

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则 (4462) 《环境科学》征订启事 (4672) 信息 (4647, 4705, 4789)	

尼洋河流域水化学特征及其控制因素

张涛,蔡五田,李颖智,张智印,耿婷婷,边超,赵森,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: 为研究尼洋河流域水化学特征及其控制因素,2014 年先后采集河水 7 组,井水 13 组,泉水 10 组,共计 30 组水样。综合运用数理统计、Piper 三线图、Gibbs 模型和离子比等方法,分析了尼洋河流域河水、泉水和井水的水文地球化学特征,并探讨了尼洋河流域的水化学演化规律。结果表明,河水、井水及泉水中阳离子均以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主,占阳离子总量的 84% 以上;阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,占阴离子总量的 97% 以上;TDS 介于 $79.11 \sim 290.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $165.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,矿化度较低;水化学类型以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 (\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3) - \text{Ca} \cdot \text{Mg} (\text{Mg} \cdot \text{Ca})$ 型水为主;水化学样品均分布在 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;主成分分析及相关分析表明,尼洋河流域水化学组分受硅酸盐岩的溶解控制,碳酸盐岩的溶解也起到非常重要的作用。

关键词: 水化学; 主要离子; 离子来源; 元素比值; 化学风化; 因子分析; 尼洋河

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4537-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201704051

Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin

ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, ZHANG Zhi-yin, GENG Ting-ting, BIAN Chao, ZHAO Miao, CAI Yue-mei

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

Abstract: In order to study the hydrochemical characteristics and their possible controls for the chemical composition of the water from the Niyang River Basin, 30 samples were collected from wells, springs, and the river in 2014 and major ion concentrations were measured. Descriptive statistics, the Gibbs figure, an ion ratio, and Piper triangular diagrams were used to investigate the hydrochemical characteristics, influencing factors, and hydrochemical evolution of the water in the basin. The results showed that the major cations in this water were Ca^{2+} and Mg^{2+} , accounting for more than 84% of cations and the main anions were HCO_3^- and SO_4^{2-} , accounting for more than 97% of anions. The hydrochemical typology of the water is $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 (\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3) - \text{Ca} \cdot \text{Mg} (\text{Mg} \cdot \text{Ca})$. The total dissolved solids (TDS) in the water ranges from 79.11 to $290.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ with an average of $165.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The chemical composition of water samples is located to the left of the Gibbs model, which indicates that the chemical process of Niyang River Basin are controlled by rock weathering. According to the principal component analysis and correlation analysis, the hydrochemical composition is controlled by silicate weathering, however, carbonate weathering also plays an important role.

Key words: hydrochemistry; major ions; ion source; element ratios; chemical weathering; factor analysis; Niyang River

水体中的离子含量和分布特征受大气降水、气温、地形地貌、海拔、补给类型、径流及排泄过程、土地利用类型和地表岩性等多种因素影响和控制;同时还受与周围环境发生的各种水文地球化学作用影响^[1,2]。水体中主要离子成分常用来分析流域水化学控制因素及物质来源^[3~5],Gibbs 基于对全球大气降水、湖水、河水和海洋水化学组分的分析,认为大气降水输入、岩石风化和蒸发-结晶过程是全球地表水化学组成的三大控制因素^[6,7]。随后研究人员对 Amazon 河^[8]、Ganga-Brahmaputra 水系^[9,10]、Rhine 河^[11]、刚果盆地流域^[12]、Alaknanda 河^[13]、Seine 河^[14]、长江^[15,16]、黄河^[17]和雅鲁藏布江^[18,19]等流域进行了应用研究,同时结合数理统计、离子比等方法对不同流域水化学的控制因素及来源进行

了分析^[20~24]。

尼洋河是雅鲁藏布江的一级支流,水量丰富,是受人类活动影响较小的地区。由于尼洋河地处青藏高原,海拔较高,研究基础相对薄弱,有关尼洋河流域水体主要离子特征及控制因素报道较少,因此,本研究利用尼洋河流域不同类型水体离子组成,来推断其控制因素。2014 年 8 月对尼洋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-} 、偏硅酸)进行了测试,分别用 Gibbs 图、Piper 三线图及数理统计方法

收稿日期: 2017-04-06; 修订日期: 2017-05-27

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120114059601, DD20160298)

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

对样品离子组成进行分析,来讨论尼洋河流域水化学特征及控制因素,并分析水化学成因,以期为尼洋河流域生态环境建设提供科学依据。

1 研究区概况

尼洋河是雅鲁藏布江的一级支流,发源于西藏自治区米拉山西侧的错木梁拉,由西向东流,在林芝县的则们附近汇入雅鲁藏布江,是雅鲁藏布江的五大支流之一^[25]。尼洋河流域位于北纬 $29^{\circ}28'$ ~ $30^{\circ}31'$ 和东经 $92^{\circ}10'$ ~ $94^{\circ}35'$ 之间,流域东西长约 230 km,南北宽约 110 km,流域面积约 17 679 km²,排在第 4 位;但水量较大,仅小于帕隆藏布,位于各大支流的第 2 位^[26]。尼洋河受印度洋暖流与北方寒流的影响,形成了林芝地区特殊的热带、亚热带、温带、寒带,湿润和半湿润并存的多种气候带,尼洋河所处地区的气候温和湿润。年均气温 8°C 左右,年降水量 600 ~ 900 mm,年内径流量相对集中,主要集中在每年的 6 ~ 9 月,占年径流总量的 90% 左右^[27]。

采样点主要分布尼洋河干流河谷平原内,平原

宽阔平坦,发育河床、心滩、漫滩和阶地,谷地由卵碎石和阶地组成,地面有起伏,含水层由全新统冲积漂石、卵石和上更新统上段冲积含泥卵石、粗砂、中砂等组成,地下水类型主要以松散岩类孔隙水为主,广泛分布与山间沟谷、山前平原及盆地内。尼洋河流域酸性-中酸性岩浆岩分布较广,岩性以花岗岩类、闪长岩类、花岗闪长岩类为主,主要矿物成分以石英、长石和云母为主,也有较少的超基性橄榄岩类、辉长岩类、辉绿岩类分布;而在尼洋河中上游分布块状的石炭系、二叠系浅变质杂砾岩,震旦系的片麻岩、片岩、混合岩、变粒岩也有条带状分布。

2 材料与方法

2.1 采样点分布

本次所采集样品包括河水、井水和泉水共 30 组,其中河水 7 组,井水 13 组,泉水 10 组。样品分布相对均匀,确保采样点分布在不同的地质地貌单元,水文地质条件、土地利用类型等不同的背景条件,保证每个样品点具有一定的代表性,采样点分布见图 1。

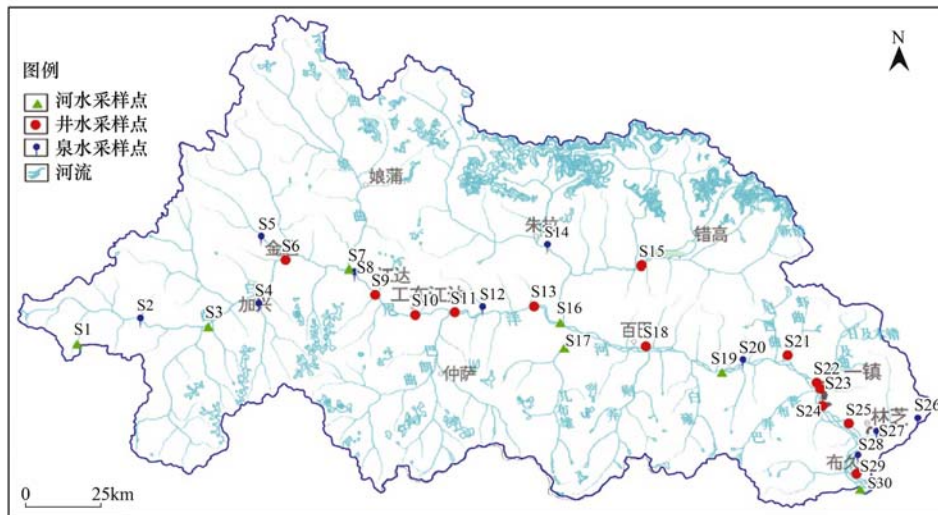


图 1 尼洋河流域及采样点分布示意

Fig. 1 Sketch map the Niyang River Basin and the sampling sites

2.2 样品采集与分析

2.2.1 样品采集与储存

首先将样品瓶清洗干净并干燥,取样时用水样清洗样品瓶 2 ~ 3 次,再装入水样,盖上瓶盖后用封口膜将瓶口封紧以保证瓶中水样不会外漏。每个水样点取两个样品,一个用 2 L 的瓶子装入原样,用于 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 H_2SiO_3 和 TDS 的分析;另一个用 500 mL 的瓶子装样,并且要加入硝酸,使水样的 $\text{pH} < 2$,防止金属离子沉淀或被器壁吸附,用

于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 的测定,然后将水样瓶放入冷藏运输箱,并且尽快送到实验室进行测试。样品采集及运输过程,均加入空白样(去离子水)、平行样等质控样品来控制采样及运输过程中数据质量。

2.2.2 样品分析

Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 采用火焰原子吸收光谱仪(contrAA300,德国耶拿公司)进行测定,相对标准偏差分别为 0.56%、0.86%、0.23% 和 0.41%;

CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 采用滴定分析法; Cl^- 和 SO_4^{2-} 用离子色谱仪(883,瑞士万通公司)进行测试分析,相对标准偏差分别为 0.61% 和 0.39%; 溶解性总固体(TDS)利用烘干法进行测定; 硅酸采用硅钼蓝比色法(TU-1901,北京普析通用公司)测定。

3 结果与讨论

3.1 水化学组成特征及水化学类型

3.1.1 水化学组成特征

本次工作共采集 30 组水样,其中包括 7 组河水、13 组井水和 10 组泉水样品,各水化学参数统计见表 1。

(1) 主要离子组成

通过对常规水化学参数进行分析,在尼洋河流

域 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 含量较高(见图 2),河水中主要阴离子浓度呈现了 $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ 关系,以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,约占阴离子总量的 98%,阳离子浓度存在 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ 的关系,以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主,约占阳离子总量的 94%; 井水中阴离子浓度呈现了 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ 关系,以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,约占阴离子总量的 97%,阳离子浓度存在 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ 的关系,以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主,约占阳离子总量的 87%; 泉水中阴离子浓度呈现了 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ 关系,以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,约占阴离子总量的 98%,阳离子浓度存在 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ 的关系,以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主,约占阳离子总量的 84%。

表 1 主要离子含量统计/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Statistics of major ions in water/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	pH 值	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	H_2SiO_3	TDS
均值	7.30	20.06	11.71	1.29	3.14	2.75	51.91	60.21	1.87	12.93	165.21
中值	7.30	19.30	11.70	1.01	1.70	2.10	49.09	54.49	0.40	12.28	178.78
标准差	0.31	9.36	3.02	0.76	4.20	1.86	16.91	32.63	5.67	5.98	55.80
最小值	6.74	5.26	5.95	0.55	0.31	0.70	21.02	12.20	0.10	6.90	79.11
最大值	7.99	36.84	22.22	3.97	18.95	7.69	93.81	140.34	30.51	28.17	290.48

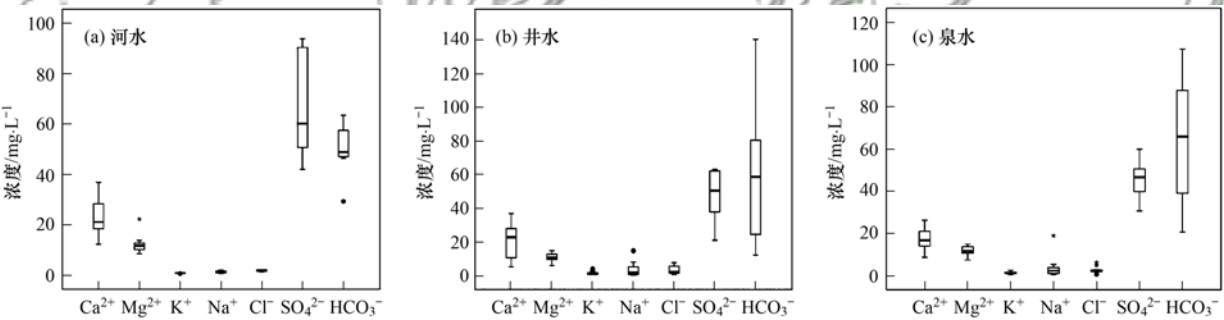


图 2 尼洋河流域水体主要离子浓度箱图

Fig. 2 Box plots showing variations of the major concentrations in water within the Niyang River Basin

(2) pH 及溶解性总固体(TDS)变化特征

尼洋河流域采集的河水水样 pH 值介于 7.07 ~ 7.58 之间,平均值为 7.21; 井水 pH 值介于 6.83 ~ 7.99 之间,平均值为 7.28; 泉水 pH 值介于 6.74 ~ 7.91 之间,平均值为 7.38. 三者有着泉水 > 井水 > 河水的关系,但没有明显的差异(见图 3); 尼洋河流域河水中 TDS 介于 104.92 ~ 207.48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均为 167.60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TDS 含量高于世界河流平均值(115 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[28]; 井水中 TDS 介于 79.11 ~ 290.48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均为 165.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 泉水中 TDS 介于 87.09 ~ 243.38 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 163.20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 尼洋河流域由于径流条件好,蒸发作用较弱,河水、井水及泉水矿化度均小于 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,为

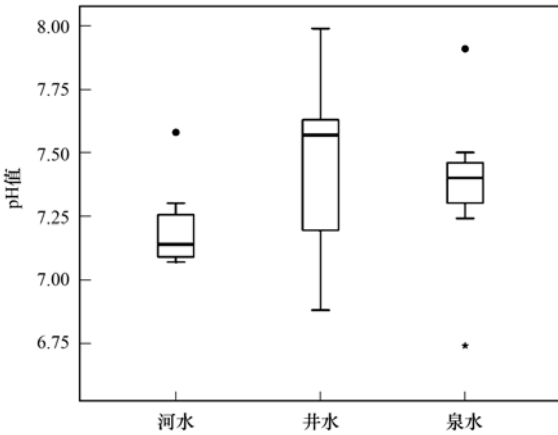


图 3 pH 箱图

Fig. 3 Box plots of pH in water within Niyang River Basin

淡水,三者之间存在河水 > 井水 > 泉水,但差异性较小(见图4),这从侧面说明尼洋河流域地表水与地下水交换比较频繁.

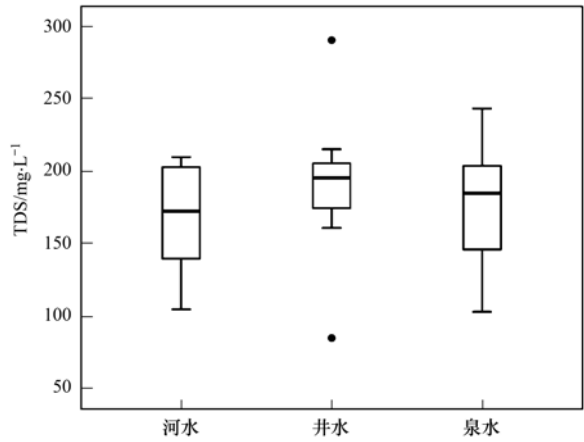


图4 TDS箱图

Fig. 4 Box plots of TDS in water within Niyang River Basin

TDS 从上游到下游变化较大,这主要是由于尼洋河流域属于峡沟地带,有大量的山间支流,汇集大量的地表水,沿程 TDS 波动明显(图5).

3.1.2 水化学类型

Piper 三线图可以用来分析地下水化学成分的演化规律,该方法的优点是不受人为因素影响,在三

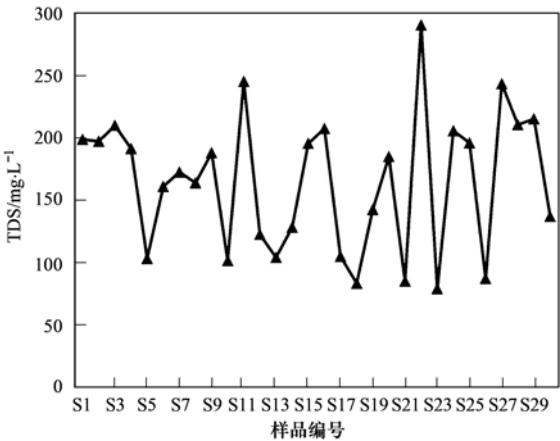


图5 尼洋河流域 TDS 沿程变化趋势

Fig. 5 Variations in the electronic conductivity along the flow direction of the Niyang River Basin

线图中可以看出各种离子的相对含量^[28,29]. 从图6可以看出,尼洋河流域河水、泉水、井水均紧贴 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 轴分布,整个流域 Cl^- 离子的含量较少,阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主;在阳离子三角图中,采样点均紧靠 $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 轴分布,说明该区阳离子主要以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主. 区内河水、井水和泉水均以 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$ ($\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$)- $\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ ($\text{Mg} \cdot \text{Ca}$) 型为主,表明地表水、地下水水力联系密切,转化频

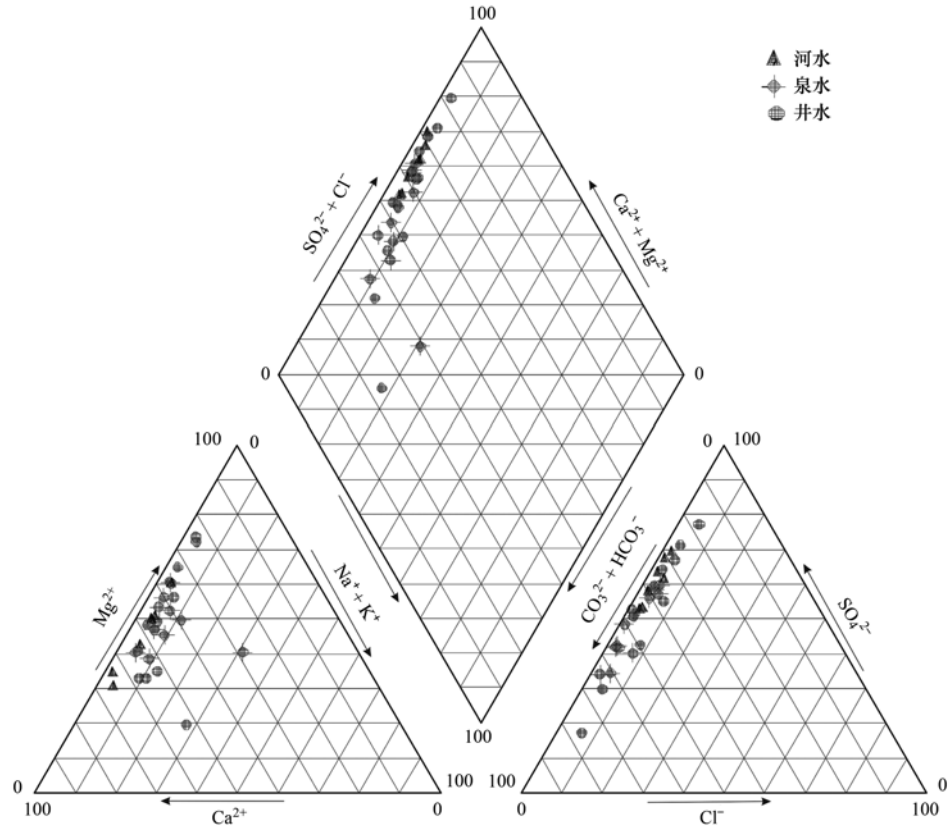


图6 Piper 三线图

Fig. 6 Ternary diagrams for ions in water within the Niyang River Basin

繁,经历了相似的水岩作用. 其中 S27 和 S29 两个水点水化学特征与其它水点存在不同,两水样中的 Na^+ 和 Cl^- 含量均明显高于平均含量,说明受人类活动影响相对较大.

3.1.3 各化学指标之间的相互关系

相关性分析常用来揭示离子的来源关系,表 2 为尼洋河流域各水化学组分之间的相关关系矩阵. TDS 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和偏硅酸都存在显著的正相关关系 ($P < 0.01$),这说明这些物质都是 TDS 的来源,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 0.874 和 0.924,且变化趋势一致(图 7),说明 Ca^{2+} 、

HCO_3^- 是 TDS 主要来源. HCO_3^- 与 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 、偏硅酸都有着显著的相关关系,说明 HCO_3^- 与 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 、偏硅酸有同一来源,可能来源于硅酸盐岩矿物的风化溶解; SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 有着显著的正相关关系,说明三者有共同来源,主要是来源于方解石、白云岩等碳酸盐岩矿物的风化溶解及硫酸溶解^[30]. 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,也有一部分来自于大气降水和蒸发盐溶解,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.

表 2 各常规指标之间相关关系¹⁾

Table 2 Correlation coefficients between major ions in the water										
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	H_2SiO_3	TDS
Ca^{2+}	1									
Mg^{2+}	0.333	1								
K^+	0.592 **	0.271	1							
Na^+	0.284	0.054	0.511 **	1						
Cl^-	0.408 *	0.066	0.522 **	0.601 **	1					
SO_4^{2-}	0.591 **	0.679 **	-0.043	-0.172	-0.059	1				
HCO_3^-	0.744 **	0.320	0.853 **	0.729 **	0.576 **	0.110	1			
NO_3^-	-0.135	-0.089	-0.042	-0.074	0.018	-0.112	-0.151	1		
H_2SiO_3	0.289	0.073	0.783 **	0.780 **	0.531 **	-0.310	0.772 **	-0.012	1	
TDS	0.874 **	0.532 **	0.748 **	0.614 **	0.548 **	0.466 **	0.924 **	-0.153	0.600 **	1

1) **表示在 0.01 上显著相关,*表示在 0.05 上显著相关

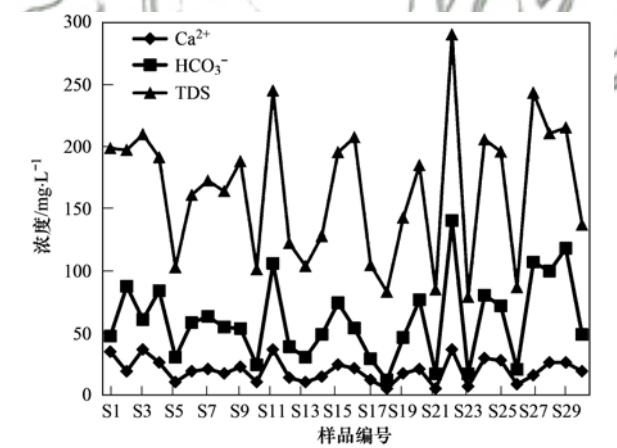


图 7 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 及 TDS 变化关系

Fig. 7 Variation of Ca^{2+} , HCO_3^- and TDS in the Niyang River Basin

3.2 主要离子来源及控制因素分析

3.2.1 水岩模型分析

Gibbs 设计了半对数坐标图,纵坐标为水样 TDS 的对数坐标,横坐标分别为阳离子质量浓度的比值 $\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或者阴离子质量浓度的比值 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$,从而形成了 Gibbs 图,

该图能直接反映河水主要离子的控制因素(蒸发结晶、岩石风化和大气降水作用)^[31]. 在 Gibbs 图中,低矿化度的河水(TDS 为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右),阳离子比值具有较高 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 接近于 1 或阴离子 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值接近于 1,此类河水采样点分布在图的右下角,这类河流以大气降水补给为主,反映该区河水受到大气降水影响;TDS 在 $10 \sim 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间的河水点,阳离子 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 的比值或者阴离子 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值在 0.5 左右或者 < 0.5 的,此类河水的采样点分布在图的中间靠左部位,这类采样点主要受岩石风化控制,离子主要来源于岩石的风化溶解;TDS 含量高的河流同时阳离子 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 的比值或阴离子 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 的比值接近于 1,此类河水点分布在图的右上角,说明此类河流主要受蒸发结晶作用控制,此类河流主要分布在干旱区^[2].

本次工作利用 Gibbs 图对尼洋河流域河水、井水和泉水样品进行分析. 通过图 8 可以看出,区内水样落于 TDS 大小 $70 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,阴阳离子

质量浓度比值小于 0.5 的区域(图 8),水样点均分布在岩石风化控制区,说明该区水体的主要离子组成是受岩石风化作用控制;所采集水样远离“降水

主导”和“蒸发结晶”作用控制区域,表明研究区内大气降水和蒸发结晶对水体中离子质量浓度的影响不是主要控制因素.

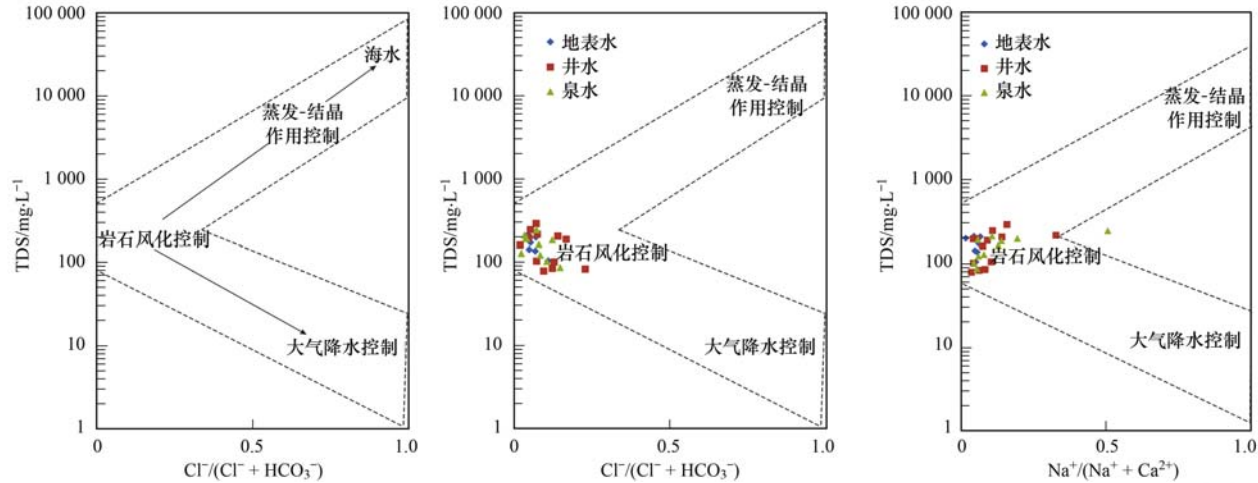


图 8 尼洋河流域水化学 Gibbs 图

Fig. 8 Gibbs plots of the Niyang River Basin

所有水样点均分布在硅酸盐岩与碳酸盐岩控制端元中间(图 9),这就说明该区水化学主要是受硅酸盐岩和碳酸盐岩风化溶解共同控制. 结合该区地质背景条件,分布大量的花岗岩,碳酸盐类矿物只是小面积零散分布,由于该区海拔较高,温度较低,这就造成硅酸盐类矿物风化溶解的速度较慢,而碳酸盐类矿物受温度和海拔的影响较小,风化速率较快,溶解得相对较多^[32]. 从图 9 中可以看出井水和泉水受硅酸盐岩的影响相对较大,而河水受碳酸盐岩的影响较大,主要是由于存在离子

交换吸附,由于河流流速较快,发生离子交换时间没有井水和泉水充裕,河水中钠吸附比($SAR = Na^+ / [Ca^{2+} + Mg^{2+} / 2]^{0.5}$)平均值为 0.04,井水和泉水中钠吸附比分别为 0.10 和 0.12,发生离子交换吸附程度井水和泉水均大于河水,致使井水和泉水中 Ca^{2+} 含量低于河水中 Ca^{2+} 含量,而 Na^+ 含量河水中比井水和泉水中低,导致 Ca^{2+} / Na^+ 比值河水大于井水和泉水,从图 9 反映出来井水和泉水受硅酸盐影响相对较大,地表水受碳酸盐影响相对大.

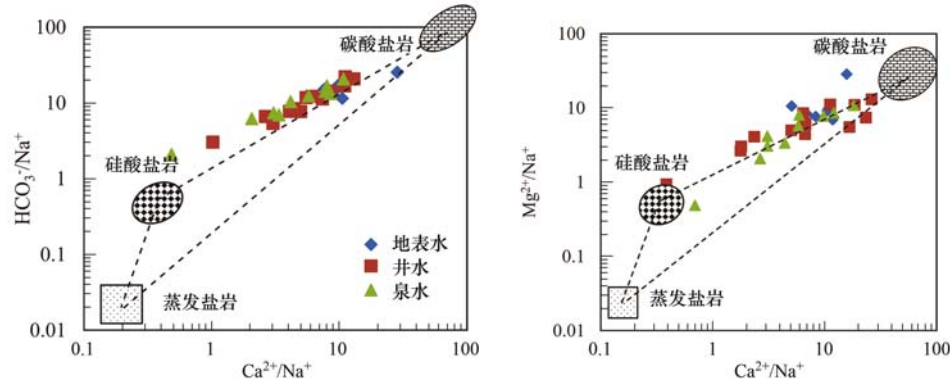


图 9 尼洋河流域水体 Ca^{2+}/Na^+ 与 HCO_3^-/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 元素比值

Fig. 9 Plots of HCO_3^-/Na^+ versus Ca^{2+}/Na^+ and Mg^{2+}/Na^+ versus Ca^{2+}/Na^+ in the Niyang River Basin

3.2.2 主成分分析

为了进一步探讨尼洋河流域不同水体主要离子与地质背景之间的关系,了解主要离子的控制因素,应用主成分分析法(PCA)对尼洋河流域不同水体主要离子间的关系进行分析^[33]. 因子分析所得因子

载荷如表 3 所示,按公共因子累积方差 > 80 % 的筛选要求,因子分析得到了 3 个主要的公共因子,累计方差为整个方差的 82.8% (表 4). 其中第 1 因子占 46.1%,第 2 因子占 23.1%,第 3 因子占 13.6%. 第 1 因子与 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、偏硅酸的

相关性较大,代表以大气降水及硅酸盐岩的风化溶解. 第2因子与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 相关性较强,说明方解石、白云岩的风化及硫酸溶解的贡献较大. 第3因子与 Cl^- 和 NO_3^- 有较好的相关性,这说明与人类活动的输入有关.

表3 尼洋河流域水体主要离子主成分分析
Table 3 Principal component analysis of the major ions in the Niyang River Basin

变量	因子		
	第1因子	第2因子	第3因子
Ca^{2+}	0.694	0.521	-0.067
Mg^{2+}	0.322	0.728	-0.154
K^+	0.876	-0.055	-0.136
Na^+	0.774	-0.352	-0.056
Cl^-	0.735	-0.121	0.533
SO_4^{2-}	0.091	0.955	-0.080
HCO_3^-	0.958	0.034	-0.182
NO_3^-	0.195	0.221	0.910
偏硅酸	0.830	-0.420	-0.156

表4 尼洋河流域水体主要离子成分方差累积
Table 4 Cumulative variance of the principal components for major ions in the waters of the Niyang River Basin

因子	提取载荷平方和		
	特征值	方差百分比/%	累积百分比/%
1	4.145	46.1	46.1
2	2.082	23.1	69.2
3	1.227	13.6	82.8

根据计算结果,大气降水与硅酸盐岩风化对 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、偏硅酸方差的贡献率为46.1%,而尼洋河流域 Cl^- 的含量较低(介于 $0.70 \sim 7.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $2.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),说明大气降水对各种水体主要离子的含量贡献较小,说明硅酸盐岩的溶解是尼洋河流域水体中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 和偏硅酸的主要来源;第1因子中 SO_4^{2-} 的载荷值为0.091,说明第1因子对 SO_4^{2-} 的贡献较小,第2因子对 SO_4^{2-} 的载荷值为0.955,说明 SO_4^{2-} 基本来自第2因子的贡献. 第3因子与 NO_3^- 相关性的相关较强,代表人类活动输入对主要离子含量的影响,由于 NO_3^- 含量较低,方差百分比约占13.6%,人类活动的影响较小.

3.3 主要风化过程及水化学演化

由于水体中离子主要来源于大气降水、岩石风化、蒸发盐溶解和人为输入等,一般用水体中各种离子的比值来反推其来源^[34,35]. 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. 尼洋河流域的 Na^+/Cl^- 的比值的平均值约为1.6,偏离该值(大于0.86),这说明该区的 Na^+ 主要源于硅酸盐岩的风化作用.

由图10可以看出,大多数点分布在1:1线的上侧,说明 Cl^- 不足以来平衡 Na^+ 和 K^+ ,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).

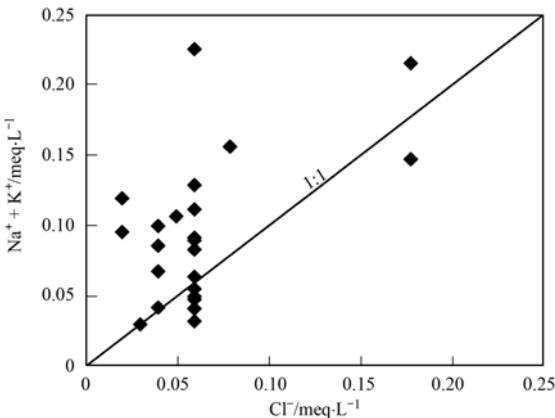


图10 Cl^- 与 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 关系图
Fig. 10 Cl^- versus $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ concentrations in the samples

所有水样点均落在 $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) = 1$ 线下方(图11),还需要有 Na^+ 、 K^+ 等阳离子来平衡阴离子,说明硅酸盐岩矿物风化是控制该区水化学的一个重要因素.

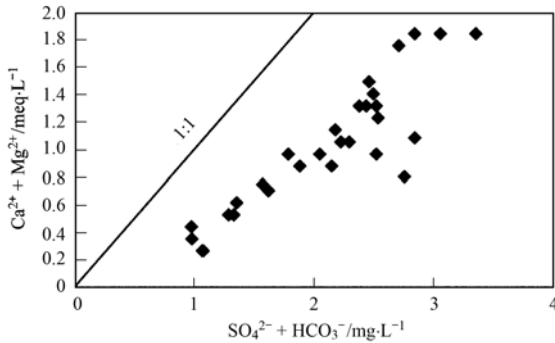
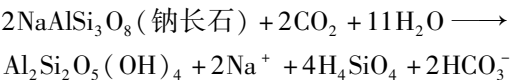
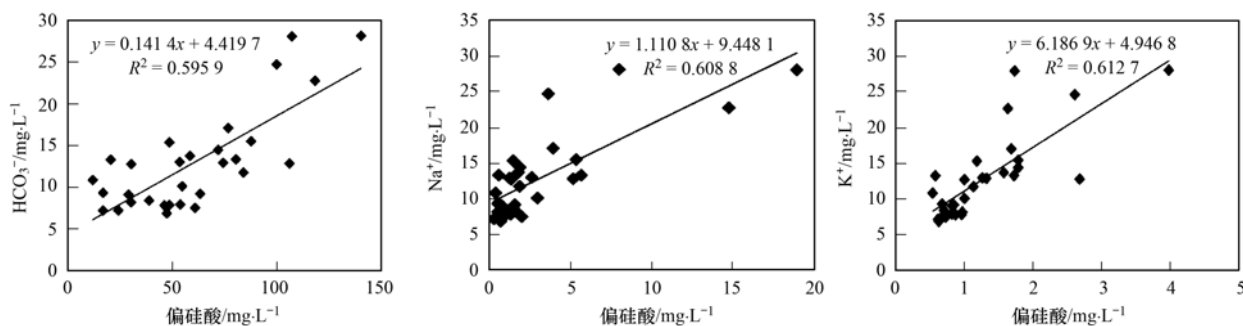
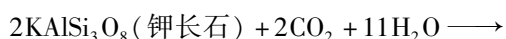


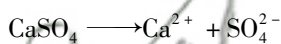
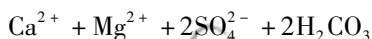
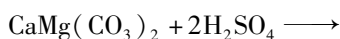
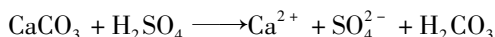
图11 $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+})$ 与 $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 关系图
Fig. 11 $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+})$ versus $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ concentrations in the samples

偏硅酸与 HCO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 都有显著的相关关系(图12),这说明尼洋河流域存在钠长石、钾长石等硅酸盐岩的风化,主要风化过程如下:

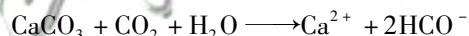


图 12 偏硅酸与 HCO_3^- 、 Na^+ 和 K^+ 相关关系图Fig. 12 H_2SiO_3 versus HCO_3^- , Na^+ , and K^+ concentrations in the samples

由于 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 有着较强的相关关系,相关系数分别为 0.591 和 0.679 ($P < 0.01$). 但尼洋河流域未见有石膏明显分布,说明石膏的溶解不是 SO_4^{2-} 的主要来源,这也从侧面说明 SO_4^{2-} 可能来自于碳酸盐岩的硫酸溶解. 反应过程如下:



Ca^{2+} 与 HCO_3^- 有着显著的相关关系(表 2),相关系数为 0.744 ($P < 0.01$),这说明二者有着共同的来源,结合该流域地质背景,该地有点状的碳酸盐岩分布,说明碳酸盐岩的风化溶解对 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 有一定的贡献,反应过程如下:



4 结论

(1) 尼洋河流域河水、井水及泉水阳离子均以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主,两者占阳离子总量的 84% 以上,阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,两者占阴离子总量的 97% 以上. TDS 在 79.11 ~ 290.48 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 165.21 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,矿化度较低; pH 介于 6.74 ~ 7.91 之间,平均值为 7.30,属于弱碱性水.

(2) 尼洋河流域河水、井水、泉水水化学类型皆以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ ($\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$)-Ca·Mg ($\text{Mg} \cdot \text{Ca}$) 型为主;尼洋河流域不同水体的离子特征主要受岩石风化作用控制,水化学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次之.

(3) Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 主要来源于钾长石、钠长石、钙长石、云母等硅酸盐岩的溶解;来自方解石、白云岩等碳酸盐岩风化及其硫酸溶解对

SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 贡献较大;人类活动对水化学的影响相对较小.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 罗进, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 赤水河中下游冬季河水化学空间分布特征分析[J]. 地球与环境, 2014, **42**(3): 297-305.
Luo J, An Y L, Wu Q X, et al. Spatial distribution of surface water chemical components in the middle and lower reaches of the Chishui River basin [J]. Earth and Environment, 2014, **42**(3): 297-305.
- [4] 孙平安, 于爽, 莫付珍, 等. 不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 123-131.
Sun P A, Yu S, Mo F Z, et al. Hydrochemical characteristics and influencing factors in different geological background: a case study in Darongjiang and Lingqu basin, Guangxi, China [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 123-131.
- [5] 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]. 生态学报, 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.
- [6] 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.
- [7] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [8] Gibbs R J. Water chemistry of the Amazon River [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1972, **36**(9): 1061-1066.

- [9] Sarin M M, Krishnaswami S. Major ion chemistry of the Ganga-Brahmaputra river systems, India [J]. *Nature*, 1984, **312** (5994): 538-541.
- [10] Galy A, France-Lanord C. Weathering processes in the Ganges-Brahmaputra basin and the riverine alkalinity budget [J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 31-60.
- [11] van der Weijden C H, Middelburg J J. Hydrogeochemistry of the river Rhine: long term and seasonal variability, elemental budgets, base levels and pollution [J]. *Water Research*, 1989, **23**(10): 1247-1266.
- [12] Négrel P, Allègre C J, Dupré B, *et al.* Erosion sources determined by inversion of major and trace element ratios and strontium isotopic ratios in river water: the Congo Basin case [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, **120**(1-2): 59-76.
- [13] Singh A K, Hasnain S I. Major ion chemistry and weathering control in a high altitude basin: Alaknanda River, Garhwal Himalaya, India [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1998, **43** (6): 825-844.
- [14] Roy S, Gaillardet J, Allègre C J. Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine River, France: anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, **63**(9): 1277-1292.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Zhang J, Huang W W, Létolle R, *et al.* Major element chemistry of the Huanghe (Yellow River), China-weathering processes and chemical fluxes [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, **168**(1-4): 173-203.
- [18] Singh S K, Kumar A, France-Lanord C. Sr and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in waters and sediments of the Brahmaputra river system: silicate weathering, CO_2 consumption and Sr flux [J]. *Chemical Geology*, 2006, **234**(3-4): 308-320.
- [19] Verma S, Mukherjee A, Choudhury R, *et al.* Brahmaputra river basin groundwater: Solute distribution, chemical evolution and arsenic occurrences in different geomorphic settings [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2015, **4**(Part A): 131-153.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 张娜, 李红敬, 文祯中, 等. 西藏尼洋河水水质时空特征分析 [J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2009, **37**(6): 79-82.
- Zhang N, Li H J, Wen Z Z, *et al.* Spatio-temporal characteristics of Niyang River in Tibet [J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science)*, 2009, **37**(6): 79-82.
- [26] 达瓦次仁, 巴桑赤烈, 白玛, 等. 尼洋河流域水文特性分析 [J]. *水文*, 2008, **28**(4): 92-94.
- Dawa C R, Basang C L, Bai M, *et al.* Analysis of hydrologic characteristics in the Nepali Yang River basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2008, **28**(4): 92-94.
- [27] 冉光辉, 旺杰, 旦增. 林芝地区降水的正态特征分析 [J]. *安徽农业科学*, 2013, **41**(14): 6403-6405.
- Ran G H, Wang J, Dan Z. Analysis of the normal distribution of precipitation in Linzhi District [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, **41**(14): 6403-6405.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 刘丛强, 蒋颖魁, 陶发祥, 等. 西南喀斯特流域碳酸盐岩的硫酸侵蚀与碳循环 [J]. *地球化学*, 2008, **37**(4): 404-414.
- Liu C Q, Jiang Y K, Tao F X, *et al.* Chemical weathering of carbonate rocks by sulfuric acid and the carbon cycling in Southwest China [J]. *Geochimica*, 2008, **37**(4): 404-414.
- [31] 王君波, 朱立平, 鞠建廷, 等. 西藏纳木错东部湖水及入湖河流水化学特征初步研究 [J]. *地理科学*, 2009, **29**(2): 288-293.
- Wang J B, Zhu L P, Ju J T, *et al.* Water chemistry of eastern Nam Lake area and inflowing rivers in Tibet [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, **29**(2): 288-293.
- [32] 周俊, 吴艳宏. 贡嘎山海螺沟水化学主离子特征及其控制因素 [J]. *山地学报*, 2012, **30**(3): 378-384.
- Zhou J, Wu Y H. Major ion chemistry of waters in Hailuoguo catchment and the possible controls [J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, **30**(3): 378-384.
- [33] 王鹏, 尚英男, 沈立成, 等. 青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 874-881.
- Wang P, Shang Y N, Shen L C, *et al.* Characteristics and evolution of hydrochemical compositions of freshwater lake in Tibetan Plateau [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 874-881.
- [34] 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.
- [35] 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.

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physiochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)