

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香薹(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素

黄奇波^{1,2}, 覃小群^{1,2*}, 刘朋雨^{1,2}, 程瑞瑞^{1,2}, 李腾芳^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004; 2. 国土资源部广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 柳林泉是山西省著名的十大岩溶大泉之一, 丰富的岩溶地下水资源对吕梁地区经济社会发展具有支撑作用, 开展岩溶地下水化学演化规律及控制因素研究对于流域水资源可持续利用意义重大. 本研究对补给区、径流区、排泄区、深埋区的29个岩溶地下水主要离子组分进行测试分析. 结果表明, 水温、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 质量浓度从补给区、到径流区、到排泄区、再到深埋区, 随着径流途径增加不断升高. K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 主要来源于盐岩的溶解; 而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 主要来源于方解石、白云石和石膏的溶解. 受控于盐岩、石膏的不断溶解, Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度增加幅度大, 最大值分别为最小值的50、80和32倍; 受去白云化作用的影响, Ca^{2+} 、 HCO_3^- 质量浓度变化不大, 最大值仅为最小值的2~3倍. 在补给区、径流区, Na^+ 、 Cl^- 质量浓度较低, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 为主要阴阳离子, 但在排泄区和深埋区, Cl^- 、 Na^+ 明显超过了 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 成为最主要的阴阳离子; 水化学类型由 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型转化为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型, 最终演变为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型和 $\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型.

关键词: 岩溶地下水; 水化学特征; 去白云化作用; 柳林泉; 补给区; 径流区; 排泄区; 深埋区

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2132-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811021

Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment

HUNAG Qi-bo^{1,2}, QIN Xiao-qun^{1,2*}, LIU Peng-yu^{1,2}, CHENG Rui-rui^{1,2}, LI Teng-fang^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 2. Karst Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources and Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin 541004, China)

Abstract: The Liulin Spring is one of the ten most famous karst springs in the Shanxi province. The abundant karst groundwater resources support the economic and social development in the Luliang Prefecture. Therefore, the study of evolution and control factors of karst groundwater is of great significance to the sustainable utilization of water resources in the watershed. For revealing the evolution and control factors of karst groundwater in the Liulin Spring area, the main ion components of 29 karst groundwater samples from spring supply area, runoff area, discharge area, and deep buried area were analyzed. The results showed that the temperature and Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , and SO_4^{2-} concentrations increased continuously along the runoff route, from the recharge area to the runoff area, to the discharge area, and then to the deep burial area. K^+ , Na^+ , and Cl^- mainly come from salt rock dissolution, and Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , and SO_4^{2-} mainly come from the dissolution of calcite, dolomite, and gypsum. Because they are controlled by the continuous dissolution of salt rock and gypsum, the concentration of Na^+ , Cl^- , and SO_4^{2-} in groundwater has increased greatly, with the maximum value being 50 times, 80 times, and 32 times of the minimum value, respectively. Under the influence of dedolomitization, the concentration of Ca^{2+} and HCO_3^- in groundwater does not change significantly, the maximum is 2-3 times of the minimum. In the recharge area and runoff area, Na^+ and Cl^- amounts are lower, and Ca^{2+} and HCO_3^- are the main cations and anions in the groundwater. However, in the discharge area and deep buried area, Cl^- and Na^+ exceed HCO_3^- , Ca^{2+} , and Mg^{2+} and become the main anions and cations in the groundwater. The hydrochemical type changes from $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ in the supply area to $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ in the runoff area, to $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ in the recharge area, and finally to $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$, $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$, and $\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ in the deep burial area.

Key words: Karst groundwater; hydrochemical characteristics; dedolomitization; Liulin Spring catchment; supply area; runoff area; discharge area; deep buried area

柳林泉是山西省著名的十大岩溶大泉之一, 出露于柳林镇东龙门会、寨东一带的三川河谷中, 由80多个泉点组成, 多年平均流量 $2.20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ [1~3], 成为吕梁地区六县区工农业生产和城镇居民生活用水的主要供水水源, 流域内丰富的岩溶地下水资源在保障城乡居民饮水安全、经济快速发展、生态环境平衡等方面具有重要的支撑作用 [4, 5]. 20世纪八九十年代, 我国很多水文地质学者对柳林泉域的地质、水文地质条件, 泉流量动态特征、泉域的保护

进行了深入研究, 取得了许多重要成果, 为柳林泉的开发与保护提供了重要依据 [6~12].

近年来, 在人类活动和气候变化(降雨量的减少)的双重影响下, 岩溶地下水资源的自然平衡被

收稿日期: 2018-11-02; 修订日期: 2018-12-06

基金项目: 中国地质调查项目(DD20160301); 国家自然科学基金项目(41302211, 41571203)

作者简介: 黄奇波(1982~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为岩溶水文地质、岩溶环境与全球变化, E-mail: qbohuang0108@163.com

* 通信作者, E-mail: qxq@karst.ac.cn

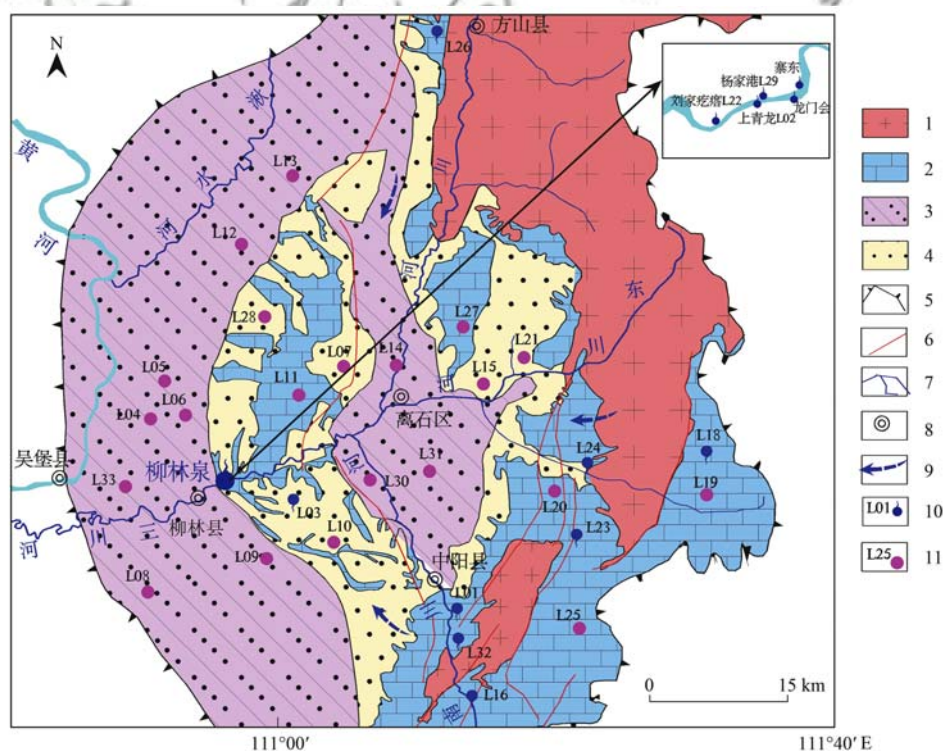
打破, 导致了地下水位下降, 泉流量不断减少^[13, 14]; 岩溶水系统的循环条件、水动力特征、水化学特征等都发生了很大改变, 引起了有关学者的关注^[15]. 如臧红飞等^[16]、贾振兴等^[17]和魏晓鸥等^[18]在 2011 年 5 月在泉域内布设了一条岩溶地下水水质监测剖面, 从补给区, 到中部径流区、到排泄区、再到西部滞留区共选择了 10 个代表性井(泉)点进行了测试分析, 深入研究了柳林泉域岩溶地下水中主要阴阳离子的来源、典型渗流路径的水文地球化学演化规律、岩溶水的补给径流特征和滞留时间等一系列的问题. 但由于受样品数量所限, 上述研究仅对一个典型剖面的水文地球化学演化规律进行了揭示. 柳林泉流域面积大, 地下水系统较为复杂^[2], 上述成果对区域上的水文地球化学形成演化的研究显得有些不足. 本研究于 2014 年 8 月对柳林泉域的补给区、径流区、排泄区、深埋区 29 个岩溶地下水进行了有针对性的系统取样, 对主要离子组分进行了测试分析, 探讨了不同径流区水化学特征、来源及影响因素, 进一步揭示流域水化学区域演化规律, 以期为流域水资源可持续利用和当地水资源综合规划提供参考.

1 研究区概况

柳林泉域属黄河水系, 位于山西省中部西侧吕

梁市, 东经 $110^{\circ}43' \sim 111^{\circ}35'$, 北纬 $37^{\circ}3' \sim 38^{\circ}18'$, 流域面积 $6\,080\text{ km}^2$. 属黄土高原区地貌, 总的地势是东高西低, 北高南低. 自东北向西南倾斜, 两侧高山隆起, 中部切割下陷, 整个横断面呈“V”形状. 属暖温带季风型大陆性干旱、半干旱气候. 多年平均降水量为 447.55 mm . 多年平均蒸发量 $1\,635.8\text{ mm}$. 年内降水高峰期主要出现在 6~9 月, 占全年降水量的 $71.5\% \sim 72.4\%$, 枯水期出现在每年的 12 月至次年的 2 月. 年均气温 $9 \sim 10^{\circ}\text{C}$, 1 月最低气温 -23°C , 7 月最高气温达 38°C .

构造上处于山西吕梁山复背斜向鄂尔多斯盆地过渡地带, 总体上构成一向西倾斜的单斜构造^[2]; 东部吕梁山一带广泛出露太古界、元古界变质岩和花岗岩, 南部和中西部主要为下古生界寒武系、奥陶系碳酸盐岩, 含蒸发岩石膏夹层; 西部为石炭-二叠系砂岩及煤系地层, 覆盖于碳酸盐岩之上(图 1). 岩溶水主要赋存在下古生界碳酸盐岩含水岩组中. 岩性以灰岩、白云岩为主, 夹 5~6 层碎屑岩和泥灰岩, 碳酸盐岩总厚度 $330 \sim 735\text{ m}$ ^[5]. 岩溶地下水接受碳酸盐岩裸露区和覆盖区大气降水直接或间接入渗补给及地表径流沿河道的渗漏补给, 受地形和含水层产状控制, 由东往西和由南、北两翼向中部三川河河谷汇集, 最后在柳林县城东侧受石炭、二叠系区域隔水顶板阻挡在三川河河谷中出露大小



1. 变质岩出露区; 2. 碳酸盐岩裸露区; 3. 石炭-二叠系地层覆盖区; 4. 松散层覆盖区; 5. 泉域边界;
6. 断裂构造; 7. 河流水系; 8. 县(市); 9. 地下水流向; 10. 泉水及编号; 11. 机井及编号

图 1 柳林泉流域取样点位置示意

Fig. 1 Generalized hydrogeology map and sampling points of study area

不等的 80 多个泉点, 组成柳林泉群. 流域在平面上可划分为补给区、径流区、排泄区和深埋区^[2, 4].

2 材料与方法

2.1 取样点基本情况及分布

2014 年 8 月 19 ~ 23 日对柳林泉域内 29 个岩溶水点进行了取样分析. 地下水主要分布于补给区、径流区、排泄区、深埋区. 补给区取样点主要位于流域南部、东部裸露岩溶区一带, 类型以泉水为主 (7 个), 并对 3 个村屯深度较浅的机井进行了取

样, 机井深 30 ~ 100 m; 径流区取样点主要分布于中部离石覆盖岩溶区一带, 均为机井, 井深 200 ~ 500 m. 排泄区取样点主要分布于柳林县城三川河两岸的泉群, 泉群出口多, 但大多位于三川河床中, 无法取样, 本次仅对南岸的上青龙泉和北岸的杨家港泉、刘家疙瘩泉进行取样; 深埋区的取样点主要位于柳林泉群西侧和北侧, 均为机井, 由于岩溶含水层被深埋于石炭系和二叠系地层之下, 机井深度均大于 500 m (550 ~ 1 000 m). 取样点详细信息如表 1, 取样点位置如图 1 所示.

表 1 流域取样点的基本信息 (2014 年)

Table 1 Information of sampling points in Liulin Spring catchment (2014)

区域	编号	地理位置	取样时间日期 (月-日)	纬度/(°)	经度/(°)	高程/m	类型	井深/m
补给区	L19	离石区吴城小溪沟旁	08-20	111.483	37.458	1 394	民井	100
	L20	吴城镇王营庄村委	08-20	111.325	37.473	1 166	民井	70
	L25	中阳县枝柯镇前师会村	08-23	111.362	37.279	1 489	民井	30
	L16	中阳县关上村	08-19	111.240	37.197	1 325	泉水	
	L01	中阳县车鸣峪	08-19	111.525	37.232	1 287	泉水	
	L32	中阳县车鸣峪	08-19	111.542	37.215	1 270	泉水	
	L18	离石区吴城上丰村	18-20	111.501	37.493	1 476	泉水	
	L23	吴城镇白马仙洞东 2km	08-23	111.310	37.395	1 797	泉水	
	L24	吴城镇侯家岭村西 300m	08-23	111.292	37.461	1 236	泉水	
	L26	方山县长家咀村	08-23	111.189	37.899	1 375	泉水	
径流区	L21	离石区信义镇归化村委	08-21	111.396	37.564	1 213	民井	200
	L31	中阳县枝柯镇南大井村	08-23	111.364	37.236	1 039	民井	500
	L10	柳林县陈家湾乡陈家湾村	08-20	111.016	37.367	969	民井	430
	L11	中阳枣林乡瓦窑口村	08-21	111.040	37.555	1 094	民井	200
	L14	离石县城乡北乡上安村	08-22	111.135	37.586	994	民井	503
	L15	离石县田家会乡韩家坡	08-22	111.245	37.554	1 123	民井	430
	L30	离石区金罗镇金罗村	08-22	111.122	37.434	978	民井	423
	L27	离石区前南村	08-23	111.239	37.742	1 100	民井	320
排泄区	L02	柳林县上青龙水厂 (南岸)	08-20	110.916	37.446	824	泉水	
	L29	柳林县杨家港泉 (北岸)	08-22	110.919	37.448	808	泉水	
	L22	柳林县刘家疙瘩泉 (北崖)	08-20	110.969	37.514	816	泉水	
深埋区	L06	柳林县下恒侧村	08-19	110.904	37.538	1 121	民井	602
	L12	离石区枣林乡三山集村	08-21	110.959	37.628	1 154	民井	700
	L13	监县县坪头乡后庄	08-21	111.024	37.719	892	民井	600
	L04	柳林县下恒侧村双柳煤矿	08-20	110.847	37.539	814	民井	660
	L08	柳林县贺家坡贺家坡村	08-20	110.787	37.345	842	民井	1 000
	L09	柳林县金家庄后元村	08-20	110.923	37.379	937	民井	550
	L05	柳林县孟门乡吉家塔村双柳	08-19	110.847	37.540	817	民井	660
	L33	柳林县薛村乡薛村	08-20	110.889	37.363	920	民井	560

2.2 样品分析测试

样品的测试指标为常规指标. 主要包括: 水温、电导率、pH 值、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- . 主要采用仪器现场测试、现场滴定和样品室内测试相结合的研究方法. 野外现场利用德国 WTW 公司生产 pH/Cond340i 测试仪测试各水点的水温、pH 值和电导率, 分辨率分别为 $0.1^\circ C$ 、 $0.1 pH$ 单位和 $1 \mu S \cdot cm^{-1}$; 使用德国 Aquamerck 公司生产的碱度计和硬度计测定河水的 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 质量浓度, 分辨率分别为 6

$mg \cdot L^{-1}$ 和 $1 mg \cdot L^{-1}$. 样品在现场进行过滤 ($0.45 \mu m$ Millipore 滤膜) 后再装入 100 mL 聚乙烯瓶中. 用于阳离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Na^+) 测定的样品立即加入超纯盐酸酸化至 $pH < 2$, 密封于暗箱中保存; 用于测定阴离子的样品直接密封于暗箱中保存.

样品带回实验室后, 用原子吸收光谱法 (atomic absorption spectroscopy, AAS) 测定阳离子 (Mg^{2+} 、 K^+ 和 Na^+) 质量浓度. 阴离子质量浓度 (SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^-) 用高效液相色谱 (HPLC) 仪测

定. 阴阳离子电荷平衡之差 < 5%. 测试结果如表 $\text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- + \text{NO}_3^- + 2\text{SO}_4^{2-}$; $\text{NICB} = (\text{TZ}^+ - \text{TZ}^-)$
2. 其中: $\text{TZ}^+ = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + 2\text{Mg}^{2+} + 2\text{Ca}^{2+}$; $\text{TZ}^- = \quad \times 100/(\text{TZ}^+ + \text{TZ}^-)$.

表 2 样品水化学特征

Table 2 Hydrochemical characteristics of samples																		水化学类型
编号	水温 /℃	pH	电导率 /μS·cm ⁻¹	Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	Na ⁺ /mg·L ⁻¹	K ⁺ /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	TZ ⁺	TZ ⁻	NICB	SIC	SID	SIG	
L19	12.8	7.37	458	67.60	13.44	13.57	0.39	8.68	275.11	6.39	22.08	5.10	5.29	-1.83	0.16	-0.21	-2.17	HCO ₃ -Ca
L20	12.6	7.67	601	79.60	21.36	22.54	2.73	21.70	309.88	15.98	61.44	6.81	7.16	-2.51	0.38	0.32	-1.74	HCO ₃ -Ca·Mg
L25	9.5	7.57	480	74.80	11.52	11.27	1.17	20.46	262.91	16.69	14.40	5.22	5.41	-1.79	0.25	-0.27	-2.28	HCO ₃ -Ca
L16	10.0	7.65	458	80.40	17.28	8.74	1.56	8.06	305.61	6.75	29.76	5.88	5.95	-0.59	0.37	0.08	-1.94	HCO ₃ -Ca·Mg
L01	10.2	7.66	486	80.80	21.84	8.28	2.73	3.72	309.88	13.49	49.92	6.29	6.56	-2.10	0.28	0.09	-1.79	HCO ₃ -Ca·Mg
L32	10.4	7.82	455	73.01	16.18	8.55	1.40	7.66	271.56	6.60	29.46	5.41	5.38	0.29	0.52	0.75	-1.89	HCO ₃ -Ca·Mg
L18	12.8	7.24	622	100.40	17.76	11.96	0.78	16.74	338.55	18.82	48.96	7.04	7.37	-2.29	0.12	-0.32	-1.75	HCO ₃ -Ca
L23	9.1	7.70	604	101.20	15.36	7.82	2.34	5.58	250.71	18.11	112.32	6.74	7.05	-2.25	0.44	0.05	-1.32	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Mg
L24	11.5	7.43	739	87.60	25.20	36.57	3.12	3.10	358.68	25.92	87.36	8.15	8.48	-1.98	0.23	0.10	-1.60	HCO ₃ -Ca·Mg
L26	9.1	7.89	607	77.60	24.96	22.54	1.56	5.58	379.42	11.36	25.92	6.98	7.17	-1.34	0.61	0.81	-2.09	HCO ₃ -Ca·Mg
平均值	10.8	7.60	551	82.30	18.49	15.18	1.78	10.13	306.23	14.01	48.16	6.36	6.58	-1.64	0.34	0.14	-1.86	
L21	19.6	7.74	485	60.00	16.80	21.39	2.34	2.48	289.75	8.52	27.84	5.39	5.61	-2.00	0.46	0.57	-2.13	HCO ₃ -Ca·Mg
L31	17.5	8.20	497	64.80	17.76	9.20	1.95	6.82	248.88	9.23	34.56	5.17	5.17	0.00	0.99	1.56	-1.94	HCO ₃ -Ca·Mg
L10	14.7	7.76	1102	102.80	38.88	99.13	1.17	18.60	450.79	31.60	223.68	12.72	13.24	-2.00	0.54	0.86	-1.22	HCO ₃ ·SO ₄ -Na·Ca·Mg
L11	13.0	8.10	650	64.80	28.80	37.03	3.12	11.16	281.21	28.76	84.48	7.33	7.36	-0.20	0.62	1.06	-1.71	HCO ₃ -Ca·Mg
L14	16.0	8.13	550	64.80	19.68	22.08	1.95	15.50	253.15	28.76	46.08	5.89	6.17	-2.32	0.67	1.00	-1.90	HCO ₃ -Ca·Mg
L15	13.0	8.18	827	71.20	39.60	49.91	1.56	12.40	381.25	40.47	79.68	9.07	9.25	-0.98	0.91	1.68	-1.70	HCO ₃ -Ca·Mg
L30	16.4	7.83	762	87.60	28.80	32.20	1.95	29.14	289.75	33.02	118.08	8.23	8.61	-2.26	0.51	0.79	-1.50	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Mg
L27	17.8	7.64	806	96.00	25.44	36.11	5.85	59.52	355.02	41.54	52.80	8.64	9.05	-2.32	0.53	0.68	-1.75	HCO ₃ -Ca·Mg
平均值	16.0	7.95	710	76.50	26.97	38.38	2.49	19.45	318.73	27.74	83.40	7.81	8.06	-1.51	0.65	1.03	-1.73	
L02	16.8	7.44	851	76.40	26.16	54.05	1.95	20.46	293.41	55.38	96.00	8.40	8.70	-1.75	0.07	-0.06	-1.64	HCO ₃ -Ca·Na·Mg
L29	17.8	7.63	894	72.80	28.32	76.13	2.73	21.70	299.51	75.62	116.16	9.38	9.81	-2.24	0.25	0.33	-1.57	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Na·Mg
L22	18.7	7.86	854	73.26	24.54	79.72	2.64	12.67	271.56	90.90	102.86	9.24	9.36	-0.63	0.54	0.80	-1.70	HCO ₃ -Cl-Ca·Na
平均值	17.8	7.64	866	74.15	26.34	69.97	2.44	18.28	288.16	73.97	105.01	9.01	9.29	-1.54	0.29	0.36	-1.64	
L06	20.2	7.96	1362	92.00	38.16	152.03	3.51	11.16	334.28	164.72	221.76	14.48	14.92	-1.50	0.71	1.30	-1.29	HCO ₃ ·Cl·SO ₄ -Na·Ca
L12	22.0	8.11	1571	92.80	41.52	184.00	3.90	13.02	303.78	231.11	219.84	16.20	16.28	-0.25	0.85	1.66	-1.34	Cl·HCO ₃ ·SO ₄ -Na·Ca
L13	24.3	7.61	2290	113.60	36.24	296.70	7.02	6.20	309.88	512.27	161.28	21.78	22.97	-2.66	0.39	0.63	-1.44	Cl-Na·Ca
L04	27.2	7.66	2560	76.80	39.84	390.77	7.80	3.10	401.99	465.05	285.12	24.35	25.68	-2.66	0.61	1.07	-1.19	Cl·HCO ₃ -Na
L08	28.4	7.92	1361	58.80	55.92	167.90	1.17	50.22	566.69	83.78	150.72	14.93	15.60	-2.19	0.61	1.51	-1.70	HCO ₃ -Na·Mg
L09	20.9	7.70	2200	112.40	37.20	291.87	3.51	8.06	295.85	467.89	216.96	21.50	22.68	-2.67	0.42	0.67	-1.31	Cl-Na·Ca
L05	24.0	7.63	1717	91.60	78.00	192.97	4.29	16.12	403.82	118.93	456.96	19.58	19.75	-0.43	0.27	0.71	-1.09	SO ₄ ·HCO ₃ -Na·Mg
L33	22.5	7.95	1720	100.90	36.66	213.96	5.86	10.45	302.16	270.56	196.45	17.55	16.84	2.08	0.60	0.94	-1.44	Cl·HCO ₃ -Na·Ca
平均值	23.7	7.82	1848	92.36	45.44	236.28	4.63	14.79	364.81	289.29	238.64	18.80	19.34	-1.29	0.56	1.06	-1.35	

3 结果与分析

3.1 综合性指标特征

3.1.1 pH 值

岩溶水点的 pH 值变化范围在 7.24 ~ 8.20 之间, 平均为 7.75, 所有样点的 pH 值均大于 7, 呈碱性, 与我国西南岩溶地下水的特征相一致^[19~23], 主要受控于碳酸盐岩溶解. 但 pH 平均值大于我国乌江流域^[21]和重庆地区岩溶地下水^[22]的值, 这反应出不同气候条件、地理环境及地下水运动过程对岩溶水化学的控制作用^[24,25].

3.1.2 水温

水温变化范围较大(9.1 ~ 28.4℃), 平均值为 16.6℃. 从补给区、到径流区、到排泄区、到深埋区地下水水温呈不断升高(图 2). 补给区样点的温度

整体较低, 平均值基本接近于当地平均气温(10℃). 补给区主要位于研究区南部、东部和北部的裸露岩溶山区, 样点的高程在 1 166 ~ 1 797 m 之间, 3 个机井的深度均不超过 100 m(表 1), 其水温主要受当地平均气温控制; 虽然研究区气温的最小值与大最值相差 30 ~ 40℃, 但补给区样点保持在年均气温值附近, 反映出地下水对气温较好地调蓄作用. 与补给区相比, 径流区的机井水温升高(图 2). 径流区的机井分布于中部黄土覆盖区, 井深在 200 ~ 500 m 之间, 其水温主要反映年均气温(10℃)与地温梯度增温(3℃/100 m)之和. 不同位置的机井, 水温又有所差异, 这可能是受机井的深度不同所控制, 从水温与井深的相关关系来看(图 3), 两者呈较好的正相关关系($R^2 = 0.73$), 显示出机井深度对水温的控制作用. 排泄

区的3个泉水水温高于径流区,表明循环深度大于径流区.但三川河南岸的上青龙泉 L02 的水温明显小于北岸的刘家疙瘩泉 L22 和杨家港泉 L29,表明南岸泉水循环深度小于北岸,这与前人的研究结果基本一致.高宝玉等^[2]的研究证实与南岸相比,北岸岩溶水径流途径远,水循环深度大,并造成了南、北两岸的泉点水化学“北咸南淡”,水温“北高南低”的特征.深埋区的机井深度大于550 m,水的径流途径远、循环深度大,受地温梯度增温影响,水温最高.

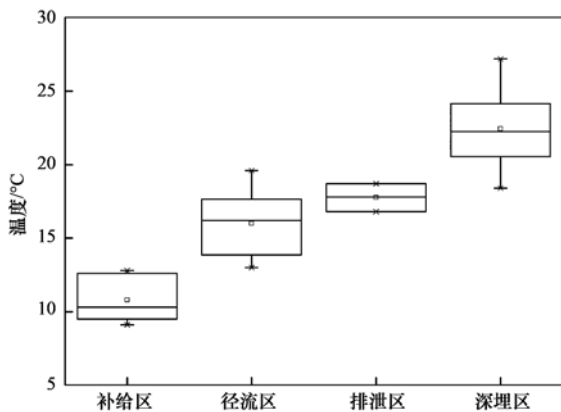


图2 不同径流区水温变化关系

Fig. 2 Variation of temperature in different areas

3.1.3 饱和指数

表2显示方解石和白云石的饱和指数(SIC和SID)变化范围分别为0.07~0.99和-0.32~1.68,平均值分别为0.48和0.66,说明这2种矿物均处于较强的过饱和状态.与臧红飞等在柳林泉的研究

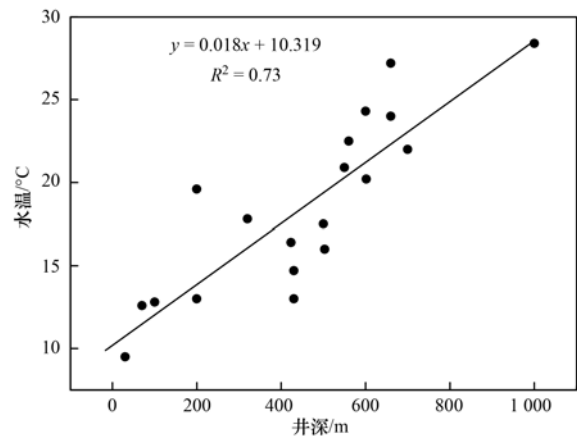


图3 机井水温与井深关系

Fig. 3 Variation of temperature according to depth

结果一致^[15].柳林泉为典型的半干旱区岩溶水系统,地下水赋存于溶蚀孔隙和溶蚀裂隙中,以扩散流为主,从补给区到深埋区经过了较长的径流途径,径流时间长,进行了充分的水-岩-气相互作用而达到饱和状态.图4显示从补给区、到径流区、到排泄区、再到深埋区SIC和SID的变化无明显的趋势性规律.这可能与不同径流区内岩溶地下水中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的来源比较复杂有关.

石膏饱和指数(SIG)均小于0,变化范围为-1.28~-1.09,平均值为-1.67,说明石膏一直处于溶解状态.图4显示从补给区、到径流区、到排泄区、到深埋区,石膏的饱和指数不断升高,表明随着地下水的径流石膏层不断溶解.在深埋区SIG仍小于-1,说明石膏仍处于较强的非饱和状

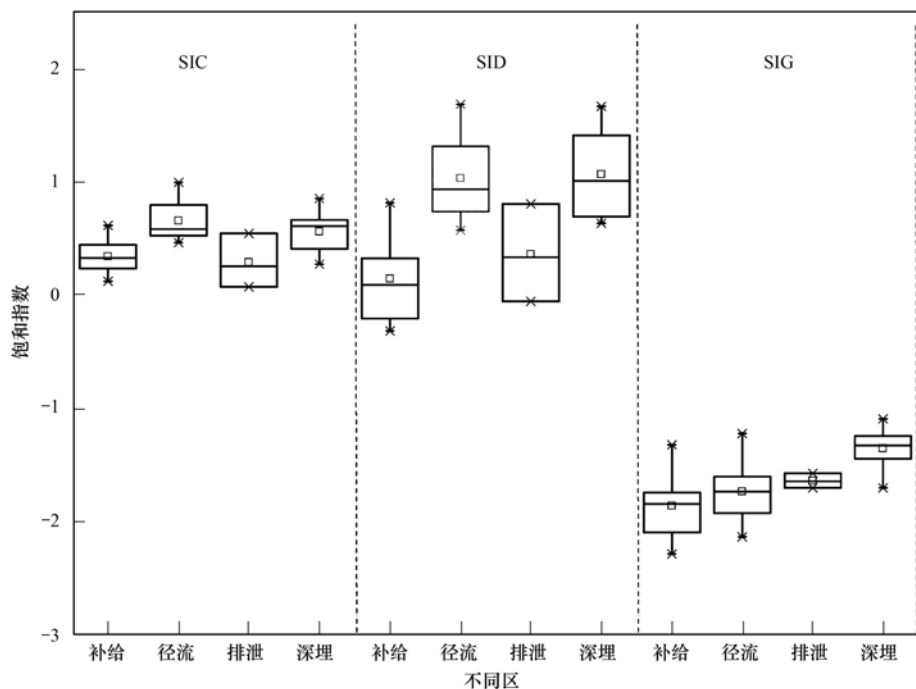


图4 不同径流区SIC、SID和SIG的变化关系

Fig. 4 Variation of SIC, SID, and SIG in different areas

态,地下水对石膏仍有溶蚀能力^[26]。

3.2 离子组分特征

3.2.1 主要阳离子

岩溶水中 K^+ 总体上处于低质量浓度水平,变化范围为 $0.39 \sim 7.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $2.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。图 5 显示从补给区、到径流区、到排泄区、到深埋区,质量浓度变化不显著,规律性变化趋势并不明显。 Na^+ 质量浓度变化范围大 ($7.82 \sim 390.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 平均值为 $95.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值为最小值的 50 倍。图 5 显示出补给区的 Na^+ 质量浓度低,到径流区、排泄区、深埋区随着径流途径增加,质量浓度不断增加,尤其是在深埋区, Na^+ 质量浓度明显超过了 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 质量浓度,成为

地下水中最主要的阳离子。

Ca^{2+} 质量浓度较高,但变化范围较小 ($58.80 \sim 113.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 平均值为 $82.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值为最小值的 2 倍。图 5 显示从补给区、到径流区、到排泄区、到深埋区, Ca^{2+} 质量浓度有所增加,但增加的量不及 Na^+ 。在补给区、径流区中, Na^+ 质量浓度较少, Ca^{2+} 为地下水中主要阳离子,但在排泄区和深埋区,由于 Na^+ 的显著增加,造成 Ca^{2+} 质量浓度比例减少。 Mg^{2+} 质量浓度变化范围为 $11.52 \sim 78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $30.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值为最小值的 7 倍。图 5 显示从补给区、到径流区、到排泄区、再到深埋区, Mg^{2+} 质量浓度不断增加。

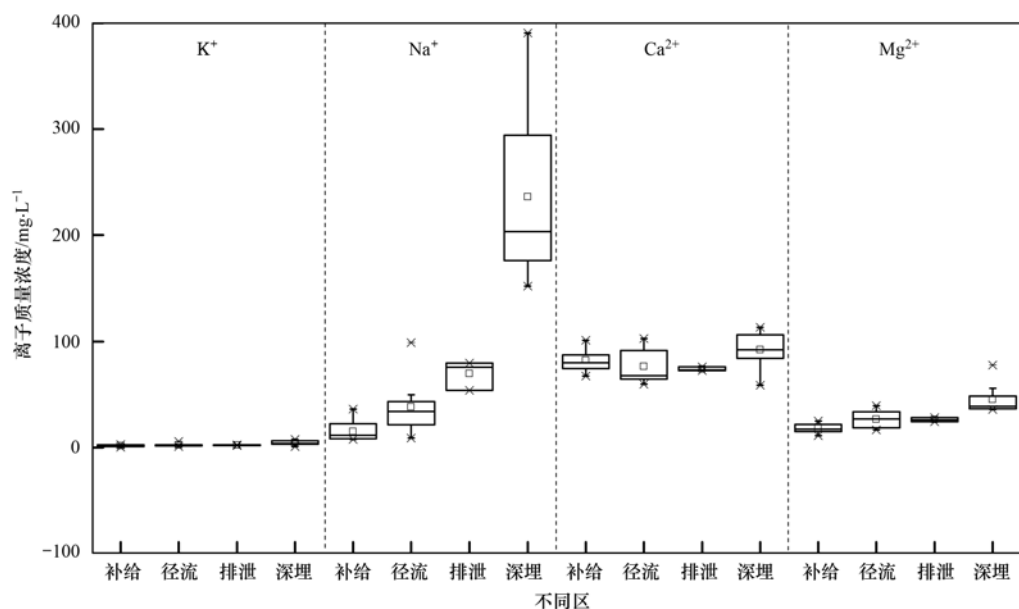


图 5 不同径流区阳离子变化关系

Fig. 5 Spatial variation of cations in different areas

3.2.2 主要阴离子

NO_3^- 质量浓度总体上较低,变化范围为 $2.48 \sim 59.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $15.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。图 6 显示从补给区、到径流区、到排泄区、到深埋区,质量浓度变化不显著。 Cl^- 质量浓度变化范围大,为 $6.39 \sim 512.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $110.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值为最小值的 80 倍。图 6 也显示补给区的 Cl^- 质量浓度低,随着径流途径增加,质量浓度不断增加,尤其是在深埋区, Cl^- 质量浓度明显超过了 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度,成为地下水中最主要的阴离子。

岩溶水中 HCO_3^- 质量浓度较高,变化范围为 $248.88 \sim 566.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $329.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值为最小值的 2.3 倍。图 6 显示从补给区,到径流区、到排泄区、到深埋区,质量浓度有所增加,但增加的量并不大,在补给区、径流区

中, HCO_3^- 为地下水中主要阴离子,但在排泄区和深埋区,由于 Cl^- 的显著增加,造成 HCO_3^- 质量浓度比例明显减少。岩溶水中 SO_4^{2-} 质量浓度的变化范围比较大,最小值为 $14.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值为 $456.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值为最小值的 32 倍。图 6 也显示补给区的 SO_4^{2-} 质量浓度最低,随着径流途径增加,质量浓度不断增加,尤其是在深埋区,增加更为显著。

3.3 水化学类型

Piper 三线图是水文地质学中应用最为广泛的一种水化学分析方法,通过 Piper 三线图可以将一个地区的大量的水化学分析资料点绘到图上,从水样在图中所处的位置判断水样的一般化学特征,可直观地显示一个区内地下水化学成分的空间演变规律^[27]。

样点在 Piper 三线图中的位置较为分散,但具

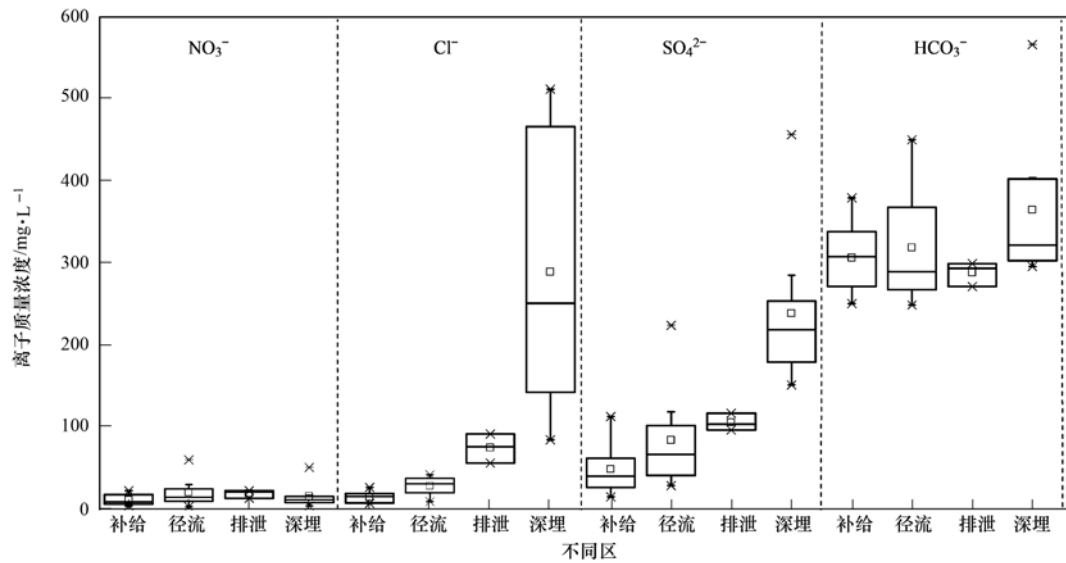


图6 不同径流区阴离子变化关系

Fig. 6 Spatial variation of anions in different areas

有一定的规律性(图7). 补给区主要位于5区, 碳酸盐硬度超过50%; $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 毫克当量所占百分比大于85%, 为主要阳离子; 阴离子中 HCO_3^- 所占比例大于58%, $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$ 比例均小于30%, 地下水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$, 以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 为主(表2). 径流区的样点从5区向9区过渡, 阳离仍以 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 为主, Na^+ 所占比例上升; 阴离子中 HCO_3^- 所占比例下降, 而 SO_4^{2-} 、 Cl^- 所占比例上升, 地下水化学类型有 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Na}$, 但仍以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 为主. 排泄区基本位于9区, 阳离子中除 K^+ 所占比例较小外, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 所占比例较均匀, 并无明显占优势的阳离子, 阴离子中 HCO_3^- 比例稍高, Cl^- 、 SO_4^{2-} 之间的优势不明显; 地下水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Na}$. 深埋区的样点除 L08 外, 主要位于7区, 非碳酸盐碱超过50%. Na^+ 比例进一步增大, 明显超过 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 的比例成为水中主要阳离子; 阴离子中 Cl^- 比例也明显增大, 超过 HCO_3^- , 同时 SO_4^{2-} 所占的比例也增加, 地下水化学类型有 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$.

总体上, 从补给区、到径流区、到排泄区、到深埋区, 阳离子沿 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 所占比例逐渐减小、 Na^+ 所占比例不断增加的趋势变化; 阴离子先是沿着 HCO_3^- 比例减小、 SO_4^{2-} 比例增大的方向变化, 随后沿 Cl^- 比例增加的方向变化(图7). 水化学类

型由 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型转化为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型, 最终演变为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型和 $\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型.

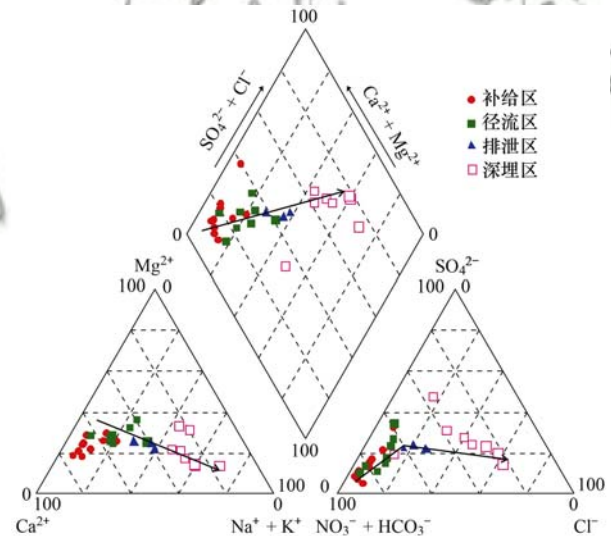


图7 岩溶地下水的 Piper 三线图

Fig. 7 Piper diagram of ionic concentration in the samples

4 讨论

4.1 K^+ 、 Na^+ 和 Cl^- 的主要来源

K^+ 、 Na^+ 和 Cl^- 主要来源于大气降水、人类活动排放和盐岩的溶解^[17, 28]. 图8显示 Cl^- 与 K^+ 、 Na^+ 具有较好的正相关关系, 表明这3种离子具有相同的来源. 补给区为裸露岩溶山区, 植被较好, 以乔木和灌丛为主, 人口稀少, 人类活动对补给区地下水中 K^+ 、 Na^+ 和 Cl^- 贡献较少, 其主要来源于大气降水. 而在径流区、排泄区和深埋区人口较为密集, 有柳林、离石、中阳等大中型县城, 但这些县城均位于覆盖岩溶区或埋藏岩溶区之

上, 岩溶含水层深埋在 200 ~ 300 m 以下, 人类活动来源的污水要经过如此厚的覆盖层才能到达岩溶含水层中, 加之覆盖黄土层对各种离子的吸附作用极强. 因此, 人类活动来源的 K^+ 、 Na^+ 和 Cl^- 对岩溶地下水的影响十分有限. 径流区、排泄区、深埋区这 3 种离子主要来源于大气降水和盐岩的溶解.

流域内大气降雨的 $K^+ + Na^+$ 和 Cl^- 的质量浓度范围为 $1.56 \sim 14.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.36 \sim 6.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [15], 补给区的地下水基本位于该范围内, 证实其 K^+ 、 Na^+ 和 Cl^- 主要来源于大气降水. 而径流区、排泄区、深埋区的地下水的 $K^+ + Na^+$ 和 Cl^- 的质量浓度明显大于大气降水, 说明岩盐的溶解是其主要来源, 高宝玉等 [2] 和臧红飞 [15] 的研究均已证实岩盐的溶解是中国北方岩溶水中 Na^+ 和 Cl^- 主要来源之一. 岩盐的溶解化学式为 [17]:

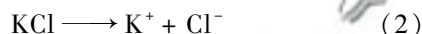
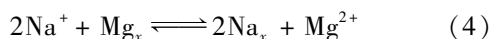


图 8 显示 K^+ 的浓度与 Na^+ 相比, 小一个数量级, 表明钾盐的溶解对地下水中离子贡献不大. 地下水中 Na^+ 和 Cl^- 主要来源于钠盐的溶解贡献. 由式 (1) 可见钠盐溶解时会产生相同摩尔数量的 Na^+ 和 Cl^- . 图 9 显示径流区、排泄区、深埋区岩溶地下水基本位于 $Na^+ : Cl^-$ 等于 1 的当量线上, 进一步证实钠盐的溶解对地下水中 Na^+ 和 Cl^- 的重要贡献. 但在深埋区, 除 L09、L13 外, 大部分样点位于 1:1 的线上方, Na^+ 相对于 Cl^- 过量, 说明还有其他来源对 Na^+ 有贡献. 而 L09、L13 位于 1:1 线的下方, Cl^- 相对于 Na^+ 过量.

阳离子交换吸附是岩溶水中 Na^+ 的来源之一, 发生最常见的阳离子交换是 $\text{Ca}-\text{Na}$ 和 $\text{Mg}-\text{Na}$ [15]. 根据质量交换平衡定律, 阳离子交换反应的化学式如下:



以上离子交换反应是可逆过程, 2 个 Na^+ 交换 1 个 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} . 当岩溶水 Na^+ 浓度远高于 Ca^{2+} 浓度时, Na^+ 交换吸附在固体颗粒表面的 Ca^{2+} , 式 (3) 的反应向右进行; 当 Ca^{2+} 浓度显著高于 Na^+ 时, Ca^{2+} 交换吸附在固体颗粒表面的 Na^+ , 反应向左进行. 由此, 由于流域内岩溶地下水中 Ca^{2+} 浓度较高, 较容易发生 Ca^{2+} 交换吸附在固体颗粒表面的 Na^+ 的反应, 造成水中的 Na^+ 浓度升高, 这可能是大部分水点 Na^+ 相对于 Cl^- 过量的重要原因. 而深埋区 L09 和 L13 样点的 Cl^- 相对于 Na^+ 过量, 可能是由于该 2 个水样 Na^+ 浓度高 (分别为 12.69

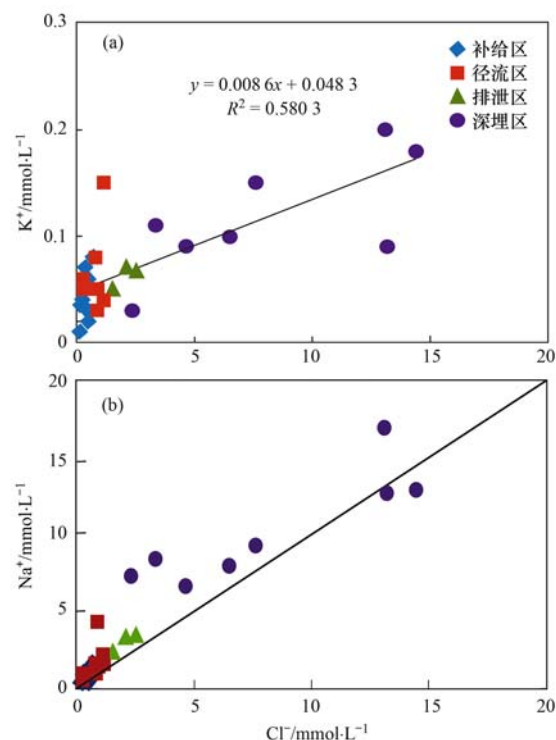


图 8 岩溶地下水中 Cl^- 与 K^+ 及与 Na^+ 的变化关系

Fig. 8 Cl^- vs. K^+ and vs. Na^+ in karst groundwater

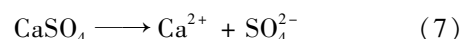
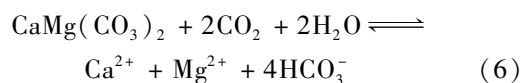
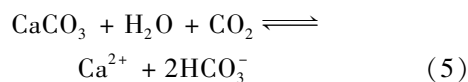
$\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $12.90 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), 而发生 Na^+ 交换吸附 Ca^{2+} , 消耗了部分 Na^+ 所致.

4.2 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 来源

Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 是北方岩溶地下水中主要的离子, 主要来源于碳酸盐岩溶解作用、石膏溶解作用和去白云岩化作用 [15]. 各种作用过程在地下水的径流过程中存在较大差异, 因而造成这 4 种离子在补给区、径流区、排泄区、深埋区具有明显不同.

4.2.1 碳酸盐岩溶解和石膏溶解

岩溶地下水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 主要来源于方解石和白云石的溶解 [15]. 但北方岩溶地下水较高的 SO_4^{2-} 质量浓度主要来源于石膏层的溶解 [29]. 3 种矿物的溶解方程如下:



由式 (7) 可知, 石膏溶解会造成岩溶地下水中 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 同步上升. 图 9 显示流域内岩溶地下水的 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 具有较好的正相关关系, 表明石膏溶解对 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 具有重要贡献. 除深埋区 2 个样点外, 补给区、径流区、排泄区和深埋区大部分样点均位于 $[\text{Ca}^{2+}] : [\text{SO}_4^{2-}] = 1$ 等当量线上方,

Ca^{2+} 浓度大于 SO_4^{2-} , 说明 Ca^{2+} 除来源于石膏溶解外, 还有一部分来源于方解石或白云石的溶解. 从补给区、到径流区、排泄区和深埋区样点越来越靠近 $[\text{Ca}^{2+}]:[\text{SO}_4^{2-}] = 1$ 等当量线, 表明 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 的浓度差值随着径流途径的增加而不断减少, 说明随着地下水的径流途径增长, 石膏溶解来源的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 所占比例不断增加. 图 9 显示深埋区有 2 个点位于 $[\text{Ca}^{2+}]:[\text{SO}_4^{2-}] = 1$ 等当量线下方, Ca^{2+} 浓度小于 SO_4^{2-} , 这可能是由于发生了 Ca-Na 阳离子交换反应, 水样中 Ca^{2+} 被大量消耗所导致.

由式(5)~(7)可见, 若 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 均来源于方解石、白云石和石膏的溶解, 4 种离子满足如下化学计量关系:

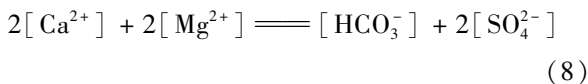


图 10 显示补给区、径流区和排泄区基本位于 $2[\text{Ca}^{2+}] + 2[\text{Mg}^{2+}] = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{SO}_4^{2-}]$ 的等当量线上, 即 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 的毫克当量等于 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 毫克当量, 说明在补给区、径流区和排泄区这 4 种离子主要来源于方解石、白云石和石膏的溶解的贡献. 但图 11 还显示径流区有 2 个水样和深埋区的大部分样点位于 $2[\text{Ca}^{2+}] + 2[\text{Mg}^{2+}] = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{SO}_4^{2-}]$ 的等当量线的下方, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度不足以平衡 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 浓度, 这可能是发生了 Ca-Na 阳离子交换反应造成地下水中部分 Ca^{2+} 被消耗.

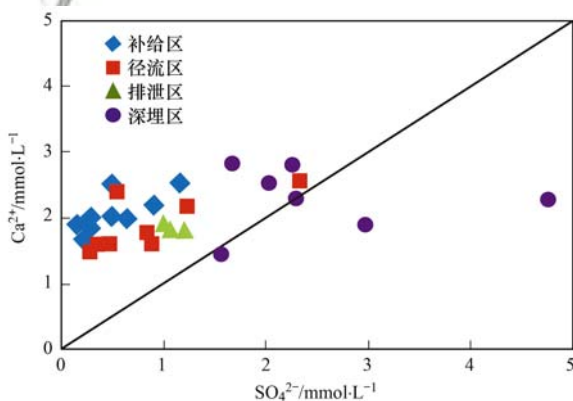


图 9 岩溶地下水中 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 相互变化关系

Fig. 9 Ca^{2+} vs. SO_4^{2-} in karst groundwater

4.2.2 去白云岩化作用

流域内奥陶系石膏夹层的大量溶解使得地下水中 Ca^{2+} 质量浓度显著增加. 由于 CaSO_4 的溶解度大于 CaCO_3 和 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 的溶解度, 在同离子效应的作用下, 导致 CaCO_3 发生沉淀以维持溶液中 Ca^{2+} 质量浓度平衡. 然而, 由于 CaCO_3 的沉淀从溶液中带走了部分 HCO_3^- , 为了维持溶液中的 HCO_3^-

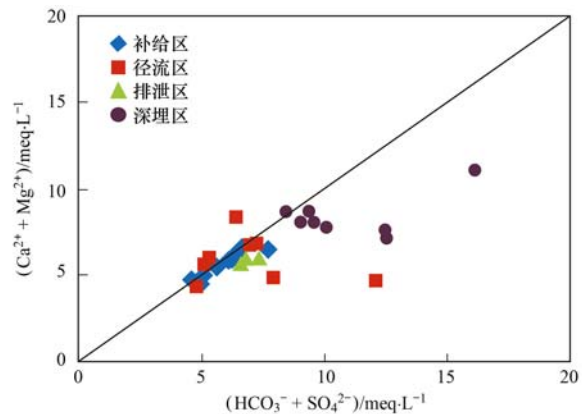
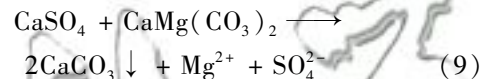


图 10 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 相互变化关系

Fig. 10 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ vs. $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ in karst groundwater

质量浓度平衡而造成白云石的溶解, 此过程即为去白云岩化作用^[5]. 其反应可简化下列方程式:



由式(9)可知, 去白云岩作用会造成岩溶地下水中的 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 质量浓度持续同步增加, 并不断有方解石晶体沉积生成, 从而使溶液中的 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 质量浓度保持不变. 因此, 虽然流域内地下水的白云石的饱和指数 (SID) 均大于 0, 由于去白云岩化作用仍可使白云石不断溶解. 这就很好地解释了从补给区、到径流区、到排泄区、到深埋区 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 质量浓度变化不明显, 而 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 质量浓度不断增加的现象[式(9)]. 图 11 中 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 具有较好的相关关系 ($R^2 = 0.7731$), 证实去白云岩化作用是 Mg^{2+} 来源的主要过程.

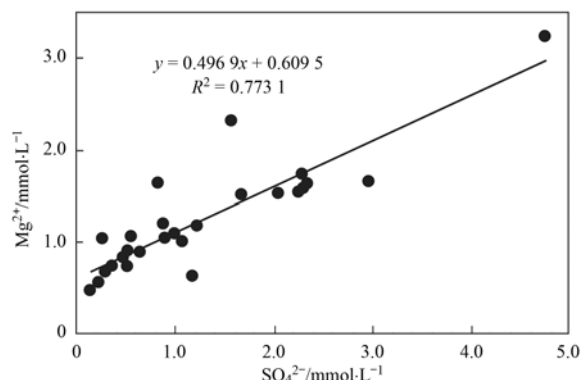


图 11 岩溶地下水中 SO_4^{2-} 与 Mg^{2+} 的关系

Fig. 11 SO_4^{2-} vs. Mg^{2+} in karst groundwater

5 结论

(1) 流域岩溶地下水化学受水文地质条件的控制, 水温、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度从补给区、到径流区、到排泄区、再到深埋区, 随着径流途径增加不断升高. 其中 Na^+ 、 Cl^-

和 SO_4^{2-} 质量浓度变化范围大, 最大值分别为最小值的 50、80 和 32 倍。而 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 变化范围相对较小, 最大值是最小值的 2~3 倍。在补给区、径流区中, Na^+ 和 Cl^- 质量浓度较小, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 为地下水中主要阴阳离子, 但在排泄区和深埋区, Cl^- 和 Na^+ 质量浓度明显超过了 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 质量浓度, 成为地下水中最主要的阴阳离子; 水化学类型由 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型转化为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型, 最终演变为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 和 $\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型。

(2) 方解石和白云石的饱和指数均大于 0, 这 2 种矿物均处于较强的过饱和状态。石膏的饱和指数均小于 0, 一直处于溶解状态。从补给区、到径流区、到排泄区、到深埋区, 石膏的饱和指数不断升高, 随着地下水的径流石膏层不断溶解。

(3) K^+ 、 Na^+ 和 Cl^- 在补给区的质量浓度低, 主要来源于大气降水; 在径流区、排泄区和深埋区中质量浓度高, 主要来源于盐岩的溶解。补给区、径流区、排泄区 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 主要来源于方解石、白云石的溶解的贡献; 深埋区石膏溶解和去白云化作用造成 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 质量浓度变化不明显, 而 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 质量浓度不断增加。

参考文献:

- [1] 梁永平, 韩行瑞, 时坚, 等. 鄂尔多斯盆地周边岩溶地下水系统模式及特点[J]. 地球学报, 2005, **26**(4): 365-369.
Liang Y P, Han X R, Shi J, *et al.* The karst groundwater system in the peripheral area of Ordos Basin: Its patterns and characteristics[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2005, **26**(4): 365-369.
- [2] 高宝玉, 梁永平, 王维泰. 柳林泉域岩溶水特点与地质背景条件分析[J]. 中国岩溶, 2008, **27**(3): 209-214.
Gao B Y, Liang Y P, Wang W T. Features of karst water and geologic background in Liulin spring basin[J]. Carsologica Sinica, 2008, **27**(3): 209-214.
- [3] 梁永平, 王维泰. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J]. 地球学报, 2010, **31**(6): 860-868.
Liang Y P, Wang W T. The division and characteristics of karst water systems in Northern China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2010, **31**(6): 860-868.
- [4] 臧红飞, 贾振兴, 郑秀清, 等. 柳林泉域岩溶水水化学及碳硫同位素特征[J]. 水电能源科学, 2013, **31**(12): 28-32.
Zang H F, Jia Z X, Zheng X Q, *et al.* Characteristics of hydrochemical and carbon-sulfur isotopic for karst water in Liulin spring Area[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2013, **31**(12): 28-32.
- [5] 杨敏, 卢耀如, 张凤娥, 等. 柳林泉域岩溶水化学演化及地球化学模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, **16**(1): 127-134.
Yang M, Lu Y R, Zhang F E, *et al.* Hydrochemical evolution and geochemical simulation of karst groundwater in Liulin springs[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, **16**(1): 127-131.
- [6] 马腾, 王国卿, 张庆保. 山西省柳林泉域地表径流渗漏量的灰色预测[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1997, **22**(1): 90-93.
Ma T, Wang G Q, Zhang Q B. A grey system approach to prediction of surface runoff Leakage: with an example from the Liulin karst water system in Shanxi province[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1997, **22**(1): 90-93.
- [7] 王数, 左强. 柳林泉区裂隙水流的数值模拟与分析[J]. 中国农业大学学报, 1997, (S2): 50-56.
Wang S, Zuo Q. The Numerical simulation and analysis of fractured flow in Liulin Spring area[J]. Journal of China Agricultural University, 1997, (S2): 50-56.
- [8] 王焰新, 马腾, 罗朝晖, 等. 山西柳林泉域水岩相互作用地球化学模拟[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1998, **23**(5): 519-522.
Wang Y X, Ma T, Luo Z H, *et al.* Geochemical modeling of water-rock interactions in the Liulin karst system, Shanxi Province[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1998, **23**(5): 519-522.
- [9] 吴吉春, 薛禹群, 黄海, 等. 山西柳林泉裂隙发育区溶质运移三维数值模拟[J]. 南京大学学报(自然科学), 2000, **36**(6): 728-734.
Wu J C, Xue Y Q, Huang H, *et al.* Three dimensional numerical simulation for solute transport in Fracture-developed areain Liulin springs, Shanxi Province[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2000, **36**(6): 728-734.
- [10] 吴吉春, 薛禹群, 黄海, 等. 山西柳林泉局部区域溶质运移二维数值模拟[J]. 水利学报, 2001, (8): 38-43.
Wu J C, Xue Y Q, Huang H, *et al.* Two dimensional numerical simulation of solute transport in Liulin spring local area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (8): 38-43.
- [11] 赵娟娟, 郝永红, 李华敏, 等. 基于地下水压力波传播过程的泉水流量灰色系统模型[J]. 水文地质工程地质, 2011, **38**(6): 1-7.
Zhao J J, Hao Y H, Li H M, *et al.* Grey model for karst spring discharge based on propagation process of groundwater pressure wave[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, **38**(6): 1-7.
- [12] 王雅捷, 王国卿, 郝永红, 等. 人类活动对柳林泉域水文过程影响研究[J]. 水文, 2011, **31**(3): 82-87.
Wang Y J, Wang G Q, Hao Y H, *et al.* Effect of human activities on hydrological process of Liulin springs[J]. Journal of China Hydrology, 2011, **31**(3): 82-87.
- [13] 梁永平, 王维泰, 赵春红, 等. 中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J]. 中国岩溶, 2013, **32**(1): 34-42.
Liang Y P, Wang W T, Zhao C H, *et al.* Variations of karst water and environmental problems in North China[J]. Carsologica Sinica, 2013, **32**(1): 34-42.
- [14] 郝永红, 王伟, 王国卿, 等. 气候变化及人类活动对中国北方岩溶泉的影响—以山西柳林泉为例[J]. 地球学报, 2009, **83**(1): 138-144.
Hao Y H, Wang W, Wang G Q, *et al.* Effects of climate change and human activities on the karstic springs in Northern China: A case study of the Liulin springs[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, **83**(1): 138-144.
- [15] 臧红飞. 柳林泉域岩溶地下水水文地球化学特征及演化规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
Zang H F. Hydrogeochemical characteristics and evolution rules of karst groundwater in the Liulin spring area[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [16] 臧红飞, 郑秀清, 张永波, 等. 柳林泉域岩溶水中 SO_4^{2-} 的来

- 源探讨[J]. 水文地质工程地质, 2017, **44**(1): 9-15.
- Zang H F, Zheng X Q, Zhuang Y B, *et al.* Source of SO_4^{2-} in karst groundwater in the Liulin spring area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, **44**(1): 9-15.
- [17] 贾振兴, 臧红飞, 郑秀清. 柳林泉域滞流区岩溶水的热源及其 Na^+ 、 Cl^- 来源探讨[J]. 中国岩溶, 2015, **34**(6): 570-576.
- Jia Z X, Zang H F, Zheng X Q. The origin of Na^+ , Cl^- and thermal source of karst groundwater in the stagnant area of Liulin spring basin [J]. *Carsologica Sinica*, 2015, **34**(6): 570-576.
- [18] 魏晓鸥, 郑秀清, 顾江海. 柳林泉域岩溶地下水水化学特征及演化分析[J]. 人民黄河, 2012, **34**(1): 72-74, 77.
- Wei X O, Zheng X Q, Gu J H. Analysis of hydrochemical characteristics and evolution of karstic groundwater in Liulin spring catchment[J]. *Yellow River*, 2012, **34**(1): 72-74, 77.
- [19] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{CDIC}$ 的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3220-3229.
- Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Influence of sulfuric acid to karst hydrochemical and $\delta^{13}\text{CDIC}$ in the upper and middle reaches of the Wujiang River[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3220-3229.
- [20] Pu J B, Yuan D X, Zhao H P, *et al.* Hydrochemical and PCO_2 variations of a cave stream in a subtropical karst area, Chongqing, SW China: Piston effects, dilution effects, soil CO_2 and buffer effects[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(9): 4039-4049.
- [21] Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Impact of sulfuric and nitric acids on carbonate dissolution, and the associated deficit of CO_2 uptake in the upper-middle reaches of the Wujiang River, China[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2017, **203**: 18-27.
- [22] 蒲俊兵. 重庆地区岩溶地下水溶解无机碳及其稳定同位素特征[J]. 中国岩溶, 2013, **32**(2): 123-132.
- Pu J B. Dissolved inorganic carbon and stable carbon isotope in karst subterranean streams in Chongqing, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, **32**(2): 123-132.
- [23] Li X D, Liu C Q, Harue M, *et al.* The use of environmental isotopic (C, Sr, S) and hydrochemical tracers to characterize anthropogenic effects on karst groundwater quality: A case study of the Shuicheng Basin, SW China[J]. *Applied Geochemistry*, 2010, **25**(12): 1924-1936.
- [24] 康志强, 袁道先, 常勇, 等. 岩溶碳汇的主控因子: 水循环[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, **41**(5): 1541-1547.
- Kang Z Q, Yuan D X, Chang Y, *et al.* The main controlling factor of karst carbon sequestration: about water cycle [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, **41**(5): 1542-1547.
- [25] 蒲俊兵, 袁道先, 蒋勇军, 等. 重庆岩溶地下水水文地球化学特征及环境意义[J]. 水科学进展, 2010, **21**(5): 628-636.
- Pu J B, Yuan D X, Jiang Y J, *et al.* Hydrogeochemistry and environmental meaning of Chongqing subterranean karst streams in China[J]. *Advances in Water Science*, 2010, **21**(5): 628-636.
- [26] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 人为活动对乌江中上游段岩溶地下水 $\delta^{13}\text{CDIC}$ 及碳汇效应的影响[J]. 第四纪研究, 2016, **36**(6): 1358-1369.
- Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* The impact of human activities to $\delta^{13}\text{CDIC}$ of karst groundwater and carbon sink in the upper and middle reaches of Wujiang River [J]. *Quaternary Science*, 2016, **36**(6): 1358-1369.
- [27] 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.
- [28] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 非岩溶水和硫酸参与溶蚀对湘南地区地下河流域岩溶碳汇通量的影响[J]. 地球科学进展, 2017, **32**(3): 307-318.
- Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* The influence of allogenic water and sulfuric acid to karst carbon sink in karst subterranean river in southern Hu'nan[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, **32**(3): 307-318.
- [29] 顾慰祖, 林曾平, 费光灿, 等. 环境同位素硫在大同南寒武-奥陶系地下水资源研究中的应用[J]. 水科学进展, 2000, **11**(1): 14-20.
- Gu W Z, Lin Z P, Fei G C, *et al.* The use of environmental sulphur isotopes in the study of the cambrian-ordovician aquifer system in the south of Datong[J]. *Advances in Water Science*, 2000, **11**(1): 14-20.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)