

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭 (1215)

乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶 (1223)

典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣 (1230)

某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价 董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽 (1238)

基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔晓勇,许群,宋现锋 (1245)

珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 孙成玲,谢绍东 (1250)

低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山 (1256)

太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强 (1263)

一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 王燕,朱春刚,许笛,丁士明 (1271)

外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 傅玲,赵凯,王国祥,欧媛,范娟,毛丽娜,张佳,韩睿明 (1278)

基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 孙法圣,程品,张博 (1285)

重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬 (1290)

重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁 (1297)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 根系对沉积物中各形态磷的影响 李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞 (1304)

循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明 (1311)

不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 段伦超,王凤贺,纪莹雪,张帆,赵斌,王国祥 (1318)

再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 黄晶晶,汤芳,席劲璇,庞宇辰,胡洪营 (1326)

二级处理出水的 UV-TiO₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌复活试验 王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帜 (1332)

水中 C₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究 方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛 (1337)

XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 赵应许,纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽 (1343)

纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究 付融冰 (1351)

共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 王琪,刘辉,姜林,唐军 (1358)

硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 吴宣,谭科艳,胡希佳,顾远,杨宏 (1366)

基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英 (1372)

模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 陈燕,黄芳,谢鑫源 (1377)

电活性生物膜介导 Cu²⁺ 生物还原的试验研究 刘毅,周顺桂,袁勇,刘志 (1384)

模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳 (1391)

填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹 (1399)

化学合成施氏矿物与 H₂O₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥 (1407)

处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅 (1414)

剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究 董慧岭,季民 (1421)

锰氧化菌 *Aminobacter* sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋铁锋 (1428)

1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊 (1437)

碘普罗胺降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究 徐冰洁,高品,薛昱,何梦琦,吴凡 (1443)

利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化 张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛 (1449)

毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建 (1457)

缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国 (1462)

微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 王妮敏,邓琦,邹华,梁婵娟 (1468)

东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应 张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠 (1473)

生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 吴丽,张高科,陈晓国,兰书斌,张德禄,胡春香 (1479)

老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 陈丽红,刘征涛,方征,王晓南,王婉华 (1486)

土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯苓,吴国平,魏复盛 (1491)

藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞 (1498)

三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊 (1502)

浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭 (1509)

西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赞,王美娥 (1516)

生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬 (1523)

上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡 (1531)

SDBS/Na⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响 唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹 (1540)

稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎 (1548)

藻类水体 Cd²⁺ 毒性快速监测新方法研究 段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽 (1555)

用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 龙峰,施汉昌,王洪臣,盛建武 (1561)

Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO₃⁻ 吸附性能的研究 钟琼,李欢 (1566)

污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 廖晓勇,陶欢,阎秀兰,赵丹,林龙勇,李尤 (1576)

城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 杨孟,李凤英,刁一伟,吴丹 (1586)

水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志 (1597)

六价铬细菌还原的分子机制研究进展 李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧 (1602)

农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 魏源送,郁达伟,曹磊 (1613)

《环境科学》征稿简则(1427) 《环境科学》征订启事(1497) 信息(1383, 1390, 1398, 1560)

填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因

何小松^{1,2}, 余红^{1,2}, 席北斗^{1,2*}, 崔东宇^{1,2}, 潘红卫^{1,2}, 李丹^{1,2}

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院地下水与环境系统创新基地, 北京 100012)

摘要: 为揭示垃圾渗滤液污染地下水特征, 采用常规分析、三维荧光光谱和多元统计分析, 研究了某简易填埋场垃圾浸提液与地下水中无机盐、有机物及重金属的分布特征及成因。结果表明, 填埋场垃圾异质性强, 浸提液中 NH_4^+ -N 浓度高, 而 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、溶解性有机物 (DOM)、重金属含量低, 强还原氛围导致硝化过程受阻, NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量低, 浸提液中 Cu 主要结合在 DOM 上, 而 Ba、Cd、Cr、Fe、Mn、Ni、Zn 及 As 主要结合在疏水性有机物上。除填埋场所在点地下水外, 其余点地下水污染物来源相似, 其中的 DOM 以微生物来源为主; 与垃圾浸提液中污染物分布特征相反, 地下水中 NH_4^+ -N 含量低而 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、DOM、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量高, Cu、Ba、Cd、Fe、Mn 及 Ni 的分布与 DOM 有关, 主要结合在荧光有机物上。研究结果显示, 基于地下水中污染物组成差异, 采用聚类分析方法可识别出地下水受渗滤液污染点。

关键词: 生活垃圾; 填埋; 无机盐; 重金属; 有机物

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1399-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.028

Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons

HE Xiao-song^{1,2}, YU Hong^{1,2}, XI Bei-dou^{1,2}, CUI Dong-yu^{1,2}, PAN Hong-wei^{1,2}, LI Dan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Innovation Base of Ground Water & Environmental System Engineering, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to investigate the groundwater pollution by landfill leachates, the distribution characteristics of inorganic salt, organic compounds and heavy metals in leachates from a simple landfill and groundwater and its reason were study using conventional analysis, fluorescence excitation-emission matrix spectra and multivariate statistical analysis. The results showed that the landfill was heterogeneous, and the extracts from the landfill wastes showed a high concentration of NH_4^+ -N, but low contents of Cl^- , SO_4^{2-} , dissolved organic matter (DOM) and heavy metals. The nitrification process was blocked due to a strong reducing atmosphere in landfill, which caused a low concentration of NO_3^- -N and NO_2^- -N in leachates. Cu was mainly associated with DOM in leachates, while the distribution of the metals Ba, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Zn and As was primarily related to hydrophobic organic compounds. The contaminate compositions in different groundwater were similar except for the groundwater under the landfill site. In contrast to landfill leachates, the groundwater showed a low concentration of NH_4^+ -N, but high concentrations of Cl^- , SO_4^{2-} , DOM, NO_3^- -N and NO_2^- -N except for the groundwater under the landfill site. The organic compounds in the groundwater were mainly originated from microbial activity, and the distribution of the metals Ba, Cd, Cu, Fe, Mn and Ni was mainly related to fluorescecent organic matter in DOM. The results showed that the leak point of landfill leachates can be identified through the cluster analysis method on the basis of the contaminant composition in groundwater.

Key words: municipal solid waste; landfill; inorganic salt; heavy metal; organic matter

生活垃圾填埋过程中, 会产生含高浓度溶质的废水——垃圾渗滤液。垃圾渗滤液中含有有机物、氨氮、无机盐、重金属等众多污染物, 当填埋场未铺设防渗膜或防渗膜破裂时, 渗滤液经包气带土壤进入含水层, 造成地下水污染。

目前在垃圾填埋场渗滤液污染地下水过程及受污染地下水组成特征上, 国内外已有相关研究, 研究主要集中在溶解性有机物 (dissolved organic matter, DOM)、无机阴阳离子及重金属等对地下水污染过程及污染特征研究上^[1]。Regadio 等^[2]对 DOM、无

机阴阳离子及重金属的研究表明, 渗滤液中不同污染物的土壤穿透性差异较大; Baker^[3]发现, 渗滤液有机物主要为腐殖质和异质性有机物, 其荧光强度与地下水中氨氮和有机物浓度显著相关;

收稿日期: 2013-08-23; 修订日期: 2013-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51078340); 中国博士后科学基金项目 (2012M520349); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (2012GQ-14); 环境保护公益性行业科研专项 (201109010)

作者简介: 何小松 (1982~), 男, 博士后, 主要研究方向为地下水污染监测与控制, E-mail: hexs82@126.com

* 通讯联系人, E-mail: xibeidou@263.net

Christensen 等^[4]发现受污染地下水有机物主要为富里酸,其 DOM 含量占总有机物的 60%,亲水性组分(30%)和胡敏酸含量较少(10%). Gounarls 等^[5]研究发现,渗滤液中重金属 Zn、Pb 及 Cr 主要结合在 DOM 上,而疏水性有机物主要存在直径大于 0.1 μm 的胶体上;而 Jensen 等^[6]的研究表明,地下水中 Cd、Ni、Cu、Pb 的分布与 DOC 有关,主要存在小于 0.40 μm 的溶液中,而 Zn 的分布却与 DOC 无关. Biswas 等^[7]对印度一生活垃圾填埋场地下水的研究表明,当地下水收到渗滤液污染后,其中重金属(Cr、Cd、Ni、Mn 及 Pb)浓度较高.

在研究渗滤液对地下水污染过程及受污染地下水组成特征的同时,一些研究者开始了填埋场地下水污染源解析与地下水污染预警研究,采用的方法主要为模型分析法和生物或化学检测法. 模型预测法可以很好地模拟渗滤液污染物迁移过程,对填埋场地下水污染提出预警^[8,9],生物监测法可以快速有效地对地下水污染物进行溯源,如 Grisey 等^[10]通过地下水中大肠杆菌的分析,确定了所研究填埋场不是地下水的污染源. 通过化学法对地下水污染源解析和污染预警上,近年来研究较多的是采用三维荧光光谱技术预警地下水污染,如 Lapworth 等^[11]采用三维荧光光谱,通过地下水中有有机物的荧光特性的研究分析了砂岩含水层中 DOC 来源和地下水流向,研究结果表明三维荧光光谱可以快速有效地确定地下水流向和其中的有机物来源.

然而,上述研究均未阐明填埋垃圾渗滤液与地下水污染物组成的差异,并基于这种差异分析渗滤液污染地下水特征与规律. 基于此,本研究采集了填埋垃圾和地下水样品,在分析填埋垃圾浸出液和地下水中无机盐、重金属及有机物组成特征及来源特性的基础上,阐明填埋垃圾渗滤液污染地下水规律,建立填埋场地下水污染源解析方法,以期对填埋场地下水污染防控和预警提供依据.

1 材料与方法

1.1 采样点概况

样品采集于北京某垃圾填埋场,该填埋场土壤岩性主要为砂土和砂砾石,透水性较好,含水层在 25 m 左右,为潜水系统,地下水流自西北流向东南^[12,13]. 该地原为采砂石坑,1989 年起开始填埋垃圾,目前仍在填埋,其填埋的垃圾包括生活垃圾、建筑垃圾和其他废弃物,2.5 km^2 范围内有大大小小分布有 8 个垃圾填埋场,除两个正规填埋场,其余均

为非正规垃圾填埋场,未采取任何防护措施直接填埋在采砂坑上. 已有报道显示^[14],该地区地下水早已经受到污染,2000 年时该地区 1.2 km^2 范围内的地下水已不能饮用,2010 年时污染面积大于 2 km^2 ,向下游扩散 1 750 m. 如图 1 所示,本研究在其中一个非正规填埋场采集了 7 个填埋垃圾样,并在该填埋场所在地下水监测井采集地下水样 1 个,填埋场的上游和下游各采集地下水样 3 个, S1 ~ S3 为填埋场下游点, S4 点为填埋场所在点, S5 ~ S7 为填埋场上游点. 在该填埋场不同位点(包括填埋场四周和中心)采集了 7 个填埋垃圾样,每个均超过 1.0 kg,采集时剔出石块、木头、玻璃等大块物,7 个样品依次编号为 L1、L2、L3、L4、L5、L6、L7. L1、L2 为填埋 0 ~ 2 m 内垃圾, L3 ~ L7 为填埋 5 m 以上垃圾. 样品采集完毕后,迅速运回实验室,4 $^{\circ}\text{C}$ 保存.

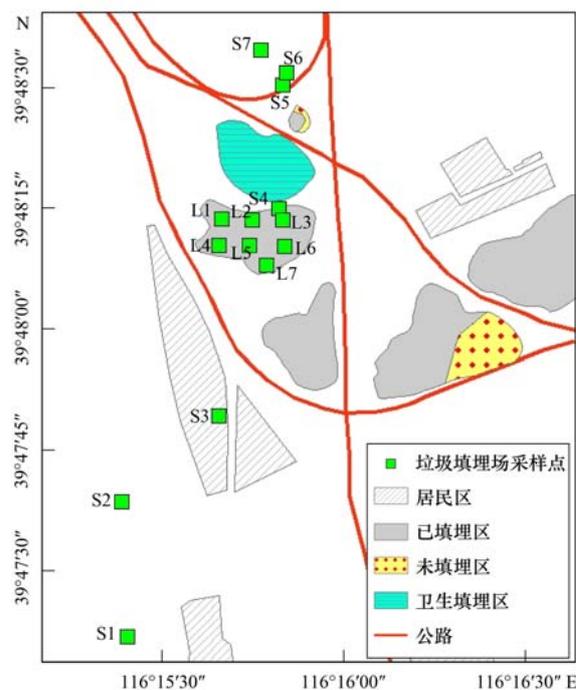


图 1 采样点示意

Fig. 1 Location map of sampling

1.2 渗滤液浸提液制备与地下水样品纯化

将所采集的填埋垃圾样品,以 1(g):5(mL) 加入双蒸水,振荡 16 h 提取制备垃圾渗滤液. 随后将浸提液 4 $^{\circ}\text{C}$ 、10 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,上清液过 0.45 μm 滤膜,将所得滤液稀释 50 倍,进行常规指标和荧光测定. 地下水样品也 4 $^{\circ}\text{C}$ 、10 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,上清液过 0.45 μm 滤膜,待分析用.

1.3 常规理化指标测定

重金属采用 ICP-OES (ICP-OES, Thermo ICAP6000 USA) 测定,无极阴离子采用离子色谱测

定(ICS-2000, Dionex USA), DOC 与 IC 测定仪器为总有机碳分析仪(multi N/C-2100 TOC, Analytik Jena GER), 其他常规指标如 pH、电导率采用 pH 计测定, ORP 采用氧化还原电位仪测定, 氨氮采用纳式试剂法。

1.4 荧光光谱测定及数据分析

荧光光谱测定仪器为 Hitachi F-7000. 将所分离纯化后的样品, 根据预实验结果, 除 S4 稀释 10 倍外, 其余均直接进行光谱测定. 测定时固定激发波长 370 nm, 扫描 380 ~ 550 nm 范围内的发射光谱, 计算发射光谱 450 与 500 nm 波长处荧光强度的比值 $f_{450/500}$. 固定激发波长范围 200 ~ 450 nm, 发射波长范围 280 ~ 520 nm, 狭缝宽度 $E_x = E_m = 5$ nm, 扫描增量 5 nm, 扫描速度 $2400 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$, 进行三维荧光光谱测定, 以双蒸馏为背景值去除拉曼散射和降低瑞利散射强度。

DOM 的三维荧光光谱区域体积积分分析法参照 Chen 等^[15]的报道进行, 将 DOM 的三维荧光光谱图分为 5 个区域(图 1): I、II、III、IV 及 V(图 2). 区 I 和区 II 激发波长/发射波长分别为 200 ~ 250/280 ~ 325 nm、200 ~ 250/325 ~ 375 nm, 区 III 激发/发射波长范围为 200 ~ 250/375 ~ 520 nm, 区 IV 和区 V 激发/发射波长范围依次为 > 250/280 ~ 375 nm 和 > 250/375 ~ 520 nm, 计算各区区域体积。

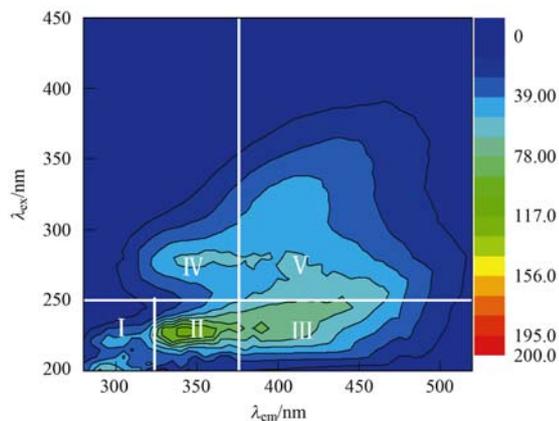


图 2 填埋场渗滤液和地下水溶解性有机物典型的三维荧光光谱图

Fig. 2 Typical fluorescence excitation-emission matrix spectra of dissolved organic matter isolated from landfill leachate and groundwater

各区区域体积按下面的公式进行计算^[15]:

$$V_i = \sum_{\text{ex}} \sum_{\text{em}} I(\lambda_{\text{ex}} \lambda_{\text{em}}) \Delta \lambda_{\text{ex}} \Delta \lambda_{\text{em}}, \quad i = \text{I} \sim \text{V} \quad (1)$$

式中, V_i 为区域 i 的体积积分, $I(\lambda_{\text{ex}} \lambda_{\text{em}})$ 为激发波长 λ_{ex} 、发射波长 λ_{em} 时的荧光强度, $\Delta \lambda_{\text{ex}}$ 、 $\Delta \lambda_{\text{em}}$ 分别

为激发波长与发射波长的增量, 本研究中均为 5 nm。

1.5 统计分析

为分析不同参数间的相关性, 解析垃圾浸提液和地下水中不同成分的来源, 将各重金属和其他常规参数在 SPSS 16.0 (SPSS International, Chicago, USA) 上进行相关性分析和主成份分析. 此外, 不同采样点的聚类分析也在 SPSS 16.0 上进行, 分析时采用 Ward Method, 度量距离采用 Euclidean distance.

2 结果与讨论

2.1 填埋垃圾浸提液和地下水无机盐、有机物的组成特征与成因分析

表 1 为填埋垃圾浸提液和地下水的基本理化特征参数. 从中可见, 填埋垃圾浸提液 pH 在 7.69 ~ 8.26, 偏碱性, 推测填埋场可能处于甲烷发酵后期或者成熟期^[16, 17], 垃圾填埋场地下水上游 pH 在 6.65 ~ 6.88, 偏酸性, 下游在 7.05 ~ 7.23, 接近中性, 即地下水流经填埋场后 pH 值升高了, 显示填埋场偏碱性的渗滤液进入了地下水, 影响了地下水的 pH. 然而, 填埋场所在点 S4 地下水 pH 却是最低的, 为 6.47, 其原因分析见后. 填埋场垃圾浸提液的氧化还原电位在 -106 ~ -74 mV 范围内, 而地下水中的在 -47 ~ -5 mV, 远高于前者的 ORP, 这可能与填埋垃圾中有机物含量高, 有机物降解造成的还原性气氛强有关. 此外, 表 1 还显示, 填埋场下游 (-47 ~ -37 mV) 地下水的 ORP 均低于上游 (-28 ~ -15 mV), 暗示地下水经渗滤液污染后, 在有机质增多发生降解的情况下, 厌氧情况进一步加剧, 还原性增加. 填埋场地下水 S4 的 DOC 为 $44.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其余点在 $2.74 \sim 5.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 填埋场所在点地下水 DOC 浓度是其他点的 8 ~ 16 倍, 显示填埋场发生了泄漏, 渗滤液有机物进入了地下水. 填埋场所在点地下水 DOC 是所有地下水样品中最高的了, 这些有机物在厌氧条件下产生大量小分子有机酸, 降低了填埋场泄漏点地下水的 pH, 造成 S4 地下水 pH 较低^[17].

表 1 还显示, 填埋垃圾在用 250 倍双蒸水浸提后其 EC 还较高, 显示填埋垃圾中含有大量的可溶性盐. 浸提液中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 浓度在 $0.24 \sim 10.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.36 \sim 4.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 填埋场污染点地下水 SO_4^{2-} 浓度为 $35.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而其他地下水点在 $148.12 \sim 205.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 填埋场地下水 SO_4^{2-} 浓度为其他点地下水的四分之一左右, 与

此相反的是,填埋场所在点 S4 地下水的 Cl^- 浓度为其他地下水点的 6 倍以上. 上述结果可能与填埋垃圾中含量大量生活垃圾,生活垃圾中含食盐(氯化钠)较高,而含硫酸盐较低有关.

表 1 填埋垃圾浸提液和地下水基本理化特征参数

位置	pH	ORP /mV	EC / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	DOC / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	SO_4^{2-} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Cl^- / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NH_4^+ -N / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO_3^- -N / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO_2^- -N / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
L1	7.77	-78	1 282	2.79	7.88	2.55	292.62	0.13	0.41
L2	7.7	-74	1 261	2.48	10.02	4.78	121.19	0.12	0.46
L3	8.26	-106	1 108	1.49	2.90	2.87	373.57	0.09	0.22
L4	8.14	-99	925	1.07	2.67	2.00	280.71	0.12	0.15
L5	8.22	-103	1 175	1.93	0.30	0.37	321.19	0.11	0.27
L6	7.71	-75	1 301	2.46	0.24	0.36	271.19	0.10	0.26
L7	7.69	-74	1 293	0.92	8.82	1.88	292.62	0.09	0.28
S1	7.05	-37	1 590	5.53	205.72	122.48	0.81	42.85	5.12
S2	7.15	-43	1 150	2.74	148.12	84.81	1.90	18.13	4.52
S3	7.23	-47	1 440	3.78	199.66	108.91	0.14	20.80	5.37
S4	6.47	-5	1 631	44.73	35.55	948.55	171.19	0.32	7.43
S5	6.88	-28	1 649	4.03	167.70	139.61	0.95	35.34	5.42
S6	6.82	-25	1 584	3.86	161.72	126.63	0.33	45.17	5.59
S7	6.65	-15	1 679	4.11	180.25	151.03	1.09	41.67	5.66

除了填埋场地下水 S4 外,其余地下水中 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 及 NH_4^+ -N 浓度依次为 18.13 ~ 42.85、4.52 ~ 5.37 及 0.14 ~ 1.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,呈现出 NO_3^- -N > NO_2^- -N > NH_4^+ -N 的分布趋势,填埋场所在点 S4 中地下水及垃圾浸提液却呈现出相反的趋势,即三氮的浓度分布为 NO_3^- -N < NO_2^- -N < NH_4^+ -N,并且氨氮的浓度 ($171.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 远高于亚硝氮 ($7.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和硝氮 ($0.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 三氮的含量高低由 ORP 和 pH 决定^[18], ORP 高而 pH 低, NH_4^+ -N 易氧化成 NO_3^- -N. 地下水中 ORP 高而 pH 低,因此 NO_3^- -N > NO_2^- -N > NH_4^+ -N,而填埋垃圾中,有机物降解产生大量的 NH_4^+ -N,高有机物浓度、缺氧、高 pH、低 ORP 下,硝化过程受阻, NH_4^+ -N 难以

转化为 NO_3^- -N,而 NO_3^- -N 易还原为 NO_2^- -N,因此导致填埋垃圾浸提液中 NH_4^+ -N 高而 NO_3^- -N 低.

表 2 为填埋垃圾浸提液中不同指标参数的相关性分析,分析结果显示,填埋垃圾浸提液中 pH 与 EC 呈负相关,显示在低 pH 条件下,无机盐化合物易以溶解态形式存在,增加了渗滤液的电导率. 此外,表 2 还表明,填埋垃圾浸提液中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 呈显著正相关 ($R = 0.765, P < 0.05$),显示填埋垃圾中 SO_4^{2-} 和 Cl^- 可能具有相似的来源. 除此之外,填埋垃圾浸提液大部分指标参数不相关,显示不同填埋点垃圾尽管 SO_4^{2-} 与 Cl^- 可能来源相似,其他污染组分来源差异较大,这可能与填埋垃圾异质性强,不同填埋点所填埋废物差异较大有关.

表 2 填埋场渗滤液中不同参数相关性分析¹⁾ ($n=7$)

	pH	ORP	EC	DOC	SO_4^{2-}	Cl^-	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	NO_2^- -N
pH	1	-1.000**	-0.764*	-0.397	-0.616	-0.214	0.619	-0.121	-0.630
ORP		1	0.767*	0.408	0.617	0.216	-0.628	0.135	0.641
EC			1	0.555	0.397	0.004	-0.285	-0.124	0.698
DOC				1	0.092	0.135	-0.397	0.536	0.723
SO_4^{2-}					1	0.765*	-0.555	0.243	0.707
Cl^-						1	-0.571	0.286	0.566
NH_4^+ -N							1	-0.461	-0.657
NO_3^- -N								1	0.457
NO_2^- -N									1

1) ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$

表 3 为填埋场地下水中不同指标的相关分析结果,结果显示,地下水中 pH 与 NO_2^- -N 呈负相关;

ORP 与 NO_2^- -N 正相关; DOC 与 Cl^- 、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 呈显著正相关,与 SO_4^{2-} 呈显著负相关; SO_4^{2-}

与 Cl^- 、 NH_4^+ -N、和 NO_2^- -N 呈显著负相关, 与 NO_3^- -N 呈显著正相关, Cl^- 与 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 呈显著正相关, NH_4^+ -N 与 NO_2^- -N 呈显著正相关, 而与 NO_3^- -N 呈显著负相关. 进一步将数据进行主成分分析 (图 3), 可以看到, 各指标在各象限聚合为三类, ORP、DOC、 Cl^- 、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 等正相关较为显著的指标, 在第一象限聚合为一类, 与之呈负相关的指

标 pH、 SO_4^{2-} 在第三象限聚为一类, SO_4^{2-} 与 NO_2^- -N 位于三、四象限的相对位置显示出二者间的负相关关系, 而 EC 离各指标距离均较远, 它与各指标的相关性均不强. 上述相关性分析和聚类分析结果显示, 与填埋垃圾浸提液不同, 地下水中大部分指标相关性较好, 预示其中各污染物具有相似的来源.

表 3 地下水中不同参数相关性分析¹⁾ ($n=7$)

Table 3 Correlation analysis of different parameters of groundwater ($n=7$)

	pH	ORP	EC	DOC	SO_4^{2-}	Cl^-	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	NO_2^- -N
pH	1	-1.000**	-0.669	-0.689	0.692	-0.723	-0.683	0.162	-0.827*
ORP		1	0.673	0.694	-0.691	0.728	0.687	-0.167	0.831*
EC			1	0.271	-0.076	0.299	0.232	0.342	0.576
DOC				1	-0.918**	0.998**	0.998**	-0.74	0.912**
SO_4^{2-}					1	-0.926**	-0.936**	0.759*	-0.799*
Cl^-						1	0.997**	-0.729	0.928**
NH_4^+ -N							1	-0.767*	0.903**
NO_3^- -N								1	-0.514
NO_2^- -N									1

1) ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$

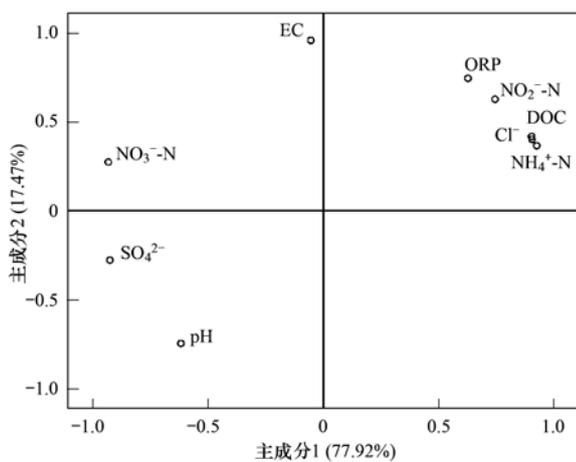


图 3 地下水不同参数的主成份分析

Fig. 3 Principal component analysis of different parameters of groundwater

2.2 填埋垃圾浸提液和地下水中重金属分布特征与影响因素

表 4 显示, 垃圾浸提液和地下水中 Ba 含量在所研究金属中浓度是最高的, 垃圾浸提液为 $90.6 \sim 282.4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 地下水中分布在 $446.5 \sim 4626 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 以填埋场所在点地下水中浓度最高 ($4626 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 为其他地下水采样点的 3 倍, 所研究填埋场为非正规填埋场, 填埋的废物包括生活垃圾和建筑垃圾, 填埋垃圾浸提液与地下水中 Ba 含量较高, 暗示着填埋废物中含有大量的含 Ba 化合物. 与 Ba 的分布特征类似的还有除 Zn 之外的其他

重金属, 均是填埋场所在点地下水中的含量超过其他点地下水中的含量, 超标倍数最大的是 Fe 和 Mn, 分别超标 47 和 203 倍. 土壤中某些重金属如 Mn 的含量很高, 在本身就 Fe、Mn 含量很高的渗滤液淋溶下, 易造成地下水铁锰污染^[19].

表 5 显示, 垃圾浸提液中 Ba 与 Cr 和 As 的浓度达到显著负相关, Cu 与 Ni 达到显著正相关, 但与其他重金属相关性不高, 显示填埋垃圾异质性较强, 不同重金属来源存在一定差异. 对浸提液中重金属与 DOC 的相关性分析显示, 除 Cu 与 DOC 浓度达到显著相关外, 其他重金属均未达到显著相关. Calace 等^[20] 研究显示, 填埋垃圾中含有大量疏水性的大分子量有机物, 这些物质如胡敏酸、胡敏素不易溶解, 但却是重金属的强配位体, 填埋垃圾中 Ba、Cd、Cu、Fe、Mn、Ni 络合在这些不溶性的有机物上, 导致浸提液中其含量与有机物浓度相关性较差. 龙於洋^[21] 的报道显示, Cu 主要与有机质结合在一起存在, 土壤中可交换态的自由 Cu 不到总 Cu 的 3%, 一些研究者进一步指出了与 Cu 结合的有机物的特性, 有研究发现^[22-24], DOM 对 Cu 的络合能力随着 DOM 分子量的降低而增加, 即小分子有机物对 Cu 的络合能力大于大分子有机物, 因此, 填埋垃圾中 Cu 主要结合在可溶性的小分子有机物上, 致使其与可溶性有机物含量显著相关. 表 5 还显示, 填埋垃圾浸提液中 Cr 和 As 的浓度达到显著相关 ($P <$

0.01), 显示浸提液中 Cr 和 As 可能具有相似的来源 或者分布影响因素.

表 4 填埋垃圾渗滤液和地下水重金属含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 Contents of heavy metals in landfill leachates and groundwater/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

位置	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	As
L1	281.1	0.5	3.3	8.3	26.7	10.6	14.2	10.2	8.4
L2	264.6	0.6	3.3	16.2	42.6	113.9	14.8	29.6	7.1
L3	106.9	0.4	6.1	5.8	307.1	21.5	14.4	35.6	13.8
L4	122.8	0.4	3.5	1.8	69.4	138.3	10.8	22.2	10.5
L5	90.6	0.6	4.9	5.8	158.7	7.3	12.2	26	13.2
L6	282.4	0.6	1.7	7.7	95.6	87.9	11.7	26.2	4.7
L7	241.7	0.5	2.1	0.1	20.4	89.9	10.8	34.4	5.5
S1	919.8	0.9	1.5	0	20	0	2.2	3	2.5
S2	717.5	0.8	0.7	0	8.8	0.2	1.4	1.1	0.8
S3	864.1	0.9	0.9	0	6	0.1	2	1.6	1.8
S4	4 626	1.4	1.4	0.8	1 104	1 670	21.1	2	2.6
S5	446.5	0.9	0.1	0	23.1	8.2	3.8	4.5	1.1
S6	1 172	0.9	0.6	0.1	22.2	3.2	2.6	5.3	1.5
S7	1 083	0.9	0.5	0	13	0.1	2.4	1.6	1.5

表 5 填埋垃圾渗滤液中重金属相关性分析¹⁾($n=7$)

Table 5 Correlation analysis between heavy metal contents in landfill leachates ($n=7$)

	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	As	DOC
Ba	1	0.443	-0.788 *	0.406	-0.686	0.229	0.153	-0.285	-0.898 **	0.553
Cd	0	1	-0.395	0.554	-0.332	-0.062	0.086	-0.050	-0.429	0.612
Cr			1	0.035	0.820 *	-0.552	0.470	0.193	0.956 **	-0.140
Cu				1	-0.071	-0.018	0.778 *	-0.135	-0.139	0.797 *
Fe					1	-0.478	0.289	0.455	0.748	-0.178
Mn						1	-0.421	0.200	-0.510	-0.323
Ni							1	-0.098	0.248	0.616
Zn								1	0.069	-0.551
As									1	-0.232
DOC										1

1) ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$

表 6 显示,地下水中除 Cr、Zn 及 As 外,其他重金属之间均显著正相关,并且它们的含量都与 DOC 均达到显著正相关,说明地下水中 Ba、Cd、Cu、Fe、Mn、Ni 来源相同,并且其分布与 DOC 有关. Jensen 等^[6]对受渗滤液污染地下水的研究显示,地下水中

Cd、Ni、Cu、Pb 主要络合在 DOC 上,而 Zn 主要以无机化合物的形式存在,本研究也显示 Zn 与 DOC 未达到显著相关. 与填埋垃圾浸提液类似,地下水中 Cr 与 As 含量也达到显著相关,显示二者可能具有相似的来源.

表 6 地下水中重金属相关性分析¹⁾($n=7$)

Table 6 Correlation analysis between heavy metal contents in groundwater ($n=7$)

	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	As	DOC
Ba	1	0.977 **	0.563	0.990 **	0.986 **	0.986 **	0.975 **	-0.193	0.648	0.987 **
Cd		1	0.512	0.979 **	0.984 **	0.982 **	0.989 **	-0.105	0.681	0.988 **
Cr			1	0.501	0.516	0.516	0.464	-0.335	0.857 *	0.543
Cu				1	0.993 **	0.992 **	0.988 **	-0.113	0.593	0.990 **
Fe					1	1.000 **	0.996 **	-0.185	0.602	0.999 **
Mn						1	0.995 **	-0.196	0.599	0.999 **
Ni							1	-0.125	0.591	0.995 **
Zn								1	-0.067	-0.184
As									1	0.637
DOC										1

1) ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$

地下水中重金属与有机物浓度密切相关. 为了进一步分析地下水中有有机物与重金属的关系, 进行了地下水中重金属浓度与不同 DOM 区域体积积分的相关性分析. 分析结果显示(表 7), 除了与有机物不相关的 Cr、Zn 及 As 外, 其他所有重金属都与 DOM 三维荧光光谱不同区域体积积分达到极显著正相关($P < 0.01$), 显示地下水中的重金属 Ba、Cd、Cu、Fe、Mn 及 Ni 的分布与荧光有机物有关, 并且

表 7 地下水 DOM 荧光区域体积积分与重金属浓度相关性分析¹⁾

Table 7 Correlation analysis between the volumes of different areas in EEM spectra of DOM and the heavy metal contents

	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	As
V _I	0.986 **	0.982 **	0.522	0.992 **	1.000 **	1.000 **	0.994 **	-0.201	0.603
V _{II}	0.986 **	0.982 **	0.521	0.992 **	1.000 **	1.000 **	0.994 **	-0.201	0.601
V _{III}	0.987 **	0.981 **	0.526	0.992 **	1.000 **	1.000 **	0.994 **	-0.203	0.604
V _{IV}	0.986 **	0.982 **	0.516	0.992 **	1.000 **	1.000 **	0.995 **	-0.198	0.598
V _V	0.986 **	0.983 **	0.516	0.992 **	1.000 **	1.000 **	0.995 **	-0.197	0.600

1) ** 表示 $P < 0.01$

2.3 填埋场地下水中有有机物源解析

荧光指数 $f_{450/500}$ 为激发波长 370 nm 下发射波长 450 与 500 nm 波长下荧光强度的比值, 它可以用来区分有机质的来源: 陆源和生物源两个端源有机质的 $f_{450/500}$ 分别为 1.4 和 1.9^[25], 本研究中地下水

$f_{450/500}$ 在 1.90 ~ 2.31 之间(表 8), 显示地下水中 DOM 主要为生物源, 即地下水微生物活动或外源微生物活动的产物. 一般而言, 陆源有机物结构复杂, 稳定性强, 而生物源有机物, 结构简单, 微生物活性强.

表 8 地下水 DOM 的 $f_{450/500}$ 分析

Table 8 The $f_{450/500}$ analysis of DOM in groundwater

位置	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
$f_{450/500}$	2.02	1.90	2.03	2.31	2.05	2.02	2.04

2.4 地下水受污染点的识别

为研究不同填埋垃圾浸提液和地下水样品的相似性, 将所有地下水及填埋垃圾浸提液进行了聚类分析. 图 4 显示, 当相对距离选择小于 5 时, 所有样品分为三类, 第一类为所有填埋垃圾样, 第二类为除

了填埋场所在点地下水 S4 外的其他地下水样品, 最后一类只有一个样品, 为填埋场所在点地下水 S4.

在第一类中, 填埋垃圾浸提液 L1、L2、L6、L7 聚为一小类, 而剩余填埋垃圾浸提液样品聚为另一类; 而在第二类中, 上游点 S5 和下游点 S2 聚为一类, 而其他点(S1、S3、S6、S7)聚为一类. 上述结果显示, 采用聚类分析, 可以区分出污染泄漏点 S4, 但对于污染泄漏到一定距离的上下游, 区分度不是很好, 这可能与地下水具有较大的缓冲能力, 污染组分在其中很快发生降解和吸附等有关^[4].

3 结论

(1) 填埋垃圾异质性强, 污染物来源差异较大; 填埋场中地下水与场外地下水污染物组成差异大, 但地下水中不同污染物来源相似性较高.

(2) 填埋垃圾氧化还原电位低, 氨氮含量高而硝氮、亚硝氮含量低. 地下水中氧化还原电位低, 氨氮含量低而硝氮、亚硝氮含量高.

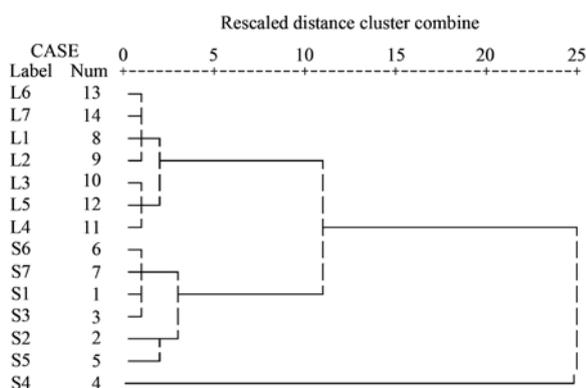


图 4 地下水与填埋垃圾浸提液的聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of different parameters of groundwater and landfill leachates

(3) 填埋垃圾浸提液中 Cu 的分布与 DOC 浓度有关,主要结合在水溶性有机物上,而 Ba、Cd、Fe、Mn 及 Ni 主要结合在难溶性有机物上;地下水中 Cu、Ba、Cd、Fe、Mn 及 Ni 的分布都与 DOC 有关,主要结合在可溶性荧光有机物上。

(4) 地下水有机物主要来源于微生物活动产生。

(5) 采用聚类分析方法,可以识别出地下水受污染点。

参考文献:

- [1] Christensen T H, Kjeldsen P, Bjerg P L, *et al.* Biogeochemistry of landfill leachate plumes[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16** (7-8): 659-718.
- [2] Regadío M, Ruiz A I, De Soto I S, *et al.* Pollution profiles and physicochemical parameters in old uncontrolled landfills [J]. *Waste Management*, 2012, **32**(3): 482-497.
- [3] Baker A. Fluorescence excitation-emission matrix characterization of river waters impacted by a tissue mill effluent [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36** (7): 1377-1382.
- [4] Christensen J B, Jensen D L, Geon C, *et al.* Characterization of the dissolved organic carbon in landfill leachate-polluted groundwater[J]. *Water Research*, 1998, **32**(1): 125-135.
- [5] Gounarls V, Anderson P R, Holsen T M. Characteristics and environmental significance of colloids in landfill leachate [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27** (7): 1381-1387.
- [6] Jensen D L, Ledin A, Christensen T H. Speciation of heavy metals in landfill-leachate polluted groundwater [J]. *Water Research*, 1999, **33**(11): 2642-2650.
- [7] Biswas A K, Kumar S, Babua S S, *et al.* Studies on environmental quality in and around municipal solid waste dumpsite[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, **55** (2): 129-134.
- [8] Bakis R, Tuncan A. An investigation of heavy metal and migration through groundwater from the landfill area of Eskisehir in Turkey[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **176**(1-4): 87-98.
- [9] Navarro A, Carbonell M. Assessment of groundwater contamination caused by uncontrolled dumping in old gravel quarries in the Besòs aquifers (Barcelona, Spain) [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2008, **30**(3): 273-289.
- [10] Grisey E, Belle E, Dat J, *et al.* Survival of pathogenic and indicator organisms in groundwater and landfill leachate through coupling bacterial enumeration with tracer tests [J]. *Desalination*, 2010, **261**(1-2): 162-168.
- [11] Lapworth D J, Gooddy D C, Butcher A S, *et al.* Tracing groundwater flow and sources of organic carbon in sandstone aquifers using fluorescence properties of dissolved organic matter (DOM) [J]. *Applied Geochemistry*, 2008, **23** (12): 3384-3390.
- [12] 董军, 赵勇胜, 王翊虹, 等. 北天堂垃圾污染场地氧化还原分带及污染物自然衰减研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 3265-3269.
- [13] 洪梅, 张博, 李卉, 等. 生活垃圾填埋场对地下水污染的风险评价 - 以北京北天堂垃圾填埋场为例[J]. *环境污染与防治*, 2011, **33**(3): 88-95.
- [14] 王翊虹, 赵勇胜. 北京北天堂地区城市垃圾填埋对地下水的污染[J]. *水文地质工程地质*, 2002, **29**(6): 45-47.
- [15] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(24): 5701-5710.
- [16] Persson L, Alsberg T, Ledin A, *et al.* Transformations of dissolved organic matter in a landfill leachate—A size exclusion chromatography/mass spectrometric approach [J]. *Chemosphere* 2006, **64**(7): 1093-1099
- [17] Lou Z Y, Zhao Y C, Yuan T, *et al.* Natural attenuation and characterization of contaminants composition in landfill leachate under different disposing ages [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(10): 3385-3391.
- [18] 陈莉微. 垃圾渗滤液中氮素和重金属在弱透水层迁移机理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [19] 廖利, 全宏东, 吴学龙, 等. 深圳盐田垃圾场对周围土壤污染状况分析[J]. *城市环境与城市生态*, 1999, **12**(3): 51-53.
- [20] Calace N, Liberatori A, Petronio B M, *et al.* Characteristics of different molecular weight fractions of organic matter in landfill leachate and their role in soil sorption of heavy metals [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **113**(3): 331-339.
- [21] 龙於洋. 生物反应器填埋场中重金属 Cu 和 Zn 的迁移转化机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [22] Zhou L X, Yang H, Shen Q R, *et al.* Fractionation and characterization of dissolved organic matter derived from sewage sludge and composted sludge [J]. *Environmental Technology*, 2000, **21**(7): 765-771.
- [23] Knoth de Zarruk K, Scholer G, Dudal Y. Fluorescence fingerprints and Cu²⁺-complexing ability of individual molecular size fractions in soil-and waste-borne DOM [J]. *Chemosphere*, 2007, **69**(4): 540-548.
- [24] 李丹, 何小松, 席北斗, 等. 生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34** (7): 2918-2924.
- [25] Wolfe A P, Kaushal S S, Fulton J R, *et al.* Spectrofluorescence of sediment humic substances and historical changes of lacustrine organic matter provenance in response to atmospheric nutrient enrichment [J]. *Environmental Science & Technology* 2002, **36** (15): 3217-3223.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride(TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunoassay for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行