

环境科学

(HUANJING KEXUE)

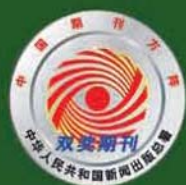
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

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 年北京市两次红色预警期间 PM _{2.5} 浓度特征	
..... 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)	
北京市冬季雾霾天人体呼吸高度 PM _{2.5} 变化特征对气象因素的响应	张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)
兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析	李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)
南京北郊冬季 PM _{2.5} 中芳香酸的测定及来源解析	张亚飞, 马嫣, 仝鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)
海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响	孔亚文, 盛立芳, 刘骞, 李秀镇 (2443)
新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价	杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)
重庆地区大气场降水氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系	温艳茹, 王建力 (2462)
湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析	
..... 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)	
河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍山为例	
..... 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)	
亚热带典型岩溶流水气界面 CO ₂ 交换通量变化过程及其环境影响	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱	
..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)	
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 荧光光谱	
..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)	
华东地区某水源水中 13 种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价	
..... 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)	
北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平	张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)
输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险	昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)
卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征	何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)
岩溶地下水水中多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)
哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性	孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)
降水对泃河水质和水体微生物的影响	卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)
不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对砷酸盐的响应	王振红, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)
布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究	景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邵义萍, 樊静静 (2577)
化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响	蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)
活性炭负载 Co ₃ O ₄ 活化过一硫酸盐降解金橙 G	王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)
碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙 G 过程及动力学	张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)
碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素	邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)
铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中 AOX、色度和 TOC 的去除效果研究	
..... 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)	
Fenton 氧化去除制药企业活性污泥中 AOX 的效果研究	陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑伟 (2625)
中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估	刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)
基于 CANON 工艺的新型 HABR 反应器生物脱氮性能研究	鲍林林, 陈婉秋 (2639)
异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究	李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)
基于高通量测序的 ABR 厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析	
..... 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)	
NUA-DAS 生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究	汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)
葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合	程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)
拉乌尔菌 sari01 的分离及其异养硝化好氧反硝化特性	颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)
海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌 SLWX ₂ 的筛选及脱氮特性	成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)
焦化废水活性污泥中降解硫化物细菌种群多样性分析	徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)
浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应	戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)
磷脂脂肪酸 (PLFA) 法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构	左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)
半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应	赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)
三峡库区消落带 N ₂ O 排放及其影响因素	李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)
不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与 N ₂ O 排放研究	高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)
冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征	易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀兰, 木志坚 (2738)
藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析	罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)
基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析	宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)
水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响	丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)
减磷施肥有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)
水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律	
..... 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)	
组配改良剂对污染稻田中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 钝化效果持续性比较	
..... 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)	
生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制	商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)
热处理天然褐铁矿制备 γ-Fe ₂ O ₃ 及其 NH ₃ -SCR 活性探究	徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)
《环境科学》征订启事 (2569) 《环境科学》征稿简则 (2576) 信息 (2744, 2769, 2790)	

河水-地下水侧向交互带地球化学特征：以重庆市马鞍溪为例

张宇^{1,2}, 杨平恒^{1,2*}, 王建力^{1,2}, 谢世友^{1,2}, 陈峰^{1,2}, 詹兆君^{1,2}, 任娟^{1,2}, 张海月^{1,2}, 刘黛薇^{1,2}, 孟元可¹

(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. 国土资源部岩溶生态环境-重庆南川野外基地, 重庆 408435)

摘要: 河水-地下水交互带是河水与地下水相互交换和混合的区域, 在河流、地下水生态和水质的保护方面具有重要作用. 为了解河水-地下水侧向交互带地球化学特征, 以重庆市马鞍溪为研究对象, 对河水及交互带的水温、溶解氧 (DO)、pH 值、电导率 (EC) 进行自动监测, 结合对水样离子浓度和交互带沉积物中元素含量的分析. 结果表明, 马鞍溪侧向交互带水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型. 监测期间交互带受河水入渗影响为主, 交互带的缓冲作用使其温度、DO、pH 值、EC 等指标变异系数较河水低. 随距河岸距离的增加, 马鞍溪侧向交互带在物理、化学、生物综合作用下形成了迅速进入缺氧状态的氧化还原环境, 以及 pH 值先降低后升高的酸碱环境. 在其影响下, K^+ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 呈下降趋势, 全 Mn、EC、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 等先上升后下降, 全 Fe、 Al^{3+} 等呈上升趋势. 受河水、地下水长期交互影响, 在距河岸约 30 cm 处的交互带沉积物中元素含量较高, 形成独特的水化学梯度. 据此可推断出马鞍溪侧向交互带边界可能在距河岸 30 ~ 50 cm 处, 其中浅层交互带的边界可能在距河岸 10 cm 左右的位置. 在河水补给地下水过程中, 河水-地下水侧向交互带对净化水质有重要作用.

关键词: 交互带; 地球化学; 梯度特征; 河水入渗; 马鞍溪; 重庆

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2478-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.009

Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing

ZHANG Yu^{1,2}, YANG Ping-heng^{1,2*}, WANG Jian-li^{1,2}, XIE Shi-you^{1,2}, CHEN Feng^{1,2}, ZHAN Zhao-jun^{1,2}, REN Juan^{1,2}, ZHANG Hai-yue^{1,2}, LIU Dai-wei^{1,2}, MENG Yuan-ke¹

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Land and Resources, Chongqing 408435, China)

Abstract: The hyporheic zone is a place where river water and groundwater mutually exchange and mix. It plays an important role in protecting the ecology and water quality of river water and groundwater. In order to study the geochemical characteristics of lateral hyporheic zone in river and ground water, water temperature, dissolved oxygen, pH, electrical conductivity were measured automatically at the hyporheic zone of Maanxi in Chongqing. The concentrations of ions in water and elements in sediment within the hyporheic zone were also analyzed. The results showed that the hydrochemical species of lateral hyporheic zone in Maanxi was $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$. Affected by the infiltration of river water, the coefficient variations of water temperature, dissolved oxygen, pH and electrical conductivity in the hyporheic zone were lower than those observed in the river under the buffer action. Along with the farther distance from the riverbank, an anoxia redox environment was formed in the hyporheic zone due to a physical, chemical and biological interactions. An acid and alkali environment was also formed with a decreasing pH trend near the riverbank and hyporheic zone. Under its influence, concentrations of K^+ , $\text{NH}_4^+\text{-N}$, NO_3^- and SO_4^{2-} decreased. Mn, electrical conductivity, and the concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} and Sr^{2+} firstly increased and then decreased, while the concentrations of Fe, Al^{3+} were elevated. Affected by the long-time interaction of river water and groundwater, the elementary concentrations in the sediment were relatively high at the place of about 30 cm away from the riverbank. This consequently formed a hydrogeochemical gradient in the hyporheic zone. The boundary of the hyporheic zone was inferred at 30 to 50 cm away from the riverbank, whereas the boundary of shallow hyporheic zone was located at 10 cm away from the riverbank. In the process of river water recharging groundwater, hyporheic zone of river and groundwater played an important role in the purification of water quality.

Key words: hyporheic zone; geochemistry; gradient feature; infiltration of river water; Maanxi; Chongqing

收稿日期: 2015-12-20; 修订日期: 2016-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41103068); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2014A016, XDJK2016D046, XDJK2016E023); 重庆市国土房管科技项目(CQGT-KJ-2014056)

作者简介: 张宇(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地球化学, E-mail: 18306005928@163.com

* 通讯联系人, E-mail: balance@swu.edu.cn

谷地貌,地势西北高,东北低^[23](图1)。马鞍溪流域内工业主要集中于上游城南新区,流域内条件较好的地区被开垦为耕地,水土流失严重,受城镇生活污水、工业废水污染严重。

研究点位于马鞍溪中游湿地公园内溪流右岸的一处河漫滩上,该段地势相对平坦,平均坡度约 7° ,河漫滩右侧阶地平均坡度约 12.5° ,植被类型为草地(图1)。

2 研究方法

2.1 实验布点

为研究河流侧向交互带地球化学特征,在河漫滩上距河岸 10 cm 起,垂直于河岸线每隔 20 cm 布直径 7.5 cm、深度 100 cm 的观测井,共 3 个(图1),观测井在河流水位以下开孔以减少对交互流的影响。监测期间对河水进行同步观测,并在距河岸 150 cm 处的阶地上设置观测井监测地下水状况(图1)。观测井编号自河流至阶地依次为 MAX1 至 MAX4。

2.2 样品采集与测试

土壤机械组成:采集各观测井 60~80 cm 深度沉积物样品,样品编号与观测井相同。自然风干后,部分样品过 50 目筛,使用比重计法分析沉积物机械组成。部分样品过 100 目筛,分别准确称取 0.10 g 样品置于微波消解罐中,加入 2.5 mL 硝酸,7.5 mL 盐酸,加盖密封,使用 Speedwave 型微波消解仪(德国 Berghof 公司)对样品进行消解,冷却后转移至 50 mL 容量瓶中,定容至标线,待测。

阳离子:用润洗好的 60 mL 高密度聚乙烯瓶采集河水及各观测井水样,用于检测阳离子,水样中滴 1:1 HNO_3 ,酸化至 pH 值 <2 后密封于暗箱,4℃保存至检测。沉积物消解样品及水样的阳离子质量浓度使用 ICP-OES Optima 2100DV(美国 PerkinElmer 公司)完成检测,仪器偏差 $<2\%$ 。为便于与水样离子浓度比较,沉积物元素含量单位由 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 换算为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

阴离子:用润洗好的 350 mL 聚乙烯瓶采集河水及各观测井水样,用于检测阴离子,水样密封于暗箱,4℃保存至检测。水样的阴离子质量浓度使用 DR2800 型便携式分光光度计(美国 HACH 公司)完成检测, NO_3^- 、 Cl^- 精度为 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SO_4^{2-} 精度为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

为进一步了解交互带的水文地球化学梯度,使用 Multi3430 便携式多参数水质分析仪(德国

WTW 公司),自动记录河水和 MAX1、MAX2 观测井入渗水的温度、pH 值、电导率(EC)、溶解氧(DO)质量浓度,其分辨率分别为 0.1°C 、 0.001 pH 单位、 $1\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,测试间隔设定为 5 min。仪器在自动记录之前校准,EC 电极用 $1412\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 标准液校准,pH 电极用 pH 值为 4.01 和 7 的两种缓冲溶液校准,DO 电极用饱和水蒸汽校准。同时,实验结束后将 EC、pH 值、DO 探头放入标准液中验证,数据偏差在 5% 以内。使用碱度试剂盒(德国 Merck 公司)现场滴定测定河水和各观测井入渗水的 HCO_3^- ,精度为 $0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。使用 DR2800 型便携式分光光度计现场测定河水和各观测井入渗水的 NH_4^+-N ,精度为 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。用 WATSPEC 计算机软件计算了各采样点水体的方解饱和指数(SIc)和 CO_2 分压($p\text{CO}_2$)。

监测期间使用位于西南大学的 CR1000 型气象站(北京天诺基业科技有限公司)自动记录监测点的温度和降雨量,其精度分别为 0.01°C 和 0.001 mm ,读数间隔设定为 10 min。

于 2015 年 10 月 13 日设置观测井并采集土样,交互带动态监测始于 2015 年 10 月 17 日 10:20,止于次日 17:20,约 31 h。监测期始末分别进行一次水位深度测量、阴阳离子水样的采集和 HCO_3^- 、 NH_4^+-N 的现场测定。各监测点水位深度以监测末期河水水位为参考。监测期间主要为阴雨天气。

3 结果与分析

3.1 马鞍溪监测点水化学特征

图 2 为马鞍溪及各观测井水化学特征。从中可以看出河水水化学类型为 HCO_3^- -Ca 型,交互带(MAX1~3)、地下水(MAX4)观测井水化学类型为 HCO_3^- -Ca·Mg 型,马鞍溪交互带各观测井水化学特征较为相似。

3.2 马鞍溪侧向交互带地球化学特征

在河流及其沉积物中的有机物浓度、交互带水动力条件、沉积物特征、温度、氧化还原环境、酸碱环境等条件共同影响下,形成了交互带独特的水物理化学梯度变化,微生物在各种生物化学反应中占有重要作用^[8,24~27]。马鞍溪受污染较为严重,河流及底泥中耗氧有机物质量浓度高,马鞍溪入嘉陵江口的 COD 达 $30.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[23],是微生物消耗氧气、硝酸盐等的重要驱动力,为交互带地球化学梯度的形成提供了条件^[8]。

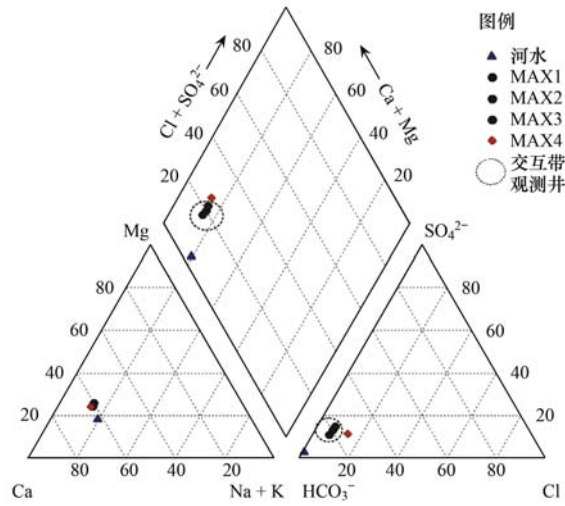


图2 马鞍溪各采样点水化学 Piper 图

Fig. 2 Piper plot for hydrochemistry of sampling points in Maanxi

3.2.1 水动力条件

图3为监测始末各项指标变化,水位变化受河水入渗、地下水以及降水补给影响. 监测初期马鞍溪水明显高于地下水,水动力条件为河水补给地下水. 监测末期各观测井水位均有不同程度的上升,距河岸30 cm处观测井(MAX2)水位上升最明显(图3),受河水入渗和降雨入渗影响明显. 距河岸50 cm处观测井(MAX3)水位变化较小,河水入渗影响较小,这说明监测期间河水入渗主要影响范围在距河岸线30 cm以内.

3.2.2 沉积物机械组成及其对交互带水化学的影响

表1为马鞍溪各观测井60~80 cm深度沉积物机械组成状况,按照我国土壤质地分类标准,距河岸10~50 cm(MAX1~3)的交互带沉积物均为黏土,主要为河流沉积所致. 距河岸150 cm(MAX4)沉积物为细沙土,呈灰紫色,为砂岩风化产物.

表1 马鞍溪交互带观测井沉积物机械组成

Table 1 Mechanical composition of sediment at the hyporheic zone in Maanxi observation wells

采样点	粒径/mm			类型
	>0.05	0.05~0.01	<0.01	
MAX1	28.61	18.97	52.42	黏土
MAX2	30.94	17.96	51.10	黏土
MAX3	28.91	19.97	51.12	黏土
MAX4	64.86	15.97	19.17	细沙土

马鞍溪交互带(MAX1~3)沉积物黏粒较多,其中靠近河岸线区域沉积物黏粒最多,对交互带水物理化学特征有重要影响. 首先,交互带内物理扰动和化学条件的变化促进沉积物中细小颗粒转化为胶体形态,土壤胶体能够吸附大量离子^[28]. 其次,在

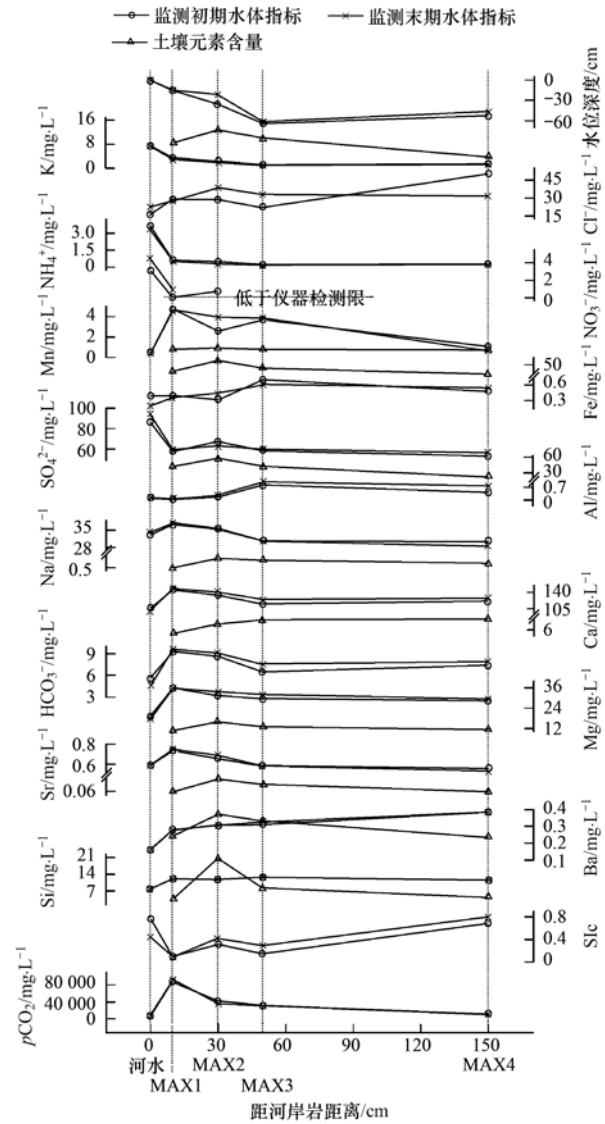


图3 马鞍溪各采样点水体及沉积物的物理化学指标变化趋势

Fig. 3 Trends of physical and chemical indexes of the water column and sediment in sampling points of Maanxi

河水入渗过程中,物理渗滤作用阻止了水中颗粒物进一步进入交互带,沉积物孔隙被填充,渗透系数降低^[29~32],有利于河水与沉积物介质以及介质中微生物的充分反应^[8,25]. 由于监测期间为雨季末期,长期的河水入渗导致入渗速度降低,交互带水动力条件较为稳定,且监测持续时间较短,各观测井离子浓度在监测期间变化较小(图3). 长期的河水入渗使大量有机物被截留在交互带中靠近河岸的区域,影响微生物的活动,进而对交互带的氧化还原环境、酸碱环境等造成影响.

沉积物质地对交互带中K⁺的质量浓度梯度产生直接影响,K⁺在运移过程中与沉积物发生吸持反应,黏粒越多,阻滞作用越明显^[33]. 同时K⁺的固定

量随沉积物 pH 值升高而增加. 故随着河水的入渗, K^+ 质量浓度逐渐降低(图 3). Cl^- 性质稳定, 不会从土壤离解、不被土壤吸附, 也不易与其他离子形成稳定化合物, 降水以及河水入渗为 Cl^- 的直接来源^[34]. 受沉积物质地影响, 雨水易于河岸带中部下渗, 监测末期, 距河岸 30 ~ 50 cm 处 (MAX2 ~ 3) 交互带水体 Cl^- 的质量浓度较初期高(图 3).

交互带沉积物中各元素与溶液中的离子也存在相互作用, Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 、全 Mn 等在马鞍溪交互带环境下易溶于土壤溶液随水迁移, 使沉积物中元素含量总体较水体低(图 3), 受 K^+ 易被吸持的影响^[33], 沉积物中 K 元素含量较水体高. 研究区沉积物富铁铝化作用较强, 马鞍溪交互带环境下全 Fe、 Al^{3+} 迁移能力较弱, 形成难溶的化合物, 导致沉积物中 Fe、Al 元素含量远高于水体(图 3). 交互带沉积物元素含量梯度受河水-地下水长期交互作用影响, 在河水入渗的边界易出现元素含量峰值. 同时河漫滩在洪水期被淹没, 河水下渗过程中, 受河漫滩内坡度、草地河岸带内较溪流边缘渗透性较好等影响^[35], 元素易在河漫滩中部的沉积物中富集. 综合作用下, 距河岸 30 cm (MAX2) 附近的沉积物中元素含量较高.

3.2.3 交互带温度特征

在交互带水动力条件下, 河水对交互带理化性质的影响大于地下水对其的影响. 河流水物理化学特征呈现较为明显的昼夜变化, 且受降雨影响较大(图 4). 16:00 ~ 20:30 及次日 15:00 ~ 17:20 天气晴朗, 20:30 至次日 02:00 出现一次较为集中的小型降雨. 气温呈现出白天升高夜晚降低的趋势, 受降雨影响, 最高气温出现在晴天, 17:30 及次日 16:30 左右(图 4). 河水水温变化趋势与气温相近, 自监测起上升至午后开始下降, 次日凌晨开始上升, 受降雨影响, 次日温度上升缓慢. 水温平均值为 23.1℃, 变异系数为 3.22% (表 2). 距河岸 10 cm、30 cm (MAX1、MAX2) 水温平均值分别为 22.3℃、22.2℃ (表 2), 说明热由河水向地下水扩散. 在河流垂向交互带内, 由于地下水温度相对稳定, 当河水补给地下水时, 随距河床距离的增加, 垂向交互带内水温变异系数缓慢降低, 当地下水补给河流时, 水温变异系数迅速降低, 交互带内温度变化进而可以反映河水和地下水的交互作用^[36]. 而 MAX1、MAX2 水温变异系数分别为 0.22%、0.20%, 较河水 (3.22%) 迅速降低(表 2), 与相同水动力条件下河流垂向交互带内温度变化状况不同, 故温度变化难

以反映出河床侧向交互带中河水、地下水的交互作用. 监测期间交互带内温度较高, 满足大多数微生物活动的热量需求, 且较为稳定的温度使微生物活动较稳定.

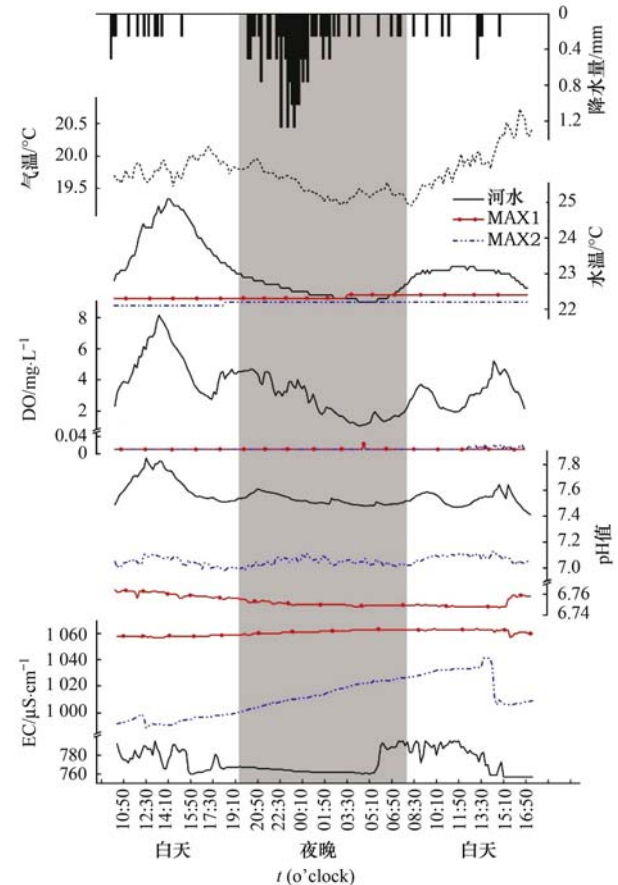


图 4 马鞍溪及其交互带水物理化学梯度变化趋势

Fig. 4 Trends of physical and chemical gradients of the water column and the hyporheic zone in Maanxi

3.2.4 交互带氧化还原环境

氧化还原作用对交互带水体水物理化学特征有重要影响, 也是交互带研究的重点^[37,38]. 马鞍溪受污染严重, 因上游工业废水、生活污水排放, 农田化肥施放以及垃圾堆放, 河水中 COD 、 NH_4^+-N 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等的质量浓度较高^[23], 较高的 COD 使水体 DO 质量浓度总体偏低, 河水 DO 平均值为 $3.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 2). 在水温、水生植物光合作用及微生物作用的共同影响下, 河水 DO 大致呈现出日出后上升, 午后下降的趋势, 在降雨影响下出现波动(图 4).

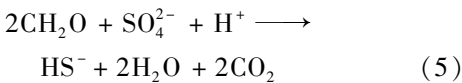
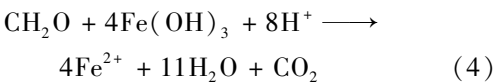
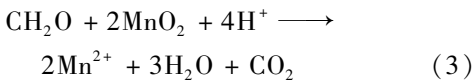
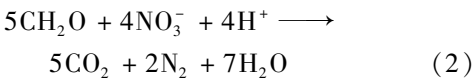
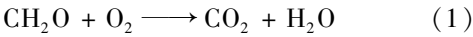
河水入渗为交互带来 DO , 入渗初期 DO 充足, 硝化作用强烈, NH_4^+-N 在交互带内被迅速转化为 NO_3^- ^[39] (图 3). 同时在有机碳充足的条件下, SO_4^{2-} 易在微生物作用下被固定为有机化合物, 另外在 pH 值较低时, 沉积物中的 Fe、Al 氧化物对 SO_4^{2-}

表 2 马鞍溪及其交互带水物理化学梯度特征

Table 2 Characteristics of physical and chemical gradients of the water column and the hyporheic zone in Maanxi

项目	水温		DO		pH 值		EC	
	平均值/℃	CV/%	平均值/mg·L ⁻¹	CV/%	平均值	CV/%	平均值/μS·cm ⁻¹	CV/%
河水	23.1	3.22	3.45	45.30	7.56	1.14	773	1.60
MAX1	22.3	0.22	0.01	14.95	6.75	0.08	1 061	0.20
MAX2	22.2	0.20	0.01	22.28	7.05	0.48	1 011	1.42

吸附较多^[40],交互带内 SO_4^{2-} 迅速降低(图 3). 氧化还原反应中氧气首先被消耗殆尽[式(1)]^[41],距河岸 10~30 cm(MAX1~2)交互带水体的 DO 平均值均为 0.01 mg·L⁻¹(表 2),且基本无变化,硝化作用被抑制^[42], NH_4^+ -N 降低缓慢(图 3). 交互带至少在距河岸 10 cm 时已经处于较为还原的环境,反硝化作用成为主要过程^[43], NO_3^- 被还原为 N_2 [式(2)], NO_3^- 在交互带内迅速降低(图 3). 距河岸 30 cm 左右 NO_3^- 低于仪器检测限. 反硝化作用进行到一定程度后,沉积物中 Mn 与 Fe 的氧化物逐渐发生还原性溶解[式(3)、(4)]^[44],使全 Mn 质量浓度在距河岸 10~30 cm(MAX1~2)较高,全 Fe 质量浓度在距河岸 50 cm(MAX3)较高(图 3). Fe、Mn 的氧化物发生还原性溶解的同时,可能使吸附在其表面的重金属被释放,进入地下水而发生迁移^[41,45]. 另外,厌氧条件下反硫化作用使 SO_4^{2-} 在交互带内继续降低[式(5)],导致 MAX2~3 水体中 SO_4^{2-} 呈下降趋势(图 3). 反硫化作用生成的 HS^- 可能与之之前解吸附的重金属结合,使之固定下来^[41]. 氧化还原作用使交互流中 H^+ 逐渐减少, Al^{3+} 受其影响不断从化合物中溶出^[46]. 在距河岸 50 cm 处交互带水体 Al^{3+} 的质量浓度达到最大值(图 3).



Petrunic 等^[44]研究表明,在交互带独特的氧化还原环境下,随着河水入渗,微生物可利用的能量逐渐减少,各元素在氧化还原反应顺序[式(1)~(5)]的影响下依次发生变化^[47]. 但因马鞍溪水入渗过程中进入相对还原环境的速度快,许多离子在交互带距河岸 10 cm 内出现较大变化,反硝化作用、

Fe、Mn 氧化物的还原性溶解、反硫化作用等反应在一定环境下可能同时进行,马鞍溪侧向交互带水体的离子变化对氧化还原顺序反映不明显.

3.2.5 酸碱环境

微生物参与还原反应的同时释放 CO_2 ,改变交互带内的酸碱环境,进一步对交互带离子浓度产生影响. 在水生植物和微生物作用下,河水的 pH 值变化趋势与 DO 相同(图 4). 河水 EC 的变化因受降雨影响,对 pH 值变化的响应不明显. 马鞍溪河岸多裸岩、农田,水土流失严重^[23],降雨将河岸的泥土颗粒带入河中,降雨增强又对河水离子浓度有稀释作用,造成河水 EC 的不规律波动(图 4).

河水 pH 值平均值为 7.56,距河岸 10 cm 处(MAX1)交互带水体 pH 值平均值降为 6.75(表 2),河水入渗时有机物被带入交互带内,微生物作用强烈,产生 CO_2 [式(1)、(2)],使 $p\text{CO}_2$ 迅速升高(图 3),pH 值降低. 在交互带酸碱环境的影响下,距河岸 10 cm 处(MAX1)水体的 SI_c 趋近于 0,促进了沉积物内方解石等碳酸盐矿物的溶解,也有利于硅酸盐矿物的溶解,同时 K^+ 与 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等发生阳离子交换作用^[33],使交互带内 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ba^{2+} 、 Sr^{2+} 、Si、 HCO_3^- 等均在距河 10 cm 处(MAX1)浓度增高(图 3). Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 为交互带水体主要离子(图 2),故酸碱环境对交互带水体的 EC 变化影响较大,河水 EC 平均值为 773 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,在沉积物机械组成、微生物作用、氧化还原环境等共同影响下 MAX1 水体的 EC 平均值上升至 1 061 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (表 2). 随河水不断入渗,微生物作用不断增强,监测期间 MAX1 水体 pH 值呈现缓慢下降的趋势,在其影响下 MAX1 水体 EC 缓慢升高,监测末期 pH 值出现小幅升高,EC 小幅下降(图 4),可能受前期降雨后雨水补给的影响.

距河岸 30 cm 处(MAX2)交互带水体 pH 平均值为 7.05(表 2),营养物质在入渗过程中受物理、化学及生物渗滤作用影响^[11],浓度逐渐降低,使微生物作用降低, $p\text{CO}_2$ 降低,pH 值、SI_c 增高(图 3),加之沉积物黏粒减少(表 1), Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、

Ba^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Si 、 HCO_3^- 等离子浓度降低, EC 平均值降为 $1\,011\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (图 3、表 2)。随距河岸近的高 EC 的交互带水入渗, 监测期间, MAX2 处 EC 呈现较大幅度的上升, 变异系数较 MAX1 大 (表 2)。受雨水补给影响, 监测末期 EC 出现较大幅度的降低, 草地河岸带内较溪流边缘渗透性较好^[35], 使 MAX2 处 EC 降低出现的时间较 MAX1 早 (图 3), 且受雨水入渗影响更大。

3.3 马鞍溪侧向交互带范围及其意义

河水-地下水相互作用的过程中, 温度、DO、pH 值等地球化学指标存在一定的梯度变化, 可以据此来确定交互带的范围, 目前主要依据温度指标的变化^[48,49], 其他指标较少涉及, 但温度变化受观测点位置、观测时间限制, 并需要足够的温度差异, 目前没有明确的阈值, 单独分析容易产生误差^[50]。同时温度对侧向交互带河水、地下水的交互作用反映较弱, 需要借助其他地球化学指标综合分析。

河流侧向交互带与垂直交互带相连, 结构相似, 也可分为浅层交互带和深层交互带。由于浅层交互带微生物活跃, 微生物作用在其中占有重要地位。交互带在河水入渗过程中具有重要的缓冲作用, 其中浅层交互带对温度、水位变化等的缓冲作用更为突出, 同时也是氧化还原环境过渡的一个区域。据此, 浅层交互带区域内各项地球化学指标变化较大, 参照马鞍溪侧向交互带的沉积物特征、温度变化、 $p\text{CO}_2$ 所指示的微生物活性、氧化还原环境等的特征, 浅层交互带主要范围在距河岸 10 cm 以内。

沉积物中元素含量的梯度变化受河水-地下水长期交互作用影响, 河水的入渗会使交互带的边界向地下水方向推移^[13], 在交互边界易发生元素的累积, 在马鞍溪侧向交互带的距河岸 30 cm 左右的沉积物中元素含量较高 (图 2)。同时 Fe 氧化物的稳定边界可以指示还原性地下水的位置, 超过 Fe 氧化物的稳定边界, 水体全 Fe 的质量浓度增加^[45]。结合监测期间水位变化状况, 可以推测马鞍溪侧向交互带深层边界在距河岸 30 ~ 50 cm 之间。

侧向交互带直接影响傍河开采的地下水水质。河水补给地下水时, 能在较短的入渗距离内缓解河水较高的 NH_4^+-N 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 对地下水水质的影响, 对水质净化具有重要意义。另外随 Fe、Mn 等氧化物的还原性溶解, 一些重金属可能从其表面解吸附, 虽然反硫化作用可能固定一部分重金属, 但马鞍溪侧向交互带氧化还原顺序性较差, 可能对地下水水质造成影响。相反, 当地下水补给河水时, 被固定

在交互带内的部分重金属可能发生溶解和迁移, 水流路径上依次发生硫化作用和硝化作用, 污染物被释放, 影响河水水质。

4 结论

(1) 监测期间马鞍溪侧向交互带主要受河水入渗影响, 交互带水化学为 HCO_3^- -Ca·Mg 型, 与河水差别较大, 交互带对河水水化学特征有较大影响。

(2) 马鞍溪侧向交互带在监测期间各监测点温度、DO、pH 值、EC 等指标变异系数较河水小, 交互带对河水变化具有较强的缓冲作用。

(3) 河水入渗过程中, 马鞍溪侧向交互带在物理、化学、生物综合作用下形成了迅速进入缺氧状态的氧化还原环境, 以及 pH 值先降低后升高的酸碱环境。 K^+ 、 NH_4^+-N 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 在吸附作用、氧化还原作用等影响下呈下降趋势, 全 Mn 先上升后缓慢下降, 全 Fe、 Al^{3+} 等呈上升趋势。pH 值的变化促进矿物溶解和沉积, 使 EC、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 等先升高后降低。受河水、地下水长期交互影响, 在距河岸 30 cm 左右的交互带沉积物中元素含量较高。形成了马鞍溪侧向交互带独特的水化学梯度。

(4) 据交互带水文地球化学梯度, 可推断马鞍溪侧向交互带边界可能在距河岸 30 ~ 50 cm 处, 其中浅层交互带的边界可能在距河岸 10 cm 以内的位置。河水补给地下水的过程中, 河水-地下水侧向交互带对净化水质有重要作用, 且河水在较短的入渗距离内便得到一定程度的净化。

致谢: 感谢西南大学地理科学学院文志林、吴泽老师, 以及于正良、李果等在实验和写作过程中的帮助。

参考文献:

- [1] Boulton A J, Findlay S, Marmonier P, *et al.* The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998, **29**: 59-81.
- [2] Packman A I, Brooks N H. Hyporheic exchange of solutes and colloids with moving bed forms [J]. *Water Resources Research*, 2001, **37**(10): 2591-2605.
- [3] 袁兴中, 罗固源. 溪流生态系统潜流带生态学研究概述 [J]. *生态学报*, 2003, **23**(5): 956-964.
- [4] Triska F J, Kennedy V C, Avanzino R J, *et al.* Retention and transport of nutrients in a third-order stream in northwestern California: hyporheic processes [J]. *Ecology*, 1989, **70**(6): 1894-1905.
- [5] Packman A I, Brooks N H. Colloidal particle exchange between stream and stream bed in a laboratory flume [J]. *Marine and*

- Freshwater Research, 1995, **46**(1): 233-236.
- [6] Krause S, Hannah D M, Fleckenstein J H, *et al.* Interdisciplinary perspectives on processes in the hyporheic zone[J]. *Ecohydrology*, 2011, **4**(4): 481-499.
- [7] 夏继红, 陈永明, 王为木, 等. 河岸带潜流层动态过程与生态修复[J]. *水科学进展*, 2013, **24**(4): 589-597.
- [8] Hartwig M, Borchardt D. Alteration of key hyporheic functions through biological and physical clogging along a nutrient and fine-sediment gradient[J]. *Ecohydrology*, 2015, **8**(5): 961-975.
- [9] Pryce D J. The hyporheic zone of Scottish rivers: its ecology, function and importance[D]. Stirling: University of Stirling, 2011.
- [10] Buxton T H, Buffington J M, Tonina D, *et al.* Modeling the influence of salmon spawning on hyporheic exchange of marine-derived nutrients in gravel stream beds[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2015, **72**(8): 1146-1158.
- [11] 滕彦国, 左锐, 王金生. 地表水-地下水的交错带及其生态功能[J]. *地球与环境*, 2007, **35**(1): 1-8.
- [12] 夏继红, 林俊强, 陈永明, 等. 国外河流潜流层研究的发展过程及研究方法[J]. *水利水电科技进展*, 2013, **33**(4): 73-77.
- [13] 潘俊, 冷特, 常玉辉, 等. 平原型水库地表水-地下水交互带特性研究——以石佛寺水库工程为例[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2013, **29**(6): 1116-1121.
- [14] Su X S, Xu W, Du S H. In situ infiltration test using a reclaimed abandoned river bed: managed aquifer recharge in Shijiazhuang City, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(12): 5017-5025.
- [15] Herzog S P, Higgins C P, McCray J E. Engineered streambeds for induced hyporheic flow: enhanced removal of nutrients, pathogens, and metals from Urban streams[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2015, **142**(1): 04015053.
- [16] 徐华山, 赵同谦, 孟红旗, 等. 河岸带地下水理化指标变化及与洪水的响应关系研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 632-640.
- [17] 徐华山, 赵同谦, 孟红旗, 等. 河岸带地下水营养元素和有机质变化及与洪水的响应关系研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 955-962.
- [18] Butturini A, Bernal S, Sabater S, *et al.* The influence of riparian-hyporheic zone on the hydrological responses in an intermittent stream[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, **6**(3): 515-525.
- [19] Boulton A J, Detry T, Kasahara T, *et al.* Ecology and management of the hyporheic zone: stream-groundwater interactions of running waters and their floodplains[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, **29**(1): 26-40.
- [20] 夏继红, 林俊强, 姚莉, 等. 河岸带的边缘结构特征与边缘效应[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2010, **38**(2): 215-219.
- [21] 钱进, 王超, 王沛芳, 等. 河湖滨岸缓冲带净污机理及适宜宽度研究进展[J]. *水科学进展*, 2009, **20**(1): 139-144.
- [22] Cardenas M B. Hyporheic zone hydrologic science: a historical account of its emergence and a prospectus[J]. *Water Resources Research*, 2015, **51**(5): 3601-3616.
- [23] 干晓瑜. 城市溪谷型湿地景观恢复与重建研究——以重庆马鞍溪湿地公园为例[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [24] Massmann G, Nogeitzig A, Taute T, *et al.* Seasonal and spatial distribution of redox zones during lake bank filtration in Berlin, Germany[J]. *Environmental Geology*, 2008, **54**(1): 53-65.
- [25] Hancock P J. Human impacts on the stream-groundwater exchange zone[J]. *Environmental Management*, 2002, **29**(6): 763-781.
- [26] Bourg A C M, Darmendrail D, Ricour J. Geochemical filtration of riverbank and migration of heavy metals between the Deûle River and the Ansereuilles alluvion-chalk aquifer (Nord, France)[J]. *Geoderma*, 1989, **44**(2-3): 229-244.
- [27] Lovley D R. Dissimilatory Fe(III) and Mn(IV) reduction[J]. *Microbiological Reviews*, 1991, **55**(2): 259-287.
- [28] Ryan J N, Elimelech M. Colloid mobilization and transport in groundwater[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1996, **107**: 1-56.
- [29] Chen X, Dong W, Ou G, *et al.* Gaining and losing stream reaches have opposite hydraulic conductivity distribution patterns[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, **17**(7): 2569-2579.
- [30] Dong W H, Ou G X, Chen X H, *et al.* Effect of temperature on streambed vertical hydraulic conductivity[J]. *Hydrology Research*, 2014, **45**(1): 89-98.
- [31] 冯斯美, 宋进喜, 来文立, 等. 河流潜流带渗透系数变化研究进展[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, **11**(3): 123-126.
- [32] 杨小全, 金光球, 李凌, 等. 河流潜流带中胶体迁移的研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2010, **30**(6): 78-83.
- [33] 占丽平, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 土壤钾素运移的影响因素研究进展[J]. *土壤*, 2012, **44**(4): 548-553.
- [34] 代晓娟, 李绪谦, 贾素萍, 等. 氯离子守恒法确定土壤生态蓄水量[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, **36**(增刊): 85-89.
- [35] 田树新. 不同河岸带土壤水分-物理性质分析[J]. *中国林副特产*, 2007, (2): 28-30.
- [36] Constantz J. Heat as a tracer to determine streambed water exchanges[J]. *Water Resources Research*, 2008, **44**(4): W00D10.
- [37] 张丽华. 傍河开采条件下河床沉积带孔隙水水化学演化规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [38] Briggs M A, Day-Lewis F D, Zarnetske J P, *et al.* A physical explanation for the development of redox microzones in hyporheic flow[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(11): 4402-4410.
- [39] 孙志高, 刘景双. 湿地土壤的硝化-反硝化作用及影响因素[J]. *土壤通报*, 2008, **39**(6): 1462-1467.
- [40] 陈中云, 闵航, 吴伟祥. 水稻田土壤硫酸盐还原活性的测定及其影响因子的研究[J]. *土壤通报*, 2003, **34**(5): 455-458.

- [41] 王璜. 鄂尔多斯沙漠高原湖泊潜流带中硫的生物地球化学特征及其分带规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [42] Haynes R J, Goh K M. Ammonium and nitrate nutrition of plants [J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 1978, **53**(4): 465-510.
- [43] Roley S S, Tank J L, Williams M A. Hydrologic connectivity increases denitrification in the hyporheic zone and restored floodplains of an agricultural stream[J]. *Journal of Geophysical Research; Biogeosciences*, 2012, **117**(G3): G00N04.
- [44] Petrunic B M, MacQuarrie K T B, Al T A. Reductive dissolution of Mn oxides in river-recharged aquifers: a laboratory column study [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **301**(1-4): 163-181.
- [45] Benner S G, Smart E W, Moore J N. Metal behavior during surface-groundwater interaction, Silver Bow Creek, Montana[J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, **29**(7): 1789-1795.
- [46] 姜应和, 周莉菊, 彭秀英. 铝在土壤中的形态及其植物毒性研究概况[J]. *草原与草坪*, 2004, (3): 16-19, 32.
- [47] Champ D R, Gulens J, Jackson R E. Oxidation-reduction sequences in ground water flow systems[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1979, **16**(1): 12-23.
- [48] Naranjo R C, Niswonger R G, Stone M, *et al.* The use of multiobjective calibration and regional sensitivity analysis in simulating hyporheic exchange[J]. *Water Resources Research*, 2012, **48**(1): W01538.
- [49] Irvine D J, Lautz L K. High resolution mapping of hyporheic fluxes using streambed temperatures: recommendations and limitations[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **524**: 137-146.
- [50] Schmidt C, Bayer-Raich M, Schirmer M. Characterization of spatial heterogeneity of groundwater-stream water interactions using multiple depth streambed temperature measurements at the reach scale [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2006, **3**(4): 1419-1446.

CONTENTS

Concentration Characteristics of PM _{2.5} in Beijing During Two Red Alert Periods	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM _{2.5} Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollutional Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM _{2.5} from the Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang	YANG Chun, Tashpolat Tiyp, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO ₂ Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co ₃ O ₄ Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrochemical Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sarI01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX ₂ from Sea Water	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA)	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N ₂ O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N ₂ O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of γ -Fe ₂ O ₃ Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行