

黄婕, 于爽, 罗惠先, 等. 西江流域水文水化学因子对岩溶系统碳汇通量的影响分析[J]. 岩矿测试, 2016, 35(6): 642-649.
HUANG Jie, YU Shi, LUO Hui-xian, et al. Effects of the Hydrology-Water Chemistry Factors of the Xijiang River Basin on the Carbon Sink Flux in the Karst System[J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, 35(6): 642-649.
【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.2016.06.011】

西江流域水文水化学因子对岩溶系统碳汇通量的影响分析

黄 婕¹, 于 爽^{2,3*}, 罗惠先¹, 林丹辉¹

- (1. 梧州市水文水资源局, 广西 梧州 543000;
2. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074;
3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 河流岩溶碳汇通量的研究对于掌握全球碳循环机制、寻找“遗漏碳汇”具有重要意义。水文地质特征是岩溶动力系统的重要单元, 为了分析河流岩溶碳汇在通量、长时间尺度的变化, 本文选取受湿润季风气候影响显著的西江梧州断面为研究对象, 探讨了 2011~2015 年西江流域流量、水位、本地降水量、水温、pH 值、电导率、Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 浓度等水文水化学因子对岩溶碳汇通量的影响。结果表明: ①岩溶碳汇通量与流量、水位的相关系数均在 0.95 以上, 岩溶碳汇通量与流量达到了同步变化, 岩溶碳汇通量与水位良好的相关关系则是通过水位对流量响应表现出来; 降水通过不同方式进入河流直接改变地表径流状况, 进而影响岩溶碳汇通量。②水温对岩溶碳汇通量的影响与西江流域雨季与夏季在同一时间段的气候特点有关, 属于次要因子。③监测点水体常年呈弱碱性, pH 值对岩溶碳汇通量的影响较弱; 电导率、Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 浓度主要受流量影响, 对岩溶碳汇通量变化的影响甚微。由此推断, 流量是岩溶碳汇通量的主控因素。

关键词: 西江流域; 岩溶碳汇通量; 水文水化学因子; 流量

中图分类号: X143 **文献标识码:** B

自工业革命以来, 大气 CO₂ 增加导致全球气候变化加剧, 是当今人类社会可持续发展面临的最严峻的挑战之一, 已经引起国际高度关注^[1]。目前 CO₂ 减排是政府控制温室效应的主要措施, 而固碳过程及储碳机制是科学研究面临的首要任务。由于在岩石化学风化过程中(地质碳汇效应)可以对大气 CO₂ 进行天然捕获, 研究河流碳输送通量对于掌握全球碳循环机制、寻找“遗漏碳汇”、探讨河流对全球气候变化的响应机制具有重要意义^[2-7]。

流域岩石风化碳汇, 主要包括碳酸盐风化碳汇和硅酸盐风化碳汇。自气候变化的岩石风化控制学说提出至今, 学者普遍认为是硅酸盐的化学风化碳汇作用(CO₂ + CaSiO₃ → CaCO₃ + SiO₂)控制着长时

间尺度的气候变化^[8]; 而岩溶作用(碳酸盐风化)在长时间尺度内并未形成明显的碳汇效应^[9], 通常被认为是“碳转移”^[10]。随着研究的进一步深入, 对岩石风化碳汇研究已有一些新的认识: 碳酸盐溶解的快速动力学和硅酸盐岩流域中微量碳酸盐矿物的风化在控制该流域溶解无机碳(DIC)浓度和碳汇上占据着重要地位, 并且碳酸盐风化碳汇占整个岩石风化碳汇的 94%, 而硅酸盐风化仅占 6% 左右^[11-13]。陆地水生生态系统光合生物对 DIC 的利用(“生物碳泵作用”)以及由此形成的有机碳埋藏(内源有机碳)所产生的碳汇是一种真正的碳汇^[14-15]。

西江作为珠江流域主要支流之一, 前人已进行了大量研究工作。陈静生等^[16]对西江流域水化学

收稿日期: 2015-04-29; 修回日期: 2016-08-10; 接受日期: 2016-11-14
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41402324, 41402238); 中国地质调查局地质调查项目(121201237000160002, 121201107000150003); 广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFBA118228)
作者简介: 黄婕, 工程师, 主要从事水质分析工作。E-mail: 269231562@qq.com。
通讯作者: 于爽, 助理实习员, 主要研究方向水文地质、岩溶环境。E-mail: yushi@karst.ac.cn。

特征、水质状况和流域特征作了较为详尽的分析;高全洲等^[17]、张连凯等^[18]对西江流域化学风化及河流碳汇效应进行了详细的研究和计算;Yu 等^[19]运用水化学平衡法计算出人类活动影响对西江流域岩溶碳汇通量的影响比例;Sun 等^[20]计算了西江流域碳汇效应过程中无机碳转变为有机碳的比例。由此看出,对于西江流域岩溶碳汇效应的研究,形式多样,而水文地质特征作为岩溶动力系统的重要单元,利用数学手段解析西江流域岩溶碳汇通量与水文水化学因子相关关系进而分析各因子对碳汇通量的贡献较为少见。因此,本文选取西江中上游梧州断面(梧州水文站)为研究对象,对 2011 年 4 月至 2015 年 3 月西江梧州断面(梧州水文站)岩溶碳汇通量和流量、水位、本地降水量、水温、pH 值、电导率、Ca²⁺、HCO₃⁻ 浓度动态变化特征进行分析,探讨以上水文水化学因子对岩溶碳汇通量的影响,监测河流岩溶碳汇在通量、时间尺度的变化,为更好地理解水文地质特征等环境条件对岩溶动力系统的影响提供依据。

1 实验部分

1.1 研究区域地质概况

西江是珠江水系的主流,经亚热带湿热季风气候区,全长 2214 km,流域面积约 35 万 km²,年平均径流总量 2300 亿 m³,径流年内变化大,4~9 月为非汛期,约占全年径流量 72%~78%,多年平均温度 12~14℃,年际变化小。流域下伏岩层以沉积岩和岩浆岩为主,其中浅海相沉积碳酸盐岩面积最大,占流域总面积的 44%,主要连片分布于流域中上游地区,现代地表和地下溶蚀过程非常强烈;岩浆岩以花岗岩类占绝大多数,集中分布于广西东部和广东境内。

西江流域土壤以赤红壤和红壤为主,云贵高原 600~800 m 以上地区及桂西北 700~1200 m 以上山地上覆黄壤。石灰岩地区分布有石灰土,河谷平原,盘地灌溉水源解决的地区还分布有水稻土。西江中上游主要干流——桂江由北向南,经兴安、桂林、阳朔、平乐、昭平终于广西梧州。梧州断面距珠江口大约 300 km。

梧州水文站集水面积 327006 km²,占西江流域集水面积的 94.6%,控制了广西境内 85% 的来水。该站自建站以来实测最高水位 27.79 m,实测最低水位 2.52 m,实测最大流量 53700 m³/s,实测最小流量 720 m³/s^[21]。

1.2 数据采集

本研究以梧州水文站监测水点采集的数据为基础,对监测水点中的 Ca²⁺和 HCO₃⁻、岩溶碳汇通量及主要环境参数进行分析。从 2011 年 4 月到 2015 年 3 月,监测密度平均每月三次,遇暴雨时加密。当年 4 月到次年 3 月为一个水文年,4 月至 9 月是西江汛期,10 月至次年 3 月是西江非汛期。

现场用德国产 pH/Cond340i 多参数水质仪测试地表水的水温、pH 值和电导率,其中电导率是由温度自动补偿至 25℃ 的值,水温、pH 值、电导率精度分别达到 0.1℃、0.01 个 pH 单位和 1 μs/cm;使用碱度计(德国 Merck 公司)测定水样的 HCO₃⁻和 Ca²⁺浓度,分辨率分别为 0.1 mmol/L 和 1 mg/L。流量、水位、本地降水量来自广西梧州水情分中心信息查询系统,精度分别为 0.1 m³/s、0.1 m、0.1 mm。

1.3 岩溶作用碳强度计算

本文对岩溶水系统碳酸盐岩溶解所致碳能力的计算,采用水化学-流量方法,以下反应式(1)~(4)为估算碳酸盐岩化学风化所消耗大气 CO₂ 量的基本原理与公式:

CO₂(g) ⇌ CO₂(aq) (1)

CaCO₃ + CO₂ + H₂O = Ca²⁺ + 2HCO₃⁻ (2)

CaMg(CO₃)₂ + 2CO₂ + 2H₂O = Ca²⁺ + Mg²⁺ + 4 HCO₃⁻ (3)

K_{CS} = 0.5 × Q × ρ(HCO₃⁻) × t × 44/61 (4)

式(1)为大气或土壤中的气态 CO₂ 通过慢转化过程成为溶解 CO₂ 的过程;式(2)和(3)为石灰岩或白云岩的溶蚀过程;式(4)为岩溶水系统岩溶碳汇通量计算公式。

式(4)中:K_{CS} 为岩溶碳汇通量(t,以 CO₂ 计算);Q 为流域排泄量(m³/s);ρ(HCO₃⁻) 为水中 HCO₃⁻ 的质量浓度(mg/L);44 和 61 分别为 CO₂ 和 HCO₃⁻ 的分子量;t 为计算时段(月);因子 0.5 表示碳酸盐溶解形成的 HCO₃⁻ 只有一半是大气成因的碳。

1.4 数据分析方法

流量、水位、水温、pH 值、电导率和 Ca²⁺、HCO₃⁻ 浓度采用月平均值,而降水对岩溶作用来说是一种累积的促进作用,所以采用每月累计降水量,而不是平均降水量。由于岩溶作用是一种潜在的、持续吸收 CO₂ 的碳汇过程,所以采用每月岩溶碳汇通量作为分析指标。

将上述参数录入 SPSS19.0 或 Origin8.5 进行统计分析,采用 Pearson 相关系数说明变量间相关程度。

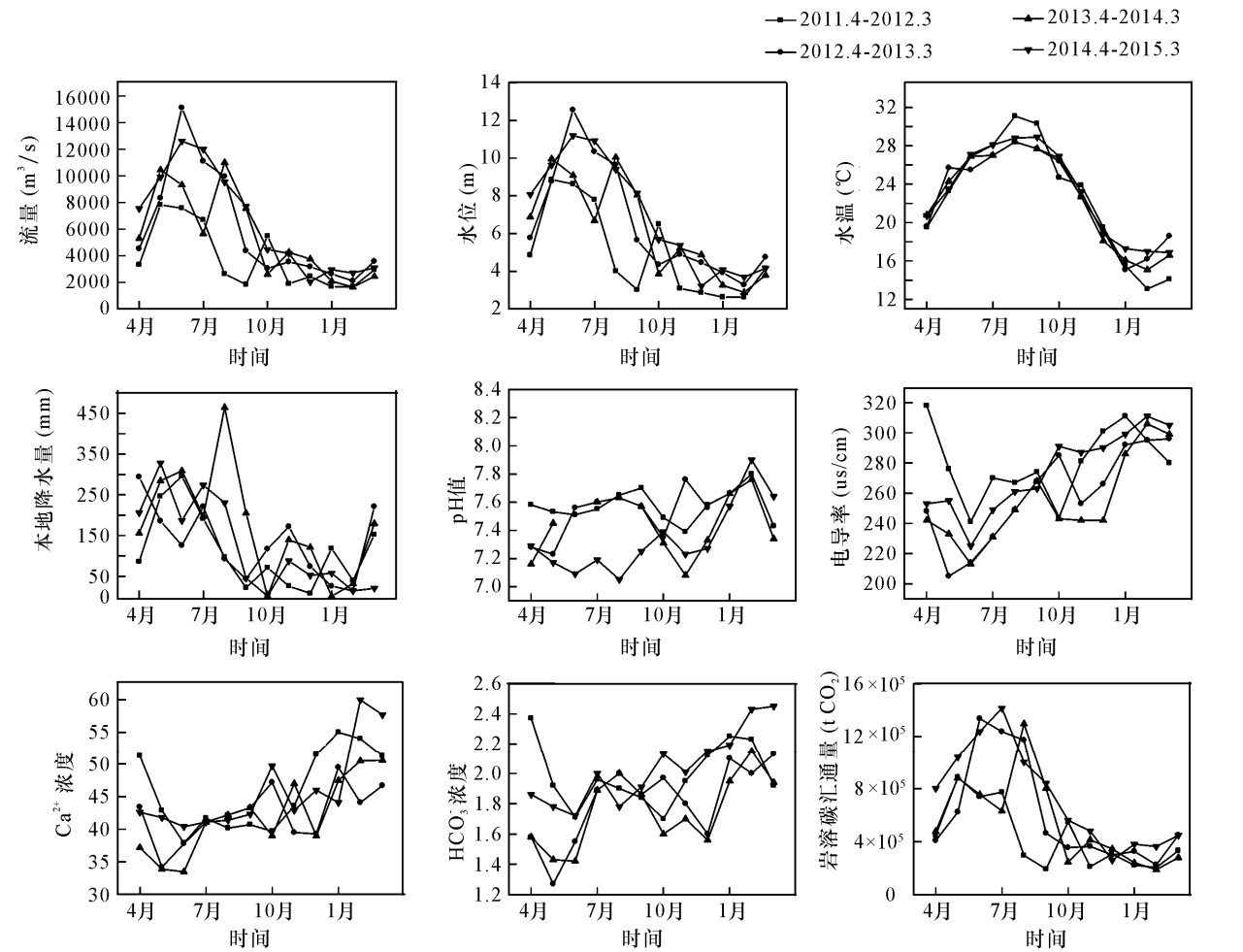


图 1 监测水点水文水化学因子与岩溶碳汇通量的季节变化
Fig.1 Seasonal change of hydrology-water chemistry factors and carbon sinks in the Wuzhou hydrological station

2 结果与讨论

2.1 监测水点环境参量季节变化特征

图 1 为梧州水文站监测水点在 4 个水文年时间尺度上的水文水化学监测数据动态变化曲线,该图清晰显示了监测点的流量、水位、本地降水量、水温、pH 值、电导率和 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 浓度的季节变化规律。流量的变化范围为 $1647.60 \sim 15106.06 \text{ m}^3/\text{s}$,平均值 $5461.71 \text{ m}^3/\text{s}$ 。水位的变化范围为 $2.62 \sim 12.55 \text{ m}$,平均值 6.16 m 。流量、水位表现明显的波动,呈现同步变化。监测水点的流量、水位最大值一般在 5、6 月份出现,最小值常在 2 月份出现。水温变化范围为 $13.1 \sim 31.1^\circ\text{C}$,平均值 22.7°C 。本地降水量变化范围为 $1.0 \sim 464 \text{ mm}$,平均值 135.9 mm 。水温、本地降水量在 4 个水文年内随时间变化趋势基本一致。水温和本地降水量符合水热同期、温暖湿润的气候特点。春夏两季,水温升高,本地降雨量增多;秋冬两季,水温降低,本地降雨量减少。

pH 值的变化范围为 $7.05 \sim 7.80$,平均值 7.46 。统计时段内,梧州水文站监测水点水体总体呈弱碱性。电导率的变化范围为 $205 \sim 318 \text{ }\mu\text{s}/\text{cm}$,平均值 $267 \text{ }\mu\text{s}/\text{cm}$ 。 Ca^{2+} 浓度的变化范围为 $33.5 \sim 60.0 \text{ mg}/\text{L}$,平均值 $44.0 \text{ mg}/\text{L}$ 。 HCO_3^- 浓度的变化范围为 $1.27 \sim 2.45 \text{ mmol}/\text{L}$,平均值 $1.90 \text{ mmol}/\text{L}$ 。研究区水样的类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 型,化学风化类型主要属于岩石风化,主要来自于流域上游的碳酸盐岩溶解, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 是主要的阳离子和阴离子^[22]。电导率、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度随时间的变化趋势一致,从侧面反映了水体中含有大量的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 。岩溶碳汇通量的变化范围为 $188531.84 \sim 1413825.15 \text{ tCO}_2$,平均值 578566.72 tCO_2 ,岩溶碳汇通量动态变化与流量、水位的动态变化趋势相似。

2.2 岩溶碳汇通量与监测水点水文水化学因子的关系分析

为了研究河流岩溶碳汇通量与水文水化学因子

之间的关系,应用 SPSS19.0 软件对各参数之间的相关性进行双变量分析。表 1 列出了 2011 ~ 2015 年西江梧州断面岩溶碳汇通量与水文水化学因子之间的相关性统计数据。有必要说明的是,2013 年 1 月、2 月、3 月,pH 值这项指标缺测,在 SPSS19.0 进行相关性分析时,采用第 2 个水文年 pH 年均值 7.50代替时间序列中缺失的数据;2014 年 3 月,pH 值这项指标缺测,采用第 3 个水文年 pH 年均值 7.40代替时间序列中缺失的数据。

2.2.1 岩溶碳汇通量与流量、水位关系

4 个水文年内,岩溶碳汇通量与流量相关系数分别是 0.985、0.963、0.955、0.988,岩溶碳汇通量与流量基本上达到了同步变化。岩溶碳汇通量与水位相关系数分别是 0.981、0.958、0.955、0.983。岩溶碳汇通量与流量、水位均呈显著的正相关关系。从岩溶碳汇计算公式和计算结果可知,流量和 HCO_3^- 浓度共同影响着岩溶碳汇强度的大小^[23]。可以推断岩溶碳汇通量主要受控于流量,即流量是岩溶碳汇通量的主控因素。岩溶碳汇通量与水位显著的正相关关系,通过水位对流量响应表现出来。流量增大,水位升高,岩溶碳汇通量增大;流量减小,水位降低,岩溶碳汇通量减少。

2.2.2 岩溶碳汇通量与本地降水量关系

4 个水文年内,岩溶碳汇通量与本地降水量相关系数分别是 0.817、0.214、0.931、0.810,本地降水量与岩溶碳汇通量存在正相关关系,但不是简单的线性相关,本地降水量对岩溶碳汇通量的影响体现在本地降水量对流量直接响应。降水直接影响水文和径流状况^[24]。碳汇过程受到雨水稀释效应、

CO_2 效应及水岩相互作用的控制,但在降水的不同时段其作用各不相同^[25]。分析降水对河流岩溶碳汇通量影响时,需要综合考虑气候特点、流域性降水对河流水体的水动力、水化学、生物作用的影响。在 2012 年 4 月到 2013 年 3 月,上游降水较少、本地降水对流量补给影响微小,所以岩溶碳汇通量与本地降水量正相关关系不明显。以上数据说明:在雨量丰沛的季节,本地降水量与岩溶碳汇通量相关明显;在干旱季节,本地降水量对岩溶碳汇通量影响微小。

2.2.3 岩溶碳汇通量与水温关系

4 个水文年内,岩溶碳汇通量与水温相关系数分别是 0.316、0.639、0.734、0.749。水温对岩溶碳汇通量的影响通过水温与水体环境的相互影响表现出来。研究期间,水温与电导率、 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 浓度呈明显负相关关系。电导率的变化主要反映河水水化学变化。水温升高,河水 CO_2 脱气过程和水生植物的光合作用加强(利用水体中 HCO_3^-),水体中方解石过饱和,发生碳酸钙沉积,导致 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 浓度减少,电导率降低^[26]。在夏季,水生植物生长繁殖较快,水生植物在太阳辐射作用下进行光合作用,吸收水中溶解的 CO_2 或 HCO_3^- 经碳酸酐酶转化进行光合作用并释放出 O_2 ,导致水体二氧化碳分压(p_{CO_2})降低,促进水体碳酸盐沉积^[27]。

水温对岩溶碳汇通量的影响具体体现为水温升高时,温度的升高导致脱气作用使岩溶碳汇通量减少,同时光合作用的增强使水生植物将无机碳转变为有机碳的能力增强,岩溶碳汇通量受到影响,反之亦然。然而在统计时段内,水温与岩溶碳汇通量呈

表 1 2011 ~ 2015 梧州水文站岩溶碳汇通量与水文水化学因子之间的相关性
Table 1 Correlation of carbon sinks and physicochemical factors in the water of the Wuzhou hydrological station (2011—2015)

4 个水文年	流量 (m^3/s)	水位 (m)	本地降水量 (mm)	水温 ($^{\circ}\text{C}$)	pH 值	电导率 ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Ca^{2+} 浓度 (mg/L)	HCO_3^- 浓度 (mmol/L)
2011.4 ~ 2012.3 每月岩溶碳汇通量 (tCO_2)	0.985 **	0.981 **	0.817 **	0.316	-0.169	-0.469	-0.489	-0.377
2012.4 ~ 2013.3 每月岩溶碳汇通量 (tCO_2)	0.963 **	0.958 **	0.214	0.639 *	0.249	-0.674 *	-0.400	-0.156
2013.4 ~ 2014.3 每月岩溶碳汇通量 (tCO_2)	0.955 **	0.938 **	0.931 **	0.734 **	0.205	-0.468	-0.456	-0.114
2014.4 ~ 2015.3 每月岩溶碳汇通量 (tCO_2)	0.988 **	0.983 **	0.810 **	0.749 **	-0.670 *	-0.896 **	-0.622 *	-0.731 **

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关。

正相关关系,水温升高,岩溶碳汇通量增大;水温下降,岩溶碳汇通量减少,其原因可能与梧州地区雨热同期气候特点有关。每年2月,气温低,降水量小,流量偏少,岩溶碳汇通量处于全年最低水平;同年5~8月,水温保持在一个较高水平,流域内降水频繁,流量增大,岩溶碳汇通量达到全年最高水平。水温对碳酸盐岩溶蚀的影响过程则相对复杂,从长时间尺度来看,水温对岩溶碳汇通量有正面的影响。

2.2.4 岩溶碳汇通量与 pH 值、电导率、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度关系

4个水文年内,岩溶碳汇通量与 pH 值相关系数分别是 -0.169、0.249、0.205、-0.670。统计时段内,岩溶碳汇通量与 pH 没有显著相关关系。由于监测水点水体常年呈弱碱性,pH 值对岩溶碳汇通量影响并不明显。闫志为等^[28]研究表明:无论温度高低,在 10~100℃ 范围内,均表现出酸性水中 H_2CO_3 占优势,碱性水中 CO_3^{2-} 占优势,偏酸、偏碱及中性水中 HCO_3^- 占优势的规律。pH 值对岩溶碳汇通量有待进一步探讨。

4个水文年内,岩溶碳汇通量与电导率的相关系数分别是 -0.469、-0.674、-0.468、-0.896;岩溶碳汇通量与 Ca^{2+} 浓度相关系数分别是 -0.489、-0.400、-0.456、-0.622;岩溶碳汇通量与 HCO_3^- 浓度相关系数分别是 -0.377、-0.156、-0.114、-0.731。研究期间,岩溶碳汇通量与电导率、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度的负相关关系越来越显著。 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 来源于上游碳酸盐岩溶解, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 作为水体中阳离子和阴离子的主要离子是影响电导率变化的主要因素。流量增大,水体中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的含量不断增加,电导率不断变大。由于径流稀释作用大于汇集作用,所以流量与电导率、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度呈现负相关。根据流量与岩溶碳汇通量良好的正相关关系,可以推断岩溶碳汇通量主要受控于流量,即流量是岩溶碳汇通量的主控因素^[29]。岩溶碳汇通量与电导率、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度的负相关关系体现了流量对电导率、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度的负面影响。

以上分析表明,流量变化不仅主导了岩溶碳汇通量变化,还直接削弱了电导率、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度与岩溶碳汇通量的关系。因此,在大江大河碳汇研究中,电导率、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度与岩溶碳汇通量影响微弱。

3 结论

依据梧州水文站监测水点水文水化学因子与岩溶碳汇通量的变化特征,确定了流量是影响监测水点岩溶碳汇通量最主要因子;水位、本地降水量对岩溶碳汇通量的影响是依附于流量变化,属于次要因子;水温对河流岩溶碳汇通量的影响与梧州地区雨热同期气候特点有关,属于次要因子;由于监测水点水体常年呈弱碱性,pH 值对河流岩溶碳汇通量的影响并不明显;由于流量变化主导着岩溶碳汇通量变化,所以电导率、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度对岩溶碳汇通量变化的影响十分微弱。

许多研究者将相关关系分析应用于河流地球化学特征研究,但是流域环境因素在一定程度上以不同方式影响着地表化学风化的速率。其中,构造运动和地貌发育过程决定了流域尺度上地表化学风化的强度和化学径流组成^[30]。所以,在研究不同水系统岩溶碳汇通量影响因素时,需结合水动力条件、水化学过程、区域气候特点等信息进行综合分析,而分析单因子与岩溶碳汇通量关系时往往容易忽略水圈、生物圈之间的耦联关系。

本次分析是建立在梧州水文站监测水点 2011 年 4 月至 2015 年 3 月岩溶碳汇监测数据的基础上,有一定代表性,也有区域限制性。因此,全面、系统地探讨流域尺度上岩溶碳汇影响机理,建立地表河流岩溶碳汇通量估算模型还有许多工作需要继续开展。

4 参考文献

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M] // Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2013: 465-570.
- [2] Jiang Z, Yuan D. CO_2 Source-Sink in Karst Processes in Karst Areas of China [J]. Episodes, 1999, 22 (1): 33-35.
- [3] Gombert P. Role of Karstic Dissolution in Global Carbon Cycle [J]. Global and Planetary Change, 2002, 32 (1-2): 177-184.
- [4] Liu Z, Zhao J. Contribution of Carbonate Rock Weathering to the Atmospheric CO_2 Sink [J]. Environmental Geology, 2000, 39 (9): 1053-1058.
- [5] Yong J J, Yi J H, Schirmer M. Biogeochemical Controls

- on Daily Cycling of Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}$ of Dissolved Inorganic Carbon in a Karst Spring-Fed Pool [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 478: 157 – 168.
- [6] Liu Z H, Dreybrodt W. Significance of the Carbon Sink Produced by H_2O -Carbonate- CO_2 -Aquatic Prototroph Interaction on Land [J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(2): 182 – 191.
- [7] White W B. Carbon Fluxes in Karst Aquifers: Sources, Sinks, and the Effect of Storm Flow [J]. *Acta Carsologica*, 2013, 42(2–3): 177 – 186.
- [8] Meybeck M. Global Chemical Weathering of Sacrificial Rocks Estimated from River Dissolved Loads [J]. *American Journal of Science*, 1987, 287(5): 401 – 428.
- [9] 吴卫华, 郑洪波, 杨杰东, 等. 硅酸盐风化与全球碳循环研究回顾及新进展 [J]. *高校地质学报*, 2012, 18(2): 215 – 224.
- Wu W H, Zheng H B, Yang J D, et al. Review and Advancements of Studies on Silicate Weathering and the Global Carbon Cycle [J]. *Geological Journal of China University*, 2012, 18(2): 215 – 224.
- [10] Curl R L. Carbon Shifted But Not Sequestered [J]. *Science*, 2012, 335(6069): 655.
- [11] 刘再华. 岩石风化碳汇研究的最新进展和展望 [J]. *科学通报*, 2012, 57(2–3): 95 – 102.
- Liu Z H. New Progress and Prospects in Study of Rock-Weathering-related Carbon Sinks [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(2–3): 95 – 102.
- [12] 刘再华, Dreybrodt W, 刘恒. 大气 CO_2 汇: 硅酸盐风化还是碳酸盐风化的贡献? [J]. *第四纪研究*, 2011, 31(3): 426 – 430.
- Liu Z H, Dreybrodt W, Liu H. Atmosphere CO_2 Sink: Silicate Weathering or Carbonate Weathering [J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(3): 426 – 430.
- [13] Liu Z H, Dreybrodt W, Wang H. A New Direction in Effective Accounting for the Atmospheric CO_2 Budget: Considering the Combined Action of Aarbonate Dissolution, the Global Water Cycle and Photosynthetic Uptake of DIC by Aquatic Organisms [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99(3–4): 162 – 172.
- [14] 刘再华, Dreybrodt W. 碳酸盐风化碳汇与森林碳汇的对比 [J]. *中国岩溶*, 2012, 31(4): 345 – 348.
- Liu Z H, Dreybrodt W. Comparison of Carbon Sequestration Capacity between Carbonate Weathering and Forests: The Necessity to Change Traditional Ideas and Methods of Study of Carbon Sinks [J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(4): 345 – 348.
- [15] 蒋忠诚, 袁道先, 曹建华, 等. 中国岩溶碳汇潜力研究 [J]. *地球学报*, 2012, 33(2): 129 – 134.
- Jiang Z C, Yuan D X, Cao J H, et al. A Study of Carbon Sink Capacity of Karst Processes in China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(2): 129 – 134.
- [16] 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, 35(6): 786 – 793.
- Chen J S, He D W. Chemical Characteristics and Genesis of Major Ions in the Pearl River Basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1999, 35(6): 786 – 793.
- [17] 高全洲, 沈承德, 孙彦敏, 等. 珠江流域的化学侵蚀 [J]. *地球化学*, 2001, 30(3): 223 – 230.
- Gao Q Z, Shen C D, Sun Y M, et al. Chemical Weathering in Zhujiang River Drainage [J]. *Geochemica*, 2001, 30(3): 223 – 230.
- [18] 张连凯, 秦小群, 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, 34(8): 3025 – 3034.
- Zhang L K, Qin X Q, Yang H, et al. Transported Fluxes of the Riverine Carbon and Seasonal Variations in Pearl River Basin [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(8): 3025 – 3034.
- [19] Yu S, He S Y, Sun P, et al. Impacts of Anthropogenic Activities on Weathering and Carbon Fluxes: A Case Study in the Xijiang River Basin, Southwest China [J]. *Environment Earth Science*, 2016, 75: 589.
- [20] Sun H G, Han J T, Zhang S R, et al. Carbon Isotopic Evidence for Transformation of DIC to POC in the Lower Xijiang River, SE China [J]. *Quaternary International*, 2015, 380 – 381: 288 – 296.
- [21] 黄婕, 于爽. 梧州水文站和昭平水文站岩溶碳汇特点研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(4): 136 – 141.
- Huang J, Yu S. Studies of the Characteristic Carbon Sink in the Water of the Wu Zhou Hydrological Station and the ZhaoPing Hydrological Station [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2014, 41(4): 136 – 141.
- [22] 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 Hydrochemistry Characteristics under Impact of Human Activity: A Case Study in the Upper Reaches of Xijiang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(1): 72 – 79.

- [23] 裴建国, 章程, 张强, 等. 典型岩溶水岩溶碳汇通量估算[J]. 岩矿测试, 2012, 31(5): 884–888.
Pei J G, Zhang C, Zhang Q, et al. Flux Estimation of Carbon Sink in Typical Karst Water Systems[J]. Rock and Mineral Analysis, 2012, 31(5): 884–888.
- [24] 曹建华, 杨慧, 康志强. 区域碳酸盐岩溶蚀作用岩溶碳汇通量估算初探: 以珠江流域为例[J]. 科学通报, 2011, 56(26): 2181–2187.
Cao J H, Yang H, Kang Z Q. Preliminary Regional Estimation of Carbon Sink Flux by Carbonate Rock Corrosion: A Case Study of the Pearl River Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(26): 2181–2187.
- [25] 康志强, 梁礼革, 何师意, 等. 广西弄拉表层岩溶动力系统水循环碳汇效应研究[J]. 地球学报, 2014, 35(4): 481–486.
Kang Z Q, Liang L G, He S Y, et al. The Carbon Sink during Karst Water Cycle in the Epikarst Dynamical System of Nongla, Guangxi [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(4): 481–486.
- [26] 莫雪, 蒲俊兵, 袁道先, 等. 亚热带典型岩溶区地表溪流溶解无机碳昼夜变化特征及其影响因素[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 873–880.
Mo X, Pu J B, Yuan D X, et al. Diel Variation and Influence Factors of Dissolved Inorganic Carbon in a Surface Creek Fed by a Karst Subterranean Stream in Subtropical Area SW China [J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(4): 873–880.
- [27] 李亮, 曹建华, 黄芬, 等. 桂林潮田河 Ca^{2+} , Mg^{2+} 与 HCO_3^- 关系模型及岩溶碳汇影响因素分析[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4): 106–111.
Li L, Cao J H, Huang F, et al. Relation Models of Ca^{2+} , Mg^{2+} and HCO_3^- and Analyses of Carbon Sinks Influencing Factors in the Chaotian River, Guilin [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(4): 106–111.
- [28] 闫志为, 刘辉利, 陶宗涛. 温度对水中碳酸平衡的影响浅析[J]. 中国岩溶, 2011, 30(2): 128–131.
Yan Z W, Liu H L, Tao Z T. Temperature Effect on Carbonic Acid Balance in Water [J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(2): 128–131.
- [29] 康志强, 袁道先, 常勇, 等. 岩溶碳汇的主控因子——水循环[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(5): 1542–1547.
Kang Z Q, Yuan D X, Chang Y, et al. The Main Controlling Factor of Karst Carbon Sequestration: About Water Cycle [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(5): 1542–1547.
- [30] 陶贞, 高全州, 刘昆. 流域化学风化过程的碳汇能力[J]. 第四纪研究, 2011, 31(3): 408–415.
Tao Z, Gao Q Z, Liu K. Carbon Sequestration Capacity of the Chemical Weathering Process within Drainage Basins [J]. Quaternary Sciences, 2011, 31(3): 408–415.

Effects of the Hydrology-Water Chemistry Factors of the Xijiang River Basin on the Carbon Sink Flux in the Karst System

HUANG Jie¹, YU Shi^{2,3*}, LUO Hui-xian¹, LIN Dan-hui¹

- (1. Wuzhou Hydrology and Water Resources Bureau, Wuzhou 543000, China;
2. College of Environment, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;
3. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, The Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources, Guilin 541004, China)

Highlights:

- The relationship between river carbon sinks and the hydrology-chemistry factors from 2011 to 2015 has been discussed.
- The flow has dominated the change of the river carbon sinks.
- The other hydrology-water chemistry factors such as pH, EC, Ca^{2+} and HCO_3^- concentration, have no obvious effect on the change of the river carbon sinks directly.

Abstract: The river carbon sink flux is important for the global carbon cycle and finding the missing carbon sink. Hydrogeological features are important parts of the karst dynamic system. In order to analyze the long-term trend and flux changes of river carbon sink, the Wuzhou section of Xijiang that was significantly affected by the wet monsoon climate was selected as the study object. In this paper, the effects of the hydrology and chemistry factors such as flow, water level, rainfall, water temperature, pH, EC, Ca^{2+} , HCO_3^- of Xijiang river basin from 2011 to 2015 on the river carbon sink flux are discussed. Results show that ① there is a good correlation of river carbon sink flux with the flow and water? level? (correlation coefficients >0.95). The carbon sink flux varies with flow and the good correlation between the carbon sink flux and water level was reflected by the effect of water level on the flow. The rainfall enters a river by different ways, which directly changes the run off in surface and further affects the river carbon sink flux. ②The effect of water temperature on the river carbon sink flux was secondary and related to the climate of summer and monsoon of the Xijiang river basin during the same period. ③The pH has no obvious effect on the river carbon sink flux because the monitor point water is weakly alkaline. The EC, Ca^{2+} or HCO_3^- were mainly affected by flow and have little effect on the carbon sink flux. Therefore, the flow is the most important factor for the carbon sink flux.

Key words: Xijiang River Basin; carbon sinks; hydrology-water chemistry factors; flow

