

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟, 李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞, 李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚, 李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰, 王铁宇, 李奇峰, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)
基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)
河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓桦, 张洪, 李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

汾河源区不同景观带水文过程研究

杨永刚^{1,2}, 李彩梅¹, 秦作栋¹, 邹松兵³

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要: 目前水源区景观带尺度水文过程机制研究还非常薄弱. 针对山西汾河流域水环境恶化, 迫切需要解决的水问题. 应用同位素示踪、水文地质勘察、水化学信号等研究方法, 揭示汾河源区景观带尺度水文过程机制. 结果表明, 汾河水源区亚高山草甸带与中高山森林带是汾河源区主要径流形成区, 而疏林灌丛带与山地草原带在时间上滞后了雨季降水的汇集. 源区径流主要由降雨、地下水、积雪和冻土融水混合补给. 流域内降水很少直接产生地表径流补给河流, 而是经过各景观带下渗, 转换成壤中流、孔/裂隙水或地下径流, 最终汇入河道, 完成“补径排”水文过程. 这一研究可为汾河流域水环境恶化的遏制提供科学依据与参考, 以期实现山西清水复流和生态环境的全面修复.

关键词: 同位素; 水文过程; 景观带; 水化学; 汾河源区

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2108-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.010

Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment

YANG Yong-gang^{1,2}, LI Cai-mei¹, QIN Zuo-dong¹, ZOU Song-bing³

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: There are few studies on the hydrologic processes of the landscape zone scales at present. Since the water environment is worsening, there is sharp contradiction between supply and demand of water resources in Shanxi province. The principle of the hydrologic processes of the landscape zones in Fenhe River headwater catchment was revealed by means of isotope tracing, hydrology geological exploration and water chemical signal study. The results showed that the subalpine meadow zone and the medium high mountain forest zone were main runoff formation regions in Fenhe River headwater catchment, while the sparse forest shrub zone and the mountain grassland zone lagged the temporal and spatial collection of the precipitation. Fenhe River water was mainly recharged by precipitation, groundwater, melt water of snow and frozen soil. This study suggested that the whole catchment precipitation hardly directly generated surface runoff, but was mostly transformed into groundwater or interflow, and finally concentrated into river channel, completed the “recharge-runoff-discharge” hydrologic processes. This study can provide scientific basis and reference for the containment of water environment deterioration, and is expected to deliver the comprehensive restoration of clear-water reflowing and the ecological environment in Shanxi province.

Key words: isotope; hydrological processes; landscape zone; hydrochemical; Fenhe River Headwater Catchment

流域水文过程研究一直是水文水资源领域的一个基础问题, 同位素技术与水化学信号可为流域径流过程、路径和来源等水文过程的研究提供有效的工具^[1~4]. 国外学者多用 D 和¹⁸O 来反映从降雨到径流对水文过程的影响, 采用分割模型来进行水源划分^[5~6]. 国内学者开展了诸如降雨径流关系, 降水季节变化与水汽输送, 以及同位素高程效应等研究^[7~9]. 稳定同位素与水化学信号也被应用于研究地表与地下水的相互转换关系, 确定降雨、积雪融水、地形、蒸发等对流域水文过程的影响等方面^[5~11], 同时也被运用于水文过程的鉴别、驻留时间和水文系统特点等研究中, 其在流域水循环各环节的定性和定量研究方面起到了独特的不可替代的

作用^[12~17]. 山西汾河水源区, 垂直带谱多样, 季节性冻土、积雪、降雨、地下水和地表水均有分布, 是研究景观带尺度水文过程的重要区域. 目前汾河流域的研究工作主要集中在水资源特征与演变、水环境调查评价与水质污染、植被类型变化、降雨径流分布式水文模型、土地利用/覆被变化及其驱动力分析、流域环境变迁以及土地利用生态安全特征和生态补偿制度等方面. 对汾河流域降雨径流关系,

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2014-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201043); 国家国际科技合作专项(2012DFA20770); 山西省青年科技研究基金项目(2012021026-3); 山西省科技重大专项(20121101011)

作者简介: 杨永刚(1982~), 男, 博士后, 副教授, 主要研究方向为同位素水文学, E-mail: gangyongyang@126.com

地下水与地表水转换等水文循环规律的研究还明显不足,尤其对汾河水源区完整水文过程研究更加薄弱,流域季节性冻土、积雪、降雨等对出山径流的影响的认识还很模糊^[18~22]. 本研究应用同位素示踪、水文地质勘察、水化学信号等综合研究方法,以各景观带各种水体为对象,将季节性冻土、降雨、积雪、地下水和地表水纳入一个完整水文系统,来甄别汾河源区不同景观带的水文过程机制,以期为流域水资源评价管理和生态环境建设提供科学依据.

1 研究区概况

汾河发源地处于宁武县境内. 本研究通过对汾河源区地方志的整理和实地调查,划定汾河源区流域的范围,地理位置处于北纬 $38^{\circ}45' \sim 38^{\circ}52'$,东经 $111^{\circ}57' \sim 112^{\circ}03'$ 之间,流域面积 150.08 km^2 ,汾河源区属于大陆性半干旱季风气候,干旱而寒冷. 山区降雨量高于平川地区,降水年内分配不均,年平均降水量 $550 \sim 750 \text{ mm}$. 降水量集中于汛期 $7 \sim 9$ 月,其降水量占年降水总量的 79% . 地形西高东低,年平均气温 $2.8 \sim 6^{\circ}\text{C}$,无霜期 $90 \sim 126 \text{ d}$,汾河源区大部分属于土石山区,山高坡陡,沟深滩窄. 但由于地处山区且有大面积森林覆盖,地貌为山地、森林、灌草茂密,自然植被较好,覆盖度在 70% 以上.

2 研究方法

2.1 样品采集与现场测定

2011 年 6 月 ~ 2012 年 12 月在汾河源区不同景观带采集了积雪、冻土、土壤水、降雨、河水和地下水等的样品采集. 同时利用 YSI-63 便携式电导仪测定了 EC 值、pH 值、水温以及盐度等指标. 在汾河源区共采集样品 87 组,所有样品用 parafilm 予以密封,并置于 4°C 环境下保存至实验分析. 取样点分布位置见图 1.

2.2 实验室测定

样品的同位素含量用同位素比值与标准样品同位素比值的千分偏差值(δ)来表示. R_s 和 R_{sm} 分别为样品与标准样品中重轻同位素含量比值,采用 V-SMOW 作为标准样. δD 或者 $\delta^{18}\text{O} = (R_s/R_{sm} - 1) \times 10^{-3} \times 1000$. 所有水样的同位素分别在中国科学院地理所与寒旱所用 LGR 公司的 Isotopic Water Analyzer -35EP 同位素分析仪利用离轴积分腔输出激光光谱技术完成,每个样品重复测定 6 次,测定结果用 V-SMOW 标准予以校正. δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 测量精度

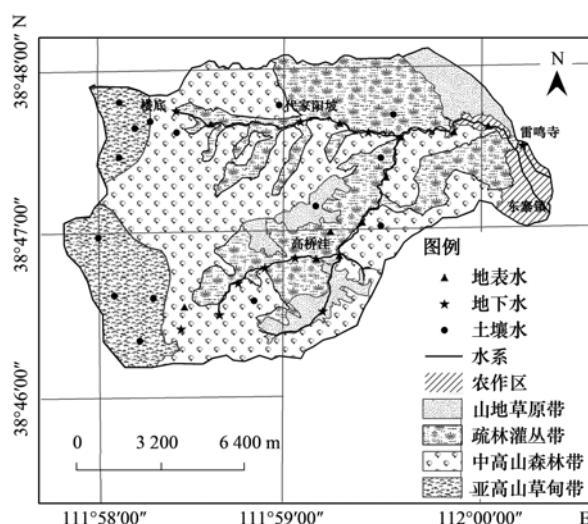


图 1 各景观带采样点分布示意

Fig. 1 Location of the sampling sites in the landscape zones

分别小于 $\pm 1 \times 10^{-3}$ 和 $\pm 0.2 \times 10^{-3}$. 土壤水和冻土水用低温真空蒸馏法提取. 样品采集后一个月内在山西大学完成水化学测定. K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子使用 PE-2380 型原子吸收光谱仪测定; SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 阴离子使用 Dionex-100 离子色谱仪测定. HCO_3^- 浓度在现场或者采集后 24 h 内采用稀硫酸-甲基橙滴定方法测定,测定精度误差为 $\pm 3\%$.

3 结果与讨论

3.1 源区植被带谱分析

在地理信息系统软件 ArcGIS 和景观格局分析软件 Fragstats 环境下,利用 GIS 和 RS 手段对汾河源区的 TM 影像进行解译(表 1). 根据植被覆盖、地表组成与土壤特征,划分流域生态水文响应单元,绘制出景观要素分布图,对其景观要素类型结构特征、景观异质性、景观要素斑块大小及各景观要素的空间关系特征进行系统研究. 在 ArcGIS 环境下使用数字化方法,将汾河源区切成若干块多边形,每一块多边形代表一种景观带,由于汾河源区总面积已知,切出来的每一块多边形的面积系统会自动生成,由此可以算出每种景观带所占的面积及所占比例. 汾河源区地处上游山区,沟谷切割剧烈,海拔高程多在 $1676 \sim 2665 \text{ m}$,气温、降水呈现明显的垂直分布特征. 由低山带到高山带,景观带类型依次为亚高山草甸带、中高山森林带、疏林灌丛带、山地草原带和农作区. 流域下垫面性质的空间异质性很大,海拔和复杂地形的变化影响大气要素在山区流域的空间和时间分布和变化,上述景观带对径流形成、河

表 1 汾河源区各景观带面积

Table 1 Area of the different landscape zones in the Mafengou River basin						
项目	亚高山草甸带	中高山森林带	疏林灌丛带	山地草原带	农作区	合计
面积/km ²	21.06	67.92	43.29	12.31	5.50	150.08
比例/%	14.04	45.25	28.84	8.20	3.67	100

水流量调蓄和涵养水源具有重要作用。

3.2 水文地质分析

汾河源区地表水多数分布于山谷河床之中,地貌林网密布,沟深山高,走向是从西向东,河流左岸地层以石炭二叠系的石灰岩、页岩为主,河流右岸地层以太古代的花岗岩、片麻岩为主. 泉水大部分直接补给河水,其余沿山谷渗漏于地下,常年降水量为 420 ~ 470 mm,径流系数为 8.4%,干流长 14.5 km,河网密度 0.177 km·km⁻²,平均纵坡 3%^[23~25]. 汾河源区属宁静向斜的西翼,主要出露地层为太古界变质岩;寒武奥陶系灰岩、白云质灰岩、竹叶状灰岩、鲕状灰岩及奥陶系碳酸盐岩;石炭、二叠系煤系地层. 地层总体向南东东方向倾斜,其中古生界碳酸盐岩构成泉域岩溶地下水含水层^[26,27](图 2). 区内没有其它外源地表水入境,岩溶地下水主要接受降水入渗补给和泉域内西南部火成岩山区地表水和风化裂隙水通过碳酸盐岩段的渗漏补给. 受地貌以及地层产状的共同作用(图 3),地下水在东西方向上由西向东渗流;在南北方向上,自西向东横切泉域的汾河及北石河河谷形成岩溶地下水的排泄基准,控制了岩溶地下水由南、北两侧向中部汇集的总体流场形态. 中部涑山乡一带谷底切割出的下伏火成岩体以及岩溶发育程度相对较弱的下奥陶统和寒武系碳酸盐岩,受相对隔水影响,岩溶地下水形成多点排泄^[28~30]. 东侧石炭二叠系碎屑岩构成了最终阻水体,在东寨西北的汾河河谷谷肩排泄形成了泉群中最大的泉水——雷鸣寺泉.

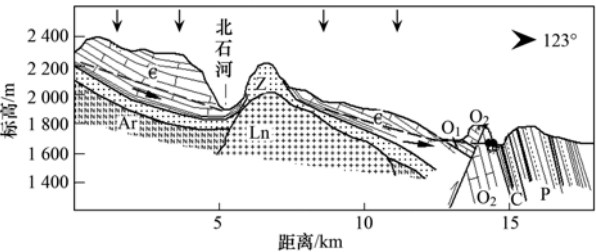


图 2 汾河源区水文地质剖面

Fig. 2 Profile map of hydrology geology in Fenhe River basin

3.3 景观带尺度水化学过程分析

不同径流路径会导致不同的水化学特点,化学

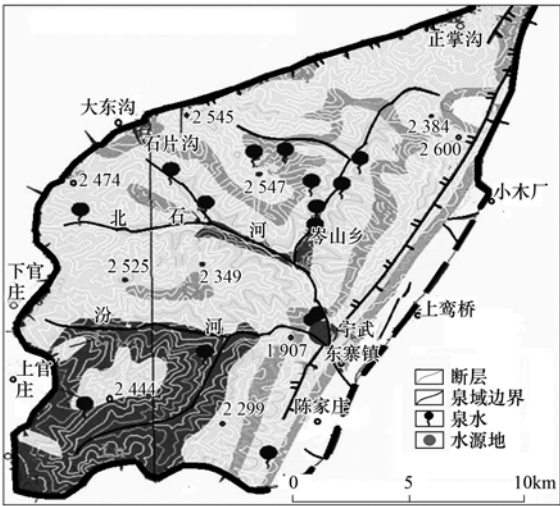


图 3 汾河源区水文地质

Fig. 3 Hydrology geology in Fenhe River basin

离子浓度变化反映了径流路径的水岩作用. 根据研究区水化学 Piper 图解可以看出,各离子质量浓度及水化学指标变化不大,地表水与地下径流均为阳离子以钙为主,阴离子以 HCO₃⁻ 为主. 由于汾河源区各地段的地下水补给、径流和排泄方式不同,因而表现出不同的水化学特征. 中高山森林带来水中主导阴离子是 HCO₃⁻, 占总阴离子的摩尔比例 90%, 主导阳离子是 Ca²⁺, 占总阳离子的 85%. 图 4 显示亚高山草甸带与中高山森林带来水阴离子相对含量顺序均为: HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > NO₃⁻ > Cl⁻, 阳离子顺序为: Ca²⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ > K⁺, 亚高山草甸带与中高山森林带水样阳离子均落在 Ca²⁺ 一端, 阴离子均落在 HCO₃⁻ 组分一端, EC 平均值为 320.78 μS·cm⁻¹, 溶解性总固体平均为 171.43 mg·L⁻¹, 水化学类型均为 Ca-HCO₃ 型, 属于方解石等纯碳酸盐岩石风化溶解. 疏林灌丛带与山地草原带的地表径流中 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 是最强的阳离子, 其含量均占总阳离子的 90% 以上, HCO₃⁻ 是最强阴离子, 占总阴离子的 85%, EC 平均值为 541.24 μS·cm⁻¹, 溶解性总固体平均为 389.13 mg·L⁻¹, 均为 Ca-Mg-HCO₃ 型水. 这些表明离子主要来自方解石和白云石等碳酸盐风化溶解, 据此初步推断此地表水混合了亚高山草甸带和中高山森林带来水. 图 4 显示雷鸣寺泉水

中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 占总阳离子的 90% 以上, Ca^{2+} 是主导阳离子, 占总阳离子的 65%, Mg^{2+} 占 28%. HCO_3^- 是主导阴离子, 占阴离子总量的 68%, EC 平均值为 $590.52 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 溶解性总固体平均 $420.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 水化学类型为 $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$ 型, HCO_3^-

含量相对较多, 而 SO_4^{2-} 相对较少, 说明混合了多种不同类型的水源, 且主要以方解石和白云石等碳酸盐风化溶解为主导, 且有小部分石膏等硫酸盐的溶解, 进一步推断雷鸣寺泉水是由不同景观带来水混合形成.

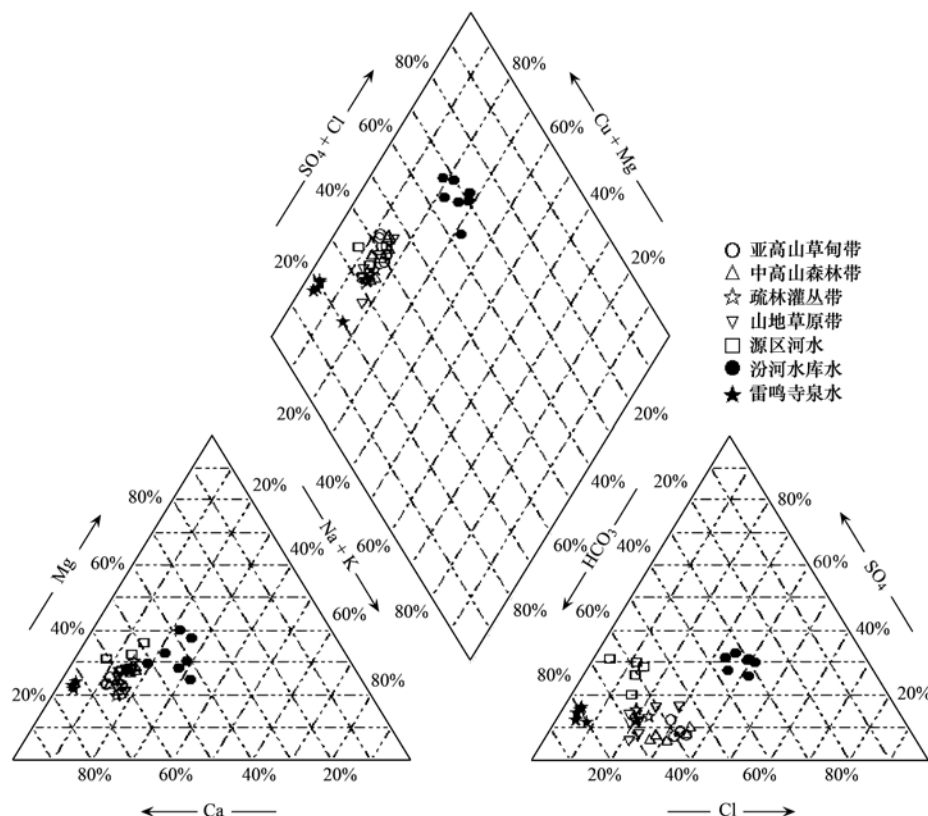


图 4 各种水样三角图水化学分析

Fig. 4 Triangle diagram for hydrochemical analysis of various water samples

3.4 景观带尺度水文过程同位素示踪

汾河源区降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 范围是: $-16.48 \times 10^{-3} \sim -5.32 \times 10^{-3}$, $-84.6 \times 10^{-3} \sim -52.17 \times 10^{-3}$, 根据降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值求出当地降水线方程为 $\delta\text{D} = 7.82 \delta^{18}\text{O} + 8.68$, $R^2 = 0.94$, 与全球降水线方程相比, 斜率与截距均偏低 (图 5), 说明大气降水下渗到地下后, 其同位素值变化趋于均一化, 反映了时间空间的混合. 此外, 汾河源区自然地理因素、水岩相互作用和气候条件也对同位素值产生影响. 汾河源头亚高山草甸水处于当地降水线左下方, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化范围为 $-11.59 \times 10^{-3} \sim -11.76 \times 10^{-3}$ 和 $-80.28 \times 10^{-3} \sim -84.42 \times 10^{-3}$, 相对贫同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD . 由图 5 得知, 亚高山草甸带深层冻土处于降水线左下方, 而上层冻土处于右下方, 说明在冻融过程中均受到蒸发效应影响, 上层冻土更为显著. 冻土样与亚高山草甸带、中高山森林带水样聚集,

它们之间有一定水力联系. 上层土壤水的同位素组成特征与其地表径流相近, 而比下层冻土相对富集 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD , 说明地表径流接受冻土融水补给, 上层冻土融化且受到蒸发影响. 由图 5 得知, 汾河源区河水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 $-11.19 \times 10^{-3} \sim -11.75 \times 10^{-3}$ 和 $-75.05 \times 10^{-3} \sim -78.15 \times 10^{-3}$, 处于当地降水线下方, 偏离当地降水线, 而且河水与疏林灌丛带和山地草原带水聚集, 有密切的水力联系, 可推断汾河源区河水主要来自亚高山草甸带, 亚高山草甸主要是季节性冻土消融和降水下渗, 转换成土壤水, 形成地下径流, 补给河水, 说明在降水-地表径流-土壤水-地下水的转化过程中, 受混合效应影响, 水体 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 不断富集, 并在补给河水过程中, 受蒸发作用影响, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 含量更加富集.

汾河源区河水的同位素特征与雷鸣寺泉水的相比, 河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 相对富集, 而与水库水的同位

素特征相比,其 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 相对贫化,雷鸣寺泉水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化范围为 $-10.25 \times 10^{-3} \sim -10.87 \times 10^{-3}$ 和 $-76.17 \times 10^{-3} \sim -76.93 \times 10^{-3}$,介于中高山森林带与疏林灌丛带、山地草原带之间,说明雷鸣寺泉水接受中高山森林带和疏林灌丛带、山地草原带混合补给。反映在D-O关系图上,雷鸣寺泉水与大庙沟流域河水聚集,且处于当地降水线以下,同位素含量接近,有密切的水力联系,雷鸣寺泉水和大庙沟流域河水接受亚高山草甸带和中高山森林带水的补给,点距离越近,水力关系越密切,可推断源区河水主要来自雷鸣寺泉水,主要接受亚高山草甸带和中高山森林带水补给,同时接受疏林灌丛带和山地草原带的补给。不同景观带的水都位于当地降水线附近,表明均接受降水补给,且受蒸发影响。由图5得知,源区河水、亚高山草甸带水、疏林灌丛带水、山地草原带来水、地下水 and 降水之间存在相互补给排泄关系,河水是由多种水源混合补给。

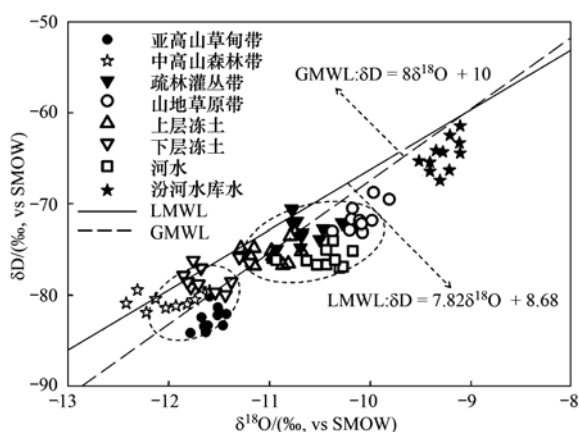


图5 研究区不同水体的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成

Fig. 5 Isotopic composition of different water bodies

氡过量参数 $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$,也是同位素水文学与水文地质学研究的另一个重要参数。结果显示亚高山草甸带 d 值为 $15.59 \times 10^{-3} \sim 17.2 \times 10^{-3}$,中高山森林带的氡盈余参数没有明显的差异, d 值为 $13.39 \times 10^{-3} \sim 14.78 \times 10^{-3}$,疏林灌丛带平均值为 12.46×10^{-3} ,山地草原带为 11.96×10^{-3} 。雷鸣寺泉水为 $10.93 \times 10^{-3} \sim 13.23 \times 10^{-3}$,介于亚高山草甸带、中高山森林带和疏林灌丛带之间,这说明雷鸣寺泉水主要由亚高山草甸带、中高山森林带和疏林灌丛带混合补给。雷鸣寺泉水以下流域,经头马营,至汾河水库,这一段河水的 d 值均偏低,且变化幅度很大,为 $7.18 \times 10^{-3} \sim 10.72 \times 10^{-3}$,汾河水库最低为 7.18×10^{-3} ,与全球平均值 d 值有较小幅度的偏离,表明与汾河源区地形和气候等地方性因素

有密切关系,这也反映了沿汾河径流方向受蒸发与混合等因素作用,致使出现一些比较低的 d 值。

总体而言,整个汾河源区各种水体的同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 差异不大,均在 $-9.11 \times 10^{-3} \sim -11.76 \times 10^{-3}$ 和 $-52.43 \times 10^{-3} \sim -84.42 \times 10^{-3}$ 范围之内,图5显示这些水体之间存在很密切的水力联系,存在相互补给排泄关系。汾河源区补给水源主要来自亚高山草甸带。汾河源区中高山森林带面积较大,拦截降水,下渗,形成土壤水,补给地下径流,最后汇入河道。疏林灌丛带和山地草原带在接受亚高山草甸带和中高山森林带来水补给的同时,也拦截降水,下渗,形成土壤水,补给地下水,最后汇入河道。

4 结论

汾河源区各种水资源以不同形式补给河流,亚高山草甸带降水和融水一部分形成地表径流,一部分通过下渗进入补给基岩裂隙水,形成地下径流。地下水径流流经中高山森林带,在中高山森林带位置较低的岩石裂隙中渗出,以泉水形式排泄,汇入河道。中高山森林带河水流量最大,是汾河源区主要径流形成区。疏林灌丛带与山地草原带通过密集的植被覆盖,吸纳降水,增加入渗,从而在数量上减少地表径流的形成。但由于其面积分布较小,对汾河源区贡献较小。源区径流主要由积雪、冻土融水、降雨和地下水混合补给,流域内降水很少直接产生地表径流,而是经各景观带下渗,转换成壤中流、地下径流,最终汇入河道。

参考文献:

- [1] 李小飞, 张明军, 李亚举, 等. 西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 712-719.
- [2] Cathrine C G, Alan F M, Katharine J M. Hydrological processes and chemical characteristics of low-alpine patterned wetlands, south-central New Zealand [J]. Journal of Hydrology, 2010, 385(1-4): 105-119.
- [3] Liu Y H, Fan N J, An S Q, et al. Characteristics of water isotopes and hydrograph separation during the wet season in the Heishui River [J]. Journal of Hydrology, 2008, 353(3-4): 314-321.
- [4] Longinelli A, Selmo E. Isotopic composition of precipitation in Italy[J]. Journal of Hydrology, 2003, 270(1-2): 75-88.
- [5] Machavaram M V, Whittemore D O, Conrad M E, et al. Precipitation induced stream flow: An event based chemical and isotopic study of a small stream in the Great Plains region of the USA [J]. Journal of Hydrology, 2006, 330(3-4): 470-480.
- [6] Kevin W T, Brent B W, Thomas W D E. Characterizing the role of hydrological processes on lake water balances in the Old Crow

- Flats, Yukon Territory, using water isotope tracers [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, **386**(1-4): 103-117.
- [7] 王鹏, 尚英男, 沈立成, 等. 青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 875-881.
- [8] 王宁练, 张世彪, 贺建桥等. 祁连山中段黑河上游山区地表径流水资源主要形成区域同位素示踪研究[J]. *科学通报*, 2009, **54**(15): 2148-2152.
- [9] 顾慰祖. 论流量过程线划分的环境同位素方法[J]. *水科学进展*, 1996, **7**(2): 105-111.
- [10] 田立德, 马凌龙, 余武生, 等. 青藏高原东部玉树降水中稳定同位素季节变化与水汽输送[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, **38**(8): 986-992.
- [11] 包为民, 王涛, 胡海英, 等. 降雨入渗条件下土壤水同位素变化实验[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2009, **48**(6): 132-138.
- [12] 杨永刚, 肖洪浪, 赵良菊, 等. 马粪沟流域不同景观带水文过程[J]. *水科学进展*, 2011, **22**(5): 624-630.
- [13] 文蓉, 田立德, 翁永标, 等. 喜马拉雅山南坡降水与河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 高程效应[J]. *科学通报*, 2012, **57**(12): 1053-1059.
- [14] Yang Y G, Xiao H L, Wei Y P, *et al.* Hydrologic processes in the different landscape zones in the alpine cold region during the melting period [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, **409**(1-2): 149-156.
- [15] 蒲焘, 何元庆, 朱国锋, 等. 丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 49-58.
- [16] 张林媛, 陈锁忠, 都娥娥. 基于同位素与水化学分析法的地下水补径排研究[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2011, **34**(2): 107-122.
- [17] 孙西欢, 张柏治, 王志璋. 汾河上游流域分布式水文模型的构建[J]. *水土保持通报*, 2008, **28**(3): 89-93.
- [18] 王尚义, 李玉轩, 田国珍. 汾河上游土地利用生态安全特征分析[J]. *太原师范学院学报(自然科学版)*, 2008, **7**(1): 121-122.
- [19] 刘冰. 汾河河源区土地利用/覆被变化及其驱动力分析[D]. 太原: 山西大学, 2010. 6-9.
- [20] 庞博, 王铁宇, 吕永龙, 等. 洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 379-387.
- [21] Longinelli A, Stenni B, Genoni L, *et al.* A stable isotope study of the Garda Lake, northern Italy: Its hydrological balance [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **360**(1-4): 103-116.
- [22] Mul M L, Mutibwa R K, Uhlenbrook S, *et al.* Hydrograph separation using hydrochemical tracers in the Makanya catchment, Tanzania [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2008, **33**(1-2): 151-156.
- [23] Zhu G F, Su Y H, Feng Q. The hydrochemical characteristics and evolution of groundwater and surface water in the Heihe River Basin, northwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **16**(1): 167-182.
- [24] Garvelmann J, Kuells C, Weiler M A. Porewater-based stable isotope approach for the investigation of subsurface hydrological processes [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, **16**(2): 631-640.
- [25] Yang Y G, Xiao H L, Wei Y P, *et al.* Hydrological processes in the different landscape zones of alpine cold regions in the wet season, combining isotopic and hydrochemical tracers [J]. *Hydrological Processes*, 2012, **26**: 1457-1466.
- [26] 杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 等. 景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3797-3807.
- [27] 赵良菊, 肖洪浪, 程国栋, 等. 黑河源区水汽来源及地表径流组成的稳定同位素证据[J]. *科学通报*, 2011, **56**(1): 58-67.
- [28] 范堆相. 山西省水资源评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. 10-74.
- [29] 山西省水利厅, 中国地质科学院岩溶地质研究所, 山西省水资源管理委员会. 山西省岩溶泉域水资源保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社. 2008. 11-85.
- [30] 吴锦奎, 杨洪越, 丁永建, 等. 黑河流域大气降水稳定同位素变化及模拟[J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 1858-1865.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiye Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《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)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行