

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.6

第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征	张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)
北京城郊 PM _{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价	徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘永桥, 赵清 (2501)
上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响	高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)
天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析	徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)
典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征	赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)
垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征	余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)
天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析	马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)
霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测	杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)
宁东能源化工基地大气 PM _{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险	刘攀亮, 剧媛丽, 毛蒲萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)
2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)
1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型	刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)
北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析	王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)
江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征	徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)
亚热带稻区大气 NO ₂ 、HNO ₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降	欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)
长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源	汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)
基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建	梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)
青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征	罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)
鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征	刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)
三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析	江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)
水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响	范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪啟容 (2657)
水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示	张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)
崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价	周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)
云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析	张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)
鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征	陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)
合流制面源污染传输过程与污染源解析	房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)
强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果	段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)
水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响	邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)
巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源碳的响应	李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈慧 (2730)
金盆水库沉积物磷的来源及分布特征	毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)
水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征	王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)
不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系	王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)
表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律	朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)
针铁矿改性生物炭对砷吸附性能	朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)
改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制	史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)
厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性	闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)
污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除	王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)
碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响	王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)
活性污泥物理结构对呼吸过程的影响	郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)
好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性	廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)
快速城市化区河流温室内空气排放的时空特征及驱动因素	刘婷婷, 王晓峰, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)
生物炭对潜流人工湿地污染物去除及 NO ₃ -N 排放影响	邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 N ₂ O 排放的影响及其微生物机制	吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)
不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响	胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)
典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价	何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)
西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征	刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)
基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析	白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)
喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价	汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)
黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征	瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓑 (2904)
秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响	徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)
生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响	阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)
稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氨氧化过程	刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)
纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氨氧化速率的影响	伍玲丽, 张旭, 舒慧慧, 张丽, 司友斌 (2939)
农田沟道土壤中锰氨氧化 (Mn-ANAMMOX) 过程的探究	陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮环, 陈志浩 (2948)
污泥四要素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响	吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)
《环境科学》征订启事 (2929) 《环境科学》征稿简则 (2947) 信息 (2646, 2656, 2857)	

云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析

张勇^{1,2}, 郭纯青¹, 朱彦光¹, 于爽^{2*}

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541000; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 为研究荞麦地流域地下水的水化学特征及物质来源, 2017年7月在研究区共采集地下水的水样32个, 综合运用聚类分析、因子分析和路径模型分析等方法, 分析了荞麦地流域地下水水化学特征, 并定性和定量探讨了荞麦地流域地下水水化学的物质来源。结果表明, 研究区内水体整体呈弱碱性, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 NO_3^- 等主要阴阳离子具有较高的空间变异性。通过聚类分析可知, 研究区内地下水可分为两大类: A类和B类, 分别具有两个子集: A_1 、 A_2 、 B_1 和 B_2 , 并且从A类地下水到B类地下水化学类型开始变得复杂, A类地下水水化学类型均为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型, B_1 类地下水和 B_2 类地下水分别有 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型各3类。为进一步探讨地下水水化学的影响因素, 通过因子分析和路径模型分析可确定碳酸盐岩、人类活动、蒸发岩和硅酸盐岩是地下水的主要物质来源。其中人类活动的作用和 MgSO_4 型蒸发岩的溶解, 是形成以碳酸盐岩为地下水化学组分的主要来源, 同时具有多元地下水水化学特征的重要原因。

关键词: 地下水; 水化学特征; 影响因素; 物质来源; 多元统计分析

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2686-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201810229

Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province

ZHANG Yong^{1,2}, GUO Chun-qing¹, ZHU Yan-guang¹, YU Shi^{2*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541000, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resource/Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to study the hydrochemistry characteristics and material sources of groundwater in the Buckwheat basin, we collected 32 groundwater samples in the study area in July 2017. The chemical characteristics of groundwater were analyzed by cluster analysis, factor analysis, and path model analysis. Meanwhile, we qualitatively and quantitatively assessed the sources of groundwater hydrochemistry in the Buckwheat basin. The results showed that the groundwater in the study area was weakly alkaline, and the major ions such as Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- , and NO_3^- had high spatial variability. According to the clustering analysis, the groundwater in the study area can be divided into two categories, namely, class A and class B, and these have the following two subsets: A_1 , A_2 , B_1 , and B_2 . From A to B, the chemical types of groundwater become more complex. The hydrochemistry types of class A were all of the $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ type, while those of class B_1 were $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$, and $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$, and those of class B_2 were $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$, $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$. In order to further explore the influence factors of groundwater hydrochemistry, we determined that carbonate rocks, human activities, evaporite rocks, and silicate rocks were the main material sources of groundwater through factor analysis and path model analysis. Among all of the above factors, the dissolution of magnesium sulfate evaporite and the actions of human activities were found to be important reasons for the formation of carbonate rocks, which served as the main sources of groundwater chemical components and diverse hydrochemistry characteristics.

Key words: groundwater; hydrochemical characteristics; influencing factors; material sources; multivariate statistical analysis

随着社会经济的发展, 地表水已不能满足人们的生产、生活的需求, 因此地下水的使用量日益增长, 成为不可或缺的资源^[1~3]。近年来, 地下水资源不合理地开发利用已引起了一系列的生态环境问题。为了促进区域社会的可持续发展, 地下水的研究已成为国内外的研究热点^[4~6]。并且由于人类活动的加剧, 地下水被赋予更多的自然属性和社会属性^[7~9], 从而增加了区分地下水水化学所受自然因素和人类活动因素影响的难度, 地下水水化学的研究成为了水文地质及水文地球化学研究的热点^[10~12]。

目前, 地下水水化学特征的研究主要基于多元统计理论, 通过大量水化学数据集中提取有效信息, 采用一般统计分析方法研究地下水与多变量的作用关系, 揭示水化学指标之间存在的潜在联系, 划分不同地下水类型, 定性揭示不同地下水水化学的成因, 有助于识别对水文地球化学特征影响较大

收稿日期: 2018-10-29; 修订日期: 2019-01-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502302); 地质调查项目(DD20160305); 国家自然科学基金项目(41402324)

作者简介: 张勇(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水文地质与地球化学, E-mail: 1020689104@qq.com

* 通信作者, E-mail: yushi@karst.ac.cn

的主要因素^[13~16]。但单纯的定性分析对于拥有复杂地层岩性的研究单元不具有普遍的指导意义，并随着人类活动对水化学形成影响程度的加剧，单纯定性讨论作用于地下水水化学的主要因素，可能会在主观上弱化复杂岩性对研究区地下水水化学组成的影响，从而夸大人类活动对地下水水化学的影响^[17~20]。

荞麦地流域位于长江上游的金沙江流域，隶属于西南岩溶地区，是典型的碳酸盐岩区域，地下水是该区域主要的生产和生活供水水源。有关荞麦地流域的研究报道较少，地下水水化学特征的研究报道更为少见。大多报道是相关的水文地质和环境地质调查，可确定荞麦地流域属于覆盖性碳酸盐地层，上层大部分为峨眉山组的碎屑岩，其独特的地质条件造成了地下水系统和地表水系统水化学特征差异较大，加之人口分布不均衡，各地所受污染有所差异。本文分析了2017年荞麦地流域地下水中主要离子含量和水化学特征，采用定性和定量的方法相结合探讨了地下水的物质来源，通过确定人类活动对于地下水水化学的影响，以期对西南岩溶区地下水资源保护提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于云南省的东北部昭通市巧家县和鲁甸县境内，其地理坐标为东经103°00′00″~103°15′00″，北纬27°00′00″~27°10′00″之间，面积为458.06 km²，主要乡镇为巧家县的药山镇(图1)。本区地处云贵高原，金沙江河深切割地带，海拔高差大，地形地貌复杂，构成了典型的山区气候特点，属南亚热带到寒温带均有分布的高原立体气候，年平均气温为21.0℃，极端最高气温达44.4℃，极端最低气温-0.4℃。多年平均蒸发量为2470.4 mm，月最大蒸发量4月为569.2 mm，月最小蒸发量10月为69.3 mm。多年平均降雨量820.9 mm，近12年的年最大降雨量为1445.5 mm，最小降雨量为721.9 mm。区域内主要水系为荞麦地河，荞麦地河属于以礼河的一级支流，以礼河属金沙江的一级支流。荞麦地河在研究区内长约33 km，坡降36‰，谷底呈“U”型，切割深度500 m以上；其向南径流汇入以礼河，再向西汇入金沙江是典型的山区雨源型河流，由降雨和地下水补给。

研究区位于滇东高原北部，地处滇东高原向黔中山原以及四川盆地过渡的斜坡地带，地势由西向东呈阶梯状下降。最高山峰高程达4000余m，最低水面高程不足300 m，区内平均海拔约1700 m，相对高差50~300 m，地形坡度20°~60°。本区地貌



图1 研究区采样点示意
Fig. 1 Schematic diagram of sampling points in the study area

以构造侵蚀、侵蚀溶蚀高中山陡坡地貌为主，区内地层以古生界为主，主要为二叠系峨眉山玄武岩、石炭系碳酸盐岩、泥盆系碳酸盐岩夹碎屑岩。志留系、奥陶系地层分布相对较少，岩性为碳酸盐岩、碎屑岩，寒武纪分布广泛但含量较少，岩性为碳酸盐岩、碎屑岩和蒸发岩。东部碳酸盐岩与碎屑岩常呈条带状相间出露，中部、东部地区二叠系峨眉山玄武岩分布广泛。荞麦地流域碳酸盐岩分布面积达221.75 km²，约占流域总面积的48.41%，非碳酸盐岩分布面积236.31 km²，约占流域总面积的41.59%。根据研究区内地层岩性、地下水赋存条件及径流特征，可将地下水划分为麦坪(I)、海家沟(II)、龙潭大泉(III)和药山镇(IV)这4个系统(图1)。

荞麦地流域工业基础薄弱、厂矿少，以建材矿山为主。农业较为发达，其中主要农业以种草为主，氮肥、磷肥以及少量钾肥等化肥和农药滥用情况严重；由于每年所施用的化肥不可能完全被农作物吸收，剩余部分则残留于耕作层中^[21~23]。此外，研究区村落大多依水而建，人口众多，居住分散，

生活污水数量大、收集处理困难，城镇及近郊村镇生活污水大部分流入荞麦地河河段海家沟内。

2 样品采集与分析测试

于 2017 年 7 月对荞麦地流域进行研究，兼顾研究区内地层岩性条件，在荞麦地流域布设 32 个采样点(地下泉水出露点)进行系统采样。采样时，利用 GPS(全球定位系统，Global Position System)测定采样点的经纬度，使用法国 Ponsel 公司 ODEON 便携式水质仪现场测定水温(T)、pH、溶解氧(DO)和 TDS 等基本水质指标，采用德国 MercK 公司生产的碱度试剂盒现场滴定碱度，滴定精度为 $0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。采集水样过程中，使用 550 mL 已用去离子水处理干净的聚乙烯瓶采取水样，用水样充分润洗采样瓶 3 次，每次取 3 个平行样，采样中瓶内不留气泡。对于测定阳离子(K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+})的水样中加入 1:1 浓度 HNO_3 酸化至 $\text{pH} < 2$ ，测定阴离子(Cl^- 、 NO_3^- 、 F^- 和 SO_4^{2-})不作处理，所

采样品都密封低温遮光保存并快速带回实验室进行分析测定。

所采水样送至中国地质科学院岩溶地质研究所岩溶地质与资源环境测试中心进行分析，阳离子使用戴安 ICS1500 离子色谱仪依据地下水 GB/T 5750.6-2006 准则进行测定，阴离子用万通 MIC 离子色谱仪依据地下水 DZ/T 0064.51-93 准则进行测定。阴阳离子电荷平衡之差 $< 5\%$ 。

3 结果与分析

变异性特征可以通过变异系数进行表征，变量变幅越大，变异系数越大，说明地下水成分形成及演化过程复杂，反之亦然。较小的变异系数说明地下水形成机理稳定，受到影响因素较少^[21~23]。

荞麦地流域地下水水化学组成见表 1。荞麦地地下水 pH 在 5.57~8.28 之间，均值为 7.23，变异系数是 7.57%，整体上荞麦地地下水呈中性偏弱碱性，碳酸盐岩地区水体 pH 相较碎屑岩区变幅不大，

表 1 荞麦地地下水常规水化学参数统计结果/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Statistical results for conventional water chemical parameters of groundwater in buckwheat field/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

采样点	pH	温度/ $^{\circ}\text{C}$	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Si	DO	TDS
QMSA01	5.67	15.33	0.3	3.30	6.86	2.26	46.29	0.45	1.70	1.02	9.86	1.67	47.84
QMSA02	7.32	15.14	1.01	1.47	40.62	1.83	126.78	1.20	2.29	7.80	4.80	5.86	104.3
QMSA03	7.1	12.54	0.46	1.36	24.68	1.45	78.49	1.25	2.17	3.57	5.05	6.66	14.16
QMSA04	7.27	12.58	0.25	1.72	2.21	0.61	16.10	0.49	1.24	0.77	9.98	5.89	11.06
QMSA05	7.07	13.41	0.54	1.04	48.00	1.68	146.91	0.77	2.10	5.82	4.57	6.78	117.1
QMSA06	7.50	14.48	0.49	0.98	48.90	1.61	149.92	0.71	1.52	6.56	4.48	6.27	120.1
QMSA07	7.61	12.96	0.36	0.28	42.63	17.89	197.22	0.73	7.43	6.24	1.23	6.26	157.4
QMSA08	6.66	9.35	0.44	1.30	3.53	1.25	26.16	0.41	1.15	0.84	8.60	9.03	10.6
QMSA09	6.59	11.54	0.40	1.38	4.14	0.77	18.11	0.57	1.34	2.86	8.40	5.38	8.11
QMSA10	7.06	9.85	0.36	0.66	1.21	0.28	12.07	0.56	1.40	2.30	5.62	5.99	2.77
QMSA11	7.24	9.54	0.34	1.14	28.65	1.34	94.58	0.45	2.05	1.41	3.58	6.5	71.52
QMSA12	7.14	10.3	0.37	0.65	37.18	1.28	118.73	0.56	1.88	3.08	3.56	6.14	93.66
QMSA13	7.19	14.51	1.01	0.40	55.94	0.91	129.80	0.81	18.54	21.96	2.34	6.11	137.9
QMSA14	7.62	14.58	0.86	1.08	46.07	5.92	161.00	1.18	5.71	5.73	3.41	6.71	122.8
QMSB01	6.38	11.4	0.50	1.66	4.69	1.36	28.17	0.48	1.26	4.51	8.01	5.86	46.8
QMSB02	7.18	13.34	1.03	2.01	7.84	1.81	30.19	1.72	1.55	9.05	6.61	5.77	29.94
QMSB03	7.23	15.63	0.32	1.56	7.31	1.50	36.22	1.34	1.60	9.11	7.33	6.02	23.27
QMSB04	6.87	11.17	0.38	1.53	4.22	1.22	28.17	0.45	2.07	1.32	7.60	5.97	14.01
QMSB05	6.58	16.33	0.35	1.17	1.77	0.55	16.10	0.48	1.51	2.25	6.21	5.83	5.45
QMSB06	7.18	13.34	0.57	1.78	7.10	1.97	32.20	1.14	1.46	8.47	6.79	5.77	29.94
QMSB07	7.63	13.13	0.52	1.36	35.39	2.06	118.73	0.83	1.90	1.28	4.94	6.4	40.74
QMSB08	8.06	15.22	0.62	1.23	37.50	1.90	122.76	0.59	1.67	1.62	4.80	6.45	92.61
QMSB09	7.05	10.93	0.22	1.59	3.81	1.71	26.16	0.68	2.22	3.89	6.14	5.4	15.54
QMSB10	6.52	13.3	0.16	0.98	1.25	0.45	14.09	0.48	1.51	0.96	5.07	5.7	3.36
QMSB11	7.62	12.25	0.45	2.00	7.62	2.04	38.24	0.86	1.70	5.64	7.68	6.3	31.69
QMSB12	7.84	16.39	0.52	1.13	29.48	1.43	95.59	0.69	1.78	4.62	4.75	6.43	78.6
QMSB13	7.79	13.75	0.37	1.22	3.87	0.83	18.11	0.64	1.42	2.80	6.06	5.91	13.89
QMSB14	6.85	15.56	0.19	1.32	6.08	1.28	30.19	0.45	2.19	0.92	5.81	5.65	4.0
QMSB15	7.84	16.39	0.52	1.10	37.75	1.54	120.75	0.56	1.53	2.84	5.59	6.43	78.6
QMSB16	7.79	13.75	0.38	1.88	31.20	2.96	102.63	1.13	8.93	5.68	5.17	5.91	13.89
QMSB17	7.72	11.41	0.27	0.36	47.52	23.20	229.42	0.92	19.30	0.76	2.34	5.57	181.6
QMSC01	8.28	23.00	0.40	2.36	23.01	2.38	82.51	0.55	2.60	3.42	6.88	5.53	58.0
变异系数/%	7.57	20.01	48.20	44.70	85.86	172.33	77.17	43.04	133.30	94.73	36.38	17.00	91.70

pH 的最高值和最低值均出现于碎屑岩区, 并且地下水沿水流方向碎屑岩区地下水 pH 有上升趋势; 碳酸盐岩和碎屑岩区 DO 含量在 $1.67 \sim 9.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 $6.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 变异系数是 17.00%, 其中 QMSA01 点周围农田富集, 农药化肥的使用导致水质出现一定的臭味, 其 DO 的含量相对较低; Si 的含量在 $1.23 \sim 9.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 变异系数是 36.38%, 荞麦地流域地下水中 Si 的含量较高, 表征了硅酸盐岩风化的水化学特征。除 pH 值、DO 值和 Si 值外, 其他离子浓度的变异系数相对较大, 特别是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 和 TDS 浓度表现较为明显的空间变异性。

地下水中阳离子中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的空间变异性较大, 变异系数分别是 85.86% 和 172.33%, 离子浓度变化范围分别为 $1.21 \sim 55.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.28 \sim 23.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。一般来说, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐岩矿物的风化溶解^[1], 在荞麦地流域, 碳酸盐岩区的 Ca^{2+} 含量相较于碎屑岩区的含量要高, 而 Mg^{2+} 含量最高的两个点却出现在碳酸盐岩夹碎屑岩区和碎屑岩区, 并且 Mg^{2+} 的变异系数远大于 Ca^{2+} 的, 表明它们的主要来源存在差异。阴离子中 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 NO_3^- 的空间变异性较大, 它们的变异系数分别为 133.30%、77.17% 和 94.73%, 浓度变化范围分别为 $1.15 \sim 19.30$ 、 $12.07 \sim 229.42$ 和 $0.76 \sim 21.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。其中, SO_4^{2-} 主要源于硫化物的氧化^[3], 而研究区内工业并不发达, “废水、废渣、废气”等“三废”物质的排放量较小, 但荞麦地流域农药化肥滥用, 加之部分区域地层岩性不适合耕作, 部分区域含硫农药化肥的使用可能是导致荞麦地流域地下水 SO_4^{2-} 浓度变异性较高的原因; HCO_3^- 主要源自于碳酸盐岩矿物的溶解^[3], 荞麦地流域碳酸盐岩分布面积广泛, 碳酸盐岩区地下水中 HCO_3^- 的浓度相较于碎屑岩的要高; 而 NO_3^- 主要受到人类活动的影响, 特别是生活污水、动物和人类的排泄物及农业中化肥的使用是其主要影响因素^[24]。由于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 是区域地下水中的主要阴阳离子, 本身较高的空间变异性导致了 TDS 浓度空间变异性较高。

区内地下水水化学类型较复杂, 以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型为主。

4 讨论

4.1 聚类分析

本文使用 Heatmap 1.0 软件, 选用“Kendall's Tau Distance”(肯德尔距离)和“Maximum LinKage

Clustering”(最大连接度聚类), 对研究区所采地下水样进行 Q 型聚类分析^[24~25]。聚类是将数据分类到不同的类或者簇的过程, 同一个簇中的对象具有很强的相似性, 不同簇间的对象有很大的相异性, 从而可以对地下水进行定性分类。研究区地下水样的 pH、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、Si、DO 和 TDS 共 12 项化学组分进行 Q 型聚类分析, 32 组样品分为两个大类(A 类和 B 类), 4 个子集(A_1 、 A_2 、 B_1 和 B_2)。将 A_1 、 A_2 、 B_1 和 B_2 这 4 类地下水投影到图 1 中, 从中可以看出, A_1 、 A_2 、 B_1 和 B_2 这 4 类地下水在 4 个地下水系统中具体分布: A_1 类地下水样品数量是子集中最少的, 分布于研究区的西北侧溪沟上碎屑岩区的麦坪地下水系统中, 人类活动剧烈, 水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型; A_2 类地下水主要分布于地下水分水岭南部碳酸盐岩区的药山镇地下水系统中, 河流、溪沟、峡谷均有出露, 这些地区部分区域人口相对密集, 但由于土地贫瘠, 农业化程度低, 主要产业以畜牧为主, 水化学组分中 NO_3^- 离子浓度异常高, 其中 QMSA13 超过地下水环境质量标准推荐值(GB/T 14848-93)的 4 倍, A_2 类地下水水化学类型开始变得复杂; B_1 类地下水零星分布于研究区北部和东南部碎屑岩区的麦坪和海家沟地下水系统, 该区人烟稀少, 地下水离子组分质量浓度变幅不大, 地下水水化学类型却较为复杂, 有 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型这 3 类; B_2 类地下水主要分布于研究区水系的中游地区的麦坪和海家沟地下水系统中, 地下水分水岭的东部和北部, 该地区人类活动和农业化水平最高, 但人口分布不平衡, 从而导致农业活动程度具有较高的时空差异, 地下水水化学类型有 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 型这 3 类。

为更直观地反映聚类分析的结果, 将分组样品指标进行标准化分析并绘制相关热点图(图 2), A_1 、 A_2 、 B_1 和 B_2 类地下水的各水化学指标明显不同, A_2 类地下水各离子组分变化要远复杂于 A_1 类地下水; B_1 和 B_2 类地下水的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 NO_3^- 具有相似的离子浓度, 说明其具有相似的来源或水化学演化过程。此外, A_1 类地下水与 A_2 类地下水相比, A_1 类地下水具有较低的 pH 和较高的 Na^+ 、Si 浓度, 与同出露于碎屑岩地区的 B 类地下水相比, A_1 类地下水的 pH 和 Na^+ 浓度也具有相同的规律。此外, 与 B 类地下水相比, A 类水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 的浓度值较高。因此, 地下水水化学组分与研究区内地形地貌、地层岩性及生活污水的排放、农业活动等人类活动密切相关。

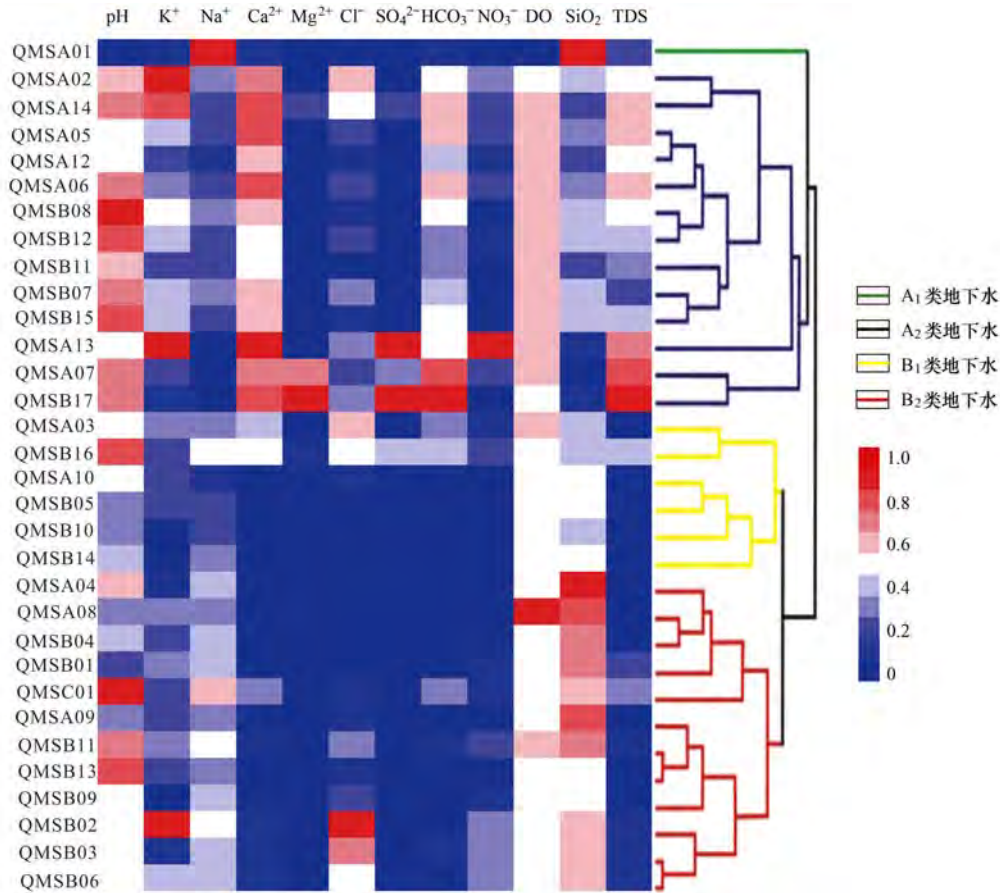


图2 研究区 A₁、A₂、B₁ 和 B₂ 类地下水水化学指标的热点图

Fig. 2 Heat map of groundwater hydrochemical indicators in the study area for A₁, A₂, B₁, and B₂

4.2 因子分析与路径模型分析

因子分析是以相关系数矩阵为基础的研究变量群的统计技术,通过主成分提取和最大方差正交旋转因子分析法,完成对地下水样的水化学参数的因子分析,可以找出变量中隐藏的具有代表性的因子^[26~30].此外,考虑研究区地层岩性的复杂性,采用水化学软件 PHREEQC 2.5.1 程序计算了所取水样的硬石膏(SIA)、碳酸钙(SIC)、白云石(SID)和石膏(SIG)饱和指数,并将其与地下水常规化学组

分相结合,进行相关的多元统计分析.通过对地下水 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、NO₃⁻、Si、SIA、SIC、SID 和 SIG 等 13 项主要水化学指标采用 SPSS 24.0 进行因子分析,根据地下水化学参数间的相关系数统计(表 2)可知, Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、SO₄²⁻、Si、石膏、碳酸钙和白云石饱和指数之间存在显著的相关性,说明水化学参数之间存在一定的信息交集,可以通过对数据降维进一步分析.

表2 研究区地下水各水化学参数间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between groundwater chemical parameters in the study area

	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Si	SIA	SIC	SID	SIG
K ⁺	1												
Na ⁺	-0.50	1											
Ca ²⁺	0.453 **	-0.478 **	1										
Mg ²⁺	-0.104	-0.383 *	0.409 *	1									
Cl ⁻	0.575 **	0.084	0.224	0.153	1								
SO ₄ ²⁻	0.196	-0.431 *	0.545 **	0.648 **	0.190	1							
HCO ₃ ⁻	0.292	-0.485 **	0.944 **	0.668 **	0.208	0.593 **	1						
NO ₃ ⁻	0.671 **	-0.167	0.382 *	-0.054	0.504 **	0.458 **	0.208	1					
SiO ₂	-0.249	0.758 **	-0.777 **	-0.508 **	-2.01	-0.565 **	-0.781 **	-0.314	1				
SIA	0.404 *	-0.343	0.916 **	0.536 **	0.334	0.716 **	0.904 **	0.438 *	-0.741 **	1			
SIC	0.386 *	-0.340	0.862 **	0.387 *	0.339	0.399 *	0.835 **	0.280	-0.676 **	0.851 **	1		
SID	0.345	-0.329	0.826 **	0.473 **	0.422 *	0.422 *	0.837 **	0.244	-0.667 **	0.841 **	0.991 **	1	
SIG	0.404 *	-0.343	0.915 **	0.538 **	0.717 **	0.717 **	0.904 **	0.438 *	-0.742 **	1.000 **	0.850 **	0.841 **	1

对研究区 32 组水样的水化学指标使用 KMO 和巴特利特球形度检验因子分析的指标,认为水化学指标满足因子分析的检验,进一步使用主成分方法提取具有代表性的公因子.经因子分析,提取得 4 个公因子,即 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 ,其累计贡献率近 88.91% (表 3),能够很好地反映水化学指标的

基本信息;并根据水样各公因子的因子得分研究各公因子对水样的影响程度.同时,结合 Q 型聚类分析的结果绘制地下水 4 个公因子地得分相关关系图 (图 3),该图能有效地反馈研究区地下水的水化学组成特征及演化规律.

第一主因子 F_1 的方差贡献率是 41.207%,其

表 3 研究区地下水各水化学指标的旋转因子载荷矩阵

变量	因子载荷				公共性方差
	F_1	F_2	F_3	F_4	
K ⁺	0.299	0.837	-0.171	-0.032	0.820
Na ⁺	-0.232	0.031	-0.190	0.893	0.889
Ca ²⁺	0.862	0.238	0.159	-0.333	0.935
Mg ²⁺	0.365	-0.179	0.844	-0.082	0.885
Cl ⁻	0.222	0.712	0.192	0.331	0.703
SO ₄ ²⁻	0.259	0.294	0.790	-0.323	0.882
HCO ₃ ⁻	0.856	0.061	0.377	-0.254	0.943
NO ₃ ⁻	0.076	0.896	0.106	-0.235	0.874
Si	-0.613	-0.143	-0.284	0.625	0.868
SIA	0.814	0.299	0.404	-0.164	0.942
SIC	0.951	0.175	0.075	-0.090	0.949
SID	0.938	0.139	0.157	-0.046	0.926
SIG	0.813	0.300	0.407	-0.164	0.943
方差贡献率/%	41.207	18.765	15.828	13.105	
累计贡献率/%	41.207	59.972	75.801	88.905	

中 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、硬石膏饱和指数、碳酸钙饱和指数、白云石饱和指数和石膏饱和指数的因子载荷较大,且与 F_1 均呈正相关关系(表 3). F_1 得分值相对高点主要为 A_2 类地下水水样点,而 A_1 、 B_1 和 B_2 类水样点所占 F_1 得分值较低甚至出现负值的情况,故 A_2 类地下水主要受到主因子 F_1 控制(图 3).该区域地下水点位于研究区的南部(图 1),为碳酸盐岩岩溶水的排泄区,区内基岩裸露,存在含无烟煤、生物碎屑或含白云质灰岩地层.因此, F_1 代表了碳酸盐岩矿物溶解过程对地下水化学组成的影响.

第二主因子 F_2 的方差贡献率是 18.765%,其中 K^+ 、 Cl^- 和 NO_3^- 的因子载荷较大,且与 F_2 均呈正相关(表 3). F_2 得分值变幅相较于其他主因子的大,较高的正得分值位于 B_2 类地下水分布区(图 3), B_2 区地下水中 K^+ 、 Cl^- 和 NO_3^- 浓度较高,这与人类活动和农业活动密集区域有关,生活垃圾、生活污水、动物及人类粪便等会引起 K^+ 、 Cl^- 和 NO_3^- 浓度的增高;此外,化肥和农药的大规模使用促进了农作物的生长,但也在一定程度导致水土出现硝酸盐污染,不被农作物吸收的氮肥将滞留于土壤中并通过农田排水和地表径流汇集到地下水中.最高的 NO_3^- 浓度出现于 A_2 类地下水水样中,而较低的负得分值也位于 A_2 类地下水分布区.在 A_2 区

中,部分地区荒无人烟,所受人为干扰小;部分人类活动密集区域受到地质条件的限制,农业活动程度不均,化肥和农药的使用量随着不均,人口分布不均农业化高低程度造成了地下水中 K^+ 、 Cl^- 和 NO_3^- 浓度变幅较大.因此, F_2 代表了生活污水的排放、农业活动等人类活动对地下水水化学组分的影响.

第三主因子 F_3 的方差贡献率是 15.828%,其中 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 的因子载荷较大,与 F_3 均呈正相关(表 3). F_3 得分值最高点出现 B_2 类地下水水样,而 A_1 、 A_2 和 B_1 类地下水水样均存在较高的 F_3 得分值,这表明 A_1 、 A_2 、 B_1 和 B_2 类地下水具有相同的来源或演化过程,为进一步研究第三主因子 F_3 对 A_1 、 A_2 、 B_1 和 B_2 类地下水演化过程的作用,采用路径模型分析^[31]测量变量间因果关系的强弱并绘制 PLS-PM 图(图 4),进行各主因子之间因果关系路径的探究.从中可知第三主因子 F_3 对第一主因子 F_1 的促进作用为 0.632,对第二主因子 F_2 和第四主因子 F_4 的抑制作用分别为 -0.043 4 和 -0.245 8.由上文分析可知,第一主因子代表碳酸盐岩的风化溶解,第二主因子代表生活污水的排放、农药化肥的使用等人类活动;而第四主因子 F_4 的方差贡献率是 13.105%,其中 Na^+ 和 Si 的因子载荷较大,且与 F_4 均呈正相关(表 3), F_4 较高得

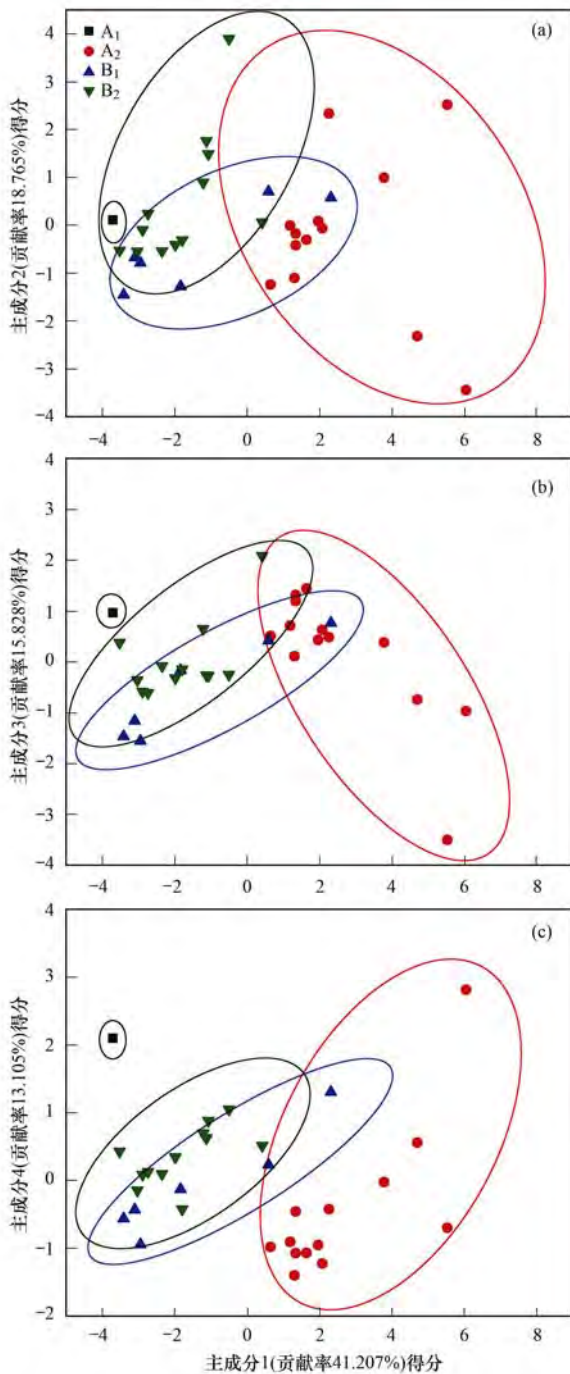


图3 主因子得分关系

Fig. 3 Main factor score relationship diagram

分值主要位于 B_2 类和少数 A_2 、 B_1 类地下水水样中, 该类样品主要分布于研究区河流中游和上游位置, 地层含有二叠系的玄武岩、凝灰岩, 局部夹杂碳酸岩. 因此, 主因子 F_4 代表硅酸盐岩如钠长石的溶解对地下水水化学组分的影响. 第三主因子 F_3 对于 4 类地下水都有影响作用, 表明其具有广泛性, 与之较大因子载荷的 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 离子和 HCO_3^- 、SIA、SIG 具有较强的相关性(表 2), 表征 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 具有相同的物质来源. 在地形地貌、径流等地理因素作用下形成 4 个地下水系

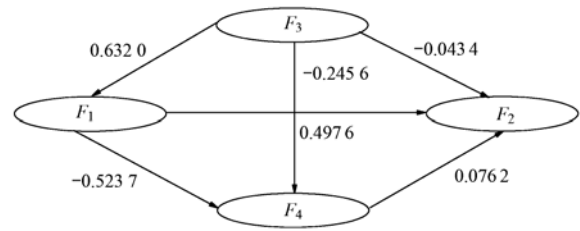


图4 各主因子 PLS-PM 网络

Fig. 4 Network diagram of each main factor PLS-PM

统其地下水水化学组分上具有一定的相似性, 但水化学类型差异较大, 造成这一原因的不仅仅是人类活动作用; 例如 B_1 类地下水具有复杂地下水类型, B_1 类地下水地区人类活动作用小, 可以认为是第三主因子 F_3 在碎屑岩区的作用程度不同, 导致这一情况的发生. 研究区地层以古生界为主, 寒武纪是世界上 $MgSO_4$ 型蒸发岩形成的重要时期^[32]. 伴随着 $MgSO_4$ 型蒸发岩的溶解, 碳酸盐岩的溶解速度加快, 从而导致地下水体中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 等离子浓度的增加; 并且岩石的风化溶解速率具有一定的顺序: 蒸发岩风化溶解速率 > 碳酸盐岩类岩石 > 硅酸盐岩类岩石, 而 $MgSO_4$ 型蒸发岩的溶解更是会加速碳酸盐岩类岩石的溶解, 对硅酸盐岩类岩石的溶解起抑制作用^[33]; 研究区内, 人类活动在空间分布上具有一定的差异性, 并且生活污水的排放、农业活动等人类活动容易导致土壤的酸化和地下水 Ca^{2+} 、 NO_3^- 等离子浓度的增加, 与蒸发岩的风化溶解影响不大^[34]. 因此, 第三主因子 F_3 代表了 $MgSO_4$ 型蒸发岩的溶解对地下水水化学组分的影响, 符合养麦地流域的地质特点, 也与聚类分析、因子分析和路径模型分析的结果较为一致.

4.3 研究区地下水水化学的多重影响因素

为进一步定量了解人类活动对于地下水水化学的影响, 笔者基于表 3 的数据, 通过因子分析对地下水中离子的来源进行估算^[35-37], 将 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 粗略地定义为碳酸盐岩的溶解、生活污水的排放、农业活动等人类活动的影响、蒸发岩的溶解和硅酸盐岩的溶解, 从而可以计算三大岩石的风化和人类活动的影响对河水中主离子的贡献. 结果为: 碳酸盐岩对 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 和 Si 的贡献率分别是 10.9%、6.1%、79.4%、15.1%、7.0%、7.6%、77.7%、0.7% 和 43.3%, 人类活动对 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 和 Si 的贡献率分别是 85.4%、0.1%、6.1%、3.6%、72.1%、9.8%、0.4%、91.7% 和 2.4%, 蒸发岩对 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 和 Si 的贡献率分别是 3.6%、4.1%、2.7%、80.6%、

5.2%、70.8%、15.1%、1.28% 和 9.3%，硅酸盐岩对 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 和 Si 的贡献率分别是 0.1%、89.8%、11.8%、0.8%、15.6%、11.8%、6.8%、6.3% 和 45.0%，并根据计算结果绘制离子的物质来源图(图 5)。 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 主要来自于碳酸盐岩的风化溶解； K^+ 、 Cl^- 和 NO_3^- 主要受到人类活动的影响； Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 主要来自蒸发岩的风化溶解； Na^+ 主要受硅酸盐岩的控制；此分析结果与前文所得的结论基本一致。而 Mg^{2+} 和 Si 一定程度上受到碳酸盐岩的影响， Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 也在一定的程度上受到硅酸盐岩的控制，这与研究区的地层岩性有着极大的关系。研究区内有大面积的碳酸盐岩分布，但其受二叠系、志留系、奥陶系和寒武系地层的影响白岩石含量较高，加之与 $MgSO_4$ 型蒸发岩的混合作用直接导致了地下水水体中 Mg^{2+} 与 HCO_3^- 所具有的较高的相关性(表 2)；碳酸盐岩沉积形成过程中容易混入非碳酸盐岩的自生矿物或夹层，如石膏、石英及非碳酸盐岩类生物碎屑等，其在一定程度影响地下水水体的水化学性质，导致水体中所具有较高的硬石膏和石膏饱和指数的因子载荷(表 3)。在碎屑岩地区中，陆源碎屑岩和火山碎屑岩主要由碎屑物质和胶结物组成，碎屑物质成分复杂，各类岩石成分都有，胶结物中富含硅质矿物和硫酸盐矿物，丰富了地下水中的物质来源；碎屑物质和胶结物具有很好的过滤性，部分碎屑岩对于人类活动的影响具有一定的净化作用，加剧了地下水中 K^+ 、 Cl^- 和 NO_3^- 浓度的空间变异性。

结合聚类分析、因子分析和路径模型分析的结果可知，任何区域的地下水都不可能只受单一因素

的控制，水中化学组成的形成相对复杂，一种或多种因子起主导作用。对云南荞麦地地下水来说，复杂多变的地层岩性造成了水体的多样性，在人类活动的影响下进一步加剧了水体的空间变异性，并随研究区地下水的赋存、径流条件、人类活动特征规律性变化。

5 结论

(1) 荞麦地流域地下水 pH 值均值为 7.23，整体呈弱碱性。流域内，地下水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 和 TDS 浓度具有较高的空间变异性，其变异系数分别为 85.86%、172.33%、133.30%、77.17%、94.73% 和 91.70%。

(2) 采用 Q 型聚类分析对研究区地下水进行分类，可将地下水划分为 4 类 A_1 、 A_2 、 B_1 和 B_2 ，从 A 类地下水到 B 类地下水其水化学类型有所差异，A 类地下水水化学类型为 HCO_3 -Ca 型， B_1 类地下水水化学有 HCO_3 -Ca 型、 HCO_3 -Na·Ca 型和 HCO_3 -Na·Ca·Mg 型 3 类， B_2 类地下水有 HCO_3 -Ca 型、 HCO_3 -Ca·Mg 型和 HCO_3 -Na·Ca 型 3 类，将 4 类地下水点投影至研究区内，发现地下水水化学组分及水化学类型受到了地理因素、地层岩性和人类活动的单独或混合作用。

(3) 为进一步确定地下水水化学的物质来源，采用因子分析提取了 4 个主因子 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 ，能解释研究区约 88.91% 的水化学数据，识别出地下水化学组分受到碳酸盐岩(方差贡献率为 41.207%)、人类活动(方差贡献率为 18.765%)、蒸发岩(方差贡献率为 15.828%)和硅酸盐岩(方差贡献率为 13.105%)等控制因素的影响；并采用路径模型分析确定各主因子的影响关系，其中 $MgSO_4$ 型蒸发岩的存在加速了碳酸盐岩的风化溶解，同时在一定程度上抑制了硅酸盐岩有的风化溶解。

(4) 通过进一步估算地下水组分的物质来源，识别出碳酸盐岩是荞麦地流域的主要物质来源， $MgSO_4$ 型蒸发岩的溶解和人类活动造成了地下水化学组分的多元化，这也和聚类分析、因子分析和路径模型分析的结果较一致，弥补了定性分析在复杂地质条件区域无法分析水体中离子浓度具有高空间变异性的不足，对于区域地下水的开发利用具有一定的指导性。

参考文献:

- [1] 杨平恒, 袁道先, 叶许春, 等. 降雨期间岩溶地下水化学组分的来源及运移路径[J]. 科学通报, 2013, 58(18): 1755-1763.
- Yang P H, Yuan D X, Ye X C, et al. Sources and migration path of chemical compositions in a Karst groundwater system

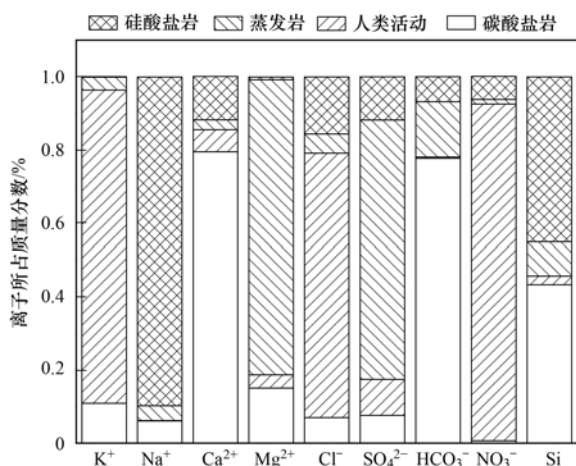


图 5 来自碳酸盐岩、人类活动、蒸发岩和硅酸盐岩离子比例

Fig. 5 A scale diagram of carbonate rock, human activity, evaporite, and silicate rock ions

- during rainfall events[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58** (20): 2488-2496.
- [2] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题[J]. 世界科技研究与发展, 1997, **19**(5): 41-43.
- Yuan D X. On the environmental and geologic problems of karst mountains and rocks in the south - west China[J]. World Sci-Tech R&D, 1997, **19**(5): 41-43.
- [3] 蒋忠诚, 夏日元, 时坚, 等. 西南岩溶地下水资源开发利用效应与潜力分析[J]. 地球学报, 2006, **27**(5): 495-502.
- Jiang Z C, Xia R Y, Shi J, *et al.* The Application effects and exploitation capacity of Karst underground water resources in Southwest China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, **27**(5): 495-502.
- [4] 袁道先. 现代岩溶学 and 全球变化研究[J]. 地学前缘, 1997, **4**(1-2): 17-25.
- Yuan D X. Modern karstology and global change study [J]. Earth Science Frontiers, 1997, **4**(1-2): 17-25.
- [5] Dar F A, Perrin J, Ahmed S, *et al.* Review: Carbonate aquifers and future perspectives of Karst hydrogeology in India [J]. Hydrogeology Journal, 2014, **22**(7): 1493-1506.
- [6] Ahmed A A. Using Generic and Pesticide DRASTIC GIS-based models for vulnerability assessment of the Quaternary aquifer at Sohag, Egypt[J]. Hydrogeology Journal, 2009, **17**(5): 1203-1217.
- [7] Apambire W B, Boyle D R, Michel F A. Geochemistry, genesis, and health implications of fluoriferous groundwaters in the upper regions of Ghana[J]. Environmental Geology, 1997, **33**(1): 13-24.
- [8] Kundu N, Panigrahi M, Tripathy S, *et al.* Geochemical appraisal of fluoride contamination of groundwater in the Nayagarh District of Orissa, India[J]. Environmental Geology, 2001, **41** (3-4): 451-460.
- [9] Noori R, Sabahi M S, Karbassi A R, *et al.* Multivariate statistical analysis of surface water quality based on correlations and variations in the data set[J]. Desalination, 2010, **260**(1-3): 129-136.
- [10] Szabó N P. Hydraulic conductivity explored by factor analysis of borehole geophysical data[J]. Hydrogeology Journal, 2015, **23** (5): 869-882.
- [11] Boukhemacha M A, Gogu C R, Serpescu I, *et al.* A hydrogeological conceptual approach to study urban groundwater flow in Bucharest city, Romania [J]. Hydrogeology Journal, 2015, **23**(3): 437-450.
- [12] Stollenwerk K G. Geochemical interactions between constituents in acidic groundwater and alluvium in an aquifer near Globe, Arizona[J]. Applied Geochemistry, 1994, **9**(4): 353-369.
- [13] 慈龙骏. 我国荒漠化发生机理与防治对策[J]. 第四纪研究, 1998, **18**(2): 97-107.
- Ci L J. Mechanism of desertification and sustainable strategies to combat desertification in China[J]. Quaternary Sciences, 1998, **18**(2): 97-107.
- [14] 袁道先. 地质作用与碳循环研究的回顾和展望[J]. 科学通报, 2011, **56**(26): 2157.
- [15] Salama R B, Otto C J, Fitzpatrick R W. Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization [J]. Hydrogeology Journal, 1999, **7**(1): 46-64.
- [16] Coleman M L, Shepherd T J, Durham J J, *et al.* Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis [J]. Analytical Chemistry, 1982, **54**(6): 993-995.
- [17] Adams S, Titus R, Pietersen K, *et al.* Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa[J]. Journal of Hydrology, 2001, **241**(1-2): 91-103.
- [18] 李韵珠, 石元春. 土壤和地下水化学类型和垂向主组分的动态——以河北曲周盐渍土区为例[J]. 土壤学报, 2003, **40** (4): 481-489.
- Li Y Z, Shi Y C. Dynamics of chemical types and main components in vertical profile of soil and groundwater salt-affected soil area in QuZhou, HeBei[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, **40**(4): 481-489.
- [19] 孟利, 左锐, 王金生, 等. 基于 PCA-APCS-MLR 的地下水污染源定量解析研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(10): 3773-3786.
- Meng L, Zuo R, Wang J S, *et al.* Quantitative source apportionment of groundwater pollution based on PCA-APCS-MLR[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(10): 3773-3786.
- [20] Harrington G A, Cook P G, Herczeg A L. Spatial and temporal variability of ground water recharge in central Australia: a tracer approach[J]. Ground Water, 2002, **40**(5): 518-527.
- [21] Salinas-Garcia J R, Hons F M, Matocha J E, *et al.* Soil carbon and nitrogen dynamics as affected by long-term tillage and nitrogen fertilization[J]. Biology and Fertility of Soils, 1997, **25** (2): 182-188.
- [22] Blackmer A M, Green C J. Nitrogen turnover by sequential immobilization and mineralization during residue decomposition in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, **59** (4): 1052-1058.
- [23] De Montety V, Martin J B, Cohen M J, *et al.* Influence of diel biogeochemical cycles on carbonate equilibrium in a karst river [J]. Chemical Geology, 2011, **283**(1-2): 31-43.
- [24] Yidana S M. Groundwater classification using multivariate statistical methods: Birimian Basin, Ghana [J]. Journal of Environmental Engineering, 2010, **136**(12): 1379-1388.
- [25] Omo-Irabor O O, Olobaniyi S B, Oduyemi K, *et al.* Surface and groundwater water quality assessment using multivariate analytical methods: A case study of the Western Niger Delta, Nigeria[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2008, **33**(8-13): 666-673.
- [26] Hopke P F, Gladney E S, Gordon G E, *et al.* The use of multivariate analysis to identify sources of selected elements in the Boston urban aerosol [J]. Atmospheric Environment (1967), 1976, **10**(11): 1015-1025.
- [27] 马荣, 石建省. 模糊因子分析在地下水污染评估中的应用——以河南省洛阳市为例[J]. 地球学报, 2011, **32**(5): 611-622.
- Ma R, Shi J S. Assessing groundwater pollution using fuzzy factor analysis method: A case study of Luoyang City in Henan Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, **32**(5): 611-622.
- [28] 陈小兵, 周宏飞, 张群. 地下水资源补给量的因子分析[J]. 干旱区资源与环境, 2004, **18**(5): 43-46.
- Chen X B, Zhou H F, Zhang Q. Factor analysis on groundwater recharge[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, **18**(5): 43-46.
- [29] 崔健, 都基众, 马宏伟, 等. 基于因子分析的浑河冲洪积扇地浅层地下水水质影响因素辨析[J]. 中国农村水利水电, 2011, (7): 45-48, 51.
- Cui J, Du J Z, Ma H W, *et al.* Distinguishing significant factors for shallow groundwater quality in the Hunhe River alluvial fan based on factor analysis [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011, (7): 45-48, 51.
- [30] Montcoudiol N, Molson J, Lemieux J M. Groundwater

- geochemistry of the Outaouais Region (Québec, Canada): a regional-scale study [J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, **23** (2): 377-396.
- [31] 张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 等. 广西官村岩溶溪流中生物地球化学控制的 DIC 和 NO_3^- 昼夜变化研究 [J]. *地质学报*, 2016, **90** (8): 1965-1977.
- Zhang T, Pu J B, Yuan D X, *et al.* Biogeochemical controls on daily cycling of DIC and NO_3^- of Guancun karst stream in Guangxi [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, **90** (8): 1965-1977.
- [32] 程怀德, 马海州, 山发寿, 等. 基于相化学研究老挝万象钾镁盐矿床形成的机制 [J]. *地球学报*, 2010, **31** (2): 194-202.
- Cheng H D, Ma H Z, Shan F S, *et al.* A Study of the formation mechanism of the Vientiane potash deposit based on phase chemistry [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, **31** (2): 194-202.
- [33] Viers J, Oliva P, Dandurand J L, *et al.* 7.6-chemical weathering rates, CO_2 consumption, and control parameters deduced from the chemical composition of rivers [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014, **7**: 175-194.
- [34] 洪涛, 谢运球, 喻崎雯, 等. 乌蒙山重点地区地下水水化学特征及成因分析 [J]. *地球与环境*, 2016, **44** (1): 11-18.
- Hong T, Xie Y Q, Yu Q W, *et al.* Hydrochemical characteristics study and genetic analysis of groundwater in a key region of the Wumeng Mountain, Southwestern China [J]. *Earth and Environment*, 2016, **44** (1): 11-18.
- [35] 钟金先, 李成, 刘兆鑫, 等. 基岩裂隙水水化学特征的聚类分析——以乌蒙山重点地区为例 [J]. *四川环境*, 2017, **36** (5): 53-58.
- Zhong J X, Li C, Liu Z X, *et al.* Cluster analysis of chemical characteristics of bedrock fissure water——Taking the Wu Mengshan key areas for example [J]. *Sichuan Environment*, 2017, **36** (5): 53-58.
- [36] 李甜甜, 季宏兵, 江用彬, 等. 赣江上游河流水化学的影响因素及 DIC 来源 [J]. *地理学报*, 2007, **62** (7): 764-775.
- Li T T, Ji H B, Jiang Y B, *et al.* Hydro-geochemistry and the sources of DIC in the upriver tributaries of the Ganjiang River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, **62** (7): 764-775.
- [37] 张春来, 曹建华, 刘晓华, 等. 河水化学离子成因及影响因素的因子分析探讨 [J]. *广西师范大学学报 (自然科学版)*, 2013, **31** (2): 123-132.
- Zhang C L, Cao J H, Liu X H, *et al.* Origin and influencing factors of hydrochemical of river ion by factor analysis [J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2013, **31** (2): 123-132.



CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jinpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹³ C-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonoxidation	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)