

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究 王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)

北京城区 PM_{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析 陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)

北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)

北京市 PM_{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析 王艳慧,肖瑶 (428)

杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征 谢小芳,孙在,杨文俊 (436)

春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征 王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽锋,杨洋 (442)

南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娟 (451)

忻州市环境空气 PM₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析 史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)

广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征 青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)

燃煤电厂锅炉 PM_{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析 史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)

中国南海大气降水化学特征 肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)

临安本底站酸雨长期观测特征分析 李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)

北京城区大气氮湿沉降特征研究 贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)

烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势 贾龙,徐永福 (495)

祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征 董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)

生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究 羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)

生物滴滤塔处理苯酚气体研究 何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶杞宏,罗雨薇,魏在山 (520)

国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究 楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)

翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响 赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合锋 (533)

CuBr₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究 胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)

浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究 张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)

基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例 贾海峰,郭羽 (555)

北京平原区第四系地下水污染风险评价 郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)

不同季节辽河口营养盐的河口混合行为 张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)

太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征 马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)

亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价 陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)

潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究 白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)

凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响 周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国锋 (597)

不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响 田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)

溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用 李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)

四环素光催化降解特性与选择性研究 宋晨怡,尹大强 (619)

微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究 符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)

市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全 杨赛,周启星,华涛 (633)

膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究 李彬,王志伟,安莹,吴志超 (643)

臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究 刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)

厌氧生物法处理果胶废水的研究 陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)

氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究 赵兴兴,于水利,王哲 (663)

平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能 胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)

基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征 王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)

广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价 郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳翎 (684)

中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究 张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)

废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价 周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)

深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究 章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)

洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策 谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)

施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响 曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)

螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征 尹雪,陈家军,吕策 (733)

Pseudomonas sp. QJX-1 的锰氧化特性研究 周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)

$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响 陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)

杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究 龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)

鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究 赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)

黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究 朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)

3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究 王艳,马泽民,吴石金 (770)

新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价 李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)

黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫磺排放动态研究 李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)

农田土壤 N₂O 产生的关键微生物过程及减排措施 朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)

《环境科学》征订启事(691) 《环境科学》征稿简则(800) 信息(489,519,591,791)

潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究

白少元^{1,2}, 宋志鑫^{1,2}, 丁彦礼^{1,3*}, 游少鸿^{1,2}, 何珊^{1,2}

(1. 桂林理工大学广西矿冶与环境科学实验中心, 桂林 541004; 2. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 3. 桂林理工大学地球科学学院, 桂林 541004)

摘要: 利用数值模拟方法结合实验手段, 研究基质结构与系统水力特性的相关性, 数值模拟结果表明, 填料渗透系数对人工湿地水力效率影响很大, 单层结构人工湿地系统中, 填料渗透系数越大, 流场分布越不均匀; 由上到下填料渗透系数逐渐增加的分层填充方式能有效避免短流及死区的发生, 提高系统水力效率. 根据数值模拟结果构建两个人工湿地对比小试实验系统, 并开展示踪实验对模拟结果进行验证, 示踪实验结果表明, 分层填充结构水力特性显著优于单层结构潜流人工湿地, 二者有效体积比分别为 0.87 和 0.49. 可见, 数值模拟方法能够有效应用于潜流人工湿地基质结构参数优化方面.

关键词: 潜流人工湿地; Visual Modflow; 数值模拟; 基质结构; 示踪

中图分类号: X171; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0592-05

Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands

BAI Shao-yuan^{1,2}, SONG Zhi-xin^{1,2}, DING Yan-li^{1,3}, YOU Shao-hong^{1,2}, HE Shan^{1,2}

(1. Guangxi Scientific Experiment Center of Mining, Metallurgy and Environment, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The correlation of substrate structure and hydraulic characteristics was studied by numerical simulation combined with experimental method. The numerical simulation results showed that the permeability coefficient of matrix had a great influence on hydraulic efficiency in subsurface flow constructed wetlands. The filler with a high permeability coefficient had a worse flow field distribution in the constructed wetland with single layer structure. The layered substrate structure with the filler permeability coefficient increased from surface to bottom could avoid the short-circuited flow and dead-zones, and thus, increased the hydraulic efficiency. Two parallel pilot-scale constructed wetlands were built according to the numerical simulation results, and tracer experiments were conducted to validate the simulation results. The tracer experiment result showed that hydraulic characteristics in the layered constructed wetland were obviously better than that in the single layer system, and the substrate effective utilization rates were 0.87 and 0.49, respectively. It was appeared that numerical simulation would be favorable for substrate structure optimization in subsurface flow constructed wetlands.

Key words: subsurface flow constructed wetlands; Visual Modflow; numerical simulation; substrate structure; tracer

在人工湿地工程化应用过程中发现, 沟流、短流、死区现象普遍存在, 堵塞问题频发, 为保证人工湿地的过水性能, 加大过流量, 在后续设计建造过程中, 选用的填料粒径逐步增大^[1~6]. 而这种方式恰恰加剧了水流分布的不均匀性, 造成局部水流过大, 水流死区增多, 系统水力效率降低, 最终引起人工湿地净化性能的降低, 如何在不牺牲净化效果的情况下提高水力效率是亟待解决的问题^[7, 8]. 但目前关于人工湿地水力学性能方面的研究主要集中在布水方式、出水位置的设置等方面^[9~11], 根据填料的特性对人工湿地主体结构进行优化方面的研究还鲜有报道. 鉴于此, 本课题组在前期研究中发现, 分层填充方式能够提高净化效果^[12]. 在此基础上, 本研究利用三维渗流模拟系统 Visual Modflow 对人工

湿地水力特性进行模拟, 该模拟方法已被成功应用于芬兰北部人工湿地流场模拟研究中^[13], 同时结合实验手段对模拟结果进行验证, 对潜流人工湿地填料分层填充方法及其与系统水力特性相关性进行分析, 以期为人工湿地的持久高效运行提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 数值模拟

基于渗流场理论, 利用数值模拟方法建立潜流

收稿日期: 2013-05-19; 修订日期: 2013-07-04

基金项目: 广西矿冶与环境科学实验中心项目(KH2012ZD004); 广西科技厅(桂科攻 1140002-1-2); 广西自然科学基金项目(2013GXNSFBA019210)

作者简介: 白少元(1981~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为地表水环境修复, E-mail: baisy@glut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: dyl@glut.edu.cn

人工湿地水流模型,研究基质结构对系统水力特性的影响.人工湿地常采用细沙或者砾石作为填料,以渗流为主,水流流速较小且为饱和稳定流,根据达西定律,水流雷诺数 $R < 1 \sim 10$ 范围内,符合理想的地下水力动力学模拟的假设条件,因此本研究依托于三维地下水数值模拟系统 Visual Modflow 进行人工湿地基质内部的流场模拟. Visual Modflow 是一个三维有限差分地下水流动模型,与有限单元法相比,它在时间步长 Δt 较小的情况下,不会引起个别点的水头反常.其常密度三维流动基本水流数值模型如式(1)所示:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - w = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中, k_{xx} 、 k_{yy} 、 k_{zz} 为沿 x 、 y 、 z 坐标轴方向上的渗透系数 (LT^{-1}); h 为测压管水头, (L); w 为地下水的源和汇; S 为孔隙介质的储水率 (L^{-1}); t 时间 (h).

利用 Visual Modflow 建立人工湿地小试系统数学模型, $L \times W \times H$ 均为 $2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$, 其中布水区及集水区长度均为 0.2 m , 主体填料区长度为 1.6 m . 将该模型剖分为 3 层, 每层 10 行, 10 列 (图 1). 布水区及集水区渗透系数设置为 $500 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, 进水端设定为补给边界, 补给量为 $4.6 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, 出水端设定为定水头边界 (0.6 m), 两侧概化为隔水边界. 两系统主体填料孔隙率均设置为 0.4 , 总孔隙率为 0.45 . 在此条件下, 通过调整主体填料区渗透系数进行多次计算, 研究单层填充和分层填充结构的人工湿地系统水力特性.

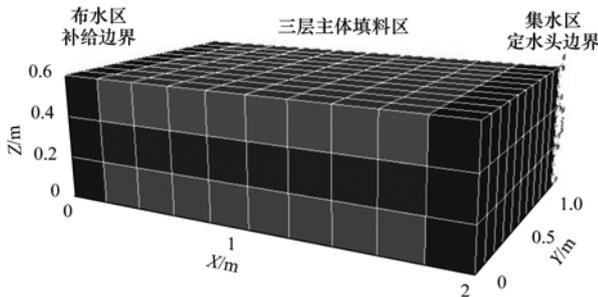


图 1 模型剖分示意

Fig. 1 Schematic diagram of constructed wetland model

1.2 实体模型的构建

根据数学模型识别的参数构建对比人工湿地实体模型,池体尺寸相同, $L \times W \times H$ 均为 $2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$, 基质填充厚度为 0.6 m , 左端为进水口, 右端为出水口, 布水区和集水区长度均为 20 cm , 采用渗透系数为 $500 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 的鹅卵石进行填充, 池体一

侧设置 12 个监测口. 两个人工湿地系统主体填料填充同一起来源石英砂, 其中一个主体填料区内填充粒径混合均匀的石英砂 (单层人工湿地), 另一个对照人工湿地小试系统主体填料区分为 3 层进行填充 (分层人工湿地, 图 2). 床体种植美人蕉, 种植密度均为 $20 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$.

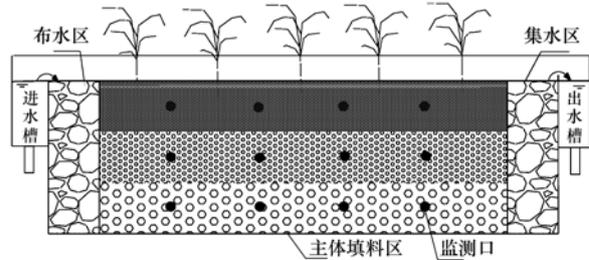


图 2 分层人工湿地结构示意图

Fig. 2 Schematic view of a layered constructed wetland

1.3 示踪实验

以 NaCl 为示踪剂对单层及分层人工湿地系统开展示踪实验, 在两系统进水区瞬时一次性投加 NaCl 溶液, 使其电导率上升到背景值的 10 倍以上, 控制系统水力停留时间 (HRT) 为 12 h , 每隔 10 min 监测 1 次出口水流电导率变化情况, 直至电导率恢复到背景值时为止. 两个人工湿地各进行 3 次示踪剂实验, 选取示踪剂回收率最高的一次结果进行对比分析.

1.4 数据分析

标准差是一组数据平均值分散程度的一种度量^[14]. 将潜流人工湿地床体进行分层, 运用 Microsoft Office Excel 2003 中分析数据库, 计算每个模型中各基质层水流通量平均值和标准差, 作为比较不同填充结构条件下流场分布均匀性的依据.

2 结果与讨论

2.1 人工湿地水力特性数值模拟解析

2.1.1 单层填充结构人工湿地模拟结果

将单层填充方式中主体填料区的渗透系数分别设置为 10 、 20 、 $30 \dots 130 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, 并据此建立 13 个数学模型, 分别计算每个模型上、中、下 3 层床体填料中过流量的平均值和标准差, 标准差越小说明基质中水流分布越均匀, 反之则越不均匀, 模拟计算结果如图 3 所示. 从中可以看出, 随着填料渗透系数的增大, 标准差显著增加, 由渗透系数为 $10 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 时的 $0.06 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 增加到渗透系数为 $130 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 时的 $0.44 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 而此时, 各模型由于尺寸及补给量相同, 平均过流量变化幅度不大. 可见,

单一填料填充的人工湿地系统中,渗透系数的增加加剧了水流分布的不均匀性. 结合目前的情况,在人工湿地构建过程中,为了避免堵塞的形成,加大过流量,所选取的填料渗透系数逐年增大,这种方式恰恰增加了水流分布的不均匀性,更容易造成局部流量过大,降低系统水力效率,最终引起人工湿地净化性能的降低.

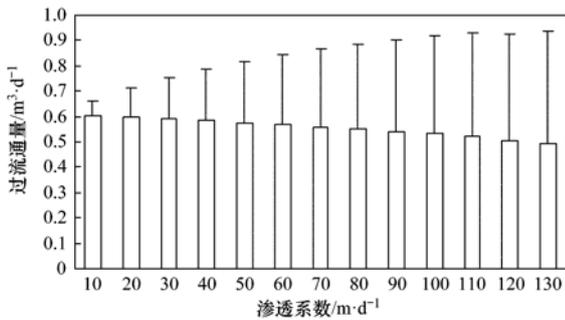


图3 单层人工湿地系统填料渗透系数与过流量相关性
Fig. 3 Relationship between permeability coefficient and flux in the single layer constructed wetland

2.1.2 分层填充结构人工湿地模拟结果

根据地下水动力学理论可知,水在饱和状态下的渗流流场与基质渗透系数有很大关系^[15, 16],因此,通过不断调整主体填料区的3层填料的渗透系数参数值,并进行反复模拟计算,找出满足3层填料过流量相当时的各层填料渗透系数值(图4). 由图4可知,通过具有不同渗透系数填料的分层填充,能够满足主体填料区水流分布均匀的目的,并且满足各层过流量相当的填料组合方式不只局限一种. 从趋势上来看,图4中列出的6个满足均匀流场的模型中,填料的组合均满足由表层到底层渗透系数逐渐增大的趋势,且表层填料选择的渗透系数越大,底层填料变化的幅度相应也越大. 如模型1中,表层的渗透系数取 15 m·d⁻¹,则底层渗透系数为 23 m·d⁻¹,即能保证水流通量的基本均匀;比较

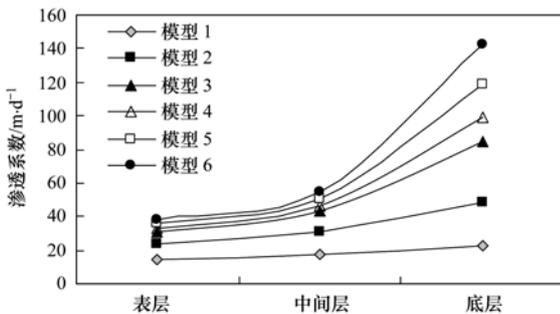


图4 均匀流场中各层填料渗透系数
Fig. 4 Permeability coefficient of each layer for the uniform flow distribution

而言,模型6中,表层和底层填料渗透系数分别为 30 m·d⁻¹和 143 m·d⁻¹,才能保证水流分布均匀. 可见,建设人工湿地过程中填料选择时,可因地制宜,根据当地材料级配及渗透系数特征,选择适宜的填料组合进行分层填充,兼顾系统的过水能力及水力效率,从而保证系统的净化性能.

根据上述模拟结果,选择主体填料区渗透系数为 65 m·d⁻¹的单层填充模型和渗透系数从上到下依次为 26、36 和 64 m·d⁻¹的分层填充数学模型构建潜流人工湿地实验系统,开展示踪实验研究基质结构对系统水力特性的影响,同时对该数值模拟方法的有效性进行验证. 选定的这两个数学模型中各层水流通量模拟计算结果如图5、6所示. 其中 Zone1 和 Zone5 分别为布水区和集水区的过流量, Zone2、Zone3 和 Zone4 分别为表层、中层和底层的过流量. 由图5、6中可以看出,计算结果中,分层填充的湿地模型主体填料区3层过流量基本相

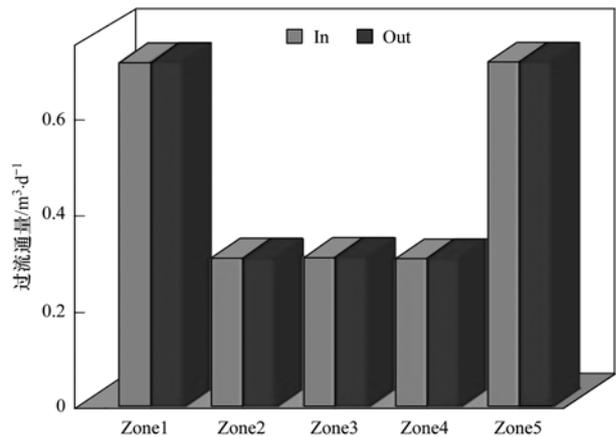


图5 分层填充人工湿地各层过水通量
Fig. 5 Water fluxes in each layer of the layered constructed wetland

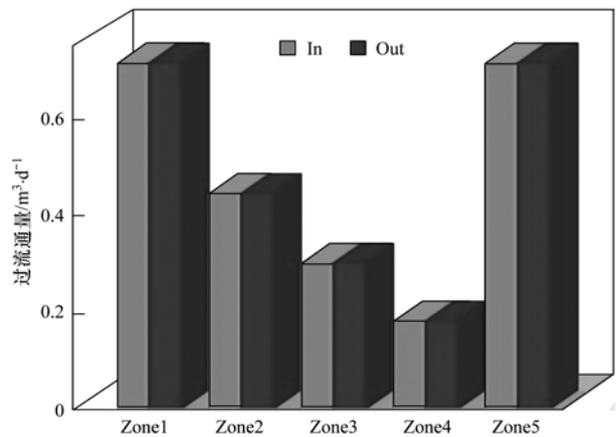


图6 单一填充人工湿地各层过水通量
Fig. 6 Water fluxes of the single layer constructed wetland

同,而单一填料系统中,表层过流量较大,底层过流量较小,即分层填充湿地中主体填料流场分布的均匀性显著优于单层填充系统。

2.2 示踪实验结果

示踪实验是研究人工湿地基质水力特性的有效方法^[17~19],在水力停留时间为 12 h 的条件下,以 NaCl 为示踪剂开展示踪实验,实验结果如图 7 所示,从图中可知,分层填充与单一填充人工湿地系统示踪剂峰值分别为 $1\,029\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $233\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,相应的峰值出现时间为 450 min 和 310 min,即单一填充系统峰值出现略早,到实验结束时,两系统出水中电导率基本恢复到背景值。根据示踪实验结果,利用经验公式计算对比系统水力特性的参数如表 1 所示^[20~22]。

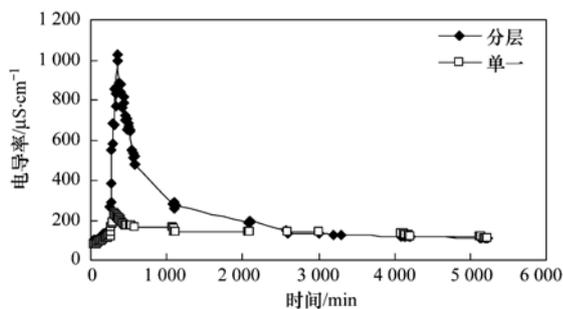


图 7 对比人工湿地出水示踪剂变化情况

Fig. 7 Tracer variability of the effluent from the parallel constructed wetland

表 1 对比人工湿地系统水力特性参数

Table 1 Hydraulic parameters of parallel constructed wetlands

填充方式	有效体积比 e	短路值 S	水力效率 λ	回收率/%
分层填充	0.87	0.51	64	86
单一填充	0.49	0.6	43	72

表 1 中,有效体积比 e 为示踪剂在系统中流动并且最终能够迁移到系统出水口的有效体积。 e 可以表示为水平潜流人工湿地装置体积和介质空隙率的乘积。一般情况下有效体积比(e)值越大,表示人工湿地中用于去除污染物的有效体积也越大。当 $e < 1$ 时,说明人工湿地系统中存在“滞水区”或“死区”,水流进入这部分区域后,很难再流到出水口,当 $e > 1$ 时,说明人工湿地中有“短路”存在,湿地系统中水流会沿优先流通道快速达到出口,而且示踪剂密度曲线出峰较早。对比系统的 e 均小于 1,说明这两个湿地系统中都存在一定的“死区”现象,但分层结构的人工湿地系统 e 值显著大于单层填充系统,说明前者死区范围明显小于后者。从短路值 S 来看,两者也同样存在不同程度的短流现象,但总体

说来,分层填充的人工湿地水力效率要显著优于未分层结构。

结合数值模拟结果来说,图 5 中显示床体表层、中层和底层过流量相当,示踪实验结果显示,该系统中仍存在一定的短流及死区现象,这主要是由于填料实际堆积起来后,填料孔隙连通程度的差异会形成很多微地形,加之植物根系与微生物的作用,造成各处水头差的细微差异^[23~25];此外,有效体积比、水力效率等参数的计算方法也是根据示踪实验结果概算得来的,这两者造成了实测数据与模型中的理想状况存在一定误差,但此误差在可接受的范围内(有效体积比为 0.87)。因此利用数值模拟方法进行人工湿地基质结构的优化是切实可行的。

3 结论

(1) 应用 Visual Modflow 实现了对潜流人工湿地水流模型的构建,初步模拟得出依据填料渗透系数构建的基质结构与水流分布情况的相关性,表明该数值模拟方法可用于优化潜流人工湿地基质结构参数,据此构建的人工湿地系统能显著提高系统的水力效率。

(2) 填料渗透系数对人工湿地水力效率影响很大,分层填充方式能有效避免短流及死区的发生,提高系统水力效率。

参考文献:

- [1] 黄锦楼,陈琴,徐连煌. 人工湿地在应用中存在的问题及解决措施[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 401-409.
- [2] Brovelli A, Carranza-Díaz O, Rossi L, et al. Design methodology accounting for the effects of porous medium heterogeneity on hydraulic residence time and biodegradation in horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(5): 758-770.
- [3] Wanko A, Tapia G, Mosé R, et al. Adsorption distribution impact on preferential transport within horizontal flow constructed wetland (HFCW) [J]. Ecological Modeling, 2009, 220(23): 3342-3352.
- [4] 项学敏,杨洪涛,周集体,等. 人工湿地对城市生活污水的深度净化效果研究: 冬季和夏季对比[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 713-719.
- [5] García J, Chiva J, Aguirre P, et al. Hydraulic behavior of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different aspect ratio and granular medium size [J]. Ecological Engineering, 2004, 23(3): 177-187.
- [6] Fountoulakis M S, Terzakis S, Chatinotas A, et al. Pilot-scale comparison of constructed wetlands operated under high hydraulic loading rates and attached biofilm reactors for domestic wastewater treatment [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(8): 2996-3003.

- [7] Alcocer D J R, Vallejos G G, Champagne P. Assessment of the plug flow and dead volume ratios in a sub-surface horizontal-flow packed-bed reactor as a representative model of a sub-surface horizontal constructed wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2012, **40**(4): 18-26.
- [8] Wanko A, Tapiab G, Mosé R, *et al.* A new empirical law to accurately predict solute retention capacity within horizontal flow constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(4): 636-643.
- [9] 戚景南, 黄玉明. MATLAB 软件在构建潜流人工湿地水力学模型中的应用[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2008, **30**(5): 145-149.
- [10] 孔德川, 丁爱忠, 郑蕾, 等. 分层式潜流人工湿地水力学特性数值模拟与分析[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(4): 741-744.
- [11] Suliman F, Futsaether C, Oxaal U. Hydraulic performance of horizontal subsurface flow constructed wetlands for different strategies of filling the filter medium into the filter basin [J]. *Ecological Engineering*, 2007, **29**(1): 45-55.
- [12] 陈腾殊, 白少元, 王敦球, 等. 基质结构对水平潜流人工湿地净化效果影响[J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(10): 3449-3454.
- [13] Ronkanen A K, Kløve B. Hydraulics and flow modeling of water treatment wetlands constructed on peatlands in Northern Finland [J]. *Water Research*, 2008, **42**(14): 3826-3836.
- [14] 郑少华, 姜奉华. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004. 228-343.
- [15] 樊贵盛, 荆日县, 张明斌. 不同级配砂砾石介质渗透系数的试验研究[J]. *太原理工大学学报*, 2012, **43**(3): 373-378.
- [16] 薛禹群, 吴吉春. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 2010. 40-56.
- [17] Schmid B H, Hengl M A, Stephan U. Salt tracer experiments in constructed wetland ponds with emergent vegetation: laboratory study on the formation of density layers and its influence on breakthrough curve analysis [J]. *Water Research*, 2004, **38**(8): 2095-2102.
- [18] Torrens A, Molle P, Boutin C, *et al.* Impact of design and operation variables on the performance of vertical-flow constructed wetlands and intermittent sand filters treating pond effluent[J]. *Water Research*, 2009, **43**(7): 1851-1858.
- [19] Chang N B, Xuan Z M, Wanielista M P. A tracer study for assessing the interactions between hydraulic retention time and transport processes in a wetland system for nutrient removal [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2012, **35**(3): 399-406.
- [20] Holland J F, Martin J, Granata T, *et al.* Effects of wetland depth and flow rate on residence time distribution characteristics [J]. *Ecological Engineering*, 2004, **23**(3): 189-203.
- [21] Werner T M, Kadlec R H. Application of residence time distributions to storm water treatment systems [J]. *Ecological Engineering*, 1996, **7**(3): 213-234.
- [22] Pedescoll A, Uggetti E, Llorens E, *et al.* Practical method based on saturated hydraulic conductivity used to assess clogging in subsurface flow constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(8): 1216-1224.
- [23] Baird A J, Surrridge B W J, Money R P. An assessment of the piezometer method for measuring the hydraulic conductivity of a *Cladium mariscus* *Phragmites australis* root mat in a Norfolk (UK) fen [J]. *Hydrological Processes*, 2004, **18**(2): 275-291.
- [24] 张翔凌, 吴振斌, 武俊梅, 等. 不同基质高负荷垂直流人工湿地水力特性研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, **30**(7): 79-83.
- [25] Zou J L, Sun Y H, Li Y H. Effect of amended soil and hydraulic load on enhanced biological nitrogen removal in lab-scale SWIS [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **163**(2-3): 816-822.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of Pleurotus Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhamnolipid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ 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