

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



2019

Vol.40 No.9

第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)
郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析	郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)
济南市背景区域大气 PM _{2.5} 污染特征及其对能见度的影响	别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中多环芳烃来源解析及健康风险评估	刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)
2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势	刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)
长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征	赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)
燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征	杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)
高速公路沿线 PM _{2.5} 中重金属污染特征	李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)
北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险	胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)
风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用	秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (3935)
京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)
成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱	周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)
工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估	孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)
典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析	王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)
不同方法制备 Co ₃ O ₄ 催化剂 CO-SCR 性能及机制	仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)
全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征	崔杰文, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)
江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笪文怡, 季鹏飞 (4000)
城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素: 以宁波市小浃江为例	高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)
水华对沉积物中氮的转化和去除的影响	肖琳, 杨佳怡 (4018)
沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性	刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)
汾河下游雨季硝酸盐污染源解析	汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)
新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)
基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性	张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)
FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例	陈倩, 李秋华, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)
天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制	邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)
镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb ²⁺ 的去除	何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)
2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb ²⁺	晋圣兆, 向阳, 张隽瑀, 张凯, 吉庆华 (4091)
钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验	白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)
大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除	贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建峰 (4105)
A ² /O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化	荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)
上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能	杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)
微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析	张若晨, 陈川, 邵博, 王威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)
基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验	张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)
聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比	易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)
厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学	唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)
Ca ²⁺ 对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响	张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)
从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷	畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)
信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响	徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏清旋 (4177)
海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响	胡越航, 宣丽霞, 裴琼芬 (4185)
耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析	赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)
稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响	保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)
地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响	陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)
氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N ₂ O 排放的影响	吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)
三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N ₂ O) 分布和释放	程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)
沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响	朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)
新建铅蓄电池集聚区对周边土壤环境的影响: 基于重金属空间特征	丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)
不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响	杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)
基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法	张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)
缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征	罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)
西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响	田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)
调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析	彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)
海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源	陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)
《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)	

新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律

魏兴^{1,2}, 周金龙^{1,2*}, 乃尉华³, 曾妍妍^{1,2}, 范薇^{1,2}, 李斌³

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第二水文工程地质大队, 昌吉 831100)

摘要:“水质型”缺水问题严重阻碍着新疆喀什地区经济的发展。为研究位于喀什地区西部的喀什三角洲地下水水化学特征及主要离子来源,于2016年6~10月采集地下水水化学样品402组,地下水氢氧同位素样品114组。综合运用数理统计、Gibbs图、离子比、Schoeller图和水文地球化学模拟等方法,分析了喀什三角洲地下水的水文地球化学特征,探讨了水化学演化规律及主要离子来源。结果表明:①该区地下水中阴离子以 SO_4^{2-} 为主,其次为 Cl^- ;阳离子以 Na^+ 为主,地下水类型以 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}$ 型为主;②该区地下水离子组分受岩石溶滤作用和蒸发浓缩作用控制。水中离子主要来源于蒸发岩的溶解,其次为碳酸岩的溶解。河流冲积平原潜水受蒸发浓缩作用影响,承压水还受反阳离子交换作用和混合作用影响;③沿地下水流向,地下水离子组分浓度呈递增趋势,岩盐、白云石和石膏发生溶解,方解石沉淀。

关键词:新疆喀什三角洲;水化学;离子来源;水化学演化;水文地球化学模拟

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-4042-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901211

Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang

WEI Xing^{1,2}, ZHOU Jin-long^{1,2*}, NAI Wei-hua³, ZENG Yan-yan^{1,2}, FAN Wei^{1,2}, LI Bin³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, China; 3. NO.2 Hydrogeological and Engineering Geological Team of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Changji 831100, China)

Abstract: Pollution-induced water shortage problems have severely hindered the economic development of Kashi Prefecture in Xinjiang. In order to study the chemical characteristics and main ion sources of groundwater in the Kashgar River Delta of Western Kashi Prefecture, 402 groundwater samples and 114 groundwater hydrogen and oxygen isotope samples were collected and tested in June to October 2016. Based on the methods of mathematical statistics, Gibbs diagram, ion ratio, Schoeller diagram, and hydrogeochemical simulation, the hydrogeochemical characteristics of the groundwater were analyzed, and the hydrochemical evolution law and the main ion sources were discussed. The following results were noted. ① SO_4^{2-} was the main anion in the groundwater, followed by Cl^- . Na^+ was the main cation, and the groundwater was mainly $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}$ type. ②The groundwater ion components were controlled by dissolution of rocks and evaporation. The groundwater ions were mainly derived from the dissolution of evaporites, followed by the dissolution of carbonates. Unconfined groundwater in the river alluvium plain was affected by evaporation, and the confined groundwater was affected by reverse cation exchange and mixing. ③Along the groundwater flow direction, the concentration of ion components in the groundwater increased. Halite, dolomite, and gypsum were dissolved, and calcite was precipitated.

Key words: Kashgar River Delta in Xinjiang; hydrochemistry; ion sources; hydrochemical evolution; hydrogeochemical simulation

新疆喀什地区地处塔里木盆地西南缘,是一个经济快速发展的典型干旱地区。长期以来“资源型缺水”和“水质型缺水”严重制约着喀什地区经济的发展。其中水质型缺水主要表现在地下水硫酸盐、氯化物、溶解性总固体和总硬度普遍性超标^[1,2],地下水水质问题较为突出。地下水与周围环境长期作用的过程中形成了特有的水化学特征^[3~5],在一定程度上记录着地下水的补给来源^[6]、运移^[7]和循环^[8]等信息。氢氧同位素在研究地下水循环和演化过程中应用广泛,不仅记录着水体起源和循环信息,还可以判断水体相互关系^[9,10]。

近年来,许多学者在喀什地区开展了较多地下水研究工作,主要包括地下水资源分布^[11]、地下水化学特征^[12]和地下水污染^[13,14]等方面。而对地下

水演化过程与控制因素的认识仍显不足。本文以位于喀什地区西部的喀什三角洲为研究区,运用水文地球化学与氢氧同位素探讨地下水化学特征及控制因素,分析水化学成因及演化过程,以期为地下水利用提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于喀什噶尔河流域中下游地区,具有北、西、南三面环山,东面向塔里木盆地敞开的独

收稿日期: 2019-01-25; 修订日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41662016); 新疆维吾尔自治区“十三五”重点学科建设高峰学科-水利工程学科基金项目(xjsgcfxk20161103)

作者简介: 魏兴(1993~),男,博士研究生,主要研究方向为干旱区地下水利用与保护, E-mail: 1035027480@qq.com

* 通信作者, E-mail: zjzhoujl@163.com

特地形条件,从西向东平原区逐渐扩大,形成典型的三角洲半封闭盆地.地理坐标为 $75^{\circ}00'00'' \sim 76^{\circ}52'15''\text{E}$, $38^{\circ}22'05'' \sim 39^{\circ}53'54''\text{N}$,总面积 $17\,545\text{ km}^2$,其中平原区面积 $13\,329\text{ km}^2$ (图 1).地貌可划分为构造剥蚀低中山、构造剥蚀低山丘陵、山麓斜坡冲洪积砾质平原、河流冲积平原和风积沙漠 5 类.研究区平原是喀什噶尔河流域主要经济活动区,包括喀什市、疏勒县、疏附县、英吉沙县、阿图什市、阿克陶县、乌恰县等县市.该区属暖温带大陆性干旱气候,多年平均气温为 11.7°C ,多年平均

降水量为 52.5 mm ,多年平均水面蒸发量为 $1\,757.1\text{ mm}$.

研究区山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水区沿北、西、南山前分布,中下游则为河流冲积平原潜水和河流冲积平原承压水区.平原区第四系厚度山前向平原区逐渐变厚,变化范围为 $100 \sim 1\,000\text{ m}$.第四系松散沉积物由山前单一的卵、砾、砂石地层向下游平原区过渡为中粗砂、砂、亚砂土、亚黏土和黏土的多层结构,研究区平原受河流冲、洪积沉积规律的影响,上游至下游具有岩性颗粒逐步变细的

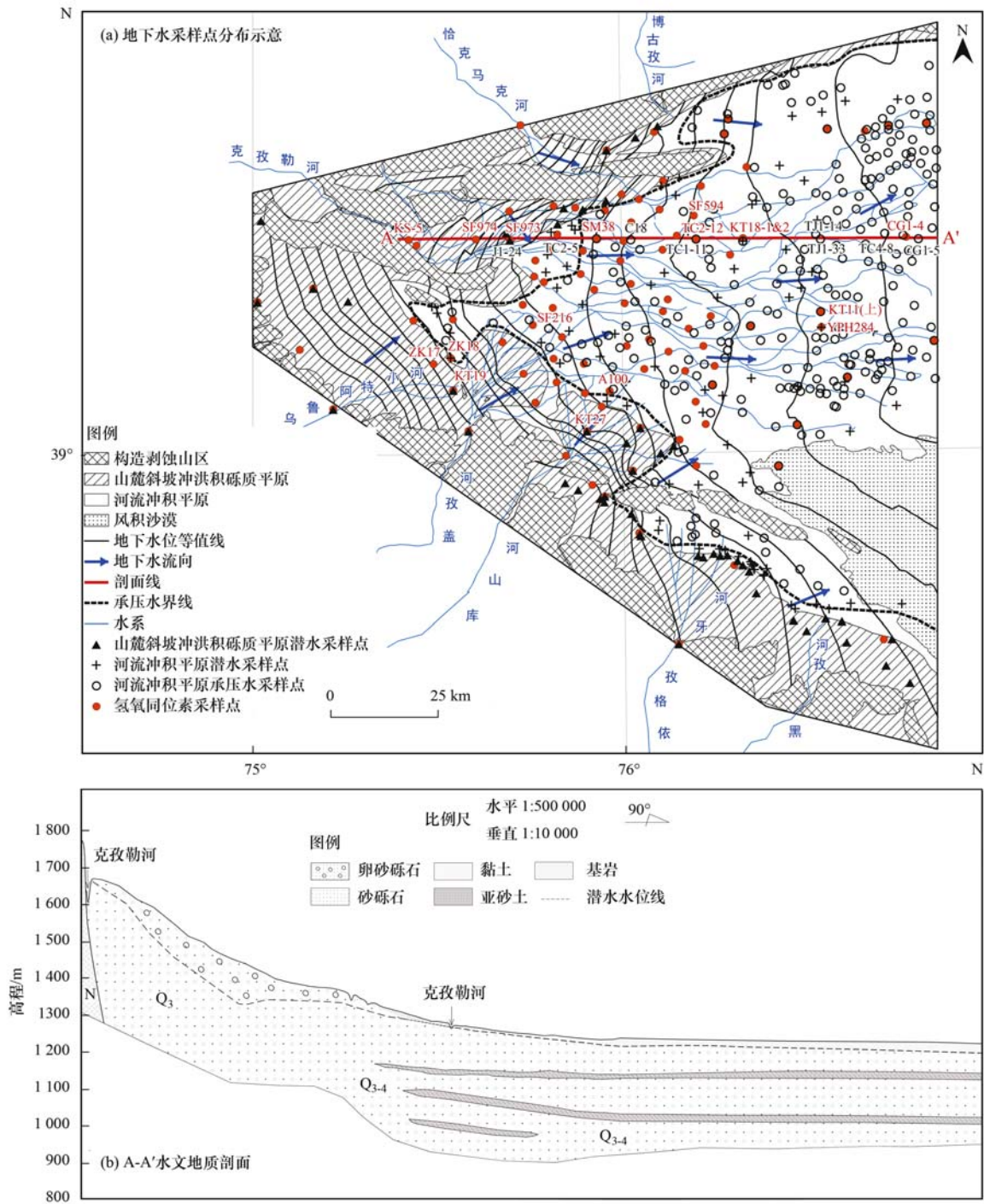


图 1 地下水采样点分布与 A-A' 水文地质剖面

Fig. 1 Distribution of groundwater sampling locations and A-A' hydrogeological section

特点.

研究区地下水主要接受河道渗漏、河床潜流、暴雨洪流入渗、地下水侧向径流、降雨入渗等补给;中下游平原区河网、渠系较为密布,地下水埋深较浅,同时接受灌区各类渠系渗漏、田间入渗、水库渗漏、泉水回归入渗等补给;地下水总体流向与地形坡降趋势一致,总体由西向东径流;地下水排泄方式为人工开采、泉水溢出、潜水蒸发蒸腾以及向下游的侧向流出等.

2 材料与方法

2016 年 6 ~ 10 月,在研究区共取地下水水化学样品 402 组,其中潜水 127 组,承压水 275 组;D、¹⁸O 同位素样品 114 组,其中潜水 87 组,承压水 27 组. 取样时,聚乙烯塑料水样瓶用所取水样润洗 3 次,之后贴好标签密封保存. 采用德国 HI9829 高精度便携式多参数综合水质测定仪现场测定 pH 值、水温、电导率、氧化还原电位和溶解氧等指标,测试精度分别为 0.01、0.01℃、0.01 μS·cm⁻¹、0.1 mV 和 0.01 ng·L⁻¹. 所取水样用 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤,阳离子分析的水样加硝酸酸化至 pH < 2.

离子指标测定(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻和 NO₃⁻等)由新疆地矿局第二水文工程地质大队化验室完成. 其中,K⁺和 Na⁺测定方法为火焰原子吸收分光光度法;Ca²⁺和 Mg²⁺测定方法为乙二醇四乙酸二钠滴定法;Cl⁻测定方法为硝酸银容量法;SO₄²⁻测定法为硫酸钡比浊法;HCO₃⁻和 CO₃²⁻采用酸碱滴定法测定;NO₃⁻测定法

为紫外分光光度法,各离子指标检出限均为 0.05 mg·L⁻¹. D 和¹⁸O 同位素值由长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室测试完成,采用气体同位素质谱仪测试,δD 值误差为 ±1‰,δ¹⁸O 值误差为 ±0.2‰.

3 结果与分析

3.1 地下水水化学特征

研究区地下水水化学参数统计结果见表 1,区内地下水 pH 值范围在 7.11 ~ 8.52 之间,平均值为 7.84,呈弱碱性. 地下水硫酸盐、氯化物、TDS 和总硬度变化范围较大,分别为 39.7 ~ 9 611.8、14.2 ~ 20 210.5、246.5 ~ 44 130.4 和 48.2 ~ 10 619.8 mg·L⁻¹. 整体上,研究区山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水硫酸盐、氯化物、TDS 和总硬度较小,河流冲积平原潜水和承压水较大. 硫酸盐、氯化物、TDS 和总硬度最大值出现在下游河流冲积平原潜水中,硫酸盐、TDS、总硬度最小值出现在中上游河流冲积平原承压水中,氯化物最小值出现在山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水中.

研究区地下水水化学类型以 SO₄·Cl-Na 型为主. 地下水中阴离子以 SO₄²⁻ 为主,其次为 Cl⁻;阳离子中 Na⁺ 占优势, Ca²⁺ 与 Mg²⁺ 浓度差异不大. 研究区地下水 SO₄²⁻、Cl⁻、TDS、总硬度和 HCO₃⁻ 浓度具有河流冲积平原潜水 > 河流冲积平原承压水 > 山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水的特征,研究区中下游河流冲积平原地下水水化学指标具有累积作用,这与 Yang 等^[15]在柴达木盆地和 Jia 等^[16]在塔里木盆地研究结果一致,符合干旱区水文地球化学演变规律.

表 1 地下水水化学指标统计结果

指标	山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水(n = 49)			河流冲积平原潜水(n = 78)			河流冲积平原承压水(n = 275)		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
pH	8.42	7.26	7.88	8.28	7.11	7.78	8.52	7.23	7.86
TDS/mg·L ⁻¹	3 163.8	291.5	1136.0	44 130.4	280.4	6 404.8	21 966.2	246.5	2 900.8
总硬度/mg·L ⁻¹	1 306.2	170.9	524.3	10 619.8	158.4	1 871.8	10 239.1	48.2	1 187.6
Na ⁺ + K ⁺ /mg·L ⁻¹	759.3	14.5	189.3	13 916.7	31.2	1 645.9	5 115.4	14.1	571.7
Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	265.0	28.4	112.7	1 707.2	34.1	262.0	1 769.7	9.3	197.7
Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	176.9	4.4	59.2	2 272.5	15.3	296.4	1 187.7	3.2	163.9
Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	822.6	14.2	229.8	20210.5	22.7	2 027.0	6 044.6	19.8	617.7
HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	1 294.9	24.4	185.0	756.8	59.8	265.2	1 320.9	48.8	223.7
SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	1 239.3	101.9	440.5	9 611.8	92.2	1 779.8	9 173.6	39.7	1 231.4

3.2 氢氧同位素特征

地下水中 D 和¹⁸O 同位素含量相对稳定,常用来示踪地下水的运动状况^[17],地下水 δD 和 δ¹⁸O 值关系曲线与大气降水线对比,可以更好地解释地下水的形成与运移^[18,19]. 研究区地下水 δD 和 δ¹⁸O 值分布在当地大气降水线^[20](图 2)附近偏右下方,表

明其初始补给源主要为大气降水,且受一定蒸发作用影响.

图 2 中阴影部分中,相近的山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水与河流冲积平原潜水 δD 和 δ¹⁸O 值相近,表明河流冲积平原潜水与山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水之间的径流条件较好. 例如,山麓斜坡冲

洪积砾质平原潜水 KT27 的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值(分别为 $-53.8‰$ 和 $-8.4‰$)与附近下游河流冲积平原潜水 A100 的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值(分别为 $-53.9‰$ 和 $-8.0‰$)相近, 且水化学类型均为 $SO_4 \cdot HCO_3$ -Ca 型, 说明两者水力联系紧密; 山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水 KT19 的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值(分别为 $-77.2‰$ 和 $-11.0‰$)、ZK17 的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值(分别为 $-76.6‰$ 和 $-11.7‰$)分别与下游河流冲积平原潜水 SF216 的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值(分别为 $-76.7‰$ 和 $-10.9‰$)、ZK18 的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值(分别为 $-76.7‰$ 和 $-12.0‰$)相近, 且离子浓度相差不大, 说明河流冲积平原潜水与上游山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水之间的径流条件较好。

研究区承压水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分布较离散, 说明可能受到上覆潜水的混合作用影响。例如, 潜水采样点 YPH284 的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值(分别为 $-77.8‰$ 和 $-10.1‰$)与附近承压水采样点 KT11(上)的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值(分别为 $-78.9‰$ 和 $-10.4‰$)相近, 且水化学类型均为 SO_4 型; 潜水采样点 SF594 的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值(分别为 $-85.9‰$ 和 $-11.6‰$)与附近承压水采样点 TC2-12 的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值(分别为 $-89.7‰$ 和 $-11.3‰$)相近, 两者的水化学类型均为 $SO_4 \cdot Cl$ 型, 表明该区承压水与潜水存在较好的水力联系, 发生了混合作用。

3.3 水化学组分控制因素及来源

3.3.1 地下水主要控制因素

Gibbs 图可以定性判断大气降水、蒸发浓缩和岩石溶滤作用所控制的水化学演化过程, 最初是根据地表水提出来的^[21], 若用于分析地下水, 应重新考虑 Gibbs 图的轮廓。因为地下水在含水层

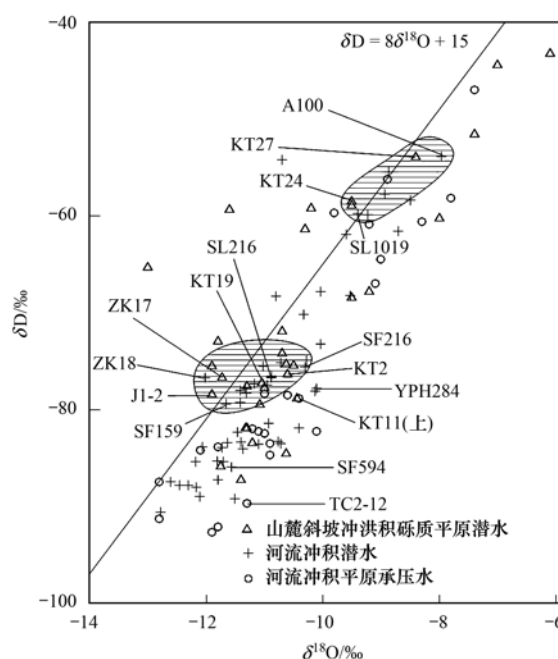


图2 研究区地下水 δD 与 $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 2 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ of groundwater in the study area

滞留的时间远远长于地表水, 长期受水-岩相互作用影响, 使“岩石溶滤控制”范围扩大^[22]。绘制研究区地下水 Gibbs 图可以看出(图3), 地下水样分布在“岩石溶滤控制”与“蒸发浓缩控制”区间, 山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水和河流冲积平原承压水主要受岩石溶滤作用影响, 而河流冲积平原潜水则受岩石溶滤及蒸发浓缩双重作用影响。一部分河流冲积平原承压水落在图外, 且 $\gamma(Cl^-)/\gamma(Cl^- + HCO_3^-)$ 没有明显的规律性, 而 $\gamma(Na^+)/\gamma(Na^+ + Ca^{2+})$ 有较好的聚集性, 这可能与阳离子交换作用有关。

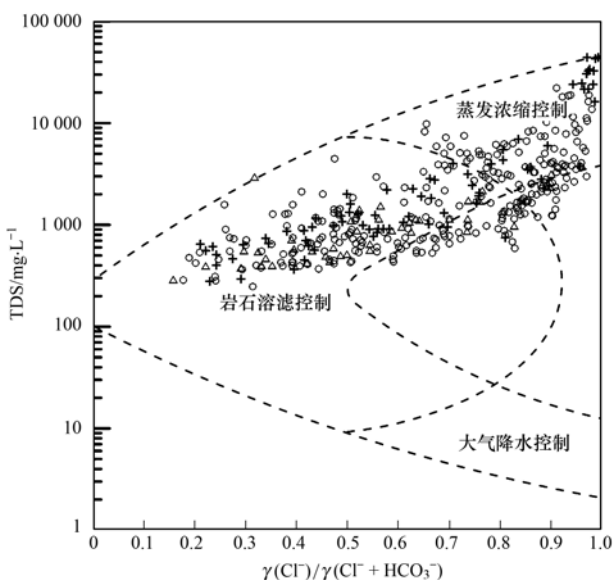
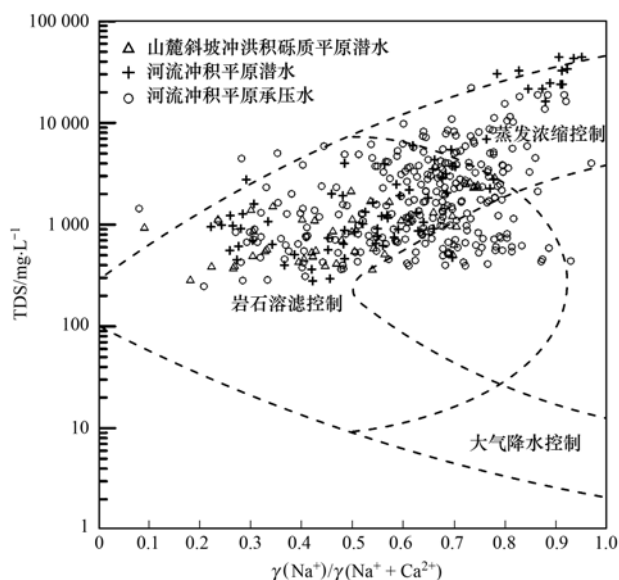


图3 研究区地下水 Gibbs 图

Fig. 3 Gibbs diagram of groundwater in the study area

3.3.2 阳离子交换作用

阳离子交换作用通常由 $\gamma(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 与 $\gamma(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 的关系来判断,若发生阳离子交换作用,则两者的比值应该在 -1 左右^[23]. 由图 4(a)可以看出,研究区河流冲积平原承压水 $\gamma(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 与 $\gamma(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 存在较强的负相关关系($R^2 = 0.85$),且比值在 -1 左右,说明承压水发生阳离子交换作用;而山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水与河流冲积平原潜水 $\gamma(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 与 $\gamma(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 的比值远离 -1 ,且相关关系较弱,说明潜水阳离子交换作用不明显,该现象与刘江涛等^[24]对河南省济源市沁河冲洪积扇地下水分析承

压水中发生阳离子交换作用结果一致.

引入氯碱指数(CAI1 和 CAI2)进一步分析河流冲积承压水阳离子交换作用发生的方向与强度^[25,26],图 4(b)为承压水氯碱指数与 TDS 关系,图中绝大部分承压水的 CAI1 和 CAI2 均小于 0,表明发生了反阳离子交换作用,承压水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与围岩中的 Na^+ 和 K^+ 发生了交换. 另从 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 $\gamma(\text{Cl}^-)$ 关系可以看出(图 5),沿地下水流向,承压含水介质颗粒逐渐变细,黏土矿物含量增加,阳离子交换作用增强,表面吸附的 Na^+ 被水中的 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 替换,使地下水的 Na^+ 浓度高于 Cl^- .

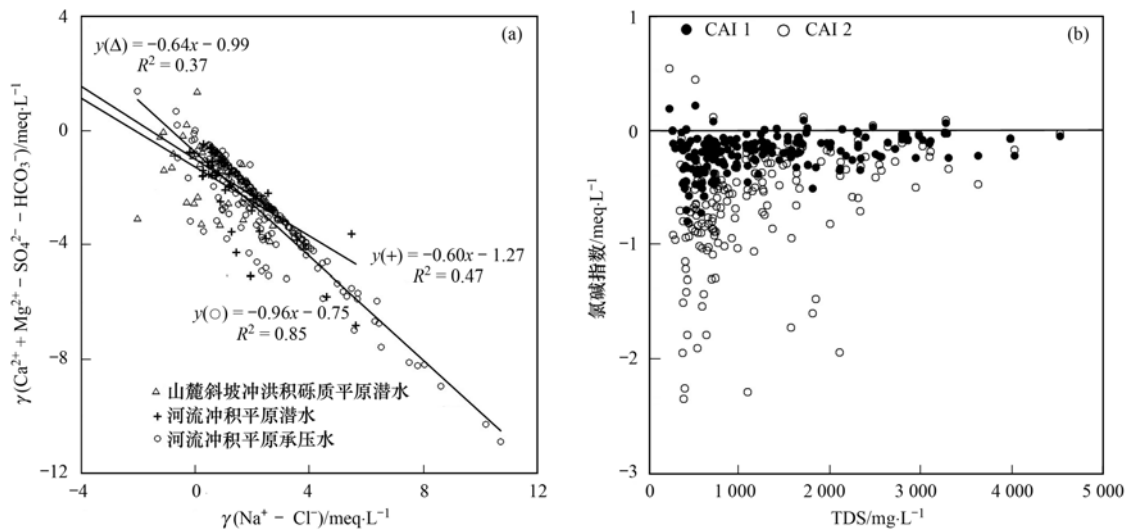


图 4 $\gamma(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 与 $\gamma(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 以及氯碱指数与 TDS 关系

Fig. 4 Relationships of $\gamma(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ versus $\gamma(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ and chlor-alkaline indices versus TDS

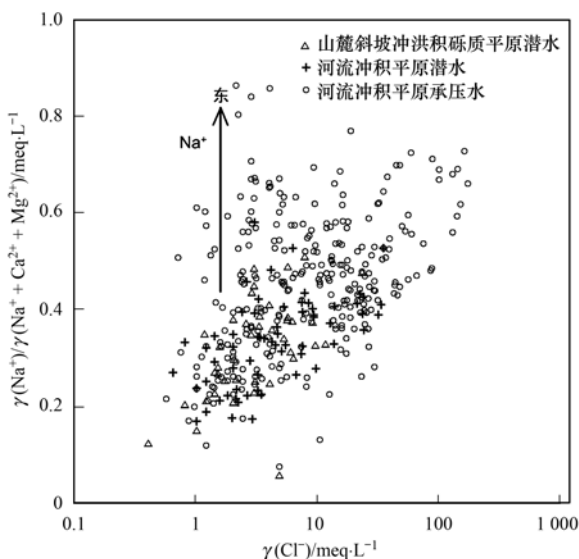


图 5 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 $\gamma(\text{Cl}^-)$ 关系

Fig. 5 Relationship between $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ and $\gamma(\text{Cl}^-)$

3.3.3 溶滤作用

研究区构造剥蚀山区新近纪地层主要为钙质粉

砂岩、钙质细砂岩和石膏等盐类矿物^[27],岩石在风化和水-岩相互作用下,从岩石溶解到地下水中,形成地下水的化学成分^[28,29]. 采用离子之间的比值关系对溶滤作用进行分析.

研究区绝大部分地下水取样点落在 $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\gamma(\text{Cl}^-) = 1$ 的上方[图 6(a)],说明地下水化学组分除了受岩盐的溶解作用以外,还可能受到其他钠盐的溶解;由于河流冲积平原承压水中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 明显偏离 1:1 线,且受到阳离子交换作用的影响,从而使 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 浓度大于 Cl^- 浓度.

研究区地下水取样点均落在 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^-) = 1$ 的上方[图 6(b)],表明地下水除了方解石和白云石的风化溶解,还有其他含 Ca^{2+} 矿物的溶解^[24]. $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 呈显著线性关系[图 6(c)],且绝大部分地下水取样点落在 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) = 1$ 的下方,说明蒸发岩(石膏)的溶解参与了水中 Ca^{2+} 的形成^[8,30].

$\gamma(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ 与 $\gamma(\text{HCO}_3^-)$ 关系可以判断蒸发岩和碳酸岩风化对地下水离子的贡献程度^[31], 研究区地下水取样点均落在 $\gamma(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)/\gamma(\text{HCO}_3^-) = 1$ 的上方[图 6(d)], 说明蒸发岩的溶解对水中离子的贡献占主导地位. 因此, 地下水中的 Ca^{2+} 应该主要来源于新近纪地层石膏矿物的溶解.

由 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 与 $\gamma(\text{SO}_4^{2-})$ 的关系可知[图 6(e)], 几乎所有的取样点中 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{SO}_4^{2-})$ 的值小于 1, 同样证明了地下水中 Ca^{2+} 主要来源于石膏矿物的溶解. 另外, 结合图 6(a)、6(c)和 6(e)可以看出, 水样中 Na^+ 和 SO_4^{2-} 浓度偏高, 推断地下水中可能存有钠长石与芒硝风化溶解所形成的 Na^+ 和 SO_4^{2-} .

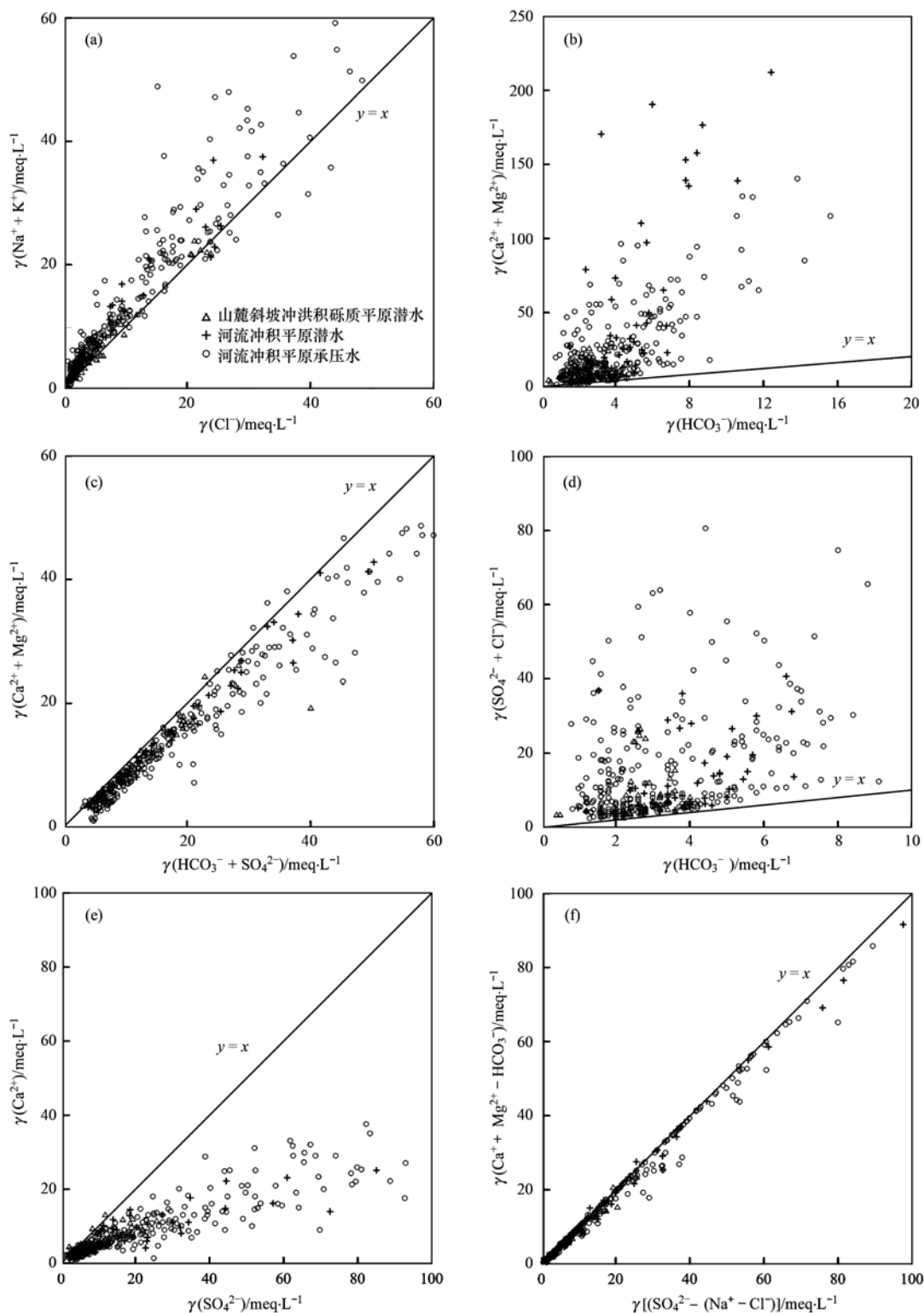


图 6 研究区地下水离子关系

Fig. 6 Ionic relationships of groundwater in the study area

研究区除了河流冲积平原承压水受阳离子交换作用使 Na^+ 浓度升高外, 地下水中 Na^+ 主要来源于岩盐和芒硝的风化溶解, 而 Ca^{2+} 主要来源除了石膏溶解以外, 还有碳酸岩的风化溶解. 令 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-)$ 来表征地下水中石膏溶解产生的 Ca^{2+} 浓度, 用 $\gamma[\text{SO}_4^{2-} - (\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)]$ 来表征石膏溶解产生的 SO_4^{2-} 浓度. 若水样中 SO_4^{2-} 全部来自石膏的溶解, 那么 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-)/\gamma[\text{SO}_4^{2-} - (\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)]$ 的值应等于 1, 结合图 6(f) 可知, 研究区地下水取样点均在 $y=x$ 线附近, 进一步证明了地下水中的 SO_4^{2-} 主要来自石膏和芒硝的溶解.

3.3.4 混合作用

研究区喀什噶尔河流域水系各出山口河流从北、西和南部汇入研究区, 形成自西向东贯穿的地下水系统, 混合作用也是影响地下水化学成分的一个重要因素.

受到稀释的混合水具有垂向移动曲线且形状变动不大的特点^[32]. 从西向东(上游至下游) A-A' 剖面地下水样 Schoeller 可以看出(图 7), 出山口河水 KS-5 与山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水 J1-24 水化学组分相差不大, 说明山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水受河水的渗漏补给; 河流冲积平原承压水 TC2-12 和 TJ1-33 分别与潜水 TC1-11 和 TJ1-14 的水化学组分变化趋势一致, 结合前文对 D 和 ^{18}O 同位素的分析, 表明河流冲积平原承压水受到上覆潜水混合作用的影响.

3.4 典型剖面水文地球化学模拟及演化过程

3.4.1 地下水化学演化模拟

PHREEQC 软件可定量模拟各种自然过程和人为活动影响下的水-岩相互作用^[33,34]. 沿地下水流向 A-A', 选择潜水路径 T1-24 → TC2-5 → KT18-1 → TC4-8 和承压水路径 C18 → KT18-2 → CG1-5 进行水文地球化学模拟.

表 2 潜水、承压水路径反向模拟结果¹⁾/mmol·L⁻¹

矿物项		潜水路径			承压水路径	
		J1-24 → TC2-5	TC2-5 → KT18-1	KT18-1 → TC4-8	C18 → KT18-2	KT18-2 → CG1-5
岩盐	NaCl	5.807×10^{-4}	2.307×10^{-3}	1.714×10^{-2}	2.102×10^{-3}	5.262×10^{-3}
方解石	CaCO ₃	-2.248×10^{-4}	-3.817×10^{-3}	-9.282×10^{-3}	-2.019×10^{-3}	-1.619×10^{-3}
白云石	CaMg(CO ₃) ₂	2.518×10^{-4}	2.032×10^{-3}	4.308×10^{-3}	1.682×10^{-3}	1.176×10^{-3}
石膏	CaSO ₄ ·2H ₂ O	1.942×10^{-3}	3.526×10^{-3}	9.294×10^{-3}	3.791×10^{-3}	3.280×10^{-3}
CO ₂	CO ₂	2.546×10^{-4}	2.487×10^{-4}	-6.344×10^{-4}	—	—
阳离子交换	CaX ₂	—	—	—	-8.262×10^{-4}	-8.969×10^{-4}
	NaX	—	—	—	1.652×10^{-3}	1.794×10^{-3}

1) 表内数值为摩尔转移量, 正值表示溶解; 负值表示沉淀; “—”表示矿物未参加反应

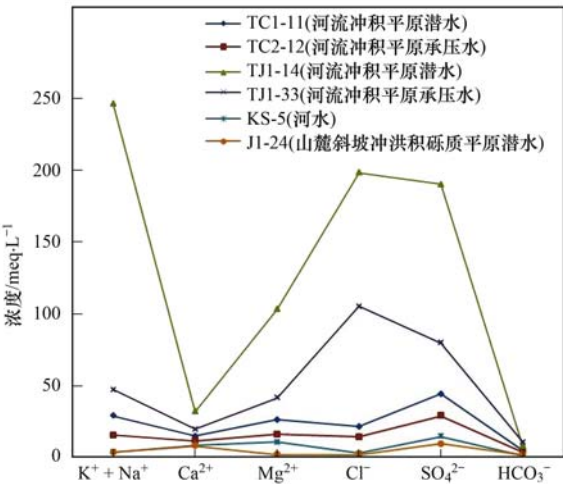


图 7 典型剖面水样点 Schoeller 图
Fig. 7 Schoeller diagram of water samples at typical sections

模型中将研究区第四系含水层中主要矿物石英、岩盐、方解石、白云石、石膏和钠长石等^[35] 作为“可能矿物项”. 考虑潜水处于开放状态, 在潜水路径中将 CO_2 作为“可能矿物项”; 承压水埋藏相对较深, 处于半封闭状态, 实际 CO_2 不参与水文地球化学作用, 但承压水中发生阳离子交换作用, 在承压水路径中将该作用作为增加的“可能矿物项”.

模拟结果表明(表 2): 潜水路径上岩盐、白云石和石膏均发生溶解作用, 随着石膏的溶解, 潜水中 Ca^{2+} 浓度增加, 使方解石沉淀, 且随着石膏的溶解量增大, 方解石的沉淀量也随之增大. 研究区中下游, 水中 CO_2 逸出, 同时因潜水埋深变浅, 受到蒸发浓缩作用影响; 承压水路径上方解石沉淀, 岩盐、白云石和石膏一直处于溶解状态. 承压水中发生反向阳离子交换作用, 且沿水流路径, 反向阳离子交换作用越强, 使得 Ca^{2+} 浓度始终保持较低的水平, 对比该路径上承压水 C18 → KT18-2 → CG1-5, 其 Ca^{2+} 浓度为 $124.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \rightarrow 100.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \rightarrow 77.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 符合实际.

3.4.2 典型剖面水文地球化学演化过程

综合以上分析, 研究区地下水水文地球化学演

化过程如图 8: 山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水受河水的渗漏补给, 总体由西向东流动, 与河流流向相

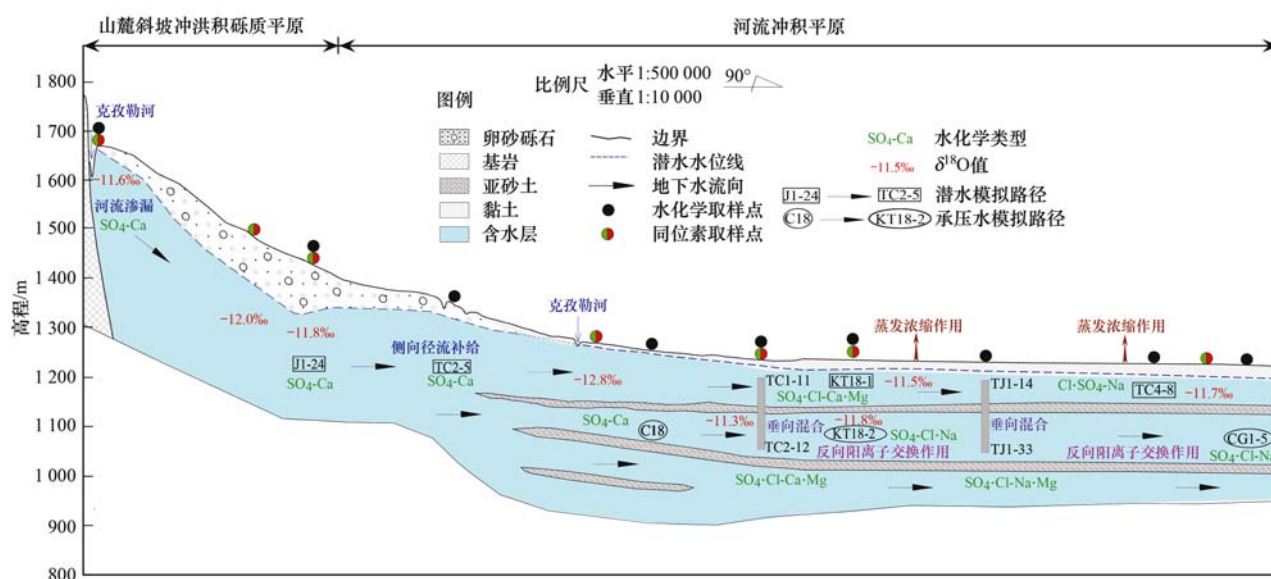


图8 典型剖面水文地球化学演化过程

Fig. 8 Hydrogeochemistry evolution process of typical section

同. 河流冲积平原潜水主要来自山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水的侧向补给, 地下水在运动过程中主要接受岩石溶滤作用和混合作用, 水化学类型为 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型; 随着流程的增加, 水体离子浓度增加; 河流冲积平原承压水受到上覆潜水的混合作用, 其水化学类型与潜水类型相似; 同时承压水还发生反向阳离子交换作用, 使 Na^+ 浓度增加, Ca^{2+} 浓度减少, 水化学类型演变为 $\text{SO}_4\text{-Cl-Ca-Mg}$ 型 $\rightarrow$ $\text{SO}_4\text{-Cl-Na-Mg}$ 型 $\rightarrow$ $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$ 型. 河流冲积平原潜水在埋深较浅区域, 受蒸发浓缩作用, 水化学类型为 $\text{Cl-SO}_4\text{-Na}$ 型.

4 结论

(1) 研究区地下水水化学类型以 $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$ 型为主. 地下水中阴离子以 SO_4^{2-} 为主, 其次为 Cl^- ; 阳离子以 Na^+ 为主, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 浓度差异不大. 地下水 TDS、总硬度、 Cl^- 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 浓度具有河流冲积平原潜水 $>$ 河流冲积平原承压水 $>$ 山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水的特征, 中下游河流冲积平原地下水水化学指标具有累积作用.

(2) 地下水氢氧同位素特征分析表明, 研究区地下水初始补给源主要为大气降水, 且在补给过程中受一定蒸发作用影响. 山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水与河流冲积平原潜水之间的径流条件较好; 河流冲积平原潜水与承压水存在较好的水力联系.

(3) 研究区地下水离子组分主要受岩石溶滤作用和蒸发浓缩作用影响. 地下水 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 主要来自岩盐、石膏和芒硝等蒸发岩的溶解; 方解石和白云石等碳酸岩的溶解对 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 也

有一定贡献. 同时, 河流冲积平原潜水受蒸发浓缩作用影响, 承压水受反向阳离子交换作用和混合作用影响.

(4) 地下水水文地球化学模拟表明, 沿地下水流向, 地下水离子组分浓度呈递增趋势, 岩盐、白云石和石膏发生溶解, 方解石沉淀; 承压水发生反向阳离子交换作用.

(5) 本文揭示的喀什三角洲地下水化学分布特征及演化规律可以为该地区地下水功能区划分和地下水可持续利用提供科学依据.

参考文献:

- [1] 纪媛媛, 李巧, 周金龙. 新疆喀什地区地下水质量与污染评价[J]. 节水灌溉, 2014, (1): 50-53, 56.
Ji Y Y, Li Q, Zhou J L. Assessment of groundwater quality and pollution in Kashgar Region of Xinjiang [J]. Water Saving Irrigation, 2014, (1): 50-53, 56.
- [2] 魏兴, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 喀什地区不同 TDS 浅层地下水分布及资源量估算[J]. 节水灌溉, 2017, (9): 51-54.
Wei X, Zhou J L, Jia R L, et al. Distribution and resource estimation of shallow groundwater with different TDS in Kashgar Region of Xinjiang [J]. Water Saving Irrigation, 2017, (9): 51-54.
- [3] 张涛, 蔡五田, 李颖智, 等. 尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4537-4545.
Zhang T, Cai W T, Li Y Z, et al. Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang River Basin [J]. Environmental Science, 2017, 38(11): 4537-4545.
- [4] 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 等. 崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2143-2151.
Zhou J M, Jiang Z C, Xu G L, et al. Major ionic characteristics and controlling factors of karst groundwater at Xiangshui, Chongzuo [J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2143-2151.
- [5] Sefie A, Aris A Z, Ramli M F, et al. Hydrogeochemistry and groundwater quality assessment of the multilayered aquifer in

- Lower Kelantan Basin, Kelantan, Malaysia [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, **77**(10): 397.
- [6] 於昊天, 马腾, 邓娅敏, 等. 江汉平原东部地区浅层地下水水化学特征[J]. *地球科学*, 2017, **42**(5): 685-692.
- Yu H T, Ma T, Deng Y M, *et al.* Hydrochemical characteristics of shallow groundwater in eastern Jiangnan Plain [J]. *Earth Science*, 2017, **42**(5): 685-692.
- [7] 寇永朝, 华琨, 李洲, 等. 泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3142-3149.
- Kou Y C, Li K, Li Z, *et al.* Major ionic features and their possible controls in the surface water and groundwater of the Jinghe River [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3142-3149.
- [8] Ma B, Jin M G, Liang X, *et al.* Groundwater mixing and mineralization processes in a mountain-oasis-desert basin, northwest China: hydrogeochemistry and environmental tracer indicators [J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, **26**(1): 233-250.
- [9] Hao S, Li F D, Li Y H, *et al.* Stable isotope evidence for identifying the recharge mechanisms of precipitation, surface water, and groundwater in the Ebinur Lake basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **657**: 1041-1050.
- [10] Zhao M, Hu Y D, Zeng C, *et al.* Effects of land cover on variations in stable hydrogen and oxygen isotopes in karst groundwater: a comparative study of three karst catchments in Guizhou Province, Southwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, **565**: 374-385.
- [11] 曲鹏飞. 喀什经济开发区地下水资源评价和可持续利用 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
- Qu P F. Evaluation and sustainable utilization of groundwater resources in Kashi Economic Development Region [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [12] 陈小兵, 周宏飞, 张学仁, 等. 新疆喀什噶尔冲积平原区地下水水化学特征[J]. *干旱区地理*, 2004, **27**(1): 75-79.
- Chen X B, Zhou H F, Zhang X R, *et al.* Chemical characteristics of groundwater in Kashgar Alluvial Plain, Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 2004, **27**(1): 75-79.
- [13] 魏兴, 周金龙, 曾妍妍, 等. 喀什地区西部地下水重金属空间分布特征及成因分析[J]. *环境化学*, 2017, **36**(8): 1802-1811.
- Wei X, Zhou J L, Zeng Y Y, *et al.* Spatial distribution and origin of heavy metals in groundwater in the western Kashgar Prefecture [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(8): 1802-1811.
- [14] 穆台力甫·牙森. 喀什噶尔河流域地下水污染的探讨[J]. *地下水*, 2016, **38**(3): 104-105.
- Ya'sen M. Discussion on groundwater pollution in the Kashgar River Basin [J]. *Groundwater*, 2016, **38**(3): 104-105.
- [15] Yang N, Wang G C, Shi Z M, *et al.* Application of multiple approaches to investigate the hydrochemistry evolution of groundwater in an arid region: Nomhon, Northwestern China [J]. *Water*, **10**(11): 1667.
- [16] Jia Y F, Xi B D, Jiang Y H, *et al.* Distribution, formation and human-induced evolution of geogenic contaminated groundwater in China: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **643**: 967-993.
- [17] 桂和荣, 陈松. 宿南矿区地下水同位素地球化学特征及地质意义[J]. *地学前缘*, 2016, **23**(3): 133-139.
- Gui H R, Chen S. Isotopic geochemical characteristics of groundwater and its geological significance in Sunan mining area [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, **23**(3): 133-139.
- [18] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2132-2142.
- Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Regional evolution and control factors of karst groundwater in Liulin Spring Catchment [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2132-2142.
- [19] Qi H H, Ma C M, He Z K, *et al.* Lithium and its isotopes as tracers of groundwater salinization: A study in the southern coastal plain of Laizhou Bay, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 878-890.
- [20] 王文祥, 王瑞久, 李文鹏, 等. 塔里木盆地河水氢氧同位素与水化学特征分析[J]. *水文地质工程地质*, 2013, **40**(4): 29-35.
- Wang W X, Wang R J, Li W P, *et al.* Analysis of stable isotopes and hydrochemistry of rivers in Tarim Basin [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2013, **40**(4): 29-35.
- [21] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [22] Marandi A, Shand P. Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram [J]. *Applied Geochemistry*, 2018, **97**: 209-212.
- [23] Xiao J, Jin Z D, Wang J, *et al.* Hydrochemical characteristics, controlling factors and solute sources of groundwater within the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau [J]. *Quaternary International*, 2015, **380-381**: 237-246.
- [24] 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 等. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5428-5439.
- Liu J T, Cai W T, Cao Y T, *et al.* Hydrochemical characteristics of groundwater and the origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5428-5439.
- [25] Singh N, Singh R P, Kamal V, *et al.* Assessment of hydrogeochemistry and the quality of groundwater in 24-Parganas districts, West Bengal [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(1): 375-386.
- [26] Nematollahi M J, Clark M J R, Ebrahimi P, *et al.* Preliminary assessment of groundwater hydrogeochemistry within Gilan, a northern province of Iran [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, **190**(4): 242.
- [27] 乃尉华, 王文科, 王艺星, 等. 喀什平原区地下水硫酸盐分布特征及来源[J]. *新疆地质*, 2018, **36**(1): 120-123.
- Nai W H, Wang W K, Wang Y X, *et al.* Sulfate distribution and source of groundwater from Kashgar Plain [J]. *Xinjiang Geology*, 2018, **36**(1): 120-123.
- [28] 张涛, 何锦, 李敬杰, 等. 蛤蟆通河流域地下水水化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 4981-4990.
- Zhang T, He J, Li J J, *et al.* Major ionic features and possible controls in the groundwater in the Hamatong River Basin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 4981-4990.
- [29] Wang L H, Dong Y H, Xu Z F, *et al.* Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the northeastern Tennger Desert, northern China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2017, **25**(8): 2363-2375.
- [30] Redwan M, Abdel Moneim A A. Factors controlling groundwater hydrogeochemistry in the area west of Tahta, Sohag, Upper Egypt [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, **118**: 328-338.
- [31] 李会亚, 冯起, 陈丽娟, 等. 民勤绿洲灌区地下水水化学特征及其演化驱动机理[J]. *干旱区研究*, 2017, **34**(4): 733-740.
- Li H Y, Feng Q, Chen L J, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution mechanism of groundwater in the Minqin Oasis [J]. *Arid Zone Research*, 2017, **34**(4): 733-740.
- [32] 李潇瀚, 张翼龙, 王瑞, 等. 呼和浩特盆地地下水水化学特征

- 及成因[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 136-145.
- Li X H, Zhang Y L, Wang R, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Hohhot basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 136-145.
- [33] 李华, 文章, 谢先军, 等. 贵阳市三桥地区岩溶地下水水化学特征及其演化规律[J]. 地球科学, 2017, 42(5): 804-812.
- Li H, Wen Z, Xie X J, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution of karst groundwater in Sanqiao District of Guiyang City [J]. Earth Science, 2017, 42(5): 804-812.
- [34] Barzegar R, Moghaddam A A, Nazemi A H, *et al.* Evidence for the occurrence of hydrogeochemical processes in the groundwater of Khoy plain, northwestern Iran, using ionic ratios and geochemical modeling[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(16): 597.
- [35] 曾妍妍. 新疆喀什地区西部劣质地下水形成机理研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2018 年 11 月 1 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单. 《环境科学》连续 17 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.



CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM _{2.5} Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, GAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} Near Highway	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co ₃ O ₄ Catalysts	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China	 CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province	 SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City	 GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal	 XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons	 ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb ²⁺ from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb ²⁺ by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe ₃ O ₄	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jian-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A ² /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca ²⁺ on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process	 ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N ₂ O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment; A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals	 DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occcluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns at Jinyun Mountain	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China	 TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)