

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

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

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭 (1215)

乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶 (1223)

典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣 (1230)

某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价 董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽 (1238)

基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔晓勇,许群,宋现锋 (1245)

珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 孙成玲,谢绍东 (1250)

低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山 (1256)

太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强 (1263)

一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 王燕,朱春刚,许笛,丁士明 (1271)

外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 傅玲,赵凯,王国祥,欧媛,范娟,毛丽娜,张佳,韩睿明 (1278)

基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 孙法圣,程品,张博 (1285)

重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬 (1290)

重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁 (1297)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 根系对沉积物中各形态磷的影响 李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞 (1304)

循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明 (1311)

不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 段伦超,王凤贺,纪莹雪,张帆,赵斌,王国祥 (1318)

再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 黄晶晶,汤芳,席劲璇,庞宇辰,胡洪营 (1326)

二级处理出水的 UV-TiO₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌复活试验 王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帜 (1332)

水中 C₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究 方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛 (1337)

XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 赵应许,纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽 (1343)

纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究 付融冰 (1351)

共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 王琪,刘辉,姜林,唐军 (1358)

硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 吴宣,谭科艳,胡希佳,顾远,杨宏 (1366)

基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英 (1372)

模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 陈燕,黄芳,谢鑫源 (1377)

电活性生物膜介导 Cu²⁺ 生物还原的试验研究 刘毅,周顺桂,袁勇,刘志 (1384)

模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳 (1391)

填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹 (1399)

化学合成施氏矿物与 H₂O₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥 (1407)

处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅 (1414)

剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究 董慧岭,季民 (1421)

锰氧化菌 *Aminobacter* sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋铁锋 (1428)

1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊 (1437)

碘普罗胺降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究 徐冰洁,高品,薛昱,何梦琦,吴凡 (1443)

利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化 张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛 (1449)

毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建 (1457)

缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国 (1462)

微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 王妮敏,邓琦,邹华,梁婵娟 (1468)

东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应 张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠 (1473)

生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 吴丽,张高科,陈晓国,兰书斌,张德禄,胡春香 (1479)

老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 陈丽红,刘征涛,方征,王晓南,王婉华 (1486)

土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯苓,吴国平,魏复盛 (1491)

藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞 (1498)

三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊 (1502)

浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭 (1509)

西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赞,王美娥 (1516)

生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬 (1523)

上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡 (1531)

SDBS/Na⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响 唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹 (1540)

稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎 (1548)

藻类水体 Cd²⁺ 毒性快速监测新方法研究 段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽 (1555)

用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 龙峰,施汉昌,王洪臣,盛建武 (1561)

Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO₃⁻ 吸附性能的研究 钟琼,李欢 (1566)

污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 廖晓勇,陶欢,阎秀兰,赵丹,林龙勇,李尤 (1576)

城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 杨孟,李凤英,刁一伟,吴丹 (1586)

水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志 (1597)

六价铬细菌还原的分子机制研究进展 李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧 (1602)

农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 魏源送,郁达伟,曹磊 (1613)

《环境科学》征稿简则(1427) 《环境科学》征订启事(1497) 信息(1383, 1390, 1398, 1560)

循环流廊道湿地中氮归趋过程模拟研究

彭剑峰^{1,2}, 宋永会^{1,2*}, 袁鹏^{1,2}, 张雪妍³, 胡小明³

(1. 中国环境科学研究院城市水环境科技创新基地, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 沈阳环境保护局东陵分局, 沈阳 110179)

摘要: 针对新型高效脱氮循环流廊道(CFC)湿地, 构建了涵盖 6 种氮形态、3 类介质、10 种代谢途径的 N 循环模型, 探索了湿地内 N 迁移转化模式. 结果表明, 沸石吸附(53.3%)、植物吸收 NH_4^+ -N(27.6%)、 NO_3^- -N反硝化(10.2%)、植物吸收 NO_3^- -N(2.9%)和 NO_2^- -N短程反硝化(1.5%)对 TN 去除贡献依次降低. NH_4^+ -N去除机制存在季节差异, 其中 1 月 NH_4^+ -N主要通过沸石吸附去除(84.5%); 4~6 月通过植物吸收去除(76.4%~85.3%); 7 月通过沸石吸附(36.1%)、亚硝化(45.8%)及植物吸收(21.4%)共同去除. 此外, 定期收获植物、按期再生沸石及种植水生植物可分别提升 TN 去除率 1.7%~7.7%、43.1%~72.2% 和 19.8%~36.2%. 总之, CFC 湿地去除途径多样性保障了 TN 的长期高效去除.

关键词: 循环流廊道湿地; 氮; 迁移转化模型; 沸石吸附; 去除贡献

中图分类号: X17 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1311-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.015

Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland

PENG Jian-feng^{1,2}, SONG Yong-hui^{1,2}, YUAN Peng^{1,2}, ZHANG Xue-yan³, HU Xiao-ming³

(1. Department of Urban Water Environmental Research, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Dongling Branch of Shenyang Environmental Protection Bureau, Shenyang 110179, China)

Abstract: Nitrogen transformation and removal in a novel circular-flow corridor (CFC) wetland was simulated. A computer model covering 6 nitrogen forms, 3 media and 10 transferring pathways, was developed. The results show that the TN removal is attributed to zeolite adsorption (53.3%), plants NH_4^+ -N uptake (27.6%), denitrification (10.2%), plants NO_3^- -N uptake (2.9%) and shortcut denitrification (1.5%). The major removal pathway for NH_4^+ -N varies from season to season. In January, the zeolite adsorption played the most important role in NH_4^+ -N removal with a contribution of 84.5%. From April to June, the plants uptake accounted for 76.4%-85.3% NH_4^+ -N removal. While in July, there were three removal pathways, namely zeolite adsorption (36.1%), nitrification (45.8%) and plants uptake (21.4%), playing an important role in nitrogen removals. Additionally, regular plants harvesting, periodical zeolite regenerating and aquatic plants growing can improve the TN removal rate by 1.7%-7.7%, 43.1%-72.2% and 19.8%-36.2%, respectively. In short, it is by the diverse removal pathways in CFC wetland that nitrogen can be continuously removed.

Key words: circular-flow corridor wetland; nitrogen; transformation and conversion model; zeolite adsorption; removal contribution

在人工湿地生态处理系统中, N 的迁移转化过程复杂. 它不仅涉及 N 在水体、植物、底泥(或填料)多介质间的迁移, 还涉及到在 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N和 ON 等不同形态间的转化, 而湿地对 N 的最终去除效果取决于各代谢途径的协同作用^[1~4]. 因而, 如何通过优化运行环境, 促进湿地内 N 代谢转向有利于 TN 去除的方向成为湿地技术研究的热点^[5~8].

循环流廊道(CFC)湿地是一种新型人工湿地, 它通过水体在不同类型湿地单元内的持续循环流动, 实现对 N 和有机物的持续高效去除. 该类湿地具有运行灵活、抗冲击能力强, 且造价及运行费用低的优点, 可实现高浓度氨氮废水的高效低成本达标排放, 因而具有较好的发展及推广前景^[9]. 然而,

目前循环流廊道湿地仅处于研发阶段, 对 N 的迁移转化过程尚未系统研究, 这一定程度上制约了该类湿地的发展及推广.

针对循环流廊道湿地中不同形态 N 在填料、水体和植物多介质间复杂的循环转化过程, 本研究构建了多形态、多过程的 CFC 湿地氮归趋模型, 表征了吸附、生物同化吸收、氨化、亚硝化、硝化和反硝化等作用机制对各形态氮代谢过程的贡献, 以期优化 CFC 湿地脱氮效果提供理论及参数支撑.

收稿日期: 2013-08-13; 修订日期: 2013-09-29

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07202-005)

作者简介: 彭剑峰(1977~), 男, 博士, 副研究员, 主要方向为流域水环境整治及风险控制, E-mail: pjf1995@163.com

* 通讯联系人, E-mail: songyh@caes.org.cn

1 材料与方法

1.1 工艺构型

选择“回”字形布局的CFC湿地开展研究(如图1).该CFC湿地包括稀释区、湿地区和储水区,待处理水在各功能区内循环流动.首先,高浓度污水由进水口直接进入稀释区,高浓度的COD和NH₄⁺-N可以得到稀释;经稀释和沉淀后由提升装置定时、定量提升至廊道湿地区,污水以间歇流形式依次流经廊道湿地区1~5单元;最终处理出水进入储水区,部分回用于农业用水、养殖场洗涤用水或直接达标排放,剩余部分自流进稀释区,重新进入循环^[9].

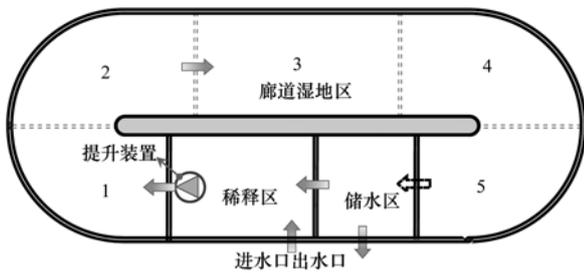


图1 循环流廊道湿地平面示意
Fig. 1 Plane figure of the CFC wetland

该CFC湿地有效容积330 L,水力停留时间7~13 d,进水COD表面负荷为5.3~16.8 g·(m²·d)⁻¹,NH₄⁺-N为9.5~18.3 g·(m²·d)⁻¹.为强化湿地脱氮能力,湿地廊道区前端2个单元(单元1、2)采用大孔隙率陶粒(粒径8~12 cm)作为填

$$\frac{d(\text{NH}_4^+-\text{N})}{dt} = \frac{Q}{V} [c(\text{NH}_4^+-\text{N})_i - c(\text{NH}_4^+-\text{N})] - r_{\text{ni},\text{NH}_4^+} - r_{\text{ut},\text{NH}_4^+} - r_{\text{ad},\text{NH}_4^+} - r_{\text{vol},\text{NH}_4^+} + r_{\text{am},\text{ON}}$$

$$\frac{d(\text{NO}_2^--\text{N})}{dt} = -c(\text{NO}_2^--\text{N}) \cdot \frac{Q}{V} + r_{\text{ni},\text{NH}_4^+} - r_{\text{dn},\text{NO}_2^-} - r_{\text{ni},\text{NO}_2^-}$$

$$\frac{d(\text{NO}_3^--\text{N})}{dt} = -c(\text{NO}_3^--\text{N}) \cdot \frac{Q}{V} + r_{\text{ni},\text{NO}_2^-} - r_{\text{dn},\text{NO}_3^-} - r_{\text{ut},\text{NO}_3^-}$$

$$\frac{d(\text{ON})}{dt} = -\text{ON} \cdot \frac{Q}{V} + r_{\text{mo},\text{WPN}} - r_{\text{am},\text{ON}}$$

$$\frac{d(\text{WPN})}{dt} = r_{\text{ut},\text{NH}_4^+} + r_{\text{ut},\text{NO}_3^-} - r_{\text{mo},\text{WPN}}$$

$$\frac{d(\text{ZEN})}{dt} = \frac{V}{m} \cdot \frac{d(\text{NH}_4^+-\text{N})}{dt}$$

式中,Q为湿地流量,m³·d⁻¹;V为湿地有效容积,m³;c(NH₄⁺-N)_i和c(NH₄⁺-N)分别为进水及湿地内氨氮浓度,mg·L⁻¹;c(NO₂⁻-N)为湿地内NO₂⁻-N浓度,mg·L⁻¹;c(NO₃⁻-N)为湿地内NO₃⁻-N浓度,mg·L⁻¹;WPN为湿地内植物的N储量,mg·g⁻¹;ON为进水及湿地内有机氮浓度,

料,后端3个单元(单元3、4、5)采用改性沸石功能填料(粒径5~8 cm),填料层厚40 cm,砾石承托层厚10 cm.湿地表面种植芦苇(*Phragmites australis*)、蒲草(*Acorus calamus* Linn)等水生植物,种植密度分别为80~100株·m⁻²和5~6株·m⁻²^[9].

1.2 模型构建

考虑到CFC湿地内N的赋存形态及循环途径,N的迁移转化模型不仅考虑了NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、ON、沸石吸附N和植物所含氮等6种N形态,还涵盖了硝化/反硝化、植物吸收/腐败、挥发、氨化和沸石吸附/解吸等10种作用过程,详见图2.

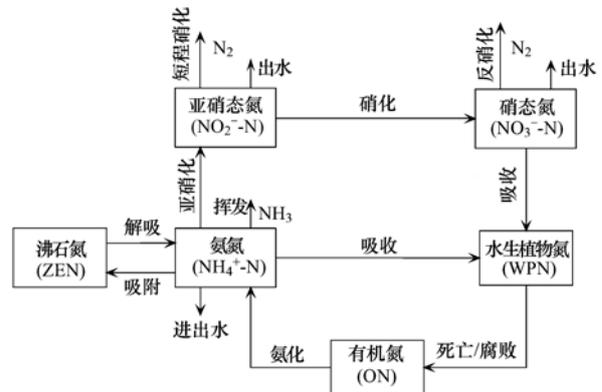


图2 循环流廊道湿地中氮迁移模式
Fig. 2 Nitrogen transformation in CFC wetland

参照CFC湿地内N迁移模式,根据物质流代谢平衡关系,建立CFC湿地中氮迁移转化的动力学模型^[10-14]:

mg·L⁻¹;ZEN为湿地内沸石吸附的N含量,mg·g⁻¹;r为氮反应速率,各速率的计算方法见表1.

1.3 分析方法

CFC湿地进水采用模拟高浓度有机废水-畜禽养殖废水,其中进水的NH₄⁺-N为870(600~1100)

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为 160 (75 ~ 230) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 为 570 (320 ~ 1 010) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 值 5.5 ~ 8.0. 该 CFC 湿地置于具有温度调节装置的温室内, 年温度变化范围 12 ~ 32 $^{\circ}\text{C}$.

表 1 循环流廊道湿地中各形态 N 反应速率^[12-21]
Table 1 Reaction rate of various nitrogen forms in CFC wetland

反应速率	计算公式
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 亚硝化速率	$r_{\text{ni},\text{NH}_4^+} = \frac{\mu_{\text{na}}}{Y_{\text{na}}} \cdot \frac{\text{DO}}{K_o + \text{DO}} \cdot \frac{c(\text{NH}_4^+\text{-N})}{K_{\text{na}} + c(\text{NH}_4^+\text{-N})} \cdot C_{\text{pH}} \cdot C_T$
$\text{NO}_2^-\text{-N}$ 硝化速率	$r_{\text{ni},\text{NO}_2^-} = \frac{\mu_{\text{nn}}}{Y_{\text{nn}}} \cdot \frac{\text{DO}}{K_o + \text{DO}} \cdot \frac{c(\text{NO}_2^-\text{-N})}{K_{\text{nn}} + c(\text{NO}_2^-\text{-N})} \cdot \frac{c(\text{NH}_4^+\text{-N})}{K_{\text{na2}} + c(\text{NH}_4^+\text{-N})} \cdot C_{\text{pH}} \cdot C_T$
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 挥发速率	$r_{\text{vol},\text{NH}_4^+} = K_v \cdot e^{0.13 \cdot (T-20)} \cdot c(\text{NH}_4^+\text{-N}) / [h \cdot (1 + 10^{10.5 - 0.03T - \text{pH}})]$
水生植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸收速率	$r_{\text{ut},\text{NH}_4^+} = \mu_{\text{max}} \cdot \theta^{(T-20)} \cdot \left[\frac{c(\text{NH}_4^+\text{-N})}{K_{\text{ua}} + c(\text{NH}_4^+\text{-N})} \right] \cdot \text{WPN} \cdot C_p \cdot C_k$
水生植物对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 吸收速率	$r_{\text{ut},\text{NO}_3^-} = \mu_{\text{max}} \cdot \theta^{(T-20)} \cdot \left[\frac{c(\text{NO}_3^-\text{-N})}{K_{\text{un}} + c(\text{NO}_3^-\text{-N})} \right] \cdot \text{WPN} \cdot (1 - C_p) \cdot C_k$
$\text{NO}_2^-\text{-N}$ 反硝化速率	$r_{\text{dn},\text{NO}_2^-} = \frac{\mu_{\text{H}}}{Y_{\text{n}}} \cdot \eta_{\text{NO}_2^-} \cdot \frac{\text{DO}}{K_{\text{O}_2} + \text{DO}} \cdot \frac{c(\text{NO}_2^-\text{-N})}{c(\text{NO}_2^-\text{-N}) + K_{\text{dn2}}} \cdot \frac{c(\text{NH}_4^+\text{-N})}{K_{\text{dna}} + c(\text{NH}_4^+\text{-N})} \cdot C_{\text{pH}}$
$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 反硝化速率	$r_{\text{dn},\text{NO}_3^-} = \frac{\mu_{\text{H}}}{Y_{\text{n}}} \cdot \eta_{\text{NO}_3^-} \cdot \frac{\text{DO}}{K_{\text{O}_2} + \text{DO}} \cdot \frac{c(\text{NO}_3^-\text{-N})}{c(\text{NO}_3^-\text{-N}) + K_{\text{dn3}}} \cdot \frac{c(\text{NH}_4^+\text{-N})}{K_{\text{dna}} + c(\text{NH}_4^+\text{-N})} \cdot C_{\text{pH}}$
ON 氨化速率	$r_{\text{am},\text{ON}} = K_{\text{am}} \cdot \theta^{(T-20)} \cdot \text{ON}$
WPN 腐败速率	$r_{\text{mo},\text{WPN}} = K_{\text{mo}} \cdot \theta^{(T-20)} \cdot \text{WPN}$
沸石填料对氨氮吸附速率	$r_{\text{ad},\text{NH}_4^+} = K_{\text{ad}} \cdot [c(\text{NH}_4^+\text{-N})]^{n-1} \cdot \frac{d(\text{NH}_4^+\text{-N})}{dt}$

CFC 湿地中 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用标准方法分析^[22]; WPN 采用凯式定氮法测定; ZEN 采用沸石吸附/解吸平衡实验计算. ON 主要来自于进水有机物携带或水生植物腐败的释放物, 其计算方法为^[8, 9]:

$$\text{ON} = \text{TN} - c(\text{NH}_4^+\text{-N}) - c(\text{NO}_2^-\text{-N}) - c(\text{NO}_3^-\text{-N})$$

2 模型求解及有效性分析

微分方程组的求解采用 4 阶龙格-库塔法^[9, 10]. 模型参数部分采用经验数值, 部分通过最小二乘法最优化确定. 模型校正及验证所需数据分别采用相邻两年的运行结果. 图 3 为 CFC 湿地中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、ON、WPN 和 ZEN 的检测值和模型预测值对比. 从中可知, 检测值和模型预测值之间的相关系数依次为 0.943 9、0.908 7、0.901 4、0.782 2、0.878 0 和 0.802 9, 其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 WPN 的相关系数均大于或接近 0.90; ON 和 ZEN 的模拟效果略差, 但相关系数也接近 0.80. 由于整个湿地系统测定值和模拟值之间具有较好的相关性, 且实测值在模拟值两侧均匀分布, 因而该模型具有较好的模拟效果, 能够有效模拟湿地中氮的迁移转化过程.

3 N 迁移转化过程分析

3.1 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的循环途径

在传统人工湿地中, 亚硝化及植物吸收是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的主要去除机制^[23, 24], 而在 CFC 湿地内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的主导去除机制存在季节差异 (如图 4). 由图 4 可知, 随水温升高, 1 ~ 7 月沸石吸附、亚硝化及植物吸收等去除途径对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除速率明显增加, 其中亚硝化增速最大, 从 0.09 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 上升至 51.21 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$; 其次为沸石吸附, 从 0.53 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 上升至 40.45 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$. 尽管反应速率均有增加, 但其对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除贡献却存在明显季节差异. 1 月沸石吸附对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除贡献高达 84.5%; 在 4 ~ 6 月的生长期, 植物吸收对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除贡献高达 76.4% ~ 85.3%; 而在 7 月沸石吸附、亚硝化及植物吸收对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除贡献依次为 36.1%、45.8% 和 21.4%.

这说明在 CFC 湿地内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的主导去除机制存在明显季节差异, 但多样化的去除机制确保了不同季节 CFC 湿地均具有较高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率. 其中低温期沸石吸附是氨氮的主要去除途径; 4 ~ 6 月植物吸收对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除贡献最大; 而高温期沸石吸

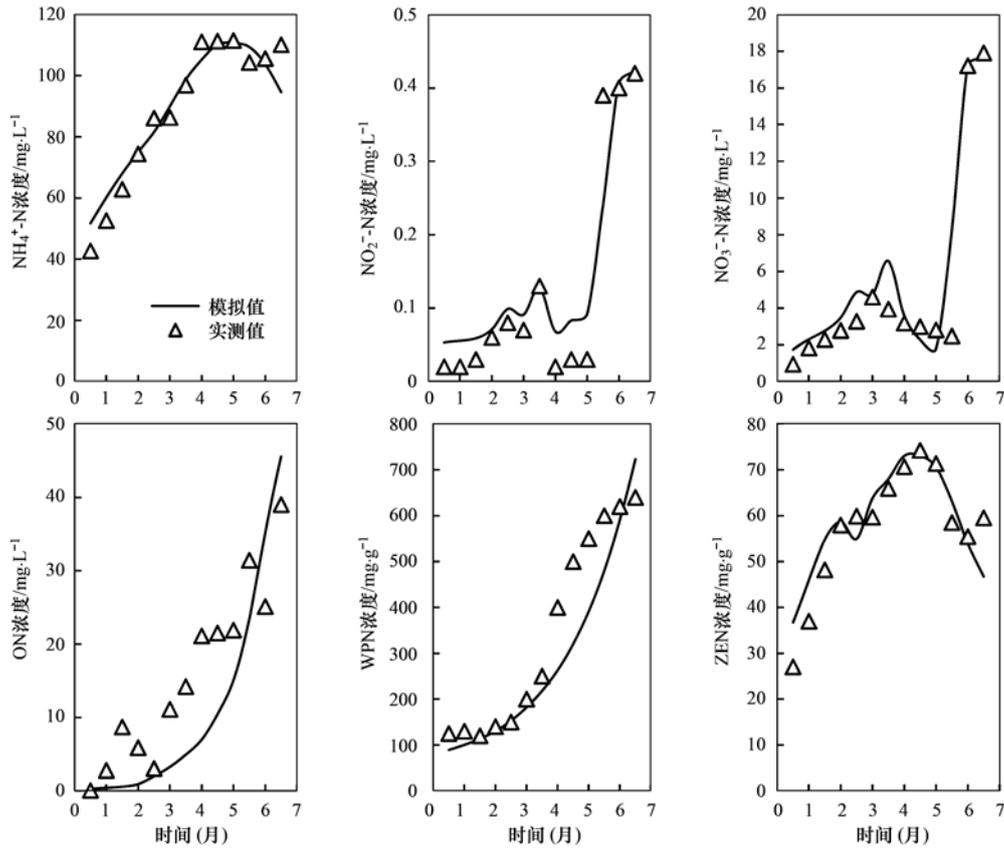


图3 CFC 湿地模拟值与实测值相关性

Fig. 3 Comparison between the simulated data and the measured data in CFC wetland

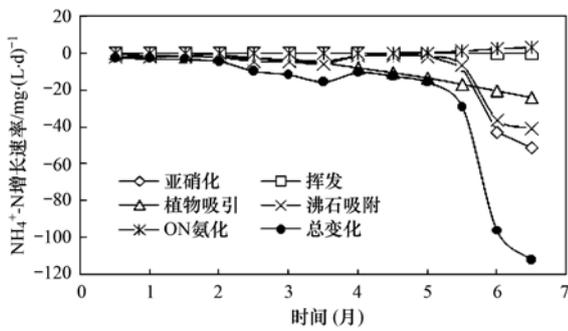


图4 CFC 湿地中NH₄⁺-N的增长速率分布

Fig. 4 Growth rate variation of NH₄⁺-N in CFC wetland

附、亚硝化及植物吸收共同实现NH₄⁺-N去除,其去除贡献依次为亚硝化 > 沸石吸附 > 植物吸收.

3.2 NO_x 的循环途径

CFC 湿地中NO₂⁻-N和NO₃⁻-N的增长速率季节变化如图5所示.从中可知,1~5月NH₄⁺-N亚硝化、NO₂⁻-N短程反硝化和硝化等途径对NO₂⁻-N的平均增长速率为1.50、-0.01和-0.66 mg·(L·d)⁻¹,远低于NH₄⁺-N的增长速率,因而低温期水体中NO₂⁻-N不会大量积累.而6~7月,随着水温及DO增长,

NH₄⁺-N亚硝化和NO₂⁻-N硝化速率分别增长至51.2 mg·(L·d)⁻¹和8.16 mg·(L·d)⁻¹,两者差值高达35.6~43.1 mg·(L·d)⁻¹,导致NO₂⁻-N在CFC湿地内快速积累.此外,模拟结果也表明高温期CFC湿地内存在显著的NO₂⁻-N短程反硝化反应,其速率最高可达4.1 mg·(L·d)⁻¹,对NO₂⁻-N的去除贡献可达10.5%.综上,高温期亚硝化是CFC湿地NO₂⁻-N变化的决定性因素.

与NO₂⁻-N的变化规律类似,1~5月CFC湿地内NO₃⁻-N浓度低,导致植物吸收与反硝化对NO₃⁻-N的平均去除速率仅有0.14 mg·(L·d)⁻¹和0.49 mg·(L·d)⁻¹,难以实现对水体中TN有效去除.而6~7月随着DO和NO₃⁻-N的快速增长,植物吸收与反硝化速率增加到3.10 mg·(L·d)⁻¹和9.71 mg·(L·d)⁻¹,成为NO₃⁻-N的主导去除机制.对比1~7月反硝化及植物吸收速率可知,反硝化对NO₃⁻-N去除贡献是植物吸收的3.1倍,是CFC湿地中NO₃⁻-N的主导去除机制.

3.3 ON和WPN的循环途径

CFC 湿地中ON和WPN的增长速率季节变化

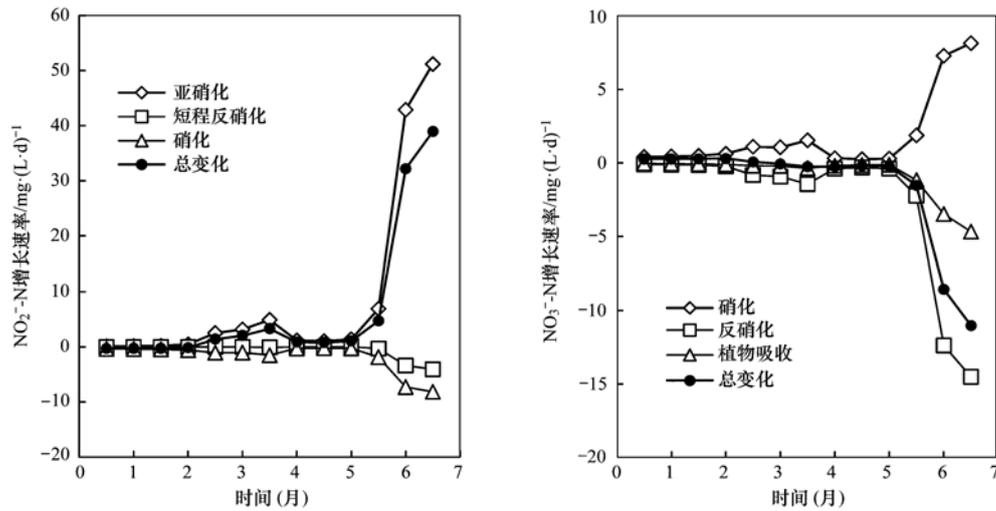
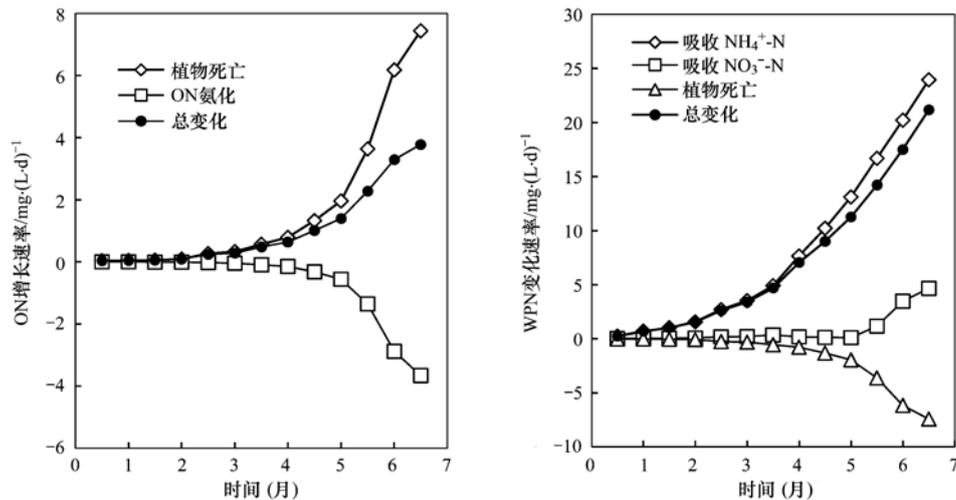
图5 循环流廊道湿地中 NO_2^- -N和 NO_3^- -N的增长速率分布Fig. 5 Growth rate variation of NO_2^- -N and NO_3^- -N in CFC wetland

图6 CFC 湿地中 ON 和 WPN 的增长速率分布

Fig. 6 Growth rate variation of ON and WPN in CFC wetland

如图6所示. 从中可知,CFC 湿地内 ON 变化主要由 ON 氨化及水生植物腐败共同决定,其中1~4月 ON 氨化速率和水生植物腐败速率的比值在0.01~0.19之间,湿地内 ON 的变化主要受植物腐败速率影响;而5~7月两者比值快速增长到0.37~0.49,氨化对 ON 去除贡献增大,但植物腐败仍是 ON 的主导变化机制. 这与模拟养殖废水中 ON 浓度持续偏低相一致.

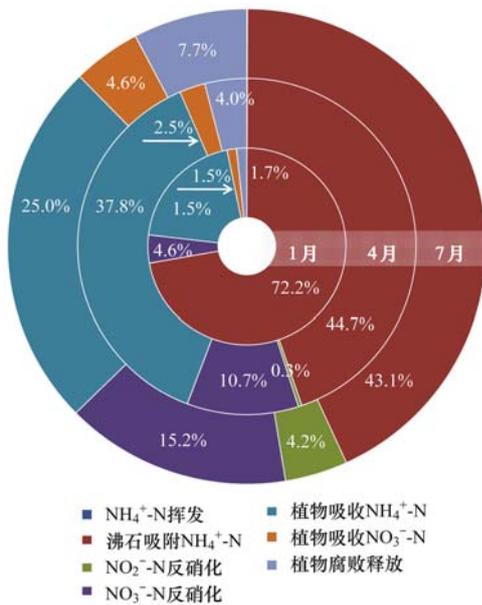
WPN 增长速率也存在明显季节差异.1~4月,CFC 湿地内 NO_3^- -N含量低,植物吸收 NH_4^+ -N成为 WPN 的主要来源;而6~7月,尽管植物吸收 NH_4^+ -N仍是 WPN 增长的主要来源,但是植物吸收 NO_3^- -N和植物腐败释放对 WPN 的增长贡献增长到

20.92%和-35.20%. 这表明随着高温期水生植物快速生长以及水体中 NO_3^- -N的大量积累,植物的吸收 NH_4^+ -N、腐败释放及吸收 NO_3^- -N共同决定了 WPN 的变化特征.

4 TN 去除季节差异

受反应速率季节差异影响,CFC 湿地内 TN 的去除也存在明显季节差异. 1月 TN 物质流速率仅有 $2.38 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$,而7月增长到 $88.24 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$. 这意味着高温期有更多 TN 参与到物质循环中,相应就有更多 TN 通过植物吸收、挥发、反硝化等途径从 CFC 湿地内去除. 图7为 CFC 湿地内 N 物质流季节分布差异. 如果仅考察 CFC 湿地内

TN 变化,可知水体中 TN 的去除途径多样,有 NH_4^+ -N挥发、 NO_2^- -N/ NO_3^- -N反硝化、沸石吸附、植物吸收 NH_4^+ -N/ NO_3^- -N和植物释放,各途径对 TN 的去除贡献依次为沸石吸附(53.3%) > 植物吸收 NH_4^+ -N(27.6%) > NO_3^- -N反硝化(10.2%) > 植物吸收 NO_3^- -N(2.9%) > NO_2^- -N反硝化(1.5%) > NH_4^+ -N挥发(<0.1%)。此外,TN 主导去除机制也存在季节差异。1月沸石吸附对 TN 的去除贡献为72.2%,是 TN 的主导去除机制;4月沸石吸附及植物吸收对 TN 的去除贡献最大,分别为44.7%和40.3%;7月沸石吸附、植物吸收及反硝化对 TN 去除贡献最大,依次为43.1%、29.6%和19.5%。



内环为1月;中环为4月;外环为7月

图7 湿地内N物质流季节差异

Fig. 7 Comparison of N material flow rate in different seasons

分析 N 物质流差异有助于优化各技术措施,提升 CFC 湿地对 TN 去除效果^[25]。由模拟结果可知,定期收获植物可提升 CFC 湿地 TN 去除率 1.7% ~ 7.7%;未定期再生功能填料,湿地对 TN 的去除率 1 月下降 72.2%,7 月下降 43.1%;不种植水生植物湿地对 TN 的去除率下降 19.8% ~ 36.2%。因而,定期维护 CFC 湿地运行,保障水生植物生长对于提升 TN 去除效果具有重要作用。

5 结论

(1)CFC 湿地内 NH_4^+ -N的主导去除机制存在明显季节差异,但多样化的去除机制确保了不同季节 CFC 湿地均具有较高的 NH_4^+ -N去除率。低温期沸石

吸附是氨氮的主要去除途径;4~6月植物吸收对 NH_4^+ -N去除贡献最大;而高温期沸石吸附、亚硝化及植物吸收共同实现 NH_4^+ -N去除。

(2)水体内 TN 主导去除机制也存在季节差异。

1月沸石吸附是 TN 的主导去除机制;4月沸石吸附及植物吸收对 TN 的去除贡献最大;7月沸石吸附、植物吸收及反硝化对 TN 去除贡献最大。各途径对 TN 的去除贡献依次为沸石吸附(53.3%) > 植物吸收 NH_4^+ -N(27.6%) > NO_3^- -N反硝化(10.2%) > 植物吸收 NO_3^- -N(2.9%) > NO_2^- -N反硝化(1.5%) > NH_4^+ -N挥发(<0.1%)。

(3)定期维护 CFC 湿地运行有助于提升 TN 去除效果。定期收获植物可提升 CFC 湿地 TN 去除率 1.7% ~ 7.7%;未种植植物降低 TN 去除率 19.8% ~ 36.2%;未定期再生功能填料降低 TN 的去除率 43.1% ~ 72.2%。

参考文献:

[1] Itoh M, Takemon Y, Makabe A, *et al.* Evaluation of wastewater nitrogen transformation in a natural wetland (Ulaanbaatar, Mongolia) using dual-isotope analysis of nitrate[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(8): 1530-1538.

[2] Saeed T, Sun G Z. The removal of nitrogen and organics in vertical flow wetland reactors; Predictive models[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(2): 1205-1213.

[3] Vymazal J. The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: a review of a recent development[J]. *Water Research*, 2013, **47**(14): 4795-4811.

[4] Hu Y S, Zhao Y Q, Zhao X H, *et al.* High rate nitrogen removal in an alum sludge-based intermittent aeration constructed wetland [J]. *Environmental Science Technology*, 2012, **46**(8): 4583-4590.

[5] 范改娜, 祝贵兵, 王雨, 等. 河流湿地氮循环修复过程中的新型功能微生物[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(8): 1558-1563.

[6] Hu Z, Lee J W, Chandran K, *et al.* Nitrogen transformations in intensive aquaculture system and its implication to climate change through nitrous oxide emission [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **130**: 314-320.

[7] 林建伟, 朱志良, 赵建夫. 天然沸石覆盖层控制底泥氮磷释放的影响因素[J]. *环境科学*, 2006, **27**(5): 880-884.

[8] Borin M, Salvato M. Effects of five macrophytes on nitrogen remediation and mass balance in wetland mesocosms [J]. *Ecological Engineering*, 2012, **46**: 34-42.

[9] Peng J F, Song Y H, Liu Z H, *et al.* Performance of a novel Circular-Flow Corridor wetland toward the treatment of simulated high-strength swine wastewater [J]. *Ecological Engineering*, 2012, **49**: 1-9.

[10] Peng J F, Wang B Z, Song Y H, *et al.* Modeling N

- transformation and removal in a duckweed ponds; model development and calibration [J]. *Ecological Modelling*, 2007, **206**(1-2): 147-152.
- [11] Peng J F, Wang B Z, Song Y H, *et al.* Modeling N transformation and removal in a duckweed ponds; model application[J]. *Ecological Modelling*, 2007, **206**(3-4): 294-300.
- [12] Edelfeldt S, Fritson P. Evaluation and comparison of models and modelling tools simulating nitrogen processes in treatment wetlands[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2008, **16**(1): 26-49
- [13] 彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 等. 浮萍塘中氮归趋模式模拟分析 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(10): 1963-1968.
- [14] Lv T, Wu S B, Hong H, *et al.* Dynamics of nitrobenzene degradation and interactions with nitrogen transformations in laboratory-scale constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **133**: 529-536.
- [15] Pai T Y, Shyu G S, Chen L, *et al.* Modelling transportation and transformation of nitrogen compounds at different influent concentrations in sewer pipe [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, **37**(3): 1553-1563.
- [16] Wang Y H, Zhang J X, Kong H N, *et al.* A simulation model of nitrogen transformation in reed constructed wetlands [J]. *Desalination*, 2009, **235**(1-3): 93-101.
- [17] 韩建刚, 曹雪. 典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2383-2389.
- [18] Tang W Z, Zhang W Q, Zhao Y, *et al.* Nitrogen removal from polluted river water in a novel ditch-wetland-pond system [J]. *Ecological Engineering*, 2013, **60**: 135-139.
- [19] 刘晓娜, 丁爱中, 程莉蓉, 等. 潜流人工湿地除氮的生态动力学模拟 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(1): 166-170.
- [20] 白军红, 欧阳华, 邓伟, 等. 湿地氮素传输过程研究进展 [J]. *生态学报*, 2005, **25**(2): 326-333.
- [21] McGechan M B, Moir S E, Sym G, *et al.* Estimating inorganic and organic nitrogen transformation rates in a model of a constructed wetland purification system for dilute farm effluents [J]. *Biosystems Engineering*, 2005, **91**(1): 61-75.
- [22] 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.
- [23] Wolf K, Ahn C, Noe G B. Microtopography enhances nitrogen cycling and removal in created mitigation wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(9): 1398-1406.
- [24] Gómez-Rey M X, Couto-Vázquez A, González-Prieto S J. Nitrogen transformation rates and nutrient availability under conventional plough and conservation tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, **124**: 144-152.
- [25] Yue F J, Li S L, Liu C Q, *et al.* Using dual isotopes to evaluate sources and transformation of nitrogen in the Liao River, northeast China[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, **36**: 1-9.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria natans</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride(TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 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