

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, 余乐洹, 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)	

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¹, 菅宇翔^{1,2}, 唐文忠¹, 张洪¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 选择北运河下游典型河网区(闸坝多、水流慢和湖库化)为研究对象,通过为期1 a的水质监控,阐述了河网区氮、磷的时空变化特征,并利用对数型幂函数普适指数公式对其水体营养状态进行了评价。结果表明,河网区水体中TN平均质量浓度为 $12.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 占67.41%),TP为 $1.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (SRP占80.81%)。河网区水体中氮、磷的时空分布特征明显,TN和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度随季节变化特征趋于一致, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 稍有不同;TP和SRP质量浓度随季节变化特征基本一致。从河网区进水带至出水带,水体中氮、磷质量浓度均呈逐渐下降趋势,其中TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 平均质量浓度分别从19.30、13.22和 $2.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至7.98、4.45和 $1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;TP和SRP分别从1.95和 $1.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至1.11和 $0.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。富营养化评价综合指数表明,河网区水体在时空尺度上均处于“极富”营养状态。

关键词: 河网区; 富营养化; 氮; 磷; 北运河; 水生生态系统

中图分类号: X832; X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0352-07

Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed

SHAN Bao-qing¹, JIAN Yu-xiang^{1,2}, TANG Wen-zhong¹, ZHAN Hong¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the water quality survey for one year in the downstream river network areas of North Canal River Watershed, variation features of inorganic nitrogen (N) and phosphorus (P) were analyzed, and water eutrophication degree of river network areas was also assessed. The results showed that the average concentration of TN was $12.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 67.41%); TP was $1.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (SRP, 80.81%). The temporal and spatial variations of N and P in the river network areas were obvious. Various forms of TN and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ concentrations almost had a similar change by month; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ was a little different; TP and SRP also had a similar change. The concentrations of N and P all decreased gradually from water coming region to water leaving region, TN, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ decreased from 19.30, 13.22 and $2.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to 7.98, 4.45 and $1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ on average, respectively; TP and SRP were from 1.95 and $1.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to 1.11 and $0.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Water eutrophication degrees of river network areas were all the highest level at both temporal and spatial scale.

Key words: river network areas; eutrophication; nitrogen; phosphorus; North Canal River; aquatic ecosystem

氮、磷营养盐是生物体必需元素,同时也是引起水体富营养化的主要影响因素^[1]。富营养化是水体出现的生态异常现象,会对区域生态环境及水体安全构成严重威胁^[2~4]。近年来,随着经济发展,人类活动日益剧烈,我国河流水体中营养元素质量浓度有上升趋势^[5~7]。营养盐质量浓度上升会导致河流水体富营养化风险增加,这将成为河流环境治理的重要问题之一。

北运河水系属海河流域北系,河流以污水补给为主,各河段水质基本是劣V类水体^[8,9]。由主河道和沟渠构成的北运河下游河网区,水系发达,河渠纵横交错,担负着调蓄、供水、灌溉、养殖等多种功能。随着区域工农业发展和城市化进程加快,每年大量

营养物排入,加上天津市水资源短缺,来水多为上游污水下排,下游河网区水体污染严重,已成为海河水系的典型污灌区^[10]。目前,关于水库、湖泊和海湾水体富营养化问题的研究较多^[2, 11~13],但北运河下游河网区具有地势平缓、闸坝多、水体流动缓慢、河渠湖库化等特点,是我国北方典型的闸坝型河流,针对这类河流水体中营养盐质量浓度上升造成富营养化问题的研究还鲜见报道。

本实验选取北运河下游典型河网区作为研究区

收稿日期: 2011-04-05; 修订日期: 2011-07-20

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07209-010, 2008ZX07209-006, 2008ZX07101-006);北京市教育委员会共建项目专项

作者简介: 单保庆(1969~),男,研究员,主要研究方向为流域水污染过程与控制机制, E-mail: bqshan@rcees.ac.cn

域,针对区域水体富营养化问题,通过对为期 1a 的水质监测结果统计和分析,揭示河网区氮、磷营养盐等指标的时空变化过程,并采用对数型幂函数普适指数公式,计算出河网区水体富营养化评价综合指数,得出河网区水体的营养状态,以期为该区域水污染治理提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本实验选取北运河下游典型河网区作为研究区域,该河网区是北运河水系下游典型污灌区之一.北运河是海河九大水系之一,其下游位于天津市武清区,属于典型的农业污灌区.区域内地貌多平原,土地利用以农业耕作为主,农作物类型包括小麦、玉米、水稻、蔬菜等;气候属于大陆性季风气候,受季风影响,春季干旱多风,年降水量约 620 mm,其 75% 集中在 7~8 月^[10].

该河网区总面积约 400 km²,主要河流有北运河、凤河、龙河、黄沙河、柳河干渠等,水流方向为自西北向东南.在研究区域内,几条主河渠之间由许多纵横交错的灌溉沟渠联通,形成复杂的河网体系.河网区内闸坝较多(杨洼闸、八孔闸等),采样期间水深 0.5~2 m,水体流动缓慢,河渠湖库化严重,是整个流域营养盐输移过程中的重要环节.

1.2 样品采集与处理

北运河下游河网区的采样共设置了 16 个点,根据河流位置分布和水流方向将其划分为 3 个梯度采样带,包括进水带(1-1~1-4)、河网带(2-1~3-4)和出水带(4-1~4-4),具体采样点位置如图 1 所示.从 2009 年 12 月~2010 年 11 月(2010 年 1 月、2 月未采样),每月中旬采样 1 次(3 个平行),在距水面约 0.20 m 处采集水样,样品采集后用硫酸酸化保存,2 d 内带回实验室完成分析,每次采样前用 YSI 便携式水质仪(YSI ProPlus)测定采样点水体理化性质,包括 pH、溶氧(DO)和氧化还原电位(ORP).

1.3 样品分析方法

河网区水体中营养盐监测指标包括化学需氧量(COD)、总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝氮(NO₃⁻-N)、总磷(TP)、活性磷酸盐(SRP).COD:原水样 2 mL 加入 HACH COD 专用药剂瓶(试剂货号:21258-25),用 DRB200(HACH,DRB200 型数字式反应器)反应器进行消解,完成后用 DR2800(HACH DR2800 分析仪)比色.氮、磷指标分析方法见参考文献[14],其中 TP:原水过硫酸钾消解,钼锑抗分光光度

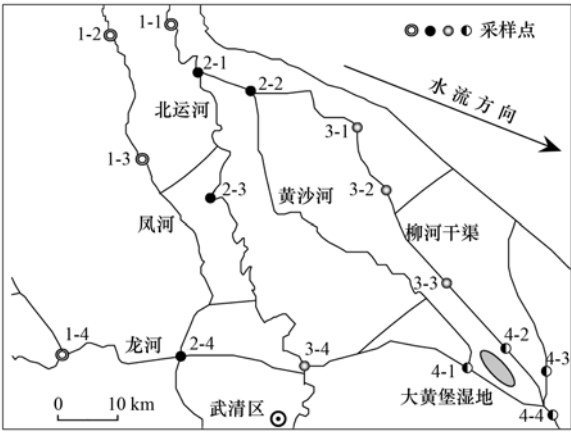


图 1 河网区地理位置与采样布点示意
Fig. 1 Sampling sites in the river network areas

法;SRP:原水过 0.45 μm 孔径滤膜,钼锑抗分光光度法;TN:原水过硫酸钾(Alfa Aesar, 英国)消解,紫外分光光度计比色;NH₄⁺-N:原水过 0.45 μm 孔径滤膜,纳氏试剂光度法;NO₃⁻-N:原水过 0.45 μm 孔径滤膜,紫外分光光度计比色法.

2 结果与分析

2.1 河网区水体理化性质与 COD 分布特征

对北运河下游河网区水质进行了长期定点检测.表 1 是各采样点水体理化性质,其中水体 pH 和 DO 从河网区进水带至出水带均呈现增加趋势,OPR 基本保持不变,平均值分别为 8.14、4.10 mg·L⁻¹和 379.35 mV.监测期间水体中 DO 质量浓度优于《国

表 1 河网区水体理化化学性质
Table 1 Physicochemical characteristics of the water in river network areas

采样点	pH	DO/mg·L ⁻¹	ORP/mV
1-1	8.00 ± 0.19	3.22 ± 0.70	395.00 ± 86.87
1-2	8.00 ± 0.18	2.68 ± 1.10	392.59 ± 89.77
1-3	8.02 ± 0.23	3.37 ± 3.01	385.36 ± 75.20
1-4	8.19 ± 0.40	3.34 ± 2.75	333.41 ± 78.91
2-1	8.16 ± 0.27	4.74 ± 1.39	387.07 ± 83.73
2-2	8.04 ± 0.38	3.90 ± 1.06	341.40 ± 94.13
2-3	8.04 ± 0.19	3.41 ± 1.08	394.14 ± 86.69
2-4	8.13 ± 0.27	2.89 ± 1.26	376.73 ± 87.42
3-1	8.19 ± 0.31	5.63 ± 2.10	367.09 ± 95.76
3-2	8.16 ± 0.40	4.99 ± 4.71	385.96 ± 86.34
3-3	8.02 ± 0.15	4.09 ± 1.81	391.96 ± 91.73
3-4	8.12 ± 0.18	4.34 ± 2.87	380.01 ± 88.30
4-1	8.22 ± 0.33	3.90 ± 2.33	385.41 ± 89.81
4-2	8.27 ± 0.35	3.59 ± 3.02	400.30 ± 94.62
4-3	8.39 ± 0.37	5.78 ± 4.95	378.93 ± 79.10
4-4	8.33 ± 0.24	5.73 ± 2.64	374.20 ± 89.89

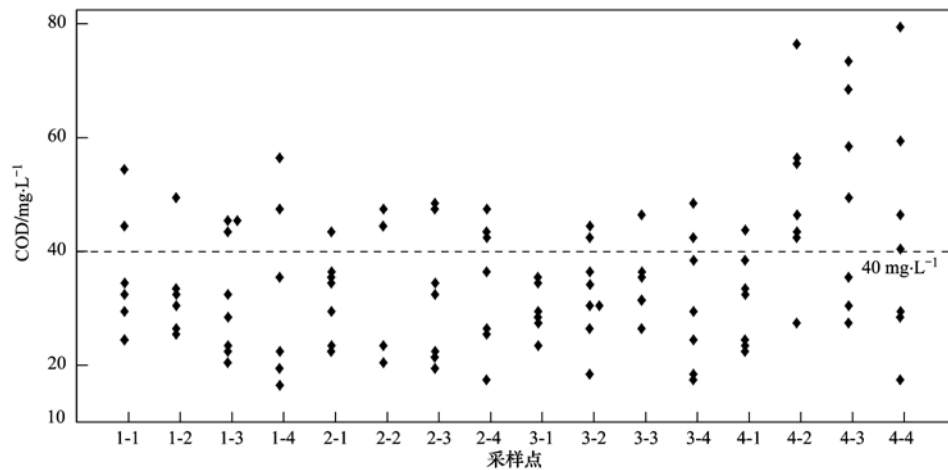


图2 河网区水体中 COD 质量浓度空间分布

Fig. 2 Spatial variation of COD in the water of river network areas

家地面水环境质量标准》(GB 3838-2002)中规定的 V 类水最小允许值($2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),应考虑到监测时间是在白天,到晚上随着浮游植物光合作用终止,转为吸氧后,表层水 DO 还会大幅度地下降^[15],但在空间尺度上,DO 增加表明河网区水体从进水带至出水带呈现一定的好转趋势。

图2显示了河网区各采样点水体中 COD 质量浓度.从图2可知,COD 质量浓度在 $18.05 \sim 80.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均质量浓度为 $36.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,除位于大黄堡湿地附近的 4-2 ~ 4-4 外(图1),COD 质量浓度空间分布差异性不明显.除受湿地植物影响的 4-2 ~ 4-3 外,其他采样点水体中 COD 质量浓度全年多数时间介于地表水 IV 类与 V 类标准之间($10 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

2.2 河网区水体中 TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 分布特征

河网区水体中 TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 质量浓度随时间变化趋势显著,TN 和 NO_3^- -N 的时间分布规律较为一致,而 NH_4^+ -N 略有不同(图3).河网区水体中 TN 平均质量浓度为 $12.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TN 质量浓度从 2009 年 12 月最高值($17.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)平缓下降至 2010 年 8 月最低值($7.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),随后又逐渐上升至最高值; NH_4^+ -N 平均质量浓度为 $8.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N 质量浓度在 1 a 内出现 2 次波动,先从 2009 年 12 月减少至 2010 年 4 月后再逐渐增加至 2010 年 6 月最高值($10.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),随后迅速下降至 2010 年 8 月最低值($5.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)再缓慢上升; NO_3^- -N 平均质量浓度为 $2.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,河网区 NO_3^- -N 质量浓度相对较低,其随时间变化趋势与 TN 基本相似,2009 年 12 月达到最高值 $4.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

2010 年 7 月出现最低值 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

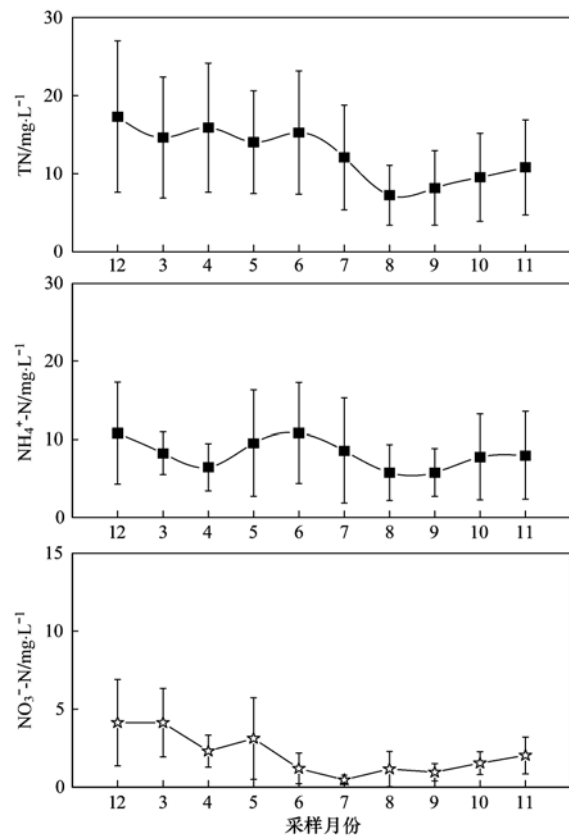
图3 河网区水体中 TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 质量浓度时间分布Fig. 3 Temporal variation of TN, NH_4^+ -N and NO_3^- -N in the water of river network areas

图4 是各采样点水体中 TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 质量浓度空间变化趋势.从图4 可以看出,北运河下游河网区水体中,TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 空间分布基本

一致,从进水带至出水带,平均质量浓度分别从 19.30、13.22 和 2.19 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 7.98、4.45 和 1.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 就形态而言,河网区水体中 NH_4^+-N 是主要氮形态, $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 质量浓度相对较少,分别占 TN 的 23.64% ~ 72.48% 和 4.55% ~ 30.10%.

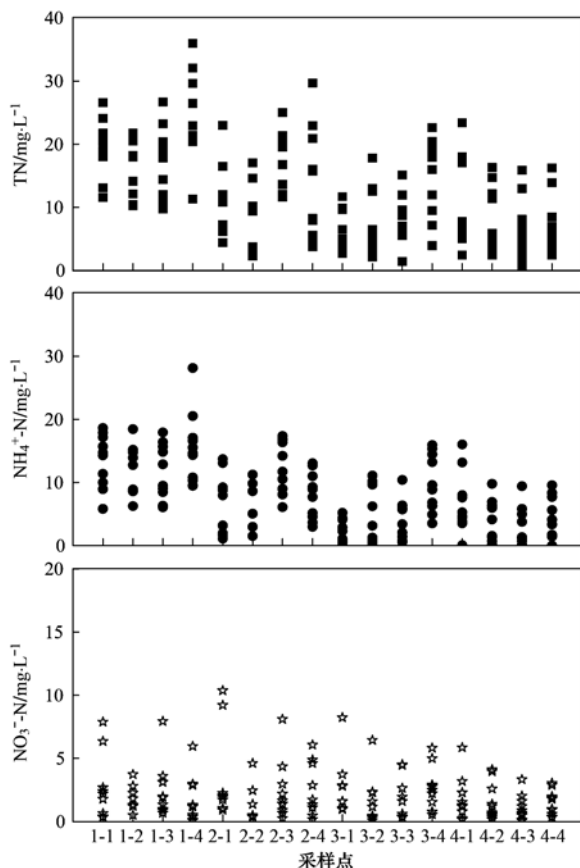


图4 河网区水体中 TN、 NH_4^+-N 和 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 质量浓度空间分布

Fig. 4 Spatial variation of TN, NH_4^+-N and $\text{NO}_3^- -\text{N}$ in the water of river network areas

2.3 河网区水体中 TP 和 SRP 分布特征

河网区水体中 TP 和 SRP 有明显的时空分布差异(图 5 和 6). 图 5 表示了水体中 TP 和 SRP 的季节性变化趋势,两者质量浓度随时间变化规律基本一致,从 2009 年 12 月迅速增加至 2010 年 6 月最高值,分别为 2.46 和 1.83 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,随后迅速减少至 2010 年 8 月再呈现平缓下降趋势;图 6 表示了水体中 TP 和 SRP 的空间变化趋势,与氮相似,TP 和 SRP 质量浓度从进水带至出水带呈现逐渐下降趋势,平均质量浓度分别从 1.95 和 1.59 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 1.11 和 0.91 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 就形态而言,河网区水体中磷主要以 SRP 形态存在,占 TP 的 60.12% ~ 91.82%,表明北运河下游河网区水体中磷的生物可利用性很高^[16].

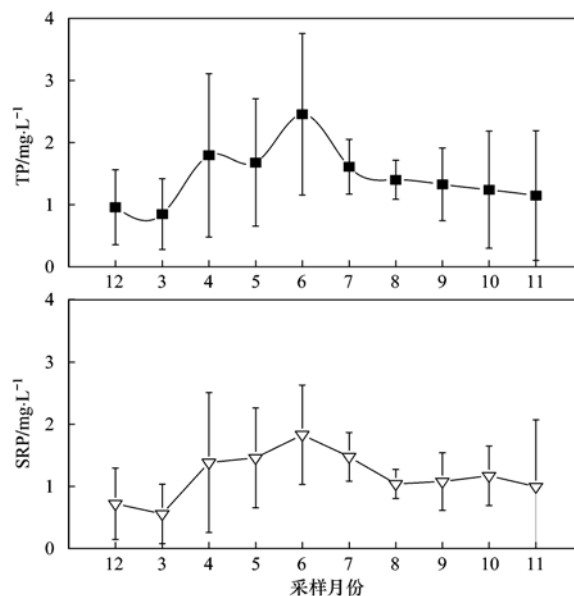


图5 河网区水体中 TP 和 SRP 质量浓度时间分布 ($n=160$)

Fig. 5 Temporal variation of TP and SRP in the water of river network areas

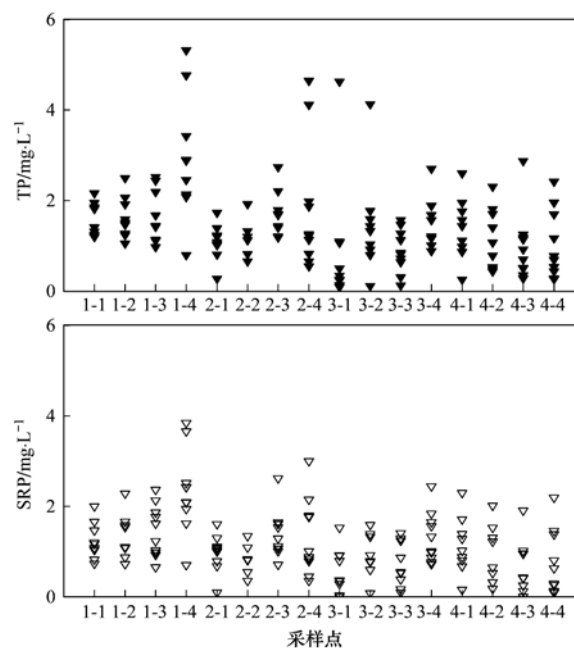


图6 河网区水体中 TP 和 SRP 质量浓度空间分布

Fig. 6 Spatial variation of TP and SRP in the water of river network areas

2.4 河网区水体富营养化评价综合指数

采用广泛适用于我国湖泊、水库和河流水体富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式,计算北运河下游河网区水体富营养化评价综合指数(EI),并依据富营养状态的各级分级标准(贫: $\text{EI} \leq 20$; 中: $\text{EI} \leq 39.42$; 富: $\text{EI} \leq 61.29$; 重富: $\text{EI} \leq 76.28$;

极富: $EI \leq 99.77$), 评价各采样点水体所处的营养状态, 其公式为^[17]:

$$EI = \sum_{j=1}^n W_j \times EI_j = 10.77 \times \sum_{j=1}^n W_j \times (\ln x_j)^{1.1826}$$

式中, W_j 为指标 j 的归一化权重值, 本研究将各指标视作等权重; EI_j 为指标 j 的富营养化评价普适指数; x_j 为指标 j 的“规范值”, 其计算方法见文献[17].

北运河下游河网区水体营养评价综合指数值计算结果如图 7 所示. 结合富营养状态分级标准, 从图 7 可知, 河网区水体全年处于“极富”营养状态, EI 最高值出现在 2010 年 5 月 (90.59); 就空间分布而言, 各采样点水体均处于“极富”营养状态, 与氮、磷相似, 从进水带至出水带, EI 值呈现逐渐下降趋势, 平均值从 85.36 降至 80.33.

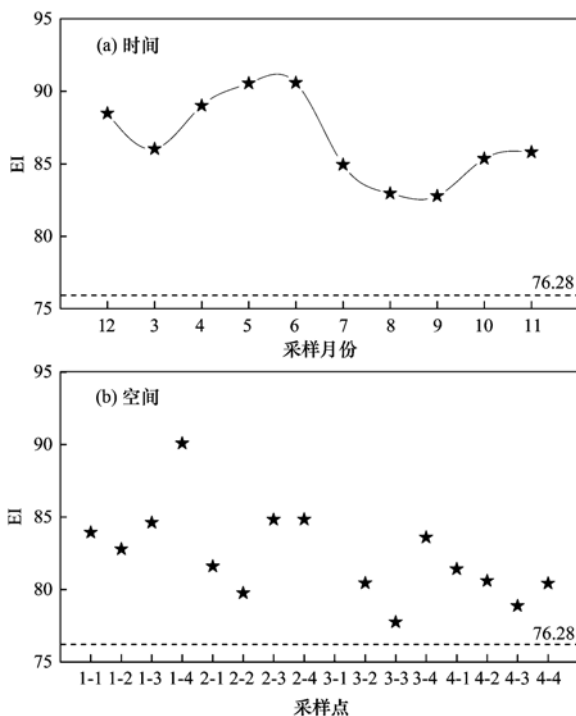


图 7 河网区水体营养评价综合指数值

Fig. 7 EI values of the water in river network areas

3 讨论

3.1 河网区水体中氮、磷时空变化特征原因分析

为了更好地分析季节性变化, 结合区域气候特征, 采用 3~5 月为春季、6~8 月为夏季、9~11 月为秋季、12 月~次年 2 月为冬季的划分原则. 北运河下游河网区水体中 TN 和 $NO_3^- - N$ 质量浓度随季节

变化特征明显, 并且趋于一致, 基本表现为春季平缓波动, 夏季陡然降低至最低值, 秋季又平缓上升至冬季最高点; 而 $NH_4^+ - N$ 质量浓度季节变化特征稍有不同, 主要表现为出现 2 次低谷, 分别在春季的 4 月和夏季的 8 月 (图 3). 河网区水体中 TP 和 SRP 质量浓度随季节变化特征基本一致, 均是由春季迅速上升至夏季 6 月达到最高值, 经过 7~8 月陡然降低后呈平缓下降趋势至冬季 (图 5).

北运河下游河网区污染源主要包括上游污水和区域内农业面源, 工业排放较少. 一般来说, 在 1 a 内, 枯水期河流自净能力最小, 水质最差; 平水期居中; 丰水期则自净能力最大, 相应水质较好^[12, 18]. 北运河下游河网区年降水量 75% 集中在夏季 7~8 月^[10], 加上藻类大量繁殖利用, 使得河网区水体中氮、磷质量浓度从 6~8 月均有迅速下降过程. 不同的是夏季过后, 在秋季和冬季, 河网区水体中氮质量浓度呈上升趋势, 而磷质量浓度仍呈下降趋势, 可能与上游来水有关. 从冬季至次年春季 3 月, 由于雪水的稀释作用, 河网区水体中氮、磷质量浓度又都有一定的下降过程 (图 3 和图 5), 而在整个春季, 水体中氮质量浓度变化不明显, 其中 $NH_4^+ - N$ 质量浓度的波动可能与微生物作用有关^[19, 20]; 磷质量浓度的增加则可能是温度上升引起沉积物中的磷释放所致^[21, 22]. 北运河下游河网区由于水资源严重不足, 闸坝调控存水现象普遍, 进而区域内河渠水体流动缓慢. 同时, 河网区每年接纳大量来自上游和区域内排放的营养物, 水体中营养盐质量浓度呈上升趋势^[9], 导致富营养化问题日趋凸显, 区域河流水生态质量下降. 河网区水体中养分质量浓度夏季变化趋势与湖泊相似, 同水体中藻类大量繁殖利用密切相关, 这也进一步证实了北运河下游河渠湖库化后带来了新问题.

北运河下游河网区水系发达, 沟渠纵横交错. 沟渠作为河网区水系重要组成部分, 能够通过其中的沉积物吸附、植物吸收、微生物降解等一系列自然净化机制, 截留水体中的氮、磷营养盐, 达到一定的水体自净能力^[23, 24]. 从图 4 和图 6 可以看出, 河网区水体中氮、磷空间分布特征相似, 经沟渠的自净作用, 从进水带至出水带水体中氮、磷质量浓度均呈现逐渐下降趋势. 可见, 河网能有效地固定和截留来自流域的污染物, 在营养盐生物地球化学循环过程中起到重要作用.

3.2 河网区水体富营养化评价

在监控周期内 (2009 年 12 月~2010 年 11 月),

北运河下游河网区水体中氮、磷营养盐质量浓度严重超标, TN 平均质量浓度为地表水 V 类标准的 6.25 倍, TP 为 3.62 倍. 在 16 个采样点处, 水体中氮、磷生物可利用态所占质量分数都非常高, 其中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$ 平均值为 67.41%; SRP/TP 平均值也高达 80.81%, 这说明河网区水体中氮、磷生物可利用性很高^[16]. 此外, N/P 是考察营养盐结构的主要指标^[11, 25]. Redfield 等^[26]认为浮游植物在光合作用中以吸收一定的 N/P 原子比进行, 该比值为 16 (Redfield 比值). 在淡水环境中, 藻类生长期水体中 $\text{N}/\text{P} < 7$, 氮是可能的限制性营养盐; 而 > 7 , 则磷是可能的限制性营养盐^[2, 27]. 2009 年 12 月 ~ 2010 年 11 月, 河网区水体 N/P 平均值为 10.14, 可以看出河网区水体富营养化进程中磷质量浓度相对略低, 要控制河网区水体的富营养化进程, 关键可能在于控制磷的污染负荷^[28].

河网区水体中氮、磷营养盐质量浓度严重超标, 势必造成水体富营养化. 本研究采用广泛适用于我国湖泊、水库和河流水体富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式, 通过计算水体富营养化评价综合指数, 评价了北运河下游河网区水体的营养状态. 无论是时间尺度还是空间尺度, 河网区水体均处于“极富”营养状态(图 7). 河网区水体富营养化虽不影响农业灌溉, 但富营养化水体中, 蓝藻常于夏季大量繁殖, 在水面形成一层蓝绿色且有腥臭味的浮沫(北运河下游河网区已观察到), 引起水质恶化, 严重时甚至会耗尽水中溶氧造成鱼类死亡, 进而导致水生生态系统紊乱, 水生生物种类减少, 多样性受到破坏, 严重危害水生生态系统健康^[29, 30]. 随着经济发展, 大量营养物排入, 北运河下游河网区水体富营养化问题已十分严重, 影响到河流水生态恢复, 这将成为区域河流水环境治理的新问题和关注点.

4 结论

(1) 北运河下游河网区水体中氮、磷质量浓度严重超标, TN 平均质量浓度为 $12.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 为 $1.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 分别是地表水 V 类标准的 6.25 和 3.62 倍, 且其生物可利用态所占比例很高, 其中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$ 平均值为 67.41%, SRP/TP 平均值为 80.81%.

(2) 河网区水体中氮、磷时空分布特征明显. 在时间尺度上, 水体中氮、磷质量浓度呈现季节性变化规律; 在空间尺度上, 水体中氮、磷分布特征相似, 从进水带至出水带氮、磷质量浓度均呈逐渐下降

趋势.

(3) 河网区水体富营养化评价综合指数表明, 无论是时间尺度还是空间尺度, 河网区水体均处于“极富”营养状态, EI 最高值出现在 2010 年 5 月.

参考文献:

- [1] 孟伟, 于涛, 郑丙辉, 等. 黄河流域氮磷营养盐动态特征及主要影响因素 [J]. 环境科学学报, 2007, **27**(12): 2046-2051.
- [2] 何德进, 邢友华, 姜瑞雪, 等. 东平湖水体中氮磷的分布特征及其富营养化评价 [J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(8): 45-48.
- [3] 马蕊, 林英, 牛翠娟. 淡水水域富营养化及其治理 [J]. 生物学通报, 2003, **38**(11): 5-9.
- [4] Smith V H, Schindler D W. Eutrophication science: where do we go from here? [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2009, **24**(4): 201-207.
- [5] Xia X H, Zhou J S, Yang Z F. Nitrogen contamination in the Yellow River basin of China [J]. Journal of Environmental Quality, 2002, **31**(3): 917-925.
- [6] Zhang J, Yan J, Zhang Z F. Chemical trend of national rivers in China: Huanghe and Changjiang [J]. Ambio, 1995, **24**: 274-278.
- [7] 刘成, 王兆印, 黄文典, 等. 海河流域主要河口口水沙污染现状分析 [J]. 水利学报, 2007, **38**(8): 920-925.
- [8] 童保铭, 陈添, 徐谦, 等. 北京市北运河系水质有机污染时空变化研究 [J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2009, **30**(3): 56-60.
- [9] 许晓伟, 刘德文, 车洪军, 等. 北运河水环境调查与评价 [J]. 海河水利, 2009, (2): 14-15.
- [10] 李楠, 单保庆, 张洪, 等. 北运河下游典型灌渠沉积物有机磷形态分布特征 [J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 2911-2916.
- [11] 彭云辉, 孙丽华, 陈浩如. 大亚湾海区营养盐的变化及富营养化研究 [J]. 海洋通报, 2002, **21**(3): 44-49.
- [12] 贾海峰, 程声通, 丁建华, 等. 水库调度和营养物消减关系的探讨 [J]. 环境科学, 2001, **22**(4): 104-107.
- [13] Singh K P, Malik A, Mohan D, et al. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India)-a case study [J]. Water Research, 2004, **38**(18): 3980-3992.
- [14] 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.
- [15] 胡雪峰, 许世远, 陈振楼, 等. 上海市郊中小河流氮磷污染特征 [J]. 环境科学, 2001, **22**(6): 68-71.
- [16] 杨清心. 太湖水华成因及控制途径初探 [J]. 湖泊科学, 1996, **8**(1): 67-74.
- [17] 李祚泳, 汪嘉杨, 郭淳. 富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式 [J]. 环境科学学报, 2010, **30**(3): 664-672.
- [18] Al Bakri D, Rahman S, Bowling L. Sources and management of urban stormwater pollution in rural catchments, Australia [J].

- Journal of Hydrology, 2008, **356**(3-4): 299-311.
- [19] Erwin D P, Erickson I K, Delwiche M E, *et al.* Diversity of oxygenase genes from methane-and ammonia-oxidizing bacteria in the Eastern Snake River Plain aquifer [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(4): 2016-2025.
- [20] Bodelier P L E, Libochant J A, Blom C W P M, *et al.* Dynamics of nitrification and denitrification in root-oxygenated sediments and adaptation of ammonia-oxidizing bacteria to low-oxygen or anoxic habitats [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, **62**(11): 4100-4107.
- [21] 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.
- [22] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al.* Phosphorus release characteristics of different trophic lake sediments under simulative disturbing conditions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **161**(2-3): 1551-1559.
- [23] Haggard B E, Stanley E H, Hyler R. Sediment-phosphorus relationships in three northcentral Oklahoma streams [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1999, **42**(6): 1709-1714.
- [24] Smith D R, Warnemuende E A, Haggard B E, *et al.* Changes in sediment-water column phosphorus interactions following sediment disturbance [J]. Ecological Engineering, 2006, **27**(1): 71-78.
- [25] 郑丙辉, 秦延文, 孟伟, 等. 1985 ~ 2003 年渤海湾水质氮磷生源要素的历史演变趋势分析 [J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 494-499.
- [26] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A. The influence of organisms on the composition of sea-water [M]. New York: Interscience, 1963. 26-77.
- [27] Bulgakov N G, Levich A. The nitrogen: phosphorus ratio as a factor regulating phytoplankton community structure: nutrient ratios [J]. Archiv für Hydrobiologie, 1999, **146**(1): 3-22.
- [28] 高永霞, 朱广伟, 贺冉冉, 等. 天目湖水质演变及富营养化状况研究 [J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 673-679.
- [29] Anderson D M, Glibert P M, Burkholder J M. Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences [J]. Estuaries and Coasts, 2002, **25**(4): 704-726.
- [30] 陈水勇, 吴振明, 俞伟波, 等. 水体富营养化的形成, 危害和防治 [J]. 环境科学与技术, 1999, (2): 11-15.

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