

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM _{2.5} 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 PM _{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 PM _{2.5} 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
PM _{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邝海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中嗅味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O ₃ /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟荪琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因

何小松^{1,2,3}, 张慧^{1,2,3}, 黄彩红^{1,2,3}, 李敏^{1,4*}, 高如泰^{1,2,3}, 李丹^{1,2,3}, 席北斗^{1,2,3}

(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. 国家环境保护地下水污染模拟与控制重点实验室, 北京 100012; 3. 中国环境科学研究院地下水与环境系统创新基地, 北京 100012; 4. 中国环境科学研究院环境标准研究所, 北京 100012)

摘要: 地下水中溶解性有机物(DOM)能够改变外来污染物的存在形态和迁移转化过程,其组成和分布特征研究具有重要的环境意义. 采用紫外-可见吸收光谱和荧光光谱,联合平行因子分析和主成分分析,对 3 个不同埋深(1.2、1.5 及 1.8 m)地下水中 DOM 的来源、组成、浓度、分布特征及影响因素进行了研究,结果表明,地下水中 DOM 来源于陆源有机质输入和微生物活动,含有类腐殖质、异质性有机物和类蛋白质这 3 种组分,类腐殖质与异质性有机物在中下层含量最高而表层最低,类蛋白质在中间层含量最低而表层含量最高. 中下层地下水中 DOM 的芳香性、腐殖化率、分子量和极性官能团含量最高,而表层地下水中 DOM 的芳香性、腐殖化率、分子量和极性官能团含量最低. 地下水中 DOM 的垂直分布主要受有机质腐殖化率、芳香性、分子量和极性影响,腐殖化率和芳香性强、分子量高和极性高的 DOM 难降解、易迁移进入下层地下水.

关键词: 地下水; 溶解性有机物; 垂直分布; 荧光光谱; 平行因子分析

中图分类号: X142; X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3813-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.10.019

Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause

HE Xiao-song^{1,2,3}, ZHANG Hui^{1,2,3}, HUANG Cai-hong^{1,2,3}, LI Min^{1,4*}, GAO Ru-tai^{1,2,3}, LI Dan^{1,2,3}, XI Beidou^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Simulation and Control of Groundwater Pollution, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Innovation Base of Groundwater and Environmental System Engineering, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. Institute of Environmental Standards, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Dissolved organic matter (DOM) can change the species, migration and transformation of foreign pollutants in groundwater, and the investigations of its composition and distribution characteristics play a role in environment protection. The groundwater DOMs were obtained at the depths of 1.2, 1.5 and 1.8 m, and its origin, composition, concentration, distribution characteristics and influencing factors were studied using UV-Vis and fluorescence spectra combined with parallel factor analysis and principle components analysis. The results showed that, DOM in the groundwater originated from both terrigenous input and microbial activities, and was comprised of humic-like matter, heterogeneous component, and protein-like matter. Humic-like matter and heterogeneous components showed a high concentration at 1.5 m and a low one at 1.2 m, whereas the protein-like matter exhibited a low concentration at 1.5 m and a high one at 1.2 m. The groundwater DOM at 1.5 m exhibited the highest aromaticity, humification, molecular weight and polar functional group content, while that at 1.2 m depth showed the lowest aromaticity, humification, molecular weight and polar functional group content. The vertical distribution of DOM in groundwater was related to aromaticity, humification, molecular weight and polar functional group, and the DOM with high aromaticity, humification, molecular weight and polar functional group resisted to biodegradation, and could easily enter into the bottom layer groundwater.

Key words: groundwater; dissolved organic matter (DOM); vertical distribution; fluorescence spectra; parallel factor analysis

生活垃圾的不规范填埋、加油站的泄漏、农药的使用等,使我国土壤受到了有机物污染. 一些有机污染物如石油和农药,其疏水性强、溶解度低,很难经土壤进入地下水. 然而,调查研究却显示这些有机污染物在地下水中时有检出^[1,2],其浓度甚至高于这些物质在纯水中的溶解度^[3~5]. 近年来研究显示,地下水中本身存在一定量的天然溶解性有机

物(dissolved organic matter, DOM),这些 DOM 具有疏水和亲水的官能团,能够增强疏水性有机物在水

收稿日期: 2016-04-06; 修订日期: 2016-05-24

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51408573); 环境基准与风险评估国家重点实验室开放课题项目(SKLECR201503)

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

* 通讯联系人, E-mail: limin@cras.org.cn

中的溶解度,促进其迁移和转化^[1,6,7].此外,地下水 DOM 还能吸附和络合重金属,影响其生物可利用性和迁移过程^[8,9].因此,研究地下水中 DOM 的时空分布特征及成因,对于阐明外源污染物在地下水的分布状态和迁移转化过程,具有非常重要的意义.

DOM 在地下水中的分布特征,可以通过其浓度、组成和来源进行描述^[10~12].DOM 的浓度可以通过溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)的质量浓度来量化,组成和结构可以通过核磁共振、紫外光谱和荧光光谱等现代波谱和光谱学技术来表征^[13~16],而来源可以通过稳定同位素进行示踪分析^[13].笔者在前期研究中,已经针对地下水中 DOM 的季节和水平空间分布特征进行了研究^[17],但迄今为止,国内外关于地下水中 DOM 的垂直分布特征及其影响因素仍鲜见报道.基于此,本研究拟采用紫外-可见光谱和三维荧光光谱,联合平行因子分析和多元统计分析,探讨地下水中 DOM 的垂直分布特征及其成因,以期阐明外源污染物在地下水中的分布特征和迁移转化规律提供依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

样品采集于湖北荆门屈家岭五三农场,该地地下水埋深较浅,1 m 以下即出水.选择农场内一平原区域,以 1.5 m × 2 m 的宽度设置采样点,一共 9 个,依次编号为 S1 ~ S9.前人模拟实验结果显示,地下水中 DOM 在表层的 1 m 范围内含量最高,1 m 后随埋深增加变化很小^[18],因此每个采样点设有紧挨的三口井,其埋深依次为 1.2、1.5 及 1.8 m.于 2013 年 4 月,采集地下水.6 号点三口不同深度的井在样品采集时已经被破坏,因此,实验总共采集了 24 个地下水样品.将样品放置于装有冰块的采样箱中,24 h 内运回实验室.

1.2 水质分析

氧化还原电位(ORP)在样品采集完后即进行现场测定,其余水质指标过 0.45 μm 滤膜后实验室测定.溶解性有机碳(DOC)含量采用总有机碳分析仪(multi N/C-2100 TOC, Analytik Jena GER)测定,Cl⁻和 SO₄²⁻采用离子色谱仪(ICS-2000, Dionex USA)测定,pH 采用 TOLEDO 320 Meter 测定,电导率(EC)采用 METTLER TOLEDO SG3 型电导率仪测定,重金属采用 ELEMENT 等离子体质谱分析.

1.3 紫外光谱测定

采用优尼科公司生产的 4802-UV/Vis 型紫外分

光光度计,扫描所有地下水样品 190 ~ 700 nm 范围内的紫外-可见吸收光谱,将 254 nm 处单位浓度 DOM 的吸光度(SUVA₂₅₄)按照下面的公式计算: $SUVA_{254} = UV_{254} \times 100 / DOC$,单位为 L · (mg · m)⁻¹^[19];将 DOM 在 253 nm 处的吸光度除以 203 nm 处的吸光度,得 E_{253}/E_{203} ;计算 DOM 275 ~ 295 nm 与 350 ~ 400 nm 范围内吸光度斜率 $S_{275 \sim 295}$ 和 $S_{350 \sim 400}$ 以及两者的比值 S_R ^[20].

1.4 荧光光谱测定及数据处理

荧光光谱测定仪器为日立公司生产的 Hitachi F-7000 型荧光光度计,固定激发波长 254 nm、扫描速度 240 nm · min⁻¹,激发和发射狭缝宽度 5 nm,扫描 300 ~ 500 nm 范围内的发射光谱,计算发射光谱中 435 ~ 480 nm 范围内积分面积 A_4 与 300 ~ 345 nm 范围内的积分面积 A_1 ,获得比值 A_4/A_1 .

固定激发波长 370 nm、扫描速度 240 nm · min⁻¹,激发和发射狭缝宽度 5 nm,扫描 380 ~ 550 nm 范围内的发射光谱,计算 450 nm 与 500 nm 处荧光强度之比,得 $f_{450/500}$ ^[17].

固定激发和发射光谱狭缝宽度为 5 nm、激发波长 200 ~ 400 nm、发射波长 280 ~ 500 nm 和扫描速度 2 400 nm · min⁻¹,扫描地下水样品和超纯水的三维荧光光谱,将所有地下水样品的三维荧光光谱扣除超纯水空白后,将数据导出,在 Matlab 7. b 上,采用 DOMFluor toolbox 软件包进行平行因子分析.通过核一致性分析和对半检验确定荧光组分数,计算得每个样品中 DOM 在对应组分的浓度得分值 F_{max} .

1.5 数据处理

相关性分析和主成分分析在 SPSS 17.0 上进行,绘图在 Origin 8.0 和 Excel 2003 上进行,地下水中 DOM 荧光组分的分布图在 Matlab 7. b 上绘制.

2 结果与讨论

2.1 地下水 DOM 浓度及其他常规指标垂直分布特征

表 1 为埋深 1.2、1.5 及 1.8 m 这 3 个深度地下水的基本理化特性.3 个不同埋深地下水中,1.2 m 埋深处 8 口井地下水 DOC 含量在 2.79 ~ 8.64 mg · L⁻¹,均值为 5.62 mg · L⁻¹,1.5 m 深处 DOC 浓度范围为 3.86 ~ 13.37 mg · L⁻¹,均值为 6.1 mg · L⁻¹,而 1.8 m 深处 DOC 浓度范围为 3.76 ~ 9.63,均值为 6.17 mg · L⁻¹.显示表层地下水 DOC 浓度较低,中下层较高.王巧莲等^[21]对岩溶流域地下水 DOC 浓度的研究显示,地下水 DOC 受降雨、气温、pH 等诸

多因素的影响. 地下水 ORP 均为负值,显示其处于厌氧环境,随着深度的增加其厌氧程度进一步增加. EC 在表层地下水最高; pH 在表层地下水分布在 7.53 ~ 7.85 之间,随着深度的增加其值不断增加,

至 1.8 m 的其值分布在 7.84 ~ 8.16; 与之类似的还包括 Cl^- 和 SO_4^{2-} , 其浓度也是随着地下水深度的增加而增加,这可能因为上述两种离子为阴离子,容易发生淋溶迁移而进入下层地下水.

表 1 不同埋深地下水基本理化特性

Table 1 Basic physicochemical characteristics of the groundwater with different depths							
深度/m	类型	DOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	ORP/mV	EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	pH	$\text{Cl}^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{SO}_4^{2-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
1.2	Min ~ Max	2.79 ~ 8.64	-27 ~ -7	948 ~ 1182	7.53 ~ 7.85	43.59 ~ 124.69	2.69 ~ 62.92
	Mean $\pm$ SD	5.62 $\pm$ 2.45	-16 $\pm$ 5.63	1057.75 $\pm$ 73.56	7.67 $\pm$ 0.09	63.41 $\pm$ 26.31	41.78 $\pm$ 17.69
1.5	Min ~ Max	3.86 ~ 13.37	-41 ~ -19	703 ~ 824	7.72 ~ 8.07	61.89 ~ 130.64	35.18 ~ 81.32
	Mean $\pm$ SD	6.1 $\pm$ 3.37	-32.13 $\pm$ 7.51	765.63 $\pm$ 50.77	7.93 $\pm$ 0.12	88.92 $\pm$ 20.69	54.61 $\pm$ 13.06
1.8	Min ~ Max	3.76 ~ 9.63	-48 ~ -27	638 ~ 1236	7.84 ~ 8.16	4.1 ~ 169.38	3.98 ~ 95.8
	Mean $\pm$ SD	6.17 $\pm$ 2.37	-36.38 $\pm$ 8.81	950 $\pm$ 178.16	7.99 $\pm$ 0.14	129.59 $\pm$ 53.41	68.60 $\pm$ 27.99

2.2 地下水 DOM 来源、结构及垂直分布特征

前人研究显示,陆源和微生物源 DOM 的 $f_{450/500}$ 两个边界值分别为 1.4 和 1.9^[17],当 $f_{450/500}$ 小于 1.4 时,DOM 主要由微生物或藻类活动产生,而当 $f_{450/500}$ 大于 1.9 时,DOM 主要来源于陆源有机物. 表 2 显示,地下水中 DOM 的 $f_{450/500}$ 在 1.65 ~ 1.98 间,显示该地地下水有机物既有陆源来源的,也有来源于微生物活动产生的. 有研究也显示^[18, 22, 23],土壤和植物废弃物是地下水有机物的主要来源,但它们只有 10% 能达到地下水. A_4/A_1 与有机物的腐殖化程度有关^[24],该值越大,有机物腐殖化程度越高,1.2、1.5 及 1.8 m 这 3 个不同埋深地下水 DOM 的 A_4/A_1 分别位于 0.56 ~ 2.05、1.48 ~ 2.96、0.76 ~ 2.47 范围内,中位数依次为 0.83、1.93 及 1.56,均值依次为 0.96、2 和 1.59,显示表层地下水 DOM 的腐殖化程度最低,中间层地下水 DOM 腐殖化程度最高,下层次之,这与前人报道的不同深度的土壤中 DOM 结构分析的结果一致^[25],有机质的腐殖化受氧气浓度即环境氧化还原电位的影响,氧含量过高或过低都不利于有机物的腐殖化^[26],表 1 中的 ORP 值显示,中间层地下水的氧含量居中,表层较高,而下层较低,导致中间层地下水的氧化还原环境最有利于 DOM 的腐殖化. 已有报道显示^[19],单位浓度 DOM 在 254 nm 下的吸光度值 SUVA_{254} 越大,有机物的芳香性越强,苯环化合物含量越多,填埋 1.2、1.5 及 1.8 m 地下水有机物的 SUVA_{254} 分别位于 0.47 ~ 2.06、0.65 ~ 3.78 及 0.6 ~ 2.73 范围内,中位数依次为 1.04、1.44 及 1.30,均值依次为 1.22、1.74 及 1.5 $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$,显示表层地下水中 DOM 的芳香化合物含量最低,而中间层地下水中 DOM 的芳

香化合物含量最高,这与 3 个埋深地下水中 DOM 的腐殖化特征分布趋势一致,表层地下水腐殖化率和芳香性低,有利于 DOM 的厌氧降解,故表层地下水 DOC 浓度低. 吸光度比值 E_{253}/E_{203} 与有机物苯环结构上官能团的组成有关,该值越大,显示苯环结构取代基上羧基、碳基、氨基等极性官能团含量越高,而该值越小,显示苯环取代基上脂肪族和酯类等非极性官能团含量越高^[20],3 个不同深度地下水有机物的 E_{253}/E_{203} 所处范围依次为 0.02 ~ 0.27、0.04 ~ 0.4 及 0.08 ~ 0.32,中位数为 0.18、0.16 及 0.17,均值依次为 0.16、0.19 及 0.19,显示表层地下水 DOM 苯环上脂肪族结构等非极性官能团含量较高,而中间层地下水 DOM 苯环上羧基、羰基等极性官能团含量较高,表层地下水 DOM 脂族含量高,疏水性强,有利于土壤吸附^[27];中下层地下水 DOM 极性官能团含量高,亲水性强,有利于 DOM 的迁移. S_R 是一个与有机物分子量有关的指标,该值越大,有机物分子量越小^[20],表 2 显示,地下水中表层地下水 DOM 的 S_R 位于 0.747 ~ 0.778 范围内,中位数为 0.77,均值为 0.763,而中下层地下水 DOM 的 S_R 分别位于 0.72 ~ 0.761 和 0.72 ~ 0.764 范围内,中位数为 0.75 和 0.76,均值依为 0.745 和 0.747,显示表层地下水 DOM 分子量较低,而中下层地下水 DOM 较大,较大的分子量,有利于 DOM 在地下水中下沉进入下层. 综上可知,该地区表层地下水中 DOM 的腐殖化率低,分子量和极性官能团含量小,不利于有机质往下迁移;而中下层地下水 DOM 的腐殖化率强,分子量和极性官能团含量高,有利于 DOM 的迁移和下沉,导致中下层地下水 DOM 的分子量高.

表 2 地下水有机物基本理化特征

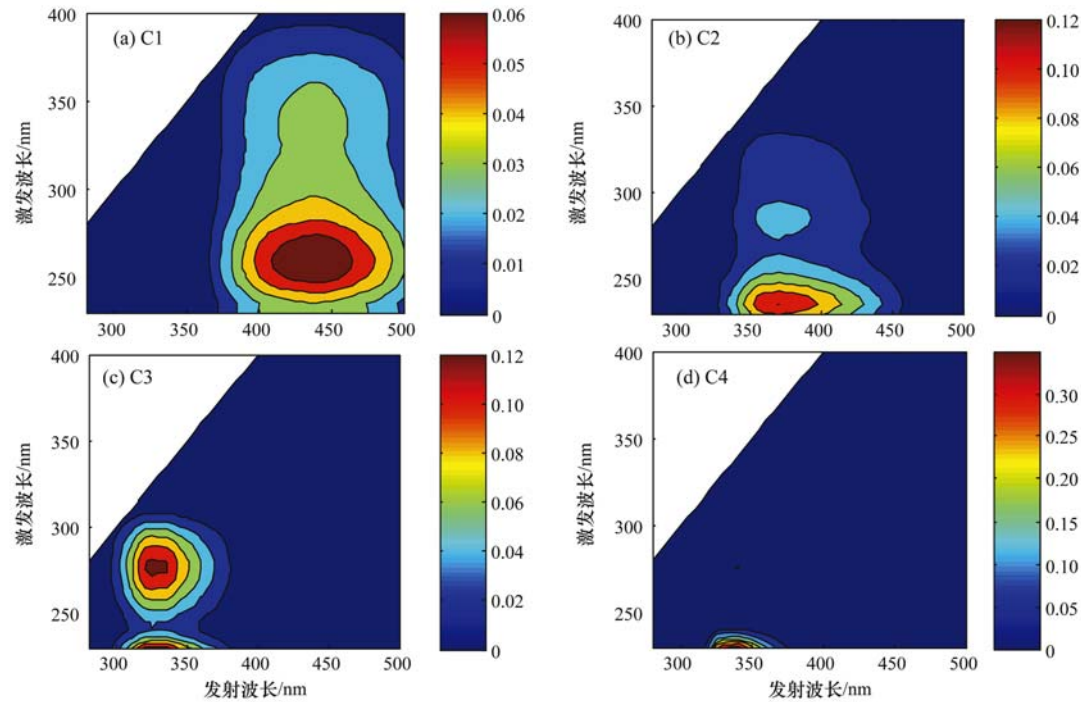
Table 2 Basic physicochemical characteristics of organic matter in groundwater						
深度/m	类型	$f_{450/500}$	A_4/A_1	$SUVA_{254}$	E_{253}/E_{203}	S_R
1.2	Min ~ Max	1.85 ~ 1.98	0.56 ~ 2.05	0.47 ~ 2.06	0.02 ~ 0.27	0.747 ~ 0.778
	Mean $\pm$ SD	1.94 $\pm$ 0.04	0.96 $\pm$ 0.47	1.22 $\pm$ 0.62	0.16 $\pm$ 0.11	0.763 $\pm$ 0.011
1.5	Min ~ Max	1.65 ~ 1.98	1.48 ~ 2.96	0.65 ~ 3.78	0.04 ~ 0.4	0.72 ~ 0.761
	Mean $\pm$ SD	1.87 $\pm$ 0.1	2 $\pm$ 0.46	1.74 $\pm$ 0.97	0.19 $\pm$ 0.11	0.745 $\pm$ 0.016
1.8	Min ~ Max	1.86 ~ 1.96	0.76 ~ 2.47	0.6 ~ 2.73	0.08 ~ 0.32	0.72 ~ 0.764
	Mean $\pm$ SD	1.92 $\pm$ 0.04	1.59 $\pm$ 0.52	1.5 $\pm$ 0.75	0.19 $\pm$ 0.08	0.747 $\pm$ 0.018

2.3 地下水 DOM 的组成特征

采用三维荧光光谱,结合平行因子分析,对地下水中 DOM 的组成进行分析,共鉴定出 4 个荧光组分(图 1),组分 1 激发和发射波长为 260, 340/440 nm,为陆源腐殖质物质,组分 2 激发/发射波长为 235, 285/375 nm,该峰在以前的报道较少,来源于药剂、杀虫剂如菲等异质性有机物^[5]. 对采样点 S4 和 S9 处 1.2 m 深地下水检测显示也确实检测到了大量有机氯和有机磷农药^[28]. 组分 3 的激发/发射波长为 < 230, 275/325 nm,根据前人的报道可知^[29, 30],该峰为微生物代谢有关的类蛋白质物质,组分 4 的激发/发射波长为 < 230, 275/340 nm,也为微生物代谢相关的类蛋白质物质,主要为类色氨酸物质. 研究区地处江汉平原,为一小麦-水稻轮作的农田,土地翻耕和微生物活动活跃,水稻收割季节和冬

季,田里出现大的裂缝,在农田灌溉和翻耕过程中,陆源有机质、农田残留农药和微生物代谢产物经包气带进入地下水,导致地下水中检测出了陆源腐殖质物质(组分 1)、异质性有机物(组分 2)和类蛋白质物质(组分 3 和 4). 前文的研究区有机物 $f_{450/500}$ 分析也表明,地下水 DOM 主要来源于陆源和微生物源有机质.

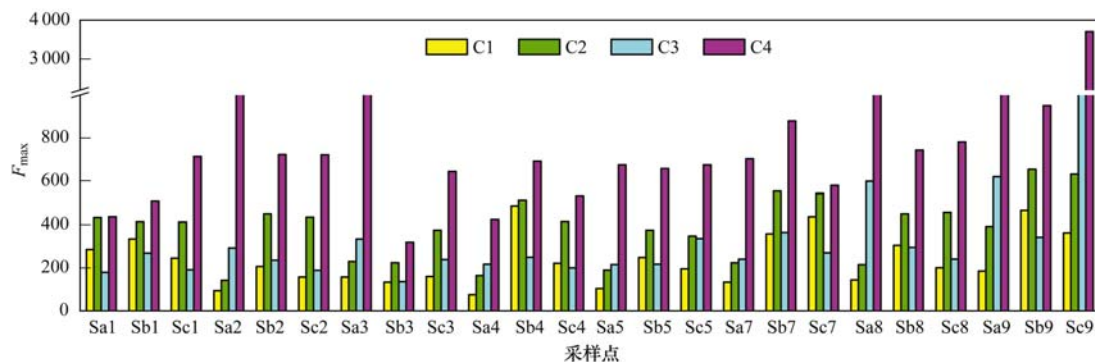
图 2 为不同荧光组分 F_{max} 的分布,从中可知,1.2 m 深处,除了采样点 S1 外,其他 7 个采样点地下水中 4 个组分的 F_{max} 分布均为 $C1 < C2 < C3 < C4$,显示表层地下水,类蛋白质物质相对含量最高,而异质性有机物次之,陆源类腐殖质物质含量最低. 在 1.5 m 和 1.8 m 处的大部分采样点,组分 4 的 F_{max} 仍然最高,组分 2 次之,显示农药已经进入 1.5 深地下水.



图例为荧光强度,无单位量纲

图 1 地下水 DOM 经平行因子分析法鉴定出的 4 个组分

Fig. 1 Four components of groundwater DOM identified by parallel factor analysis



横坐标中 a、b 及 c 分别代表 1.2、1.5 及 1.8 m 深井

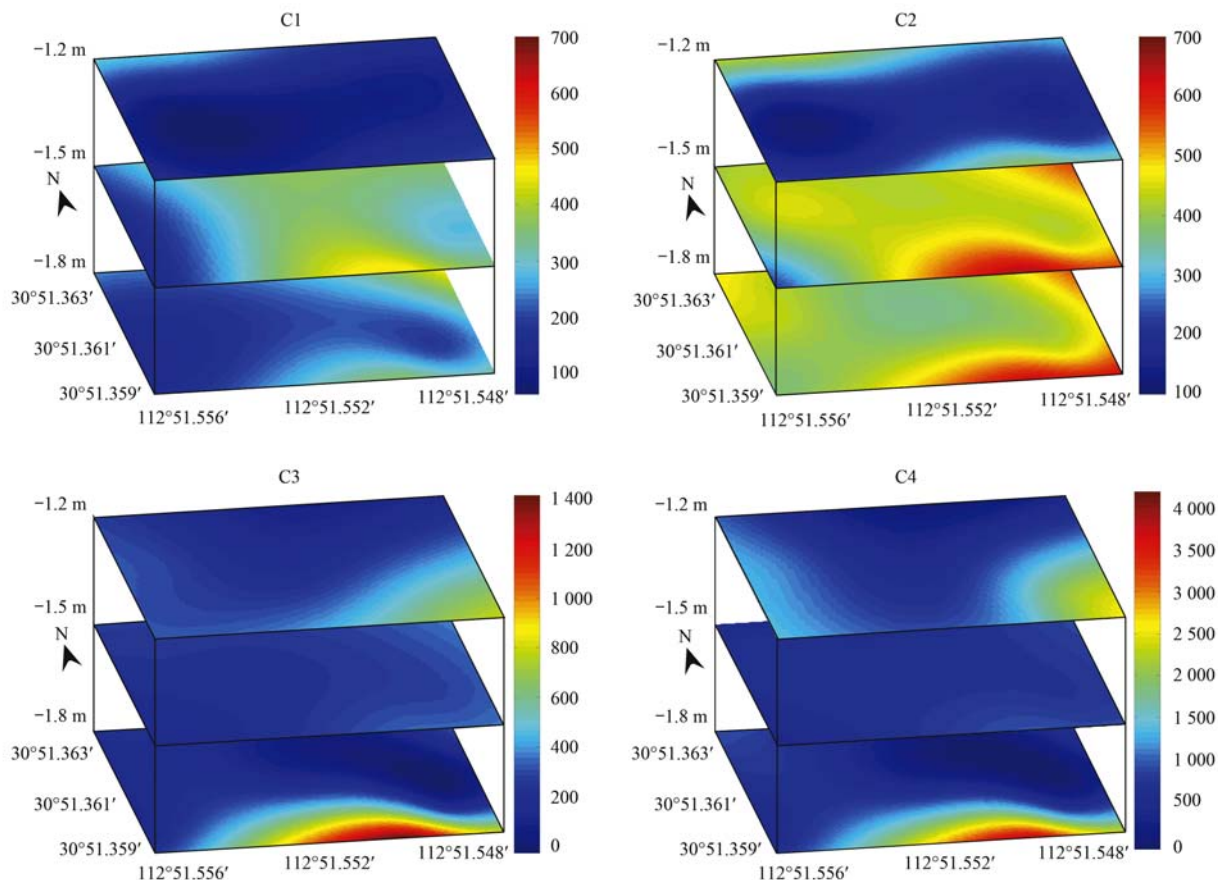
图 2 不同深度地下水荧光组分分布

Fig. 2 Fluorescence component distribution of groundwater to different depths

2.4 地下水 DOM 不同组分垂直分布特征

图 3 为不同埋深地下水四类荧光有机物分布, 从中可知, 异质性荧光组分的浓度高于腐殖质组分, 在 3 个不同埋深地下水中的分布均为 1.5 m 深地下水中最高, 1.8 m 深其次, 表层地下水浓度最低. 此外, 该图还显示, 类腐殖质组分 1 和异质性有机物组分 2 在不同埋深地下水中的分布模式均不相同, 显

示地下水中腐殖质和异质性有机物组分的分布不仅受到上层污染物淋溶的影响, 还可能受到地下水水平迁移的影响, 此外, 类腐殖质组分与异质性有机物组分的分布模式不同, 这可能与二者的疏水性不同有关. 类蛋白组分 3 和 4 在 3 个不同埋深中的分布类似, 显示二者具有相同的来源和运移模式. 与类腐殖质组分和异质性有机物组分分布不同, 类蛋白



图例为荧光强度, 无单位量纲

图 3 不同埋深地下水有机物分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of dissolved organic matter at different depths

组分3和4的分布为1.5 m埋深层最低,部分点1.2 m埋深地下水有机物浓度组分最高,部分点1.8 m埋深地下水类蛋白组分最高,显示地下水有机物分布异质性强,也进一步证实地下水有机物分布受地下水水平迁移的强烈影响,与上层污染浓度分布关联不大。

2.5 不同层有机物总体分布区域图

将不同埋深地下水中四类荧光有机组分的 $F_{\max}$ 值进行主成分分析,分析其中埋深对地下水最主要的影响。分析结果显示,8个采样点的4个荧光组分得分主成分分析结果有两个主成分,因子1解释了所有变量的58.6%,因子2解释了所有变量的37.3%。每个因子与4个荧光组分的关系如下:

$$\text{因子1} = 0.047C1 + 0.169C2 + 0.978C3 + 0.99C4 \quad (1)$$

$$\text{因子2} = 0.966C1 + 0.951C2 + 0.167C3 + 0.054C4 \quad (2)$$

从每个因子的表达式(1)和(2)可以看出,因子1中组分1和2的系数均小于0.2,而组分3和4的系数均大于0.9,显示因子1由类蛋白组分3和4控制,与之相反的是,因子2中组分1、2、3及4的系数分别为0.966、0.951、0.167及0.054,显示因子2受控于类腐殖质组分1和异质性有机物组分2^[31]。图4显示,4个荧光组分得分在因子1的差别主要是4个第一层的点在因子1上得分为正,相对1.5和1.8 m埋深地下水类蛋白组分含量较高,但是,3个不同埋深地下水在因子2上得分较为明显,即在因子2的得分上,大部分地下水水井的得分排序是1.5 m埋深的最高,1.2 m埋深的得分最低,显示3个不同埋深的地下水中,中间层地下水类腐殖质和异质性有机物含量最高,而表层地下水中类腐殖质和异质性有机物含量最低。图4还显示,1.2、1.5及1.8 m这3层地下水在因子1上得分值的分散度依次减少,显示表层地下水不同采样点类蛋白质含量差异较大,而底层地下水不同采样点的类蛋白含量差异较小。

2.6 地下水 DOM 垂直分布影响因素

为了分析地下水有机物垂直分布成因,进行了DOM表征参数的相关性分析。表3显示,DOM的 $SUVA_{254}$ 与 $f_{450/500}$ 呈极显著负相关,显示苯环官能团含量越高,有机物芳香性越大。 E_{253}/E_{203} 与 $f_{450/500}$ 极显著负相关,与 $SUVA_{254}$ 极显著正相关,显示苯环官能团氧化度越高,有机质苯环芳香度越高。有机物的 S_R 仅与 A_4/A_1 显著负相关,显示分子量越大,

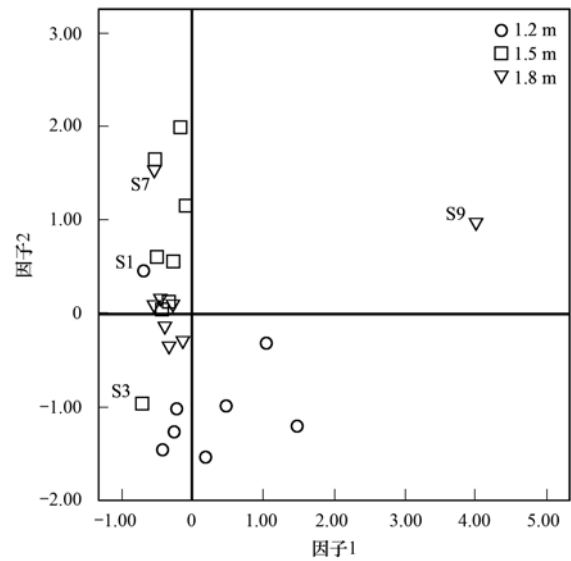


图4 不同样品在不同埋深地下水4个组分得分分布

Fig. 4 Florescent intensity score of different samples at different depths

有机质腐殖化率越高。此外,4个荧光组分中类腐殖质组分1和异质性有机组分2均与 A_4/A_1 极显著正相关,显示决定地下水有机物腐殖化率的是类腐殖质组分,而类蛋白组分3和4含量与腐殖化率呈负相关。在4个荧光组分中,类腐殖质组分1和异质性有机物组分2含量达到极显著正相关,显示地下水中农药等异质性有机物的分布,主要受腐殖质组分含量的影响,这可能与类腐殖质组分1既含有疏水性的苯环官能团,又含有羧基、羰基等极性官能团具有类似表面活性剂的作用有关。类蛋白组分3和4的含量也达到极显著正相关,显示二者具有相同的来源。但是,类蛋白组分3和4与类腐殖质组分和异质性有机物组分1和2不相关,显示其来源和分布特性不同。这与上面分析的四类荧光组分的分布模式得出的结果一致。一般而言,地下水中类腐殖质组分含量稳定,受外界影响较小,而类蛋白组分含量易受微生物活动影响^[20],导致地下水中类腐殖质组分和类蛋白组分相关性差。总体而言,相对于表层地下水,中下层地下水DOM腐殖化率高,取代基上羧基、羰基等极性官能团含量高,而脂族结构等疏水性官能团少,导致DOM结构稳定,亲水性强,易往下迁移进入地下水;此外,相对于表层地下水,中下层地下水DOM分子量大,更易下沉进入地下水下层。

2.7 地下水 DOM 对其他污染物分布的影响

对地下水中DOM和重金属进行相关性分析(表4),结果显示,地下水DOM与重金属浓度没

达到显著相关. 进一步分析显示,地下水中类腐殖质组分 1 和异质性有机物组分 2 的含量均与 Cu 和 Mo 的含量达到极显著正相关. 前人研究显示^[9],土壤环境中 Cu 大部分以有机结合态形式存在,以自由态形式存在的 Cu 不到总 Cu 的 3%. 因此,组分 C1、C2 与 Cu、Mo 的显著性相关表明,该

区域地下水中 Cu、Mo 结合在类腐殖质物质上,其迁移和转化过程受到类腐殖质物质的影响. 但是,还有多种重金属,并未与荧光组分 1 和 2 显著相关,显示地下水 DOM 成分复杂,一些非荧光有机物和无机配位体,可能在重金属的分布中起着重要作用.

表 3 不同有机质指标相关性分析 (n = 24)

Table 3 Correlation analysis of different parameters obtained from organic matter									
	$f_{450/500}$	A_4/A_1	SUVA ₂₅₄	E_{253}/E_{203}	S_R	C1	C2	C3	C4
$f_{450/500}$	1.000								
A_4/A_1	-0.152	1.000							
SUVA ₂₅₄	-0.670 **	0.124	1.000						
E_{253}/E_{203}	-0.441 *	0.174	0.523 **	1.000					
S_R	-0.246	-0.509 *	0.144	0.321	1.000				
C1	-0.284	0.787 **	0.360	0.278	-0.299	1.000			
C2	-0.273	0.663 **	0.372	0.253	-0.22	0.862 **	1.000		
C3	-0.150	-0.374	0.342	0.109	0.269	0.206	0.322	1.000	
C4	-0.037	-0.461 *	0.160	0.052	0.299	0.106	0.211	0.961 **	1.000

表 4 有机物与重金属分布相关性分析

Table 4 Correlation between organic matter and distribution of heavy metals									
	Mn	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Cd	Pb
DOC	-0.021	0.178	0.04	-0.234	0.045	-0.176	0.356	-0.053	0.146
C1	-0.308	0.356	-0.326	-0.279	0.585 **	-0.328	0.570 **	0.24	-0.292
C2	-0.374	0.328	-0.435 *	-0.309	0.574 **	-0.356	0.516 **	0.156	-0.441 *
C3	-0.048	-0.124	-0.01	0.178	0.204	0.113	-0.137	-0.147	-0.22
C4	-0.034	-0.213	0.05	0.1	0.049	0.056	-0.195	-0.262	-0.176

3 结论

农田地下水 DOM 主要来源于土壤陆源有机质输入和微生物活动,在 1.2 ~ 1.8 m 埋深范围内,表层地下水中 DOM 的浓度较低,其组成以类蛋白组分为主,中下层 DOM 的浓度较高,其组成中类腐殖质物质和异质性有机物含量相对较高. 在有机物的结构特征方面,表层地下水 DOM 的芳香性、腐殖化率及极性官能团含量低,分子量小,不利于迁移和下沉,而中下层地下水 DOM 的腐殖化率、芳香性及极性官能团含量高,分子量大,有利于迁移和下沉进入深层地下水.

参考文献:

[1] Dvorski S E M, Gonsior M, Hertkorn N, *et al.* Geochemistry of dissolved organic matter in a spatially highly resolved groundwater petroleum hydrocarbon plume cross-section [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(11): 5536-5546.

[2] 赵江涛,周金龙,高业新,等. 新疆焉耆盆地平原区地下水有机污染评价及污染成因[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 117-124.

[3] 石建省,王昭,张兆吉,等. 华北平原地下水有机污染特征初步分析[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(11): 1695-1699.

[4] 金爱芳,何江涛,陈素暖,等. 北京东南郊污灌区土壤有机氯农药的垂向分布特征[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(9): 1970-1977.

[5] Baker A, Curry M. Fluorescence of leachates from three contrasting landfills[J]. *Water Research*, 2004, **38**(10): 2605-2613.

[6] Hur J, Lee D H, Shin H S. Comparison of the structural, spectroscopic and phenanthrene binding characteristics of humic acids from soils and lake sediments[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(10): 1091-1099.

[7] Hur J, Lee B M. Characterization of binding site heterogeneity for copper within dissolved organic matter fractions using two-dimensional correlation fluorescence spectroscopy [J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(11): 1603-1611.

[8] Wu J, Zhang H, He P J, *et al.* Insight into the heavy metal binding potential of dissolved organic matter in MSW leachate using EEM quenching combined with PARAFAC analysis[J]. *Water Research*, 2011, **45**(4): 1711-1719.

[9] 何小松,余红,席北斗,等. 填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1399-1406.

[10] Lu J H, Chang A C, Wu L S. Distinguishing sources of groundwater nitrate by ¹H NMR of dissolved organic matter[J]. *Environmental Pollution*, 2004, **132**(2): 365-374.

[11] Goody D C, Hinsby K. Organic quality of groundwaters[A]. In: Edmunds W M, Shand P (Eds.). *Natural Groundwater*

- Quality[M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2008. 59-70.
- [12] 王毛兰, 赖建平, 胡珂图, 等. 鄱阳湖表层沉积物有机碳、氮同位素特征及其来源分析[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(4): 1019-1025.
- [13] Lapworth D J, Goody 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.
- [14] McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, *et al.* Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity [J]. Limnology and Oceanography, 2001, **46**(1): 38-48.
- [15] 高洁, 江韬, 李璐璐, 等. 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[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 151-162.
- [16] 宋晓娜, 于涛, 张远, 等. 利用三维荧光技术分析太湖水体溶解性有机质的分布特征及来源[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(11): 2321-2331.
- [17] 何小松, 席北斗, 张鹏, 等. 地下水中溶解性有机物的季节变化特征及成因[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(3): 862-870.
- [18] Chapelle F H, Shen Y, Strom E W, *et al.* The removal kinetics of dissolved organic matter and the optical clarity of groundwater [J]. Hydrogeology Journal, 2016, doi: 10.1007/s10040-016-1406-y.
- [19] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, *et al.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(20): 4702-4708.
- [20] He X S, Xi B D, Wei Z M, *et al.* Spectroscopic characterization of water extractable organic matter during composting of municipal solid waste[J]. Chemosphere, 2011, **82**(4): 541-548.
- [21] 王巧莲, 蒋勇军, 陈宇. 岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析: 以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1788-1797.
- [22] 梁作兵, 孙玉川, 李建鸿, 等. 典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1814-1822.
- [23] Shen Y, Chapelle F H, Strom E W, *et al.* Origins and bioavailability of dissolved organic matter in groundwater[J]. Biogeochemistry, 2015, **122**(1): 61-78.
- [24] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(4): 742-746.
- [25] Traversa A, D'Orazio V, Mezzapesa G N, *et al.* Chemical and spectroscopic characteristics of humic acids and dissolved organic matter along two Alfisol profiles[J]. Chemosphere, 2014, **111**: 184-194.
- [26] Yao H Y, Bowman D, Ruffy T, *et al.* Interactions between N fertilization, grass clipping addition and pH in turf ecosystems: implications for soil enzyme activities and organic matter decomposition [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(7): 1425-1432.
- [27] 吴东明, 李勤奋, 武春媛. 铁铝土对溶解性有机质的吸附特性[J]. 环境化学, 2016, **35**(4): 639-650.
- [28] 潘红卫. 典型农业活动区土壤-地下水农药污染特征与风险研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- [29] Ishii S K L, Boyer T H. Behavior of reoccurring PARAFAC components in fluorescent dissolved organic matter in natural and engineered systems: a critical review[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(4): 2006-2017.
- [30] Li W T, Chen S Y, Xu Z X, *et al.* Characterization of dissolved organic matter in municipal wastewater using fluorescence PARAFAC analysis and chromatography multi-excitation/emission scan: a comparative study[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(5): 2603-2609.
- [31] He X S, Xi B D, Gao R T, *et al.* Using fluorescence spectroscopy coupled with chemometric analysis to investigate the origin, composition, and dynamics of dissolved organic matter in leachate-polluted groundwater [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(11): 8499-8506.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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