

# 贵州省三岔河流域水化学特征及其控制因素

侯祎亮 安艳玲 吴起鑫 吴旌滔 黄娟 段少琼 刘霄

(1. 贵州大学喀斯特环境与地质灾害防治重点实验室, 贵州贵阳 550025;

2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550025;

3. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550002)

**【摘要】**对乌江源区三岔河流域枯水期和丰水期河水样品离子浓度及组成特征分析表明, 河水主要的阴阳离子分别是  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$ , 分别占到总阴离子量的 55% 和总阳离子量的 70%, 与喀斯特地区流域相似。主要离子的时空分布的对比分析表明,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$  枯水期浓度略高于丰水期, 而  $\text{K}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  两期浓度变化相对较小; 空间分布的多样化, 反映了不同小流域在地质背景、生态环境、人为活动等方面的差异对河水离子的影响。通过 Gibbs 图分析表明, 研究区河水水化学主要受到岩石风化的影响, 通过阴阳离子三角图分析表明, 研究区河水水化学主要受到碳酸岩盐的影响, 并且硫酸广泛参与到岩石风化中, 人为活动对流域水化学组成也有一定影响。

**【关键词】** 三岔河; 水化学; 离子来源; 影响因素

**【中图分类号】** X36 **【文献标识码】** A

**【文章编号】** 1004-8227(2016)07-1121-08

**【DOI】** 10.11870/cjlyzyyhj201607014

河流是全球水循环的重要组成部分, 可以携带包括岩石、大气、土壤以及人为活动输入的大量物质, 因此河水的水化学特征可以反应河流流经区域的地质背景、大气沉降、土地利用和人为活动等重要因素对流域的影响, 并可估算流域的侵蚀风化情况。国内外学者对水体水化学进行了大量研究, 包括流域、湖泊、水库、湿地、地下水降水等。对西南喀斯特地区流域的研究表明, 河水中主要离子来源于碳酸岩盐风化, 受人为活动和大气降水影响较小, 并且硫酸广泛参与到岩石风化的过程中。

三岔河流域属于长江流域乌江水系上游河段, 是乌江的正源, 也是黔中地区重要的水源地, 黔中水利枢纽便设址在三岔河流域中段。三岔河流域地处云贵高原喀斯特地区, 喀斯特地区生态环境具有脆弱性和难恢复的特征, 不断增加

的人口破坏了喀斯特地区的生态环境, 造成了严重的石漠化及水土流失, 强烈影响和制约着喀斯特地区的经济发展和生态恢复。研究显示, 三岔河流域岩石风化率为  $120.2 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 侵蚀作用明显。本研究试图通过对三岔河流域不同时期(丰、枯水期)地表水中水化学元素含量进行测定, 分析河水主要元素的来源及水化学特征, 为三岔河流域、黔中水利枢纽工程的管理和保护, 提供流域水化学的基本信息和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

三岔河流域地处云贵高原东部  $104^{\circ} 18' 06'' \text{E}$ 、 $26^{\circ} 1' 10'' \text{N}$  之间, 全长 325.6 km, 自东向西落差 1300 m, 平均比降为 4‰。流域面积为  $7264 \text{ km}^2$ , 其中 95% 为山地和丘陵 [15]。三岔河发源于贵州省西部乌蒙山, 流经黔西南及黔中地区, 在黔西、清镇、织金 3 县交界处与六冲河汇合形成鸭池河。流域大部分地区属于亚热带季风气候区, 多年平均气温  $12^{\circ} \text{C} \sim 16^{\circ} \text{C}$ , 年均降水量 1300 mm, 且年内干湿季节明显, 75% 的降水量集中在 5~10 月, 11~翌年 4 月的降水量明显减少。流域平均径流量为由于降水在时间上分布不均, 径流在一个水文年内变化较大, 其中丰水期径流量占全年径流量的 80% 以上, 而枯水期只占到 20% 左右。三岔河是典型的喀斯特地区小流域, 流域内主要分布有二叠系、三叠系碳酸盐岩、含煤岩组及玄武岩, 具体地质背景见图 1。

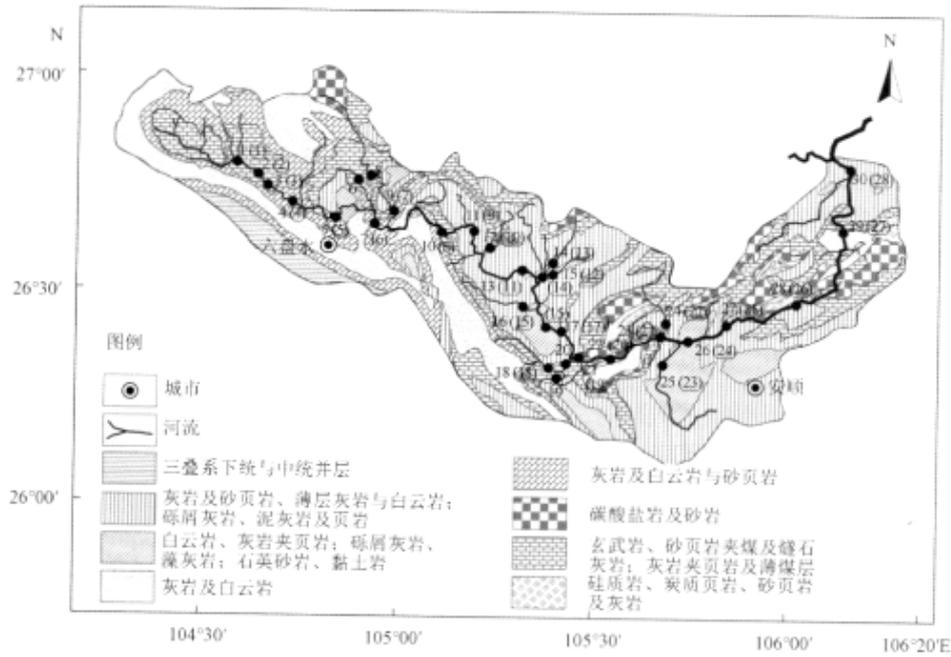


图1 三岔河流域采样点及地质背景

Fig.1 Geological Map of the Sanchahe River Basin and Sampling Locations

## 1.2 样品采集与分析

本次研究分别于2014年2月、8月采集三岔河枯水期、丰水期河水样品共58个,其中枯水期样品30个,丰水期样品28个,所有采样点覆盖全流域干流及主要支流,具体采样点见图1(括号内为丰水期采样点)。采样时现场记录采样点的GPS、海拔等信息,并用WTW便携式多参数测试仪现场测定河水水温(T)、pH、溶解氧(DO)、电导(EC)值。河水 $\text{HCO}_3^-$ 值用浓度为0.01mol/L的HCl现场平行滴定两次,控制误差在5%以内。采集的水样当天用0.45 $\mu\text{m}$ 的Millipore滤膜进行过滤并分装在高密度聚乙烯瓶中,用于测定阳离子的样品立即加入超纯盐酸酸化至 $\text{pH}<2$ 。河水样品中阳离子和阴离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ )含量用离子色谱仪(DIONEX, ICS-1100, IonPacAG-19阴离子柱, IonPacCS-12A阳离子柱)分别分析测定,测试精度为 $\pm 5\%$ 。 $\text{SiO}_2$ 测定采用钼酸黄光度法,于410nm波长处用分光光度计测定。所有实验过程中均插入空白以及间隔5个样品插入标准样品与平行样品,确保实验数据准确可靠。

## 2 结果与分析

### 2.1 河水水化学总体特征

两期河水样品主要离子见表1。三岔河流域两期河水样品pH为6.9~10.2,平均值为7.8,呈弱碱性,且枯水期比丰水期大,这可能是由于丰水期大量酸性降雨引起河水pH减小。枯水期河水温度为 $9.1^\circ\text{C}$ ~ $15.5^\circ\text{C}$ ,丰水期为 $16.2^\circ\text{C}$ ~ $24.7^\circ\text{C}$ ,两期平均为 $15.6^\circ\text{C}$ 。两期河水电导率为320~828 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,平均值为467 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。两期河水总溶解性固体(TDS)为241.27~628.39 $\text{mg}/\text{L}$ ,平均值为340.46 $\text{mg}/\text{L}$ ,高于世界河流平均值100 $\text{mg}/\text{L}$ [16],反映了研究区强烈的化学侵蚀作用。两期河水样品的无机电荷平衡NICB[NICB=(TZ+ - TZ)/TZ+]较好,水体中的总溶解性阳离子(TZ+=2Ca<sup>2+</sup>+2Mg<sup>2+</sup>+Na、IC)与总溶解性阴离子(TZ、2SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>+NO<sub>3</sub>+CT+HCCV)电荷基本平衡。

表 1 三岔河流域河水样品主要离子浓度

Tab.1 Major ionic Compositions of the River Water Samples from Sanchahe River Basin

| 项目                             | 枯水期    |        |        |        | 丰水期   |        |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
|                                | 最小值    | 最大值    | 平均值    | 中值     | 最小值   | 最大值    | 平均值    | 中值     |
| pH                             | 7.9    | 10.2   | 8.3    | 8.2    | 6.9   | 7.9    | 7.4    | 7.4    |
| EC                             | 337    | 828    | 509    | 504    | 320   | 569    | 422    | 414    |
| Cl <sup>-</sup>                | 2.15   | 42.36  | 9.44   | 7.10   | 1.88  | 8.62   | 4.28   | 4.51   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | 3.89   | 15.80  | 8.88   | 8.30   | 4.70  | 13.71  | 10.10  | 10.70  |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>  | 36.35  | 269.27 | 102.41 | 90.27  | 41.69 | 210.72 | 82.40  | 80.03  |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 103.09 | 176.29 | 140.98 | 141.34 | 66.17 | 183.10 | 123.44 | 125.03 |
| Ca <sup>2+</sup>               | 43.18  | 104.24 | 66.93  | 67.70  | 52.53 | 81.66  | 64.06  | 64.62  |
| Mg <sup>2+</sup>               | 5.02   | 24.16  | 10.40  | 10.63  | 4.12  | 16.89  | 7.98   | 7.60   |
| K <sup>+</sup>                 | 0.62   | 8.11   | 2.52   | 2.14   | 0.98  | 2.99   | 1.68   | 1.70   |
| Na <sup>+</sup>                | 2.72   | 76.64  | 21.13  | 20.86  | 5.04  | 37.26  | 10.70  | 9.46   |
| SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | 1.04   | 8.68   | 4.87   | 5.08   | 5.50  | 9.98   | 6.79   | 6.89   |
| TDS                            | 247.8  | 628.4  | 367.5  | 362.42 | 241.3 | 427.5  | 311.4  | 309.08 |

注：表中电导率单位为μS/cm，离子、TDS浓度单位为mg/L。

两期河水中主要的阳离子均是 Ca<sup>2+</sup>，平均质量浓度为 65.54mg/L，其次是 Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup> 平均质量浓度分别为 16.09、9.23、2.11mg/L；两期河水中主要的阴离子是 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>，平均质量浓度分别为 132.51、92.75mg/L，其次是 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>，平均质量浓度分别为 9.47、6.95mg/L。Ca<sup>2+</sup>和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>是占绝对优势的离子，Ca<sup>2+</sup>占总阳离子量的 70%，HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>占总阴离子量的 55%。

为了进一步说明三岔河河水中主要离子浓度水平，将三岔河流域与其他小流域进行对比，对比结果列于表 2 中。除黄河外，三岔河流域的 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、TDS 均高于其他流域，而 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>则处于平均浓度范围。总体而言，西南喀斯特地区河流的主要离子浓度组成较为相似，而三岔河流域主要离子浓度水平最接近于赤水河和北盘江流域，这是由于研究区与赤水河和北盘江流域地质背景、气候条件、水文环境等各方面都十分接近，使得河水主要离子具有相似的特征。而蒸发岩地区的黄河流域，则明显富含 Cl<sup>-</sup>和 Na<sup>+</sup>。

表 2 三岔河流域主要离子与其他流域主要离子浓度对比(mg/L)

Tab.2 Comparison of Major Ion Concentrations in the Sanchahe River with Other Rivers

|                     | Cl <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | TDS    |
|---------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|--------------------------------|--------|
| 三岔河                 | 6.95            | 9.47                         | 92.75                         | 132.51                        | 65.54            | 9.23             | 2.11           | 16.09           | 5.80                           | 340    |
| 清水江 <sup>[27]</sup> | 3.55            | 5.58                         | 33.6                          | 120.17                        | 30.80            | 11.04            | 1.56           | 4.14            | 7.73                           | 214    |
| 赤水河 <sup>[28]</sup> | 6.67            | 12.53                        | 84.23                         | 134.78                        | 62.85            | 11.75            | 3.43           | 7.03            | /                              | 323    |
| 北盘江 <sup>[28]</sup> | 4.24            | 13.91                        | 52.60                         | 152.83                        | 61.58            | 9.49             | 1.73           | 5.51            | 5.99                           | 302    |
| 乌江 <sup>[29]</sup>  | 3.95            | 7.14                         | 55.46                         | 171.26                        | 61.51            | 12.82            | 1.55           | 4.09            | 5.74                           | 324    |
| 长江 <sup>[6]</sup>   | 2.9             | /                            | 11.7                          | 133.8                         | 34.1             | 7.6              | 8.2*           | /               | 6.2                            | 205.9  |
| 黄河 <sup>[5]</sup>   | 46.86           | 7.44                         | 99.84                         | 200.08                        | 44.80            | 22.08            | 3.51           | 60.03           | 18.00                          | 502.64 |
| 西江 <sup>[21]</sup>  | 2.84            | 6.12                         | 16.32                         | 154.33                        | 45.40            | 7.68             | 1.95           | 3.22            | 6.00                           | 241    |
| 赣江 <sup>[22]</sup>  | 8.76            | 4.22                         | 5.39                          | 22.59                         | 7.28             | 1.25             | 1.77           | 7.09            | 5.52                           | 63.87  |

注：\*表示(K<sup>+</sup>+Na<sup>+</sup>)。

## 2.2 主要离子的时空变化特征

图 2 是三岔河流域上游至下游主要离子时空变化分布特征，选取两期对应的 26 个采样点作为对比，其中干流采样点 18 个，支流采样点 8 个。

从图 2 可以看出，主要离子浓度年内变化表现出一定的差异性，普遍规律是枯水期离子浓度略高于丰水期，代表性离子是 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>，这是由于一方面丰水期降水量明显增加，而离子来源没有明显变化的情况下，形成的稀释效应；另一方面枯水期水流速度相对缓慢，水体与岩石接触时间较长，增加了岩石的溶解。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 两期浓度变化相对较小，这是由于 Cl<sup>-</sup> 的浓度很小，稀释效应对 Cl<sup>-</sup> 的影响不大；SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 变化不大是由于研究区处于我国典型的酸雨区，大气降水中含有较高浓度的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 且丰水期降水量大，带入大量的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>，进而抵消了一部分稀释效应。河流上流到下流主要离子空间变化见图 2。干流离子浓度变化趋势主要分为三类，一类从上游至下游呈增大趋势，代表性离子是 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>；第二类总体变化趋势比较平缓，代表性离子是 K<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>；第三类表现为先升高后降低，代表性离子是 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>。选取的 8 条支流各主要离子浓度变化比较大，反映了不同的小流域在地质背景、生态环境、人为活动的差异对河水离子的影响，其中以支流 2(枯水期 12 号采样点)和支流 8(枯水期 25 号采样点)最为明显。支流 2 的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 均高于干流，这可能是由于支流 2 位于纳雍县曙光乡境内，区域内煤系地层分布，煤炭产业较多，煤矿开采力度较大，矿山废水进入河流加速了碳酸盐岩溶解，另外河流径流较小，在一定程度上对离子进行富集。支流 8 除 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 无明显变化外，其余离子均高于干流，主要原因是该支流主要靠地下水补给，支流上游地区地表、地下河发育，且地下河水主要离子浓度高于干流平均值。

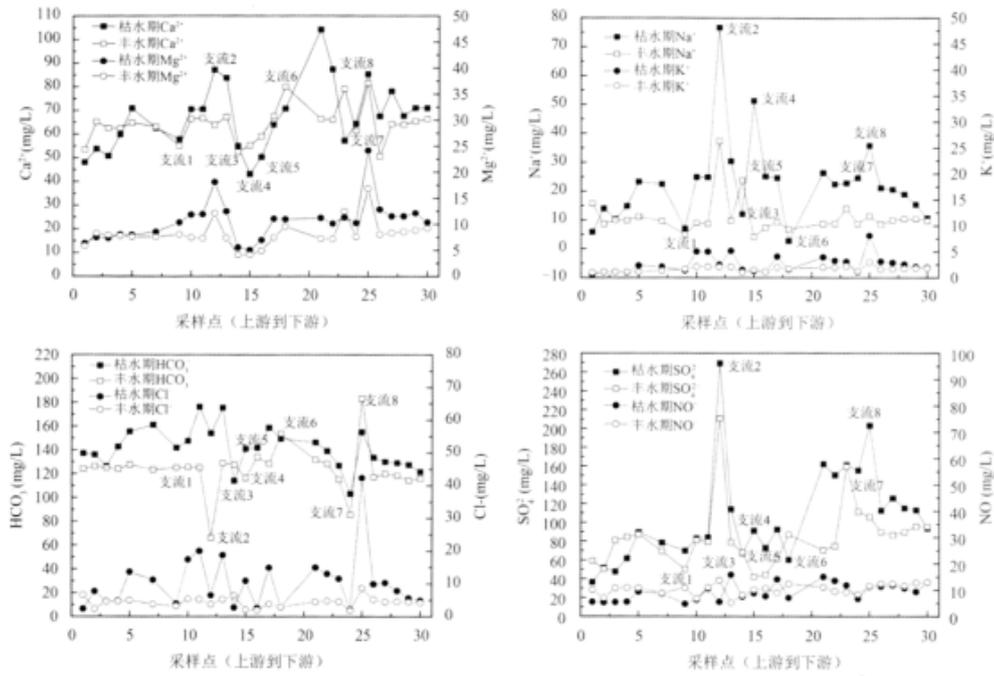


图2 三岔河主要离子浓度时空变化特征  
Fig.2 Temporal and Spatial Variations of the Concentrations of Major Ions of Sanchahe River Basin

### 3 讨论

#### 3.1 离子来源分析

Gibbs图是反应TDS与 $Na^+ + Ca^{2+}$ 、TDS与 $Cl^- + HCO_3^-$ 的关系图，可以定性判断河流水化学的控制类型，直观地反映蒸发-结晶、岩石风化、大气降水作用对河流水化学的影响。三岔河流域河水Gibbs图见图3，大部分河水样品 $Na^+ + Ca^{2+}$ 小于0.6， $Cl^- + HCO_3^-$ 小于0.2，所有河水样品点均落在岩石风化控制区域，远离大气作用带，说明河流主要离子组成受岩石风化作用控制，这一特征与长江、西江等中国大型流域以及清水江、赤水河、南、北盘江、桂江、柳江等喀斯特地区小流域相似，而赣江流域则表现出一定的大气降水的影响。

#### 3.2 岩性影响分析

阴离子 $HCO_3^- - SiO_2 - (Cl^- + SO_4^{2-})$ 三角图和阳离子 $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (Na^+ + K^+) - (SO_4^{2-} + NO_3^-)$ 三角图可以直观反映河水的阴阳离子组成，分析水体化学性质，揭示岩石风化类型[29]。通常，在阴离子三角图中，碳酸盐岩风化产物以为 $HCO_3^-$ 为主，落在 $HCO_3^-$ 一端，硅酸盐岩风化产物落在三角图中间，蒸发盐矿物风化产物落在 $Cl^- + SO_4^{2-}$ 相对较高一端。在阳离子三角图中，白云岩风化产物落在 $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ 线中间，石灰岩风化产物落在 $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ 线上靠近 $Ca^{2+}$ 一端，硅酸盐岩风化产物落在 $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ 线偏 $Na^+ + K^+$ 一端，蒸发盐矿物风化产物落在 $Na^+ + K^+$ 一端。

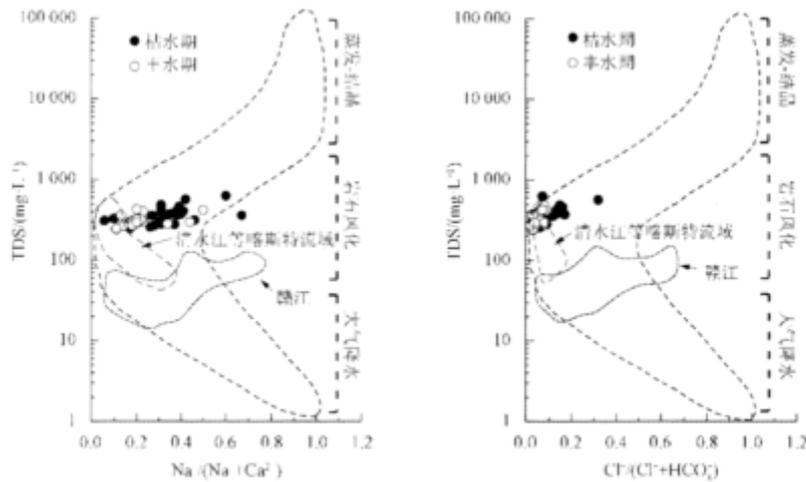


图3 三岔河流域河水Gibbs图<sup>[17-19, 22, 27, 28]</sup>

Fig.3 Gibbs Plots of the River Water in the Sanchahe River Basin

图4是三岔河流域河水阴阳离子三角图。在阴离子三角图中，河水阴离子主要靠近 $\text{HCO}_3^-$ 一端，表明河水阴离子主要受到碳酸盐岩风化的影响；在阳离子三角图中，河水阳离子主要落在碳酸盐岩风化的区域，表明三岔河河水的水化学组成主要受碳酸盐岩矿物的风化侵蚀控制，与南、北盘江、长江相似；而同为喀斯特地区的桂江和柳江1281流域河水中 $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 所占阴阳离子的比例更大， $\text{SO}_4^{2-}$ 所占阴离子比例则相对较小，这也表明三岔河流域受到更多只404的影响；与非碳酸盐岩地区的黄河流域相比，三岔河流域富含HCCV与 $\text{Ca}^{2+}$ ，而 $\text{SiO}_3^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 浓度则低于黄河。流域内基本没有蒸发岩分布，其影响可以忽略不计。

$\text{H}_2\text{CO}_3$  化碳酸盐岩， $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 的当量比值为1； $\text{H}_2\text{SO}_4$  风化碳酸盐岩， $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 的当量比值为1， $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 的当量比值为2。三岔河河水样品 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 的当量比值都大于1， $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 的当量比值接近1，说明 $\text{HCO}_3^-$ 不足以平衡 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ ，需要 $\text{SO}_4^{2-}$ 加以平衡。从图5可以看出，三岔河河水样品都分布于只2(：03和14岁04风化碳酸盐岩两个端元之间，远离石膏溶解线，表明硫酸参与到岩石风化过程中，这一结果也与前人研究结果相似。

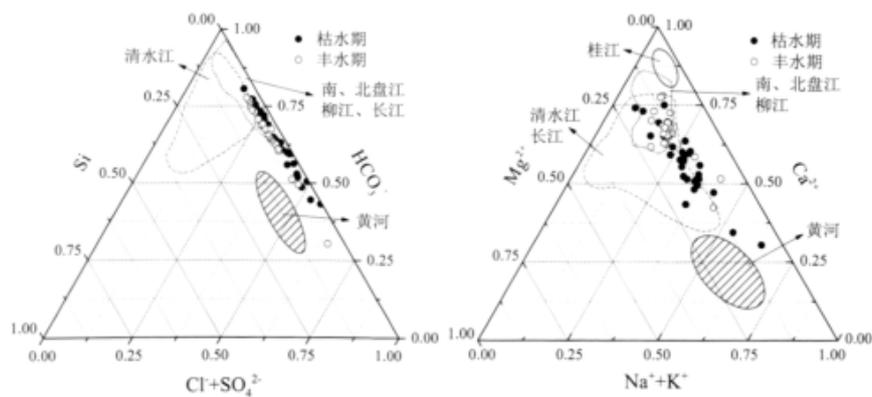


图4 三岔河流域河水阴阳离子三角图<sup>[4, 5, 17, 19, 27, 28]</sup>

Fig.4 Triangle Diagrams Show in Cation and Anion Composition in Waters from Sanchahe River Basin

通常 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cr}^{6+}$ 可以用来表征人为活动对河流水体的影响[32]，河水中 $\text{SO}_4^{2-}$ 主要来源于大气酸沉降、含硫矿层氧化、石膏溶解以及工业活动， $\text{NO}_3^-$ 主要来源于农业活动施用氮肥， $\text{Cr}^{6+}$ 主要来源于大气沉降、蒸发岩风化和人为活动，而三岔河流域内几乎没有蒸发岩分布，所以岩石风化的 $\text{Cr}^{6+}$ 可以忽略不计。

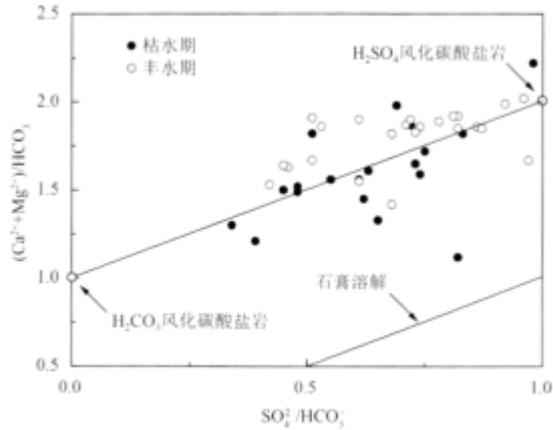


图5 三岔河流域 $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/HCO_3^-$ 与 $SO_4^{2-}/HCO_3^-$ 当量比值关系  
Fig.5 Equivalent Ratios of  $HCO_3^-/(Ca^{2+}+Mg^{2+})$  vs.  $SO_4^{2-}/HCO_3^-$  of Sanchahe River Basin

河水  $so42_$  和  $no3_$  相关性可以鉴别这两种离子的来源，并且可以比较不同流域人为活动的强度。三岔河流域河水  $S042$  和  $N0$  相关图见图 6。由图可知，两种离子在枯水期和丰水期相关性均较低，说明这两种离子可能受到不同来源控制。结合表 1 可以得出， $so42_$  浓度表现出枯水期高于丰水期，这是由于三岔河流域是我国主要产煤区之一，出产的多为硫含量超过 1% 的煤，而冬季用煤需求相对较大，采煤废水和燃煤用量增加，使得枯水期具有较高浓度的  $so42_$ ，因此， $so42_$  更多来源于煤炭工业； $N03$  浓度表现出丰水期高于枯水期，这主要是因为冬季氮肥施用量小，农业活动相对较少。

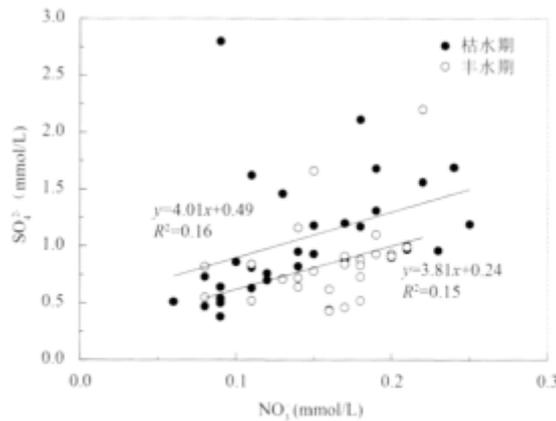


图6 三岔河流域 $SO_4^{2-}$ 和 $NO_3^-$ 相关图  
Fig.6 Diagrams of  $SO_4^{2-}$  Versus  $NO_3^-$  in Sanchahe River Basin

## 4 结论

三岔河流域河水总体呈弱碱性，TDS 平均值为 340.4611/1，高于世界河流平均值 1001/1。主要的阴离子是  $HCO_3^-$ ，占总阴离子量的 55%，其次为  $SO_4^{2-}$ ；主要的阳离子是  $Ca^{2+}$ ，占总阳离子量的 70%。离子特征与喀斯特地区流域相似。

三岔河流域河水主要离子浓度年内变化表现出一定的差异性， $Ca^{2+}Mg^{2+}$ 、 $Na^+HCO_3^-$ 、 $cr$  枯水期浓度略高于丰水期， $so42_$ 、 $N0$  两期浓度变化相对较小。空间变化上，干流和支流差异较大，反映了不同的小流域在地质背景、生态环境、人为活动的差异对河水离子的影响。

三岔河流域河水水化学组成主要受到碳酸盐岩风化控制，硫酸广泛参与到岩石风化中。工农业活动对河水有一定影响，除了需要控制城镇、农业污水排放外，还需加强流域内工矿企业的监管。

## 参考文献:

- [1] 陶贞, 高全洲, 王振刚, 等. 湿热山地丘陵流域化学风化过程的碳汇估算[J]. 科学通报, 2011, 56(26):2188-2197.
- [2] 韩贵琳, 刘从强. 贵州乌江水系的水文地球化学研究[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1):37-45.
- [3] 张芸, 吕宪 N, 杨苻. 三江平原典型湿地水化学性质研究[J]. 水土保持学报, 2005(1):184-187.
- [4] 吴起鑫, 韩贵琳, 陶发祥, 等. 西南喀斯特农村降水化学研究: 以贵州普定为例[J]. 环境科学, 2011, 32(126-32).
- [5] 韩贵琳, 刘从强. 贵州喀斯特地河流的研究—碳酸盐岩溶解控制的水文地球化学特征[J]. 地球科学进展, 2005(4):394~406.
- [6] 枣思亮, 韩贵琳, 张鸿翔, 等. 硫酸参与喀斯特流域(北盘江)风化过程的碳同位素证据[J]. 地球与环境, 2006(2):57-60.
- [7] 焦树林, 罗福家, 梁虹, 等. A 江源区阳长流域化学侵蚀作用的碳汇效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5):4447.
- [8] 吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫. 等. 贵州清水江流域干:水期水化学特征及离子来源分析[J]. 环境科学, 2015(5):1565-1572.
- [9] 罗进, 安艳玲, 吴起鑫. 等. 赤水河中下游冬季河水化学空间分布特征分析[J]. 地球与环境, 2014, 42(3):297-305.
- [10] 吴起鑫, 韩贵琳, 李富山, 等. 珠江源区南、北盘江丰水期水化学组成特征及来源分析[J]. 环境化学, 2015, 34(7):1289-1296.
- [11] 李甜甜, 手宏兵, 江用彬, 等. 赣江上游量流水化学的影响家及来源[J]. 地理学报, 2007, 62(7):764-775.
- [12] 万洪涛, 谢传节, 杨勇, 等. 贵州后寨河喀斯特小流域水化学特征[J]. 中国岩溶, 1999(4):45-52.
- [13] 蒙海花, 王腊春. 喀斯特流域水体中离子时空变化特征[J]. 水资源保护, 2007(5):1-5+10.
- [14] 解絨骥, 高全洲, 陶贞. 流域化学风化与河流水化学研究综述与展望[J]. 热带地理, 2012, 32(4):331-337.
- [15] 张红波, 何师意, 于爽, 等. 桂江流域河流水化学特征及影响 W 家[J]. 中国岩溶, 2012, 31(4):395401.
- [16] 原雅琼, 何师意, 于爽, 等. 柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析[J]. 环境科学, 2015, 36(7):2437-2445.
- [17] 李军, 刘从强, 李龙波, 等. 硫酸侵蚀碳酸盐岩对长江河水 DIC 循环的影响[J]. 地球化学, 2010(4):305-313.
- [18] 刘从强, 蒋颖魁, 陶发祥, 等. 西南喀斯特流域碳酸盐岩的硫酸侵蚀与碳循环[J]. 地球化学, 2008, 37(4):404~414.
- [19] 于爽, 孙平安, 杜文越, 等. 人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域

为例[J]. 环境科学, 2015(1):72-79.

[20]王亚平, 王岚, 许#宵, 等. 长江水系水文地球化学特征及主要离子的化学成因[J]. 地质通报, 2010, 29(2):446-456.