ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 39 卷 第 9 期
2018 年 9 月 15 日

目 次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测 …… 黄成, 安静宇, 鲁君(3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率 …… 李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞(3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析 …… 杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希(3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单 …… 孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启(3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布 …… 李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜(4002)
济南市夏、冬季 $PM_{2.5}$ 中化学组分的季节变化特征及来源解析 …… 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰(4014)
聊城冬季一重污染过程 $PM_{2.5}$ 污染特征及成因分析 …… 张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰(4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量 …… 王楠, 马淼, 石金辉, 高会旺, 姚小红(4034)
晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析 …… 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林(4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价 …… 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛(4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析 …… 孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤(4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质 …… 李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静(4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征 …… 李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来(4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析 …… 高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王滨, 滕彦国, 王金生(4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估 …… 宫曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇(4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析 …… 赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸(4105)
黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性 …… 席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋(4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比 …… 李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛(4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素 …… 王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡(4132)
柳江盆地浅层地下水硝酸型水特征和成因分析 …… 徐进, 何江涛, 彭聪, 曾颖(4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性 …… 张雯, 尹琳, 周念清(4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征 …… 张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁(4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算 …… 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明(4169)
锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响 …… 何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静(4179)
洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响 …… 李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧姝(4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应 …… 聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼(4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响 …… 储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙(4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程 …… 汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进(4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征 …… 胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征(4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征 …… 花莉, 李璐, 杨春燕(4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较 …… 赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹(4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向 …… 姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌(4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性 …… 王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺酰淑, 王磊(4249)
UV 强化草酸络合 Fe^{3+} 活化过硫酸盐氧化降解苯胺 …… 韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国(4257)
焦化废水 A/O^2 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析 …… 吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环(4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响 …… 俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧(4274)
NaCl 盐度对 A^2/O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响 …… 张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成(4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响 …… 陈方敏, 金润, 袁砚, 李祥, 黄勇, 顾澄伟(4289)
游离氨(FA)对氨氧化菌(AOB)活性抑制动力学试验 …… 孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓(4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响 …… 安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志(4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复 …… 李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲(4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析 …… 宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌(4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应 …… 罗梅, 田冬, 高明, 黄容(4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响 …… 李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳(4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力 …… 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉(4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响 …… 周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波(4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响 …… 韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢(4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险 …… 李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇(4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析 …… 靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小卉, 於俊颖, 杨惠媛(4385)
《环境科学》征订启事(3986) 《环境科学》征稿简则(4050) 信息(4085, 4104, 4337)

人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较

赵林丽[1,2], 邵学新[1], 吴明[1*], 姜小三[2], 陆琳莹[1]

(1. 中国林业科学院亚热带林业研究所, 浙江杭州湾湿地生态系统定位观测研究站, 杭州 311400; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 为研究人工湿地基质类型和粒径对水质净化效率的影响, 选择了 1~2、2~4、4~8 mm 的沸石, 2~4、4~8、8~16 mm 的砾石和 2~4、3~5、6~8 mm 的无烟煤基质, 在无植物人工实验柱中开展单一基质的水质净化实验. 结果表明, 相同类型不同粒径的基质对 COD、TN、TP 的去除效果不同. 4~8 mm 沸石和砾石、6~8 mm 无烟煤对 COD 的去除率最高, 分别为 53.74%、60.76%、62.93%; 人工实验柱中氮素的去除以反硝化作用为主, 粒径对 TN 去除效果的影响表现为小粒径更优; 砾石和无烟煤的 TP 去除率也表现为小粒径更高, 但沸石的 TP 去除率随着粒径的增大而增大. 基质类型对 COD、TP、TN 的去除效果也存在差异. 无烟煤对 COD、TP、TN 均有较好的去除效果, 平均去除率在 60% 以上; 沸石对 TN 的去除效果最好, TP 去除率不高; 砾石对 COD 有较高的去除率, 对 TP 的去除效果一般.

关键词: 人工湿地; 基质; 化学需氧量; 总氮; 总磷

中图分类号: X703 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2018)09-4236-06 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201712009

Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification

ZHAO Lin-li[1,2], SHAO Xue-xin[1], WU Ming[1*], JIANG Xiao-san[2], LU Lin-ying[1]

(1. Wetland Ecosystem Research Station of Hangzhou Bay, Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China; 2. College of Resource and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Choosing suitable substrate is key to improving the efficiency of wetland decontamination. However, little is known about the effect of particle size. In order to study the effect of substrate type and size on COD, TN, and TP removal from sewage, 1-2, 2-4, and 4-8 mm zeolite, 2-4, 4-8, and 8-16 mm gravel, and 2-4, 3-5, and 6-8 mm anthracite were selected for establishment of the constructed system of experimental media with three replications. Results showed that removal efficiency of COD, TN, and TP varied with different particle sizes of the same material. The greatest COD removal was achieved with 4-8 mm zeolite and gravel and 6-8 mm anthracite, with removal rates of 53.74%, 60.76%, and 62.93%, respectively. Denitrification is the main pattern of nitrogen removal in the artificial test column; results show that smaller particle size is more effective for removal of TN. The removal rate of TP is also higher with smaller sizes of gravel and anthracite, but the opposite pattern occurred with zeolite. The removal of COD, TP, and TN also varied by substrate type. Anthracite led to good removal of COD, TP, and TN. Zeolite was most effective for removal of TN but had lower removal of TP. Gravel has high removal rate for COD, and has a general removal effect on TP.

Key words: constructed wetlands; substrate; chemical oxygen demand; total nitrogen; total phosphorus

人工湿地[1]是指通过模拟天然湿地结构与功能, 选择一定的地理位置与地形, 根据人们的需要人为设计与建造的湿地. 它由水体、基质、水生植物和微生物四大基本要素构成. 基质是人工湿地中水生植物和微生物的生长载体, 一般由不同级配、比例的单一或混合填料构成. 选择合适的基质材料, 可以为污水在湿地系统中的渗流提供良好的水力条件[2], 为植物和微生物的生长提供良好的载体[3,4]. 基质是人工湿地系统中重要的营养聚集场所, 它本身还可以通过物理化学吸附、沉降络合等作用有效去除污水中的氮、磷、难降解有机物等污染物质[5~7]. 因此, 选择合适的基质材料, 是构建人工湿地、提高人工湿地净化污水能力的关键措施.

国内外学者在基质除污性能上已作了大量研究[7~12], 发现页岩、钢渣、无烟煤等基质能有效去除污水中的磷, 煤灰渣、砂子、无烟煤、生物陶粒等基质对有机物的去除效果较好, 沸石、陶瓷滤料、高炉渣等基质对氮素有较高的去除率. 但是, 不同的基质材料在粒径上往往难以统一, 甚至存在较大差异, 过去在比较不同基质类型对污染物质的去除效率时往往忽略了基质粒径的影响. 比较不同基质类型的除污效能时, 必须要考虑粒径的作用,

收稿日期: 2017-12-01; **修订日期**: 2018-03-11

基金项目: 浙江省科技计划项目(2015C32011); 浙江省-中国林科院合作林业科技项目(2015SY01); 国家林业公益性行业科研专项(201404210)

作者简介: 赵林丽(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为人工湿地生态学, E-mail: 2015103068@njau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: hangzhoubay@126.com

确保粒径统一的情况下对不同基质进行比较. 目前对基质粒径的研究主要集中在湿地堵塞方面[13, 14]，基质粒径对污水中污染物质的净化效果的影响尚没有一个明确的参考值.

因此，本文就不同粒径下(2 ~ 4、4 ~ 8 mm)对 3 种常用人工湿地基质(无烟煤、沸石、砾石)的除污性能作了研究，并比较了相同基质类型下不同粒径对 COD、TN、TP 去除率的影响，分析了基质粒径和基质类型对 COD、TN、TP 这 3 种典型污染物质去除效能的贡献，以期为人工湿地基质的选择提供科学依据，进一步提高人工湿地的水质净化效率.

1　材料与方法

1.1　实验装置与基质

如图 1，实验装置为人工实验柱，柱体采用有机玻璃材料，直径 10 cm，高 60 cm，柱体中铺设 50 cm 高的基质层(在实验柱底部填充大粒径的实验基质以防止堵塞)，下方设置锥形排水口. 实验选用了沸石、砾石和无烟煤这 3 种常用的人工湿地基质，每种基质分别选取了 3 种常见的粒径，分别为 1 ~ 2、2 ~ 4、4 ~ 8 mm 粒径的沸石，2 ~ 4、4 ~ 8、8 ~ 16 mm 粒径的砾石、以及 2 ~ 4、3 ~ 5、6 ~ 8 mm 粒径的无烟煤. 共 9 组处理，每组处理设置 3 个重复.

1.2　实验设计与进水

实验前期(4 月中旬)，用实际生活污水培养人工实验柱系统，以模拟真实的微生物环境. 5 月初，人工实验柱排出实际生活污水后，注入人工配置的污水，开展水质净化实验. 配置污水所用底水为亚热带林业研究所内的池塘水，参考冯华军等[15]对浙江省生活污水的水质调查结果模拟生活污水水质，分别用蔗糖、硝酸钙、硫酸铵、磷酸二氢钾[16]调整了化学需氧量、总氮、铵态氮和总磷的浓度，使进水污染物浓度保持在较高水平，进水 pH 为 7(表 1).

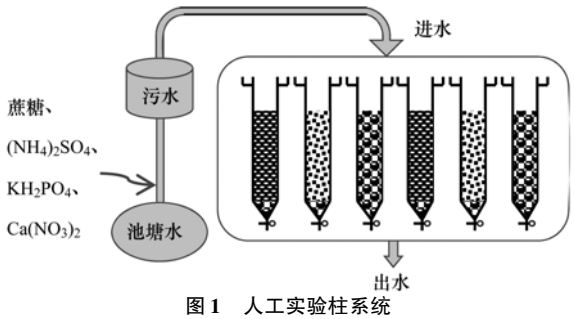


图 1　人工实验柱系统

Fig. 1　Constructed experimental media system

实验期长两个月，采取间歇进水方式，一次性注入配置污水 2 L，使污水恰好没过基质层 2 ~ 5 cm，研究水力停留时间(hydraulic retention time，HRT)为 7 d 时，3 种基质和粒径大小对污水中 COD、TN 和 TP 的去除效果. 本研究采取了较长的水力停留时间，目的在于使污水与基质充分接触，既延长污水中污染物质与基质表面微生物的作用时间，也为基质的吸附、沉淀等物理化学反应提供充足的反应时间，有助于体现基质之间的差异性.

表 1　实验期间进水水质

Table 1　Water quality of influent during the experiment period

初始进水	COD/mg·L^{-1}	TN/mg·L^{-1}	TP/mg·L^{-1}	NH_4^+-N/mg·L^{-1}	pH
实际污水	179.23 ± 10.95	43.18 ± 4.58	2.70 ± 0.26	28.22 ± 4.34	7.09 ± 0.05
配置污水	525.60 ± 5.57	222.09 ± 2.79	24.97 ± 0.79	119.46 ± 6.49	7.00 ± 0.02

1.3　指标测定与统计分析

水样测试指标为化学需氧量(COD)、总磷(TP)、总氮(TN)，分别采用重铬酸钾法、过硫酸钾氧化-钼锑抗比色法和过硫酸钾氧化-紫外分光光度法进行测定[17].

使用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 20.0 对数据进行统计分析和绘图：对相同粒径不同基质类型的数据、相同类型不同基质粒径的数据分别进行 LSD 法显著性检验($P < 0.05$)和 Duncan^{a,b,c} 多重比较($\alpha = 0.05$)；对总样本进行主体间效应的检验($P < 0.05$)，得到基质粒径和基质类型对污染物去除率变异的贡献值.

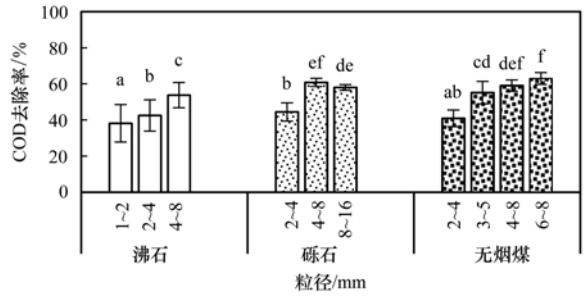
2　结果与分析

2.1　COD 的去除

从图 2 可以看出，不同粒径沸石和无烟煤基质对 COD 的去除率均表现为大粒径优于小粒径：4 ~ 8 mm > 2 ~ 4 mm > 1 ~ 2 mm(沸石)，6 ~ 8 mm > 3 ~ 5 mm > 2 ~ 4 mm(无烟煤)，且不同粒径之间在 0.05 水平上差异显著，4 ~ 8 mm 沸石和 6 ~ 8 mm 无烟煤对 COD 的平均去除率分别达到了 53.74% 和 62.93%. 不同粒径砾石对 COD 的去除效果表现

为：4 ~8 mm > 8 ~16 mm > 2 ~4 mm，且 3 种粒径之间存在显著性差异($P < 0.05$).

在 2 ~4、4 ~8 mm 粒径下，3 种基质对 COD 的去除效果均表现为砾石最好，分别为 44.45%、60.76%. 方差分析结果显示，在 4 ~8 mm 粒径下，无烟煤和砾石对 COD 的去除效果要显著优于沸石($P < 0.05$)，但在 2 ~4 mm 粒径下，3 种基质对 COD 的去除率之间无显著性差异($P > 0.05$).



以 3 ~5、6 ~8 mm 无烟煤对 COD(TN、TP)去除率的均值为 4 ~8 mm 无烟煤的 COD(TN、TP)去除率；小写英文字母为 Duncan[a, b, c]多重比较结果，不同字母之间表示 COD 去除率存在显著性差异($P < 0.05$)，下同

图 2 不同基质和粒径对 COD 的平均去除率

Fig. 2 Average removal rate of COD by different substrates and particle sizes

2.2 TN 的去除

图 3 结果显示，3 种基质对 TN 均有较高的去除率. 沸石对 TN 的平均去除率最高，1 ~2 mm 沸石对 TN 的平均去除率达到了 88.64%；其次是无烟煤，平均去除率在 60% 以上；砾石基质对 TN 的去除效果相对差一些，但 2 ~4 mm 砾石对 TN 的平均去除率也高达 68.49%. 方差分析结果显示，不同粒径的沸石之间、砾石之间以及无烟煤之间对 TN 的去除率均存在显著性差异($P < 0.05$)，总体上表现为小粒径优于大粒径. 在 2 ~4、4 ~8 mm 粒径下，3 种基质对 TN 的去除效果均表现为：沸石 > 无烟煤 > 砾石.

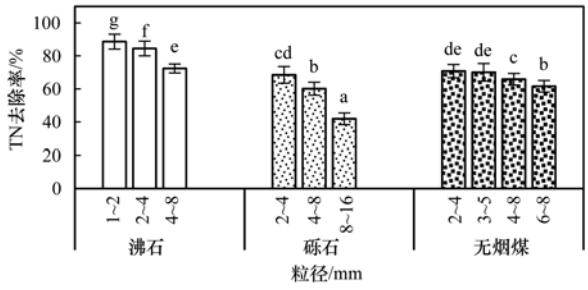


图 3 不同基质和粒径对 TN 的平均去除率

Fig. 3 Average removal rate of TN by different substrates and particle sizes

2.3 TP 的去除

从图 4 可以看出，无烟煤对 TP 的去除效果最好，平均去除率在 60% 以上，其次是砾石，去除率在 20% ~40% 之间，沸石对 TP 的去除效果最差，平均去除率仅在 15% 以上. 表 2 结果显示，不同粒径的沸石之间、砾石之间和无烟煤之间对 TP 的去除效果在 0.05 水平上均存在显著性差异；其中，砾石和无烟煤表现为小粒径优于大粒径，沸石基质则表现出与此相反的趋势：4 ~8 mm 沸石对 TP 的去除效果显著优于 1 ~2、2 ~4 mm($P < 0.05$).

在 2 ~4 mm 粒径下，3 种基质对 TP 的去除效果表现为：无烟煤 > 砾石 > 沸石，且方差分析结果显示，3 种基质对 TP 的去除效果之间均存在显著性差异($P < 0.05$)；在 4 ~8 mm 粒径下，无烟煤基质对 TP 的去除率(62.68%)也显著高于沸石(27.29%)和砾石(27.98%).

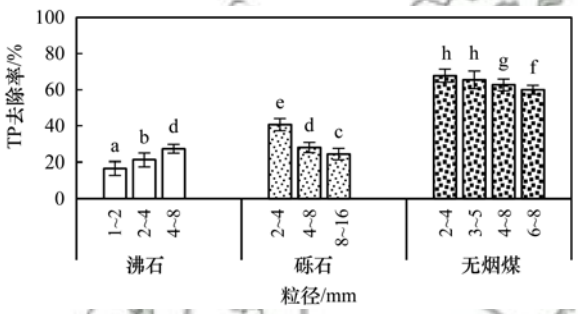


图 4 不同基质和粒径对 TP 的平均去除率

Fig. 4 Average removal rate of TP by different substrates and particle sizes

3 讨论

3.1 基质类型和粒径对 COD 去除效果的影响

在本实验中，沸石、砾石、无烟煤对 COD 均有较高的去除率. 4 ~8 mm 粒径沸石、砾石和无烟煤对 COD 的平均去除率分别达到了 53.74%、60.76%、62.93%. 以往的研究结果也显示，这 3 种基质对 COD 的去除率是较高的. 刘灏等[18]的研究发现，6.25 ~6.5 mm 砾石对北京市生活污水中 COD 的去除率在 60% 以上；李怀正等[12]研究了砾石对上海市莘庄污水厂初沉池出水的去污效果发现，砾石的 COD 去除率在 60% 以上. 但是本实验中 3 种基质对 COD 的平均去除率均高于文献[19, 20]的研究结果. 张翔凌[19]比较了沸石、砾石和无烟煤对东湖湖水与化粪池出水的混合原污水污染物的净化效果发现，沸石对 COD 的平均去除率在 30% ~40% 之间，砾石和无烟煤对 COD 的平均去除率在 40% 以上. 孔令华等[20]的研究发现，沸石

对 COD 的去除率仅为 36.7%. 这可能是由于实验中充足的碳源和较长的水力停留时间为微生物的降解提供了充足的反应底物和反应时间，从而提高了实验柱中有机物的去除效率.

人工湿地主要依赖微生物代谢活动分解去除有机物，基质作为微生物的生长载体，直接的吸附作用对有机物去除影响较小，主要通过间接影响微生物从而影响 COD 去除率[21]. 本研究实验进水中 COD 的浓度较高(525.60 mg·L)，在有机物含量充足的条件下，溶解氧是限制人工实验柱系统好氧降解最主要的因子[22]. 实验柱中的溶解氧主要来自于大气复氧，基质间孔隙度的大小会直接影响实验柱的复氧能力. 表2 结果显示，沸石和无烟煤基质对 COD 的去除均表现为大粒径优于小粒径：4 ~ 8 mm > 2 ~ 4 mm > 1 ~ 2 mm(沸石)，6 ~ 8 mm > 3 ~ 5 mm > 2 ~ 4 mm(无烟煤)，可以判断出，在 2 ~ 4 mm 和 3 ~ 5 mm 粒径下，溶解氧仍是限制沸石和无烟煤实验柱中有机物去除效率的重要因子. 填充 4 ~ 8 mm 粒径砾石的人工实验柱对 COD 的去除效果则要优于 2 ~ 4 mm 和 8 ~ 16 mm，说明在 4 ~ 8 mm 粒径下，砾石既能为微生物的降解作用提供更多与有机污染物反应的位点，又不会受到溶解氧供应量的限制.

效应检验结果显示(表 2)，在 COD 的去除过程中，基质粒径对 COD 去除率变异的解释度为 62.3%，远高于基质类型的解释度 7.2%，可以判断出，基质粒径在 COD 的去除中起了更关键的作用，也说明在人工实验柱中，基质对微生物的影响主要表现为基质粒径对微生物的影响.

表 2　基质类型和基质粒径对 COD、TN、TP 去除影响的统计分析[1)]

Table 2　Statistical analysis of the effects of matrix type and particle size on removal of COD, TN, and TP

水质指标	变异来源	Ⅲ型 SSQ	自由度(d.f.)	均方 MS	F	P	Eta^2
COD	基质类型	442.291	2	221.146	5.920	0.003 **	0.072
	基质粒径	9 454.219	5	1 890.844	50.616	0.000 **	0.623
TN	基质类型	3 985.671	2	1 992.836	114.082	0.000 **	0.599
	基质粒径	10 102.653	5	2 020.531	115.668	0.000 **	0.791
TP	基质类型	17 965.735	2	8 982.868	667.029	0.000 **	0.897
	基质粒径	2 669.225	5	533.845	39.641	0.000 **	0.564

1)Ⅲ型 SSQ 为Ⅲ型平方和；F 为检验统计量，F = 组间变异测量指标/组内变异测量指标；P 为 Sig. 值，* 表示显著相关($P < 0.05$)，* * 表示极显著相关($P < 0.01$)；Eta^2 为相关比率，是消除由效应源随机性带来的误差后，由刺激效应源带来的变异即组间变异占总变异的比值

3.2　基质类型和粒径对 TN 去除效果的影响

图 3 显示，TN 去除率在不同基质类型和不同基质粒径之间均有显著差异($P < 0.05$). 在 2 ~ 4 mm 和 4 ~ 8 mm 粒径下，3 种基质对 TN 的去除效果均表现为：沸石 > 无烟煤 > 砾石. 这与张翔凌[19]的研究结果一致. 沸石的氨氮吸附性能[9]十分优异，其硅铝酸盐骨架结构[23]内部含有可用于交换阳离子的通道，对氨氮的净化具有重要的影响. 但与以往的研究相比，本实验中 TN 去除率是明显偏高的. 汤显强等[10]做了室内无植物条件下单一填料粗砾石对污水的净化，发现其对 TN 的去除率低于 40%. Zhang 等[11]构建了垂直流人工湿地基质模拟实验柱，在实验期间砾石和无烟煤对 TN 的去除率均低于 40%. 本实验中，沸石的 TN 去除率在 70% 以上，无烟煤的 TN 去除率在 60% 以上，砾石的 TN 去除率相对较低，但也在 40% 以上. 这可能与实验装置和进水中污染物的浓度有关. 有研究表明，微生物的硝化与反硝化作用[19]是湿地除氮最主要的方式，水中碳源充足可以有效提高湿地系统的反硝化速率[24, 25]. 在人工实验柱中，溶解氧沿基质层自下而上呈现出厌氧、缺氧及好氧这 3 种状态，从而使得系统硝化/反硝化作用有条不紊地进行. 污水中充足的硝态氮含量和缺氧环境为反硝化菌提供了有利的生存条件，充足的碳源为反硝化脱氮提供了电子供体，较长的水力停留时间也为基质和微生物提供了更多的吸附和降解反应时间，使得人工实验柱中氮素的去除效率显著增大.

不同粒径沸石、砾石和无烟煤对 TN 去除效果的影响均表现为小粒径优于大粒径，这也说明了厌氧反硝化作用是人工实验柱中脱氮的主要方式. 小粒径的基质能够为反硝化细菌提供更好的缺氧环境，同时也能够提供更多与氨氮、硝态氮进行物理化学反应的位点，从而提高 TN 去除率. 效应检验结果表明，基质类型和粒径对 TN 去除率变异的解释度分别为 59.9%、79.1%，基质粒径对实验柱中 TN 去除率的影响作用大于基质类型的影响，说明当湿地脱氮以反硝化作用为主时，选择合适的粒径有助于提高湿地脱氮效率.

3.3　基质类型和粒径对 TP 去除效果的影响

在 2 ~ 4 mm 和 4 ~ 8 mm 粒径下，无烟煤对 TP

的去除效果均显著优于砾石和沸石基质. 无烟煤的 TP 去除率在 60% 以上, 砾石在 20% ~45% 之间, 沸石的 TP 去除率低于 30%. 这与前人的研究结果较为一致. 孔令华等[20]研究了沸石对 SBR 尾水的处理效果, 发现沸石对 TP 的去除率为 24.9%. 汤显强等[10]发现粗砾石对 TP 的平均去除率在 35% 左右. 张翔凌[19]比较了几种基质对 TP 的去除效果也发现无烟煤的 TP 去除率高于砾石和沸石. 人工实验柱中磷素的去除[7]是微生物积累和基质的物理化学反应共同作用的结果. 基质中的 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Al^{3+}、Fe^{3+}等金属离子[22]、金属氧化物和氢氧化物以及黏土矿物可与可溶性无机磷酸盐发生吸附沉淀反应或配位体交换作用, 以实现磷的净化. Reddy 等[26]的研究发现, 湿地系统中 7% ~87% 的磷是通过基质的吸附沉淀作用被除去的. 基质本身的理化性质对磷素的吸附有很大影响, 这也是基质类型对 TP 去除率变异的解释度(89.7%)远高于基质粒径解释度(56.4%)的原因.

图 4 结果显示, 不同粒径的沸石、砾石和无烟煤对 TP 的去除率之间均存在显著差异($P < 0.05$), 可见基质粒径对 TP 去除率的影响也是不可忽略的. 相同基质类型下, 相同体积的小粒径的基质具有更大的比表面积, 能够为磷酸盐提供更多吸附沉淀或配位体交换的反应位点. 因此基质粒径越小, 基质对 TP 的去除率将会越高. 张倩[27]的研究中也发现, 基质对磷的吸附会受到粒径大小的影响, 粒径较小时基质的磷吸附量相对较高. 因此在砾石和无烟煤实验柱中, TP 的去除均表现为小粒径优于大粒径. 但在沸石实验柱系统中, 4 ~8 mm 沸石对 TP 的去除效果显著优于 1 ~2 mm 和 2 ~4 mm 粒径的沸石. 这与张翔凌等[28]的结论不一致. 笔者猜测出现该结果有以下原因:①沸石基质对氨氮的吸附性能优异[9], 有研究发现[29], 沸石中与 NH_4^+ 发生离子交换的主要是 Na^+、Ca^{2+}和 K^+, 三者占离子交换总量的 99%. 氨氮和磷的吸附点位有所重合, 沸石对氨氮的吸附可能会影响其对磷的去除; ②实验柱中的有机物分解和硝化作用都会消耗氧, 相较 4 ~8 mm 和 2 ~4 mm 沸石, 1 ~2 mm 沸石实验柱中由于基质复氧能力弱, 溶解氧含量更低. 微生物在厌氧环境下会将吸收的磷酸盐重新释放到水中[30], 使水中的磷酸盐含量升高, TP 去除率降低; ③在对磷素的去除过程中, 沸石表面的金属离子和氧化物能与无机磷反应生成难溶化合物[27], 导致水力传导系数下降, 污水在沸石中的渗流受阻将会限制磷素的进一步去除.

4 结论

(1)沸石、砾石和无烟煤对 COD 均有较好的去除效果. 选择合适的基质粒径有利于提高湿地 COD 的去除率, 基质粒径过小和过大都会限制湿地中有机物的降解. 本实验中, 4 ~8 mm 粒径下沸石和砾石的 COD 去除率最高, 6 ~8 mm 粒径下无烟煤对 COD 去除效果最好.

(2)人工实验柱中氮素的去除以反硝化脱氮为主, 小粒径由于复氧能力弱更有利于氮素的去除. 在 2 ~4 mm 粒径下, 3 种基质对 TN 均有较高的去除率, 总体表现为:沸石 > 无烟煤 > 砾石.

(3)3 种基质中, 无烟煤对 TP 的平均去除率最高, 且表现为小粒径优于大粒径; 沸石的 TP 去除率较低, 不同粒径间表现为:4 ~8 mm > 2 ~4 mm > 1 ~2 mm.

参考文献:

[1] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率[J]. 生态学杂志, 2002, **21**(4): 52-59.
Xia H P. Mechanisms and efficiencies on wastewater treatment with constructed wetlands: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2002, **21**(4): 52-59.

[2] 白少元, 宋志鑫, 丁彦礼, 等. 潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 592-596.
Bai S Y, Song Z X, Ding Y L, *et al*. Correlation of substrate structure and hydraulic characteristics in subsurface flow constructed wetlands[J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 592-596.

[3] 李振灵, 丁彦礼, 白少元, 等. 潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3713-3720.
Li Z L, Ding Y L, Bai S Y, *et al*. Correlations between substrate structure and microbial community in subsurface flow constructed wetlands[J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3713-3720.

[4] Long Y, Zhang Z K, Pan X K, *et al*. Substrate influences on archaeal and bacterial assemblages in constructed wetland microcosms[J]. Ecological Engineering, 2016, **94**: 437-442.

[5] 王玉洁, 唐运平, 顾修君, 等. 不同人工湿地基质对甲苯的比较吸附研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(1): 170-175.
Wang Y J, Tang Y P, Gu X J, *et al*. Adsorption of toluene on different substrates for constructed wetland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(1): 170-175.

[6] Drizo A, Frost C A, Grace J, *et al*. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. Water Research, 1999, 33(17): 3595-3602.

[7] Vohla C, Kõiv M, Bavor H J, *et al*. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands—A review[J]. Ecological Engineering, 2011, **37**(1): 70-89.

[8] 王万宾, 胡飞, 孔令瑜, 等. 人工湿地脱氮除磷基质的吸附能力及其影响因子[J]. 湿地科学, 2016, **14**(1): 122-128.
Wang W B, Hu F, Kong L Y, *et al*. Adsorption capacity of

substrates of constructed wetlands based on denitrification and dephosphorization and their influencing factors [J]. Wetland Science, 2016, **14**(1): 122-128.

[9] 史鹏博, 朱洪涛, 孙德智. 人工湿地不同填料组合去除典型污染物的研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3):704-711.
Shi P B, Zhu H T, Sun D Z. Removal efficiency of typical pollutants by different substrate combinations for constructed wetlands[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(3): 704-711.

[10] 汤显强, 李金中, 李学菊, 等. 人工湿地不同填料去污性能比较[J]. 水处理技术, 2007, **33**(5): 45-48.
Tang X Q, Li J Z, Li X J, *et al*. Comparison between performance of pollutant removal by different packings in contructed wetland[J]. Technology of Water Treatment, 2007, **33**(5): 45-48.

[11] Zhang X L, Zhang S, He F, *et al*. Differentiate performance of eight filter media in vertical flow constructed wetland: Removal of organic matter, nitrogen and phosphorus [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2007, **16**(11B): 1468-1473.

[12] 李怀正, 叶建锋, 徐祖信. 几种经济型人工湿地基质的除污效能分析[J]. 中国给水排水, 2007, **23**(19): 27-30.
Li H Z, Ye J F, Xu Z X. Analysis on removal efficiency of pollutants by some substrates in vertical-flow constructed wetland [J]. China Water & Wastewater, 2007, **23**(19): 27-30.

[13] 杨萌尧, 吕铭志, 何春光, 等. 基质类型和粒径对垂直潜流人工湿地堵塞效应的研究[J]. 湿地科学, 2017, **15**(3): 391-395.
Yang M Y, Lv M Z, He C G, *et al*. Effects of matrix type and particle size on clogging in vertical-flow constructed wetlands[J]. Wetland Science, 2017, **15**(3): 391-395.

[14] Knowles P, Dotro G, Nivala J, *et al*. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors [J]. Ecological Engineering, 2011, **37**(2): 99-112.

[15] 冯华军, 冯小晏, 薛飞, 等. 浙江省典型地区生活污水水质调查研究[J]. 科技通报, 2011, **27**(3): 436-440.
Feng H J, Feng X Y, Xue F, *et al*. Sewage quality investigation research in typical region of Zhejiang Province[J]. Bulletin of Science and Technology, 2011, **27**(3): 436-440.

[16] 张彩莹, 杜瑞卿, 王岩. 季节气温变化对潜流人工湿地处理效果的影响[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(4): 1706-1712.
Zhang C Y, Du R Q, Wang Y. Effect of season and temperature on treatment of subsurface flow constructed wetland[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(4): 1706-1712.

[17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 210-257.

[18] 刘灏, 王勇, 张宝莉, 等. 垂直流人工湿地中基质组合对污水的处理效果及模型模拟[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(6): 2940-2946.
Liu H, Wang Y, Zhang B L, *et al*. Effects of substrate on wastewater treatment in vertical constructed wetlands and model simulation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(6): 2940-2946.

[19] 张翔凌. 不同基质对垂直流人工湿地处理效果及堵塞影响研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2007.
Zhang X L. Studies on performance of purification and influence on clogging of vertical flow constructed wetlands with different filter media [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2007.

[20] 孔令华, 施春红, 马方曙, 等. 不同填料潮汐流人工湿地处理SBR尾水的对比[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(1): 379-385.
Kong L H, Shi C H, Ma F S, *et al*. Comparison of treatment on SBR tail water in tidal flow constructed wetlands with different packing[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(1): 379-385.

[21] Ladu J L C, Lu X W, Zheng M L, *et al*. Application of A2/O bio-reactor & constructed wetlands for removing organic and nutrient concentrations from rural domestic sewage [J]. International Journal of Environmental Sciences, 2014, **4**(5): 709-718.

[22] 汤显强, 黄岁樑. 人工湿地去污机理及其国内外应用现状[J]. 水处理技术, 2007, **33**(2): 9-13.
Tang X Q, Huang S L. Mechanisms of pollutant removal in constructed wetlands and their applications both at home and abroad[J]. Technology of Water Treatment, 2007, **33**(2): 9-13.

[23] Alshameri A, Ibrahim A, Assabri A M, *et al*. The investigation into the ammonium removal performance of Yemeni natural zeolite: Modification, ion exchange mechanism, and thermodynamics[J]. Powder Technology, 2014, **258**: 20-31.

[24] Wang W, Ding Y, Wang Y H, *et al*. Intensified nitrogen removal in immobilized nitrifier enhanced constructed wetlands with external carbon addition [J]. Bioresource Technology, 2016, **218**: 1261-1265.

[25] Zhu H, Yan B X, Xu Y Y, *et al*. Removal of nitrogen and COD in horizontal subsurface flow constructed wetlands under different influent C/N ratios[J]. Ecological Engineering, 2014, **63**: 58-63.

[26] Reddy K R, Connor G A O, Gale P M. Phosphorus sorption capacities of wetland soils and stream sediments impacted by dairy effluent[J]. Journal of Environmental Quality, 1998, **27**(2): 438-447.

[27] 张倩. 水平潜流人工湿地去除受污染水体中磷的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. 30-32.
Zhang Q. The study of the phosphorous removal in horizontal subsurface flow wetland treating the polluted surface water[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. 30-32.

[28] 张翔凌, 黄华玲, 郭露, 等. Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 3058-3066.
Zhang X L, Huang H L, Guo L, *et al*. Mechanisms of phosphorus removal by modified zeolites substrates coated with Zn-LDHs in laboratory-scale vertical-flow constructed wetlands [J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 3058-3066.

[29] 李圣品, 刘菲, 陈鸿汉, 等. 法库沸石对氨氮的吸附特性和阳离子交互过程[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(1): 157-163.
Li S P, Liu F, Chen H H, *et al*. Adsorption characters of ammonium by Faku zeolite and cation exchanges in ammonium removal process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(1): 157-163.

[30] 程龙, 李怀, 阎百兴, 等. 无植物水平折流式潜流人工湿地对氮和磷的净化效果[J]. 湿地科学, 2016, **14**(2): 219-225.
Cheng L, Li H, Yan B X, *et al*. The nitrogen and phosphorus removal efficiency of horizontal baffle subsurface flow constructed wetland without plants[J]. Wetland Science, 2016, **14**(2): 219-225.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 39 No. 9

Sep. 15, 2018

CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China ····· HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)

Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province ····· LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, *et al.* (3976)

Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai ····· YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, *et al.* (3987)

Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province ····· SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, *et al.* (3995)

Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing ····· LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, *et al.* (4002)

Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of $PM_{2.5}$ During Summer and Winter in Ji'nan City ····· LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, *et al.* (4014)

$PM_{2.5}$ Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City ····· ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, *et al.* (4026)

Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer ····· WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, *et al.* (4034)

Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng ····· YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, *et al.* (4042)

Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing ····· XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, *et al.* (4051)

Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City ····· MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, *et al.* (4060)

Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face ····· LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, *et al.* (4070)

Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing ····· LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, *et al.* (4078)

Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment ····· GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, *et al.* (4086)

Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads ····· GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, *et al.* (4096)

Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River ····· ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, *et al.* (4105)

Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions ····· XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, *et al.* (4114)

Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring ····· LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, *et al.* (4122)

Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin ····· WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, *et al.* (4132)

Characteristics and Genesis of NO_3 Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin ····· XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, *et al.* (4142)

Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution ····· ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)

Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir ····· ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, *et al.* (4161)

Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment ····· LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, *et al.* (4169)

Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment ····· HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, *et al.* (4179)

Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin ····· LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, *et al.* (4189)

Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China ····· NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, *et al.* (4199)

Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu ····· CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, *et al.* (4206)

Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater ····· WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, *et al.* (4215)

Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China ····· HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, *et al.* (4222)

Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes ····· HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)

Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification ····· ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, *et al.* (4236)

Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network ····· YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, *et al.* (4242)

Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process ····· WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, *et al.* (4249)

Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate ····· HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, *et al.* (4257)

Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O^2 and A/O/H/O Processes ····· WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, *et al.* (4265)

Effects of Long-term Side Stream Extracton on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System ····· YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, *et al.* (4274)

Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A^2/O Process ····· ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, *et al.* (4281)

Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process ····· CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, *et al.* (4289)

Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB) ····· SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, *et al.* (4294)

Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification ····· AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, *et al.* (4302)

Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage ····· LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, *et al.* (4310)

Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi ····· SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, *et al.* (4317)

Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar ····· LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, *et al.* (4327)

Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System ····· LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, *et al.* (4338)

Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite ····· XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, *et al.* (4348)

Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves ····· ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, *et al.* (4359)

Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms ····· HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, *et al.* (4366)

Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment ····· LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, *et al.* (4375)

Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis ····· JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, *et al.* (4385)