贵州阿哈湖喀斯特小流域 DOC 输出特征

黄轶婧¹ 吴起鑫^{1,2} 安艳玲³ 吕婕梅³ 陈银波¹ 何守阳^{1,21}

(1. 贵州大学 国土资源部喀斯特环境与地质灾害重点实验室,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)

【摘 要】: 河流不仅是陆地碳循环的通道,也是碳交换的重要场所,而小流域更被认为是陆地碳循环的热点。为 探究人类活动影响下喀斯特小流域溶解性有机碳 (DOC) 输出特征,于 2017 年 6 月~2018 年 5 月对阿哈湖 3 条主要入 湖小流域游鱼河、白岩河、金钟河河水主要理化特征和 DOC 含量进行分析,并计算流域 DOC 输出通量。研究期间游 鱼河、白岩河、金钟河 DOC 含量分别为 4.78±2.11、5.61±2.27、7.40±2.51mg/L,输出通量分别为 2.71、2.91、 3.82t/(km².a)。结果表明:(1) 阿哈湖小流域河水 DOC 含量时空变化特征明显,与降雨、流域土地利用类型密切相关, 人类外源输入对 DOC 有显著影响;(2) 对比不同河流 DOC 输出特征发现,小流域通常具有更高的 DOC 输出通量,特别是 受城市输出影响的中小流域,其河流碳过程在碳循环中的贡献可能被低估。

【关键词】: DOC 输出通量 阿哈湖 小流域 人类活动

【中图分类号】:S153.61【文献标识码】:A【文章编号】:1004-8227 (2020) 03-0706-08

溶解性有机碳 (DOC) 是河流碳循环中的重要组成部分,每年大约有 0.14~0.21 Pg DOC 通过河流输入海洋^[1]。近年来大量河流 DOC 监测结果表明 DOC 浓度呈逐年增长趋势,河流 DOC 循环机理日益受到关注^[2,3]。许多研究表明 DOC 的增加与受到人类活动的影响有关,例如土地利用方式的改变^[4,5]、生活废水的排入^[6,7]等明显改变了河流中 DOC 含量及其输出通量。

近期一些研究表明,小流域因其体量小、对外界干扰响应迅速,对于理解陆地-水体系统的碳循环驱动过程、评价人为活动的影响、揭示河流内部碳释放机理具有先天的优势^[8,9]。然而,目前国内对于河流有机碳循环的研究主要集中在少数大型河流主河道、河口以及大型水库,对小流域碳循环的研究相对较少^[10-13]。喀斯特地区是我国碳循环活跃的区域,在全球碳循环中发挥着重要作用^[14],而人类活动通过影响河流生态系统间接对河流碳输出通量和组成造成一定程度的影响^[15]。本研究选取喀斯特地区受人类活动影响明显的阿哈湖主要入湖支流游鱼河、白岩河、金钟河为研究对象,对 2017 年 6 月~2018 年 5 月河水主要水文指标及 DOC 进行分析研究,探讨人类活动对河水 DOC 含量及输出通量的影响,并将不同类型河流 DOC 含量及输出通量进行对比,揭示人类活动影响下河流 DOC 输出规律及其影响因素,为建立和完善河流 DOC 循环研究提供科学依据。

^{&#}x27;**作者简介:** 黄轶婧(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向为小流域碳循环.E-mail:549185713@qq.com; 吴起鑫 E-mail:wuqixin03@163.com

基金项目:国家自然科学基金(41603123, 41763019, 41501018);国家自然科学基金委-贵州省喀斯特联合基金项目(U1612442);贵州省科技厅联合基金项目(黔科合LH字[2016]7457号);贵州省水利厅科技基金项目(KT201508);贵州一流学科建设(GNYL[2017]007);黔教合KY字([2016]045)。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州阿哈湖位于贵阳市穿城河流南明河上游,属于长江流域乌江水系南明河支流,106°39′E,26°33′N之间,是贵阳市的 主要供水水源地之一。流域主要地貌类型为岩溶丘陵,岩溶低中山与侵蚀低中山丘陵,喀斯特地貌发育强烈,主要分布三叠系白云 岩、灰岩等碳酸盐岩,为典型的喀斯特小流域。入湖河流有金钟河、白岩河、游鱼河、蔡冲沟、烂泥沟,其中前3条河流约占流 域面积92%。流域主要入湖河流土地利用类型分布见表1,游鱼河主要以农业用地为主,支流上游有废弃煤矿;白岩河上游植被覆 盖高,中下游地区分布有农田和村庄;金钟河流经观山湖、云岩区两个人口密集城区,受城市废水影响明显。

土地利用类型占比(%)	农业用地	林地	草地	建设用地	其他用地	流域面积(km²)
游鱼河	53	36.9	5.96	2.73	1.41	6157.46
白岩河	36.63	40.16	4.39	13.08	5.74	4220.09
金钟河	6. 45	9. 52	1. 58	65.73	16.71	5059.4

表1阿哈湖主要入湖河流流域土地利用类型分布1

1.2 样品采集与分析

于 2017 年 6 月~2018 年 5 月对阿哈湖主要 3 条入湖支流进行样品采集与分析,每月采集一次,采样点分布如图 1 所示。采样 现场使用德国 WTW Multi340i 便携式多参数测试仪现场测定水体 pH、电导率(EC)、溶解氧(DO)、水温(WT);采集的河水样品当天 过滤(0.45 µm Millipore 滤膜),存储于聚乙烯瓶密封,于 4℃冰箱密封保存。总氮(TN)使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB11894-89),氨氮(NH,)使用纳氏试剂分光光度法(GB7479-87),溶解性磷(SDP)、总磷(TP)均使用钼酸铵分光光度法(GB11893-89)进行测定。现场采集水样酸化至 pH<2 后,当天进行测试,测试前将 pH 调节至 7 左右,然后用 0.45 µm 的 Millipore 滤膜过滤,使用 VarioTOC 测定溶解性有机碳(DOC)。所有样品测试过程中定期加入标准和平行样品,测试精度优于±5%。



图1阿哈湖流域采样点分布示意图

2 结果与讨论

2.1 流域主要基本理化性质和水质特征

2.1.1 主要基本理化性质

阿哈湖小流域主要入湖河流 2017年6月~2018年5月主要基本理化参数见表 2。研究期间, 流域 pH 值变化范围为7.15~8.20, 平均值为7.95, 水体总体呈弱碱性。白岩河 pH 值最高, 金钟河 pH 值略低, 游鱼河最低。虽然三条河流 pH 相差不大, 但 EC 差异明 显, 游鱼河 EC 最高 (815.99 μ s. cm⁻¹), 金钟河(582.74 μ s. cm⁻¹)其次, 白岩河(426.74 μ s. cm⁻¹)最低, 与 pH 表现出相反的趋势, 游鱼 河 EC 比白岩河高了近 1 倍。白岩河表现出高 pH 低 EC, pH 与生态环境良好的赤水河(平均值 8.2)接近^[16]。游鱼河低 pH 高 EC, 其 应该与流域内分布有多个废弃煤矿和含煤地层有关, 虽然煤矿已关闭多年, 但仍有少许酸性矿山废水流出。如贵州毕节地区受矿 山废水污染严重的织金小流域具有典型的低 pH 高电导率特征 (pH 平均值 5.77, EC 为 1233.63 μ s. cm⁻¹)^[17]。金钟河受城市废水排 放影响, EC 明显更高, 接近南明河城区河段(319~759 μ s. cm⁻¹)^[18], 但 pH 总体变化不大。

2.1.2 水质特征

2017年6月~2018年5月全年3个小流域不同形态氮、磷浓度如图2所示。3条河流氨氮(NHi)含量存在明显差异,总体表现为金钟河(2.00mg/L)>游鱼河(0.18mg/L)>白岩河(0.15mg/L),金钟河比其他两条河流均高了一个数量级;总氮(TN)含量差异也较大,金钟河(3.86mg/L)含量分别为游鱼河(1.39mg/L)的2.77倍、约为白岩河(1.71mg/L)的2.25倍,白岩河TN含量略高于游鱼河。总磷(TP)和溶解性磷(SDP)与氮含量分布特征总体相似,金钟河明显高于另两条河流,均高了一个数量级。3条河流地质背景相同,可见城市生活废水输入导致金钟河氮、磷含量明显区别于其他河流,也表明金钟河可代表受城市活动影响的典型河流。

西日	游鱼河			白岩河			金钟河		
坝日	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
WT(°C)	8.08	22.23	16.54	9.93	24.63	16.84	11.57	23.47	17.34
рН	7.53	7.97	7.79	7.65	8.35	8.11	7.80	8.30	8.00
DO (mg/L)	7.11	9.75	8.54	6.54	10.48	8.55	5.96	8.59	7.61
EC(μs/cm)	595.25	1137.33	815.99	366. 57	557.83	426.74	521.67	627.67	582.74

表 2 阿哈湖主要入湖河流基本理化参数



图 2 阿哈湖主要入湖河流水质特征

注:Y1-游鱼河上游, Y2-游鱼河中游、Y3-游鱼河中下游, Y4-游鱼河下游, B1-白岩河上游, B2-白岩河中游, B3-白岩河下游, J1-金钟河上游, J2-金钟河中游, J3-金钟河下游.

2.2 人类活动影响下喀斯特小流域 DOC 输出特征

2.2.1 河水 DOC 含量时间变化特征

阿哈湖主要入湖河流 DOC 含量时间分布特征如图 3 所示。游鱼河 DOC 含量变化范围为 2.07~8.30mg/L,平均值为 4.78mg/L; 白岩河 DOC 含量变化范围为 2.52~10.53mg/L,平均值为 5.61mg/L;金钟河 DOC 含量变化范围为 3.21~11.81mg/L,平均值为 7.40mg/L。流域 DOC 含量存在明显的时间变化,且 3 条河流时间变化规律基本一致,与降雨量变化密切相关。DOC 含量在降雨较多 的时期 2017 年 6 月~2017 年 9 月和 2018 年 3 月~2018 年 5 月出现了明显的变化,表现出先升高后降低的趋势,在降雨较少的时 期 2017 年 10 月~2018 年 2 月,DOC 含先升高到一定水平后变化较小。在降雨增多时,降雨冲刷作用、淋滤作用将土壤中有机质 带入河流使 DOC 含量升高,随着土壤有机质的不断流失,降雨带入的雨水会稀释河流中 DOC 含量^[19,20]。



图 3 阿哈湖主要入湖河流 DOC 含量时间变化

2.2.2 河水 DOC 空间分布特征

阿哈湖流域主要入湖河流 DOC 含量空间变化特征如图 4 所示。3 条河流 DOC 含量空间差异明显,总体表现为金钟河最高,白岩 河次之,游鱼河最低。流域 DOC 含量差异主要与土地利用类型分布有关。由流域土地利用类型分布(表1)可知,游鱼河、白岩河土 地利用类型以农业用地和林地为主,金钟河土地利用类型以建设用地为主。金钟河流经贵阳市城区,受生活废水排放影响明显,生 活废水中富含大量的有机质使金钟河 DOC 含量明显高于另外两条河流^[7]。游鱼河农业用地占比较白岩河高,白岩河林地占比略高 于游鱼河,且白岩河建设用地占比要高于游鱼河,推测白岩河 DOC 含量较游鱼河高可能与前者土壤 DOC 含量较高和受生活废水排 入的影响有关。Liu 等^[8]在爱尔兰小流域的发现林地流域 DOC 含量与土壤中 DOC 含量关系显著,且林地为主的小流域 DOC 含量要 高于农业用地为主的小流域。森林地区因为植物凋谢物和腐殖质多,土壤中有机质含量相对较高,农业土壤长年耕作,土壤有机质 矿化明显,其输出 DOC 含量也相对较低^[21]。另外,白岩河流域附近分布有部分居民,生活废水的排放也可能造成河流 DOC 含量升高。



图 4 阿哈湖主要入湖河流 DOC 含量空间变化

2.2.3 主要水质因子与 DOC 的关系

通过作流域全年河水基本理化参数和水质特征指标与溶解性碳的相关性分析发现(见表 3),全年流域 DOC 与氮(NH₄⁻、TN)、磷 (SDP、TP)相关性显著(P<0.05)。氮和磷是河流的主要营养元素,影响着河流内的生物活动,对河流 DOC 含量既有正效应,也有负效应。一方面水生生物可吸收利用河流中不稳定氮、磷合成 DOC^[22,23];另一方面,磷是亚热带河流生态系统中有机碳矿化的重要驱动因素,磷富集时会提高 DOC 微生物降解性,导致 DOC 含量降低^[24]。此外,当 DOC 和氮、磷具有共同来源时也表现出正相关关系^[28,26]。由表 4 可知,本研究流域 DOC 与 N、P 呈极显著正相关关系(P<0.01),与 pH、DO 关系不明显。DO 是控制生物活动的重要因素,阿哈湖小流域处于山地地形,流速较快,DO 含量较高,因此可认为生物活动不受抑制。同时结合金钟河流域高氮磷含量伴随高 DOC,可推测阿哈湖小流域 DOC 与营养物质具有共同来源,这与在中国南部百花湖和红枫湖^[25]、爱达荷州中部 Sawtooth Mountain 小流域^[36]研究结果一致。结合前一步的分析,阿哈湖 3 条主要入湖小流域 DOC 和氮磷主要来源外源输入,受人类活动影响显著。

2.3 流域 DOC 输出通量与其他河流的比较

目前,常用公式(1)和(2)计算河流 DOC 输出通量^[27,28]。

表 3 流域主要水质因子与 DOC 相关性分析 (n=114)

WT	pН	DO	EC	SDP	TP	$\mathrm{NH_4}^+$	TN	DOC	
WT	1								
pН	0.104	1							
DO	640**	0.316**	1						
EC	0.022	-0.505**	-0.170	1					
SDP	-0.102	-0.002	-0.015	0.053	1				
TP	-0.234*	0.013	0.126	0.010	0.843**	1			
$\mathrm{NH_4^+}$	0. 234*	0.053	-0.294**	0.146	0.032	-0.035	1		
TN	0. 377**	0.174	-0.358**	0.050	-0.077	-0.208*	0.777**	1	
DOC	-0.049	-0.157	-0.057	-0.152	0.236*	0. 233*	0. 231 [*]	0.131	1

$$F_{DOC} = \sum_{i=1}^{n} c_i * Q_i$$
(1)
$$E_{DOC} = F_{DOC} / A$$
(2)

式中:Fnc表示 DOC 输出量;Enc表示 DOC 输出通量;n=3;i表示月份;ci表示 i月 DOC 含量;Qi表示 i月径流量;A表示流域面积。

游鱼河、白岩河、金钟河 DOC 输出通量见表 4。Ludwig 等^[20]对全球主要河流 DOC 统计分析发现, 流量是决定河流 DOC 输出通量的最主要因子, 如热带雨林河流流量为全球流量 48.31%, 其 DOC 通量占全球河流输出通量 44%。然而本研究中发现金钟河流量最小却具有最大的 DOC 输出通量, 仔细对比游鱼河和金钟河发现, 金钟河流量为游鱼河的 72.15%, 但 DOC 输出通量却高达游鱼河的 1.41 倍, 可见城市废水输出的高 DOC 含量对河流 DOC 的总体输出通量具有明显的影响, 城市活动对河流 DOC 的影响在大尺度河流的研究可能会被忽视。

对比不同尺度流域 DOC 含量及输出通量发现(表 5),大型河流的 DOC 输出通量小于尺度较小的河流,比如珠江支流西江 DOC 输出通量为 1.64t/(km².a),明显低于白岩河 2.73t/(km².a)。流经城市的河流,特别是小型河流,受纳了大量富含有机质的城市生活 废水,明显比天然河流具有更高的 DOC 输出通量。本研究中金钟河受城市活动影响特征明显,DOC 输出通量明显高出流域面积相近 的白岩河近 2/3。随着河流的自净作用,DOC 在城市的下游河段氧化分解,转化为 CO₂释放进入大气,DOC 含量也逐渐恢复正常水平。 然而,在这个过程中往大气释放的 CO₂在区域模型中往往被忽略了,导致河流内部过程的碳释放低估。

流域	集水面积(km²)	流量Q(m³/S)	$Q(10^4 m^3)$	DOC(mg/L)	F _{DOC} (t/a)	$E_{DOC}[t/(km^2.a)]$
游鱼河	65.9	1.15	3627	4.92	178.45	2.71
白岩河	51.5	0.9	2838	5.28	149.85	2.91

农4 凹喧湖土安入湖河流 DUC 召重及制出迪

金钟河 47.5	0.83	2617	6.93	181.36	3.82
----------	------	------	------	--------	------

河流	流域面积(km²)	监测时间	DOC 范围(mg/L)	DOC 含量(mg/L)	$E_{DOC}[t/(km^2.a)]$	来源
Congo/Zaire	3.5×10 ⁵	1990.11~1993.10	nd	10.6	3.57	[30]
Amazon	5.9 $\times 10^{6}$	1982.09~1984.08	4.0~6.0	4.46	4.46	[29;31]
长江(河口)	nd	2003.06~2004.05	1.09~1.92	1.59	nd	[32]
珠江(西江)	3.5×10 ⁵	2012.04	nd	1.67	1.64	[27]
东江(博罗)	2. 7×10^4	2011.01~2011.12	0.79~2.25	1.37	1.38	[33]
九龙江	1.47×10^{4}	2018.01	1.34~3.56	2.34	2.19	[13]
桂江	9.88 $\times 10^{3}$	2012.05	0.68~2.16	1.39	nd	[34]
漓江	5. 03×10^{3}	2016.01	0.72~2.89	2.16	nd	[35]
红枫湖支流	1.6×10^{3}	2015.08	0.53~5.50	2.39	2.78	[36]
脱甲河	52.12	2014.12~2015.11	0.46~9.54	3.09	nd	[37]
游鱼河	65.9	2017.12~2018.02	3.24~7.4	4.7	2.71	本研究
白岩河	51.5	2017.12~2018.02	3.66~6.22	5. 41	2.91	本研究
金钟河	47.5	2017.12~2018.02	6.56~11.04	7.62	3.82	本研究
全球平均值	106.3×10^{6}	nd	nd	5.37	2.04	[29]

表 5 不同尺度流域 DOC 含量及输出通量对比

3 结论

(1)阿哈湖 3 条主要入湖小流域基本理化性质、水质特征因受人类活动影响差异显著。金钟河受生活废水排放影响明显,水质最差,游鱼河和白岩河相对受人类活动影响较小,水质较好,但游鱼河由于受矿山废水影响,具有最低的 pH 和最高的 EC。

(2) 流域 DOC 含量时空变化明显,其中时间变化与降雨量变化密切相关,在降雨集中时期表现出先升高后下降的变化趋势;空间变化与流域土地利用类型分布有关,表现为金钟河>白岩河>游鱼河,受生活废水排放影响的河流明显具有更高的 DOC 含量,以林地、农业用地为主的河流 DOC 含量可能与土壤中 DOC 含量有关。DOC 与氮、磷显著相关,具有共同的来源,受人类活动影响显著。

(3)对比不同类型河流发现,大尺度流域 DOC 输出通量明显低于小流域,且受城市活动影响的河流 DOC 输出通量明显更高。在碳循环过程中小流域 DOC 含量在水体自净作用下逐渐降低,而这一过程往往容易被忽略,导致河流内部过程的碳释放低估。

参考文献:

[1]DAI M,YIN Z,MENG F,et al.Spatial distribution of riverine DOC inputs to the ocean:An updated global synthesis[J].Current Opinion in Environmental Sustainability, 2012, 4(2):170-178.

[2]COUTURE S, HOULE D, GAGNON C. Increases of dissolved organic carbon in temperate and boreal lakes in Quebec, Canada[J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2012, 19(2):361-371.

[3]SANCLEMENTS M D, OELSNER G P, MCKNIGHT D M, et al. New insights into the source of decadal increases of dissolved organic matter in acid-sensitive lakes of the northeastern United States[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46 (6): 3212-3219.

[4]WANG L, SONG C, GUO Y. The spatiotemporal distribution of dissolved carbon in the main stems and their tributaries along the lower reaches of Heilongjiang River Basin, Northeast China[J]. Environ Science Pollution Research, 2016, 23(1): 1–14.

[5]LIU W, XU X, MCGOFF N M, et al. Spatial and seasonal variation of dissolved organic carbon (DOC) concentrations in Irish streams: Importance of soil and topography characteristics [J]. Environmental Management, 2014, 53 (5):959-67.

[6] 叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 等. 巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素[J]. 环境科学, 2015, 36 (9): 3186-3193.

[7]丁薇,陈敬安,杨海全,等.云南抚仙湖主要入湖河流有机碳来源辨识[J].地球与环境,2016,44(3):290-296.

[8]CRAWFORD J T, DORNBLASER M M, Stanley E H, et al. Source limitation of carbon gas emissions in high-elevation mountain streams and lakes: Mountain stream emissions[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2015, 120(5): 952-964.

[9] BENSTEAD J P, LEIGH D S. An expanded role for river networks [J]. Nature Geoscience, 2012, 5(10):678-679.

[10]张永领. 河流有机碳循环研究综述[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2012, 31 (3): 344-351.

[11] 张永领, 王明仕, 董玉龙. 黄河小浪底水库水沙调控对 DOC 输送的影响 [J]. 环境科学, 2015, 36 (4): 1249-1255.

[12]ZHANG L, XUE M, WANG M, et al. The spatiotemporal distribution of dissolved inorganic and organic carbon in the main stem of the Changjiang (Yangtze) River and the effect of the Three Gorges Reservoir[M]. 2014.

[13]刘金科,韩贵琳,阳昆桦,等.九龙江流域河水溶解态碳的时空变化[J].长江流域资源与环境,2018,27(11):2578-2587.

[14] 刘丛强, 郎赟超, 李思亮, 等. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究:重要性、现状与趋势[J]. 地学前缘, 2009, 16(6):1-12.

[15] 王晓锋, 袁兴中, 陈槐, 等. 河流 CO2 与 CH4 排放研究进展 [J]. 环境科学, 2017, (12):1-17.

[16] 安艳玲, 吕婕梅, 罗进, 等. 赤水河流域岩石化学风化及其对大气 CO2 的消耗[J]. 地球科学进展, 2018, 33 (2): 179-188.

[17]石金芳,吴攀,张瑞雪,等.煤矿排水影响下的水体水质特征及灌溉适宜性评价——以贵州织金县贯城河小流域为例[J]. 节水灌溉,2016,(11):71-76.

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

[19]丁虎,刘丛强,郎赟超,等.桂西北典型峰丛洼地降雨过程中地表水溶解性碳13CDIC变化特征[J].地学前缘,2011,18(6): 182-189.

[20] 乔慧娇. 季节性降雨事件对河流溶解性有机碳的影响——以农业用地为例[D]. 江西师范大学, 2016.

[21]汪智军,梁轩,袁道先. 岩溶流域不同土壤剖面溶解性碳氮分布和淋失特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6):83-87.

[22]RODRÍGUEZ-CARDONA B, WYMORE A S, MCDOWELL W H. DOC:NO3- ratios and NO3-uptake in forested headwater streams[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2016, 121(1):205-217.

[23]CARLSON C A, GIOVANNONI S J, HANSELL D A, et al. Effect of nutrient amendments on bacterioplankton production, community structure, and DOC utilization in the northwestern Sargasso Sea[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2002, 30(1):19-36.

[24]MAO R, CHEN H, LI S. Phosphorus availability as a primary control of dissolved organic carbon biodegradation in the tributaries of the Yangtze River in the Three Gorges Reservoir Region[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574:1472-1476.

[25]LI W, WU F, LIU C, et al. Temporal and spatial distributions of dissolved organic carbon and nitrogen in two small lakes on the Southwestern China Plateau[J].Limnology, 2008, 9(2):163-171.

[26]GOODMAN K J,BAKER M A,WURTSBAUGH W A.Lakes as buffers of stream dissolved organic matter (DOM) variability:Temporal patterns of DOM characteristics in mountain stream - lake systems[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2015, 116 (G4):178-181.

[27]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, 34(8): 3025-3034.

[28]孔凡亭.大沽河溶解性有机碳时空分布特征和通量研究[D].青岛大学,2014.

[29]LUDWIG W, PROBST J L, KEMPE S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(1):23-41.

[30]COYNEL A, SEYLER P, ETCHEBER H, et al. Spatial and seasonal dynamics of total suspended sediment and organic carbon species in the Congo River[J].Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(4).

[31]RICHEY J E, HEDGES J I, DEVOL A H, et al. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River[J].Limnology & Oceanography, 1990, 35(2):352-371.

[32]林晶,吴莹,张经,等.长江有机碳通量的季节变化及三峡工程对其影响[J].中国环境科学,2007,27(2):246-249.

[33]解晨骥.东江流域化学风化的碳汇效应及河流溶解碳的输出过程[D].中山大学,2014.

[34]黄奇波, 覃小群, 唐萍萍, 等. 桂江流域河流有机碳特征[J]. 地质科技情报, 2014, 33(2):148-153.

[35]原雅琼.水生光合生物对漓江流域水化学和岩溶碳汇的影响[D].西南大学,2016.

[36]李甜甜. 赣江上游与红枫湖流域水化学特征及溶解碳的研究[D]. 首都师范大学, 2007.

[37] 吴红宝, 秦晓波, 吕成文, 等. 脱甲河流域水体溶解有机碳时空分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10): 1968-1976.

注释:

1 流域集水面积、流量数据由贵阳市两湖一库管理局提供。