

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                                             |                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 长江三角洲 PM <sub>2.5</sub> 质量浓度遥感估算与时空分布特征 .....                                               | 徐建辉, 江洪 (3119)                                              |
| 宁波市 PM <sub>2.5</sub> 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 .....                                             | 杜博涵, 黄晓峰, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)        |
| 青岛大气中酸碱气体及 PM <sub>2.5</sub> 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系 .....                                       | 周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)                              |
| 北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征 .....                                                             | 胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)         |
| 2015 年春节北京市空气质量分析 .....                                                                     | 程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)             |
| 上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系 .....                                                                | 王红丽 (3159)                                                  |
| 生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究 .....                                                                     | 陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)                             |
| 一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型 .....                                                          | 郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)                       |
| 巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 .....                                                                  | 叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)                           |
| 河北洺河溶解性有机物光谱学特性 .....                                                                       | 虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)            |
| 东山岛地下水“三氮”空间分布特征 .....                                                                      | 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)                     |
| 重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化 .....                                                        | 梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)                  |
| 硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 δ <sup>13</sup> C <sub>DIC</sub> 的影响 .....                                  | 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)                              |
| 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析 .....                                                                     | 张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)                                      |
| 东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动 .....                                                              | 陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)                                    |
| 水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响 .....                                                         | 胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)                                     |
| 溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟 .....                                                                | 杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)                           |
| 坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果 .....                                                        | 李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)                                    |
| 典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估 .....                                                                  | 李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)                                    |
| 南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比 .....                                                       | 张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)                           |
| 臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响 .....                                                                     | 刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)                               |
| 含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响 .....                                                                  | 吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)                                    |
| 厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究 .....                                                                  | 王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)                                |
| 印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究 .....                                                            | 申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)                     |
| 螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征 .....                                                            | 覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)                                    |
| 两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究 .....                                                                   | 税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)                               |
| 农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析 .....                                                                  | 孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)                  |
| 四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 .....                                                              | 张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)                   |
| 从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 .....                                                               | 刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)                                    |
| 提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响 .....                                                               | 刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)                          |
| 常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例 .....                                                | 桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)                                    |
| 水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 .....                                                                | 傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)                                |
| 厌氧条件下砂壤水稻土 N <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> O、NO、CO <sub>2</sub> 和 CH <sub>4</sub> 排放特征 ..... | 曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373) |
| 黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 .....                                                               | 陈盖, 许明祥, 张亚峰, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)                          |
| 生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 .....                                                                | 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)                              |
| 宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 .....                                                               | 倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)                            |
| 石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究 .....                                                         | 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)                |
| 江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例 .....                                                            | 王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)                     |
| 缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征 .....                                                           | 李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)                                         |
| 西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应 .....                                                             | 聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)                   |
| 电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价 .....                                                             | 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)                               |
| 典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性 .....                                                                 | 刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)                           |
| 紫色土对硫丹的吸附与解吸特征 .....                                                                        | 赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)                      |
| 紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响 .....                                                            | 焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)                              |
| 4 株外生菌根真菌对 Al <sup>3+</sup> 吸收与吸附的研究 .....                                                  | 王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)                                    |
| 长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价 .....                                                                 | 于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)                                 |
| 北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律 .....                                                           | 宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)                                |
| 城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响 .....                                                            | 吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)                               |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -WO <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英 .....     | 任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)                               |
| 基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析 .....                                                                 | 林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)                                     |
| 我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨 .....                                                                    | 江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)                        |
| 异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响 .....                                                               | 司友斌, 王娟 (3533)                                              |
| 《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)                             |                                                             |

# 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析

张艳<sup>1,2</sup>, 吴勇<sup>1,2\*</sup>, 杨军<sup>1,2</sup>, 孙厚云<sup>1,2</sup>

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059; 2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059)

**摘要:** 阆中市思依镇地区的水体主离子特征受该地区地质条件、地形地貌以及水文气象条件等因素影响, 分析该地区的水化学离子特征对掌握地下水类型、成因以及水质情况具有重要作用. 运用统计学、Piper 三线图、Gibbs 图、相关性分析、主离子比例关系和平衡分析等方法对阆中市思依镇河水和地下水水样中的主离子测试结果进行分析, 表明河水和地下水水体阳离子中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  占主要优势, 阴离子中  $\text{HCO}_3^-$  占主要优势, 水化学类型主要有  $\text{HCO}_3^-$ -Ca 型、 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ -Ca 型和  $\text{HCO}_3^-$ -Ca + Mg 型. 水体离子主要受岩石风化作用过程中溶滤作用影响, 并以方解石和白云石的溶解为主.

**关键词:** 阆中市; 地下水; 水化学; 主离子; 化学成因

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3230-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.014

## Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City

ZHANG Yan<sup>1,2</sup>, WU Yong<sup>1,2\*</sup>, YANG Jun<sup>1,2</sup>, SUN Hou-yun<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The characteristics of main ions in Siyi Town, Langzhong City was influenced by geological conditions, topography and hydrological and meteorological conditions and other factors. Here we analyzed the groundwater ions characteristics which will play an important role in mastering the groundwater types, chemical origin and water quality in this area. The testing data of main ions in river water and groundwater in this area were analyzed with statistics, Piper diagram, Gibbs figure, and correlation analysis, proportional relationship of main ions and equilibrium analysis method analysis. The results showed that  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$ , and  $\text{HCO}_3^-$  dominant among cations and anions, respectively, and the hydrogeochemical types can be classified into  $\text{HCO}_3^-$ -Ca type,  $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ -Ca type and  $\text{HCO}_3^-$ -Ca + Mg type. Main ions of all water are mainly affected by leaching effect in rock weathering process, which are dominantly dissolved from dolomite and calcite.

**Key words:** Langzhong City; groundwater; hydrochemistry; main ions; chemical origin

地下水的化学成分是水在循环过程中不断与周围环境(大气、地表水、岩石)长期相互作用的结果<sup>[1,2]</sup>. 地下水中的化学组分是地下水演化的直接结果,可以帮助分析地下水的演变规律<sup>[3~5]</sup>. 研究一个地区水体主离子特征,能够有效分析确定该区水化学演化的控制因素,以及该区的水文地质及水文地球化学发展历史. 影响一个地区的地下水的水化学特征有众多因素,如气候、大气降雨、水文条件、地质条件和人为因素等,其中起主导因素的是地质因素. 朱秉启等<sup>[6]</sup>对塔克拉玛干沙漠南部地区的河流以及沙区地下水进行分析,得出河水中溶解物主要受岩石风化作用和蒸发结晶作用共同控制. 蒲焘等<sup>[7]</sup>对丽江盆地地表水和地下水的水化学成分进行分析,得出水体无机离子主要来源于碳酸盐的风化溶解,且其离子浓度受海拔影响较大,同时,降雨对水体离子成分也有一定影响. 王鹏等<sup>[8]</sup>通过分析青藏高原地区淡水湖泊的水化学离子,得出该

区域水体的离子主要受硅酸盐岩的风化作用控制. 王晓曦等<sup>[9]</sup>通过对滦河流域地下水以及河水进行研究,得出该地区地下水化学类型主要受溶滤作用控制,随着向下游含水介质颗粒变细,地下水径流变弱,蒸发作用、阳离子交替吸附作用逐渐增强,并最终代替溶滤作用.

思依镇地区的居民主要以浅表层地下水作为饮用水水源,由于地处农业区,地下水或多或少受到农业污染的影响. 这一地区的水文地球化学特征还未有相关研究,本文利用水文地球化学基础理论与方法对思依镇地区浅层地下水以及河水水化学特征及其成因进行分析,以期为进一步研究该地区地下水

收稿日期: 2015-01-28; 修订日期: 2015-04-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40730634); 四川省科技支撑计划项目(2011SZ0172)

作者简介: 张艳(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境水文地质, E-mail: yanflyqi@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: ywu@cdut.edu.cn

水化学成分的影响、水质评价和是否需要重建水源  
地提供基础信息。

## 1 研究区概况

研究区位于四川省阆中市思依镇的西边,距离  
阆中市约 35 km(图 1)。研究区属亚热带湿润季风  
气候,气候温和。研究区年际年内降雨量分配不均,  
降雨主要集中在 6~10 月,年均降雨量 1 042.5 mm,  
年均蒸发量 998.3 mm,平均相对湿度 76。研究区的  
主要河流桃花河、温家河大致呈南北走向,流经西  
河,最终注入嘉陵江。

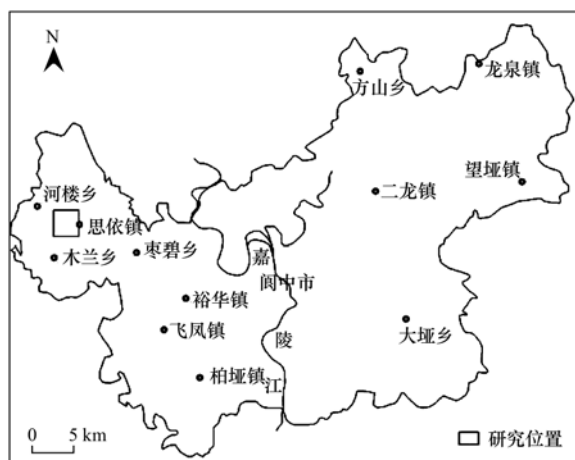


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

研究区属低山丘陵区,地形大致呈“U”形分  
布——即东、西、南三方向山体顶部到坡脚相对  
高差均在 100 m 以上,中部和北部地势较低,利于研  
究区的水体的汇集。研究区最高地为西南部尖山子  
和东部棋盘山,其海拔均高于 700 m。

研究区地下水分属第四系孔隙水、红层砂-泥  
岩风化带孔隙水和砂岩-泥岩层间裂隙水。第四系  
孔隙水主要分布在研究区山体顶部、缓坡及各冲沟  
的第四系松散层覆盖物中;红层砂-泥岩风化带孔  
隙水主要分布在研究区山体砂岩、泥岩裸露风化带  
地区;红层砂-泥岩层间裂隙水是研究区地下水主  
要赋存形式,研究区含水层、隔水层相间存在,层间  
裂隙发育,为形成层间裂隙水提供有利条件,层间裂  
隙水以泉的形式出露地表。研究区地下水主要接受  
大气降雨补给,径流途径短,地下水水量呈现出季节  
性特点。

研究区地下水-地表水水力联系,表现在地下水  
通过径流排泄于地表、地表水渗流补给地下水以及  
地下水和河水之间的动态关系。洪水期,部分降雨

经地表径流汇集河流,河水水位高于地下水位,河水  
补给地下水;枯水期,降雨补给较少,地下水水位高  
于河流水位,地下水补给河水。

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集与测试

2013 年 12 月,在阆中市思依镇进行河水和地  
下水水样采集,共采样 53 组,其中河水水样 6 组,浅  
层地下水 47 组。河水水样取自桃花河上中下游,地  
下水水样主要分布在研究区水系区域。取样工作由  
四川省核工业地质局二八二大队完成,采样时,在地  
形图上标出相应采样点的位置,河水水样编号 H1~  
H6,地下水水样编号为 1~47,采样点分布情况如图  
2 所示。

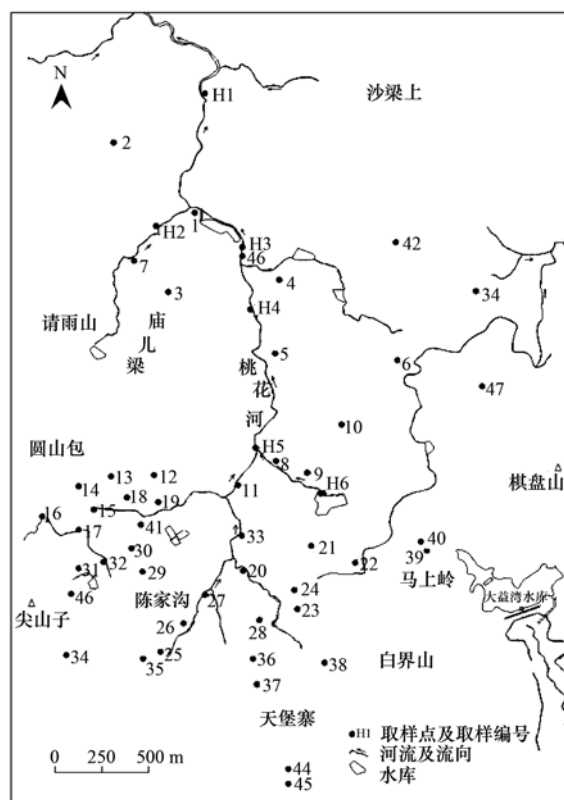


图 2 采样点分布示意

Fig. 2 Distribution map of the water samples

样品水化学分析在四川省核工业辐射测试防护  
院进行。 $K^+$ 、 $Na^+$  采用原子吸收分光光度法测定;  
 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  采用 EDTA 滴定法测定; $Cl^-$  采用硝酸  
盐滴定法; $SO_4^{2-}$  采用 EDTA-Ba 滴定法; $HCO_3^-$  采  
用盐酸滴定法。

### 2.2 数据分析方法

数据的统计处理及部分分析用 Microsoft Office  
中的 Excel 电子表格软件完成,利用阴阳离子平衡

法检查样品数据的可靠性,并取电荷平衡误差  $E < \pm 5\%$  的水样数据为可靠数据。由计算结果显示,所有水样数据均为可靠。为了解研究区水化学特征及类型,绘制了 Piper 三线图,并对水化学参数进行 Spearman 相关性分析;为进一步研究该区水化学成因作了 Gibbs 图、离子比例相关性系数图,并进行水化学平衡分析。

### 3 结果与讨论

分别对河水和地下水水样数据各个指标做数理统计分析,由统计结果表 1 可知,研究区河水水样 pH 值的范围在 8.16 ~ 8.58,地下水水样 pH 值的范围在 7.47 ~ 8.52,整体上呈碱性。河水水样中 TDS 值在 183.73 ~ 415.13  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,地下水水样中 TDS 值的范围在 271.53 ~ 645.47  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,河水和地下水 TDS 的平均值均高于 300  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,比一般大气降

水的矿化度 (20 ~ 50  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 高,属于淡水。

河水和地下水水体中阳离子各组分含量整体为:  $\text{Ca}^{2+} \gg \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ \gg \text{K}^+$ ,阴离子浓度表现为:  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ 。地下水阳离子平均值中,  $\text{Ca}^{2+}$  含量占主要优势,是  $\text{Mg}^{2+}$  的 7.54 倍,是  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  的 7.14 倍;阴离子平均值中  $\text{HCO}_3^-$  占优势,分别为  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  的 4.71 倍和 13.13 倍。河水水样阳离子平均值中,  $\text{Ca}^{2+}$  含量也占主要优势,分别是  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  的 5.84 倍和 5.75 倍;阴离子平均值中  $\text{HCO}_3^-$  占优势,分别是  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  的 4.43 倍和 11.83 倍。

硬度 ( $\text{CaCO}_3$  的当量) 以钙镁的毫克当量总数乘以 50 计算,地下水水样中硬度的范围在 120 ~ 272  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,平均值为 201  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水的硬度类型划分:中软水为 75 ~ 150  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,微硬水为 150 ~ 300  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,地下水水样硬度超过 150  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的水样占 93.6%,所以该区的地下水的硬度类型为微硬水。

表 1 水化学参数统计<sup>1)</sup>

Table 1 Statistics of hydrochemical parameters of groundwater and river water

| 分类  | 项目   | pH   | TDS    | $\text{K}^+$ | $\text{Na}^+$ | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{HCO}_3^-$ |
|-----|------|------|--------|--------------|---------------|------------------|------------------|---------------|--------------------|------------------|
| 地下水 | Min  | 7.47 | 271.53 | 0.26         | 4.70          | 65.74            | 6.66             | 1.59          | 7.70               | 108.87           |
|     | Max  | 8.52 | 645.47 | 14.2         | 69.60         | 193.72           | 26.00            | 85.50         | 172.90             | 580.14           |
|     | Mean | 8.16 | 468.1  | 1.37         | 17.03         | 131.48           | 17.43            | 29.05         | 81.00              | 381.51           |
|     | Std. | 0.27 | 88.31  | 2.49         | 12.43         | 29.05            | 4.12             | 19.59         | 42.26              | 87.32            |
|     | Cv   | 0.03 | 0.18   | 1.36         | 0.61          | 0.21             | 0.22             | 0.63          | 0.50               | 0.21             |
| 河水  | Min  | 8.16 | 183.73 | 1.13         | 5.20          | 49.47            | 6.02             | 9.33          | 3.90               | 109.12           |
|     | Max  | 8.58 | 415.13 | 4.67         | 14.40         | 121.88           | 17.86            | 29.00         | 151.00             | 388.58           |
|     | Mean | 8.33 | 300.28 | 2.20         | 11.57         | 79.19            | 13.56            | 20.21         | 53.95              | 239.19           |
|     | Std. | 0.08 | 60.26  | 0.48         | 2.37          | 16.24            | 4.11             | 6.17          | 8.65               | 62.12            |
|     | Cv   | 0.01 | 0.21   | 0.22         | 0.20          | 0.21             | 0.31             | 0.28          | 0.19               | 0.26             |

1) Min 表示最小值; Max 表示最大值; Mean 表示均值; Std 表示标准偏差; Cv 表示变异系数; pH 无量纲,其余单位为  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

#### 3.1 水化学特征

##### 3.1.1 水化学类型及其分布特征

研究区地下水水化学类型,按舒卡列夫分类方法,研究区地下水水化学类型整体上分为  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca} + \text{Mg}$  型和  $\text{HCO}_3 + \text{SO}_4\text{-Ca}$  型。  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型广布研究区西部、北部、东北部以及南部天堡寨至白界山一带;  $\text{HCO}_3\text{-Ca} + \text{Mg}$  型分布在中东部至东南部绕棋盘山一带;  $\text{HCO}_3 + \text{SO}_4\text{-Ca}$  型分布在西南尖山子省道公路陈家沟一带。

利用 Piper 三角图可以表明水体的主离子组成变化,体现水体化学特征。Piper 三线图以主要阳离子和阴离子的每毫升当量的百分数来表示<sup>[10]</sup>。根据研究区河水和地下水水化学数据,将河水和地下水水样绘制在 Piper 三线图中,如图 3。

由图 3 可以看出,河水水样中阳离子主要分布

在  $\text{Ca}^{2+}$  端,阴离子靠近于  $\text{HCO}_3^-$  端,分布较为集中。地下水水样中阳离子也主要分布在  $\text{Ca}^{2+}$  端,阴离子主要靠近于  $\text{HCO}_3^-$  端,但分布较为分散,部分分布在  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4^{2-}$  线上,偏向  $\text{HCO}_3^-$  端。该地区地层中常见矿物有白云石、方解石等碳酸盐矿物分布,由此初步推测该区浅层地下水化学组分受碳酸盐溶滤作用控制。

##### 3.1.2 水化学相关性分析

利用相关性分析,可以推测出水体各离子之间是否为相同来源。研究区地下水-地表水水力联系紧密,将地下水和地表水水样合在一起进行相关性分析。对所有水样的水化学参数进行 Spearson 相关系数计算,其计算结果如表 2。从中可知,  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{K}^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$  与  $\text{HCO}_3^-$  相关性显著。  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、

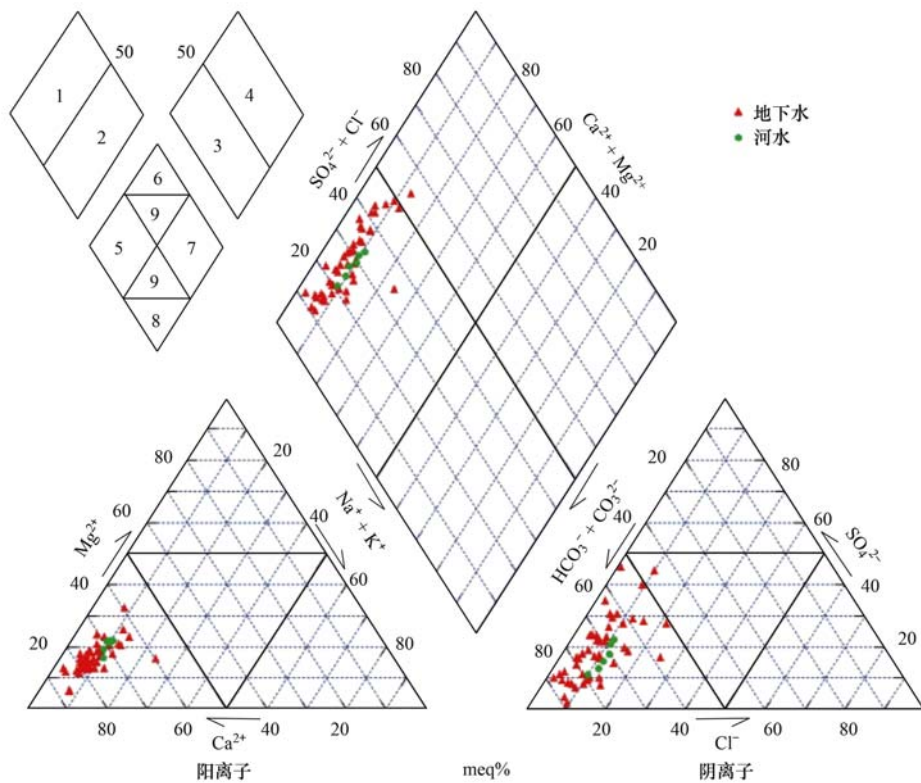


图3 水化学 Piper 图

Fig. 3 Piper diagram of hydrochemical of groundwater and river water

$\text{Mg}^{2+}$  与 TDS 相关性显著,其中  $\text{Ca}^{2+}$  与 TDS 相关性系数达到 0.9。此外,还有  $\text{Na}^{+}$  与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^{+}$  与  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Na}^{+}$  相关性较好。由于研究区地层中矿物以方解石和白云石等矿物分布为主,据此,可以推测水体的主要离子是由该地区的方解石、白云石等碳酸盐经过风化溶解而来。

表 2 水化学参数相关系数矩阵<sup>1)</sup>

| Table 2 Correlation matrices of hydrochemical parameters |                |                 |                  |                  |                    |                 |                    |         |
|----------------------------------------------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|--------------------|-----------------|--------------------|---------|
|                                                          | $\text{K}^{+}$ | $\text{Na}^{+}$ | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{HCO}_3^{-}$ | $\text{Cl}^{-}$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | TDS     |
| $\text{K}^{+}$                                           | 1.000 0        |                 |                  |                  |                    |                 |                    |         |
| $\text{Na}^{+}$                                          | 0.070 2        | 1.000 0         |                  |                  |                    |                 |                    |         |
| $\text{Ca}^{2+}$                                         | -0.500 5 **    | 0.388 0 **      | 1.000 0          |                  |                    |                 |                    |         |
| $\text{Mg}^{2+}$                                         | -0.070 5       | 0.351 5 **      | -0.027 0         | 1.000 0          |                    |                 |                    |         |
| $\text{HCO}_3^{-}$                                       | 0.047 5        | 0.605 5 **      | 0.406 6 **       | 0.224 4          | 1.000 0            |                 |                    |         |
| $\text{Cl}^{-}$                                          | -0.066 3       | 0.134 5         | 0.246 3          | 0.282 6 *        | 0.088 6            | 1.000 0         |                    |         |
| $\text{SO}_4^{2-}$                                       | -0.404 5 **    | 0.376 2 **      | 0.745 0 **       | 0.063 5          | 0.197 9            | -0.269 6        | 1.000 0            |         |
| TDS                                                      | -0.371 5 **    | 0.567 1 **      | 0.926 7 **       | 0.622 11 **      | 0.514 8 **         | 0.437 1 **      | 0.650 9 **         | 1.000 0 |

1) \* 和 \*\* 分别代表 0.05 和 0.01 显著水平

3.2 水化学成因分析

3.2.1 水化学类型形成作用讨论

将水样绘制在 Gibbs 图中,可以反映出研究区水化学类型的形成作用。Gibbs 根据世界河流、湖泊及主要海洋水分析,认为离子起源的自然控制因素分为岩石风化型、大气降雨控制型和蒸发-浓缩型<sup>[11]</sup>。Gibbs 模型是分别以  $\text{Na}^{+}/(\text{Na}^{+} + \text{Ca}^{2+})$  和  $\text{Cl}^{-}/(\text{Cl}^{-} + \text{HCO}_3^{-})$  为 X 轴,TDS 含量的对数为 Y 轴的两关系图。根据 Gibbs 图(图 4)的分布原

理可以知道,在图的右下角,即  $\text{Na}^{+}/(\text{Na}^{+} + \text{Ca}^{2+})$  比值或  $\text{Cl}^{-}/(\text{Cl}^{-} + \text{HCO}_3^{-})$  比值大于 0.5 且 TDS 含量较低时,反映该区域受大气降水影响明显;在图的中间靠左的位置,即  $\text{Na}^{+}/(\text{Na}^{+} + \text{Ca}^{2+})$  比值或  $\text{Cl}^{-}/(\text{Cl}^{-} + \text{HCO}_3^{-})$  比值小于 0.5 且 TDS 含量中等时,反映该区域受岩石组分对水体影响明显;在图的右上方,即  $\text{Na}^{+}/(\text{Na}^{+} + \text{Ca}^{2+})$  比值或  $\text{Cl}^{-}/(\text{Cl}^{-} + \text{HCO}_3^{-})$  比值较高(接近 1),且 TDS 含量较高时,反映出该区域水体特征受蒸发

结晶作用影响.

将研究区地下水和河水水样数据绘于 Gibbs 模型中,如图 4 所示. 由计算结果知道,TDS 含量对数在  $100 \sim 1\,000$ ,  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  的比值整体小于 0.3,  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  的比值整体小于 0.3. 研究

区所有水样落在 Gibbs 模型范围内,且主要分布在 Gibbs 模型的左端,且该地区年均降雨量与年均蒸发量基本保持平衡,由此可知研究区水化学类型主要受岩石风化作用控制,蒸发和沉淀作用微弱且远离大气降雨.

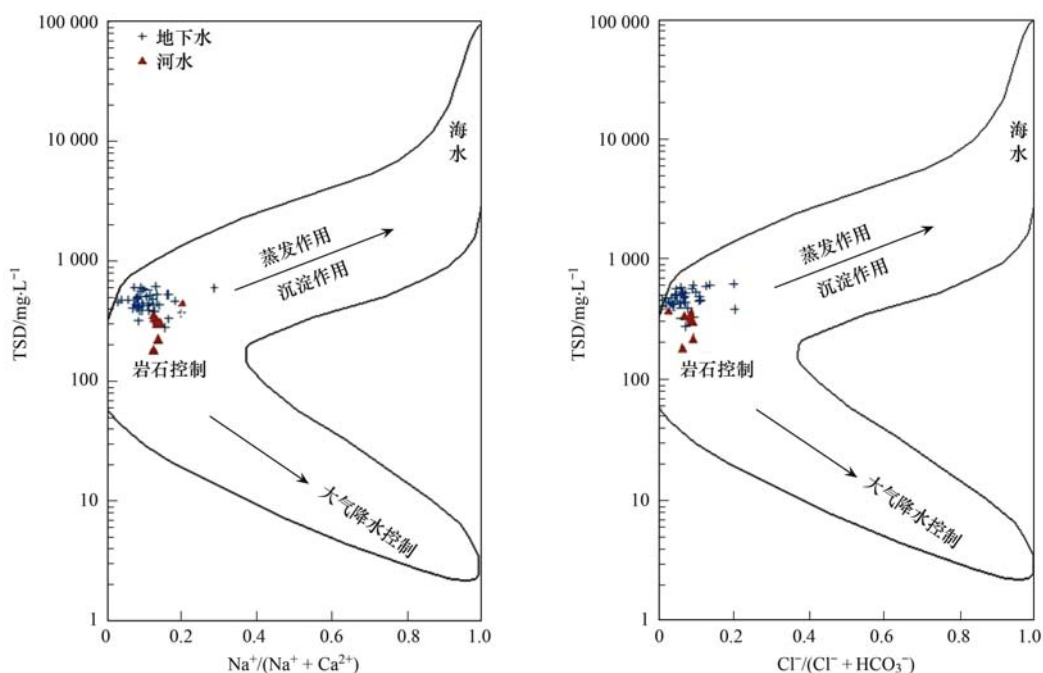


图 4 研究区水化学 Gibbs 分布图

Fig. 4 Plot of the major ions within the Gibbs' model for water in study area

研究区存在的溶滤作用还可以用离子之间的比值关系来反映.  $\text{Cl}^-$  与 TDS 的比值如图 5(a) 所示,河水中  $\text{Cl}^- / \text{TDS}$  随 TDS 增长不变,地下水中  $\text{Cl}^- / \text{TDS}$  随 TDS 变化主要表现在 TDS 增加,  $\text{Cl}^- / \text{TDS}$  值不变或者  $\text{Cl}^- / \text{TDS}$  值增加缓慢,表明地下水存在岩盐溶解,受蒸发作用影响较小. 如图 5(b) 所示,由  $(\text{K}^+ + \text{Na}^+) / \text{Cl}^-$  的比值关系图可以看出,地下水大多数点位于  $(\text{K}^+ + \text{Na}^+) / \text{Cl}^- = 1$  的附近,部分点分布在  $(\text{K}^+ + \text{Na}^+) / \text{Cl}^- = 1$  两边,表明该地区在发生岩盐溶解的同时还发生着铝硅酸盐矿物等的溶解<sup>[9]</sup>. 研究区水中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  主要来自含钙和镁的碳酸盐或铝硅酸盐的溶解,通过  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$  的当量浓度与  $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$  当量浓度的比值关系,可推断其来源<sup>[9,12,13]</sup>,如图 5(c) 所示,河水和地下水水样点主要位于  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) = 1$  的附近,表明该地区同时存在碳酸盐和铝硅酸盐矿物的溶解.  $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$  与  $\text{HCO}_3^-$  的关系图如图 5(d) 所示,河水水样点绝大多数位于  $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-) / \text{HCO}_3^- = 1$  线以下,且偏离较远,极少部分点位于该线的上方,暗示

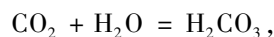
碳酸盐岩为主要来源,蒸发盐岩的溶解微弱. 该地区地下水样中  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / (\text{K}^+ + \text{Na}^+)$  的平均值为 12.8,是世界平均值(2.2)的 5.8 倍,研究区河水水样中  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / (\text{K}^+ + \text{Na}^+)$  的平均值为 8.8,典型的以碳酸盐岩风化为主的印度河流域  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / (\text{K}^+ + \text{Na}^+)$  为 6.0<sup>[9,14,15]</sup>,因此,研究区地下水和河水  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$  与  $(\text{K}^+ + \text{Na}^+)$  的比值均高于印度河流域的比值.

综上所述,阆中市思依镇水化学类型形成的主要作用是碳酸盐和铝硅酸盐矿物溶解作用,且碳酸盐的溶解作用明显,该地区属于碳酸盐岩地区.

### 3.2.2 水化学平衡分析

#### (1) $\text{CO}_2$ 分压

研究区属于碳酸盐岩地区,地下水化学类型主要受方解石和白云石两种矿物控制,系统中的  $\text{CO}_2$  控制了这个两种矿物的溶解和沉淀. 该系统中的碳酸平衡反应:



$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = K_{\text{H}} \times p\text{CO}_2 \quad (K_{\text{H}} \text{ 为 Henry 常数})$$

(1)

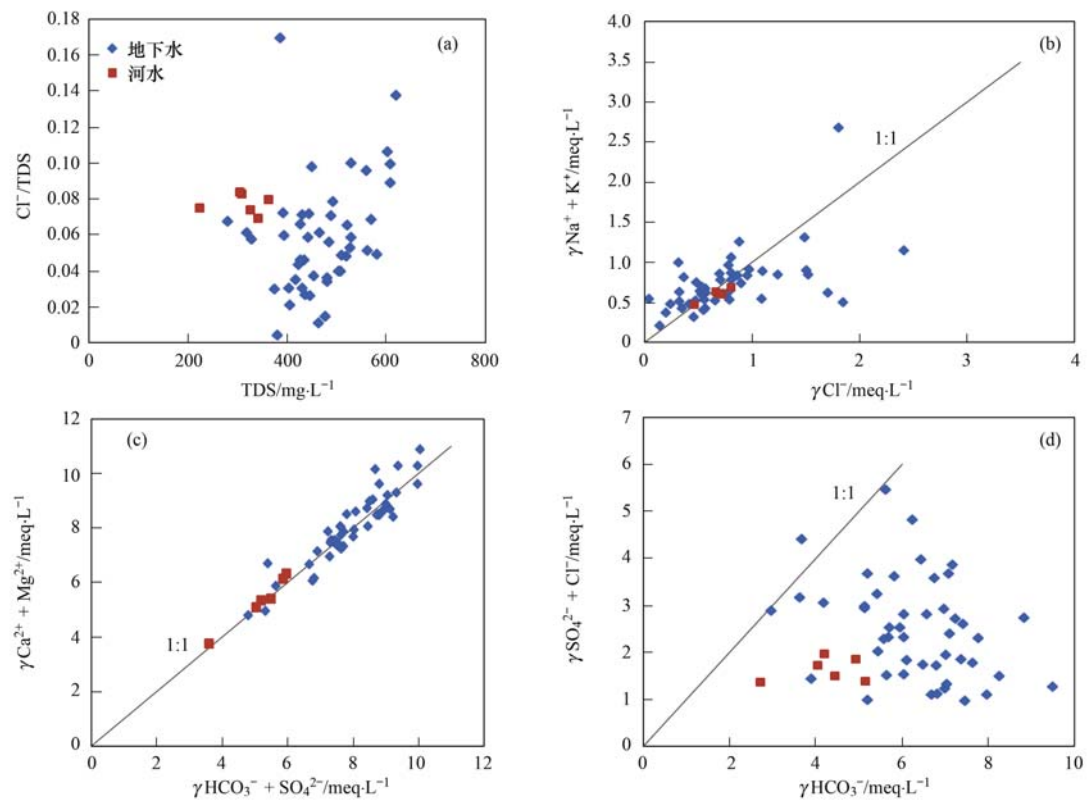


图5 研究区水化学主离子比例关系图

Fig. 5 Relationship between the rate of the selected ions of water samples in study area

$$\text{H}_2\text{CO}_3 = \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-, \quad K_1 = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]},$$
$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[K_1]} \quad (2)$$
$$\text{HCO}_3^- = \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}, \quad K_2 = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]},$$
$$[\text{HCO}_3^-] = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[K_2]} \quad (3)$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = \frac{K_3}{[\text{Ca}^{2+}]} \quad (4)$$

整理所有式子,有:

$$p\text{CO}_2 = \frac{K_2 \times [\text{Ca}^{2+}][\text{HCO}_3^-]^2}{K_{\text{H}} \times K_1 \times K_3} \quad (5)$$

Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>以mol·L<sup>-1</sup>代入公式(5),求出研究区地下水各个水样CO<sub>2</sub>分压,其结果统计如表3所示. 大气中的pCO<sub>2</sub>为10<sup>-3.5</sup>×100 kPa,表3中pCO<sub>2</sub>在(10<sup>-1</sup>~10<sup>-2</sup>)×100 kPa之间,均高于大气中的pCO<sub>2</sub>值,地下水系统属于开系统.

表3 地下水pCO<sub>2</sub>分压计算结果<sup>1)</sup>×100/kPa

| Table 3 Calculation results of pCO <sub>2</sub> of groundwater ×100/kPa |                     |    |                     |    |                     |    |                     |    |                     |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------|----|---------------------|----|---------------------|----|---------------------|----|---------------------|
| 编号                                                                      | pCO <sub>2</sub> 分压 | 编号 | pCO <sub>2</sub> 分压 | 编号 | pCO <sub>2</sub> 分压 | 编号 | pCO <sub>2</sub> 分压 | 编号 | pCO <sub>2</sub> 分压 |
| 1                                                                       | 0.128               | 11 | 0.280               | 21 | 0.082               | 31 | 0.069               | 41 | 0.066               |
| 2                                                                       | 0.082               | 12 | 0.085               | 22 | 0.126               | 32 | 0.183               | 42 | 0.085               |
| 3                                                                       | 0.179               | 13 | 0.097               | 23 | 0.146               | 33 | 0.140               | 43 | 0.012               |
| 4                                                                       | 0.107               | 14 | 0.079               | 24 | 0.036               | 34 | 0.109               | 44 | 0.138               |
| 5                                                                       | 0.087               | 15 | 0.147               | 25 | 0.053               | 35 | 0.069               | 45 | 0.134               |
| 6                                                                       | 0.099               | 16 | 0.158               | 26 | 0.119               | 36 | 0.067               | 46 | 0.019               |
| 7                                                                       | 0.137               | 17 | 0.206               | 27 | 0.121               | 37 | 0.075               | 47 | 0.026               |
| 8                                                                       | 0.127               | 18 | 0.060               | 28 | 0.143               | 38 | 0.124               |    |                     |
| 9                                                                       | 0.338               | 19 | 0.114               | 29 | 0.146               | 39 | 0.055               |    |                     |
| 10                                                                      | 0.111               | 20 | 0.102               | 30 | 0.052               | 40 | 0.020               |    |                     |

1) lg K<sub>H</sub> = -1.466<sup>[16,17]</sup>, lg K<sub>1</sub> = -6.351<sup>[16,17]</sup>, lg K<sub>2</sub> = -10.33<sup>[16,18]</sup>, lg K<sub>3</sub> = -8.475<sup>[16,19]</sup>

(2)水化学碳酸平衡

水体离子之间以配位键的方式结合在一起的复杂缔合物称之为络合物,并影响水体的溶解组分<sup>[16,20,21]</sup>,因此,在计算地下水中溶解方解石和白云石的饱和指数时,需要考虑地下水中络合物.随着文献[22~24]对水体中络合物深入的研究,在饱和指数计算模型中,是否考虑络合物的存在对饱和指数的计算影响较大.

地下水中常量组分的主要离子对有以下 10 种:  $\text{CaSO}_4^0$ 、 $\text{MgSO}_4^0$ 、 $\text{NaSO}_4^-$ 、 $\text{KSO}_4^-$ 、 $\text{CaHCO}_3^+$ 、 $\text{MgHCO}_3^+$ 、 $\text{NaHCO}_3^0$ 、 $\text{CaCO}_3^0$ 、 $\text{MgCO}_3^0$  和  $\text{NaCO}_3^-$ . 根据饱和指数计算公式  $\text{SI} = \text{IAP}/K$ ,利用 Excel 先求得离子强度以及活度系数,然后计算各络合物的含量,将剩下的游离离子再次代入以上计算,进行迭代.由于以  $m\text{SO}_4^{2-}$  前后两次计算值之差小于  $0.0001 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  来控制计算的迭代次数的稳定性差<sup>[25]</sup>,以离子强度  $I$  的前后计算差值比  $m\text{SO}_4^{2-}$  更具稳定性,

本次采取离子强度  $I$  前后计算误差区间  $\varepsilon$  为  $0.01 \sim 0.02$ ,取第 3 次迭代计算结果,如表 4.

由表 4 可知,研究区的地下水水样中方解石饱和指数大部分大于 1,部分白云石饱和指数大于 1,处于饱和状态,而 1、2、5、6、11、46 和 47 号水样中方解石的饱和指数小于 1,表明水样中方解石处于非饱和状态.其中 46 和 47 方解石的饱和指数较小,处于非饱和状态的主要原因是,该两处的岩石风化程度可能偏低,所受溶滤作用较弱,因此水中溶解的方解石较少.1、2、5 和 6 属于排泄区,地下水以泉的形式出露地表,溶解于水中的  $\text{CO}_2$  逸出, $p\text{CO}_2$  分压减小,部分络合物沉淀使得这些水体中离子含量减少,因此,饱和指数有所降低.河水水样中 H1~H3 方解石溶解饱和,H1 的白云石溶解饱和.且由数据可知,河水中方解石和白云石饱和指数随河流上中下游的变化呈递增变化.

表 4 方解石和白云石饱和指数计算结果<sup>1)</sup>

Table 4 Saturation index of calcite and dolomite

| 编号 | SI <sub>C</sub> | SI <sub>D</sub> | 编号 | SI <sub>C</sub> | SI <sub>D</sub> | 编号 | SI <sub>C</sub> | SI <sub>D</sub> | 编号 | SI <sub>C</sub> | SI <sub>D</sub> |
|----|-----------------|-----------------|----|-----------------|-----------------|----|-----------------|-----------------|----|-----------------|-----------------|
| 1  | 0.32            | 0.04            | 15 | 1.77            | 0.74            | 29 | 2.51            | 1.14            | 43 | 1.25            | 0.66            |
| 2  | 0.77            | 0.20            | 16 | 2.18            | 1.42            | 30 | 1.81            | 1.06            | 44 | 2.85            | 2.53            |
| 3  | 1.17            | 0.33            | 17 | 2.44            | 1.25            | 31 | 1.57            | 0.73            | 45 | 2.93            | 2.08            |
| 4  | 1.13            | 0.43            | 18 | 1.97            | 1.33            | 32 | 1.26            | 0.33            | 46 | 0.31            | 0.07            |
| 5  | 0.30            | 0.03            | 19 | 1.55            | 0.83            | 33 | 4.02            | 4.60            | 47 | 0.22            | 0.02            |
| 6  | 0.66            | 0.10            | 20 | 1.61            | 0.71            | 34 | 1.82            | 0.88            | H1 | 1.61            | 1.08            |
| 7  | 1.39            | 0.67            | 21 | 1.26            | 0.66            | 35 | 1.43            | 0.60            | H2 | 1.26            | 0.68            |
| 8  | 1.38            | 0.18            | 22 | 1.12            | 0.40            | 36 | 2.78            | 2.79            | H3 | 1.10            | 0.45            |
| 9  | 1.19            | 0.03            | 23 | 1.23            | 0.44            | 37 | 2.59            | 1.42            | H4 | 0.96            | 0.40            |
| 10 | 1.65            | 1.21            | 24 | 1.14            | 0.52            | 38 | 3.47            | 2.87            | H5 | 0.98            | 0.43            |
| 11 | 0.74            | 0.11            | 25 | 1.26            | 0.70            | 39 | 1.60            | 1.23            | H6 | 0.81            | 0.21            |
| 12 | 1.25            | 0.51            | 26 | 1.12            | 0.29            | 40 | 1.12            | 0.70            |    |                 |                 |
| 13 | 2.06            | 1.10            | 27 | 2.13            | 1.08            | 41 | 1.43            | 0.41            |    |                 |                 |
| 14 | 1.86            | 0.75            | 28 | 1.11            | 0.30            | 42 | 2.58            | 1.78            |    |                 |                 |

1) 1~47 为地下水, H1~H6 为河水; SI<sub>C</sub> 为方解石饱和指数, SI<sub>D</sub> 为白云石饱和指数

4 结论

(1)总体上,研究区水体中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  占主要优势.地下水水化学类型分为  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型、 $\text{HCO}_3 + \text{SO}_4\text{-Ca}$  型和  $\text{HCO}_3\text{-Ca} + \text{Mg}$  型,以  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型为主.硬度以  $\text{CaCO}_3$  的当量计算,属微硬水.

(2)研究区水样化学组分全部落在 Gibbs 图的中间靠左端,该区的水化学组分主要受岩石风化作用影响,蒸发和沉淀作用微弱.

(3)研究区水体水化学类型主要受溶滤作用控制.据方解石和白云石饱和指数计算结果,研究区

地下水中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  主要来自方解石和白云石的溶解.研究区地下水系统属于开系统,水体中  $\text{HCO}_3^-$  有两种来源:一是大气中的  $\text{CO}_2$  与地下水溶解后离解形成;二是方解石和白云石遇水溶解形成.同时,研究区还存在铝硅酸盐矿物(石英、长石、云母等)的溶解作用.

致谢:感谢四川省核工业地质局二八二大队刘勇及其团队辛苦采集样品,以及四川省核工业辐射测试防护院对样品进行检测.同时还感谢成都理工大学田梦莎、巫维杰等在资料收集整理时给予的帮助.

## 参考文献:

- [1] 汪名鹏. 江苏泗阳城区浅层地下水化学特征及其影响因素[J]. 现代地质, 2014, **28**(6): 1329-1336.
- [2] 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 等. 锡林河流域地表水化学主离子特征及控制因素[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 131-142.
- [3] 滕彦国, 左锐, 王金生, 等. 区域地下水演化的地球化学研究进展[J]. 水科学进展, 2010, **21**(1): 127-136.
- [4] 章斌, 郭占荣, 高爱国, 等. 用氢氧稳定同位素揭示闽江河口区河水、地下水和海水的相互作用[J]. 地球学报, 2013, **34**(2): 213-222.
- [5] 张文章, 王锦国, 陈舟. 云南鹤庆西山岩溶地下水同位素及水化学分析[J]. 工程勘察, 2015, (3): 51-56.
- [6] 朱秉启, 杨小平. 塔克拉玛干沙漠天然水体的化学特征及其成因[J]. 科学通报, 2007, **52**(13): 1561-1566.
- [7] 蒲焱, 何元庆, 朱国锋, 等. 丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 49-54.
- [8] 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.
- [9] 王晓曦, 王文科, 王周锋, 等. 滦河下游河水及沿岸地下水水化学特征及其形成作用[J]. 水文地质工程地质, 2014, **41**(1): 25-33, 73.
- [10] 王瑞久. 三线图解及其水文地质解释[J]. 工程勘察, 1983, (6): 6-11.
- [11] Gibbs J R. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, **170** (3962): 1088-1090.
- [12] Jalali M. Chemical characteristics of groundwater in parts of mountainous region, Alvand, Hamadan, Iran [J]. Environmental Geology, 2006, **51**(3): 433-446.
- [13] Umar R, Absar A. Chemical characteristics of groundwater in parts of the Gambhir River basin, Bharatpur District, Rajasthan, India[J]. Environmental Geology, 2003, **44**(5): 535-544.
- [14] Lakshmanan E, Kannan R, Kumar M S. Major ion chemistry and identification of hydrogeochemical processes of ground water in a part of Kancheepuram district, Tamil Nadu, India [J]. Environmental Geosciences, 2003, **10**(4): 157-166.
- [15] Nganje T N, Adamu C I, Ugbaja A N, *et al.* Evaluation of Hydrogeochemical characteristics of groundwater in parts of the lower Benue Trough, Nigeria [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2010, **29**(4): 398-406.
- [16] Reddy M M, Plummer L N, Busenberg E. Crystal growth of calcite from calcium bicarbonate solutions at constant  $p\text{CO}_2$  and  $25^\circ\text{C}$ : a test of a calcite dissolution model[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1981, **45**(8): 1281-1289.
- [17] Harned H S, Davis Jr R. The Ionization constant of carbonic acid in water and the solubility of carbon dioxide in water and aqueous salt solutions from 0 to  $50^\circ$  [J]. Journal of the American Chemical Society, 1943, **65**(10): 2030-2037.
- [18] Harned H S, Scholes Jr S R. The ionization constant of  $\text{HCO}_3^-$  from 0 to  $50^\circ$  [J]. Journal of the American Chemical Society, 1941, **63**(6): 1706-1709.
- [19] Jacobson R L, Langmuir D. Dissociation constants of calcite and  $\text{CaHCO}_3^-$  from 0 to  $50^\circ\text{C}$  [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1974, **35**: 1023-1045.
- [20] Garrels R M, Thompson M E. A chemical model for sea water at  $25^\circ\text{C}$  and one atmosphere total pressure[J]. American Journal of Science, 1962, **260**(1): 57-66.
- [21] 郭张军, 宋汉周. 地下水化学组分存在形式及其 SI 值计算[J]. 资源环境与工程, 2009, **19**(3): 200-202.
- [22] 周祖权, 宋汉周. 水-岩作用模拟中饱和度 SI 的灵敏度分析[J]. 河海大学学报, 2001, **29**(6): 90-93.
- [23] 王琪, 史基安, 赵兴东, 等. 石羊河流域地下水地球化学特征演化的计算机模拟研究[J]. 中国沙漠, 2003, **23**(2): 160-164.
- [24] 彭鹏, 宋汉周. 吴志伟. 基于化学热力学的饱和度模型求解方法的改进[J]. 水文地质工程地质, 2009, **36**(5): 76-79.
- [25] 吴志伟, 宋汉周, 彭鹏. 络合物对水-岩作用 SI 模型计算的影响程度分析[J]. 勘察科学技术, 2008, (3): 23-26.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                     |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Estimation of PM <sub>2.5</sub> Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations .....                                                        | XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)                                       |
| Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM <sub>2.5</sub> in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon .....                                                             | DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)        |
| Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> and Gas-Particle Partitioning in Qingdao .....                                                          | ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)          |
| Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing .....                                                                                           | HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)           |
| Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015 .....                                                                                                                         | CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)      |
| Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai .....                                                                                              | WANG Hong-li (3159)                                                  |
| Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter .....                                                                                                     | CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)  |
| A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery .....                                                                                                               | GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)               |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu .....                                                                          | YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)               |
| Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei .....                                                                                                                    | YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)             |
| Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island .....                                                                                                     | WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)        |
| Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area .....                                                           | LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)      |
| Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River .....                                                 | HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)         |
| Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City .....                                                                                                              | ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)                   |
| Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China .....                                                                       | CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)        |
| Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol .....                                                                  | HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)               |
| Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment .....                                                                                 | YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)          |
| Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions .....                                                           | LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)           |
| Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts .....                                                                                                    | LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)               |
| Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes .....                                                         | ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)       |
| Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results .....                                                                                                                    | LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)       |
| Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water .....                                                                                                           | WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)                |
| XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment .....                                                                                                                         | WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)          |
| AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries .....                                                                                                      | SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)            |
| Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production .....                                                                                                             | QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)          |
| A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater .....                                                                                              | SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)     |
| Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System .....                                                                                               | KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)           |
| Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community .....                                                               | ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)           |
| Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation .....                                                               | LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345) |
| Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge .....                                                                               | LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)    |
| Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River .....        | SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)       |
| Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emission from Double-Season Rice Paddy Field .....                                                     | FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)              |
| Characteristics of N <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, NO, CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil .....                                     | CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)               |
| Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau .....                                                                        | CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)         |
| Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region .....                                                                                                                        | GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)     |
| Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia ..... | NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)              |
| Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification .....                                               | HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)             |
| Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City .....                                                                                   | WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)             |
| Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain .....                                                                  | LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)                        |
| Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China .....                                                                                                 | NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)                     |
| Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment .....                                                          | GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)      |
| Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil .....                                                                                | LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)          |
| Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil .....                                                                                                                        | ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)              |
| Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil .....                               | JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)      |
| Al <sup>3+</sup> Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi .....                                                                                                                    | WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)       |
| Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China .....                                                               | YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)           |
| Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing .....                                                                                                             | SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)            |
| Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables .....                                                                    | LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)            |
| Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -WO <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> Catalyst and Activated Carbon .....                                                       | REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)             |
| Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services .....                                                                             | LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)               |
| Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China .....                                                                                                                      | JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)               |
| Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil .....                                                                                       | SI You-bin, WANG Juan (3533)                                         |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主 管     | 中国科学院                                                                                                                                                               | Superintended    | by | Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                                                                             |
| 主 办     | 中国科学院生态环境研究中心                                                                                                                                                       | Sponsored        | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                             |
| 协 办     | (以参加先后为序)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                          |
| 主 编     | 欧阳自远                                                                                                                                                                | Editor-in -Chief |    | OUYANG Zi-yuan                                                                                                                                                                                                          |
| 编 辑     | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                                                            |
| 印 刷 装 订 | 北京北林印刷厂                                                                                                                                                             | Printed          | by | Beijing Bei Lin Printing House                                                                                                                                                                                          |
| 发 行     | 科 学 出 版 社<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                                                               |
| 订 购 处   | 全国各地邮电局                                                                                                                                                             | Domestic         |    | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                                                         |
| 国外总发行   | 中国国际图书贸易总公司<br>(北京399信箱)                                                                                                                                            | Foreign          |    | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China                                                                                                                      |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行