

\*\*\*\*\*  
\* 试 验 研 究 \*  
\*\*\*\*\*

# 喀斯特流域水土流失对水库碳汇效应的影响

王翠<sup>1,2</sup>, 周忠发<sup>1,2</sup>, 李永柳<sup>1</sup>, 张勇荣<sup>1</sup>

(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:** [目的] 研究喀斯特流域水土流失对水库碳汇的影响, 为区域水土流失治理和科学评估喀斯特地区河流生态系统碳循环提供科学依据。[方法] 基于纳雍河 2014—2018 年水文数据和其下游平寨水库流域 2017—2018 年水化学监测数据, 利用回归分析、相关分析、水化学分析方法, 研究水土流失对水库碳汇的影响。[结果] ① 2014—2018 年, 干流纳雍河流量  $1.15 \times 10^9 \sim 1.66 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ , 泥沙通量  $2.54 \times 10^5 \sim 1.23 \times 10^6 \text{ t/a}$ 。泥沙通量和流量在年际间无相关性, 在月时间尺度上呈极显著正相关, 短时强降雨是流域发生水土流失的主要原因之一, 流域内春夏季水土流失剧烈, 秋冬季减弱。② 平寨水库  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  为主要阴阳离子, 来源于碳酸盐岩风化。  $\text{SO}_4^{2-}$  是第二大阴离子, 参与水库 30.30%~59.70% 的碳酸盐岩风化, 水库水化学类型秋冬季为  $\text{HCO}_3^-$ -Ca 型, 春夏季主要为  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{SO}_4^{2-}$ -Ca 型。③ 平寨水库二氧化碳分压具有时空异质性, 表现为: 冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季, 秋冬季为碳源, 春夏季为碳汇。[结论] 平寨水库流域水土流失与水库碳汇效应具有相同的周期性季节变化, 水土流失影响水库水化学组成, 减弱水库碳汇效应。

**关键词:** 喀斯特; 水土流失; 水化学; 水库碳汇

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)06-0001-07

中图分类号: P641.3, P592

**文献参数:** 王翠, 周忠发, 李永柳, 等. 喀斯特流域水土流失对水库碳汇效应的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 1-7. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.001; Wang Cui, Zhou Zhongfa, Li Yongliu, et al. Effects of soil and water loss on reservoir carbon sink in karst watersheds [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 1-7.

## Effects of Soil and Water Loss on Reservoir Carbon Sink in Karst Watersheds

Wang Cui<sup>1,2</sup>, Zhou Zhongfa<sup>1,2</sup>, Li Yongliu<sup>1</sup>, Zhang Yongrong<sup>1</sup>

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

**Abstract:** [Objective] The impacts of soil erosion on reservoir carbon sinks in karst watersheds were studied, in order to provide scientific basis for regional soil erosion control and scientific assessment of carbon cycle in river ecosystems in karst areas. [Methods] Based on hydrological data of Nayong River from 2014 to 2018 and water chemistry monitoring data of Pingzhai Reservoir at the downstream from 2017 to 2018, regression analysis, correlation analysis, and water chemistry analysis were used to study the effects of soil erosion on reservoir carbon sinks. [Results] ① During period from 2014 to 2018, the flow of the Nayong River ranged from 1.151 to 1.663 billion  $\text{m}^3/\text{a}$ , and sediment flux ranged from 25.36 to 1.224 7 million t/a. Sediment flux and water flow were not correlated between years but showed a highly significant positive correlation on the monthly time scale. The short-time intense rainfall was one of the main reasons for the occurrence of soil erosion in the watershed. The erosion was intense in spring and summer and weak in autumn and winter. ②  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$  were the main anions in Pingzhai Reservoir, which came from carbonate rock weathering.

收稿日期: 2021-07-29

修回日期: 2021-08-15

资助项目: 国家自然科学基金项目“喀斯特筑坝河流水安全与调控对策”(U1612441); 贵州省科学技术基金项目(黔科合平台人才[2016]5674); 贵州省研究生科研项目[黔教合 YJSCXJH(2020)110]

第一作者: 王翠(1982—), 女(汉族), 四川省德阳市人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事喀斯特环境污染与防治方面的研究。Email: 154012313@qq.com。

通讯作者: 周忠发(1969—), 男(汉族), 贵州省遵义市人, 教授, 博士生导师, 主要从事喀斯特生态环境、地理信息系统与遥感研究。E-mail: fa6897@163.com。

$\text{SO}_4^{2-}$  was the second most important anion, participating in 30.30%~59.70% of carbonate rock weathering in the reservoir. Reservoir water chemistry type was  $\text{HCO}_3^-$ -Ca type in autumn and winter, and mainly  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{SO}_4^{2-}$ -Ca type in spring and summer. ③ The partial pressure of carbon dioxide in the reservoir of Pingzhai Reservoir showed spatial and temporal heterogeneity as: winter > autumn > spring > summer, which were showed as carbon sources during autumn and winter, and as carbon sinks while spring and summer. [Conclusion] Soil erosion and reservoir carbon sink effect in Pingzhai Reservoir basin have the same periodic seasonal changes, soil erosion affects reservoir water chemistry and weakens reservoir carbon sink effect.

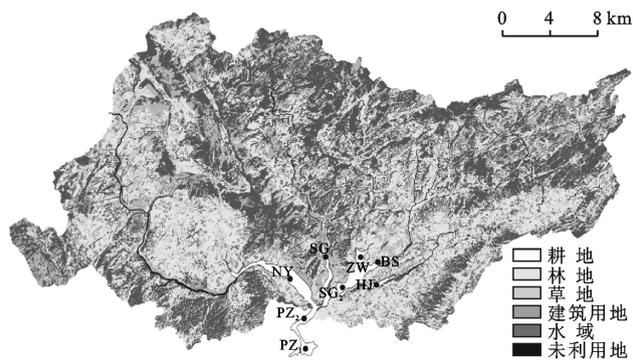
**Keywords:** karst; soil erosion; hydrochemistry; reservoir carbon sink

水土流失影响生态安全、饮水安全、防洪安全、粮食安全,威胁并制约经济社会发展。近年来,随着全球碳循环研究的深入,水土流失导致的土壤碳迁移已被广泛关注。已开展降雨过程对土壤有机碳流失规律、有机碳在流失泥沙中的富集规律、泥沙含碳量与泥沙量的关系、泥沙有机碳富集比与雨强的关系等方面的研究<sup>[1-3]</sup>。还有水土保持措施减少土壤有机碳的输出<sup>[4]</sup>、水土流失影响土壤有机碳的分解转化、二氧化碳的释放和土壤碳汇、陆地生态系统碳循环的科学评估等<sup>[5]</sup>方面的研究。这些研究都是针对水土流失对土壤碳库的影响,对沉积区碳库的影响研究却相对较少。水库作为水土流失的沉积区,沉积物可揭示流域土壤侵蚀状态<sup>[6]</sup>,是土壤碳库与水库碳库产生交互作用的重要区域,每年大概有  $1.50 \times 10^{10} \sim 2.00 \times 10^{10}$  mg 土壤有机碳及氮、磷、钾、硫等元素通过水土流失途径被输送到河流湖库中<sup>[7-8]</sup>。尽管我们知道水土流失带来的颗粒性有机碳使水库成为流失区碳的净汇并向大气释放温室气体<sup>[9-10]</sup>,但这个结论仍是对土壤碳库而言,水土流失对水库碳汇来说是碳源还是碳汇目前判断不一<sup>[11-14]</sup>。水库是陆地生态系统的重要组成部分,是全球“碳遗失汇”的重点关注区,前人因为对喀斯特作用的认识不足,无法科学计算和评估喀斯特地区水库碳汇效应,因此开展喀斯特区域水土流失对水库碳汇效应的影响研究,是对喀斯特地区水库碳汇效应研究的补充。平寨水库流域位于贵州省毕节市,喀斯特面积占区域总面积的 73.34%。平寨水库是流域内唯一水库,是长江上游一级支流乌江上游的大型水库,也是贵州省首个大型跨地区、跨流域长距离水利调水工程的核心水源工程,其生态安全对贵州省实施西部大开发战略具有重要意义。目前在平寨水库流域开展的研究多为水质、水化学、生物碳泵等方面的研究<sup>[15-16]</sup>,尚未见流域水土流失对水库碳汇效应的研究报道。因此,本研究以平寨水库流域为研究区,开展流域水土流失对水库碳汇效应的影响研究,为区域水土流失治理,科学评估喀斯特地区河流生态系统碳循环提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区为平寨水库流域,是黔中水利枢纽工程的核心水源工程集雨区,流域面积 833.77 km<sup>2</sup>。区域内碳酸盐岩与非碳酸盐岩交替出现,呈典型多层状碳酸盐岩组结构。平寨水库是研究区唯一水库,属典型喀斯特深水水库。水库主要干流为纳雍河,还有水公河、张维河、白水河、扈家河 4 条支流。纳雍河流域分布有煤炭资源和硫铁矿矿床<sup>[17-18]</sup>,其余区域未见大型矿产资源分布。研究区地形包括山地和丘陵两种,土地利用类型有耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地 6 类,地表覆被类型以耕地和林地为主(图 1)。水库 2015 年 4 月下闸蓄水,2018 年 12 月通过蓄水验收并于月底开始向贵阳供水。



注: ZW, BS, HJ, PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, SG<sub>1</sub>, SG<sub>2</sub> 和 NY 分别为 8 个监测点的编号。

图 1 平寨水库流域土地利用类型及监测点分布

### 1.2 样品采集与分析

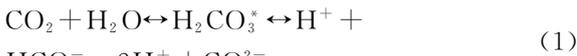
在平寨水库库区及支流上布设 8 个监测点,分别编号为 ZW, BS, HJ, PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, SG<sub>1</sub>, SG<sub>2</sub> 和 NY(图 1)。研究于 2017 年 11 月(秋季),2018 年 1 月(冬季),5 月(春季),8 月(夏季)进行 4 次表层水分季采样。水样在水面下 5 cm 处采集,分析指标为水温、pH 值、电导率(EC)、溶解氧(DO)、叶绿素(a)、透明度和阴阳离子(阴离子主要有  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$  和  $\text{HCO}_3^-$ , 阳离子主要有  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$ )。水温

(精度 0.01 °C)、DO(精度 0.01 mg/L)、EC(精度 1 mS/cm)、pH(精度 0.01 pH 单位)在现场采用 Multi3430 便携式多参数水质分析仪器(德国 WTW 公司)进行测定,测定前校准<sup>[19]</sup>。

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 采用酸碱试剂盒现场测定, Ca<sup>2+</sup> 采用钙试剂盒现场测定,其余阴阳离子测定所需水样通过 0.45 μm 醋酸纤维素膜过滤,储存在经酸洗的 HDPE 瓶中。阳离子加硝酸(GR 级)酸化至 pH ≤ 2.0,阴离子不加保存剂,低温冷藏保存运输。阴阳离子在中科院地化所分别采用 IS90 型离子光谱仪和电感耦合等离子体一发射光谱仪测定,阴离子相对误差小于 ± 3%,阳离子相对误差小于 ± 2%<sup>[20]</sup>。叶绿素 a 测定水样体积 1 L,加 1 ml 碳酸镁悬浊液,低温冷藏保存,按照研磨一丙酮提取一分光光度计测定进行分析。透明度用塞氏盘法测定。同时收集 2014 年 1 月至 2018 年 12 月连续 60 个月的纳雍河阳长水文站水文数据。

### 1.3 二氧化碳分压计算

二氧化碳分压根据亨利定律<sup>[20]</sup>进行计算,计算公式为:



$$K_{\text{CO}_2} = [\text{H}_2\text{CO}_3^*] / [\text{P}_{\text{CO}_2}] \quad (2)$$

$$K_1 = [\text{H}^+][\text{HCO}_3^-] / [\text{H}_2\text{CO}_3^*] \quad (3)$$

$$K_2 = [\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}] / [\text{HCO}_3^-] \quad (4)$$

式中:  $K_i$  为平衡常数,计算方程为:

$$pK_{\text{CO}_2} = -7 \times 10^{-5} T^2 + 0.016 T + 1.11 \quad (5)$$

$$pK_1 = 1.1 \times 10^{-4} T^2 - 0.012 T + 6.58 \quad (6)$$

$$pK_2 = 9 \times 10^{-5} T^2 - 0.013 7 T + 10.62 \quad (7)$$

式中:  $T$  为温度(°C)。

根据亨利定律,  $p_{\text{CO}_2}$  可根据以下公式计算:

$$p_{\text{CO}_2} = [\text{H}_2\text{CO}_3^*] K_{\text{CO}_2} = \alpha (\text{H}^+) \cdot \alpha (\text{HCO}_3^-) / (K_{\text{CO}_2} \times K_1) \quad (8)$$

$$\alpha (\text{H}^+) = 10^{-[\text{pH}]} \quad (9)$$

$$\alpha (\text{HCO}_3^-) = [\text{HCO}_3^-] \times 10^{-0.5/T} \quad (10)$$

$$I = 0.5 \times ([\text{K}^+] + [\text{Ca}^{2+}] \times 4 + [\text{Na}^+] + [\text{Mg}^{2+}] \times 4 + [\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}] \times 4 + [\text{NO}_3^-] + [\text{HCO}_3^-]) / 1\,000\,000 \quad (11)$$

式中:  $\alpha$  表示离子活度;  $I$  表示离子强度。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区水土流失分析

河流泥沙主要来源于流域水土流失,因此以干流纳雍河阳长水文站 2014—2018 年水文数据为代表进行流域水土流失分析(图 2)。2014—2018 年,纳雍河年流量最大  $1.66 \times 10^9 \text{ m}^3$  (2014 年),最小  $11.51 \text{ m}^3$

(2016 年)。平寨水库流域水资源为降雨补给型,因此河流年流量呈自然起伏状态,降雨量多的年份流量大。泥沙通量在  $2.54 \times 10^5 \sim 1.23 \times 10^6 \text{ t/a}$  之间,最大值在 2014 年,最小值在 2018 年。年流量和年泥沙通量变化不同步,主要是由于 2016 年泥沙通量的突然升高。将平寨水库 2014—2018 年年际间的流量和泥沙通量进行相关分析,  $R^2$  为 0.486 4,无显著相关性。泥沙通量在 2016 年突然升高是由于下闸蓄水后水面抬升,淹没耕地和林地,淹没区的沉积物或土壤被水流不断侵蚀,短时间内形成大量泥沙进入河流。随着水库的调度运转,流速降低,河流两岸可侵蚀面积稳定,水库泥沙通量逐年降低。

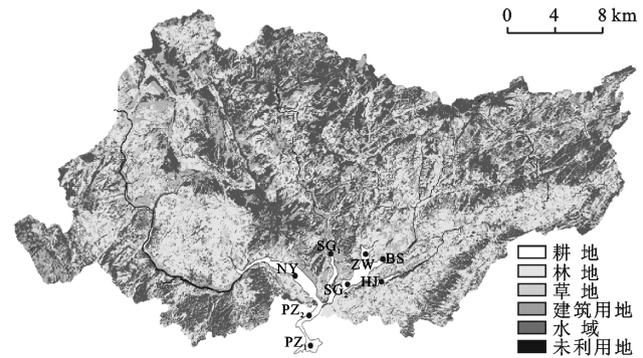


图 2 纳雍河 2014—2018 年水流量与泥沙通量变化

按月时间尺度对纳雍河流量和含沙量作对数、线性、指数、乘幂和多项式回归分析,含沙量与降雨的变化趋势分析,含沙量与降雨等的相关分析,分析结果见图 3 和表 1。流量与泥沙含量回归方程  $R^2$  最大为 0.760 1,为指数回归模型,该结果与长江宜昌站分析结果不同<sup>[21]</sup>,表明研究区不同,水土流失机制和河流水文情势有差异,影响含沙量与流量关系。平寨水库流域降雨和含沙量表现为春夏季逐渐增大,秋冬季逐渐降低的变化周期,峰值出现在夏季。含沙量随降雨的变化而变化,峰值一般与降雨峰值同时出现。相关分析表明,研究区月时间尺度上含沙量与降雨、蒸发量、流量、流速都呈极显著正相关,流量和流速对含沙量的影响更大。因此在平寨水库流域,降雨是造成流域内水土流失的主要原因之一,短时强降雨对水库泥沙通量影响显著,春夏季水土流失剧烈,秋冬季减弱。

表 1 研究区含沙量与降雨等参数的相关分析

项目	含沙量
降雨量	0.879 **
蒸发量	0.630 *
流量	0.908 **
流速	0.927 **

注: \* 表示显著相关, \*\* 表示极显著相关。下同。

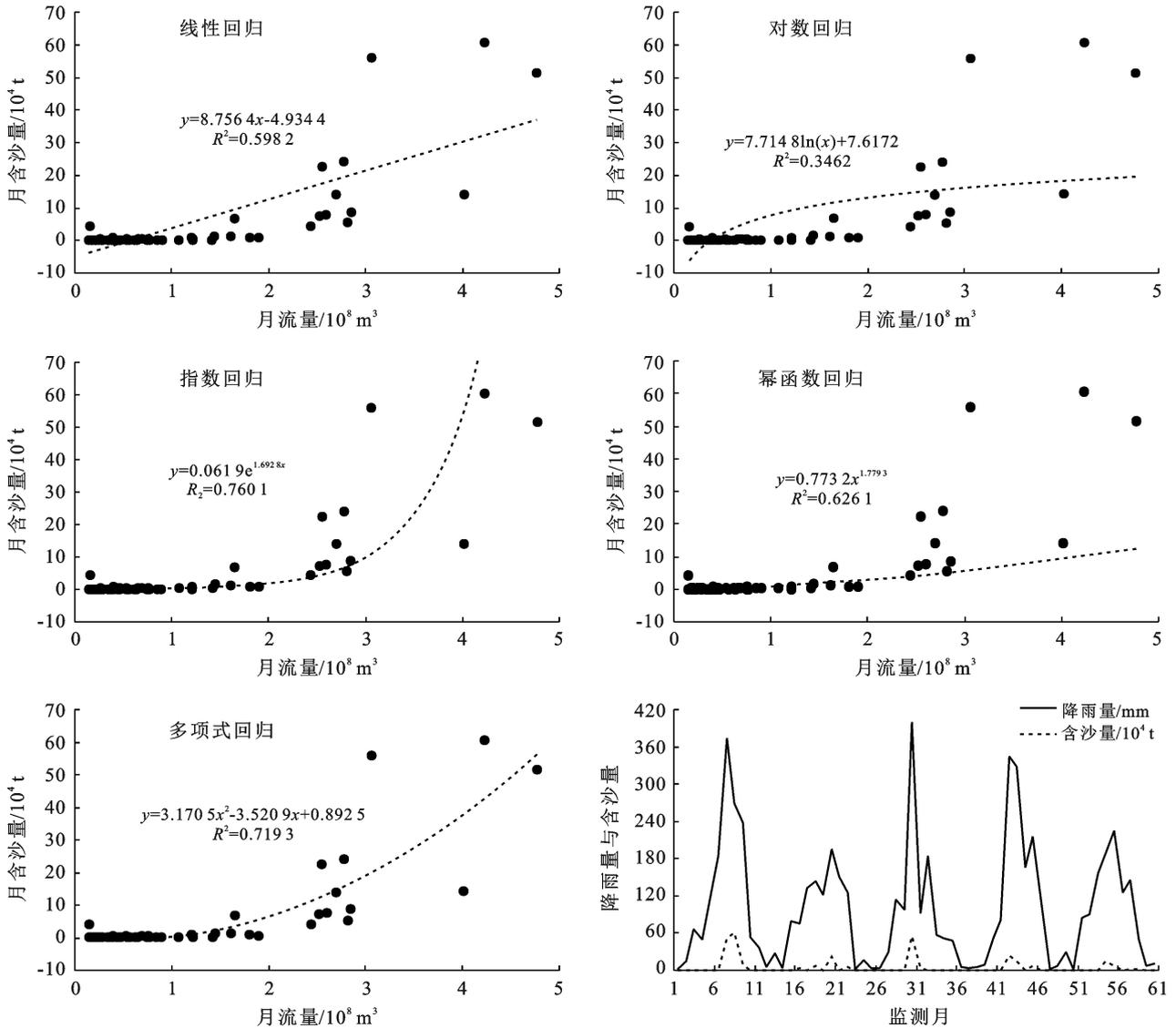


图3 纳雍河月流量与含沙量回归分析与变化趋势分析

## 2.2 水库水化学分析

水化学和 Piper 三线图是研究水循环和演化的重要手段<sup>[22-23]</sup>,对平寨水库水化学进行分析(表 2 和图 4),可明确水库水化学与碳酸盐岩风化的关系、是否受冲洗入侵影响等。平寨水库  $\text{Ca}^{2+}$  浓度 31.50~76.00 mg/L,  $\text{K}^{+}$  浓度 1.36~2.77 mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  浓度 3.68~7.04 mg/L,  $\text{Na}^{+}$  浓度 7.85~17.47 mg/L, 阳离子浓度依次为:  $[\text{Ca}^{2+}] > [\text{Na}^{+}] > [\text{Mg}^{2+}] > [\text{K}^{+}]$ 。  $\text{F}^{-}$  浓度 0.09~0.23 mg/L,  $\text{Cl}^{-}$  浓度 3.13~8.57 mg/L,  $\text{NO}_3^{-}$  浓度 6.76~13.48 mg/L,  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度 37.47~75.48 mg/L,  $\text{HCO}_3^{-}$  浓度 54.90~170.80 mg/L, 阴离子浓度依次为:  $[\text{HCO}_3^{-}] > [\text{SO}_4^{2-}] > [\text{NO}_3^{-}] > [\text{Cl}^{-}] > [\text{F}^{-}]$ 。水温 11.40~30.67 °C, pH 值在 7.63~9.05, 水质呈弱碱性。经 Piper 图分析,  $\text{HCO}_3^{-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  为平寨水库主要的阴阳离子, 变化趋势具有一致性, 均主要来源于碳酸盐岩风化。  $\text{SO}_4^{2-}$  是第二大阴离子,

NY 监测点的浓度最大, SG 最小。  $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{HCO}_3^{-}]$  为 1.21~1.97,  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^{-}]$  为 1.39~2.53,  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^{-}]$  为 0.83~1.18, 碳酸盐岩风化产物阳离子当量浓度高于阴离子, 表明平寨水库其他阴离子参与碳酸盐岩风化, 例如  $\text{SO}_4^{2-}$ 。根据水化学原理和质量平衡原理计算, 平寨水库硫酸参与碳酸盐岩风化的比例为 30.30%~59.70%, 与乌江流域研究结果相似<sup>[24]</sup>。硫酸参与碳酸盐岩风化比例冬季低, 夏季高, 随水土流失规律变化, 因此判断水土流失是  $\text{SO}_4^{2-}$  进入水库的途径之一。根据舒卡列夫水化学分类法, 将水中主要离子的相对含量进行组合分类, 当离子含量 > 25% 时, 就参与组合定名。平寨水库水化学类型在秋冬季为  $\text{HCO}_3^{-}$ -Ca 型, 在春夏季则多数转变为  $\text{HCO}_3^{-}$ - $\text{SO}_4^{2-}$ -Ca 型(表 2), 因此平寨水库水化学演化不仅受碳酸盐岩风化控制, 也受冲洗入侵影响。

表 2 水化学基本参数及水化学类型

项目	样点编号							
	ZW	BS	HJ	PZ <sub>2</sub>	PZ <sub>1</sub>	SG <sub>2</sub>	SG <sub>1</sub>	NY
Ca <sup>2+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	54.25±16.78	52.38±15.70	53.63±16.38	60.13±18.15	59.63±17.45	57.63±13.57	53.50±14.82	57.63±16.19
K <sup>+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	2.01±0.45	2.02±0.45	2.02±0.41	2.22±0.40	2.18±0.39	2.05±0.38	1.81±0.39	2.37±0.36
Mg <sup>2+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	5.69±0.91	5.64±1.04	5.68±0.89	6.23±0.63	6.21±0.67	5.78±0.81	4.84±0.94	6.58±0.44
Na <sup>+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	12.06±2.53	13.78±3.39	12.02±2.27	13.04±1.91	12.99±1.76	12.40±1.89	10.03±2.02	14.15±1.18
F <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	0.15±0.04	0.13±0.03	0.16±0.05	0.17±0.04	0.16±0.03	0.17±0.05	0.15±0.03	0.18±0.04
Cl <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	5.32±1.36	5.64±1.56	5.29±1.47	6.23±1.62	6.01±1.48	5.33±1.33	4.53±1.45	6.53±1.36
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	10.77±1.49	10.46±1.55	10.54±1.72	10.91±1.88	11.10±1.79	10.99±1.78	9.51±1.84	11.48±1.79
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	58.04±5.88	59.56±5.57	58.44±6.86	63.75±5.12	63.59±5.91	58.36±5.54	49.59±8.51	66.91±6.61
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	119.33±40.77	115.90±5.57	109.42±25.53	115.14±41.85	118.19±44.92	119.71±37.55	115.52±31.46	117.81±49.77
水温/℃	18.65±5.24	20.16±7.89	19.37±5.59	19.13±5.58	19.49±5.81	18.75±5.67	18.63±5.24	19.00±5.81
pH 值	8.32±0.50	8.30±0.45	8.52±0.45	8.42±0.56	8.38±0.52	8.33±0.46	8.39±0.48	8.46±0.51
水化学类型	201711	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca						
	201801	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca						
	201805	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca						
	201808	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca

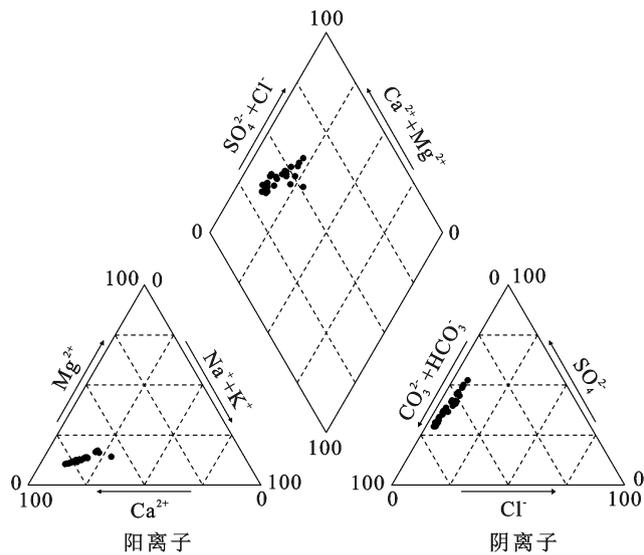


图 4 平寨水库水化学分析结果

### 2.3 水库碳汇效应分析

根据碳通量计算公式:

$$\text{Flux} = K(C_{\text{water}} - C_{\text{air}})$$

式中: Flux 为 CO<sub>2</sub> 交换通量 [mg/(m<sup>2</sup>·h)]; C<sub>water</sub> 为 CO<sub>2</sub> 在水体中的浓度 (mmol/L); C<sub>air</sub> 为空气中 CO<sub>2</sub> 浓度 (mmol/L); K 为 CO<sub>2</sub> 交换系数 (cm/h)。

当 K > 0 时, 水库二氧化碳分压大于大气二氧化碳分压, 水库向大气排放二氧化碳, 为碳源, 反之为碳汇。

大气二氧化碳分压一般较稳定, 因此水库碳汇效应取决于水中二氧化碳分压。平寨水库水中二氧化

碳分压在 3.51~202.11 Pa 之间, 变异系数为 1.23, 易变化。在季节上表现为: 冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季 (图 5), 秋季、冬季二氧化碳分压最高点为 ZW, 最低点为 HJ; 春季最高点为 PZ<sub>1</sub>, 最低点为 HJ; 夏季最高点为 BS, 最低点为 PZ<sub>2</sub>。因此平寨水库二氧化碳分压具有时空异质性。研究表明, 水库二氧化碳分压受风速、碱度、水温、碳酸盐分解和生物泵等的影响<sup>[25]</sup>。以 pH 代表碱度, 叶绿素 a 代表水生生物、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 指示水土流失<sup>[26]</sup>, 与平寨水库二氧化碳分压进行相关性分析 (表 3) 发现, 上述因素与水库二氧化碳分压均为极显著负相关。表明平寨水库二氧化碳分压不仅受到碱度、生物活性影响, 还受到水土流失影响。水库碳汇效应不仅有季节性变化, 还有日变化, 以三峡水库澎溪河为例, 其在夏季为碳汇, 日间对大气 CO<sub>2</sub> 的吸收量最大值在 15:00 左右, 最弱在次日凌晨 3:00 左右<sup>[26]</sup>。比较平寨水库流域各监测点水和大气二氧化碳分压 (图 6), 0 值线为碳源汇分界线, 线上为碳源, 线下为碳汇。经比较, 平寨水库碳汇效应也存在季节性变化, 秋冬季为碳源, 春夏季为碳汇, 与流域水土流失有相同的季节周期变化。

表 3 pH 值、叶绿素 a 及 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 与二氧化碳分压相关分析

项目	$\rho_{\text{CO}_2}$ / Pa
pH 值	-0.994 **
Chl-a	-0.686 **
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 所占比例	-0.777 **

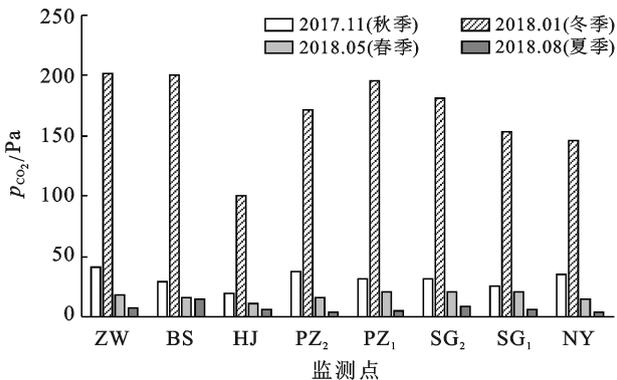


图 5 平寨水库二氧化碳分压

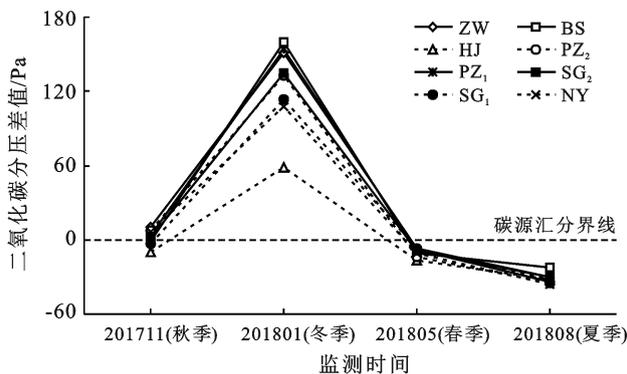


图 6 平寨水库碳汇效应季节变化

## 3 讨论

### 3.1 平寨水库流域水土流失变化及对水环境的影响

研究认为流量与泥沙含量一般规律为流量增加,水动力增强,水流挟沙力增大,泥沙含量升高<sup>[27]</sup>。平寨水库筑坝后水位上升,水动力减弱,河流泥沙通量逐年降低,与长江主要干支流水库建设对河流输沙量的影响研究结果一致<sup>[28]</sup>。

平寨水库流域水土流失与降雨、蒸发量、流速、流量在月时间尺度上呈极显著正相关,在年时间尺度上无相关性。一是用于统计分析的含沙量是水土流失的一部分,从年时间尺度上看,样本含量较少。二是由于水库筑坝破坏河流连续和洪水脉动规律,水流对泥沙的裹挟能力减弱,在此作用下,水土流失与降雨等影响因素失去年时间尺度上的相关性。三是影响水土流失的因素众多,各作用因子对水土流失的影响差异大<sup>[29-30]</sup>,在各因子的交互作用下,平寨水库流域降雨、流量、流速与水土流失在年际间较难形成相关关系,但在短时间尺度上,降雨是造成平寨水库流域水土流失的重要原因。

尹捷等<sup>[31]</sup>利用复合指纹法证实  $\text{SO}_4^{2-}$  是流域水土流失带入水库,本研究通过水化学法、相关分析法

分析,再对比平寨水库碳酸盐岩风化比例的变化趋势与降雨、流量和含沙量变化趋势,判断平寨水库  $\text{SO}_4^{2-}$  来源于流域水土流失,与复合指纹法判断结果一致。流域水土流失带入的物质,改变平寨水库水化学类型,参与碳酸盐岩风化,提高风化速率,减少水库碳酸盐岩风化对大气  $\text{CO}_2$  的需求。

### 3.2 平寨水库流域水土流失对水库碳汇效应的影响

目前水土流失对碳汇的影响,研究主要还是集中在土壤圈<sup>[3,5,32]</sup>。水库作为水土流失的重要沉积区,是土壤碳库与水库碳库的交集,现有的研究成果尽管已经考虑到两者的交汇关系,但在判定水土流失产物进入水库后的碳汇效应时,依然以土壤碳库为主要比较对象。例如流失到水库中的土壤有机碳随泥沙沉积是碳汇<sup>[13]</sup>,矿化消耗排放  $\text{CO}_2$  是碳源<sup>[16]</sup>,都是针对来自土壤的碳的沉积和排放,或模糊来源笼统分析水库吸收和排放  $\text{CO}_2$ ,不能准确评估水土流失对水库碳汇效应的影响。本研究分析发现,水土流失对平寨水库碳汇效应的影响,主要来自水土流失带来的各种离子,尤其是丰富的  $\text{SO}_4^{2-}$ 。在平寨水库,  $\text{SO}_4^{2-}$  可以替代  $\text{CO}_2$  提供质子,参与碳酸盐岩风化的比例在 30.30%~59.70%之间,改变碳酸盐岩风化路径,不吸收大气中的  $\text{CO}_2$  而向大气释放  $\text{CO}_2$ <sup>[33]</sup>,减弱水库碳汇效应。但是水土流失带入水库碳库的离子因地而异,参与水库碳酸盐岩风化的机制也有差别,对水库碳汇效应的影响需逐一明确,才能最终确定水土流失对水库是增汇还是减汇作用。

## 4 结论

(1) 2014—2018 年平寨水库流域干流纳雍河流量  $1.15 \times 10^9 \sim 1.66 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ ,泥沙通量  $2.54 \times 10^5 \sim 1.23 \times 10^6 \text{ t/a}$ ,泥沙通量和流量在年际间无相关性,在月时间尺度上极显著正相关,含沙量与流量是指数回归关系,与降雨峰值一般同时出现,短时强降雨是流域发生水土流失的主要原因之一。流域内春夏季水土流失剧烈,秋冬季减弱。

(2)  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  是平寨水库主要的阴阳离子,来源于碳酸盐岩风化。 $\text{SO}_4^{2-}$  是第二大阴离子,参与水库 30.30%~59.70%的碳酸盐岩风化,水库水化学类型秋冬季为  $\text{HCO}_3^-$ -Ca 型,春夏季主要为  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{SO}_4^{2-}$ -Ca 型,水土流失是  $\text{SO}_4^{2-}$  进入水库的主要方式。

(3) 平寨水库二氧化碳分压具有时空异质性,表现为:冬季>秋季>春季>夏季,秋冬季为碳源,春夏季为碳汇。平寨水库流域水土流失与水库碳汇效应且具有相同的季节变化周期,水土流失会减弱水库的碳汇效应。

## [参 考 文 献]

- [1] 任瑞雪,张风宝,杨明义,等.坡面侵蚀过程中泥沙有机碳流失特征分析[J].水土保持学报,2017,31(6):15-19.
- [2] 聂小东,李忠武,王晓燕,等.雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究[J].土壤学报,2013,50(5):900-908.
- [3] 张雪,李忠武,申卫平,等.红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系[J].土壤学报,2012,49(3):465-473.
- [4] 陈敏全,王克勤.坡耕地不同水土保持措施对径流泥沙与土壤碳库的影响[J].广东农业科学,2015,42(6):124-129.
- [5] Jong E D, Kachanoski R G. The importance of erosion in the carbon balance of prairie soils [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1988,68(1):111-119.
- [6] 孙璐萍,邢萌,刘卫国.黄土高原泾河小流域泥沙碳、氮同位素与生态环境示踪[J].水土保持学报,2013,27(4):273-277.
- [7] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. Environment International, 2003,29(4):437-450.
- [8] 袁红,胡宁,黄运湘,等.西南岩溶坡地土壤流失的养分含量响应特征研究[J].安徽农业科学,2012,40(12):7313-7314,7318.
- [9] Stimson A G, Allott T, Boulton S, et al. Reservoirs as hotspots of fluvial carbon cycling in peatland catchments [J]. Science of the Total Environment, 2017,580(15):398-411.
- [10] Amit K, Sharma M P. Estimation of soil organic carbon in the forest catchment of two hydroelectric reservoirs in Uttarakhand, India [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2016,22(4):991-1001.
- [11] Gregorich E G, Greer K J, Anderson D W. et al. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects [J]. Soil & Tillage Research, 1998,47(3):291-302.
- [12] Robert F S. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: Coupling weathering and erosion to carbon burial [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1998,12(2):231-257.
- [13] Noordwijk M V, Cerri C, Woomer P L, et al. Soil carbon dynamics in the humid tropical forest zone [J]. Geoderma, 1997,79(1):187-225.
- [14] Jacinthe P A, Lal R, Kimble J M. Organic carbon storage and dynamics in croplands and terrestrial deposits as influenced by subsurface tile drainage [J]. Soil Science, 2001,166(5):322-335.
- [15] 韩翠红,孙海龙,魏榆,等.喀斯特筑坝河流中生物碳泵效应的碳施肥及对水化学时空变化的影响:以贵州平寨水库及红枫湖为例[J].湖泊科学,2020,32(6):1683-1694.
- [16] 张勇荣,周忠发,蒋翼,等.筑坝河流不同尺度土地利用结构对库区水质的影响:以平寨水库为例[J].水利水电技术,2019,50(4):138-145.
- [17] 周智.贵州省三岔河流域煤炭开采的可持续环境管理[D].贵州 贵阳:贵州师范大学,2005.
- [18] 夏学惠.贵州三岔河硫铁矿矿床中假象黄铁矿的发现及其成因意义[J].化工地质,1994(1):22-28.
- [19] 刘贤梅,周忠发,张昊天,等.平寨水库夏季热分层期间水化学及溶解无机碳变化[J].长江流域资源与环境,2021,30(4):936-945.
- [20] George W K, George W. The flux of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from lakes and rivers in Arctic Alaska [J]. Hydrobiologia, 1992,240(1):23-36.
- [21] 徐慧娟,黎育红,孙燕.长江宜昌水文站流量、含沙量和悬移质粒度关系[J].长江流域资源与环境,2006,15(1):110-115.
- [22] 杨郦城,沈照理,文冬光,等.鄂尔多斯白垩系地下水盆地硫酸盐的水文地球化学特征及来源[J].地球学报,2008,29(5):553-562.
- [23] 王瑞久.三线图解及其水文地质解释[J].工程勘察,1983(6):6-11.
- [24] Yang Mengdi, Li Xiaodong, Huang Jun, et al. Damming effects on river sulfur cycle in karst area: A case study of the Wujiang cascade reservoirs [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 294: 106857.
- [25] Biswas H, Mukhopadhyay S K, De T K, et al. Biogenic controls on the air-water carbon dioxide exchange in the Sundarban mangrove environment, northeast coast of Bay of Bengal, India [J]. Limnology and Oceanography, 2004, 49(1): 95-101.
- [26] 郭劲松,蒋滔,李哲,等.三峡水库澎溪河流域高阳回水区夏季水体 CO<sub>2</sub> 分压日变化特性[J].湖泊科学,2012,24(2):190-196.
- [27] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1991.
- [28] 张信宝,文安邦, Walling D E,等.大型水库对长江上游主要干支流河流输沙量的影响[J].泥沙研究,2011(4):59-66.
- [29] 曹媛,孙鹏,姚蕊,等.不同雨强条件下工程措施对坡地产流产沙影响[J].水土保持学报,2020,34(6):1-7.
- [30] 徐露,张丹,向宇国,等.不同耕作措施下金沙江下游紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].山地学报,2020,38(6):851-860.
- [31] 尹捷,杨苑君,喻庆国,等.利用复合指纹法分析剑川双河水库泥沙来源[J].水土保持通报,2020,40(1):148-154,162.
- [32] 肖胜生,汤崇军,王凌云,等.自然降雨条件下红壤坡面有机碳的选择性迁移[J].土壤学报,2017,54(4):874-884.
- [33] Li Siliang, Calmels D, Han Guilin, et al. Sulfuric acid as an agent of carbonate weathering constrained by  $\delta^{13}\text{C}$ : Examples from Southwest China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008,270(3/4):189-199.