

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

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

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析 刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)

1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析 刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)

瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征 刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)

上海城区PM_{2.5}中有机碳和元素碳变化特征及来源分析 张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)

亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布 王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)

无锡市冬季典型天气PM_{2.5}中碳组分的污染特征 云龙龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)

高炉炼铁工艺细颗粒物PM_{2.5}排放特性分析 范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)

重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究 祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)

双组分VOCs的催化氧化及动力学分析 卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)

汽车排放超细颗粒物浓度及粒径谱特征的实验研究 陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)

疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素 周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)

河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量 陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)

大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价 张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)

雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价 柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)

北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析 李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖淋 (3352)

黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布 李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)

合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征 李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)

基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究 刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)

杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态 邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)

基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演 李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)

天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例 高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)

利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度 李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)

Cu₂O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究 王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)

不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究 李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)

还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸 周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)

多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较 宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)

不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究 金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)

气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响 李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)

微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究 刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚炜 (3455)

“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究 吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)

温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)

污水处理厂尾水细菌群落结构分析 徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)

沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究 国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)

内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析 李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)

基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析 李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)

S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响 陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)

影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析 李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)

河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系 马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)

Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究 马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)

基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析 艾建超,王宁,杨净 (3530)

石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究 杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)

不同施磷量(KH₂PO₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化 郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)

硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中的形态影响 杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)

硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响 刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)

再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响 龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)

西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征 秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)

黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ¹³C值的影响 杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)

碳底物含量对厌氧条件下水稻土N₂、N₂O、NO、CO₂和CH₄排放的影响 陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂, Klaus Butterbach-Bahl (3595)

北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM_{2.5}能力研究 梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)

污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响 刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)

京津冀区域生产和消费CO₂排放的时空特点分析 汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)

水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究 任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)

《环境科学》征稿简则(3279) 《环境科学》征订启事(3545) 信息(3364,3486,3552,3563)

基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析

李志华, 白旭丽, 张芹, 刘毅, 贺春博

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055)

摘要: 内源呼吸是活性污泥重要的代谢过程, 但目前对内源呼吸过程的认识较为模糊. 本研究采用呼吸图谱的方法, 对以去除 BOD 为代表的异养菌和以硝化菌为代表的自养菌的内源呼吸特征进行了解析. 结果表明, 上述两类细菌进入内源呼吸时间几乎相同, 但异养菌进入休眠期较快, 且处于休眠期的易恢复生物量比例较高, 表明异养菌具有较强的环境适应能力, 而自养菌则相反, 因此, 本研究从内源呼吸角度证实了自养菌较为脆弱. 另外, 研究还发现, 内源呼吸速率比例的增大反映出污泥活性变差, 是表征活性污泥活性的重要参数, 可作为活性污泥健康状态的定量描述指标. 本研究成果深化了内源呼吸过程的进一步认识, 为污水处理厂运行管理提供理论基础.

关键词: 内源呼吸; 比呼吸速率; 异养菌; 自养菌; 饥饿; 衰减速率

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3492-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.09.035

Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map

LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, LIU Yi, HE Chun-bo

(Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The endogenous process is an important metabolic part of the activated sludge, and the understanding of this process is still unclear. Characteristics of endogenous respiration for heterotrophic bacteria and autotrophic nitrifiers were analyzed using respirogram. Results showed that both heterotrophic and autotrophic bacteria entered the stage of endogenous respiration at almost the same time, but heterotrophic bacteria first entered the stage of dormancy i. e., they were easier to recover a higher proportion of biomass during the dormancy stage, indicating that heterotrophic bacteria exhibited strong environmental adaptability. Autotrophic bacteria were, however, quite different. This finding confirmed that autotrophic bacteria were more vulnerable from the viewpoint of endogenous respiration. In addition, the study also found that the increase of endogenous respiration rate ratio reflected the decreased sludge activity. And the proportion of endogenous respiration was an important parameter to characterize the activity of activated sludge, which can be used as a quantitative index for the health status of activated sludge. The findings further deepened the understanding of endogenous respiration process and provided a theoretical basis for the operation and management of wastewater treatment plants.

Key words: endogenous respiration; specific respiration rate; heterotrophic microbe; autotrophic microbe; starvation; decay rate

在污水处理中微生物的内源呼吸是指活性细胞利用细胞内含物作为基质进行新陈代谢过程中的呼吸作用, 通常发生在没有任何其他基质可利用时^[1]. 在饥饿状态下细胞不得不自身氧化、分解自身组织以生成能量提供给细胞维持过程^[2]. 衡量内源呼吸的大小即内源呼吸速率, 其定义为污泥在没有易降解物质时单位时间单位体积内的耗氧量^[3].

内源呼吸作为活性污泥的重要基础代谢指标, 可有效地表征活性污泥的活性与生物量^[3]、溶氧的有效利用率^[4]等重要工艺性能. 很多动力学参数和化学计量系数的测量也都基于内源呼吸^[1, 5]. 但活性污泥的内源呼吸过程研究较少, 对活性污泥何时进入内源呼吸没有明确参数表征. 虽曾有文献解析内源呼吸过程^[2, 3, 6~8], 但是没能明确指出内源呼吸中各阶段微生物种群的变化特征. 目前污水处理厂

由于测量工具以及测量方法的局限性, 无法对污泥的呼吸过程进行定性的分析, 因此污水处理厂的运行管理中出现的微生物种群变化问题缺乏理论指导.

本研究在引入呼吸图谱和呼吸速率比例概念的基础上, 探索了以去除 BOD 为代表的异养菌和以硝化菌为代表的自养菌两类典型细菌进入内源呼吸的时间以及各自的抗衰减能力. 通过结合内源呼吸过程特征以及活性污泥微生物变化对污泥的活性进行定性分析, 以期污水处理厂的运行管理提供理论基础.

收稿日期: 2014-01-27; 修订日期: 2014-03-19

基金项目: 陕西省科技计划国际合作项目(2013KW2201); 教育部博士点基金项目(20136120110002)

作者简介: 李志华(1976~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为废水生物处理技术与理论, E-mail: lizhihua@gmail.com

1 材料与方法

1.1 实验材料

污泥来源于西安市某 A²/O 污水处理厂好氧池内的活性污泥。活性污泥测定前先用无机无氮中性缓冲溶液清洗污泥, 然后通过搅拌-静沉-去上清液, 重复 3 次。然后将洗好的污泥置于恒温好氧反应器内。

实验采用课题组开发的呼吸仪^[9], 由恒温水浴的反应器、两个探头、PLC 和电脑组成。其中荧光法溶解氧探头(瑞士 Hamilton 公司出产的 HAMILTON Visiferm DO 120), pH 计(瑞士 Hamilton 公司出产的 HAMILTON Polilyte Plus Arc 120)监测反应室中的溶解氧及 pH 变化, 数据记录频率分别为 6s、10s 一次, 然后通过 PLC 把数据传输到电脑。测试过程中用水浴维持反应器温度在 25℃ ± 0.5℃。以 0.05 mol·L⁻¹ 的 HCl 和 NaOH 调节 pH 使其保持稳定。测得反应器 DO 在 (7.2 ± 0.1) mg·L⁻¹, 控制 pH 在 7.7 ± 0.1。

1.2 分析方法

实验方法采用呼吸计量法^[1, 10], 通过呼吸仪监测液相中的氧平衡浓度, 计算得到氧吸收速率。呼吸速率由外源性呼吸和内源性呼吸两部分组成, 其中外源性呼吸又包括自养菌呼吸和异养菌呼吸部分。公式表示如下:

$$OUR_T = OUR_{en} + OUR_A + OUR_H \quad (1)$$

等式两边同时除以 OUR_T , 公式变为:

$$1 = \frac{OUR_{en}}{OUR_T} + \frac{OUR_A}{OUR_T} + \frac{OUR_H}{OUR_T} \quad (2)$$

式中, OUR_{en}/OUR_T 为内源呼吸速率占总呼吸速率的比例; OUR_A/OUR_T 为自养菌呼吸速率占总呼吸速率的比例; OUR_H/OUR_T 为异养菌呼吸速率占总呼吸速率的比例。

在实际测量过程中为了能够区分开自养菌呼吸和异养菌呼吸, 可以用以下的实验来测得。测量过程, 先对约 6 L 污泥充分(恒温)曝气, 每隔一定时间取泥 300 mL 置于恒温水浴的呼吸仪中, 先在无基质条件下测定了 OUR_{en} , 然后加入 50 mg·L⁻¹ 的氯化铵测定 OUR_N (测量时间很短, 在 10 min), 最后加入 300 mg·L⁻¹ 的乙酸钠(并加入适量的微量元素, 保证基质充足)测定 OUR_T (实验首先是基于假设 6 h 污泥就进入了内源呼吸, 测了三者实验数据)。

公式中, ①无基质条件下 OUR_{en} ; ②只有氯化铵时的呼吸速率 $OUR_N = OUR_{en} + OUR_A$; ③只有乙

酸钠的呼吸速率 $OUR_C = OUR_{en} + OUR_H$; ④加入氯化铵和乙酸钠的呼吸速率, 即总的呼吸速率 $OUR_T = OUR_{en} + OUR_A + OUR_H$ 。

传统测定内源呼吸的方法是通过投加硝化抑制剂 ATU 实现的, 本研究是污泥的总内源呼吸过程, 包括自养菌内源呼吸和异养菌内源呼吸。通过投加不同的基质, 来实现不同菌种呼吸速率的分离。文献[6]中指出硝化抑制剂 ATU 对异养菌的可能有影响, ATU 可能在抑制自养菌生长的同时也一定程度上对异养菌有影响^[11]。自养菌即硝化细菌, 包括氨氮氧化细菌(AOB)和亚硝氮氧化细菌(NO_B), ATU 主要是抑制 AOB 的 NH₄⁺ 氧化过程, 而对于 NO_B 的 NO₂⁻ 氧化过程的抑制作用需要投加 NaClO₃ 或是叠氮化物^[12~14]。因此通过投加不同基质, 来实现不同菌种呼吸速率分离, 该方法不仅操作简单, 节省用药成本, 而且缩短了测试时间, 同时异养菌也不会受到抑制, 实验结果更加真实、可靠。

2 结果与讨论

2.1 内源呼吸过程中 SOUR 的变化

由于采用呼吸计量法与常规化学分析方法结合的手段对微生物过程测量技术的局限性, 只能简单测得 OUR_{en} 和 OUR_T 以及常规水质等参数, 这些数据只能粗略得到微生物整体进入内源呼吸的情况, 而无法表征不同类型微生物进入内源呼吸过程的呼吸能力。在基质充足的前提下, 生物量的增加会引起 OUR 增加^[5, 15], 而生物量衰减则会导致 OUR 的减小。其他条件一定时, 内源呼吸速率与污泥浓度的变化趋势一致, 即比内源呼吸速率与污泥浓度无关^[3, 16]。同理, 总呼吸速率、自养菌呼吸速率和异养菌呼吸速率也和 VSS 相关, 所以文中使用 SOUR 比呼吸速率, 以消除 VSS 的影响。

在曝气过程中 $SOUR_T$ 后期出现了两个平台期, 当污泥平台时(污泥早已进入内源呼吸期), 这样就会误使人们以为这是污泥进入内源呼吸的标志, 从而导致实验数据准确性不高。如图 1 所示, 可以看出 $SOUR_T$ 由上升转为下降的转折点, $SOUR_H$ 和 $SOUR_A$ 同时出现转折, 是异养菌和自养菌真正的进入了内源呼吸的点。文献中给出的活性污泥完全进入内源呼吸期的时间各有不同, 1 h (呼吸计量法)^[17] 到 5 d^[6] 不等。同样的通过 $SOUR_{en}$ 曲线, 该曲线基数较小且较稳定, 受外界影响较小, 测量精度要求高, 分析的难度大。

$SOUR_T$ 由 $SOUR_H$ 、 $SOUR_A$ 和 $SOUR_{en}$ 三部分组

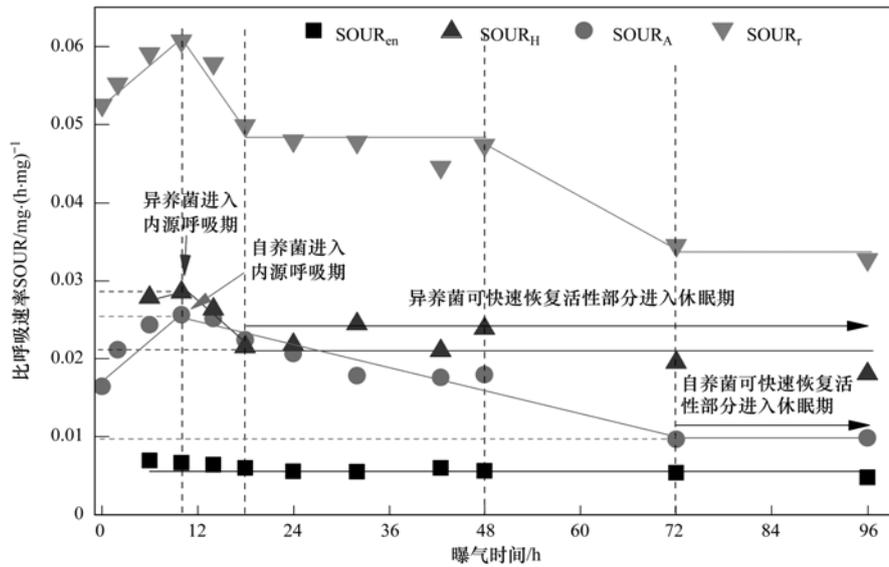


图 1 内源呼吸过程的比呼吸速率

Fig. 1 Specific respiration rate in the endogenous respiration process

成。由这四部分曲线组成的图形,本研究将其定义为呼吸图谱。从呼吸图谱中看出, $SOUR_{en}$ 整体水平较低,变化幅度小。图 1 中 0~10 h, $SOUR_T$ 逐渐上升,表明生物量在增加,说明污泥中还存在一部分可被利用的基质,包括胞外物质 EPS^[18]、被絮体吸附的物质以及胞内存储物 PHB^[19,20] 等。10 h,是 $SOUR_T$ 由上升转为下降的转折点, $SOUR_H$ 和 $SOUR_A$ 同时出现转折,表明异养菌和自养菌同时进入内源呼吸。不同的污泥组成、污泥内 EPS、F/M^[10] 等不同,造成进入内源呼吸时间不同,所以实验开始提出假设,污泥 6 h 进入了内源呼吸,证明假设不成立,实际污泥进入内源呼吸的时间是 10 h。基于不同污泥进入内源呼吸时间不同,采用本研究介绍的测定方法,可以确定具体的时间。

从图 1 中可以看出,异养菌和自养菌在内源呼吸过程中明显分为两部分,一部分是不可恢复部分,即图 1 中的下降段,其在基质充足的条件下不能恢复活性,可能是微生物衰减死亡了;另一部分在基质充足条件下可快速恢复活性,并且能发挥其功能的部分,即图 1 中的平稳段,是可快速恢复部分。可快速恢复部分能够在基质缺乏/饥饿条件下,处于休眠保护状态,一旦基质充足,能够快速恢复活性,维持微生物的正常生命活动。图 1 中平稳段,将其定义为微生物的休眠期。

10~18 h, $SOUR_T$ 曲线下降,其中 $SOUR_H$ 以较快的速率下降,下降了最高值的 24.49%,说明异养菌中不可恢复部分占总量的 24.49%,而剩余

75.51% 都是可快速恢复部分。同理,自养菌呼吸速率 $SOUR_A$ 以较慢的速率下降,下降了最高值的 62.22%,说明自养菌中不可恢复部分占总量的 62.22%,而只有 37.78% 是可快速恢复部分。72h 之后, $SOUR_H$ 和 $SOUR_A$ 均稳定,异养菌和自养菌进入了休眠期。最高值时, $SOUR_H$ 是 $SOUR_A$ 的 1.11 倍,而休眠期时两者比例是 2.02 倍。对应该系统污泥的异养菌和自养菌的浓度占 MLVSS 的比例分别为 28.87% 和 2.72%。

18~48 h 的 $SOUR_A$ 曲线下下降比例占 $SOUR_A$ (18h 时刻) 的 20%,下降幅度较大,所以 $SOUR_A$ 趋势线是下降的趋势。18~48 h,根据公式, $SOUR_T$ 是 OUR_{en} , OUR_A 和 OUR_H 三者之和, OUR_{en} 基本稳定, OUR_A 下降, OUR_H 略有上升(波动变化),自养菌部分衰减,异养菌利用自养菌衰减死亡的作为基质,从而使 $SOUR_T$ 基本维持不变。从 18~48 h, $SOUR_T$ 曲线下下降的比例占 $SOUR_T$ (18 h 时刻) 的 5%,变化幅度很小,近似是稳定的趋势。同时从 48~72 h, $SOUR_T$ 曲线下下降的比例占 $SOUR_T$ (48 h 时刻) 的 27%,下降比例明显,此处 48 h 可能是一个潜在的转折点,若将 18~72 h 整体看作是一段下降段,则忽略了这一点的变化,同时趋势线明显偏离了 48 h 的数据点。此转折点的具体含义还需要进一步的实验验证。因此本文将 18~72 h 细分为两个阶段。

通过呼吸图谱中的异养菌和自养菌的呼吸速率曲线变化,可以分析得出异养菌和自养菌进入内源

呼吸时间相同,但异养菌可快速恢复部分比自养菌可快速恢复部分大得多(75.51%和37.78%,约两倍),休眠期时异养菌微生物是自养菌微生物的两倍,充分说明异养菌和自养菌抗饥饿能力不同.当饥饿环境变为基质充足条件,异养菌中可迅速恢复活性部分的比例高,则说明异养菌微生物抗冲击负荷能力高.相反,自养菌微生物抗冲击负荷能力差,较敏感.长期基质缺乏,只有约三分之一的自养菌存活,对应到实际污水处理厂,如果自养菌大量流失,那么出水水质难以保证达标处理.这也同文献[21]中的结论相一致.主要原因是,异养菌与自养菌在细胞代谢、维持过程方面是不同的^[2],在异养菌细胞内有提供能量的胞内聚合物.在外源基质不

表 1 不同污泥的呼吸比例/%

Table 1 Respiration proportion of different sludges/%

不同污泥来源比例	某污水厂 A ² /O 好氧池	某污水厂 Orbal 氧化沟	实验室 A ² /O 好氧池	实验室 SBR1	实验室 SBR2
SOUR _{em} /SOUR _T	11.72	25.13	5.22	9.05	6.23
SOUR _A /SOUR _T	41.15	33.90	19.13	9.83	5.16
SOUR _H /SOUR _T	47.13	41.14	75.65	81.12	88.61

不同污泥由于微生物组成不同、活性等不同,使得呼吸速率比不同.从表 1 中可以看出,污水厂污泥的内源呼吸速率的比例较高,实验室的较低;污水厂的异养菌呼吸比例较低,而实验室的很高,高于 75%.还可以看出 SOUR_{em}/SOUR_T 的范围在 5%~15%; SOUR_A/SOUR_T 的范围在 5%~45%,范围较宽;而 SOUR_H/SOUR_T 的范围在 40%~90%.异养菌是活性污泥的主要组成,对应的异养菌呼吸速率较大,从而异养菌呼吸速率比也越大.污水厂的异养菌浓度占 MLVSS 的比例在 15%~60%^[15, 23, 24],实验室的异养菌浓度占 MLVSS 的比例在 60%~80%^[25-27].呼吸计量法测定了该污泥的异养菌和自养菌的浓度占 MLVSS 的比例分别为 28.87%和 2.72%.其中污水厂异养菌比例较低,也有一部分原因是在运输过程和实验室的检测过程,污泥的活性可能进一步的降低.其中异养菌比例主要与污泥龄(SRT)和进水水质有关,污泥龄越长,比例越低;进水中不可生物降解有机物含量高,比例也越低^[23, 28].而自养菌的浓度占 MLVSS 的比例在 1%~10%^[5, 29],这也同本实验室测得的数据一致^[30].本实验室同时测了污水厂和实验室培养的活性污泥,其中污水厂自养菌的浓度较低,实验室比例较高.同时表中也可以看出实际污水处理厂的内源呼吸比例要比实验室污泥的大.

其中异养菌和自养菌浓度占 MLVSS 的比例计

足条件下,异养菌转而利用胞外物质 EPS、胞内存储物 PHB 等,很快地进入了内源呼吸阶段,因此能够平稳的保持较长时间.文献[7, 22]中也指出异养菌细胞能够更好地适应衰减的环境,也可能是异养菌细胞能够进行隐形生长,补偿了衰减过程中活性细胞的死亡.

2.2 内源呼吸过程中各呼吸速率比例的变化

如果将总呼吸速率看作是 1,异养菌呼吸速率、自养菌呼吸速率和内源呼吸速率同时除以总呼吸速率,得到各自的呼吸速率比例,我们将此定义为呼吸速率比例.该参数可表征各呼吸速率占总呼吸速率的比例大小,从而了解呼吸过程中各呼吸速率的耗氧量的相对大小.

算如下:

$$f = X / (MLVSS \cdot i_{CV}) \quad (3)$$

式中, X 为异养菌或自养菌的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; i_{CV} 为 MLVSS 与 COD 的转换系数,取默认值 $1.48 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ ^[23].

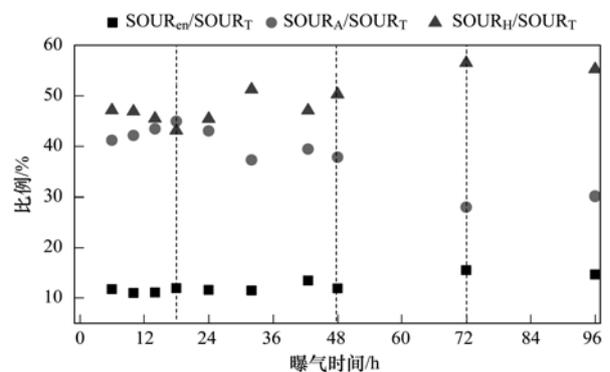


图 2 呼吸速率比例随曝气时间的变化

Fig. 2 Variation of respiration rate proportion with the aeration time

图 2 中表示内源呼吸过程中各呼吸速率比例的沿时变化,在开始曝气的 0~18 h 阶段,异养菌呼吸比例和自养菌呼吸比例均较高,分别占总呼吸比例的 47.12%和 41.15%.由于曝气起初反应器内残留着一些基质且在好氧条件下,异养菌和自养菌利用水中残留的基质用于生长,两者同步上升,其比例基本不变.随着曝气时间的进一步加长,残留的基质基本被消耗殆尽,18 h 之后,异养菌呼吸比例上

升,由 43.11% 上升到 56.52%,上升了 13.41%;自养菌呼吸速率的比例开始下降,比例由 44.95% 下降至 27.98%,下降了 16.97%;内源呼吸比例相比其他两者,基本维持不变.产生这一变化的原因是,虽然异养菌呼吸速率维持不变,但由于内源呼吸比例不变和自养菌呼吸比例下降,而使得异养菌呼吸比例的上升,呼吸比例发生了变化.

通过呼吸速率比例变化的分析,得出活性污泥系统中氧气消耗的的主体是 $SOUR_H$,异养菌消耗的氧气的比例占总呼吸比例的 50% 以上,异养菌是活性污泥的主体也是降解有机物的主体,同时消耗氧气也较多的.而自养菌呼吸比例(该污泥的硝化效果较好)占总呼吸比例的 30%~40%,而内源呼吸比例只占总呼吸的 10%~15%.当微生物种群发生变化,则会引起呼吸速率的变化,从而引起呼吸速率比例的变化.

2.3 内源呼吸比例和比内源呼吸速率的对比分析

从内源呼吸过程的 $SOUR_{en}$ 的变化趋势来看,只能看出一部分的信息而不能全面反映污泥中各微生物变化特征.随着微生物的内源呼吸氧化分解等作用,活性的细胞逐渐减少,从而 $SOUR_{en}$ 的逐渐下降.下降过程也会有突然的上升,文献[6]中给出以 $SOUR_{en}$ 的突然上升作为短暂适应期的判据.同时结合 $SOUR_{en}/SOUR_T$ 内源呼吸速率比例的上升还可以判断是否污泥的恶化.

结合表 1 和图 3,长期基质缺乏会使 $SOUR_{en}/SOUR_T$ 由 11% 上到 15%.表明当污泥在环境不利的情况,比如毒性物质浓度增大,内源呼吸比例会较高^[31].内源呼吸比例较高,表明用于微生物自生基础代谢的溶氧消耗比例较高,因此,在去除相同外部污染物的条件下,所需要的溶解氧较高,从而导致运行成本上升,因此可用内源呼吸比例指示活性污泥的健康状态,就污水处理功效而言,该值越低,活性

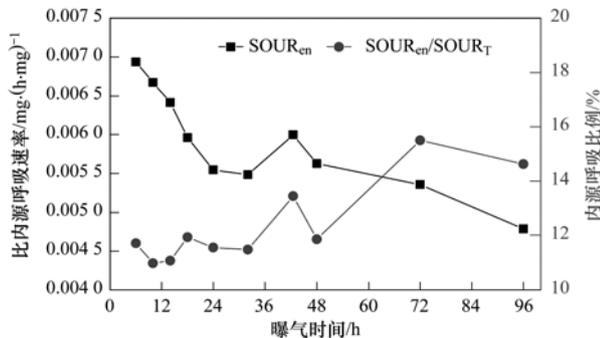


图 3 比内源呼吸速率及内源呼吸速率比例

Fig. 3 Specific endogenous respiration rate and proportion of endogenous respiration rate time

污泥健康状态越好.研究发现,实际污水处理厂的內源呼吸比例要比实验室污泥的大,而污泥的活性明显比污水厂高,说明污水厂污泥的活性较差.因此,可用内源呼吸速率比例来表征污泥的活性.

3 结论

(1) 基于本研究的呼吸图谱的方法可以有效判定异养菌和自养菌进入内源呼吸的时间.通过呼吸图谱中的异养菌和自养菌的呼吸速率曲线分析得出,虽然异养菌微生物和自养菌微生物进入内源呼吸时间相同,但两类菌的抗饥饿能力不同.异养菌微生物的可快速恢复部分比自养菌高.当饥饿环境变为基质充足条件,异养菌微生物中可迅速恢复活性部分的比例高,异养菌微生物抗冲击负荷能力高,自养菌微生物则相反.从内源呼吸的角度证实了,自养菌较为脆弱.原因是异养菌与自养菌的细胞代谢、维持过程不同,在异养菌细胞内有提供能量的胞外聚合物 EPS 等.因此在污水处理厂实际运行管理中,如果长时间的基质缺乏,极易导致自养菌的大量流失或者污泥菌种比例失调进而引起出水水质不达标.

(2) 建立了采用内源呼吸比例定量描述活性污泥的健康状态的指标,即内源呼吸速率比例的增大,反映出污泥活性会变差.活性污泥的活性变化引起呼吸速率的变化,进而引起了内源呼吸速率比例的变化.用该方法来分析污水厂运行中污泥生物量的变化情况,比用呼吸计量法测量自养菌和异养菌浓度的方法更加地快捷.

参考文献:

- [1] 黄满红,李咏梅,顾国维,等.呼吸计量法在活性污泥系统废水特性测定中的应用[J].工业水处理,2005,25(9):58-60.
- [2] 郝晓地,朱景义,曹亚莉,等.污水生物处理系统中内源过程的研究进展[J].环境科学学报,2009,29(2):231-242.
- [3] 崔卫华,宋英豪,倪文,等.SBR系统中活性污泥内源呼吸速率的研究[J].环境工程学报,2007,1(4):123-126.
- [4] 孙艳,李若谷,张雁秋.城市污水处理厂活性污泥呼吸速率的研究[J].能源环境保护,2011,25(1):19-22.
- [5] 唐书娟,吴志超,周振,等.活性污泥系统中自养菌浓度及生长动力学参数测定[J].环境工程学报,2009,3(2):271-274.
- [6] Friedrich M, Takács I. A new interpretation of endogenous respiration profiles for the evaluation of the endogenous decay rate of heterotrophic biomass in activated sludge [J]. Water Research, 2013, 47(15): 5639-5646.
- [7] 郝晓地,朱景义,曹秀芹,等.污水生物处理系统细菌衰减值特征的实验研究[J].环境科学,2008,29(11):3104-3109.

- [8] 王啟林, 郝晓地, 曹亚莉. 聚糖原菌富集实验及其内源过程探究[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1034-1041.
- [9] 李志华, 王之玺, 姬晓琴, 等. 一种自养菌动力学参数测量装置[P]. 中国专利: CN 2012201657445, 2012-04-18.
- [10] Zielińska M, Bernat K, Cydzik-Kwiatkowska A, *et al.* Respirometric activity of activated sludge in sequencing batch reactor depending on substrate and dissolved oxygen concentration [J]. *Environment Protection Engineering*, 2012, **38**(2): 41-49.
- [11] Lavallée B, Lessard P, Besser C. Decay rate variability of active heterotrophic biomass [J]. *Water Science and Technology*, 2002, **46**(1-2): 423-430.
- [12] Pai T Y, Wang S C, Lin C Y, *et al.* Two types of organophosphate pesticides and their combined effects on heterotrophic growth rates in activated sludge process[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2009, **84**(12): 1773-1779.
- [13] Ginestet P, Audic J M, Urbain V, *et al.* Estimation of nitrifying bacterial activities by measuring oxygen uptake in the presence of the metabolic inhibitors allylthiourea and azide[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, **64**(6): 2266-2268.
- [14] Surmacz-Gorska J, Gemaey K, Demuyne C, *et al.* Nitrification monitoring in activated sludge by oxygen uptake rate (OUR) measurements[J]. *Water Research*, 1996, **30**(5): 1228-1236.
- [15] 吴志超, 周振, 王志伟, 等. 活性污泥系统中异养微生物浓度的测定[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(10): 910-914.
- [16] 刘昕, 张继伟, 朱书全, 等. 利用呼吸速率在线测定活性污泥浓度[J]. 工业水处理, 2008, **27**(11): 62-64.
- [17] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al.* Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 [M]. London: IWA Publishing, 2000.
- [18] 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.
- [19] Wang J, Yu H. Biosynthesis of polyhydroxybutyrate (PHB) and extracellular polymeric substances (EPS) by *Ralstonia eutropha* ATCC 17699 in batch cultures [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **75**(4): 871-878.
- [20] 王亚宜, 鲁文敏, 杨健, 等. 基于聚糖菌和聚磷菌竞争的代谢模型及影响因素[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(6): 1131-1138.
- [21] 李智, 李志华, 王晓昌, 等. 含盐量与负荷对好氧颗粒中自养与异养菌的影响[J]. 环境工程学报, 2009, **3**(2): 205-208.
- [22] Hao X, Wang Q, Zhang X, *et al.* Experimental evaluation of decrease in bacterial activity due to cell death and activity decay in activated sludge[J]. *Water Research*, 2009, **43**(14): 3604-3612.
- [23] Majewsky M, Gallé T, Yargeau V, *et al.* Active heterotrophic biomass and sludge retention time (SRT) as determining factors for biodegradation kinetics of pharmaceuticals in activated sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(16): 7415-7421.
- [24] Ubisi M F, Jood T W, Wentzel M C, *et al.* Activated sludge mixed liquor heterotrophic active biomass [J]. *Water SA*, 1997, **23**(3): 239-248.
- [25] Tsai Y P, Wu W M. Estimating biomass of heterotrophic and autotrophic bacteria by our batch tests [J]. *Environmental Technology*, 2005, **26**(6): 601-613.
- [26] Ramdani A, Dold P, Gadbois A, *et al.* Characterization of the heterotrophic biomass and the endogenous residue of activated sludge [J]. *Water Research*, 2012, **46**(3): 653-668.
- [27] Ramdani A, Dold P, Déléris S, *et al.* Biodegradation of the endogenous residue of activated sludge [J]. *Water Research*, 2010, **44**(7): 2179-2188.
- [28] Ikumi D S, Harding T H, Ekama G A. Biodegradability of Wastewater and Activated sludge organics in anaerobic digestion [J]. *Water Research*, 2014, **56**: 267-279.
- [29] Ni B, Yu H, Sun Y. Modeling simultaneous autotrophic and heterotrophic growth in aerobic granules [J]. *Water Research*, 2008, **42**(6-7): 1583-1594.
- [30] 王之玺. 呼吸法定量分析微生物过程技术优化及设备开发 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [31] 施汉昌, 柯细勇, 张伟, 等. 用快速生物活性测定仪测定活性污泥生物活性的研究 [J]. 环境科学, 2004, **25**(1): 67-71.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i>	(3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i>	(3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i>	(3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i>	(3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i>	(3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i>	(3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i>	(3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i>	(3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i>	(3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i>	(3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i>	(3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i>	(3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i>	(3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i>	(3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i>	(3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i>	(3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i>	(3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i>	(3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i>	(3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i>	(3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i>	(3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i>	(3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i>	(3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i>	(3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i>	(3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i>	(3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i>	(3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i>	(3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i>	(3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i>	(3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i>	(3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue	(3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i>	(3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i>	(3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing	(3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang	(3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i>	(3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i>	(3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i>	(3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i>	(3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i>	(3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang	(3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i>	(3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region; an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i>	(3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i>	(3632)

《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9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 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@reces. 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@reces. 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