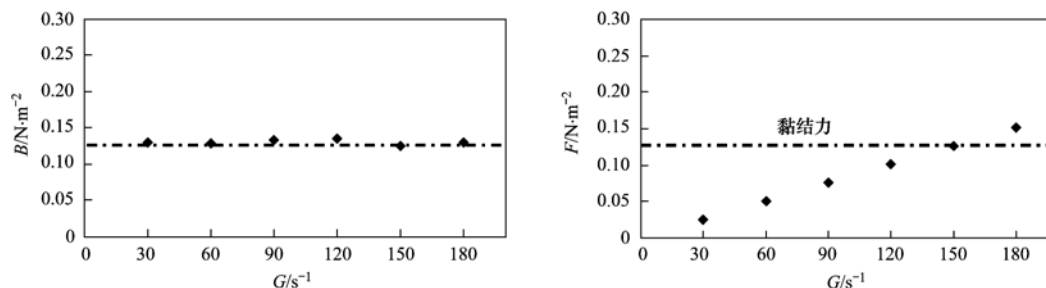


图6 絮凝体黏结力和破碎力分析

Fig. 6 Analysis of binding force and breaking force of flocs

4 结论

(1) 通过理论分析,指出絮凝体的黏结力表达式为 $B = k_1 d^{2D_f/3}$,通过测定絮凝体的分形维数和粒径以及絮凝体的剪切力场可计算絮凝体黏结力与破碎力.

(2) 本研究构建了基于 PDA 在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析评价方法.通过调节橡胶管内的水流速度梯度(G 值)来改变作用于絮凝体上的剪切力,同时运用 PDA 在线监测技术可以准确找出絮凝体临界破碎条件,从而确定黏结力系数 k_1 ,并借助絮凝体形态学表征(分形维数、粒径分布)计算得到表征絮凝体强度的黏结力以及不同水力条件下絮凝体所承受的剪切力及其破碎力.

(3) 以天然腐殖酸为研究对象,根据已建立的絮凝体强度分析计算方法,分析计算出在 $\text{pH} = 5$,混凝剂投加量 $[m(\text{Al})/m(\text{TOC})]$ 为 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ 条件下形成的腐殖酸絮凝体的强度为 $0.126 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$,进一步证实了该方法的有效性和适用性.

参考文献:

- [1] 武若冰,王东升,李涛.絮体性能及其工艺调控的研究与进展[J].环境科学学报,2008,28(4):593-598.
- [2] 武若冰.絮体结构、强度及其调控研究[D].北京:中国科学院生态环境研究中心,2007.27-50.
- [3] Boller M, Blaser S. Particles under stress[J]. Water Science & Technology, 1998, 37(10):9-29.
- [4] Jarvis P, Jefferson B, Gregory J, et al. A review of floc strength and breakage[J]. Water Research, 2005, 39(14):3121-3137.
- [5] Parker D S, Kaufman W J, Jenkins D. Floc breakup in turbulent flocculation processes[J]. Journal of the Sanitary Engineering Division, 1972, 98(1):79-99.
- [6] François R J. Strength of aluminium hydroxide flocs[J]. Water Research, 1987, 21(9):1023-1030.
- [7] Spicer P T, Pratsinis S E. Shear-induced flocculation: the evolution of floc structure and the shape of the size distribution at steady state[J]. Water Research, 1996, 30(5):1049-1056.
- [8] Ducoste J J, Clark M M. The influence of tank size and impeller geometry on turbulent flocculation: I. experimental[J]. Environmental Engineering Science, 1998, 15(3):215-224.
- [9] 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.
- [10] Bache D H. Floc rupture and turbulence: a framework for analysis[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(12):2521-2534.
- [11] Chu C P, Chang B V, Liao G S, et al. Observations on changes in ultrasonically treated waste-activated sludge[J]. Water Research, 2001, 35(4):1038-1046.
- [12] Yeung A K C, Pelton R. Micromechanics: a new approach to studying the strength and breakup of flocs[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1996, 184(2):579-585.
- [13] Yeung A, Gibbs A, Pelton R. Effect of shear on the strength of polymer-induced flocs[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1997, 196(1):113-115.
- [14] Tambo N, Hozumi H. Physical characteristics of flocs II. Strength of flocs[J]. Water Research, 1979, 13(5):421-427.
- [15] Tambo N, Watanabe Y. Physical characteristics of flocs I. The floc density function and aluminium floc[J]. Water Research, 1979, 13(5):409-419.
- [16] Chakraborti R K, Atkinson J F, Van Benschoten J E. Characterization of alum floc by image analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34(18):3969-3976.
- [17] Gregory J. Turbidity fluctuations in flowing suspensions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1985, 105(2):357-371.
- [18] Jin P K, Wang X C, Chai H X. Evaluation of floc strength by

- morphological analysis and PDA online monitoring[J]. *Water Science & Technology*, 2007, **56**(10): 117-124.
- [19] 金鹏康, 王晓昌. 腐殖酸混凝过程 FI 曲线的特征参数分析[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(4): 423-427.
- [20] 王晓昌, 金鹏康, 周兰. 水中天然有机物混凝过程的光学在线监测及控制[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(1): 6-11.
- [21] Wang X C, Jin P K, Gregory J. Structure of Al-humic flocs and their removal at slightly acidic and neutral pH[J]. *Water Science & Technology: Water Supply*, 2002, **2**(2): 99-106.
- [22] Chakraborti R K, Gardner K H, Atkinson J F, *et al.* Changes in fractal dimension during aggregation[J]. *Water Research*, 2003, **37**(4): 873-883.
- [23] Li T, Zhu Z, Wang D S, *et al.* Characterization of floc size, strength and structure under various coagulation mechanisms[J]. *Powder Technology*, 2006, **168**(2): 104-110.
- [24] 钟润生, 张锡辉, 肖峰, 等. 絮体分形结构对沉淀速度影响研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(8): 2353-2357.
- [25] 金鹏康, 王晓昌. 腐殖酸絮凝体的形态学特征和混凝化学条件[J]. *环境科学学报*, 2001, **21**(增刊): 23-29.
- [26] 金鹏康, 余静静, 刘岚, 等. 典型 pH 条件下腐殖酸混凝特性研究[J]. *西安建筑科技大学学报 (自然科学版)*, 2011, **43**(2): 215-219.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjcx.ac.cn>)。该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用。目前本刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行。作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可。如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系。

邮政地址:北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编:100085

电 话:010-62941102,010-62849343

传 真:010-62849343

E-mail:hjcx@rcees.ac.cn

网 址:www.hjcx.ac.cn

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