

# 西南喀斯特地区河流水化学研究综述与展望<sup>\*1</sup>

张倩<sup>1, 2</sup> 焦树林<sup>1</sup> 梁虹<sup>1</sup> 袁热林<sup>1, 2</sup>

(1 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州贵阳 550001;

2 贵州省山地资源与环境遥感应重点实验室, 贵州贵阳 550001)

**【摘要】**: 喀斯特地区生态环境脆弱, 河流水体溶解离子及其运移规律独特, 作为世界三大喀斯特集中分布区之一的中国西南喀斯特地区, 其河流水化学研究对区域河流环境乃至水环境保护有重要意义。从河流水体中主要离子组成角度出发, 综述了中国西南喀斯特地区河流水化学研究现状和进展, 归纳了喀斯特地区河流水化学时空特征及其影响因素。总结了喀斯特地区河流水化学特征及其影响规律, 指出目前研究存在的问题、研究热点、难点及突破点。

**【关键词】**: 西南喀斯特地区, 河流水化学, 展望

**【中图分类号】**: P595 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1003-6563(2017)03-0036-08

## 0 引言

河流是陆地—海洋水循环中必不可少的角色, 是海陆间物质能量交换的重要平台。河流中水化学元素对流域环境有指示作用。河流水化学研究则是将河流水文效应与水化学联系起来, 研究河流中离子组成以及地球化学特征变化规律。河流中水化学元素的地球化学循环与流域岩石化学风化、大气降水输入、人为活动关系密切, 因此, 河流中总溶解质研究与流域下垫面及所处地区水文过程关系密切。目前, 河流水化学研究多集中在水质地球化学特征, 尤其是元素组成特征, 以及流域岩石地球化学组成、化学风化、人类活动影响和河口区元素地球化学行为等研究<sup>[1-9]</sup>。西南地区是我国喀斯特地貌发育较好、类型齐全、较典型的区域。由于地质岩性的关系, 喀斯特地区河流化学侵蚀明显强于非喀斯特地区。因此, 针对喀斯特地区河流水化学深入研究对认识喀斯特地区河流生态环境、元素地球化学循环规律有重要意义。

我国河流水化学研究始于 20 世纪 60 年代初期乐嘉祥等学者的研究。有关学者针对我国的 500 条河流进行水化学研究, 其中对长江、黄河作了有关水化学特征分析, 并将我国河流水化学分成四带<sup>[10]</sup>。此后, 河流水化学研究得到迅速发展, 如陈静生等分别对 1958—1990 年间的长江水系 191 个站点以及对 1958—2000 年间黄河水系的 100 个站点的水质资料进行分析, 在河流水化学组成特征、离子来源以及水质三个方面上进行了一系列的研究<sup>[11-12]</sup>; 在区域上, 西南区水化学研究主要是集中于大流域, 相关学者对乌江、沅江、南北盘江、桂江、柳江等做了研究。在时间尺度上, 西南喀斯特地区研究内容和我国大江大河的研究类似, 最早主要研究西南喀斯特地区河流的水化学类型以及河流的水体矿化度、硬度、电导、总溶解质固体、pH 值等一系列基础的物理、化学特征。随着研究的深入, 除了河流基础的物化性质外, 离子组成及离子来源、时空特征、影响因素分析和人类

<sup>1</sup>收稿日期: 2016-12-29; 修回日期: 2017-01-05

**基金项目**: 国家自然科学基金项目(41263011), 贵州省科学技术基金(黔科合计省合 [2012] 7005 号)。

**作者简介**: 张倩(1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水文水资源与 GIS。

**通讯作者**: 梁虹(1959-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 喀斯特水文水资源。

活动对其特征影响逐渐成为西南喀斯特地区当前河流水化学研究重点。

## 1 喀斯特地区河流水化学时空特征及影响因素

### 1.1 喀斯特地区河流水化学时间特征

喀斯特河流水化学时间特征变化研究主要集中在大时间尺度上河流长时间序列及季节变化。贵州清水江流域在以碳酸盐岩类风化为主，中下游碎屑岩地区硅酸盐岩石风化逐渐增多基础上，运用 Gibbs 图法、主量元素三角图和离子分析丰水期河流水体主要离子来源，测出丰水期水体中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  为主量离子，TDS 值  $213.96 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  高于全世界河流平均值<sup>[13]</sup>；桂江流域内各支流 EC、主量离子由于气温、降雨条件季节差异导致流域内离子浓度、pH 等水化学特征在时间上呈现不同变化，其中离子浓度、TDS 由于夏季降雨稀释导致夏季出现最低值、冬季最高，春秋居中<sup>[14-16]</sup>。位于该区三省接壤的赤水河流域运用 Gibbs 图和 piper 三角图分析证明上游枯水期离子组成主要受碳酸盐岩风化控制，硫酸参与了流域内碳酸盐岩的风化<sup>[17]</sup>；云南丽江喀斯特盆地流域中蒲焘针对白水河、三束河等几条地表河研究发现季节变化特征，由于所处位置会受到西南季风影响，水体中离子浓度西风期大于季风期、pH 变化不大<sup>[18]</sup>；原雅琼对柳江河流水化学离子组成及特征分析得出  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  为主量离子， $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  由于降水稀释与  $\text{CO}_2$  作用导致离子浓度、pH 值呈现冬高夏低特征变化，电导 EC 值春季最低  $174.93 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、秋季最高  $210.94 \mu\text{S}/\text{cm}$ <sup>[19]</sup>。

表 1 时间变化特征

Tab. 1 Temporal variation characteristics

	主要组成离子	季节变化	流域	相关研究学者
桂江	$\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$	水体中主要离子浓度、TDS 值冬季高,夏季低,春秋居中	西江流域	张红波
大溶江灵渠	$\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$	水体中主要离子浓度冬季高,夏季低,春秋居中	桂江流域	孙平安
丽江地表水	$\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$	总离子浓度:西风期 ( $84.52 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) > 季风期 ( $69.03 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	—	蒲焘
柳江	$\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$	水体中主要离子浓度、pH 值冬季高夏季低;EC 值春季最低 $174.93 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 秋季最高为 $210.94 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	西江流域	原雅琼

大小时间尺度的特征研究能反应河流水化学的年、季节以及昼夜变化规律。相关学者目前集中于大流域季节变化差异，昼夜动态变化研究还较缺乏，且主要偏向于碳元素在河流中相对含量的昼夜变化情况以及对水体碳通量估算影响<sup>[20]</sup>。喀斯特地区岩石风化强烈，河流水化学昼夜动态变化研究对喀斯特河流内部循环水文特征规律的认识、化学侵蚀以及河流水质评估分析有重要作用，有助于了解河流短时间尺度属性特征即相对快速的生物地球化学过程。因此除了碳元素外，对河流中其余水化学元素昼夜变化特征进行整体性研究有助于更全面认识河流内部循环规律。

### 1.2 喀斯特地区河流水化学空间特征

西南喀斯特河流水化学研究主要偏向于大流域，由于大面积覆盖碳酸盐岩，岩石化学风化强烈，河流化学侵蚀成为西南喀

斯特地区河流水化学研究重点。碳酸盐岩主要受硫酸、碳酸作用溶解，就岩性而言，岩组性质影响岩石化学风化速率，如碳酸盐岩风化速率明显强于硅酸盐岩<sup>[21-22]</sup>，灰岩侵蚀速率明显高于白云岩<sup>[23]</sup>。河流水体中 TDS 含量是流域化学风化强度的主要标志，反映了径流过程中河流水体携带溶解物质的能力<sup>[24]</sup>，不同流域以及河流段岩性组成差异导致河流水化学变化；孙平安针对广西不同地质背景大溶江以及灵渠研究水化学特征，水化学类型都是 Ca—HCO<sub>3</sub>型且都以岩石化学风化为主，但两条河流的 Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>以及 Mg<sup>2+</sup>/Ca<sup>2+</sup>比值却明显不同<sup>[25]</sup>。上游为花岗岩、碎屑岩区，中游以碳酸盐岩为主，下游主要为砂岩地质特征的桂江，张红波研究发现河流水化学空间差异，河流以 Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Mg<sup>2+</sup>为主，与岩石风化有关，离子浓度中游高上下游低，Slc 值中游大、上下游小<sup>[15-16]</sup>；蒲焱对丽江盆地地表水水化学研究发现空间尺度上白水河、三束河等几条地表河流中主要离子 Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>从海拔至低海拔离子浓度逐渐升高<sup>[18]</sup>。表 2 中列表针对西南喀斯特区河流岩组性质不同对应的河流化学侵蚀风化对比，利用 TDS 值代表流域化学风化程度。

表 2 空间变化特征  
Tab. 2 Spatial variation characteristics

	岩组性质	主要组成离子	TDS 值 (平均值) / (mg/L)	空间变化	流域	相关研究学者
大溶江	碎屑岩为主, 碳酸盐岩占总地层 9%	Ca <sup>2+</sup> 、HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	75.5	主要离子浓度冬季最高, 春秋次之, 夏季最低; pH 平均值 7.2; EC 平均值 92.9 μS/cm	桂江流域	孙平安
灵渠	碳酸盐岩占总地层 48%	Ca <sup>2+</sup> 、HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	190	主要离子浓度冬季最高, 春秋次之, 夏季最低; pH 平均值 7.2; EC 平均值 92.9 μS/cm	桂江流域	孙平安

### 1.3 河流水化学主要离子来源及特征影响因素分析

河流中主要离子来源与河流水化学影响因素密切相关，河水离子化学特征研究可以用来确定河流溶质地球化学来源与区域自然条件关系<sup>[26]</sup>，据研究表明，河流水中各种离子含量与水动力条件关系密切<sup>[27]</sup>。目前，河水的地球化学组成是区域和全球生态环境问题研究领域极具代表性的研究点<sup>[28-29]</sup>，河流水体离子组成及影响因素分析研究自然也成为了当前西南喀斯特地区研究热点之一。

河水中的离子主要来源于岩石化学风化、大气降水、人为活动三个方面，主要离子来源可通过三角图法对流域水体中阴阳离子含量特点进行判断。三个影响因素可通过 Gibbs 图法判断三者对河流水化学的影响程度，分析出河流水化学特征主控因素以及主要贡献。贵州喀斯特地区河流(乌江、清水江)研究揭示了硫酸参与碳酸盐岩是乌江，清水江离子来源主要因素且岩石化学风化过程减少了 CO<sub>2</sub> 消耗，增加其风化速率<sup>[30]</sup>；长江河源区河水用反演方法求解物质平衡方程确定其河流水化学成分来自大气降雨雪、蒸发盐岩、碳酸盐岩、硅酸盐岩，三种岩石化学侵蚀率表明长江河源区化学侵蚀作用中主要为蒸发盐喀斯特解<sup>[31]</sup>。

王兵对利用 Sr 值以及 Sr 同位素值分析西江干流河水岩石风化特征及主要离子组成，得出 Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 是河流主要离子，西江干流河水中主要溶解离子主要来源于碳酸盐岩中白云岩及灰岩风化作用，郁江则主要是受碎屑岩风化作用影响<sup>[32]</sup>。人为活动对喀斯特河流影响研究专注于大流域水质参数以及相关离子含量变化。西江中上游流域不同程度地受到人类活动影响，

农业活动中施肥作用以及酸雨作用影响 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量连续时间序列变化趋势，工业活动造成酸雨影响 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 变化趋势<sup>[33]</sup>；尹新雅发现贵阳市南明河由于人类活动导致河水主要离子浓度、电导 EC 不同程度地升高<sup>[34]</sup>；黄齐波对乌江上游段河流离子来源研究发现，与 1999 年乌江水化学数据相比受人为活动影响增强<sup>[35]</sup>。

我国河流化学组成主要受流域碳酸盐岩、蒸发盐岩控制，硅酸盐风化贡献较弱<sup>[36]</sup>。有研究表明岩石风化是喀斯特地区河流离子主要来源<sup>[37-39]</sup>。西南喀斯特区碳酸盐岩分布较广，风化侵蚀强烈，河流岩性特征决定了河流水化学组成基本类型。人为活动愈加频繁，其对河流水化学特征影响也不容忽视，以往人类活动对岩溶河流水化学研究主要集中在工农业导致河流水体中化学元素通量输入变化与相关离子相对含量以及化合物的转变。河流水化学研究，国外已做得较为翔实<sup>[40]</sup>。

我国西南喀斯特地区河流水化学目前倾向于大流域，我国学者对西南喀斯特区河流虽做了一系列研究，但是小流域研究还不够深入，喀斯特地区特征性小流域研究更鲜为报道。人为活动对河流水化学特征影响，在岩溶地质背景下农业活动对河流中离子内循环影响研究较为缺乏，这类型特征性小流域由于自身所处区域地理位置、周围环境有其独特性，研究这类型流域水化学变化特征可作为西南喀斯特地区小流域研究代表，为以后喀斯特地区特征型小流域研究提供参考，对认识河流离子内循环规律以及小流域治理有一定现实指导意义。

表 3 相关河流主要离子来源及影响因素研究  
Tab. 3 Sources and influencing factors of major ions in relevant rivers

地层岩性	主要组成离子	TDS 值	主要离子来源	影响因素	流域
碎屑岩夹碳酸盐岩及变质岩	Ca <sup>2+</sup> 、HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Mg <sup>2+</sup>	241	硅酸盐岩风化控制为主	岩石化学风化	沅江流域
碳酸盐岩	Ca <sup>2+</sup> 、HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Mg <sup>2+</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	328	石灰岩风化控制为主	岩石化学风化、人为活动	乌江流域
灰岩、白云岩、页岩、泥岩	Ca <sup>2+</sup> 、HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Mg <sup>2+</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	138.2	白云岩、灰岩风化为主	岩石化学风化	西江流域
碳酸盐岩	Ca <sup>2+</sup> 、HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Mg <sup>2+</sup>	62.89	白云岩风化为主	岩石化学风化	沅江流域

## 2 研究方法

### 2.1 定性化

河流水化学研究中有 5 种常用方法估计离子来源，其中 Gibbs 图法、三角图法、端元图法属于定性化描述。Gibbs<sup>[41]</sup> 基于全球大量降水、河水、湖水和海洋水化学组成的分析，认为降水输入、岩石风化和蒸发结晶过程是全球地表水组成的三大控制因素。Gibbs 图是一幅半对数坐标图，通过图可以定性判断大气降水、岩石风化、蒸发结晶对河流水化学的影响，但是由于水化学数据较旧，用 Gibbs 图分析人类活动强烈的流域研究结果会产生偏差<sup>[42]</sup>；三角图法表示河水溶质主要载荷离子相对丰度和分布特征，从而揭示不同岩石风化对河水总溶质成分的相对贡献率<sup>[43]</sup>，且该方法在河流水化学研究中得到广泛应用<sup>[44-45]</sup>；端

元图法将水体中离子的主要来源分为蒸发岩溶解、碳酸盐岩和硅酸盐岩的化学风化。由于数据来源的限制，若用来描述岩性较复杂的流域有一定局限性。

## 2.2 定量化

质量平衡法、同位素追踪法同样用于分析元素来源。质量平衡法通过一系列步骤将溶解物质分配给对应源矿物的一种计算方法，河水溶解物质 X 质量平衡方程可表示为：

$$[X]_{riv} = [X]_{cyc} + [X]_{eva} + [X]_{car} + [X]_{sil} + [X]_{anth}$$

方程中:riv=river; cyc=循环源; eva=蒸发岩源; car=碳酸岩源; sil=硅酸盐源; anth=人类活动源。

利用同位素追踪分析不同岩性流域离子来源主要利用氢氧同位素、Sr 浓度中  $87\text{Sr}/86\text{Sr}$  比值判断河流中元素来源。除此之外，Li、C、N、Zn 等同位素也应用于河流水化学研究；质量平衡法与同位素追踪法被广泛应用，喀斯特地区流域情况复杂，离子来源以及河流内循环更是如此。今后，应加强数理统计方法研究。本文针对上述 5 种方法在表 4 中进行一定归纳对比。

表 4 研究方法

Tab. 4 Research methods

	方法介绍	特 点	定性/定量
Gibbs 图法	一幅半对数坐标图，定性判断大气降水、岩石风化、蒸发结晶三者对河流水化学影响	范围较大，含概全面，较直观；但由于水化学数据较旧，研究结果会有偏差	定性分析
Piper 三角图法	分为阳离子三角图赫阴离子三角图，分别以 $\text{K}^+ + \text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} - \text{Si}$ 为顶点，根据离子相对丰度判断河水主要离子来源	适合于岩组性质差异大和水化学类型较简单流域，单独用于分析研究不够充分，属于定性化描述，复杂流域研究结果会出现偏差。	定性分析

	方法介绍	特 点	定性/定量
端元图法	一种对数坐标图,分为 Ca/Na—Mg/Na 和 Ca/Na—HCO <sub>3</sub> /Na 端元图,蒸发岩溶解,硅酸盐岩和碳酸盐岩分为水体中离子主要来源,利用水样 Na 校正比值判断河水水化学类型	符合岩性较单一流域,不能单一分析研究,定性描述。	定性分析
质量平衡法	利用一系列步骤及质量平衡方程将溶解物质分配给对应矿物的一种计算方法。	计量计算分析,模型计算分配清晰全面,应用广泛。	定量分析
同位素追踪法	利用同位素比值及相应特点对比分析河流离子来源	利用元素自身特点,方法严谨,研究结果说服力强,应用广泛。	定量分析

### 3 总结与展望

流域水化学特征是流域水文过程中水与周围环境相互作用的结果,河水中水化学离子对河流流经地区环境具有指示作用。喀斯特地区河流水化学研究虽较普遍,但在研究内容上翔实度还不够,今后应注意以下几个方面:

1) 相关研究表明,河流水化学具有昼夜动态变化特征<sup>[46-48]</sup>,喀斯特地区溶蚀作用强烈,河流水体离子季节变化规律研究已较完善,今后应加强对河流中元素昼夜变化规律研究。昼夜间河流相对快速的生物地球化学过程中水生植物扮演了不可或缺的重要角色。国外有研究表明,水生植物活动对河流水体中溶解氧、电导、pH 等水化学指标变化有显著影响<sup>[49-51]</sup>,其中水生植物的光合作用与光照、温度相关,且是导致 pH、溶解氧变化的主要原因。河流中生物作用(光合作用和呼吸作用)导致水体内部氧化还原环境改变是河水中微量元素产生昼夜动态变化的主控因素。当前研究大多是针对河流中 DIC 昼夜变化及碳通量估算,水体中其余化学元素昼夜变化以及河流内部相对环境下的形态变化研究较为缺乏,在往后研究中值得关注。

2) 西南喀斯特区大流域水化学已形成一套系统的研究,小流域研究尚为不足。小流域是大流域的分支,小流域水化学规律研究对大流域综合特征分析有重要贡献。特征性小河流可作为该类型流域的代表,认识其水化学规律对往后研究提供借鉴和参考。今后应增加小流域水化学研究力度,弥补研究区域不足,使流域水化学研究更为全面。现行的研究方法主要是以定性化描述为主,若是岩性复杂的流域定性化描述方法会有所偏差,往后多引用定量化方法,增加研究结果的可信度。

3) 近几年,随着经济发展,人类活动对自然环境干扰愈发明显,关于河流健康研究应着重加强关注特征性小流域探究。喀斯特地区生态力脆弱,不同土地利用方式势必会对河流产生影响,水体中离子相对含量以及变化特征也会引起相应变化。目前关于工农业活动对河流水质影响研究较多,但人为活动影响下河流水化学特征研究较为不足,尤其针对人为活动影响显著的代表性河流,如农田流域、城镇河流等。农田流域中离子变化特征研究对所处区域农业活动管理及该区水资源利用与保护具有现实意义,今后在该方面应进行深入研究。

#### 参考文献【REFERENCES】

- 
- [1] WANG Z L, ZHANG J, LIU C Q. Strontium isotopic compositions of dissolved and suspended loads from the main channel of the Yangtze River [J]. *Chemosphere*, 2007, 69(7) : 1081-1088.
- [2] RYU J S, LEE K S, CHANG H W, et al. Chemical weathering of carbonates and silicates in the Han River Basin, South Korea [J]. *Chem Geol*, 2008, 247(1/2) : 66-80.
- [3] XU Z F, LIU C Q. Chemical weathering in the upper reaches of Xijiang River draining the yunan-Guizhou plateau, Southwest China [J]. *Chem Geol*, 2007, 239(1/2) : 83-95.
- [4] XU Y F, MARCANTONIO F. Stontium isotope variations in the lower Mississippi River and its estuarine mixing zone [J]. *Mar Chem*, 2007, 105(1/2) : 118-128.
- [5] HOSONO T, NAKANO T, IGETA A, et al. Impact of fertilizer on a small watershed of Lake Biwa: use of sulfur and strontium isotopes in environmental diagnosis [J]. *Sci Total Environ*, 2007, 384(1-3) : 342-354.
- [6] RYU J S, LEE K S, CHANG H W. Hydrogeochemical and isotopic investigations of the Han River Basin. South Korea [J]. *J Hydrol*, 2007, 345(1/2) : 50-60.
- [7] SINGH S K, KUMAR A, FRANVE-LANORD C. Sr and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in waters and sediments of the Brahmaputra river system:Silicate weathering,  $\text{CO}_2$  consumption and Sr flux [J]. *Chem Geol*, 2006, 234(3/4) : 308-320.
- [8] HAN G L, LIU C Q. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karstdominated terrain, Guizhou Province, China [J]. *Chem Geol*, 2004, 204(1/2) : 1-21.
- [9] MILLOT R, GAILLARDET J, DUPRE B, et al. Northern latitude chemical weathering rates: clues from the Mackenzie River Basin, Canada [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67(7) : 1305-1329.
- [10] 乐嘉祥, 王德春. 中国河流水化学特征 [J]. *地理学报*, 1963, 29(1) : 1-13.
- [11] 陈静生, 王飞越, 夏星辉. 长江水质地球化学 [J]. *地学前缘*, 2006, 13(1) : 74-85.
- CHEN J S, WANG F Y, XIA X H. Geochemistry of water quality of the Yangtze River basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(1) : 74-85.
- [12] 陈静生, 王飞越, 何大伟. 黄河水质地球化学 [J]. *地学前缘*, 2006, 13(1) : 58-73.
- CHEN J S, WANG F Y, HE D W. Geochemistry of water quality of the Yellow River Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(1) : 58-73.
- [13] 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.
- LV J M, AN Y L, WU Q X, et al. Hydrochemical characteristics and sources of Qingshuijiang River Basin at

---

wet season in Guizhou province [J]. *Environmental Science*, 2015, 36 (5) :1565-1572.

[14] 焦杰松, 何师意, 张红波. 岩溶区流域水化学时空变化特征——以桂江流域为例 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 39(3) : 158-165.

JIAO J S, HE S Y, ZHANG H B. Water chemical temporal and spatial changes characteristics in Karst areas [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 39(3) : 158-165.

[15] 张红波, 何师意, 于爽, 等. 桂江流域河流水化学特征及影响因素 [J]. *中国岩溶*, 2012, 31(4) : 395-401.

ZHANG H B, HE S Y, YU S, et al. Hydrochemical characteristics and influencing factors of the river water in the Guijiang [J]. *Carsologica sinica*, 2012, 31(4) : 395-401.

[16] 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 等. 桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程 [J]. *环境科学*, 2014, 35(6) : 2009-2107.

TANG W K, TAO Z, GAO Q Z, et al. Biogeochemical processes of the major ions and dissolved inorganic carbon in the Guijiang River [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(6) : 2009-2107.

[17] 安艳玲, 吕婕梅, 吴起鑫, 等. 赤水河流域上游枯水期水化学特征及其影响因素分析 [J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(8) : 117-122.

AN Y L, LV J M, WU Q X, et al. Hydrochemical characteristics of upper Chishui River basin in dry season [J]. *Environmental Science Technology*, 2015, 38(8) : 117-122.

[18] 蒲焘, 何元庆, 朱国锋, 等. 丽江盆地地表—地下水的水化学特征及其控制因素 [J]. *环境科学*, 2012, 33(1) : 48-54.

PU T, HE Y Q, ZHU G F, et al. Geochemistry of surface and ground water in the Lijiang Basin, northwest Yunnan [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(1) : 48-54.

[19] 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.

YUAN Y Q, HE S Y, YU S, et al. Hydrochemical characteristics and the dissolved carbon flux in Liujiang basin [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(7) : 2437-2445.

[20] 章程. 岩溶区河流水化学昼夜变化与生物地球化学过程 [J]. *中国岩溶*, 2015, 34(1) : 1-8.

ZHANG C. Diel aqueous chemistry and biogeochemical processes in streams of karst areas [J]. *Carsologica sinica*, 2015, 34(1) : 1-8.

[21] MEYBECK M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolver loads [J]. *American*

---

Journal of Science, 1987, 287(5) : 401-428.

[22] SUCHET P A, PROBST J L. A global model for presentday atmospheric /soil CO<sub>2</sub> consumption by chemical erosion of continental rocks ( GEM-CO<sub>2</sub>) [J]. Tellus, 1995, 47 (1/2 ) :273-280.

[23] 刘再华, Dreybrodt W, 李华举. 灰岩和白云岩溶解速率控制机理的比较 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2006, 31(3) : 411-416.

LIU Z H, DREYBRODT W, LI H J. Comparison of dissolution ratedetermining mechanisms between limestone and dolomite [J]. Earth Science ( Journal of China University of Geosciences), 2006, 31(3) :411-416.

[24] 焦树林, 刘丽, 孙婷, 等. 三岔河流域水文特征与化学风化碳汇效应 [J]. 地理研究, 2013, 32(6) : 1025-1032.

JIAO S L, LIU L, SUN T, et al. Hydrochemical characteristics and the atmospheric carbon sink in the chemical weathering processes of the Sanchahe watershed [J]. Geosciences Research, 2013, 32( 6) : 1025-1032.

[25] 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.

SUN P A, YU S, MO F Z, et al. Hydrochemical characteristics and influencing factors in different geological background: a case study in Darongjiang and Lingqu basin, Guangxi China [J]. Environmental Science, 2016, 37( 1) : 123-131.

[26] 陈静生, 夏星辉. 我国河流水化学研究进展 [J]. 地理科学, 1999, 19( 4) : 290-294.

CHEN J S, XIA X H. Progress in research on river hydro-chemistry in china [J]. Scientia Geosciences Sinica, 2016, 37 (1) :123-131.

[27] 杨立铮. 中国南方岩溶水化学的某些特征 [J]. 成都地质学院学报, 1989, 16( 1) : 93-101.

YANG L Z. Chemical characterristics of Karst water in south China [J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1989, 16(1) :93-101.

[28] STALLARD R F, EDMOND J M. Geochemistry of the Amazon: 2. Influence of geology weathering environment on the dissolved load [J]. Journal of Geophysical Research, 1983, 88(C14) : 9671-9688.

[29] GAILLARDET J, DUPRE B, ALLEGRE C J. Geochemistry of large river suspended sediments: silicate weathering or recycling tracer? [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(23-24) : 4037-4051.

[30] 韩贵琳, 刘丛强. 贵州乌江水系的水文地球化学研究 [J]. 中国岩溶, 2000, 19( 1) : 35-43.

HAN G L, LIU C Q. Hydrogeochemistry of Wujiang River water in Guizhou province [J]. Carsologica sinica, 2000, 19 (1) : 35-43.

---

[31] 赵继昌, 耿冬青, 彭建华, 等. 长江河源区的河水主要元素与 Sr 同位素来源 [J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(2) :89-93.

ZHAO J C, GENG D Q, PENG J H, et al. Origin of major elements and Srisotope for river water in Yangtze R iver source area [J]. Hydrogeology ans Engineering Geology, 2003, 30 (2) : 89-93.

[32] 王兵, 李心清, 袁洪林, 等. 西江干流河水主要离子及锶同位素地球化学组成特征 [J]. 地球化学, 2009, 38 (4) :345-353.

WANG B, LI X Q, YUAN H L, et al. Geochemical characteristics of main ion and Sr isotope in the main channel of Xijiang river, south China [J]. Geochimica, 2009, 38(4) : 345-353.

[33] 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, 36(1) : 72-79.

YU S, SUN P A, DU W Y, et al. Effect of hydrogeochemistry characteristics under impact of Human activity: a case study in the upper reaches of the Xijiang River basin [J]. Environmental Science, 2015, 36(1) : 72-79.

[34] 尹新雅, 陶发祥. 寻找人类活动影响南明河的水化学指纹: I. 空间变化 [J]. 地球与环境, 2012, 40(4) : 517-523.

YIN X Y, TAO F X. Searching for hydrochemical imprints indication human impact on the Nanming River: I. spatial variations [J]. Earth and Environment, 2012, 40(4) : 517-523.

[35] 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 hydrochemica and  $\delta^{13}\text{CDIC}$  in the upper and middle reaches of the Wujiang River [J]. Environmental Science, 2015, 36(9) : 3220-3229.

[36] HU M H, STALLARD R F, EDMOND J M. Major ion chemistry of some large Chinese rivers [J]. Nature, 1982, 298(5874) : 550-553.

[37] 李晶莹, 张经. 黄河流域化学风化作用与大气  $\text{CO}_2$  的消耗 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(2) : 43-49.

LI J Y, ZHANG J. Chemical weathering processes and atmospheric  $\text{CO}_2$  consumption in the Yellow River drainage basin [J]. Marine Geology Quaternary Geology, 2003, 23(2) : 43-49.

[38] 王亚平, 王岚, 许春雪, 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 (2-3) :446-456.

WANG Y P, WANG L, XU C X, et al. Hydrogeochemistry and genesis of major ions in the Yangtze River China [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(2-3) : 446-456.

---

[39] 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.

[40] 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): 331-356.

XIE C J, GAO Q Z, TAO Z. Review and perspectives of the study on chemical weathering and hydrogeochemistry in river basin [J]. Tropical Geography, 2012, 32(4): 331-356.

[41] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1971, 170(3962): 1088-1090.

[42] JHA P K, TIWARI J, SINGH U K, et al. Chemical weathering and associated CO<sub>2</sub> consumption in the Godavari river basin, India [J]. Chemical Geology, 2009, 264(1-4): 364-374.

[43] HUH Y, TOSI M Y, ZAITSEV A, et al. The fluvial geochemistry of the rivers of eastern Siberia: I. Tributaries of the Lena river draining the sedimentary platform of the Siberian Craton [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62(10): 1657-1676.

[44] HAGEDORN B, CARTWRIGHT I. Climatic and lithologic controls on the temporal and spatial variability of CO<sub>2</sub> consumption via chemical weathering: an example from the Australian Victorian Alps [J]. Chemical Geology, 2008, 260(3/4): 234-253.

[45] GAO Q, TAO Z. Chemical weathering and chemical runoffs in the seashore granite hills in South China [J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 53(8): 1195-1204.

[46] SPIRO B, PENTECOST A. One day in the life of a stream—a diurnal inorganic carbon mass balance for a travertine-depositing stream (waterfall beck, Yorkshire) [J]. Geomicrobiology Journal, 1991, 9(1): 1-11.

[47] FINLAY J C. Controls of streamwater dissolved inorganic carbon dynamics in a forested [J]. Biogeochemistry, 2003, 62(3): 231-252.

[48] 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.

[49] NIMICK D A, CLEASBY T E, MCCLESKEY R B. Seasonality of diel cycles of dissolved trace-metal concentrations in a Rocky Mountain stream [J]. Environmental Geology, 2005, 47(5): 603-614.

[50] NAGORSKI S A, MOORE J J, MCLINNON T E, et al. Scale-dependent temporal variations in stream water geochemistry [J]. Environmental Science and Technology, 2003, 37(5): 859-864.

[51] WALDRON S, SCOTT E M, SOULSBY C. Stable isotope analysis reveals lower-order river dissolved inorganic

---

carbon pools are highly dynamic [J] . Environmental Science and Technology, 2007, 41( 7) : 6156-6162.

[52] POULSON S R, SULLICAN A B. Assessment of dielchemical and isotopic techniques to investigate biogeochemical cycles in the upper Klamath River, Oregon, USA [J] . Chemical Geology, 2010, 269(1-2) : 3-11.

[53] LIU Z, LI Q, SUN H, et al. Diurnal variations of hydrochemistry in a travertine-depositing stream at Baishuitai, Yunnan, SW China [J] . Aquatic Geochemistry, 2006, 12 (2) : 103-121.

[54] LIU Z, LI X, SUN H, et al. Daytime deposition and nighttime dissolution of calcium carbonate controlled by submerged plants in a karst spring-fed pool: Insights from high time-resolution monitoring of physico-chemistry of water [J] . Environmental Geology, 2008, 55( 6) : 1159-1168.