

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O ₃ 来源识别	李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)
厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势	徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)
近10年海南岛大气NO ₂ 的时空变化及污染物来源解析	符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)
稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成	洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)
气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H ₂)浓度	栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)
小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO ₂ 特征及扩散通量	张永领, 杨小林, 张东(40)
夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究	李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)
基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度	张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)
温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别	马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)
人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例	于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)
太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究	汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)
鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应	沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)
影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析	李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)
水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响	刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)
蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响	吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)
汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化	程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)
三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)
三峡库区农林复合小流域水体汞的时空变化特征	赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)
环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响	宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)
三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征	高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)
舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析	周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)
太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律	李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)
厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估	程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)
两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例	王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)
大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价	张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)
铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验	陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军(202)
铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究	陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)
一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究	吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)
磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为	张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)
腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附	朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)
降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响	赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)
FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究	陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)
微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响	邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)
微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化	曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)
舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征	张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)
四川凉山藏彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究	周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林尤静(274)
铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用	徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)
外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响	熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)
厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征	洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)
洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素	商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)
不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究	吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)
畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化	商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)
华南某市生活垃圾组成特征分析	张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)
生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥	刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)
基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究	徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)
一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测	刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)
典型黄土区油松树干液流变化特征分析	张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)
利用巨藻发酵产氢气与挥发性有机酸的研究	赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)
人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响	李曼璐, 姜玥璐(365)
《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236, 243, 273, 300)	

生物沥浸耦合类 Fenton 氧化调理城市污泥

刘昌庚¹, 张盼月^{2,3}, 蒋娇娇¹, 曾成华¹, 黄毅¹, 徐国印¹

(1. 攀枝花学院资源与环境工程学院, 攀枝花 617000; 2. 北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083; 3. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082)

摘要: 采用生物沥浸耦合类 Fenton 氧化工艺对城市污泥进行了调理研究。结果表明, 在升华硫和 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 投量分别为 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 污泥 pH 从 6.9 降至 2.5 约需 1 d, 满足类 Fenton 氧化的适宜酸性条件。生物沥浸处理后, 污泥挥发性固体 (VS) 减少率为 13.4%, 污泥比阻从 $3.1 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 降至 $1.5 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 降低 51.6%, 但仍属于难脱水污泥。沥浸污泥继续经类 Fenton 氧化调理, 调理的最佳 H_2O_2 投量和反应时间分别为 $3.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 60 min。处理后污泥 VS 减少率为 30.8%, 污泥比阻和滤饼含水率分别为 $1.9 \times 10^8 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 76.9%, 污泥比阻降低 93.9%, 污泥脱水性能和稳定性能得到显著提高。此外, 该联合工艺对污泥的调理效果优于类 Fenton 氧化单独调理。

关键词: 城市污泥; 生物沥浸; 类 Fenton 氧化; 脱水性能; 稳定性能

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0333-05 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.01.044

Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation

LIU Chang-geng¹, ZHANG Pan-yue^{2,3}, JIANG Jiao-jiao¹, ZENG Cheng-hua¹, HUANG Yi¹, XU Guo-yin¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Bioleaching combined with Fenton-like oxidation was used to condition sewage sludge. The results showed that it took ~1 d to decrease pH from 6.9 to 2.5 by bioleaching, with fixed sulfur power and $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dosages of $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ and $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. After bioleaching, the volatile solids (VS) reduction was 13.4%, and the specific resistance to filtration (SRF) dropped from $3.1 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ to $1.5 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ with a reduction of 51.6%, but the bioleached sludge was still difficult to be dewatered. The bioleached sludge was further oxidized by Fenton-like oxidation. The results indicated that the optimal H_2O_2 dosage and reaction time were $3.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ and 60 min, respectively. Under the optimal conditions, VS reduction was 30.8%, SRF was declined to $1.9 \times 10^8 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ with a reduction of 93.9%, and the moisture of sludge cake was 76.9%. After treated by bioleaching combined with Fenton-like oxidation, the dewaterability and stability of sewage sludge were significantly improved. Besides, the combined technology was more efficient in conditioning sewage sludge than single Fenton-like oxidation.

Key words: sewage sludge; bioleaching; Fenton-like oxidation; dewaterability; stability

活性污泥法广泛应用于城市污水处理厂, 其运行过程产生大量的城市污泥。但城市污泥脱水难、处理费用昂贵, 已成为污泥处理和处置的瓶颈问题^[1]。传统的改善污泥脱水性能的方法主要包括物理调理法和化学调理法^[2~4]。近年来, 生物调理法因其成本低、环境友好等特点, 已成为国内外的研究热点。其中, 生物沥浸已被证实为有效的生物调理法, 其利用嗜酸性硫杆菌将还原性硫氧化成硫酸, 降低污泥 pH, 具有去除重金属、降解有机物、杀灭病原菌、改善污泥脱水性能等特点^[5~11]。Fenton 和类 Fenton 氧化作为高级氧化技术, 在污泥调理中已得到深入研究^[1,4,12~16]。其中类 Fenton 氧化是通过 Fe^{3+} 在酸性条件下催化 H_2O_2 分解生成羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$), 氧化污泥中有机物和还原物质, 破坏污泥

结构, 使污泥中水分和有机物释放出来, 改善污泥脱水性能^[13,15]。此外, 类 Fenton 氧化还具有杀灭病原菌、改善污泥稳定性能等特点^[15]。

迄今, 国内外对于生物沥浸和类 Fenton 氧化单独调理城市污泥已有相当研究, 但对于生物沥浸耦合类 Fenton 氧化工艺调理城市污泥的研究却鲜有报道。污泥经生物沥浸处理后, 污泥 pH 下降至类 Fenton 氧化的适宜 pH 范围^[13,15]。因此, 本研究采用生物沥浸耦合类 Fenton 氧化调理城市污泥, 以污泥比阻、滤饼含水率表征污泥的脱水性能, 以挥发性固体 (VS) 减少率表征污泥稳定性能。

收稿日期: 2014-06-15; 修订日期: 2014-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178047)

作者简介: 刘昌庚 (1985~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为污泥处理处置与资源化, E-mail: changwyx@163.com

1 材料与方法

1.1 实验材料

七水合硫酸亚铁($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)、六水合氯化铁($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、升华硫、硫酸(H_2SO_4)及质量分数 30% 的过氧化氢(H_2O_2)均为分析纯. 供试污泥取自攀枝花市某污水处理厂的污泥浓缩池,其基本性质如表 1.

表 1 供试污泥的基本性质

Table 1 Basic properties of the sewage sludge sample					
pH	含水率 /%	污泥比阻 / $\text{s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	滤饼含水率 ¹⁾ /%	TS / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	VS / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
6.9	98.4	3.1×10^9	93.1	15 816	11 978

1) 滤饼含水率指经布氏漏斗法测定污泥比阻后,截留在滤纸上的污泥滤饼的含水率

1.2 接种液培养和驯化

接种液的培养方法已在前期研究中报道^[17],具体可分为 3 步: 首先,在 250 mL 锥形瓶中装入 100 mL 新鲜供试污泥,同时投加 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 升华硫和 $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 作为生物沥浸细菌的能源物质,置于水浴振荡器中培养,培养为温度 28°C ,转速为 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$; 然后,培养至污泥 pH < 2,吸取此沥浸污泥 10 mL 加入 90 mL 新鲜供试污泥中,同时投加与上步等量的升华硫和 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,在相同条件下继续培养. 最后,待此污泥 pH < 2,重复上步操作. 经 3 次培养后,沥浸细菌的活性达到要求,所得驯化污泥即为接种液^[9,17].

1.3 实验方法

1.3.1 生物沥浸实验

前期研究表明,以 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 单质硫和 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为能源物质时^[17],污泥生物沥浸速率最快. 因此,在本研究中固定升华硫和 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 投量分别为 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,作为生物沥浸细菌的能源物质. 首先,将一系列 250 mL 锥形瓶装入 135 mL 新鲜供试污泥,接种液投加量为新鲜供试污泥量的 10%; 然后控制温度和转速分别为 28°C 和 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,将锥形瓶置于水浴振荡器中培养,并测定沥浸过程中污泥 pH 和氧化还原电位(ORP)变化以及沥浸后污泥性质. 培养过程中采用补加去离子水补充蒸发的水分.

1.3.2 类 Fenton 氧化实验

污泥经过生物沥浸处理后,设置不同 H_2O_2 投量进行类 Fenton 氧化反应,探究其对污泥脱水性能和稳定性能的影响. 投加 H_2O_2 后,以转速 200

$\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 快速搅拌 5 min; 随后以转速 $50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 慢速搅拌一定时间. 类 Fenton 氧化单独调理污泥的 pH 采用 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ H_2SO_4 调节.

1.4 分析方法

污泥脱水性能用污泥比阻表征,其测定采用布氏漏斗法,具体测定步骤已在前期研究中报道^[17]. 滤饼含水率、污泥总固体(TS)和挥发性固体(VS)均采用重量法测定.

2 结果与讨论

2.1 生物沥浸

生物沥浸主要依靠嗜酸性硫杆菌的直接和间接代谢作用生成硫酸使污泥体系的 pH 降低,以达到污泥调理的目的^[18,19]. pH 降低和 ORP 升高可直接反映污泥生物沥浸过程的进行. 生物沥浸过程 pH 和 ORP 的变化如图 1 所示. 在升华硫和 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 投量为 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,污泥体系 pH 降至 2.5 约需 1 d. 污泥 pH 和 ORP 的变化呈相反趋势, pH 下降, ORP 上升. 污泥 ORP 升高源于氧化亚铁硫杆菌的氧化作用,将 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} ,增加了污泥体系的氧化性能. 沥浸污泥性质如表 2 所示,经生物沥浸处理后,污泥稳定性能和脱水性能得到较大改善, VS 降低 13.4%, 污泥比阻降低 51.6%. 这是由于经生物沥浸处理后,胞外聚合物和微生物细胞发生破解,污泥结构得以破坏,污泥中一部分间隙水被释放变成自由水,进而改善污泥脱水性能^[11,12]. 此外,在低 pH 条件下,污泥絮体的静电排斥作用和解离常数均很小,污泥的絮凝能力增强,有利于提高污泥脱水性能^[20]. 同时,污泥中 Fe^{3+} 的絮凝作用,也可改善污泥的脱水性能^[21]. 一般认为污泥比阻 $> 1 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 为难脱水污泥, $< 0.4 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 为易脱水污泥^[22]. 因此,经生物沥浸处理后的污泥仍属难脱水污泥.

表 2 沥浸污泥的基本性质

Table 2 Basic properties of the bioleached sludge sample				
pH	污泥比阻 / $\text{s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	滤饼含水率 /%	TS / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	VS / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
2.6	1.5×10^9	86.6	14 628	10 373

2.2 生物沥浸耦合类 Fenton 氧化调理污泥

污泥经生物沥浸处理后,仍属于难脱水污泥. 因此,采用生物沥浸耦合类 Fenton 氧化继续调理污泥. Lu 等^[13]研究表明,类 Fenton 氧化调理污泥的适宜 pH 范围为 2.5 ~ 4.5. 污泥经生物沥浸处理后,污泥 pH 可降至类 Fenton 氧化的适宜 pH 范围.

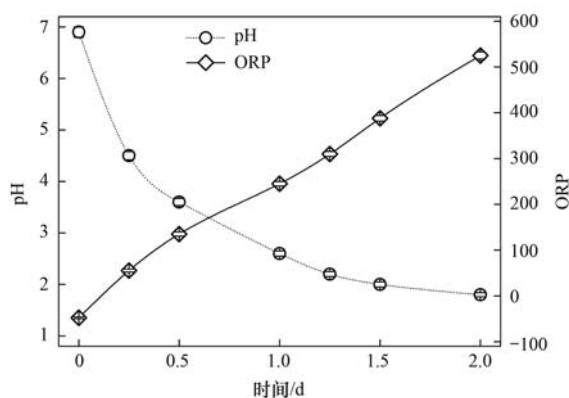


图1 生物沥浸过程 pH 和 ORP 的变化

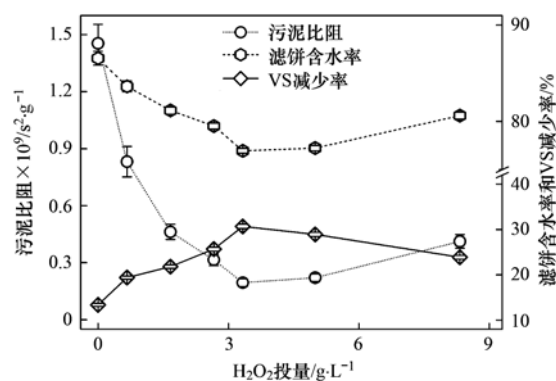
Fig. 1 Changes of pH and ORP during bioleaching

此外,肖凌鹏^[23]研究指出,当 pH 降至 2 以下时,生物沥浸调理后污泥的脱水性能变差. 因此,为满足类 Fenton 氧化的适宜 pH,且避免生物沥浸后污泥脱水性能变差,本研究以污泥 pH 降至约 2.5 为生物沥浸过程结束的标志. 由图 1 可知,生物沥浸周期约 1 d.

2.2.1 H_2O_2 投量的影响

投加 H_2O_2 对沥浸污泥比阻、滤饼含水率和 VS 减少率的影响如图 2 所示. 随 H_2O_2 投量的增加,VS 减少率和污泥比阻呈相反趋势显著变化. 但当 H_2O_2 投量大于 $5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,污泥脱水性能和 VS 减少率均有减弱趋势. 由图 2 可知, H_2O_2 投量为 $3.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,污泥比阻和滤饼含水率均达到最小值,分别为 $2.0 \times 10^8 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 77.0%; VS 减少率达到最大值,为 30.7%. 污泥 VS 含量可直接反映污泥的稳定性能,VS 含量越低,污泥稳定性能越好^[24]. 因此,经类 Fenton 氧化处理后,沥浸污泥的稳定性能得到显著提高. Neyens 等指出^[15],污泥难脱水主要源于胞外聚合物的存在,它可占污泥总质量的 80%^[25]. VS 是污泥中有机物含量的综合指标,沥浸污泥经类 Fenton 氧化处理后,VS 减少率达 30.7%,这表示胞外聚合物得到有效的降解. 胞外聚合物的降解会减弱其吸附水能力,进而释放出胞外聚合物结合水,提高污泥脱水性能^[20]. 此外,由于失去了胞外聚合物的保护,微生物细胞容易被类 Fenton 氧化破坏,进而释放出细胞间隙水,改善污泥脱水性能^[12,26].

类 Fenton 氧化能有效调理城市污泥,源于 Fe^{3+} 催化 H_2O_2 分解,在酸性条件下生成 $\cdot\text{OH}$,引发和传递链反应,加快有机物和还原物质的氧化反应^[13,15]; 进而破坏污泥结构,使污泥中的水分和有

温度 = 28°C , pH = 2.5 ± 0.1 , 反应时间 = 60 min图2 H_2O_2 投量对沥浸污泥脱水性能和 VS 减少率的影响Fig. 2 Effects of H_2O_2 dosage on the dewaterability and VS reduction of the bioleached sludge

机物释放出来,提高污泥脱水性能和稳定性能^[15]. 此外,污泥中 Fe^{3+} 的絮凝作用,也可改善污泥的脱水性能^[21]. 由图 2 可知,污泥脱水性能和稳定性能开始均随 H_2O_2 投量的增加而提高,但当 H_2O_2 投量超过 $5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 后,两者均有下降趋势. 这是由于当 H_2O_2 浓度过高,会对 $\cdot\text{OH}$ 产生清除作用,即产生 H_2O_2 和污泥中有机物竞争 $\cdot\text{OH}$,进而导致调理效果下降^[27,28]. 因此,最佳 H_2O_2 投量为 $3.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 经类 Fenton 氧化处理后,沥浸污泥属于易过滤脱水污泥.

2.2.2 反应时间的影响

反应时间对沥浸污泥脱水性能和 VS 减少率的影响如图 3 所示. 反应开始阶段,随反应时间的增加,污泥脱水性能和 VS 减少率迅速升高; 但反应时间超过 60 min 后,污泥比阻、滤饼含水率及 VS 减少率均趋于平衡. 反应时间为 60 min 时,沥浸污泥已属易脱水污泥,污泥比阻和滤饼含水率分别为

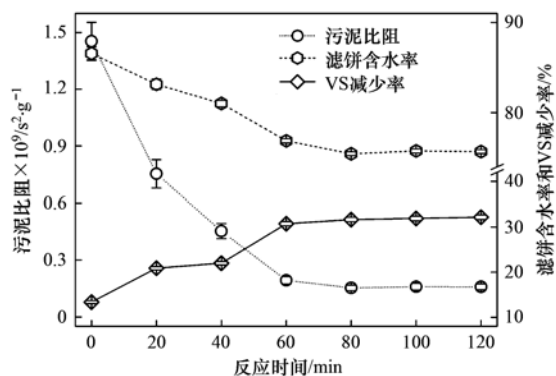
温度 = 28°C , pH = 2.5 ± 0.1 , H_2O_2 投量 = $3.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$

图3 反应时间对沥浸污泥脱水性能和 VS 减少率的影响

Fig. 3 Effects of the reaction time on the dewaterability and VS reduction of the bioleached sludge

$1.9 \times 10^8 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 76.9%, 污泥比阻降低 93.9%; VS 减少率为 30.8%, 沥浸污泥稳定性得到显著提高. 因此, 适宜的反应时间为 60 min. 研究结果表明, 类 Fenton 反应需要足够的反应时间利用产生的大量 $\cdot\text{OH}$ 降解有机物, 进而破坏污泥结构, 释放出结合水和有机物间的间隙水^[15], 改善污泥脱水性能和稳定性能.

2.3 类 Fenton 氧化单独调理污泥

类 Fenton 氧化单独调理后污泥性质如表 3 所示. 处理后污泥稳定性能和脱水性能得到较大提高, VS 减少率为 13.9%, 污泥比阻为 $1.1 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 降低 64.5%, 但污泥仍属难脱水污泥. 由表 3 可知, 在相同调理条件下, 经生物沥浸耦合类 Fenton 氧化处理后, 污泥脱水性能和稳定性能均显著优于污泥经类 Fenton 氧化单独调理, 其中污泥比阻小 4.8 倍, VS 减少率高 1.2 倍. 因此, 生物沥浸耦合类 Fenton 氧化更能有效地改善污泥脱水性能和稳定性能. 这可能是由于污泥经生物沥浸预处理后, 一部分胞外聚合物和微生物细胞发生破解, 使污泥结构得以破坏^[11,12], 为类 Fenton 氧化提供了更适宜的调理条件.

表 3 生物沥浸耦合类 Fenton 氧化和类 Fenton 氧化调理污泥的基本性质

Table 3 Basic properties of the sludge sample treated respectively by Fenton-like oxidation and bioleaching combined with Fenton-like oxidation

调理方法	污泥比阻 $/\text{s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	滤饼含水率 $/\%$	VS 减少率 $/\%$
类 Fenton 氧化 ¹⁾	1.1×10^9	84.2	13.9
生物沥浸 + 类 Fenton 氧化	1.9×10^8	76.9	30.8

1) 类 Fenton 氧化的调理条件与生物沥浸耦合类 Fenton 氧化的优化调理条件相同 (温度 = 28℃, pH = 2.5 ± 0.1, Fe^{3+} 投量 = $1.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, H_2O_2 投量 = $3.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 反应时间 = 60 min)

3 结论

(1) 以 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 升华硫和 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 作为生物沥浸的能源物质时, 污泥 pH 降至 2.5 约需 1 d. 经生物沥浸处理后, 污泥 VS 降低 13.4%, 污泥比阻降至 $1.5 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 降低 51.6%, 但污泥仍属难脱水污泥.

(2) 经生物沥浸耦合类 Fenton 氧化调理后, 污泥属易脱水污泥, 且污泥稳定性能得到显著提高. 该工艺的最佳 H_2O_2 投量和反应时间分别为 $3.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 60 min, 处理后污泥比阻和滤饼含水率分别为 $1.9 \times 10^8 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 76.9%, 污泥比阻降低 93.9%, VS 减少率为 30.8%.

(3) 经类 Fenton 氧化单独调理后, 污泥属难脱水污泥. 相比生物沥浸耦合类 Fenton 氧化, 后者更能有效的改善污泥脱水性能和稳定性能.

参考文献:

- [1] Liu H, Yang J K, Zhu N R, *et al.* A comprehensive insight into the combined effects of Fenton's reagent and skeleton builders on sludge deep dewatering performance [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **258-259**: 144-150.
- [2] 刘欢, 杨家宽, 时亚飞, 等. 不同调理方案下污泥脱水性能评价指标的相关性研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3394-3399.
- [3] 牛美青, 张伟军, 王东升, 等. 不同混凝剂对污泥脱水性能的影响研究 [J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(9): 2126-2133.
- [4] 马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 等. Fenton 试剂与 CPAM 联合调理对污泥脱水效果的影响研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3538-3543.
- [5] Benmoussa H, Tyagi R D, Campbell P G C. Simultaneous sewage sludge digestion and metal leaching using an internal loop reactor [J]. *Water Research*, 1997, **31**(10): 2638-2654.
- [6] 刘奋武, 周立祥, 周俊, 等. 生物沥浸处理提高城市污泥脱水性能的中试研究: 连续运行模式 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2993-2998.
- [7] 宋永伟, 刘奋武, 周立祥. 微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2786-2792.
- [8] 朱海凤, 周立祥, 王电站. 生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 916-921.
- [9] Zhang P Y, Zhang G M, Zeng G M, *et al.* Influence of Fe(II) addition on heavy metal bioleaching from sewage sludge with mixed inocula [J]. *International Journal of Biotechnology*, 2008, **10**(1): 16-25.
- [10] 石超宏, 朱能武, 吴平霄, 等. 生物沥浸去除污泥重金属及改善脱水性能研究 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(3): 474-479.
- [11] 华玉妹, 陈英旭, 张少辉. 污泥生物沥滤中硫细菌变化和胞外多聚物作用的研究 [J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(5): 795-802.
- [12] Lu M C, Lin C J, Liao C H, *et al.* Dewatering of activated sludge by Fenton's reagent [J]. *Advances in Environmental Research*, 2003, **7**(3): 667-670.
- [13] Lu M C, Lin C J, Liao C H, *et al.* Influence of pH on the dewatering of activated sludge by Fenton's reagent [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **44**(10): 327-332.
- [14] Buyukkamaci N. Biological sludge conditioning by Fenton's reagent [J]. *Process Biochemistry*, 2004, **39**(11): 1503-1506.
- [15] Neyens E, Baeyens J. A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, **98**(1-3): 33-50.
- [16] Liu H, Yang J K, Shi Y F, *et al.* Conditioning of sewage sludge by Fenton's reagent combined with skeleton builders [J]. *Chemosphere*, 2012, **88**(2): 235-239.
- [17] 刘昌庚, 张盼月, 曾光明, 等. 生物淋滤-PAC 与 PAM 联合

- 调理城市污泥 [J]. 环境科学, 2010, **31** (9): 2124-2128.
- [18] Blais J F, Tyagi R D, Auclair J C. Bioleaching of metals from sewage sludge: Microorganisms and growth kinetics [J]. Water Research, 1993, **27**(1): 101-110.
- [19] Bosecker K. Bioleaching: Metal solubilization by microorganisms [J]. FEMS Microbiology Reviews, 1997, **20**(3-4): 591-604.
- [20] Neyens E, Baeyens J, Dewil R, *et al.* Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering [J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, **106**(2-3): 83-92.
- [21] Oikonomidis I, Burrows L J, Carliell-Marquet C M. Mode of action of ferric and ferrous iron salts in activated sludge [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2010, **85** (8): 1067-1076.
- [22] 国家环境保护总局科技标准司. 污水处理设施运行管理 [M]. 北京: 北京出版社, 2006. 309-321.
- [23] 肖凌鹏. 基于生物淋滤的污泥调理和脱水研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011. 39-47.
- [24] Pathak A, Dastidar M G, Sreekrishnan T R. Bioleaching of heavy metals from sewage sludge: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2009, **90**(8): 2343-2353.
- [25] Frølund B, Palmgren R, Keiding K, *et al.* Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin [J]. Water Research, 1996, **30** (8): 1749-1758.
- [26] Houghton J I, Quarmby J, Stephenson T. Municipal wastewater sludge dewaterability and the presence of microbial extracellular polymer [J]. Water Science and Technology, 2001, **44**(2-3): 373-379.
- [27] Lin S, Gurol M. Catalytic decomposition of hydrogen peroxide on iron oxide: Kinetics, mechanism and implications [J]. Environmental Science & Technology, 1998, **32** (10): 1417-1423.
- [28] Torrades F, Pérez M, Mansilla H D, *et al.* Experimental design of Fenton and photo-Fenton reactions for the treatment of cellulose bleaching effluents [J]. Chemosphere, 2003, **53** (10): 1211-1220.

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i> (11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i> (18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i> (25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong (40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenritang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling (64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i> (72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i> (80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i> (87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang (107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i> (114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i> (121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i> (143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i> (151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i> (163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i> (172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i> (179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i> (186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i> (194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i> (202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i> (209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i> (215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i> (221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui (227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i> (237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i> (259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i> (274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i> (280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i> (295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i> (301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i> (309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i> (325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i> (333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i> (338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i> (343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i> (357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu (365)

《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)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行