

贵州乌江渡水库沉积速率及碳氮埋藏通量估算

杨玉雪^{1,2}, 向鹏^{1,2}, 卢玮琦^{1,2}, 王仕禄^{1,*}

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 我国西南地区峡谷梯级水库沉积物的碳汇效应对全球碳循环有着重要意义。为了探明该区域水库的碳汇强度, 本研究选择乌江流域的乌江渡水库作为研究对象, 于2015年5月对水库沉积物进行采样, 并利用²¹⁰Pb_{ex}核素计年技术结合沉积物碳氮分析, 估算乌江渡水库的碳埋藏量。结果表明: 乌江渡水库沉积物平均沉积速率为0.155 g/(cm²·a), TOC沉降通量为70.85 g/(m²·a), 堆积通量为29.14 g/(m²·a); TN沉降通量为8.22 g/(m²·a), 堆积通量为2.79 g/(m²·a)。乌江渡水库沉积物年均TOC总埋藏通量为1.39×10⁹ g/a, 其中82%来自水库内部光合作用形成的有机质。因此, 依据保守的估算, 乌江渡水库沉积物的净碳汇通量为23.9 g/(m²·a), 保存的净碳汇量为1.1×10⁹ g/a。研究结果表明水库沉积物是一个重要的碳汇。

关键词: ²¹⁰Pb_{ex}核素计年; 沉积速率; 碳、氮埋藏通量; 乌江渡水库

中图分类号: P592 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2017)01-0066-08 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2017.01.009

迫于对绿色能源的需求, 世界各国正在以前所未有的速度修建水电大坝, 致使全球水库的数量和规模急剧增加, 这些水库大坝对全球碳循环的影响受到越来越多的关注。一方面, 水库水气界面释放的大量温室气体构成大气温室气体的一个源, 另一方面, 水库沉积物中保存的大量有机质构成一个碳汇。Mulholland和Elwood^[1]第一次估计了全球湖泊、水库每年在沉积物中保存的碳分别为0.02×10¹⁵和0.2×10¹⁵ g C, Dean和Gorham^[2]估算全球湖泊和水库埋藏的碳分别为0.042×10¹⁵和0.16×10¹⁵ g C, 两个估算结果比较接近。Tranvik等^[3]总结了最近几年的研究成果, 充分考虑了各种湖泊、水库以及拦水坝等水利设施, 估算出每年在淡水沉积物中碳的埋藏量约为0.6×10¹⁵ g C, 这一结果显著高于前期估算。

影响水库沉积速率和沉积物碳埋藏的因素很多。一方面, 流域的地形地貌、土地利用状况、植被覆盖状况、流域生产力、流域经济发展状况等因素能显著影响输入到水库的泥沙和有机质的量; 另一方面, 水库的营养状况以及初级生产力等因素也会影响有机质的产生量, 进一步影响输入到沉积物中的有机碳量。有机质从水体沉降到沉积物表层, 在

成岩作用过程中, 相当一部分有机质被微生物分解, 释放出CO₂或(和)CH₄, 剩余部分最终保存在沉积物中构成碳汇。表征这一过程的主要因子是埋藏效率, 研究发现控制埋藏效率的主要因素包括氧浓度^[4]、有机质浓度、沉积速率等。

西南地区是我国重要的水电能源基地, 修建有大量的水库大坝。这些水库大部分属于特殊的、狭长型河道梯级深水水库, 其沉积物中保存了多少碳, 这些碳对区域以及全球碳循环的意义有多大等很多问题目前尚不清楚。本研究选择乌江流域梯级水库中的乌江渡水库作为研究对象, 利用²¹⁰Pb_{ex}核素计年技术, 结合沉积物碳氮分析, 估算乌江渡水库的碳埋藏量。

1 材料与方法

1.1 乌江渡水库概况

乌江地处云贵高原东部, 其源头分为南源和北源, 南源为发源于贵州西部乌蒙山东麓威宁县香炉山的三岔河; 北源为发源于贵州西部高原赫章县辅处乡的六冲河(图1)。两河在贵州省黔西县东风水库内汇合, 最终汇入长江。乌江是长江南岸最大的

收稿日期: 2016-10-08; 改回日期: 2016-11-25

基金项目: 国家重大科学研究计划(2013CB956703); 国家重点研发计划专项(2016YFA0601000); 国家自然科学基金项目(41373137、91547117); 环境地球化学国家重点实验室开放课题(SKLEG2016902)。

第一作者简介: 杨玉雪(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事湖泊环境变化研究。E-mail: yangyuxue14@mails.ucas.ac.cn.

* 通讯作者: 王仕禄(1969-), 男, 研究员, 从事环境地球化学研究。E-mail: wangshilu@vip.skleg.cn.

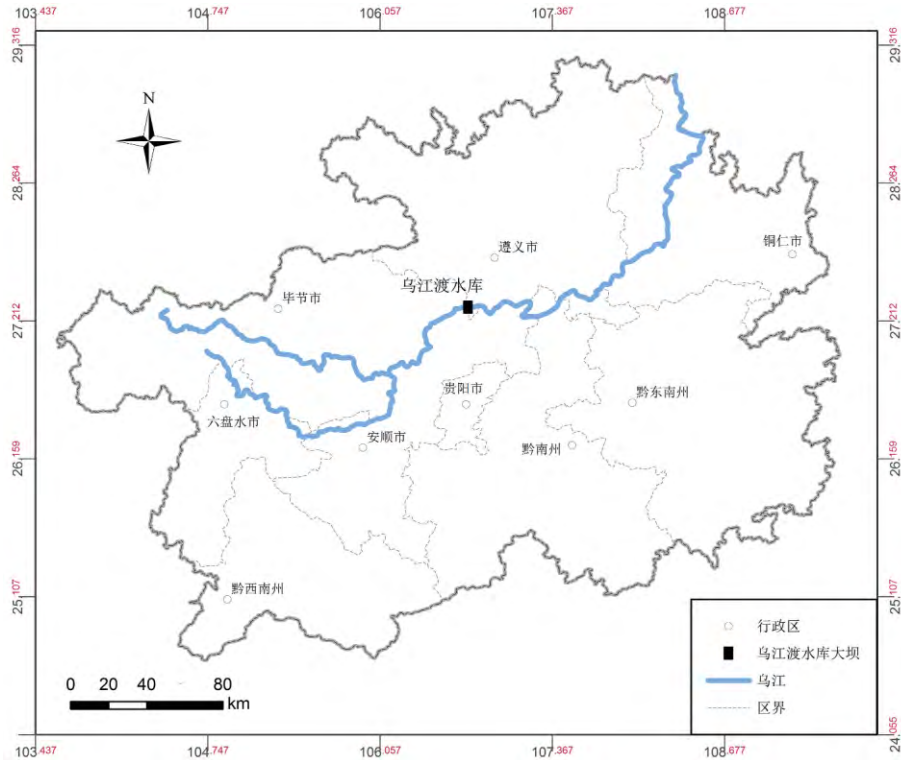


图 1 乌江渡水库地理位置图

Fig.1 A map showing the location of Wujiangdu reservoir

支流,多年平均流量为 $1\,590\text{ m}^3/\text{s}$,年径流量 534 亿 m^3 ,变差系数小,水量稳定^[5]。

乌江渡水库位于贵州省境内息烽县和遵义县交界附近的乌江干流中部(图 1)。水库 1970 年动工,1982 年竣工发电^[6],是我国在岩溶地区修建的一座高原峡谷型大型水库。水库总容量 23 亿 m^3 ,正常蓄水位 760 m,平均水深 154 m,干流库长 76 km,水库总面积 48 km^2 ^[7],集水面积 $2.779 \times 10^4\text{ km}^2$,多年平均流量 $475\text{ cm}^3/\text{s}$ ^[8]。

乌江渡水库库区属于亚热带季风气候,年平均温度 $14.5\sim 16.5\text{ }^\circ\text{C}$,年均降水量 $1\,104\text{ mm}$ ^[9]。河水补给以季节降水补给为主,地下水补给为辅,同时有多条支流汇入库区。库区范围内植被类型以亚热带常绿阔叶林为主,部分区域分布着针叶林。流域内地形变化大,起伏度接近 200 m ^[10],碳酸盐岩类岩石面积广布,多喀斯特岩溶发育。

1.2 样品的采集与处理

本研究于 2015 年 5 月对乌江渡水库沉积物进行采样,使用中国科学院地球化学研究所改进的便携式沉积物-界面水采样器^[11],在乌江渡水库坝前开阔水域采得未受扰动的沉积物柱芯 38 cm 长。沉积物柱芯现场按照间隔 1 cm 切割,依次分装入已编

号且干燥清洁的离心管中密封保存,带回实验室待测。

沉积物 TOC、TN 化学组分使用元素分析仪 (Vario MACRO cube) 进行测定,TIC 采用化学容量法^[12]进行测定。放射性活度测定在中国科学院地球环境研究所运用高纯锗 γ 能谱仪 (ORTEC) 完成。

1.3 沉积速率与埋藏通量计算方法

平均沉积速率利用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ CIC 模式计算。CIC 模式假设表层沉积物的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 初始活度 C_0 (Bq/kg) 为一定值,则沉积物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度 C (Bq/kg) 随质量深度 Z 呈指数衰减关系,即:

$$C = C_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot Z) \quad (1)$$

$$\alpha = \lambda/S$$

式中, λ 为 ^{210}Pb 的放射性衰变常数, S 为平均沉积速率 ($\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$)。

沉积物中 C、N 的沉降通量、埋藏通量采用以下公式进行计算:

$$F_i = S \times C_i \quad (2)$$

式中, F_i 为营养元素 i 的沉降或埋藏通量 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]; C_i 为 i 元素的含量 (%)。其中沉降通量计算采用的是表层沉积物的元素含量,埋藏通量采用的是底部沉积物中元素的平均含量。

结合水库正常蓄水位的水面面积进而估算出水库 TOC、TIC、TN 年均总埋藏通量:

$$TF_i = F_i \times A \quad (3)$$

式中, TF_i 为年均总埋藏通量(g/a); A 为水库正常蓄水位的水面面积(km^2)。

2 结果与讨论

2.1 乌江渡水库沉积物 $^{210}Pb_{ex}$ 比活度及沉积速率

乌江渡水库沉积物柱芯的 $^{210}Pb_{ex}$ 比活度表层较高,下部较低(图 2)。其中,自表层到 $5.321 g/cm^2$ 内的 $^{210}Pb_{ex}$ 比活度出现了较大的锯齿状波动,平均值为 $428.4 Bq/kg$ 。向下, $^{210}Pb_{ex}$ 比活度则迅速减小并趋于稳定,在 $6.59 g/cm^2$ 以下, $^{210}Pb_{ex}$ 比活度保持在 $65.0 Bq/kg$ 左右。总体上,乌江渡沉积物柱芯 $^{210}Pb_{ex}$ 比活度符合指数变化,拟合函数为: $y = 607.46e^{-0.201x}$ ($R^2 = 0.7367$, $P < 0.01$)。根据 $^{210}Pb_{ex}$ 比活度的垂向变化(图 2),依据 CIC 模式^[13]估算出乌江渡沉积物的平均沉积速率为 $0.155 g/(cm^2 \cdot a)$,其几何沉积速率为 $0.46 cm/a$ 。

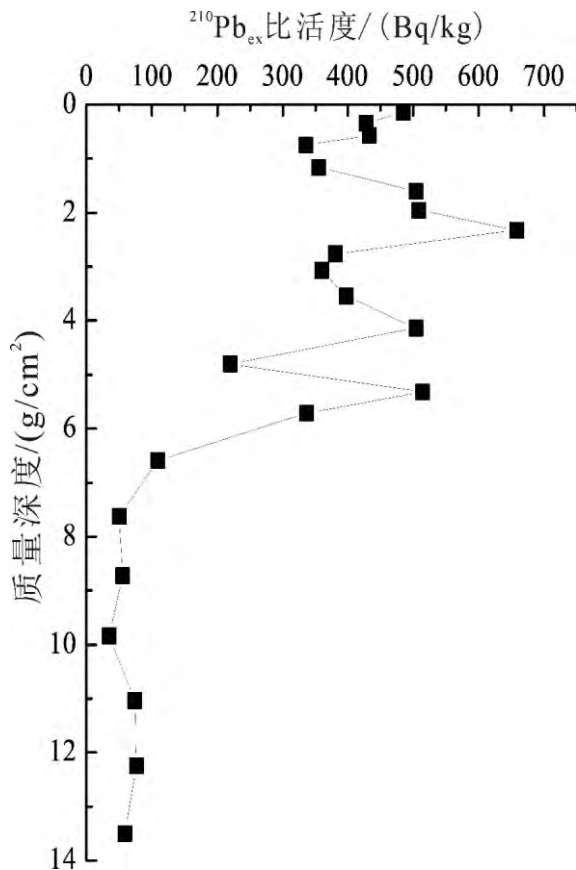


图2 乌江渡水库沉积物 $^{210}Pb_{ex}$ 比活度垂直剖面

Fig.2 The vertical profile of $^{210}Pb_{ex}$ activity in the sediment core of Wujiangdu reservoir

乌江渡水库库龄较短,无法运用 ^{137}Cs 计年,本文仅运用了 ^{210}Pb 计年方法。但 ^{210}Pb 计年方法计算的沉积速率较 ^{137}Cs 方法的结果偏低,万国江^[14]在红枫湖比较 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 方法, ^{210}Pb 的结果为 ^{137}Cs 的 46% (表 1)。胥思勤和万国江^[15]在程海同时运用 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 计年, ^{210}Pb 计算的沉积速率为 ^{137}Cs 结果的 32%~40%。尽管导致 ^{210}Pb 结果与 ^{137}Cs 存在较大差异的原因尚不明确,但二者的结果具有相同的变化趋势,因此 ^{210}Pb 结果仍然是可以参考的^[15]。考虑到 ^{210}Pb 计年结果普遍偏低,乌江渡水库的沉积速率可能高达 $0.484 g/(cm^2 \cdot a)$,最可能的范围为 $0.155 \sim 0.336 g/(cm^2 \cdot a)$,几何沉积速率变化的范围可能在 $0.46 \sim 1.00 cm/a$ 之间。这一沉积速率较国内北方的官厅水库、洪湖水库以及贵州省内的麦岗水库高,但与周边的水库,如乌江支流猫跳河上的红枫湖、百花湖,贵州中部的鹅顶水库和克酬水库等相比基本一致。总体上,乌江渡水库的沉积速率显著高于天然湖泊,但低于其他地区的大部分水库(表 1)。

一些环境条件会导致乌江渡水库的沉积速率偏低。乌江渡水库位于黔中喀斯特高原地区,这一地区的初级生产力较低,因而有可能引起较低的沉积速率。另外,由于乌江流域梯级水库开发程度较高,乌江渡水库上游干流已建成 5 座大型水库,各级支流上建有更多的水坝。这些梯级水库拦截了大量的悬浮物,致使位于中下游的乌江渡水库沉积速率偏低。

2.2 TOC、TIC、TN 变化

乌江渡水库沉积物 TOC 含量变化在 1.61%~4.86% 之间。总体分布表现为表层沉积物 TOC 含量较高,向下逐渐降低,在达到一定深度后 TOC 含量保持稳定(图 3)。在表层 $0 \sim 1.39 g/cm^2$ 范围内 TOC 含量变化在 4%~5% 之间,平均值为 $4.57 \pm 0.19\%$; 在深度为 $1.39 \sim 7.44 g/cm^2$ 范围内时,TOC 含量迅速降低;在 $7.44 g/cm^2$ 深度以下,TOC 含量保持稳定,变化在 1.5%~2.0% 之间,平均值为 $1.88 \pm 0.13\%$ 。

TIC 含量在 1.34%~5.76% 之间变化,总体趋势与 TOC 相似(图 3) 表层浓度最高,达到 5.76%,在很短的间距内,即 $0.66 g/cm^2$ 处含量降至 1.91%。在 $0.66 \sim 2.52 g/cm^2$ 区间内存在较大的波动。 $7.44 g/cm^2$ 深度以下,TIC 含量呈现随深度增加而缓慢递减直至稳定,平均为 $1.52 \pm 0.08\%$ 。

表 1 乌江渡水库与其他地区湖泊水库的沉积速率

Table 1 Comparisons of mean sedimentation rate in sediments of Wujingdu and other lakes and reservoirs

水库	位置	柱芯	计年时段	平均沉积速率/(cm/a)	参考文献
乌江渡水库	27°18' 49.05" N ,106°43'43.07" E	WJDS1	1961—2015	0.46	本研究
官厅水库	41°14.2'~38°15' N ,112°8.3'~116°20.6'E	GT1-GT5	1954—2014	0.33	[16]
双龙水库	24°34.8'~24°34.2' N ,102°33'~102°34.2'E	TSL4	1956—2012	1.3	[17]
洪湖水库	28°20'~27°40' N ,116°40'~117°20'E	HHB	1862—2011	0.32	[18]
红枫湖水库	26°34' 17"~26°24' 37" N , 106°20' 10"~106°27' 00" E	HF8801	—	0.17±0.014 g/(cm ² ·a) (¹³⁷ Cs) 0.092 g/(cm ² ·a) (²¹⁰ Pb)	[14]
红枫湖水库	同上	HF980903-1-2/HF980903-2-2	1960—1998	1.05	[19]
红枫湖水库	同上	HF980903-1-1	1960—1998	0.71	[20]
百花湖水库	26°40' N ,106°32'E	BH980906-1-2/BH980906-2-2	1966—1998	1.25	[19]
百花湖水库	同上	BH980519-2-2	1966—1998	0.66	[20]
鹅项水库	—	EX-1	1960—2005	0.66	[21]
克酬水库	—	KC	1969—2005	0.71	[22]
麦岗水库	20°00'50.3"N ,106°17'38.4"E	MG4-2	1956—2008	0.31	[23]
花岗水库	46°5' N ,3°41'E	2011C2/2013C2/2014C2/2014C4	1963—~2012	2.1~5.2	[24]
石梁河水库	34°46.72' N ,118°51.81'E	SLH01	1962—2014	2.98	[25]
马尔特水库	—	NL1	~1963—~2000	2.98	[26]
庄园水库	42°41'05"N ,73°47'21"W	—	1958—1999	4	[27]
罗特河水库	45°~44° N ,0°~2°30'E	Marcenac/Cajarc/Tample	~1950—2001	2.4~2.8	[28]
新米尔斯水库	48°51'29.70"N ,16°43'20.34"E	NM1 to NM8	~1976—~2011	0.58~2.33	[29]
新米尔斯水库	同上	NM1/NM4/NM6/NM8	~1980—~2010	1.45/1.29/2.33/0.55	[30]
布尔诺水库	49°13'56.45"N ,16°31'08.53"E	BP1/BP2/BP3	1940—2008	3.16/3.23/0.21	[30]
普卢姆洛夫水库	49°28'11.79"N ,17°02'17.64"E	P1/P2/P3	1986—2010	0.9/1.68/1.04	[30]
水库平均值				1.44	
湖泊	位置	柱芯	计年时段	平均沉积速率/(cm/a)	参考文献
滇池	25°02'~24°40' N ,102°36'~102°47'E	DC1	1954—2007	0.28~0.36	[31]
抚仙湖	24°40'~24°20' N ,102°45'~103°00'E	FX0701	1986—2007	0.19	[32]
抚仙湖	同上	FB	1986—2003	0.28	[33]
程海	26°38'~26°27' N ,100°38'~100°41'E	CH970608-1	1964—1997	1.06	[34]
程海	同上	同上	—	0.409 g/(cm ² ·a) (¹³⁷ Cs) 0.139 g/(cm ² ·a) (²¹⁰ Pb)	[15]
草海	26°53'~26°49' N ,104°12'~104°18'E	C2	1963—2007	0.28	[35]
当惹雍错湖	31°22'~30°45' N ,86°23'~86°49'E	DCG09-1/DCG10-2	~1860—~2000	0.018~0.049	[36]
青海湖	—	QHH01-QHH04	1963—2005	0.110/0.229/0.019/0.040	[37]
纳木错湖	30°44.245' N ,90°47.420'E	—	—	0.043~0.098	[38]
玛旁雍错湖	30°47'~30°34' N ,81°22'~81°27'E	MPG09-1	1820—2009	0.031	[39]
拉昂错湖	30°51'~30°40' N ,81°06'~81°19'E	LAG10-1	—	0.065	[39]
塔若错湖	31°12'~31°03' N ,83°55'~84°20'E	—	—	0.049~0.058	[40-41]
塔若错湖	同上	—	—	0.11	[42]
湖泊平均值				0.22	

乌江渡水库沉积物 TN 含量为 0.16%~0.59%。整体分布表现为: 表层含量高, 随质量深度增加而递减(图 3)。表层沉积物的 TN 含量在质量深度 0~1.24 g/cm² 内比较稳定, 含量维持在 0.53% 左右。质量深度为 1.24~7.44 g/cm² 区间, TN 含量迅速下降; 当质量深度达到 7.44 g/cm² 以下, TN 含量则渐

趋稳定, 平均为 0.18±0.01%。

2.3 乌江渡水库沉积物的埋藏过程与埋藏通量

乌江渡水库沉积物 TOC、TN 含量变化符合前人提出的有机质成岩降解的“沉降-降解-堆积”^[19,43] 三阶段模式。图 3 可以看出表层 0~1.39 g/cm² 深度范围内, 总有机碳 TOC 含量变化不大, 属于有机

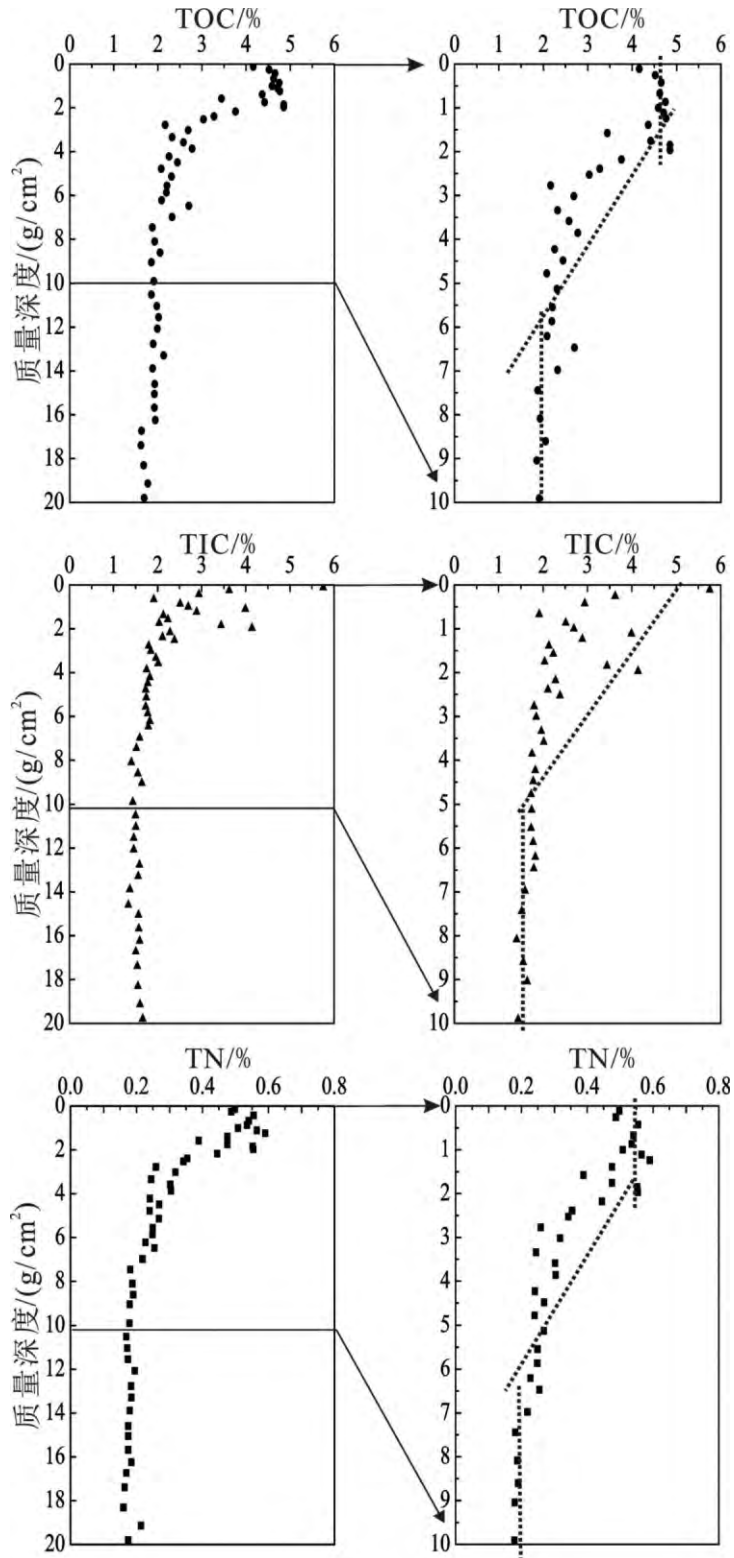


图3 乌江渡水库沉积物 TOC(%)、TIC(%)、TN(%) 的垂直变化

Fig.3 The vertical profiles of TOC(%)、TIC(%) and TN(%) in the sediment core of Wujiangdu reservoir

质的沉降阶段,沉降通量为 70.85 g/(m²·a)。向下,进入有机质的降解阶段,降解速率常数为 0.022/a。在 7.44 g/cm² 以下,易降解有机质大部

分已分解,TOC 含量基本保持稳定,有机碳进入堆积阶段,埋藏通量为 29.14 g/(m²·a) (表 2)。

有机质矿化分解时,有机碳、有机氮同时被氧

表 2 乌江渡水库沉积物中 C、N 降解的生物地球化学参数以及与其他湖泊、水库的比较

Table 2 Biogeochemical parameters of C and N decomposition in sediments of Wujiangdureservoir and comparisons with the values from other lakes and reservoirs

地点	水域正常蓄水面 /km ²	沉积速率 / [g/(cm ² ·a)]	沉降阶段		降解阶段		堆积阶段		总沉降通量 / (g/a)	总埋藏通量 / (g/a)	有效埋藏率 / %	参考文献	
			沉降通量 / [g/(m ² ·a)]	持续深度/cm 持续时间 /a	降解常数 / (a ⁻¹)	寄宿时间 /a	持续深度/cm 持续时间/a	堆积通量 / [g/(m ² ·a)]					
乌江渡水库	TOC	47.8	0.155	70.85	9/8.2	0.022	32.03	23/39.08	29.14	3.39×10 ⁹	1.39×10 ⁹	41	本研究
	TIC			36.89	—	—	—	—	23.56	1.79×10 ⁹	1.13×10 ⁹	63	
	TN			8.22	8/7.3	0.030	23.10	24/40.05	2.79	3.93×10 ⁸	1.33×10 ⁸	34	
洱海	TOC	249.8	0.046±0.002	12.7	4/13	0.017	40.4	10/34	7.20	3.17×10 ⁹ *	1.80×10 ⁹ *	57*	[43]
	TN			2.62	4/13.5	0.024	29.6	10/35	1.21	6.54×10 ⁸ *	3.02×10 ⁸ *	46*	
红枫湖	TOC	32.2	0.17±0.01	171.1	—	0.092	7.54	17/12.86	64.5	5.51×10 ⁹ *	2.08×10 ⁹ *	38*	[19]
	TN			21.9	—	0.201	3.45	13/7.32	8.2	7.05×10 ⁸ *	2.64×10 ⁸ *	37*	
百花湖	TOC	10.4	0.17±0.01	158.1	—	0.097	7.14	12/10.41	68.4	1.64×10 ⁹ *	7.11×10 ⁸ *	43*	[19]
	TN			14.8	—	0.147	4.72	10/8.03	6.1	1.54×10 ⁸ *	6.34×10 ⁷ *	41%*	

注: * 表示根据参考文献数据计算得出。

化,使得沉积物有机碳与有机氮具有相同的埋藏过程,致使沉积物中 TOC 与 TN 的垂向变化一致。表层(图 3)反映出 TN 沉降通量约为 8.22 g/(m²·a); 向下进入降解阶段, TN 的降解速率常数为 0.030/a。TN 的降解速率常数略大于 TOC,表明 TN 的降解快于 TOC。在更深的沉积物中, TN 浓度基本稳定,进入堆积阶段,埋藏通量为 2.79 g/(m²·a) (表 2)。

依据表层沉积物 IC 浓度估算的水库无机碳沉降通量高达 89.3 g/(m²·a)。有机质降解释放的 CO₂ 溶解碳酸盐,使得沉积物无机碳含量迅速降低。底部的无机碳含量稳定在 1.52% 左右,无机碳的埋藏通量约为 23.6 g/(m²·a)。

沉积物中 TOC 在表层的平均含量是 4.57%,而在底部的平均含量是 1.88%,说明在早期成岩作用过程中,59% 的有机碳被分解。表层 TN 平均含量为 0.53%,底部的 TN 平均含量为 0.18%,有机质降解过程中 66% 的有机氮被分解,同时有机质降解使得表层沉积物 74% 的无机碳被溶解。

在乌江渡水库,沉降到沉积物表层的有机碳最终仅 41% 能够保存在沉积物中(表 2),这一保存率与百花湖的 43% 和红枫湖的 38% 很接近。相比较而言,天然湖泊洱海的有机碳保存率高达 57%。推测有机碳的保存率可能与沉积速率有关。洱海的沉积速率较低,输入到沉积物的易降解有机碳比例较低,而难降解有机碳比例较高,因而,洱海有机碳

具有较高的保存率。相对而言,红枫湖、百花湖、以及乌江渡水库沉积速率较快,有机质尚未分解,因而易降解组分较多,导致沉积后有机碳的保存率较低。有机氮也存在相似的变化特征。

2.4 乌江渡水库沉积物碳、氮的总埋藏量

乌江渡水库沉积物 TOC 总埋藏量 1.39×10⁹ g/a; TIC 总埋藏量 1.13×10⁹ g/a; TN 总埋藏量 1.33×10⁸ g/a (表 2)。以上关于埋藏通量和埋藏总量的估算都是基于沉积速率为 0.155 g/(cm²·a) 计算出来的,考虑到这一沉积速率可能处于变化范围的低值端,因此上述估算是比较保守的。比较起来,乌江渡水库有机碳的埋藏量小于红枫湖水库而大于百花湖水库。与天然湖泊洱海相比,虽然乌江渡水库的面积只有洱海的 1/5,但有机质的埋藏量已经接近洱海。

乌江渡水库中保存的有机质主要有两部分来源,一是外部流域输入的,二是水库内部光合形成的。这两部分来源的有机碳对全球碳循环的意义是不同的,内部产生的有机碳是一个碳汇,而外部来源的有机碳属于流域初级生产力的一部分,不具有碳汇效应。两部分来源的有机质的 C/N 是不同的,外部来源的有机质含有较多的木质素, C/N 较高,水库内部形成的有机质的 C/N 较低。乌江渡水库的 C/N 变化在 10.42~14.95 之间,据推算沉积物中的有机碳 18% 来自外部输入,其余的 82% 是由水库内部光合作用产生的(未发表资料),属于净的

碳汇。因此乌江渡水库净的碳汇通量为 $23.9 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 保守地估算其净碳汇量为 $1.1 \times 10^9 \text{ g/a}$, 实际的结果可能更高。本文的研究结果可以看出水库沉积物是一个重要的净碳汇。

3 结论

1) 利用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 核素计年法计算出乌江渡水库沉积物平均沉积速率为 $0.155 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$, 几何沉积速率为 0.46 cm/a 。考虑到 ^{210}Pb 核素计年结果普遍较 ^{137}Cs 低, 乌江渡水库沉积物速率最可能的范围为 $0.155 \sim 0.336 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$, 这一结果与本地区其它水库的沉积速率基本一致。未来需要开展更准确

的沉积物计年工作。

2) 结合沉积物 TOC 和 TN 浓度变化, 估算出乌江渡水库 TOC 沉降通量为 $70.85 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 堆积通量为 $29.14 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 有效埋藏率为 41%。沉积物中的 TN 沉降通量为 $8.22 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 堆积通量为 $2.79 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 有效埋藏率为 34%。

3) 乌江渡水库沉积物年均 TOC 总埋藏通量为 $1.39 \times 10^9 \text{ g/a}$, 其中 82% 来自水库内部光合作用形成的有机质, 因此, 可保守地估算乌江渡水库沉积物的净碳汇通量为 $23.9 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 保存的净碳汇量为 $1.1 \times 10^9 \text{ g/a}$ 。

参 考 文 献

- [1] Mulholland P J and Elwood J W. The role of lake and reservoir sediments as sinks in the perturbed global carbon cycle [J]. *Tellus*, 1982, 34(5): 490-499.
- [2] Dean W E and Gorham E. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands [J]. *Geology*, 1998, 26(6): 535-538.
- [3] 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, part 2): 2298-2314.
- [4] Sobek S, Durisch-Kaiser E, Zurbrugg 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.
- [5] 苏维词. 乌江流域梯级开发的不良环境效应 [J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(4): 388-392.
- [6] 贵州省地方志编纂委员会编, 汪凡主编. 贵州省水利志 [M]. 北京: 方志出版社, 1997: 80-99.
- [7] 覃子建, 吴淑才. 乌江渡水电站水库地震分析 [J]. *贵州地质*, 1993, 4(37): 335-344.
- [8] 唐红波, 望建成, 杨建赞, 等. 乌江流域气象、水文特性分析 [J]. *贵州水力发电*, 2010, 24(1): 6-9.
- [9] 吴正祺. 乌江流域大气降水微量元素丰度及地面水物质来源探究 [J]. *贵州环保科技*, 2000, 4(4): 1-4.
- [10] 王金凤, 代稳. 贵州省乌江流域地貌定量研究 [J]. *贵阳学院学报(自然科学版)*, 2015, 10(1): 66-68.
- [11] 王雨春, 黄荣贵, 万国江. SWB-1 型便携式湖泊沉积物-界面水取样器的研制 [J]. *地球与环境*, 1998, 1(1): 94-96.
- [12] 李酉年. 土壤农业化学常规分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [13] Robbins J A, Edgington D N. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137 [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1975, 39(3): 285-304.
- [14] 万国江, 黄荣贵, 王长生, 等. 红枫湖沉积物顶部 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 垂直剖面的变异 [J]. *科学通报*, 1990, 35(8): 612-615.
- [15] 胥思勤, 万国江. 云南省程海现代沉积物中 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 的分布及计年研究 [J]. *地球与环境*, 2001, 29(1): 28-31.
- [16] 朱晓磊, 张洪, 雷沛, 等. 官厅水库沉积物中大量元素的历史分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36(2): 442-449.
- [17] 郭文景, 王延华, 杨浩, 等. 滇池流域双龙水库径流区人类活动的沉积物记录 [J]. *土壤*, 2015, 47(4): 773-780.
- [18] 张明礼, 孔冉冉, 杨浩, 等. 江西洪湖沉积物营养盐变化与人类活动响应研究 [J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2015, 38(3): 99-106.
- [19] 王雨春. 贵州红枫湖、百花湖沉积物-水界面营养元素(磷、氮、碳)的生物地球化学作用 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2001.
- [20] 胥思勤. 红枫-百花湖、程海沉积物 ^{210}Pb 分布及环境示踪的对比研究 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1999.
- [21] 孙旭波, 王红亚. 贵州鹤顶水库沉积物特征及其土壤侵蚀的意义 [J]. *第四纪研究*, 2008, 28(4): 769-778.
- [22] 王文博, 蔡运龙, 王红亚. 结合粒度和 ^{137}Cs 对小流域水库沉积物的定年——以黔中喀斯特地区克酬水库为例 [J]. *湖泊科学*, 2008, 20(3): 306-314.
- [23] 李春梅, 王红亚. 贵州省西南部麦岗水库沉积物的 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 测年与沉积速率研究 [J]. *水土保持通报*, 2010, 30(2): 215-219.
- [24] Reyss J L, Mangeret A, Courbet C, et al. Estimation of sedimentation rates based on the excess of radium 228 in granitic reservoir sediments [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2006, 162-163: 8-13.
- [25] Zhang F, Zhang R, Guan M, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and Pb isotopic ratios in a sediment core from Shilianghe Reservoir, eastern China: Implying pollution sources [J]. *Applied Geochemistry*, 2016, 66: 140-148.
- [26] Müller J, Ruppert H, Muramatsu Y, et al. Reservoir sediments—A witness of mining and industrial development (Malter Reservoir, eastern Erzgebirge, Germany) [J]. *Environmental Geology*, 2000, 39(12): 1341-1351.

- [27] Arnason J G and Fletcher B A. A 40-year record of Cd, Hg, Pb, and U deposition in sediments of Patroon Reservoir, Albany County, NY, USA [J]. *Environmental Pollution*, 2003, 123(3): 383-391.
- [28] Audry S, Schäfer J, Blanc G, *et al.* Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution (Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs (France) [J]. *Environmental Pollution*, 2004, 132(3): 413-426.
- [29] Sedláček J, Bábek O and Nováková T. Sedimentary record and anthropogenic pollution of a complex, multiple source fed dam reservoirs: An example from the Nové Mlýny reservoir, Czech Republic [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 574: 1456-1471.
- [30] Sedláček J, Bábek O and Kielar O. Sediment accumulation rates and high-resolution stratigraphy of recent fluvial suspension deposits in various fluvial settings, Morava River catchment area, Czech Republic [J]. *Geomorphology*, 2015, 254: 73-87.
- [31] 王小雷, 杨浩, 赵其国, 等. 云南滇池近现代沉积速率及气候干湿变化的粒度记录 [J]. *地理研究*, 2011, 30(1): 161-171.
- [32] 王小雷, 杨浩, 顾祝军, 等. 抚仙湖沉积物中营养盐和粒度垂向分布及相关性研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2014, 4(5): 353-360.
- [33] Zeng H A, Wu J L. Sedimentary records of heavy metal pollution in Fuxian Lake, Yunnan Province, China: Intensity, history, and sources [J]. *Pedosphere (土壤圈(英文版))*, 2009, 19(5): 562-569.
- [34] 万国江, 陈敬安, 胥思勤, 等. $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 沉积通量突发增大对湖泊生产力的指示——以程海为例 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2004, 34(2): 154-162.
- [35] 朱正杰, 陈敬安, 曾燕. 草海地区过去 500 年来温度重建: 来自沉积物纤维素结合碳酸盐氧同位素的证据 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(2): 250-258.
- [36] Wang J, Zhu L, Wang Y, *et al.* Variability of the $\delta^{14}\text{C}$ reservoir effects in Lake Tangra Yumco, Central Tibet (China), determined from recent sedimentation rates and dating of plant fossils [J]. *Quaternary International*, 2015.
- [37] 张信宝, 曾奕, 龙翼. ^{137}Cs 质量平衡法测算青海湖现代沉积速率的尝试 [J]. *湖泊科学*, 2009, 21(6): 827-833.
- [38] Kasper T, Haberzettl T, Doberschütz S, *et al.* Indian Ocean Summer Monsoon (IOSM) -dynamics within the past 4 ka recorded in the sediments of Lake Nam Co, central Tibetan Plateau (China) [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 39(3): 73-85.
- [39] 王君波, 彭萍, 马庆峰, 等. 西藏玛旁雍错和拉昂错水深、水质特征及现代沉积速率 [J]. *湖泊科学*, 2013, 25(4): 609-616.
- [40] Ma Q, Zhu L, Xinmiao L, *et al.* Pollen-inferred Holocene vegetation and climate histories in Taro Co, southwestern Tibetan Plateau [J]. *Science Bulletin*, 2014, 59(31): 4101-4114.
- [41] Haberzettl T, Henkel K, Kasper T, *et al.* Independently dated paleomagnetic secular variation records from the Tibetan Plateau [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2015, 416: 98-108.
- [42] 张小龙, 徐柏青, 李久乐, 等. 青藏高原西南部塔若错湖泊沉积物记录的近 300 年来气候环境变化 [J]. *地球科学与环境学报*, 2012, 34(1): 79-90.
- [43] 万国江, 白占国. 洱海近代沉积物中碳-氮-硫-磷的地球化学记录 [J]. *地球化学*, 2000, 29(2): 189-197.

The Sedimentation Rate and Burial Fluxes of Carbon and Nitrogen in Wujiangdu Reservoir, Guizhou, China

YANG Yuxue^{1,2}, XIANG Peng^{1,2}, LU Weiqi^{1,2}, WANG Shilu¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The burial of carbon in reservoir sediments in southwestern China is of great significance to the global carbon cycle as a carbon sink. In order to calculate the magnitude of the carbon sink, the contents of TOC, IC and TN in sediments of Wujiangdu reservoir in Wujiang River basin were determined, and the sedimentation rate was estimated on basis of activity of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in this paper. Results show that the average sedimentation rate was $0.155 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$, and deposition and accumulation fluxes of organic carbon were $70.85 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ and $29.14 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, respectively. TN shared a similar vertical distribution with TOC, with deposition and accumulation fluxes of $8.22 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ and $2.79 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, respectively. The annual total burial flux of TOC was $1.39 \times 10^9 \text{ g/a}$, while 82% comes from organic matter formed by photosynthesis in the reservoir. Therefore, the net flux of carbon sink was $23.9 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, and the net carbon sink in Wujiangdu reservoir is $1.1 \times 10^9 \text{ g/a}$, conservatively. Result here suggests that sediments in reservoirs in southwestern China are a significant carbon sink.

Key words: $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ radionuclide; sedimentation rate; carbon-nitrogen burial flux; Wujiangdu reservoir