

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻类荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H ₂ O ₂ 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲱鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N ₂ O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O ₃ 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析

杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳

(西南大学地理科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 降雨期是揭示岩溶地下水系统物质能量输入和输出的重要阶段。以重庆青木关地下河系统的出口姜家泉为例, 监测了降雨条件下泉水中不同粒径悬浮颗粒物分布, 辅助以水文地球化学手段, 对岩溶地下水悬浮颗粒物的运移特征和来源进行了探讨。结果表明, 在降雨初期, 由于外源物质的输入, 泉口渠道地表水中 $0 \sim 11 \mu\text{m}$ 悬浮颗粒物的数量急剧升高; 而后当地下水主要靠岩溶裂隙水补给时, 泉水中 $0 \sim 11 \mu\text{m}$ 悬浮颗粒物的数量升高, 再悬浮作用占到主导地位; 继而雨水补给整个流域地下水系统, 稀释作用占主导地位时, 泉水中 $0 \sim 4 \mu\text{m}$ 悬浮颗粒物的数量升高, 地下水悬浮颗粒物为外源物质。由于研究区特定的水文地质条件和降雨强度, 悬浮颗粒物的临界粒径为 $4 \mu\text{m}$, 对于泉水是否受到微生物的污染可能有着重要的指示意义。

关键词: 降雨; 岩溶泉水; 悬浮颗粒物; 运移; 来源; 青木关

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3376-06

Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event

YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang

(Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Storm periods are the crucial stage to reveal input and outlet of material and energy in groundwater system. Jiangjia spring, the outlet of Qingmuguan groundwater system, was taken as an example. Distribution of suspended particle in the Jiangjia spring was continuously monitored. Supported by hydrochemical data, characteristics and sources of the suspended particle in the karst groundwater system were investigated. Results show that the number of suspended particle in size of $0-11 \mu\text{m}$ abruptly increased in the channel of Jiangjia spring at the beginning of rainfall occurred. It indicates the suspended particle was derived from allochthonous material. While the groundwater was recharged by karst fissure, the number of suspended particle in size of $0-11 \mu\text{m}$ sharply raised, which shows that the suspended particle was autochthonous. Finally, the number of suspended particle in size of $0-4 \mu\text{m}$ elevated due to the entire groundwater watershed recharged by rainfall and dilution effect occurring again, suggesting the suspended particle was derived from allochthonous material. Owing to the intrinsic hydrogeological settings and rainfall intensity, the threshold of size for the suspended particle was $4 \mu\text{m}$ in Qingmuguan groundwater system. It probably was a high practical significance to indicate the groundwater was whether polluted by microbe or not.

Key words: storm event; karst spring; suspended particle; transportation; sources; Qingmuguan

悬浮颗粒物是指以悬浮态存在于水体中的颗粒物, 在水体中扮演着重要的角色^[1]。研究表明, 悬浮颗粒物会吸附大量的污染物质, 成为水体中污染物吸附和运移的载体^[2-4], 严重影响着水质的变化^[1, 5-7]。关于河流^[8]、冰川^[9]和海洋^[10]中悬浮颗粒物分布特征的研究已经有大量的报道。

岩溶地下水是重要的地下水资源, 目前世界上约有 $20\% \sim 25\%$ 的人口依靠岩溶地下水作为饮用水源^[11]。而在我国西南地区, 由于岩溶面积集中连片广布^[12], 岩溶地下水在该地区的国民经济建设和社会发展中发挥着举足轻重的作用。但由于岩溶系统的特殊结构, 导致地表水很容易通过连接地表和地下的通道进入地下水系统。也正是因为岩溶系统

的特殊结构, 岩溶区地表的水土流失严重, 地表土壤、污染物等物质很容易进入地下水系统。然而, 目前有关岩溶地下水中悬浮颗粒物运移特征的报道和研究甚少。

降雨期间, 岩溶地下水的流量、地球化学指标对降雨事件响应迅速, 地下水系统与外界环境的物质能量进行了充分的交换^[13, 14]。降雨期是研究系统

收稿日期: 2011-12-04; 修订日期: 2012-03-08

基金项目: 重庆市国土房管局科技计划项目; 国家自然科学基金项目(41103068, 41072192); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2012B005); 西南大学博士基金项目(SWU111009); 重庆市自然科学基金项目(CSTC, 2010BC7004)

作者简介: 杨平恒(1983~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为岩溶水文地质和地球化学, E-mail: balance@swu.edu.cn

内部水文地球化学变化及其主要控制因子的重要阶段,是探讨系统物质能量输入和输出特征的重要阶段. 因而对降雨期间岩溶地下水中悬浮颗粒物的运移特征和来源进行研究,有助于对岩溶地下水这种稀缺而宝贵的资源进行合理有效的开发和利用,有助于对岩溶地下水水质变化进行有效的预测.

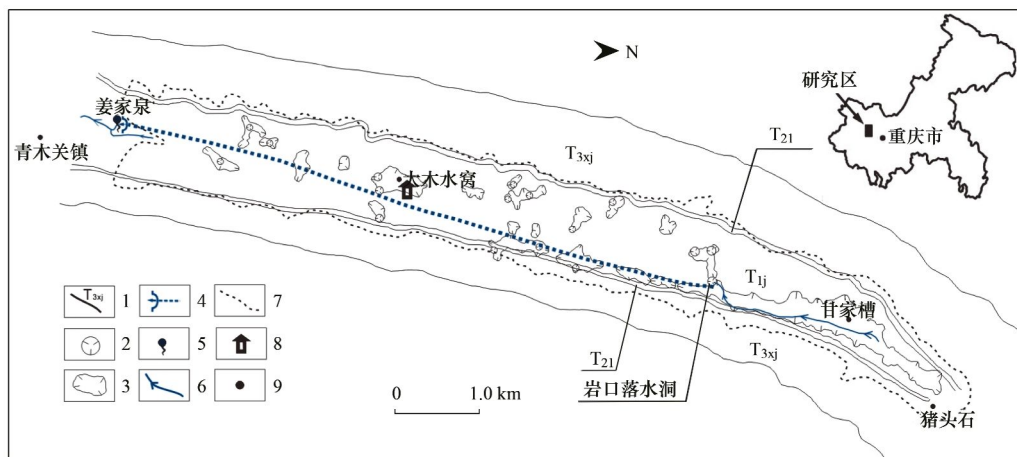
1 研究区概况

青木关地下河系统是西南大学于 2007 年建立的野外实习基地. 它位于重庆市北碚区、沙坪坝区和璧山县的交界处,流域面积约 13.4 km². 区内背斜成山,向斜成谷,呈现“一山二岭一槽”式的典型岩溶槽谷景观. 槽谷呈狭长带状,NNE 向展布,南北

长约 12 km,北部猪头石到岩口落水洞一带东西宽从 500 m 逐渐变至 1 km,岩口落水洞到研究区南部宽度基本保持在 1.1 km 左右(图 1). 山脉走向与构造方向基本一致,地势总体表现为北高南低,山峰与谷地相对高差在 200~300 m 之间.

研究区地下岩溶形态发育以单一岩溶管道为主^[15]. 地下河伏流入口为岩口落水洞,示踪试验证明地下水的平均流速为 177 m·h⁻¹^[15],地下河在姜家泉出露后注入青木关盆地的青木溪,最终流入嘉陵江.

研究区多年平均降水量为 1 250 mm,多年平均气温为 16.5℃. 区内土壤覆盖以地带性黄壤和非地带性石灰土为主. 植被主要为亚热带常绿阔叶林、灌木丛,具有旱生、喜钙的特点.



1. 地层界线及代号; 2. 落水洞; 3. 洼地; 4. 青木关地下河展布及出口; 5. 泉点; 6 地表水流向; 7. 地表分水岭; 8. 气象站; 9. 地物名

图 1 研究区水文地质示意

Fig. 1 Hydrogeological map of Qingmuguan underground river system

2 研究方法

由于岩溶含水层具有高度的复杂性,在其内部直接进行取样和监测的难度极大,因而只有通过监测地下河系统出口姜家泉泉水中的悬浮颗粒物分布特征,并辅助以地球化学数据,来研究岩溶地下水系统悬浮颗粒物的来源. 本研究分析的时间段为 2009 年 7 月 26~28 日的一场降雨.

为了观测流量,在泉口修建了矩形渠道. 使用 WGZ-1 型光电数字水位计(重庆华正水文仪器有限公司)测量矩形渠道的实时水位,其分辨率为 1 mm,再通过经验公式换算成流量. 采用 CTD300 型多参数自动记录仪测定泉水的电导率、pH 值和水温,精度分别为 0.1 μS·cm⁻¹、0.01 和 0.01℃,数据采集间隔为 15 min. 采用野外自动化荧光仪(flow-through field flourometer,瑞士 Albillia 公司)测定泉

水的浊度,间隔为 4 min. 使用 Abakus Mobil Fluid 型颗粒计数仪(德国 Klotz 公司)测定泉水不同粒径悬浮颗粒物的个数,测定间隔为 10 min,数量以个·(10 mL)⁻¹计,其利用光阻塞原理测定水中悬浮颗粒物的浓度,目前该仪器被国外极少数学者应用于岩溶地下水系统污染物衰减与运移的研究中^[16,17]. 通过安装在研究区中游大木水窝(图 1)的野外自动气象站(美国 ONSET 公司)观测降雨量,精度为 0.2 mm.

3 结果与分析

3.1 地球化学指标对降雨的响应

据自动气象站记录显示,研究区从 2009 年 7 月 26 日 16:39 开始降雨,一直持续到 27 日 09:49,总降雨量为 25.2 mm. 为了便于分析,将姜家泉水文过程划分为不同特征的几个过程(图 2).

E1 期间:降雨开始初期,在短短的 3.25 h 内(7 月 26 日 16:36 ~ 19:51),区内下了 18.2 mm 的降雨,此时安装在姜家泉泉口的水位计虽未感应到水位的变化,但据笔者当时在野外现场的观测,发现在降雨开始后的 30 min 内,姜家泉西侧山坡上雨水形成的地表坡面流汇入姜家泉人工修筑的矩形渠道. 由于该山坡上有一规模较大的采石场及紧挨矩形渠道的菜地,土地裸露率高,坡面流携带着大量受侵蚀

的土壤顷刻间进入矩形渠道中,从而引起泉水浊度从降雨前的 1.6 NTU 在 4 min 内骤升至 5.01 NTU (图 2). 由于雨水具有极低的矿化度,且在降落和地表径流的过程中,受到大气和土壤、植被的加温,导致姜家泉泉水的电导率从降雨前的 $688 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 急剧降低至 $640 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,水温从 18.92°C 升至 19.04°C (图 2),此时姜家泉泉水的物理化学行为主要表现为雨水的稀释效应.

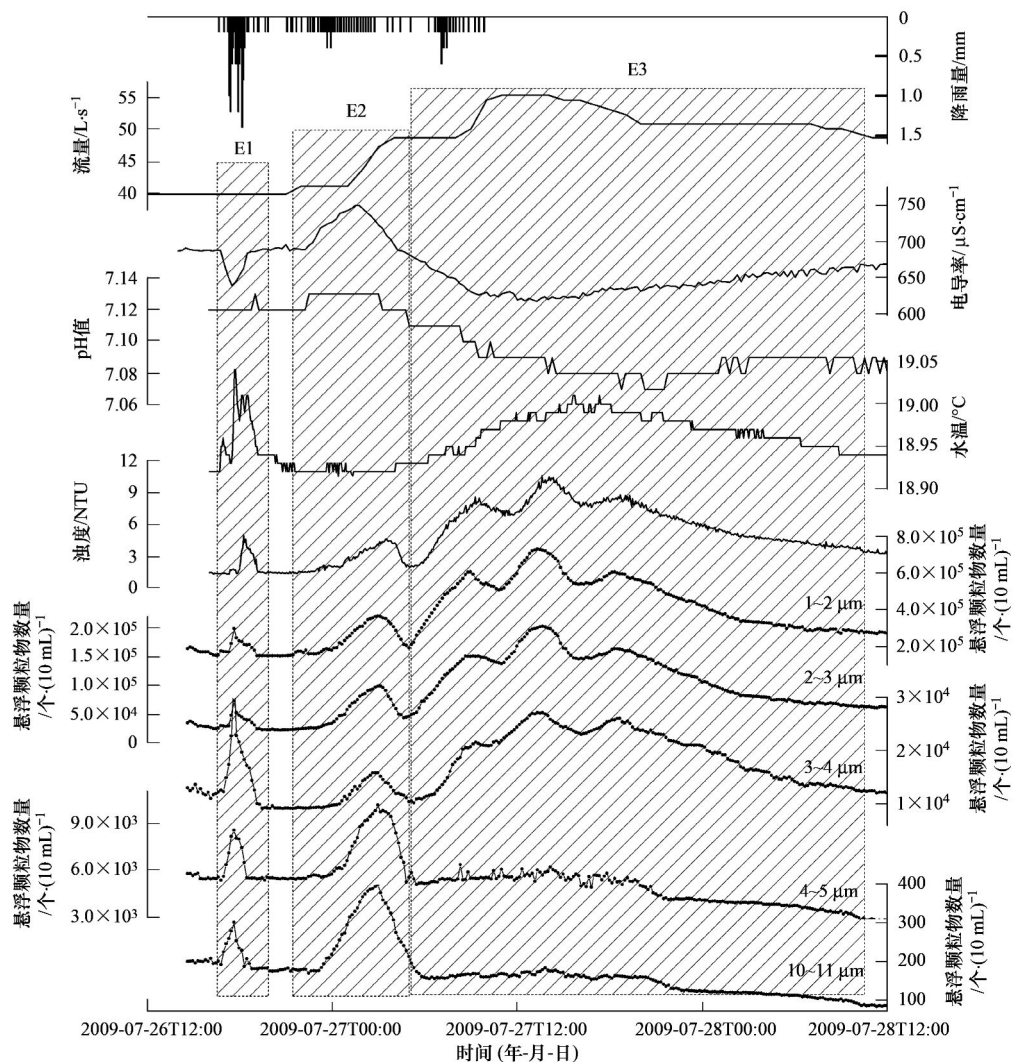


图 2 悬浮颗粒物粒径分布与部分地球化学指标

Fig. 2 Variation of particle-size distribution, a portion of hydrochemical parameters at Jiangjia spring during storm events

E2 期间:降雨开始约 5.4 h 后(26 日 22:00)流量开始响应,从 $39.9 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 逐渐上升至 $41.2 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. 27 日 02:00,流量开始急剧上升,从 $43.9 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 上升至 04:00 的 $48.8 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 2). 电导率从流量响应之初的 $689.2 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (26 日 22:15) 上升至 $750.1 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (27 日 01:45). pH 值略有所上升,水温基本稳定不变(图 2). 浊度从 26 日 22:03 的 1.49 NTU

逐渐升高至 27 日 03:31 的 4.64 NTU. 在裂隙介质占 90% 左右,管道介质占 10% 左右的研究区,这种现象主要归因于岩溶裂隙介质中的高矿化度的“老水”被雨水冲入岩溶管道中,使得电导率升高,表现为活塞效应. 随着地下水水位的抬升,岩溶裂隙含水介质中沉积的泥沙很可能被水流搅动,引起地下水浊度升高,随水流在姜家泉排泄.

E3 阶段:在 E2 阶段后,由于雨水补给的稀释作用,电导率逐渐下降,于 27 日 13:15 降至最低值 $618 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,然后缓慢升高,逐渐向降雨前的水平恢复(图 2). pH 值的行为与电导率表现的极为相似,只是前者恢复的幅度较后者小而已(图 2). 水温表现出与电导率大致相反的地球化学行为(图 2),主要是因为被环境加温后的雨水补给地下水,使得地下水温在一定程度上有所上升,对地下水起到加温的作用. 浊度表现出 3 个亚峰值,分别为 27 日 09:31 时的 8.45NTU 、27 日 14:03 的 10.45NTU 和 27 日 18:39 的 8.75NTU (图 2). 浊度的这 3 个亚峰值很可能与 3 场比较集中的降雨有关,因为降雨越集中,雨强越大,地表水土流失也越严重,进入地下水系统的泥沙越多,引起的浊度也越高.

综上所述,E1 阶段主要为雨水形成地表坡面流汇入姜家泉泉口修筑的渠道,所表现出来的稀释效应;E2 阶段主要表现为存储于岩溶裂隙介质中的地下水被释放出来,所形成的活塞效应;E3 阶段主要表现为雨水对地下水的稀释效应和“加温效应”.

3.2 泉水中不同粒径悬浮颗粒物的行为特征

笔者以 $1 \mu\text{m}$ 为间隔单位,分别记录了 $1 \sim 11 \mu\text{m}$ 粒径悬浮颗粒物的个数. 由于 $4 \sim 11 \mu\text{m}$ 粒径悬浮颗粒物的特征一致,所以只分析 $1 \sim 2$ 、 $2 \sim 3$ 、 $3 \sim 4$ 、 $4 \sim 5$ 和 $10 \sim 11 \mu\text{m}$ 粒径的悬浮颗粒物的个数分布特征.

E1 期间:各种粒径的悬浮颗粒物总体上随浊度的变化而变化. $1 \sim 2$ 、 $2 \sim 3$ 、 $3 \sim 4$ 、 $4 \sim 5$ 和 $10 \sim 11 \mu\text{m}$ 粒径的悬浮颗粒物的个数分别从 $152\,764$ 、 $26\,740$ 、 $12\,200$ 、 $5\,627$ 和 202 个 $\cdot(10\text{ mL})^{-1}$ (26 日 16:38) 上升至 $299\,125$ 、 $73\,550$ 、 $34\,732$ 、 $8\,570$ 和 303 个 $\cdot(10\text{ mL})^{-1}$ (26 日 17:38),而后(26 日 19:28)逐渐分别下降至 $148\,316$ 、 $23\,491$ 、 $9\,138$ 、 $5\,580$ 和 184 个 $\cdot(10\text{ mL})^{-1}$,见图 2.

E2 期间:各种粒径的悬浮颗粒物总体上随浊度的变化而变化. 26 日 23:28 $1 \sim 2$ 、 $2 \sim 3$ 、 $3 \sim 4$ 、 $4 \sim 5$ 和 $10 \sim 11 \mu\text{m}$ 粒径的悬浮颗粒物的个数分别从 $180\,833$ 、 $31\,373$ 、 $9\,341$ 、 $5\,649$ 和 195 个 $\cdot(10\text{ mL})^{-1}$ 上升至 $366\,310$ 、 $99\,000$ 、 $15\,837$ 、 $10\,143$ 和 400 个 $\cdot(10\text{ mL})^{-1}$ (27 日 02:58),随后逐渐下降(图 2).

E3 期间: $1 \sim 2$ 、 $2 \sim 3$ 和 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 粒径的悬浮颗粒物的个数分别从 $191\,012$ 、 $46\,643$ 和 $10\,365$ 个 $\cdot(10\text{ mL})^{-1}$ (27 日 04:58) 上升至第一个亚峰值的 $608\,888$ 、 $150\,655$ 和 $20\,511$ 个 $\cdot(10\text{ mL})^{-1}$ (27 日

8:48),随后, $1 \sim 2$ 、 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 粒径的悬浮颗粒物逐渐下降至 $510\,712$ 、 $139\,631$ 个 $\cdot(10\text{ mL})^{-1}$ (27 日 10:48); $1 \sim 2$ 、 $2 \sim 3$ 和 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 粒径的悬浮颗粒物第 2 个亚峰值的数量分别为 $735\,939$ 、 $200\,181$ 和 $27\,193$ 个 $\cdot(10\text{ mL})^{-1}$ (27 日 13:18),第 3 个亚峰值的数量分别为 $609\,164$ 、 $163\,735$ 和 $25\,844$ 个 $\cdot(10\text{ mL})^{-1}$ (27 日 18:18). 但是, $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 、 $10 \sim 11 \mu\text{m}$ 粒径的悬浮颗粒物的数量并未出现升高的现象(图 2). 从图 2 还可以发现,随着粒径的增大,悬浮颗粒物的数量逐渐减少,以 $4 \mu\text{m}$ 为临界点,这似乎存在某种内在的原因,值得深究.

3.3 泉水中悬浮颗粒物的来源

研究表明,悬浮颗粒物的来源主要有 2 种,即内源和外源^[18]. 外源是指地表的土壤、大气粉尘等在随降雨形成的地表径流输入地下河而形成的悬浮颗粒物. 而内源主要是指上一场或几场降雨输入的外源物质部分在岩溶裂隙中滞留和沉积,在本场降雨作用下重新进入地下河而形成的悬浮颗粒物.

E1 阶段:此阶段为降雨初期,稀释作用占主导地位,此时矩形渠道地表水中的悬浮颗粒物主要为外源物质,悬浮颗粒物的数量出现明显的峰值. 这主要是由于姜家泉东侧的采石场、菜地产生的坡面流携带着地表受侵蚀的土壤,顺坡而下补给姜家泉人工修筑的矩形渠道.

E2 阶段:此阶段地下水流量主要靠岩溶裂隙水补给,表现为明显的活塞效应. 原先滞留和沉积在岩溶裂隙中的泥沙、有机质等内源沉积物,在雨水下渗的水头压力作用下进入地下河,并在一定的水动力条件下,成为悬浮颗粒物. 各种粒径的悬浮颗粒物表现为升高的现象,并随地下水最终在泉口排泄. 此过程颗粒物表现为再悬浮作用(过程).

E3 阶段:此阶段为雨水补给整个地下水系统,即稀释效应占主导地位,降落地表的雨水携带着流域内地表受侵蚀的土壤,通过岩溶管道、竖井等连接地表地下的通道进入地下河. 大粒径颗粒物($>4 \mu\text{m}$)由于受到重力作用,在地下河河床上沉积,粒径较小的颗粒物($1 \sim 4 \mu\text{m}$)随地下水水流在姜家泉排泄. 因而此时 $1 \sim 4 \mu\text{m}$ 粒径的悬浮颗粒物的个数与浊度、降雨同步变化,而 $>4 \mu\text{m}$ 粒径颗粒物的个数则无明显的变化. 表明不同粒径悬浮颗粒物的搬运方式与颗粒的大小有关,悬浮颗粒物粒径越小,则地下水搬运量悬浮颗粒的数量(浓度)也越大,反之亦然. 在本次降雨中,地下水搬运悬浮颗粒物的直径以 $4 \mu\text{m}$ 为临界值.

3.4 影响悬浮颗粒物临界粒径的可能因素

地下水不同的流速对不同粒径颗粒物的搬运能力是不同的,根据尤尔斯特隆图(图3),颗粒搬运方式由粒径的大小和流速决定,流速越大,能搬运颗粒的直径也越大.本研究在管道含水介质形态和特征既定的情况下,地下水流速的决定因素主要是降雨强度,雨强越大,地下水流速则越快.

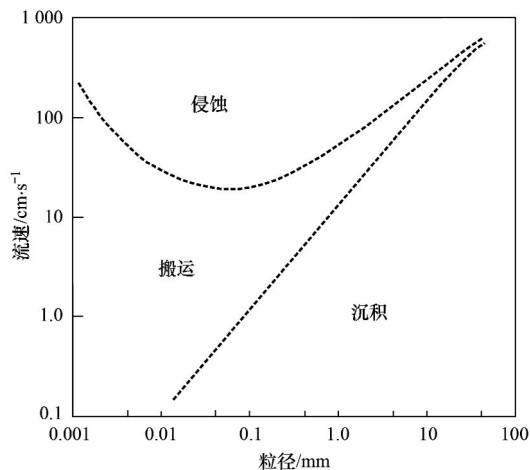


图3 尤尔斯特隆图

Fig. 3 Hjulstrom diagram

而 Atteia 等^[19]对瑞士 Jura 山 Vallée des Ponts 地区的 Noiraigue 岩溶泉和 Bied 地表河进行了详细的研究,根据粒径的不同,将泉水中悬浮颗粒物分为两种,其临界粒径为 $5\mu\text{m}$. $<5\mu\text{m}$ 粒径悬浮颗粒物在水中的运移特征主要受泉水的 pH 值或地表溪流的水温决定,而 $>5\mu\text{m}$ 粒径悬浮颗粒物的运移特征主要受流量(水动力条件)的影响.

岩溶地下水的 pH 值、水温等指标在不同的水文过程有不同的表现,当然本研究并未对 pH 值的形成进行深入的分析,但无外乎涉及到土壤 CO_2 、岩溶含水介质特征^[20]以及酸雨^[21,22]等一些因素. pH 值、水温在一定程度上受到流量大小的影响,它们是不同的流量过程的一种表现形式.归根到底,降雨形成的地表径流、地下河流量变化,是 pH 值、水温变化的载体和重要的驱动因素.而与 Atteia 等^[19]的研究结果不同的是,本研究悬浮颗粒物的临界粒径为 $4\mu\text{m}$,很可能是本研究区与文献^[19]的研究区具有不同含水介质条件、雨强、地表土壤结构和流量过程的缘故.

3.5 应用价值

Goldscheider 等^[16]和 Pronk 等^[17]综合瑞士一条岩溶地下河的悬浮颗粒物粒径分布特征和水化学资料,发现当地下水受到外源水补给时,即泉水中的悬

浮颗粒物是外源的,可以用 $0.9\sim 2.5\mu\text{m}$ 粒径的悬浮颗粒物的运移特征来指示泉水是否受到污染.当悬浮颗粒物为外源时, $0.9\sim 2.5\mu\text{m}$ 粒径的悬浮颗粒物个数的峰值与 *E. coli* 和 TOC 浓度的峰值基本一致, $>3.0\mu\text{m}$ 粒径悬浮颗粒物的个数并未增高.而对于 $>3.0\mu\text{m}$ 粒径的悬浮颗粒物的个数并未增高的原因,文献^[16,17]并未给出解释,但笔者认为应该受流速的控制和影响.

如果使用在线颗粒计数仪,在青木关地下河系统只需根据仪器在线记录的 $1\sim 4\mu\text{m}$ 粒径悬浮颗粒物的个数历时数据,就可能较好地判断地下水是否受到外源沉积物及其吸附微生物的污染,为降雨期间岩溶区地下水的污染预报提供较好的工具,大大减少了工作量,节约了成本.限于作者的专业和工作量,未能在监测悬浮颗粒物的同时监测地下水中的 *E. coli* 作为验证.当然,总的来说,不同地区、不同降雨量、不同水文地质条件的地下河系统,其地下水悬浮颗粒物的环境指示意义的临界值应是不同的,应该针对不同流域的地下河,做好前期研究工作,初步确定其临界值.

4 结论

(1)在降雨初期(E1 阶段),由于姜家泉西侧坡面流的补给,稀释作用占主导地位,矩形渠道地表水中悬浮颗粒物主要为外源物质;当地下水流量主要靠裂隙水补给时(E2 阶段),表现为活塞效应,岩溶裂隙中的沉积物的再悬浮作用占到主导地位;而当雨水补给整个流域的地下水时(E3 阶段),即稀释效应占主导地位时,此时地下水悬浮颗粒物为外源物质.

(2)在一定条件下,不同粒径悬浮颗粒物的搬运方式与颗粒的大小有关,沉积物颗粒越小,则地下水搬运的量越大,沉积物颗粒越大,则地下水搬运的量越小,其中本次降雨姜家泉的悬浮颗粒物直径以 $4\mu\text{m}$ 为临界值.

(3)野外在线监测岩溶地下水悬浮颗粒物的临界粒径,可能对于预测地下水是否受到微生物的污染有着重要的意义.

参考文献:

- [1] McCarthy J F, Zachara J M. Subsurface transport of contaminants [J]. Environmental Science & Technology, 1989, 23(5): 496-502.
- [2] 魏俊峰,陈洪涛,刘月良,等. 2008 年调水调沙期间黄河下游悬浮颗粒物中磷的赋存形态[J]. 环境科学, 2011, 32(2): 368-374.

- [3] 王平. 水体中悬浮颗粒物对十溴二苯醚的吸附/解吸特性研究[J]. 生态毒理学报, 2009, **4**(1): 81-86.
- [4] 李玉, 俞志明, 宋秀贤, 等. 点源污染对胶州湾海水体系中不同形态重金属富集的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(10): 5592-5599.
- [5] Herman E K, Toran L, White W B. Threshold events in spring discharge: evidence from sediment and continuous water level measurement[J]. Journal of Hydrology, 2008, **351**(1-2): 98-106.
- [6] Mahler B, Lynch L, Bennett P. Mobile sediment in an urbanizing karst aquifer: implications for contaminant transport [J]. Environmental Geology, 1999, **39**(1): 25-38.
- [7] Vesper D J, White W B. Metal transport to karst springs during storm flow: an example from Fort Campbell, Kentucky/Tennessee, USA[J]. Journal of Hydrology, 2003, **276**(1-4): 20-36.
- [8] 余真真, 王玲玲, 戴会超, 等. 水温分层对水体中悬浮颗粒物垂向输运影响的研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, **43**(1): 64-69.
- [9] 高文华, 李忠勤, 张明军, 等. 乌鲁木齐河源冰川径流中总可溶性固体和悬浮颗粒物的特征及影响因素分析[J]. 环境化学, 2011, **30**(5): 920-927.
- [10] Yoshimura T, Nishioka J, Saito H, *et al.* Distributions of particulate and dissolved organic and inorganic phosphorus in North Pacific surface waters[J]. Marine Chemistry, 2007, **103**(1-2): 112-121.
- [11] Ford D C, Williams P W. Karst geomorphology and hydrology [M]. Chichester, UK: Wiley, 2007.
- [12] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题[J]. 大自然探索, 1996, **15**(4): 21-23.
- [13] Yang P H, Yuan D X, Yuan W H, *et al.* Formations of groundwater hydrogeochemistry in a karst system during storm events as revealed by PCA[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, **55**(14): 1412-1422.
- [14] 杨平恒, 旷颖仑, 袁文昊, 等. 降雨条件下典型岩溶流域地下水中的物质运移[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3249-3255.
- [15] 杨平恒, 罗鉴银, 彭稳, 等. 在线技术在岩溶地下水示踪试验中的应用——以青木关地下河系统岩口落水洞至姜家泉段为例[J]. 中国岩溶, 2008, **27**(3): 215-220.
- [16] Goldscheider N, Pronk M, Zopfi J. Role of sediments and suspended particles for contaminant attenuation and transport in karst aquifer systems [J]. Carsologica Sinica, 2009, **28**(2): 113-121.
- [17] 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.
- [18] White E L, White W B. Dynamics of sediment transport in limestone caves [J]. Bulletin of the National Speleological Society, 1968, **30**(4): 115-129.
- [19] Atteia O, Kozel R. Particle size distributions in waters from a karstic aquifer: from particles to colloids [J]. Journal of Hydrology, 1997, **201**(1-4): 102-119.
- [20] 刘再华, 李强, 汪进良, 等. 桂林岩溶试验场钻孔水化学暴雨动态和垂向变化解译[J]. 中国岩溶, 2004, **23**(3): 169-176.
- [21] 杨平恒, 罗鉴银, 袁道先, 等. 降雨条件下岩溶槽谷泉水的水文地球化学特征[J]. 水利学报, 2009, **40**(1): 67-74.
- [22] 曹云松, 罗祥康, 黄德辉. 试论重庆酸雨对地下水水质变异的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, **6**(3): 43-48.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17β-estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polycrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xin, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行