

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O ₃ 来源识别	李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)
厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势	徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)
近10年海南岛大气NO ₂ 的时空变化及污染物来源解析	符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)
稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成	洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)
气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H ₂)浓度	栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)
小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO ₂ 特征及扩散通量	张永领, 杨小林, 张东(40)
夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究	李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)
基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度	张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)
温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别	马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)
人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例	于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)
太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究	汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)
鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应	沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)
影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析	李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)
水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响	刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)
蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响	吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)
汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化	程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)
三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)
三峡库区农林复合小流域水体汞的时空变化特征	赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)
环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响	宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)
三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征	高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)
舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析	周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)
太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律	李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)
厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估	程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)
两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例	王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)
大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价	张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)
铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验	陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军(202)
铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究	陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)
一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究	吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)
磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为	张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)
腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附	朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)
降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响	赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)
FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究	陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)
微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响	邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)
微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化	曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)
舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征	张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)
四川凉山藏彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究	周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林尤静(274)
铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用	徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)
外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响	熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)
厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征	洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)
洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素	商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)
不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究	吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)
畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化	商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)
华南某市生活垃圾组成特征分析	张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)
生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥	刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)
基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究	徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)
一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测	刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)
典型黄土区油松树干液流变化特征分析	张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)
利用巨藻发酵产氢气与挥发性有机酸的研究	赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)
人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响	李曼璐, 姜玥璐(365)
《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236, 243, 273, 300)	

太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律

李佳乐^{1,2}, 张彩香², 王焰新^{1,2*}, 廖小平^{1,2}, 姚林林^{1,2}, 刘敏², 徐亮^{1,2}

(1. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 污水灌溉在华北水资源匮乏地区得到广泛应用, 但却可能会将有机污染物引入地下水. 为查明有机污染物在污灌区地下水中的污染现状, 本文选取山西省小店污灌区为研究区, 采集了16个地下水样品(浅层水样品13个, 深层水样品3个), 利用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)分析了多环芳烃(PAHs)的含量、利用气相色谱-电子捕获器(GC-ECD)分析了有机氯农药(OCPs)的含量. 结果表明, 研究区地下水中PAHs的浓度范围为13.98~505.89 ng·L⁻¹, 平均浓度为115.67 ng·L⁻¹, 以2~3环的低环芳烃为主, 萘和菲的检出率最高; OCPs的浓度范围为13.91~103.23 ng·L⁻¹, 平均浓度为40.99 ng·L⁻¹, 检出率最高的为 α -六六六、 δ -六六六、2,4-滴滴滴、艾氏剂、硫丹硫酸酯、六氯苯. 总体来看, 深层水的有机污染物浓度明显低于浅层水; 各水渠附近地下水中有有机污染物浓度顺序为: 东干渠 < 北张退水渠 < 太榆退水渠, 显示地下水水质受到污水灌溉的影响.

关键词: 污灌区; 地下水; 污染特征; 分布规律; 多环芳烃; 有机氯农药

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0172-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.01.022

Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City

LI Jia-le^{1,2}, ZHANG Cai-xiang², WANG Yan-xin^{1,2*}, LIAO Xiao-ping^{1,2}, YAO Lin-lin^{1,2}, LIU Min², XU Liang^{1,2}

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Sewage irrigation has been widely used in areas of water shortage in northern China, and it may introduce organic contaminants into groundwater. To characterize the organic contaminants in groundwater in sewage irrigation area, the Xiaodian sewage irrigation area in Shanxi Province was chosen as the case study area. A total of 16 groundwater samples (13 from shallow aquifer, 3 from deep aquifer) were collected. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were determined by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and organochlorine pesticides (OCPs) were analyzed by gas chromatography-electron capture detection (GC-ECD). The results showed that the concentrations of PAHs ranged from 13.98 to 505.89 ng·L⁻¹ with an average concentration of 115.67 ng·L⁻¹. The 2 and 3 ring-PAHs were the main components, while naphthalene and phenanthrene were most frequently detected. The concentrations of OCPs were in the range of 13.91-103.23 ng·L⁻¹ with an average concentration of 40.99 ng·L⁻¹, while α -HCH, δ -HCH, *o,p'*-DDD, Aldrin, Endosulfan-sulfate and HCB were most frequently detected. Overall, shallow aquifers appeared more contaminated with these pollutants than deep aquifers. In the area, the order of the organic contaminants concentration in groundwater was: East Main Channel < Beizhang Drainage < Taiyu Drainage, which indicated the quality of groundwater was influenced by the sewage irrigation.

Key words: sewage irrigation area; groundwater; pollution characteristics; distribution rule; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); organochlorine pesticides (OCPs)

地下水是人类宝贵的资源,也是人类生产、生活的重要水源. 伴随着人类的活动,进入地下水中的有机污染物日益增多,许多有机污染物具有致癌、致畸、致突变的“三致”作用^[1]. 由于地下水赋存环境复杂,一旦受到污染就很难得到彻底修复,对地下水中有有机污染物的研究成了国际上的热点问题^[2~6]. 农业灌溉用水量巨大,而水资源严重不足,污水灌溉成为解决这一问题的有效办法^[7],但是也

为有机污染物进入地下水提供了更多机会^[8],因此研究污灌区地下水中的有机污染具有重要意义.

通过对美国环保署、美国地调局和欧盟近年来

收稿日期: 2014-07-16; 修订日期: 2014-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(40830748, 41372255); 国家自然科学基金委国家建设高水平大学公派研究生项目

作者简介: 李佳乐(1986~),男,博士研究生,主要研究方向为地下水污染与防治、环境有机污染化学, E-mail: jillee_cug@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: yx.wang@cug.edu.cn

的关于地下水质量的报告和文献进行调研,发现挥发性有机污染物、农药、多环芳烃等在欧美国家地下水中的检出率最高^[9]. 高存荣等^[10]对我国 69 个城市地下水有机污染数据的分析,发现我国城市地下水有机污染超标率较低,但检出率较高. 早在 20 世纪 80 年代,涂洁莹等^[11]就对国内某重点污灌区饮水井的有机污染物进行了调查,检测出了荧蒽、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、蔡、菲、 α -六六六等 31 种 EPA 公布的优先监测有机物. 对小清河河水及污灌区地下水进行的有机污染物研究显示,在该区地下水中检测出了 56 种有机物,其中“三致物”以脂类、芳烃、胺类为多^[12]. 对细河沿岸污灌区的地下水水质调查显示,16 种多环芳烃总浓度范围在 $51 \sim 389 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均浓度 $133 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽的检出率最高^[13]. 张敏等^[14]对某污灌区的研究表明,该灌区主要污染物为重金属锌、多环芳烃和农残六六六.

太原市小店污灌区有近 40 年的灌溉历史,是典型的污水灌灌区. 针对本污灌区,前人的研究一般集中在重金属污染方面^[15, 16],近年来开始有人研究有机污染物方面^[17~20],但是未见有对该污灌区地下水中有机污染物的定量报道. 本文选取小店污灌区为研究区,分析了该污灌区地下水中有机污染物的污染特征及其分布规律,以期同类研究提供实例,同时对当地地下水的开发利用与保护提供指导借鉴意义.

1 材料与方法

1.1 研究区域

小店区位于山西省太原市的东南部,区内主要有三大排污渠,从西至东,分别是东干渠、北张退水渠、太榆退水渠,小店区内的农田在灌溉季节都是从这三条排污渠内引水进行灌溉. 小店区的污灌历史可以上溯至 20 世纪 70 年代. 1972 年开始用东干渠(太钢污水)以及汾河水灌溉,1973 年开始用北张退水渠的污水灌溉,大量用污水灌溉始于 1988 年,北张退水渠的污水是未处理过的城市污水,北张村以上进杨家堡,以下进北张退水渠. 20 世纪 90 年代以后,小店区工业园的工业废水也成为灌溉水源. 研究区西临汾河,南濒潇河,东北角连接东山,主体为两河之冲积平原区,地层出露主要为新生界第四系松散堆积. 依据含水层岩性及赋存分布规律,其地下水类型主要为松散岩类孔隙水^[17].

1.2 样品采集

2011 年 8 月在小店污灌区采集地下水样品 16

个. 如表 1 所示,由于小店当地多数机井已暂停使用,而当地建筑房屋时多会开凿水井,故本次所采集的地下水大多为建筑用水,深度大多在 18~40 m 之间. 根据太原市水文地质条件,埋深大于 50 m 的为深层水,小于 50 m 的为浅层水^[21, 22],由此定义本次研究采集的 13 个深度小于 50 m 的地下水样品为浅层水样品,另外 3 个为深层水样品. 采样点地理位置如图 1 所示.

表 1 研究区采样点概述

Table 1 Summary of the sampling sites in the study area				
采样点编号	位置	井深/m	类型	井水用途
GW-1	宋环	200	深层水	饮用水源地
GW-2	宋环	20	浅层水	已荒废多年
GW-3	流涧	20	浅层水	建筑用水
GW-5	大村	25	浅层水	饮用水
GW-6	贾家寨	90	深层水	灌溉用水
GW-8	杜家寨	20	浅层水	建筑用水
GW-10	东桥	20	浅层水	建筑用水
GW-11	薛店	10	浅层水	建筑用水
GW-12	梁家庄	38	浅层水	建筑用水
GW-13	小北格	25	浅层水	建筑用水
GW-14	武宿	40	浅层水	建筑用水
GW-16	西北格	25	浅层水	建筑用水
GW-18	温家堡	25	浅层水	建筑用水
GW-19	北格	18	浅层水	建筑用水
GW-20	侯家寨	25	浅层水	建筑用水
GW-21	孙家寨	100	深层水	灌溉用水

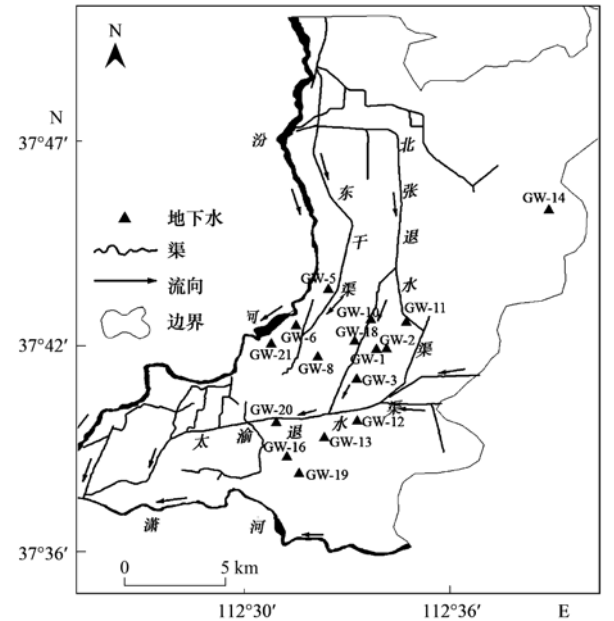


图 1 研究区采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the study area

样品采集过程: 采样瓶为 4 L 的棕色玻璃瓶,经重铬酸钾洗液浸泡以去除瓶内潜在的有机物,再用自来水冲洗 8 遍,用去离子水冲洗 6 遍,烘干备用. 采样

前,先抽水 5 min,将静置在水管内的水排净,以免影响测试结果准确性.用抽出的新鲜地下水润洗采样瓶 3 遍后将水样灌满,排净气泡后盖紧盖子,用 Parafilm 膜封口,迅速置于 4℃ 条件保存待测.

1.3 试剂与仪器

试剂:正己烷、二氯甲烷(农残级,美国 TEDIA 公司).中性氧化铝(Al_2O_3)、硅胶(层析用,100~200 目)用 CH_2Cl_2 经索氏提取器抽提,分别在 240℃、180℃ 活化 12 h,待冷却至室温后再加入其质量 3% 的去离子水降活性,平衡后储于干燥皿中备用.滤纸及脱脂棉使用前均用 CH_2Cl_2 经索氏提取器抽提.无水硫酸钠(Na_2SO_4)为分析纯,经 450℃ 焙烧 4 h,干燥后备用.氮气、氦气购自武钢氧气气瓶检验厂,纯度均为 99.999%.含 16 种标准物质的多环芳烃混合标样及多环芳烃回收率指示剂(蔡-d8、苊-d10、菲-d10、蒽-d12、芘-d12)均购自美国 AccuStandard 公司;多环芳烃内标六甲基苯(Hexamethylbenzene)购自德国 Dr. Ehrenstorfer 公司.24 种有机氯农药标准物质组成的混合标样;有机氯农药回收率指示剂为 2,4,5,6-四氯间二甲苯(TCMX)和十氯联苯(PCB209);有机氯农药内标为五氯硝基苯(PCNB),以上与有机氯农药分析相关的标准品均购自美国 Ultra Scientific 公司.

主要仪器:气相色谱-质谱联用仪(GC-MS; Agilent 6890N/5975MSD, Agilent 7683 自动进样器);气相色谱-电子捕获器(GC-ECD; Agilent HP6890).

1.4 处理方法

样品前处理采用 EPA3510C 液液萃取法^[23],样品净化采用 EPA3630C 硅胶净化法^[24].流程如下:取 1 000 mL 水样倒入分液漏斗中,快速打入 20 ng 多环芳烃回收率指示剂及 20 ng 有机氯农药回收率指示剂,用 CH_2Cl_2 萃取 3 次.提取液经旋转蒸发浓缩后移至填充硅胶/ Al_2O_3 /无水 Na_2SO_4 并经 C_6H_{14} 活化的层析柱中去除杂质.再次旋转蒸发浓缩后转移至 2 mL 棕色进样瓶.使用氮吹仪通过柔和氮气将进样瓶中的有机相浓缩至 0.2 mL,加入 1 000 ng Hexamethylbenzene 和 20 ng PCNB 待测.

1.5 测试方法

样品测试参考文献[25~29]的方法,均在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室完成.

多环芳烃测试:采用 GC-MS(HP 5975 四级杆质谱仪,HP 6890 气相色谱仪和 AS800 自动进样仪)

定量分析.色谱柱为 DB-5ms(30 m×0.25 mm ID×0.25 μm ,石英毛细管柱),载气为高纯氮气.实验条件:以不分流方式进样 1 μL ,进样口温度 280℃,色谱柱初始温度 80℃ 保持 2 min,然后以 4℃·min⁻¹ 程序升温至 290℃,保持 25 min.

有机氯农药测试:采用 GC-ECD(Agilent HP6890)定量分析.色谱柱为 DB-5(30 m×0.32 mm ID×0.25 μm ,石英毛细管柱),载气为高纯氮气.实验条件:以不分流方式进样 2 μL ,进样口温度 250℃,检测器温度 300℃,色谱柱柱温 100℃ 保持 1 min,以 4℃·min⁻¹ 升至 200℃,2℃·min⁻¹ 升至 230℃,再以 8℃·min⁻¹ 升至 280℃,保持 15 min.

1.6 质量控制

预处理过程中每 5 个样品插入一个去离子水样品为实验室空白,以检验是否有由于人为因素而引入的目标化合物;样品测试过程中每日插入一个空白有机试剂,以去除色谱柱中潜在的有机相残留,预防交叉污染.上述空白样品中仅检测出极微量的蔡和菲,已在数据校正时扣除.多环芳烃平均回收范围为 77.5%~98.9%,检测限为 0.13~0.92 ng·L⁻¹;有机氯农药平均回收范围为 78%~105%,检测限为 0.02~0.08 ng·L⁻¹,以上结果均符合美国环保署要求,实验结果可靠.多环芳烃和有机氯农药的测试结果均用内标法进行定量并经过仪器校正和回收率校正.

2 结果与讨论

2.1 地下水有机污染特征

检测结果的数据统计分析如表 2 所示.

本研究区地下水中共检测出 8 种 PAHs,其中,浅层水检测出了 2 环的蔡、二氢苊、苊、芴,3 环的菲、蒽、荧蒽以及 4 环的芘,只有 5 个水样检测出芘.浅层水中蔡的检出率最高,达到 90.91%,其次是非,达到了 81.82%,二氢苊和苊分别只在一个样品中检出.张跃进等^[30]的研究表明,浑河沿岸地下水中的 PAHs 主要由低环芳烃及部分高环芳烃组成,结合图 2 可知,小店污灌区的地下水中 PAHs 以 2~3 环的低环芳烃为主,这是由于随着分子量的增大,PAHs 的 $\lg K_{ow}$ 变大,在水中的溶解度变小^[30],所以高环的 PAHs 比较容易吸附于土壤颗粒表面.仅在 GW-2、GW-3、GW-12、GW-19、GW-20 检测到 4 环 PAHs,各采样点均未检测到 5~6 环的高环芳烃,与浑河污灌区地下水中的 PAHs 组成特征不同^[29],推测是由于 PAHs 的来源不同而导致的.

表 2 研究区地下水中有机污染物含量¹⁾/ng·L⁻¹

Table 2 Concentrations of organic contaminants in groundwater of the study area/ng·L⁻¹

有机污染物	浅层水 (n=13)				深层水 (n=3)			
	范围	平均值	标准差	检出率	范围	平均值	标准差	检出率
萘	ND ~ 64. 62	25. 31	19. 67	10/11 ^e	11. 29 ~ 33. 51	24. 22	11. 55	3/3
二氢萘	ND ~ 120. 95	11. 00	36. 47	1/11 ^e	ND	—	—	0/3
芴	ND ~ 79. 57	7. 23	23. 99	1/11 ^e	ND	—	—	0/3
芘	ND ~ 124. 26	18. 49	38. 84	3/11 ^e	ND	—	—	0/3
菲	ND ~ 139. 22	32. 50	46. 60	9/11 ^e	9. 16 ~ 34. 45	19. 11	13. 48	3/3
蒽	ND ~ 11. 60	3. 03	4. 54	4/11 ^e	ND	—	—	0/3
荧蒽	ND ~ 132. 48	15. 93	39. 34	4/11 ^e	ND	—	—	0/3
芘	ND ~ 184. 86	21. 91	54. 59	5/11 ^e	ND	—	—	0/3
2+3 环 ^a	13. 98 ~ 410. 61	113. 49	139. 28	11/11 ^e	20. 45 ~ 67. 96	43. 33	23. 81	3/3
4 环 ^a	ND ~ 184. 86	21. 91	54. 59	5/11 ^e	ND	—	—	0/3
∑ PAHs ^b	13. 98 ~ 505. 89	135. 40	171. 98	11/11 ^e	20. 45 ~ 67. 96	43. 33	23. 81	3/3
α-六六六	0. 07 ~ 29. 43	2. 82	8. 02	13/13	0. 12 ~ 0. 63	0. 30	0. 29	3/3
β-六六六	ND ~ 43. 34	4. 65	11. 71	9/13	ND ~ 0. 85	0. 28	0. 49	1/3
γ-六六六	ND ~ 4. 16	1. 41	1. 29	10/13	0. 40 ~ 1. 29	0. 78	0. 46	3/3
δ-六六六	0. 23 ~ 5. 07	1. 90	1. 56	13/13	1. 95 ~ 3. 30	2. 42	0. 76	3/3
∑ 六六六 ^c	0. 30 ~ 51. 23	10. 77	15. 05	13/13	3. 21 ~ 4. 68	3. 78	0. 79	3/3
2,4-滴滴伊	ND ~ 4. 41	0. 92	1. 51	5/13	ND	—	—	0/3
4,4-滴滴伊	ND ~ 2. 34	0. 62	0. 98	7/13	ND ~ 0. 35	0. 19	0. 18	2/3
2,4-滴滴滴	1. 10 ~ 5. 34	2. 58	1. 66	13/13	0. 71 ~ 5. 20	2. 59	2. 33	3/3
4,4-滴滴滴	ND ~ 27. 96	2. 58	7. 66	6/13	ND ~ 0. 46	0. 27	0. 24	2/3
2,4-滴滴涕	ND ~ 1. 66	0. 54	0. 70	7/13	0. 84 ~ 1. 25	1. 11	0. 24	3/3
4,4-滴滴涕	ND ~ 1. 59	0. 29	0. 46	7/13	0. 14 ~ 0. 72	0. 39	0. 30	3/3
∑ 滴滴涕 ^e	1. 41 ~ 32. 78	7. 53	8. 15	13/13	2. 31 ~ 6. 80	4. 54	2. 25	3/3
α-硫丹	ND ~ 59. 03	6. 51	16. 06	11/13	ND ~ 0. 41	0. 37	0. 35	2/3
β-硫丹	ND ~ 1. 25	0. 40	0. 43	8/13	ND ~ 0. 71	0. 46	0. 40	2/3
硫丹硫酸酯	ND ~ 2. 66	0. 85	0. 81	11/13	0. 12 ~ 0. 50	0. 34	0. 20	3/3
∑ 硫丹 ^c	0. 24 ~ 59. 87	7. 76	15. 95	13/13	0. 53 ~ 1. 83	1. 18	0. 65	3/3
六氯苯	ND ~ 0. 87	0. 53	0. 29	11/13	0. 29 ~ 0. 93	0. 62	0. 32	3/3
七氯	ND ~ 2. 16	0. 53	0. 80	5/13	0. 85 ~ 2. 79	1. 57	1. 06	3/3
艾氏剂	1. 50 ~ 42. 58	12. 31	11. 66	13/13	1. 95 ~ 4. 38	3. 42	1. 29	3/3
七氯环氧	ND ~ 6. 93	1. 48	2. 55	4/13	ND	—	—	0/3
反氏九氯	ND ~ 6. 79	0. 52	1. 88	1/13	ND	—	—	0/3
狄氏剂	ND	—	—	0/13	ND ~ 1. 17	0. 52	0. 60	2/3
异狄氏剂	ND ~ 5. 80	1. 59	2. 02	9/13	ND ~ 0. 50	0. 17	0. 29	1/3
顺氏九氯	ND ~ 3. 07	0. 28	0. 84	3/13	ND	—	—	0/3
甲氧滴滴涕	ND ~ 29. 22	3. 38	8. 05	7/13	ND ~ 1. 81	0. 60	1. 05	1/3
∑ OCPs ^d	16. 21 ~ 103. 23	46. 67	27. 95	13/13	13. 91 ~ 19. 71	16. 40	2. 98	3/3

1) ND 代表未检出或低于检测限; “—”代表无意义; 检出率以分数形式表现: 分母为检测的样品数, 分子为检出的样品数; 上标中, a: 4 环包括芘, 2+3 环为检测出的其他的 PAHs 的总和; b: 相对分子质量大于 202 的 PAHs 在所有样品中均未检出, 未列在表中; c: $\sum \text{六六六} = \alpha\text{-六六六} + \beta\text{-六六六} + \gamma\text{-六六六} + \delta\text{-六六六}$, $\sum \text{滴滴涕} = 2,4\text{-滴滴伊} + 4,4\text{-滴滴伊} + 2,4\text{-滴滴滴} + 4,4\text{-滴滴滴} + 2,4\text{-滴滴涕} + 4,4\text{-滴滴涕}$, $\sum \text{硫丹} = \alpha\text{-硫丹} + \beta\text{-硫丹} + \text{硫丹硫酸酯}$; d: 反式氯丹、顺式氯丹在所有样品中均未检出, 未列在表中; e: 由于实验过程中偶有操作失误而必须重测某些样品, 导致样品量不足, 所以 GW-8 和 GW-14 未检测 PAHs

浅层水中 PAHs 浓度范围最大的为芘 ND ~ 184. 86 ng·L⁻¹, 范围最小的为蒽 ND ~ 11. 60 ng·L⁻¹; 平均值最高的为菲 32. 50 ng·L⁻¹, 最低的为蒽 3. 03 ng·L⁻¹. 深层水中只检测出萘和菲, 检出率均为 100%, 浓度范围分别为 11. 29 ~ 33. 51 ng·L⁻¹和 9. 16 ~ 34. 45 ng·L⁻¹. 浅层水和深层水的

$\sum$ PAHs 浓度范围分别为 13. 98 ~ 505. 89 ng·L⁻¹和 20. 45 ~ 67. 96 ng·L⁻¹, 均低于我国生活饮用水卫生标准的 2 000 ng·L⁻¹, 符合我国生活饮用水要求^[31]. 地下水中 $\sum$ PAHs 浓度范围为 13. 98 ~ 505. 89 ng·L⁻¹, 平均浓度为 115. 67 ng·L⁻¹, 且均未检测到具有强致癌作用的苯并[a]芘. 小店污灌区的 PAHs

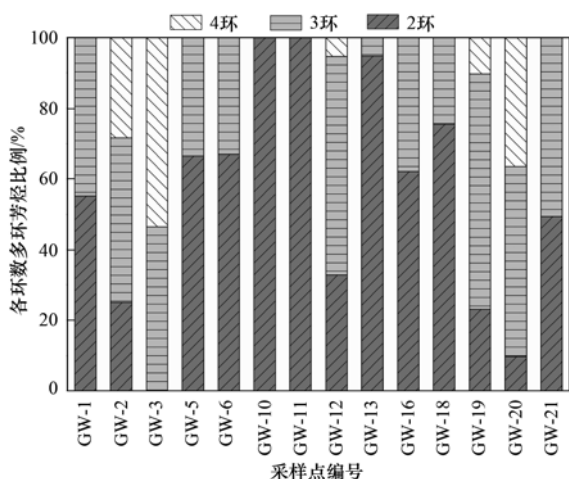


图2 各环多环芳烃的组成类型

Fig. 2 Composition pattern of PAHs rings

污染水平低于浑河污灌区^[29]和细河污灌区^[32, 33], 深层水受 PAHs 污染程度比浅层水轻, 与高存荣等^[10]的研究相一致。

表2显示,在所有检测的24种OCPs中,反式氯丹和顺式氯丹均未检出。在浅层水中, α -六六六、 δ -六六六、2,4-滴滴滴、艾氏剂的检出率均达到100%,深层水中 α -六六六、 γ -六六六、 δ -六六六、2,4-滴滴滴、2,4-滴滴涕、4,4-滴滴涕、硫丹硫酸酯、六氯苯、七氯、艾氏剂的检出率达到100%,由此可见,小店污灌区的地下水普遍受到OCPs的污染。浅层水中平均浓度最高的OCPs单体为艾氏剂 $12.31 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,其次为 α -硫丹 $6.51 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$;深层水中平均浓度最高的为艾氏剂 $3.42 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,其次为2,4-滴滴滴 $2.59 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。深层水中, δ -六六六、2,4-滴滴滴、2,4-滴滴涕、七氯、艾氏剂不仅检出率高,而且污染浓度比较高,平均浓度均超过 $1 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,应引起重视。地下水中 $\sum \text{OCPs}$ 的浓度范围为 $13.91 \sim 103.23 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,平均浓度为 $40.99 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,污染水平与细河污灌区相当^[33]。

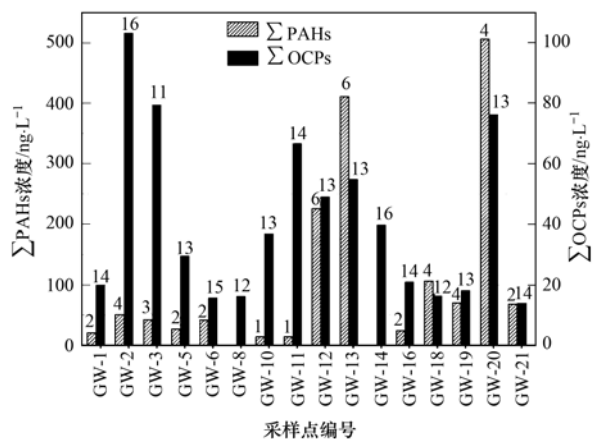
所有地下水样中 $\sum \text{OCPs}$ 均远低于欧盟规定的饮用水标准浓度 $500 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[28],符合欧盟规定的饮用水要求。 γ -六六六、 $\sum$ 六六六、 $\sum$ 滴滴涕、六氯苯、七氯浓度均低于我国生活饮用水标准^[31]。参照地下水环境质量标准(GB/T 14848-93)^[34],所有水样均检测出滴滴涕,故不符合I类水的不得检出滴滴涕的规定。3个深层水采样点中GW-1、GW-6及GW-21均达到II类水中关于OCPs的标准,即主要反映地下水化学组分的天然背景含量,适用于

各种用途。浅层水中只有GW-3、GW-8、GW-18、GW-19达到II类水中OCPs的相关标准。其他12个地下水样均达到III类水中关于OCPs的标准,即以人体健康基准值为依据,主要适用于集中式生活饮用水水源及工、农业用水。基于OCPs含量分析,东干渠附近的地下水大都属于II类水,太榆退水渠附近的地下水大都属于III类水。东干渠中的污水经过污水处理厂处理,而太榆退水渠中的污水未经处理被直接引用灌溉。由此可见,本灌区地下水水质受到污水灌溉的影响。

2.2 有机污染物的分布规律

小店污灌区地下水中有有机污染物的分布如图3所示。PAHs浓度最小值出现在位于北张退水渠中游的GW-10,为 $13.98 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$;最大值出现在GW-20,达到 $505.89 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,推测是由于该点位于北张退水渠和太榆退水渠汇合点的下游,污水将流经的区域中的PAHs携带至此。

OCPs浓度最大值出现在GW-2,为 $103.23 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,在此点检测出的OCPs种类也最多,达到16种,这可能是由于水位较低,溶解度比较大的OCPs随周围的地下水汇于此处,该点附近的GW-3和GW-11的 $\sum \text{OCPs}$ 浓度也较高。最小值出现在GW-21,该点是灌溉机井,深度达到100 m,大部分OCPs被土壤及胶体吸附,但是在该点检测出14种OCPs,主要是因为该点周围种植了生菜、豆角、白菜等多种蔬菜,为防治病虫害,喷洒了多种OCPs。



GW-8和GW-14未检测PAHs指标;各长柱上方的数字代表该类有机污染物在该样点中所检测出的种类数量

图3 各采样点中有机污染物的分布

Fig. 3 Distribution of organic contaminants in each sampling site

如图4所示,沿渠道流向,PAHs的浓度总体呈现上升趋势,OCPs分布趋势不明显,说明这两类化合物在地下水中的分布与其理化性质有关。从平均

浓度来看,总体上太榆退水渠附近的浓度 > 北张退水渠附近的浓度 > 东干渠附近的浓度,与各渠道里有机污染物浓度的分布吻合^[35],也进一步证明污水灌溉对当地地下水产生了影响。

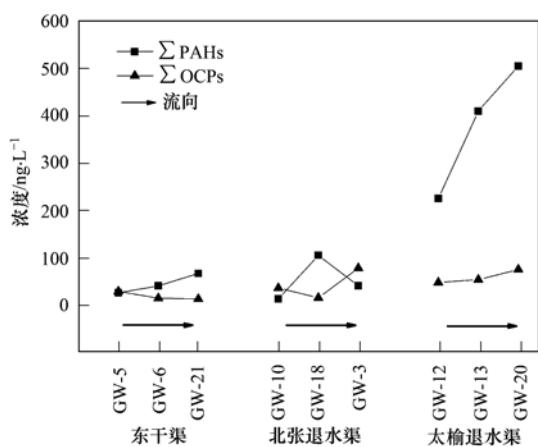


图4 有机污染物延渠道流向的分布

Fig. 4 Distribution of organic contaminants along the flow direction of the drainages

从表2可知,浅层水中PAHs的平均浓度为深层水中的3.12倍,OCPs的平均浓度为深层水的2.85倍,深层水受有机污染物的污染比浅层水小很多,推测是由于有机污染物随地下水下渗迁移的过程中受到土壤及胶体的吸附以及微生物分解。结合表1和图3可知,GW-1和GW-2同在宋环村,相隔不足500 m,但是GW-2的 $\sum$ PAHs浓度为GW-1的2.48倍, $\sum$ OCPs浓度甚至达到了GW-1的5.24倍,由此可见,在污染较严重区域,应开采埋深较大的地下水。

3 结论

(1)小店污灌区中16个地下水的有机污染物检测表明,该区域地下水中多环芳烃的浓度范围为13.98 ~ 505.89 ng·L⁻¹,平均浓度为115.67 ng·L⁻¹;有机氯农药的浓度范围为13.91 ~ 103.23 ng·L⁻¹,平均浓度为40.99 ng·L⁻¹。

(2)研究区地下水中多环芳烃以2~3环的低环芳烃为主,萘和菲的检出率最高,污染水平低于浑河污灌区和细河污灌区;有机氯农药检出率最高的为 α -六六六、 δ -六六六、2,4-滴滴滴、艾氏剂、硫丹硫酸酯、六氯苯。

(3)深层水的有机污染物浓度明显低于浅层水。各水渠附近地下水中有机污染物浓度为:东干渠附近最低,北张退水渠附近次之,太榆退水渠附近

最高,可见地下水水质受到污水灌溉的影响。

(4)小店污灌区的地下水中的有机污染物浓度符合我国生活饮用水及工、农业用水要求,对本区域地下水的使用还需综合考虑其他指标。

(5)建议污水在灌溉前经污水处理厂统一处理,加强灌渠沿岸砌衬措施,保护当地地下水水质。

致谢:太原市水务局杜成元、卢利生先生、中国地质大学杜斌博士、向青清硕士在野外采样中给予了帮助;中国地质大学祁士华教授团队在样品测试分析中给予了支持;丹麦地质调查局高级研究员René K. Juhler在本研究成文过程中给予了指导,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] Stahl R G Jr. The genetic toxicology of organic compounds in natural waters and wastewaters [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1991, **22**(1): 94-125.
- [2] 王焰新,李义连,付素蓉,等. 武汉市第四系含水层地下水有机污染敏感性研究[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2002, **27**(5): 616-620.
- [3] 钟佐桑. 地下水防污性能评价方法探讨[J]. *地学前缘*, 2005, **12**(增刊): 3-11.
- [4] Gonzalez M, Miglioranza K S B, Shimabukuro V M, et al. Surface and groundwater pollution by organochlorine compounds in a typical soybean system from the south Pampa, Argentina [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, **65**(2): 481-491.
- [5] Rodriguez-Escales P, Sayara T, Vicent T, et al. Influence of soil granulometry on pyrene desorption in groundwater using surfactants[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2012, **223**(1): 125-133.
- [6] Han D M, Tong X X, Jin M G, et al. Evaluation of organic contamination in urban groundwater surrounding a municipal landfill, Zhoukou, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(4): 3413-3444.
- [7] 刘润堂,许建中. 我国污水灌溉现状、问题及其对策[J]. *中国水利*, 2002, (10): 123-125.
- [8] Gonzalez M, Miglioranza K S, Aizpún J E, et al. Assessing pesticide leaching and desorption in soils with different agricultural activities from Argentina(Pampa and Patagonia)[J]. *Chemosphere*, 2010, **81**(3): 351-358.
- [9] 刘菲,王苏明,陈鸿汉. 欧美地下水有机污染调查评价进展[J]. *地质通报*, 2010, **29**(6): 907-917.
- [10] 高存荣,王俊桃. 我国69个城市地下水有机污染特征研究[J]. *地球学报*, 2011, **32**(5): 581-591.
- [11] 涂洁莹,陈代线,舒小平,等. 污灌区饮水井中有机污染物研究[J]. *环境化学*, 1986, **5**(5): 60-74.
- [12] 田家怡,张洪凯,周桂芬,等. 小清河污灌水质有机化合物污染及对地下水影响的研究[J]. *山东环境*, 1995, (1): 15-18.
- [13] 宋雪英,孙丽娜,王鑫,等. 细河河水及其沿岸地下水水质的有机污染特征[J]. *生态学杂志*, 2007, **26**(12): 2057-2061.

- [14] 张敏, 蔡五田, 刘雪松, 等. 某污灌区污水-土壤-地下水污染物分布特征[J]. 地球与环境, 2012, **40**(1): 30-36.
- [15] 张乃明, 邢承玉, 贾润山, 等. 太原污灌区土壤重金属污染研究[J]. 农业环境保护, 1996, **15**(1): 21-23.
- [16] 张乃明, 张守萍, 武丕武. 山西太原污灌区农田土壤汞污染状况及其生态效应[J]. 土壤通报, 2001, **32**(2): 95-96.
- [17] 杜斌, 龚娟, 李佳乐. 太原市污水灌溉对水土环境的有机污染研究[J]. 人民长江, 2010, **41**(17): 58-61.
- [18] 郑伟林, 罗泽娇, 张沙沙, 等. 山西小店污灌区土壤中多环芳烃的研究[J]. 安全与环境工程, 2010, **17**(2): 60-63.
- [19] 廖小平, 张彩香, 赵旭, 等. 太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4263-4269.
- [20] 姚林林, 张彩香, 李佳乐, 等. 污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1553-1560.
- [21] 王俊有. 太原市地下水水质现状及污染防治措施[J]. 环境科学动态, 2002, (4): 19-21.
- [22] 杨军生. 太原市地下水水质分析评价[J]. 地下水, 2005, **27**(2): 107-109.
- [23] EPA Method 3510C, Separatory funnel liquid-liquid extraction [S]. 1996.
- [24] EPA Method 3630C, Silica gel cleanup[S]. 1996.
- [25] Liu G Q, Zhang G, Li X D, *et al.* Sedimentary record of polycyclic aromatic hydrocarbons in a sediment core from the Pearl River Estuary, South China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, **51**(8-12): 912-921.
- [26] 罗锡明, 刘永刚, 何江涛, 等. 气相色谱法测定地下水多环芳烃准确度的保证措施[J]. 地学前缘, 2005, **12**(增刊): 193-198.
- [27] Gong X Y, Qi S H, Wang Y X, *et al.* Historical contamination and sources of organochlorine pesticides in sediment cores from Quanzhou Bay, Southeast China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, **54**(9): 1434-1440.
- [28] Zhou Y, Wang Y X, Zwahlen F, *et al.* Organochlorine pesticide residues in the environment of Central Jiangnan Plain, China [J]. Environmental Forensics, 2011, **12**(1): 106-119.
- [29] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准 [S].
- [30] 张跃进, 朱书全, 肖汝, 等. 浑河沿岸污灌区地下水中 PAHs 分布特征研究[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(1): 7-11.
- [31] Guo W, He M C, Yang Z F, *et al.* Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Xihe River, an urban river in China's Shenyang City: distribution and risk assessment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **186**(2-3): 1193-1199.
- [32] 罗庆. 细河沿岸地下水中特征有机污染物健康风险评估 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2011.
- [33] Villholth K G. Colloid characterization and colloidal phase partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in two creosote-contaminated aquifers in Denmark[J]. Environmental Science & Technology, 1999, **33**(5): 691-699.
- [34] GB/T 14848-93, 地下水环境质量标准[S].
- [35] 刘敏, 张彩香, 徐亮, 等. 太原市小店污灌区地表水中有机氯农药分布[J]. 环境化学, 2013, **32**(8): 1469-1474.

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i> (11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i> (18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i> (25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong (40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenritang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling (64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i> (72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i> (80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i> (87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang (107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i> (114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i> (121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i> (143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i> (151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i> (163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i> (172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i> (179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i> (186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i> (194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i> (202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i> (209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i> (215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i> (221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui (227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i> (237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i> (259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i> (274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i> (280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i> (295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i> (301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i> (309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i> (325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i> (333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i> (338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i> (343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i> (357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu (365)

《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)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行