

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

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

我国4个WMO/GAW本底站大气CH ₄ 浓度及变化特征	方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳	(2917)
我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源	李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙	(2924)
2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析	李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海	(2932)
厦门市冬春季灰霾期间大气PM ₁₀ 中多环芳烃的污染特征及来源分析	钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红	(2939)
气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用	王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J	(2946)
松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征	张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超	(2953)
河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究	赵亚娟,龚巍巍,栾胜基	(2960)
印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选	马英歌	(2967)
烹调油烟中挥发性有机物的排放初探	何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕	(2973)
生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究	胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟	(2979)
分期布液生物滴滤床净化H ₂ S废气性能研究	刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪	(2987)
粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究	孟阳,王书肖	(2993)
太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价	刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁	(3000)
巢湖水质与流域农业投入的关联性研究	张燕,高翔,张洪	(3009)
巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性	李如忠,李峰,周爱佳	(3014)
巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价	刘恩峰,杜巨昌,羊向东,沈吉	(3024)
巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性	陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼	(3031)
丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究	雷沛,张洪,单保庆	(3038)
水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响	刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤	(3046)
平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究	杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波	(3051)
江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析	刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功	(3057)
太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价	甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩	(3064)
南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究	刘静,路风,杨廷钊,徐娜,王田妮	(3070)
珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系	何洪威,周达诚,王保强,梁艳红	(3076)
东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价	王若师,许秋瑾,张炯,魏群山,颜昌宙	(3083)
深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究	孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉	(3089)
福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响	高文华,杜永芬,王丹丹,高抒	(3097)
渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨	蔡文倩,刘录三,乔飞,林岍璇,周娟	(3104)
地下水污染防治区划体系构建研究	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮	(3110)
北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(3117)
川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO ₃ ⁻ 的存储和运移	杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风	(3124)
改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究	董锡臻,石宝友,解岳,王东升	(3132)
水溶液中臭氧和溴离子的反应研究	俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇	(3139)
HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布	张晗,董秉直	(3144)
不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSC _s)产生机制研究	卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才	(3152)
不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响	况烨,周琰,王清萍,陈祖亮	(3160)
多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水	李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶	(3167)
三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究	徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮	(3172)
改性花生壳对水中镉的动态吸附研究	龙腾,易筱筠,党志	(3177)
硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能	王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军	(3182)
海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型	罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰	(3189)
营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复	张著,高大文,袁向娟,勾倩倩	(3197)
生物表面活性剂强化污泥水解的研究	易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平	(3202)
厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定	刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波	(3208)
阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究	李绍峰,朱静,李铁晶	(3214)
农业废物堆肥中高产漆酶新菌株的分离鉴定及酶学性质研究	任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明	(3220)
糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定	李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云	(3228)
餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析	刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕	(3236)
共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究	吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳	(3241)
<i>Geobacter sulfurreducens</i> 对汞的甲基化及其影响因素研究	邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳	(3247)
单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应	武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷	(3253)
金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价	杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新	(3261)
环境激素氯菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响	董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵	(3266)
地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究	金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳	(3272)
焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯化特征	刘敬勇,孙水裕	(3279)
城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例	于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞	(3288)
NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析	连静,刘俊新	(3295)
《环境科学》征订启事(3037)	《环境科学》征稿简则(3151)	信息(2999,3030,3096,3227)

川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中 NO_3^- 的存储和运移

杨平恒¹, 袁道先^{1,2}, 任幼蓉³, 谢世友¹, 贺秋芳¹, 胡晓风³

(1. 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; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所国土资源部岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 3. 重庆市国土资源和房屋管理局, 重庆 400015)

摘要: 为了研究 NO_3^- 在岩溶含水系统中的存储和运移规律, 对降雨条件下重庆川东平行岭谷区青木关地下河系统的水化学动态进行在线监测和高密度采样测试, 结合 NO_3^- 的月动态变化, 并利用主成分分析方法. 结果表明, 降雨期间地下河中的 NO_3^- 与全 Fe、全 Mn、 Al^{3+} 是两组不同来源的元素, 在含水系统中表现出不同的地球化学行为. NO_3^- 从地表输入后随土壤水下渗存储于岩溶非饱和带的裂隙、孔隙和溶隙等含水介质中, 而全 Fe、全 Mn、 Al^{3+} 则是地表受雨水侵蚀的土壤随地表径流通过落水洞、竖井等通道, 以集中流的形式灌入地下河造成的. 进而将 NO_3^- 在岩溶含水系统中的运移过程分为输入存储、快速输出和再输入存储这 3 个理想的阶段. 在外部条件大致相同的情况下, 非饱和带的岩溶发育程度是影响降雨期间地下河中 NO_3^- 浓度变化的关键因素. 降雨条件下存储于非饱和带的 NO_3^- 很容易被释放出来, 破坏地下水生态环境, 严重威胁着当地群众的健康安全. 需要加强岩溶生态系统管理工作, 改善土地利用方式, 科学施肥, 有效控制地下水营养成分的地表输入.

关键词: 岩溶地下水; 非饱和带; 地球化学; NO_3^- ; 降雨条件; 青木关

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)09-3124-08

Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan

YANG Ping-heng¹, YUAN Dao-xian^{1,2}, REN You-rong³, XIE Shi-you¹, HE Qiu-fang¹, HU Xiao-feng³

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 3. Land and Resource & Housing Management Bureau of Chongqing, Chongqing 400015, China)

Abstract: In order to investigate the nitrate storage and transport in the karst aquifer system, the hydrochemical dynamics of Qingmuguan underground river system was monitored online by achieving high-resolution data during storm events and monthly data in normal weather. The principal component analysis was employed to analyze the karst water geochemistry. Results showed that nitrate in Jiangjia spring did not share the same source with soluble iron, manganese and aluminum, and exhibited different geochemical behaviors. Nitrate was derived from land surface and infiltrated together with soil water, which was mainly stored in fissure, pore and solution crack of karst unsaturated zone, whereas soluble iron, manganese and aluminum were derived from soil erosion and directly recharged the underground river through sinkholes and shafts. Nitrate transport in the karst aquifer system could be ideally divided into three phases, including input storage, fast output and re-inputting storage. Under similar external conditions, the karstification intensity of vadose zone was the key factor to determine the dynamics of nitrate concentrations in the groundwater during storm events. Nitrate stored in the karst vadose zone was easily released, which would impair the aquatic ecosystem and pose seriously threats to the local health. Thus, to strengthen the management of ecological system, changing the land-use patterns and scientifically applying fertilizer could effectively make a contribution to controlling mass nutrient input from the surface.

Key words: karst groundwater; unsaturated zone; geochemistry; nitrate; storm events; Qingmuguan

自 20 世纪 70 年代以来,地下水 NO_3^- 污染一直是世界范围内普遍存在的环境问题,对人类健康和生态环境构成严重的威胁^[1~5]. 饮用水中的 NO_3^- 浓度过高,将会造成人类一系列的健康问题,如婴儿易得高铁血红蛋白血症,成人则易得消化系统癌^[6,7]. 另外,水体中 NO_3^- 的浓度过高,很可能导致水体富营养化^[8]. 因而世界卫生组织和各个国家陆

续制定了饮用水 NO_3^- 浓度标准(以 N 计),如美国、中国规定的上限是 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[9,10]. 而农业活动是

收稿日期: 2011-11-17; 修订日期: 2012-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41103068, 41072192); 2011 年度重庆市国土房管局科技计划项目; 西南大学博士基金项目(SWU111009); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2012B005)

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

地下水 NO_3^- 的主要来源^[3, 11~17], 垃圾场渗滤液、城市污水、干湿沉降等也可能是地下水 NO_3^- 的来源之一^[18~20].

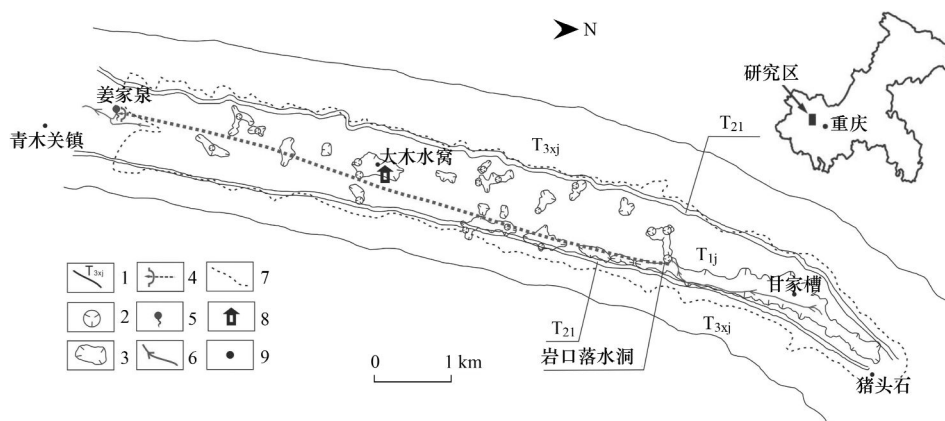
我国西南地区(滇、黔、桂、渝、湘、鄂、川等省市区)的岩溶总面积约有 50 万 km^2 ^[21], 岩溶地下水在这些地区的经济社会发展中起着至关重要的作用. 由于土壤层薄甚至缺失, 地表污染物很容易通过落水洞、竖井等连接地表和地下的通道, 直接进入岩溶含水层. 加之岩溶含水介质具有不均匀性的特点^[22, 23], 管道、大裂隙等含水介质发育, 地下水流速极快, 进入的污染物没有经过充分的自净化, 在极短的时间内向地下河出口或以泉的形式排泄. 因此, 与非岩溶含水层相比, 岩溶系统更具开放性, 岩溶含水层对外界环境更具敏感性^[24]和脆弱性^[25~27], 受到人类活动的影响更为严重. 正是岩溶系统的开放性和含水介质的不均匀性, 降雨可加速地下水系统内部的雨水、地表水与地下水之间的转化^[28], 使得岩溶水文系统的补给(扩散流和集中流)、径流(非饱和带和饱和带)、排泄(扩散流和集中流)特征明显^[29~31]. 降雨尤其是暴雨后的岩溶地下水所携带的水文地球化学信息, 能够很好地反映岩溶地表地下系统的结构和特征^[32, 33], 因而降雨期是研究和了解岩溶动力系统的重要阶段.

目前国内外已有大量的学者对岩溶地下水中的 NO_3^- 进行了研究, 主要包括其浓度动态变化^[34~38], 及利用 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素来确定地下水 NO_3^- 的来源^[14, 17, 39]等. 然而, 由于岩溶含水介质的不均匀性, 加之地表土壤的自然属性和土壤 N 循环过程非

常复杂^[11, 38], 对于 NO_3^- 在岩溶含水系统中的存储和运移过程, 尤其是对降雨条件下地下水 NO_3^- 浓度的变化原因了解甚少. 因而本研究通过监测重庆青木关地下河系统地下水地球化学对降雨事件的响应, 以及地表和地下水的地球化学月动态变化, 分析地下河水中 NO_3^- 动态变化特征, 并结合其他地球化学指标来揭示 NO_3^- 在岩溶含水层中的存储、运移过程及影响因素. 这将有助于对岩溶地下水 NO_3^- 浓度变化进行有效的预测, 同时对于岩溶地下水资源的合理开发和利用也有着积极的指导意义.

1 研究区概况

青木关地下河系统位于重庆境内的川东平行岭谷区华梁山帚状褶皱束温塘峡背斜中段, 行政位置处于北碚区、沙坪坝区和璧山县的交界处. 研究区是西南大学 2007 年建立的岩溶动力系统野外观测站. 区内碳酸盐岩地层主要由下三叠统嘉陵江组(T_{1j})厚层块状灰岩、白云岩、白云质灰岩夹角砾状灰岩, 及中三叠统雷口坡组(T_{21})白云质灰岩、白云岩及泥灰岩, 夹角砾状灰岩及灰绿、黄绿色页岩组成. 碳酸盐岩地层被两侧上三叠统须家河组(T_{3sj})灰色长石石英砂岩夹灰黑色炭质页岩及煤层包围. 碳酸盐岩地层为背斜核部, 须家河组地层为背斜两翼. 由于岩性差异, 导致背斜成山, 向斜成谷, 表现为“一山二岭一槽”的典型岩溶槽谷地貌. 研究区内地势呈北高南低, 碳酸盐岩地层内发育着一条自 NNE 向 SSW 流动的地下河, 直线距离长约 7.4 km (图 1). 地下河最北端的入口为虎头村的岩口落水洞, 沿途不断接受两侧地表水通过落水洞集中流补



1. 地层界线及代号; 2. 落水洞; 3. 洼地; 4. 地下河及出口; 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 Schematic hydrogeologic map of Qingmuguan underground river system

给,以及非饱和带的裂隙、孔隙、溶隙水的扩散流补给,流域面积约 13.4 km². 地下河主要在流域最南端的姜家泉(海拔约 320 m)出露^[40],注入青木溪,最终流入嘉陵江.

通过染色剂示踪试验和流量衰减法计算得到,研究区岩溶管道介质的平均直径在 2.27 ~ 2.72 m^[41],但其储水空间占整个研究区地下空间的比例不到 10%,而岩溶裂隙、孔隙和溶隙等含水介质形态非常发育,其比例达 90% 以上^[41,42],在水资源的存储和调节上起到了非常重要的作用.

研究区属于亚热带湿润季风型气候,多年平均降水量为 1 250 mm,多年平均气温为 16.5℃. 土地利用类型主要为林地,占流域面积的 82%,主要分布在山坡两侧;水田面积占流域面积的 6%,主要分布在流域上游的甘家槽洼地;旱地面积占流域面积的 8%,主要分布在上中游的洼地内或其边缘的坡地上. 区内土壤覆盖以地带性黄壤和非地带性石灰土为主.

研究区上游甘家槽洼地水田主要施用合成化肥,如复合肥和尿素等,施肥期主要在 5 月中下旬和 7 月下旬,施肥量约为 700 kg·(hm²·a)⁻¹. 从岩口落水洞至姜家龙洞之间的区域内,以旱地为主,主要农作物为玉米和蔬菜,施肥期主要在 5 月中下旬,施肥种类有粪肥与氮磷钾肥,施肥量约为 800 kg·(hm²·a)⁻¹. 因而,区内地下水 NO₃⁻ 的潜在污染源为农业施肥、土壤有机氮矿化污水,以及人类和家禽的粪便^[43,44].

2 研究方法

本研究选取 2008 年 4 月下旬和 5 ~ 6 月降雨条件下姜家泉的地球化学动态为分析对象,辅助以 2007 年 4 月 ~ 2009 年 7 月期间姜家泉和岩口落水洞地表水的地球化学月动态变化数据.

2.1 野外仪器在线记录

为了准确记录岩溶地下水地球化学对降雨的响应,在姜家泉安装了 WGZ-1 型光电数字水位计(重庆华正水文仪器有限公司)、NITRATAXplus sc 型在线硝氮分析仪(美国 HACH 公司)和 CTD300 型多参数自动记录仪(澳大利亚 Greenspan 公司). WGZ-1 型光电数字水位计监测实时水位(利用水位与流量的数学关系,将水位换算成流量),精度为 1 mm. NITRATAXplus sc 型在线硝氮分析仪测定 NO₃⁻ 的浓度,精度为 0.01 mg·L⁻¹,数据采集间隔为 15 min,监测 2008 年 5 ~ 6 月降雨条件下姜家泉的

NO₃⁻ 浓度. CTD300 型多参数自动记录仪测定电导率,精度为 0.1 μS·cm⁻¹,数据采集间隔为 15 min. 另外,在流域内设有 HOBO 小型自动气象站(美国 ONSET 公司),观测区内的降雨量,精度为 ±1.0%.

2.2 野外水样采集步骤和方法

月动态变化:每月采集岩口落水洞地表水、姜家泉水样,采样尽量避开降雨,以降低雨水对水化学成分的影响. 降雨期动态变化:在 2008 年 4 月下旬的降雨期间,根据姜家泉水位变化情况,每 1 ~ 2 h 取 1 次泉水样,取样测试指标包括 NO₃⁻、全 Fe、全 Mn 和 Al³⁺,共取 82 件水样. 保存和运送方法按文献^[45].

2.3 实验室测试分析方法

NO₃⁻ 测试方法参考文献^[46]. 全 Fe、全 Mn 和 Al³⁺ 使用 ICP-OES Optima 2100DV (美国 PerkinElmer 公司)测定,仪器稳定性:1 h 内 RSD < 1%,相对标准偏差 RSD ≤ 0.5%. 水样野外采集后于 10 d 内在西南大学地球化学与同位素实验室、岩溶环境微生物实验室分析完毕.

2.4 主成分分析法

利用降维的思想,将大量具有一定相关关系的变量重新组合成几个互不相关的综合指标,替代原来的多个变量,从而使得分析变得相对容易. 这种方法被广泛地用在地球化学研究上^[47~52],其具体原理见文献^[53],计算在 SPSS 16.0 软件中运行完成.

3 研究结果

3.1 地表水和地下水中 NO₃⁻ 浓度的对比分析

非饱和带自上而下主要包括土壤层、表层岩溶带,以及位于表层岩溶带与饱水带之间的裂隙、孔隙和溶隙等含水介质. 除土壤层外,其余部分构成了岩溶非饱和带.

从月动态变化的结果来看,姜家泉和岩口落水洞 NO₃⁻ 的平均浓度分别是 22.50 mg·L⁻¹ 和 3.85 mg·L⁻¹ (图 2),前者的浓度大约是后者的 5.8 倍,说明地下河水中的 NO₃⁻ 并非主要是上游地表径流补给而来,应该还有其它来源. 通过对研究区 7 种不同土地利用方式下的土壤剖面采样测试,发现其土壤水溶液中 NO₃⁻ 的平均浓度为 40.38 mg·L⁻¹^[43],远高于地表水中 NO₃⁻ 的浓度(3.85 mg·L⁻¹). 因而土壤水溶液通过岩溶非饱和带下渗补给地下河,成为姜家泉水 NO₃⁻ 浓度高于入口岩口落水洞地表

水的主要原因,下文将作进一步的讨论.

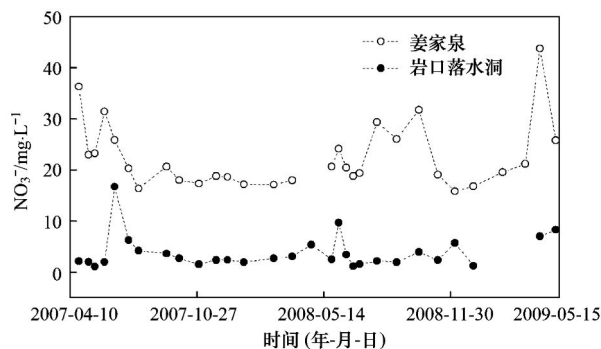


图2 姜家泉和岩口落水洞的 NO_3^- 浓度的月动态变化

Fig. 2 Monthly variation of nitrate concentration at Jiangjia spring and Yankou sinkhole

3.2 降雨条件下地下水地球化学的动态响应

图3为研究区2008年4月下旬姜家泉地球化学指标对两场降雨(storm1和storm2)的变化响应过程. 在storm1和storm2期间,电导率分别在流量到达最大值前的3.75 h和3.67 h到达顶峰,表现为活塞效应(图3). 此时 NO_3^- 与电导率一样,表现出非常明显的峰值,并呈较好的正相关关系(图3). 而全Fe、全Mn、 Al^{3+} 与流量变化表现得极为一致,随流量而变化,表现为极好的正相关关系(图3).

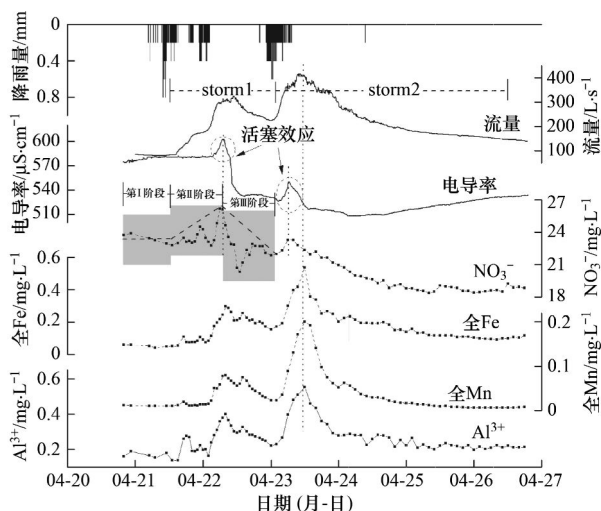


图3 降雨条件下姜家泉水文地球学变化

Fig. 3 Variation of hydrochemistry at Jiangjia spring during storm events

2008年5~6月姜家泉在线记录 NO_3^- 的浓度变化与电导率变化非常一致,随降雨表现出明显的动态变化特性,且在不同降雨场次期间地下水的电导率和 NO_3^- 所出现的3个峰值(F1、F2和F3)对应性非常好,表现为活塞效应(图4).

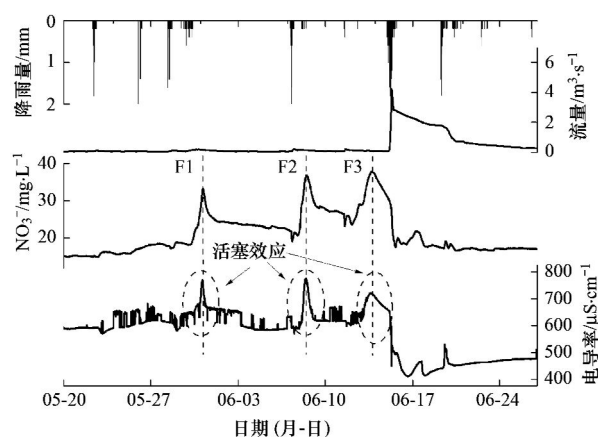


图4 降雨条件下姜家泉的 NO_3^- 与电导率动态变化

Fig. 4 Variation of nitrate concentration and specific conductance at Jiangjia spring during storm events

3.3 主成分分析

对2008年4月下旬降雨期间的地球化学指标进行主成分分析^[52],并绘制第一主成分与第二主成分的载荷相关图(图5). 表明全Fe、全Mn、 Al^{3+} 和流量在第一主成分中有着较高的载荷,分别为0.903、0.811、0.811和0.849,而 NO_3^- 、电导率在第二主成分中有着较高的载荷,分别是0.929、0.755.

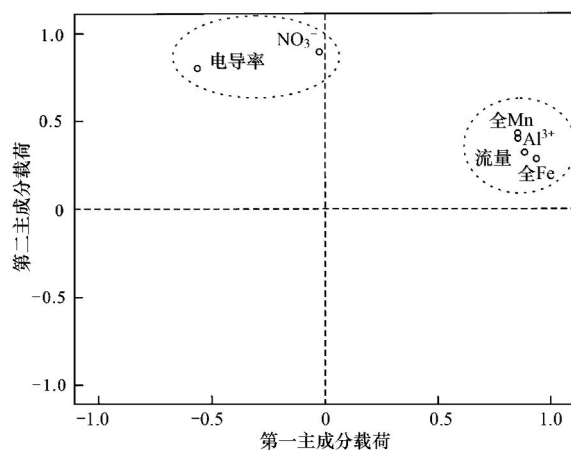


图5 主成分载荷图^[52]

Fig. 5 Component loadings of variables in principle component 1 and 2

4 分析与讨论

4.1 地下水中部分化学组分的来源

从图5可知,在第一主成分中全Fe、全Mn、 Al^{3+} 、流量有着极高的载荷,说明这些指标的地球化学行为极为相似. 流量与全Fe、全Mn、 Al^{3+} 的浓度有着极好的正相关(图3),且全Fe、全Mn、 Al^{3+} 浓度在storm2期间的浓度总体上要大于

storm1 期间,而 storm2 期间的流量要大于 storm1 (图 3),说明这 3 种元素的浓度随流量的增大而上升,是土壤受到降雨和地表水侵蚀后,随着地表径流通过落水、竖井等通道以流入、灌入式补给地下河而造成的。

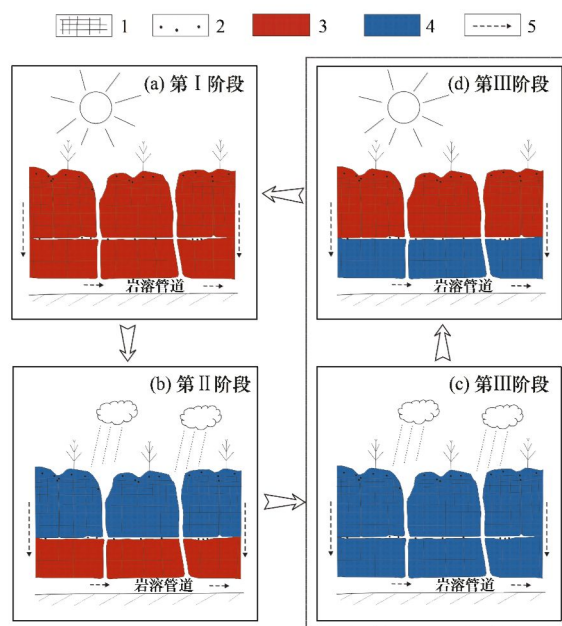
在第二主成分中 NO_3^- 和电导率有着较高的载荷(图 5),说明这两种指标之间有着密切的关系,表现出极为相似的地球化学行为。众所周知,电导率是水岩相互作用程度的直接表现^[32, 52],在碳酸盐岩系统中,地下水在岩溶非饱和带的滞留时间越长,矿化度和电导率也越高。而 NO_3^- 是农业活动、动物粪便、动植物体腐烂后的产物,极易溶于水。研究表明, NO_3^- 一旦进入土壤根系层以下,反硝化作用明显降低甚至停止^[54],很容易造成 NO_3^- 在非饱和带的积累。所以 NO_3^- 通过土壤层渗透进入岩溶非饱和带,存储于高电导率的岩溶裂隙、孔隙和溶隙水中,并以扩散流的形式补给地下河。而在降雨期间,高电导率、高 NO_3^- 浓度的岩溶非饱和带地下水在雨水水头压力的作用下,快速地补给地下河。因而在降雨条件下,姜家泉的 NO_3^- 浓度与电导率的变化趋势非常一致,在第二主成分中 NO_3^- 和电导率表现出较高的载荷,且表现为明显的活塞效应(图 3、4)。

因此, NO_3^- 与全 Fe、全 Mn、 Al^{3+} 是两组不同来源元素,在含水层中表现出不同地球化学行为。降雨期间地下水中的 NO_3^- 是来自非岩溶饱和带,而全 Fe、全 Mn、 Al^{3+} 则是地表降雨造成的土壤侵蚀而带来。

4.2 岩溶含水系统中 NO_3^- 的运移模式

根据以上的分析,在岩溶裂隙、孔隙和溶隙等非饱和带含水介质发育的研究区,可以总结出 NO_3^- 在岩溶含水层中的运移模式。为了方便讨论,大致可以分为以下 3 个阶段(图 6)。

输入存储阶段(第 I 阶段):在非降雨条件下,由于地表人类施用氮肥和有机肥、人畜粪便以及土壤有机氮的矿化、硝化作用等形成的 NO_3^- ,随前场降雨形成的土壤水下渗,储存于岩溶非饱和带的裂隙、孔隙和溶隙等介质中, NO_3^- 几乎充满整个非饱和带[图 6(a)]。此时岩溶非饱和带的水是来自上一场或上几场的降雨,称之为“老水”(old water)。岩溶非饱和带中富含 NO_3^- 的老水以持续稳定的扩散流形式向饱水带——地下河(岩溶管道)补给。地下河在接受老水补给的同时,还接受地表水通过落



1. 岩溶非饱和带; 2. 土壤层; 3. 高 NO_3^- 浓度的地下水;
4. 低 NO_3^- 浓度的地下水; 5. 水流方向

图 6 NO_3^- 在岩溶含水系统中的存储和运移模式

Fig. 6 Model of nitrate storage and transport in the karst aquifer system

水洞、竖井等通道以集中流的形式持续稳定补给。但由于地表水中 NO_3^- 的浓度较非饱和带低得多,对地下河中 NO_3^- 的浓度起到了较强的稀释作用。因而地下河中 NO_3^- 的浓度较土壤水低得多,且处于相对稳定的状态(图 3)。

快速输出阶段(第 II 阶段):降雨开始后,雨水渗入土壤,逐渐向裂隙、孔隙和溶隙等岩溶非饱和带含水介质渗透[图 6(b)]。将本场降雨在非饱和带形成的渗流称为“新水”(new water)。岩溶非饱和带高 NO_3^- 浓度、高矿化度的老水在新水的水头压力作用下,加快了其向地下河运移和补给的速度,导致地下河 NO_3^- 的浓度、电导率逐渐上升,表现为“活塞效应”(图 3)。此时老水在岩溶非饱和带中的范围逐渐缩小,新水的范围逐渐扩大,慢慢占据岩溶非饱和带[图 6(b)]。另外,由于雨水中 NO_3^- 的浓度低^[42],相对于土壤水来说可以忽略不计,对岩溶非饱和带中 NO_3^- 的浓度起到稀释作用,加之新产生的 NO_3^- 来不及供应,故而岩溶非饱和带新水中 NO_3^- 的浓度较老水低得多。

再输入存储阶段(第 III 阶段):当降雨持续一定的时间,或当降雨结束后,非饱和带中富含 NO_3^- 的老水基本排尽,低 NO_3^- 浓度的新水占据了整个非饱

和带[图 6(c)]. 随后新水替代老水开始补给地下河,使得地下河中 NO_3^- 的浓度逐渐降低(图 3). 而后,由于外界环境又逐渐输入新产生的 NO_3^- ,随土壤水向下渗流[图 6(d)]. 随着时间的推移,含有高浓度的 NO_3^- 渗流渐渐占据整个非饱和带,待下场降雨来临后,非饱和带中的新水相对于降雨则成了老水,返回到第 I 阶段.

当然,这 3 个阶段只是一种理想的模式. 由于降雨强度具有很大不确定性,很可能存在一场降雨未必能将存储于岩溶非饱和带中的 NO_3^- 完全冲入地下河,需要一场甚至若干场降雨才能将岩溶非饱和带的 NO_3^- 完全冲入地下河. 如,2008 年 4 月下旬研究区非饱和带的 NO_3^- 虽然经历了 storm1 降雨的“洗礼”,但在 storm2 期间还出现升高的趋势,这表明一场 storm1 降雨不能将岩溶非饱和带中的 NO_3^- 完全冲入地下河.

4.3 NO_3^- 在岩溶含水系统中运移的影响因素

影响降雨期间地下水 NO_3^- 浓度变化的因素有很多,有岩溶含水层内在的因素,如补给、径流、排泄特征;也有外在的因素,如地表土地利用状况、农业施肥程度、土壤有机质含量,等. 在降雨条件下,具有不同内在和外在条件的岩溶含水层,其地下水 NO_3^- 所表现出来的动态变化也不尽一致,有的地下水 NO_3^- 浓度降低^[35,36],表现为雨水的稀释效应,而有的地下水 NO_3^- 浓度急剧升高^[55],表现为活塞效应,但大部分研究者将地下水中 NO_3^- 浓度的变化归结为外在的因素. 在此,假设外在因素大致相同的前提下,笔者讨论一下地下河中 NO_3^- 浓度变化的主控因素.

当非饱和带的扩散流通道如岩溶裂隙、孔隙和溶隙等岩溶形态极为发育时(处于岩溶化的初期),则其可存储大量高 NO_3^- 浓度的老水,对地下水资源量起到非常好的调蓄作用. 在降雨条件下,岩溶非饱和带的老水在水头压力作用下,短时间内大量地补给地下河,使得地下河 NO_3^- 的浓度升高,表现为活塞效应. 当地下河接受岩溶非饱和带老水的补给量逐渐减少后,新水补给占主导地位后,地下河中 NO_3^- 的浓度才会逐渐降低.

而当非饱和带的岩溶裂隙、孔隙和溶隙演化为落水洞、竖井和大裂隙等岩溶形态时,即集中流通道的岩溶形态极为发育(处于岩溶化的中晚期),则岩溶非饱和带失去了地下水存储的良好场所,对地下水资源量的调蓄能力非常弱. 在降雨条件下,落

水洞、竖井和大裂隙等岩溶形态成为雨水、地表水直接灌入地下河的通道,地下河水动态表现出暴涨暴落特性,其 NO_3^- 的浓度将会迅速降低,表现为稀释效应.

因而,在外部条件大致相同的前提下,非饱和带的岩溶发育程度是影响降雨期间地下河中 NO_3^- 浓度升高还是降低的关键因素.

4.4 生态环境效应

研究区中下游地下河水是当地居民的重要饮用水源地,区内经济社会较为落后,降雨期间的地下水未经处理便直接作为饮用水和生活用水. 久旱无雨条件下的岩溶非饱和带地下水中存储了大量的 N 等营养物质. 一旦遇到一定强度的降雨,岩溶非饱和带中的 N 等营养物质将被释放出来,造成地下河水中营养成分浓度急剧升高,引起地下河的水质恶化,严重影响着当地群众身体健康和生命安全. 同时还很可能会破坏地下水生态系统,引起排泄区水体的富营养化,成为当地群众健康安全、地下水环境和排泄区的一颗“定时炸弹”. 因而要从控制 N 等营养成分的源头抓起,改善和转变地表的土地利用方式,进行科学农业施肥,限制农业生态系统营养成分的输出,做好岩溶生态系统管理工作,有效控制岩溶流域地表营养物质的输入.

5 结论

(1)通过对比青木关地下河出口(姜家泉)和入口(岩口落水洞)地表水的 NO_3^- 浓度,结合主成分分析结果,表明地下河中 NO_3^- 来自岩溶非饱和带的岩溶裂隙、孔隙和溶隙等含水介质.

(2)将 NO_3^- 在岩溶含水系统中的运移过程分为 3 个理想的阶段. 输入存储阶段:岩溶地下河接受非饱和带富含 NO_3^- 的裂隙、孔隙和溶隙水的补给,同时也接受低 NO_3^- 浓度的地表水补给,地下河中的 NO_3^- 浓度稳定;快速输出阶段:在降雨条件下岩溶非饱和带的老水在降雨形成新水的水头压力下,以较短的时间内补给地下河,使得地下河中 NO_3^- 的浓度逐渐升高,非饱和带中的老水逐渐被新水所取代;再输入存储阶段:在非降雨或持续降雨条件下,非饱和带中的新水补给饱和带,地下河中的 NO_3^- 浓度降低,便趋于稳定,同时新输入的 NO_3^- 逐渐向非饱和带迁移.

(3)在外部条件大致相同的情况下,非饱和带的岩溶发育程度是影响地下水中 NO_3^- 浓度在降雨期间升高或降低的关键因素.

(4) 岩溶含水系统的 N 等营养物质的生态环境效益不容忽视,应做好岩溶生态系统管理工作,从源头控制污染源。

参考文献:

- [1] Burden R J. Nitrate contamination of New Zealand aquifers: A review[J]. *New Zealand Journal of Science*, 1982, **25**(3): 205-220.
- [2] Birkinshaw S J, Ewen J. Nitrogen transformation component for SHETRAN catchment nitrate transport modelling[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, **230**(1-2): 1-17.
- [3] Joosten L T A, Buijze S T, Jansen D M. Nitrate in sources of drinking water? Dutch drinking water companies aim at prevention[J]. *Environmental Pollution*, 1998, **102**(S1): 487-492.
- [4] Moore K B, Ekwurzel B, Esser B K, *et al.* Sources of groundwater nitrate revealed using residence time and isotope methods[J]. *Applied Geochemistry*, 2006, **21**(6): 1016-1029.
- [5] Spalding R F, Exner M E. Occurrence of nitrate in groundwater-a review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, **22**(3): 392-402.
- [6] 蔡鹤生, 刘存富, 周爱国, 等. 饮用水 NO_3^- 污染与食管癌发病率及死亡率相关性探讨——以河南省林州安阳地区为例[J]. *地质科技情报*, 2002, **21**(1): 91-94.
- [7] Wolfe A H, Patz J A. Reactive nitrogen and human health: acute and long-term implications[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2002, **31**(2): 120-125.
- [8] Croll B T, Hayes C R. Nitrate and water supplies in the United Kingdom[J]. *Environmental Pollution*, 1988, **50**(1-2): 163-187.
- [9] 822-B-00-001, Drinking water standards and health advisories[S].
- [10] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [11] Ling G, El-Kadi A I. A lumped parameter model for Nitrogen transformation in the unsaturated zone[J]. *Water Resource Reserch*, 1998, **34**(2): 203-212.
- [12] Almasri M N. Nitrate contamination of groundwater: A conceptual management framework[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2007, **27**(3): 220-242.
- [13] Yadav S N. Formulation and estimation of nitrate-nitrogen leaching from corn cultivation[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, **26**(3): 808-814.
- [14] Wells E R, Krothe N C. Seasonal fluctuation in $\delta^{15}\text{N}$ of groundwater nitrate in a mantled karst aquifer due to macropore transport of fertilizer-derived nitrate[J]. *Journal of Hydrology*, 1989, **112**(1-2): 191-201.
- [15] Liu Z J, Hallberg G R. Spatial relations between row crops and nitrate contamination in groundwater[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2002, **134**(1-4): 367-385.
- [16] Boumans L J M, Fraters D, Van Dreht G. Nitrate leaching in agriculture to upper groundwater in the sandy regions of the Netherlands during the 1992-1995 period[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, **102**(1-3): 225-241.
- [17] Panno S V, Hackley K C, Hwang H H, *et al.* Determination of the sources of nitrate contamination in karst springs using isotopic and chemical indicators[J]. *Chemical Geology*, 2001, **179**(1-4): 113-128.
- [18] MacQuarrie K T B, Sudicky E A, Robertson W D. Numerical simulation of a fine-grained denitrification layer for removing septic system nitrate from shallow groundwater[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2001, **52**(1-4): 29-55.
- [19] Batziaka V, Fytianos K, Voudrias E. Leaching of nitrogen, phosphorus, TOC and COD from the biosolids of the municipal wastewater treatment plant of Thessaloniki[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **140**(1-3): 331-338.
- [20] Almasri M N, Kaluarachchi J J. Implications of on-ground nitrogen loading and soil transformations on ground water quality management[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, **40**(1): 165-186.
- [21] 袁道先, 朱德浩, 翁金桃, 等. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [22] 袁道先. 岩溶水不均匀性程度差异的产生条件[A]. 见: 中国地质学会第二届岩溶学术会议论文选集编辑组. 中国地质学会第二届岩溶学术会议论文选集[C]. 北京: 科学出版社, 1982. 77-85.
- [23] 袁道先. 论岩溶水的不均匀性[A]. 见: 广西水文工程地质队. 岩溶地区水文地质及工程地质工作经验汇编[C]. 北京: 地质出版社, 1978. 1-19.
- [24] 袁道先, 刘再华, 林玉石, 等. 中国岩溶动力系统[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [25] Witkowski A J, Rubin K, Kowalczyk A, *et al.* Groundwater vulnerability map of the Chrzanow karst-fissured Triassic aquifer (Poland)[J]. *Environmental Geology*, 2003, **44**(1): 59-67.
- [26] Trček B, Veselič M, Pezdič J. The vulnerability of karst springs-a case study of the Hubelj spring (SW Slovenia)[J]. *Environmental Geology*, 2006, **49**(6): 865-874.
- [27] Bakalowicz M. Karst groundwater: a challenge for new resources[J]. *Hydrogeology Journal*, 2005, **13**(1): 148-160.
- [28] Long A J. Hydrograph separation for karst watersheds using a two-domain rainfall-discharge model[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **364**(3-4): 249-256.
- [29] Smart P L, Friederich H. Water movement and storage in the unsaturated zone of a maturely karstified carbonate aquifer, Mendip Hills, England [A]. In: National Water Well Association, Ohio. Proceedings of the Conference on Environmental Problems of Karst Terrains and their Solutions [C]. Dublin OH: National Water Well Association, 1987. 59-87.
- [30] Ford D C, Williams P W. Karst geomorphology and hydrology [M]. Chichester, U K: Wiley, 2007.
- [31] White W B. Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains [M]. New York: Oxford University, 1988.
- [32] Hess J W, White W B. Storm response of the karstic carbonate aquifer of southcentral Kentucky [J]. *Journal of Hydrology*,

- 1988, **99**(3-4): 235-252.
- [33] 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 CO_2 and dilution effects [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, **337**(1-2): 207-223.
- [34] Mahler B J, Valdes D, Musgrove M, *et al.* Nutrient dynamics as indicators of karst processes: Comparison of the Chalk aquifer (Normandy, France) and the Edwards aquifer (Texas, USA) [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2008, **98**(1-2): 36-49.
- [35] Peterson E W, Davis R K, Brahana J V, *et al.* Movement of nitrate through regolith covered karst terrane, northwest Arkansas [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, **256**(1-2): 35-47.
- [36] Perrin J, Jeannin P Y, Cornaton F. The role of tributary mixing in chemical variations at a karst spring, Milandre, Switzerland [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, **332**(1-2): 158-173.
- [37] Guo F, Jiang G H. Nitrogen budget of a typical subterranean river in peak cluster karst area [J]. *Environmental Geology*, 2009, **58**(8): 1741-1748.
- [38] Iqbal M Z, Krothe N C. Infiltration mechanisms related to agricultural waste transport through the soil mantle to karst aquifers of southern Indiana, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, **164**(1-4): 171-192.
- [39] 杨琰, 蔡鹤生, 刘存富, 等. NO_3^- 中 ^{15}N 和 ^{18}O 同位素新技术在岩溶地区地下水氮污染研究中的应用——以河南林州食管癌高发区研究为例 [J]. *中国岩溶*, 2004, **23**(3): 206-212.
- [40] 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.
- [41] 杨平恒. 重庆青木关地下河系统的水文地球化学特征及悬浮颗粒物运移规律 [D]. 重庆: 西南大学, 2010. 54-55.
- [42] 扈志勇. 不同降雨过程下岩溶水文系统信息的响应研究——以重庆青木关岩溶槽谷为例 [D]. 重庆: 西南大学, 2010. 44-47.
- [43] 汪智军. 青木关岩溶流域水-土系统碳氮同位素特征研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2011. 15-38.
- [44] 汪智军, 杨平恒, 旷颖伦, 等. 基于 ^{15}N 同位素示踪技术的地下河硝态氮来源时空变化特征分析 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3548-3554.
- [45] GWI-B1, 水样采集与送检技术要求 [S].
- [46] GB/T 8538-2008, 饮用天然矿泉水检测方法 [S].
- [47] Carroll S, Goonetilleke A. Assessment of high density of onsite wastewater treatment systems on a shallow groundwater coastal aquifer using PCA [J]. *Environmetrics*, 2005, **16**(3): 257-274.
- [48] Koonce J E, Yu Z, Farnham I M, *et al.* Geochemical interpretation of groundwater flow in the southern Great Basin [J]. *Geosphere*, 2006, **2**(2): 88-101.
- [49] Lamouroux C, Hani A. Identification of groundwater flow paths in complex aquifer systems [J]. *Hydrological Processes*, 2006, **20**(14): 2971-2987.
- [50] Omo-Irabor O O, Olobaniyi S B, Oduyemli K, *et al.* Surface and groundwater water quality assessment using multivariate analytical methods: A case study of the Western Niger Delta, Nigeria [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2008, **33**(8-13): 666-673.
- [51] Rao N S, Rao J P, Subrahmanyam A. Principal component analysis in groundwater quality in a developing urban area of Andhra Pradesh [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2007, **69**(5): 959-969.
- [52] 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.
- [53] 张文霖. 主成分分析在 SPSS 中的操作应用 [J]. *市场与研究*, 2005, (12): 31-34.
- [54] Smith D I. The nature of karst aquifers and their susceptibility of pollution [A]. In: Williams P W. *Karst terrains, environmental changes, human impact* [C]. Cremlingen: zbornik, 1993. 41-58.
- [55] Vesper D J, Loop C M, White W B. Contaminant transport in karst aquifers [J]. *Theoretical and Applied Karstology*, 2001, **13**(14): 101-111.

CONTENTS

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《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9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol.33 No.9 Sep. 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

国内外公开发刊