

贵州省都柳江流域水化学特征研究

左禹政^{1,2}, 安艳玲^{3*}, 吴起鑫^{1,2,4}, 屈坤杰^{1,2}, 樊光辉^{1,2}, 叶祖鑫^{1,2}, 秦玲^{1,2}, 钱娟婷^{1,2}, 涂成龙⁴ (1. 贵州大学国土资源部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. 贵州理工学院, 贵州 贵阳 550003; 4. 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: 于 2015 年丰水期和枯水期采集了都柳江河水样品, 分析了河水的主要水质参数和主量元素。结果显示, 都柳江河水呈弱碱性, 优势阳离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 优势阴离子为 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} , 水化学类型为 HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} 型。Gibbs 图、三角图、相关性分析表明都柳江水化学上游主要受碳酸盐岩风化控制, 下游硅酸盐影响增加。受地层岩性和地貌变化的影响, 河流 TDS 沿主河道呈递减的趋势。离子比值分析表明, 流域上游主要受工矿活动的影响, 而中下游地区人为活动因素较为复杂, 受农业、城镇排污等多种活动影响。

关键词: 都柳江流域; 水化学; 岩石风化; 影响因素

中图分类号: X13, X143 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2017)07-2684-07

Study on the hydrochemical characteristics of Duliu River basin in Guizhou Province. ZUO Yu-zheng^{1,2}, AN Yan-ling^{3*}, WU Qi-xin^{1,2,4}, QU Kun-jie^{1,2}, FAN Guang-hui^{1,2}, YE Zu-xin^{1,2}, QIN Ling^{1,2}, QIAN Juan-ting^{1,2}, TU Cheng-long⁴ (1. Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard Prevention, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China; 4. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China). *China Environmental Science*, 2017,37(7): 2684~2690

Abstract: 62 water samples were collected in wet and dry seasons in 2015 at Duliu River at Guizhou Province in southwest China. The water parameters and major ions were determined. The results showed that river water of Duliu River was alkaline, and the dominant cations and anions were Ca^{2+} 、 Mg^{2+} and HCO_3^- 、 SO_4^{2-} , respectively. The hydrochemical type was HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} . Gibbs diagram, triangle diagrams and correlation analysis showed that the water chemistry was mainly controlled by the chemical weathering of carbonate at the upper reaches, while the silicates have an increasing influence at the lower reaches. The TDS decreased gradually in the mainstream of Duliu Basin due to lithology and geological landforms changes. Analyses of $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ and $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ show that Upper Duliu river was mainly affected by mining industries, while the downstream area was controlled by multifarious human activities such as agriculture and sewage.

Key words: Duliu River Basin; water chemistry; weathering; influencing factors

河流在全球水循环及元素地球化学循环过程中扮演着重要角色, 通过不同地区河流水化学研究, 可以了解不同背景条件下气候变化、人为活动对流域风化、物质输出的影响^[1]。我国学者从 20 世纪 60 年代开始进行流域水化学研究^[2], 研究了长江、黄河、珠江等流域的水化学特征、离子时空分布特点、风化成因、人为影响等情况^[3-5]。近年, 随着研究的深入, 小流域水化学研究成为热

点。如在我国北方小流域研究发现硫酸参与了碳酸盐岩化学风化, 气候条件对岩石风化速率也有一定影响^[6]; 在武夷山九曲溪山区小流域发现湿

收稿日期: 2016-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(41603123, U1612442); 贵州省基金资助项目(黔科合 LH 字[2016]7457 号); 水利部公益性项目(201401050); 贵州省重点学科建设项目(黔学位合字 ZDXK[2016]11 号)

* 责任作者, 副教授, re.yilan@gzu.edu.cn

热季风区风化对碳汇的重要影响^[7];通过对不同地质背景下河流的水化学特征进行研究,发现碳酸盐岩的风化在不同地质背景下都有相对较高的溶解贡献^[8].

珠江流域作为我国第二大江河水系,其水化学、流域碳循环受到广泛关注^[9];都柳江下游的柳江断面河水主要离子浓度存在明显的季节性变化^[10];在珠江源头——南北盘江的研究中发现,该流域主要受到碳酸盐岩风化控制,人为活动的影响在不同河段有较为明显的差别^[11].都柳江是珠江水系西江干流的重要支流,是贵州黔东南地区重要的水源.随着经济社会的发展,水库的建设,流域内水环境受到人类活动影响愈加显著^[12].近年来,部分学者对都柳江流域的气候、水文及重金属污染^[12-14]进行了研究,但对该流域基础水化学系统的研究却相对有限.本研究对都柳江水系水化学进行系统研究,分析流域水化学的主要来源和控制因素,解析自然过程及人为活动对水环境的影响,以期为流域水资源的保护及合理利用提供科学依据.

1 研究区概况

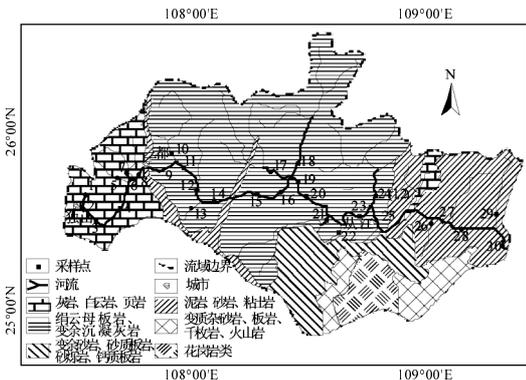


图 1 都柳江岩性

Fig.1 The lithology map of the Duliu River basin

都柳江发源于贵州省黔南州独山县,位于东经 107°30'~109°25',北纬 25°30'~26°30'之间,流域全长 310km,流域面积 11326km².流域处于黔中山原向广西丘陵山地的过渡地带,其地势西北高东南低,落差 1176m,平均比降为 3.8‰.都柳江流域上游以沉积岩分布为主,碳酸盐岩分布

面广,岩溶较发育.流域中下游出露地层以下江群碎屑岩为主,硅酸盐岩分布较广^[15](图 1).流域内矿产资源丰富,上游多分布砷、汞、镉矿床,中下游多分布铅、锌等多金属矿床.

都柳江流域属于亚热带湿润季风气候区,流域平均气温为 16~18℃,年平均降水量在 1100~1400mm 之间,雨季集中在 5~10 月,占总降水量的 70%^[12-13].

2 样品的采集及分析

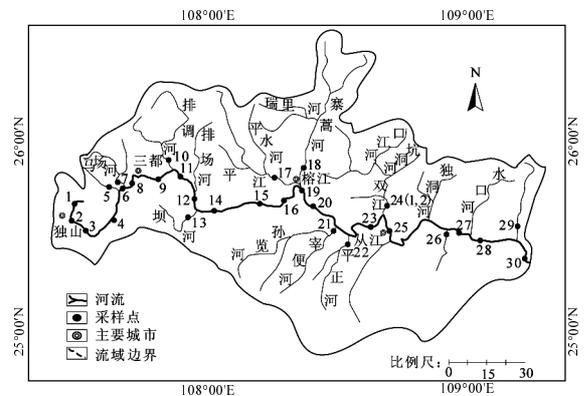


图 2 都柳江采样点

Fig.2 Sample locations in the Duliu River Basin

本次研究于 2015 年 1 月(枯水期)和 7 月(丰水期),分别采集都柳江流域干流及其主要支流的河水样品,干流采样点 19 个,支流采样点 12 个,具体位置见图 2.现场测定参数为:水温(T)、pH 值、溶解氧(DO)、电导率(EC)及 HCO_3^- 浓度,其中 T 、pH 值、DO、EC 采用德国 WTW 便携式多参数测试仪测定; HCO_3^- 浓度用标定好的稀 HCl 滴定.采集的河水样品当天用 0.45 μm 的 Millipore 滤膜进行过滤,过滤后的样品分装在事先酸洗、反复冲净并且用滤得样品润洗后的高密度聚乙烯瓶中;用于测定阳离子的样品加入超纯盐酸酸化至 $\text{pH}<2$,所有样品均避光密封保存,并尽快送入实验室进行测量.实验室测定参数为:阴、阳离子(Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+)及 SiO_2 浓度,其中阴、阳离子用离子色谱仪进行测定(DIONEX,ICS-1100,IonPac CS-12A 阳离子柱、IonPac AG-19 阴离子柱),测试精

度为 $\pm 5\%$; SiO_2 浓度采用硅钼黄光度法测定. 总溶解性固体(TDS)根据公式 $\text{TDS}=(\text{SiO}_2+\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}+\text{Na}^++\text{K}^++\text{Cl}^-+\text{NO}_3^-+\text{SO}_4^{2-}+\text{F}^-+\text{HCO}_3^-)^{[16]}$ 计算得出. 为保证实验数据的准确性、有效性, 对实验分析测试过程进行质量控制, 对所有测定的参数进行空白值测定、每组实验间隔 5 个样品进行平行样测定和标准样测定, 误差控制在 5% 以内.

3 结果与分析

表 1 都柳江流域河水主要元素浓度

Table 1 Chemical composition of Dulu river basin

项目	枯水期		丰水期	
	范围	均值	范围	均值
pH 值	7.75~8.63	8.18	7.55~9.08	8.28
T(°C)	10.9~15.00	12.49	22.00~29.40	25.65
TDS(mg/L)	39.4~505.08	150.38	30.50~485.07	134.47
SiO_2 (mg/L)	0.8~13.61	5.99	2.76~15.09	8.39
Ca^{2+} (mmol/L)	0.0~2.15	0.64	0.08~1.98	0.56
Mg^{2+} (mmol/L)	0.0~1.33	0.32	0.04~1.48	0.28
Na^+ (mmol/L)	0.04~0.49	0.20	0.05~0.41	0.17
K^+ (mmol/L)	0.01~0.19	0.04	0.01~0.14	0.04
HCO_3^- (mmol/L)	0.28~4.30	1.30	0.14~4.38	1.16
SO_4^{2-} (mmol/L)	0.02~1.16	0.21	0.04~1.21	0.17
NO_3^- (mmol/L)	0.01~0.15	0.04	0.02~0.04	0.03
Cl^- (mmol/L)	0.03~0.52	0.10	0.01~0.42	0.07

由表 1 知: 都柳江河水温度枯水期均值为 12.49°C , 丰水期均值为 25.65°C . 河水枯水期 pH 均值为 8.18, 丰水期为 8.28, 河水总体呈弱碱性. 流域水体枯水期 TDS 值介于 $39.48\sim 505.08\text{mg/L}$ 之间, 均值 150.38mg/L , 丰水期介于 $30.50\sim 485.07\text{mg/L}$ 之间, 均值 134.47mg/L , 两季均高于世界河流 TDS 的均值 $100\text{mg/L}^{[17]}$, 与国内大河流域(长江= 220mg/L 、黄河= 370mg/L)^[18-19]及西南部分流域(南北盘江= 307mg/L 、柳江= 154.93mg/L 、西江= 138.2mg/L)^[10-11,20]相比, 都柳江流域的 TDS 均值较低. 流域样品中阳离子含量依次为 $\text{Ca}^{2+}>\text{Mg}^{2+}>\text{Na}^+>\text{K}^+$, 其中枯水期 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度变化分别为 $0.09\sim 2.15\text{mmol/L}$ 、 $0.04\sim 1.33\text{mmol/L}$, 丰水期 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度介于 $0.08\sim 1.98\text{mmol/L}$ 、 $0.04\sim 1.48\text{mmol/L}$ 之间, 两季 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度都分别占总阳离子的 53% 和 27%. 流域阴离子浓度依次为 $\text{HCO}_3^->\text{SO}_4^{2-}>\text{Cl}^->\text{NO}_3^-$ (由于流域河水

中 F^- 浓度非常小, 故在分析中将其忽略), 枯水期 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 的浓度分别介于 $0.28\sim 4.30\text{mmol/L}$ 和 $0.02\sim 1.16\text{mmol/L}$ 之间, 占总阴离子的 79% 和 12%; 在丰水期 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 的浓度变化分别为 $0.14\sim 4.38\text{mmol/L}$ 和 $0.04\sim 1.21\text{mmol/L}$, 占总阴离子的 81% 和 12%.

4 讨论

4.1 主要离子来源及岩石风化分析

Gibbs 图法是一种定性研究天然水体水化学组成及来源的方法^[21]. 通过该方法, 即绘制 TDS 与 $\text{Na}^+(\text{Na}^++\text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3^-)$ 的半对数坐标图, 以判断蒸发结晶、岩石风化、大气降水对都柳江流域主要离子的影响^[22]. 由图 3 可知, 都柳江干流 $\text{Na}^+(\text{Na}^++\text{Ca}^{2+})$ 比值在 0.5 以内, 支流部分水样 $\text{Na}^+(\text{Na}^++\text{Ca}^{2+})$ 比值接近 1, 河流全部样品 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3^-)$ 比值小于 0.3, 这说明岩石风化为都柳江河水离子的主要来源.

阴阳离子三角图能反映河水的离子组成, 常用于判断流域岩石风化的控制端元^[23]. 在 $\text{Mg}^{2+}-\text{Ca}^{2+}-\text{Na}^+(\text{Na}^++\text{K}^+)$ 三角图中, 若流域受石灰岩风化控制, 则样品点靠近 Ca^{2+} 端元; 若流域受白云岩风化控制, 则样品点落于 Mg^{2+} 与 Ca^{2+} 两端中间; 而硅酸盐为主要控制因素时, 样品点落于 Mg^{2+} 与 Ca^{2+} 线向 $\text{Na}^+(\text{Na}^++\text{K}^+)$ 的端元处. 在 $\text{SiO}_2-\text{HCO}_3^--(\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-})$ 三角图中, 若河水以碳酸盐岩控制为主, 则样品点落于 HCO_3^- 端; 若其受到硅酸盐风化控制, 则样品点靠近 SiO_2 端; 而河水以岩盐及蒸发岩为主控因素时, 样品点则在 $(\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-})$ 端^[11]. 都柳江上游地区水样主要落于碳酸盐岩(石灰岩及白云岩)风化控制区(图 4), 而流域中下游受到硅酸盐岩风化的影响, 这与都柳江所处的地质岩性背景相吻合(图 1). 在阴离子三角图中, 都柳江流域上游样品点均靠近碳酸盐岩控制一端, 而中、下游样品点则落在碳酸盐岩风化与碳酸风化硅酸盐控制区域之间, 这反映了该河段的离子组成可能是受两种岩石风化共同作用的结果. 这与处于西北干旱地区以蒸发岩溶解为主的黄河有明显差别, 与以碳酸盐风化为主的长江、西江(都柳江属西江支流)有相似之处^[5,24-25].

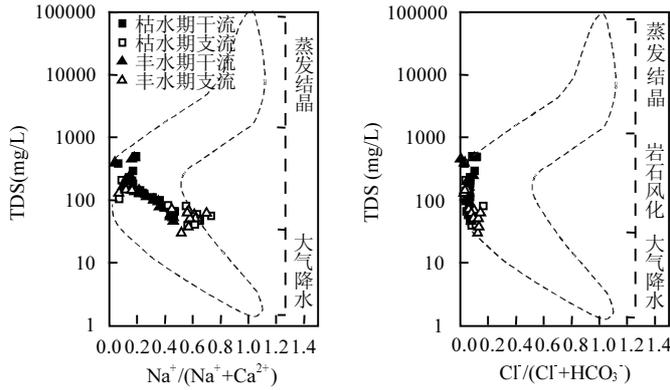


图3 都柳江流域 Gibbs

Fig.3 The Gibbs plots of the Dulu river basin

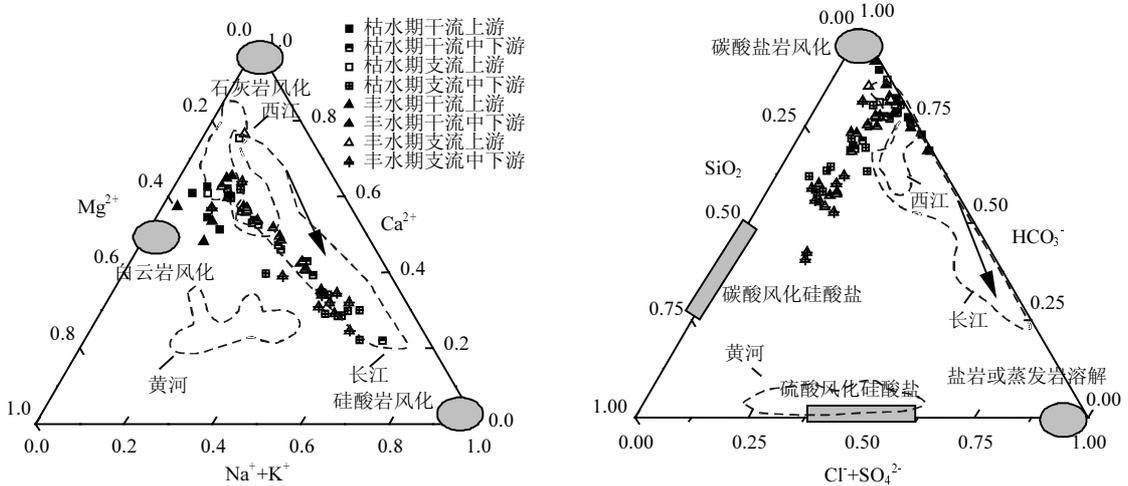


图4 都柳江三角

Fig.4 Ternary diagrams showing cation and anion compositions of the river water

4.2 都柳江干流河水 TDS 时空变化特征

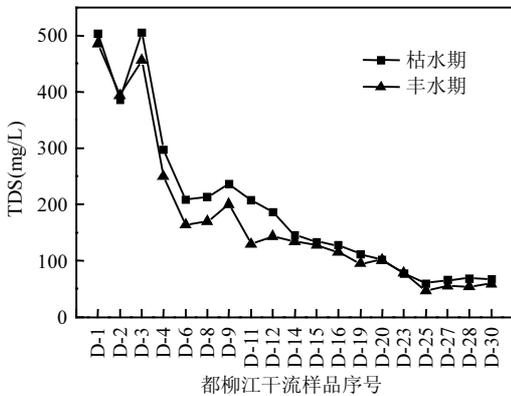


图5 都柳江干流 TDS 时空变化特征

Fig.5 Temporal and spatial variations TDS values of mainstream of Dulujiang Basin

由都柳江干流 TDS 变化趋势图可知(图 5), 在空间上,上游河水 TDS 值最高,下游逐渐呈降低趋势,这不仅与流域上游处于碳酸盐岩地区,下游处于碎屑岩地区的地质岩性有关(图 1)^[24,26];还可能与沿流从山原向丘陵地带过渡的地理地貌有关,前人的研究表明,构造运动后地貌起伏导致新鲜岩石暴露加速风化过程,流域离子含量相对较高^[27-28].在时间上,枯水期 TDS 值普遍高于丰水期,这可能是由于该地区夏季多降雨,雨水的稀释作用所致.

4.3 离子间相关性分析

运用 origin 软件绘制都柳江河流水样中离子间的线性关系,并拟合它们之间的 pearson 相关系数.根据相关性分析方法原则认为两变量

pearson 相关系数 $|r| \geq 0.95$ 时存在显著相关, $|r| \geq 0.8$ 高度相关^[29].

由图6可知,TDS与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{HCO}_3^-$ 显著相关,说明矿化度大小主要由 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 HCO_3^- 的浓度决定^[22]. $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的相关系数 r 为0.966, HCO_3^- 与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 的比值为1.2,而受碳酸盐岩控制地区 HCO_3^- 与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 比值约为2^[30],可见该流域可能存在白云岩及方解石溶解的同时,可能还受到粘土矿物及碎屑岩风化过程的影响. $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 SO_4^{2-} 高度相关,都柳江流域河水 SO_4^{2-} 浓度(丰水期均值=0.21mmol/L 枯水期均值=0.17mmol/L)低于贵州其它河流的 SO_4^{2-} 浓度(南北盘江丰水期均值=0.48mmol/L^[11],清水江丰水期均值=0.35mmol/L^[30],三岔河枯水期均值=2.13mmol/L、丰水期均值=1.71mmol/L^[16]),且流

域内少煤矿多金属矿,因此可推测金属矿硫化物溶解为都柳江流域内 SO_4^{2-} 的主要来源之一. K^+ 与 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 显著相关,河水中的 K^+ 、 Cl^- 可能来源于农业种植钾肥(KCl)的施用.在都柳江流域,烟叶和茶是主要的经济作物,这两种作物主要使用的钾肥是 KSO_4 ,这也可能是 K^+ 和 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 显著相关原因之一.

4.4 人为活动的影响

研究表明,流域水化学以岩石风化为离子主要来源且碳酸盐岩是 Ca^{2+} 的主要控制因素时,可以通过 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 的变化关系来分析人为活动对河水中离子的影响.如果 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 比值高、 $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 比值低,则河水可能受工矿活动的影响较大;反之,则可能受农业活动和生活污水的影响较大^[31].

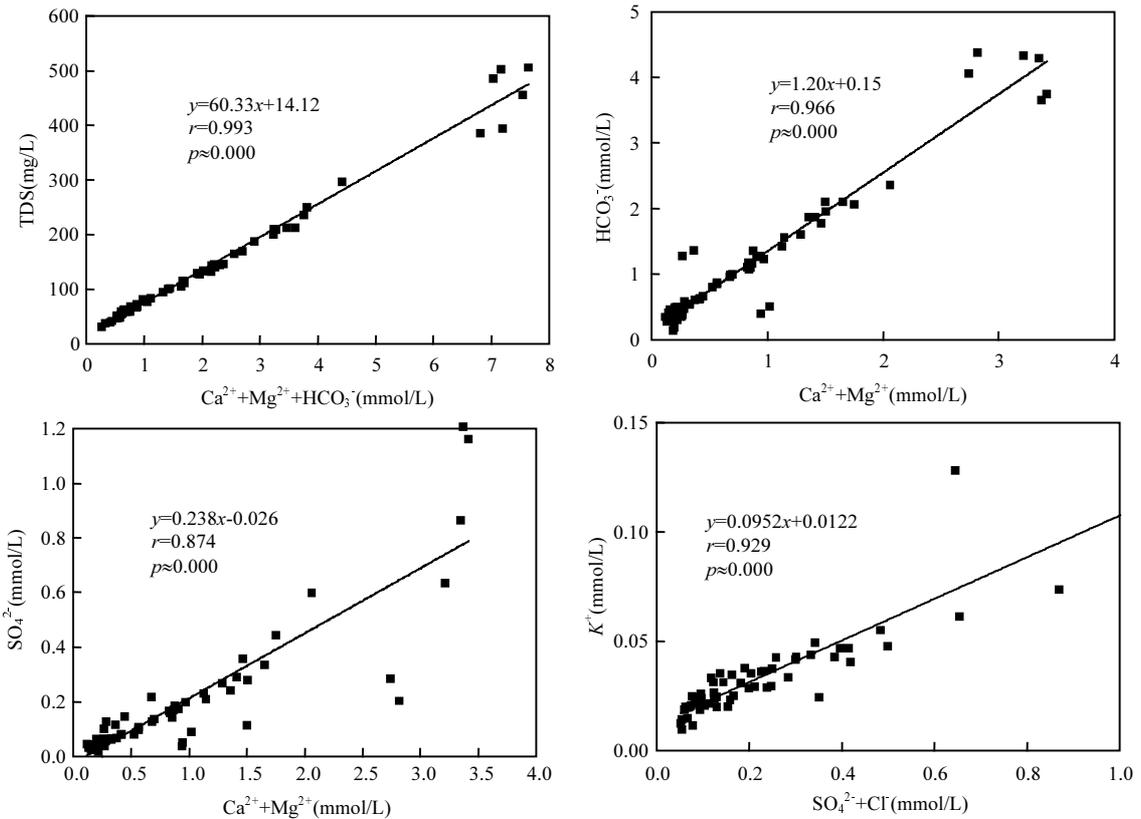


图6 都柳江枯水期、丰水期主要元素相关性

Fig.6 Pearson correlation matrix for chemical composition of Dulu River basin

由图7可知,都柳江上游 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 比值高于 $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 比值,这说明上游地区受到工矿活动的

影响大,这与都柳江上游流域矿产丰富,沿流域多矿采活动分布区有关,并且与山区人口密度小居

住分散,农耕活动分散的特点相一致^[32]。而下游流域的 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 比值的变化较大,这说明下游受到影响的程度和方式比较复杂。丰水期的比值变化范围大于枯水期,原因可能是枯水期为农闲期,农业活动减少所致。此外,由图 7 还知都柳江支流受到农业活动及生活污水的影响大于工业活动,这与山区农村多农业少工业的特点相吻合。

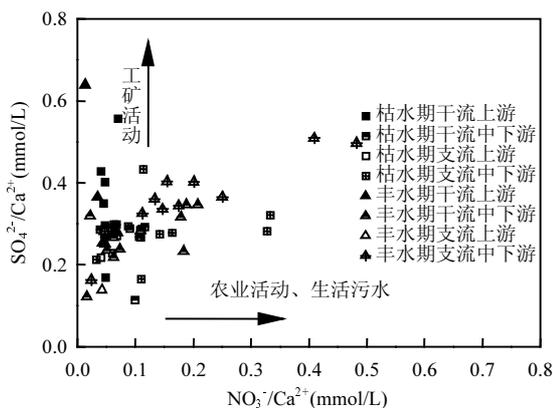


图 7 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 的变化关系图

Fig.7 Correlation between $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ and $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$

对比 2010 年(平水期)与 2015 年都柳江水化学数据(表 1、表 2)可知:都柳江流域 pH 及 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Cl^- 浓度无明显变化,2015 年河水的 NO_3^- 高于 2010 年,这可能是西部大开发推动下城镇化水平提高所致;而流域河水中 SO_4^{2-} 均值则低于 2010 年,其原因有近年来贵州省加强了流域环境治理,减少矿山企业废水排放,另一方面煤炭行业产能过剩,流域内大量煤矿关停也有一定影响。

表 2 2010 年都柳江流域干流河水主要元素浓度^[14]

Table 2 The main element concentration of Duliu River Basin in 2010^[14]

采样点	pH 值	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
均值	8.26	0.03	0.09	0.57	0.08	0.01	0.57
最大值	9.19	0.06	0.21	1.19	0.22	0.02	4.90
最小值	6.69	0.01	0.04	0.05	0.02	0.00	0.03

5 结论

5.1 都柳江河水总体呈弱碱性.河水水化学类

型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 。都柳江流域水化学特征主要受到岩石风化的控制,流域上游主要以碳酸盐岩风化为主,中下游河段可能受到碳酸盐岩和硅酸盐岩两种岩石风化的共同作用。

5.2 都柳江河水 TDS 两季均值为 142.43mg/L,高于世界河流均值.TDS 值沿流降低,这与流域内的地质岩性(上游以碳酸盐岩为主,中下游以碎屑岩为主)及地理地貌(研究区自西向东从山原向丘陵过渡)有关。丰水期 TDS 值低于枯水期,这是由于夏季为雨季,雨水的稀释作用所致。

5.3 人为活动对都柳江流域水化学有一定影响,其中上游主要受到工业活动的影响;流域中下游受到的人为活动影响则较为复杂。

参考文献:

- [1] Markich SJ, Brown PL. Relative importance of natural and anthropogenic influences on the fresh surface water chemistry of the Hawkesbury-Nepean River, south-eastern Australia [J]. Science of The Total Environment, 1998, 217(3): 201-230.
- [2] 乐嘉祥,王德春. 中国河流化学特征 [J]. 地理学报, 1963, (1): 1-13.
- [3] Chen J S, Wang F Y, Xia X H, et al. Major element chemistry of the Changjiang (Yangtze River) [J]. Chemical Geology, 2002, 187(3): 231-255.
- [4] 陈静生,何大伟. 珠江水系河水主要离子化学特征及成因 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 1999, (6): 61-68.
- [5] 李晶莹,张经. 黄河流域化学风化作用与大气 CO_2 的消耗 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, (2): 43-49.
- [6] 张东,秦勇,赵志琦. 我国北方小流域硫酸参与碳酸盐矿物化学风化过程研究 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3568-3578.
- [7] 叶宏萌,李国平,袁旭音,等. 山区性小流域水化学特征及物源贡献研究——以武夷山九曲溪流域为例 [J]. 环境化学, 2016, (3): 581-589.
- [8] 孙平安,于爽,莫付珍,等. 不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 [J]. 环境科学, 2016, 37(1): 123-131.
- [9] 张连凯,覃小群,杨慧,等. 珠江流域河流碳输出通量及变化特征 [J]. 环境科学, 2013, (8): 3025-3034.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 黄旭,陈晓兵,石宏辉,等. 都柳江洪水传播时间分析 [J]. 贵州气象, 2015, (3): 58-61.

- [13] 郑小波,郑 奕,周成霞.珠江上游都柳江流域河谷 40a 来气候变化特征 [J]. 广西气象, 2005,(9):153-154.
- [14] 卢莎莎,顾尚义,韩 露,等.都柳江水体-沉积物间梯的迁移转化规律 [J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2013,(3):131-136.
- [15] 覃永军,杜远生,牟 军,等.黔东南地区新元古代下江群的地层年代及其地质意义 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, (7):1107-1131.
- [16] An Y L, Hou Y L, Wu Q X, et al. Chemical weathering and CO₂ consumption of a high-erosion-rate karstic river: a case study of the Sanchahe River, southwest China [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2015,34:(4):601-609.
- [17] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers [J]. Chemical Geology, 1999,159:(1-4):3-30.
- [18] Chetelat B, Liu C Q, Zhao Z Q, et al. Geochemistry of the dissolved load of the Changjiang Basin rivers: anthropogenic impacts and chemical weathering [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008,72:(17):4254-4277.
- [19] Wu L L, Huh Y, Qin J H, et al. Chemical weathering in the Upper Huang He (Yellow River) draining the eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005,69:(22): 5279-5294.
- [20] Wang B, Lee X-Q, Yuan H-L, et al. Distinct patterns of chemical weathering in the drainage basins of the Huanghe and Xijiang River, China: Evidence from chemical and Sr-isotopic compositions [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012,59:219-230.
- [21] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970,170:(3962):1088-1090.
- [22] 阿不都沙拉木·加拉力丁,王 欣,师芸宏.吐鲁番市地表水水化学特征变化分析 [J]. 环境科学学报, 2015,(8):2481-2486.
- [23] Han G L, Liu C Q. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China [J]. Chemical Geology, 2004, 204(1/2):1-21.
- [24] Xu Z F, Liu C Q. Water geochemistry of the Xijiang basin rivers, South China: Chemical weathering and CO₂ consumption [J]. Applied geochemistry, 2010,25:(10):1603-1614.
- [25] 陈静生,王飞越,夏星辉.长江水质地球化学 [J]. 地学前缘, 2006,(1):74-85.
- [26] Liu B J, Liu C Q, Zhang G, et al. Chemical weathering under mid-to cool temperate and monsoon-controlled climate: A study on water geochemistry of the Songhuajiang River system, Northeast China [J]. Applied Geochemistry, 2013,31(2):265-278.
- [27] Blum J D. The Effect of Late Cenozoic Glaciation and Tectonic Uplift on Silicate Weathering Rates and the Marine 87 Sr/ 86 Sr Record [M]. Tectonic Uplift and Climate Change. Springer US, 1997:259-288.
- [28] 解晨骥,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.
- [29] 孙逸敏.利用 SPSS 软件分析变量间的相关性 [J]. 新疆教育学院学报, 2007,(2):120-123.
- [30] 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,等.贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析 [J]. 环境科学, 2015,36(5):1565-1572.
- [31] 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,(5):628-636.
- [32] 吴勇.山地城镇空间结构演变研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2012.

作者简介: 左禹政(1991-),女,贵州贵阳人,贵州大学硕士研究生,主要从事流域水化学方面研究。