

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

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12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数

王晓玲^{1,2}, 宋铁红^{1,2}, 殷宝勇², 李静文², 李紫棋², 余勇²

(1. 吉林建筑大学松江流域水环境教育部重点实验室, 长春 130118; 2. 吉林建筑大学市政与环境工程学院, 长春 130118)

摘要: 为了优化污水脱氮除磷系统的运行, 基于试验结果和物料平衡分析, 以系统脱氮除磷性能和缺氧吸磷性能为评价依据, 考察主缺氧段氧化还原电位 (ORP_m) 作为连续流单污泥脱氮除磷系统运行调控参数的可行性, 并揭示其与氮、磷物质转化规律的关系, 确定最佳 ORP_m 设定值. 试验期间, 以硝化液内循环流量为被控变量, 采用 PLC 自动控制系统调控 ORP_m, 其它运行参数保持不变. 试验分为 6 个阶段, 各阶段控制系统 ORP_m 设定值分别为 -143、-123、-105、-95、-72 以及 -57 mV. 结果表明, 不同 ORP_m 设定值条件下, 出水氨氮浓度变化较小, 但 TN、TP 浓度变化较明显, 当 ORP_m 设定值为 -95 mV 时, 连续流单污泥脱氮除磷系统具有最佳的氮磷去除性能. 物料平衡分析结果表明, 当 ORP_m 设定值由 -143 mV 增加至 -57 mV 时: ①主缺氧段硝酸盐氮反应量分别为 214.40、235.16、241.16、244.02、240.90 以及 233.65 mg·h⁻¹; 该段内 TN 转化量分别为 244.92、255.85、328.04、347.45、336.42 以及 320.60 mg·h⁻¹, 硝酸盐氮和 TN 反应量均在 ORP_m 设定值为 -95 mV 时达到峰值. ②厌氧段释磷量分别为 -214.12、-228.64、-259.26、-264.54、-256.92 和 -252.84 mg·h⁻¹, 系统总吸磷量分别为 252.15、275.85、332.25、338.10、336.15 和 324.30 mg·h⁻¹, 其中主缺氧段吸磷量分别为 30.27、62.14、124.58、154.41、150.41 和 138.30 mg·h⁻¹, 吸磷量在 ORP_m 设定值为 -95 mV 时达到峰值. 结果表明, ORP_m 值可作为连续流单污泥脱氮除磷系统运行调控参数.

关键词: ORP; 连续流; 调控参数; 脱氮; 除磷

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2617-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.039

ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow

WANG Xiao-ling^{1,2}, SONG Tie-hong^{1,2}, YIN Bao-yong², LI Jing-wen², LI Zi-qi², YU Yong²

(1. Key Laboratory of Songliao Aquatic Environment, Ministry of Education, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

Abstract: To optimize the performance of nitrogen and phosphorus removal, based on test results and mass balance, the feasibility of control for nitrogen and phosphorus removal in the single sludge system with a continuous flow using ORP in the main anoxic stage (ORP_m) was investigated, meanwhile, the objective laws of conversion for nitrogen and phosphorus under different ORP_m were expounded. During the experiments, nitrification liquid internal circulation flow rate was controlled as the variable. The ORP_m was controlled by PLC automatically, and the other operation parameters remained unchanged. The experiments tested six different ORPs in main anoxic stage affecting nitrogen and phosphorus removal, *i. e.*, -143, -123, -105, -95, -72, and -57 mV. The ammonia concentration changed a little in effluent under the condition of different ORP_ms, however, the TN and TP concentrations changed obviously. When the ORP_m was controlled as -95 mV, the active sludge reached the maximal nitrogen and phosphorus removal with the continuous flow. According to mass balance calculation, when ORP_m increased from -143 mV to -57 mV, ①In the main anoxic stage, nitrate nitrogen reaction rates were 214.40, 235.16, 241.16, 244.02, 240.90 and 233.65 mg·h⁻¹, respectively; the amount of total nitrogen conversions were 244.92, 255.85, 328.04, 347.45, 336.42 and 320.60 mg·h⁻¹, respectively; both reaction rates reached the peak at the ORP_m of -95 mV; ②Phosphorus release rates in anaerobic stage were -214.12, -228.64, -259.26, -264.54, -256.92 and -252.84 mg·h⁻¹, respectively; total phosphorus absorption rates were 252.15, 275.85, 332.25, 338.10, 336.15 and 324.30 mg·h⁻¹, respectively, and phosphorus absorption rates were 30.27, 62.14, 124.58, 154.41, 150.41 and 138.30 mg·h⁻¹, respectively, in the main anoxic stage; phosphorus absorption rates reached the peak when ORP_m was -95 mV. The experiments revealed that ORP_m could be used as the control parameter of nitrogen and phosphorus removal in single sludge system with a continuous flow.

Key words: ORP_m; continuous flow; control parameter; denitrification; phosphorus removal

收稿日期: 2014-11-08; 修订日期: 2015-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308253); 吉林省科技发展计划项目(20130522076JH)

作者简介: 王晓玲(1977~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水同步脱氮除磷技术及污水处理过程控制系统, E-mail: smile_gyb@sina.com

目前,国内外水体富营养化现象越来越严重,因此为保护水资源,点源污水中的营养元素氮和磷必须去除^[1]. 然而,污水生物脱氮除磷过程较复杂,其中涉及 BOD 降解、硝化、反硝化、释磷以及吸磷等多个生化反应,且各个反应过程对微生物组成及含量、底物类型及环境条件的要求均不相同^[2]. 因此在连续流单污泥污水生物处理系统中实现同步脱氮和除磷,将不可避免地产生多种矛盾关系,其中以聚磷菌(phosphate-accumulating organisms, PAOs)和反硝化菌碳源竞争的矛盾最为突出^[3]. 大量的研究和实际运行结果表明,连续流单污泥脱氮除磷系统运行的关键是缺氧段的反硝化过程,且对于处理低碳氮比污水的系统来说,该段的吸磷过程同样重要^[4-11]. 因此,对于以连续流单污泥脱氮除磷系统为处理工艺主体的污水厂来说,为保证其运行效果,需具备以下 3 个条件:①可充分利用缺氧段反硝化潜力;②可最大程度地刺激反硝化菌以聚 β 羟基丁酸为碳源进行硝酸盐呼吸;③提高出水稳定性. 城市污水处理厂的运行实践表明,建立过程控制系统可保证出水的稳定性^[12-15]. 因此,为满足上述 3 个条件,构建反硝化吸磷过程控制系统至关重要,这则要求开发可测、可控的参数.

根据活性污泥反应动力学模型 2d:

$$\frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}}$$

是缺氧段反硝化速率和吸磷速率方程式的开关函数,式中, S_{O_2} 为主缺氧段溶解氧(dissolved oxygen, DO)浓度, S_{NO_3} 为主缺氧段硝酸盐氮浓度, K_{O_2} 为 DO 半饱和常数(IWA 专家组推荐该值取 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), K_{NO_3} 为硝酸盐氮半饱和常数(IWA 专家组推荐该值取 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[16]. 由此开关函数可知,主缺氧段的反硝化速率受该段 DO 和硝酸盐氮浓度的影响.

在构建污水生物处理过程控制系统时,控制参数的可实时、稳定、准确地检测是至关重要的. 虽然主缺氧段硝酸盐氮浓度可作为连续流单污泥脱氮除磷系统运行控制参数^[17,18],但硝酸盐在线测定仪维护较困难,且检测精度有待提高. 而 DO 浓度是否可作为缺氧段反应过程的控制参数至今没有研究报道,且 DO 在线测定仪在低氧浓度条件下的灵敏度和准确度较差. 因此,硝酸盐在线测定仪和 DO 在线测定仪均不适合用作缺氧段反应过程控制系统的检测仪器. 而有研究结果表明,主缺氧段 DO 浓度和硝酸盐氮浓度可用氧化还原电位(oxidation

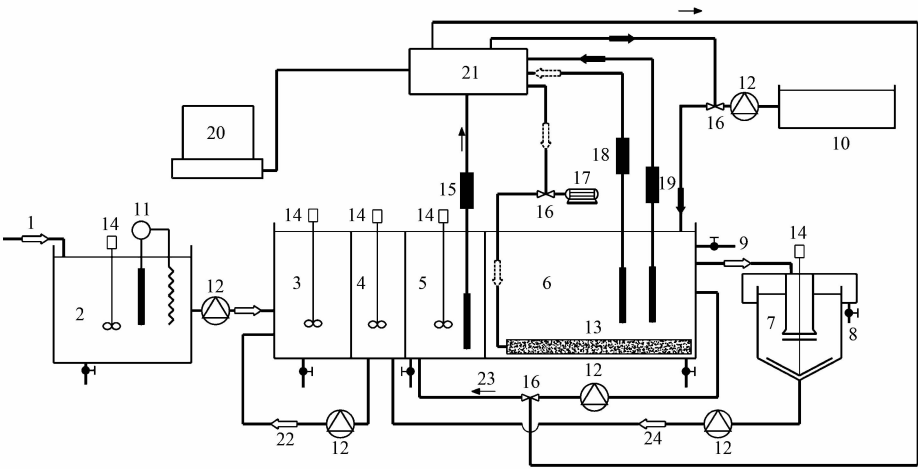
reduction potential, ORP)间接表征,该值与硝酸盐浓度、DO 浓度之间存在着密切的相关关系^[19]. ORP 在线检测器具有在线检测、响应快、控制精度高、便于接入计算机等优点,并已大量应用,尤其在间歇式活性污泥工艺中获得了最为广泛地应用^[20-23]. 此外,从微生物生理生态学角度来说,ORP 是表征污水生物处理过程氧化还原能力的变量,调节该值可控制细胞内氧化还原物质的含量进而改变物质的代谢途径^[24-27],且作为生态因子,每种微生物均具有适宜的 ORP 范围. 本研究考察了连续流单污泥脱氮除磷系统在不同的主缺氧段 ORP(ORP_m)条件下运行时的脱氮除磷性能,并基于物料平衡分析,揭示 ORP_m 与氮磷转化的关系,通过评价用该参数调控脱氮除磷系统性能的可行性,以期为优化连续流单污泥污水脱氮除磷系统的运行提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验系统安装于实验室内,工艺流程及装置见图 1. 该系统由污水箱($L \times B \times H = 70 \text{ cm} \times 80 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$)、连续流单污泥脱氮除磷反应器($L \times B \times H = 75 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$)、沉淀池(其中沉淀区:直径 $\Phi = 40 \text{ cm}$,深度 $H = 25 \text{ cm}$)以及自动控制系统 4 部分组成. 污水箱内装有搅拌器以保证污水水质均匀,并装有自动调温器以保持水温恒定. 连续流单污泥脱氮除磷反应器为双廊道矩形反应器,分为 4 个反应段,分别为厌氧段($L \times B \times H = 30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$, anaerobic stage, ANS)、预缺氧段($L \times B \times H = 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$, pre-anoxic stage, PAnS)、主要缺氧段($L \times B \times H = 30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$, main anoxic stage, MAnS)、好氧段($L \times B \times H = 75 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$, aerobic stage, AS). 厌氧段、预缺氧段、主缺氧段中均设有搅拌器,以保证污泥和污水充分接触. 空气由鼓风机压缩至安装于好氧段的扩散器,供氧的同时搅拌混合液使活性污泥处于悬浮状态. 沉淀池中设有低速旋转的刮泥机.

为了控制 ORP_m、好氧段 DO 及 pH 值,试验系统设有过程控制系统. 该过程控制系统由计算机、可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)、在线测定仪以及电动调节阀组成,采用反馈控制结构对运行过程和环境进行控制. 其中检测器 ORP 在线测定仪安装于主缺氧段,DO 在线测定仪和 pH 在线测定仪安装于好氧段.



1. 模拟城市污水; 2. 污水箱; 3. 厌氧段; 4. 预缺氧段; 5. 主缺氧段; 6. 好氧段; 7. 沉淀池; 8. 出水; 9. 剩余污泥排放; 10. NaHCO₃ 溶液贮池; 11. 温度自动调节装置; 12. 蠕动泵; 13. 空气扩散器; 14. 电动磁力搅拌器; 15. ORP 在线测定仪; 16. 电动调节阀; 17. 空气压缩机; 18. DO 在线测定仪; 19. pH 在线测定仪; 20. 计算机; 21. 可编程逻辑控制器; 22. 混合液内循环; 23. 硝化液内循环; 24. 污泥回流

图 1 试验系统流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of study set-up

1.2 试验污水与污泥

试验以模拟城市污水为考察对象, 污染物质成分与浓度参照长春市政污水处理系统生化池进水确定. 污水以全脂奶粉和啤酒废水为有机碳源. 全脂奶粉和啤酒废水是常见的人工配置污水的碳源^[28~34], 二者混合后, 所含有机物成分、有机氮含量及其可生化性更接近于污水处理厂生化池进水(经水解酸化池预处理). 以氯化铵为氮源, 以磷酸二氢钾为磷源; 为中和硝化反应释放的酸度而投加碳酸氢钠, 其投加量由 PLC 控制系统自动调控; 为满足聚磷菌吸磷代谢过程中对镁离子和钙离子的需

求而投加硫酸镁和氯化钙; 为满足活性污泥微生物生长繁殖的营养需要, 投加微量营养元素液. 各药剂投加浓度及污水水质特性见表 1.

接种污泥取自长春市北郊污水处理厂, 该厂以改良厌氧/缺氧/好氧 (anaerobic/anoxic/aerobic, A²/O) 工艺为主体, 于 2006 年建成投产. 将接种污泥投加到连续流单污泥脱氮除磷系统中, 启动运行. 20 d 后, 系统内混合液悬浮固体浓度 (mixed liquor suspended solids, MLSS) 基本保持不变, 系统脱氮除磷效果较好且稳定, 这说明活性污泥已驯熟成熟, 可开始取样跟踪测定, 进行试验研究.

表 1 试验模拟城市污水试剂及水质特性

Table 1 Components in synthetic wastewater and major characteristics of the influent

配制药剂	投加量/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	微量营养元素液成分	浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	水质指标	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
啤酒废水	$0.5\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$	氯化铁	0.9	COD	290 ± 10
全脂奶粉	0.5	硼酸	0.15	BOD ₅	172 ± 8
氯化铵	0.05	七水氯化钴	0.15	氨氮	53.9 ± 4.10
磷酸二氢钾	0.031	五水硫酸铜	0.03	硝酸盐氮	<1
氯化钙	0.01	碘化钾	0.18	总氮	58.13 ± 3.79
硫酸镁	0.05	四水氯化锰	0.06	总磷	7.14 ± 0.51
微量营养元素液	$0.6\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$	二水钼酸钠	0.06		
		七水硫酸锌	0.12		

1.3 试验方案

为了评价 ORP_m 作为连续流单污泥脱氮除磷系统运行控制参数的可行性, 分别在不同的 ORP_m 设定值条件下进行试验研究. 根据研究报告, 缺氧段 ORP 与该段 DO 和硝酸盐氮浓度密切相关, 而 DO 和硝酸盐均通过硝化液内循环由好氧段回流至主缺

氧段(硝化液内循环), 所以调节硝化液内循环流量可控制 ORP_m. 试验期间, ORP_m 采用自动控制系统调控. 该控制系统采用反馈控制结构, 以硝化液内循环流量作为被控变量, 以电动调节阀门为执行器, 控制过程如下: 安装于主缺氧段的 ORP 在线测定仪检测 ORP_m 值并将其传输至计算机的数据采集卡

后,转换成数字信号输入 PLC 内;在 PLC 内将该值与 ORP_m 设定值进行比例、积分、微分计算控制,然后给出输出值调节电动调节阀以改变硝化液内循环流量,进而控制 ORP_m 。根据自动控制系统 ORP_m 设定值的不同,试验共分为 6 个阶段,每阶段该值分别为 -143 、 -123 、 -105 、 -95 、 -72 和 -57 mV。试验每阶段运行 2~3 个污泥龄 (solid retention time, SRT),共进行 200 d。试验期间,除改变 ORP_m 设定值及硝化液内循环流量以外,其他运行参数保持不变。进水流量为 $10 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,水力停留时间 (hydraulic retention time, HRT) 为 9h;混合液内循环流量 (混合液由预缺氧段回流至厌氧段) 为 $10 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,污泥回流量为 $5 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$; MLSS、COD (chemical oxygen demand) 污泥负荷、总氮 (total nitrogen, TN) 污泥负荷以及总磷 (total phosphorus, TP) 污泥负荷分别维持为 $1.76 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (厌氧段)、 $0.253 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $0.049 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.006 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 。采用水力学方法控制污泥龄为 12 d。当气温较高时 (夏秋季节),试验在室温条件下进行,水温约为 $20 \sim 25^\circ\text{C}$;当气温较低时 (冬春季),则利用安装于污水箱内的温度自动调节装置将其升高至 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。

1.4 分析方法

试验期间每天检测各项水质指标。水样从连续流单污泥脱氮除磷系统的不同反应段收集,由离心机离心后取上清液测定。检测指标包括: TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TP、COD、五日生物化学需氧量 (biochemical oxygen demand, BOD_5)、MLSS 等。上述指标均采用国家规定的标准方法检测。采用 WTW-pH/OXi340 便携式在线测定仪检测厌氧段、预缺氧段、主缺氧段 DO 浓度。

为了评价氮磷物质去除性能,并揭示不同 ORP_m 设定值条件下氮、磷的物质转化规律,分别以厌氧段、预缺氧段、主缺氧段以及好氧段为系统边界,利用物料平衡原理,基于各段氮磷物质浓度的测定值计算各段物质转化量。系统稳定运行时各反应段内物质的积累量为 0,因此各段的物质反应量可按如下公式计算。

厌氧段:

$$\text{MA}_{\text{Re,ANS}} = Q \cdot \text{MA}_{\text{in}} + r \cdot Q \cdot \text{MA}_{\text{PAnS}} - (1+r) \cdot Q \cdot \text{MA}_{\text{ANS}} \quad (1)$$

预缺氧段:

$$\text{MA}_{\text{Re,PAnS}} = (1+r) \cdot Q \cdot \text{MA}_{\text{ANS}} + s \cdot Q \cdot \text{MA}_{\text{EFF}} - (1+r+s) \cdot Q \cdot \text{MA}_{\text{PAnS}} \quad (2)$$

主缺氧段:

$$\text{MA}_{\text{Re,MANs}} = (1+s) \cdot Q \cdot \text{MA}_{\text{PAnS}} + a \cdot Q \cdot \text{MA}_{\text{AS}} - (1+a+s) \cdot Q \cdot \text{MA}_{\text{MANs}} \quad (3)$$

好氧段:

$$\text{MA}_{\text{Re,AS}} = (1+a+s) \cdot Q \cdot (\text{MA}_{\text{MANs}} - \text{MA}_{\text{AS}}) \quad (4)$$

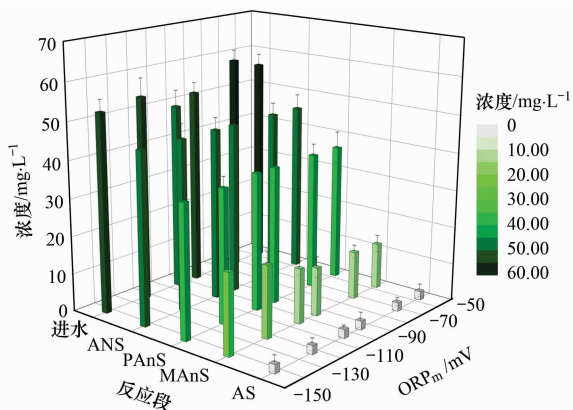
式中, $\text{MA}_{\text{Re,ANS}}$ 、 $\text{MA}_{\text{Re,PAnS}}$ 、 $\text{MA}_{\text{Re,MANs}}$ 、 $\text{MA}_{\text{Re,AS}}$ 分别表示厌氧段、预缺氧段、主缺氧段以及好氧段物质转化量, $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$; Q 表示反应系统进水流量, $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$; r 表示从预缺氧段向厌氧段回流的混合液循环比; s 表示污泥回流比; a 表示从好氧段向主缺氧段回流的硝化液循环比; MA_{in} 、 MA_{ANS} 、 MA_{PAnS} 、 MA_{MANs} 、 MA_{AS} 、 MA_{EFF} 分别表示进水、厌氧段、预缺氧段、主缺氧段、好氧段以及出水物质的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。因水样经离心机离心后测定,好氧段出水水质与沉淀池基本相同,所以将好氧段出水各水质指标浓度作为系统出水浓度,即 $\text{MA}_{\text{EFF}} = \text{MA}_{\text{AS}}$ 。

2 结果与分析

试验期间,连续流单污泥脱氮除磷系统对 COD 和 BOD_5 的去除率超过 90%,且保持稳定,与 ORP_m 设定值的变化无关,即调控 ORP_m 对有机污染物质的降解过程影响较小,因此不进行讨论。

2.1 ORP_m 设定值与连续流单污泥脱氮除磷系统的脱氮性能

试验期间,不同 ORP_m 设定值条件下,连续流单污泥脱氮除磷系统各段氨氮、TN、硝酸盐氮的变化规律见图 2~4。从图 2 中可以看出,在不同 ORP_m 设定值条件下,出水氨氮浓度稳定在 $2.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,即 ORP_m 对氨氮去除效果无影响。从图 3 和 4

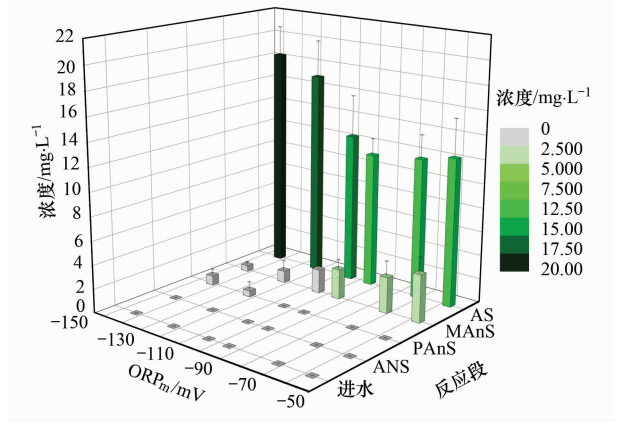


误差棒长度表示 ± 1.03 乘以标准方差 ($n=20, P=0.68$)

图 2 试验期间 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 变化规律

Fig. 2 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ profile of pilot study

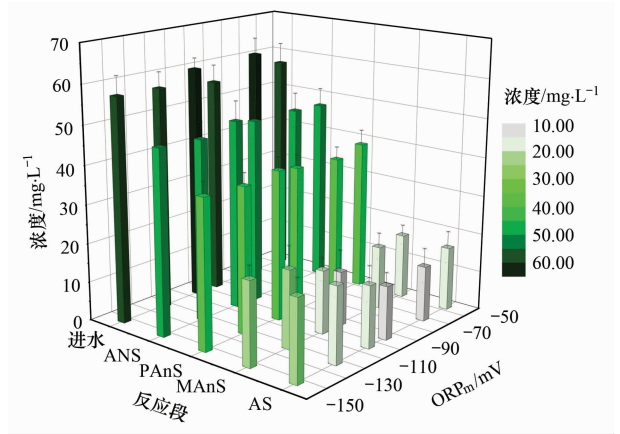
中可以看出,ORP_m 设定值对出水硝酸盐氮和总氮浓度产生了明显的影响. 当 ORP_m 设定值由 -143 mV 增加至 -57 mV 时,出水硝酸盐浓度分别为 18.44、17.07、12.51、11.17、11.77 和 12.39 mg·L⁻¹,出水 TN 浓度分别为 20.90、19.54、15.97、13.70、14.21 和 16.39 mg·L⁻¹,也就是说,对反硝化性能和脱氮性能来说,连续流单污泥脱氮除磷系统存在最佳的 ORP_m 设定值.



误差棒长度表示 ±1.03 乘以标准方差 (n = 20, P = 0.68)

图 3 试验期间 NO₃⁻-N 变化规律

Fig. 3 NO₃⁻-N profile of pilot study



误差棒长度表示 ±1.03 乘以标准方差 (n = 20, P = 0.68)

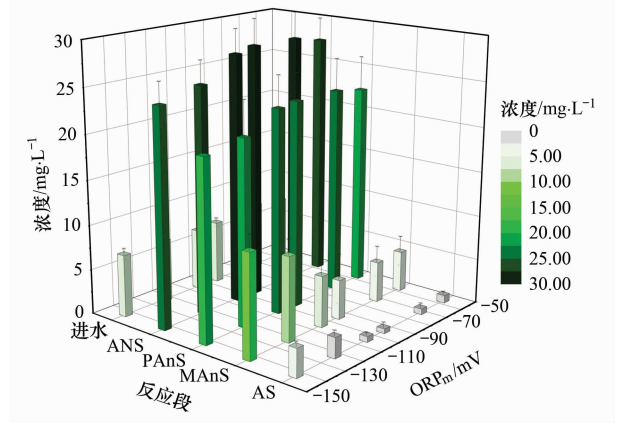
图 4 试验期间 TN 变化规律

Fig. 4 TN profile of pilot study

2.2 ORP_m 设定值与连续流单污泥脱氮除磷系统的除磷性能

图 5 给出了试验期间各段 TP 浓度的变化规律. 从中可以看出,厌氧段 TP 浓度最高,从预缺氧段开始下降,直至好氧段降至最低. 从中还可以看出,出水 TP 浓度随 ORP_m 设定值增加而改变. 当 ORP_m 设定值由 -143 mV 增加至 -57 mV 时,出水 TP 浓度分别为 3.14、2.30、0.64、0.50、0.65 以及 0.86

mg·L⁻¹,也就是说,对除磷性能来说,连续流单污泥脱氮除磷系统存在最佳的 ORP_m 设定值.



误差棒长度表示 ±1.03 乘以标准方差 (n = 20, P = 0.68)

图 5 试验期间 TP 变化规律

Fig. 5 TP profile of pilot study

3 讨论

3.1 ORP_m 设定值与硝化性能

从图 2 中还可看出,氨氮浓度降低主要发生在主缺氧段和好氧段. 由于硝化液内循环对氨氮产生了明显的稀释、混合作用,导致主缺氧段氨氮浓度大幅降低. 而氨氮的转化则在好氧段内通过自养菌的硝化反应完成. 出水较低的氨氮浓度说明在好氧段发生了明显的硝化反应,这说明,在本试验条件下,连续流单污泥脱氮除磷系统具备了硝化细菌生长繁殖的生态条件:①进水中的 COD 一部分被聚磷菌的释磷反应利用,另一部分被预缺氧段和主缺氧段的反硝化反应利用,所以进入好氧段的 COD 浓度较低. ②好氧段 pH 值由自动控制系统调控为 7.0 ± 0.5,硝化反应所需碱度充足. 好氧段 pH 值自动控制系统与 ORP_m 自动控制系统相同,也采用反馈控制结构, pH 设定值为 7.0,被控变量为 NaHCO₃ 投加量. ③好氧段 DO 浓度由自动控制系统控制为 (2.0 ± 0.5) mg·L⁻¹,硝化反应所需电子受体充足. 好氧段 DO 自动控制系统与 ORP_m、pH 值自动控制系统相同,采用反馈控制结构, DO 设定值为 2.0 mg·L⁻¹,被控变量为空气压缩机的供气量. 试验结果表明,ORP_m 设定值对好氧段的硝化性能基本无影响.

3.2 ORP_m 设定值与反硝化性能

为揭示系统中氮的物质转化规律,对出水各形态氮的百分含量进行了计算,并以厌氧段、预缺氧段、主缺氧段以及好氧段为系统边界,利用公式(1)

~(4),对 TN 进行物料平衡计算,结果分别见图 6 和图 7. 从图 6 中可以看出,出水中的氮主要以硝酸盐氮为主,TN 浓度变化由硝酸盐氮引起. 从图 7 中可以看出,试验期间,TN 在主缺氧段的去除量最大,且不同 ORP_m 设定值条件下,该段 TN 去除量差别明显,当 ORP_m 设定值为 -95 mV 时,达到最大值.

根据生物脱氮基本原理,污水中氮的去除由 3 个反应过程共同完成:氨化作用、硝化作用、反硝化作用,其中氨化作用和硝化作用改变了氮的存在形态,而反硝化作用则将氮从污水中去除,也就是说,氮的去除主要在主缺氧段实现,因此主缺氧段硝酸盐氮的转化量将决定 TN 的去除量. 为进一步阐明 TN 去除量与硝酸盐氮转化的关系,分别以厌氧段、预缺氧段、主缺氧段以及好氧段为系统边界,利用公式(1)~(4),对硝酸盐氮的转化量进行了计算,结果见表 2. 从中可以看出,主缺氧段硝酸盐氮的转化量随着 ORP_m 设定值的升高而变化. 当 ORP_m 设定值由 -143 mV 增加至 -57 mV 时,该反应量分别为 214.40、235.16、241.16、244.02、240.90 以及 233.65 mg·h⁻¹,即当 ORP_m 设定值较低时,硝酸盐氮转化量随着该值的升高而升高,当 ORP_m 设定值增加至一定值时(-95 mV)时,硝酸盐氮反应量达到峰值,其后,即使 ORP_m 设定值再升高,硝酸盐氮转化量也保持稳定,甚至稍有降低,这与 TN 的变化规律相似. 试验结果说明,对连续流单污泥脱氮除磷系统的反硝化性能来说,主缺

氧段存在最佳的 ORP_m 设定值.

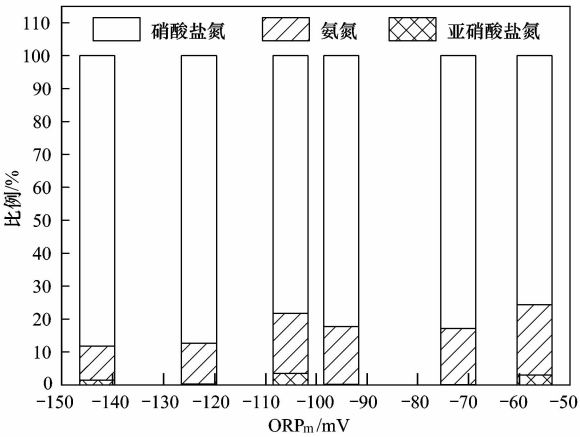


图 6 出水中各种形态氮所占比例
Fig. 6 Proportion of nitrogen remaining in the effluent

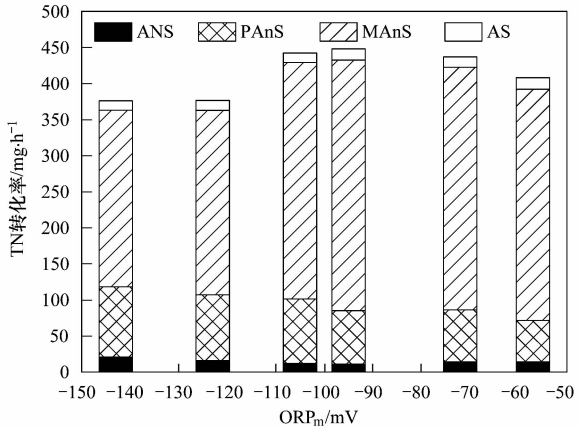


图 7 各反应段 TN 转化量
Fig. 7 Relation rate of TN in each stage

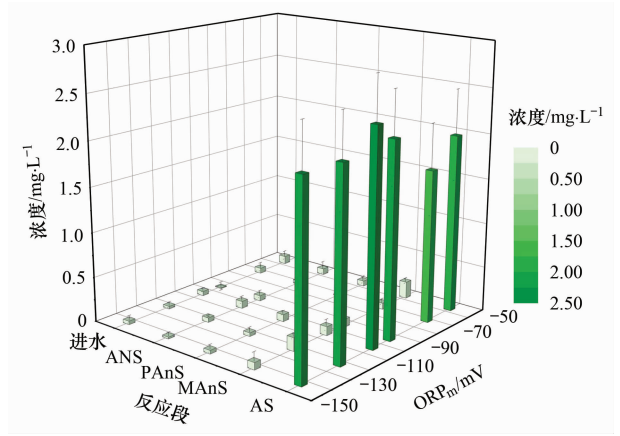
表 2 各反应段硝酸盐氮和总磷的反应量 ¹⁾ /mg·h ⁻¹								
Table 2 Relation rate of nitrate and TP in each stage/mg·h ⁻¹								
ORP/mV	厌氧段		预缺氧段		主缺氧段		好氧段	
	TP	硝酸盐氮	TP	硝酸盐氮	TP	硝酸盐氮	TP	硝酸盐氮
-143	-214.12	-8.00	+0.17	-72.20	+30.27	-214.40	+221.88	+479.00
-123	-228.64	-5.00	-0.11	-72.85	+62.14	-235.16	+213.71	+483.71
-105	-259.26	0.00	-10.89	-62.55	+124.58	-241.16	+207.67	+428.81
-95	-264.54	0.00	-8.46	-56.35	+154.41	-244.02	+183.69	+413.07
-72	-256.92	0.00	-9.43	-58.85	+150.41	-240.90	+185.74	+417.45
-57	-252.84	0.00	-8.46	-61.95	+138.30	-233.65	+186.00	+419.50

1) TP 反应量中,“-”表示释磷量,“+”表示吸磷量;硝酸盐氮反应量中,“-”表示消耗量,“+”表示生成量

ORP 是表征污水处理系统环境条件的参数. 从微观角度来说,活性污泥微生物群落结构、优势菌群的动态变化与其生存环境的 ORP 密切相关,即活性污泥中特定的优势微生物有其适宜 ORP 范围^[27]. 另有研究表明,调控 ORP 值可使微生物新陈代谢过程中的 NADH/NAD⁺ 和 NADPH/NADP⁺ 的含量发生改变,并激活某些关键酶,进而改变物质的

代谢网络,促使微生物沿着目标代谢途径完成同化反应和异化反应^[27]. 结合试验结果,当 ORP_m 设定值为 -95 mV 时,主缺氧段硝酸盐氮和 TN 转化量均达到峰值,说明该 ORP_m 设定值在反硝化细菌适宜 ORP 范围内,在此氧化还原条件下,硝酸盐还原酶活性可得到最大程度地激活. 该值与 Peng 等的研究成果基本一致^[19].

从宏观角度来说,主缺氧段 ORP_m 设定值与该段 DO 浓度、硝酸盐浓度密切相关^[19]. 试验期间主缺氧段 DO 浓度检测结果见图 8. 从中可以看出,主缺氧段 DO 浓度在 $0.08 \sim 0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,变化较小. 因此, ORP_m 设定值在一定程度上反映了硝酸盐氮的水平,即硝酸盐氮浓度越高,则 ORP_m 也越高,这从图 3 中也可以看出. 王晓玲等^[17]和 Musvoto 等^[18]的研究表明,连续流单污泥脱氮除磷系统主缺氧段的反硝化作用受硝酸盐氮浓度的影响. 为最大程度地利用主缺氧段的反硝化潜力,需保证该段含有充足的硝酸盐氮,但硝酸盐氮浓度不宜过低或为零也不宜过高,即存在最佳的硝酸盐氮浓度值,相应地 ORP_m 也将存在最佳值. 若该段硝酸盐氮浓度控制在大于零的较低值范围内变化,即 ORP_m 设定值在 $-140 \sim -95 \text{ mV}$ 之间时,随着 ORP_m 设定值的升高,主缺氧段反硝化过程越来越充分,脱氮性能逐渐增强;但当硝酸盐氮浓度较高,即 ORP_m 设定值大于 -95 mV 时,为达到该值所需的硝化液内循环流量增大,则使:①进入主缺氧段的 DO 量升高消耗更多的碳源(即使缺氧段 DO 浓度未发生变化);②混合液在主缺氧段的实际水力停留时间缩短. 这终将导致反硝化作用不能充分实现.



误差棒长度表示 ± 1.03 乘以标准方差 ($n = 20, P = 0.68$)

图 8 试验期间 DO 浓度变化规律
Fig. 8 TP profile of pilot study

综上分析可知,在连续流单污泥脱氮除磷系统中,必将存在适宜的 ORP_m 使系统具有最佳的脱氮性能. 在本试验条件下,该设定值为 -95 mV .

3.3 ORP_m 设定值与释磷过程

有研究结果表明,厌氧释磷反应是生物除磷的关键过程,除磷效果由其决定. 根据研究报道,硝酸盐氮若进入厌氧段,反硝化菌和聚磷菌则将竞争污水中的有机碳源,且聚磷菌在竞争中处于劣势^[35],

这将直接导致被聚磷菌吸收、贮存的有机碳源减少,使系统的除磷容量大大降低. 为了分析和评价不同 ORP_m 设定值条件下连续流单污泥脱氮除磷系统的除磷性能,基于物料平衡原理,分别以厌氧段、预缺氧段、主缺氧段、以及好氧段为系统边界,利用公式(1)~(4),对 TP 的转化量进行了计算,结果见表 2. 活性污泥中的磷以两种状态存在:一种为细胞物质组成成分,另一种为聚磷菌体内贮存的聚磷. 根据活性污泥微生物细胞物质经验分子式,在细胞物质中,磷(不包括聚磷)的含量约为 $1.5\% \sim 2.0\%$ ^[36],因此在物料平衡分析过程中忽略用于合成细胞物质的磷量.

从表 2 中可以看出,当 ORP_m 设定值分别为 -143 mV 和 -123 mV 时,因系统出水硝酸盐氮浓度较高,所以随污泥回流至预缺氧段的硝酸盐氮较多,以致超过了该段的反硝化潜力,使得该段出水中含有硝酸盐氮,并随混合液回流至厌氧段,最终对该段的释磷量(该量分别为 $214.12 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $228.64 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$)产生明显影响. 当 ORP_m 设定值分别为 -105 、 -95 、 -72 和 -57 mV 时,出水硝酸盐氮浓度较低,进入预缺氧段的硝酸盐氮量低于该段的反硝化潜力,所以该段出水硝酸盐氮浓度为 0,对厌氧段的释磷过程不产生影响,释磷量有所提高,分别为 -259.26 、 -264.54 、 -256.92 和 $-252.84 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$. 试验和物料平衡计算结果说明, ORP_m 设定值对厌氧释磷过程也产生了一定的影响,但该影响是间接产生的.

3.4 ORP_m 设定值与缺氧吸磷性能

从表 2 中还可以看出,总吸磷量的变化规律与释磷量相同. 当 ORP_m 设定值由 -143 mV 增加至 -57 mV 时,总吸磷量分别为 252.15 、 275.85 、 332.25 、 338.10 、 336.15 以及 $324.30 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$. 试验结果和物料平衡分析表明,当 ORP_m 设定值为 -95 mV 时,连续流单污泥脱氮除磷系统可获得最佳的除磷性能.

不同 ORP_m 设定值条件下好氧吸磷量、缺氧吸磷量的物料平衡计算结果也在表 2 中表示. 从中可以看出,缺氧吸磷量随着 ORP_m 设定值的变化而改变. 当 ORP_m 设定值由 -143 mV 增加至 -57 mV 时,缺氧吸磷量分别为 30.27 、 62.14 、 124.58 、 154.41 、 150.41 以及 $138.30 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$. 分析试验结果可知,连续流单污泥脱氮除磷系统中,大部分 COD 在厌氧段被聚磷菌转化成聚 β 羟基丁酸贮存^[37],再加上预缺氧段活性污泥中的反硝化菌也利

用 COD 进行硝酸盐呼吸,所以进入主缺氧段的 COD 量较低,因此该段反硝化过程的主要供氢体是聚 β 羟基丁酸,即反硝化聚磷菌的反硝化作用占有优势,在还原硝酸盐氮的同时,大量的磷也被吸收. 从表 2 中可以看出,当 ORP_m 设定值为 -95 mV 时,硝酸盐反应量达到最高值 $244.02\text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$,该段的吸磷量也达到最大值 $154.41\text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$,系统的反硝化吸磷性能达到最佳.

综上,在 ORP_m 设定值为 -95 mV 的缺氧环境下,反硝化菌以聚 β 羟基丁酸为碳源进行硝酸盐呼吸的活性最高.

4 结 论

(1) ORP_m 对氨氮去除没有影响,而对出水硝酸盐和 TN 浓度的影响较大,在 ORP_m 设定值为 -95 mV 时,氨氮、TN、TP 的去除效果均最佳.

(2) 主缺氧段 ORP_m 设定值对该段 TN 去除量和硝酸盐反应量影响较大,在 ORP_m 设定值为 -95 mV 时,两者均达到最大值.

(3) 在 ORP_m 设定值控制为 -95 mV 的缺氧环境状态下,反硝化菌具有最佳的吸磷性能,该菌以聚 β 羟基丁酸为碳源进行新陈代谢反应.

(4) ORP_m 设定值可作为连续流单污泥脱氮除磷系统的控制参数,并可以其为控制变量建立缺氧段反应过程控制系统.

致谢:感谢松辽流域水环境教育部重点实验室(吉林建筑大学)对本研究的支持. 王建辉、陆海、李广、李娜、董利鹏、谢添、张芳等在试验和样品检测方面提供了帮助,在此一并致谢!

参考文献:

[1] Guerrero J, Guisasaola A, Baeza J A. The nature of the carbon source rules the competition between PAO and denitrifiers in systems for simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal[J]. *Water Research*, 2011, **45**(16): 4793-4802.

[2] 郭劲松, 黄天寅, 龙腾锐. 生物脱氮除磷工艺中的微生物及其相互关系[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2000, **1**(1): 8-16.

[3] 刘瑾, 高廷耀. 生物除磷机理的研究[J]. *同济大学学报*, 1995, **23**(4): 387-392.

[4] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Brandse F A, *et al.* Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT-type wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 1997, **31**(96): 777-786.

[5] 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.

[6] Yuan Q Y, Oieszkiewicz J. Selection and enrichment of denitrifying phosphorus accumulating organisms in activated sludge [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2010, **22**(1-3): 4311-4329.

[7] Kapagiannidis A G, Zafiriadis I, Aivasidis A. Comparsion between aerobic and anoxic metabolism of denitrifying-EBPR sludge: effect of biomass poly-hydroxyalkanoates content [J]. *New Biotechnology*, 2013, **30**(2): 227-237.

[8] 刘立, 汤兵, 黄绍松, 等. 反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2869-2875.

[9] 曾薇, 王向东, 张立东, 等. MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3513-3521.

[10] Vaipoulou E, Aivasidis A. A modified UCT method for biological nutrient removal: configuration and performance [J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(7): 1062-1068.

[11] Duan J M, Li W, Zhao K, *et al.* Variation of organics, nitrogen and phosphorus within a cycle of a Bio-Denipho system [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2012, **40**(1-3): 24-32.

[12] 赵捷. 污水处理厂自动控制系统设计 [J]. *测控技术*, 2005, **24**(12): 12-14.

[13] 何世钧, 王化祥, 杨立功, 等. 城市污水处理系统溶解氧的控制 [J]. *化工自动化及仪表*, 2003, **30**(1): 36-38.

[14] 谢添, 董利鹏, 张芳, 等. 东北地区中小型污水厂改良 A^2/O 工艺的节能降耗 [J]. *工业水处理*, 2014, **34**(6): 84-86.

[15] 董利鹏, 王晓玲, 谢添, 等. 寒冷地区改良 A^2/O 工艺污水处理厂的自动控制 [J]. *中国给水排水*, 2014, **30**(12): 119-123

[16] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al.* Activated Sludge Model NO. 2D, ASM2D [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **39**(98): 165-182.

[17] 王晓玲, 尹军, 高尚. 利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为 MUCT 工艺运行控制参数 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(1) 175-180.

[18] Musvoto E V, Casey T G, Ekama G A, *et al.* The effect of a large anoxic mass fraction and concentrations of nitrate and nitrite in the primary anoxic zone on low F/M filament bulking in nutrient removal activated sludge systems [R]. Cape, South Arica: Department of Civil Engineering, University of Cape Town, 1992.

[19] Peng Y Z, Wang X L, Wu W M, *et al.* Optimisation of anaerobic/anoxic/oxic process to improve performance and reduce operating costs [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2006, **81**(8): 1391-1397.

[20] 马勇, 彭永臻. 城市污水处理系统运行及过程控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. 259-263.

[21] 王之晖. A/O 法污水处理系统过程控制与外碳源投加仿真 [D]. 北京: 北京工业大学. 2004. 119-122.

[22] Han Z Y, Wu W X, Zhu J, *et al.* Oxidization-reduction

- potential and pH for optimization of nitrogen removal in a twice-fed sequencing batch reactor treating pig slurry [J]. *Biosystems Engineering*, 2008, **99**(2): 273-281.
- [23] Ra C S, Lo K V, Shin J S, *et al.* Biological nutrient removal with an internal organic carbon source in piggery wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2000, **34**(3): 965-973.
- [24] Koch F A, Oldham W K. Oxidation-reduction potential-a tool for monitoring, control and optimization of biological nutrient removal systems [J]. *Water Science and Technology*, 1985, **17**: 259-281.
- [25] Harpentier J, Florentz M, David G. Oxidation-reduction potential (ORP) regulation: a way to optimize pollution removal and energy savings in the low load activated sludge process [J]. *Water Science and Technology*, 1987, **19**(3-4): 645-655.
- [26] Charpentier J, Godart H, Martin G, *et al.* Oxidation-reduction potential (ORP) regulation as a way to optimize aeration and C, N and P removal: experimental basis and various full-scale examples [J]. *Water Science and Technology*, 1989, **21**: 1209-1223.
- [27] 刘晨光. 氧化还原电位调控的高浓度乙醇发酵及其机理研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011. 10-13.
- [28] Zhu G B, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Effect of influent flow rate distribution on the performance of step-feed biological nitrogen removal process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2007, **131**(1): 319-328.
- [29] Wang X L, Pene Y Z, Ma Y, *et al.* Effects of operational variables on nitrogen removal performances and its control in a pre-denitrification plant [J]. *Chemical Engineering Technology*, 2007, **30**(2): 234-241.
- [30] Brigg J, Tillotson M, Parsons S A, *et al.* Comparison between disintegrated and fermented sewage sludge for production of a carbon source suitable for biological nutrient removal [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **175**(1-3): 733-739.
- [31] Yuan Q, Baranowski M, Oleszkiewicz J A. Effect of sludge type on the fermentation products [J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(4): 445-449.
- [32] Liu H B, Zhao F, Mao B Y, *et al.* Enhanced nitrogen removal in a wastewater treatment process characterized by carbon source manipulation with biological adsorption and sludge hydrolysis [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **114**: 62-68.
- [33] Huang M H, Li Y M, Gu G W. Chemical composition of organic matters in domestic wastewater [J]. *Desalination*, 2010, **262**(1-3): 36-42.
- [34] Chuang S H, Ouyang C F. The biomass fractions of heterotrophs and phosphate-accumulating organisms in a nitrogen and phosphorus removal system [J]. *Water Research*, 2000, **34**(99): 2283-2290.
- [35] Chuang S H, Ouyang C F, Wang Y B. Kinetic competition between phosphorus release and denitrification on sludge under anoxic condition [J]. *Water Research*, 1996, **30**(12): 2961-2968.
- [36] 张锡辉, 刘勇弟. 废水生物处理 [M]. 北京: 化学工业出版社. 2003. 585.
- [37] Østgaard K, Christensson M, Lie E, *et al.* Anoxic biological phosphorus removal in a full-scale UCT process [J]. *Water Research*, 1997, **31**(97): 2719-2726.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行