

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾璐杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) - 臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氯化物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐璐, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨洽, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12)	《环境科学》征订启事 (194)
信息 (21, 51)	

紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化

张维^{1,2}, 唐翔宇^{2*}, 鲜青松^{2,3}

(1. 重庆工商大学旅游与国土资源学院, 重庆 400067; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 胶体是多种污染物迁移进入地下水的主要载体。为探究地下水中胶体颗粒的长期动态变化及影响因素, 对川中丘陵区紫色土小流域浅层井中胶体颗粒浓度及井水理化性质进行了 1 a 的原位观测。结果表明: 浅层井水中胶体颗粒含量存在较强的季节变异 ($CV > 0.5$), 胶体颗粒质量浓度峰值可达到 $14.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (相应的数量浓度为 $1.34 \times 10^9 \text{ L}^{-1}$), 出现在非雨季, 由人为取水扰动所致。雨季中前期大雨产流的物理扰动能有效增加井水中胶体颗粒浓度, 后期暴雨的促进作用不明显。井水化学性质 (EC 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 DOC) 是影响胶体颗粒浓度动态及存在形态最重要的因素。该地区作为饮用水源的浅层井在雨季中前期可能受到因增加的胶体颗粒输入而辅助迁移的农化物质 (如农药、P 等) 对井水质量安全的威胁, 建议加强该时段内降雨后井水中胶体及井水理化性质的监测。

关键词: 胶体; 地下水; 颗粒粒径分布; 紫色土; 季节变化

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0087-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201607070

Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil

ZHANG Wei^{1,2}, TANG Xiang-yu^{2*}, XIAN Qing-song^{2,3}

(1. School of Tourism and Land Resource, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 2. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Colloids are the major carriers of various contaminants during the downward transport into groundwater. To explore the long-term dynamics of colloid in the groundwater and its influencing factors, a one-year monitoring of colloid concentration and water physicochemical parameters was carried out in the shallow wells in a purple soil dominated watershed in the hilly region of central Sichuan. The results indicated that colloid concentrations within a year had a strong seasonal variation with the coefficient of variation being larger than 0.5. The maximum of colloid mass concentration could reach as high as $14.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (the corresponding number concentration being $1.34 \times 10^9 \text{ L}^{-1}$), which occurred in the non-rainy season and was caused by the physical perturbations from water taken. Physical perturbations of rainfall led to the distinct peaks of colloid concentrations in the well water at the early stages of rainy season while it did not occur at the end of the rainy season even upon heavy storm. Water chemistries (EC , Ca^{2+} , Mg^{2+} , DOC) showed the dominant role in determining colloid concentrations and status in the well. The facilitated transport of contaminants (i. e. pesticides and heavy metals) due to the increased colloids in the shallow well water at the early stages of rainy season would potentially pose a great threat to the drinking water safety in the study area. Therefore, it is strongly suggested to increase the monitoring frequencies in terms of colloid concentrations and well water physicochemical parameters following the large rainfall events during this period.

Key words: colloid; groundwater; particle size distribution; purple soil; seasonal dynamics

胶体广泛存在于地下环境中。胶体颗粒巨大的比表面积以及丰富的表面化学基团, 对有机物 (如农药、激素)、土壤养分 (如磷、氮) 以及重金属等物质具有较强的吸附能力^[1~4]。同时, 由于胶体颗粒的尺寸排阻 (size exclusion) 及电荷排阻 (charge exclusion) 效应, 胶体颗粒向下迁移过程中不易被滤除或截留^[5]。因此, 胶体颗粒成为憎水性污染物如农药、P 等农化物质迁移进入地下水的重要载体^[6, 7], 对地下水质量安全构成极大的威胁。

胶体颗粒原位释放、迁移的研究是胶体迁移模

型及胶体颗粒辅助污染物运移研究的前提。目前, 胶体颗粒释放、迁移的研究主要在室内展开, 仅有的地块尺度的胶体颗粒迁移研究集中在自然/模拟降雨后地下水中胶体颗粒浓度、粒径分布、矿物组成以及水化学性质等的动态变化。McKay 等^[8]探索发现突发性集中降雨会促进已沉降的胶体态示踪剂

收稿日期: 2016-07-11; 修订日期: 2016-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21307152); 四川省“百人计划”项目 (142)

作者简介: 张维 (1987~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境科学、土地整治, E-mail: zw512119@163.com

* 通信作者, E-mail: xytang@imde.ac.cn

(荧光微球体、病毒颗粒)在下方井水中的富集. Kuno 等^[9]采集了膨润土采矿点地表以下近 100 m 和 300 m 的地下水样品,分析发现胶体颗粒浓度低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,主要是该采矿点地下水呈强酸性以及阳离子含量较高,导致胶体颗粒絮凝沉降所致. 而在喀斯特地区,短暂降雨造成地下水中胶体颗粒浓度的快速上升,但胶体颗粒浓度动态同时受到 pH、离子强度/组成以及有机碳等的影响^[10]. 在 Yucca Mountain 的深层裂隙岩地下出水中, Cizdziel 等^[11]研究发现,裂隙潜流中 CO_2 分压的减小会导致碳酸盐、方解石以及氟化物等矿物颗粒的沉降,进而促进无机胶体的形成. 在沿海地区含水层, Rani 等^[12]检测发现了不同采样点浅层井水中胶体颗粒浓度介于 $0.05 \sim 6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,且井水盐度越高,胶体颗粒浓度越低.

已有的地下水中胶体颗粒释放与迁移研究存在的主要问题在于仅注重单次降雨事件后短时间内或不同点位同一时段内胶体颗粒的动态变化,缺乏对地下水汇流中胶体颗粒长时间、连续变化的研究. 本研究以川中丘陵区截流小流域浅层井为对象,探索井水中胶体颗粒季节变化特征及其影响因素,有助于拓展胶体颗粒迁移研究的尺度. 该地区前期研究已表明,紫色土坡耕地裂隙潜流中胶体颗粒对自然降雨响应迅速,胶体颗粒浓度可增加 1~2 个数量级^[13]. 而浅层井水是坡耕地及其它地类的汇水区之一,同时也是川中丘陵区主要的饮用水源之一. 因此,本研究对于该地区地下饮用水质量保护有重要的意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于长江上游川中丘陵区截流小流域(图 1),面积 0.35 km^2 . 该地区属亚热带季风气候,多年(1981~2006 年)平均降水量 826 mm,春夏秋冬分别占 5.9%、65.5%、19.7% 及 8.9% 且季节性干旱频发. 紫色土是流域内典型的地带性土壤,颗粒分散性强,抗侵蚀能力差. 流域内主要土地利用方式包括坡耕地(>50%)、林地、水田及居民点. 零散分布的居民点以浅层井水为唯一饮用水源.

1.2 研究方法

1.2.1 监测井选取及样品采集

居民点零散分布于小流域的中下部,一般是一户独用或几户共用一口井. 本研究分别选取位于流域中部的赵林修井和下部的张飞上井作为监测井

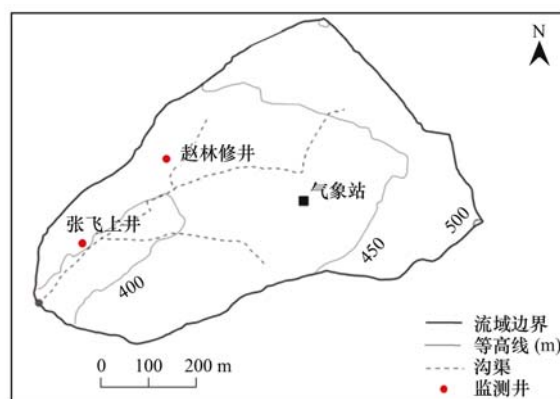


图 1 截流小流域监测井位置示意

Fig. 1 Location of monitoring wells in the Jiuliu Watershed

(图 1). 赵林修井位于旱地下方的林地内,通过内置的塑料管以虹吸方式取水作为生活用水水源. 张飞上井位于旱地旁,不再作为饮用水源,而是用作附近旱地灌溉用水,取水方式为吊桶取水.

从 2013 年 1 月至 2014 年 1 月,人工采集两口井井水样品,采样频率为 2 周一次(张飞上井缺少前 4 次水样). 采样前用卷尺手工测量并记录井水面至地表的高度作为水位值. 通过有机玻璃采水器,慢速放至液面下 20 cm 左右,缓慢取出,立即读取采样器内置温度计指示的井水温度值. 井水样品保存于玻璃瓶中. 水样的测定依托小流域内的中科院盐亭紫色土生态农业试验站($31^{\circ}16' \text{N}$, $105^{\circ}28' \text{E}$). 日降雨数据从试验站的气象站获取(图 1).

1.2.2 样品测定及分析

胶体颗粒质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)于采样当天完成测定,采用广泛使用的紫外-可见分光光度法^[12, 13],波长为 400 nm. 原样中胶体颗粒质量浓度(c_1)测定完成后,对水样进行 2 min 水浴超声振荡(100W, KQ-3000VDE)处理,再一次比色测定得到超声后的浓度(c_2). 基于胶体颗粒的质量浓度,利用以下公式估算胶体颗粒的数量浓度(L^{-1})^[12]:

$$N_p = 6c/\pi d^3 \rho \quad (1)$$

式中, N_p 即为单位体积水样中胶体颗粒数目(L^{-1}), c 为胶体颗粒质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), d 为胶体粒径,本研究采用 $2 \mu\text{m}$ (与胶体颗粒质量浓度测定时提取的胶体母液中胶体颗粒上限一致), ρ 为胶体密度($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$),黏土矿物一般采用 $2.60 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$ 进行估算.

井水中悬浮颗粒的粒径分布(PSD)采用激光粒度仪测定(LA950, Horiba),以 3 次重复测定的均值作为井水的粒径分布结果. pH 和电导率(EC)的测

定采用复合型酸度计(SensIon + MM150). 此外,井水原样经 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,进行 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 浓度(离子色谱, ICS-900)以及溶解性有机碳(DOC)的测定(流动分析仪, Auto Analyzer 3).

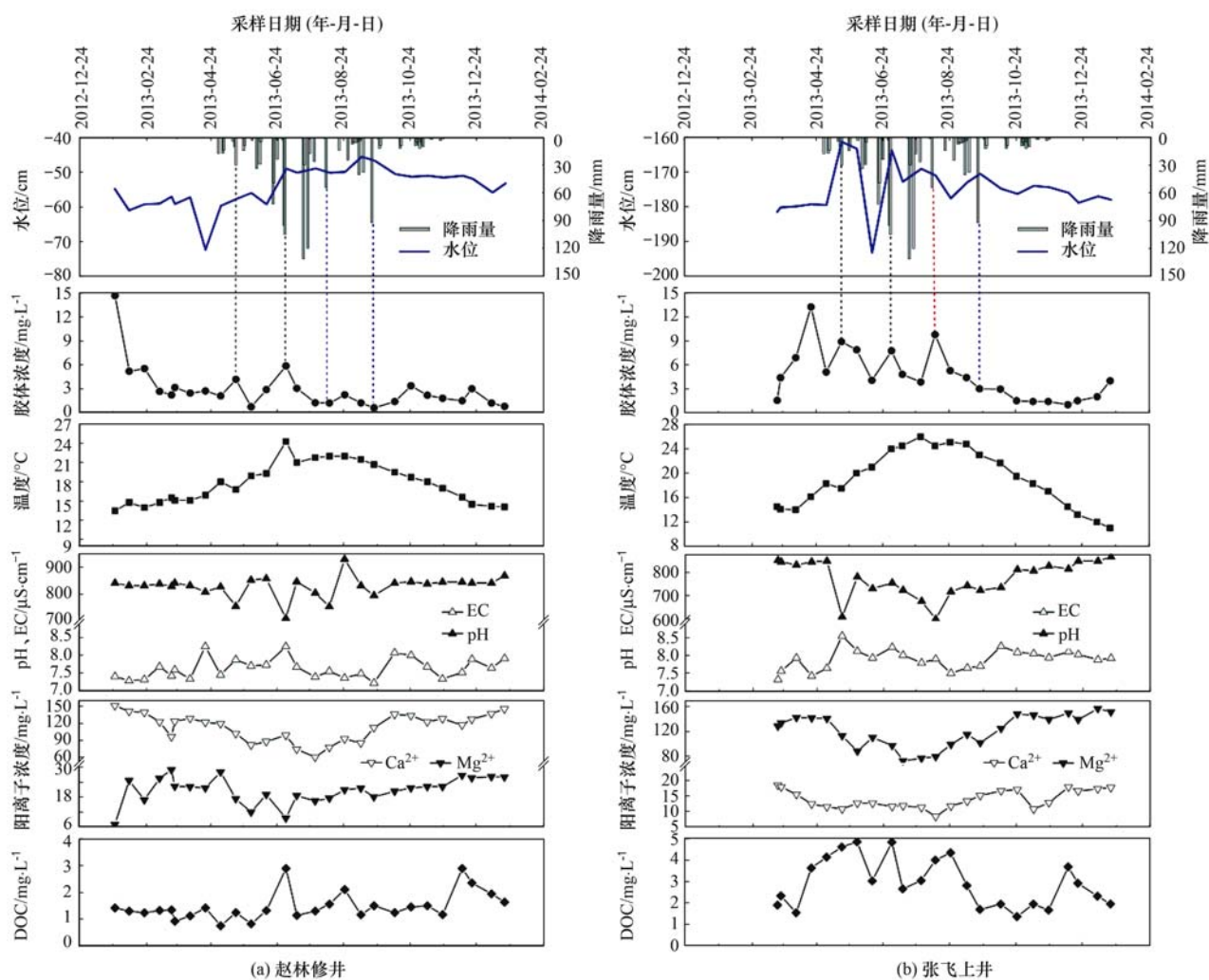
2 结果与分析

2.1 井水理化性质参数的动态变化

总的来说,随着雨季开始(5月),井水水位快速上升,雨季期间(5~9月)维持在较高水平,雨季后期及进入旱季期间,水位逐渐下降(图2). 但张飞上井的水位分别在6月14日、7月12日及8月25日出现了3次明显的下降[图2(b)]. 值得注意的是,该3次水位下降时间均发生在雨季的高温季节性干旱期间. 季节性干旱时段内附近旱地频繁灌溉而导致的大量人为取水,是该井水位降低的主要原因. 井水水温均从4月逐渐上升,7月达到最高值,

从9月逐渐降低,呈现单峰型的变化特征,与该地区气温变化过程相似.

井水中性偏碱,pH介于7.22~8.55,年内变动最小($\text{CV}=0.04$,表1). 这主要与流域内石灰性紫色土(平均pH为8.30^[14])较好的缓冲性有关. EC在雨季之前较平稳,雨季期间出现较大的波动(图2). EC的降低主要发生在集中降雨或大暴雨之后的时段内,这是EC较低的雨水($\text{EC}<50\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)对地下水稀释的缘故. 而在雨季结束后,EC逐渐上升. 类似地,井水中主要二价阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+})的浓度在雨季期间出现不同幅度的降低,在雨季后期逐渐增大(图2). 与该地区坡耕地地下径流 Ca^{2+} 浓度相比^[13],井水 Ca^{2+} 浓度普遍较高,表明坡耕地地下水在迁移穿过裂隙岩进入井水过程中可能引起岩层矿物(如碳酸盐矿物)的溶解,导致更多的阳离子释放、迁移进入井水. 雨季开始前,赵林修井中



虚线表示采样前48 h内出现过降雨($R>30\ \text{mm}$)

图2 2013年赵林修井及张飞上井中胶体颗粒和井水理化指标的动态变化

Fig. 2 Physicochemical dynamics of colloid and water in Zhao Linxiu Well and Zhang Feishang Well in 2013

井水 DOC 浓度逐渐降低(图 2). 随着雨季开始,两口井中 DOC 浓度逐渐上升至峰值并在雨季期间呈现较大波动. 雨季初期井水 DOC 浓度的增加主要是降雨对旱季长时间内累积的有机碳的冲刷,导致 DOC 溶出量增加所致. 值得注意的是,在旱季井水 DOC 浓度逐渐降低的过程中,两口井中 DOC 浓度均出现了较明显的峰值(图 2 中 2013 年 12 月 11 日),这可能与紫色土介孔在后期排水过程中 DOC 的溶出有关. 不同时段内 DOC 浓度较大的变化导

致 DOC 中等程度的季节变动(CV 介于 0.3~0.4,表 1),且是上述指标中变异最大的.

2.2 胶体颗粒浓度的季节变化

井水中胶体颗粒质量浓度介于 0.60~14.68 mg·L⁻¹,数量浓度介于 5.51×10⁷~1.34×10⁹ L⁻¹之间(表 2). 胶体颗粒数量比报道的沿海地区井水或花岗岩地下水中数量浓度低 1~3 个数量级^[12, 15],这主要与各自地区胶体颗粒的产生来源及影响因素不同有关.

表 1 井水理化性质指标统计特征¹⁾

Table 1 Descriptive statistics of the physiochemical parameters of the well water

位置	项目	水位/cm	水温/℃	pH	EC/μS·cm ⁻¹	Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	DOC/mg·L ⁻¹
赵林修井	最大值	-45.50	24.30	8.25	930	151.13	30.03	2.90
	最小值	-72.30	13.50	7.22	710	60.59	6.92	0.75
	平均值	-54.39	17.65	7.63	829	112.32	20.23	1.49
	SD	6.20	3.11	0.29	40	24.23	5.40	0.53
	CV	-0.11	0.18	0.04	0.05	0.22	0.27	0.36
张飞上井	最大值	-161.27	26.00	8.55	867	156.88	18.46	4.86
	最小值	-193.25	11.00	7.32	599	73.02	8.38	1.37
	平均值	-175.02	18.89	7.89	776	121.73	13.96	2.93
	SD	6.86	4.70	0.29	77.81	26.29	2.94	1.13
	CV	-0.04	0.25	0.04	0.10	0.22	0.21	0.39

1)SD:标准偏差; CV:变异系数

表 2 井水中胶体颗粒浓度的描述性统计¹⁾

Table 2 Descriptive statistics of colloid concentrations of the well water

位置	$N_{\max}/L^{-1}$	$N_{\min}/L^{-1}$	$M_{\max}/mg\cdot L^{-1}$	$M_{\min}/mg\cdot L^{-1}$	平均值/ $mg\cdot L^{-1}$	SD	CV
赵林修井	1.34×10^9	5.51×10^7	14.68	0.60	2.94	2.74	0.93
张飞上井	1.22×10^9	9.19×10^7	13.27	1.00	4.64	3.18	0.69

1) $N_{\max}$ 和 $N_{\min}$:胶体颗粒数量浓度的最大值和最小值; $M_{\max}$ 和 $M_{\min}$:胶体颗粒质量浓度的最大值和最小值;SD:标准偏差; CV:变异系数

对于赵林修井,井水中胶体颗粒浓度年内最高值达到 14.68 mg·L⁻¹,于 2013 年 1 月 26 日观测到,自此至旱季结束,胶体颗粒浓度快速降低至 2.09 mg·L⁻¹ [图 2(a)]. 雨季初期第一场较大降雨(5 月 17 日,降雨量 30.2 mm)结束后,井水中胶体颗粒浓度上升至 4.20 mg·L⁻¹. 同样,在 6 月 29 日~7 月 1 日累计降雨量高达 203.2 mm 的情况下,7 月 2 日井水中胶体颗粒浓度达到 5.88 mg·L⁻¹. 这是雨季期间降雨结束后 48 h 内井水中胶体颗粒浓度观测到的两次较明显的峰值(图 2 中黑色虚线所示). 井水中胶体颗粒浓度上升主要归因于降雨产流入渗对地下环境中旱季分散的胶体颗粒的水力剪切与裹挟,活化的胶体颗粒迁移进入井水. 但总的来说,雨季期间,井水中胶体颗粒浓度总体不高(均值为 2.30 mg·L⁻¹),尤其是雨季中后期阶段. 如图 2(a)中蓝色虚线所示,该两次大雨事件之后短时段内,井水中胶体颗粒浓度并未明显增加,这可能与该时段

内地下环境中易迁移的水分散性胶体颗粒含量较少有关. 该地区坡耕地裂隙潜流中胶体颗粒迁移的研究也表明,雨季开始阶段裂隙潜流中胶体颗粒浓度普遍高于雨季中后段同等降雨条件下裂隙潜流中胶体颗粒的浓度^[13]. 此外,其他学者在室内研究发现,土柱中胶体颗粒的迁移主要集中在产流的初始阶段且土壤中分散的胶体颗粒在短时间内快速耗尽,在连续降雨中后阶段,胶体的迁移量非常有限^[16, 17].

对于张飞上井,在雨季前的干旱阶段,井水中胶体颗粒浓度快速上升至峰值(13.27 mg·L⁻¹),这与同时段内赵林修井中胶体颗粒浓度变化刚好相反(图 2). 该时段内胶体颗粒浓度的增大可能与人为吊桶取水灌溉引起的扰动有关. 旱季井水水位较低时取水的物理扰动引起井底表层已沉降的胶体颗粒再悬浮,使得井水中胶体颗粒浓度增大. Rani 等^[12]证实,相比于慢速泵吸取水,吊桶取水扰动后,井水

的浊度可能增加 2 个数量级. 孙小静等的室内模拟试验也发现, 水力扰动显著促进沉积物中胶体颗粒的初始释放^[18].

与赵林修井类似, 在雨季中前期大雨或暴雨作用下, 井水中胶体颗粒浓度均有所上升[图 2(b) 黑色虚线所示]. 不同的是, 张飞上井雨季期间胶体颗粒浓度最大值为 $9.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 于 8 月 10 日观测到[图 2(b) 红色虚线所示]. 胶体颗粒浓度峰值的出现一方面可能是 8 月 8 日降雨导致的胶体颗粒迁移进入井水所致. 另一方面, 本次采样之前持续的高温天气季节性干旱情况下频繁地人为吊桶取水灌溉扰动可能是胶体颗粒浓度增加的主要原因. 9 月 19 日大暴雨之后, 张飞上井中胶体颗粒浓度并未增加[图 2(b) 蓝色虚线所示], 仍然与雨季后期地下胶体库中易迁移的胶体颗粒含量较少有关. 在雨季中后期以及进入旱季阶段, 井水中胶体颗粒浓度逐渐降低.

人为取水以及自然降雨的物理扰动, 使得不同季节井水中胶体颗粒浓度产生较强的时间变异. 赵林修井和张飞上井中胶体颗粒浓度变异系数分别为 0.93、0.69(表 2), 均远高于井水理化性质指标的变异系数(表 1). 对于浅层井水中的胶体颗粒, 经过 2 min 超声振荡处理后, 胶体颗粒浓度(c_2)均高于原样中胶体颗粒浓度(c_1), 见图 3. 赵林修井和张飞上井中 c_2/c_1 平均值分别为 1.76 和 1.47, 表明井水中胶体颗粒以团聚体形式存在. 超声的物理振荡导致较大的团聚体颗粒分解为较小的胶体颗粒, 从而引起胶体颗粒浓度的增加.

2.3 井水中颗粒粒径分布特征

颗粒粒径分布是指示饮用水源是否遭受颗粒结

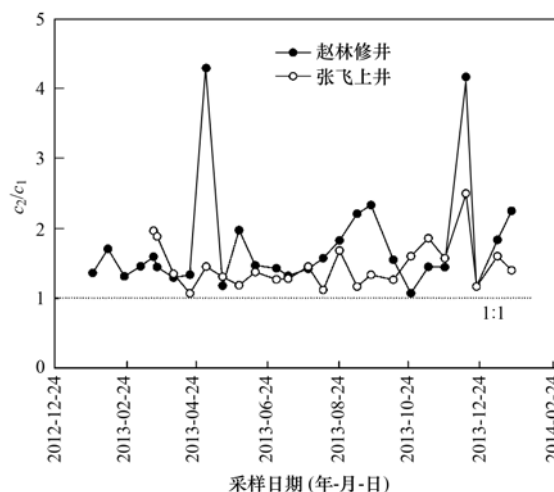


图 3 超声振荡前后井水中胶体颗粒浓度的相对变化

Fig. 3 Relative variations of colloid mass concentrations before and after ultrasound vibration

合态污染物潜在影响的重要指标^[19]. 图 4 展示了 6 月 29 日 ~ 7 月 1 日的大暴雨(累计降雨量 203.2 mm)后, 7 月 2 日赵林修井和张飞上井中悬浮颗粒的粒径分布(PSD). 井水 PSD 均呈单峰型分布(图 4). 赵林修井中胶体态颗粒($< 10 \mu\text{m}$)占有所有悬浮颗粒的比例高达 96.5%, 中值粒径(d_{50})为 $4.47 \mu\text{m}$, 表明该井极有可能受到胶体结合态污染物(如来自林地上部耕地的农药、P 等)的潜在影响. 因此, 必须加强大雨后井水的连续监测. 张飞上井中悬浮颗粒粒径介于 $1.98 \sim 262.38 \mu\text{m}$, 胶体态颗粒占 7.97%, d_{50} 为 $22.79 \mu\text{m}$. 相比于赵林修井附近林地凋落物及地表植被或地下根系对径流中颗粒物的截留、吸附和滤除, 张飞上井附近旱地频繁耕作以及井中取水灌溉的物理扰动, 是该井中大颗粒($> 10 \mu\text{m}$)体积比较高的主要原因.

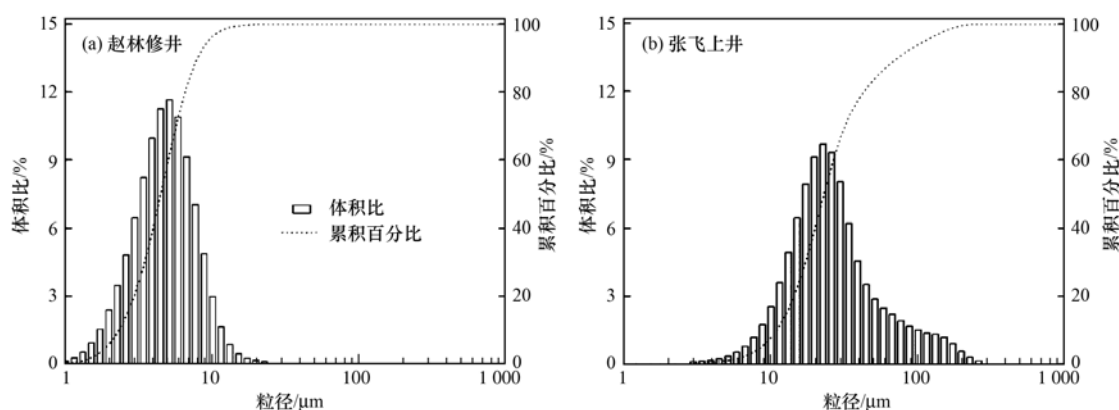


图 4 井水中颗粒粒径分布

Fig. 4 Particle size distributions of well water in Zhaoilinxu Well and Zhangfeishang Well

3 讨论

本研究中,两口井中胶体颗粒浓度最大值均出现在旱季非雨水扰动情况下,水位较低时人为频繁取水的物理扰动直接导致井底已沉降的胶体颗粒再悬浮是胶体颗粒浓度峰值出现的最主要原因.但这种直接扰动的方式只造成胶体颗粒浓度短时间内的增加,不具有持续性.在雨季期间,大雨之后浅层井水中胶体颗粒浓度出现不同程度的增加,但仅限于雨季的中前期阶段.雨季后期,即使大暴雨作用下,井水中胶体颗粒浓度并无明显增加.总的来说,井水中胶体颗粒浓度与井水水位并不存在显著的相关关系(表3).因此,自然降雨的物理扰动对川中丘陵区浅层井水中胶体颗粒浓度的动态变化有一定影响.但胶体颗粒随地下径流长距离迁移进入井水的过程中可能受到植物根系的截留与土壤基质或裂隙岩层的物理滤除^[20],从而削弱降雨的直接影响,导致降雨的影响相对井中取水扰动的直接影响更小,尤其是雨季中后期地下环境中可分散的胶体源减少的情况下.

除上述物理扰动的影响,井水水化学性质变化也会导致胶体颗粒浓度的动态变化.如表3所示,胶体颗粒浓度与EC、 Mg^{2+} 及DOC浓度均呈现显著的相关关系.井水中胶体颗粒浓度与EC和 Mg^{2+} 浓度均呈负相关关系,相关系数分别为-0.307和-0.517. EC或 Mg^{2+} 浓度降低会促进胶体颗粒与固体(土壤基质或岩石裂隙)表面扩散双电层(electric double layer)的扩张,增大排斥能阻,进而促进胶体颗粒从固体表面释放迁移进入井水.其他室内研究或野外观测也报道了类似的现象^[9, 21~23].而相反,胶体颗粒浓度与DOC浓度呈极显著的正相关关系,相关系数为0.452.自然条件下,溶解性有机碳大分子易于吸附在胶体颗粒表面,形成有机-无

机复合胶体. DOC分子在胶体颗粒表明形成覆盖层后,极大地增加了胶体颗粒的表面负电荷进而增大胶体颗粒与固体表面间排斥能阻,促进胶体颗粒的释放迁移^[20].此外,井水中胶体颗粒相互之间也由于增强的静电排斥作用,提高了井水中胶体体系的稳定性,利于胶体颗粒的长时间悬浮.但与已有研究中报道不一致的是,本研究中胶体颗粒浓度与井水pH以及 Ca^{2+} 浓度间均不存在相关关系.溶液必须经历酸性-中性或碱性较大幅度的变化才可能导致矿质胶体颗粒表面电性的变化,进而影响水溶液中胶体颗粒的浓度^[9].本研究中井水中性偏碱(pH:7.22~8.55),pH的微弱变化不足以影响胶体颗粒浓度动态.而赵林修井和张飞上井中 Ca^{2+} 的平均浓度分别为 $112.32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 及 $121.73\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远远高于流域内坡耕地紫色土颗粒的临界絮凝浓度($24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Ca}^{2+}$)^[13]或其它土壤颗粒的临界絮凝浓度($80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Ca}^{2+}$)^[21].井水中如此高浓度的 Ca^{2+} 会破坏DOC维持胶体体系稳定性的作用,极大地压缩负电荷胶体颗粒之间的扩散双电层,促进胶体颗粒絮凝成为更大的团聚体,这也是井水中胶体颗粒以团聚体形式存在的主要原因. Albarran等^[24]进一步研究发现,在 Ca^{2+} 浓度为 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶液中, Ca^{2+} 可通过钙离子桥(Ca-bridging)的键合作用将胶体颗粒聚合在一起,形成粒径更大的团聚体颗粒.此外, Mg^{2+} 浓度增加对胶体颗粒的团聚也有一定影响.如图3所示,赵林修井中 c_2/c_1 的最大值(4.29)和次大值(4.17)分别于2013年5月3日及2013年12月11日出现,相应地 Ca^{2+} 浓度分别为 $119.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $116.94\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [明显低于 Ca^{2+} 的峰值($151.13\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),图2(a)],但 Mg^{2+} 浓度分别高达 $28.07\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $26.76\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [均接近 Mg^{2+} 的峰值($29.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),图2(a)]. Ca^{2+} 浓度较高情况下, Mg^{2+} 浓度的增加有利于胶体颗粒之间排斥

表3 胶体颗粒浓度与井水理化性质参数相关分析结果¹⁾

Table 3 Correlation analysis between colloid concentration and well water physicochemical parameters

	胶体浓度	水位	水温	pH	EC	Ca^{2+}	Mg^{2+}	DOC
胶体浓度	1	-0.273	0.042	0.057	-0.307 *	0.031	-0.517 **	0.452 **
水位		1	-0.152	-0.414 **	0.386 **	-0.222	0.577 **	-0.623 **
水温			1	0.129	-0.615 **	-0.714 **	-0.457 **	0.301 *
pH				1	-0.423 **	-0.076	-0.293 *	0.407 **
EC					1	0.415 **	0.547 **	-0.509 **
Ca^{2+}						1	0.138	-0.099
Mg^{2+}							1	-0.484 **
DOC								1

1) * * 表示相关性在0.01水平上显著(双尾检验); * 表示相关性在0.05水平上显著(双尾检验)

能阻的进一步降低,进而增加胶体颗粒的团聚程度^[25],因此 c_2/c_1 较高. 张飞上井中 c_2/c_1 最大值(2.50)和次大值(1.96)的出现也与对应 Mg^{2+} 浓度分别为全年的次大值及最大值有关[图 2(b)]. 本研究中,较大的团聚体颗粒在重力作用下易于沉降到井底,减少井水中悬浮胶体颗粒的浓度,这也是物理扰动之外胶体颗粒浓度总体较低的原因. 因此,本研究中井水水化学性质对胶体颗粒的动态变化存在较大影响,且这种影响持续存在. 此外,井水水化学特性可能会削弱物理扰动(自然降雨或人为取水)对胶体颗粒动态变化的影响,使其影响时间缩短或影响程度减小.

4 结论

(1)川中丘陵区浅层井水中胶体颗粒年内质量浓度介于 $0.60 \sim 14.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,数量浓度介于 $5.51 \times 10^7 \sim 1.34 \times 10^9 \text{ L}^{-1}$,存在较强的季节变异.

(2)井水中胶体颗粒浓度峰值出现在非雨季,与人为取水的物理扰动有关;雨季初期及中期大雨或暴雨后井水中胶体颗粒浓度有较大增长,雨季后期大暴雨对井水中胶体颗粒浓度变化影响不显著.

(3)井水化学性质(EC、二价阳离子、DOC)是影响胶体颗粒浓度动态变化的最重要因素,其次是人为取水的直接扰动以及自然降雨入渗的物理扰动;井水中高浓度的 Ca^{2+} 含量导致胶体颗粒倾向于絮凝成团聚体,团聚体是胶体颗粒存在的主要形式.

(4)建议该地区在雨季初期至中期的大雨后对作为饮用水源的井水加强监测,以应对潜在的胶体辅助农药、P 等农化物质迁移对井水质量构成的较大威胁.

参考文献:

- [1] Molnar I L, Johnson W P, Gerhard J I, *et al.* Predicting colloid transport through saturated porous media: a critical review[J]. Water Resources Research, 2015, **51**(9): 6804-6845.
- [2] Nie M H, Yang Y, Liu M, *et al.* Environmental estrogens in a drinking water reservoir area in Shanghai: occurrence, colloidal contribution and risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2014, **487**: 785-791.
- [3] 李海明, 吴锦兰, 贾晓玉, 等. 滨海含水介质胶体对垃圾渗滤液氨氮的吸附特征[J]. 水科学进展, 2008, **19**(3): 339-344.
Li H M, Wu J L, Jia X Y, *et al.* Adsorption of ammonia-nitrogen in landfill leachate on the colloids of beach water-bearing media[J]. Journal of Advances in Water Science, 2008, **19**(3): 339-344.
- [4] 马杰, 李海明, 顾晓明, 等. 垃圾污染场地浅层地下水中铁锰时空变异的胶体效应[J]. 环境科学, 2011, **32**(3): 908-912.
- [5] Zhang W, Tang X Y, Weisbrod N, *et al.* A review of colloid transport in fractured rocks[J]. Journal of Mountain Science, 2012, **9**(6): 770-787.
- [6] 顾丽军, 杨毅, 刘敏, 等. 长江口滨岸及近海水体中胶体的分布和理化性质研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4195-4203.
Gu L J, Yang Y, Liu M, *et al.* Distribution and physicochemical properties of aquatic colloids in the Yangtze estuarine and coastal ecosystem[J]. Environmental Science, 2013, **34**(11): 4195-4203.
- [7] Gooddy D C, Mathias S A, Harrison I, *et al.* The significance of colloids in the transport of pesticides through chalk[J]. Science of the Total Environment, 2007, **385**(1-3): 262-271.
- [8] McKay L D, Sanford W E, Strong J M. Field-scale migration of colloidal tracers in a fractured shale saprolite[J]. Ground Water, 2000, **38**(1): 139-147.
- [9] Kuno Y, Kamei G, Ohtani H. Natural colloids in groundwater from a bentonite mine-Correlation between colloid generation and groundwater chemistry-[J]. Materials Research Society Symposium Proceedings, 2002, **713**: 841-848.
- [10] Pronk M, Goldscheider N, Zopfi J, *et al.* Percolation and particle transport in the unsaturated zone of a karst aquifer[J]. Ground Water, 2009, **47**(3): 361-369.
- [11] Cizdziel J V, Guo C X, Steinberg S M, *et al.* Chemical and colloidal analyses of natural seep water collected from the exploratory studies facility inside Yucca Mountain, Nevada, USA [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2008, **30**(1): 31-44.
- [12] Rani R D, Sasidhar P. Stability assessment and characterization of colloids in coastal groundwater aquifer system at Kalpakkam [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, **62**(2): 233-243.
- [13] Zhang W, Tang X Y, Weisbrod N, *et al.* A coupled field study of subsurface fracture flow and colloid transport[J]. Journal of Hydrology, 2015, **524**: 476-488.
- [14] Zhao P, Tang X Y, Zhao P, *et al.* Tracing water flow from sloping farmland to streams using oxygen-18 isotope to study a small agricultural catchment in southwest China[J]. Soil and Tillage Research, 2013, **134**: 180-194.
- [15] Degueldre C, Baeyens B, Goerlich W, *et al.* Colloids in water from a subsurface fracture in granitic rock, Grimsel Test Site, Switzerland[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, **53**(3): 603-610.
- [16] van den Bogaert R, Cornu S, Michel E. To which extent do rain interruption periods affect colloid retention in macroporous soils [J]. Geoderma, 2016, **275**: 40-47.
- [17] Mohanty S K, Bulicek M C D, Metge D W, *et al.* Mobilization of microspheres from a fractured soil during intermittent infiltration events[J]. Vadose Zone Journal, 2015, **14**(1), doi: 10.2136/vzj2014.05.0058.
- [18] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟, 等. 持续水动力作用下湖泊底泥胶体态氮、磷的释放[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1223-1229.
Sun X J, Qin B Q, Zhu G W, *et al.* Release of colloidal N and

- P from sediment of lake caused by continuing hydrodynamic disturbance[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(6): 1223-1229.
- [19] Pronk M, Goldscheider N, Zopfi J. Particle-size distribution as indicator for fecal bacteria contamination of drinking water from karst springs[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(24): 8400-8405.
- [20] Wu L, Muñoz-Carpena R, Gao B, *et al.* Colloid filtration in surface dense vegetation: experimental results and theoretical predictions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(7): 3883-3890.
- [21] Kretzschmar R, Sticher H. Colloid transport in natural porous media: influence of surface chemistry and flow velocity[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, **23**(2): 133-139.
- [22] Li D, Kaplan D I, Roberts K A, *et al.* Mobile colloid generation induced by a cementitious plume: mineral surface-charge controls on mobilization [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(5): 2755-2763.
- [23] McCarthy J F, McKay L D, Bruner D D. Influence of ionic strength and cation charge on transport of colloidal particles in fractured shale saprolite [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(17): 3735-3743.
- [24] Albarran N, Degueudre C, Missana T, *et al.* Size distribution analysis of colloid generated from compacted bentonite in low ionic strength aqueous solutions [J]. *Applied Clay Science*, 2014, **95**: 284-293.
- [25] Grolimund D, Borkovec M. Release of colloidal particles in natural porous media by monovalent and divalent cations[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2006, **87**(3-4): 155-175.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172