

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估 张玉欣,安俊琳,林旭,王俊秀,师远哲,刘静达(1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布 蒋磊,汤莉莉,潘良宝,刘丹彤,花艳,张运江,周宏仓,崔玉航(13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响 贺祥,林振山(22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散 李双德,徐俊波,莫胜鹏,李文辉,高佳佳,曹亚裙,陈运法(33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量 张维,唐翔宇,鲜青松(41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH₄ 与 CO₂ 浓度日动态 谭立山,杨平,何雨露,黄佳芳,胡智强,全川(52)
河南鸡冠洞 CO₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较 张萍,杨琰,孙喆,梁沙,张娜,田宁,李建仓,凌新有,张志钦(60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质(FDOM)荧光光谱特征 陈俊伊,王书航,姜霞,黄晓峰,赵丽(70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析 韩秀秀,黄晓虎,余丽燕,杨浩,黄昌春,黄涛,余艳红,罗玉(78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化 张维,唐翔宇,鲜青松(87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应 祁闯,王国祥,吴馨婷,许晓光,韩睿明,吴松峻(95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性:以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例 杨朝辉,苏群,陈志辉,白俊武,钱新强,张志敏(104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征 陈小华,李小平,钱晓雍,胡双庆(113)
深水型水库藻类生态功能组(MBFG)的季节演替特征 杨毓,卢金锁,张颖(121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素 范志伟,郝庆菊,黄哲,柴雪思,江长胜(129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征 华玲玲,李文超,翟丽梅,崔超,刘宏斌,任天志,张富林,雷秋良(138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析:以羊圈沟为例 贾璐杰,高扬,陈维梁,郝卓,汪亚峰,陈利顶(147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较 金树权,周金波,包薇红,陈君,李丹丹,李洋(156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估 张芹,张圣虎,汪贞,郭敏,刘济宁,石利利,古文(162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价 张家泉,胡天鹏,邢新丽,郑煌,张丽,占长林,刘红霞,肖文胜,祁士华(170)
pH 和络合剂对五价铈在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响 王华伟,李晓月,李卫华,孙英杰(180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制 王文东,王昌鑫,刘荟,韩雨(188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响 艾扬,孔东东,于畅,沈扬,李剑(195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证 高婷婷,杜鹏,徐泽琼,杨军,张华方,李喜青(201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯 赵纯,张帅,周宇,李琨,周炜,黎鹏宇,杨广,孙志华,郑怀礼(212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究 王利颖,石洁,王凯伦,关羽琪,郭瑾(220)
曝气生物滤池(Fe²⁺)-臭氧组合工艺强化处理石化二级出水 徐敏,吴昌永,周岳溪,郭明昆,王翼(229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整烷烃的特异性 王晗,方芳,李凯,邢晖,郭劲松,陈猷鹏,曾前松(238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析 张超,陶华强,宋圆圆,逯彩彩,郭延凯,廉静,郭建博(247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征 刘竹寒,岳秀,于广平,金腊华,唐嘉丽,吉世明(253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制 季民,刘灵婕,翟洪艳,刘京,苏晓(260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响 王书永,钱飞跃,王建芳,沈耀良(269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程 郑莹,潘杨,周晓华,廖旭弘,孟璇,夏健伟(276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制:基于增强回归树分析 吴雁雯,张金池,郭晓平,刘鑫(283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响 史广宇,程媛媛,施维林(294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响 石小霞,赵诣,张琳,吴文良,孟凡乔(301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)及酶活性的季节变化特征 李南洁,曾清苹,何丙辉,周飞(309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性 刘晋仙,李鑫,景炬辉,贾彤,刘兴港,王小云,柴宝峰(318)
安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析 李法松,倪卉,黄涵宇,徐志兵,张倩,李长霞,黄文秀,金陶胜(327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响 赵世翔,于小玲,李忠徽,杨艳,刘丹,王旭东,张阿凤(333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响 田桃,曾敏,周航,徐璐,杨文骏,辜娇峰,邹佳玲,张平,彭佩钦,廖柏寒(343)
苾、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制 陈欣瑶,杨惠子,李敏,牛晓丛,苏雨轩,张园(352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响 高瑞丽,唐茂,付庆立,郭光光,李响,胡红青(361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测 李培中,吕晓健,王海见,杨苏才,魏文侠,宋云(368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力 黄辉,宁西翠,郭瞻宇,郭堤,张增强,李荣华,王力,Ali Amjad(374)
卤系阻燃剂在东江水体中的生物富集 何明靖,杨婷,李琦,王登祥,赵佳渊(382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价 陈志良,黄玲,周存宇,钟松雄,王欣,戴玉,蒋晓璐(389)
蔬菜镉(Cd)富集因子变化特征及其影响因素 杨阳,李艳玲,陈卫平,王美娥,彭驰(399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响 余亚伟,杨雨洽,张成,易建婷,安思危,王定勇(405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局 赵辉,郑有飞,曹嘉晨,徐静馨,黄积庆,袁月(412)
《环境科学》征稿简则(12) 《环境科学》征订启事(194) 信息(21, 51)

5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较

金树权¹, 周金波¹, 包薇红², 陈君³, 李丹丹³, 李洋¹

(1. 宁波市农业科学研究院生态环境研究所, 宁波 315040; 2. 宁波市环境科学保护设计研究院, 宁波 315012; 3. 宁波伊玛环保生物技术有限公司, 宁波 315000)

摘要: 选取轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*)、苦草 (*Vallisneria natans*)、金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)、穗状狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*)、微齿眼子菜 (*Potamogeton maackianus*) 等 5 种乡土沉水植物为研究对象, 在室内静水条件下对其氮、磷吸收和水质净化能力进行比较研究. 结果表明, 不同沉水植物试验前后的含水率差异较小, 变化范围为 89.8% ~ 92.0%, 但净增生物量差异较大且均存在显著性差异, 变化范围(干重计)为 1.52 ~ 12.92 g·m⁻², 其中净增生物量最高的轮叶黑藻是最低的微齿眼子菜的 8.5 倍. 不同沉水植物试验前后植株氮、磷含量变化范围分别为 26.54 ~ 34.44 g·kg⁻¹ 和 2.54 ~ 4.01 g·kg⁻¹, 其中金鱼藻的植株氮、磷含量相对偏高. 不同沉水植物处理的水质 TN、TP 去除率范围分别为 63.8% ~ 83.1% 和 49.2% ~ 70.8%, 均显著高于 CK 处理的 39.9% 和 36.9%, 去除率大小顺序均为: 轮叶黑藻 > 金鱼藻 > 苦草 > 穗状狐尾藻 > 微齿眼子菜 > CK. 不同沉水植物处理的水质 TN、TP 去除率与净增生物量存在较高相关性, 相关性系数分别为 0.994 ($P < 0.01$) 和 0.996 ($P < 0.01$). 不同沉水植物氮、磷直接吸收贡献率范围分别为 1.5% ~ 13.3% 和 2.2% ~ 13.2%, 扣除水体自身自净能力后沉水植物的增效作用贡献率范围分别为 22.5% ~ 29.9% 和 10.1% ~ 20.6%, 表明水质净化氮、磷去除过程中沉水植物的增效作用要大于直接吸收作用.

关键词: 沉水植物; 氮、磷吸收; 水质净化

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0156-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201606135

Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes

JIN Shu-quan¹, ZHOU Jin-bo¹, BAO Wei-hong², CHEN Jun³, LI Dan-dan³, LI Yang¹

(1. Ecology and Environment Institute, Ningbo Academy of Agricultural Science, Ningbo 315040, China; 2. Environmental Protection Research and Design Institute of Ningbo, Ningbo 315012, China; 3. Ningbo Yima Environmental Biotechnology Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: Uptake of nitrogen (N) and phosphorus (P) and their purification capacity for five native submerged macrophytes were investigated in laboratory simulated hydrostatic conditions, including *Hydrilla verticillata*, *Vallisneria natans*, *Ceratophyllum demersum*, *Myriophyllum spicatum*, *Potamogeton maackianus*. The results indicated that the moisture contents of different submerged macrophytes were almost the same before and after the test, with the range of 89.8% - 92.0%. The net accumulated biomass changed from 1.52 g·m⁻² to 12.92 g·m⁻² among different submerged macrophytes, and the highest net accumulated biomass of *Hydrilla verticillata* was 8.5 times higher than the lowest plant of *Potamogeton maackianus*. The N and P contents of five submerged macrophytes ranged from 26.54 to 34.44 g·kg⁻¹ and from 2.54 to 4.01 g·kg⁻¹, respectively, and the N and P contents of *Ceratophyllum demersum* were relatively high. Total N and P removal efficiency of different submerged macrophyte treatments had ranges of 63.8% - 83.1% and 49.2% - 70.8%, significantly higher than those of the CK treatment (39.9% and 36.9%), respectively, and the removal efficiency decreased in the order of *Hydrilla verticillata* > *Ceratophyllum demersum* > *Vallisneria natans* > *Myriophyllum spicatum* > *Potamogeton maackianus*. Total N and P removal efficiencies of different submerged macrophyte treatments were significantly correlated with net accumulated biomass, with correlation coefficients of 0.994 ($P < 0.01$) and 0.996 ($P < 0.01$). The contribution of direct N and P uptake to different submerged macrophytes had the ranges of 1.5% - 13.3% and 2.2% - 13.2%, and the synergism contribution (deducting self-purification capacity of water) of different submerged macrophytes ranged 22.5% - 29.9% and 10.1% - 20.6%, indicating that the synergistic effect of submerged macrophytes purification was much more significant than the direct uptake effect in the process of water purification.

Key words: submerged plants; nitrogen and phosphorus uptake; water purification

沉水植物作为水体生态系统的主要初级生产者之一, 不仅自身具有氮、磷吸收能力, 也是水体生物多样性赖以维持的基础, 因此恢复和重建沉水植物群落是预防与治理水体富营养化工作的重要环节^[1-4]. 沉水植物改善河湖水生态系统的作用机

制主要包括: ①沉水植物的自身净化作用. 沉水植物的根茎叶可以直接吸收底泥和水体中的氮、磷

收稿日期: 2016-06-20; 修订日期: 2016-08-03

基金项目: 宁波市科技局公益类重大专项(2015C110024)

作者简介: 金树权(1981~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为河湖水环境生态治理, E-mail: jinshuq@126.com

营养物质,沉水植物分泌的化感物质对藻类有明显的抑制作用^[5,6];②沉水植物的生境改善作用.沉水植物不仅可有效提高水体溶解氧浓度,还具有促进水体中生物和非生物性悬浮物质沉淀,抑制底泥沉积物再悬浮的作用,有效提高水体透明度^[7-9];③沉水植物的生物载体作用.沉水植物不仅可以为水体复杂的食物链提供食物,还可以为其他水生动物提供生存和产卵栖息地,沉水植物水体中的根茎叶都可以作为微生物的载体,便于形成生物膜,增加水体环境微生物含量,最终提高水体自净能力^[10-13].

目前,关于不同沉水植物净水能力研究相对较多^[14-17],但是对于沉水植物在水质净化过程中的氮、磷直接吸收和间接增效作用贡献率的定量研究较少.本文选取宁波地区 5 种乡土沉水植物为研究对象,在室内静水条件下通过分析试验各阶段沉水

植物的生物量、植株氮、磷含量、水质氮、磷浓度变化以及计算水质氮、磷去除率,对不同沉水植物的氮、磷直接吸收和净水增效作用贡献率进行定量研究,以期沉水植物的水生态修复工程应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

选择宁波地区自然分布的轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*)、苦草 (*Vallisneria spiralis*)、金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)、穗状狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*)、微齿眼子菜 (*Potamogeton maackianus*) 等 5 种乡土沉水植物为研究对象,试验前野外采集后在基地统一驯化培养 7d. 为模拟自然水体条件,试验供试用水全部取自污染相对严重的自然河道,基本性质见表 1.

表 1 供试水样基本性质

Table 1 Basic properties of experimental water

项目	pH	COD /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	DRP /mg·L ⁻¹	PP /mg·L ⁻¹
供试用水	7.13	25.60	6.85	4.86	0.56	0.65	0.31	0.34

1.2 试验设计

试验在宁波市农业科学研究院试验基地温室大棚内进行,选用长×宽×高(70 cm×60 cm×55 cm)的塑料桶进行盆栽试验.野外采集的供试用水经充分混合后缓缓放入塑料桶内至 50 cm 处,选用生长状态良好的沉水植物成熟植株,统一修剪至株高 25 cm,清洗干净后种植在塑料桶内,各处理桶内初始种植 50 g. 为明确沉水植物的植株氮、磷吸收率占水质氮、磷去除率的比例,本试验不采用底泥进行栽培,而采用陶瓷环和海绵固定沉水植物.5 种沉水植物各设 3 个重复,另外设 3 个不种植沉水植物的空白对照,共计 18 个试验水桶.试验日期为 2015 年 8 月 10 日至 9 月 28 日.

1.3 取样和样品处理

试验开始后在 1、3、7、14、21、28、35、42、49 d 进行水质取样,水质取样后冷藏于 4℃ 冰柜内 2d 完成水质指标测定,用预留原水补充检测消耗水量,用蒸馏水补给因蒸发损耗水分,以保持水位.原始水样用于 TN、TP、COD 测定, NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、DRP 用经 0.45 μm 滤膜过滤后的水样用于测定.试验前后沉水植物取样后用蒸馏水进行清洗,利用吸水棉充分吸附着水分后用电子天平进行湿重生物量测定,在烘箱内烘干(80℃)后进行干重生物量测

定.将烘干后的植物样品用碾磨机粉碎,过 0.25 mm 筛后装瓶用于植物氮、磷含量的测定.

1.4 样品测定方法

水质 pH 用玻璃电极法测定, TN 用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, NH₄⁺-N 用纳氏试剂比色法, NO₃⁻-N 用紫外分光光度法, DRP 和 TP 采用钼酸铵分光光度法测定^[18].

沉水植物株高采用直尺进行测定;生物量使用烘干法(80℃)进行测定.预处理好的植物样品采用浓硫酸-过氧化氢法消解,植株全氮用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,植株全磷用钼酸铵分光光度法测定^[19].

1.5 数据处理

数据采用 SPSS19.0 软件进行单因素方差(One-Way ANOVA)分析和相关性分析,不同处理之间多重比较采用 Duncan 新复极差方法,然后经过 *t* 检验 ($P < 0.05$),制图软件采用 Origin 7.5.

为明确不同沉水植物的水质净化能力以及沉水植物氮、磷直接吸收在水质净化过程中的作用,本研究在测定不同阶段植物生物量、植物氮、磷含量、水质氮、磷浓度的基础上计算水体氮、磷去除率 η_1 , 沉水植物氮、磷直接吸收贡献率 η_2 , 其它作

用贡献率 η_3 , 沉水植物氮、磷去除增效作用贡献率 η_4 , 其中 $\eta_1 = (\text{起始状态水体氮、磷总量} - \text{结束状态水体氮、磷总量}) / (\text{起始状态水体氮、磷总量})$, $\eta_2 = (\text{沉水植物植物体氮、磷净吸收量}) / (\text{水体初始氮、磷总量})$, $\eta_3 = \text{空白对照的水质氮、磷去除率}$, $\eta_4 = \eta_1 - \eta_2 - \eta_3$.

2 结果与分析

2.1 不同沉水植物生物量和植株氮磷变化

根据表 2 可以看出, 各处理沉水植物经过 49 d 生长, 植物株高和生物量均产生较大变化, 平均株高由 25.0 cm 增高至 51.3 ~ 80.7 cm, 其中苦草的平均

株高增加最多, 微齿眼子菜增加最少; 湿重生物量由各处理 119.05 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加至 140.95 ~ 271.67 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 其中轮叶黑藻的生物量增加最多, 而微齿眼子菜生物量增加均最少. 从不同阶段各沉水植物的含水率数值可以看出, 各处理沉水植物结束状态的含水率略高于起始状态, 但各沉水植物之间的含水率较为相近. 通过计算不同沉水植物处理试验前后的净增生物量, 变化范围(以干重计)为 1.52 ~ 12.92 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 大小顺序为轮叶黑藻 > 金鱼藻 > 苦草 > 穗状狐尾藻 > 微齿眼子菜, 净增生物量差异较大且均存在显著性差异, 最多的轮叶黑藻是最少的微齿眼子菜的 8.5 倍.

表 2 5 种沉水植物的株高与生物量变化

Table 2 Variation of plant height and biomass of five submerged macrophytes

植物名	起始状态			结束状态			净增生物量 干重/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$
	湿重/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	含水率/%	株高/cm	湿重/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	含水率/%	株高/cm	
轮叶黑藻	119.05 ± 0.00a	90.8 ± 0.5a	25.0 ± 0.0a	271.67 ± 13.38a	91.2 ± 0.7a	66.7 ± 1.5b	12.92 ± 0.55a
苦草	119.05 ± 00.0a	91.2 ± 0.5a	25.0 ± 0.0a	201.90 ± 9.95c	92.0 ± 0.8a	80.7 ± 4.2a	5.67 ± 0.48c
金鱼藻	119.05 ± 0.00a	90.2 ± 0.8a	25.0 ± 0.0a	237.38 ± 11.55b	90.6 ± 0.7a	64.3 ± 1.3b	10.48 ± 0.55b
穗状狐尾藻	119.05 ± 0.00a	91.4 ± 0.6a	25.0 ± 0.0a	160.43 ± 5.33d	91.6 ± 0.9a	69.9 ± 2.5b	3.24 ± 0.12d
微齿眼子菜	119.05 ± 0.00a	89.8 ± 0.9a	25.0 ± 0.0a	140.95 ± 4.10e	90.3 ± 0.4a	51.3 ± 4.2c	1.52 ± 0.12e

1) 净增生物量指结束状态与起始状态植物干重差值; 2) 各列中的字母表示统计分析的显著性, 相同字母表示不显著, 不同的字母表示在 $P = 0.05$ 水平上显著, 下同

根据表 3 可以看出, 不同沉水植物试验终止状态的植株氮、磷含量均略大于起始状态, 5 种沉水植物植株氮含量范围为 26.54 ~ 34.44 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 植株磷含量范围为 2.54 ~ 4.01 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

表 3 5 种沉水植物的植株氮、磷含量¹⁾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Plant nitrogen and phosphorus contents of five submerged macrophytes/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

植物名	植株氮含量		植株磷含量	
	起始状态	结束状态	起始状态	结束状态
轮叶黑藻	29.33 ± 1.31ab	34.44 ± 2.20a	2.96 ± 0.15b	3.33 ± 0.14b
苦草	27.68 ± 1.56ab	28.62 ± 1.67b	2.40 ± 0.12d	2.56 ± 0.16d
金鱼藻	30.12 ± 1.02a	33.24 ± 1.76a	3.88 ± 0.26a	4.01 ± 0.22a
穗状狐尾藻	26.84 ± 2.56ab	28.46 ± 1.48b	2.54 ± 0.13cd	2.78 ± 0.22cd
微齿眼子菜	26.54 ± 1.86b	27.66 ± 2.22b	2.76 ± 0.12bc	3.02 ± 0.17bc

1) 植株氮、磷含量指干重状态下的含量

2.2 不同沉水植物处理的水质氮磷浓度变化

根据图 1(a) 可以看出, 试验开始后各沉水植物处理的 TN 浓度在 3 d 时稍有上升, 之后呈现明显的下降趋势, 35 d 后 TN 浓度逐渐趋于稳定, 试验结束时各沉水植物处理的 TN 浓度均显著小于不种植沉水植物的 CK 处理. 根据图 1(b) 可以看出, 各沉水植物处理的 NH_4^+ -N 浓度在 21 d 前均呈明显的下降趋势, 21 d 后 NH_4^+ -N 趋于稳定, 试验结束时各沉水植物处理的 NH_4^+ -N 浓度均显著小于 CK 处理. 根据图 1(c) 可以看出, 各处理的 NO_3^- -N 浓度在 14 d 前

从不同沉水植物之间植株氮、磷含量比较上看, 植株氮含量差异相对较小, 而植株磷含量差异相对较大, 5 种沉水植物中金鱼藻的植株氮、磷含量相对偏高.

呈现上升趋势, 而 14 d 后呈现下降趋势.

根据图 2(a) 可以看出, 试验开始后各沉水植物处理的 TP 浓度在 3 d 时稍有上升, 之后呈现明显的下降趋势, 试验结束时各沉水植物处理的 TP 浓度均显著小于 CK 处理. 根据图 2(b) 可以看出, 各处理的 DRP(可溶态磷) 浓度下降幅度相对较小. 根据图 2(c) 可以看出, 各处理的 PP(颗粒态磷) 浓度在 3 d 时稍有上升, 之后呈现明显的下降趋势, 35 d 后 PP 浓度逐渐趋于稳定, 试验结束时各沉水植物处理的 PP 浓度显著小于 CK 处理. 综合图 1 和图 2

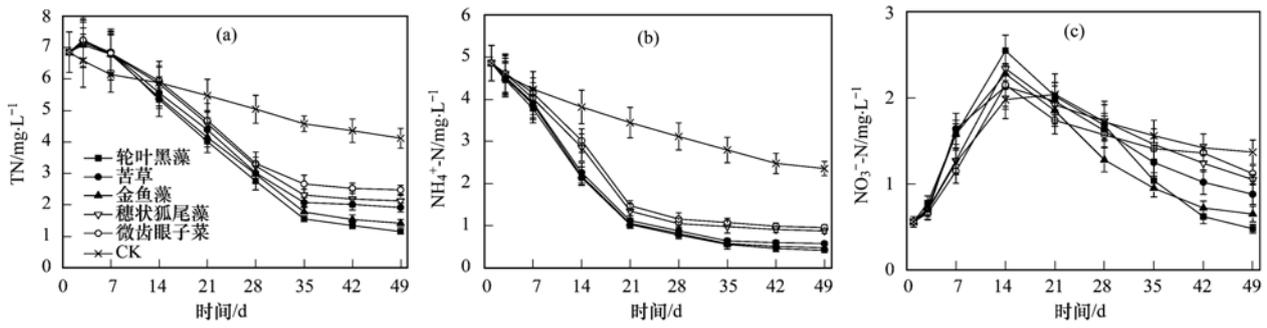


图1 不同沉植物处理各态氮浓度变化

Fig. 1 Variation of concentrations of different nitrogen forms in different submerged macrophytes treatments

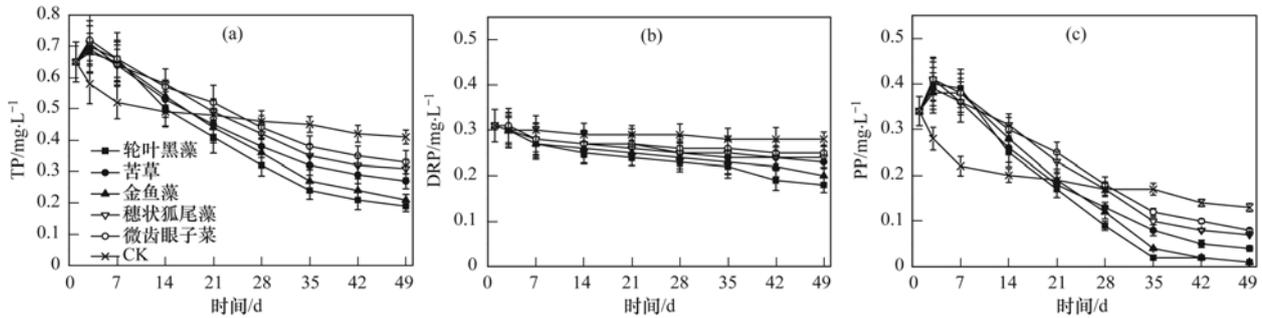


图2 不同沉水植物处理各态磷浓度变化

Fig. 2 Variation of concentrations of different phosphorus forms in different submerged macrophytes treatments

可以看出,虽然水质各态氮磷的变化规律不一致,但最终种植沉水植物处理的水质 TN、TP 浓度均要显著小于 CK 处理,表明沉水植物可显著提高水体的自净能力,以下将进一步分析沉水植物氮、磷直接吸收、沉水植物净水增效作用和其它作用等各作用的贡献率水平。

2.3 沉水植物氮、磷吸收和水质净化能力分析

本研究将水质氮、磷去除率 η_1 分为沉水植物直接吸收、沉水植物增效作用和其它作用等 3 部分贡献率,其中,沉水植物直接吸收贡献率 η_2 通过计算植物氮、磷净吸收量获得;其它作用是指不种植沉水植物条件下水体具备的自净能力,其它作用贡献率 η_3 通过计算 CK 处理的氮、磷去除率获得;沉水植物增效作用是指通过沉水植物吸附、改善生境

提高水体微生物转化等因种植沉水植物而产生的净水增效作用,沉水植物增效作用 $\eta_4 = \eta_1 - \eta_2 - \eta_3$ 。根据表 4 可以看出,不同沉水植物处理的水质 TN、TP 去除率 η_1 存在较大差异,5 个沉水植物处理的水质 TN、TP 去除率范围分别为 63.8% ~ 83.1% 和 49.2% ~ 70.8%,均显著高于 CK 处理的 39.9% 和 36.9%,各处理水质 TN、TP 去除率顺序均为:轮叶黑藻 > 金鱼藻 > 苦草 > 穗状狐尾藻 > 微齿眼子菜 > CK。不同沉水植物处理的 TN、TP 直接吸收贡献率范围分别为 1.5% ~ 13.3% 和 2.2% ~ 13.2%,沉水植物体现的增效作用贡献率范围分别为 22.5% ~ 29.9% 和 10.1% ~ 20.6%,可见虽然沉水植物通过直接吸收氮、磷占水质 TN、TP 去除率的比例不高,但通过促进植物体吸附、改善生境提高水体微生物

表 4 5 种沉水植物的水质氮、磷去除率和各作用的贡献率/%

Table 4 Nitrogen and phosphorus removal efficiencies of five submerged macrophytes and contributions of different effects/%

植物名	TN				TP			
	水质去除率 (η_1)	植物吸收贡献率 (η_2)	其它作用贡献率 (η_3)	植物增效贡献率 (η_4)	水质去除率 (η_1)	植物吸收贡献率 (η_2)	其它作用贡献率 (η_3)	植物增效贡献率 (η_4)
轮叶黑藻	83.1 ± 4.5a	13.3 ± 0.6a	39.9 ± 2.5	29.9 ± 1.3a	70.8 ± 3.5a	13.2 ± 0.7a	36.9 ± 2.5	20.6 ± 1.0a
苦草	72.0 ± 3.2b	4.6 ± 0.2c	39.9 ± 2.5	27.5 ± 1.4ab	58.5 ± 2.7b	6.1 ± 0.3c	36.9 ± 2.5	15.5 ± 0.7c
金鱼藻	79.3 ± 4.0a	10.4 ± 0.5b	39.9 ± 2.5	29.1 ± 1.6a	67.7 ± 3.2a	12.4 ± 0.6b	36.9 ± 2.5	18.4 ± 0.9b
穗状狐尾藻	68.9 ± 2.7bc	2.9 ± 0.1d	39.9 ± 2.5	26.2 ± 1.5b	52.3 ± 2.8c	3.2 ± 0.1d	36.9 ± 2.5	12.2 ± 0.7d
微齿眼子菜	63.8 ± 3.1c	1.5 ± 0.1e	39.9 ± 2.5	22.5 ± 1.2c	49.2 ± 3.1c	2.2 ± 0.1e	36.9 ± 2.5	10.1 ± 0.6e
CK	39.9 ± 2.5d	0	39.9 ± 2.5	0	36.9 ± 2.3d	0	36.9 ± 2.5	0

转化等增效作用较为明显。

3 讨论

本试验水体中磷的去除主要依靠植物直接吸收、植物体吸附和沉淀作用等途径去除^[20~22],而水体中氮的去除除了这些途径外,还存在氨的挥发、硝化和反硝化等途径^[23~25]。根据图 1 和图 2 可以看出,水质 TN、TP 浓度均在 3 d 稍有上升,这可能是由于沉水植物转移到新水体后稍有不适应而导致部分植物死亡腐败引起。3 d 后各沉水植物处理的水质 TN、TP 浓度下降趋势较明显,主要可能存在于以下影响:①沉水植物的氮、磷直接吸收作用,这部分主要体现在可溶态氮、磷浓度的下降;②通过沉水植物分泌助凝物质加速吸附沉降水体中的悬浮颗粒,这部分主要体现在颗粒态氮、磷浓度的下降;③通过提高水体中微生物含量和改善生存环境提高了微生物的降解转化作用。本试验中 35 d 后各沉水植物处理的水质 TN、TP 浓度趋于稳定,其中水质 TN 浓度可能因为后期试验水体中存在碳源不足而导致部分微生物停止生长或者部分死亡,最终影响了水体中的硝化和反硝化作用,而水质 TP 浓度趋于稳定是颗粒态磷(PP)趋于稳定的结果[见图 2(c)]。

将水质 TN、TP 去除率与沉水植物净增生物量、植株平均氮磷含量进行相关性分析,水质 TN、TP 去除率与沉水植物净增生物量相关性较高,分别高达 0.994($P < 0.01$)和 0.996($P < 0.01$),而水质 TN、TP 去除率与植株平均氮、磷含量相关性不高,可见沉水植物净增生物量是决定沉水植物水质净化能力的一个重要因素。进一步分析,水质 TN、TP 去除率与沉水植物净增生物量虽然相关性较高,但水质 TN、TP 去除并非完全依靠沉水植物氮、磷的直接吸收作用,事实上,5 种沉水植物氮、磷直接吸收贡献率仅为 1.5%~13.3%和 2.2%~13.2%,而扣除水体自身自净能力后沉水植物的增效作用贡献率则达 22.5%~29.9%和 10.1%~20.6%,表明沉水植物的水质净化增效作用大于本身直接吸收作用,这一结论与已有研究相符合^[26,27]。

当然,室内静水条件和野外自然条件存在较大的差异,在自然条件下由于底质作用、水体流动性及其它影响因素,水体中的氮、磷通过底质吸附、水生动物吸收和微生物降解转化等作用会比静水条件大大增强^[28~30]。另一方面,自然条件下沉水植物的生长由于不受空间限制其净增生物量比室内静水条件下也会有所增加。本研究在静水条件下的研究

结果虽然具有一定的局限性,但是不同沉水植物在水质净化过程中的氮、磷直接吸收和间接增效作用贡献率的定量研究结论,对于沉水植物的净水基础理论研究和生态工程应用仍具有一定的参考价值。

4 结论

(1)不同沉水植物试验前后的平均含水率差异较小,变化范围为 89.8%~92.0%,但净增生物量差异较大且均存在显著性差异,变化范围(以干重计)为 1.52~12.92 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,其中净增生物量最大的轮叶黑藻是最低的微齿眼子菜的 8.5 倍。

(2)不同沉水植物试验终止状态的植株氮、磷含量均略大于起始状态,植株氮、磷含量变化范围分别为 26.54~34.44 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 2.54~4.01 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,不同沉水植物之间植株氮含量差异相对较小,而植株磷含量差异相对较大,其中金鱼藻的植株氮、磷含量相对偏高。

(3)不同沉水植物处理的水质 TN、TP 去除率变化范围分别为 63.8%~83.1%和 49.2%~70.8%,均显著高于 CK 处理的 39.9%和 36.9%,水质 TN、TP 去除率大小顺序均为:轮叶黑藻 > 金鱼藻 > 苦草 > 穗状狐尾藻 > 微齿眼子菜 > CK,不同沉水植物处理的水质 TN、TP 去除率与净增生物量存在较高相关性,相关性系数分别为 0.994($P < 0.01$)和 0.996($P < 0.01$)。

(4)不同沉水植物氮、磷直接吸收贡献率为 1.5%~13.3%和 2.2%~13.2%,而沉水植物的增效作用贡献率为 22.5%~29.9%和 10.1%~20.6%,表明水质净化氮、磷去除过程中沉水植物的增效作用要大于直接吸收作用。

参考文献:

- [1] 王华, 逢勇, 刘申宝, 等. 沉水植物生长影响因子研究进展[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3958-3968.
Wang H, Pang Y, Liu S B, et al. Research progress on influencing of environmental factors on the growth of submerged macrophytes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3958-3968.
- [2] Hilt S, Gross E M, Hupfer M, et al. Restoration of submerged vegetation in shallow eutrophic lakes—a guideline and state of the art in Germany[J]. Limnologia-Ecology and Management of Inland waters, 2006, 36(3): 155-171.
- [3] Dai Y, Jia C, Liang W, et al. Effects of the submerged macrophyte *Ceratophyllum demersum* L. on restoration of a eutrophic waterbody and its optimal coverage[J]. Ecological Engineering, 2012, 40(3): 113-116.
- [4] Dodkins I, Aguiar F, Rivaes R, et al. Measuring ecological change of aquatic macrophytes in Mediterranean rivers[J]. Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters, 2012, 42(2): 95-107.

- [5] 肖溪, 楼莉萍, 李华, 等. 沉水植物化感作用控藻能力评述 [J]. 应用生态学报, 2009, **20**(3): 705-712.
Xiao X, Lou L P, Li H, *et al.* Algal control ability of allelopathically active submerged macrophytes: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, **20**(3): 705-712.
- [6] Hilt S, Gross E M. Can allelopathically active submerged macrophytes stabilise clear-water states in shallow lakes? [J]. Basic and Applied Ecology, 2008, **9**(4): 422-432.
- [7] 谢始发, 胡耀辉, 刘正文, 等. 沉积物再悬浮对沉水植物生长的影响研究 [J]. 环境科学学报, 2007, **27**(1): 18-22.
Xie Y F, Hu Y H, Liu Z W, *et al.* Effects of sediment resuspension on the growth of submerged plants [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, **27**(1): 18-22.
- [8] Dong B L, Qin B Q, Gao G, *et al.* Submerged macrophyte communities and the controlling factors in large, shallow Lake Taihu (China): sediment distribution and water depth [J]. Journal of Great Lakes Research, 2014, **40**(3): 646-655.
- [9] Pettit N E, Ward D P, Adame M F, *et al.* Influence of aquatic plant architecture on epiphyte biomass on a tropical river floodplain [J]. Aquatic Botany, 2016, **129**: 35-43.
- [10] 杨文斌, 李阳, 孙共献. 两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 [J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2156-2163.
Yang W B, Li Y, Sun G X. Effects of two submerged macrophytes on dissolved inorganic nitrogen in overlying water and interstitial water [J]. Environmental Science, 2014, **35**(6): 2156-2163.
- [11] Zhou Y L, Wu H F, Yan Z S, *et al.* The enhanced survival of submerged macrophyte *Potamogeton malaianus* by sediment microbial fuel cells [J]. Ecological Engineering, 2016, **87**: 254-262.
- [12] Zhang Y, He F, Xia S B, *et al.* Studies on the treatment efficiency of sediment phosphorus with a combined technology of PCFM and submerged macrophytes [J]. Environmental Pollution, 2015, **206**: 705-711.
- [13] Wang J, Zhu J Y, Liu S P, *et al.* Generation of reactive oxygen species in cyanobacteria and green algae induced by allelochemicals of submerged macrophytes [J]. Chemosphere, 2011, **85**(6): 977-982.
- [14] 任文君, 田在锋, 宁国辉, 等. 4 种沉水植物对白洋淀富营养化水体净化效果的研究 [J]. 生态环境学报, 2011, **20**(2): 345-352.
Ren W J, Tian Z F, Ning G H, *et al.* Purification efficiency of four species submerged macrophytes for the eutrophic water in Baiyangdian lake [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, **20**(2): 345-352.
- [15] 张丁予, 章婷曦, 董丹萍, 等. 沉水植物对沉积物微生物群落结构影响: 以洪泽湖湿地为例 [J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1734-1741.
Zhang D Y, Zhang T X, Dong D P, *et al.* Influence of submerged plants on microbial community structure in sediment of Hongze lake [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1734-1741.
- [16] Dhote S, Dxti S. Water quality improvement through macrophytes-a review [J]. Environment Monitoring and Assessment, 2009, **152**(1): 149-153.
- [17] Gao J Q, Xiong Z T, Zhang J D, *et al.* Phosphorus removal from water of eutrophic Lake Donghu by five submerged macrophytes [J]. Desalination, 2009, **242**(1-3): 193-204.
- [18] 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.
State Environment Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis methods [M]. (4th ed.). Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [20] 王立志, 王国祥, 俞振飞, 等. 沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响 [J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 385-392.
Wang L Z, Wang G X, Yu Z F, *et al.* Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in the growth period [J]. Environmental Science, 2012, **33**(2): 385-392.
- [21] 葛绪广, 王国祥, 陈成忠, 等. 苦草生长对沉积物中磷迁移转化的影响 [J]. 生态学报, 2014, **34**(20): 5802-5811.
Ge X G, Wang G X, Chen C Z, *et al.* Effects on the transformation of phosphorus in sediment with growing of *Vallisneria natans* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(20): 5802-5811.
- [22] Christianse N H, Andersen F Ø, Jensen H S. Phosphate uptake kinetics for four species of submerged freshwater macrophytes measured by $a^{33}\text{P}$ phosphate radioisotope technique [J]. Aquatic Botany, 2016, **128**: 58-67.
- [23] 刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 等. 伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响 [J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3764-3768.
Liu D D, Li Z K, Ye Z X, *et al.* Nitrogen uptake and denitrification study on the joint treatment of aquatic vegetation and immobilized nitrogen cycling bacteria in Taihu lake [J]. Environmental Science, 2014, **35**(10): 3764-3768.
- [24] 孔祥龙, 叶春, 李春华, 等. 苦草对水-底泥-沉水植物系统中氮素迁移转化的影响 [J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 539-549.
Kong X L, Ye C, Li C H, *et al.* Effect on nitrogen transfer and migration by *Vallisneria natans* (Lour.) Hara in water-sediment-submerged macrophytes system [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(2): 539-549.
- [25] Sachse R, Petzoldt T, Blumstock M, *et al.* Extending one-dimensional models for deep lakes to simulate the impact of submerged macrophytes on water quality [J]. Environmental Modelling & Software, 2014, **61**: 410-423.
- [26] Xu W W, Hu W P, Deng J C, *et al.* Effects of harvest management of *Trapa bispinosa* on an aquatic macrophyte community and water quality in a eutrophic lake [J]. Ecological Engineering, 2014, **64**: 120-129.
- [27] Ye C, Yu H C, Kong H N, *et al.* Community collocation of four submerged macrophytes on two kinds of sediments in Lake Taihu, China [J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(11): 1656-1663.
- [28] Srivastava J, Gupta A, Chandra H. Managing water quality with aquatic macrophytes [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2008, **7**(3): 255-266.
- [29] Wang C, Wang C, Wang Z. Effects of submerged macrophytes on sediment suspension and $\text{NH}_4\text{-N}$ release under hydrodynamic conditions [J]. Journal of Hydrodynamics, Series B, 2010, **22**(6): 810-815.
- [30] Silveira M J, Harthman V C, Michelan T S, *et al.* Anatomical development of native and non-native submerged aquatic macrophytes in different sediment types [J]. Aquatic Botany, 2016, **133**: 24-27.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibabe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Ju-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172