

◆环境科学◆

岩溶区峡谷型水库枯水期表层水体有机碳浓度分布特征*

韦宗校^{1,2}, 杨柳英^{1,2}, 焦树林^{1,2**}, 刘炜^{1,2}, 李银久^{1,2}, 冯柳林^{1,2}, 邵雨潇^{1,2}, 李娟^{1,2}

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院/喀斯特研究院, 贵州贵阳 550001; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州贵阳 550001)

摘要:为揭示岩溶区峡谷型水库碳循环规律,以岩溶区峡谷型水库万峰、董箐水库为研究区,通过现场监测和水体样品采集,分析水库枯水期理化指标、有机碳(Organic Carbon, OC)浓度的变化特征和分布规律。研究结果显示:万峰水库水体温度(Water Temperature, WT)、电导率(Conductivity, COND)、总溶解固体物(Total Dissolved Solids, TDS)含量、氧化还原电位(Oxidation-Reduction Potential, ORP)、总氮(Total Nitrogen, TN)浓度、总磷(Total Phosphorus, TP)浓度均比董箐水库高,且变化范围较大,万峰、董箐水库 WT、COND、TDS、TP的空间差异较小,ORP和TN的变异系数较大,具有较高的空间变异性;万峰水库总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)、溶解有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)浓度分别为3.11—6.66、2.35—5.12 mg/L,呈干流高于马岭河支流的分布特征,董箐水库 TOC、DOC浓度分别为3.07—4.75、2.87—3.99 mg/L,呈库湾(D1) > 码头(D4) > 坝前(D2)的分布特征,万峰水库 TOC和DOC浓度均比董箐水库高,且变化范围较大;万峰、董箐水库有机碳均以DOC为主,颗粒有机碳(Particulate Organic Carbon, POC)含量较少但高于其他水库。本研究为岩溶区水生态系统碳循环研究提供数据支持及参考。

关键词:总有机碳;溶解有机碳;峡谷型水库;岩溶区

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2024)03-0532-09

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20240910.014

水库是全球碳平衡的主要参与者,在全球碳循环中起着重要的调节作用,被认为是全球碳循环的重要调节器^[1,2]。水库的修建不仅增加了水体的滞留时间,扩大了水-陆接触面积,还在一定程度上改变了河流营养物质的地球化学循环及有机碳(Organic Car-

bon, OC)在河流系统中的动态进程,并逐渐演化形成了水库特有的固碳和有机碳埋藏模式,从而影响着内陆水体的碳循环^[3-5]。据统计,湖泊和水库埋藏碳量约占全球陆地水埋藏碳量的68%^[6,7],有机碳总量估计为每年全球海洋有机碳总量的6%—13%,且更具

收稿日期: 2023-12-08

修回日期: 2024-01-24

* 黔科合基金项目(C[2020]1Y252)资助。

【第一作者简介】

韦宗校(1998—),女,在读硕士研究生,主要从事流域地表过程与环境变化研究。

【**通信作者简介】

焦树林(1969—),男,教授,主要从事流域水文地貌系统与环境变化研究, E-mail: jiaoshulin@gznu.edu.cn。

【引用本文】

韦宗校,杨柳英,焦树林,等.岩溶区峡谷型水库枯水期表层水体有机碳浓度分布特征[J].广西科学,2024,31(3):532-540.

WEI Z X, YANG L Y, JIAO S L, et al. Distribution Characteristics of Organic Carbon Concentrations in Upper Layer of Canyon-type Reservoirs in Karst Areas During Dry Season [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(3): 532-540.

稳定性,在水体碳循环中起重要作用^[8,9]。

近年来,国内外学者对湖泊和水库中的有机碳展开研究,并取得丰富的研究成果。王从锋等^[10]解析了不同库龄水库沉积物中总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)来源,发现新、老水库的 TOC 来源存在显著差异。Song 等^[11]通过监测 367 个湖泊和 144 个水库发现,咸水湖中的溶解有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)浓度远高于淡水湖,水库中的 DOC 浓度相对较低。Mendonça 等^[12]将统计模型与内陆水体有机碳的库存量相结合,估计每年约 40% 的有机碳被储存在水库中,进一步证明了水库在全球碳循环中的重要性。随着“碳酸盐岩化学风化碳汇稳定性”质疑的提出^[13],岩溶区水库碳循环也开始受到关注^[14,15],但目前关于岩溶区水库水体有机碳的研究相对较少,更加缺乏有关岩溶区峡谷型水库有机碳的详细研究。因此,深入研究岩溶区峡谷型水库有机碳浓度分布特征及影响因素,不仅能填补该类型研究区的空白,还能为岩溶区后期 DOC 侵蚀通量的研究奠定基础,对揭示岩溶区水库有机碳的生物地球化学特征及来源具有重大意义。

中国西南岩溶区是世界三大岩溶区之一,岩溶区峡谷型水库受人为和自然两大因素影响,流水“二元侵蚀”切割形成了大量的河流峡谷区,为解决“田高水低”的水土资源空间不匹配困局,人类修建了大量的峡谷水库,改变了原有的碳循环模式,形成了复杂的“岩溶河流-岩溶水库”相结合的碳循环体系^[16]。岩溶区峡谷型水库具有“V”形河谷、河谷深切、河库狭窄、水体深度大等特点,总溶解固体物(Total Dissolved Solids, TDS)含量相对较高^[17,18],该类型水库水域的生态系统生产、消费环境条件不同于平原地区浅水水库,形成了独特的“岩溶河流-岩溶水库”混合型岩溶区峡谷型水库水生生态系统规律。峡谷型水库水体滞留时间较短,其水库水体有机碳的研究尚未引起重视。枯水期水体流速缓慢,水环境扰动因素小,利于样本的采集与对比。鉴于此,本研究以我国西南地区珠江流域南盘江和北盘江上的两个不同营养状态、不同库龄的典型岩溶区峡谷型水库(万峰、董箐水库)为研究对象,在枯水期进行采样,探讨水库水体有机碳浓度变化的分布特征及差异性,从而揭示岩溶区峡谷型水库碳循环规律及其影响因素,为岩溶区水生生态系统碳循环研究提供数据支持及参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及采样点设置

万峰水库(东经 104°31′—105°01′,北纬 24°37′—25°23′),位于贵州省黔西南布依族苗族自治州安龙县和广西壮族自治区百色市隆林各族自治县交界处的南盘江中段,是红水河第一级水电站,于 2000 年建成。水库总库容 102.57 亿立方米,调节库容 57.96 亿立方米,多年平均流量 612 m³/s,年径流量 193 亿立方米,河长 263.5 km,落差 425 m。研究区属亚热带季风气候,夏季高温多雨、冬季温和少雨,年平均气温 15—18 ℃,降水量 1 300—1 600 mm。库区两岸以白云岩和石灰岩为主,流域岩溶地貌发育,为高原岩溶峡谷型水库^[19]。

董箐水库(东经 105°27′—105°49′,北纬 25°19′—25°50′),位于贵州省西南部北盘江下游黔西南布依族苗族自治州贞丰县与安顺市镇宁布依族苗族自治县交界河段上,于 2012 年建成。水库总库容 9.55 亿立方米,水库正常蓄水位 490 m,最大坝高 149.5 m,水库的年平均流量 398 m³/s,年平均径流量约为 12.72 亿立方米。研究区属亚热带湿润季风气候,冬季温暖、夏季炎热多雨。多年平均气温 16 ℃,降水量 1 100—1 330 mm,年内分配不均匀,多集中在 7—9 月。库区两岸石灰岩分布广泛,岩溶发育,为岩溶峡谷型水库。

本研究采样时间为 2021 年 12 月,是南盘江和北盘江的典型枯水期。本课题组乘船从坝前至上游逆行对万峰水库、董箐水库进行采样,万峰水库取干流(W1—W3、W11—W16)及支流(W4—W10)共 16 个样点作为研究样点。董箐水库取库湾(D1)、坝前(D2)、库中(D3)、码头(D4)4 个样点作为水库的研究样点,采样期间使用 GPS 定位并记录采样点地理坐标(图 1)。

1.2 样品采集和实验方法

各采样点均利用彼德森采水器在水面以下 0.5 m 处进行表层水样采集,所有聚乙烯容器在实验室用超纯水清洗,在现场采集前用水样润洗 3 次。水体温度(Water Temperature, WT)、总溶解固体物(TDS)、氧化还原电位(Oxidation-Reduction Potential, ORP)、电导率(Conductivity, COND)等使用便携带手持式多参数水质分析仪(Ultrameter-II 6P, Myron L[®] Company, America)在现场进行原位测定,所有指标均测试 3 次,并记录均值。水样分为两份分别

装入 500 mL 经酸洗的聚乙烯瓶中, 不留气泡, 第一份注入适量的饱和 HgCl_2 溶液后密封低温保存, 用于总碳 (Total Carbon, TC)、总有机碳 (TOC)、溶解有机碳 (DOC) 等不同形态水体碳的测定分析, 颗粒有机碳 (Particulate Organic Carbon, POC) 由 TOC 减去 DOC 后计算得出, 第二份水样低温保存, 用于分析主要阴离子。

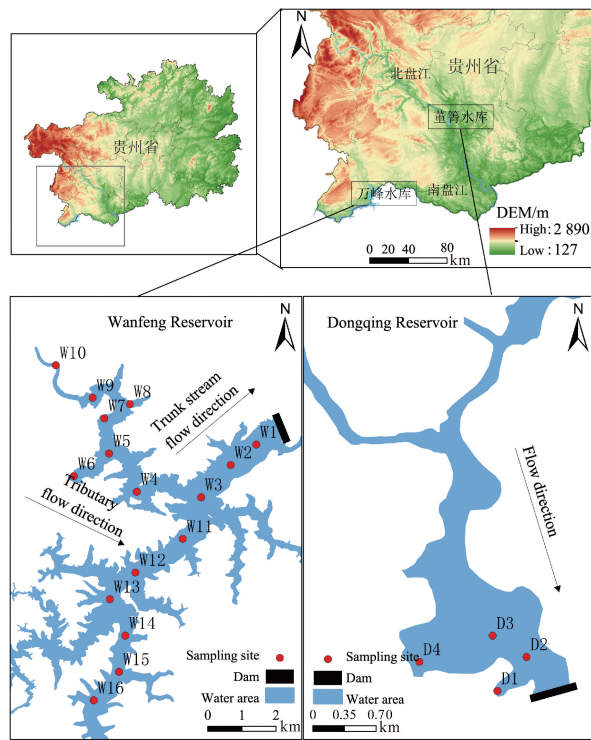


图 1 研究区域及采样点位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area and sampling sites

水样运回实验室后低温保存, 3 d 内在贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地完成所

表 1 万峰、董管水库表层水体各指标统计参数

Table 1 Statistical parameters of each index in upper layer of Wangfeng and Dongqing Reservoirs

指标 Index	万峰水库 Wangfeng Reservoir							董管水库 Dongqing Reservoir								
	WT/ °C	COND/ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TDS/ (mg/L)	ORP/ mV	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	TOC/ (mg/L)	DOC/ (mg/L)	WT/ °C	COND/ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TDS/ (mg/L)	ORP/ mV	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	TOC/ (mg/L)	DOC/ (mg/L)
Range of change	17.5—19.3	426.4—443.9	288.3—297.4	115—330	1.932—3.488	0.018—0.021	3.11—6.66	2.35—5.12	17.9—18.7	411.2—419.1	278.8—282.5	167—238	1.709—2.92	0.017—0.018	3.07—4.75	2.87—3.99
Average	18.7	434.0	293.7	195	2.577	0.019	4.33	3.55	18.3	414.8	280.6	192	2.297	0.017	3.93	3.37
Standard deviation	0.449 0	4.696 4	2.975 4	48.248 0	0.435 2	0.000 7	0.795 9	0.733 1	0.330 0	3.557 6	1.740 7	33.270 0	0.513 2	0.000 5	0.758 2	0.474 0
Coefficient of variation	0.024 0	0.010 8	0.010 1	0.248 1	0.168 9	0.036 8	0.183 8	0.206 5	0.018 0	0.008 6	0.006 2	0.173 5	0.223 4	0.029 4	0.192 9	0.140 7

董管水库 WT 为 17.9—18.7 °C, 最大值出现在采样点 D2, 空间分布特征为坝前 > 码头 > 库湾。

有实验。总磷 (Total Phosphorus, TP)、总氮 (Total Nitrogen, TN) 按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 进行测定^[20,21]。在实验室采用 $\varphi = 0.45 \mu\text{m}$ 的玻璃纤维滤膜进行水样过滤, 将水体颗粒碳与溶解碳分离, 采用日本岛津公司 TOC-LCPH/CPN 总有机碳分析仪 (精度为 $\pm 4 \mu\text{g}/\text{L}$) 测试分析过滤前后的水样, 获取水样的 TOC、DOC、POC 等不同形态水体碳含量浓度。

所有实验数据均在 SPSS 20.2 软件和 Excel 中进行统计分析, 并运用 ArcGIS 10.8、CorelDRAW X4 SP2 及 Origin 2021 Pro 软件进行图像绘制。

2 结果与分析

2.1 指标变化特征

枯水期万峰、董管水库表层水体各指标统计参数如表 1 所示, 主要指标的变化情况如图 2 所示。万峰水库 WT 为 17.5—19.3 °C, 最大值出现在采样点 W13, 干流 WT (采样点 W13 除外) 总体呈现沿水流方向逐渐下降的趋势, 马岭河支流 WT 沿水流方向逐渐升高, 且呈支流 > 干流的特征。COND 为 426.4—443.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 最大值出现在采样点 W1, 最小值出现在采样点 W15; TDS 含量为 288.3—297.4 mg/L , 最大值出现在采样点 W3, 最小值出现在采样点 W15; COND、TDS 含量在干流沿水流方向略有升高, 但马岭河支流沿程变化规律不明显, 总体呈支流 > 干流的特征。ORP 为 115—330 mV, 最大值出现在采样点 W1, 最小值出现在采样点 W8, 在干流和支流沿流程均没有明显的变化规律, 但呈强烈的空间变异性, 空间分布呈干流 > 支流的特征。

COND 为 411.2—419.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 最大值出现在采样点 D1, 没有明显的空间变异性, 空间分布特征表现为

库湾 > 码头 > 坝前。TDS 含量为 278.8—282.5 mg/L, 最大值出现在采样点 D4, TDS 空间分布特征规律为码头 > 库湾 > 坝前。ORP 为 167—238 mV,

最大值出现在采样点 D1, 空间分布呈现出库湾 > 坝前 > 码头的特征。

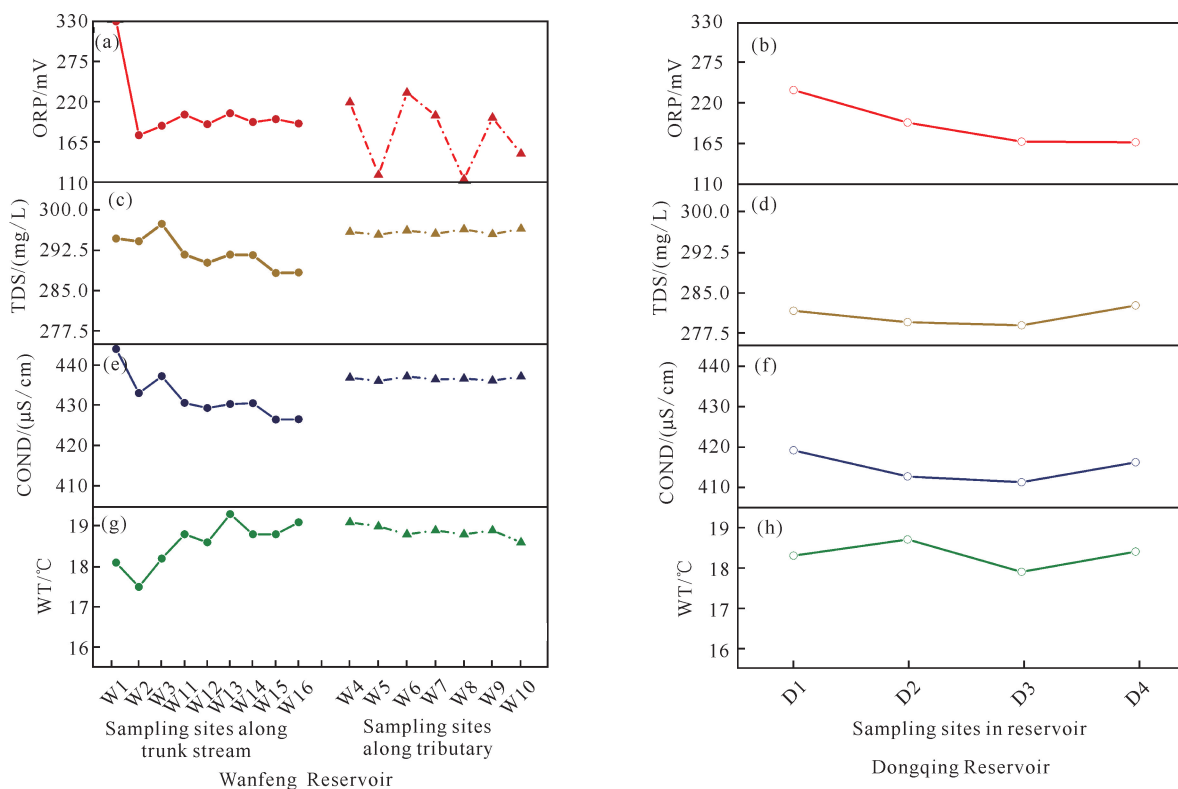


图2 万峰、董管水库 WT、COND、TDS、ORP 变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of WT, COND, TDS and ORP in Wangfeng and Dongqing Reservoirs

2.2 TP、TN 浓度变化特征

万峰、董管水库表层水体 TN、TP 特征如图 3 所示。枯水期万峰水库表层水体 TN 浓度为 1.932—3.488 mg/L, TP 浓度为 0.018—0.021 mg/L。TN 浓度最大值出现在采样点 W2, TP 浓度最大值出现在采样点 W13, TN、TP 浓度的最小值均出现在采样点 W14。枯水期董管水库表层水体 TN 浓度为 1.709—2.920 mg/L, TP 浓度为 0.017—0.018 mg/L; TN 浓度最大值出现在采样点 D2, TP 浓度最大值出现在采样点 D1。采样期间万峰水库、董管水库表层水体 TN 浓度普遍超过国家地表水 V 类水标准 (2.0 mg/L), TP 浓度均达到 II 类水标准。在空间变化上, TN 浓度的变异系数较大, 说明空间分布差异相对较大, 而 TP 浓度的变异系数较小, 表明空间变化差异不大。枯水期万峰水库 TN、TP 浓度的空间分布均呈支流 > 干流的特征; 枯水期董管水库表层水体 TN 浓度的空间分布特征表现为库湾 > 坝前 > 码头, TP 浓度的空间分布呈库湾 > 码头 > 坝前的特征。

2.3 有机碳浓度变化特征

万峰、董管水库表层水体有机碳浓度特征如图 4 所示。万峰水库表层水体 TC 为 36.62—42.81 mg/L, 最小值出现在采样点 W10, 最大值出现在采样点 W14。TOC、DOC 浓度分别为 3.11—6.66、2.35—5.12 mg/L。TOC、DOC 浓度的最小值均出现在采样点 W6, 最大值均出现在采样点 W3, TOC 和 DOC 浓度沿流程没有明显的变化规律。POC 浓度为 0.24—1.95 mg/L, 最小值出现在采样点 W16, 最大值出现在采样点 W3。枯水期万峰水库表层水体 TOC、DOC 浓度在空间分布上均呈干流 > 支流的特征。

董管水库表层水体 TC 浓度为 34.78—36.96 mg/L, 最大值出现在采样点 D4。TOC、DOC 浓度分别为 3.07—4.75、2.87—3.99 mg/L; TOC、DOC 浓度的最小值均出现在采样点 D2, 最大值均出现在采样点 D1。POC 浓度为 0.12—1.17 mg/L, 最小值出现在采样点 D2, 最大值出现在采样点 D4。枯水期董管水库表层水体的 TOC、DOC 浓度的在空间分布上

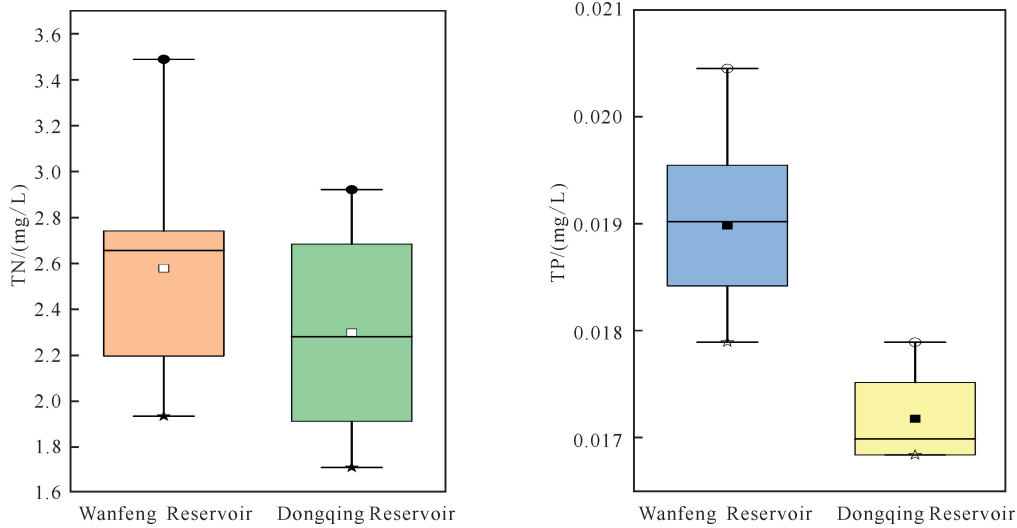


图3 万峰、董箐水库表层水体 TN、TP 特征

Fig. 3 Characteristics of TN and TP in upper layer of Wangfeng and Dongqing Reservoirs

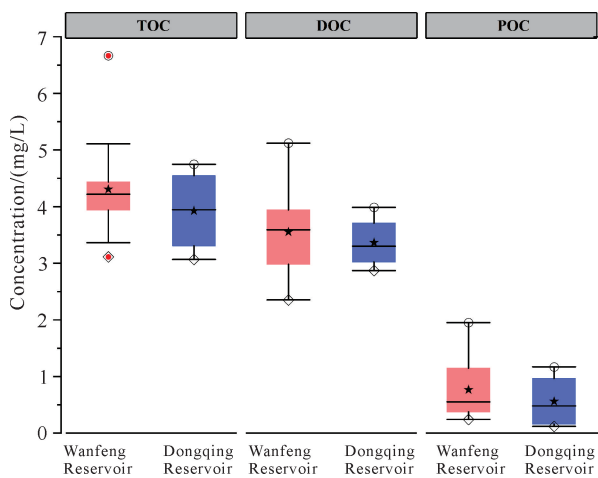
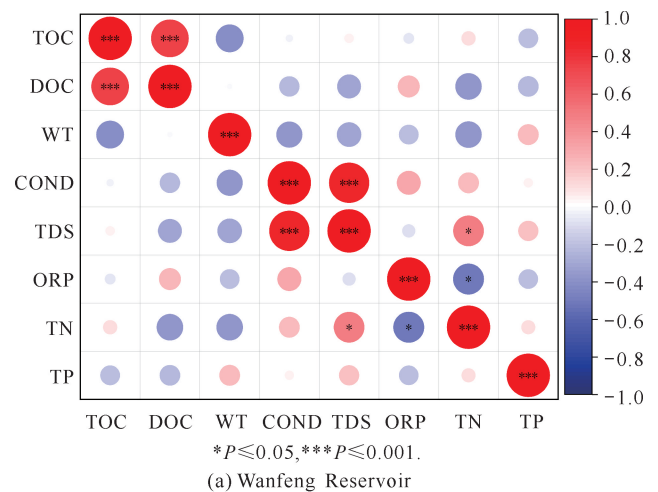


图4 万峰、董箐水库有机碳浓度特征

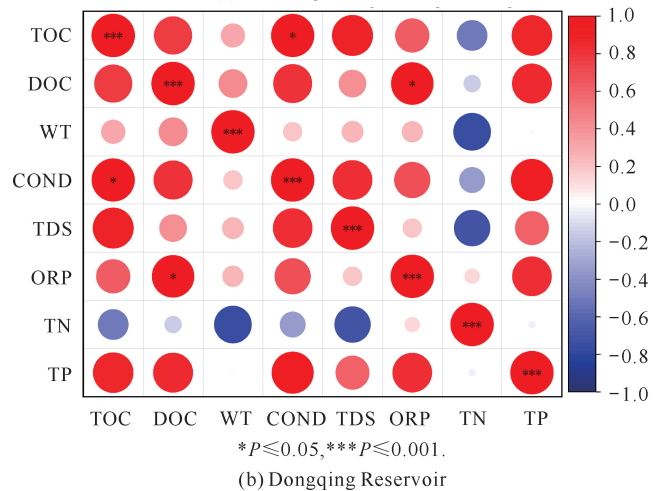
Fig. 4 Characteristics of organic carbon concentrations in Wangfeng and Dongqing Reservoirs
呈库湾>码头>坝前的特征。

2.4 相关性分析

有机碳浓度变化及其分布特征与水环境因素关系密切,通过对有机碳和水环境因子间的 Pearson 相关性分析(图 5),可探明影响有机碳的内在因素与水环境之间的相互关系。采样期间万峰水库表层水体 TOC、DOC 的浓度与 WT、COND、TDS 含量、ORP、TN 浓度、TP 浓度等理化指标参数之间几乎没有显著的相关性,但水体的 COND 与 TDS 呈极显著正相关性($P < 0.001$),水体的 TDS 含量与 TN 浓度存在显著的正相关性($P < 0.05$),ORP 与 TN 浓度呈显著的负相关性($P < 0.05$)。董箐水库表层水体的 TOC 浓度与 WT、TDS 含量、ORP、TN 浓度、TP 浓度等理化指标参数之间的相关性不显著,但水体的



(a) Wangfeng Reservoir



(b) Dongqing Reservoir

图5 万峰水库、董箐水库相关性热图

Fig. 5 Correlation heat map of physicochemical indicators and organic carbon in Wangfeng and Dongqing Reservoirs

TOC 浓度与 COND 之间呈显著的正相关性 ($P < 0.05$); 水体 DOC 浓度与水体的温度、COND、TDS 含量、TN 浓度、TP 浓度等理化指标参数之间的相关性不显著, 但水体 DOC 浓度与 ORP 呈显著的正相关性 ($P < 0.05$)。由此可见, 枯水期两个岩溶区峡谷型水库的碳、氮、磷在水体中的累积与代谢受到不同因素的影响。

3 讨论

3.1 水体理化指标分布特征分析

WT、TDS 含量、ORP、COND、TN 浓度、TP 浓度均是水库环境评价的重要理化指标, 指标的空间变化及分布特征直接反映水体的水质状况, 进而影响其他评价指标的空间变化及分布特征^[22]。

整体上, 枯水期万峰水库表层水体 WT、TDS 含量、ORP、COND、TN 浓度、TP 浓度的均值和变化范围均大于董箐水库。两个水库 WT、COND 和 TDS 含量的变异系数均较小, 说明 WT、COND、TDS 含量在空间上的变化小, 空间分布差异不显著; ORP 变异系数最大, 万峰水库的极值差高达 215 mV, 说明 ORP 空间变异性大, 且在万峰水库空间分布特征中表现明显。ORP 是水溶液中氧化还原能力的测量指标^[23], WT、pH 值、溶解氧、盐度等水环境因素都会使 ORP 产生波动, ORP 越大说明水体的氧化性越强, 越小说明水体的还原性越强。万峰水库和董箐水库的 ORP 最高值分别出现在坝前和库湾, 这些位置的水流较为平缓、营养物质堆积, 为浮游植物提供了良好的生长条件, 表层气体的交换和浮游植物的光合作用使水库表层水体溶解氧含量逐渐上升, ORP 也随之升高。两个水库 COND 均偏高, 这是岩溶地区水体离子含量较高导致的, 研究表明岩溶区控制水库水化学组成的主要机制是岩石风化^[24, 25], 万峰水库可溶性岩种类多, 以白云岩和石灰岩为主, 董箐水库可溶性岩种类单一, 以石灰岩为主; 其次, 万峰水库和董箐水库同为季风性气候, 受纬度位置差异影响, 枯水期万峰水库受冬季风影响小, 导致其表层水体温度高于董箐水库, 有利的岩石条件和气候条件使万峰水库受岩石风化作用更为强烈, 因此其 COND 高于董箐水库。此外, 万峰水库和董箐水库的 COND 和 TDS 含量具有相同的变化趋势和较好的对应关系, 说明两个水库的水体中溶解盐含量较高, 从而 TDS 含量也相对较高。营养盐的负荷与外源输入和沉积物来源的内源污染有关^[26], 万峰水库干流及其支流

涉及云南(滇)、贵州(黔)、广西(桂)的多个县市, 流域面积广大, 大面积的降雨、农田地表侵蚀、生活污水等通过河流汇入水库, 因而表层水体营养物质以外源输入为主, 在自然条件和人类活动双重影响下, 氮、磷等营养盐的负荷量增大; 董箐水库的氮、磷主要通过周边的排放性污水输入^[27], 但受地理位置及库容等条件的限制, 董箐水库接收的排放量较少, 因而该水库水体表层氮、磷等营养盐的负荷量相对较低。

3.2 有机碳浓度分布特征及影响因素分析

TDC 是水质检测中非常重要的指标, 水体中有机碳浓度可直接反映水体所含有有机物的总量及有机污染物的情况。有机碳来源分为内源和外源, 外源性有机碳主要经由陆地植物腐烂代谢及人类生产、生活产生, 内源性有机碳主要经由水体自身的浮游生物光合作用产生^[28]。枯水期万峰水库表层水体 TOC、DOC 的浓度均比董箐水库高, 且万峰水库 TOC、DOC 浓度的变化范围较董箐水库的变化范围大。内源性条件上, 万峰水库枯水期以硅藻为主, 浮游植物主要集中在表层, 整个水库处于中营养状态^[29]; 董箐水库枯水期以绿藻为主, 浮游植物多样性和群落结构较为稳定^[27]。不同丰度、种类的浮游植物进行光合作用释放有机质的能力存在差异^[30], 从而对两个水库的有机碳浓度产生影响。外源性条件上, 万峰水库上游周边的工业废水和生活污水通过径流进入库区, 码头附近则主要接收旅游设施所排放的废水, 因此万峰水库的 TOC、DOC 主要由干流输入, 呈现干流 > 支流的特征; 董箐水库为日调节水库^[31], 即一日内水位从最低水位蓄至最高水位, 又从最高水位降落至最低水位, 如此循环往复, 库区水位规律性涨落可大量增加干流和支流的水体交换, 从而对有机碳产生稀释作用^[32]。此外, 陆源碎屑输入对水库水体有机质的影响不可忽视, 以 0—20 年、20—50 年和 50—100 年的时限为界, 可将水库库龄划分为青年水库、中年水库和老年水库^[33], 万峰水库(2000 年建成)和董箐水库(2012 年建成)分别对应了中、青年水库库龄类型, 岩溶地区水库筑坝不仅增加了水体营养物质的停留时间, 还可能随着水库库龄的增加溶解更多有机质, 从而改变水库水体中有机碳的浓度和动态分布^[10]。可见两个水库表层水体有机碳浓度存在差异, 与水库建成时间的长短有一定的关系性, 建成时间越长水库中的有机碳浓度相对越高。虽然众多研究表明我国湖泊水库中的有机碳以内源性有机碳为主^[25, 34], 但万峰水库和董箐水库有机碳的变化特征揭示了岩溶

地区有机碳来源的复杂性。因此除了着重研究有机碳与浮游植物初级生产力之间的关系这类有机碳内源性条件外,外源物质输入、有机质降解和人类活动频繁程度等有机碳外源性条件也是岩溶区峡谷型水库有机碳研究的重要内容。

从有机碳与其他水体理化指标的相关性上,万峰水库表层水体的 TOC 和 DOC 浓度与 WT、COND、TDS 含量、ORP、TN 浓度、TP 浓度等理化指标参数之间几乎没有显著的相关性;董箐水库表层水体 DOC 浓度与 ORP 呈显著正相关性($P < 0.05$),TOC 浓度与 COND 之间呈显著的正相关性($P < 0.05$),再一次证明了岩溶区峡谷型水库有机碳影响机制的多样性与复杂性。就董箐水库的研究结果来看,崔荣阳等^[35]的研究表明 DOC 具有驱动氧化还原过程的潜力,从而影响地下水中物质的转化,这也解释了为何 DOC 浓度的变化会带来 ORP 的变化。此外,岩溶地区具有特殊的地表-地下双重水文地质结构,地表水与地下水交互剧烈,表现出明显的季节性,除人为调控外,岩溶水库枯水期补给方式主要为地下径流,地下径流携带较多可溶性物质进入库区,导致枯水期水库水体有机碳浓度偏高,TOC 浓度随之增高^[36],COND 与 TOC 浓度的相关性密切,说明 COND 还可用于判断水中溶解物质的种类和浓度,这与不同溶解物质具有不同电导率特性有关。

3.3 与枯水期其他水库有机碳浓度比较分析

万峰水库、董箐水库同属亚热带岩溶区峡谷型水库,与枯水期其他水库表层水体 TOC、DOC 浓度进行比较分析(图 6),发现在枯水期万峰水库、董箐水库表层水体中的 TOC、DOC 浓度均比水布垭水库^[37](位于温带,属岩溶区水库)和五里峡水库^[38](位于亚热带,属岩溶区水库)表层水体中的 TOC、DOC 浓度高,但均低于文武砂水库^[14](位于亚热带)表层水体中的 TOC、DOC 浓度,其中文武砂水库表层水体中的 TOC、DOC 浓度最高,五里峡水库表层水体中的 TOC 浓度最低,DOC 浓度则以水布垭水库表层水体中的含量最低。

从各水库表层水体中 DOC 浓度占 TOC 浓度的比例(DOC%)来看,枯水期各水库表层水体 DOC% 具有一定的差异,其中位于亚热带的文武砂水库和五里峡水库表层水体中的 DOC% 基本相近,董箐水库、万峰水库与同属岩溶区峡谷型水库的水布垭水库表层水体中的 DOC% 大体相近,具体为文武砂水库(91.5%)>五里峡水库(91.3%)>董箐水库

(86.85%)>水布垭水库(83.1%)>万峰水库(82.37%)。虽然在枯水期各个水库表层水体浓度中的 DOC% 具有差异性,但各水库水体的有机碳仍以溶解有机碳含量为主,颗粒有机碳含量较少。由于受到碳酸盐岩溶蚀的促进作用,岩溶区峡谷型水库的 POC 含量较其他地区水库的 POC 含量高^[39]。

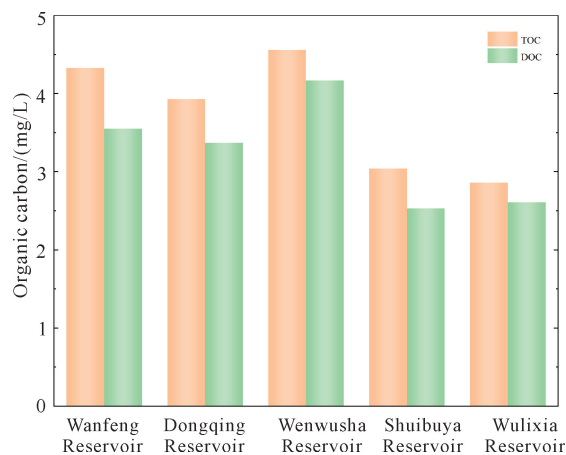


图 6 枯水期 5 个水库有机碳研究结果对比

Fig. 6 Comparison of organic carbon in 5 reservoirs during dry season

4 结论

本研究分析了岩溶区峡谷型水库万峰、董箐水库枯水期理化指标、有机碳浓度的变化特征和分布规律。从理化指标和有机碳的浓度变化特征上看,万峰水库理化指标参数(WT、COND、TDS、ORP、TN、TP)和有机碳浓度(TOC、DOC)均比董箐水库高,且变化范围较董箐水库大。从空间分布规律上看,万峰、董箐水库表层 WT、COND 和 TDS 含量的空间分布差异不显著,ORP 的空间变异性最大,空间分布差异显著。万峰水库表层水体 TOC、DOC 浓度分别为 3.11—6.66、2.35—5.12 mg/L,呈干流高于支流的空间分布特征。董箐水库 TOC、DOC 浓度分别为 3.07—4.75、2.87—3.99 mg/L,呈库湾(D1)>码头(D4)>坝前(D2)的分布特征。

万峰、董箐水库中有机碳以 DOC 为主,万峰水库 DOC%(82.37%)比董箐水库(86.85%)低,POC 含量较少。各水库 TOC、DOC、POC 浓度含量具有差异性,但仍以 DOC 含量为主,POC 含量较少,且岩溶区峡谷型水库的 POC 含量较其他水库高。造成水库有机碳浓度差异的原因,除了受到外源物质输入、水生植物光合作用、有机物降解以及人类活动频繁程度的影响外,还受到水库建成时间的影响,建成时间

越长,水库有机碳浓度越高。

参考文献

- [1] SOBEK S, DURISCH-KAISER E, ZURBRÜGG R, et al. Organic carbon burial efficiency in lake sediments controlled by oxygen exposure time and sediment source [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(6): 2243-2254.
- [2] TRANVIK L J, DOWNING J A, COTNER J B, et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(6): 2298-2314.
- [3] MENDONÇA R, KOSTEN S, SOBEK S, et al. Carbon sequestration in a large hydroelectric reservoir: an integrative seismic approach [J]. *Ecosystems*, 2014, 17(3): 430-441.
- [4] PONDELL C R. Sediment and organic carbon burial in Englebright Lake, CA over the last century [D]. Virginia, USA: College of William and Mary - Virginia Institute of Marine Science, 2014.
- [5] MENDONÇA R, KOSTEN S, SOBEK S, et al. Hydroelectric carbon sequestration [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(12): 838-840.
- [6] DEAN W E, GORHAM E. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands [J]. *Geology*, 1998, 26(6): 535-538.
- [7] RAYMOND P A, HARTMANN J, LAUERWALD R, et al. Global carbon dioxide emissions from inland waters [J]. *Nature*, 2013, 503(7476): 355-359.
- [8] 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.
- [9] HUANG S, PU J, CAO J, et al. Origin and effect factors of sedimentary organic carbon in a karst groundwater-fed reservoir, South China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(9): 8497-8511.
- [10] 王从锋, 胡子龙, 杨正健, 等. 基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析[J]. *环境科学*, 2019, 40(7): 3039-3048.
- [11] SONG K, WEN Z, SHANG Y, et al. Quantification of dissolved organic carbon (DOC) storage in lakes and reservoirs of mainland China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 217: 391-402.
- [12] MENDONÇA R, MÜLLER R A, CLOW D, et al. Organic carbon burial in global lakes and reservoirs [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1694.
- [13] 黄芬, 张春来, 杨慧, 等. 中国岩溶碳汇过程与效应研究成果及展望[J]. *中国地质调查*, 2014, 1(3): 57-66.
- [14] 卢晓漩, 李强, 靳振江, 等. 桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征[J]. *环境科学*, 2018, 39(5): 2075-2085.
- [15] LIU Z H, ZHAO M, SUN H L, et al. "Old" carbon entering the South China Sea from the carbonate-rich Pear River Basin: coupled action of carbonate weathering and aquatic photosynthesis [J]. *Applied Geochemistry*, 2017, 78: 96-104.
- [16] 王晤岩, 李清光. 淡水碳酸盐湖泊中 $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2$ 化学平衡对 CO_2 的缓冲作用: 以贵州百花湖为例[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(4): 572-579.
- [17] 晏妮, 陈椽. 贵州干流峡谷型水库: 乌江渡水库浮游植物分布及水质现状分析[J]. *贵州科学*, 2011, 29(2): 69-75.
- [18] 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]. 北京: 首都师范大学, 2007.
- [19] 赵宗权, 索惠英, 焦树林. 万峰湖水库溶解性无机碳来源及时空变异特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 1783-1790.
- [20] 韩丽彬, 王星, 李秋华, 等. 贵州高原百花水库浮游植物功能群的动态变化及驱动因子[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(4): 1102-1114.
- [21] 李秋华, 韩丽彬, 马一明, 等. 贵州高原红枫水库蓝藻组成特征与环境因子之间的关系[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 39(6): 1-7, 134.
- [22] 李秋华. 贵州高原水库富营养化特征及评价[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 36(2): 1-8.
- [23] 赵永彬, 吴翠鲜. 氧化还原电位在污水和地表水净化中的作用[J]. *节能与环保*, 2020(10): 29-30.
- [24] 蒋翼, 周忠发, 薛冰清, 等. 贵州三岔河流域平寨水库水化学特征及控制因素[J]. *环境工程*, 2020, 38(2): 41-47.
- [25] 杨明星, 刘再华, 孙海龙, 等. 基于生物标志物法的珠江流域有机碳溯源及 DIC 施肥效应研究[J]. *地球与环境*, 2017, 45(1): 46-56.
- [26] AN K G, JONES J R. Factors regulating bluegreen dominance in a reservoir directly influenced by the Asian monsoon [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 432: 37-48.
- [27] 李惠男. 北盘江梯级水库浮游植物群落特征及水环境评价[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2018.
- [28] OREILLY S S, SZPAK M T, FLANAGAN P V, et al. Biomarkers reveal the effects of hydrography on the sources and fate of marine and terrestrial organic matter in the western Irish Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 136: 157-171.
- [29] 李秋华, 商立海, 李广辉, 等. 万峰湖浮游植物群落的时空分布[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(5): 1031-1038.
- [30] 石琳, 卢耀庭, 杨永琼, 等. 红枫水库和普定水库碳、磷、硅生源要素时空分布特征[J]. *地球与环境*, 2022, 50(1): 94-102.
- [31] 何芸, 吕笑笑. 董箐水电站水工高性能混凝土应用技术研究[J]. *江西水利科技*, 2015, 41(2): 86-89.
- [32] 周建军. 关于三峡电厂日调节调度改善库区支流水质的探讨[J]. *科技导报*, 2005, 23(10): 8-12.
- [33] 张翎, 王远见, 夏星辉. 水库建成与运行对温室气体排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(1): 298-307.
- [34] 陶贞, 高全洲, 姚冠荣, 等. 增江流域河流颗粒有机碳的来源、含量变化及输出通量[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(5): 789-795.
- [35] 崔荣阳, 陈安强, 刘刚才, 等. 高原湖泊周边浅层地下

- 水:溶解性碳时空分布及驱动因素[J]. 环境科学, 2024, 45(8):4589-4599.
- [36] 邹艳,周忠发,孔杰,等. 喀斯特水库及入库河流 TOC、TN的变化特征及影响机制[J]. 地球与环境, 2023, 51(3):255-265.
- [37] 赵登忠,肖潇,汪朝辉,等. 水布垭水库水体碳时空变化特征及其影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(2):304-313.
- [38] 李大帅,吴少景,李建鸿,等. 岩溶水库热结构变化对水体溶解无机碳及其同位素的影响过程[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2):183-196.
- [39] 李强. 流域尺度岩溶碳循环过程:“岩溶作用与碳中和”专栏特邀主编寄语[J]. 地球学报, 2022, 43(4):421-424.

Distribution Characteristics of Organic Carbon Concentrations in Upper Layer of Canyon-type Reservoirs in Karst Areas During Dry Season

WEI Zongxiao^{1,2}, YANG Liuying^{1,2}, JIAO Shulin^{1,2**}, LIU Wei^{1,2}, LI Yinjiu^{1,2}, FENG Yelin^{1,2}, SHAO Yuxiao^{1,2}, LI Juan^{1,2}

(1. School of Geography and Environmental Science/Karst Research Institute, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou, 550001, China; 2. State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecological Environment of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou, 550001, China)

Abstract: To reveal the carbon cycle patterns of canyon-type reservoirs in karst areas, this study took Wanfeng and Dongqing Reservoirs as the study areas. The variation characteristics and distribution patterns of physico-chemical indicators and organic carbon concentrations during the dry season were analyzed by field monitoring and water sample collection. The results showed that the Water Temperature (WT), Conductivity (COND), Total Dissolved Solids (TDS), Oxidation-Reduction Potential (ORP), Total Nitrogen (TN) and Total Phosphorus (TP) in Wanfeng Reservoir were higher than those in Dongqing Reservoir and had large variation ranges. The spatial variations of WT, COND, TDS and TP in Wanfeng and Dongqing Reservoirs were small. The coefficients of variation of ORP and TN were large and had high spatial variability. The concentrations of Total Organic Carbon (TOC) and Dissolved Organic Carbon (DOC) in Wanfeng Reservoir ranged from 3.11 mg/L to 6.66 mg/L and 2.35 mg/L to 5.12 mg/L, respectively, being higher in the main stream than in the tributary Maling River. The TOC and DOC concentrations in Dongqing Reservoir ranged from 3.07 mg/L to 4.75 mg/L and 2.87 mg/L to 3.99 mg/L, respectively, showing the distribution pattern of reservoir bay (D1) > quay (D4) > pre-dam (D2). The TOC and DOC concentrations in Wanfeng Reservoir were both higher than those in Dongqing Reservoir and had large variation ranges. The organic carbon in both Wanfeng and Dongqing Reservoirs were dominated by DOC. The concentrations of Particulate Organic Carbon (POC) in the two reservoirs were low but higher than those in other reservoirs. The findings provide data support and reference for studying the carbon cycle in water ecosystems in karst areas.

Key words: total organic carbon; dissolved organic carbon; canyon-type reservoirs; karst areas