

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

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

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化	薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源	周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)
利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布	刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气 PM _{2.5} 的污染水平及来源解析	林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晚芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征	刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立	陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试	胡月琪,郭晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价	王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
CoCuMnO ₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学	孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化	张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征	史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用δ ¹⁵ N-NO ₃ ⁻ 和 δ ¹⁸ O-NO ₃ ⁻ 示踪北京城区河流硝酸盐来源	赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析	王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响	陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究	王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究	冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例	张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素	任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价	王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价	蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险	陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)
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	王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素	黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(<i>Bacteroides</i>) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例	张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
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	梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成	刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究	丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素	董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析	程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学	郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选	李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米 Fe ₃ O ₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究	钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能	宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放通量的影响	郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解 CH ₄ 与 N ₂ O 浓度特征	侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克什克腾草原 N ₂ O 排放的影响	杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制	曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局	高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响	史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险	赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析	刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米 TiO ₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响	张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学	马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响	宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响	黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析	王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响	郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征	林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)	

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

王巧莲¹, 蒋勇军^{1,2*}, 陈宇¹

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 西南大学岩溶环境开放实验室, 重庆 400715)

摘要: 2014 年 8 月至 2015 年 9 月通过野外在线监测获取岩溶流域连续、高精度的气象、地下水 TOC 和水文地球化学等数据, 利用主成分回归模型探讨流域地下水 TOC 在不同时间尺度上的输出及影响因素。结果表明在季节时间尺度上, 气温和地下水电导率 (SpC) 夏季高, 冬季低, pH 则相反; TOC 和浊度冬、夏季高, 春、秋季低; 地下水 TOC 和水文地球化学指标对降雨表现出明显的响应过程, 但地下水 TOC 对不同降雨强度的响应时间和过程有明显差异, 整体来说, TOC 在降雨过程中表现出上升的趋势, 而暴雨过后受稀释效应影响呈现下降趋势。主成分回归分析发现降雨、流量和浊度对 TOC 有正向促进作用, 而气温和 pH 对 TOC 有负向的影响。

关键词: 总有机碳; 岩溶流域; 时间尺度; 降雨事件; 主成分回归模型

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1788-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.05.024

Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors: An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing

WANG Qiao-lian¹, JIANG Yong-jun^{1,2*}, CHEN Yu¹

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Karst Environment Laboratory, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: High time-resolution auto-monitoring techniques were used to obtain the data for TOC and hydrogeochemistry of groundwater, and air temperature and precipitation from August 2014 to September 2015 in Xueyu Cave karst watershed, Southwest China, and then the principal component regression model was used to reveal the variation of TOC in groundwater and its influencing factors. The results indicated that there were significant variations of the TOC and hydrogeochemistry of groundwater in seasonal timescale. The temperature and specific conductance (SpC) of groundwater showed higher values in summer and lower values in winter; while an opposite variation pattern for pH in groundwater was observed, and the TOC and turbidity of groundwater showed higher values in winter and summer seasons and lower values in spring and autumn seasons. Meanwhile, high time-resolution data revealed that the TOC of groundwater responded quickly to rainfall events with different intensities. Generally, an increasing trend for TOC in groundwater was observed during raining and a decreasing trend for TOC in groundwater was shown after rainfall events, especially after storm events due to the dilution effect of rainfall. The export and variations of the TOC in groundwater were mainly controlled by the precipitation and discharge of underground river in the study area, as revealed by the principal component regression model. The TOC increased with the increase of the precipitation, discharge and turbidity of groundwater, and declined with the increase of air temperature and pH of groundwater.

Key words: total organic carbon; karst watershed; time-scales; rainfall events; principal component regression model

地下水是全球水循环的重要组成部分,是工业、农业和居民生活用水的重要来源,在国民建设中发挥着重要的作用。岩溶地区由于特殊的水文地质背景使岩溶水具有不同于其他水资源的特殊性,包括易受地质构造的控制、时空分布不均、地表水与地下水迅速转换、对环境变化敏感等 4 个特点^[1,2],岩溶区溶蚀作用强烈,岩溶含水介质溶蚀裂隙、管道高度发育,形成岩溶区特有的地表、地下双层空间结构体系^[3],另外由于岩溶区独特的水土资源分布格局导致土壤层的天然保护和过滤作用较弱,使得水资源利用和环境问题十分突出。总有机碳 (total

organic carbon, TOC) 是以碳的含量来表示环境水体中有机物总量的综合指标,包含溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 和颗粒有机碳 (particulate organic carbon, POC) 两类,通常溶解有机碳占了总有机碳的 90% 以上^[4~6]。总有机碳在生物地球化学过程中起着非常重要的作用,它可以影响水体中的 pH^[7],也可以影响水体中污染物,例如

收稿日期: 2015-10-13; 修订日期: 2015-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41472321, 41172311)

作者简介: 王巧莲 (1991 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为资源环境与 GIS 应用, E-mail: qiaolianwang268@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jiangyj@swu.edu.cn

重金属的迁移和固定^[8],而且它还可以作为水体中微生物的能量来源^[9].另外,TOC 是衡量水体有机污染程度的一项综合指标,对有机污染起指示作用,被作为评价水体中有机物污染程度的一项重要参考指标^[10].

近几十年全球地下水 TOC 输出表现出明显的增加趋势^[11,12],而其影响机制的研究仍存在着争论.究其原因主要是 TOC 对外界环境要素的变化十分敏感,如降雨和融雪的强度、频率以及季节模式^[13,14]、温度^[15]、大气酸沉降^[16]以及土地利用的变化^[17~19]等都会影响到地下水 TOC 的输出,但目前的研究大都限于单一因素对地下水 TOC 输出的影响分析.近年来,通过连续监测地下水中有机的荧光性质来获得有机物的成分和浓度,为获取连续的高分辨率的地下水 TOC 输出数据提供了可能^[20~22],如 Pronk 等^[21]利用地下水 DOM 荧光和 TOC 的线性相关关系,通过连续监测地下水中有机的荧光得到 TOC 的浓度,并分析了瑞士 Yverdon 岩溶含水层系统中颗粒有机物的来源及运移以及 TOC 在不同气象条件下(单次降雨、多次降雨和冰雪融水)的变化过程;Tissier 等^[22]通过每周对地下水 TOC 取样分析与连续监测的 COM 荧光数据建立相关关系,得到地下水 TOC 输出对降雨过程响应的结论.

因此,本研究通过野外在线自动监测地下水的有机物荧光信号与每月取样分析的地下水 TOC 浓度,利用地下水有机物的荧光信号和 TOC 浓度的相关性获取岩溶流域连续的高分辨率地下水 TOC 数据,以及相应的气象数据,分析不同时间尺度上(季节、不同降雨强度)地下水 TOC 的变化规律,并利用主成分回归分析方法探讨流域地下水 TOC 输出的主要影响因素,以期对岩溶地下水资源合理开发利用提供科学依据.

1 研究区概况

雪玉洞地下河系统位于重庆市丰都县长江南岸一级支流龙河下游段峡谷内(图 1),距丰都新县城 12 km,经纬度分别为 29°47'00"N,107°47'13"E.洞口海拔 233 m.雪玉洞地下河系统发育于川东平行岭谷方斗山背斜北西翼的下三叠统飞仙关组(T_1f)薄至中厚层状灰岩中,洞穴顶板岩层厚 150~250 m,上覆植被以常绿阔叶林和灌丛为主,土壤厚度 0~50 cm^[23],地处亚热带湿润季风气候区,多年平均降水和气温分别为 1 072 mm 和 16.5℃,大气降水是

地下河唯一的补给源,受西南季风和东南季风的双重影响,降水主要集中在每年的 4~10 月,夏季 7~8 月受高压控制降水相对偏少.

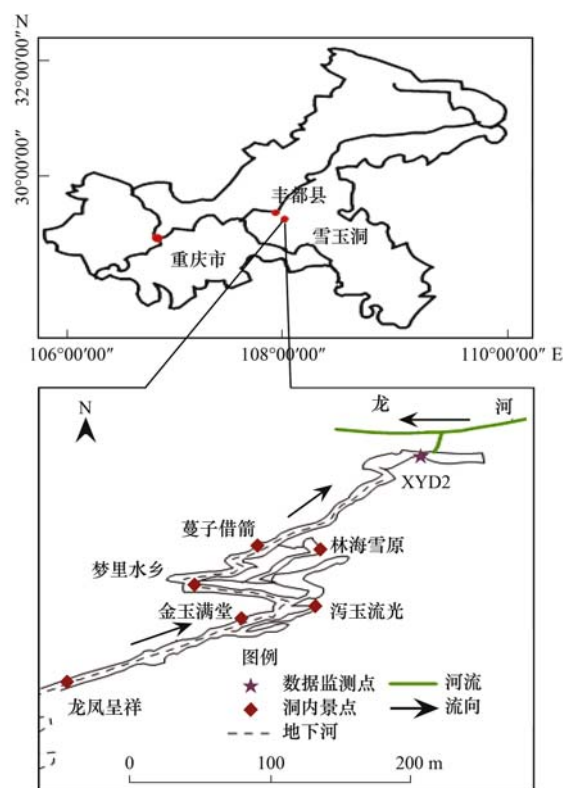


图 1 雪玉洞地理位置及采样点分布示意

Fig. 1 Geographical location of Xueyu Cave and distribution of sampling points

2 数据来源与研究方法

2.1 野外监测与现场测试

2014 年 8 月至 2015 年 9 月,在雪玉洞地下河出口处(XYD2)安装 GGUN-FL30 野外自动化荧光仪(flow-through field fluorometers,瑞士 Neuchatel 大学水文地质研究所生产)^[24]监测地下水的 3 种荧光信号值(tracer1、tracer2、tracer3)、浊度和水温(精度分别为 0.01、0.01、0.01、0.01 NTU、0.01℃),时间间隔设定为 15 min. 2015 年 1 月 1 日安装 MS5 多参数水质分析仪(美国 HACH 公司)监测地下水 pH 值、电导率(时间间隔为 15 min),精度分别为 0.01 个 pH 单位、1 $\mu S \cdot cm^{-1}$. 另外,2002 年开始,流域内安装有 HOBO 小型气象站(美国 Onset 公司生产),监测数据包括降雨量和气温,精度分别为 0.01 mm、0.1℃. 同时,利用德国 Aquamerck 的硬度试剂盒与碱度试剂盒每月测定地下水的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度,精度分别为 2 $mg \cdot L^{-1}$ 和 0.1 $mmol \cdot L^{-1}$.

2.2 样品采集和室内分析

每月使用事先用 10% HCl 酸化并用去离子水清洗过的 100 mL 高密度聚乙烯瓶采集 TOC 样品、阴阳离子样品。TOC 样品分析在中国地质科学院岩溶地质研究所岩溶动力学重点实验室,使用德国耶拿公司 (Analytik Jena AG) 生产的 Multi C/N 3100 测定,精度为 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。阳离子在西南大学地球化学与同位素实验室使用美国 Perkin-Elmer 公司生产的 Optima-2100DV 电感耦合等离子反射光谱仪 (ICP-OES) 测定,精度为 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,相对标准偏差 $<2\%$ 。阴离子在西南大学地理科学学院水污染分析室使用 SHIMADZU 公司 (Kyoto Japan) 生产的 UV-2450 紫外可见分光光度计测定,精度为 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.3 荧光信号值与 TOC 浓度之间的相关性

TOC 在波长为 250 ~ 425 nm 的光照射下,发射出波长为 350 ~ 500 nm 的波,而在激发/发射波长为 320 ~ 350 nm/420 ~ 450 nm 时出现最大强度。人工染料天来宝 (Tinopal, 即 tracer3) 所检测到的波长和上述波长相近 (在安装有滤波器的波长大约为 370 nm 的 UV-LED 的光照射下,检测到的发射波长为 440 ~ 540 nm 之间)^[25,26]。因此,利用野外自动化荧光仪监测的荧光信号值与实验室分析获得的 TOC 浓度值之间的相关性可以获得连续的高分辨率的地下水 TOC 浓度。图 2 为地下水荧光信号与实测 TOC 浓度的相关关系。

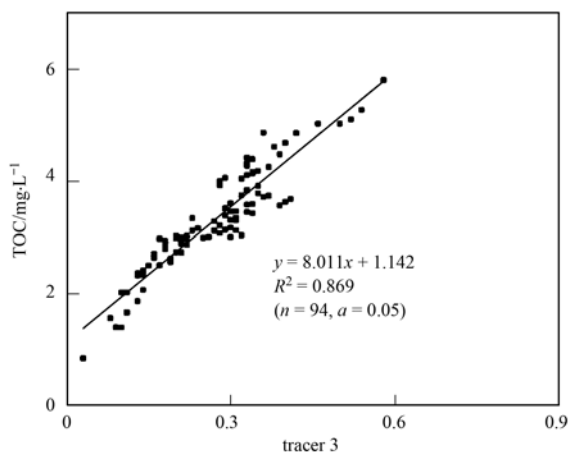


图 2 雪玉洞流域地下水荧光信号值与 TOC 浓度的线性关系

Fig. 2 Linear correlation between organic matters fluorescent signal and TOC concentrations of groundwater in Xueyu Cave karst watershed

2.4 地下水 TOC 输出影响因素的分析

利用主成分回归分析方法定量研究地下水 TOC 输出的影响因素,主成分回归模型的具体原理

和分析方法见文献[27,28];统计分析、主成分分析计算和多元线性回归分析均在 SPSS 16.0 软件中完成。

3 结果与讨论

3.1 监测期间地下水 TOC 浓度和水文地球化学指标的变化

如图 3 所示,监测期间地下水除温度外, TOC 浓度和其它各物理、化学指标均表现出明显的季节变化规律。地下水 pH 值变化范围在 7.1 ~ 8.3 之间,冬季高而夏季低,1 月 pH 最高可达到 8.3,随着 3 月雨季来临,地下水 pH 降低到 8.0 左右,到了 5、6 月 pH 甚至降低到 7.1 左右;而地下水 SpC 高值出现于夏季,低值出现于冬季,从 2 月的 $260 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 左右上升到 6 月的 $420 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 左右,上升幅度为 $160 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。从每年的 3 月开始,流域降水增多气温升高,土壤温度高,植物根系及微生物活动旺盛,土壤 CO_2 浓度升高,地表径流在下渗过程中溶解大量 CO_2 ,形成具有较低 pH 值的土壤水,溶蚀能力增强,另外雨水 pH 值较低,夏季大量雨水直接通过管道进入地下河系统,其溶蚀能力也会增强;冬季由于温度低,降水少,土壤 CO_2 浓度明显低于夏季,其溶蚀能力明显低于夏季。这样流域夏季地下水的 pH 值为出全年中的低值,而 SpC 表现出高值^[29]。TOC 浓度从 2014 年的 10 月到 2014 年的 12 月中旬一直呈上升趋势,之后 2015 年 1 月、2 月呈现稳定变化的状态,1、2 月 TOC 浓度的月平均值为 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而从 2015 年的 4 月开始下降,在 6 月下降到 $2.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,从 6 月下旬至 7 月中旬之后又开始上升;整体来看,冬、夏季高于春、秋季。地下水 TOC 季节变化的原因与流域岩溶裂隙、管道等高度发育有关,夏季降雨多,雨水将土壤中的水溶性及颗粒性物质等有机物带入地下河中,同时由于地下河流量增加,稀释效应的存在导致地下水 TOC 浓度有一定的降低;而冬季,虽然降雨少、温度低,土壤中微生物活性低和植物根系呼吸作用弱,进入地下水的有机物明显减少,但由于地下水流量降低,浓缩效应造成地下水 TOC 浓度较高,而春、秋季节由于降水较少,流量相对于夏季也较低而高于冬季,因此 TOC 浓度低于冬、夏季。

3.2 不同降雨强度下地下水 TOC 输出和水文地球化学指标变化过程

根据降雨量大小可以将降雨分为不同的等级 (表 1,监测期内流域没有出现特大暴雨的情况),监

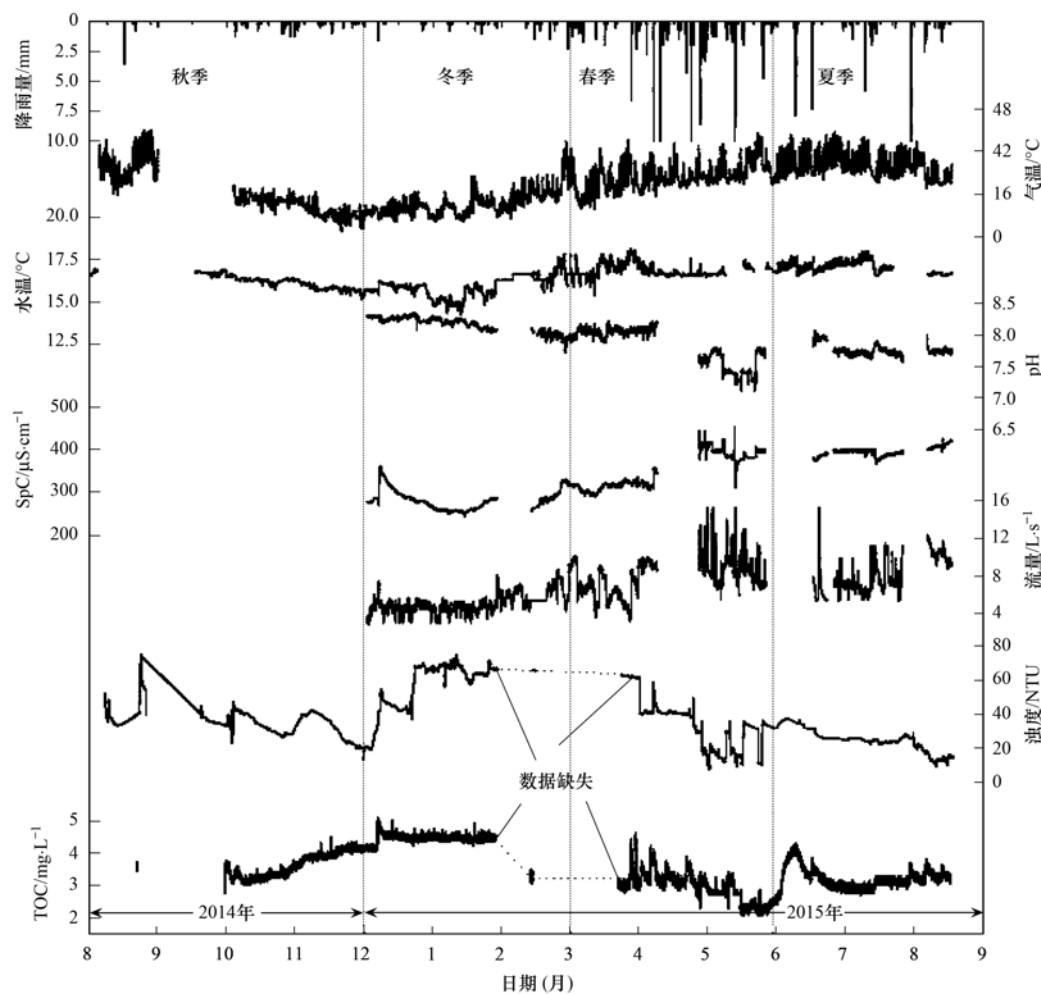


图3 监测期间地下水 TOC 浓度和水文地球化学指标的变化

Fig. 3 Variation in TOC and hydrogeochemistry of groundwater during the monitoring periods

测结果显示不同降雨强度条件流域地下水 TOC 输出和水文地球化学指标变化规律表现出明显的差异.

表1 降雨等级的划分

Table 1 Division of rain levels

等级	降雨量
小雨	< 10 mm/24 h
中雨	10 ~ 25 mm/24 h
大雨	25 ~ 50 mm/24 h
暴雨	50 ~ 100 mm/24 h
大暴雨	100 ~ 200 mm/24 h
特大暴雨	> 200 mm/24 h

3.2.1 小雨条件下地下水 TOC 输出和水文地球化学指标变化过程

图4为小雨条件下(2015年2月21~23日总降雨量为4.5 mm,其中2月22日的日降雨量为4.3 mm)地下水 TOC 浓度和水文地球化学指标的变化情况.这次降雨过程可以分为3个阶段:第一

阶段降雨从2月22日的02:30开始,到06:00结束,降雨量为3.5 mm,期间有短暂的停止;另外在2月22日的14:30和23日的04:15分别有两场短时间的降雨,降雨量分别只有0.8 mm和0.3 mm.第一阶段气温在降雨出现时立即降低,从降雨开始前的16.3℃降低到降雨结束后的11.9℃,地下水中 TOC 浓度从降雨前的4.3 mg·L⁻¹上升到降雨后的4.7 mg·L⁻¹,而其它指标没有表现出明显的变化;降雨的第二和第三阶段,除气温表现出降低外,地下水 TOC 及水文地球化学指标都没有发生明显的变化.

3.2.2 中雨条件下 TOC 输出和水文地球化学指标变化过程

2015年1月5~7日流域总降雨量达到27.7 mm,其中,1月6日的日降雨量为23.4 mm,属于中雨的级别.如图5所示,降雨从1月5日的18:45开始,到1月6日的07:00停止,期间有短暂的停止.气温在降雨前为9.5℃左右,在降雨开始后下

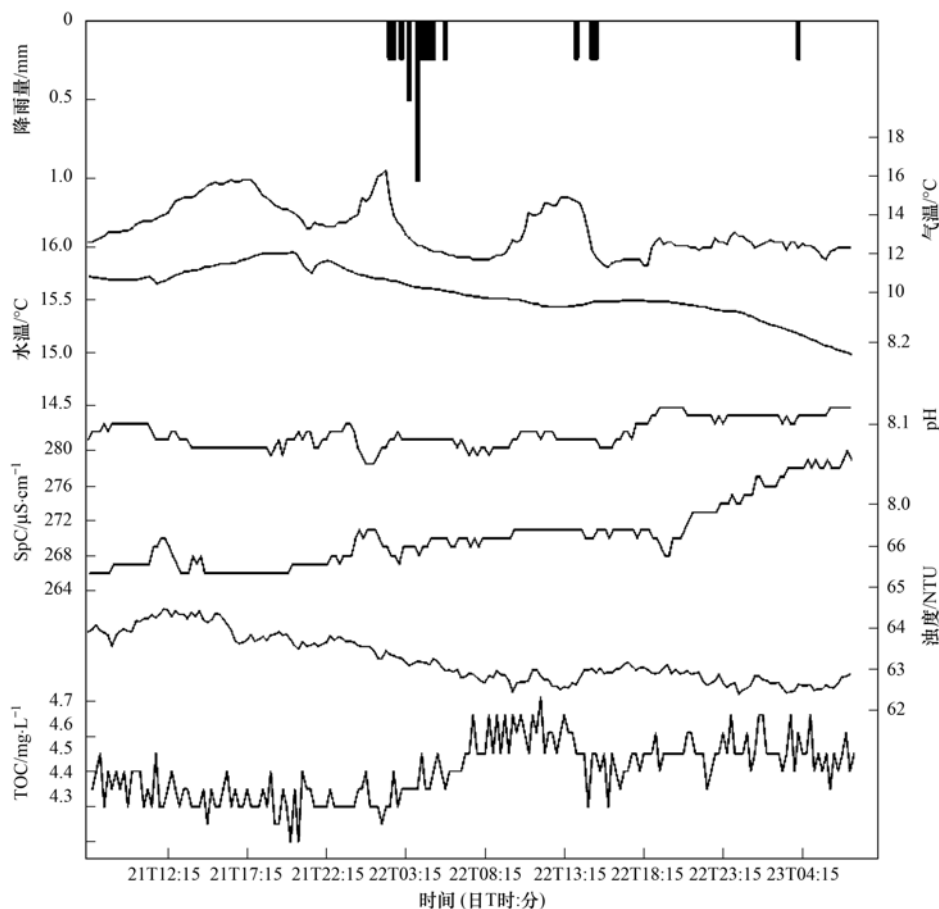


图4 小雨条件下地下水 TOC 和各水文地球化学指标变化过程(2015 年 2 月 21 ~ 23 日)

Fig. 4 Variation in TOC and hydrogeochemistry of groundwater under the condition of light rain during 21th-23th February, 2015

降,在降雨结束后达到最低值 6.4℃. 地下水 SpC 在 1 月 6 日 11:30 开始上升,从降雨前的 284 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 上升到最大值 353 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,反映出明显的土壤 CO_2 效应^[30];即大量土壤 CO_2 在雨水的挤压下进入岩溶裂隙或管道,并溶蚀碳酸盐岩,从而促使地下水的 SpC 值升高;6 h 之后 SpC 达到平稳变化状态. 地下水 pH 在降雨结束 4 h 左右出现降低趋势,在 1 月 6 日的 18:00 降到最低值 8.2,反映了雨水的稀释效应^[30];1 h 后 pH 开始升高,反映了地下水的溶蚀过程增强,1 h 后稳定在 8.3 左右. 地下水 TOC 浓度从 1 月 5 日 22:15 开始上升,相对于降雨出现时间延迟了 4 h 左右,在降雨完全停止后出现最大值 5.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,然后开始下降,在 1 月 6 日的 10:15 降到最低值 4.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,随后表现出上升的趋势,6 h 后达到稳定状态(5.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 浊度对降雨的滞后时间为 9 h 左右,2 h 后稳定在 52.0 NTU 左右. 地下水 TOC 浓度和浊度达到稳定状态时,其值都高于降水前的值(分别升高了 0.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、9.2 NTU). 地下水 TOC 浓度和浊度对中等降雨强度的响应过程反映

出降雨对流域土壤物质的选择性携带,土壤中的水溶性有机碳等物质快速响应降雨过程(4 h),而土壤颗粒物(含悬浮颗粒物)在降雨达到一定强度时才随径流进入地下河道(9 h);随着降雨量和流量增加也在某种程度上稀释了水溶性物质(有机碳 TOC 等),但整个过程来看前者的影响程度明显强于后者,导致 TOC 含量表现出整体升高趋势^[31];而土壤颗粒物则没有表现出稀释过程,随着降雨量和流量增加地下水中土壤颗粒(含悬浮颗粒物)浓度增高,导致地下水浊度的增高^[32].

3.2.3 大雨条件下地下水 TOC 输出和水文地球化学指标变化过程

图 6 是大雨条件下地下水 TOC 浓度和水文地球化学指标对降雨的响应过程. 5 月 11 日流域总降雨量为 34.0 mm,为大雨级别;降雨从 5 月 11 日的 03:15 开始,持续到 04:45,另外在 12:45 有一场小的降雨,降雨量为 0.3 mm. 地下水 pH 在降雨开始后立即出现下降,从 8.1 下降到 8.0,反映了降雨的稀释作用^[30],但在降雨结束 4 h 左右后开始回

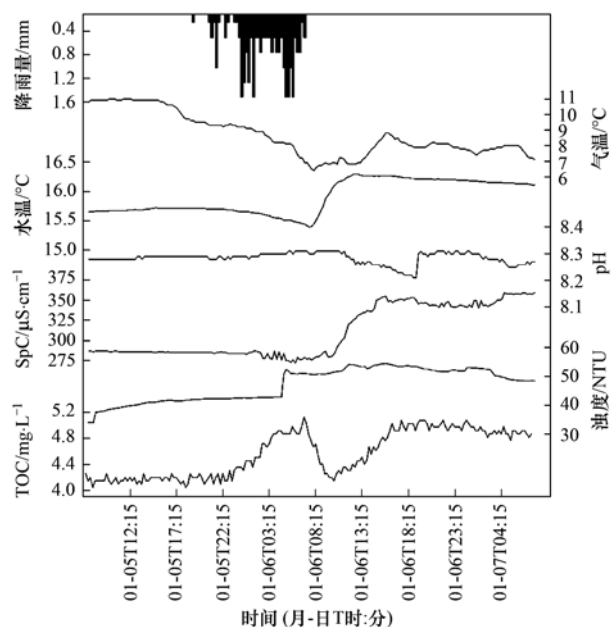


图5 中雨条件下地下水 TOC 和水文地球化学指标变化过程(2015 年 1 月 5~7 日)

Fig. 5 Variation in TOC and hydrogeochemistry of groundwater under the condition of moderate rain during 5th-7th January, 2015

升,达到最大值 8.2 后平稳变化,表现为地下水的溶蚀过程增强; SpC 在降雨开始后立即出现上升,从 $308 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 上升到 $356 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,之后保持稳定变化趋势,表明土壤 CO_2 效应明显^[30]. pH 变化幅度仅为 0.1 个 pH 单位, SpC 的变化幅度可达到 $50 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 左右,说明土壤 CO_2 效应起主要控制作用. 地下水 TOC 浓度在降雨出现前基本稳定在 $3.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但在降雨开始后迅速升高,上升到最大值 $4.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,之后保持了稳定变化的状态; 浊度在降雨开始后同样迅速上升,降雨开始 1 h 左右从降雨前的 40.1 NTU 上升到最大值 59.2 NTU,但之后呈缓慢下降趋势,在 5 月 11 日 18:15 左右稳定在 45.5 NTU 左右. 由于在大雨条件下,降雨强烈且集中, TOC 浓度和浊度几乎同时对降雨发生响应并且响应迅速,表现出明显的活塞效应^[30],强降雨将土壤中的水溶性物质和颗粒性物质同时带入地下河中, TOC 浓度在降雨期间以及降雨之后没有出现下降的趋势,浊度虽然在降雨之后下降,但仍然比降雨前要高,说明在大雨条件下主要是降雨对土壤中的水溶性及颗粒性物质的冲刷作用.

3.2.4 暴雨条件下地下水 TOC 和水文地球化学指标的变化过程

图 7 是暴雨条件下地下水 TOC 和水文地球化学指标对降雨的响应过程. 此次总降雨量达到 68.3 mm,其中 6 月 1 日的日降雨量为 61.2 mm,已

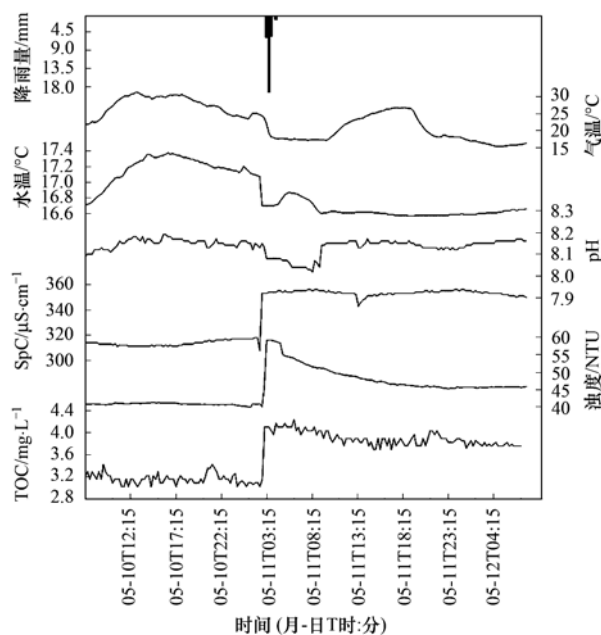


图6 大雨条件下 TOC 和各水文地球化学指标变化过程(2015 年 5 月 10~12 日)

Fig. 6 Variation in TOC and hydrogeochemistry of groundwater under the condition of heavy rain during 10th-12th May, 2015

经达到暴雨级别. 降雨过程可以分为 3 个阶段,第一阶段从 6 月 1 日的 06:00~11:30,降雨量为 57.4 mm. 在此阶段中,气温对降雨响应快速,降雨一出现就立即下降,从降雨前的 27°C 下降到降雨后的 22.4°C. 浊度在降雨出现 3 h 左右开始上升,从降

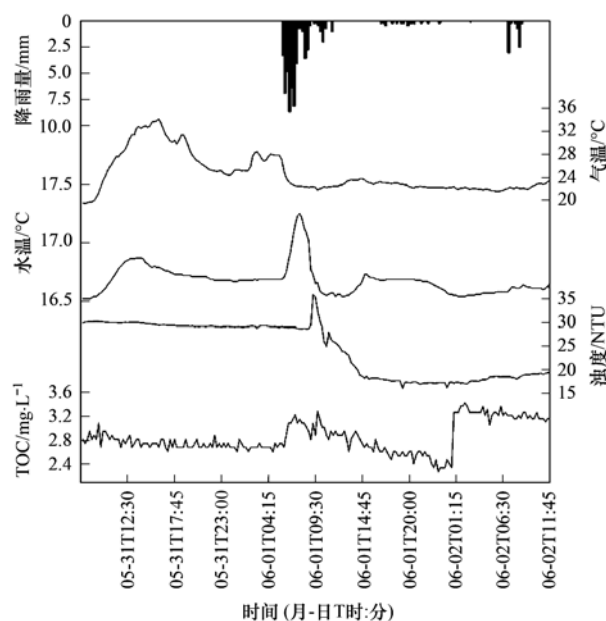


图7 暴雨条件下地下水 TOC 和各水文地球化学指标变化过程(2015 年 5 月 31 日~6 月 2 日)

Fig. 7 Variation in TOC and hydrogeochemistry of groundwater under the condition of storm rain during 31th May-2nd June, 2015

雨前的 28.9NTU 上升到 09:15 的 35.9NTU,表现出明显的活塞效应^[30]; TOC 在降雨前一直稳定在 $2.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,降雨开始 3 h 左右上升了 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 浊度和 TOC 浓度在降雨出现后几乎同时出现上升,表现了降雨对土壤中颗粒性和水溶性有机物的冲刷,但浊度和 TOC 浓度在上升 1 h 左右后又开始下降,浊度到第二阶段降雨结束时只有 16.1NTU,而 TOC 浓度只有 $2.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均低于降雨前的相应值,表现出明显的稀释效应. 第二阶段从 6 月 1 日的 17:00~23:45,降雨量为 3.8 mm,第三阶段从 6 月 2 日的 07:15~09:00,降雨量为 7.1 mm. 第二和第三阶段气温、水温和浊度没有发生明显的变化, TOC 在第二阶段的降雨结束 1 h 左右后出现了上升的趋势,上升幅度达到 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与第一阶段 TOC 的变化幅度相比有了很大的提高,可能是因为降雨的冲刷作用起主导作用.

3.2.5 大暴雨条件下地下水 TOC 和水文地球化学指标变化过程

图 8 是大暴雨条件下地下水 TOC 和水文地球化学指标的变化情况. 6 月 16~18 日这 3 d 总降雨量为 112.2 mm,其中 6 月 17 日降雨量为 106.1

mm,属于大暴雨的级别. 从图 8 中可以看出,气温在降雨开始 1 h 后下降,在 6 月 17 日的 08:00 降到最小值 21.1°C ,然后在降雨后期开始上升. TOC 和浊度均在降雨出现后立即表现出上升的趋势,在 6 月 17 日的 07:30 达到最大值 $3.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 21.1NTU,表现出明显的活塞效应,之后一直呈下降趋势,稀释效应出现, TOC 和浊度整体变化幅度分别为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 8NTU,均低于降水前的相应值. 地下水 pH 在降雨开始 6 h 左右出现了下降,然后在 6 月 17 日 01:00 又有一次短时间的下降,维持了大约 6 h,然后有了小幅度的上升,相反,SpC 在降雨开始 7 h 左右出现了上升,之后稳定在 $422 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,说明 CO_2 效应起主要作用.

3.3 基于主成分回归模型的地下水 TOC 输出的影响因素分析

对重庆雪玉洞地下水化学指标进行主成分分析,选取特征根大于 1 的 4 个主成分,其载荷、方差贡献率、累积方差贡献率见表 2. 其中,4 个主成分的方差贡献率分别为 48.778%、15.831%、12.883%、7.172%,累积方差贡献率为 84.664%,包含了水化学指标的大部分信息.

表 2 各水文化学指标的载荷、特征根及方差贡献率

Table 2 Component loadings, characteristic roots and variance contribution rates of the hydrogeochemical parameters of groundwater

项目	1	2	3	4
浊度	0.653	0.331	-0.017	0.455
气温	-0.313	0.656	-0.260	-0.515
降雨量	0.019	0.209	0.949	-0.093
地下河流量	-0.419	0.531	0.041	0.370
pH	-0.523	-0.693	0.110	-0.019
SpC	0.729	0.257	-0.090	0.294
Ca^{2+}	0.564	0.173	-0.136	0.072
HCO_3^-	0.925	0.198	0.131	0.051
NO_3^-	0.698	0.258	-0.010	0.153
SO_4^{2-}	0.739	0.228	-0.041	0.145
K^+	-0.250	0.112	0.933	0.008
Na^+	0.877	0.347	0.092	0.150
Mg^{2+}	0.849	0.292	-0.128	0.261
Cl^-	-0.555	0.634	-0.084	-0.212
特征根	7.317	2.375	1.932	1.076
方差贡献率/%	48.778	15.831	12.883	7.172
累积方差贡献率/%	48.778	64.609	77.492	84.664

提取的前 4 个主成分与表达式分别为:

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= 0.241X'_1 - 0.116X'_2 + 0.007X'_3 - 0.155X'_4 - 0.193X'_5 + 0.270X'_6 + 0.210X'_7 + 0.342X'_8 + \\
 &\quad 0.258X'_9 + 0.273X'_{10} - 0.92X'_{11} + 0.324X'_{12} + 0.314X'_{13} - 0.205X'_{14} \\
 Z_2 &= 0.215X'_1 + 0.426X'_2 + 0.136X'_3 + 0.345X'_4 - 0.450X'_5 + 0.167X'_6 + 0.112X'_7 + 0.128X'_8 + \\
 &\quad 0.167X'_9 + 0.148X'_{10} + 0.073X'_{11} + 0.225X'_{12} + 0.189X'_{13} + 0.411X'_{14}
 \end{aligned}$$

$$Z_3 = -0.012X'_1 - 0.187X'_2 + 0.683X'_3 + 0.029X'_4 + 0.079X'_5 - 0.065X'_6 - 0.098X'_7 + 0.094X'_8 - \\ 0.007X'_9 - 0.029X'_{10} + 0.671X'_{11} + 0.066X'_{12} - 0.092X'_{13} - 0.060X'_{14} \\ Z_4 = 0.439X'_1 - 0.496X'_2 - 0.090X'_3 + 0.357X'_4 + 0.018X'_5 + 0.283X'_6 + 0.069X'_7 + 0.049X'_8 + \\ 0.147X'_9 + 0.140X'_{10} + 0.008X'_{11} + 0.145X'_{12} + 0.252X'_{13} - 0.204X'_{14}$$

式中, $X'_i (i=1, 2, \dots, 14)$ 表示原始指标值经过标准化后的数值. 设 μ 为 X_i 的均值, σ 为 X_i 的标准差,

$$\text{则 } X'_i = \frac{X_i - \mu}{\sigma}.$$

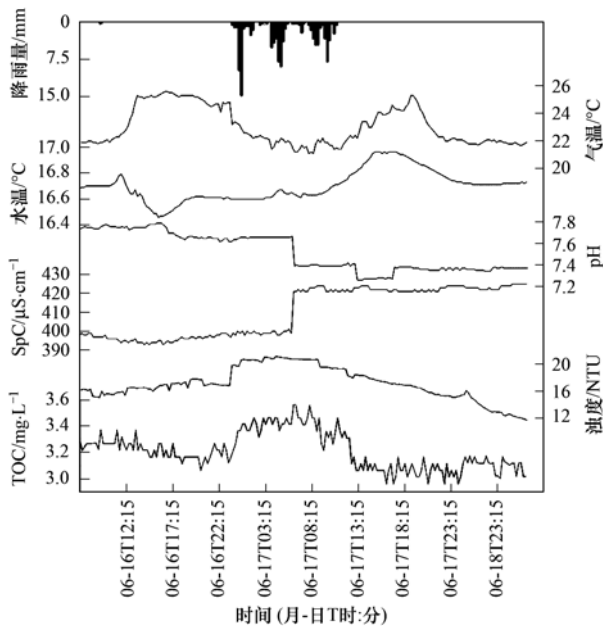


图8 大暴雨条件下 TOC 和各水文地球化学指标变化趋势(2015 年 6 月 16~18 日)

Fig. 8 Trends of TOC and hydrogeochemistry under the condition of rainstorm in 16th-18th June, 2015

主成分分析通过构造原指标的线性组合得到一组互不相关且能够反映原指标大部分信息的新变量. 从其中挑选前几个变量作为自变量, 进行多元线性回归分析, 可以在解决原指标多重共线性问题的同时保持了原变量的大部分信息. 基本过程为: 将前 4 个主成分 (Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4) 代替原自变量进行多元回归分析. 以 Y 为因变量 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 进行多元线性回归分析, 建立回归模型为:

$$Y = 4.473 + 0.01Z_1 + 0.044Z_2 + \\ 0.020Z_3 + 0.072Z_4$$

从回归结果看, 调整后的判定系数 $\overline{R^2} = 0.840$, 说明模型总体拟合效果比较好, 且能通过 F 检验 ($F = 24.049$) 和 t 检验 ($t_1 = 2.160$ 、 $t_2 = 5.852$ 、 $t_3 = 2.436$ 、 $t_4 = 7.417$), 回归模型具有统计学意义. 将主成分 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 转化为原指标变量, 得到因

变量 Y 与原始指标 X_1 、 X_2 、 $\dots$ 、 X_{14} 的线性回归方程:

$$Y = 2.985 + 0.124X_1 - 0.029X_2 + 0.303X_3 + \\ 0.260X_4 - 0.097X_5 + 0.003X_6 + 0.012X_7 + \\ 0.002X_8 + 0.037X_9 + 0.031X_{10} + 0.018X_{11} + \\ 0.013X_{12} + 0.014X_{13} + 0.002X_{14}$$

从最终回归方程可以看出, 流域降雨量 (X_3)、地下河流量 (X_4) 和浊度 (X_1) 对地下水 TOC 输出具有明显的正向作用, 而流域气温 (X_2) 和地下水 pH (X_5) 对 TOC 的输出呈反向促进作用.

随着降雨的增加, 流域土壤侵蚀增强, 由于岩溶流域特殊的水文地质结构, 一方面地下河流量对降水的响应迅速, 随着降水增加而快速增大, 同时土壤中大量的有机物质沿着发育的岩溶管道或裂隙随雨水一起进入到地下水中促使地下水 TOC 浓度升高^[33,34], 另外由于流量增加和流速增大, 地下水的扰动加剧可能会造成地下水底沉积物中的有机物再悬浮而导致 TOC 浓度的升高^[35]; 同时随着流域侵蚀作用加强, 大量的泥沙等颗粒物质也进入地下水中, 地下水浊度明显增加. 但随着流量增加, 稀释效应将导致地下水 TOC 浓度和浊度的降低. 同时, 由于雨水具有较低的 pH 值, 因此, 降水增加会导致地下水 pH 值会降低, 因而地下水 pH 对地下水 TOC 输出的反向作用也间接反映了降水/流量对流域 TOC 输出的正向促进作用. 而温度的反向促进作用主要反映在不同季节地下水 TOC 浓度的差异, 温度低的冬季由于降水少、流量低, 浓缩效应明显, 地下水中 TOC 浓度高, 而温度高的夏季, 尽管有机物的分解加速, 会导致地下水 TOC 浓度升高^[33,34], 但由于降水和流量的增加, 稀释效应导致夏季地下水 TOC 浓度的降低.

4 结论

(1) 雪玉洞岩溶流域地下水文地球化学指标表现出明显的季节变化, SpC 在冬季低、夏季高, 反映了土壤 CO_2 效应; pH 冬季高、夏季低, 受夏季降雨带来的稀释效应影响明显; TOC 和浊度冬夏季高、春秋低, 反映了冬季的浓缩效应和夏季降雨效应的影响.

(2) 地下水 TOC 和水文地球化学指标对降雨

表现出明显的响应过程,但地下水 TOC 对不同降雨强度的响应过程有明显差异,整体来说,TOC 在降雨过程中表现出上升的趋势,而暴雨过后受稀释效应影响呈现下降趋势。

(3)主成分回归分析表明,地下水 TOC 的变化主要是受到降雨和流量因素的控制。随着降雨量的增大,土壤中的有机物质被携带进入到地下水中,致使地下水 TOC 浓度升高;同时随降水的增加,地下水流量增加和流速增大,地下水的扰动加剧引起地下河底沉积物中的有机物再悬浮也会导致 TOC 浓度的升高。pH 对地下水 TOC 输出的反向作用也间接反映了降水/流量对流域 TOC 输出的正向促进作用。而温度对 TOC 呈反向促进关系主要表现在 TOC 的季节变化上,温度低的冬季降水少,浓缩效应明显,地下水的 TOC 浓度高,而温度高的夏季,降水和流量的增加,稀释效应导致夏季地下水 TOC 浓度的降低。

参考文献:

- [1] 袁道先,朱德浩,翁金桃,等. 中国岩溶学[M]. 北京:地质出版社,1994. 1-13.
- [2] 卢耀如,张凤娥,刘长礼,等. 中国典型地区岩溶水资源及其生态水文特性[J]. 地球学报,2006, 27(5): 393-402.
- [3] 袁道先,蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆:重庆出版社,1988. 3-27.
- [4] Mattsson T, Kortelainen P, R       A. Export of DOM from boreal catchments: impacts of land use cover and climate [J]. Biogeochemistry, 2005, 76(2): 373-394.
- [5] Kortelainen P, Mattsson T, Fin     L, et al. Controls on the export of C, N, P and Fe from undisturbed boreal catchments, Finland [J]. Aquatic Sciences, 2006, 68(4): 453-468.
- [6] 梁成菊. 青岛近海有机碳的分布特征及影响因素[D]. 青岛:中国海洋大学,2008.
- [7] K       S, Buffam I, Jonsson A, et al. Photochemical and microbial processing of stream and soil water dissolved organic matter in a boreal forested catchment in northern Sweden [J]. Aquatic Sciences, 2002, 64(3): 269-281.
- [8] Haque S E, Tang J W, Bounds W J, et al. Arsenic geochemistry of the great dismal swamp, Virginia, USA: possible Organic Matter controls [J]. Aquatic Geochemistry, 2007, 13(4): 289-308.
- [9] Jansson M, Bergstrom A K, Blomqvist P, et al. Allochthonous organic carbon and phytoplankton/bacterioplankton production relationships in lakes [J]. Ecology, 2000, 81(11): 3250-3255.
- [10] 任文祥,武开业,雷鹏,等. 水源地水体中总有机碳的测定[J]. 科技信息,2009, (31): 16, 39.
- [11] Sarkkola S, Hoivusalo K, Laur     A, et al. Trends in hydrometeorological conditions and stream water organic carbon in boreal forested catchments [J]. Science of the Total Environment, 2009, 408(1): 92-101.
- [12] Freeman C, Evans C D, Monteith D T, et al. Export of organic carbon from peat soils [J]. Nature, 2001, 412(6849): 785.
- [13] Erlandsson M, Buffam I, F       J, et al. Thirty-five years of synchrony in the organic matter concentrations of Swedish rivers explained by variation in flow and sulphate [J]. Global Change Biology, 2008, 14(5): 1191-1198.
- [14] Hongve D, Ri     G, Kristiansen J F. Increased colour and organic acid concentrations in Norwegian forest lakes and drinking water-a result of increased precipitation? [J]. Aquatic Sciences, 2004, 66(2): 231-238.
- [15] Preston M D, Eimers M C, Watmough S A. Effect of moisture and temperature variation on DOC release from a peatland: conflicting results from laboratory, field and historical data analysis [J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(7): 1235-1242.
- [16] Monteith D T, Stoddard J L, Evans C D, et al. Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry [J]. Nature, 2007, 450(7169): 537-540.
- [17] Rodgers M, O'Connor M, Robinson M, et al. Suspended solid yield from forest harvesting on upland blanket peat [J]. Hydrological Processes, 2011, 25(2): 207-216.
- [18] Worrall F, Burt T P. Trends in DOC concentration in Great Britain [J]. Journal of Hydrology, 2007, 346(3-4): 81-92.
- [19] Cummins T, Farrell E P. Biogeochemical impacts of clearfelling and reforestation on blanket-peatland streams: II. major ions and dissolved organic carbon [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 180(1-3): 557-570.
- [20] Cumberland S A, Baker A. The freshwater dissolved organic matter fluorescence-total organic carbon relationship [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(16): 2093-2099.
- [21] 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.
- [22] Tissier G, Perrette Y, Dzikowski M, et al. Seasonal changes of organic matter quality and quantity at the outlet of a forested karst system (La Roche Saint Alban, French Alps) [J]. Journal of Hydrology, 2013, 482(9): 139-148.
- [23] 蒲俊兵,沈立成,王翱宇,等. 重庆丰都雪玉洞水文地球化学指标的时空变化研究[J]. 中国岩溶,2009, 28(1): 49-54.
- [24] Schnegg P A. An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement [J]. Groundwater and Human Development, 2002, 3: 1484-1488.
- [25] Savoy L. Use of natural and artificial reactive tracers to investigate the transfer of solutes in karst systems [D]. Geneva: Universit     de Neuch    tel, 2007.
- [26] MacCraith B, Grattan K T V, Connolly D, et al. Cross comparison of techniques for the monitoring of total organic carbon (TOC) in water sources and supplies [J]. Water Science

- & Technology, 1993, **28**(11-12): 457-464.
- [27] 唐守正. 多元统计分析方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1984.
- [28] 辜子寅. 基于主成分回归模型在江苏省农民增收研究中的应用[J]. 统计教育, 2009, (4): 21-24.
- [29] 王凤康, 王晓晓, 任坤. 重庆雪玉洞地下河水文地球化学特征及其影响因素[J]. 地下水, 2014, **36**(4): 58-62.
- [30] Liu Z H, Li Q, Sun H L, *et al.* Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: soil CO₂ and dilution effects [J]. Journal of Hydrology, 2007, **337**(1-2): 207-223.
- [31] 陶澍, 梁涛, 徐尚平, 等. 伊春河河水溶解态有机碳含量和输出通量的时空变化[J]. 地理学报, 1997, **52**(3): 254-261.
- [32] 杨平恒, 袁道先, 袁文昊, 等. 以 PCA 揭示降雨期间岩溶地下水文地球化学的形成[J]. 科学通报, 2010, **55**(9): 788-797.
- [33] Ryder E, de Eyto E, Dillane M, *et al.* Identifying the role of environmental drivers in organic carbon export from a forested peat catchment [J]. Science of the Total Environment, 2014, **490**: 28-36.
- [34] Butturini A, Sabater F. Seasonal variability of dissolved organic carbon in a Mediterranean stream [J]. Biogeochemistry, 2000, **51**(3): 303-321.
- [35] 程远月, 郭卫东, 胡明辉. 近岸沉积物再悬浮期间所释放溶解有机物的荧光特征[J]. 地球化学, 2008, **37**(1): 51-58.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 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	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行