

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2010~2015年我国水泥工业 NO _x 排放清单及排放特征	蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)
兰州市煅烧污染物排放清单及其对 PM _{2.5} 浓度贡献	郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)
北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)
郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)
菏泽市冬季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的昼夜变化特征	孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)
我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征	温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)
嘉兴市 2015 年人为源 VOCs 排放清单	郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)
上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险	盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)
SBR 工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征	杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)
太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应	石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)
巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析	胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)
蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响	彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)
三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响	陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)
纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响	白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)
澜沧江流域水体悬浮颗粒物 δ ¹⁵ N 空间差异及成因分析	唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)
潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律	耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)
蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素	张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)
典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算	熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)
农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响	李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)
城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征	刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)
不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响	葛德, 张守红 (5015)
四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用	王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)
厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用	卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)
光助-二茂铁/H ₂ O ₂ 非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶	张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)
基于同位素技术的短程硝化过程 N ₂ O 产生途径	杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)
基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响	安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)
厌氧/好氧 SPNDPR 系统实现低 C/N 城市污水同步脱氮除磷的优化运行	于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)
污水处理厂 SNAD 工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)
盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学	唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)
中试 ANAMMOX-ASBR 处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性	张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)
碳氮比对颗粒污泥 CANON 反应器脱氮性能和 N ₂ O 释放的冲击影响	付昆明, 姜娜, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)
污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析	房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)
重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析	伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)
韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布	刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)
有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源	杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)
纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的 α-HCH	姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)
株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征	申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)
生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响	王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)
生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响	俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)
颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响	郭毅轩, 赵秀兰 (5180)
施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响	曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)
不同水稻品种对重金属的积累特性	林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄欠如 (5198)
芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤	曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)
三峡库区典型河流水-气界面 CO ₂ 通量日变化观测及其影响因素分析	罗佳宸, 李思悦 (5217)
富营养化湖区 CH ₄ 排放特征及其影响因素	商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)
短期放牧对半干旱草地生态系统 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)
覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响	罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)
臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物 (BVOCs) 影响的研究进展	冯兆忠, 袁相洋 (5257)
地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展	杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)
污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素	张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)
《环境科学》征订启事 (4848) 《环境科学》征稿简则 (4990) 信息 (5188, 5216, 5236)	

蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素

张涛, 何锦*, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051)

摘要: 为研究蛤蟆通河流域水化学特征及主要离子来源, 2017年先后采集地下水样品59组, 综合运用数理统计、Piper三线图、Gibbs模型和离子比等方法, 分析了蛤蟆通流域地下水的水文地球化学特征, 并探讨了蛤蟆通流域的水化学演化规律及主要离子来源。结果表明, 该区地下水阳离子以 Ca^{2+} 为主, 占阳离子总量的质量分数为22.1%~72.4%, 平均为48.7%; 阴离子以 HCO_3^- 为主, 占阴离子总量的质量分数为35.3%~97.5%, 平均为80%; TDS介于93.3~521.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为219.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均为淡水; 地下水类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型水为主; 地下水样品均分布在Gibbs模型左中部, 说明该流域水化学离子组成受岩石风化作用控制; 通过离子来源分析, 该区主要离子来源于硅酸盐岩和碳酸盐岩的风化溶解。

关键词: 水化学; 主要离子; 离子来源; 元素比值; 化学风化; 蛤蟆通河

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-4981-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201804070

Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin

ZHANG Tao, HE Jin*, LI Jing-jie, CAO Yue-ting, GONG Lei, LIU Jin-wei, BIAN Chao, CAI Yue-mei

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, China)

Abstract: In order to study the major ion chemistry and controls of groundwater, 59 groundwater samples were collected and their major ions measured in the Hamatong River Basin. The hydrogeochemical characteristics of groundwater in this basin were analyzed by means of mathematical statistics, Piper triangular diagrams, Gibbs figures, and ionic relations, and the water chemical evolution and ion sources of the Hamatong River Basin were determined. The results showed that Ca^{2+} was the main cation in the groundwater, accounting for 22.1% to 72.4% of the total cations, with an average value of 48.7%. HCO_3^- was the main anion, accounting for 35.3% to 97.5% of the total anions, and with an average value of 80%. Total dissolved solids concentration ranged from 93.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to 521.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ with a median value of 219.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The hydrochemical types of groundwater are $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$, and $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$. Chemical weathering rates of carbonates and silicates were estimated, and the chemical composition of groundwater samples located in the middle of Gibbs model indicated that the major chemical process of groundwater was controlled by rock weathering. Silicate weathering is believed to significantly contribute to dissolved solute compositions, and carbonate weathering played an important role as the source of dissolved ions.

Key words: hydrochemistry; major ions; ion source; element ratios; chemical weathering; Hamatong River

地下水化学组成是水文地球化学循环的重要组成部分, 与周围环境有着密切的关系, 通常利用地下水化学组分来示踪地下水循环途径, 反映地下水流特征, 从而对地下水资源变化趋势及合理开发进行科学判断^[1-3]。蛤蟆通流域位于黑龙江省东部宝清县境内, 处于三江平原腹地, 农业活动相对集中, 水资源相对欠缺区。近年来, 农业活动对地下水的需求逐渐增加, 对地下水的开采量也逐年增加, 造成湿地退化和草地面积减少等生态环境问题。2017年对蛤蟆通河流域进行了样品采集, 对样品主要常规成分(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_2)进行了测试, 分别用Gibbs图、Piper三线图及数理统计方法对样品离子组成进行分析^[4-8], 来讨论蛤蟆通河流域水化学特征及物质来源, 并分析水化学成因, 以期对蛤蟆通

河流域生态环境建设提供基础数据资料。

1 研究区概况

蛤蟆通河为乌苏里江二级支流, 发源于黑龙江省东北完达山脉蛤蟆顶子北麓, 河长约150 km, 河宽10~20 m, 在东升乡注入挠力河, 流域面积约为1 350 km^2 ^[9]。属于寒温带大陆性季风气候区, 降水有明显的季节性, 多年平均降雨量为515 mm, 降雨量时空分布不均, 主要集中在6~9月, 年平均蒸发量在1 000 mm以上, 年平均气温4.6℃^[10]。蛤蟆通河流域可以分为剥蚀地形、剥蚀堆积地形及堆积

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2018-04-25

基金项目: 地质调查项目(DD20160317)

作者简介: 张涛(1984~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为环境分析, E-mail: 277169074@163.com

* 通信作者, E-mail: hejing007105@126.com

地形,剥蚀地形主要分布在研究区东南部的低山丘陵区,剥蚀堆积地形主要分布在山前台地,堆积地形主要分布在研究区西北部的平原地区.研究区东南部以变质岩、火成岩为主的岩石风化裂隙发育.蛤蟆通河流域地下水类型主要有基岩裂隙水、碎屑岩裂隙孔隙水和第四系孔隙水这3种,基岩裂隙水主要分布在南部山区,分布的中生代及以前的火山岩、沉积岩、不同时代的花岗岩,这些岩层及岩体经长期内外营力作用下形成大面积分布不均网状风化裂隙含水层和线状构造裂隙含水层.碎屑岩裂隙孔隙水主要分布在北部合江拗陷盆地中,含水层由富锦组泥质粉细砂岩、含砾砂岩、砂砾岩组成,由于成岩作用不好,赋存裂隙孔隙水.第四系孔隙水主要分布在西北部的平原地区,该含水岩组主要为第四系松散沉积物,岩性主要为粉质黏土夹杂砂砾石为主,孔隙相对较大.蛤蟆通河流域地下水主要以大气降水和地表水入渗补给为主,地下水位随地形变化,由山前向北部平原区逐渐降低,地下水总体流向为自东南向西北,以蒸发和人工开采为主要排泄方式,最终排泄于挠力河^[11].

2 材料与方法

2.1 采样点分布

为研究蛤蟆通河流域水化学特征及其控制因素,共采集地下水样品59组,本次工作充分考虑该区的土地利用类型、水文地质条件和地质地貌条件,所采集样品尽量能代表蛤蟆通河流域地下水特征,其中S57、S58和S59分布在低山丘陵区为基岩裂隙水,S44~S56分布在山前台地主要为裂隙孔隙水,S1~S43分布在下游平原区主要是第四系孔隙水,采样点分布见图1.

2.2 样品采集与分析

2.2.1 样品采集与储存

样品采集在实验室专业技术人员的指导下进行,样品采集前先对样品瓶用稀硝酸进行浸泡,并用去离子水清洗干净,样品采集时用水样清洗2~3次,再装入水样.每个采样点均采集两瓶水样,其中一瓶水样加入1+1硝酸,使样品pH<2,用于 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等金属阳离子的测试,另一瓶原样用于 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_2 、 NO_3^- 、溶解性总固体(TDS)和总硬度(TH)等化学指标的测定.pH利用哈希多参数分析仪(HQ40D,美国哈希)现场测定.



图1 蛤蟆通河流域地下水样品分布示意

Fig. 1 Sketch map of Hamatong River Basin and the sampling sites

2.2.2 样品分析

本研究选取地下水样品中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_2 、 NO_3^- 、TDS和TH进行分析,TH、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 采用传统的滴定分析法进行分析,利用硅钼蓝比色法(TU-1901,北京普析通用公司)来测定地下水中的 SiO_2 ,利用火焰原子吸收光谱仪(contrAA300,德国耶拿公司)对地下水中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 进行分析, NO_3^- 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 采用离子色谱仪(883,瑞士万通公司)进行测定,TDS采用烘干称量的方法进行测定,水样在中国地质调查局水文地质环境地质调查中心地下水和土壤污染防治实验室测定.

3 结果与讨论

3.1 水化学组成特征

本次工作共采集地下水样品59组,分别对水样中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 SiO_2 、TDS、TH和pH等指标进行了测试,各水化学参数统计见表1.

K^+ 质量浓度介于0.08~18.5 $mg \cdot L^{-1}$,平均为2.36 $mg \cdot L^{-1}$, Na^+ 质量浓度介于2.38~65.2

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $20.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Ca^{2+} 质量浓度介于 $12.0\sim89.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $34.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Mg^{2+} 质量浓度介于 $3.65\sim41.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $10.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Cl^{-} 质量浓度介于 $1.77\sim65.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $10.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, HCO_3^{-} 质量浓度介于 $48.8\sim329.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $170.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SO_4^{2-} 质量浓度介于 $0\sim140.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $8.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中有 22 个水样未检出 SO_4^{2-} , 中值为 $4.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,

只有一个水样 SO_4^{2-} 质量浓度为 $140\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 该点的 Na^{+} 和 Cl^{-} 质量浓度均较高, 分别为 $19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $64.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 初步判断该水样可能受人为活动影响. NO_3^{-} 质量浓度介于 $0\sim100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $15.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 中值为 $7.40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (平均值大于中值, 说明个别水样点 NO_3^{-} 质量浓度较高, 受人类活动影响较大), 整体上 NO_3^{-} 质量浓度较低, 说明该区受人类活动影响较小.

表 1 主要离子质量浓度统计/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
Table 1 Statistics of major ions in groundwater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	K^{+}	Na^{+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^{-}	HCO_3^{-}	SO_4^{2-}	NO_3^{-}	SiO_2	TDS	TH	pH
均值	2.36	20.5	34.1	10.5	10.4	170.5	8.48	15.9	24.0	219.1	128.3	7.34
中值	1.79	17.7	29.1	9.12	7.06	164.8	4.00	7.40	22.0	202.3	115.1	7.26
标准差	2.62	13.1	16.2	6.02	14.1	66.0	19.6	20.5	13.58	81.7	57.4	0.39
最小值	0.08	2.83	12.0	3.65	1.77	48.8	0.0	0.0	2.00	93.3	50.1	6.36
最大值	18.5	65.2	89.2	41.3	65.1	329.5	140.0	100.0	60.0	521.1	337.8	8.26

蛤蟆通河流域地下水中主要阴离子质量浓度存在 $\text{HCO}_3^{-} > \text{NO}_3^{-} > \text{Cl}^{-}$ 的关系, 而阳离子质量浓度表现为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+}$ (表 1). 在蛤蟆通河流域地下水中 Ca^{2+} 和 HCO_3^{-} 的质量浓度占明显优势(见图 2), Ca^{2+} 占阳离子总量的质量分数为 $22.1\%\sim72.4\%$, 平均为 48.7% , HCO_3^{-} 占阴离子总量的质量浓度为 $35.3\%\sim97.5\%$, 平均为 80% .

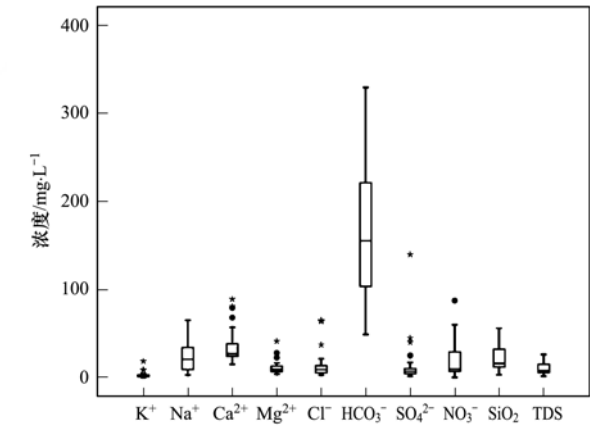


图 2 蛤蟆通河流域地下水水化学参数箱图

Fig. 2 Box plots showing variations in major ion concentrations in groundwater in the Hamatong River Basin

S53、S54、S52、S50、S30、S58、S16、S5 和 S15 等是蛤蟆通河上游到下游分布的 9 个地下水采样点, 依据这 9 个地下水样品水化学特征来判断各种指标从上游到下游变化情况. TDS、 HCO_3^{-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^{+} 等从上游到下游呈增加趋势, K^{+} 从上游到下游没有明显变化, Cl^{-} 呈递减趋势, SO_4^{2-} 质量浓度较低, 中下游水样点没有检出(图 3).

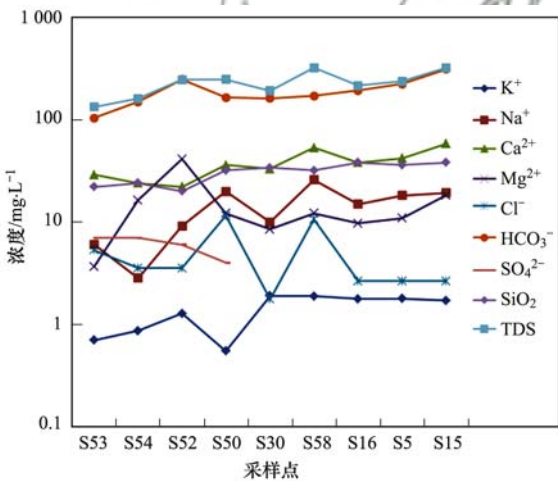


图 3 蛤蟆通河地下水水化学参数沿流向变化情况

Fig. 3 Variations in hydrochemical parameters along the flow direction in the Hamatong River Basin

蛤蟆通河流域所采集地下水的 pH 处于 $6.36\sim8.26$ 之间, 80% 以上的水样 $\text{pH} > 7.0$, 平均值为 7.34 , 呈弱碱性, 与刘宝剑等^[12]在嫩江流域研究的结果相差不大(平均值 7.5); pH 从上游到下游变化比较平缓(图 4), 整体上有减小的趋势, 这主要是由于在蛤蟆通河的源头受岩石风化作用比较明显, 风化时产生较多的碱性物质, 因此源头的 pH 相对较高. 蛤蟆通河流域地下水溶解性总固体(TDS)介于 $93.3\sim521.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $219.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 低于 $1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均为淡水. TDS 从上游到下游有增加趋势(图 4), 由 $133\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $320\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 变化较大, 主要是沿流向随路径的增加溶解的矿物越多, 从而致使水中的各种离子也逐

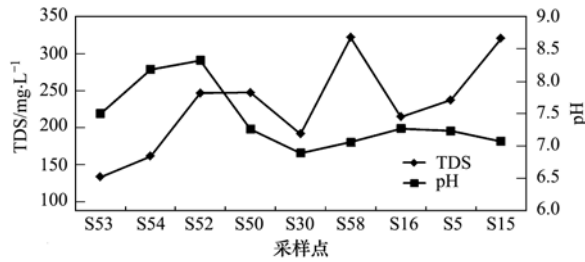


图 4 pH 及 TDS 从上游到下游变化情况

Fig. 4 Variations in pH and TDS along the flow direction in Hamatong River Basin

渐增加,因而水中的 TDS 也不断增大.

3.2 地下水化学类型

Piper 三线图可以用来分析地下水化学成分的变化规律,该方法的优点是不受人为因素影响,在三线图中可以看出各种离子的相对含量^[13~15]. 蛤蟆通河流域地下水样品均靠近 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 端元,且远离 Cl^- 和 SO_4^{2-} 端元,阴离子以 HCO_3^- 为主;在阳离子三角图中,地下水样品分布在下部靠近 Ca^{2+} 端元,该区阳离子主要以 Ca^{2+} 为主, Mg^{2+} 和 Na^+ 含量次之,主要来自于碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发岩的风化溶解,研究区内地下水类型主要以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主,从基岩山区到平原区没有明显变化(图 5).

3.3 各化学指标之间的相互关系

地下水中化学组成之间的关系与其来源有一定的联系,研究者常用化学组分之间的相关关系来揭示离子的来源^[16]. 从蛤蟆通河流域地下水中各化学组分之间的相关关系矩阵(表 2)看出, TDS 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 都存在显著

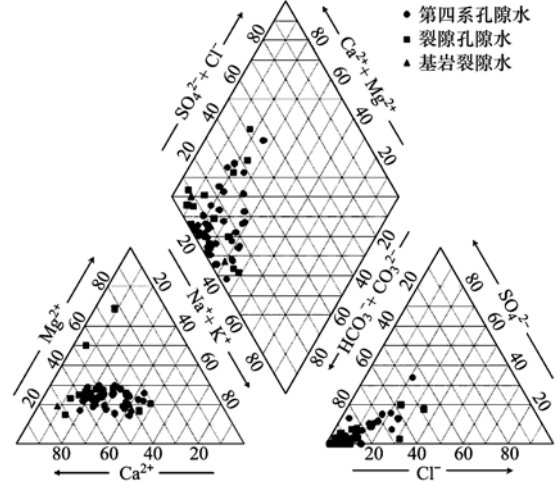


图 5 蛤蟆通河流域地下水 Piper 三线图

Fig. 5 Ternary diagrams for ions in groundwater in the Hamatong River Basin

的正相关关系 ($P < 0.01$), 这说明这些物质都对 TDS 有着明显的贡献,其中 TDS 与 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 的相关关系最为显著,相关关系常数分别为 0.892 和 0.777 3,说明 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 是 TDS 的主要来源. HCO_3^- 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 都有着显著的相关关系,说明 HCO_3^- 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 有同一来源,可能来源于硅酸盐岩或碳酸盐岩的风化溶解. Na^+ 与 Cl^- 、 HCO_3^- 有着显著相关关系,说明存在钠长石等含钠硅酸盐岩矿物的风化溶解,也可能来自于大气降水和蒸发盐岩溶解,由于 Cl^- 含量较低, Na^+ ($\text{Na}^+ = \text{Na}^+ - \text{Cl}^-$) 相对较高,而 Na^+ 主要来源于硅酸盐类矿物的溶解,说明 Na^+ 主要来源于钠长石等硅酸盐类矿物的风化溶解,而来源于大气降水和蒸发盐岩的溶解相对较小.

表 2 各常规指标之间相关关系¹⁾

Table 2 Correlation coefficients between major ions in groundwater in the Hamatong River Basin

	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	HCO_3^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	NO_3^-	SiO_2	TDS	TH	pH
K^+	1.00												
Na^+	0.11	1.00											
Ca^{2+}	0.17	0.526 **	1.00										
Mg^{2+}	0.06	0.325 *	0.516 **	1.00									
Cl^-	0.361 **	0.486 **	0.678 **	0.387 **	1.00								
HCO_3^-	-0.05	0.658 **	0.702 **	0.640 **	0.21	1.00							
CO_3^{2-}	-0.05	-0.12	-0.10	0.679 **	-0.06	0.15	1.00						
SO_4^{2-}	0.391 *	0.472 **	0.664 **	0.440 **	0.699 **	0.29	-0.05	1.00					
NO_3^-	0.10	0.11	0.17	-0.05	0.321 *	-0.20	-0.09	-0.10	1.00				
SiO_2	-0.18	0.05	-0.08	0.07	-0.24	0.20	-0.04	-0.13	-0.20	1.00			
TDS	0.21	0.765 **	0.892 **	0.661 **	0.697 **	0.777 **	0.04	0.679 **	0.21	0.09	1.00		
TH	0.15	0.512 **	0.929 **	0.796 **	0.646 **	0.773 **	0.22	0.666 **	0.09	-0.03	0.916 **	1.00	
pH	-0.04	-0.06	-0.09	0.261 *	-0.07	0.08	0.333 **	-0.18	-0.08	0.08	-0.06	0.05	1.00

1) * * 表示在 0.01 上显著相关, * 表示在 0.05 上显著相关

3.4 地下水化学控制因素分析

3.4.1 水岩模型分析

由于地下水与含水层矿物之间发生反应, 探讨含水层矿物水岩作用, 对了解地下水化学成因有着重要作用. 蛤蟆通河流域属于寒温带大陆性季风气候区, 受季节性降雨影响较大, 大气降雨的入渗及河水径流补给, 都会引起地下水水化学的变化. Gibbs 图^[17~20]常用来研究水岩作用对地下水化学的影响, Gibbs 利用世界河流、湖泊及主要海洋的 TDS、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 HCO_3^- 等的关系, 将河水主要离子来源分为蒸发结晶作用、大气降水作用和岩石风化作用控制这 3 个类型, 在 Gibbs 图中, 具有较低溶解性总固体 ($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和较高的 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值的水样落在大气降水控制作用区, 即图的右下角, 这类水样主要受大气降水补给, 其主要离子组成受大气降水作用控制. 具有中

等溶解性总固体和较低比值的水样落在岩石风化作用控制区, 即图的左中部; 具有较高溶解性总固体和较大比值的水样落在蒸发结晶控制区, 即图的右上角, 该区主要集中在干旱区的水样^[4,9,21].

本研究利用 Gibbs 图对蛤蟆通河流域地下水样品进行分析. 区内地下水样品均落于 TDS 大小 $93 \sim 521 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 所有的地下水样品 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值小于 0.5, 均落在岩石风化作用控制端元; 大多数地下水样品中 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 的比值小于 0.5 (图 6), 说明该区地下水的主要离子组成是受岩石风化作用控制; 所采集水样远离“大气降水”和“蒸发结晶”作用控制区域, 表明大气降水和蒸发结晶作用对研究区内地下水主要离子组成贡献较小. 个别样品 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值大于 0.5, 说明这些样品受一定的人类活动影响.

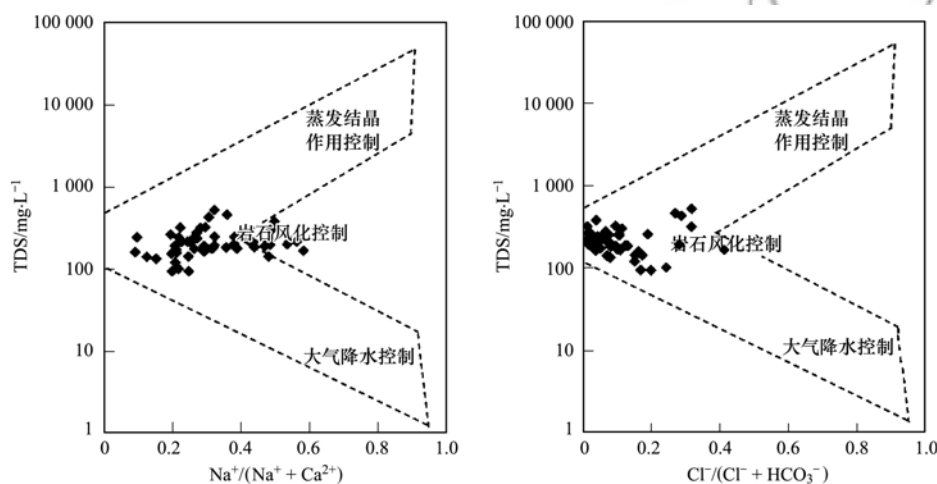


图 6 蛤蟆通河流域地下水 Gibbs 图

Fig. 6 Gibbs plots of the Hamatong River Basin

以大气降水作为基线, 常用 Ca/Na 和 TDS 关系模型来判断控制水化学的主要控制因素^[22]. 在该区采集 2 组雨水样品, 雨水中 TDS、 Ca^{2+} 和 Na^+ 的平均含量分别为 19.5、1.47 和 $2.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 用于 Ca/Na 和 TDS 关系模型分析. 蛤蟆通河流域地下水主要落在岩石风化作用控制区域 (图 7), 这个结论和 Gibbs 模型的分析结果是一致的, 从图 7 中也可以看出该区主要是受含钙岩石的风化作用控制, 含钠岩石的风化作用控制相对较少.

$\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$, $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 主要受流速、稀释和蒸发作用影响, 常用来研究水和不同岩石之间的反应, 碳酸盐岩风化作用控制端元比值分别接近于 50、10 和 120, 而硅酸盐岩控制端元该比

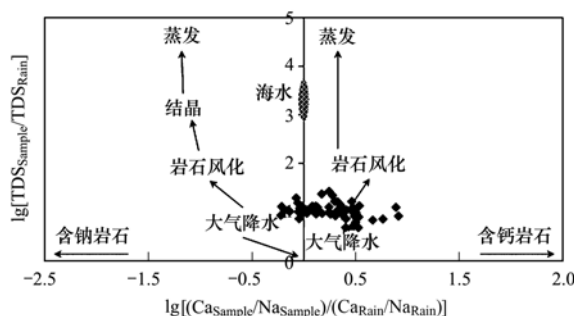


图 7 蛤蟆通河流域地下水 Ca-Na-TDS 关系

Fig. 7 Relationship of the Ca-Na-TDS in groundwater of the Hamatong River Basin

值接近于 0.35 ± 0.15 、 0.24 ± 0.12 和 2 ± 1 ^[23~25]. 蛤蟆通河流域地下水样品集中在硅酸盐岩和碳酸盐岩控制端元中间且偏向硅酸盐岩控制端元, 说明该

区地下水主要受硅酸盐岩的风化溶解作用控制,其次是来自碳酸盐岩风化作用的贡献.样品点均远离

蒸发盐岩控制端元,说明该区地下水主要离子受蒸发盐岩的作用较小(图8).

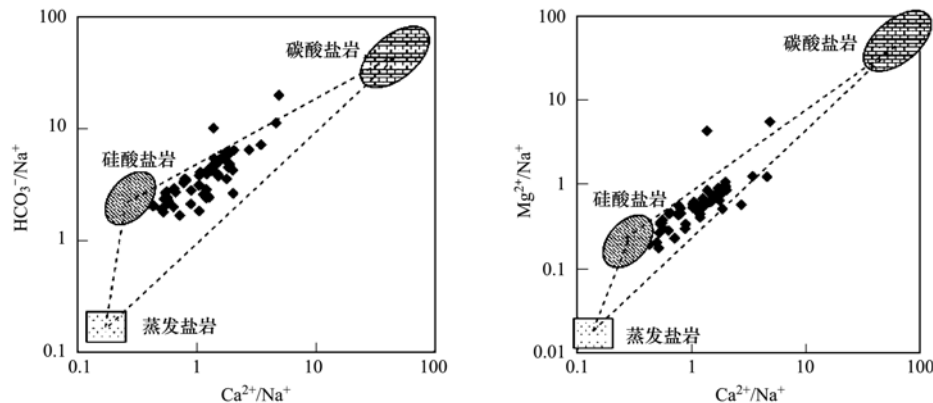


图8 蛤蟆通河流域水体 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 元素比值

Fig. 8 Plots of $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ versus $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ and $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ versus $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ in the Hamatong River Basin

地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于岩石(碳酸盐岩和硅酸盐岩)的风化溶解和蒸发盐岩(石膏)的溶解,那么可以用 $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]^*([\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]^* = [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}] - [\text{SO}_4^{2-}])$ 来指示来源于碳酸盐岩或硅酸盐岩岩石风化溶解的部分;一般地下水中 Na^+ 和 K^+ 主要来源于大气降水、盐岩和硅酸盐岩的溶解,那么可以用 $[\text{Na}^+ + \text{K}^+]^*([\text{Na}^+ + \text{K}^+]^* = [\text{Na}^+ + \text{K}^+] - \text{Cl}^-)$ 来指示硅酸盐岩的溶解部分.因此用蛤蟆通河流域地下水中 $[\text{Na}^+ + \text{K}^+]/[\text{HCO}_3^-]$ 与 $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^-]$ 的关系来了解该区碳酸盐岩和硅酸盐岩对地下水的贡献(图9),该区大部水样点落在 $[\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^-] = 1$ 附近,说明该区硅酸盐岩溶解对地下水的贡献是主要的,部分地下水样品 $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^-]$ 比值大于1,说明受人类活动的影响,多出的 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 量可能被 Cl^- 或 NO_3^- 平衡^[26,27].

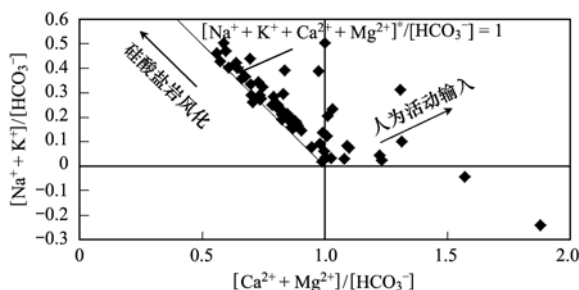


图9 硅酸盐岩和碳酸盐岩风化的相对贡献

Fig. 9 Relative contributions from silicate and carbonate weathering by carbonic acid

3.4.2 离子交替作用

$(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 与 $(\text{Na}^+ -$

$\text{Cl}^-)$ 的关系常用来判断该区地下水是否发生阳离子交换作用,若发生阳离子交换作用,那么这两者比值应该在 -1 左右^[28]. 蛤蟆通河流域地下水 $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 与 $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 有着较强的相关关系 ($R^2 = 0.7457$),且比值在 -1 左右(图10),说明该区发生着一定阳离子交换作用.

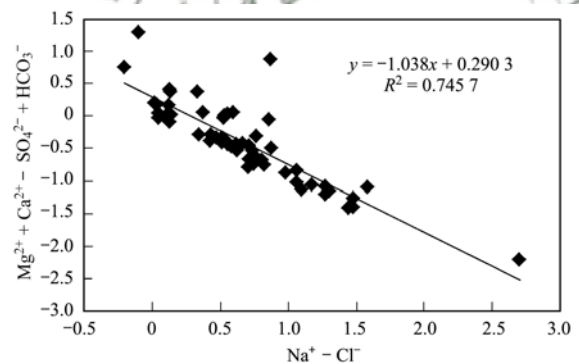


图10 $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 与 $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 的关系

Fig. 10 Plots showing the relationships between $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ and $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ in groundwater samples

3.4.3 人为活动输入

人们常用 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 与 Ca^{2+} 的比值关系来分析人类活动对地下水中主要离子的影响,当 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 时,人为活动受工矿活动影响较大,反之,则受农业活动和生活污水的影响较大^[29]. 该区地下水中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 含量都比较低,受人类活动的影响相对较小,大部分水样两个比值都较小(图11),说明蛤蟆通河流域地下水受人类活动影响较小,而个别地下水样品受农业活动和生活污水的影响较大.

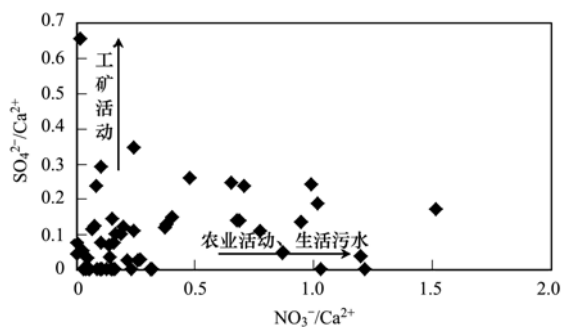
图 11 地下水中 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 的关系

Fig. 11 Relationship of the $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ and $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ in groundwater

3.5 离子比例关系及主要组分来源

由于水体中离子主要来源于大气降水、岩石风化、蒸发盐岩溶解和人为输入等,一般用水体中各种离子的比值来反推其来源^[30-33]. 水体中的 Na^+ 、 K^+ 离子主要来源于大气降水、硅酸盐岩风化及蒸发盐溶解. 海水中 Na^+/Cl^- 约为 0.86, 大气降水的 Na^+/Cl^- 值与海水相似. 蛤蟆通河流域的 Na^+/Cl^- 的比值为 0.66 ~ 20.77 (图 12), 平均值约为 6.22, 偏离该值 (大于 0.86), 说明来源于海洋大气搬运的贡献是非常微弱的, 大于 1:1 这说明水中 Cl^- 不足以来平衡 Na^+ 和 K^+ , 其主要来源不是大气降水和岩盐的溶解, 说明还有其它阴离子来平衡 Na^+ 和 K^+ , 因此多出的部分 Na^+ 和 K^+ 主要是来自岩石风化溶解, 如钠长石、钾长石等硅酸盐岩类矿物的溶解 (HCO_3^- 与 K^+ 、 Na^+ 都有着显著的相关关系, 也说明有含钾钠岩石矿物的风化溶解).

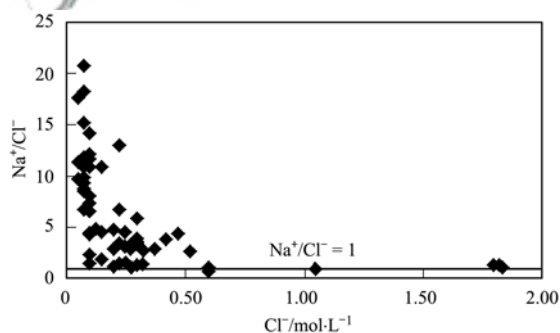
图 12 地下水中 Na^+/Cl^- 比值关系

Fig. 12 Relationship between Na^+ and Cl^- in groundwater

蛤蟆通河地下水样品 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 几乎都全在 1:1 等值线上方 (图 13), $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\text{Cl}^-$ 介于 0.78 ~ 21.73, 均值为 6.61, 表明 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 含量几乎全大于 Cl^- 含量, 说明过量的 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 来源于钠长石、钾长石等硅酸盐岩的风化溶解, 只有两个点分布在 1:1 线下方, 这说明大气降水和蒸发盐溶解不

是该区地下水中 Na^+ 和 K^+ 的主要来源, 说明还有其它来源, 地下水中 Na^+ 和 K^+ 一般来自火成岩或者变质岩, 如钠长石、正长石和云母等硅酸盐矿物的风化产物, 说明硅酸盐岩的风化溶解是该区地下水中 Na^+ 和 K^+ 的主要来源. 由于该区 K^+ 含量较小, 大气降水中的 K^+ 含量约为地下水中的一半, 说明 K^+ 主要是来自于大气降水和硅酸盐岩溶解.

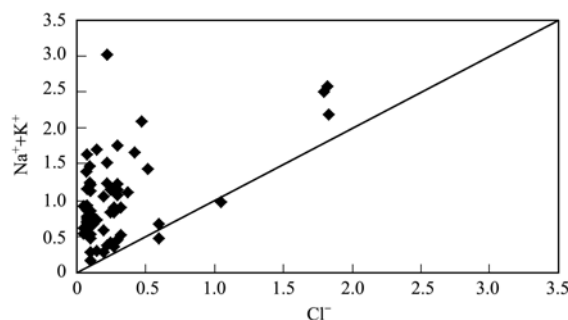
图 13 地下水中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 和 Cl^- 之间的关系

Fig. 13 Relationship between $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ and Cl^- in groundwater

水体中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于岩石的风化溶解和蒸发盐岩 (石膏) 的溶解, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 比值为 1 ~ 2 说明碳酸盐岩的风化溶解占主要地位, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} > 2$ 说明硅酸盐或石膏的溶解贡献较大^[31], 蛤蟆通河流域地下水比值在 0.32 ~ 4.78 之间, 均值为 2.12, 其中有 31 组比值大于 2, 说明该区受硅酸盐岩或石膏的风化溶解影响较大, 由于该研究区 SO_4^{2-} 检出率不高, 且绝大多数地下水样品在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 说明该区石膏对水中离子的贡献非常微弱而硅酸盐岩的风化溶解对地下水组成贡献相对较大. 有 26 组地下水样品 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 比值介于 1 和 2 之间, 说明该区受碳酸盐岩的风化溶解也较大, 对地下水离子组成影响相对较大 (图 14).

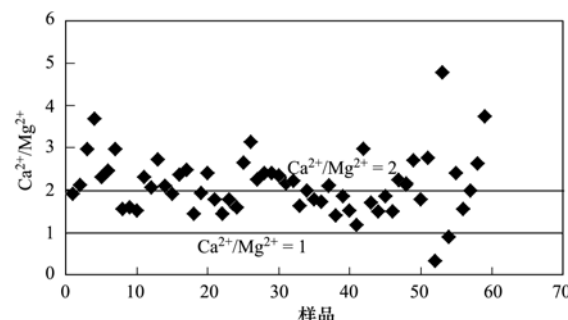
图 14 蛤蟆通河流域地下水 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 比值

Fig. 14 Ratio of $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ in groundwater of the Hamatong River Basin

由于该区地下水中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 说明蒸发盐岩的溶解不是该区地下水主要离子的主要来源, 由于该区地下水样品中 22 组未检出 SO_4^{2-} ,

而其它地下水样品中 SO_4^{2-} 也多在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 说明该区受蒸发盐岩溶解的作用较小, 也说明石膏溶解不是 Ca^{2+} 的主要来源. $\text{HCO}_3^- / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值约为 1.45 (图 15), 为碳酸岩和白云岩的比值中间, 说明该区有这两类岩石风化溶解提供地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} .

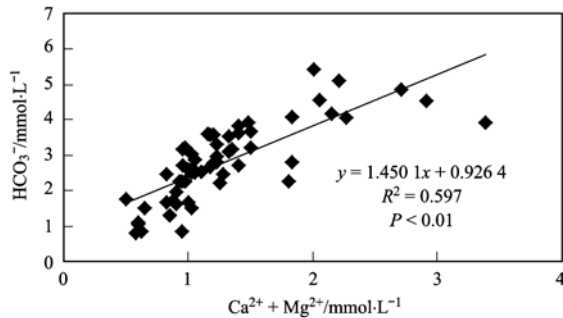


图 15 $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+})$ 与 HCO_3^- 的关系

Fig. 15 $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+})$ versus HCO_3^- in the samples

在碳酸盐岩风化作用控制的区域, 一般用 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的关系来揭示研究区白云岩或方解石风化溶解对水体主要物质组成的贡献关系^[34, 35]. 蛤蟆通河流域地下水样 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值多数在 0.5 左右 (图 16), 说明该区地下水受方解石和白云岩风化溶解的贡献都非常重要.

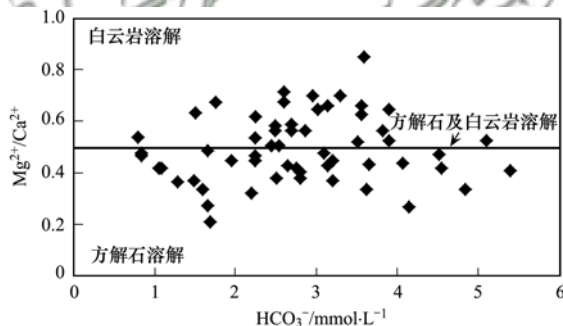
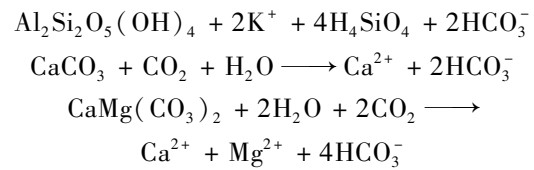
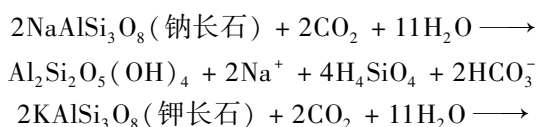


图 16 碳酸盐岩风化溶解关系

Fig. 16 Carbonate rock weathering in the Hamatong River Basin

而硅酸盐岩的风化溶解过程中产生 Na^+ 也可产生 HCO_3^- , 相关性分析看出二者有着较强的相关关系 ($0.658, P < 0.01$), 这也充分说明 Na^+ 主要来源于硅酸盐岩的风化溶解, 同时也说明硅酸盐岩的风化溶解也是 HCO_3^- 的一个来源. HCO_3^- 与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 都有着较强的相关关系, 相关常数分别为 0.702 和 0.640, 说明碳酸盐岩风化是提供 HCO_3^- 的一个重要来源, 反应如下.



4 结论

(1) 蛤蟆通河流域地下水阳离子以 Ca^{2+} 为主, 占阳离子总量的质量分数为 22.1% ~ 72.4%, 平均为 48.7%, 阴离子以 HCO_3^- 为主, 占阴离子总量的质量分数为 35.3% ~ 97.5%, 平均为 80%; TDS 介于 93.3 ~ 521.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 219.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均为淡水; pH 介于 6.36 ~ 8.26 之间, 80% 以上的水样 pH > 7.0, 属于弱碱性水.

(2) 蛤蟆通河流域地下水类型以 HCO_3^- -Ca、 HCO_3^- -Ca·Mg 和 HCO_3^- -Ca·Na 型水为主; 地下水主要受岩石风化作用控制, 地下水主要离子来源受硅酸盐岩的溶解影响较大, 同时受碳酸盐岩的溶解影响.

(3) Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 主要来源于钾长石、钠长石等硅酸盐岩的溶解; 来自方解石、白云岩等碳酸盐岩风化对 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 贡献较大; 阳离子交替作用对地下水组成有一定的影响, 人类活动对水化学的影响相对较小.

参考文献:

- [1] 董维红, 苏小四, 侯光才, 等. 鄂尔多斯白垩系地下水盆地地下水水化学类型的分布规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(2): 288-292.
Dong W H, Su X S, Hou G C, et al. Distribution law of groundwater hydrochemical type in the Ordos cretaceous artesian basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(2): 288-292.
- [2] 苏小四, 万玉玉, 董维红, 等. 马莲河河水与地下水的相互关系: 水化学和同位素证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(6): 1087-1094.
Su X S, Wan Y Y, Dong W H, et al. Hydraulic relationship between Malianhe river and groundwater: hydrogeochemical and isotopic evidences[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(6): 1087-1094.
- [3] 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 等. 锡林河流域地表水水化学主要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.
- [4] Xiao J, Jin Z D, Zhang F, et al. Solute geochemistry and its sources of the groundwaters in the Qinghai Lake catchment, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 52: 21-30.
- [5] Bo Y, Liu C L, Jiao P C, et al. Hydrochemical characteristics and controlling factors for waters' chemical composition in the Tarim Basin, Western China [J]. Chemie der Erde-

- Geochemistry, 2013, **73**(3): 343-356.
- [6] Gao Z Y, Lin Z J, Niu F J, *et al.* Hydrochemistry and controlling mechanism of lakes in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Engineering Corridor, China[J]. *Geomorphology*, 2017, **297**: 159-169.
- [7] 吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1565-1572.
- Lü J M, An Y L, Wu Q X, *et al.* Hydrochemical characteristics and sources of Qingshuijiang river basin at wet season in Guizhou Province[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1565-1572.
- [8] Xiao J, Jin Z D, Ding H, *et al.* Geochemistry and solute sources of surface waters of the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, **54-55**: 162-173.
- [9] 赵辉. 三江平原蛤蟆通河流域地下水补、径、排特征及水化学演化规律[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [10] 刚什婷. 蛤蟆通流域地下水水位与水质研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- Gang S T. Study on the groundwater table and water quality in the Hamatong Basin [J]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [11] 王宝春, 贾涛, 刚什婷, 等. 蛤蟆通流域浅层地下水水文地球化学特征分析[J]. *人民长江*, 2017, **48**(16): 43-48.
- Wang B C, Jia T, Gang S T, *et al.* Hydrochemical characteristics of shallow groundwater in Hamatong Basin [J]. *Yangtze River*, 2017, **48**(16): 43-48.
- [12] 刘宝剑, 赵志琦, 李思亮, 等. 寒温带流域硅酸盐岩的风化特征——以嫩江为例[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(4): 1006-1016.
- Liu B J, Zhao Z Q, Li S L, *et al.* Characteristics of silicate rock weathering in cold temperate zone: a case study of Nenjiang River, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(4): 1006-1016.
- [13] 周嘉欣, 丁永建, 曾国雄, 等. 疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3315-3324.
- Zhou J X, Ding Y J, Zeng G X, *et al.* Major ion chemistry of surface water in the upper reach of Shule River basin and the possible controls [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3315-3324.
- [14] 张艳, 吴勇, 杨军, 等. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3230-3237.
- Zhang Y, Wu Y, Yang J, *et al.* Hydrochemical characteristic and reasoning analysis in Siyi Town, Langzhong City [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3230-3237.
- [15] 高坛光, 康世昌, 张强弓, 等. 青藏高原纳木错流域河水主要离子化学特征及来源[J]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 3009-3016.
- Gao T G, Kang S C, Zhang Q G, *et al.* Major ionic features and their sources in the Nam Co basin over the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(11): 3009-3016.
- [16] He J H, Ma J Z, Zhang P, *et al.* Groundwater recharge environments and hydrogeochemical evolution in the Jiuquan Basin, Northwest China[J]. *Applied Geochemistry*, 2012, **27**(4): 866-878.
- [17] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [18] Gibbs R J. Water chemistry of the Amazon River [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1972, **36**(9): 1061-1066.
- [19] Chetelat B, Liu C Q, Zhao Z Q, *et al.* Geochemistry of the dissolved load of the Changjiang Basin Rivers: anthropogenic impacts and chemical weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72**(17): 4254-4277.
- [20] Chen J S, Wang F Y, Xia X H, *et al.* Major element chemistry of the Changjiang (Yangtze River) [J]. *Chemical Geology*, 2002, **187**(3-4): 231-255.
- [21] 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.
- [22] Wu Y, Gibson C E. Mechanisms controlling the water chemistry of small lakes in northern Ireland[J]. *Water Research*, 1996, **30**(1): 178-182.
- [23] Xiao J, Jin Z D, Zhang F, *et al.* Major ion geochemistry of shallow groundwater in the Qinghai Lake catchment, NE Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, **67**(5): 1331-1344.
- [24] Zhu B Q, Yang X P, Rioual P, *et al.* Hydrogeochemistry of three watersheds (the Erlqis, Zhungarar and Yili) in northern Xinjiang, NW China[J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(8): 1535-1548.
- [25] Fan B L, Zhao Z Q, Tao F X, *et al.* Characteristics of carbonate, evaporite and silicate weathering in Huanghe River basin: a comparison among the upstream, midstream and downstream[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, **96**: 17-26.
- [26] 韩贵琳, 刘丛强. 贵州喀斯特地区河流的研究——碳酸盐岩溶解控制的水文地球化学特征[J]. *地球科学进展*, 2005, **20**(4): 394-406.
- Han G L, Liu C Q. Hydrogeochemistry of rivers in Guizhou Province, China: constraints on crustal weathering in karst terrain [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, **20**(4): 394-406.
- [27] Li S Y, Xu Z F, Wang H, *et al.* Geochemistry of the upper Han River basin, China: 3: anthropogenic inputs and chemical weathering to the dissolved load[J]. *Chemical Geology*, 2009, **264**(1-4): 89-95.
- [28] 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.
- [29] 左禹政, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 贵州省都柳江流域水化学特征研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(7): 2684-2690.
- Zuo Y Z, An Y L, Wu Q X, *et al.* Study on the hydrochemical characteristics of Duliu River basin in Guizhou Province [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(7): 2684-2690.
- [30] 赵海娟, 肖琼, 吴夏, 等. 人类活动对漓江地表水水体水-岩作用的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4108-4119.
- Zhao H J, Xiao Q, Wu X, *et al.* Impact of human activities on water-rock interactions in surface water of Lijiang River [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4108-4119.

- [31] Xing L N, Guo H M, Zhan Y H. Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the North China Plain[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, **70-71**: 250-264.
- [32] Zhu B Q, Yu J J, Qin X G, *et al.* Identification of rock weathering and environmental control in arid catchments (northern Xinjiang) of Central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, **66**: 277-294.
- [33] 张清华, 孙平安, 何师意, 等. 西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1065-1075.
- Zhang Q H, Sun P A, He S Y, *et al.* Fate and origin of major ions in river water in the Lhasa River Basin, Tibet [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1065-1075.
- [34] 蒲俊兵, 袁道先, 蒋勇军, 等. 重庆岩溶地下水水文地球化学特征及环境意义[J]. *水科学进展*, 2010, **21**(5): 628-636.
- Pu J B, Yuan D X, Jiang Y J, *et al.* Hydrogeochemistry and environmental meaning of Chongqing subterranean karst streams in China[J]. *Advances in Water Science*, 2010, **21**(5): 628-636.
- [35] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1779-1787.
- Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Major ionic features and their controlling factors in the Upper-Middle reaches of Wujiang river [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1779-1787.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1,1.1,1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the $\delta^{15}\text{N}$ of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α -HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)