

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)

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^{1,2}, 徐宗学^{1*}, 唐芳芳¹, 于伟东³, 程燕平³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454003; 3. 水利部海河水利委员会漳卫南运河管理局, 德州 253009)

摘要: 采用聚类分析、季节性 Kendall 法分析了漳卫南运河流域的水质时空演变特征及水质变化趋势, 采用因子分析/主成分分析法和多元回归法定性识别了流域水质污染的主要污染源并对其贡献率进行了计算。空间聚类和站点因子得分计算后发现, 漳卫南运河流域水质空间上可以分为两大类, 一类是位于流域西北部漳河中上游区域, 该区域水质优良; 第二类为卫河流域及漳卫南运河东部平原区, 该区域水体受污染严重, 水质较差, 且沿途接纳点源排放口排入的污染物, 水质空间变化较大。时间聚类和季节性 Kendall 趋势分析表明: 流域水质在 2002~2009 年间可分为 3 个阶段 2 种变化趋势, 2002~2003 年为水质恶化阶段, 卫河及漳卫南运河东部平原区干流水质严重污染, 漳河上游及中游岳城水库水质也呈恶化趋势, 但总体水质良好; 2004~2006 年为水质好转期, 2007~2009 年为第三阶段, 水质进一步好转期。在 2004~2009 年间, 流域整体水质虽然好转, 但西南部的卫河流域及漳卫南运河东部平原干流区水环境状况依然堪忧。因子分析/主成分分析和多元线性回归分析结果表明, 造成漳卫南运河流域水质污染的污染物主要来源于市政污水、重工业废水、化学工业废水、天然污染源和采矿活动, 汛期农业生产引起的农业非点源排放以及暴雨径流引起的非点源排放也占相当比例。采用主成分多元线性回归方法评价了各种污染源的贡献率。结果可以为漳卫南运河流域水污染控制战略制定提供有益的参考。

关键词: 漳卫南运河; 水质; 多元统计分析; 时空变化; 污染源识别

中图分类号: X824; X832 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0359-11

Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin

XU Hua-shan^{1,2}, XU Zong-xue¹, TANG Fang-fang¹, YU Wei-dong³, CHENG Yan-ping³

(1. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 3. Zhangweinan Canal Authority of Haihe River Water Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Dezhou 253009, China)

Abstract: In this study, several statistical methods including cluster analysis, seasonal Kendall test, factor analysis/principal component analysis and principal component regression were used to evaluate the spatiotemporal variation of water quality and identify the sources of water pollution in the Zhangweinan River basin. Results of spatial cluster analysis and principal component analysis indicated that the Zhangweinan River basin can be classified into two regions. One is the Zhang River upstream located in the northwest of the Zhangweinan River basin where water quality is good. The other one covers the Wei River and eastern plain of the Zhangweinan River basin, where water is seriously polluted. In this region, pollutants from point sources flow into the river and the water quality changes greatly. Results of temporal cluster analysis and seasonal Kendall test indicated that the study periods may be classified into three periods and two different trends were detected during the period of 2002-2009. The first period was the year of 2002-2003, during which water quality had deteriorated and serious pollution was observed in the Wei river basin and eastern plain of the Zhangweinan River basin. The second period was the year of 2004-2006, during which water quality became better. The year of 2007-2009 is the third period, during which water quality had been improved greatly. Despite that water quality in the Zhangweinan River basin had been improved during the period of 2004-2009, the water quality in the Wei River (southwestern part of the basin), the Wei Canal River and the Zhangweixin River (eastern plain of the basin) is still poor. Principal component analysis and multi-linear regression of the absolute principal component scores showed that the main pollutants of the Zhangweinan River basin came from point source discharge such as heavy industrial wastewater, municipal sewage, chemical industries wastewater and mine drainage in upstream. Non-point source pollution such as agricultural pollution and runoff pollution caused by heavy rainfalls also showed considerable impact on water quality in the Zhangweinan River basin during flood seasons. These results provide useful information for better pollution control strategies in the Zhangweinan River basin.

收稿日期: 2011-04-08; 修订日期: 2011-06-09

基金项目: 漳卫南运河管理局全球环境基金海河项目监测评价(ZWNOZJ017); 河南省高校矿山环境保护与生态修复省级重点实验室培育基地开放基金项目(KF2010-06)

作者简介: 徐华山(1977~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为流域污染物总量控制, E-mail: xuhuashan@mail.bnu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

Key words: Zhangweinan River; water quality; multivariate statistical analysis; spatiotemporal variation; pollution source apportionment

河流水质是流域水环境管理决策部门关心的核心问题,其时空分布特征可以为流域水环境管理者提供动态信息.目前流域水质空间变化研究的主流技术为多元统计分析方法^[1],如系统聚类分析法、因子分析/主成分分析法和多元线性回归分析法.国内研究者采用系统聚类分析法对我国陕西秦岭南坡的金水河^[2,3]、三峡库区的香溪河^[4]、汉江流域堵河^[5]、汉江上游^[6]、湘江^[7]等流域水质进行评估,分析其时空变化;国外学者采用该法分析了西班牙 Pisuerga 河^[8]、马来群岛的河口^[9]、日本富士河^[10]、土耳其 Behrimaz 河^[11]、尼泊尔 Bagmati 河^[12]、印度 Ganga 河^[13]、默哈纳迪河^[14]、Gomti 河^[15]、Brahmani 河^[16]、阿根廷 Suquia 河^[17]、韩国 Nakdong 河^[18]等流域水质时空演变特征.季节性 Kendall 法常用于流域水质非参数趋势分析^[19~26].因子分析/主成分分析法可对河流污染源进行定性识别^[9,12,15,16,27~31],多元线性回归分析法常与主成分分析法一起用于计算不同污染源对水体不同指标的贡献率^[3,15,27,29,32,33].目前关于漳卫南运河流域的研究主要偏重于流域水资源的管理^[34,35]、水污染控制^[36]、水生态恢复^[37]、沉积物重金属污染及生态风险评价^[38],而针对水质时空演变及污染源定性识别研究鲜见报道.采用系统聚类分析法,分析了漳卫南运河流域水质时空演变规律;采用季节性 Kendall 法对流域 2001~2009 年水质变化趋势进行了分析;采用因子分析法对流域主要污染源进行定性识别;采用主成分回归分析法确定主要公因子对各水质指标的贡献率,并结合流域环境特点分析其水质时空差异的原因,以期对漳卫南运河流域水资源保护与可持续利用决策提供科学依据.

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

漳卫南运河水系位于太岳山以东,滏阳河、子牙河以南,黄河、马颊河以北,流域范围为东经 112°~118°,北纬 35°~39°,由漳河、卫河、卫运河、漳卫新河和南运河组成,流经山西、河南、河北、山东四省经天津市入渤海,是海河流域五大水系之一.流域总面积 37 700 km²,山区、丘陵区面积 25 466 km²,占流域总面积的 68%;平原面积 12 234 km²,占流域总面积的 32% (图 1).流域地处温带半干旱、半湿润季

风气候区,多年平均气温在 14℃ 左右.流域总的地势是西南高东北低,平均比降 0.263%,大致分山地、平原 2 种地貌.西部为南-北和西南-东北走向的太行山山脉.流域径流主要产生于上游的两大支流漳河和卫河.多年平均降水量 604 mm,其中漳河流域 584 mm、卫河流域 652 mm、中下游地区 567 mm;年最大降雨量为 997 mm (1963 年),年最小降雨量为 339 mm (1965 年),年内降雨量主要集中在汛期 (6~9 月),汛期多年平均降雨量为 448 mm,占全年降雨量的约 74%.

1.2 研究方法

1.2.1 系统聚类分析法

系统聚类分析法是一种广泛应用的聚类分析方法,分为变量聚类 and 样品聚类.其思想是先将每一个个体看做一类,然后将相近程度最高的两类进行合并组成一个新类,再将该新类与相似度最高的类进行合并.不断重复此过程,直到所有的个体都归为一类.流域水质评价中常按照监测时间和监测断面的地理位置进行聚类,分析流域水质的时空变化特征.

1.2.2 因子分析/主成分分析

因子分析是一种数据简化技术,通过研究众多变量之间的内部依赖关系,探求观测数据之间的基本结构,并用少数几个独立的不可观测变量 (因子) 来表示其基本的数据结构,这几个假想变量 (因子) 能够反映原来众多变量的主要信息,原来的变量可以用这些提取出来的因子的线性组合表示^[10,13].水质分析中常用因子分析提取污染因子对污染源定性识别^[9,12,15,16,27~32,39~43],也有研究者采用该方法评价河流监测网络监测站点布设的合理性^[12]和识别水质监测指标重要性^[44].

1.2.3 季节性 Kendall 法

河流水质受河流径流变化影响,传统意义上的汛期与非汛期水质数据比较,缺乏可比性.季节性检验将比较历年相同月份间水质数据,避免季节性影响.季节性 Kendall 检验是 Mann-Kendall 检验方法的一种推广,该法可用于系列有漏测值、未检测值以及变量非正态分布时间序列.其思路是分别计算各季节或月份水质数据的检验统计量及方差,然后计算各季节或月份的总统计量.通过比较总统计量与标准正态表进行统计显著性趋势检验,详细的数学描述见文献[20].

1.3 数据来源及预处理

漳卫南运河流域 2001 ~ 2009 年水质逐月监测数据由漳卫南运河管理局提供,共分刘家庄(漳河)、匡门口(漳河)、天桥断(漳河)、观台(漳河)、岳城水库(漳河)、淇门(卫河)、小河桥(卫河)、杨庄桥(卫河)、武陵(卫河)、龙王庙(卫河)、白庄桥(卫运河)、北馆陶(卫运河)、先锋桥(卫运河)、四女寺闸(卫运河)、第三店(南运河)、吴桥闸(岔河)、袁桥闸(减河)、王营盘(漳卫新河)、辛集闸(漳卫新河)19 个断面(图 1)。监测指标包括电导率(EC)、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数、五日生化需氧

量(BOD_5)、总硬度(TH)、悬浮固体(TSS)、氯离子(Cl^-)、硫酸根(SO_4^{2-})、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、硝氮($NO_3^- -N$)、总磷(TP)、氟离子(F^-)、挥发酚(V-ArOH)、氰化物($T-CN^-$)、汞(THg)、砷(As)、六价铬(Cr^{6+})18 项指标。数据分汛期和非汛期分别处理,分析 2001 ~ 2009 年的时空变化。数据在进行多元统计分析之前进行标准化转换,主成分分析前对数据进行 KMO 检验,看是否适合作主成分分析[要求 KMO 值 > 0.5 ($0 < KMO < 1$),并且越接近 1 越好;显著性越接近 0 越好]。多元统计分析采用 SPSS 18.0 软件包完成。

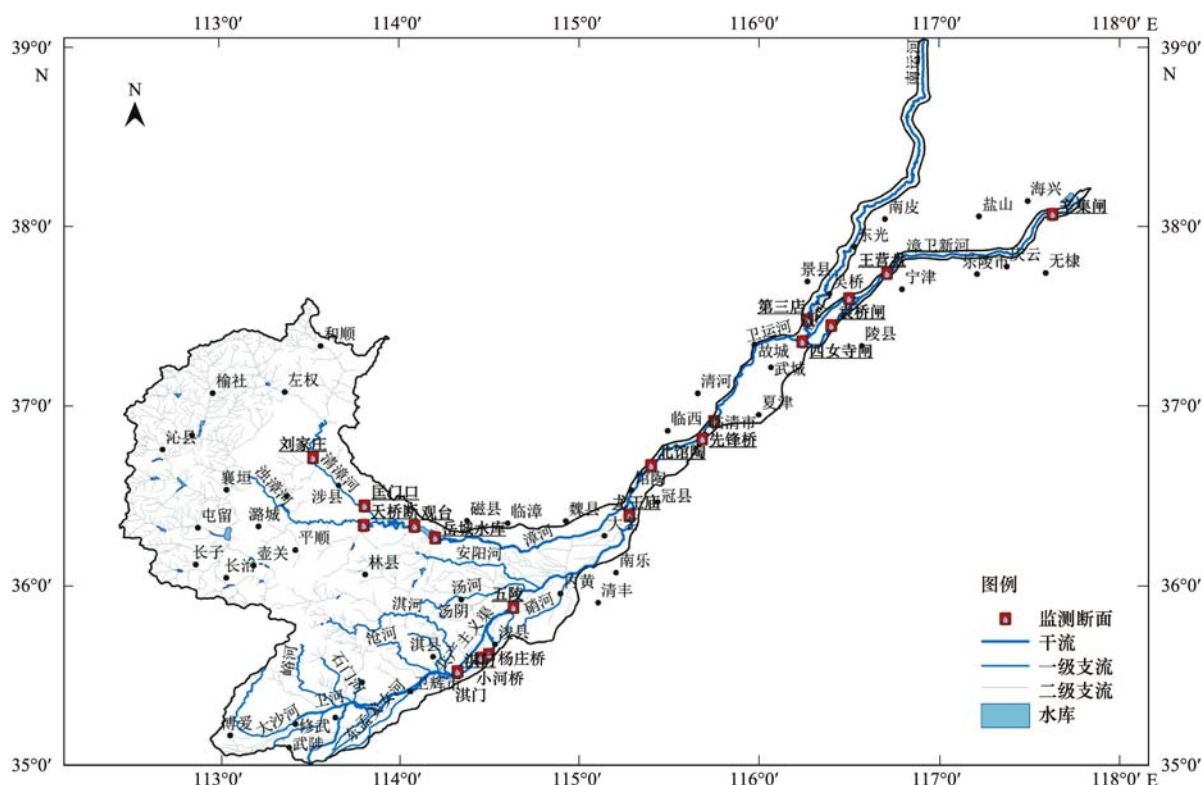


图 1 漳卫南运河流域断面分布示意

Fig. 1 Sampling sites in the Zhangweinan River basin

2 结果与分析

2.1 聚类分析

2.1.1 时间聚类分析

从时间聚类结果上看,漳卫南运河流域 2001 ~ 2009 年汛期分为 3 个时段,2002 ~ 2003 年为第一阶段,这一阶段流域水质呈恶化趋势,卫河及流域干流的卫运河和漳卫新河流域表征有机污染的单项指标超标严重,漳河流域部分水质指标也呈现下降趋势,但水质总体良好。2004 ~ 2006 年为第二时段,水质

较第一阶段有明显好转,COD 和 BOD_5 均有大幅度降低,但卫河及流域干流的卫运河和漳卫新河流域依然超标严重。2001、2007 ~ 2009 年属于第三阶段,水质较第二阶段 2004 ~ 2006 年有进一步的提高,2007 ~ 2009 年卫河及流域干流的卫运河和漳卫新河流域 COD 和 BOD_5 继续大幅度降低,超标倍数进一步减少,水环境进一步好转(图 2)。漳河上游及岳城水库水质一直处于地表水Ⅲ以上(营养性指标不参与评价),90% 以上的时段都符合地表水环境质量标准(GB 3838-2002)的Ⅰ、Ⅱ类水质。

非汛期分为 4 个时段 2 种变化趋势,2001 年和 2002 ~ 2003 年 2 个时段为水质恶化阶段,这一阶段流域水质呈现下降趋势,2002 ~ 2003 年成为卫河流域及干流卫运河和漳卫新河流域水质超重污染期,表征有机污染的单项指标超标严重.2004 ~ 2005 年和 2006 ~ 2009 年 2 个时段为污染减轻趋势时段,为重污染期,这一时段流域水质为呈现好转趋势,水质

较第一阶段有明显好转,COD 和 BOD_5 均有大幅度降低,但是依然超标严重.2004 ~ 2009 年 6 a 内,每 2 a 水质出现一次较大的好转(图 2).虽然水质较差,但水质一直呈现上升趋势,且趋势明显.漳河上游及岳城水库水质一直处于地表水Ⅲ类以上(营养性指标不参与评价),90% 以上的时段都符合地表水环境质量标准(GB 3838-2002)的Ⅰ、Ⅱ类水质.

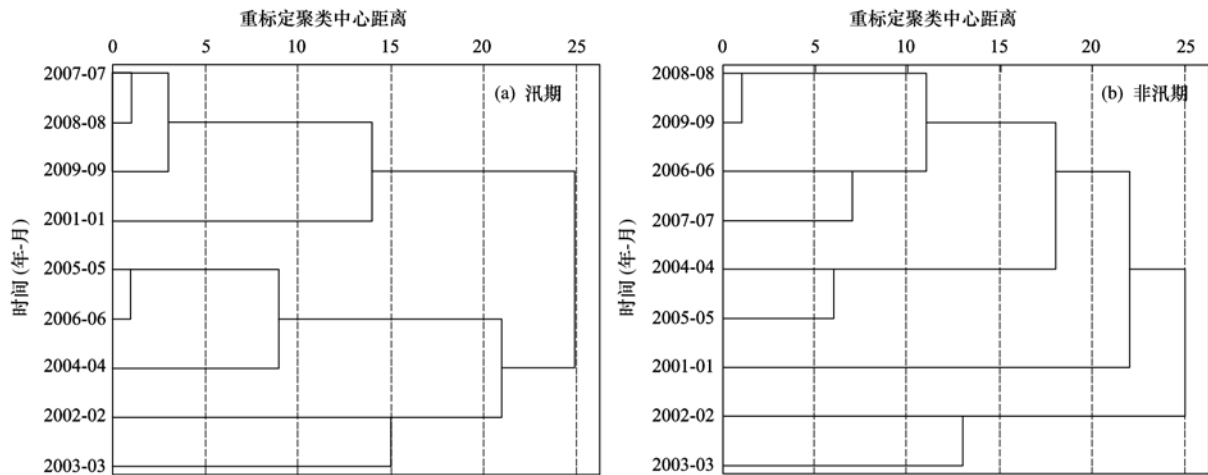


图 2 时间聚类结果

Fig. 2 Dendrogram of sampling periods based on cluster analysis

2.1.2 空间聚类分析

从空间聚类结果上看,汛期流域水质在空间上可分为 5 类(图 3),依次定义为Ⅴ级(一般)、Ⅳ级(较重)、Ⅲ级(重)、Ⅱ级(严重)、Ⅰ级(特别严重).在汛期,位于岔河上的吴桥闸断面为Ⅰ级,污染特别严重;位于南运河上的第三店断面污染严重,为Ⅱ级;漳卫新河上的辛集闸水质重污染,为Ⅲ级,卫运河上白庄桥、卫河的淇门、小河桥、杨庄桥、五陵和龙王庙断面、卫运河上的北馆陶、先锋桥、四女寺闸断面、减河上的袁桥闸断面、漳卫新河上的王盘营和辛集闸断面污染较重,为Ⅳ级;漳河刘家庄、匡门口、天桥断、观台和岳城水库断面水质较好,为Ⅴ级.流域入海口辛集闸断面在汛期水质污染严重,结合水质监测数据发现 EC 、 TH 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 指标较其他断面高出许多,因辛集闸兼有非汛期防止海水倒灌的功能,非汛期一般不开启,处于封闭状态,在汛期开启以倾泻洪水,在入海水量较小时海水就会回灌进入辛集闸断面,引起水体 EC 、 TH 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 较其他断面高出许多,在空间聚类单独成类,主成分得分也相对较高.

和汛期相比,非汛期流域水质在空间上可分为 4 类(图 3),类似于汛期,依次定义为Ⅳ级(一般)、

Ⅲ级(较重)、Ⅱ级(严重)、Ⅰ级(特别严重).位于岔河上的吴桥闸断面为Ⅰ级,污染特别严重;位于南运河上的第三店断面污染严重,为Ⅱ级;卫运河上白庄桥、卫河的淇门、小河桥、杨庄桥、五陵和龙王庙断面、卫运河上的北馆陶、白庄桥、先锋桥、四女寺闸断面、减河上的袁桥闸断面、漳卫新河上的王盘营和辛集闸断面污染较重,为Ⅲ级;漳河刘家庄、匡门口、天桥断、观台和岳城水库断面水质较好,为Ⅳ级.

从空间聚类结果并结合地表水环境质量标准,流域水质状况具有明显的空间分布特征,流域西北部漳河流域上游为一类,该区工业较少,地处山区,水质优良;卫河流域及漳卫南运河东部平原干流区为一类,这一区域水资源开发强度大,受工业废水和生活污水排放的双重影响,水体污染较严重,水质较差.

2.2 季节性 Kendall 趋势分析

考虑到水质序列主要资料的可靠性和可比性,特别是考虑到取样和分析程序及方法的一致性,选择具有代表性的刘家庄、天桥断、观台、岳城水库、淇门、小河桥、龙王庙、北馆陶、先锋桥、白庄桥、四女寺闸、王盘营 12 个断面 2003 ~ 2009 年的逐月水质监测资料进行趋势分析.由于水质监测项目较多,开始

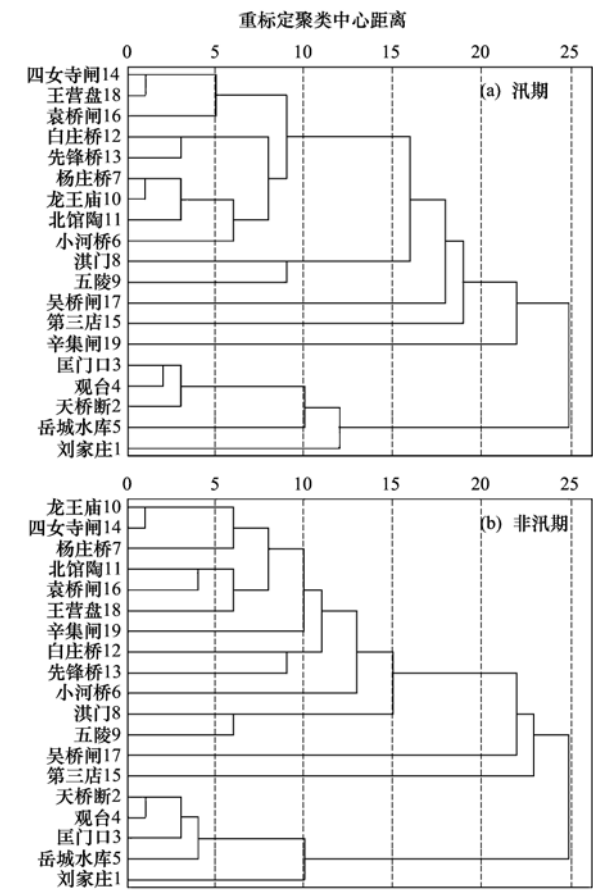


图3 流域汛期非汛期空间聚类结果

Fig. 3 Dendrogram of sampling sites based on cluster analysis

监测的时间不等,在确定趋势分析的参数时,重点选择了监测序列长、数据可靠、在判定污染和水质上具有重要作用的监测指标,重点讨论了漳卫南运河水体中主要污染物 DO、高锰酸盐指数、BOD₅、NH₄⁺-N、V-ArOH、TN、TP 的浓度变化趋势.采用季节性 Kandell 法,趋势分析的结果如表 1 所示.

由表 1 知,漳卫南流域 12 个监测断面除天桥断、刘家庄、淇门这 3 个断面外,其他监测断面的水质均出现不同程度的好转,尤其是白庄桥、北馆陶、龙王庙、四女寺闸、先锋桥、王营盘这 6 个断面趋势最为明显.漳河上游刘家庄和天桥断 2 个断面水质优良,变化趋势不明显说明水质保持在一个较好的状态,漳河上游岳城水库入库的观台断面氨氮也出现显著下降,引起岳城水库水质较差的最主要原因是总氮,该指标呈现显著的下降趋势,水质好转,但卫河淇门站水质变化趋势不明显,淇门站水质监测结果较差,卫河水质污染防治任重道远.从整体上看漳卫南运河流域的水质发生明显好转,这与漳卫南运河流域科学管理与严格执法是密不可分的.

2.3 因子分析/主成分分析

汛期提取公因子 5 个(特征值 >1),累计贡献率为 90.36%(表 2),能反映原始数据的基本信息.非汛期提取公因子 4 个,累计贡献率为 87.64%(表 2),也能反映原始数据的基本信息.

表 1 漳卫南运河流域水质变化趋势检验结果¹⁾

Table 1 Trend test results of water quality in the Zhangweinan River basin

断面	DO	高锰酸盐指数	BOD ₅	NH ₄ ⁺ -N	V-ArOH	TP	TN
刘家庄	—	—	—	—	—	—	—
天桥断	—	—	—	—	—	—	—
观台	—	—	—	▼	—	—	—
岳城水库	—	—	—	—	—	—	▼▼
淇门	—	—	—	—	—	—	—
小河桥	—	▼	▼	▼	—	▼	▼
龙王庙	▲▲	▼▼	▼▼	▼▼	▼▼	▼	▼▼
北馆陶	▲▲	▼▼	▼▼	▼▼	▼▼	—	▼▼
先锋桥	▲▲	▼▼	▼▼	▼▼	▼▼	▼	▼▼
白庄桥	▲▲	▼▼	▼▼	▼	▼▼	▼	▼▼
四女寺闸	▲▲	▼▼	▼▼	▼	▼▼	—	▼▼
王营盘	▲▲	▼▼	▼	▼	—	—	▼

1) ▲▲表示高度显著上升,▲表示显著上升;▼▼表示高度显著下降,▼表示显著下降;—表示没有明显变化趋势;本研究取趋势检验的显著水平 α 为 0.1 和 0.01,即当 α≤0.01 时,检验具有高度显著水平,当 0.01 < α ≤0.1 时,检验具有显著水平

因子得分反映各监测断面的污染状况(表 3),其值越高,说明水质越差,岔河的吴桥闸断面、南运河的第三店断面得分最高,污染最为严重,漳河的 5 个断面得分较小,水质最好.这一点与图 2 的分析结

果一致.

2.4 主成分多元线性回归分析

依据因子分析,采用主成分多元线性回归分析,计算得到污染因子对各指标的贡献率(表 4).

表 2 汛期和非汛期空间分析的旋转因子载荷矩阵

Table 2 Matrix of rotated factor loadings in spatial analysis during flood and non-flood seasons

指标	汛期					非汛期			
	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4
EC	0.422	0.902	-0.045	-0.013	-0.012	0.946	0.029	-0.18	-0.053
DO	-0.877	-0.275	0.063	0.206	-0.086	-0.91	-0.049	-0.002	0.33
高锰酸盐指数	0.866	0.052	-0.226	0.304	0.195	0.9	-0.146	0.228	0.19
BOD ₅	0.83	0.033	-0.14	0.511	0.081	0.863	-0.026	0.22	0.377
TH	0.557	0.787	-0.022	-0.11	-0.059	0.898	-0.091	-0.018	-0.348
TSS	0.107	-0.061	0.003	-0.021	0.978	0.385	-0.026	0.525	0.09
Cl ⁻	0.147	0.971	0.018	-0.026	-0.042	0.865	-0.107	-0.212	-0.017
SO ₄ ²⁻	0.4	0.831	-0.258	-0.005	0.022	0.795	-0.021	-0.551	-0.048
TN	0.869	-0.15	0.289	-0.302	-0.026	0.677	0.696	0.188	-0.054
NH ₄ ⁺ -N	0.888	-0.094	0.173	-0.371	0.007	0.684	0.669	0.147	-0.208
NO ₃ ⁻ -N	-0.381	-0.15	0.031	0.863	-0.088	0.014	-0.095	0.002	0.899
TP	0.774	0.256	0.062	0.252	0.203	0.847	0.158	0.056	0.253
F ⁻	0.716	0.231	-0.033	-0.26	-0.164	0.646	0.709	-0.216	-0.098
V-ArOH	0.796	-0.004	-0.081	0.506	0.197	0.819	0.09	0.161	0.466
T-CN ⁻	-0.257	0.055	0.914	0.021	0.16	0.084	0.976	0.02	0.014
Hg	0.768	0.132	-0.333	-0.011	-0.172	0.688	0.155	-0.398	0.16
As	0.865	0.277	-0.034	-0.215	-0.156	0.853	0.149	0.133	-0.399
Cr ⁶⁺	-0.082	-0.347	0.84	-0.043	-0.188	-0.375	0.111	0.853	-0.05
特征值	7.735	3.541	1.922	1.820	1.246	9.692	2.534	1.795	1.754
贡献率/%	42.972	19.674	10.680	10.109	6.9221	53.845	14.076	9.972	9.747
累积贡献率/%	42.972	62.646	73.326	83.434	90.356	53.845	67.922	77.894	87.641

表 3 监测断面因子得分

Table 3 Scores at different monitoring sections

监测断面	汛期					非汛期			
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y1	Y2	Y3	Y4
刘家庄	-4.31	-2.88	2.34	0.96	2.69	-4.49	-1.77	2.09	1.16
天桥断	-4.22	-2.63	1.22	1.1	-1.26	-4.11	-1.33	0.44	1.17
匡门口	-4.7	-2.85	2.39	0.97	-1.04	-4.67	-1.07	0.96	0.92
观台	-4.59	-2.86	1.8	0.83	-0.52	-4.72	-1.61	0.71	1.12
岳城水库	-4.3	-2.36	-0.76	0.12	-1.38	-4.41	-2.02	-0.2	0.2
小河桥	2.2	0.41	-0.71	0.23	1.35	-0.94	-1.16	-1.32	-1.52
杨庄桥	1.34	0.43	-0.94	-1.02	1.84	1.25	0.23	-0.46	-0.68
淇门	2.05	-0.37	3.3	-1.25	0.01	1.77	1.82	3.86	-1.24
五陵	2.05	-0.48	1.25	-2.01	-1.25	0.8	1.06	1.61	-1.51
龙王庙	1.21	0.18	-0.57	-0.64	1.27	0.99	0.19	-0.85	-0.7
北馆陶	0.97	0.28	-1.2	-0.82	-0.09	0.52	-0.04	-0.2	-0.71
白庄桥	2.33	0.74	-1.44	1.96	0.92	3.45	0.04	-0.03	1.53
先锋桥	1.07	0.17	-1.32	1.27	0.38	1.27	-0.05	-0.86	1.75
四女寺闸	0.97	0.54	-1.41	-0.22	-0.69	1.2	-0.19	-1.07	-0.27
第三店	2.68	1.87	0.78	-2.31	-0.81	3.63	6.57	-1.12	-1.19
袁桥闸	-0.79	0	-0.79	-0.8	-0.96	-0.29	-0.78	-1.09	-0.94
吴桥闸	4.52	2.88	-1.71	3.27	0.66	6.33	1.11	-0.19	3.07
王营盘	0.71	0.6	-1.33	-0.37	-0.41	1.41	-0.1	-0.33	-0.52
辛集闸	0.8	6.31	-0.9	-1.26	-0.72	1.01	-0.9	-1.93	-1.63

3 讨论

3.1 水质时空演变成因分析

漳卫南运河流域水质存在明显的时空变异特征. 从时间聚类的结果上看, 流域 2001 ~ 2009 年间,

整个流域都经历了一个污染加重(2002 ~ 2003 年)和缓解时期(2004 ~ 2009 年). 2003 ~ 2009 年间季节性 Kendall 趋势分析结果也证实了流域水质整体转好. 其主要原因是位于卫河上游的河南省在 2004 年大规模关闭年制浆能力 2×10^4 t 以下的石灰法制

表 4 公因子对各指标的贡献率/%
Table 4 Source contribution for each variable/%

指标	汛期贡献率					非汛期贡献率			
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y1	Y2	Y3	Y4
EC	1	96.7	1.2	0.4	—	88.8	—	2	—
DO	85.6	—	—	—	—	81.1	1.8	—	9.1
高锰酸盐指数	72.8	—	—	15	—	71.1	7.3	10	—
BOD ₅	62.3	2.1	—	32.7	—	67.9	—	4.5	17.7
TH	—	91.8	—	—	—	74.8	8.4	—	8.5
TSS	2.1	—	—	2.9	91.7	—	—	—	—
Cl ⁻	15	78.4	2.5	—	—	69.7	5.6	—	—
SO ₄ ²⁻	—	88.4	—	—	—	62.7	—	29.5	—
TN	57.9	6.7	22.7	6.4	—	3.6	91.3	2.9	—
NH ₄ ⁺ -N	65.9	10.3	13	6.2	—	4.1	90	2.1	1.3
NO ₃ ⁻ -N	7.9	—	—	77.5	3	—	—	—	79.8
TP	62.5	—	—	—	—	71.8	—	—	5.6
F ⁻	54.3	—	—	—	—	—	87.2	8.9	1.1
V-ArOH	55.1	3.2	—	32.7	—	64	—	2.6	24
T-CN ⁻	—	8.9	74.9	4.2	—	19.3	73.6	—	1.5
THg	61.1	—	—	—	—	49	—	10.4	—
As	81.2	—	—	—	4.4	72.5	—	3.5	14.4
Cr ⁶⁺	—	—	76.2	—	—	—	—	83.3	—

浆生产线和 1.7×10^4 t 以下的碱法草浆生产线,大幅削减 COD. 同时河南省还投资兴建了多座污水处理厂进一步削减 COD 排污量.

流域水质空间上分为两类,一类为上游西北部漳河流域,该区水质较好;另一类为流域南部的卫河流域及流域中下游东部平原的卫运河、南运河及漳卫新河流域,这一区域水质差,基本丧失水体功能. 在流域西南部的卫河流域、东部平原的卫运河、南运河及漳卫新河流域汛期可以分为 4 类,非汛期可分为 3 类(图 3). 造成这种空间差异性的原因很多. 其一,漳河流域岳城水库以上处于流域的上游,水利工程相对较少,河道有一定的天然径流,上游排污口排污量相对卫河和东部平原区小得多,水资源开发利用强度相对较小,岳城水库水质优良. 漳卫南运河流域的南部及东部平原区,天然径流量较小,水资源开发强度大,卫河上游河南省焦作市、新乡市和安阳市内煤化工、炼钢、煤炭开采、造纸等工业集聚,排污总量、COD 和氨氮排放量占到流域总排放量的 65% 以上(图 4、图 5),造成卫河河水水质污染严重. 卫河污水在徐万仓与漳河汇合后进入卫运河到四女寺闸,经过河道的自净过程,水质状况有一定的改善,但在流经山东省临清市时注入了大量的生活污水,导致白庄桥断面水质进一步恶化,在卫运河的下游经四女寺闸分流后,南运河接纳了山东省德州市的部分工业废水和生活污水,使得第三店断面的水质恶化,岔河也接纳了德州市的部分工业废水,水

质进一步恶化,但没有接纳污水的减河相对于南运河和岔河来说水质要好的多. 岔河和减河汇合后进入漳卫新河,山东省德州市的部分工业废水排入漳卫新河,使得位于流域下游的王盘营断面和辛集闸断面水质较上游减河袁桥闸断面水质有所下降. 除了大量的工业废水和生活污水排放污染河流水质以外,卫河上游、漳河上游大量水库建设,拦蓄河水,造成下游径流量减小甚至断流,卫运河、南运河、岔河、减河、漳卫新河上大量水利枢纽工程建成,人工调节河流径流量也是形成漳卫南运河流域水质空间分布差异的原因之一. 流域水利工程的调度规则直接影响河流的径流量,进而影响流域水环境容量,影响河流水质. 如四女寺闸水利枢纽工程的调度方式就直接影响下游南运河、岔河和减河的径流量,影响其下游水质.

3.2 污染源识别

采用最大方差法旋转后的因子载荷矩阵表明,影响漳卫南运河流域汛期水质有 5 个主要因素,非汛期有 4 个主要因素(表 2). Liu 等^[45]认为当因子载荷值分别 >0.75 、 $0.75 \sim 0.5$ 和 $0.5 \sim 0.3$ 时,代表强相关、中度相关和弱相关. 汛期提取的 5 个公因子中,F1 的贡献率为 42.97%,其中高锰酸盐指数、BOD₅、NH₄⁺-N、TN、TP、F⁻、V-ArOH、THg 和 As 所占的因子载荷较大,与 F1 呈强正相关关系,与 TH 和 F⁻呈中度正相关,与 DO 呈强负相关. 从 NH₄⁺-N、TN、TP 这 3 个水质指标的因子载荷上分析,F1 可以

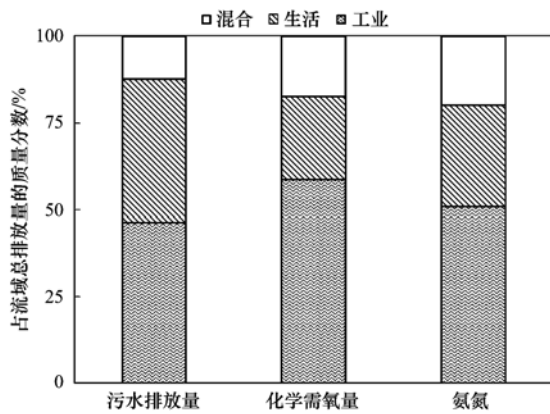


图4 漳卫南运河流域排污总量、COD和氨氮负荷

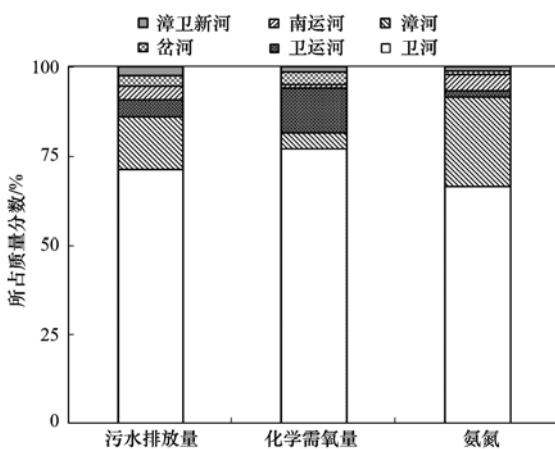
Fig. 4 Total amount of emissions, COD and NH_3 load

图5 漳卫南运河流域排污构成

Fig. 5 Sewage constitute in the Zhangweinan River basin

部分识别为农业污染。 NH_4^+-N 、 TN 、 TP 在农业排水、大量使用化肥的农田径流中含量较高^[15, 33]。同时 NH_4^+-N 在畜禽养殖废水中含量较高,汛期随地表径流进入河道,这也从一定程度上表征畜禽养殖农业非点源污染, TP 也能从一个方面说明这一点,磷可以由点源产生也可以由非点源产生,点源如市政污水排放,工业废水排放,非点源主要包括土壤侵蚀,农田、城市暴雨径流,农村散养畜禽排泄物等^[33, 46], NH_4^+-N 也代表着化工废水排放^[33]。同样, F1 与高锰酸盐指数和 BOD_5 呈强正相关关系,与 DO 呈强负相关关系,这种有机污染指标说明流域水体受到快速城市化引起市政污水排放的强烈影响^[15, 32, 33]。 F1 还与 V-ArOH 、 THg 和 As 强正相关,与 F^- 中度正相关。 THg 和 As 多来源于重工业废水^[7],化学与制革工业^[47]和电子工业^[48]例如电镀、印染和电路板制造等工业废水排放。 V-ArOH 主要来源于造纸、化学

工业^[33, 41]、炼钢工业和炼焦工业^[49]。基于以上分析, F1 代表强烈人类活动影响下的市政污水、工业废水排放以及农业活动带来的污染。

F2 的贡献率为19.674%,与 EC 、 TH 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 呈强正相关性。这主要代表盐分^[15],说明研究区内可能存在化学工业。 F3 的贡献率为10.680%,与 T-CN^- 和 Cr^{6+} 呈强正相关性。 Cr^{6+} 和 T-CN^- 常见于电镀废水和采矿工业废水排放^[7]。监测数据显示, Cr^{6+} 3次超过地表水国家三类标准[GB 3838-2002 (0.05 mg/L)],且都位于卫河流域。 T-CN^- 11次超过地表水国家三类标准[GB 3838-2002 (0.05 mg/L)],所以 T-CN^- 和 Cr^{6+} 可能来源于天然污染源,如岩石和土壤风化产生^[41]和采矿活动。 F4 的贡献率为10.109%,与 NO_3^--N 强正相关,与 BOD_5 中度相关,代表果园和农业区域的非点源污染贡献^[7]。研究区内农业生产大量使用含氮化肥,硝酸盐氮通过地下水淋滤进入地表河流水体^[10],同时也可能来自上游煤矿工业的排水。 F5 的贡献率为6.922%,与 SS 呈强正相关, SS 常由暴雨径流携带进入河流水体,该因子代表暴雨事件引起非点源污染。

所以,汛期漳卫南运河流域存在5类污染源,第一类是剧烈人类活动影响的排放源,如市政污水、重工业废水和农业活动带来的污染,第二类是化学工业废水,第三类是天然污染源和采矿活动引起的污染物排放,第四类是农业非点源和采矿活动引起的污染,第五类是暴雨引起的非点源污染。

非汛期, EC 、 DO 、高锰酸盐指数、 BOD_5 、 TH 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 TN 、 NH_4^+-N 、 TP 、 F^- 、 V-ArOH 、 THg 和 As ,占总贡献率的53.845%,组成第一公共因子,与 EC 、高锰酸盐指数、 BOD_5 、 TH 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 TP 、 V-ArOH 和 As 呈强正相关,与 TN 、 NH_4^+-N 、 F^- 和 THg 呈中度正相关,与 DO 呈强负相关。 F1 与高锰酸盐指数和 BOD_5 呈强正相关,与 DO 呈强负相关,与汛期类似, F1 代表市政污水排放。 F1 还与 EC 、 TH 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 TP 、 V-ArOH 和 As 呈强正相关,与 TN 、 NH_4^+-N 、 F^- 和 THg 呈中度相关,从这点上看 F1 也代表工业废水排放。所以 F1 代表市政污水和重工业废水排放。 F2 的贡献率为14.076%,与 T-CN^- 呈强正相关与 TN 、 NH_4^+-N 、 F^- 呈中度正相关,说明研究区有化学工业存在。 F3 的贡献率为9.976%,与 Cr^{6+} 呈强正相关,与 SS 呈中度正相关,这可能与采矿活动引起的污染物排放有关。 F4 的贡献率为9.747%,与 NO_3^--N 呈强正相关,这可能与来源于上游煤矿开采

过程中的矿井排水有关.所以,漳卫南运河流域非汛期存在3类污染源,第一类是剧烈人类活动影响的排放源,如市政污水和工业废水排放带来的污染,第二类为化学工业带来的污染,第三类为采矿工业带来的污染.

3.3 基于多元线性回归分析的污染源贡献率计算

识别污染源后,采用多元线性回归受体模型对不同水质指标的源贡献率进行计算(表3).汛期大多数指标主要受市政污水、工业废水和农业活动的影响(85.6%的DO,72.8%的高锰酸盐指数,62.3%的BOD₅,57.9%的TN,65.9%的NH₄⁺-N,62.5%的TP,54.3%的F⁻,55.1%的V-ArOH,61.1%的THg和81.2%的As),由化学工业废水排放(96.7%、91.8%、78.4%和88.4%的EC、TH、Cl⁻和SO₄²⁻),自然源和矿业活动(74.9.7%和76.2%的T-CN⁻和Cr⁶⁺),农业非点源污染和矿业活动(32.7%、77.5%、32.7%的BOD₅、NO₃⁻-N、V-ArOH),暴雨引起的非点源污染(91.7%的SS).非汛期与市政污水和工业废水排放关系密切(88.1%的EC,81.1%的DO,71.1%的高锰酸盐指数,67.9%的BOD₅,74.8%的TH,69.7%的Cl⁻,62.7%的SO₄²⁻,71.8%的TP,64.0%的V-ArOH,49.0%的THg和72.5%的As),由化学工业废水排放(91.3%、90.0%、87.2%、73.2%和83.3%的TN、NH₄⁺-N、T-CN⁻和Cr⁶⁺)以及矿业生产引起的污染物排放(79.8%的NO₃⁻-N).

通过上面的讨论可知,漳卫南运河流域污染物主要来源于市政污水和工业废水排放以及汛期农业非点源污染.但所有提取的公因子中都存在未能识别的污染源,因此采用多元统计方法对污染源进行定性识别的同时,配合必要的污染源调查是必要的^[33].

4 结论

(1)漳卫南运河流域水质空间上可以分为两大类,一类是位于流域西北部漳河上游区域,该区域水质优良;卫河流域及东部平原区为一类,水体污染较严重,水质较差.

(2)漳卫南运河流域水质时间上可以分为3个阶段2种趋势,2002~2003年为第一阶段,为水质恶化阶段,卫河流域、卫运河、漳卫新河水质严重污染,漳河流域水质也有恶化趋势,但总体水质良好;2004~2006年为水质好转期,2007~2009年系第三阶段,流域水质进一步好转,但卫河及流域干流水质

依然堪忧.

(3)造成漳卫南运河流域水质污染的污染物主要来源于高强度的人类活动引起的重工业废水、市政污水、化学工业废水、采矿活动等点源排放,汛期中上游农业生产引起的农业非点源污染排放以及暴雨径流引起的非点源污染物排放也占相当比例.

参考文献:

- [1] 周丰,郭怀成,黄凯,等.基于多元统计方法的河流水质空间分析[J].水科学进展,2007,18(4):544-551.
- [2] 卜红梅,刘文治,张全发.多元统计方法在金水河水质时空变化分析中的应用[J].资源科学,2009,31(3):429-434.
- [3] Bu H M, Tan X, Li S Y, *et al.* Water quality assessment of the Jinshui River (China) using multivariate statistical techniques [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(8): 1631-1639.
- [4] 叶麟,黎道丰,唐涛,等.香溪河水质空间分布特性研究[J].应用生态学报,2003,14(11):1959-1962.
- [5] 顾胜,李思悦,张全发.汉江堵河流域地表水质时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2009,18(1):41-46.
- [6] Li S Y, Zhang Q F. Spatial characterization of dissolved trace elements and heavy metals in the upper Han River (China) using multivariate statistical techniques [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 176(1-3): 579-588.
- [7] Zhang Q, Li Z W, Zeng G M, *et al.* Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques in red soil hilly region: a case study of Xiangjiang watershed, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 152(1-4): 123-131.
- [8] Vega M, Pardo R, Barrado E, *et al.* Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis [J]. Water Research, 1998, 32(12): 3581-3592.
- [9] Alkarkhi A F M, Ahmad A, Easa A M. Assessment of surface water quality of selected estuaries of Malaysia: multivariate statistical techniques [J]. Environmentalist, 2009, 29(3): 255-262.
- [10] Shrestha S, Kazama F. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Fuji river basin, Japan [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(4): 464-475.
- [11] Varol M, Sen B. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of Behrimaz Stream, Turkey [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 159(1-4): 543-553.
- [12] Kannel P R, Lee S, Kanel S R, *et al.* Chemometric application in classification and assessment of monitoring locations of an urban river system [J]. Analytica Chimica Acta, 2007, 582(2): 390-399.
- [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] Sundaray S K, Panda U C, Nayak B B, *et al.* Multivariate

- statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of the Mahanadi river-estuarine system (India)-a case study [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2006, **28**(4): 317-330.
- [15] Singh K P, Malik A, Sinha S. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques-a case study [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2005, **538**(1-2): 355-374.
- [16] Sundaray S K. Application of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies-a case study: Brahmani-Koel River (India) [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **164**(1-4): 297-310.
- [17] Alberto W D, Del Pilar D M, Valeria A M, *et al.* Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality. A case study: Suquia River basin (Cordoba-Argentina) [J]. *Water Research*, 2001, **35**(12): 2881-2894.
- [18] Han S, Kim E, Kim S. The water quality management in the Nakdong River watershed using multivariate statistical techniques [J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2009, **13**(2): 97-105.
- [19] Zhang J, Burke P, Iricanin N, *et al.* Long-term water quality trends in the Lake Okeechobee Watershed, Florida [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, **41**(S1): 548-575.
- [20] Lee H W, Bhang K J, Park S S. Effective visualization for the spatiotemporal trend analysis of the water quality in the Nakdong River of Korea [J]. *Ecological Informatics*, 2010, **5**(4): 281-292.
- [21] Yin X, Hu G H. Trend analysis of surface water quality in Hunan Province [A]. In: 2009 International conference on environmental science and information application echnology, Vol III, Proceedings [C]. Los Alamitos: Ieee Computer Soc, 2009. 154-157.
- [22] Hirono Y, Watanabe K I, Nonaka K. Trends in water quality around an intensive tea-growing area in Shizuoka, Japan [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, **55**(6): 783-792.
- [23] Dong S, Jun-Feng S Fei-Fei L. Seasonal kendall test and its application in water quality trend analysis [A]. In: Li J L, Jiang Y, (eds.). Proceedings of first international conference of modelling and simulation, Vol I-Modelling and simulation in science and technology [C]. Liverpool: World Acad Union-World Acad Press, 2008. 378-383.
- [24] Johnson H O, Gupta S C, Vecchia A V, *et al.* Assessment of water quality trends in the Minnesota River using non-parametric and parametric methods [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, **38**(3): 1018-1030.
- [25] Bouza-Deaño R, Ternero-Rodríguez M, Fernández-Espinosa A J. Trend study and assessment of surface water quality in the Ebro River (Spain) [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **361**(3-4): 227-239.
- [26] Chang H. Spatial analysis of water quality trends in the Han River basin, South Korea [J]. *Water Research*, 2008, **42**(13): 3285-3304.
- [27] Simeonov V, Stratis J A, Samara C, *et al.* Assessment of the surface water quality in Northern Greece [J]. *Water Research*, 2003, **37**(17): 4119-4124.
- [28] Kazi T G, Arain M B, Jamali M K, *et al.* Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: a case study [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, **72**(2): 301-309.
- [29] Pekey H, Karakaş D, Bakoğlu M. Source apportionment of trace metals in surface waters of a polluted stream using multivariate statistical analyses [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, **49**(9-10): 809-818.
- [30] Omo-Irabor O O, Olobaniyi S B, Oduyemli K, *et al.* Surface and groundwater water quality assessment using multivariate analytical methods: a case study of the Western Niger Delta, Nigeria [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2008, **33**(8-13): 666-673.
- [31] Azzellino A, Salvetti R, Vismara R, *et al.* Combined use of the EPA-Qual2E simulation model and factor analysis to assess the source apportionment of point and non point loads of nutrients to surface waters [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **371**(1-3): 214-222.
- [32] Zhou F, Huang G H, Guo H C, *et al.* Spatio-temporal patterns and source apportionment of coastal water pollution in eastern Hong Kong [J]. *Water Research*, 2007, **41**(5): 3429-3439.
- [33] Su S L, Zhi J J, Lou L P, *et al.* Spatio-temporal patterns and source apportionment of pollution in Qiantang River (China) using neural-based modeling and multivariate statistical techniques [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2011, **36**(9-11): 379-386.
- [34] 翟学军. 节约保护水资源, 促进漳卫南运河的可持续发展 [J]. *海河水利*, 2009, (2): 4-5.
- [35] 王立卿, 于伟东. 漳卫南运河水资源和水环境问题与对策探讨 [J]. *海河水利*, 2008, (5): 6-8.
- [36] 于伟东. 漳卫南运河流域水污染趋势与控制 [J]. *水资源保护*, 2008, **24**(4): 83-86.
- [37] 于伟东. 漳卫南运河水生态恢复面临的问题和对策 [J]. *海河水利*, 2005, (2): 21-23.
- [38] 郝红, 周怀东, 王剑影, 等. 漳卫南运河沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2005, **3**(2): 109-115.
- [39] Palma P, Alvarenga P, Palma V L, *et al.* Assessment of anthropogenic sources of water pollution using multivariate statistical techniques: a case study of the Alqueva's reservoir, Portugal [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **165**(1-4): 539-552.
- [40] Caccia V G, Boyer J N. Spatial patterning of water quality in Biscayne Bay, Florida as a function of land use and water management [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**(11): 1416-1429.
- [41] Huang F, Wang X Q, Lou L P, *et al.* Spatial variation and source apportionment of water pollution in Qiantang River (China) using statistical techniques [J]. *Water Research*,

- 2009, **44**(5): 1562-1572.
- [42] 沈琼, 王开颜, 张巍, 等. 北京市通州区河流 PAHs 的源解析 [J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(3): 904-909.
- [43] 林秀梅, 陈江麟, 刘文新, 等. 多元统计在渤海表层沉积物中 PAHs 源解析上的应用 [J]. 海洋环境科学, 2007, **26**(2): 107-111.
- [44] Ouyang Y. Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis [J]. Water Research, 2005, **39**(12): 2621-2635.
- [45] Liu C W, Lin K H, Kuo Y M. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan [J]. Science of the Total Environment, 2003, **313**(1-3): 77-89.
- [46] Boyacioglu H, Boyacioglu H. Water pollution sources assessment by multivariate statistical methods in the Tahtali Basin, Turkey [J]. Environmental Geology, 2008, **54**(2): 275-282.
- [47] Owen R B, Sandhu N. Heavy metal accumulation and anthropogenic impacts on Tolo Harbour, Hong Kong [J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, **40**(2): 174-180.
- [48] Pekey H. The distribution and sources of heavy metals in Izmit Bay surface sediments affected by a polluted stream [J]. Marine Pollution Bulletin, 2006, **52**(10): 1197-1208.
- [49] Zhang Y, Guo F, Meng W, *et al.* Water quality assessment and source identification of Daliao river basin using multivariate statistical methods [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **152**(1-4): 105-121.

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

国内外公开发行人