

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, 单慧媚, 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, 纪文凝, 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)	

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¹, 吴敬禄^{2*}, 吉力力·阿不都外力³, A. S. Saparov⁴, Gulnura Isanova⁴

(1. 扬州大学环境科学与工程学院, 扬州 225127; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 4. 哈萨克斯坦农业部土壤与农业化学研究所, 阿拉木图 050060)

摘要: 巴尔喀什湖位于哈萨克斯坦境内, 是世界上最大的湖泊之一。伊犁河是巴尔喀什湖的主要补给河流, 也是中哈两国重要的跨境河流。通过数理统计、Piper 三线图、Gibbs 模型和主成分分析(PCA)等方法, 对巴尔喀什湖流域不同水体的化学参数和氢氧稳定同位素(δD 和 $\delta^{18}O$)进行分析, 初步研究了该区域水化学类型和同位素空间分布特征, 探讨了其形成原因和环境意义。结果表明, 不同水体的水化学类型不同, 湖泊水体的主要化学类型为 SO_4 -Na 和 Cl -Na, 入湖河流的水化学类型为 HCO_3 -Ca 型, 其中伊犁河水化学类型从上游到下游由重碳酸盐型过渡到硫酸化物型、氯化物型; Gibbs 图显示湖泊水体离子组成位于蒸发作用区, 河流水体离子组成位于蒸发作用和岩石风化作用之间, 伊犁河从上游到下游向蒸发控制带偏移, 反映了上游河水受降水、冰雪融水的补给影响较大, 而下游水体受蒸发作用影响较大; 此外, PCA 分析指示人类活动对湖泊、伊犁河中下游和其他入湖河流化学的影响。湖泊和河流水体的氢氧同位素组成变化差异较大, 湖泊水体氢氧同位素偏正, 位于全球大气降水线和哈萨克斯坦地区蒸发线之间, 氘盈余小于全球降水线, 反映了较强的蒸发作用导致湖水同位素富集; 河流水体的氢氧同位素位于全球降水线附近, 河流水体的氢氧同位素关系方程的斜率(伊犁河: 5.7, 其他入湖河流: 3.1)均低于全球降水线(8), 表明降水和蒸发过程影响河流水体同位素组成。湖泊水体化学参数和同位素显著相关, 尤其是东部水体, 表明强烈的蒸发作用同时导致水体同位素的富集和水化学离子的浓缩。

关键词: 巴尔喀什湖流域; 伊犁河; 不同水体; 水化学; 氢氧同位素

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0173-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201905220

Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan

SHEN Bei-bei¹, WU Jing-lu^{2*}, Jilili Abuduwalili³, A. S. Saparov⁴, Gulnura Isanova⁴

(1. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 4. Institute of Soil Science, Kazakhstan Ministry of Agriculture, Almaty 050060, Kazakhstan)

Abstract: Lake Balkhash is one of the largest lakes in the world. It is located in arid Central Asia and receives major water from the Ili River, which is an international river flowing across China and Kazakhstan. Hydrochemical and isotopic measurements of waters can provide an improved understanding of hydrogeochemical processes and environmental characteristics, which is useful for water resource management in arid regions. In this study, δD , $\delta^{18}O$, and major ions in water samples from the Lake Balkhash catchment were analyzed using an integration of mathematical statistics, Piper diagrams, Gibbs model, and principal component analysis (PCA). Water types and main mechanisms controlling the hydrochemistry presented a clear spatial heterogeneity. The chemical composition of lake waters was dominated by SO_4 -Na and Cl -Na type, whereas river waters were classified as a HCO_3 -Ca type. The chemical composition downstream of the Ili River evolved from HCO_3 -Ca to SO_4 -Na-Cl type. Gibbs model suggested that the main mechanisms controlling the lake water chemistry were evaporation-crystallization processes, and that major ions in the river water were affected by rock-weathering and evaporation processes. The main controlling factors of the water chemistry changed from the upstream to the downstream, and may have related to spatial differences whereby the upstream area experienced higher rainfall and snow melt, and the downstream area experienced relatively higher evaporation. PCA analysis showed that human activities also played an important role in the chemical composition of water sampled from the lake, middle and lower reaches of the Ili River, and other rivers. The isotopic compositions of the lake and river waters varied spatially. In the lake waters, positive isotopic ratios and negative deuterium-excess values indicated that evaporitic enrichment dominated the changes in the isotopic signature of the lake water. In river waters, isotope values located near the global meteoric water line (GMWL) and lower slopes of the regression lines ($r=0.91$, $P<0.001$ for Ili River, and $r=0.63$, $P<0.001$ for other rivers), were associated with a stronger influence of rainfall and weaker evaporation. Correlation analysis showed that there were significant relationships between isotope values and chemical parameters in the lake water, especially in the eastern area, thus suggesting that extensive evaporation led to simultaneous enrichment of isotopes and ions in the lake water.

收稿日期: 2019-05-29; 修订日期: 2019-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671200, U1603242); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA2006030101)

作者简介: 沈贝贝(1988~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为湖泊环境化学, E-mail: shenbeibei@yzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: w.jinglu@niglas.ac.cn

Key words: Lake Balkhash basin; Ili River; water samples; hydrochemistry; hydrogen and oxygen isotopes

随着气候变暖和人类活动的加剧,不同区域湖泊生态环境均出现了不同程度的恶化,其中干旱区湖泊生态系统脆弱,对气候变化和人类活动干扰更为敏感,面临的生态环境问题更为严峻^[1]. 巴尔喀什湖位于中亚干旱区哈萨克斯坦共和国(“哈国”)东南部,是流域各河流的尾间湖,伊犁河是其主要供给河流,也是跨中哈两国的国际河流,对巴尔喀什湖水量、水质具有显著影响. 伊犁河-巴尔喀什湖流域是世界上最大的湖泊生态系统之一,湖泊作为流域重要的水源保障,向来备受关注^[2]. 1969年卡普恰盖水库的建立和伊犁河中下游水资源的过度开发利用,导致了入湖水量减少、水文过程变化和三角洲生态环境的恶化,制约了地区的经济和社会发展^[3-5]. 因此,客观认识巴尔喀什湖和伊犁河水环境问题以及产生的主要原因,具有十分重要的理论意义和实践价值.

水化学组成是水体在循环过程中与周围环境长期相互作用的结果,能够指示水体形成和运移的历史^[6]. 水体离子组成是水化学性质的重要方面,自然水体中的离子主要来源于陆地、大气以及人类活动^[7,8],分析离子特征的水化学组分能够反映水体离子组成,识别其控制因素^[9-12]. 氢氧同位素是水文过程的重要指示剂,水在循环过程中的蒸发和扩散等作用引起同位素分馏,造成地表不同水体的同位素组成差别^[13],通过同位素组成变化可以示踪水体来源及其循环过程^[14-17]. 因此,结合氢氧稳定同位素和水化学等相关数据,可以更好地科学评价水资源质量状况、理解水文地球化学过程,进而为区

域水资源的管理和可持续利用等提供科学依据^[18,19].

目前,关于巴尔喀什湖已有的研究主要集中在湖泊水文和湖泊古气候环境演变等方面^[2,3,20-23],龙爱华等^[2]的研究表明 1970 年以前湖泊水位呈现规律性的变化,随着伊犁河中游卡普恰盖水库修建和蓄水,湖泊水位开始下降,并在 20 世纪 80 年代末达到低值. 水量和水质是水资源利用的重要影响因素,流域修建水库、农业生产等人为活动和气候变化影响了湖泊的水量变化,但同时,也将伴随着水化学过程的变化,这些影响必然对区域人类的生产生活构成一定风险. 然而,水化学特性相关研究较少,且多集中于巴尔喀什湖,缺乏系统的巴尔喀什湖全流域化学风化和同位素地球化学循环过程研究.

本文通过对哈国境内巴尔喀什湖流域的湖泊、河流水体的水化学和氢氧同位素分析,研究不同水体的化学和同位素的组成和分布特征及其环境意义,以期巴尔喀什湖环境变化研究提供基础.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

巴尔喀什湖位于 $73^{\circ}20' \sim 79^{\circ}11'E$ 、 $45^{\circ}00' \sim 46^{\circ}44'N$ 之间,地处哈国东南部(图 1). 巴尔喀什湖面积约 $1.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,湖体呈狭长状,长约 605 km,平均宽约 30 km(最宽处 70 km),中间被乌泽纳拉尔水道隔开,分为东西两部分,西湖宽而浅,为淡水湖,东湖窄而深,为咸水湖. 流入巴尔喀什湖的固定河流主要有 5 条:伊犁河、卡拉塔尔河、阿克苏河、

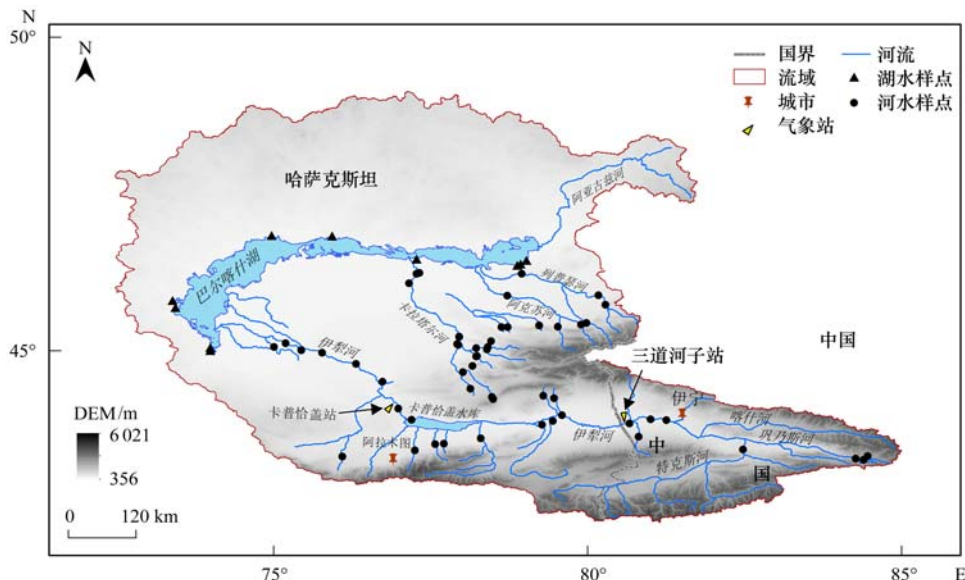


图 1 巴尔喀什湖流域水体采样点分布示意

Fig. 1 Sketched geological map of the study area and water sampling sites

列普瑟河和阿亚古兹河,主要由降水和高山冰雪融水补给,其中的伊犁河是主要的入湖河流,入湖径流量占巴尔喀什湖流域地表水资源总量的 78%^[20]. 巴尔喀什湖南岸与东岸广泛分布着固定和半固定的沙漠与盐碱地,气候较为干旱^[22].

伊犁河发源于天山山脉中部,是跨越中国和哈萨克斯坦的国际河流(图 1). 河流全长约 1 237 km,以我国境内的三道河子站和哈萨克斯坦境内的卡普恰盖站为分界点将伊利河分为上、中、下游. 伊犁河上游的特克斯河、巩乃斯河和喀什河汇合后始称伊犁河^[3].

伊犁河-巴尔喀什湖流域总面积为 50.0×10^4 km²,其中,哈国境内面积占 85%,中国境内的流域面积占 15%^[20]. 流域从西北向东南逐渐抬升,东南部的伊犁河谷东、南、北三面环山,中间为谷地,具有“三山二盆一谷”的地貌特征,既阻挡了干热气流,又可接受湿润水汽,导致该区形成丰富的降水,谷地年均降水量约 300 mm,山地年均降水量约 500 ~ 1 000 mm,属于温带大陆性干旱气候^[23, 24];中西部为水分耗散区,年均降水量在 135 ~ 150 mm 之间,属于干旱区大陆性气候^[23]. 流域气候干旱,地表蒸发量大,再加上人类不合理的农业灌溉等水资源利用,导致该区域沙漠化日趋严重,目前河流下游沿岸、沿巴尔喀什湖的部分小湖和已干涸的湖边,盐碱地分布广泛.

1.2 采样与分析

依据《水质采样技术指导》(HJ 494-2009)相关内容以及巴尔喀什湖流域水文条件和地貌特征,在伊犁河干流及其主要支流、湖泊东西部水体及其入湖河流布设采样点. 2018 年 6 月采集了哈萨克斯坦境内巴尔喀什湖流域湖水样品 10 个、伊犁河水样

18 个及其他入湖河流水样 29 个,2018 年 7 月,在新疆采集了我国境内的伊犁河水样 8 个(图 1). 在采样的同时,通过多参数水质分析仪(YSI, EXO2, USA)对水体常规水化学指标进行现场测定;双指示剂滴定法测定 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} ,即分别以酚酞和甲基橙为指示剂,用酸标准溶液滴定水样,根据两次滴定消耗酸标准溶液的体积,分别计算碳酸根和重碳酸根的含量,相对标准偏差为 1.2%. 然后将水样经 0.45 μm 滤膜过滤,过滤后的部分样品加 1:1 的硝酸酸化后保存于塑料瓶内用于阳离子分析;部分的样品装于玻璃瓶中,并用 PARAFILM 封口膜进行密封,用于 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和同位素分析. 实验室内水体阳离子(Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 K^+)浓度采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Prodigy, USA)测定, SO_4^{2-} 和 Cl^- 浓度由离子色谱仪(Dionex, ICS2000, USA)分析,测试误差在 0.5% 以内;氢、氧同位素测定由美国液体水激光同位素分析仪(LGR, DLT-100, USA)完成,每个样品重复测量 6 次,取其平均值,测试精度分别为 1.0‰和 0.1‰.

2 结果与讨论

2.1 水体化学特征

2.1.1 水体 TDS 和主要离子组成

巴尔喀什湖流域不同类型水体的阴、阳离子浓度分析结果见表 1 和表 2. 巴尔喀什湖水体阴离子浓度的高低顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{HCO}_3^-$, 阳离子浓度的高低顺序为 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+}$, 矿化度平均值为 $2\,527\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最高达 $4\,387\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 1). 湖泊东湖水体的阴、阳离子浓度的高低顺序和西部水体离子相似,但东部水体的离子浓度和矿化度普遍较西部水体高. 湖泊水体离子浓度标准

表 1 巴尔喀什湖水体主要离子浓度分析

Table 1 Statistics of major components of water samples in Lake Balkhash										
水体类型	项目	Ca^{2+} /meq·L ⁻¹	Mg^{2+} /meq·L ⁻¹	Na^+ /meq·L ⁻¹	K^+ /meq·L ⁻¹	CO_3^{2-} /meq·L ⁻¹	HCO_3^- /meq·L ⁻¹	Cl^- /meq·L ⁻¹	SO_4^{2-} /meq·L ⁻¹	TDS /mg·L ⁻¹
湖水 (n = 10)	最小值	1.13	0.56	0.56	0.05	0.00	1.67	0.18	0.65	198
	最大值	3.69	23.37	45.69	2.24	13.34	6.16	27.48	35.28	4 387
	平均值	2.18	13.31	24.99	1.14	8.79	4.26	14.43	19.82	2 527
	标准差	0.96	7.75	15.79	0.79	4.10	1.45	9.70	11.71	1 412
东部湖水 (n = 5)	最小值	1.13	0.56	0.56	0.05	0.00	2.86	0.18	0.65	198
	最大值	1.98	23.37	45.69	2.24	13.34	6.16	27.48	35.28	4 387
	平均值	1.44	16.99	32.86	1.58	9.73	5.10	19.49	25.37	3 174
	标准差	0.43	9.93	19.78	0.96	5.64	1.35	11.96	14.98	1 806
西部湖水 (n = 5)	最小值	2.09	7.54	12.77	0.55	6.15	1.67	6.94	11.07	1 439
	最大值	3.69	12.29	23.23	0.90	10.00	4.17	12.82	18.31	2 589
	平均值	2.92	9.64	17.12	0.71	7.86	3.42	9.37	14.26	1 881
	标准差	0.73	1.70	3.81	0.13	1.97	1.08	2.13	2.69	426

偏差较大,反映了较大的空间差异性,东部湖水的离子浓度和 TDS 较西部高,与巴尔喀什湖西部淡水、东部咸水的特征相符. 这种现象一方面与伊犁河汇入湖泊西部的稀释作用有关,另一方面可能与东、西部湖区的降水量、蒸发能力差异有关,东、西部湖区的年均降水量分别为 $15.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $18.7 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年均蒸发量分别为 1 018 mm 和 987 mm^[2].

伊犁河水体阴离子浓度从大到小依次为 $\text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$, 阳离子浓度从大到小依次为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ (表 2). 伊犁河不同区域水体主要离子和 TDS 浓度总体上呈现从上游到下游

递增的趋势,可能是与沿河独特的水文地质条件及地形地貌特征有关,上游地区的冰雪融水及降水补给较大,稀释了离子浓度,导致水体中各离子浓度较低,中下游地区降水少且蒸发作用强烈,使得水体在一定程度上蒸发、浓缩;再加上地表大面积暴露,当地较强的风化侵蚀作用释放大量盐离子并进入水体,导致水中各主要离子浓度和矿化度升高. 流域其他入湖流水体的阴离子浓度高低顺序为 $\text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$, 阳离子浓度的高低顺序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ (表 2). 伊犁河和其他入湖河流水体离子浓度顺序较一致,体现了相似的离子影响因素.

表 2 伊犁河及其他入湖河流水体主要离子浓度分析
Table 2 Statistics of major components of water samples in rivers from the Lake Balkhash catchment

水体类型	项目	Ca^{2+} /meq·L ⁻¹	Mg^{2+} /meq·L ⁻¹	Na^+ /meq·L ⁻¹	K^+ /meq·L ⁻¹	CO_3^{2-} /meq·L ⁻¹	HCO_3^- /meq·L ⁻¹	Cl^- /meq·L ⁻¹	SO_4^{2-} /meq·L ⁻¹	TDS /mg·L ⁻¹
伊犁河 (n = 26)	最小值	1.39	0.26	0.12	0.02	0.00	1.00	0.02	0.34	91.3
	最大值	4.82	2.12	3.42	0.07	5.26	10.62	2.28	3.11	608
	平均值	2.54	1.06	1.15	0.05	1.89	3.61	0.55	1.43	289
	标准差	0.88	0.49	0.85	0.02	2.08	2.93	0.52	0.74	133
伊犁河上游 (n = 8)	最小值	1.47	0.26	0.12	0.02	0.00	4.53	0.02	0.39	91.3
	最大值	2.79	1.35	1.24	0.07	1.20	10.62	0.46	1.52	259
	平均值	2.00	0.72	0.55	0.04	0.65	7.30	0.19	0.84	163
	标准差	0.51	0.41	0.43	0.02	0.42	2.57	0.17	0.40	61.7
伊犁河中游 (n = 11)	最小值	1.39	0.30	0.18	0.03	0.00	1.00	0.06	0.34	127
	最大值	4.82	1.74	3.42	0.07	5.00	3.33	2.28	3.11	608
	平均值	2.91	1.06	1.29	0.05	2.60	1.85	0.68	1.54	333
	标准差	1.17	0.48	1.00	0.02	2.09	0.78	0.71	0.86	146
伊犁河下游 (n = 7)	最小值	2.50	1.29	1.31	0.07	0.00	1.25	0.68	1.84	339
	最大值	2.63	2.12	2.86	0.07	5.26	3.33	1.05	2.45	475
	平均值	2.57	1.43	1.61	0.07	2.18	2.14	0.74	1.94	364
	标准差	0.05	0.30	0.55	0.00	2.72	0.86	0.13	0.23	49.2
其他入湖河流 (n = 29)	最小值	0.95	0.24	0.14	0.02	0.00	1.11	0.04	0.18	107
	最大值	3.55	2.51	4.34	0.10	6.67	3.75	1.39	3.63	604
	平均值	2.12	0.89	1.00	0.04	2.01	2.26	0.24	1.05	263
	标准差	0.88	0.67	1.02	0.02	2.64	0.80	0.28	1.03	148

水化学 Piper 三角图能够体现水体的化学组成特征,进而可以辨别水体的一般化学特征及其控制单元^[11,12,25]. 图 2 为巴尔喀什湖流域不同类型水体主要离子当量浓度的相对比例. 湖泊水体的水化学组成分布较为集中,阴离子以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主,分别占阴离子总量的 42% 和 31%,阳离子以 Na^+ 为主,占阳离子总量的 60%,水化学类型为 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 和 Cl-Na 型,表明蒸发作用的影响;卡拉塔尔河入湖口处的水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,可能受河水影响较大. 伊犁河水体离子以 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 为主,分别占阴、阳离子总量的 48% 和 53%,水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型. 伊犁河从上游到下游,水样中 HCO_3^-

在阴离子总量的比例从 81% 下降到 31%, Ca^{2+} 在阳离子总量的比例从 60% 下到 45%,而 SO_4^{2-} 的比例从 9% 升高到 28%, Cl^- 的比例从 2% 升高到 11%, Na^+ 的比例从 16% 升高到 28%,水化学类型逐渐由重碳酸盐型过渡到硫酸化物型、氯化物型,反映了水化学性质的影响因素发生变化. 流域内其他入湖河流的水体阴离子以 HCO_3^- 为主,阳离子以 Ca^{2+} 为主,分别占阴、阳离子总量的 41% 和 52%,水化学类型是 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$.

2.1.2 水体离子来源分析

Gibbs^[26]通过对世界雨水、河水和湖泊等地表水体的水化学组分分析,将天然水化学成分的来源主要区别为 3 个,即大气降水控制型、岩石风化控

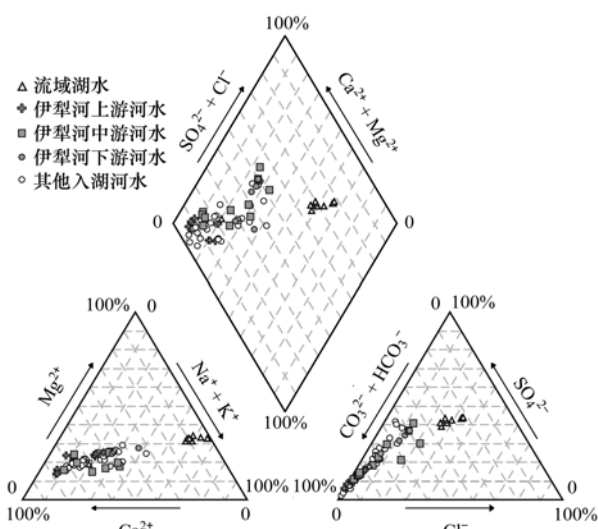


图2 巴尔喀什湖流域不同类型水体的水化学 Piper 图

Fig. 2 Piper trilinear diagram of water in the Lake Balkhash catchment

制型、蒸发-结晶控制型,而 Gibbs 图可以定性判断水化学组成来源。由研究区的湖泊和河流水体离子的水化学 Gibbs 图可知(图3),除卡拉塔河入湖口处水体外,湖泊水体具有较高的 TDS 值, $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值在 0.5 ~ 0.8 之间, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值接近 1, 优势离子主要落在 Gibbs 模型上端,处于岩石风化与蒸发结晶区,表明离子主要受蒸发作用影响。除卡拉塔河入湖口处样点外的湖泊东部水体的 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 和 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 均值分别为 0.97 和 0.71, TDS 均值为 3 918 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 西部水体的 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 和 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 均值分别为 0.62 和 0.87, TDS 均

为 1 881 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 反映了东部水体较西部水体受到的蒸发作用更强。

伊犁河水体的 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值在 0.1 ~ 0.6 之间, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值在 0.002 ~ 0.6 之间, TDS 值在 91.3 ~ 608 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 主要处在岩石风化与蒸发结晶区之间。其中, 上游河水的 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 均值为 0.01, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 均值为 0.2, TDS 均值为 163 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 中游河水的 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 均值为 0.18, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 均值为 0.3, TDS 均值为 333 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 下游河水的 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 均值为 0.19, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 均值为 0.4, TDS 均值为 364 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。伊犁河水体阴、阳离子分布相似, 说明河水优势离子主要受岩石风化作用和蒸发作用共同影响。伊犁河水体主要离子比值(尤其是阴离子比值)和 TDS 值整体上表现为从上游到下游的递增趋势, 表明影响水体离子的作用逐渐从岩石风化为蒸发作用为主, 主要与伊犁河不同区域降水、蒸发情况等有关, 伊犁河上游河谷地区降水丰富, 加之天山冰雪融水, 水体离子主要来自碳酸盐类矿物风化; 中下游经萨雷耶西克特劳沙漠区后注入巴尔喀什湖, 降水少, 蒸发强烈, 河水经蒸发浓缩, 下游灌溉区以及南岸沙漠与盐碱地大面积地表暴露, 导致当地较强的风化侵蚀作用, 大量盐离子释放进入水体。流域其他入湖河流体水的 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值在 0.1 ~ 0.6 之间, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值在 0.01 ~ 0.4 之间, TDS 值在 107 ~ 604 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。其主要阴、阳离子分布与伊犁河相似, 处在岩石风化和蒸发作

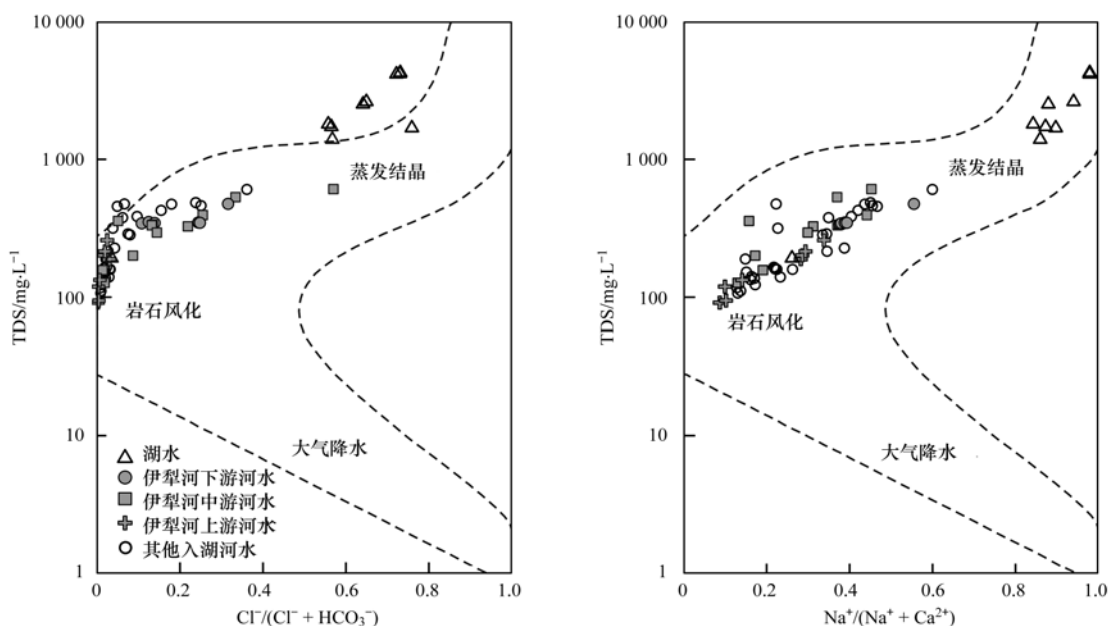


图3 巴尔喀什湖流域不同类型水体主要离子的 Gibbs 图

Fig. 3 Gibbs plots of major ions in water samples from the Lake Balkhash catchment

用区,指示河流水体离子的影响因素相似,即碳酸盐风化和蒸发过程。

对巴尔喀什湖流域不同类型水体离子空间分布进行主成分分析(PCA,图4),得到两个主成分,共解释了变量的94.60%方差,其中主成分1(PC1)解释了75.99%的方差,主成分2(PC2)解释了18.61%的方差。湖泊水体离子对PC1的贡献度较大,伊犁河上游水体离子对PC2的贡献度较大。伊犁河中下游水体离子在PC1上的贡献度逐渐增大,同时在PC2上的贡献逐渐减小;其他入湖河流水体在两个主成分因子上都有贡献。伊犁河上游和湖泊水体离子位于图右上顶端的对角线的两端,类似于两个“端元”,而伊犁河中下游和流域其他入湖河流水体位于这两个“端元”之间,表明不同地理位置的水体离子主要控制因子差异。

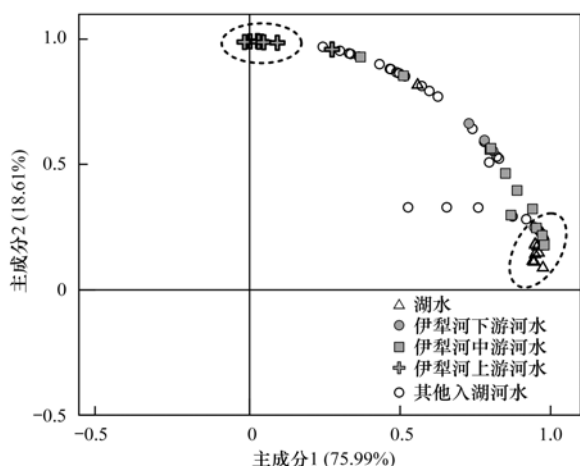
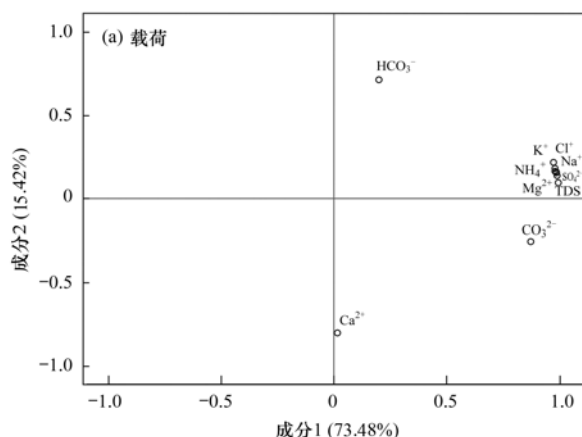


图4 巴尔喀什湖流域水体离子空间分布的主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis diagram of water samples from the Lake Balkhash catchment

为了进一步探讨水体主要离子与地质背景之间的关系,对巴尔喀什湖流域不同类型水体主要离子间的关系进行PCA分析,得到2个主要公共因素[图5(a)],共解释了总变量88.90%的方差。第一



因子(PC1)的方差贡献率为73.48%,与大部分离子、TDS之间存在强相关性,表明这些离子是TDS的主要来源, Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 的强相关性表明蒸发作用^[27],与 NH_4^+ 的相关性反映了人类活动的影响,如农业化肥的使用引起 NH_4^+ 含量升高^[28];第二因子(PC2)的方差贡献率为15.42%,与 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 存在较强的相关关系,反映了碳酸盐溶解作用对水体离子的影响。因子得分在PC1和PC2上的分布情况如图5(b)所示,采样点被分为与其地质背景有关的3类。流域湖泊水体离子受PC1的影响较大,即蒸发作用以及人类活动;伊犁河上游水体离子对PC2的贡献较大,即碳酸盐风化溶解作用;伊犁河水体离子从上游到中下游在PC1上的贡献逐渐增大,同时在PC2上的贡献逐渐减小,表明伊犁河中下游水体受到的蒸发作用、人类活动影响增强;流域其他入湖河流水体离子分布在PC1和PC2上,反映了蒸发作用、碳酸岩风化溶解作用和人类活动的共同影响。伊犁河中下游地区是重要的农业灌区,包含8个主要灌区,面积约为 $56.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$,大规模种植水稻等作物^[29],农业施肥和灌溉引水等给水环境造成了一定的影响。

2.2 水体氢氧同位素

2.2.1 水体氢氧同位素的分布特征和影响因素

不同水样的氢同位素和氧同位素空间分布见图6,氢和氧同位素空间分布特征基本一致。湖水氢和氧同位素值变化范围分别为 -91.13‰ ~ -18.26‰ 和 -13.96‰ ~ -0.53‰ ,均值分别为 -30.50‰ 和 -2.69‰ ;河水氢和氧同位素值变化范围分别为 -99.17‰ ~ -71.43‰ 和 -14.52‰ ~ -10.25‰ ,均值分别为 -84.62‰ 和 -12.40‰ 。卡拉塔尔河入湖口处的水体氢氧同位素呈现较低值,除该采样点外的湖东部水体氢氧同位素均值分别为 -23.39‰ 和 -1.22‰ ,湖西部水体氢氧同位素均值分别为

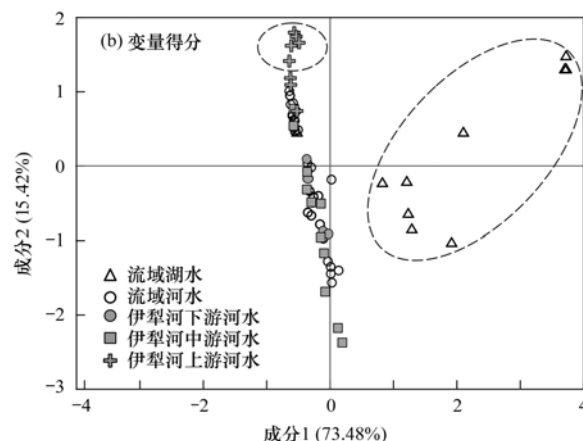


图5 巴尔喀什湖流域水体离子的主成分分析

Fig. 5 Principal component analysis diagram of major ions in water samples from the Lake Balkhash catchment

-24.07‰和-1.61‰,湖泊东部水体氢氧同位素值高于西部水体,反映了湖泊东西部蒸发强度的差异,与降水量和蒸发量差异有关。伊犁河水体氢和氧同位素变化范围分别为-89.41‰~-71.43‰和-13.06‰~-10.25‰,均值分别为-77.94‰和-11.41‰。其中,上游水体氢和氧同位素变化范围分别为-85.42‰~-71.43‰和-12.73‰~-10.33‰,下游水体氢和氧同位素变化范围分别为-75.32‰~-71.74‰和-11.48‰~-10.25‰。伊犁河水体的氢和氧同位素值从上游到下游呈现富集趋势,主要是由于上游河水冰雪融水和雨水补给,年均径流量较大(143.61 亿 m^3)^[3],造成上游水体的同位素贫化。而伊犁河中下游的卡普恰盖水库位于阿拉木图境内,阿拉木图农业灌溉和城市工业、生活用水极大依赖于水库及上游供水,2008 年巴尔喀什湖流域中下游用水量约 $65 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右^[29],耗水量增加导致年径流量减少(46.99 亿 m^3)^[3];下游河面较宽阔、水流相对缓慢,蒸发作用强烈;再加上下游农田回水和城市污水排放等影响,最终导致水中离子浓度升高,重同位素留存比例增大,氢氧同位素值升高。伊犁河中游水体同位素值较低可能与该区域支流贫同位素河水汇入有关,有研究表明河流支流水体氢氧同位素值对干流同位素值的影响较大,不同支流小流域地理因素影响其稳定同位素组成,最终影响到干流河水中稳定同位素的变化^[30,31]。流域其他入湖河流体水的氢氧同位素值变化范围分别为-99.17‰~-77.48‰和-14.52‰~-10.94‰,均值分别为-90.61‰和-13.28‰。整体上,流域其他入湖河流较伊犁河水体的同位素值低,湖泊水体的氢氧同位素值高于河流水体,湖泊水体同位素偏正主要是长期的蒸发浓缩导致,流域不同区域水体的同位素差异与降水、蒸发作用等差异有关。

区域降水中的同位素组成呈现一定的地理效

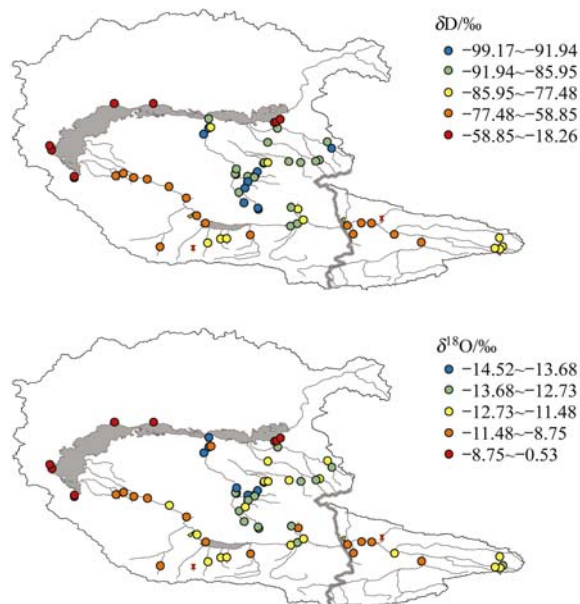


图6 巴尔喀什湖流域不同类型水体氢氧同位素值的分布

Fig. 6 Distributions of δD and $\delta^{18}\text{O}$ values in water samples from the Lake Balkhash catchment

应,包括高程效应、大陆效应和纬度效应^[12,19,32,33],高程效应是指当海拔高度较高时,平均气温较低,降水中的同位素值减少;纬度效应是指随着纬度的升高,降水中的同位素值降低;大陆效应指当水蒸气汽团从源区被输送经过大陆时,由于地形作用及温度影响,同位素组成发生变化,导致不同地区的降水表现出不同的同位素值,一般运移距离越远,同位素值愈负。降水是河水主要补给水源,其同位素组成影响不同区域河水中氢氧同位素组成。为了解该流域河流水体同位素空间差异的影响因素,对该流域河流水体的氢氧同位素值与纬度、经度、海拔的相关性进行分析(图7)。结果显示,河流水体同位素值与采样点纬度的相关性达到显著水平,与经度($r = -0.13, P > 0.05$; $r = -0.11, P > 0.05$)、海拔($r = -0.12, P > 0.05$; $r = -0.03, P > 0.05$)不显著相关。河流水体同位素组成表现了一

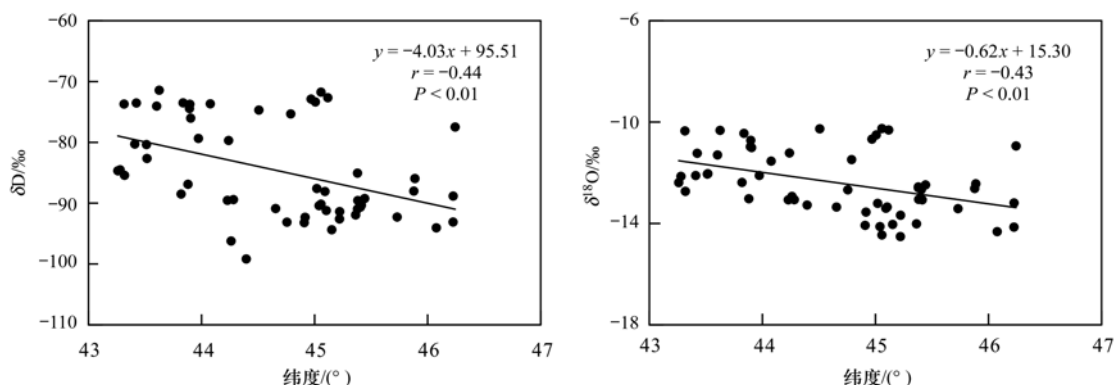


图7 流域河流水体氢氧同位素随纬度的变化

Fig. 7 Relationship between δD , $\delta^{18}\text{O}$ values, and the latitude of river waters in the Lake Balkhash catchment

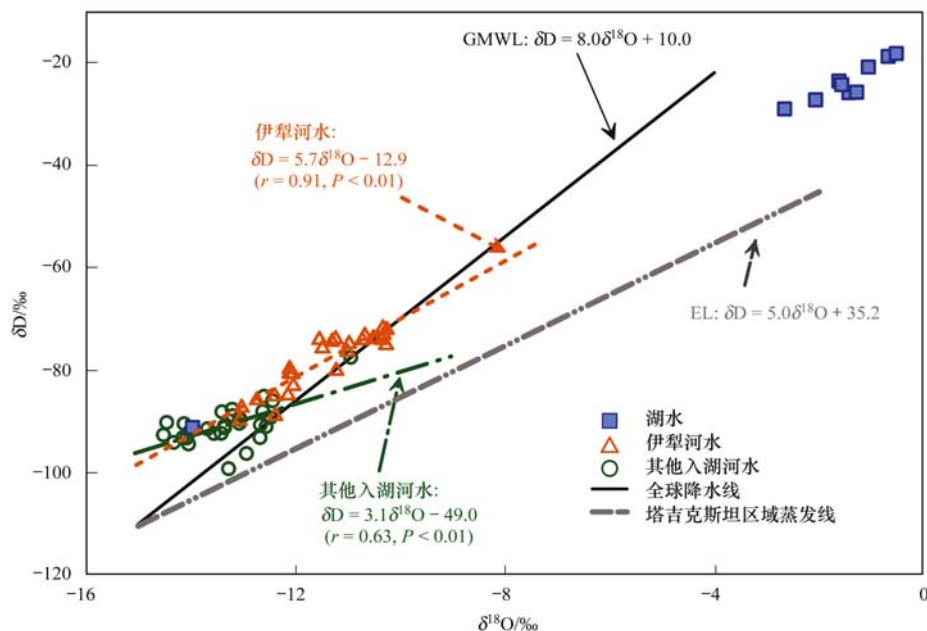
定的纬度效应,但大陆效应、高程效应不明显。

2.2.2 水体 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系

Craig^[34]在研究北美大陆大气降水过程中,将氢氧同位素的线性关系($\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$)命名为全球大气降水线(global meteoric water line, GMWL)。GMWL 仅适用于全球范围,由于气候和地理参数的变化,许多区域大气降水线与 GMWL 不同。黄天明等^[19]根据西部地区相关气象站降水资料计算出中国西部地区大气降水线(local meteoric water line, LMWL): $\delta D = 7.56 \delta^{18}O + 5.05$,并认为 LMWL 斜率偏离 GMWL 主要是由蒸发作用引起。

除卡拉塔河入湖口处的采样点外,流域湖水氢氧同位素值与哈国东部湖水^[12]相近,都偏离全球降水线,并靠近塔吉克斯坦区域蒸发线^[35],同位素

值最为偏正(图8),体现了湖泊作为流域低点,其水体受到较强的蒸发作用;伊犁河和流域其他入湖河流水体氢氧同位素的分布位置相近,位于降水线附近(图8),表明河流同位素组成受到降水影响较大。对河水中的氢氧同位素进行线性回归分析,得出相应的线性关系(图8),伊犁河水体的氢氧同位素关系为: $\delta D = 5.7 \delta^{18}O - 12.9$,流域其他入湖河流水体氢氧同位素关系为: $\delta D = 3.1 \delta^{18}O - 49.0$ 。这2个线性方程均不同程度地偏离 GMWL,斜率值都小于降水线(GMWL 和 LMWL)^[19, 34]和哈国东部河水线(7.6)^[12],但大于塔吉克斯坦区域的蒸发线斜率(5.0)^[35],表明哈国不同区域河水受到蒸发的影响程度不同,但蒸发强度相对塔吉克斯坦地区较低。



GMWL 表示全球大气降水线^[34], EL 表示塔吉克斯坦区域蒸发线^[35]

图8 巴尔喀什湖流域不同水体 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系

Fig. 8 Plots of δD and $\delta^{18}O$ in waters from the Lake Balkhash catchment

氕盈余($d = \delta D - 8 \delta^{18}O$)可以较直观地反映地区大气降水蒸发、凝结过程的不平衡程度,即蒸发、凝结过程的不平衡程度越强, δD 和 $\delta^{18}O$ 值越偏正, d 值越小^[32, 36]。湖泊水体 d 值为 $-9.02‰$,除卡拉塔河入湖口处的采样点外的东部水体 d' 值为 $-13.66‰$,湖西部水体 d 值为 $-11.21‰$;伊犁河水体 d 值为 $13.33‰$,流域其他入湖河流水体 d 值为 $15.65‰$ 。湖泊水体 d 值,尤其是东部水体 d' 值,明显小于全球大气降水线的 d 值($10‰$),表明湖水,尤其是东部湖水,受到强烈的蒸发作用导致氢、氧同位素富集。

2.3 水化学指标和同位素相关性分析

当水体的氢、氧同位素组成与离子质量浓度、

矿化度相关性不明显时,水体主要受补给来源的影响;当水体的氢、氧同位素组成与离子质量浓度、矿化度相关性显著时,水体受蒸发作用引起氢、氧同位素的分馏,使得氢、氧同位素偏重,相应的离子质量浓度、矿化度等也会升高^[36]。湖泊水体同位素,尤其是东部湖水同位素与大部分水化学指标存在显著相关性(表3),表明东部湖水受蒸发作用较强,不同区域湖水同位素和离子浓度、矿化度相关性差异与伊犁河水入湖和降水量、蒸发程度差异有关。除 K^+ 和 Mg^{2+} 外,流域河水体氢、氧同位素组成与离子质量浓度的相关性不明显,说明河流水体同位素和主要离子组成主要受补给来源的影响,蒸发作用相对较小。

表3 巴尔喀什湖流域不同水体的化学参数和同位素相关性分析¹⁾

Table 3 Correlations between δD , $\delta^{18}O$ and hydrochemical parameters in waters from the Lake Balkhash catchment										
水体类型	同位素	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
东部湖水 (n=5)	δD	0.88 *	-0.41	0.88 *	0.87	0.85	0.94 *	0.890 *	0.86	0.88 *
	$\delta^{18}O$	0.89 *	-0.44	0.90 *	0.88 *	0.86	0.94 *	0.90 *	0.87	0.89 *
西部湖水 (n=5)	δD	0.77	0.12	0.83	0.76	0.70	0.92 *	-0.14	0.83	0.67
	$\delta^{18}O$	0.78	0.19	0.85	0.79	0.75	0.88 *	-0.07	0.85	0.72
伊犁河水 (n=26)	δD	-0.05	-0.27	0.30	-0.01	0.42 *	0.04	0.17	-0.19	0.07
	$\delta^{18}O$	0.07	-0.13	0.41 *	0.13	0.49 *	0.13	0.16	-0.08	0.18
湖泊东南部卡拉 塔尔河河水(n=18)	δD	-0.25	-0.22	-0.25	-0.28	0.48 *	0.30	-0.06	-0.11	-0.33
	$\delta^{18}O$	0.39	0.39	0.33	0.37	0.59 **	0.34	0.13	0.37	0.33
湖泊东部阿克苏河、 列普瑟河河水(n=11)	δD	0.15	0.09	-0.13	-0.20	0.41	0.23	-0.05	-0.16	-0.25
	$\delta^{18}O$	-0.02	-0.09	-0.23	-0.26	0.49	-0.05	0.18	-0.24	-0.28

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上极显著相关

3 结论

(1)巴尔喀什湖流域湖泊水体中阴离子以 Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 为主,阳离子以 Na⁺ 为主,水化学类型为 SO₄-Na 和 Cl-Na;河流水体离子以 Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 为主,水化学类型为 HCO₃-Ca. 伊犁河从上游到下游呈现由重碳酸盐型过渡到硫酸化物型、氯化物型的趋势,表现为 Na⁺ 和 SO₄²⁻、Cl⁻ 浓度的明显升高. 湖泊水体的主要离子浓度明显位于 Gibbs 模型的蒸发作用区;河流水体的离子分布在蒸发和岩石风化区之间,其中伊犁河主要离子从上游到下游向蒸发控制带偏移. PCA 分析结果表明,湖水离子组成与蒸发岩风化溶解、人类活动有关,伊犁河上游水体离子受碳酸岩溶解作用影响,伊犁河中下游和其他入湖河流水体的离子组成受蒸发岩风化溶解、人类活动和碳酸岩溶解作用影响,反映了水化学影响因素的空间差异.

(2)湖泊水体氢氧同位素组成位于全球大气降水线和哈萨克斯坦地区蒸发线之间,氕盈余明显小于全球降水线,反映了较强的蒸发作用导致的水体同位素富集;河流水体的氢氧同位素位于全球大气降水线附近,表明降水对同位素组成的影响. 此外,伊犁河流域水体的氢氧同位素值在空间分布上表现为从上游到下游的富集趋势,与沿途降水、蒸发等的差异有关.

(3)巴尔喀什湖流域不同水体化学参数与同位素相关分析表明,河流水体的氢氧同位素组成与各离子相关性不显著,东部湖水的同位素组成与大部分离子存在显著相关性,反映了湖泊水体受到强烈的蒸发作用影响.

参考文献:

[1] 魏国英. 西北干旱区高山-绿洲湖泊近两千年生态变化及可能机制[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.

Wei G Y. Ecological changes and possible mechanisms of alpine-oasis lakes in the arid region of northwest China in the past two thousands of years[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.

[2] 龙爱华, 邓铭江, 谢蕾, 等. 巴尔喀什湖水量平衡研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1341-1352.

Long A H, Deng M J, Xie L, et al. A study of the water balance of Lake Balkhash[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1341-1352.

[3] 邓铭江, 王志杰, 王校妍. 巴尔喀什湖生态水位演变分析及调控对策[J]. 水利学报, 2011, 42(4): 403-413.

Deng M J, Wang Z J, Wang J Y. Analysis of Balkhash Lake ecological water level evolvement and its regulation strategy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4): 403-413.

[4] Petr T. Lake Balkhash, Kazakhstan[J]. International Journal of Salt Lake Research, 1992, 1(1): 21-46.

[5] Kezer K, Matsuyama H. Decrease of river runoff in the Lake Balkhash basin in Central Asia[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(6): 1407-1423.

[6] 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 等. 锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 131-142.

Tang X W, Wu J K, Xue L Y, et al. Major ion chemistry of surface water in the Xilin River basin and the possible controls[J]. Environmental Science, 2014, 35(1): 131-142.

[7] Meybeck M, Ragu A. River discharges to the oceans: an assessment of suspended solids, major ions and nutrients[M]. Kenya: UNEP, 1997.

[8] Berner E K, Berner R A. Global environment: water, air, and geochemical cycles (2nd ed.) [M]. Princeton: Princeton University Press, 2012.

[9] Pant R R, Zhang F, Rehman F U, et al. Spatiotemporal variations of hydrogeochemistry and its controlling factors in the Gandaki River Basin, Central Himalaya Nepal[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622: 770-782.

[10] Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers[J]. American Journal of Science, 1982, 282(4): 401-450.

[11] Li Q Y, Wu J L, Shen B B, et al. Water chemistry and stable isotopes of different water types in Tajikistan[J]. Environmental Processes, 2018, 5(S1): 127-137.

[12] 曾海鳌, 吴敬禄, 刘文, 等. 哈萨克斯坦东部水体氢、氧同位素和水化学特征[J]. 干旱区地理, 2013, 36(4): 662-668.

- Zeng H A, Wu J L, Liu W, *et al.* Characteristics of hydrochemistry and hydrogen, oxygen isotopes of waters in Kazakhstan[J]. *Arid Land Geography*, 2013, **36**(4): 662-668.
- [13] 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. *水科学进展*, 2006, **17**(5): 738-747.
Zhang Y H, Wu Y Q, Wen X H, *et al.* Application of environmental isotopes in water cycle[J]. *Advances in Water Science*, 2006, **17**(5): 738-747.
- [14] Bowen G J, Kennedy C D, Henne P D, *et al.* Footprint of recycled water subsidies downwind of Lake Michigan [J]. *Ecosphere*, 2012, **3**(6): 1-16.
- [15] Burnett A W, Mullins H T, Patterson W P. Relationship between atmospheric circulation and winter precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in central New York State[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(22): 122209.
- [16] Gat J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1996, **24**: 225-262.
- [17] 吴敬禄, 林琳, 曾海鳌, 等. 长江中下游湖泊水体氧同位素组成[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, **26**(3): 53-56.
Wu J L, Lin L, Zeng H A, *et al.* Characteristics of oxygen isotopic composition of the lakes along the mid-lower reaches of the Yangtze River[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, **26**(3): 53-56.
- [18] Naseem S, Hamza S, Bashir E. Groundwater geochemistry of Winder agricultural farms, Balochistan, Pakistan and assessment for irrigation water quality[J]. *European Water*, 2010, **31**: 21-32.
- [19] 黄天明, 聂中青, 袁利娟. 西部降水氢氧稳定同位素温度及地理效应[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, **22**(8): 76-81.
Huang T M, Nie Z Q, Yuan L J. Temperature and geographical effects of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in west of China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, **22**(8): 76-81.
- [20] Krupa E, Slyvinskiy G, Barinova S. The effect of climatic factors on the long-term dynamics of aquatic ecosystem of the Balkhash Lake (Kazakhstan, Central Asia) [J]. *Advanced Studies in Biology*, 2014, **6**(3): 115-136.
- [21] Leal Filho W. Climate change and disaster risk management [M]. Berlin: Springer, 2013.
- [22] 高彦华, 王洪亮, 周旭, 等. 巴尔喀什湖近30余年动态变化遥感监测与分析[J]. *环境与可持续发展*, 2016, **41**(1): 102-106.
Gao Y H, Wang H L, Zhou X, *et al.* Remote sensing monitoring and analyses of the dynamic change of Balkhash Lake in the last 30 years[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2016, **41**(1): 102-106.
- [23] 郝建盛, 张飞云, 赵鑫, 等. 基于GRACE监测数据的伊犁—巴尔喀什湖盆地水储量变化特征及影响因素[J]. *遥感技术与应用*, 2017, **32**(5): 883-892.
Hao J S, Zhang F Y, Zhao X, *et al.* Spatiotemporal change of water storage and its influencing factors in the Ili-Balkhash Basin based on GRACE data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, **32**(5): 883-892.
- [24] 夏含峰, 谢洪波, 刘浩, 等. 新疆伊犁河谷植被与地形地貌及地下水关系[J]. *长江科学院院报*, 2018, **35**(9): 54-57.
- Xia H F, Xie H B, Liu H, *et al.* Relations of vegetation with topography and groundwater in Yili River valley of Xinjiang[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, **35**(9): 54-57.
- [25] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1944, **25**(6): 914-928.
- [26] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [27] Monjerezi M, Vogt R D, Aagaard P, *et al.* Hydro-geochemical processes in an area with saline groundwater in lower Shire River valley, Malawi: an integrated application of hierarchical cluster and principal component analyses [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(8): 1399-1413.
- [28] Hamed Y, Dhahri F. Hydro-geochemical and isotopic composition of groundwater, with emphasis on sources of salinity, in the aquifer system in Northwestern Tunisia [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2013, **83**: 10-24.
- [29] 雪克来提·巴斯托夫, 龙爱华, 邓铭江, 等. 基于Google Earth的巴尔喀什湖流域中下游水资源开发利用研究[J]. *干旱区地理*, 2012, **35**(3): 388-398.
Basituofu X, Long A H, Deng M J, *et al.* Disquisition for water resources development and utilization in middle-lower reaches of Balkhash Basin on Google Earth [J]. *Arid Land Geography*, 2012, **35**(3): 388-398.
- [30] Pawellek F, Franenstein F, Veizer J. Hydrochemistry and isotope geochemistry of the upper Danube River [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, **66**(21): 3839-3853.
- [31] 余婷婷, 甘义群, 周爱国, 等. 拉萨河流域地表径流氢氧同位素空间分布特征[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2010, **35**(5): 873-878.
Yu T T, Gan Y Q, Zhou A G, *et al.* Characteristics of oxygen and hydrogen isotope distribution of surface runoff in the Lhasa River Basin [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2010, **35**(5): 873-878.
- [32] 李亚举, 张明军, 王圣杰, 等. 我国大气降水中稳定同位素研究进展[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(3): 624-633.
Li Y J, Zhang M J, Wang S J, *et al.* Progress of the research of stable isotope in precipitation in China: a review [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(3): 624-633.
- [33] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [34] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [35] Mischke S, Rajabov I, Mustaeva N, *et al.* Modern hydrology and late Holocene history of Lake Karakul, eastern Pamirs (Tajikistan): a reconnaissance study [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, **289**(1-4): 10-24.
- [36] 汪敬忠, 吴敬禄, 曾海鳌, 等. 内蒙古河套平原水体同位素及水化学特征[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2013, **35**(4): 104-112.
Wang J Z, Wu J L, Zeng H A, *et al.* Characteristics of water isotope and hydrochemistry in Hetao Plain of Inner Mongolia [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2013, **35**(4): 104-112.

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)