

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究	郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)
基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究	罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)
湿地水环境健康评价方法及案例分析	李玉凤, 刘红玉, 郝敬峰, 郑因, 曹晓 (346)
北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价	单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)
漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别	徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)
黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用	安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)
沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响	李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)
沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响	王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)
长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)
洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究	张文斌, 余辉 (399)
降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析	彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)
浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响	刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)
基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演	刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)
基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究	张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)
好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化	李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响	别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)
Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究	蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)
羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究	白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)
天然菱铁矿改性及强化除砷研究	赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)
零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究	廖娣劫, 杨琦, 李俊鎔 (469)
水体中氧氟沙星的光化学降解研究	邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)
阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究	季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)
吡啶在紫外光辐射下的生物降解	方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)
蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化	朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)
ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究	曹玉娟, 张杨, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)
丝状菌污泥致密过程的强化条件研究	李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)
亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究	罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄兢, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)
我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究	李东玲, 吴烨, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)
北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究	齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)
道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究	徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)
Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析	陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)
UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响	宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)
干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性	唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)
九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究	郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)
秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究	姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)
我国典型非木浆造纸二噁英排放研究	王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)
典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布	邱孟德, 邓代永, 余乐洵, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)
电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征	王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)
北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险	彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)
上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价	柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)
海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价	尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)
三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价	王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)
大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究	赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)
不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究	尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)
应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测	朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)
软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化	王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)
固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素	洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)
五氯酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究	金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)
建筑陶瓷碳计量与优化模型研究	彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)
《环境科学》征订启事 (447) 《环境科学》征稿简则 (475) 信息 (524, 586, 605, 624)	

沉水植物长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响

王立志^{1,2}, 王国祥^{1*}, 俞振飞¹, 周贝贝¹, 陈秋敏¹, 李振国³

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏省环境演变及生态建设重点实验室, 南京 210046; 2. 临沂大学山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂 276000; 3. 湖南科技大学建筑与城乡规划学院, 湘潭 411201)

摘要: 分别在春季培养黑藻(*Hydrilla verticillata*)和苦草(*Vallisneria spiralis*), 在冬季培养菹草(*Potamogeton crispus*), 跟踪监测在沉水植物影响下环境因子的变化, 及上覆水和沉积物各形态磷的浓度变化, 以探讨沉水植物对磷在沉积物和上覆水中迁移转化的规律。结果表明, 不同季节实验条件下沉水植物均能不同程度降低上覆水中各形态磷的浓度。在植物生长期上覆水磷浓度保持在相对较低的水平, 黑藻、苦草和菹草组上覆水中总磷(TP)的浓度分别保持在 0.03~0.05、0.04~0.12 和 0.02~0.11 mg·L⁻¹。沉水植物组沉积物中各形态磷的浓度均呈现不同程度的降低, 黑藻、苦草和菹草组沉积物 TP 的含量最大降低幅度分别为 35.34%、60.67% 和 25.92%。植物组上覆水溶解氧(DO)、氧化还原电位(Eh)和 pH 均显著提高(DO 10.0~14.0 mg·L⁻¹; Eh 185~240 mV; pH 8.0~11.0), 沉积物中 Eh(-140~-23 mV)也明显提高, 并使得沉积中 pH 保持在中性范围内(7.2~8.0)。沉水植物通过提高上覆水中的 DO、Eh 和 pH 及沉积物 Eh 的方式影响上覆水和沉积物之间磷的迁移转化。

关键词: 沉水植物; 磷; 迁移; 上覆水; 环境因子

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0385-08

Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period

WANG Li-zhi^{1,2}, WANG Guo-xiang¹, YU Zhen-fei¹, ZHOU Bei-bei¹, CHEN Qiu-min¹, LI Zhen-guo³

(1. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Soil Conservation and Environmental Protection, Linyi University, Linyi 276000, China; 3. School of Architecture and Urban Planning, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the process of phosphorus transfer between sediment and overlying water, *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria spiralis* were cultured in spring, *Potamogeton crispus* was cultured in winter. Changes of environmental factors and phosphorus concentrations in water and sediment were investigated. The results indicated that: submerged macrophytes could reduce all phosphorus fractions in the overlying water. Phosphorus concentrations in overlying water maintained in a relative low level in the growth period of submerged macrophytes. The concentrations of total phosphorus (TP) in overlying water of *H. verticillata*, *V. spiralis* and *P. crispus* were 0.03-0.05, 0.04-0.12, 0.02-0.11 mg·L⁻¹, respectively. All phosphorus fractions in sediment were reduced. The maximum value between submerged macrophyte and control of *H. verticillata*, *V. spiralis* and *P. crispus* were 35.34%, 60.67% and 25.92%, respectively. Dissolved oxygen (DO), redox potential (Eh) and pH in overlying water increased (DO 10.0-14.0 mg·L⁻¹, Eh 185-240 mV, pH 8.0-11.0) in the submerged macrophytes groups. Submerged macrophytes increased Eh(-140~-23 mV) and maintained pH(7.2-8.0) in neutral range. The results indicated that submerged macrophytes affected phosphorus transferring between sediment and overlying water through increasing DO, Eh and pH in overlying water, and Eh in sediment.

Key words: submerged macrophyte; phosphorus; transferring; overlying water; environmental factors

沉水植物占据着浅水水体生态系统的关键界面, 以自身的形态特征、群落结构特征及生理活动影响着其周围的环境, 对水体生产力及生物地球化学循环具有十分重要的影响^[1]。而环境因子的改变则影响着沉积物中磷的释放与吸收^[2]。研究表明环境因子 pH、DO 和 Eh 等能够影响水-沉积物界面的磷循环过程, 但是, 在较大的湖泊中却较难通过人工的方法改变湖泊整体的环境因子, 而沉水植物在生长过程中可以通过光合作用等对周围环境因子产生影响, 改变水体的 pH、DO 和 Eh 等。因此, 在大型浅水

湖泊中可以采用沉水植物修复和重建的方式来对环境因子产生影响, 从而达到影响水-沉积物界面磷迁移转化的目的。目前, 针对环境因子对水-沉积物界面磷迁移转化的影响的研究多建立在室内模拟实验的基础上, 通过人为调控某一环境因子的方式, 来探

收稿日期: 2010-11-23; 修订日期: 2011-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40873057); 江苏省重大科技支撑项目(BE2008677)

作者简介: 王立志(1980~), 男, 博士研究生, 主要研究水环境生态修复, E-mail: wlzlyj@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn

讨磷迁移转化的过程^[3,4]. 而采用通过培育沉水植物来探讨沉水植物作用下环境因子影响沉积物和上覆水之间的磷交换过程的研究相对缺乏.

因此本研究选用了不同季节生长模式的沉水植物(黑藻、苦草和菹草)分别在春季和冬季进行实验,主要目的是探讨在沉水植物影响下沉积物和上覆水之间磷的交换过程,分析沉水植物影响下环境因子的改变对水-沉积物界面磷迁移转化的影响.

1 材料与方法

1.1 实验方法

沉积物采自南京富营养化水华暴发水体(32°06'10.36"N, 118°54'13.75"E),采用彼得森采泥器于2008年8月采集.样品经高温灭菌(120℃, 30 min)后低温风干过100目筛,去除粗粒及动植物残体,然后充分混匀.将混匀后的沉积物置入高密度聚乙烯桶(顶直径×底直径×高=55 cm×45 cm×75 cm,实验桶预先经过5%的HCl处理后用蒸馏水冲洗干净),沉积物平均厚度为10 cm,干重为4 821.00 g.然后缓慢注入曝晒3 d后的自来水100 L(TP=0.02 mg·L⁻¹),注入水后实验装置水深为50 cm.

春季实验设置实验桶装置总计9桶,其中沉水植物苦草(30 g 鲜重)和黑藻(30 g 鲜重)休眠芽分别种植3桶,另外3桶不种植沉水植物作为对照组.

冬季实验设置实验桶装置总计6桶,其中沉水植物菹草(30 g 鲜重)种植3桶,另外3桶不进行沉水植物种植作为对照组.实验植株密度依据长江中下游沉水植物种群平均密度设置.

沉水植物黑藻、苦草和菹草采集自南京固城湖(31°14'N, 118°53'E),并经驯化培养.采用性状均一的休眠芽以避免附生生物的影响,均匀种植于实验桶中.

实验在温室玻璃房内进行,冬季实验时间为2008年11月~2009年4月.春季实验为2009年5月~2009年8月.实验温室内部月平均光照及温度变化情况如图1所示.

1.2 取样与分析

水样采集采用虹吸管抽取的方式,每次采集水面以下5 cm、20 cm和45 cm处的等体积水(50 mL)混匀.沉积物采用微型柱状采泥器采集,沉积物样品每次均匀采集5个微型柱状样(横切面直径2 cm),采集后的样品室温(25℃)风干,然后对风干前后的样品称重以计算由采样带来的总体磷和水量的损

耗.将风干后沉积物样品与植物根系分离,过100目筛后充分混匀,然后进行沉积物中各形态磷分析.沉积物样品磷形态分析采用国际通用的SMT法^[5].上覆水中磷浓度按照相关规范分析^[6].

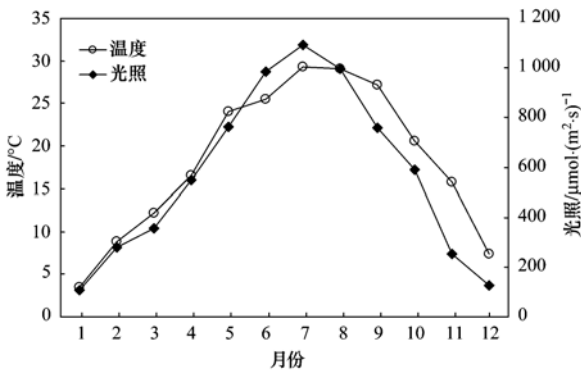


图1 实验温室内部月平均光照及温度

Fig. 1 Average temperature and illumination of the experiment glass room

实验期间水温按照室外的温度控制在5~25℃,各桶间水温差异小于2℃.上覆水及沉积物初始理化指标如表1所示.

表1 沉积物和上覆水初始理化指标
(数据为平均值±标准偏差,n=3)

Table 1 Physicochemical characteristics of sediment and water (values are mean ± SD, n=3)

样品	项目	冬季实验	春季实验
沉积物/mg·kg ⁻¹	TP	771.19 ± 9.25	775.10 ± 10.10
	TN	1 845.36 ± 21.05	1 864.36 ± 20.12
	TP	0.10 ± 0.01	0.04 ± 0.01
上覆水/mg·L ⁻¹	PP	0.07 ± 0.01	0.01 ± 0.00
	DTP	0.02 ± 0.00	0.03 ± 0.00
	SRP	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00
	DOP	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00
	TN	1.11 ± 0.12	1.25 ± 0.21
	NH ₄ ⁺ -N	0.19 ± 0.02	0.21 ± 0.02
	NO ₃ ⁻ -N	0.09 ± 0.00	0.12 ± 0.01
	DO	9.57 ± 0.51	8.35 ± 0.42
	pH	7.62 ± 0.22	7.51 ± 0.21

1.3 数据处理

实验所得数据采用SPSS 13.0统计软件进行方差分析,处理组和对照组之间采用单因素方差分析法,P<0.05为差异性显著,P<0.01为差异性极显著.

2 结果与分析

2.1 上覆水各形态磷浓度的变化

实验期间黑藻、苦草和菹草组上覆水中各形态磷的浓度均呈不同程度的降低且保持在相对较低的

水平. 实验期间黑藻、苦草和菹草组上覆水中 TP 的浓度与对照相比较最大降低幅度分别为 0.17、0.10 和 0.11 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 且 3 组上覆水中 TP 的浓度分别保持在 0.03 ~ 0.05 [图 2(a)]、0.04 ~ 0.12 [图 2(a)] 和 0.02 ~ 0.11 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 2(b)]. 黑藻组上覆水中 TP 及其它各形态磷的浓度在实验期间基本保持在相对稳定的水平, 最大波动仅为 0.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 苦草组上覆水中 TP、溶解性总磷 (DTP)、颗粒态总磷 (PP) 和溶解性活性磷 (SRP) 的浓度在实验第 60 d 达到最大值后呈下降趋势, 溶解性有机磷 (DOP) 的浓度在实验第 90 d 达到最大值后下降 [图 2(a) 和 2(b)]. 菹草组上覆水中各形态磷的浓度在实验第 60 d 后达到最低值, 并在实验 60 ~ 120 d 期间呈缓慢上升趋势, 在实验 120 d 后 TP、DTP、DOP 下降, PP 和 SRP 仍缓慢上升 [图 2(c)].

2.2 沉积物各形态磷含量的变化

不同季节的实验结果表明沉水植物组沉积物中各形态磷的含量均呈现不同程度的降低, 其中苦草组各形态磷含量降低幅度均较大. 黑藻、苦草和菹草组沉积物 TP 的含量最大降低幅度分别为 35.34、60.67 和 25.92 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [图 3(a) 和 3(c)]. 在其他各形态磷的变化过程中, 沉水植物对无机磷 (IP) 的影响大于有机磷 (OP), 而 OP 在实验过程中保持在相对较稳定的水平. 在 IP 的变化中, 沉水植物对 NaOH 提取磷 (NaOH-P) 的影响大于稀 HCl 提取磷 (HCl-P), HCl-P 在实验过程中基本保持在相对稳定的水平 [图 3(b) 和 3(d)].

在春季实验中, 黑藻组和苦草组沉积物中各形态磷的含量均呈下降趋势. 黑藻组和苦草组沉积物 TP 的含量在实验第 60 d 时开始迅速下降, 实验 90 ~ 120 d 期间变化相对较为缓和 [图 3(a)]. 在冬季实验中, 菹草组 TP 的含量在实验第 60 d 开始下降, 并在实验第 120 d 下降幅度开始增大 [图 3(c)]. 而 OP 和 HCl-P 的变化相对较为缓和, 在实验期间没有明显的波动.

3 讨论

3.1 沉水植物对上覆水磷浓度的影响

在春季实验中实验第 30 d 后是黑藻和苦草进入旺盛生长期 [图 4(a)], 在冬季实验中第 60 d 后菹草进入旺盛生长期 [图 4(b)]. 沉水植物在旺盛生长期对营养盐的需求量大, 实验结束时黑藻、苦草和菹草分别聚集的磷总量为 (159.07 ± 7.95) 、 (249.06 ± 10.45) 和 (115.28 ± 5.76) mg. 在本实验

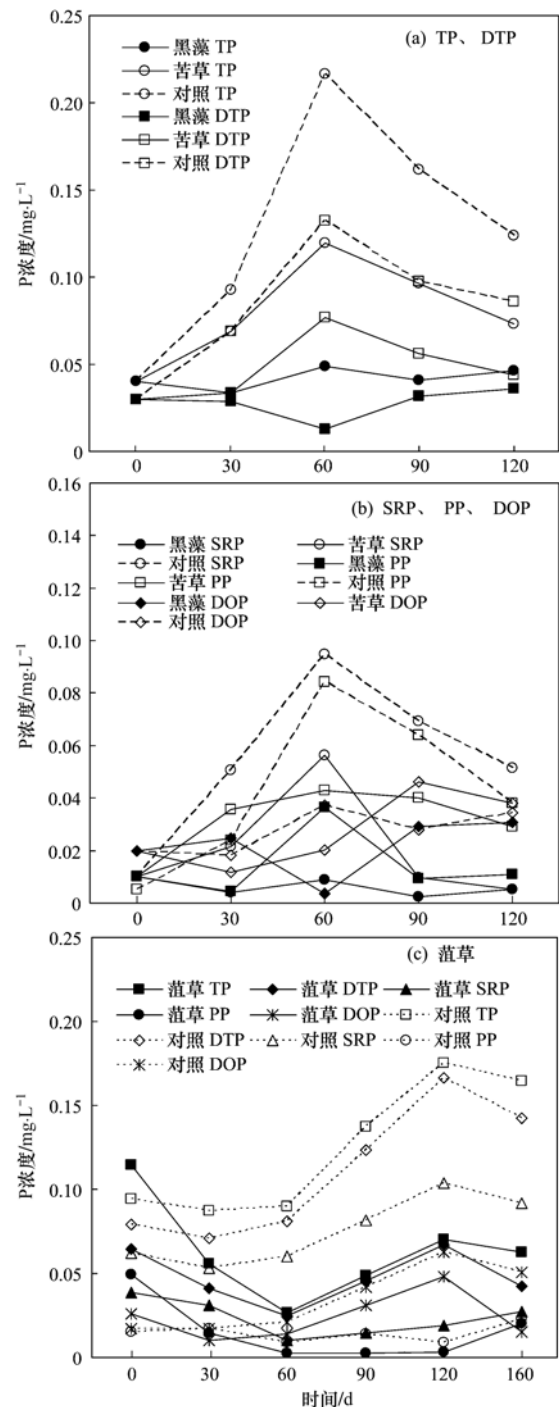


图 2 实验期间黑藻组、苦草组及菹草组上覆水各形态磷浓度变化

Fig. 2 Changes in different phosphorus concentrations of *H. verticillata*, *V. natans* and *P. crispus* in overlying water during the experiment

系统中, 处于一个相对封闭的环境, 没有外源磷的输入, 因此沉水植物体内富集的磷只来自于上覆水和沉积物. 这是沉水植物降低上覆水中各形态磷的浓度的一个重要原因.

3.2 上覆水环境因子的改变对各形态磷的影响

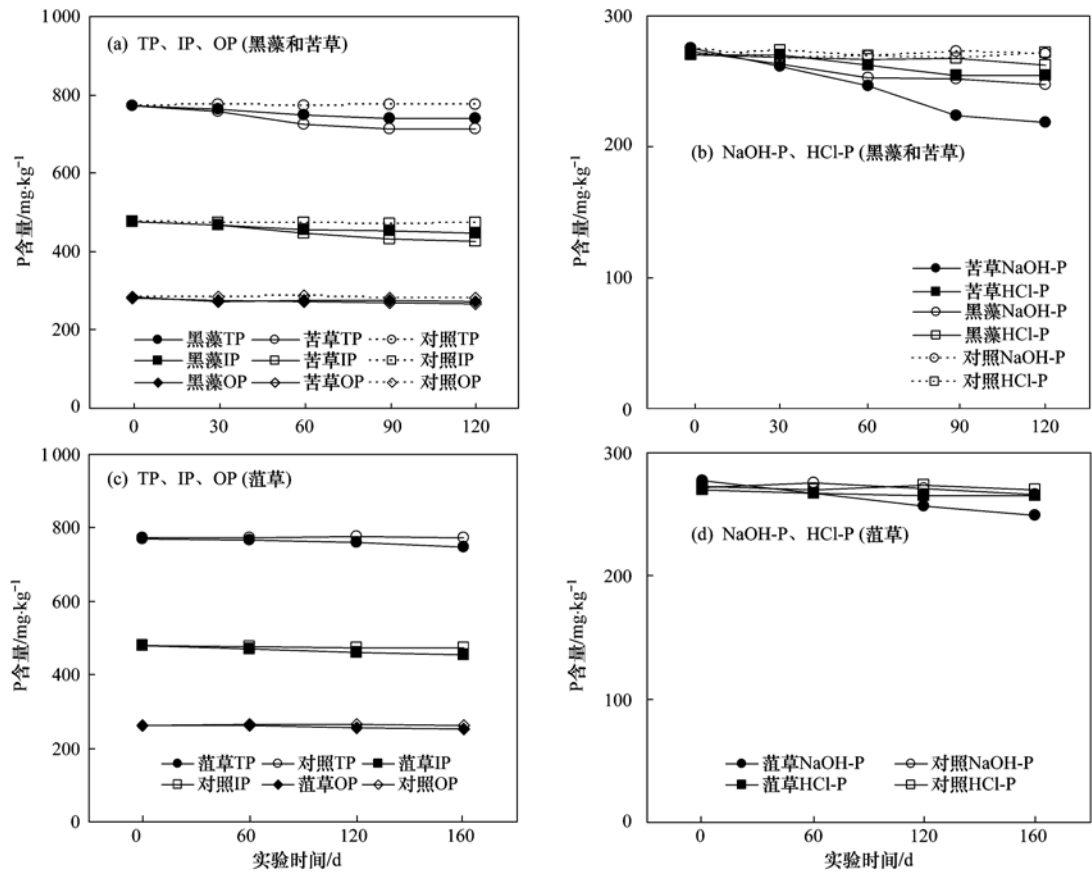


图 3 实验期间黑藻组、苦草组和菹草组沉积物各形态磷含量变化

Fig. 3 Changes in different phosphorus concentrations of *H. verticillata*, *V. natans* and *P. crispus* in sediment during the experiment

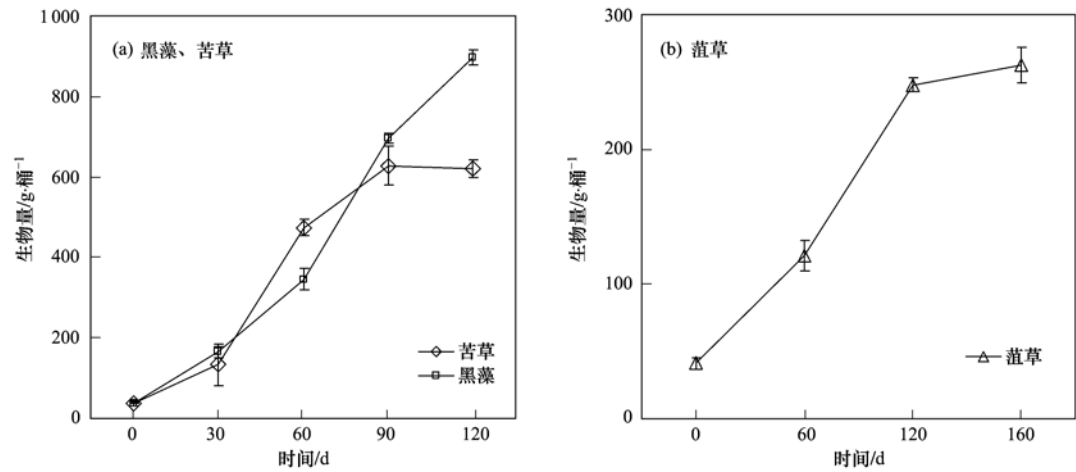


图 4 实验期间沉水植物黑藻、苦草和菹草生物量

Fig. 4 Biomass of submerged macrophytes *H. verticillata*, *V. natans* and *P. crispus*

内源磷的释放受到水环境条件,如温度、溶解氧和氧化还原电位、pH、扰动等因素影响.而大型水生植物特别是沉水植物,对水环境条件如溶解氧、氧化还原电位、pH 等都有重要影响.在本实验条件下,无论是

冬季还是春季实验中,沉水植物组上覆水中 DO、pH 和氧化还原电位(Eh)均高于对照组(图 5).

上覆水 pH 在沉水植物生长期偏碱性,Jin 等^[7]研究发现 pH 升高时将促进沉积物磷释放,但本实

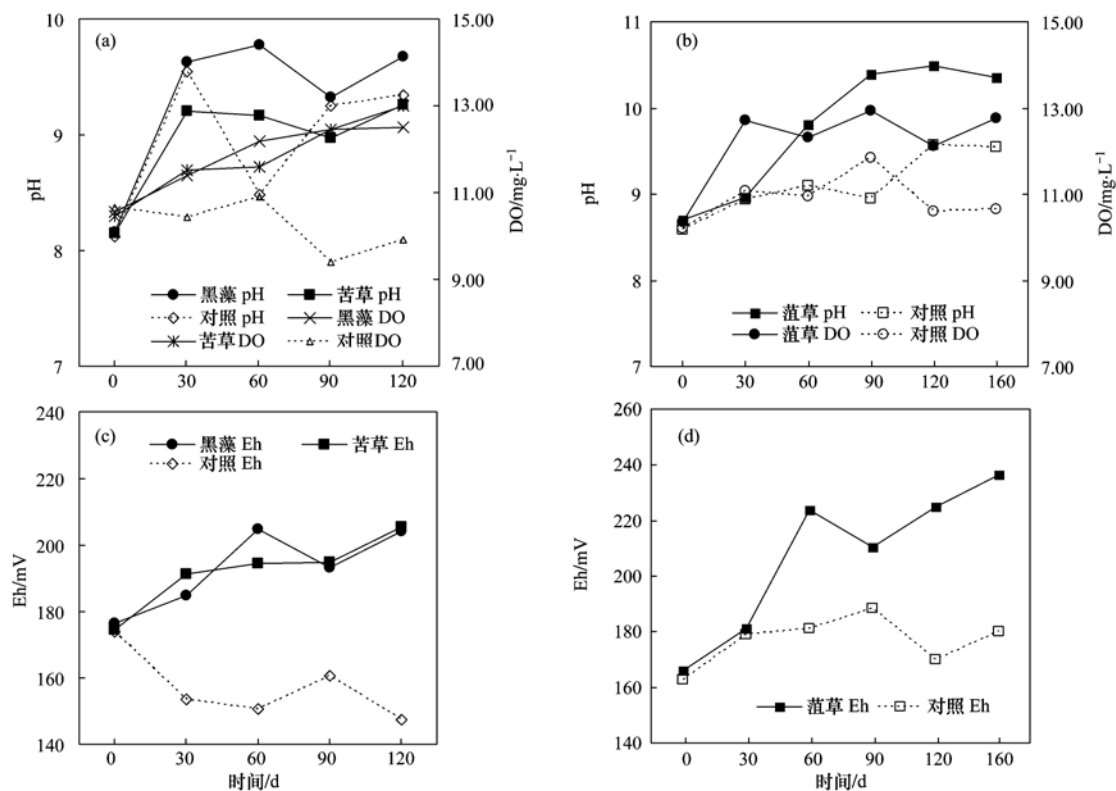


图5 实验期间上覆水环境因子黑藻、苦草 pH、DO 的变化和菹草 pH、DO 的变化,黑藻、苦草 Eh 变化和菹草 Eh 变化

Fig. 5 Changes of pH, DO and Eh of *H. verticillata*, *V. natans* and *V. natans* in overlying water during the experiment

验中植物组上覆水中各形态磷的浓度并未出现显著的升高. 本研究认为这与实验条件有关, 文献[7]所采用研究手段是在室内条件下控制了其他因子如 (DO、Eh 等), 单纯考虑 pH 对水土界面沉积物磷的影响, 而没有考虑在植物生长过程中各种环境因子变化的复杂性. 本实验表明, 在沉水植物存在的条件下, 沉水植物生长所引起的 pH 的升高并未导致沉积物磷的释放这应该和沉水植物生长过程中提高了上覆水 DO、Eh 等有较大关系. 研究表明 DO、Eh 的升高能有效抑制沉积物磷的释放并促进沉积物对上覆水中磷的吸附. 因此, 在沉水植物生长过程中多种环境因子的综合作用下, pH 的升高并未导致上覆水中磷浓度的升高.

由于 pH 和温度同时也影响着沉积物对上覆水磷的释放与吸收过程, 因此上覆水中各形态磷浓度的变化是环境因子综合作用的结果.

对上覆水 TP、环境因子温度 (T)、pH、DO 和 Eh 按式(1)进行归一处理.

$$f(x) = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中, x_i 为变量; $x_{\min}$ 为因子变量最小值; $x_{\max}$ 为因子

变量最大值.

不同沉水植物上覆水中和各环境因子之间的关系归一化后可以通过线性函数关系式表达为:

$$\begin{aligned} \text{TP}_{\text{黑藻}} = & 0.560T + 0.509\text{pH} - 1.112\text{DO} - \\ & 0.755\text{Eh} + 0.293 \\ (R^2 = & 0.98, P < 0.01) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TP}_{\text{苦草}} = & 0.914T + 0.654\text{pH} - 0.925\text{DO} - \\ & 0.382\text{Eh} - 0.382 \\ (R^2 = & 0.97, P < 0.01) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TP}_{\text{菹草}} = & 0.497T + 0.194\text{pH} - 0.354\text{DO} - \\ & 0.470\text{Eh} + 0.210 \\ (R^2 = & 0.95, P < 0.01) \end{aligned}$$

3.3 沉水植物对沉积物磷含量的影响

沉水植物对沉积物 IP 的影响中, 对 NaOH-P 的影响大于 HCl-P, 这主要和沉积物磷的结合性质有关. NaOH-P 是与沉积物中易发生还原作用的铁、铝氧化物或氢氧化物结合的磷. 通常认为这部分磷是较易于释放的, 同时被认为是可为生物所利用的磷^[7-9]. 沉水植物在生长过程中, 其根系的生长发育过程几乎全部是在沉积物中进行的, 在根系的生长

过程中,根系的输氧作用,增加了根系周边的溶解氧^[10],引起根系周围环境因子(pH、Eh 等)的变化,并对根系周边的沉积物进行氧化作用^[10~12],而环境因子的变化必然影响到沉积物 NaOH-P 的释放^[9],研究表明在较高的 Eh 和较低的 pH 均能促进 NaOH-P 的释放^[13, 14]. 在本研究中发现,沉水植物组沉积物中 pH 呈下降趋势而 Eh 呈上升趋势(图 6),所以 NaOH-P 在沉积物中能够被大量释放而为沉水植物所利用.

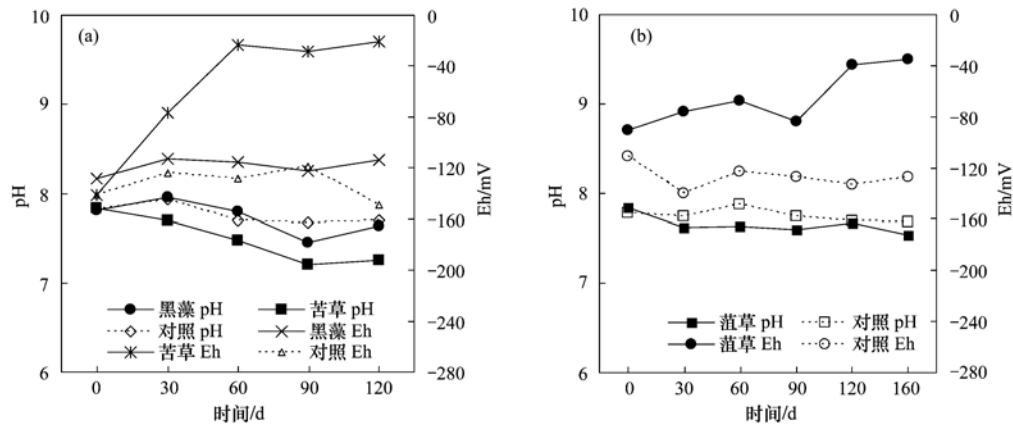


图 6 实验期间黑藻、苦草组 pH、Eh 和菹草组 pH、Eh 沉积物各环境因子变化

Fig. 6 Changes of pH and Eh of *H. verticillata*, *V. natans* and *V. natans* in sediment during the experiment

OP 包括由陆源性排放物质组成的难降解性有机磷部分和由死亡的水生生物残体组成的可降解性有机磷部分^[16]. 湖泊沉积物中 OP 具有部分的活性,但是 OP 结构相对较稳定,植物利用相对较难^[2],OP 的释放速度也相对较小^[2, 17]. 这可能是 OP 在实验过程中变化较小的主要原因之一. 沉积物 OP 多数以磷酸酯(包括肌醇六磷酸)、磷脂、核酸、磷蛋白和磷酸糖类以及一些未知的化合物等形态出现^[18],其中肌醇六磷酸是沉积物中有机磷的重要形态,在需氧降解过程中肌醇六磷酸被有效地矿化成无机磷^[18~20],其矿化程度和速率与氧化还原条件极为相关^[20],实验过程中 OP 向 IP 方向的迁移^[9],也是沉积物中 OP 降低的另一个重要原因.

相关分析表明,植物组沉积物 TP 与 NaOH-P、HCl-P、IP 和 OP 均呈极显著正相关(表 2). 因此,沉积物各形态磷含量的变化对沉积物 TP 具有显著的影响. 这与 Wang 等^[13]在研究长江中下游湖泊沉积物中所得到的结论一致. 沉积物各形态磷与温度(T)、Eh 和生物量(Biomass)均呈不同程度的负相关(表 2).

HCl-P 主要指与自生磷灰石、沉积碳酸钙以及生物骨骼等的含磷矿物有关的沉积磷存在形态,主要来自于生物颗粒的沉积和早期成岩作用形成的氟磷灰石^[15]. 它是沉积物中较为稳定的磷形态,但是当在 pH 值较低的情况下 HCl-P 也可以从沉积物中释放出来^[9]. 在本实验条件下上覆水中 pH 为碱性而沉积物中 pH 值基本保持在中性的水平,所以沉积物中 HCl-P 在实验期间并没有出现明显的波动,这和 HCl-P 的难利用性及难析出性有重要的关系.

因此,在本实验条件下,随着温度、Eh 和生物量的升高沉积物各形态磷均呈下降趋势. 沉积物各形态磷与沉积物 pH 呈不同程度的正相关,表明在沉水植物影响下沉积物较低的 pH 值能降低沉积物中各形态磷的含量.

沉积物 TP 与环境因子及生物量等也呈不同程度的相关,因此将沉积物 TP、温度(T)、pH、Eh 和生物量(Biomass)按式(1)进行归一化.

归一化后不同沉水植物组沉积物中 TP 与各环境因子及生物量之间的关系可以通过线性函数关系式表达为:

$$\begin{aligned} \text{TP}_{\text{黑藻}} = & -0.186T + 0.239\text{pH} - 0.214\text{Eh} - \\ & 0.547\text{Biomass} + 0.930 \\ & (R^2 = 0.98, P < 0.01) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TP}_{\text{苦草}} = & -0.847T + 1.229\text{pH} + 0.235\text{Eh} + \\ & 0.745\text{Biomass} - 0.229 \\ & (R^2 = 0.97, P < 0.01) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TP}_{\text{菹草}} = & 0.024T + 0.999\text{pH} - 0.596\text{Eh} + \\ & 0.515\text{Biomass} \\ & (R^2 = 0.99, P < 0.01) \end{aligned}$$

表 2 植物组沉积物各形态磷与环境因子及生物量之间相关系数矩阵¹⁾

Table 2 Pearson correlation coefficient matrix among phosphorus in sediment, environmental factors and biomass of submerged macrophyte										
沉水植物		TP	NaOH-P	HCl-P	IP	OP	T	pH	Eh	生物量
黑藻	TP	1.00								
	NaOH-P	0.99 **	1.00							
	HCl-P	0.76 **	0.80 **	1.00						
	IP	0.99 **	0.98 **	0.84 **	1.00					
	OP	0.75 *	0.79 *	0.60	0.77 *	1.00				
	T	-0.97 **	-0.98 **	-0.89 **	-0.99 **	-0.73 *	1.00			
	pH	0.73 *	0.62	0.35	0.67	0.28	-0.58	1.00		
	Eh	-0.46	-0.58	-0.60	-0.52	-0.83 **	0.57	0.23	1.00	
	生物量	-0.94 **	-0.96 **	-0.70 *	-0.97 **	-0.67	0.94 **	-0.79 *	0.35	1.00
苦草	TP	1.00								
	NaOH-P	0.96 **	1.00							
	HCl-P	0.95 **	0.97 **	1.00						
	IP	0.98 **	0.99 **	0.98 **	1.00					
	OP	0.92 **	0.92 **	0.82 *	0.90 **	1.00				
	T	-0.95 **	-0.93 **	-0.89 **	-0.96 **	-0.95 **	1.00			
	pH	0.98 **	0.99 **	0.98 **	0.98 **	0.89 **	-0.90 **	1.00		
	Eh	-0.95 **	-0.87 *	-0.81 *	-0.89 **	-0.97 **	0.93 **	-0.89 **	1.00	
	生物量	-0.92 **	-0.98 **	-0.96 **	-0.97 **	-0.87 *	0.92 **	-0.95 **	0.80 *	1.00
菹草	TP	1.00								
	NaOH-P	0.94 **	1.00							
	HCl-P	0.85 *	0.98 **	1.00						
	IP	0.92 **	0.97 **	0.98 **	1.00					
	OP	0.92 **	0.93 **	0.90 **	0.93 **	1.00				
	T	-0.59	-0.34	-0.21	-0.31	-0.60 *	1.00			
	pH	0.96 **	0.90 **	0.79 *	0.87 *	0.79 *	-0.43	1.00		
	Eh	-0.79	-0.88 *	-0.89 **	-0.88 **	-0.97 **	0.51	-0.63	1.00	
	生物量	-0.86 *	-0.98 **	-0.99 **	-0.99 **	-0.94	0.30	-0.78 *	0.94 **	1.00

1) * 表示相关性在 0.05 水平显著(双侧检验); ** 表示相关性在 0.01 水平显著(双侧检验)

4 结论

(1)沉水植物在生长期均不同程度地降低上覆水和沉积物中各形态磷,黑藻、苦草和菹草组上覆水 TP 的最大降低幅度分别为 0.17、0.10 和 0.11 mg·L⁻¹,沉积物 TP 的最大降低幅度分别为 35.34、60.67 和 25.92 mg·kg⁻¹. 沉水植物对 IP 的影响大于 OP,对 NaOH-P 的影响大于 HCl-P.

(2)沉水植物在生长期通过提高上覆水中 DO, Eh 和 pH,提高沉积物 Eh,并使得沉积物 pH 保持在中性的水平范围内的方式促进沉积物对上覆水中磷的吸附能力,从而影响上覆水和沉积物之间磷的迁移转化.

参考文献:

[1] Carpenter S R, Lodge D M. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes [J]. Aquatic Botany, 1986, 26(3): 341-370.
[2] Jiang X, Jin X C, Yao Y, et al. Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at

the sediment and water interface of Taihu Lake, China [J]. Water Research, 2008, 42(8-9): 2251-2259.
[3] Wen Q X, Chen Z Q, Tian T, et al. Effects of phosphorus and nitrogen limitation on PHA production in activated sludge [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(10): 1602-1607.
[4] Zhong J C, Fan C X, Liu G F, et al. Seasonal variation of potential denitrification rates of surface sediment from Meiliang Bay, Taihu Lake, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(7): 961-967.
[5] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—A synthesis of recent works [J]. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 2001, 370(2-3): 224-228.
[6] 刘鸿亮. 湖泊富营养化调查规范 [M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 239-275.
[7] Jin X C, Wang S R, Pang Y, et al. Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China [J]. Environmental Pollution, 2006, 139(2): 288-295.
[8] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, et al. Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle

- and lower reaches of Yangtze River area in China [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2006, **273**(1-3): 109-116.
- [9] Sun S J, Huang S L, Sun X M, *et al.* Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(3): 291-295.
- [10] Sorrell B K, Dromgoole F I. Oxygen transport in the submerged freshwater macrophyte *Egeria densa* planch. I. Oxygen production, storage and release [J]. Aquatic Botany, 1987, **28**(1): 63-80.
- [11] Gahoonia T S, Asmar F, Giese H, *et al.* Root-released organic acids and phosphorus uptake of two barley cultivars in laboratory and field experiments [J]. European Journal of Agronomy, 2000, **12**(3-4): 281-289.
- [12] Rooney N, Kalff J. Inter-annual variation in submerged macrophyte community biomass and distribution: the influence of temperature and lake morphometry [J]. Aquatic Botany, 2000, **68**(4): 321-335.
- [13] Wang S G, Jin X C, Pang Y, *et al.* Phosphorus fractions and phosphate sorption characteristics in relation to the sediment compositions of shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River region, China [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, **289**(2): 339-346.
- [14] Barlow K, Nash D, Turrall H, *et al.* Phosphorus uptake and release in surface drains [J]. Agricultural Water Management, 2003, **63**(2): 109-123.
- [15] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments-Lakes Volvi and Koronia. N. Greece [J]. Chemosphere, 2002, **46**(8): 1147-1155.
- [16] Turner B L, Cade-Menun B J, Condron L M, *et al.* Extraction of soil organic phosphorus [J]. Talanta, 2005, **66**(2): 294-306.
- [17] Turner B L. Organic phosphorus in Madagascan rice soils [J]. Geoderma, 2006, **136**(1-2): 279-288.
- [18] Zhang R Y, Wu F C, Liu C Q, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau, China [J]. Environmental Pollution, 2008, **152**(2): 366-372.
- [19] Horppila J, Nurminen L. Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in Lake Hiidenvesi (southern Finland) [J]. Water Research, 2003, **37**(18): 4468-4474.
- [20] Benitez-Nelson C R, O'Neill Madden L P, Styles R M, *et al.* Inorganic and organic sinking particulate phosphorus fluxes across the oxic/anoxic water column of Cariaco Basin, Venezuela [J]. Marine Chemistry, 2007, **105**(1-2): 90-100.

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> (337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> (342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed ...	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> (359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> (370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> (379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> (385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui (399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> (407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> (421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo (448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> (454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> (459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi (469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai (476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> (481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming (488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> (495)
Biosorption of Chromium(VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> (499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> (505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> (511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong (525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi (532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> (539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> (545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> (551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> (565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> (574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> (580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> (599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> (606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> (612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> (625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> (633)
Detection of <i>Prorocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> (647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG Ya-lei, <i>et al.</i> (652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> (658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> (665)

《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)

2012年2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行