

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究	郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)
北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征	于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)
奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析	张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)
华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素	苏彬彬 (2519)
北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究	方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2526)
民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究	海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)
醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究	张凡, 王建海, 王小臣, 王建昕 (2539)
微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究	曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)
生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析	李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)
炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究	周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)
春季东、黄海溶解甲烷的分布和海气交换通量	曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)
千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究	董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)
新安江流域土地利用结构对水质的影响	曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)
长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析	孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)
河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性	杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)
水藻暴发的影响因素定量化研究初步	张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)
深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响	卢金锁, 胡亚潘 (2611)
结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度	周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)
Subwet 模型在人工湿地设计中的应用	李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)
白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应	何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响	许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勋, 周峰 (2642)
铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究	汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)
铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究	杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)
不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响	赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)
邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H ₂ O ₂ 降解机制研究	刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)
二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd ²⁺ 离子的吸附研究	张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)
酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附	蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)
基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni ²⁺ 的吸附性能	张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)
树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐	王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)
Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究	朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)
化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究	王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)
镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究	陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)
HRT 对 A ² O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响	刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)
发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟	张超, 陈银广 (2741)
强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究	熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)
污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响	周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)
不同粒径铁铝泥对砷(Ⅲ)的吸附效果	林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)
我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析	仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)
浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离	徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)
三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响	张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)
吉林前郭水田土壤有机碳垂直分布规律和储量研究	汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)
关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例	张晓伟, 许明祥 (2793)
三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究	黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)
土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C 连续标记法	史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809)
西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析	张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)
丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价	李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)
农药企业场地苯系物污染风险及调控对策	庞博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)
水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响	张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)
硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响	刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)
零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用	周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)
2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果	全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)
反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别	刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)
1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究	张倩, 王弘宇, 桑穗姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)
1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究	陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)
微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解	张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)
扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究	周际海, 孙向武, 胡锋, 李辉信 (2894)
固定化 <i>Lysinibacillus cresolovorans</i> 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解	李婷, 任源, 韦朝海 (2899)
生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析	黄翔峰, 张树聪, 彭开彰, 陆丽君, 刘佳 (2906)
A ² O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性	高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞薇, 白志辉 (2912)
生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究	李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)
专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)	

Subwet 模型在人工湿地设计中的应用

李慧峰¹, 黄津辉^{1*}, 林超²

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 水利部海河水利委员会水资源保护局, 天津 300170)

摘要: 针对人工湿地的设计问题, 介绍了水平潜流人工湿地的运行机制和设计准则, 提出了利用人工湿地数字模型 Subwet 辅助设计的方法. 利用 Subwet 模型对水平潜流人工湿地的设计进行了模拟, 根据模拟结果对影响人工湿地处理效率的因素进行了分析和探讨, 并据此对人工湿地的设计优化提出了指导意见. 该 Subwet 模型的应用实例表明人工湿地模型可以应用于设计中, 并可为人工湿地设计提供一定的理论指导.

关键词: 人工湿地; 湿地设计; 湿地模型; 湿地模拟; 设计优化

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2628-09

Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland

LI Hui-feng¹, HUANG Jin-hui¹, LIN Chao²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Water Resources Protection Bureau, Haihe River Water Conservancy Commission, The Ministry of Water Resources 300170, China)

Abstract: The mechanism of horizontal subsurface-flow constructed wetland (HSSF CW) and its design guidelines were introduced for the design of a constructed wetland. A numerical model Subwet was proposed to aid the design of constructed wetland. The design of a horizontal subsurface-flow wetland was simulated by utilizing Subwet model. The treatment efficiency for a year round operation was obtained from the modelling. The factors which have effects on treatment efficiencies were analyzed and investigated in this study. The recommendations on optimizing and improving the HSSF CW design were provided. This case study of Subwet model demonstrated the applicability of this model in the design of constructed wetland. It can provide theoretical basis for the design of constructed wetland.

Key words: constructed wetlands; wetland design; wetland model; wetland modelling; design optimization

人工湿地是根据自然生态系统中物理、化学和生物三重协同作用, 以及污水特点和自然环境特点, 由人工设计建造并且监督控制, 以达到污水净化功能的生态工程处理技术^[1,2]. 作为生态环境修复的一个重要手段, 近年来, 人工湿地在中国和世界范围内都有了长足的发展, 人工湿地的设计也日益成为一个研究的热点领域^[3,4]. 人工湿地在创造新的生态环境的同时, 亦受到多重环境因素包括季节更替、水力负荷条件和湿地发育阶段等因素的制约^[5,6]. 长期以来, 传统的人工湿地设计主要靠经验和手工计算^[7], 因而很难将这些制约条件和生化反应与植物生长间相互作用机制的复杂性反映到设计中, 因此也限制了在设计中对流程的优化. 随着计算机技术和数字模拟技术的发展, 通过模型模拟人工湿地的运行已经成为一个重要的研究领域和趋势^[8], 并产生了一些可以深入反映人工湿地水力学和生化动力机制的模型. 污染物反应动力学和水动力学是人工湿地数学模型研究中不断发展完善的主线. 由联合国环境规划署与加拿大弗莱明大学非常规污水处理中心联合开发的模拟水平潜流湿地的 Subwet 模

型就是多成分反应迁移模型中具有代表性的模型.

本研究探讨了以水平潜流为代表的人工湿地设计原理以及 Subwet 模型的数字模拟机制; 并利用 Subwet 模型对中国北方某地处理污水厂尾水人工湿地的设计方案进行模拟. 本研究分析了运用模型模拟技术辅助和指导人工湿地设计的方法, 以及该方法的可行性和优越性.

1 水平潜流湿地设计

人工湿地设计主要涉及反应动力学和水力学问题, 反应动力学即污染物的去除效率与水力停留时间的关系, 水力学关系即污水在多孔介质中运行规律^[8]. 水平潜流湿地设计中, 影响反应动力学和水力学因素主要包括人工湿地的水力水文条件、人工湿地的形状、生物成分、温度及溶解氧等.

收稿日期: 2012-10-10; 修订日期: 2012-11-13

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-09-0586); 国家国际科技合作项目 (S2013BGR0244) 水利部公益性行业科研专项项目 (201101018, 201201114)

作者简介: 李慧峰 (1987 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水利工程及水处理, E-mail: lhf3317@163.com

* 通讯联系人, E-mail: huangj@tju.edu.cn

水平潜流湿地物质组成包括基质、植物、微生物^[9]。基质的选择主要考虑其对污水中污染物的吸附和过滤作用,并为微生物生长提供附着环境。人工湿地基质一般选取空隙发达、比表面积大的填料如砾石、多孔陶粒等^[10]。植物的作用主要为根部区域供氧同时根系也为微生物提供了附着环境,在根区形成聚集菌群,既增加了对污染物的降解作用,又通过根系对周围污染物的吸收转化,也促进了植物自身的生长^[11]。人工湿地的许多功能是由微生物代谢作用调节的。人工湿地为好氧、兼性厌氧及厌氧微生物的生存提供了有利生境,微生物的作用主要是转化有机或无机物质及参与湿地的养分循环^[12]。

2 Subwet 模型的概述

Subwet 模型是在对水平潜流湿地进行一系列研究的基础上,对水平潜流湿地的水力学和生化反应机制有了充分认识的基础上开发的。Subwet 可以模拟不同温度、不同尺度及多梯度污染物负荷下人工湿地中氮(包括铵态氮、硝态氮及有机氮)、磷以及 BOD₅ 的循环降解。鉴于人工湿地对水质的净化作用一部分来源于植物的贡献,Subwet 在模拟中也充分考虑了植物的影响作用,使其模拟结果更加精确合理。

大多数模型考虑的为综合因素参数,而且这些参数大多由经验而来,因此有其局限性;还有些湿地模型过多的考虑水力参数而非水质参数,水质的模拟能力比较弱^[13]。Subwet 模型充分考虑了基质、微生物以及植物的综合作用,同时全面的考虑了水质及水力学参数,使模型具有更强的物理及生化意义,因此弱化了对经验值的依赖,使其有很强的可推广性。该模型分别在处于热带的非洲坦桑尼亚及处于寒带的北美洲加拿大这样两种不同的气候环境和运行模式下进行实地校核,校核效果计较理想,说明该模型具有较广的实用性。Subwet 模型可以验证不同工况下湿地设计的合理性,因此本研究提出了利用 Subwet 辅助湿地设计,对设计进行验证和优化的方法,并应用于设计实例中。Subwet 模型目前国内湿地模拟和设计中还鲜见使用,因此本研究对 Subwet 模型进行一个较为详细的描述,对某地处理污水厂尾水人工湿地设计方案进行模拟,为 Subwet 模型的研究和使用提供一个可借鉴的案例。

2.1 Subwet 设计原理

Subwet 模型综合考虑了水流水力学原理和水

质生化反应动力学原理,采用单元法,将整个潜流湿地分成 5 个串联的(A~E)单元,水动力和所有生化反应都在这 5 个模块单元内完成。每个模块单元的反应机制相同,均包含 6 个反应过程:①氨化反应;②硝化反应;③反硝化反应;④氧化反应;植物对磷的吸收作用;⑥基质对磷的吸附作用。针对不同的反应过程,Subwet 模型有其特定的一组参数和方程来定义这些反应过程。表 1 是对上述生化反应过程的一个总结。

2.2 模型水质降解参数

Subwet 模型根据在加拿大及坦桑利亚大量的实验数据及文献[14],总结出了模型水质降解参数的参考范围(如表 2)。

3 实例

3.1 研究区域概况

本研究区域位于天津市空港经济区,它是一个集工业制造、大规模商业及居住为一体的复合型新城区。区域内现有污水处理厂一座,日排污量为 3 万 t·d⁻¹,尾水直接排入排污河。一方面造成河道污染,另一方面导致淡水资源的浪费。因此,有关部门拟规划利用绿地 33 万 hm²,建设人工湿地以净化污水厂尾水,使之达到景观水要求的水平,进而对其实现回用。这种措施一方面可补充景观河道用水,解决景观河道在春夏两季水源不足的问题;另一方面通过人工湿地的进一步净化,减少污水外排,为区域的节能减排作出一定的贡献。本项目采用水平潜流人工湿地的形式进行设计。

3.2 水平潜流湿地设计

利用规划用地,湿地系统采用单元模块设计,根据上文提到的人工湿地设计原则及相关研究^[15,16],单元模块初步拟定为 30 m × 20 m,有效水深为 1.0 m,基质粒径选取 20 ~ 30 mm 之间,根据实验得出基质孔隙率为 0.3 左右,湿地坡度选择 1%。湿地植物优选处理效果较好的芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha orientalis*)。以 Subwet 模型为平台,指导确定人工湿地的运行参数:水力停留时间(HRT)、水力负荷及确定运行机制。

3.3 模型建立

利用 Subwet 模型进行模拟,首先要在模型中输入初步拟定的人工湿地几何尺寸和模型中代表各个生化反应过程的参数,构建模型的基本雏形。在此基础上,根据研究的要求,确定湿地来水的各个污染物的浓度指标以及各模块的溶氧浓度。

表 1 水质降解反应方程式

Table 1 Water chemistry reaction equations

降解反应原理	降解反应原理
氨化反应 $c_{EO} = c_{iO} \times AC \times TA^{(TEMP-20)}$ 式中, c_{iO} 为进水有机氮浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); c_{EO} 为出水有机氮浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); AC 为有机氮的最大分解速率 ($L \cdot d^{-1}$); TA 为氨化温度影响系数	硝化反应 $c_{EA} = c_{iA} \times NC \times INOX \times TN^{(TEMP-20)} \times [(AMM + MA)^{-1}]$ 式中, NC 为硝化速率 ($L \cdot d^{-1}$); TN 为硝化温度系数; c_{iA} 为进水氨氮浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); c_{EA} 为出水氨氮浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); INOX 为氧气浓度对硝化反应的影响系数; MA 为硝化反应常数 ($mg \cdot L^{-1}$); INOX 为氧气浓度对硝化反应速率的影响系数 $INOX = AOX \times [(AOX + KO)^{-1}]$; AOX 为平均氧浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); KO 为氧气浓度对硝化反应速率的影响系数 ($mg \cdot L^{-1}$)
反硝化反应 $c_{EN} = c_{iN} \times DC \times TD^{(TEMP-20)} \times [(c_{iN} + MN)^{-1}]$ 式中, c_{iN} 为进水硝氮浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); c_{EN} 为出水硝氮浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); DC 为反硝化反应速率 ($L \cdot d^{-1}$); TD 为反硝化反应温度影响系数; MN 为反硝化反应常数 ($mg \cdot L^{-1}$); TEMP 为反应温度	氧化反应 $c_{EB} = c_{iB} \times OC \times INOO \times TO^{(TEMP-20)}$ 式中, c_{iB} 为进水 BOD_5 浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); c_{EB} 为出水 BOD_5 浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); OC 为有机物氧化效率 ($L \cdot d^{-1}$); INOO 为氧气浓度对有机物氧化速率的影响系数, $INOO = AOX \times [(AOX + OO)^{-1}]$; AOX 为平均氧浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); OO 为氧气浓度对有机物氧化速率的影响系数 ($mg \cdot L^{-1}$); TO 为有机物氧化反应温度影响系数
植物对氨氮吸收作用 $c_{EA} = c_{iA} \times PA$ 式中, c_{iA} 为进水氨氮浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); c_{EA} 为出水氨氮浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); PA 为植物吸收氨氮速率系数 ($L \cdot d^{-1}$)	植物对硝氮吸收作用 $c_{EN} = c_{iN} \times PN$ 式中, c_{iN} 为进水硝氮浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); c_{EN} 为出水硝氮浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); PN 为植物吸收硝氮速率系数 ($L \cdot d^{-1}$)
植物对磷吸收作用 $c_{EP} = c_{iP} \times PP \times (1-POP)$ 式中, c_{iP} 为进水磷浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); c_{EP} 为出水磷浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); PP 为植物对磷吸收速率系数 ($L \cdot d^{-1}$); POP 为磷以悬浮物存在的比例	基质对磷的吸附作用 $c_{EP} = c_{iP} \times (1-POP) \times (POR)-AF \times (1-POR)$ 式中, c_{iP} 为进水磷浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); c_{EP} 为出水磷浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); POR 为孔隙率; AF 为磷逆吸附系数; POP 为磷以悬浮物存在的比例

表 2 模型参数参考值范围及默认值¹⁾

Table 2 Ranges and default values of modelling parameters in Subwet

参数	AOX	AC	NC	OC	DC	TA	TN	TO	TD
取值范围	0.4	0.05 ~ 0.8	0.1 ~ 1.5	0.05 ~ 0.8	0.25 ~ 5	1.02 ~ 1.06	1.02 ~ 1.07	1.02 ~ 1.06	1.05 ~ 1.12
默认值	0.4	0.5	0.8	0.5	2.2	1.04	1.047	1.04	1.09
参数	KO	OO	MA	MN	PA	PN	PP	AF	
取值范围	0.1 ~ 2	0.1 ~ 2	0.05 ~ 2	0.01 ~ 1	0.00 ~ 1	0.00 ~ 1	0.00 ~ 1	0 ~ 100	
默认值	1.3	1.3	1	0.1	0.01	0.01	0.003	1.0	

1) AOX 为平均氧浓度 ($mg \cdot L^{-1}$), AC 为有机氮的最大分解速率 ($L \cdot d^{-1}$), NC 为硝化速率 ($L \cdot d^{-1}$), OC 为有机物氧化效率 ($L \cdot d^{-1}$), DC 为反硝化反应速率 ($L \cdot d^{-1}$), TA 为氨化温度影响系数, TN 为硝化温度系数, TO 为有机物氧化反应温度影响系数, TD 为反硝化反应温度影响系数, KO 为氧气浓度对硝化反应速率的影响系数 ($mg \cdot L^{-1}$), OO 为氧气浓度对有机物氧化速率的影响系数 ($mg \cdot L^{-1}$), MA 为硝化反应常数 ($mg \cdot L^{-1}$), MN 为反硝化反应常数 ($mg \cdot L^{-1}$), PA 为植物吸收氨氮速率系数 ($L \cdot d^{-1}$), PN 为植物吸收硝氮速率系数 ($L \cdot d^{-1}$), PP 为植物对磷吸收速率系数 ($L \cdot d^{-1}$), AF 为磷逆吸附系数

在设计模拟中, 对该模型可以通过调节进水流
量及温度, 考察人工湿地在不同温度环境以及不同
水力负荷条件下对污染物的处理情况, 得到人工湿

地不同季节的最优运行工况. 根据人工湿地的设
计尺寸和填料的选择, 该人工湿地单元模块在不同
HRT 下相应的进水量见表 3.

表 3 不同停留时间下的进水量

Table 3 Hydraulic loading and HRT

HRT/d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
流量/ $m^3 \cdot d^{-1}$	180	90	60	45	36	30	26	23	20	18	16	15	14	13	12

3.3.1 模型模拟温度

根据统计资料, 研究区域多年月平均气温在 -3
 $\sim -28^{\circ}C$ 之间波动. 四季平均温度为春季 $14^{\circ}C$ 、夏

季 $28^{\circ}C$ 、秋季 $14^{\circ}C$ 、冬季 $-3^{\circ}C$. 多年月、四季平均
气温见图 1. 鉴于四季温差较大, 模型考察温度梯度
拟定为 -5 、 0 、 5 、 10 、 15 、 20 、 25 、 $30^{\circ}C$. 同时用

15℃代表春季和秋季的工况,用 30℃代表夏季的工况,用-5℃代表冬季的工况。

3.3.2 入水及出水污染物浓度

目前研究区域污水厂污染物排放水质标准符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB 18918-2002 中一级标准(B类),研究区域污水厂尾水人工湿处理后出水至少要达到《地表水环境质量标准》GB 3838-2002 V类标准及需要达到的处理效率要求,所示部分参数指标见表 4。

3.3.3 模型水质降解参数

溶氧浓度对水平潜流湿地中有机物及氨氮的去除效率影响比较大^[17,18]。黄娟等^[19]在湿地溶氧分布及脱氮效果对比研究中表明水平潜流人工湿地中溶氧的范围在 0.05~0.52 mg·L⁻¹之间。水平潜流人工湿地通常用来营造厌氧环境,其溶氧浓度普遍较低。模型开发者在实验基础上得出水平潜流湿地的平均溶氧 DO 为 0.4 mg·L⁻¹。其他参数根据 2012 年 3~4 月在空港经济区进行的水平潜流人工湿地小试实验中对 BOD₅、TN、NH₄⁺-N 和 TP 的处理效率(见图 2)及在模型使用手册中的参数取值参考范围内进行调试校核,得出当地适应的模型水质降解参数取值见表 5。

3.4 结果及分析

3.4.1 BOD₅ 模拟结果分析

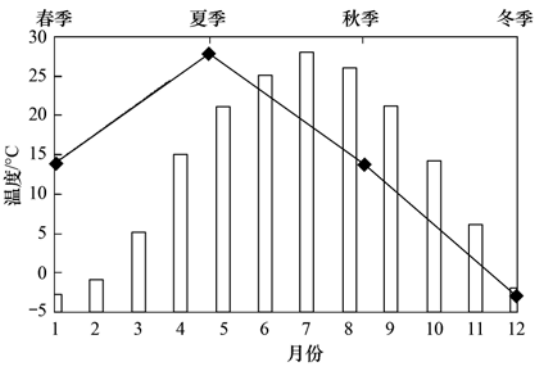


图1 天津市月平均气温及四季平均气温

Fig. 1 Monthly mean temperature and seasonal mean temperature in Tianjin

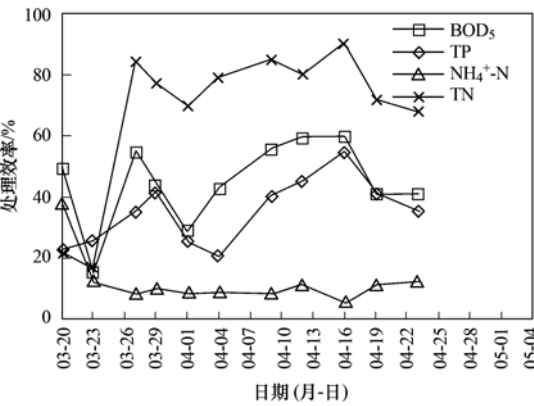


图2 水平潜流人工湿地小试实验的处理效率

Fig. 2 Treatment efficiency of HSSF CW bench scale experiment

表 4 人工湿地进水、出水浓度及处理效率要求

Table 4 Design requirements for influent and effluent concentration and treatment efficiency for the constructed wetland			
分类基本控制项目	一级标准(B类)/mg·L ⁻¹	地表水 V 类/mg·L ⁻¹	处理效率要求/%
生化需氧量 BOD ₅	20	10	50
氨氮	15	2.0	86.7
总氮	20	2.0	90
总磷	1.5	0.4	73.4

表 5 用于 Subwet 模型模拟的参数值¹⁾

Table 5 Referential parameters used in SubWet									
参数	DO /mg·L ⁻¹	AC /L·d ⁻¹	NC /L·d ⁻¹	OC /L·d ⁻¹	DC /L·d ⁻¹	TA	TN	TO	TD
取值	0.4	0.5	1.3	0.4	2.2	1.04	1.04	1.04	1.05
参数	KO /mg·L ⁻¹	OO /mg·L ⁻¹	MA /mg·L ⁻¹	MN /mg·L ⁻¹	PA /L·d ⁻¹	PN /L·d ⁻¹	PP /L·d ⁻¹	AF	
取值	0.8	1.3	2	1	0.01	0.01	0.003	0.3	

1) 参数代表值见表 2

本研究利用 Subwet 模型模拟了不同 HRT 在温度梯度-5~30℃下对 BOD₅ 处理效率。结果见图 3。

图 3 模拟结果表明,HRT 在 1~6 d 范围内,温

度梯度在-5~30℃下,水平潜流湿地对有机物污染物的去除率为 34%~74%。当温度从-5℃提升到 30℃时,BOD₅ 处理效率提高了约 25%。湿地的 HRT 从 1 d 增长 6 d,BOD₅ 处理效率可提高 20% 左

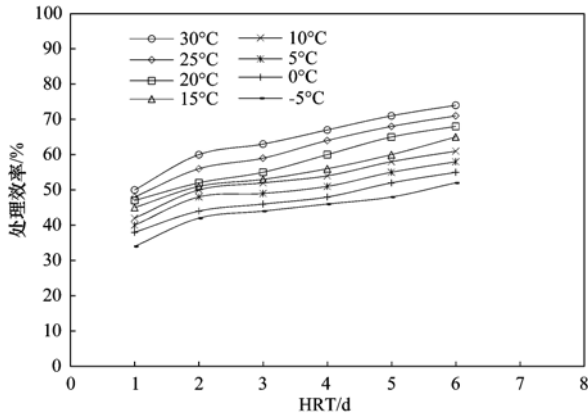


图3 停留时间、温度和 BOD₅ 的处理效率

Fig. 3 HRT temperature and BOD₅ treatment efficiency

右. 模拟结果表明在温度较低条件下,HRT 的延长对处理效率的提升有明显作用;例如在 5℃ 的条件下,HRT 由 1 d 延长到 2 d,BOD₅ 的处理效率提高了 8%. 在同样温度条件下,HRT 由 4 d 延长到 5 d 时,效率仅提高 2%. 这说明温度的提高或 HRT 的增大都有利于潜流湿地对 BOD₅ 的处理,但是 HRT 的延长,在初期 1,2 d 内比较有效,超过 3 d 后,对 BOD₅ 处理效果的增加并不明显.

根据表 4 拟定的对 BOD₅ 处理效果(50% 的处理效率)的要求,利用 Subwet 模型模拟人工湿地在四季的运行工况. 结果表明(见表 6):BOD₅ 的处理效率可以达到设计标准要求时,在春秋季节 HRT 为 3 d. 在夏季,由于温度升高,生化反应速度加快,HRT 为 1.5 d. 反之,在冬季运行时,HRT 需要延长至 5 d.

表 6 BOD₅ 的设计水力负荷

Table 6 Design hydraulic loading for BOD₅

设计参数	春季	夏季	秋季	冬季
HRT/d	3	1.5	3	5
入水流量/m ³ ·d ⁻¹	60	120	60	36
水力负荷/m ³ ·(m ² ·d) ⁻¹	0.1	0.2	0.1	0.05

3.4.2 氮素模拟结果分析

氮素的模拟包括了对 NH₄⁺-N 和 TN 的模拟. 由于处理机制不同,这里分别描述 NH₄⁺-N 和 TN 的模拟结果.

图 4 为 HRT 为 1~15 d,在温度梯度为 -5、0、5、10、15、20、25、30℃ 条件下对 NH₄⁺-N 的处理效率.

由图 4 可知,温度梯度在 -5~30℃、HRT 在 1~15 d 范围内,潜流湿地对 NH₄⁺-N 的处理效率为 10%~93%. 潜流湿地对 NH₄⁺-N 的处理效率随着温

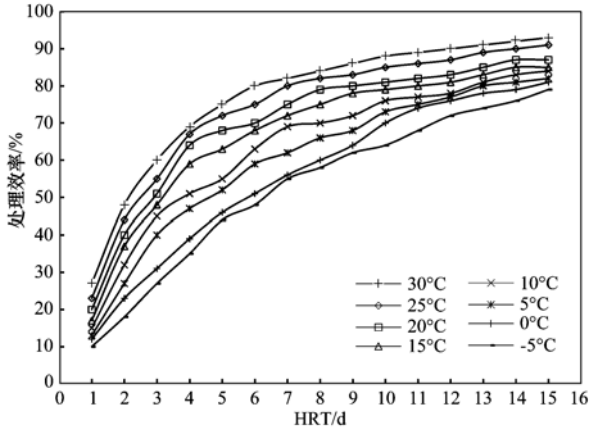


图4 不同 HRT 在相应温度下 NH₄⁺-N 的处理效率

Fig. 4 Ammonia treatment efficiency over HRT and corresponding temperature

度的升高而升高,在温度为 -5℃ 时,对于 HRT 为 1~15 d,其处理效率在 10%~79% 之间变动;随着 HRT 的增加,水力负荷降低,处理效率则相应得到提高. 对于 HRT 为 1 d,其处理效率为 10%,而当 HRT 为 15 d,其处理效率为 79%. 当温度从 -5℃ 升高到 30℃ 时,NH₄⁺-N 处理效率在不同 HRT 条件下,均可提高 10%~30%. 由于水平潜流湿地中硝化反应需要一定温度的保证,在温度较低条件下,水平潜流湿地对 NH₄⁺-N 处理效率较低. 但是水平潜流湿地的溶氧水平极低,硝化反应也是水平潜流湿地中的薄弱环节.

如果需要更高效率的硝化作用,则需要考虑通过调控系统对湿地进行流量控制. 也可以在较低的温度下,提高湿地的含氧量促进硝化反应. 肖海文等^[20]研究表明溶解氧分布与生物量分布以及有机物的去除规律呈现明显的相关性,提高湿地床填料内的溶解氧分布,可以促进硝化反应.

图 5 为在 5℃ 下,HRT 为 1~15 d 相应于不同溶氧浓度下湿地对 NH₄⁺-N 的处理效率. 由图 5 可知,在 5℃ 温度较低的环境下,如果潜流湿地溶氧浓度可以从 0.4 mg·L⁻¹ 提高到 10.0 mg·L⁻¹ 时,潜流湿地对 NH₄⁺-N 的处理效率可提高 15%~37%. 因此通过增加溶氧浓度提高硝化反应效率是解决冬季 NH₄⁺-N 处理效率低的一个有效手段. 在实施时,可以通过在水平潜流人工湿地前增加前处理曝气工序或者增加不饱和的垂直潜流湿地系统来实现^[21].

根据表 4 拟定的对 NH₄⁺-N 处理效果(86.7% 的处理效率)的要求,利用 Subwet 模型模拟人工湿地在四季的运行工况. 结果表明(见表 7 中 NH₄⁺-N 的设计水力负荷),通过增氧措施使湿地溶氧浓度大

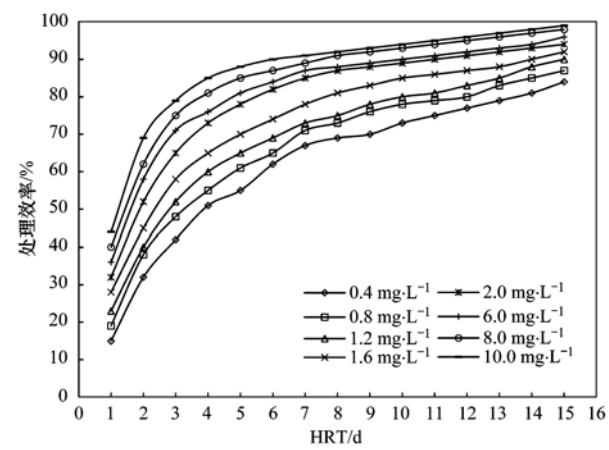


图5 不同 HRT 在相应溶氧下 NH_4^+ -N 的处理效率

Fig. 5 Ammonia treatment efficiency over HRT and corresponding dissolved oxygen

于 $8.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,在春秋季节,HRT 在 4 d 之内, NH_4^+ -N 的处理效率可以达到设计标准. 在夏季,由于温度升高,生化反应速度加快,处理效率达标需要的 HRT 可缩短为 3 d 之内. 反之,在冬季运行时,通过增氧措施使湿地溶氧浓度调整到不低于 $8.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其 HRT 延长至 9 d.

表 7 NH_4^+ -N 的设计水力负荷

Table 7 Design hydraulic loading for ammonia				
设计参数	春季	夏季	秋季	冬季
HRT/d	4	3	4	9
溶氧浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	8.0	8.0	8.0	8.0
入水流量/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	45	60	45	20
水力负荷/ $\text{m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	0.075	0.1	0.075	0.033

图 6 给出了 HRT 为 1 ~ 15 d,同时在温度梯度为 -5 、 0 、 5 、 10 、 15 、 20 、 25 、 30°C 条件下对 TN 的处理效率的总结.

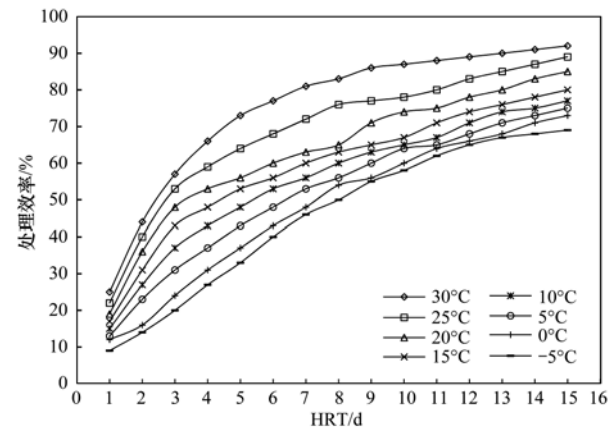


图6 不同 HRT 相应温度下 TN 的处理效率

Fig. 6 TN treatment efficiency over HRT and corresponding temperature

图 6 表明温度梯度在 $-5\sim 30^\circ\text{C}$ 、HRT 在 1 ~ 15 d 范围内,潜流湿地对 TN 的处理效率为 9% ~ 92%. 图 7 中的 TN 在潜流湿地中降解趋势和 NH_4^+ -N 的降解趋势相近. 表明虽然水平潜流湿地具有较好的反硝化作用,但是 NH_4^+ -N 处理效率的低下导致硝氮生成量有限,抑制了反硝化反应的进行,因此 NH_4^+ -N 的处理效率直接影响 TN 的处理效率. 同时碳源是反硝化过程所不可缺少的一种物质,生物反硝化过程需要提供足够数量的碳源,保证一定的碳氮比才能使反硝化反应顺利完成^[22,23],因此设计时需要考虑补充合适的碳源以达到高效的脱氮效果. 根据表 4 拟定的对 TN 处理效果(90% 的处理效率)的要求,利用 Subwet 模型模拟人工湿地在四季的运行工况(见表 8 中 TN 的设计水力负荷). 结果表明,在春秋季节,HRT 需要大于 15 d,TN 的处理效率才有可能达到设计标准. 即使在夏季,由于温度升高,生化反应速度加快,HRT 也需要 15 d,TN 的处理效率才可达到设计标准. 在冬季运行时,HRT 只有在 15 d 以上,TN 才可能达到设计标准.

表 8 TN 的设计水力负荷

Table 8 Design hydraulic loading for TN				
设计参数	春季	夏季	秋季	冬季
HRT/d	>15	15	>15	>15
入水流量/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	>12	12	>12	>12
水力负荷/ $\text{m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	>0.02	0.02	>0.02	>0.02

3.4.3 TP 模拟结果分析

由于人工湿地中总磷(TP)主要靠基质的过滤吸附等物理化学作用来达到去除的目的. 因此温度对 TP 去除的影响很小,影响其去除率的主要是 HRT 的条件^[24,25]. 图 7 给出了不同 HRT 所对应的 TP 的处理效率.

从图 7 中可以看出,HRT 在 1 ~ 15 d 范围时,水

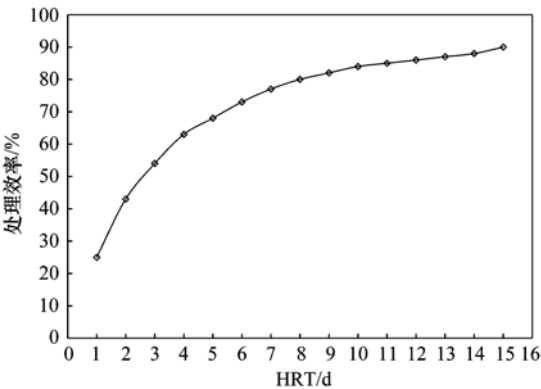


图7 不同 HRT 下 TP 的处理效率

Fig. 7 Total phosphorus treatment efficiency over HRT

平潜流湿地对 TP 的处理效率为 25% ~ 90%。由于 TP 的进水浓度较低,因此人工湿地的处理效率也不可能太高。因为吸附过程取决于进水和基质间隙水中磷的浓度梯度,进水中磷负荷对湿地中磷的吸附和沉淀过程都有影响^[26],为了达到理想的处理效果,基质应该进行定期的更换或冲洗。根据表 4 拟定的对 TP 处理效果(73.4% 的处理效率)的要求,利用 Subwet 模型模拟人工湿地的运行工况。结果表明 HRT 为 7 d 时,TP 才能达到设计标准。

3.4.4 模拟结果的综合分析和设计优化

表 9 给出了 BOD₅、NH₄⁺-N、TN 及 TP 的处理效率与 HRT 的关系。综合以上分析可知,该设计中 BOD₅ 和 TP 基本上在 HRT 为 7 d 内均能达到设计处理效率要求。但是 NH₄⁺-N、TN 在 15 d 的水力运行时

间内仅在夏季可以达到设计处理效率要求。因此要使人工湿地出水达到 V 类水的标准,需要强化对 NH₄⁺-N、TN 的处理。需要在硝化反应阶段通过一定工程手段比如曝气或增加不饱和垂直潜流湿地单元来增加溶氧水平;在反硝化反应阶段采用适当措施,比如增加 C:N 比以提高反硝化菌的活性^[27,28],或者直接添加反硝化菌以增强反硝化的能力。

由于曝气手段是一个比较容易实施且成本较低,运行和维护比较简便的手段。因此本设计对人工湿地进水溶氧的提高措施进行了进一步的实验研究。实验中采用小型曝气装置对一个容积为 1 m³ 的流动水箱进行 24 h 不间断曝气。从 2012-04-01 ~ 2012-04-23 进行间断性监测,图 8 为监测到的水箱中进水和出水的溶氧浓度数据。

表 9 人工湿地设计运行参数参考值¹⁾/%

设计参数	春季				夏季				秋季				冬季			
	3 d	7 d	12 d	15 d	3 d	7 d	12 d	15 d	3 d	7 d	12 d	15 d	3 d	7 d	12 d	15 d
BOD ₅	50	74	94	99	59	84	97	99	50	74	97	99	44	62	86	98
NH ₄ ⁺ -N	48	72	81	85	55	80	87	91	48	72	81	85	27	55	72	79
TN	43	60	74	80	53	72	83	90	43	60	74	80	20	46	65	69
TP	54	77	86	90	54	77	86	90	54	77	86	90	54	77	86	90

1) 黑体字数据表示达到设计要求处理效率

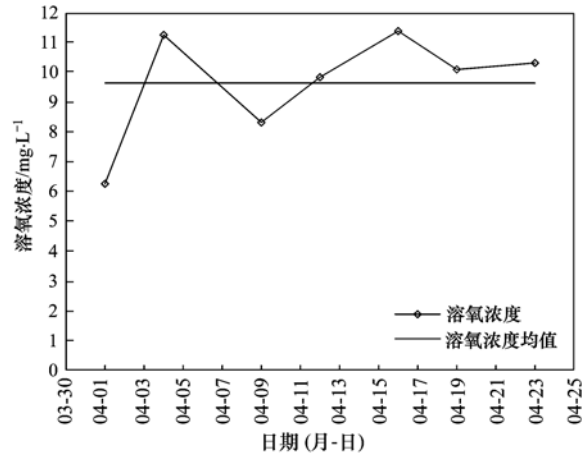


图 8 溶氧浓度

Fig. 8 Dissolved oxygen concentration

实验表明,流动水箱进水溶氧浓度范围为 0.19 ~ 2.83 mg·L⁻¹,曝气后出水溶氧浓度为 6.25 ~ 11.38 mg·L⁻¹,进水和出水的平均溶氧浓度由 1.59 mg·L⁻¹ 提高到 9.63 mg·L⁻¹,曝气装置的增加使人

工湿地进水溶氧浓度提高了 83%。

当人工湿地溶氧浓度提高到 8.0 mg·L⁻¹ 时,利用 Subwet 模型分别模拟了在春秋季节、夏季及冬季的代表温度 15℃、30℃ 及 -5℃ 下人工湿地对

BOD₅、NH₄⁺-N 及 TN 的处理效率和 HRT 的变化关系。见图 9 为 BOD₅ 处理效率与 HRT 的关系,图 10 为 NH₄⁺-N 与 HRT 的关系,图 11 为 TN 与 HRT 的关系。

由图 9 可知,在溶氧浓度从 0.4 mg·L⁻¹ 提高到 8.0 mg·L⁻¹ 的条件下,潜流湿地对 BOD₅ 的处理效率在四季不同温度的运行条件下均提高约 30% 左右。人工湿地 HRT 为 1 d,即可满足 BOD₅ 设计的处理效率要求。

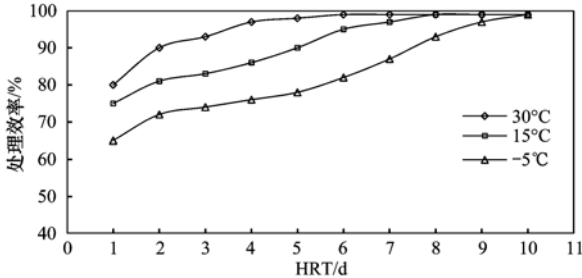


图 9 不同 HRT 与 BOD₅ 处理效率的关系

Fig. 9 Relation between BOD₅ treatment efficiency and HRT

图 10 表明溶氧浓度在 8.0 mg·L⁻¹ 时,要使 NH₄⁺-N 满足出水水质要求,在春、秋季 HRT 为 4 d,夏季为 3 d,冬季为 9 d。因此通过增加溶氧浓度提

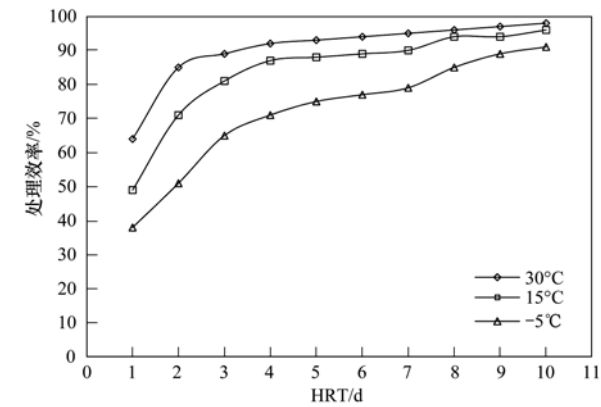


图 10 不同 HRT 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 处理效率的关系

Fig. 10 Relation between $\text{NH}_4^+\text{-N}$ treatment efficiency and HRT

高硝化反应效率是提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 处理效率的一个有效手段。

图 11 表明人工湿地对 TN 的处理效率随着溶氧的提高也相应得到了提高,春、秋季节,在满足人工湿地处理效率要求下,湿地的 HRT 从 15 d 以上降低到 6 d 以内,夏季,HRT 为 3 d 的情况下处理效率从 53% 提高到 90%。冬季,HRT 达到 10 d 时,即

可满足设计出水水质要求。这与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 处理效率随着溶氧浓度的增加而大幅度的提升有一定的关系。

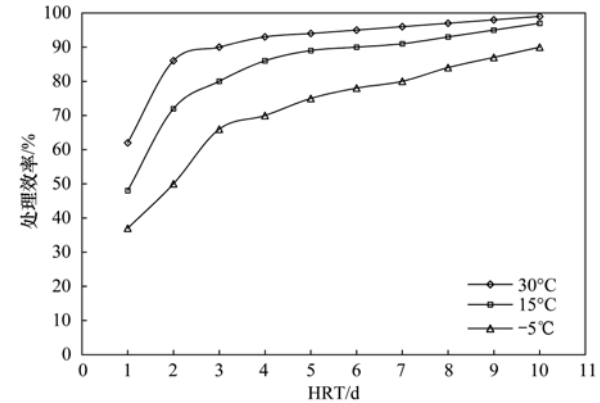


图 11 不同 HRT 与 TN 处理效率的关系

Fig. 11 Relation between TN treatment efficiency and HRT

在实施时,提高湿地溶氧浓度可以通过在水平潜流人工湿地前增加前处理曝气工序或者增加不饱和的垂直潜流湿地系统来实现。通过增氧措施使湿地溶氧浓度调整到不低于 $8.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,污染物 BOD_5 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 及 TP 的处理效果与 HRT 的关系见表 10。

表 10 人工湿地优化设计运行参数参考值¹⁾/%

Table 10 Reference values from the optimization design operation parameters in the CW system/%

设计参数	春季				夏季				秋季				冬季		
	1 d	4 d	6 d	7 d	1 d	3 d	7 d	1 d	4 d	6 d	7 d	1 d	7 d	9 d	10 d
水力停留时间															
BOD ₅	75	86	95	97	80	93	99	75	86	95	97	65	80	87	90
NH ₄ ⁺ -N	49	87	89	90	64	89	95	49	87	89	90	38	79	89	91
TN	48	86	90	91	62	90	96	48	86	90	91	37	80	87	90
TP	25	63	73	77	25	54	77	25	63	73	77	25	77	82	84

1) 黑体字数据表示达到设计要求处理效率

3.5 模型优化后确定的设计参数

由以上分析总结得出该水平潜流人工湿地模块优化后的设计运行参数如表 11 所示。

表 11 人工湿地设计运行参数

Table 11 Optimization design operation parameters in the CW

运行参数	溶氧 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	流量 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	水力停留 时间/d	表面水力负荷 $\text{m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$
春季	8.0	25	7	0.04
夏季	8.0	25	7	0.04
秋季	8.0	25	7	0.04
冬季	8.0	18	10	0.03

4 结论

Subwet 人工湿地模型可以模拟人工湿地不同的运行工况,如果在曝气装置辅助下使拟定设计规模的人工湿地入水的溶氧浓度提高到 $8.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,四季内人工湿地的对 BOD_5 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 及 TP 处理效率达标需要的最长 HTR 减少了 5 d。通过工

程增氧措施,在满足出水水质要求的条件下,得出了不同运行工况下的不同的参数,春、秋及夏季 HTR 维持在 7 d,表面水力负荷为 $0.04\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。在冬季人工湿地的 HRT 提高到 10 d,相应的表面水力负荷为 $0.03\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。春、秋及夏季的湿地模块进水流量最大为 $25\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,冬季湿地模块进水流量最大为 $18\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。运行模块数量的调整应根据相应的运行条件做出改变。

致谢:感谢天津市空港经济区管委会曲华林,陈永生,樊再义对本研究的大力支持。加拿大 Fleming 学院非常规污水处理中心提供的 Subwet 软件及使用方法,张忠广、高翔、周绪申等在采样和实验方面提供的帮助,在此一并致谢!

参考文献:

[1] El-Khateeb M A, Al-Herrawy A Z, Kamel M M, et al. Use of wetlands as post-treatment of anaerobically treated effluent[J].

- Desalination, 2009, **254**(1-3): 50-59.
- [2] 闻岳, 周琪. 水平潜流人工湿地模型[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(2): 456-462.
- [3] Vymazal J. The use constructed wetlands with horizontal subsurface flow for various types of wastewater [J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(1): 1-17.
- [4] 杨旭, 于水利, 张洪洋, 等. 潜流人工湿地预处理给水厂原水的效能研究[J]. 中国给水排水, 2009, **25**(2): 48-51.
- [5] Kusch P, Wiebner A, Kappelmeyer U, *et al.* Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate [J]. Water Research, 2003, **37**(17): 4236-4242.
- [6] Akrotas C S, Tsihrantzis V A. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2007, **29**(2): 173-191.
- [7] Rousseau D P L, Vanrolleghem P A, Pauw N D. Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands; a review [J]. Water Research, 2004, **38**(6): 1484-1493.
- [8] Langergraber G, Giraldo D, Mena J, *et al.* Recent developments in numerical modelling of subsurface flow constructed wetlands [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(13): 3931-3943.
- [9] Jing S R, Lin Y F, Lee D Y, *et al.* Nutrient removal from polluted river water by using constructed wetlands [J]. Bioresource Technology, 2001, **76**(2): 131-135.
- [10] Vymazal J. The use of subsurface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience [J]. Ecological Engineering, 2002, **18**(5): 633-646.
- [11] 梁威, 吴振斌. 人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展[J]. 环境科学动态, 2000, **18**(3): 23-37.
- [12] Faulwetter J L, Gagnon V, Sundberg C, *et al.* Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: a review [J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(6): 987-1004.
- [13] 朱永青. 人工湿地净化机制数学模型模拟及应用[D]. 上海: 东华大学, 2006.
- [14] Snow A, Anderson B, Wootton B. Flow-through land-based aquaculture wastewater and its treatment in subsurface flow constructed wetlands [J]. Environmental Reviews, 2012, **20**(1): 54-69.
- [15] HJ 2005-2010, 人工湿地污水处理工程技术规范[S].
- [16] EPA/625/R-99/010, Manual constructed wetlands treatment of municipal wastewaters[S].
- [17] Zhang L Y, Zhang L, Liu Y D, *et al.* Effect of limited artificial aeration on constructed wetland treatment of domestic wastewater [J]. Desalination, 2010, **250**(3): 915-920.
- [18] Noorvee A, Poldvere E, Mander U. The effect of pre-aeration on the purification processes in the long-term performance of a horizontal subsurface flow constructed wetland [J]. Science of the Total Environment, 2007, **380**(1-3): 229-236.
- [19] 黄娟, 王世和, 钟秋爽, 等. 不同构型湿地氧分布及脱氮效果对比[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, **31**(6): 117-121.
- [20] 肖海文, 邓荣森, 翟俊, 等. 溶解氧对人工湿地处理受污染城市河流水体效果的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(12): 2426-2431.
- [21] Tchobanoglous G, Burton F, Stensel H D. Wastewater engineering: treatment and reuse[M]. New York: McGraw-Hill Companies Inc., 2003. 940-982.
- [22] 贾文林, 吴娟, 武爱国, 等. 碳氮比对人工湿地污水处理效果的影响[J]. 环境工程学报, 2010, **4**(4): 767-770.
- [23] 陆松柳, 张辰, 王国华. 碳源强化对人工湿地反硝化过程的影响研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(9): 1949-1954.
- [24] 袁东海, 景丽洁, 高士祥, 等. 几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析[J]. 环境科学, 2005, **26**(1): 51-55.
- [25] 周艳丽, 余宗莲, 孙文杰. 水平潜流人工湿地脱氮除磷研究进展[J]. 水资源保护, 2011, **27**(2): 42-48.
- [26] Robert H K, Wallace S D. Treatment wetlands [M]. (2nd ed.). New York: CRC Press, 2007. 174-175.
- [27] 王琨, 汤利华, 汪强林, 等. 污水可生化性对污水处理效果影响的分析[J]. 工业用水与废水, 2012, **43**(1): 16-18.
- [28] 王全金, 周世超, 李芳, 等. 潜流人工湿地除氮正交试验研究[J]. 水处理技术, 2010, **36**(12): 47-49.

CONTENTS

Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China	GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)
Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing	YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)
Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics	ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Impact Factors of O ₃ Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin (2519)
Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing	FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors	HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles	ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)
Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment	CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)
Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities	LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery	ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)
Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring	CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao	DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River	CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)
Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophtic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)
Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient	YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)
Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom	ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)
Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir	LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)
Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification	ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland	LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>	HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)
Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River	XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)
Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity	TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)
Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process	YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water	ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H ₂ O ₂ System	LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)
Adsorption of Cd ²⁺ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles	ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)
Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions	JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yun, <i>et al.</i> (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni ²⁺ Adsorption Characteristics	ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark	WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media	ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)
Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation	WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)
Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid	CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)
Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A ² O Process	LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)
Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)
Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization	XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)
Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge	ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)
Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes	LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China	QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain	XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)
Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China	ZHANG Zhong-sheng, LU Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)
Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qianguo, Jilin	TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province	ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)
Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil	HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)
Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)
Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region	ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)
Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir	LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory	PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)
Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements	ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments	LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12	ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions	QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)
Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology	LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes	ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium	CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)
Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis	ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)
Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics	ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i>	LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A ² O Wastewater Treatment Process	GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行