ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第33卷 第5期
2012年5月15日

目 次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究 …… 谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用 …… 苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究 …… 徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究 …… 张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)
青岛市大气 $PM_{2.5}$ 元素组成及来源研究 …… 李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究 …… 王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)
再悬浮装置在大气 $PM_{2.5}$ 源谱分析中的应用 …… 段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究 …… 魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探 …… 蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析 …… 王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响 …… 陈书涛,张勇,胡正华,史艳姝,沈小帅(1476)
托木尔峰青冰滩72号冰川径流水化学特征初步研究 …… 赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究 …… 张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)
7条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律 …… 卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性 …… 李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)
北运河系地表水近10年来水质变化及影响因素分析 …… 郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析 …… 孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级 …… 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟 …… 李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究 …… 邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究 …… 高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响 …… 齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究 …… 傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)
酞酸酯在模拟海河菹草微宇宙中的消减和分布特征 …… 迟杰,杨青(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻藻毒素产生和释放的抑制作用研究 …… 刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析 …… 李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)
四溴双酚A的辐照降解研究 …… 李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究 …… 王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响 …… 李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成NDMA的影响因素研究 …… 尚晓玲,李咏梅(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究 …… 沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)
好氧污泥颗粒化过程中Zeta电位与EPS的变化特性 …… 王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性 …… 周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律 …… 邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征 …… 李婷,孟昭福,张斌(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响 …… 张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)
南京市4个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析 …… 葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能 …… 陈春,李文英,吴静文,李静(1652)
Xanthobacter flavus DT8降解二噁烷的特性研究 …… 金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)
未开发油气田地表烃氧化菌空间定量分布 …… 满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究 …… 赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)
长江中游干流及22条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险 …… 李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)
典型血吸虫病疫区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险 …… 吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究 …… 陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价 …… 王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险 …… 邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价 …… 高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,季宏兵(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性 …… 杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)
基于GIS的某训练场土壤重金属污染评价 …… 刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)
土壤质地和湿度对SVE技术修复苯污染土壤的影响 …… 刘少卿,姜林,姚珏君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对DNA吸附与解吸特征 …… 王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)
LNAPL在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究 …… 潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征 …… 董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究 …… 任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)
固定化微生物技术修复PAHs污染土壤的研究进展 …… 钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)
《环境科学》征订启事(1483) 《环境科学》征稿简则(1620) 信息(1490,1496,1586,1743)

典型血吸虫病疫区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险

吴正勇[1,2],赵高峰[2*],周怀东[2],李科林[1],曾敏[1],李昆[1,2],张盼伟[1,2],郝红[2]
(1. 中南林业科技大学林学院,长沙 410004; 2. 中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘要: 为研究典型血吸虫病疫区酚类化合物的污染现状,通过采集枯水期松澧洪道、藕池河下游和沱江这 3 条河的南县段 27 个表层水样,采用高灵敏的 GC-MS/MS 技术对水样中 14 种酚类化合物进行分析, 结果表明松澧洪道、藕池河下游和沱江表层水样中 $\sum$ 酚类的浓度分别为 878.05、148.36 和 594.49 ng·L^{-1}. 松澧洪道水样中 $\sum$ 氯代酚的浓度为 203.03 ng·L^{-1}, $\sum$ 非氯代酚的浓度为 97.21 ng·L^{-1},在这 3 条河流水样中都是最高的; *t*-检验的结果显示 3 条河流水样中的 $\sum$ 氯代酚之间以及 $\sum$ 非氯代酚之间都不存在显著性差异 ($P>0.05$). 五氯酚、2-硝基酚、2,6-二氯酚和苯酚是松澧洪道水样中主要的污染物,分别占这条河流总酚类污染物质量分数的 27%、54%、4.4% 和 1%; 2-硝基酚和 2,6-二氯酚是藕池河下游与沱江水样中主要的污染物,这 2 类污染物分别占藕池河下游水样中总酚类污染物质量分数的 61% 和 4.3%,占沱江水样中总酚类污染物质量分数的 30% 和 2%. 研究结果中五氯酚的检出浓度与文献报道的国内血吸虫病疫区水样中的浓度相比较,表明该研究区水样中五氯酚的浓度处于各疫区的中等污染水平,说明因五氯酚及其降解产物的污染会给当地水环境带来潜在风险.

关键词: 血吸虫病疫区; 表层水; 酚类化合物; 污染特征; 潜在风险
中图分类号: X131.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)05-1682-05

Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas

WU Zheng-yong[1,2], ZHAO Gao-feng[2], ZHOU Huai-dong[2], LI Ke-lin[1], ZENG Min[1], LI Kun[1,2], ZHANG Pan-wei[1,2], HAO Hong[2]
(1. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Twenty-seven surface water samples were collected from Songli spillway, Ouchi River downstream, Tuojiang River in Nanxian County in order to investigate the pollution characteristics of phenolic compounds in schistosomiasis epidemic areas. The contents of 14 phenolic compounds in surface water samples were measured using Varian CP3800/300 GC-MS/MS technique. The total concentrations of the phenolic compounds in the samples from Songli spillway, Ouchi River downstream, Tuojiang River were 878.05 ng·L^{-1}, 148.36 ng·L^{-1} and 594.49 ng·L^{-1}, respectively. The concentration of chlorinated phenols and non-chlorinated phenols in samples from Songli spillway are separately 203.03 ng·L^{-1} and 97.21 ng·L^{-1}, which are the highest among the concentrations of these phenols detected in water samples among the three rivers. Significant *t*-test analysis indicated that there is no significant difference between the concentrations of chlorinated phenols (or non-chlorinated phenols) in these samples from those rivers ($P>0.05$). Pentachlorophenol, 2-nitrophenol, 2,6-dichlorophenol and phenol are the most predominant phenolic compounds which respectively accounted for 27%, 54%, 4.4% and 1% in the samples from Songli spillway, 2-nitrophenol and 2,6-dichlorophenol are the most predominant compounds which respectively accounted for 61% and 4.3% in Ouchi River downstream, and 30% and 2% in Tuojiang River. The levels of phenolic compounds in the samples were in the same order of magnitude of those reported on moderate levels in these schistosome-endemic areas, which shows that there exists certain potential risk due to pentachlorophenol and its derivatives pollution in local water environment.

Key words: schistosomiasis epidemic areas; surface water; phenolic compounds; pollution character; potential risk

我国从 1959 年起在长江中下游地区大量使用五氯酚及其钠盐(PCP)灭螺防治血吸虫病; 尽管 1992 年国家规定停用 PCP 改用氯硝柳胺作为灭螺剂[1]; 但由于氯硝柳胺杀螺作用缓慢,在施药后有钉螺上爬现象,导致其灭螺效果降低,因此在一些地方血防单位仍将 PCP 和氯硝柳胺混合使用以提高

收稿日期: 2011-07-25; **修订日期**: 2011-09-14
基金项目: 中国水利水电科学研究院青年基金项目(环集 1113);国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07104, 2008ZX07209, 2009ZX07527);国家自然科学基金创新研究群体基金项目 (51021066)
作者简介: 吴正勇(1985~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境化学,E-mail:jcddwu@163.com
* 通讯联系人,E-mail: zhgaofeng@yahoo.com.cn

灭螺效果. 2002 年联合国环境规划署化学品处中亚和东北亚区域的调查报告显示 PCP 在我国每年的产量大约是5 000 t,其中有 60% 的 PCP 被用于血吸虫病防治. 谭大等[2]报道 2003 年湖南 PCP 的消费量约640 t,其中环洞庭湖区的岳阳、常德和益阳这 3 个地区的 PCP 消费量最大,合计达 620 t. 疫区血防人员灭螺时,每 m^2 土地面积的 PCP 用药量高达 5 ~ 20 g,导致表层土壤、沉积物中 PCP 的浓度非常高,常发生青蛙和鱼类大量死亡、人畜中毒甚至死亡的急性中毒事件[1,3]. 残留在疫区表层土壤、沉积物中的 PCP,通过生物降解与光降解可生成一氯酚、二氯酚、三氯酚和四氯酚等低氯代酚[4]以及其他一些衍生化的产物如硝基酚等[5,6]. 毒理学资料表明氯代酚在极低的浓度下就能干扰生物机体的内分泌系统,例如:干扰甲状腺激素的正常功能[7],抑制酵母人孕酮受体活性[8],抑制性激素和性激素受体的结合[9],干扰维甲酸活性[10],而且国际癌症组织还发现 2,4,5-三氯酚和 PCP 是可致癌物(B2)[11],这些过去残留和新近输入疫区环境中的氯代酚将给当地居民带来潜在的健康风险. 因此,开展疫区酚类化合物污染的研究工作在新形势下显得尤为重要.

目前国内学者针对氯代酚开展的研究工作主要有:刘金林等[12]报道了海河流域和渤海湾水体中的五氯酚污染现状; 罗茜等[13]探讨了五氯酚(PCP)、2,4-二氯酚(2,4-DCP)和 2,4,6-三氯酚(2,4,6-TCP)在我国太湖地区的水生态基准定值; 张兵等[14]对五氯酚这一个化合物在洞庭湖环境介质中的分布进行了初步研究; 董军等[15]对珠江口地区表层水中 2-氯酚、2,4-二氯酚、2,4,6-三氯酚和五氯酚这 4 种优先控制的氯代酚污染物进行了研究. 可见,国内目前关于氯代酚污染物的研究主要集中在 4 种优先控制的氯代酚污染物,研究的目标化合物种类比较有限,针对典型血吸虫病疫区多种酚类污染的研究报道也很少,因此,通过同时测定水体中多种酚类化合物将有利于更全面地评估疫区表层水中酚类的污染现状,具有重要的现实意义.

本研究选取湖南省典型血吸虫病疫区的松澧洪道、藕池河下游和沱江的南县段为研究区,运用能同时检测水体中多种酚类化合物的分析方法,针对枯水期 3 条河流的 27 个水样中 14 种酚类化合物,通过 SPE 萃取,五氟苄基溴衍生化,采用 GC-MS 技术对水样中的酚类化合物进行分析,结合酚类化合物迁移降解规律,研究污染物在典型疫区表层水中的分布特征和潜在风险,以期为该地区地表水中酚类化合物污染现状的评估提供重要数据支持.

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

实验中所用有机溶剂乙酸乙酯、二氯甲烷和甲醇等均为农残级(J. T. Baker, Phillipburg, USA); 优级纯浓硫酸(BDHL, England); 超纯水(经 Milli-Q 水纯化系统纯化,电阻率为 18.1 MΩ·cm); 无水硫酸钠(分析纯,用二氯甲烷淋洗,然后置于 600℃的马弗炉中烘烤 6 h,干燥器中密闭,保存备用); 碳酸钾(分析纯); 五氟苄基溴(PFBBr)衍生化试剂(纯度为 99%, Dikma); HLB 萃取柱(Waters).

气相色谱/三重四极杆质谱联用仪 VarianCP3800/300 GC-MS,配备 30 m VF-5-MS (5% phenyl/95% methyl silicone, 0.25 mm i. d., 0.25 μm film, Varian, USA)毛细管柱.

1.2　样品采集与处理

2010 年 11 月在湖南省南县的松澧洪道、藕池河下游和沱江的南县段共选取 27 个采样点,其中松澧洪道 7 个,藕池河下游 10 个,沱江 10 个(如图 1). 每个采样点处的河宽约 100 m,取水面以下 5 cm处水样 400 mL,置于无污染容器内低温避光存放. 带回实验室后经 0.45 μm 孔径滤膜过滤,调节 pH ≤ 2,每个样品中加回收率替代内标 50 μL (2,4,6-tribromophenol, 100 ng·mL^{-1}),超声波振荡混匀,再按以下步骤进行 SPE 萃取:①SPE 柱清洗、活化:在不启用真空泵的情况下,加入 5 mL 乙酸乙酯让其自然流出; 再使用 5 mL 二氯甲烷重复上述过程,弃除清洗液. 再加入 10 mL 甲醇,让甲醇浸泡

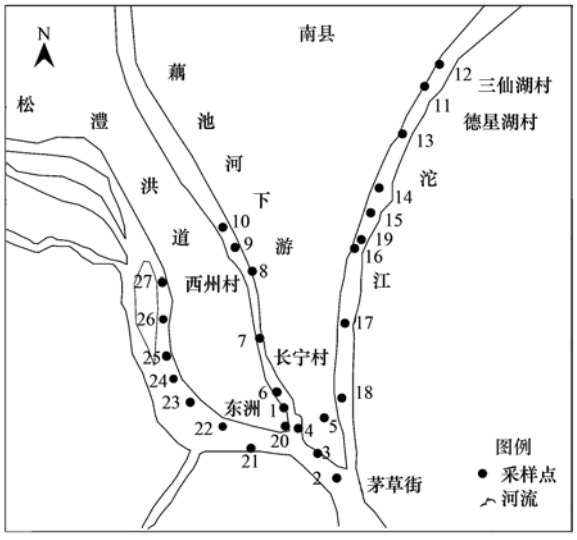

图 1　采样点分布示意

Fig. 1　Sampling sites in Nanxian County

柱体 30 s(注意控制溶剂液面高度,确保填料湿润,避免空气暴露),然后让甲醇慢慢流出. 再加入超纯水 10 mL,淋洗活化,最后柱体内保留 1 ~2 mL 超纯水液面高于填料面 1 ~2 mm. ②富集:开启真空泵,调节流速为 15 mL·min^{-1}. 样品富集完毕后继续真空抽取 5 ~10 min,使柱体干燥. ③洗脱目标化合物:对 SPE 装置装上防污染交叉管,每个柱体中加入 10 mL 二氯甲烷让其自然流出并用 K-D 管收集洗脱液. 氮吹浓缩:将气阀开至适当的大小,液面无明显波动为最佳. 氮吹至 1 mL 转移至 10 mL 刻度管,再次氮吹至 2 mL 待衍生化处理.

1.3 五氟苄基溴(PFBBr)衍生化

向 2 mL 浓缩液中依次加入 2 g 无水硫酸钠、0.2 g 碳酸钾; 依次移取 8 mL 丙酮和 100 μL 5% PFBBr 衍生化试剂,盖紧管塞,振荡 10 s 确保混合均匀; 30℃水浴加热 20 min,盖紧瓶塞保证衍生化反应在密闭环境中进行; 反应完毕室温下冷却 20 min; 移取上清液,氮吹浓缩至 0.5 mL; 加入 3 mL 正己烷剧烈振荡 1 min,氮吹浓缩定容至 100 μL,待测.

1.4 GC/MS 检测方法

采用 SIM 模式下无分流进样方式进行检测,载气为高纯 He,恒流 1.5 mL·min^{-1},进样量 1 μL. 进样口温度 260℃,离子源和传输杆的温度分别为 230℃和 250℃; 采用电子轰击 (EI)监测模式; 升温程序:50℃停留 1.5 min,以 7℃·min^{-1}升温速率升至 280℃,停留 2 min.

2 质量保证与控制

2.1 排除背景干扰

实验过程中所用玻璃器皿依次用丙酮、重铬酸钾洗液、洗涤剂、自来水和去离子水漂洗,再用烘箱烘干. 每 10 个样品添加一个溶剂空白和程序空白,避免背景污染.

2.2 标准曲线与检出限

运用外标法定量,标准曲线浓度梯度依次为 0、20、50、100、200 ng·mL^{-1},线性复相关系数 $r^2 > 0.90$, 样品的最低检测限(LOD)以 3 倍信噪比(S/N)来计算得到.

2.3 准确度与精密度

为保证方法的准确性与可靠性,实验过程中进行了加标回收率实验,用超纯水分别配制出酚类化合物浓度为 20 ng·mL^{-1}和 50 ng·mL^{-1}的水样 2 组各 7 个平行样,同时在每个样品中添加 50 μL 100 ng·mL^{-1}的内标指示物 2,4,6-tribromophenol,选用平均回收率和相对标准偏差来表征准确度和精密度,结果如表 1 所示.

表 1 15 种酚类化合物 2 个浓度加标水平下的平均回收率及相对标准偏差/%

Table 1 Average recovery and RSD of 15 kinds of phenolic compounds at two spike levels/%

化合物	20 ng·mL^{-1} (n=7)		50 ng·mL^{-1} (n=7)	
	回收率	RSD	回收率	RSD
phenol	93.9	14.1	113.0	10.2
o-cresol	98.0	13.0	72.3	9.0
m-cresol	86.6	23.7	77.0	10.4
p-cresol	103.9	16.5	75.1	8.6
2-chlorophenol	72.0	20.2	75.9	10.0
2,4-dichlorophenol	88.6	20.7	102.4	8.7
4-chloro-3-methyphenol	96.5	11.5	76.3	9.3
2,6-dichlorophenol	108.1	8.0	119.0	7.0
2,4,5-trichlorophenol	91.6	16.6	84.8	8.8
2,4,6-trichlorophenol	92.0	13.4	76.2	9.1
2-nitrophenol	119.3	12.7	78.1	9.7
2,3,4,6-tetrachlorophenol	123.7	20.1	93.7	8.9
2,3,5,6-tetrachlorophenol	86.5	21.7	83.1	8.3
2,4,6-tribromophenol(sur)	106.3	12.8	99.6	12.8
pentachlorophenol	82.8	27.6	85.9	9.0

2.4 数据处理

运用 SPSS 17.0 统计分析软件对 27 个采样点检测数据进行处理,各样品的分析数据根据内标指示物的回收率进行了修正. 统计中,在超过 40% 的样品被检出时,才进行统计分析,样品中污染物浓度低于 LOD 时,采用 1/2LOD 来统计.

3 结果与讨论

统计结果如表 2 所示,14 种酚类化合物在松澧洪道、藕池河下游和沱江中的 $\sum$酚 类分别为 878.05、148.36 和 594.49 ng·L^{-1}. 松澧洪道水样中 $\sum$氯 代酚的浓度为 203.03 ng·L^{-1}, $\sum$非 氯代酚的浓度为 97.21 ng·L^{-1},在 3 条河流水样中都是最高的. 3 条河的水样中 $\sum$氯 代酚之间不存在显著性差异 ($P > 0.05$); $\sum$非 氯代酚之间也不存在显著性差异 ($P > 0.05$). 五氯酚、2-硝基酚、2,6-二氯酚和苯酚分别为 37.17、25.48、5.98 和 5.30 ng·L^{-1},是松澧洪道水样中主要的污染物; 2-硝基酚和 2,6-二氯酚是藕池河下游与沱江水样中主要的污染物.

表 2　三条河流表层水样中酚类化合物的统计结果[1)] /ng·L^{-1}

Table 2　Statistical results of phenolic compounds in collected surface water from the three rivers/ng·L^{-1}

污染物	松澧洪道(n = 7)			藕池河下游(n = 10)			沱江(n = 10)		
	几何均值	范围	检出率/%	几何均值	范围	检出率/%	几何均值	范围	检出率/%
phenol	5.30	0.05 ~ 38.49	100	0.27	ND ~ 29.82	100	0.15	ND ~ 116.38	77
o-cresol	0.01	ND ~ 1.79	60	0.02	ND ~ 0.81	75	0.01	ND ~ 1.01	62
m-cresol	0.07	0.06 ~ 0.42	40	0.08	0.06 ~ 0.56	25	0.10	0.06 ~ 1.08	38
p-cresol	0.08	0.08 ~ 0.08	30	0.11	0.08 ~ 0.74	25	0.13	0.08 ~ 1.01	38
2-CP	0.35	ND ~ 19.25	90	0.18	ND ~ 5.84	92	0.40	0.01 ~ 13.75	100
2,4-DCP	NA	ND	30	NA	ND ~ 9.09	33	NA	ND	23
4-chloro-3-methyphenol	NA	ND ~ 0.44	30	NA	ND ~ 0.16	30	0.02	ND ~ 1.88	85
2,6-DCP	5.98	0.09 ~ 362.72	100	9.03	0.07 ~ 28.35	100	20.07	0.12 ~ 117.06	100
2,4,5-TCP	2.81	0.11 ~ 48.48	80	0.25	0.11 ~ 1.38	50	1.29	0.11 ~ 37.70	69
2,4,6-TCP	0.08	ND ~ 10.04	80	0.01	ND ~ 1.55	58	0.05	ND ~ 3.19	77
2-nitrophenol	25.48	0.02 ~ 2 634.97	80	15.07	0.02 ~ 1 100.16	83	2.29	0.02 ~ 3 366.12	62
2,3,4,6-TeCP	1.62	ND ~ 1 248.23	90	0.60	ND ~ 26.53	92	1.07	ND ~ 103.86	85
2,3,5,6-TeCP	1.95	0.41 ~ 139.29	100	0.10	ND ~ 11.45	67	0.11	ND ~ 15.09	69
PCP	37.17	ND ~ 1 471.98	90	0.21	ND ~ 651.62	50	0.27	ND ~ 6 057.37	46
∑氯酚	203.03	12.19 ~ 2 386.90	100	39.93	2.50 ~ 691.00	100	175.82	17.18 ~ 6 148.28	100
∑非氯酚	97.21	0.64 ~ 2 673.46	100	65.05	7.51 ~ 1 100.23	100	32.76	ND ~ 3 485.60	100
∑酚类	878.05	47.69 ~ 3 467.29	100	148.36	33.08 ~ 1 159.85	100	594.49	61.33 ~ 6 148.28	100

1) NA：未统计；ND：未检出，下同

由于我国从 1959 年起在长江中下游地区大量使用 PCP 灭螺防治血吸虫病；导致大量 PCP 被洒落在疫区的表层土以及水环境中，PCP 在常态下不易挥发，能在环境中长期残留；在光照以及微生物的作用下能进行降解，厌氧条件下，五氯酚很容易脱去氯原子而依次转化为四氯酚、三氯酚、二氯酚和氯酚等[16]. 本研究中采集的表层水样中的 PCP 及其降解产物在松澧洪道、藕池河下游和沱江中均能被检出，表明 PCP 在当地水环境中存在一定程度的污染，并降解、衍生化了一些低氯代、甲基化和硝基化的产物[5,6].

松澧洪道、藕池河下游和沱江中的表层水样中∑氯酚的浓度分别为 203.03、39.93 和 175.82 ng·L^{-1}，统计分析结果显示3 条河流的∑氯酚之间不存在显著性差异（$P > 0.05$）；∑非氯酚之间也不存在显著性差异（$P > 0.05$），说明尽管各河流污染物的浓度在数值上存在一定差别，但 3 条河流就氯酚（或非氯酚）而言仍处于同一污染水平.

2,6-二氯酚在 3 条河流表层水中的浓度分别是 5.98、9.03 和 20.7 ng·L^{-1}，是被检出酚类中的优势污染物. 还原脱氯是氯代酚类化合物一种重要的降解机制，Chang 等[17]通过接种降解菌研究了沉积物中三氯酚和五氯酚在厌氧条件下的还原脱氯过程，发现三氯酚和五氯酚降解的中间产物包括：苯酚、低氯代酚、甲基酚等，因此除杀螺剂中本身含有微量 2,6-二氯酚以外，2,6-二氯酚可能主要源于 PCP 等高氯代酚类的降解.

2-硝基酚被发现在 3 条河流表层水中的浓度都比较高（2.29 ~ 25.48 ng·L^{-1}）是优势污染物，Chiron 等[6]发现光硝化实验能将氯酚转化成硝基酚，认为硝基酚是酚类农药发生环境转变或降解的中间产物[5]；此外，2-硝基酚也是一类常用的化工原料，作为原材料或中间体被广泛应用于医药、杀虫剂、染料、木材防腐剂等生产中，硝基酚在生产和使用过程中，会随废水的排放进入当地水环境，因此本研究中被检出的 2-硝基酚可能主要源于五氯酚等氯酚在环境中的转变以及硝基酚本身在工农业方面的应用而排放进入当地水环境.

为了更好地理解研究区域表层水中酚类的污染程度，将数据统计结果与国内典型血吸虫病疫区的报道相比较，由于国内疫区报道的大都只有五氯酚的值，因此表 3 中只列出了五氯酚的比较数据，发现研究区域表层水中五氯酚浓度处于各疫区的中等污染水平. 我国地表水环境质量标准（GB 3838-2002）对五氯酚的标准限值为9 000 ng·L^{-1}，而 3 条研究河流表层水中五氯酚的最高浓度已达 651.62 ~ 6 057.37 ng·L^{-1}，因此五氯酚及其降解产物的污染会给当地水环境带来潜在风险.

表 3 各疫区表层水中五氯酚的浓度比较/ng·L^{-1}

Table 3 Levels of PCP in surface water samples from various schistosome-endemic localities/ng·L^{-1}

省份	采样时间(年)	研究区域	PCP	文献
湖南	2010	松澧洪道	ND ~ 1 471.98	本研究
湖南	2010	藕池河下游	ND ~ 651.62	本研究
湖南	2010	沱江	ND ~ 6 057.37	本研究
福建	1993,1994	福清疫区主干渠	6 ~ 54	[18]
江苏	1992 ~ 1994	金坛疫区饮用水	81	[19]
湖南	1998	洞庭湖疫区	ND ~ 103 700	[14]
江苏	2008	金坛疫区池塘	380 ~ 21 620	[20]
江苏	2009	金坛疫区池塘	1 160 ~ 2 180	[20]

4 结论

(1)五氯酚、2-硝基酚、2,6-二氯酚和苯酚是松澧洪道水样中主要的污染物;2-硝基酚和 2,6-二氯酚是藕池河下游与沱江水样中主要的污染物.

(2)研究区水样中五氯酚的浓度处于各疫区的中等污染水平,因此五氯酚及其降解产物的污染会给当地水环境带来潜在风险.

参考文献:

[1] 戴建荣, 黄铭西, 朱荫昌. 灭螺药物的研究进展[J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2000, **12**(3): 189-192.

[2] 谭大, 张剑波. Top-down 法计算中国五氯酚钠消费分布[J]. 环境污染与防治, 2008, **30**(3): 17-20.

[3] 宗俊安, 陈福鑫, 肖诗焱, 等. 耕牛皮肤接触五氯酚钠导致中毒死亡报告[J]. 中国血吸虫病防治杂志, 1989, (3): 25.

[4] 刘薇. 部分典型有机污染物及其主要降解产物的生态毒理效应研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.

[5] Chiron S, Comoretto L, Rinaldi E, *et al*. Pesticide by-products in the Rhône delta (Southern France). The case of 4-chloro-2-methylphenol and of its nitroderivative[J]. Chemosphere, 2009, **74**(4): 599-604.

[6] Chiron S, Minero C, Vione D. Occurrence of 2, 4-dichlorophenol and of 2, 4-dichloro-6-nitrophenol in the Rhône river delta (Southern France)[J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(9): 3127-3133.

[7] Shiizaki K, Asai S, Ebata S, *et al*. Establishment of yeast reporter assay systems to detect ligands of thyroid hormone receptors α and β[J]. Toxicology in Vitro, 2010, **24**(2): 638-644.

[8] Li J, Ma M, Wang Z J. In vitro profiling of endocrine disrupting effects of phenols[J]. Toxicology in Vitro, 2010, **24**(1): 201-207.

[9] Balsiger H A, De La Torre R, Lee W Y, *et al*. A four-hour yeast bioassay for the direct measure of estrogenic activity in wastewater without sample extraction, concentration, or sterilization[J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(6): 1422-1429.

[10] US ATSDR (US Agency for Toxic Substances and Disease Registry). Toxicological profile for pentachlorophenol, 2001 [S].

[11] IARC. IARC monographs for the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans: Polychlorophenols and their sodium salts[S]. (Group 2B). Vol 71. Lyon, France: World Health Organization, International Agency for Research on Cancer, 2001.

[12] 刘金林, 胡建英, 万祎, 等. 海河流域和渤海湾沉积物和水样中五氯酚的分布[J]. 环境化学, 2006, **25**(5): 539-542.

[13] 罗茜, 查金苗, 雷炳莉, 等. 三种氯代酚的水生态毒理和水质基准[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(11): 2241-2249.

[14] 张兵, 郑明辉, 刘苗岩, 等. 五氯酚在洞庭湖环境介质中的分布[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(2): 165-167.

[15] 董军, 孙丽娜, 陈若虹, 等. 珠江口地区表层水中氯酚化合物污染研究[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(7): 82-85.

[16] 王旭刚, 孙丽蓉. 五氯酚的污染现状及其转化研究进展[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(8): 93-100.

[17] Chang B, Liao K T, Pan T M, *et al*. Biotransformations of chlorophenols in river sediments[J]. Chemistry and Ecology, 1995, **10**(1-2): 105-114.

[18] 吕华东, 黄心宜, 林玉珍, 等. 环境中五氯酚污染监测与人体摄入蓄积情况[J]. 福建环境, 1996, **13**(1): 23-25.

[19] 王晓红, 钱松, 杨沛, 等. 人体五氯酚环境接触量的研究[J]. 预防医学文献信息, 1997, **3**(3): 277-278.

[20] 许晓国. 江苏金坛鱼塘水、底泥、鱼体和渔民血中五氯酚暴露水平研究[D]. 上海: 复旦大学, 2010.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 33 No. 5

May 15, 2012

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment ····· XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, *et al.* (1409)

Applications of Pollutants Released form Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model ····· SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, *et al.* (1418)

Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities ····· XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, *et al.* (1425)

Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity ····· ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, *et al.* (1431)

Element Compositions and Source of $PM_{2.5}$ Aerosols in Qingdao ····· LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, *et al.* (1438)

Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter ····· WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, *et al.* (1446)

Application of a Resuspension Test Chamber in $PM_{2.5}$ Source Profile Analysis ····· DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, *et al.* (1452)

Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou ····· WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, *et al.* (1457)

Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir ····· JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, *et al.* (1463)

Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors ····· WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, *et al.* (1471)

Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland ····· CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, *et al.* (1476)

Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak ····· ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, *et al.* (1484)

Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorous in Wudalianchi Lake, China ····· ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, *et al.* (1491)

Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake ····· LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, *et al.* (1497)

Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu ····· LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, *et al.* (1503)

Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years ····· GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, *et al.* (1511)

Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage ····· SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)

Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain ····· LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, *et al.* (1526)

3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process ····· LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, *et al.* (1532)

Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers ····· ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, *et al.* (1540)

Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid ····· GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)

Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of *Nostoc flagelliforme* ····· QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, *et al.* (1556)

Inhibitory Effects of Liquor Cultured with *Hydrodictyon reticulatum* on the Growth of *Microcystis aeruginosa* ····· FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, *et al.* (1564)

Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in *Potamogeton crispus* L. Microcosm of Haihe River ····· CHI Jie, YANG Qing (1570)

Control and Removal of Microcystin Production of *Microcystis aeruginosa* by Irradiation of Electron Beam ····· LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)

Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District ····· LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)

Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis ····· LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, *et al.* (1587)

Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob ····· WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, *et al.* (1591)

Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland ····· LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, *et al.* (1597)

Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage ····· SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)

Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source ····· SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, *et al.* (1609)

Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge ····· WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, *et al.* (1614)

Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge ····· ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, *et al.* (1621)

Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes ····· DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, *et al.* (1625)

Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics ····· LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)

Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon ····· ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, *et al.* (1639)

Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis ····· GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, *et al.* (1646)

Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment ····· CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, *et al.* (1652)

Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by *Xanthobacter flavus* DT8 ····· JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, *et al.* (1657)

Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields ····· MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, *et al.* (1663)

Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse ····· ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, *et al.* (1670)

Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River ····· LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, *et al.* (1676)

Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas ····· WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, *et al.* (1682)

Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City ····· CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, *et al.* (1687)

Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period ····· WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, *et al.* (1693)

Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone ····· DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, *et al.* (1700)

Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream ····· GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, *et al.* (1707)

Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi ····· YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, *et al.* (1718)

Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS ····· LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, *et al.* (1725)

Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene ····· LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, *et al.* (1731)

Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite ····· WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, *et al.* (1736)

LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method ····· PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, *et al.* (1744)

Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis ····· DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, *et al.* (1753)

Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor ····· REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, *et al.* (1760)

Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique ····· QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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 5 月 15 日　33 卷　第 5 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 33　No. 5　May 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