ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第36卷 第2期
2015年2月15日

目 次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征 …… 朱琼宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响 …… 蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近3年太原市夏季降水的化学特征研究 …… 郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市 $PM_{2.5}$ 中有机碳和元素碳的污染特征 …… 刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布 ……
…… 李秋旭, 何畅, 马召辉, 马丽花, 扎西卓玛, 王英, 金军(402)
北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究 …… 王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征 …… 宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究 …… 刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析 …… 李鹤, 李军, 刘小龙, 杨曦, 张伟, 王洁, 牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析 ……
…… 张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钥,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 …… 金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究 …… 郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析 …… 陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力 ……
…… 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性 …… 李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究 …… 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿型绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价 ……
…… 臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价 … 戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋, 周汝佳(507)
UV协同 ClO_2 去除三氯生及其降解产物的研究 …… 李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(Ⅴ)的去除机制研究 …… 康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(Ⅵ)的研究…… 曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中 Cr(Ⅵ)研究 …… 刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO_2@酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究 …… 吴菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO_2/CFP复合电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 特性的研究 …… 刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂 TiO_2 催化剂 …… 王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁 TiO_2 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究…… 项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载 Fe/Co 催化 H_2O_2 氧化降解阳离子红3R …… 马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究 …… 张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响 …… 韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧 EBPR 系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究 …… 马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O池溶解氧水平对石化废水 A/O 工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响 ……
…… 丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探 …… 周雨珺,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究 …… 杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应 ……
…… 齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田 N_2O 排放的影响 …… 吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究 …… 刘义凡, 陈书涛, 胡正华, 沈小帅, 张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素 …… 罗由林,李启权, 王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响 …… 张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性 …… 张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究 …… 刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险 … 张石磊, 薛南冬, 杨兵, 李发生, 陈宣宇, 刘博, 孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律 …… 杨文弢, 王英杰, 周航, 易开心, 曾敏, 彭佩钦, 廖柏寒(694)
植物根系质外体溶液的提取方法研究:以多环芳烃为例 …… 朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究 …… 徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,宫敏(706)
1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究 …… 刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应 …… 陈幕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对 Cu^{2+} 和毒死蜱毒性的生理响应 …… 李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物 …… 田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中 Na^+ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究 …… 张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用 …… 樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401) 《环境科学》征稿简则(437) 信息(489,522,726,735)

碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响

韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪
(西安建筑科技大学环境与市政工程学院,西安 710055)

摘要: 以中试氧化沟系统活性污泥为研究对象,开展了碳源类型、温度、电子受体和 COD 浓度对释磷、吸磷过程的影响研究. 结果表明:25℃ 时,以生活污水、乙酸钠和葡萄糖为不同碳源,葡萄糖的释磷、吸磷速率最小,分别为 5.12 mg·(g·h)$^{-1}$和 6.43 mg·(g·h)$^{-1}$,生活污水和乙酸钠的释磷、吸磷速率数值相近. 在 12、16、20 和 25℃ 时,以乙酸钠为碳源,释磷、吸磷速率随温度的升高有不同程度的增加; 且好氧吸磷速率随外加 COD 浓度的增大而减小. 当以氧、硝酸盐和亚硝酸盐为电子受体时,吸磷速率的大小排序为:氧 > 硝酸盐 > 亚硝酸盐; 缺氧吸磷过程的硝酸盐和亚硝酸盐的消耗量与吸磷量之间的化学计量关系($P_{吸收}/N_{消耗}$,质量比)分别为 0.96 和 0.65.

关键词:生物除磷; 释磷; 吸磷; 碳源; 温度; 电子受体
中图分类号: X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2015)02-0590-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2015.02.029

Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal

HAN Yun, XU Song, DONG Tao, WANG Bin-fan, WANG Xian-yao, PENG Dang-cong
(School of Municipal and Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Effects of carbon sources, temperature and electron acceptors on phosphorus uptake and release were investigated in a pilot-scale oxidation ditch. Phosphorus uptake and release rates were measured with different carbon sources (domestic sewage, sodium acetate, glucose) at 25℃. The results showed that the minimum phosphorus uptake and release rates of glucose were 5.12 mg·(g·h)$^{-1}$ and 6.43 mg·(g·h)$^{-1}$, respectively, and those of domestic sewage are similar to those of sodium acetate. Phosphorus uptake and release rates increased with the increase of temperature (12, 16, 20 and 25℃) using sodium acetate as carbon sources. Anoxic phosphorus uptake rate decreased with added COD. Electron acceptors (oxygen, nitrate, nitrite) had significant effects on phosphorus uptake rate and their order was in accordance with oxygen > nitrate > nitrite. The mass ratio of anoxic P uptake and N consumption ($P_{uptake}/N_{consumption}$) of nitrate and nitrite were 0.96 and 0.65, respectively.

Key words: biological phosphorus removal; phosphorus release; phosphorus uptake; carbon source; temperature; electron acceptor

强化生物除磷(enhanced biological phosphorus removal,EBPR)工艺是目前城市污水生物除磷的主要方法之一. EBPR 工艺是通过厌氧、好氧交替运行,依靠排放富磷剩余污泥达到除磷的目的[1]. 在厌氧环境中,聚磷菌(phosphorus accumulating organisms,PAOs)将细胞中聚磷酸盐水解成正磷酸盐获取能量,并利用污水中易降解的有机物(如 VFAs),合成储能物质 PHAs 贮存于细胞中; 在好氧环境中,PAOs 以氧为电子受体,氧化储藏的 PHAs,并利用反应产生的能量,过量吸收磷酸盐,合成高储能物质 ATP,作为能量物质储存于细胞中[2~6]. EBPR 主要受到温度、pH、DO、电子受体和碳源等因素的影响[7]. 近年来,不少研究者开展以乙酸和丙酸为碳源的研究,但是针对其他类型碳源的研究较少,如吴昌永等[8]分别以乙酸和丙酸为碳源培养出的 PAOs 均表现出良好的生物除磷性能. 通常温度会影响微生物活性,Johnson 等[9]发现在中温(15~30℃)时,生物除磷效率随温度的升高而增大,高温(30℃以上)时生物除磷效率开始降低. 而 Ong 等[10]研究指出高温(32℃)并没有影响生物除磷过程,同时 Li 等[11]认为低温(5℃)时 PAOs 可以获得良好的生物除磷效果,甚至优于 25℃ 时的除磷效果. 传统的生物除磷工艺是以氧作为吸磷过程的电子受体,而 Zhou 等[12]、Moraes 等[13]和 Zeng 等[14]发现硝酸盐和亚硝酸盐也可作为电子受体进行生物除磷.

综上,目前关于 EBPR 影响因素的研究,针对不同碳源的研究较少,同时在温度对 EBPR 影响研究上还存在不同的认识. 因此,开展碳源类型、温度和电子受体对 EBPR 影响因素的研究,旨在为 EBPR 工艺提供技术支持.

收稿日期: 2014-06-10; **修订日期**: 2014-09-05
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07315-001-04,2009ZX07317-009); 国家自然科学基金项目(51408458); 陕西省科技统筹创新重大项目(2011KTZB-03-03-03)
作者简介: 韩芸(1974~),女,博士,副教授,主要研究方向为污水处理与回用,E-mail:hanyun@xauat.edu.cn

1　材料与方法

1.1　试验污水和污泥

生活污水取自西安市第四污水处理厂曝气沉砂池出水，主要水质指标如表 1 所示. 试验所用活性污泥取自带有前置厌氧的氧化沟中试系统，该系统污泥泥龄为 15 d，运行稳定. 活性污泥样品为中试系统好氧末活性污泥，淘洗水为自来水.

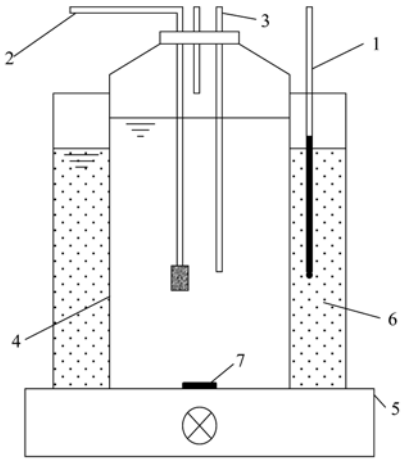
表 1　主要水质指标/mg·L^{-1}

Table 1　Water quality/mg·L^{-1}

项目	COD	TN	NH_4^+-N	TP	PO_4^{3-}-P
范围	270 ~ 633	28.0 ~ 76.0	17.0 ~ 53.0	2.86 ~ 7.08	0.60 ~ 5.33
平均值	448	56.0	36.5	6.24	3.14

1.2　试验装置

试验采用小试的方法，在密封罐内进行释磷和吸磷试验. 厌氧和缺氧试验时向气管内通入氮气，好氧时通入空气，采用磁力搅拌器进行搅拌，水浴方法控制温度. 试验装置如图 1 所示.



1. 温度计；2. 曝气管；3. 取样管；4. 密封罐；5. 磁力搅拌器；6. 水浴；7. 转子

图 1　试验装置示意

Fig. 1　Schematic diagram of test

1.3　测定方法

主要测定指标包括：PO_4^{3-}-P、NO_3^--N、NO_2^--N、MLSS 和 MLVSS，其中，PO_4^{3-}-P 采用钼锑抗分光光度法；NO_3^--N 采用紫外分光光度法；NO_2^--N 采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法；MLSS 和 MLVSS 采用重量法测定[15].

1.4　试验设计思路

通过释磷和吸磷速率测定试验，研究碳源、温度、电子受体和 COD 浓度对释磷和吸磷的影响，释磷和吸磷过程在 25℃下进行.

(1)不同碳源类型试验　首先取中试氧化沟系统好氧末污泥 0.8 L，淘洗定容至 4 L 的试验容器中，分别加入 COD 当量为 300 mg·L^{-1}的乙酸钠、葡萄糖和生活污水，密封搅拌，在厌氧环境中进行释磷试验. 释磷结束后将污泥淘洗定容，加入磷酸氢二钾，将溶液中 PO_4^{3-}-P 浓度调整到 20 mg·L^{-1}，立即曝气进行好氧吸磷试验.

(2)不同温度对生物除磷影响试验　采用水浴方法，分别将温度控制在 12、16、20 和 25℃，以乙酸钠为碳源研究释磷和吸磷速率随温度的变化情况，试验步骤及方法同(1).

(3)不同 COD 浓度和电子受体对吸磷速率的影响试验　首先取中试氧化沟系统好氧末污泥，将活性污泥 1.2 L 淘洗定容至 5 L 的试验容器中进行释磷过程，释磷完成后淘洗定容至 5 L，加入磷酸氢二钾至 PO_4^{3-}-P 浓度为 20 mg·L^{-1}，然后将溶液平均分到 5 个 1 L 密封罐内，分别进行如下操作. 1 号：不加任何药剂；2 号：加入 COD 当量为 50 mg·L^{-1}乙酸钠；3 号：加入 COD 当量为 150 mg·L^{-1}乙酸钠；4 号：加入 20 mg·L^{-1}亚硝酸盐；5 号：加入 20 mg·L^{-1}硝酸盐. 前 3 个密封罐通入空气，后两个通入氮气，同时进行吸磷试验.

2　结果与分析

2.1　不同碳源类型对释磷、吸磷的影响

为了研究不同碳源类型对生物除磷的影响，以氧化沟中试系统活性污泥为研究对象，分别开展以乙酸钠、生活污水和葡萄糖为碳源的磷速率测定试验.

不同碳源类型的释磷变化曲线见图 2. 从中可知，以乙酸钠和生活污水为碳源的释磷曲线在前 30 min 时曲线斜率最大，随后开始逐渐减小，2.5 h 获得最大释磷量. 以葡萄糖为碳源的释磷量较低，且曲线没有明显的弯曲，快速释磷现象不明显. 以 30 min 为分界线，可将释磷过程分为快速阶段和慢速阶段，三者的快速释磷量、最大释磷量和释磷速率见表 2. 3 种碳源的释磷速率及 2.5 h 最大释磷量大小顺序为：乙酸钠 > 生活污水 > 葡萄糖.

不同碳源类型的吸磷变化曲线如图 3 所示，吸磷量和吸磷速率见表 2. 不同碳源对吸磷的影响同

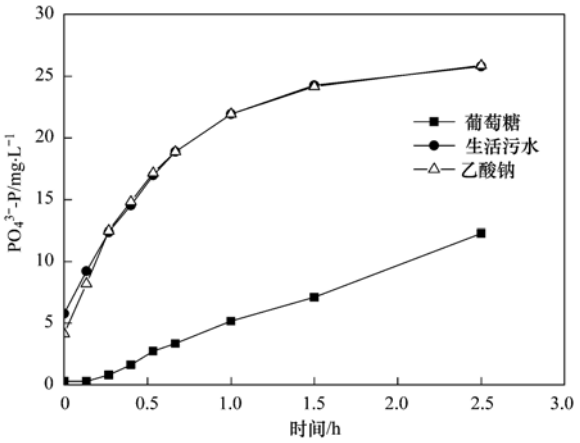


图 2 不同碳源类型的释磷变化

Fig. 2 Profiles of phosphorus release rates with different carbon sources

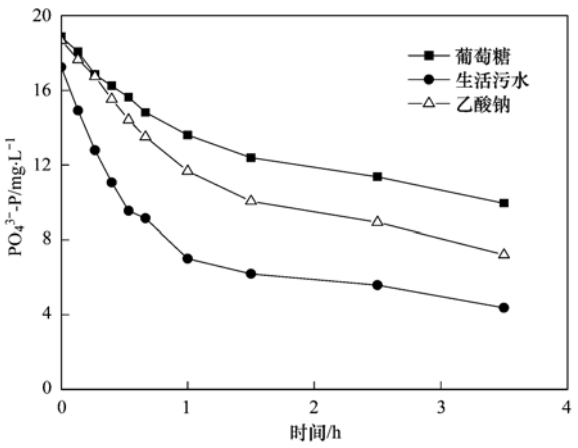


图 3 不同碳源类型的吸磷变化

Fig. 3 Profiles of phosphorus uptake rates with different carbon sources

表 2 不同碳源的磷速率测定相关指标

Table 2 Summary of phosphorus rates with different carbon sources

碳源	厌氧释磷			好氧吸磷	
	快速释磷量 /mg·L^{-1}	最大释磷量 /mg·L^{-1}	释磷速率 /mg·(g·h)$^{-1}$	吸磷量 /mg·L^{-1}	吸磷速率 /mg·(g·h)$^{-1}$
乙酸钠	17.0	21.7	23.4	11.3	8.34
生活污水	16.8	20.0	19.0	12.9	13.4
葡萄糖	2.60	12.0	5.12	8.68	6.43

释磷稍有不同,生活污水的吸磷速率和吸磷量最大,其次为乙酸钠,葡萄糖的吸磷速率和吸磷量最低.

2.2 不同温度对释磷、吸磷的影响

(1)不同温度对释磷的影响

不同温度的释磷变化曲线如图 4 所示,在 12、16、20 和 25℃的最大释磷量分别为:3.85、6.66、9.87 和 20.0 mg·L^{-1};释磷速率依次为:1.53、2.83、8.54 和 19.0 mg·(g·h)$^{-1}$. 由此可知,温度对污泥的厌氧释磷过程的影响非常明显,不仅影响污泥的释磷速率,也影响厌氧最大释磷量. 从整体上

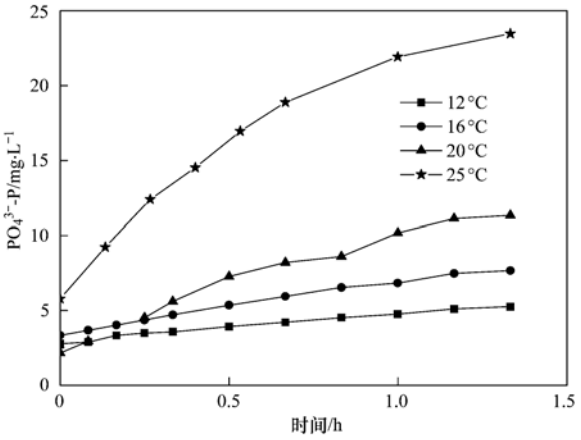


图 4 不同温度的释磷变化

Fig. 4 Profiles of phosphorus release rates at different temperatures

看,不同温度的释磷速率和最大释磷量随温度的升高而增大,且 20~25℃的增幅最大.

(2)不同温度对好氧吸磷的影响

图 5 为不同温度的好氧吸磷变化曲线. 从中可知,随着温度的升高,吸磷速率和吸磷量均有不同程度的增加. 在 12、16 和 20℃好氧吸磷量分别为 1.53、3.80 和 4.60 mg·L^{-1},吸磷速率分别为 1.09、2.75 和 3.92 mg·(g·h)$^{-1}$,在 25℃时,吸磷量达到 17.3 mg·L^{-1},吸磷速率为 13.4 mg·(g·h)$^{-1}$,远大于其他 3 个温度.

2.3 不同 COD 浓度对吸磷的影响

试验在好氧条件下进行,将外加 COD 浓度分别控制在 0、50 和 150 mg·L^{-1}. 不同 COD 浓度的好氧吸磷变化曲线如图 6 所示.

由图 6 可知,外加 COD 浓度为 0 mg·L^{-1}时,活性污泥表现出很好的吸磷效果,好氧吸磷速率为 9.72 mg·(g·h)$^{-1}$,仅前 60 min 吸收了大部分磷酸盐,60 min 后吸磷过程趋于稳定.

当外加 COD 浓度为 50 mg·L^{-1}时,好氧吸磷速率为 5.22 mg·(g·h)$^{-1}$,前 20 min 吸磷缓慢,稍后吸磷现象明显,吸磷速率增大. 这说明好氧段有机物的存在会影响 EBPR 过程,这与唐旭光等[16]研究得出的结论相同,即好氧段中易降解有机物底物的存

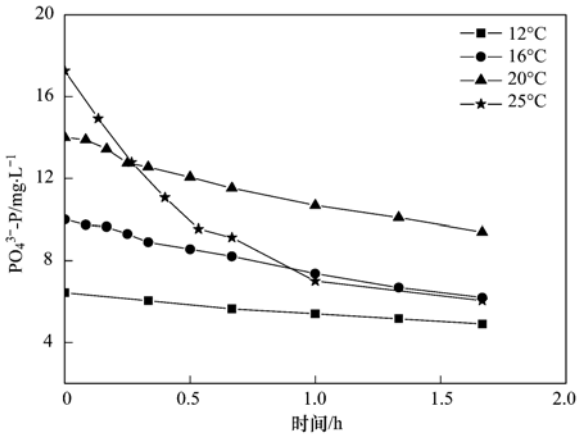


图 5　不同温度好氧吸磷的变化

Fig. 5　Profiles of phosphorus uptake rates at different temperatures

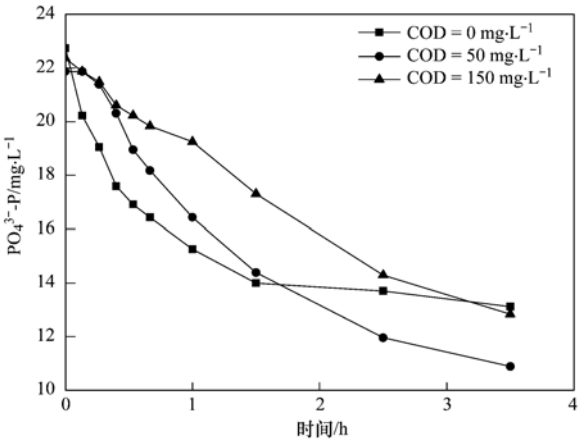


图 6　不同起始 COD 浓度好氧吸磷的变化

Fig. 6　Profiles of phosphorus uptake rates with different initial COD concentrations

在，可能使 PAOs 继续合成 PHAs，吸收磷酸盐的同时也伴随着磷酸盐的释放，所以好氧段有机物的存在对吸磷过程有抑制作用.

当外加 COD 浓度为 150 mg·L^{-1}时，磷酸盐浓度下降趋势明显比其它两者小，好氧吸磷速率也最小，为 2.74 mg·(g·h)$^{-1}$. 说明好氧段有机物浓度的增加会进一步抑制 EBPR 过程，这是因为随 COD 浓度增大混合液中异养菌的呼吸作用加强导致溶解氧降低，低溶解氧阻碍 PAOs 吸磷过程[17].

所以，对于除磷系统，厌氧阶段较高的 COD 浓度虽然可以加快厌氧释磷过程，但是残余的有机物会对好氧吸磷产生抑制作用，使吸磷不充分，而且分解这部分有机物还会消耗更多的氧，增加污水处理厂的运行费用. 此外，外加 COD 浓度为 50 mg·L^{-1}和 150 mg·L^{-1}时的最终吸磷量相同，两者好氧吸磷速率分别为 5.22 mg·(g·h)$^{-1}$和 2.74 mg·(g·h)$^{-1}$，因此吸磷所用时间后者比前者多，说明好氧段有机物浓度的增加并没有影响最终好氧吸磷量，只增加了好氧吸磷的时间.

2.4　不同电子受体对吸磷的影响

不同电子受体的吸磷变化曲线如图 7 所示. 从图 7(a)和 7(b)可知，以硝酸盐和亚硝酸盐为电子受体的反硝化吸磷现象明显，从图 7(c)得到以氧、硝酸盐和亚硝酸盐为电子受体时，吸磷速率分别为 9.72、4.32 和 3.98 mg·(g·h)$^{-1}$. 结果表明，PAOs 以氧为电子受体的吸磷速率明显高于以硝酸盐为电子受体的吸磷速率，以硝酸盐为电子受体的吸磷速率高于以亚硝酸盐为电子受体的吸磷速率. 这与 Zhou 等[12]在 SBR 反应器中分别培养以氧、硝酸盐和亚硝酸盐为电子受体的 PAOs 对比试验研究结果相同.

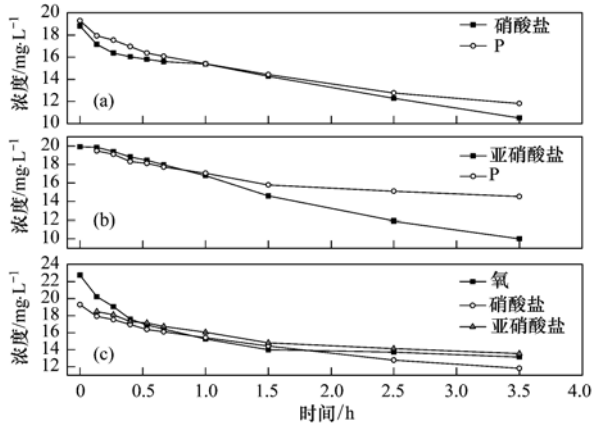


图 7　不同电子受体吸磷变化

Fig. 7　Profiles of phosphorus uptake rates with different electron acceptors

3　讨论

3.1　碳源对生物除磷的影响

生物除磷过程包括释磷和吸磷两个过程，以乙酸钠、生活污水和葡萄糖为碳源进行磷速率试验，探讨 3 种碳源对释磷和吸磷过程的影响，发现释磷过程中释磷速率由大到小排序为：乙酸钠 > 生活污水 > 葡萄糖. Kargi 等[18]以葡萄糖分别与乙酸、丙酸和丁酸混合为碳源，研究其对释磷和吸磷过程的影响结果与之相似. 乙酸钠作为小分子物质，极易溶于水而被 PAOs 利用，故乙酸钠为碳源的释磷速率较高；表 2 中生活污水的释磷速率和乙酸钠相近，说明生活污水中易降解的 COD 物质较多，通过短时间的厌氧水解过程，COD 物质较容易转化为 VFA 而被 PAOs 利用；葡萄糖为大分子物质，需先降解为小分子 VFA 再被 PAOs 利用，造成释磷过程

中快速释磷现象不明显,整体释磷速率低.

吸磷过程,不同碳源吸磷速率的大小顺序为:生活污水 > 乙酸钠 > 葡萄糖. 这是因为乙酸钠作为碳源改变了溶液 pH 值,使得混合液 pH 值升高至 9 ~ 10,而微生物吸磷的最适 pH 范围在 5.5 ~ 6.5,过高的 pH 值使 PAOs 吸磷能力降低. 同时生活污水为氧化沟中试系统进水,活性污泥长期以生活污水为碳源物质,污泥已对生活污水产生适应性,所以有较好的吸磷效果. 从表 2 中 3 种碳源的释磷量大小可以看出,以乙酸钠和生活污水为碳源时活性污泥厌氧释磷充分,而以葡萄糖为碳源时厌氧释磷不充分,导致其在好氧过程中吸磷速率和吸磷量均较小.

Kargi 等[18]的研究结果还表明单独以葡萄糖为碳源时的释磷和吸磷速率最低; Pijuan 等[19]以乙酸、丙酸、丁酸和葡萄糖为碳源,发现在厌氧条件下,以乙酸为碳源合成 PHA 效率最高,以葡萄糖为碳源的效率最低,以上研究结果均与本研究一致. 乙酸等小分子脂肪酸易被 PAOs 直接利用合成 PHA,进而完成吸磷过程; 葡萄糖作为大分子物质不能直接被 PAOs 利用,需先降解为小分子脂肪酸. 因此,以乙酸等小分子脂肪酸为碳源的生物除磷过程优于以葡萄糖为碳源的生物除磷过程.

3.2 温度对生物除磷的影响

温度对生物除磷过程的影响主要表现在:影响 PAOs 的生物酶活性、影响污泥中聚糖菌(glycogen accumulating organisms, GAOs)和 PAOs 的含量[5]. 以乙酸钠为碳源,分别在 12、16、20 和 25℃的条件下进行磷速率试验结果表明,温度对生物除磷过程存在明显的影响,不同温度下的释磷、吸磷速率和释磷、吸磷量均随温度的升高有不同程度的增加. 温度由 12℃升高至 25℃的过程中,PAOs 细胞内生物酶活性不断升高,PAOs 代谢活性加强,最终使释磷、吸磷速率有不同程度的升高. 其中,20 ~ 25℃的释磷、吸磷速率增加幅度最大. 12 ~ 20℃的变化趋势与 Brdjanovic 等[20]研究温度对生物除磷过程影响的结果一致.

但是,Panswad 等[21]以 SBR 工艺系统研究 20 ~ 35℃对 EBPR 系统微生物群落结构的影响,得出温度由 20℃升高至 35℃时,释磷、吸磷速率随温度的升高而降低. Nittami 等[22]以 SBR 工艺系统研究温度、pH 和 DO 对 EBPR 的影响,试验结果表明 10 ~ 25℃的吸磷速率变化趋势与本研究结果一致,但 25℃时吸磷速率值增幅不大; 同时释磷趋势也有所不同,20℃的释磷速率最大, 20 ~ 25℃表现为下降. 这可能是因为 Panswad 等[21]研究中的污泥取自以实验室配水为进水的 SBR 系统,而本研究中的污泥取自以实际生活污水为进水的氧化沟系统,这导致了污泥中的微生物群落结构不同,尤其是 PAOs 与 GAOs 的含量. 同时污泥中的 PAOs 的代谢途径也可能不同,导致其最佳释磷、吸磷的温度不同.

综上所述,温度对生物除磷的影响较为复杂,本研究结果表明温度由 12℃升高至 25℃的过程中有利于生物除磷过程.

3.3 电子受体对生物除磷的影响

研究分别以氧、硝酸盐和亚硝酸盐为电子受体进行对比试验,结果显示以氧为电子受体的吸磷速率明显大于以硝酸盐和亚硝酸盐为电子受体的吸磷速率.

试验结果还表明,以硝酸盐为电子受体的吸磷速率高于以亚硝酸盐为电子受体的吸磷速率,这与高大文等[23]以 SBR 厌氧/缺氧运行反应器研究 NO_3^- 和 NO_2^- 作为电子受体的反硝化除磷的结果一致. 这是因为污水处理系统中很少出现亚硝酸盐积累的情况,试验所用污泥均是以硝酸盐为电子受体进行反硝化过程,硝酸盐还原酶活性高且数量多,以硝酸盐为电子受体时表现出较高的反硝化速率. 在反硝化除磷过程中,反硝化作用提供吸收磷酸盐和合成聚磷酸盐的能量,反硝化作用强,缺氧吸磷作用加强[24].

总之,不同的电子受体表现出不同的吸磷效果,以氧、硝酸盐和亚硝酸盐为电子受体的吸磷速率由大到小为:氧 > 硝酸盐 > 亚硝酸盐.

3.4 硝酸盐和亚硝酸盐消耗量与吸磷量的化学计量关系

以硝酸盐和亚硝酸盐作为电子受体的反硝化除磷过程中,硝酸盐和亚硝酸盐的消耗量与反硝化吸磷量存在着化学计量关系.

3.4.1 硝酸盐消耗量与吸磷量的化学计量关系

根据以硝酸盐为电子受体的吸磷过程中硝酸盐和 PO_4^{3-}-P 浓度的变化关系,对其进行线性回归,如图 8 所示. 从中可知,硝酸盐的消耗量与吸磷量的化学计量关系为每消耗 1 mg N 可以吸收 0.96 mg P,这与刘建广等[25]以 SBR 反应器研究不同电子受体对反硝化除磷菌缺氧吸磷的影响得出的关系(1.0,$P_{吸收}/N_{消耗}$)相近; 高大文等[23]在研究 NO_3^- 和 NO_2^- 作为电子受体的反硝化除磷得出两者的关系为 0.88,这说明反硝化除磷过程由于工艺、pH 和 SRT 等条件的不同,其化学计量关系略有差别.

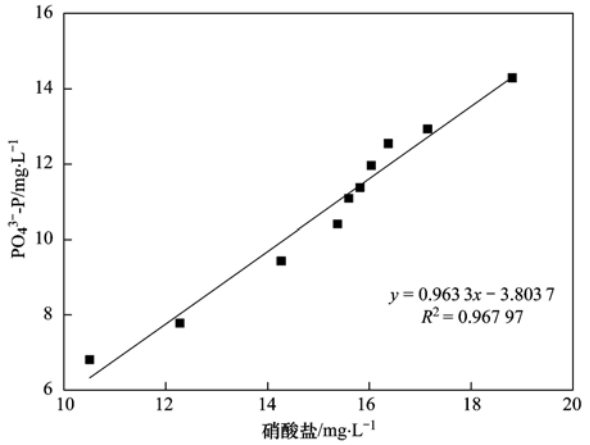


图 8　硝酸盐消耗量和吸磷量的关系

Fig. 8　Relationship between nitrate consumption and P uptake

3.4.2　亚硝酸盐消耗量与吸磷量的化学计量关系

图 9 为亚硝酸盐消耗量和吸磷量的关系. 从中可知,以亚硝酸盐为电子受体的吸磷过程中每消耗 1mg N 可以吸收 0.65mg P,小于以硝酸盐为电子受体的数值. Meinhold 等[26]研究发现当亚硝酸盐浓度小于 4 mg·L^{-1}时,PAOs 能以亚硝酸盐为电子受体进行反硝化吸磷,但当亚硝酸盐浓度高于 8 mg·L^{-1}时,吸磷过程受到抑制; Zeng 等[27]认为,亚硝酸盐浓度在 10 mg·L^{-1}以下时,其对吸磷过程无明显抑制作用,但当浓度达到 20 mg·L^{-1}时除磷效果变差. 所以这可能是试验过程中由于亚硝酸盐浓度高,对以亚硝酸盐为电子受体的反硝化吸磷过程产生了抑制作用,导致亚硝酸盐的单位吸磷量低于硝酸盐.

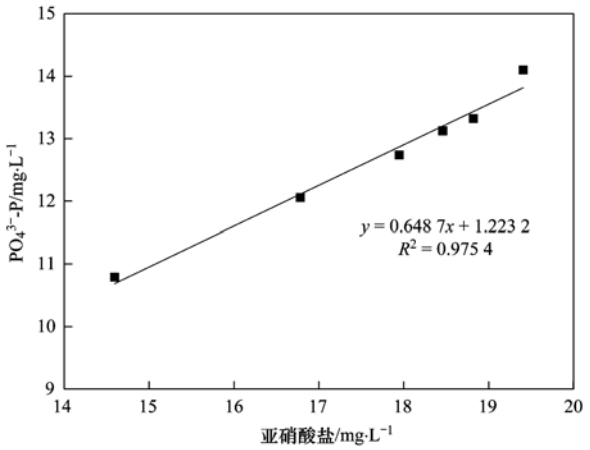


图 9　亚硝酸盐消耗量和吸磷量的关系

Fig. 9　Relationship between nitrite consumption and P uptake

4　结论

(1)25℃,以乙酸钠、生活污水和葡糖糖作为碳源,对释磷和吸磷过程的影响研究结果显示:释磷阶段,以乙酸钠和生活污水为碳源时释磷速率相当,分别为 23.4 mg·(g·h)$^{-1}$和 19.0 mg·(g·h)$^{-1}$,而以葡萄糖为碳源时释磷速率最小,为 5.12 mg·(g·h)$^{-1}$;吸磷阶段,吸磷速率大小顺序与释磷速率有所不同,其顺序为:生活污水 > 乙酸钠 > 葡萄糖.

(2)温度对释磷和吸磷速率的影响非常明显,在 12 ~25℃时,释磷和吸磷速率随温度的升高逐渐增大,且 20 ~25℃之间的增幅最大.

(3)好氧段外加有机物的存在对吸磷过程有抑制作用,且浓度越高抑制作用越强.

(4)以氧、硝酸盐和亚硝酸盐为吸磷过程的电子受体时,吸磷速率大小依次为:氧 > 硝酸盐 > 亚硝酸盐.

(5)反硝化除磷过程中,硝酸盐、亚硝酸盐的消耗量与吸磷量之间的化学计量关系($P_{吸收}/N_{消耗}$,质量比)分别为 0.96 和 0.65.

参考文献:

[1] Zhang Z J, Li H, Zhu J, *et al*. Improvement strategy on enhanced biological phosphorus removal for municipal wastewater treatment plants: full-scale operating parameters, sludge activities, and microbial features [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(7): 4646-4653.

[2] Chen H B, Wang D B, Li X M, *et al*. Biological phosphorus removal from real wastewater in a sequencing batch reactor operated as aerobic/extended-idle regime [J]. Biochemical Engineering Journal, 2013, **77**: 147-153.

[3] Xie B Z, Wang L, Liu H. Using low intensity ultrasound to improve the efficiency of biological phosphorus removal [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2008, **15**(5): 775-781.

[4] Gebremariam S Y, Beutel M W, Christian D, *et al*. Research advances and challenges in the microbiology of enhanced biological phosphorus removal-a critical review [J]. Water Environment Research, 2011, **83**(3): 195-219.

[5] Oehmen A, Lemos P C, Carvalho G, *et al*. Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale [J]. Water Research, 2007, **41**(11): 2271-2300.

[6] Lanham A B, Oehmen A, Saunders A M, *et al*. Metabolic versatility in full-scale wastewater treatment plants performing enhanced biological phosphorus removal [J]. Water Research, 2013, **47**(19): 7032-7041.

[7] Mulkerrins D, Dobson A D W, Colleran E. Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters [J]. Environment International, 2004, **30**(2): 249-259.

[8] 吴昌永, 彭永臻, 万春黎, 等. 碳源对 EBPR 代谢过程及微生物特性的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(7): 1990-1994.

[9] Johnson K, van Geest J, Kleerebezem R, *et al*. Short-and long-term temperature effects on aerobic polyhydroxybutyrate producing

mixed cultures [J]. Water Research, 2010: **44**(6): 1689-1700.

[10] Ong Y H, Chua A S M, Fukushima T, *et al*. High-temperature EBPR process: The performance, analysis of PAOs and GAOs and the fine-scale population study of Candidatus "Accumulibacter phosphatis" [J]. Water Research, 2014, **64**: 102-112.

[11] Li N, Ren N Q, Wang X H, *et al*. Effect of temperature on intracellular phosphorus absorption and extra-cellular phosphorus removal in EBPR process [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(15): 6265-6268.

[12] Zhou S Q, Zhang X J, Feng L Y. Effect of different types of electron acceptors on the anoxic phosphorus uptake activity of denitrifying phosphorus removing bacteria [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(6): 1603-1610.

[13] Moraes B S, Souza T S O, Foresti E. Effect of sulfide concentration on autotrophic denitrification from nitrate and nitrite in vertical fixed-bed reactors [J]. Process Biochemistry, 2012, **47**(9): 1395-1401.

[14] Zeng W, Yang Y Y, Li L, *et al*. Effect of nitrite from nitritation on biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor treating domestic wastewater [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(12): 6657-6664.

[15] 国家环保总局编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2012. 200-284.

[16] 唐旭光, 王淑莹, 彭永臻, 等. SBR 法好氧段碳源浓度对吸磷的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, **42**(10): 3220-3224.

[17] 谢继慈, 陈洪波, 李小明, 等. 混合碳源浓度对单级好氧生物脱氮除磷的影响[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(10): 1771-1778.

[18] Kargi F, Uygur A, Başkaya H S. Phosphate uptake and release rates with different carbon sources in biological nutrient removal using a SBR [J]. Journal of Environmental Management, 2005, **76**(1): 71-75.

[19] Pijuan M, Casas C, Baeza J A. Polyhydroxyalkanoate synthesis using different carbon sources by two enhanced biological phosphorus removal microbial communities [J]. Process Biochemistry, 2009, **44**(1): 97-105.

[20] Brdjanovic D, Logemann S, van Loosdrecht M C M, *et al*. Influence of temperature on biological phosphorus removal: process and molecular ecological studies [J]. Water Research, 1998, **32**(4): 1035-1048.

[21] Panswad T, Doungchai A, Anotai J. Temperature effect on microbial community of enhanced biological phosphorus removal system [J]. Water Research, 2003, **37**(2): 409-415.

[22] Nittami T, Oi H, Matsumoto K, *et al*. Influence of temperature, pH and dissolved oxygen concentration on enhanced biological phosphorus removal under strictly aerobic conditions [J]. New Biotechnology, 2011, **29**(1): 2-8.

[23] 高大文, 李强, 梁红, 等. NO_3^- 和 NO_2^- 作为电子受体时的反硝化除磷实时控制[J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 1073-1078.

[24] Zhou Y, Pijuan M, Yuan Z G. Free nitrous acid inhibition on anoxic phosphorus uptake and denitrification by poly-phosphate accumulating organisms [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2007, **98**(4): 903-912.

[25] 刘建广, 付昆明, 杨义飞, 等. 不同电子受体对反硝化除磷菌缺氧吸磷的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1472-1476.

[26] Meinhold J, Arnold E, Isaacs S. Effect of nitrite on anoxic phosphate uptake in biological phosphorus removal activated sludge [J]. Water Research, 1999, **33**(8): 1871-1883.

[27] Zeng W, Li L, Yang Y Y, *et al*. Denitrifying phosphorus removal and impact of nitrite accumulation on phosphorus removal in a continuous anaerobic-anoxic-aerobic (A^2O) process treating domestic wastewater [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2011, **48**(2): 134-142.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 36 No. 2

Feb. 15, 2015

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days ····· ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, *et al.* (373)

Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station ····· PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, *et al.* (379)

Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan ····· GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, *et al.* (388)

Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in $PM_{2.5}$ in Taiyuan ····· LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, *et al.* (396)

Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China ····· LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, *et al.* (402)

Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing ····· WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, *et al.* (408)

Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands ····· SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, *et al.* (415)

Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring ····· LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, *et al.* (421)

Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China ····· LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, *et al.* (430)

Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China ····· ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, *et al.* (438)

Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China ····· JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, *et al.* (448)

Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary ····· GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, *et al.* (457)

Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis ····· CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, *et al.* (464)

Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake ····· MENG Ya-yuan, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, *et al.* (471)

Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch ····· LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, *et al.* (481)

Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China ····· ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)

Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region ····· ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, *et al.* (497)

Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China ····· DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, *et al.* (507)

Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO_2 and Its Degradation Products ····· LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, *et al.* (516)

Mechanism of Groundwater As(Ⅴ) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration ····· KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)

Preparation of Nano Zero-valent Iron/*Sargassum horneri* Based Activated Carbon for Removal of Cr(Ⅵ) from Aqueous Solution ····· ZENG Gan-ning, WU Xiao, ZHENG Lin, *et al.* (530)

Adsorption of Cr(Ⅵ) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution ····· LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, *et al.* (537)

Adsorption of the TiO_2@ Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed ····· WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, *et al.* (545)

Preparation and Pb^{2+} Electrosorption Characteristics of MnO_2/CFP Composite Electrode ····· LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, *et al.* (552)

Preparation of Weak Light Driven TiO_2 Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis ····· WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, *et al.* (559)

Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO_2 Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation ··· XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, *et al.* (568)

Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H_2O_2 Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co ····· MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)

Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles ····· ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, *et al.* (584)

Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal ····· HAN Yun, XU Song, DONG Tao, *et al.* (590)

Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition ····· MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, *et al.* (597)

Effects of Dissolved Oxygen in the Oxic Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater ····· DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, *et al.* (604)

Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement ····· ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, *et al.* (612)

Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant ····· YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, *et al.* (619)

Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded *Leymus chinensis* Steppes in Inner Mongolia, China ····· QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, *et al.* (625)

Impacts of Elevated Ozone Concentration on N_2O Emission from Arid Farmland ····· WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, *et al.* (636)

Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest ····· LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, *et al.* (644)

Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin ····· LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, *et al.* (652)

Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China ····· ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, *et al.* (661)

Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake ····· ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, *et al.* (669)

Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation ····· LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)

Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation ····· ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, *et al.* (686)

Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice ····· YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, *et al.* (694)

Extraction of Plant Root Apoplast Solution: A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons ····· ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, *et al.* (700)

Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of *Phytolacca americana* L. ····· XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, *et al.* (706)

Degradation Characteristics of Naphthalene with a *Pseudomonas aeruginosa* Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel ····· LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, *et al.* (712)

Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos ····· CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, *et al.* (719)

Physiological Response of *Neocaridina denticulate* to the Toxicity of Cu^{2+} and Chlorpyrifos ····· LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, *et al.* (727)

Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors ····· TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, *et al.* (736)

Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na^+-Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening ····· ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, *et al.* (744)

Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District ····· FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning (751)

《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 2 月 15 日　第 36 卷　第 2 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 36　No. 2　Feb. 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