

福建山美水库表层沉积物不同形态硅分布特征及其环境意义

易成国¹,郭沛涌^{1,2*},路丁^{1,2},陈佳美¹,滕聪¹,王亚茹¹(1.华侨大学化工学院环境科学与工程系,福建 厦门 361021; 2.华侨大学环境与资源技术研究所,福建 厦门 361021)

摘要: 采用 Tessier 连续提取法研究了亚热带典型山区深水水库-福建泉州山美水库沉积物中不同形态硅(可交换离子态硅[IEF-Si]、碳酸盐结合态硅[CF-Si]、铁锰氧化物结合态硅[IMOF-Si]和有机硫化态硅[OSF-Si])的时空分布特征及其环境意义.结果表明,山美水库平水期、丰水期、枯水期表层沉积物中不同形态硅总含量分别为 3043.50~4414.24,2711.17~3676.89,3198.44~4444.28mg/kg,平水期>枯水期>丰水期;其空间分布特征为:库尾区>水库中部区>近坝区>入库区.该水库中 IEF-Si 和 CF-Si 相对含量少,活性大.虽然可交换态硅的含量较少,其释放潜能有可能对水生生态系统营养状况及初级生产产生影响;CF-Si 对环境因子尤其是 pH 值特别敏感;IMOF-Si 和 OSF-Si 相对含量高,IMOF-Si 可能是山美水库硅补充的最主要途径;而 OSF-Si 是比较稳定形态的硅,其分布规律与受不同时期沉积下来的沉积物类型和环境影响有关.平水期、丰水期 CF-Si 与 IMOF-Si 呈显著正相关关系($P<0.05$, $r=0.728$; $P<0.05$, $r=0.672$),丰水期、枯水期 IMOF-Si 与 OSF-Si 均呈显著正相关关系($P=0.05$, $r=0.757$; $P<0.01$, $r=0.832$).

关键词: 山区深水水库; 表层沉积物; 硅形态; 时空分布

中图分类号: X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2015)01-0211-07

Distribution characteristics and environmental significance of different silicon forms in surface sediments of Shanmei Reservoir. YI Cheng-guo¹, GUO Pei-yong^{1,2*}, LU Ding^{1,2}, CHEN Jia-mei¹, TENG Cong¹, WANG Ya-ru¹ (1.Department of Environmental Science and Engineering, Chemical Engineering Institute of Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2.Huaqiao University Environment and Resource Technology Research Institute, Xiamen 361021, China). *China Environmental Science*, 2015,35(1): 211~217

Abstract: Tessier's sequential extraction method was used to analyze different forms of silicon (IEF-Si, CF-Si, IMOF-Si and OSF-Si) in surface sediments from a subtropical mountain deepwater reservoir-Shame Reservoir in Quanzhou City, and their temporal and spatial distribution were investigated. Total concentrations of silicon in surface sediments ranged in 3043.50~4414.24, 2711.17~3676.89, 3198.44~4444.28mg/kg in normal water period, dry season and wet season, respectively. Total concentrations of silicon in surface sediments of this reservoir from high to low was as follows: tail zone of reservoir, central zone of reservoir, near-dam zone, storage zone. IEF-Si and CF-Si accounted for a small proportion of total silicon, but they were active species. Although IEF-Si content was low, its potential release was likely to impact the trophic state of aquatic ecosystem and the primary production. CF-Si was sensitive to environmental factors, especially pH. The percentages of IMOF-Si and OSF-Si were much larger than those of other two forms. Mobility of IMOF-Si was probably the main way to supply Si in the Shanmei Reservoir. OSF-Si was relatively stable and its distribution was linked with the sediment type and environmental. The concentrations of CF-Si and IMOF-Si were positively correlated during normal water period ($P<0.05$, $r=0.728$) and wet season ($P<0.05$, $r=0.672$). The concentrations of IMOF-Si and OSF-Si also had significantly positive correlation in wet season ($P<0.05$, $r=0.757$) and dry season ($P<0.01$, $r=0.832$), respectively.

Key word: mountain deepwater reservoir; surface sediments; silicon species; spatiotemporal distribution

收稿日期: 2014-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(20777021);福建省自然科学基金项目(2010J01043,D0610012);泉州市科技计划项目(2012Z85)

* 责任作者, 研究员, guopeiyong@sina.com.

硅(Si)作为几乎所有母质都含有的元素,是大多数土壤的基本成分^[1],也是多种作物正常生长必需的营养元素^[2],同时是水库生态系统中重要的营养盐.硅在水库水环境中的赋存、迁移和转化等过程对水库生态系统的初级生产力具有重要意义.自然条件下,硅输入海洋后,经浮游植物吸收,当浮游植物死亡,硅随之沉入海底,在水体中几乎没有硅再生过程^[3-4].因此,硅可能也是水库生态系统的限制性因子,控制水库的初级生产力水平.水体中的营养盐硅缺乏及其与氮、磷之间的比例失调会导致浮游植物群落由硅藻向蓝藻演替^[5-6],导致水体富营养化.

沉积物是水库环境中硅的重要储库,其对上覆水中营养盐硅的“源/汇”效应在整个水库生态系统物质的生物地球化学循环过程中扮演着重要角色.营养物质有很大部分来源于沉积物与上覆水之间的物质交换^[7-8].有研究表明,“滞留效应”导致的氮、磷损失可能被流域面源的输入而抵消.而硅主要来自流域岩石的侵蚀过程,没有外源输入机制可以补偿水体中由于硅藻吸收造成的可溶解态硅的减少,所以流域对水体中的硅常产生明显的“滞留”效应^[9-11].当外源营养硅被控制时,沉积物营养盐硅的季节性释放成为水体中可溶性硅酸盐的主要来源^[12].虽然大量的硅存在于水体沉积物中,但是参与到生物地球化学循环的量可能仅占其总量的一小部分,这就可能导致水域硅的亏损.目前,国内外对于硅的研究主要集中在河流、海洋和湖泊^[13-14].对于水库沉积物硅的研究较少,且几乎集中在生物硅和单一赋存形态硅^[15-16],而亚热带山区深水水库沉积物中硅的研究鲜有报道.本文以亚热带典型山区深水水库泉州山美水库为例,通过对山美水库沉积物中不同形态硅分布特征的研究,探讨不同形态硅之间的相关性,揭示不同形态硅的环境生物地学化学意义,为硅在水库水体富营养化及初级生产的作用研究提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

山美水库位于泉州晋江东溪中游南安码头

镇山美村,周围群山环抱,是省水利厅管辖库容最大的水库.水库集雨面积 1023.00km²,总库容 3.27 亿 m³,实时蓄水位 88.54m.山美水库年平均出库水量为 8.97×10⁸m³,全年水深 15.30~46.60m,平均水深 34.15m,年平均气温(17.0~20.0)℃,主要植被类型为次生常绿阔叶林为主,主要土壤是红壤和赤红壤,是典型的亚热带山区深水水库.山美水库主要污染源来自桃溪中游约 9.00km 永春县城的工业和生活废水.虽然经过不断治理,但仍呈现出富营养化趋势^[17].山美水库从入库、水库中部区至出库的表层水体,除 pH 值外,DO、COD_{Mn} 和 BOD₅ 浓度呈递减趋势^[18].

1.2 样品采集

根据山美水库库区的形态特征,分别于 2012 年 3 月(平水期)、7 月(丰水期)、11 月(枯水期)在山美水库的入库区、库尾区、水库中部区和近坝区共选取了具有代表性的 9 个采样点(图 1).其中,S1、S2 位于水库入库区,S3、S4 位于库尾区,属于闭合区域,紧邻九都镇居民区.S5、S6、S7 即水库中部,S8、S9 位于近坝区.采样过程中,用 GPS 导航仪定位,利用彼得逊采泥器采集 9 个点的表层 0~30cm 沉积物,置于聚乙烯袋中带回实验室于-20℃下保存备用.

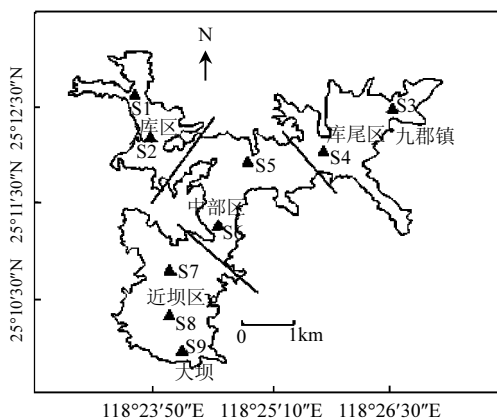


图 1 山美水库采样站位示意

Fig.1 Sampling sites in Shanmei Reservoir

1.3 样品处理与测定

采集后的水库沉积物样品经冷冻干燥后,挑去石粒等异物,用玻璃研钵研磨,过 50 目筛,密封

于自封袋中,将标记好的样品连同自封袋一起置于干燥皿中保存.不同形态硅参照 Tessier 连续提取法^[19]的操作步骤提取.

可交换态硅(IEF-Si):称取样品 0.8g,加入 20mL 氯化镁 1mol/L,搅拌后连续振荡 1h(转速 200r/min),再离心 15min(5000r/min),快速取 0.2mL 上层清液于 25mL 比色管中定容.

碳酸盐结合态硅(CF-Si):用去离子水洗涤上一步骤的残余物,再加入 20mL 醋酸钠 1mol/L,于 pH5.0 下,连续振荡 5h,再离心 15min(5000r/min),快速取 0.2mL 上层清液于 25mL 比色管中定容.

铁锰氧化态硅(IMOF-Si):用去离子水洗涤上一步骤残余物,再加入 20mL 盐酸羟胺-醋酸 0.04mol/L,再 96℃下水浴恒温 4h,间歇搅拌,离心 15min (5000r/min),快速取 0.2mL 上层清液于 25mL 比色管中定容.

有机硫化态硅(OSF-Si):用去离子水洗涤上一步骤残余物,再加入 3mL 硝酸 0.02mol/L、5mL 30% H₂O₂,控制 pH 2,(85±2)℃水浴恒温 2h,间歇振荡.再加入 3mL 30% H₂O₂,控制 pH 2,再恒温 3h,并间断的振荡.冷却后,加入 5mL 醋酸铵 3.2mol/L,用 20%(V/V)硝酸稀释到 20mL,振荡 30min.离心 15min(5000r/min)后,取 0.2mL 上层清液于 25mL 比色管中定容.根据硅钼蓝比色法^[20]测定各形态硅的含量.

1.4 数据处理

所得数据利用 origin8.0,SPSS18.0,excel2003 等软件进行统计和分析.

2 结果与分析

2.1 平水期表层沉积物不同形态硅的分布特征

如图 2 所示,泉州山美水库平水期表层沉积物中不同形态硅总含量为 3043.50~4414.24mg/kg,各个区域中硅的总含量分布为库尾区>近坝区>库中区>入库区.可交换态硅平均含量为 200.31mg/kg,其分布水平整体上相差不大,入库区、库尾区、库中区和近坝区含量分别约占 5.22%、4.86%、4.76%和 4.08%,其含量最大值在 S2 采样点,而最小值在 S7 采样点.碳酸盐结合态硅的平均含量为 384.17mg/kg,近坝区含量最高,

平均比重占硅总含量约 12.45%,入库区、库尾区和库中区碳酸盐结合态硅分别占硅总含量约 4.23%、11.91%和 9.53%.不同形态硅中以铁锰氧化态硅为主,该形态硅含量为 1561.01~2210.14mg/kg,占硅总含量的 42.61%~51.91%.有机硫化态硅的平均含量为 1464.75mg/kg,占硅总含量的比重 42.87%~47.66%,其含量在库中部最高,库尾区居第 2,入库区最低.

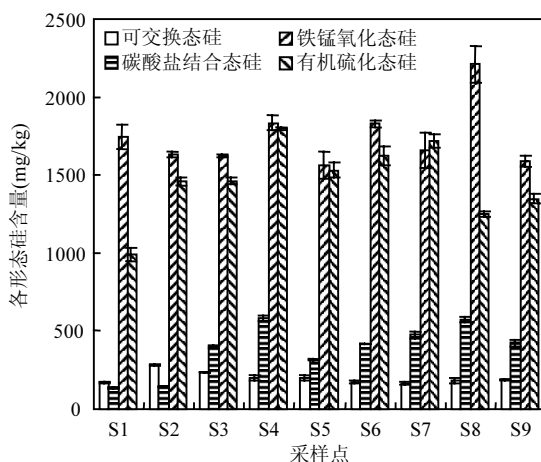


图2 平水期不同形态硅含量

Fig.2 The concentrations of different silicon forms in surface sediments during normal water period

2.2 丰水期表层沉积物不同形态硅的分布特征

如图 3 所示,泉州山美水库丰水期表层沉积物中不同形态硅总含量在 2711.17~3676.89mg/kg 之间,各个区域硅总含量分布为库尾区>库中部>近坝区>入库区.可交换态硅和碳酸盐结合态硅的含量比平水期少,其含量约 77.03~209.22mg/kg,且各采样点含量接近,占硅总含量约 3.87%~5.60%.铁锰氧化态硅和有机硫化态硅是丰水期表层沉积物硅的主导形态,两者的平均含量接近约 1390.13mg/kg,这 2 种形态硅占硅总含量约 42.87%~47.69%,铁锰氧化态硅分布为库尾区>近坝区>库中区>入库区,有机硫化态为库尾区>库中部>近坝区>入库区.这两种形态硅在各区域内的不同位置的含量有较大的差异,这种差异比平水期、枯水期大得多,可能是丰水期人类活动对环境的污染或水文条件变化较大,对硅活动性产

生较大影响。

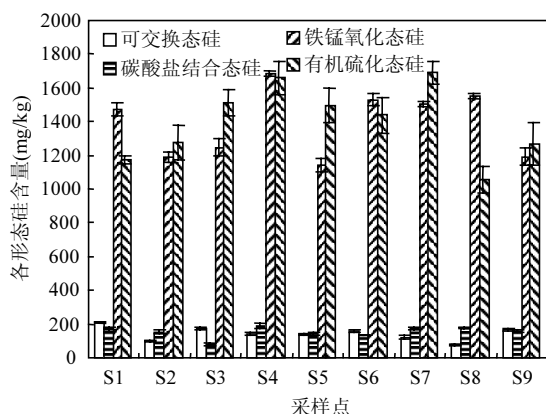


图3 丰水期各级形态硅含量

Fig.3 The concentrations of different silicon forms in surface sediments in wet season

2.3 枯水期表层沉积物不同形态硅的分布特征

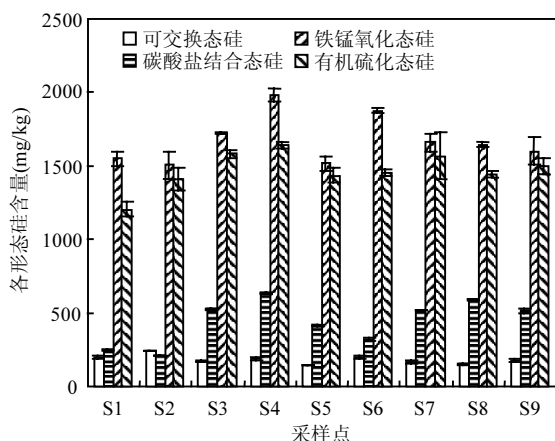


图4 枯水期各级形态硅含量

Fig.4 The concentrations of different silicon forms in surface sediments in dry season

如图4所示,泉州山美水库枯水期表层沉积物中不同形态硅总含量在3198.44~4444.28mg/kg之间,不同形态硅总含量分布为库尾区>近坝区>库中区>入库区。可交换态硅所占比重为4.25%~6.73%,其平均含量为181.61mg/kg。碳酸盐结合态则占6.90%~13.72%,其平均含量为440.00mg/kg。铁锰氧化态硅是优势形态,该形态硅含量范围为1504.98~1979.65mg/kg,占硅总

含量的42.50%~46.57%。而有机硫化态硅约占硅总含量39.00%,平均含量为1469.40mg/kg左右。碳酸盐结合态、铁锰氧化态和有机硫化态3种形态硅含量均为入库区最低,而其余3个区域则呈现库中部区域含量低,近坝区和库尾区含量高的分布格局。枯水期铁锰氧化态硅含量比丰水期高,可能是因为枯水期水量少,水库污染物浓度比较大,好氧微生物大量繁殖和分解有机物,消耗溶解氧,给铁锰氧化态硅创造还原条件,有助于铁、锰离子吸附硅,并形成结合力更强的铁锰氧化物。

3 讨论

3.1 表层沉积物中不同形态硅的环境意义

孔隙水中溶解硅主要来源于沉积物的溶解扩散^[21],而沉积物的释放强烈依赖于周围环境的温度和化学进程^[22]。本研究中亚热带山区深水水库山美水库不同形态硅的总含量分布特征为平水期(3月)>枯水期(11月)>丰水期(7月)。这是由于7月的气温高,而且又是丰水期,由于丰水期降雨量充沛,上游河道处于汛期,河流输入源增加;同时福建位于沿海区域,且时为多台风季节,强风和降水作用使入水量增大。流域来水引起水的流速不同,也会造成不同的水动力,引发表层沉积物的悬浮,也带动吸附在其上的营养物质,一起进入上覆水。水动力扰动初期可引起沉积物颗粒态和胶体态硅向水体大量释放,当颗粒物与胶体物质的絮凝沉淀作用超过了其悬浮量,硅的释放趋于稳定。此外,水位的大幅度涨落致使水库沿岸带沉积物经历大面积的干湿交替过程,而逐渐干燥的沉积物会发生结构上的变化,如收缩、破裂或致密^[23],以及细颗粒的聚集或大颗粒的分解等^[24]。此外,底泥的干湿交替明显地减少水稳性团聚体^[25],这些物理性状的变化必然影响硅的含量、形态与吸附释放行为。

丰水期的温度高,加快了还原溶解和置换反应速度^[26],还能增加底泥中微生物和生物体的活动。因此,丰水期可能对山美水库上覆水体中的硅存在稀释的作用,有助于沉积物中的硅向孔隙水和上覆水体释放,而有利于沉积物对于营养盐硅的吸附。而平水期和枯水期临近冬季,气候寒冷干

燥,水量少,沉积物中硅溶解速度和释放缓慢。

本研究表明可交换态硅含量是 4 种不同形态硅中含量最少的,且相对含量也较少.可交换态硅较容易从沉积物中释放进入到上覆水体中,成为浮游植物的重要营养源.其对环境变化敏感,易于迁移转化和被植物吸收.这种硅在自然状态下从沉积物中主要是通过溶出、间隙水离子交换、络合等形式释放出来,风、径流、人类活动以及水库底部生物的扰动都会加快间隙水中溶解硅向上层水体扩散^[27].硅藻等浮游植物的生长限制因子可能是含量最少的可交换态硅,当可交换态硅含量充足时导致硅藻产率增加,但是随着水体中的可交换态硅不断被消耗,硅藻生长开始缓慢,最终受到硅限制.因此,虽然可交换态硅的含量很少,其释放潜能有可能对水库水体营养状况及初级生产产生影响。

碳酸盐结合态硅与可交换态硅的含量接近,但相较于平水期和枯水期,丰水期的碳酸盐结合态硅含量明显高于可交换态硅,主要是因为碳酸盐结合态硅对环境因子敏感.当 pH 值下降时,水中 H⁺ 浓度增大,会与碳酸盐进行反应,使得该形态硅易释放出来而进入环境中.相反,pH 值升高有利于该形态硅的生成.因此,夏季丰水期由于浮游植物的光合作用加大,溶解氧含量上升,甚至饱和,pH 值增大^[28],不利于该形态硅重新释放出来进入水体环境中,使得沉积物中的碳酸盐结合态硅含量多。

铁锰氧化态硅是不同形态硅中含量最高的,其分布为库尾区>近坝区>库中区>入库区.氧化铁锰胶体为两性胶体,当 pH 值小于零点电荷时,胶体表面带正电,产生的专性吸附作用随产生正电荷的增加而削弱,吸附能力增加缓慢,当 pH 值升到氧化物的零点电荷以上,胶体表面带负电荷,吸附能力必然急剧增加^[29-30],pH 值氧化还原电位较高时,有利于铁锰氧化物的形成.所以在氧化环境下,低价态的 Fe²⁺ 和 Mn²⁺ 氧化形成铁锰氧化物,在沉积的过程中,通过物理化学吸附作用不断结合水体中的硅;而在还原条件下,铁锰氧化物上的硅就会被重新释放到孔隙水中被向上层水体扩散.初步推断,山美水库水体铁锰氧化态硅含量与氧化还原电位大小有一定的对应关系.若水体

中的氧化还原条件发生改变,铁锰氧化态硅就能够大量从沉积物中释放出来参与循环,所以铁锰氧化态硅可能是山美水库硅补充的最主要途径。

有机硫化态硅是比较稳定形态的硅,受外界影响比较小^[31].其含量在 4 种不同形态硅中含量居第 2,比铁锰氧化态硅少,可能与有机质和铁锰氧化物对硅的吸附特性有关^[32],其分布规律是库尾区>水库中部>近坝区>入库区,这与受不同时期沉积下来的沉积物类型和环境影响有关^[33-34];该形态会在有机质分解时逐渐释放,因为有机质含量减少,会使营养盐硅的吸附能力减弱.山美水库以铁锰氧化态硅和有机硫化态硅为主,但是宋金明^[35]对渤海南部海域中沉积物硅的研究结果显示:碳酸盐结合态硅是主要赋存形态,与本研究结果不一致,可能与水库的封闭性等特性和人为活动影响较大等因素有关。

3.2 沉积物中不同形态硅的相关性

由表 1 可见,平水期 CF-Si 与 IMOF-Si 呈正相关关系 ($P<0.05,r=0.728$); 丰水期 CF-Si 与 IMOF-Si 呈正相关关系 ($P<0.05,r=0.672$), IMOF-Si 与 OSF-Si 也呈正相关关系 ($P<0.05,r=0.757$); 枯水期 IMOF-Si 与 OSF-Si 呈显著正相关关系 ($P<0.01,r=0.832$).

表 1 各时期不同形态硅间的相关性分析

Table 1 Correlation analysis between different forms of silicon in each period					
硅形态	时段	IEF-Si	CF-Si	IMOF-Si	OSF-Si
IEF-Si	平水期	1	-0.412	-0.158	0.081
	丰水期	1	-0.257	-0.184	-0.398
	枯水期	1	-0.651	0.020	-0.329
CF-Si	平水期	-0.412	1	0.728*	0.511
	丰水期	-0.257	1	0.672*	0.651
	枯水期	-0.651	1	0.488	0.596
IMOF-Si	平水期	-0.158	0.728*	1	0.344
	丰水期	-0.184	0.672*	1	0.757*
	枯水期	0.020	0.488	1	0.832**
OSF-Si	平水期	0.081	0.511	0.344	1
	丰水期	-0.398	0.651	0.757*	1
	枯水期	-0.329	0.596	0.832**	1

注: *在0.05水平(双侧)上显著相关; **在0.01水平(双侧)上显著相关

根据表 2、表 3 的可见:泉州山美水库硅形态

分布特征与环境有关.

表 2 山美水库沉积物粒径分布(%)
Table 2 Mountain America reservoir sediment grain size distribution (%)

时期	站位	粒径分布		
		<4μm	4~63μm	>63μm
丰水期	S1	24.95±0.58	52.17±1.19	22.88±0.64
	S2	29.13±0.09	66.05±0.19	4.82±0.11
	S3	26.83±0.06	65.45±0.18	7.72±0.24
	S4	28.24±0.10	69.08±0.23	2.68±0.13
	S5	29.16±0.26	63.66±0.33	7.18±0.22
	S6	26.46±0.18	64.11±0.23	9.43±0.30
	S7	22.42±0.02	55.33±1.10	22.26±1.08
	S8	24.36±0.15	60.49±0.70	15.15±0.58
	S9	25.94±0.28	60.47±0.26	13.59±0.37
枯水期	S1	23.25±0.11	54.77±1.01	21.98±0.95
	S2	30.12±0.09	56.01±0.29	13.88±0.29
	S3	31.78±0.11	62.14±0.30	6.08±0.22
	S4	24.28±0.06	53.65±0.58	22.07±0.58
	S5	24.62±0.08	58.03±0.30	17.36±0.35
	S6	25.76±0.10	57.19±0.76	17.06±0.84
	S7	25.03±0.08	65.54±0.44	9.44±0.38
	S8	27.86±0.05	57.17±0.49	14.98±0.50
	S9	30.96±0.57	52.09±0.20	16.95±0.74

注:粒径小于4μm的为黏土,粒径为4~63μm的为粉砂,粒径大于63μm的为细砂

表 3 各时期硅总量与粒径的相关性分析
Table 3 Analysis of total amount and particle size of silicon correlation in each period

沉积物粒径	丰水期硅总量	枯水期硅总量
<4μm	-0.228	0.056
4~63μm	0.079	0.116
>63μm	0.013	-0.126

从山美水库表层沉积物中不同形态硅的相关性研究来看,CF-Si 与 IMOF-Si 在平水期和丰水期均呈正相关关系,而 IMOF-Si 与 OSF-Si 在丰水期和枯水期也呈正相关关系,且它们在枯水期的时候呈显著正相关.存在相关性的原因可能是 IMOF-Si 是 Si 与 Fe,Mn 氧化物一起被包裹的,其本身成为氢氧化物沉淀的一部分,在沉降的过程中由于自身的胶体性质会吸附有机质和碳酸盐,这是矿物聚集体对于营养物质的包裹保护;另外一个原因则可能是因为沉积物中的有机质与

铁、锰发生氧化还原反应:在氧化还原电位低的情况下,高价态的锰和铁不易稳定,将从有机物缺氧或者厌氧分解中获取电子还原;当表层沉积物中氧化还原电位较高,且处于有氧环境,铁锰氧化物不易被还原,其表面对于溶解性的有机质有吸附作用.

4 结论

4.1 亚热带典型山区深水水库山美水库平水期表层沉积物中不同形态硅总含量在 3043.50~4414.24mg/kg 之间.硅总含量分布为库尾区>近坝区>库中区>入库区,其中以铁锰氧化态硅是优势形态.丰水期表层沉积物中不同形态硅总含量 2711.17~3676.89mg/kg 之间,硅总含量分布为库尾区>库中部>近坝区>入库区.铁锰氧化态硅和有机硫化态硅是主导形态,该时期两者的平均含量接近,且它们在库尾区的含量均最大.枯水期表层沉积物中不同形态硅总含量 3198.44~4444.28mg/kg 之间,各个区域硅总含量分布为库尾区>近坝区>库中区>入库区.该时期仍以铁锰氧化态硅为主,有机硫化态硅次之.

4.2 山美水库虽然可交换态硅的含量较少,其释放潜能有可能对水生生态系统营养状况及初级生产产生影响.碳酸盐结合态硅对环境因子敏感.山美水库水体铁锰氧化态硅含量与氧化还原电位大小有一定的对应关系,铁锰氧化态硅可能是山美水库硅补充的最主要途径.有机硫化态硅是比较稳定形态的硅,其分布规律与受不同时期沉积下来的沉积物类型和粒度影响有关.

4.3 山美水库表层沉积物中不同形态硅的相关性表明:平水期 CF-Si 与 IMOF-Si 呈正相关关系;丰水期 IMOF-Si 与 CF-Si、OSF-Si 呈正相关关系;枯水期 IMOF-Si 与 OSF-Si 呈显著正相关关系.

参考文献:

[1] Sommer M, Kaczorek D, Kuzyakov Y, et al. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes: a review [J]. J. Plant Nutr and Soil Science, 2006, 169(4):310-329.
[2] 常春荣,朱治强.海南省主要河流及地下水硅含量的分布规律 [J]. 华南热带农业大学学报, 2006,12(4):6-11.
[3] 陈荣华,汪东军,徐建,等.南海东北部表层沉积中钙质和硅质

- 微体化石与沉积环境 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(4):15-21.
- [4] 杨东方,高振会,秦 洁,等.地球生态系统的营养盐硅补充机制 [J]. 海洋科学进展, 2006,24(4):568-576.
- [5] 郭 云,支崇远,赵宇中,等.硅藻对地表石灰华沉积的生物作用及其意义 [J]. 上海地质, 2007,(1):21-24.
- [6] 胡胜华,周巧红,成水平,等.月湖近代生物硅沉积测定与营养演化的动态过程 [J]. 生态环境, 2008,17(6):2141-2144.
- [7] Fay C, Gary R F, Charlotte E L T, et al. Impact of resuspension of cohesive sediments at the Oyster Grounds (North Sea) on nutrient exchange across the sediment-water interface [J]. Biogeochemistry, 2013,113:37-52.
- [8] 古小治,张 雷,柏 祥,等.湿地沉积物-水界面营养盐交换的定量估算 [J]. 水科学进展, 2011,22(1):75-82.
- [9] Hooper R P, Aulenbach B T, Kelly V J. The National Stream Quality Accounting Network: a flux-based approach to monitoring the water quality of large rivers [J]. Hydrological Processes, 2001,15:1089-1106.
- [10] Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A, et al. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure [J]. Nature, 1997,386:385-388.
- [11] Humborg C, Conley D J, Rahm L, et al. Silicon Retention in River Basins: Far-reaching Effects on Biogeochemistry and Aquatic Food Webs in Coastal Marine Environments [J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2000,29(1):45-50.
- [12] Liu S M, Zhang J, Jiang W S. Pore Water Nutrient Regeneration in Shallow Coastal Bohai Sea, China [J]. Journal of Oceanography, 2003,59:377-385.
- [13] DeMaster D J. The supply and accumulation of the silica in the marine environment [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1981,45(10):1715-1732.
- [14] Ding T, Wan D, Wang C, et al. Silicon isotope compositions of dissolved silicon and suspended matter in the Yangtze River, China [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004,68(2):205-216.
- [15] Chuang C Y, Santschi P H, Ho Y F, et al. Role of biopolymers as major carrier phases of Th, Pa, Pb, Po, and Be radionuclides in settling particles from the Atlantic Ocean [J]. Marine Chemistry, 2013,157(2):131-143.
- [16] Florindo F, Roberts A P, Palmer M R. Magnetite dissolution in siliceous sediments [J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2003,4:1053.
- [17] 陈泳艺.九都镇山美水库周边环境现状调查 [J]. 化学工程与装备, 2013,(7):244-246.
- [18] 陈婉卿.泉州山美水库水质分布特征与富营养化趋势 [J]. 厦门大学学报, 2003,42(5):639-643.
- [19] Aderonke O O, Kehinde O O, Babajide I A. Comparison of three sequential extraction protocols for the fractionation of potentially toxic metals in coastal sediments [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011,172:319-327.
- [20] Dubovik D B, Tikhomirova T I, Ivanov A V, et al. Determination of Silicon, Phosphorous, Arsenic, and Germanium as Heteropoly Acids [J]. Journal of Analytical Chemistry, 2003,58:802-819.
- [21] Hofmann A, Roussy D, Filella M. Dissolved silica budget in the North basin of Lake Lugano [J]. Chemical Geology, 2002,182: 35-55.
- [22] Wu Y H, Wen Y J, Zhou J X, et al. Phosphorus release from lake sediments: Effects of pH, temperature and dissolved oxygen [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014,18(1):323-329.
- [23] 丛海兵,黄延林,李创宇,等.于桥水库沉积物内源污染特性研究 [J]. 水资源保护, 2006,22(4):20-24.
- [24] Luiz F. Pires, Felipe C. A. Villanueva, Nivea M. P. Dias, et al. Chemical migration during soil water retention curve evaluation [J]. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 2011,83(3):1097-1107.
- [25] Soulides D A, Allison F E. Effect of drying and freezing soil on carbon dioxide production, available mineral nutrients, aggregation, and bacterial population [J]. Soil Science, 1996, 91(5):291-298.
- [26] 高 倩,徐兆礼,庄 平.长江口北港和北支浮游动物群落比较 [J]. 应用生态学报, 2008,19(9):2049-2055.
- [27] Bidle K D, Azam F. Accelerated dissolution of diatom silica by marine bacterial assemblages [J]. Nature, 1999,397:508-512.
- [28] 陈剑锋,赖延和,童万平.南美白对虾工厂化养殖水体 pH 值的变化特征 [J]. 水产科学, 2006,25(9):456-458.
- [29] 丁疆华,温琰茂,舒 强.土壤环境中镉、锌形态转化的探讨 [J]. 城市环境与城市生态, 2001,14(2):47-49.
- [30] Pastrana-Martinez L M, López-Ramón M V, Moreno-Castilla C. Adsorption and thermal desorption of the herbicide fluroxypyr on activated carbon fibers and cloth at different pH values [J]. Journal Colloid Interface Sci. 2009,331(1):2-7.
- [31] 刘文彦.达里诺尔沉积物中硅的地球化学特征 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2011.
- [32] 吕昌伟,崔 萌,高际玫,等.硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究 [J]. 环境科学, 2012,33(1):135-141.
- [33] Liu M, Xu S Y, Hou L J, et al. Phosphorus forms in sediments and their distribution in the Yangtze Estuary and coastal areas [J]. Marine Science Bulletin, 2001,3(2):55-62.
- [34] Xia X, Wang R. Effect of sediment particle size on polycyclic aromatic hydrocarbon biodegradation: importance of the sediment-water interface [J]. Environ. Toxicol. Chem., 2008, 27(1):119-25.
- [35] 宋金明,罗延馨.渤海南部海域柱状沉积物中磷与硅的形态特征 [J]. 海洋科学集刊, 2001,43:83-95.
- 作者简介:** 易成国(1990-),男,福建泉州人,本科,主要从事水环境科学研究。