

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩峰, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕锦, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究

杨永刚^{1,2}, 胡晋飞¹, 肖洪浪², 邹松兵², 尹振良²

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 目前高寒区景观带尺度水文规律的研究还非常薄弱. 同位素技术被用来甄别高寒区不同景观带冰川、积雪、冻土、地表水、地下水和降雨等对径流的贡献组合及其时空变化规律, 旨在揭示各景观带的水文规律. 结果表明马粪沟流域雨季降雨量大, 温度效应显著, 易发生再次蒸发, 致使各水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 较高. 干季气温低, 降水多为固态, 蒸发弱, 不易受到再次蒸发和周围水汽交换影响, 致使各水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 相对偏负. 降雨和各水体在雨季富集重D和 ^{18}O , 干季较贫重同位素, 存在季节效应. 降雨存在高程效应, $\delta^{18}\text{O} = -0.0052H - 8.951$, $R = -0.9172$; $\delta\text{D} = -0.0185H - 34.873$, $R = -0.8763$. 流域各景观带各水体在雨季和干季均不存在高程效应, 是因为出山径流均非以降雨直接补给为主, 受冰川、积雪和冻土等冻融过程影响, 降水、融水、地表水与地下水等相互转化, 导致同位素特征发生变化, 混合和蒸发效应是其同位素变化的主要控制因素.

关键词: 同位素; 景观带尺度; 水文过程; 季节效应; 高程效应

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3797-07

Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region

YANG Yong-gang^{1,2}, HU Jin-fei¹, XIAO Hong-lang², ZOU Song-bing², YIN Zhen-liang²

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Key Laboratory of Eco-hydrology and River Basin Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: There are few studies on the hydrological characteristics on the landscape zone scale in alpine cold region at present. This paper aimed to identify the spatial and temporal variations in the origin and composition of the runoff, and to reveal the hydrological characteristics in each zone, based on the isotopic analysis of glacier, snow, frozen soil, groundwater, etc. The results showed that during the wet season, heavy precipitation and high temperature in the Mafengou River basin caused secondary evaporation which led to isotope fractionation effects. Therefore, the isotope values remained high. Temperature effects were significant. During the dry season, the temperature was low. Precipitation was in the solid state during the cold season and the evaporation was weak. Water vapor came from the evaporation of local water bodies. Therefore, less secondary evaporation and water vapor exchange occurred, leading to negative values of $\delta^{18}\text{O}$ and δD . $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of precipitation and various water bodies exhibited strong seasonal variations. Precipitation exhibited altitude effects, $\delta^{18}\text{O} = -0.0052H - 8.951$, $\delta\text{D} = -0.0185H - 34.873$. Other water bodies did not show altitude effects in the wet season and dry season, because the runoff was not only recharged by precipitation, but also influenced by the freezing and thawing process of the glacier, snow and frozen soil. The mutual transformation of precipitation, melt water, surface water and groundwater led to variations in isotopic composition. Therefore, homogenization and evaporation effect are the main control factors of isotope variations.

Key words: isotope; landscape zone scale; hydrological processes; seasonal effects; altitude effects

水文规律的观测试验研究一直是资源环境领域的研究重点, 同位素示踪技术可为流域水文规律研究、水文模型结构与参数识别等提供详细信息, 能有效避免对自然状况模拟的失真问题^[1~3]. 同位素技术已被应用于地下水起源、降雨径流关系、径流路径、不同水体水力联系等水循环各环节的定性定量研究方面^[4]. 王宁练等^[5]应用同位素示踪提出黑河上游山区的降水具有高程效应, 并对地表径流进行估算. 吴锦奎等^[6]对黑河流域降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化进行了分析, 表明降水中同位素的变化和气

温之间呈现出正相关关系, 但不存在降水量效应. 赵良菊等^[7]应用同位素技术揭示黑河源区水汽来源及地表径流组成. 稳定同位素也被研究者运用于水汽来源、坝基渗漏、植物水分利用效率和水文系统特点等方面, 并取得了显著成果. 但研究多集中

收稿日期: 2013-01-18; 修订日期: 2013-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201043); 国际科技合作项目(2012DFA20770); 山西省青年科技研究基金项目(2012021026-3); 国家自然科学基金项目(91225302, 41240002); 山西省科技重大专项(20121101011)

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

在平原、盆地和喀斯特等区域,对高寒冻土区、寒漠区和冰雪区的研究相对较少^[8-10]. 黑河流域历来是研究寒旱区水文水资源的典型区域,目前在黑河流域径流模拟预测、地下水动态监测、融雪径流预报以及水资源利用等方面已取得了许多成果,从不同角度开展了诸多开拓性工作. 马粪沟流域在黑河高寒区有很好代表性,下垫面齐全,冰川、积雪、冻土均有分布,垂直带谱多样,是研究高寒区水文水资源的重要区域. 目前高寒区水文系统规律研究还非常薄弱,冰川、积雪和冻土等对出山径流的影响及程度的认识还很模糊,应用同位素技术进行景观带尺度水文规律的研究还较薄弱^[11-15]. 本研究是对前人研究和作者前期研究工作的进一步深入,基于野外台站和观测试验,采用野外调查取样和实验室测定分析相结合的研究手段,应用同位素示踪与“3S”技术,以冰川积雪、高山寒漠、沼泽草甸、高山灌丛和山地草原典型景观带的各种水体为对象,将冻土、冰川、积雪、降雨、地下水和地表水纳入一个完整的水文循环系统,定量解析高寒区景观带尺度冰川、积雪、冻土、地表水、地下水和降雨等对径流的贡献组合及其时空变化规律,旨在揭示各景观带的水文规律,为高寒区水资源科学评价管理与生态环境建设提供科技支撑.

1 研究区概况

马粪沟流域位于中国青海省祁连山区,地理位置处于北纬 $38^{\circ}12'14'' \sim 38^{\circ}16'23''$,东经 $99^{\circ}50'37'' \sim 99^{\circ}53'54''$ 之间. 流域面积 22.5 km^2 ,成葫芦状,属于黑河一级支流,也是黑河流域的产流区和水源涵养区. 流域海拔范围为 $2960 \sim 4820 \text{ m}$,海拔跨度 1860 m . 具有典型的由干旱区向极端寒区过渡的山地垂直景观. 流域内地形条件复杂、沟谷切割剧烈,山势陡峭,水文网密集而深切,植被垂直分带分明,典型景观带主要有冰川积雪带、高山寒漠带、沼泽草甸带、高山灌丛带与山地草原带. 气候属大陆性气候,高寒阴湿,昼夜温差大,气温低,月均最低温度在 1 月,最高温度在 7 月. 降水相对充沛,主要集中于 7~9 月. 流域内发育有现代冰川和冻土,是流域水资源存在的一种特殊形式. 马粪沟流域在黑河高寒山区具有很好的代表性,很适合做集成观测研究,是一个理想的寒旱区科学研究流域.

2 研究方法

2.1 样品采集与现场测定

在 ArcGIS 与景观格局分析软件 Fragstats 环境下,利用 GIS 和 RS 解译流域 TM 影像,划分流域水文响应单元,对景观要素斑块大小及各景观要素的空间关系特征进行分析,绘制出流域景观要素分布图(图 1). 采样点分布位置见图 1.

项目组成员于 2008 年 9 月至 2011 年 9 月在马粪沟流域不同景观带开展了野外考察和冰川、积雪、冻土、土壤水、河水、降水和地下水等的样品采集工作,总共采集到上述样品 265 组. 同时在现场用 Kestrel 4000 便携式气象站在采样现场进行气温、湿度和风速等的测定. 所有样品用 parafilm 密封,带回实验室,冻土/土样品置于 -20°C 冷冻,水样置于 4°C 环境保存至实验分析.

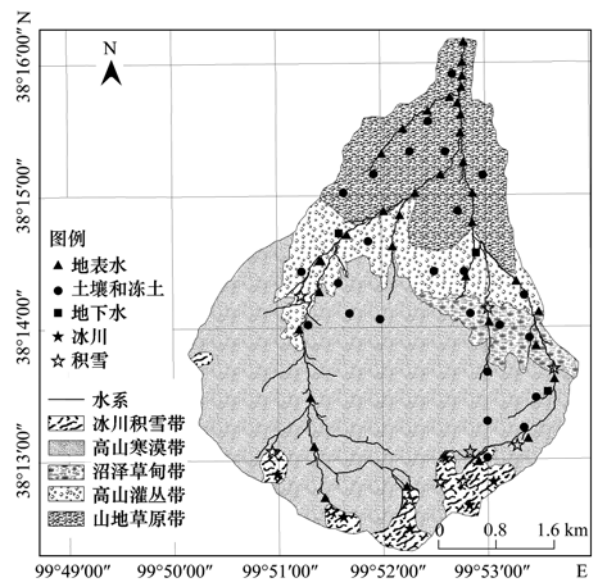


图 1 研究区样点分布示意

Fig. 1 Location of the sampling sites in the study area

2.2 实验室测定分析

样品同位素分析测定在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所生态水文与流域科学重点实验室完成,水样用 EuroPyrOH-3000 元素分析仪与 Isoprime 质谱仪联机工作,经高温裂解及还原炉反应后在线测定 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$. 每个样品重复测定 6 次,重复样误差控制在 δD 小于 $\pm 3.4\text{‰}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 小于 $\pm 1.6\text{‰}$. 土壤水和冻土水用低温真空蒸馏法提取. 用样品同位素比值与标准样品同位素比值的千分偏差值(δ)来表示元素的同位素含量. 采用 IAEA 制定的 V-SMOW 作为标准样,与 SMOW 标准一致. 用 V-SMOW 标准校正. δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 测定精度分别小于 $\pm 1\text{‰}$ 和 $\pm 0.2\text{‰}$.

3 结果与讨论

3.1 景观带尺度时间变化

受流域下垫面条件,冰川、积雪和冻土分布及降水和气温差异影响,马粪沟流域景观带尺度径流逐月变化的影响因子及其影响程度也存在差异.气温变化对降水和径流的影响主要体现在影响高山区冰川积雪和冻土的消融,影响流域的蒸发和改变流域的降水状况.由于温度、湿度和气团运移等因素存在季节性变化,因此不同区域降水的同位素组成也会有季节性的变化.由于降水中同位素组成与温度之间的很强相关关系,水的同位素组成的季节性变化也越强.气温、湿度、蒸发和降水的季节变化可导致大气降水中重同位素的变化.

在雨季,马粪沟流域出山口河水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值普遍偏负,绝大多数都在 $-8‰$ 和 $-46‰$ 以下(图2),介于山区大气降水和冰川积雪融水之间,这说明出山口河水的季节性补给有冬季降水或者夏季高山冰川积雪融水.倘若河水的补给来自降雨直接补给,则其同位素组成应明显地接近大气降水的同位素组成,但是马粪沟流域出山口河水与同期雨水相比,出现低于当地同期降雨平均同位素组成的情况,相对贫同位素 D 和 ^{18}O ,这是冰川积雪融水成因河水同位素组成的一个重要特征.在雨季,贫同位素的冻土融水和冰川积雪融水混合降雨,然后下渗转换成壤中流或地下径流,以泉水形式排泄,最终补给马粪沟河水,造成出山口河水的 D 和 ^{18}O 含量也较低,说明出山口河水主要由高寒区冰川积雪融水、冻土融水和降雨混合补给.

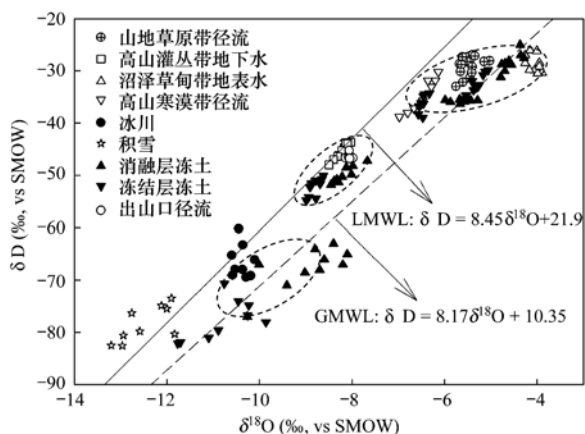


图2 雨季各种水体的 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 2 Plot of δD versus $\delta^{18}O$ for the various samples in the rainy season

在干季,马粪沟流域出山口河水的 δD 与 $\delta^{18}O$ 值变化范围分别为 $-8.91‰ \sim -8.84‰$, $-52.46‰ \sim -51.72‰$,可以看出干季比雨季更为贫同位素 D 与 ^{18}O ,介于泉水和冰川积雪融水之间,说明出山

口河水的季节性补给主要为冰川积雪融水和泉水.从图3可以看出,出山口河水的同位素组成落在当地降水以上且稍微偏离,出山口河水、冻土、高山灌丛带泉水和冰川聚集,它们之间有十分密切的水力联系,存在相互补给排泄的关系,表明高山灌丛带泉水的补给水源主要为冰川积雪融水和冻土融水,进一步推断出山口河水在干季主要来自冰川积雪融水、泉水和冻土融水的混合补给形成.

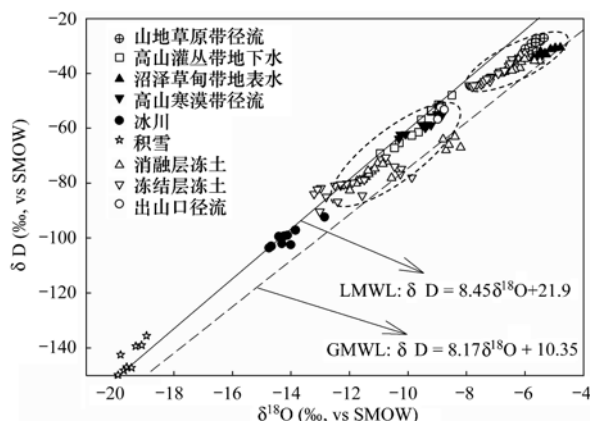


图3 干季各种水体的 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 3 Plot of δD versus $\delta^{18}O$ for the various samples in the dry season

马粪沟流域降雨和各水体在雨季富集重同位素 D 和 ^{18}O ,而干季同位素含量低,贫重同位素 D 和 ^{18}O ,存在季节效应.同位素组成逐月变化具有显著的温度效应,受温度效应间接影响,在不同月份受蒸发作用影响的程度不同,季节变化显著.马粪沟流域位于中国西北内陆,季节性变化较大,控制不同水体的同位素组成季节性变化的主要因素是气温的季节性变化,造成这季节差异的原因主要是:①在雨季,马粪沟流域的降雨主要集中在7~9月,这期间降雨量大,气温较高,温度效应影响强烈.降水过程中容易受到再次蒸发,发生动力分馏效应,致使降雨量大但同位素值仍较高,同位素 $\delta^{18}O$ 和 δD 最为富集.②在5月和10月(干季)的水汽来源多为局地水体蒸发的水汽,气温低,蒸发作用弱,其同位素 $\delta^{18}O$ 和 δD 值相对偏负.③干季气温低,寒冷季节降水多以固态形式存在,在降水过程不易受到再次蒸发和周围水汽交换的影响,致使降水量小但同位素含量较低.而雨季降雨过程中易受到再次蒸发,发生动力分馏效应.随着向秋冬季节的转变,降水量逐渐减少,气温逐渐降低,逐渐贫重同位素,再加上寒冷季节降水多以固态形式,不易发生蒸发,致使同位素值较低.

马粪沟流域出山径流以冰川积雪、冻土和降

雨/雪混合补给为主,径流年内分配的特点为汛期较晚,夏雨集中,春汛连着夏汛,汛期较长。径流连续最大3个月发生在7~9月,最大月一般在7~8月,最小月一般在1月或2月。初春,因地表层土壤处于冻结状态,流域内基本无地表径流形成,3~4月白天表层土壤处于正温,有融雪过程,但融水较少,以及流域的填注作用,地表径流十分微弱,晚上出现负温,土壤重新冻结。在5月左右随气温上升,高寒山区季节性积雪和冰川开始消融,融雪加快,而且此时冻土消融尚浅,在满足流域表层初损之后形成地表径流,冬季降雪和冰川融水为干季河川径流的主要来源。随着气温升高,地表径流开始缓慢增加,出现不明显的春汛。进入6月后降雨开始增多,并随气温升高,冻土消融和冰川积雪消融量逐渐增多。到7~8月,降雨量达到最大值,季节性冰川积雪消融量减少,冻土消融量增大,低海拔处山地草原带等的冻土已基本达到最大融化层深度,季节冻土层消失,地表水量急剧上升。进入9月融水逐渐减少,降水也逐渐转为固态,河水很快减退,高寒山区的降水不断地对冰川积雪进行补给。10月后直至次年2月为枯水期。气温迅速下降,降水多以冰川积雪形式存留,地表水、降雪和土壤冻结,径流量减

少,出山径流主要依靠泉水补给,土壤冻结把大量的壤中流以冰的形式存贮进来。流域季节性冻土的消融过程是影响水文过程的重要因素,冻土作为不贮水层,可以滞留冬季降水,提高流域蓄水量。

3.2 景观带尺度空间变化

同位素高程效应可以用同位素高程梯度来表示。对某一地区来说,同位素的高程梯度是同位素气温变化率和气温高度梯度的函数。 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 会随着海拔梯度而变化,变化范围分别为:(0.15~0.5)‰/100 m和(1.2~4)‰/100 m。高程效应实际和温度有关系,随着高度的升高,同位素 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的含量变低。

根据同位素数据绘制出马粪沟流域雨季和干季水体 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 与高程的关系线(图4),降水同位素与高程之间存在着负相关关系。从图4可以看出,马粪沟流域降雨存在高程效应,降雨同位素组成随地区高程的变化而变化,随着海拔增高, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐降低。计算结果显示, $\delta^{18}\text{O}$ 与高程的相关程度比 δD 与高程的相关程度高。 $\delta^{18}\text{O}$ 与高程关系为: $\delta^{18}\text{O} = -0.0052H - 8.951$,相关系数 $R = -0.9172$ 。 δD 和高程的关系为: $\delta\text{D} = -0.0185H - 34.873$, $R = -0.8763$ 。

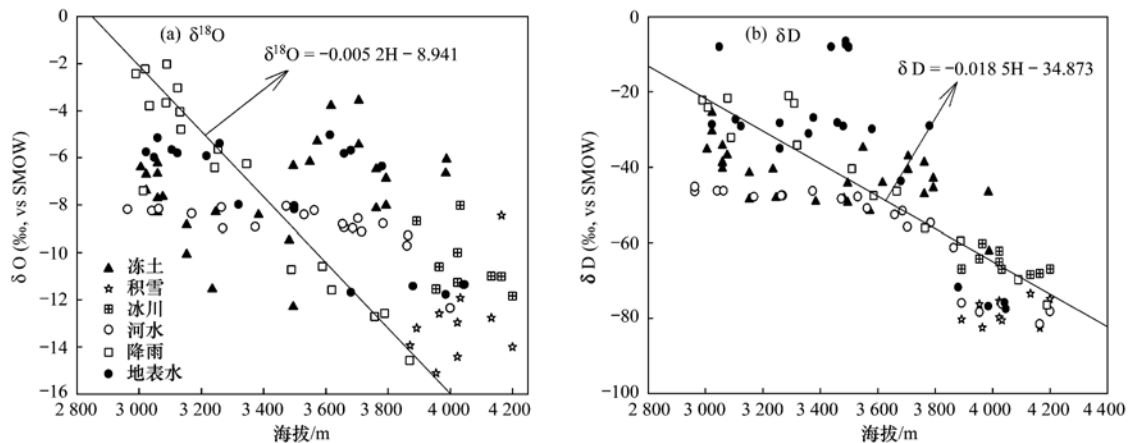


图4 雨季各景观带各种水体同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 的高程效应

Fig. 4 Altitude effects of $\delta^{18}\text{O}$ and δD for various water bodies in different landscapes in the rainy season

在雨季,马粪沟流域各景观带地表水不存在高程效应,因为高山寒漠带地表水主要为降雨、冻土融水和冰川积雪融水的混合水,而高山灌丛带为泉水、冻土融水和降雨的混合水,山地草原带和沼泽草甸带主要为冻土反复消融形成,因此同位素D和 ^{18}O 组成差异很大,不存在高程效应。由图4可以看出,雨季不同景观带的冻土也不存在高程效应,从低海拔到高海拔,不同带都存在冻土,但其冻土同位

素组成变化不大,冻土的同位素差异只受气温的控制,不受高程效应影响。马粪沟上游高海拔河水混合了同位素组成偏低的冰川积雪融水,因此其同位素D和 ^{18}O 组成偏负,而在出山口河水富集同位素D和 ^{18}O ,河水的同位素组成从上游至下游出山口的总体趋势存在由低到高的变化,但不是很明显,因为在高山灌丛带有同位素值偏低的泉水的汇入,山地草原带和沼泽草甸带有富集同位素D和 ^{18}O 的径流的

汇入。

在干季,不同景观带的各种水体的同位素组成虽然与雨季有差异,但同样也不存在高程效应,干季的变化规律与雨季相似。各个景观带水体的同位素 δD 和 $\delta^{18}O$ 值与高程不存在相关关系,不存在高程效应(图 5),造成这种非相关性主要是因为河水非以降雨直接补给为主,冰川积雪融水和冻土融水等补给比例较大。另一个原因是降水和冰川积雪融水入

渗形成地下径流,河流沿程流动过程中,地表水与地下水经过相互转化,导致同位素含量发生变化,混合和蒸发效应是水中同位素变化的主要控制因素。马粪沟流域河水沿程流下与冻土、冰川、积雪和降雨均有密切水力联系,进一步推断马粪沟流域出山径流接受不同补给水源混合补给形成。因此在马粪沟流域不能应用高程效应来确定地下水或河水的补给高程。

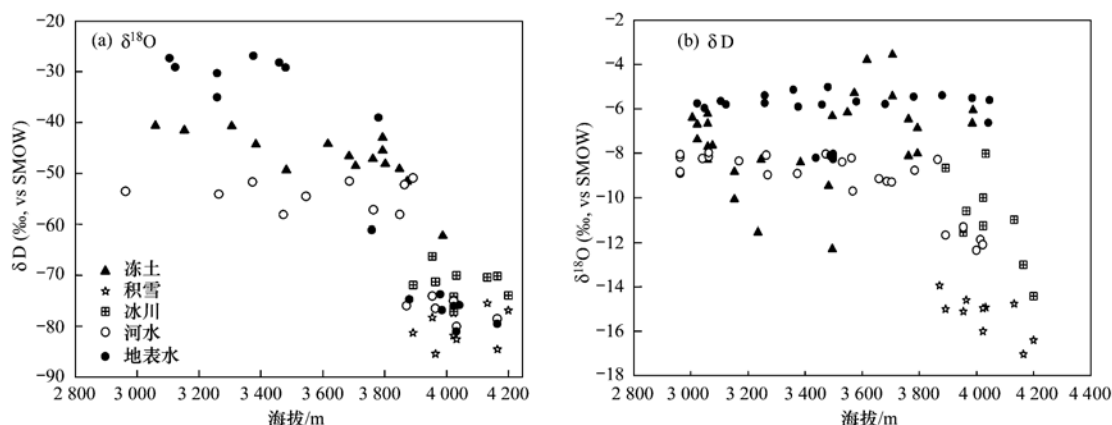


图 5 干季各景观带各种水体中同位素 $\delta^{18}O$ 与 δD 的高程效应

Fig. 5 Altitude effects of $\delta^{18}O$ and δD for various water bodies in different landscapes in the dry season

3.3 景观带尺度径流贡献组合变化

采用同位素示踪技术定量研究水体的不同来源混合比例是目前比较实用且有效的方法。稳定同位素 $\delta^{18}O$ 和化学示踪剂 Cl 用来确定研究区内各径流组分的起源和演变,同时用来辨别和量化马粪沟流域出山径流各补给组分比例,三端元分别为降雨、冻土融水和冰川积雪融水。

图 6 显示,雨季山地草原带径流中 Cl 离子含量过高,远大于其他景观带含量,故没有落在三端元贯穿的三角形区域内。其他各景观带水体几乎均没有落在任何两端元连线上,而是落在由降雨、冻土融水和冰川积雪融水三端元贯穿的三角形区域内,反映了三端元混合的特征。说明各个景观带径流不是简单地由一种或两种水源补给,而是由降雨、冻土和冰川积雪融水混合补给形成,且在不同景观带其补给组分贡献不同,进而得出出山径流混合了各景观带的各种水体。图 6 显示,不同景观带地表水、地下水和马粪沟流域出山口河水均落在偏冻土和降雨一侧,说明在雨季马粪沟流域出山径流得补给水源中,冻土融水与降雨的补给占主要部分,冰川积雪融水的补给占少部分。

由图 7 得知,在干季,各个景观带径流同位素组成均落在由泉水、冻土融水和冰川积雪融水三端元

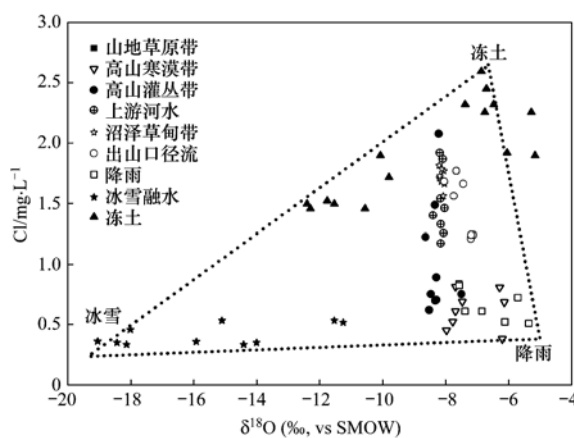


图 6 雨季三端元混合 (^{18}O 和 Cl)

Fig. 6 Mixing diagram using ^{18}O and Cl in the rainy season

贯穿的三角形区域内,也反映了三端元混合的特征。但是不同景观带地表水、地下水和马粪沟流域出山口河水均落在偏泉水和冰川积雪一侧,说明干季马粪沟流域出山径流的补给水源中,冰川积雪融水与泉水的补给占主要部分,冻土融水补给相对较少。

4 结论

(1) 马粪沟流域位于西北高寒区,雨季降雨量大但同位素值仍较高。干季降水多以固态形式存在,不易受到再次蒸发和周围水汽交换的影响,致使

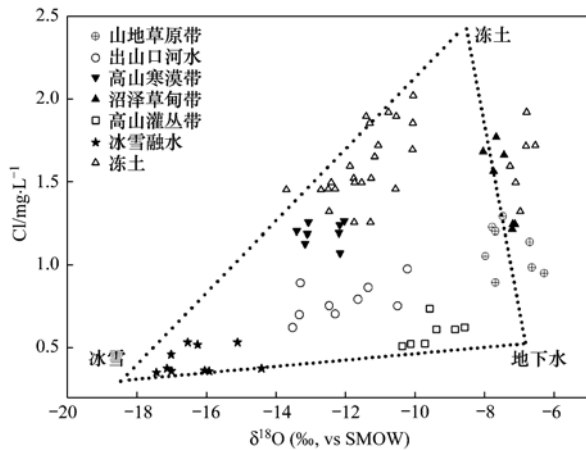


图7 干季三端元混合($\delta^{18}\text{O}$ 和Cl)

Fig. 7 Mixing diagram using $\delta^{18}\text{O}$ and Cl in the dry season

其同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值相对偏负. 降雨和各水体在雨季富集重同位素D和 ^{18}O ,而干季同位素含量低,存在季节效应.

(2)流域降雨存在高程效应,降雨 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 随海拔增高而逐渐降低. 各水体在雨季与干季均不存在高程效应,因为出山径流的补给水源在雨季和干季不同. 径流过程受冰雪和冻土融水等影响,非降雨直接补给为主,降水、融水、地表水与地下水等相互转化,导致同位素组成发生变化,混合和蒸发效应是其同位素变化的主要控制因素.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Liu F J, Robert P, Paul D B, *et al.* Seasonal and interannual variation of streamflow pathways and biogeochemical implications in semi-arid, forested catchments in Valles Caldera, New Mexico[J]. *Ecology*, 2008, **1**(3): 239-252.
- [3] 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.
- [4] 章新平, 王晓云, 杨宗良, 等. 利用CLM模拟陆面过程中稳定水同位素季节变化[J]. *科学通报*, 2009, **54**(15): 2233-2239.
- [5] 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的同位素示踪研究[J]. *科学通报*, 2009, **54**(15): 2148-2152.
- [6] 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.
- [7] 赵良菊, 尹力, 肖洪浪, 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.
- [8] 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): 1054-1058.
- [9] Kirchner J W, Tetzlaff D, Soulsby C. Comparing chloride and water isotopes as hydrological tracers in two Scottish catchments[J]. *Hydrological Processes*, 2010, **24**(12): 1631-1645.
- [10] Catherine J. Tracing hydrological variability and isotopic composition of waters from surface to cave at the Wellington Caves in SE Australia, Paleoclimate Implications[J]. *Quaternary International*, 2012, **279-280**: 222.
- [11] Stump C, Maloszewski P, Stichler W, *et al.* Environmental isotope ($\delta^{18}\text{O}$) and hydrological data to assess water flow in unsaturated soils planted with different crops[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **369**(1-2): 198-208.
- [12] Mayer B, Shanley J B, Bailey S W, *et al.* Identifying sources of stream water sulfate after a summer drought in the Sleepers River watershed (Vermont, USA) using hydrological, chemical, and isotopic techniques[J]. *Applied Geochemistry*, 2010, **25**(5): 747-754.
- [13] Catherine 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.
- [14] 宋献方, 刘相超, 夏军, 等. 基于环境同位素技术的怀沙河流域地表水和地下水转化关系研究[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 2007, **37**(2): 102-110.
- [15] 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.
- [16] 曾海鳌, 吴敬禄. 塔吉克斯坦水体同位素和水化学特征及成因[J]. *水科学进展*, 2013, **24**(2): 115-120.
- [17] 黄金良, 黄亚玲, 李青生, 等. 流域水质时空分布特征及其影响因素初析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1099-1107.
- [18] 瞿思敏, 包为民, McDonnell J J, 等. 同位素示踪剂在流域水文模拟中的应用[J]. *水科学进展*, 2008, **19**(4): 588-596.
- [19] 顾慰祖. 集水区降雨径流响应的环境同位素实验研究[J]. *水科学进展*, 1992, **3**(4): 246-254.
- [20] Mul M L, Savenije H H G, Uhlenbrook S. Spatial rainfall variability and runoff response during an extreme event in a semi-arid catchment in the South Pare Mountains, Tanzania. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, **5**(4): 2657-2685.
- [21] Ogrinc N, Kanduž T, Willibald S, *et al.* Spatial and seasonal variations in $\delta^{18}\text{O}$ and δD values in the River Sava in Slovenia[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **359**(3-4): 303-312.
- [22] MacKinnon G, MacKenzie A B, Cook T, *et al.* Spatial and temporal variations in Pb concentrations and isotopic composition in road dust, farmland soil and vegetation in proximity to roads since cessation of use of leaded petrol in the UK[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**: 5010-5019.
- [23] 蒲焘, 何元庆, 朱国锋, 等. 丽江盆地地表-地下水的化学特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 49-58.
- [24] 田立德, 姚檀栋, 沈永平, 等. 青藏高原那曲河流域降水及河流水体中氧稳定同位素研究[J]. *水科学进展*, 2002, **13**(2): 206-210.

- [25] 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.
- [26] 杨永刚, 肖洪浪, 邹松兵, 等. 高寒水源集水区水文过程研究[J]. 水科学进展, 2011, **22**(5): 30-36.
- [27] Garvelmann J, Kuells C, Weiler M A. A Porewater-based stable isotope approach for the investigation of subsurface hydrological processes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, **16**(2): 631-640.
- [28] Long A J, Hydrol J. Hydrograph separation for karsts watersheds using a two-domain rainfall-discharge model [J]. Journal of Hydrology, 2009, **364**(3-4): 249-256.
- [29] Engström E, Rodushkin I, Ingri J, *et al.* Temporal isotopic variations of dissolved silicon in a pristine boreal river [J]. Chemical Geology, 2010, **271**(3-4): 142-152.
- [30] Yang Y G, Xiao H L, Wei Y P, *et al.* Hydrologic processes in the different landscape zones of Mafengou river basin in the alpine cold region during the melting period[J]. Journal of Hydrology, 2011, **409**(1-2): 149-156.
- [31] 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**(10): 1457-1466.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	Ji Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

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