

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.1

第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM _{2.5} 污染演变的时空过程	时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)
2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析	郑庆峰, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)
夏季大气PM _{2.5} 中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例	刘威杰, 石明明, 程敏, 黎莹, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)
呼包鄂地区冬季、夏季PM _{2.5} 污染特征	李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)
2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM _{2.5} 污染特征及来源解析	周静博, 段青春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)
基于模型模拟的成都市PM _{2.5} 污染来源解析	许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)
北京市PM _{2.5} 中砷污染特征	石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段青春, 谭吉华, 陈荣志 (57)
夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析	易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)
安阳市大气PM _{2.5} 中水溶性离子季节特征及来源解析	孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)
新乡市夏冬季节PM _{2.5} 稳定碳同位素特征分析	闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)
基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估	梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)
超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征	王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)
京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨	余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)
安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析	杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)
长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响	王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)
华东典型城市非道路移动机械排气烟度	鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昀, 黄成 (133)
国内外储油库VOCs排放现状与标准分析	胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)
四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响	庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)
乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比	徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张显, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)
长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素	汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)
巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征	沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)
城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例	田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)
典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估	陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)
长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估	李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)
白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析	汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)
松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评价	王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟丰, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)
鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系	李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)
臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响	刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒峰, 潘杨 (253)
兰州市西固区儿童饮水重金属暴露与健康风险精细化评估	陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)
镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制	吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)
一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制	廖丹雪, 单慧娟, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)
酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能	谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)
脱氮菌剂在低溶解性黑臭水体中氮代谢特征	赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)
宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及耐药基因	陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)
淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析	赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)
基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控	陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)
基于间歇饥饿的SNAD工艺运行	李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)
反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液	陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)
硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现	刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)
高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响	张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)
中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评价	向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖偲, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)
某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征	孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)
北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征	张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征	杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)
亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征	宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)
宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化	陈志浩, 覃云斌, 丁帮琛, 胡优优, 陈湜, 李正魁 (412)
秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响	王晶, 马丽娟, 刘泽华, 陆伟, 侯振安 (420)
基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析	黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)
塔里木盆地东南缘绿洲区土壤砷空间分布及农作物砷富集特征	陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)
广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征	马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)
不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响	张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)
不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响	栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪艺凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)
黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应	周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)
炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响	蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)
《环境科学》征订启事(89)	
《环境科学》征稿简则(97)	
信息(303, 329, 344)	

长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素

汪少勇^{1,2,3}, 何晓波^{1,2*}, 丁永建^{1,2,3}, 常福宣⁴, 吴锦奎^{1,2}, 胡召富^{1,3}, 王利辉^{1,3}, 杨贵森³, 邓明珊³

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 730000; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 长江科学院水资源综合利用研究所, 武汉 430010)

摘要: 基于长江源区冬克玛底流域 2017 年 6~9 月采集的 84 个地下水样品, 分析了地下水稳定同位素特征及其影响因素, 讨论了地下水的补给来源。结果表明, 研究区多年冻土区地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 -15.3‰ ~ -12.5‰ , 平均值为 -14.0‰ ; δD 的变化范围为 -108.9‰ ~ -91.7‰ , 平均值为 -100.2‰ , 与当地大气降水相比, 地下水较为富集重同位素; 地下水线 (LG) 的斜率和截距均低于全球和局地大气降水线 (GMWL 和 LMWL), 表明地下水在接受降水的补给后经历了不同程度的蒸发作用; 地下水氘盈余 ($d\text{-excess}$) 变化范围为 4.9‰ ~ 25.0‰ , 平均值为 11.6‰ , 低于大气降水平均氘盈余值; 地下水同位素与降水量存在显著的负相关关系, 表明大气降水对地下水具有重要的补给作用; 不同时期影响地下水同位素的组成和变化因素有所不同, 在冻土的冻融前期 (气温上升阶段), 由于冻土活动层较薄, 地下水受气温影响显著。虽然后期气温降低, 但冻土活动层厚度依然在增加, 此时地下水在土壤中滞留的时间的增加是地下水同位素富集的一个重要因素。结合流域的地形特点、地下水同位素特征及其影响因素, 推断降水是地下水的主要补给来源。研究结果能够为长江源多年冻土区的水循环过程提供科学依据。

关键词: 青藏高原; 长江源区; 多年冻土区; 地下水; 同位素; 补给来源

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0166-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201907240

Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River

WANG Shao-yong^{1,2,3}, HE Xiao-bo^{1,2*}, DING Yong-jian^{1,2,3}, CHANG Fu-xuan⁴, WU Jin-kui^{1,2}, HU Zhao-fu^{1,3}, WANG Li-hui^{1,3}, YANG Gui-sen³, DENG Ming-shan³

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Water Resources Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: We use 84 rainfall samples collected during June to September 2017 from the Dongkemadi basin, source region of the Yangtze River, China, to analyze the characteristics and influencing factors of stable isotopes in groundwater, and further discuss the groundwater recharge sources. The results showed that the range of groundwater $\delta^{18}\text{O}$ values in this permafrost region varied from -15.3‰ to -12.5‰ (mean -14.0‰). The range of δD values in groundwater varied from -108.9‰ to -91.7‰ (mean -100.2‰). Compared with local atmospheric precipitation, groundwater isotopes were relatively enriched. The slope and intercept of the groundwater line (GL) in the study area were both lower than of those of the global and local meteoric water lines (GMWL and LMWL), thus indicating that groundwater in the study area was subjected to evaporation during rainfall recharge of groundwater. The $d\text{-excess}$ values of groundwater varied from 4.9‰ to 25.0‰ (mean 11.6‰), which was close to the average $d\text{-excess}$ value determined for global average rainfall (10‰), but lower than that of rainfall in the study area (15.1‰). The influencing factors on the composition and variation of groundwater isotopes were different in different periods. The permafrost active layer was relatively thin during periods of increasing air temperature, and groundwater isotopes were significantly affected by air temperature. A temperature decrease during the latter part of the sampling period, when the thickness of the permafrost active layer was still increasing, further increased the retention time of infiltrating rainfall in the soil, thereby eventually leading to evaporation that strengthened the enrichment of heavy isotopes in the groundwater. According to the topographic characteristics of the Dongkemadi basin, the isotopic characteristics of the groundwater, and the factors influencing the isotopic composition, we conclude that rainfall was the main source of groundwater recharge. The results of this study provide a scientific basis for studying water cycle processes in the permafrost regions of the source

收稿日期: 2019-07-28; 修订日期: 2019-08-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0405706, 2017YFC0405704); 国家自然科学基金重点项目 (41730751); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (CKSF2017045); 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题项目 (SKLCS-ZZ-2019)

作者简介: 汪少勇 (1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为寒区水文, E-mail: wangshaoyong17@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: hxb@lzb.ac.cn

region of the Yangtze River.

Key words: the Qinghai-Tibet Plateau; source region of the Yangtze River; permafrost region; groundwater; isotopes; recharge sources

青藏高原的多年冻土面积约 $1.26 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占高原总面积的 56%, 是全球最主要的高海拔冻土区^[1]. 冻土作为冰冻圈的重要组成部分, 对冰冻圈水文过程有着重要影响^[2], 对气候变化的响应也极为敏感^[3]. 由于受全球气候变暖影响, 青藏高原冻土退化显著, 产生了一系列水文、生态和环境问题^[1, 4]. 同时冻土区的产流机制有别于非冻土区, 因此在气候变暖的背景下, 冻土退化可能导致多年冻土水文过程发生变化^[5, 6].

同位素技术是明晰冻土水文过程的一种有效工具. 利用稳定同位素可以探讨冻土区地下水与地表水相互作用, 有助于深入了解径流的形成机制和转化过程^[7]. 目前, 同位素技术已经被广泛应用于冻土区的产汇流过程. Sugimoto 等^[8]利用同位素研究了西伯利亚东部冻土区不同水文年的土壤水气状态. Obradovic 等^[9]和 Metcalfe 等^[10]的研究发现, 融雪期间冻土区地下水对河道径流补给量可达 50% 左右. McIntosh 等^[11]通过稳定同位素来区分欧美地区冻土消融释放的地下水和其他来源的地下水. McEachern 等^[12]利用同位素对比分析发现, 在非连续性多年冻土区流域融雪水占径流比例较高, 而低地流域主要受地下水补给. 然而, 到目前为止, 与中国青藏高原地下水同位素有关的研究相对较少. 田立德等^[13]对青藏高原中部土壤水中稳定同位素变化进行研究, 认为土壤表层水同位素受降水的直接影响. 肖可等^[14]发现藏南干旱区的地热水受蒸发作用影响. 任东兴^[15]利用稳定同位素研究长江源区风火山流域的水循环过程, 指出多年冻土区由于冻土作为隔水层的存在, 加强了地下水与大气降水的联系.

长江源多年冻土区是对全球气候变化响应最为敏感的区域之一^[16], 由于其海拔高, 气候条件恶劣, 后勤保障十分困难, 使得对数据获取难度极大. 而本研究有效地获取了该冻土区连续的地下水同位素数据, 一定程度上弥补了青藏高原中部的长江源多年冻土区地下水同位素数据的不足, 以及通过分析地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素, 以期为进一步认识青藏高原长江源区的冻土水文过程提供科学依据.

1 研究区概况

研究区 ($91^{\circ}58' \sim 92^{\circ}06' \text{ E}$, $33^{\circ}00' \sim 33^{\circ}06' \text{ N}$) 位于长江源区的冬克玛底流域 (图 1), 流域平均海

拔在 5 000 m 以上, 是内陆干旱区典型冰川流域和青藏高原代表性冻土流域. 流域面积为 50.96 km^2 , 在流域源头发育着面积为 16.40 km^2 的冬克玛底冰川. 流域河谷广泛分布着多年冻土, 冻土活动层范围为 $1 \sim 3 \text{ m}$ ^[17], 主要植被为高寒草甸. 流域年平均气温为 -6.0°C , 年平均降水量约为 443 mm, 以固态降水为主, 降水主要集中在每年的 5 ~ 9 月, 可占全年的 90% 以上. 流域没有四季之分, 仅有冷暖两季, 其中冷季长达 8 个月 (10 ~ 5 月), 主要受西风控制, 气候寒冷干燥; 暖季为 4 个月 (6 ~ 9 月), 受印度夏季风影响, 气候温凉湿润.

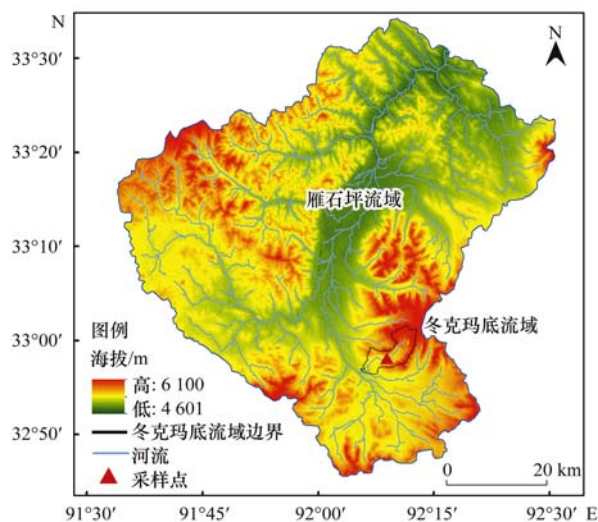


图 1 研究区及采样点位置示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

2 材料与方法

2.1 样品采集

本研究的地下水采样点位于冬克玛底流域大本营地下水观测场, 该取样点为一个深入地下约为 1.5 m, 直径为 0.2 m 的 PVC 管, PVC 管顶部密封, 以防止蒸发及降水直接进入. 由于大部分冻土水在重力的作用下会积蓄在不透水界面之上, 由此地下水便会在 PVC 管中汇集, 因此本研究的地下水实际上是来源于不同层位的冻土融水及土壤水的混合. 冻土地区的地下水一般分为冻土层上水 (活动层地下水)、冻土层间水和冻土层下水^[4], 而本文所采集的地下水属于冻土层上水. 本研究的地下水采样期为 2017 年 6 ~ 9 月, 采样时间为每日 20:00, 期间共采集地下水样品 84 个. 为了防止水样被污染, 所用的采样设备均作洁净化清洗处理. 水样采集完毕后, 立即用封口膜封住瓶口, 以防止水样蒸发, 而后置于

冰箱中冷冻存储。

2.2 同位素测定

样品以冷藏状态运输至中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室进行同位素比率的测定,测定仪器为液态氢氧同位素分析仪(LGR, DLT-100 LWIA, USA)。为了减小仪器记忆效应带来的误差,每个样品均测6次,取后4次测定的平均值,测定结果以相对于维也纳标准平均海洋水(vienna standard mean oceanic water, V-SMOW)的千分差形式表示:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{或}\delta\text{D}) = \left(\frac{R_s}{R_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, R_s 和 $R_{\text{V-SMOW}}$ 分别代表地下水和维也纳标准平均海洋水氢或氧稳定同位素比率($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 、 D/H), $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 平均测定误差范围分别为 $\pm 0.2\text{‰}$ 和 $\pm 0.6\text{‰}$ 。另外,实验室分析氢氧稳定同位素所使用的标样有5组,如表1所示。

表1 实验室分析同位素的标样/‰

项目	标样1	标样2	标样3	标样4	标样5
$\delta^{18}\text{O}$	-19.57	-15.55	-11.54	-7.14	-2.96
δD	-154.10	-117.00	-79.00	-43.60	-9.80

2.3 气象数据

本文所利用的气象数据主要有降水量、气温和土壤温度。其中降水量是在每次降水事件结束后由人工观测得到。气温和不同深度的土壤温度来自冬克玛底流域大本营气象观测场的双层风湿温自动气象站,数据采集仪器为CR10X。

3 结果与讨论

3.1 地下水同位素特征

在采样期内,研究区地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围在 $-15.3\text{‰} \sim -12.5\text{‰}$ 之间,平均值为 -14.0‰ ; δD 的变化范围为 $-108.9\text{‰} \sim -91.7\text{‰}$,平均值为 -100.2‰ ,与同期在该流域观测到的降水同位素($\delta^{18}\text{O}$: $-29.8\text{‰} \sim -0.2\text{‰}$ 和 δD : $-223.5\text{‰} \sim 11.6\text{‰}$,平均值分别为 -15.0‰ 和 -104.5‰)以及全球大气降水同位素($\delta^{18}\text{O}$: $-50\text{‰} \sim 10\text{‰}$ 和 δD : $-350\text{‰} \sim 50\text{‰}$)^[18]相比,地下水同位素的变化幅度相对较小,并且平均值要高于同期该流域的大气降水同位素,说明地下水比大气降水富集重同位素。

图2显示了地下水同位素时间变化特征(以 $\delta^{18}\text{O}$ 为例),可知地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 随着时间波动较为明显,同时发现地下水同位素随着时间呈略微地向上变化趋势($R^2 = 0.35$, $P < 0.001$, $n = 84$),可能是由于降水或由降水形成的地表径流在入渗过程中受到一定

蒸发富集作用。但在采样初期,地下水同位素相对贫化,其 $\delta^{18}\text{O}$ 最小值达到 -15.3‰ 。同时,地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 在波动变化过程中,其值出现多个异常负值,这可能与降水对地下水的补给有关。通过分析发现,地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 的2次异常负值所对应的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -15.4‰ (8月13日)和 -26.2‰ (9月1~3日),这两个阶段的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 均低于降水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值(-15.0‰),均表现出相对贫化。事实上,这与青藏高原长江源区夏季的季风暴发有关,因为由季风携带的降水往往贫化重同位素,虽然期间也伴随着富集重同位素的西风 and 局地气团的降水,但其比例相对较小^[19]。

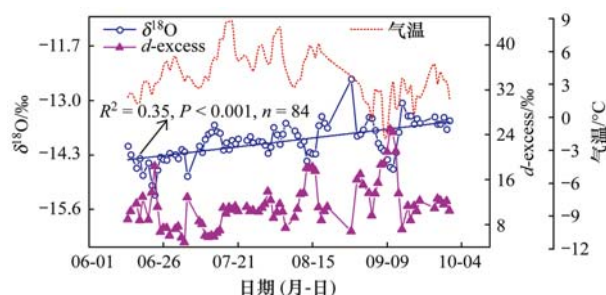


图2 地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $d\text{-excess}$ 及气温的时间变化

Fig. 2 Variation of $\delta^{18}\text{O}$, $d\text{-excess}$ in groundwater, and air temperature

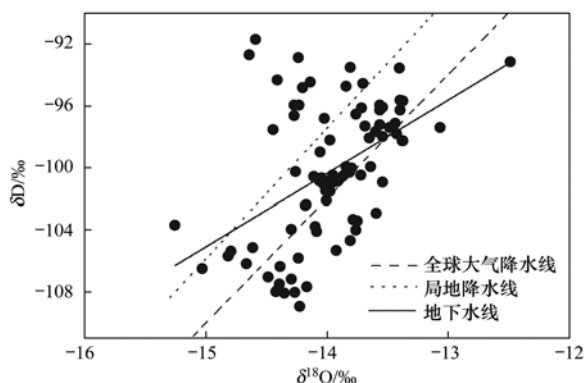
3.2 地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 的关系

地下水和大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系可用于定性分析地下水的来源。本文将地下水氢氧稳定同位素的关系定义地下水线(groundwater line, GL),通过运用最小二乘回归方法拟合得到观测期内研究区多年冻土区的地下水线为:

$$\delta\text{D} = 4.74 \delta^{18}\text{O} - 34.04$$

$$(R^2 = 0.22, P < 0.001, n = 84) \quad (2)$$

该地下水线与全球大气降水线(global meteoric water line, GMWL): $\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ ^[20]、中国降水线: $\delta\text{D} = 7.9 \delta^{18}\text{O} + 8.2$ ^[21]以及该地区的局地大气降水线(local meteoric water line, LMWL): $\delta\text{D} = 8.43 \delta^{18}\text{O} + 20.62$ ^[19]相比,其斜率和截距均较小。如图3所示, GL与GMWL和LMWL均有交点,但地下水同位素点基本上位于LMWL的下方,说明研究区地下水受到一定的非平衡蒸发的影响。同时,地下水同位素点在GMWL和LMWL的两侧都有分布,表明地下水一定程度上受到大气降水补给的影响。地下水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的关系虽然达到0.001的显著性水平,但拟合系数相对较低(0.22),说明地下水同位素的分布比较离散,表明影响其组成和变化的因素较为复杂,除了受降水和蒸发的影响外,还可能受其他因素,如植物的吸收和冻土融水补给等。

图3 地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的关系Fig. 3 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD in groundwater

3.3 地下水氕盈余特征

在水循环过程中,由于同位素的不平衡分馏,会导致水体中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系会出现一个差值,Dansgaard^[22]称之为氕盈余($d\text{-excess}$),其被定义为: $d\text{-excess} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$,全球大气降水中的 $d\text{-excess}$ 平均值为10‰。蒸发是影响氕盈余值大小的一个重要因素,如果蒸发越强烈,氕盈余的值会下降。因此,地下水的氕盈余是能够反映补给到地下水的水体受到蒸发作用的强烈程度^[23]。

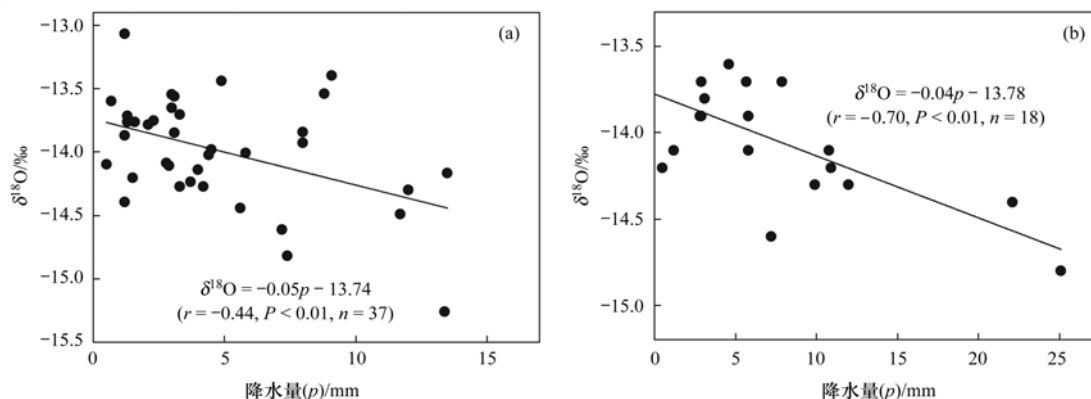
在采样期内,研究区地下水 $d\text{-excess}$ 的变化范围介于4.9‰~25.0‰之间,平均值为11.6‰,与全球大气降水平均 $d\text{-excess}$ 值(10‰)相近,但远低于该流域大气降水氕盈余平均值(15.1‰)^[19]。由图2可以看出,地下水 $d\text{-excess}$ 随时间呈明显的波动变化,同时发现 $d\text{-excess}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间存在一定的反向变

化关系,通过分析发现二者具有显著的负相关性($r = -0.34$, $P < 0.01$, $n = 84$),进一步说明实了地下水受到了一定的蒸发作用,因为当较强的蒸发发生时,水体富集重同位素的同时,其 $d\text{-excess}$ 值相应会减小。

3.4 地下水同位素的影响因素

3.4.1 地下水同位素与降水量的关系

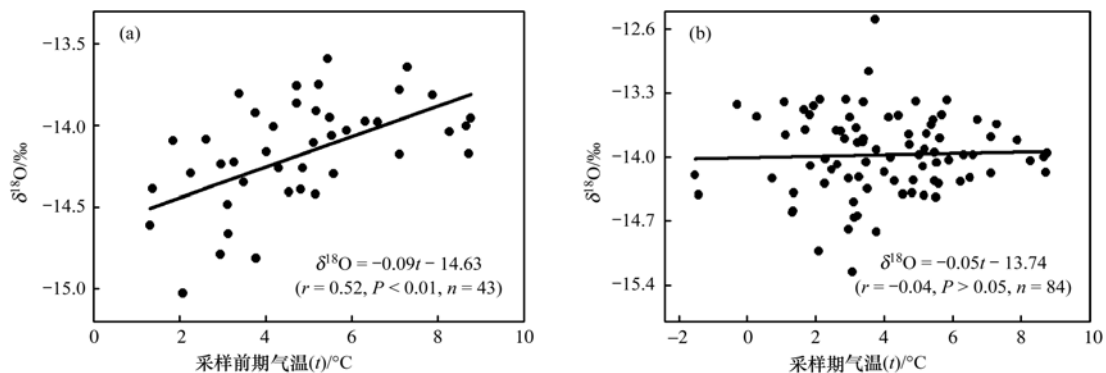
已有相关研究发现,该流域的大气降水由于受印度夏季风的影响,降水同位素存在显著的降水量效应^[19],即降水量越大,降水重同位素越贫化,而这种显著的降水量效应可能会影响到地下水同位素的组成。如图4(a)所示,地下水同位素与日降水量存在显著的负相关关系($r = -0.44$, $P < 0.01$, $n = 37$),可能是由于当降水量较大时,气温和空气相对湿度降低,降水补给地下水的过程中受到蒸发作用的影响较小,有效补给地下水的降水比重增加,此时降水同位素往往较为贫化,导致地下水接受贫化同位素值的大气降水的补给量较高,使得地下水的同位素值偏负。同时考虑到降雪和冰雹等固态降水在地表形成一定的积雪后,可导致降水入渗到地下的过程中存在一定的滞后。因此,将平均5 d地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与5d总降水量进行相关分析[图4(b)],发现二者之间依然存在显著的相关性($r = -0.70$, $P < 0.01$, $n = 18$),并且其相关性要优于日尺度上的结果,进一步说明了大气降水对地下水重要的补给作用。因此,由于研究区地下水受降水的补给,降水量的大小或降水同位素的降水量效应是影响冻土区地下水同位素组成的原因之一。

图4 地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 与日降水量和5 d总降水量的关系Fig. 4 Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in groundwater and daily precipitation, 5-day total precipitation

3.4.2 地下水同位素与气温的关系

温度是影响水体同位素组成的一个重要因子^[19]。如图2所示,可以看出,在前期(气温上升阶段),气温与地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化具有一定的正向对应关系,通过分析发现[图5(a)],地下水同位素与上升阶段的气温呈显著的正相关关系($r = 0.52$, $P < 0.01$, $n = 43$),但与整个采样期日均气温并不相关

[图5(b)],可能原因是,在气温上升阶段时,冻土活动层厚度较薄,地下水受气温影响更为明显,而此时蒸发较为强烈,导致地下水不断富集重同位素。Zhang等^[24]的研究发现,青藏高原的地表消融和降水入渗是同时进行的,活动层较浅时可增加蒸发量,以及王利辉等^[25]的研究发现,青藏高原中部冻土区的蒸散发与气温存在显著的正相关关系,说明气温

图5 地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 与上升阶段和整个观测期日均气温的关系Fig. 5 Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in groundwater and daily air temperature during a period of increasing temperature, and daily air temperature over the whole observation period

可通过影响蒸发进而影响地下水同位素的组成.但在8月初后,不断降低的气温对地下水的蒸发富集作用实际上是有所减弱的,但是此时地下水同位素仍然呈现富集的趋势,其具体原因则需进一步探讨.

3.4.3 地下水同位素与土壤温度的关系

随着年内气温的变化,不同深度的土壤温度也会发生变化,进而导致冻土活动层厚度随着发生变化,最终影响冻土区的产汇流过程^[6, 16].图6为流域冻土区不同土壤深度土壤温度的变化,可以发现10、30和50 cm的土壤温度变化较为一致,虽然个别时段出现了逆温层,但总体上随着深度的增加土壤温度降低.而70 cm和110 cm的土壤温度变化表现出了与表层土壤温度不同的变化特征,10、30和50 cm的土壤温度在8月初之后呈下降的趋势,这与气温的变化十分一致,但是在8月初之后,70 cm和110 cm的土壤温度依然有增加的趋势.根据土壤温度可以判断冻土活动层厚度的变化(图6),就整个采样期而言,冻土活动层随着时间呈逐渐变厚的趋势,5月中旬活动层约为30 cm,6月中旬为70 cm左右,7月底的冻土活动层约为110 cm.

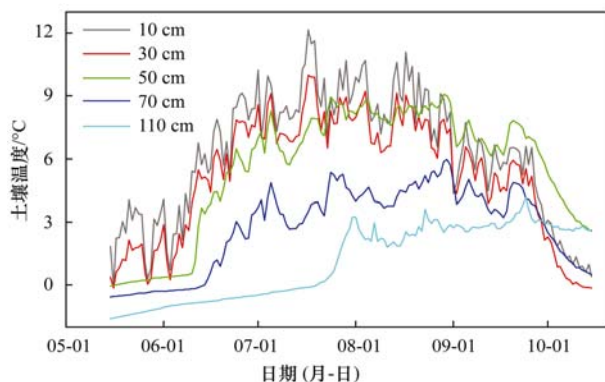


图6 不同深度的土壤温度变化

Fig. 6 Variation of soil temperature at different depths

因此,为了探讨地下水同位素的组成是否与土壤温度有关,通过相关分析发现,地下水同位素与平

均活动层温度存在显著的正相关关系(表2),但相关性较低($r = 0.22$, $P < 0.05$, $n = 84$).进一步分析地下水同位素与不同深度的土壤温度的关系,发现地下水同位素与10 cm和30 cm的土壤温度的变化并不相关,却与50、70和110 cm的土壤温度存在显著的正相关关系(表2),并且随着深度的增加,相关性增强,可能的原因是随着深层土壤温度的升高,使得冻土活动层厚度增加,而增加的冻土活动层厚度让降水入渗水分在土壤中滞留的时间增加,导致蒸发作用进一步加强了地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的富集.同时,这也解释了为什么在采样后期气温下降的同时,地下水同位素依然呈富集的趋势.因此,伴随着气温年内波动变化,冻融锋面也发生迁移变化(冻土活动层厚度发生变化),可导致在不同的时间段影响地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 组成和变化因素有所不同,在冻土的冻融前期,活动层较薄,地下水受气温影响明显,后期气温降低,但冻土活动层厚度依然在增加,土壤水的滞留时间的增加是地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 富集的主要因素.从另一方面讲,也可能是入渗水分与活动层底部的冻土融水进行交换混合,产生了混合效应,而这部分水体可能富集重同位素,随着活动层厚度不断增加,该融水可能更为富集重同位素.同样在祁连山马粪沟流域,混合和蒸发效应也是冻土区地下水同位素变化的主要影响因素^[26].因此,多年冻土区冻土的冻融过程对流域地下水同位素变化实际上起到了十分重要的作用.

3.5 地下水的补给来源分析

通过前面对研究区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响素的分析可以发现,大气降水对地下水具有重要的补给作用,以及大气降水在补给地下水的过程中经历了一定的蒸发作用,同时流域内的高寒草甸以及其他植被对地下水的吸收作用,也可能影响地下水同位素的组成和变化.事实上,已有相关研

表 2 地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 与不同深度土壤温度(t)的关系¹⁾

Table 2 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ in groundwater and soil temperature at different depths

土壤深度/cm	回归方程	皮尔逊相关系数(r)	显著性水平(P)	样本数(n)
10	$\delta^{18}\text{O} = -0.04t - 13.68$	-0.16	>0.05	84
30	$\delta^{18}\text{O} = -0.05t - 13.62$	-0.19	>0.05	84
50	$\delta^{18}\text{O} = 0.12t - 14.82$	0.35	<0.01	84
70	$\delta^{18}\text{O} = 0.15t - 14.54$	0.40	<0.001	84
110	$\delta^{18}\text{O} = 0.17t - 14.21$	0.56	<0.001	84
活动层平均温度	$\delta^{18}\text{O} = 0.09t - 14.45$	0.22	<0.05	84

1) 黑体字表示通过了 0.05 显著性检验

究指出冻土层上水主要来源于大气降水,如果在冷季冻结之前没有以地下径流的形式流走,其将会以地下冰的形式储存在活动层中^[4]. 其流动路径主要受区域地形控制,无论是冻土层上水还是层下水,总体上是以水平径流的形式从地势较高处流向地势较低的河谷洼地^[7].

根据冬克玛底流域的地形特点,流域多年冻土主要分布在主河道两岸,并以一定坡度向河道倾斜,所以地下水可能会补给河水,但地下水几乎很难有河水的补给. 另外,流域仅在河水源头有冰川存在,但是由冰川融化产生的融水顺着地势优先汇入源头主河道,同时流域侧边的山谷并无冰川覆盖,由此可以推断冰川融水同样难以补给地下水. 尽管在冻土融化过程中,冻土活动层厚度不断增加,会产生一定量冻土融水,但这部分水往往比较少. 综上,结合流域地形特点和地下水同位素特征及其影响因素,可以推断研究区地下水的补给来源比较单一,而降水是地下水的主要补给来源.

4 结论

(1) 研究区地下水同位素随时间波动变化明显,其 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-15.3\text{‰} \sim -12.5\text{‰}$,平均值为 -14.0‰ ; δD 的变化范围为 $-108.9\text{‰} \sim -91.7\text{‰}$,平均值为 -100.2‰ ,与全球和当地大气降水相比,地下水同位素值的变化范围相对较小,并且比大气降水富集重同位素.

(2) 研究区地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 的关系为: $\delta\text{D} = 4.74 \delta^{18}\text{O} - 34.04$ ($R^2 = 0.22$, $P < 0.001$, $n = 84$),其斜率和截距均低于全球和局地大气降水线,表明地下水受到一定的蒸发作用. 地下水线的拟合系数相对较低(0.22),说明地下水同位素的分布比较离散,表明影响地下水同位素组成和变化的因素较为复杂.

(3) 研究区地下水的氡盈余($d\text{-excess}$)变化范围为 $4.9\text{‰} \sim 25.0\text{‰}$,平均值为 11.6‰ ,与全球大气降水平均 $d\text{-excess}$ 值(10‰)相近,但低于当地大气降水氡盈余平均值(15.1‰). 同时,地下水 $d\text{-excess}$

与 $\delta^{18}\text{O}$ 的存在显著的负相关关系,进一步表明地下水受蒸发作用的影响.

(4) 研究区地下水同位素与降水量存在显著的负相关关系,表明大气降水对地下水具有重要的补给作用. 通过分析地下水同位素与气温和土壤温度的关系,发现在不同时期影响地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 组成和变化因素有所不同,在冻土的冻融前期(气温上升阶段),活动层较薄,地下水受气温影响明显,后期气温降低,但冻土活动层厚度依然在增加,土壤水滞留时间的增加是地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 富集的一个重要因素.

(5) 根据流域的地形特点和地下水同位素特征及其影响因素,研究区地下水的补给来源比较单一,而降水是地下水的主要补给来源.

参考文献:

[1] 程国栋,金会军. 青藏高原多年冻土区地下水及其变化[J]. 水文地质工程地质, 2013, **40**(1): 1-11.
Cheng G D, Jin H J. Groundwater in the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau and it changes[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, **40**(1): 1-11.

[2] Frampton A, Painter S L, Destouni G. Permafrost degradation and subsurface-flow changes caused by surface warming trends [J]. Hydrogeology Journal, 2013, **21**(1): 271-280.

[3] Grenier C, Régnier D, Mouche E, et al. Impact of permafrost development on groundwater flow patterns: a numerical study considering freezing cycles on a two-dimensional vertical cut through a generic river-plain system[J]. Hydrogeology Journal, 2013, **21**(1): 257-270.

[4] 阳勇,陈仁升. 冻土水文研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, **26**(7): 711-723.
Yang Y, Chen R S. Research review on hydrology in the permafrost and seasonal frozen regions[J]. Advances in Earth Science, 2011, **26**(7): 711-723.

[5] 刘光生,王根绪,孙向阳,等. 多年冻土区风火山流域降水河水稳定同位素特征分析[J]. 水科学进展, 2012, **23**(5): 621-627.
Liu G S, Wang G X, Sun X Y, et al. Variation characteristics of stable isotopes in precipitation and river water in Fenghuoshan permafrost watershed[J]. Advances in Water Science, 2012, **23**(5): 621-627.

[6] 杨针娘,杨志怀,梁凤仙,等. 祁连山冰沟流域冻土水文过程[J]. 冰川冻土, 1993, **15**(2): 235-241.
Yang Z N, Yang Z H, Liang F X, et al. Permafrost hydrological processes in Binggou basin of Qilian mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, **15**(2): 235-241.

- [7] 常启昕, 孙自永, 马瑞, 等. 冻土区地下水过程及其与地表水转化关系研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2016, **36**(5): 87-94.
Chang Q X, Sun Z Y, Ma R, *et al.* A review of groundwater flow and its interaction with surface water in permafrost region[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, **36**(5): 87-94.
- [8] Sugimoto A, Naito D, Yanagisawa N, *et al.* Characteristics of soil moisture in permafrost observed in east Siberian Taiga with stable isotopes of water[J]. Hydrological Processes, 2003, **17**(6): 1073-1092.
- [9] Obradovic M M, Sklash M G. An isotopic and geochemical study of snowmelt runoff in a small arctic watershed[J]. Hydrological Processes, 1986, **1**(1): 15-30.
- [10] Metcalfe R A, Buttle J M. Soil partitioning and surface store controls on spring runoff from a boreal forest peatland basin in north-central Manitoba, Canada[J]. Hydrological Processes, 2010, **15**(12): 2305-2324.
- [11] McIntosh J C, Schlegel M E, Person M. Glacial impacts on hydrologic processes in sedimentary basins: evidence from natural tracer studies[J]. Geofluids, 2012, **12**(1): 7-21.
- [12] McEachern P, Prepas E E, Chanasyk D S. Landscape control of water chemistry in northern boreal streams of Alberta[J]. Journal of Hydrology, 2006, **323**(1-4): 303-324.
- [13] 田立德, 姚檀栋, Tsujimura M, 等. 青藏高原中部土壤中稳定同位素变化[J]. 土壤学报, 2002, **39**(3): 289-295.
Tian L D, Yao T D, Tsujimura M, *et al.* Stable isotope in soil water in the middle of Tibetan plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, **39**(3): 289-295.
- [14] 肖可, 沈立成, 王鹏. 藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 2952-2958.
Xiao K, Shen L C, Wang P. Hydrogen and oxygen isotopes of lake water and geothermal spring water in arid area of south Tibet[J]. Environmental Science, 2014, **35**(8): 2952-2958.
- [15] 任东兴. 基于环境同位素的长江源典型多年冻土小流域水循环规律研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
Ren D X. Hydrologic cycle on the typical permafrost by using environmental isotope in the headwaters of the Yangtze River[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.
- [16] Wang G X, Hu H C, Li T B. The influence of freeze-thaw cycles of active soil layer on surface runoff in a permafrost watershed[J]. Journal of Hydrology, 2009, **375**(3-4): 438-449.
- [17] Gao H K, He X B, Ye B S, *et al.* Modeling the runoff and glacier mass balance in a small watershed on the central Tibetan Plateau, China, from 1955 to 2008[J]. Hydrological Processes, 2012, **26**(11): 1593-1603.
- [18] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture[J]. Hydrological Processes, 2000, **14**(8): 1341-1355.
- [19] 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 等. 长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2615-2623.
Wang S Y, Wang Q L, Wu J K, *et al.* Characteristics of stable isotopes in precipitation and moisture sources in the headwaters of the Yangtze River[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2615-2623.
- [20] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [21] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, **28**(13): 801-806.
- [22] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, **16**(4): 436-468.
- [23] 欧阳波罗. 巴丹吉林沙漠湖水和地下水氢氧同位素研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
Ouyang B L. Characteristics of H-O isotopes in lake-water and groundwater in Badain Jaran Desert[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [24] Zhang Y S, Ohata T, Kadota T. Land-surface hydrological processes in the permafrost region of the eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2003, **283**(1-4): 41-56.
- [25] 王利辉, 何晓波, 丁永建. 青藏高原中部高寒草甸蒸散发特征及其影响因素[J]. 冰川冻土, 2017, **39**(6): 1-7.
Wang L H, He X B, Ding Y J. Characteristics and influence factors of the evapotranspiration from alpine meadow in central Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, **39**(6): 1-7.
- [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): 3797-3803.
Yang Y G, Hu J F, Xiao H L, *et al.* Spatial and temporal variations of hydrological characteristic on the landscape zone scale in alpine cold region[J]. Environmental Science, 2013, **34**(10): 3797-3803.

CONTENTS

Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years	SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i> (1)
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016	ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i> (14)
Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China	LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (23)
PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China	LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i> (31)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019	ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i> (39)
Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China	XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo (50)
Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing	SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (57)
Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City	YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i> (65)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City	SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (75)
Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xinxiang City	YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i> (82)
Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species	LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i> (90)
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant	WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i> (98)
Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018	YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i> (106)
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City	YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (115)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols	WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i> (125)
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China	LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i> (133)
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals	HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (139)
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaacol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration	ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (146)
Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain	XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (155)
Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i> (166)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, Jilili Abuduwali, <i>et al.</i> (173)
Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years	TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i> (183)
Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea	CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (194)
Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River	LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (205)
Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (213)
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake	WANG Jing-zhong, LIU Zhao, WEI Hao, <i>et al.</i> (224)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River	WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (232)
Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River	LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i> (242)
Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent	LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (253)
Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou	CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i> (262)
Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments	WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (273)
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i> (284)
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II)	XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i> (293)
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water	ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i> (304)
Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant	CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i> (313)
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch	ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i> (321)
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR	CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (330)
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (337)
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter	CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i> (345)
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function	LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (353)
Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge	ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (360)
Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China	XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i> (368)
Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant	MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i> (377)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils	ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i> (385)
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation	DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Tian-hui, <i>et al.</i> (394)
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils	SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (403)
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshangang Lake	CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i> (412)
Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field	WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i> (420)
Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Jiulong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin	CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (438)
Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China	MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i> (449)
Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel	ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i> (460)
Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes	LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (469)
Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region	ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i> (479)
Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain	LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i> (489)