

# 滇池流域宝象河水库沉积物粒度分布 特征及其环境记录

陈 艳<sup>1</sup>, 王延华<sup>1,2</sup>, 叶 斌<sup>3</sup>, 孙 恬<sup>1</sup>, 张茂恒<sup>1,2</sup>

(1.南京师范大学 地理科学学院, 南京 210023; 2.虚拟地理环境教育部重点实验室,  
南京 210023; 3.生态环境部环境工程评估中心, 北京 100012)

**摘 要:**沉积物粒度特征不仅能指示沉积物的来源和迁移方式,还可以揭示不同历史时期区域暖湿变化。为研究滇池流域宝象河水库沉积物粒度的垂向变化特征及其记录的环境变化信息,以滇池宝象河水库岩芯沉积物粒度为研究对象,利用 Sahu 判别式对沉积物沉积环境进行了判别,并用粒径—标准偏差法分析沉积物中的环境敏感组分。研究表明:(1) 宝象河水库岩芯沉积物中粗粉砂质(16~64  $\mu\text{m}$ )含量最高,为 39.6%;黏土质(<4  $\mu\text{m}$ )和细粉砂质(4~16  $\mu\text{m}$ )含量相当,合计 50.3%;砂质(>64  $\mu\text{m}$ )含量最低(10.1%)。不同粒级组分随着深度变化而变化,黏土质和细粉砂质含量随埋藏深度而增加,粒径在 16  $\mu\text{m}$  以上的粗颗粒随埋藏深度而减小。(2) 沉积物粒度基本参数特征表明沉积物分选性差,偏度属于极负偏或负偏,峰态为中等峰态或峰态宽平,平均粒径介于 5.56~6.94  $\mu\text{m}$ 。(3) Sahu 判别式判别沉积环境推断入库河流不连续。粒径—标准偏差法提取宝象河水库沉积物中的敏感组分结果揭示研究区沉积环境水动力条件有变高的趋势。B 组分对沉积环境变化响应敏感,并且降水量对研究区沉积物粒径的影响显著。

**关键词:**沉积物; 粒度; Sahu 判别式; 粒度—标准偏差法; 宝象河水库

中图分类号:P512.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0007-06

## Characteristics of Distribution of Sediment Particle Size and Its Environmental Records in Baoxianghe Reservoir of the Dianchi Basin

CHEN Yan<sup>1</sup>, WANG Yanhua<sup>1,2</sup>, YE Bin<sup>3</sup>, SUN Tian<sup>1</sup>, ZHANG Maoheng<sup>1,2</sup>

(1.School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2.State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution, Nanjing 210023, China;

3.Appraisal Center for Environment & Engineering, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China)

**Abstract:** The particle size characteristics of sediments can not only indicate the source and migration pattern of sediments, but also reveal the regional warm and humid changes in different historical periods. In this study, the sediments from Baoxianghe Reservoir of the Dianchi Basin were taken as the research object in order to study the vertical variation characteristics of sediment particle size and the recorded environmental change information. The Sahu discriminant method was used to identify the sedimentary environment. The environmental sensitive components in the sediments were analyzed by the grade-standard deviation method. The results show that: (1) the content of coarse silt (16~64  $\mu\text{m}$ ) in the sediments was the highest (39.6%); the contents of clay (<4  $\mu\text{m}$ ) and fine silty (4~16  $\mu\text{m}$ ) were the same, with a total of 50.3%. The content of sandy (>64  $\mu\text{m}$ ) was the lowest (10.1%); the contents of clay and fine silty increased with the burial depth, and the coarse particles with particle size of 16  $\mu\text{m}$  or more decreased with the burial depth; (2) the characteristics of the basic parameters of sediment particle size indicated that the sediment had poor sorting, the skewness was extremely negative or negative, the kurtosis was medium or wide and flat, and the average particle size was between 5.56~6.94  $\mu\text{m}$ ; (3) we deduced from the results of Sahu discriminant that the inflow stream of the Baoxianghe Reservoir might be discontinuous; the sensitive components by the

收稿日期:2020-05-07

修回日期:2020-08-19

资助项目:国家自然科学基金面上项目“太湖流域氮流特征及其影响机制”(41673107);国家自然科学基金面上项目“滇池流域土壤侵蚀与氮流失的同位素示踪研究”(41273102)

第一作者:陈艳(1994—),女,四川遂宁人,硕士研究生,研究方向为沉积环境及其环境效应研究。E-mail:chenyan\_njnu@163.com

通信作者:王延华(1978—),女,山东烟台人,教授,博导,主要从事流域生态环境演变。E-mail:wangyanhua@njnu.edu.cn

grade-standard deviation method revealed that the hydrodynamic conditions of the sedimentary environment in the study area tended to be higher; component B was sensitive to the change of sedimentary environment; the precipitation had the significant effect on the particle size of sediments in this study area.

**Keywords:** sediment; particle size; Sahu discriminant; grade-standard deviation method; Baoxianghe Reservoir

沉积物粒度是反演古气候的可靠物理指标之一<sup>[1-2]</sup>,是水动力条件、沉积物源、搬运介质以及搬运方式综合作用的结果<sup>[3-4]</sup>。特定的沉积环境通常具有不同的沉积物粒径特征<sup>[5]</sup>。滇池是云贵高原最大的淡水湖泊,湖泊沉积记录蕴含有丰富的气候、环境信息。国内外学者对滇池流域湖泊沉积物进行了研究<sup>[6-8]</sup>,采用放射性核素(<sup>137</sup>Cs 和 <sup>210</sup>Pb)计年法确定沉积年代和沉积速率,通过对沉积柱中有机和无机污染物的垂向研究,反演不同时间尺度的沉积环境变化状况。也有研究者通过对表层沉积物的元素组成和含量进行分析研究其空间分布特征与赋存状态,探讨其污染特征和生态风险<sup>[9-10]</sup>。对滇池流域的研究集中在滇池主体及其周边地区污染物环境行为,对流域内水库沉积物的研究较少。近几十年来滇池流域干旱频发,宝象河水库作为滇池流域的重要组成部分,具有防洪、发电、灌溉等功能,并且是昆明主城区水源的主要源头,滇池流域第二大河流宝象河的水源<sup>[11]</sup>。本文以云南滇池流域的宝象河水库柱状沉积物为研究对象,通过对沉积物粒度及其参数特征的研究,结合 Sahu 判别式和粒级一标准偏差法的分析,探讨沉积物粒度的环境敏感组分及其环境特征。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

宝象河水库(102°55′—102°56′E, 24°01′—25°02′N)修建于 1958 年,地处大板桥镇,蓄水后未清淤,最初用于农灌,1996 年后成为昆明主城区水源的主要源头,主要补给水源为三岔河、热水河和方杆溪水。水库东北高,西南低<sup>[12]</sup>。北亚热带湿润季风气候,干湿分明,降雨集中在 5—10 月。水库周围主要土壤类型为红壤和水稻土,土地利用方式主要为林地、耕地和水体<sup>[13]</sup>,人为干扰程度较弱。

### 1.2 样品采集与测试方法

1.2.1 样品采集方法 2019 年 8 月,滇池流域旱年,利用重力采样器在宝象河水库采得连续的柱状沉积物 3 根(图 1),沉积物柱芯分别长为 73.5 cm, 58 cm 和 74.5 cm。采集后将柱芯于 -20℃ 冷冻,选取其中 74.5 cm 沉积柱进行分析。按照地下 0~0.5 cm 为 1 层;0.5~59.5 cm 为 1 cm/层间隔连续分样,共得 59 个样品;59.5~74.5 cm 为 0.5 cm/层间隔分样,共得

30 个样品;整个沉积柱共得 90 个样品。将分割后的样品进行冷冻干燥至恒重备用。

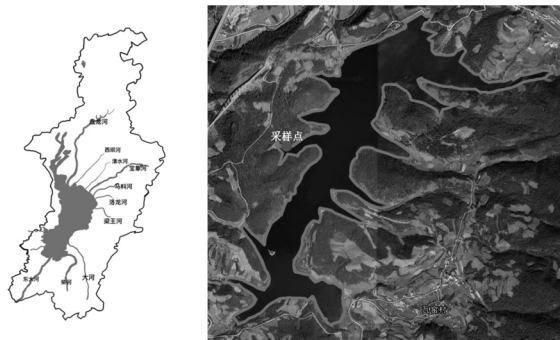


图 1 宝象河水库研究区域与采样位置

1.2.2 样品测试方法 粒度测定基于英国 Malvern 生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪,仪器测量范围为 0.02~2 000  $\mu\text{m}$ ,相对误差小于 3%。主要步骤<sup>[14]</sup>为:取干燥研磨后的样品 0.5 g,样品放置于小烧杯内,加入 10% 的双氧水,同时用玻璃棒搅拌尽可能去除有机质。加入 5 ml 浓度为 20% 的盐酸以去除碳酸盐,继续用玻璃棒搅拌直至无气泡产生。倒入蒸馏水清洗样品,静置后去除上清液,重复 4 次以上,最终使样品溶液为中性即可。加入 10 ml 分散剂(0.05 mol/L 六偏磷酸钠溶液),借助超声波震荡溶液 15 min 使样品充分分散,随后上机进行粒度测试。

## 2 结果与分析

### 2.1 沉积物粒度垂向变化趋势

为了研究宝象河沉积物岩芯粒度的垂向分布特征,根据 Udden-Wentworth 分级方法将粒径组分为黏土质( $<4 \mu\text{m}$ )、细粉砂质( $4\sim16 \mu\text{m}$ )、粗粉砂质( $16\sim64 \mu\text{m}$ )和砂质( $>64 \mu\text{m}$ )4 类。见图 2,沉积物粒度组分以粗粉砂质为主,其次是细粉砂质,黏土质分别占比 31.8~47.4%, 18.2~35.5% 和 15.9~34.7%。沉积物中黏土质、细粉砂质、粗粉砂质、砂质组分平均含量分别为  $24.7\% \pm 4.28\%$ ,  $25.6\% \pm 4.02\%$ ,  $39.6\% \pm 4.43\%$ ,  $10.1\% \pm 4.52\%$ 。中值粒径介于  $8.4\sim31.1 \mu\text{m}$ ,与各组分之间相关系数分别为 0.96, 0.91, 0.85, 0.88( $p < 0.01$ )。可用中值粒径表征沉积柱岩芯粒度的垂向变化趋势。根据沉积物岩芯中值粒径的变化特征将宝象河水库沉积物划分为 4 个沉积阶段:沉积阶段 I ( $-74.5\sim-55 \text{ cm}$ );沉积物各粒径组分波动较小,以粉砂质为主,包括细粉砂质和粗粉砂质,沉积物粒径由细

到粗各组分含量分别为  $27.4\% \pm 2.0\%$ ,  $28.7\% \pm 2.9\%$ ,  $36.7\% \pm 3.2\%$ ,  $7.2\% \pm 3.3\%$ 。

沉积阶段Ⅱ(−55~−43 cm):沉积物粒径细化,黏土质含量增加,细粉砂质和粗粉砂质含量稍有减少。主要以黏土质和粗粉砂质为主,各粒径组分含量分别为  $28.9\% \pm 2.9\%$ ,  $27.9\% \pm 2.1\%$ ,  $36.1\% \pm 2.3\%$ ,  $7.1\% \pm 1.7\%$ 。沉积阶段Ⅲ(−43~−26 cm):沉积物粗化明显,以粗粉砂质为主。其中粗颗粒物质含量增多,粗粉砂质和砂质平均含量分别为  $40.2\% \pm 3.1\%$ ,  $12.3\% \pm 2.7\%$ ;细颗粒物质含量减少,黏土质和细粉砂质平均含量分别为  $24.2\% \pm 2.7\%$ ,  $23.3\% \pm 2.4\%$ 。沉积阶段Ⅳ(−26~0 cm):沉积物粒度波动

较小,但仍有粗化的趋势。其中黏土质和细粉砂质含量明显减少,含量分别为  $19.5\% \pm 2.0\%$ ,  $21.7\% \pm 2.4\%$ ;粗粉砂质含量稳定变化,含量为  $44.8\% \pm 1.5\%$ ;砂质含量增多,含量为  $14.0\% \pm 4.0\%$ 。

整体来看,不同粒级组分含量随着深度的变化趋势有较为明显的差异,黏土质与粗粉砂质、细粉砂质与砂质组分的变化趋势相反。黏土质与细粉砂质含量随着深度减小而减小,粗粉砂质和砂质含量随着深度减小而增多。随着深度的减小,沉积物粗颗粒物质含量增加,细颗粒物质含量减少。随着深度减小,沉积物粗化明显,表明沉积环境的水动力条件有由小变大的趋势。

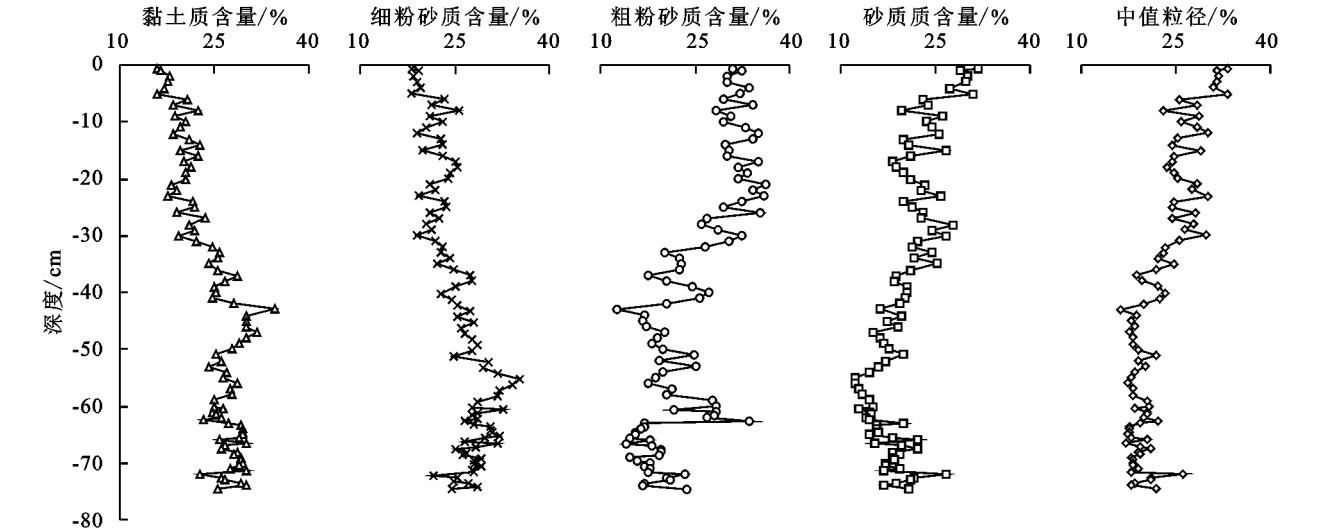


图2 宝象水库沉积物粒度垂向分布特征

2.2 粒度基本参数特征

粒度基本参数包括分选系数( $S_d$ )、偏度( $S_k$ )、峰态( $K_g$ )和平均粒径( $M_z$ )。分选系数代表了沉积物颗粒大小的集中程度<sup>[15]</sup>,常用于分析沉积环境的动力条件和沉积物的物质来源<sup>[16]</sup>。偏度是表示沉积物粒度频率曲线对称性的参数<sup>[17]</sup>,反映粗细分布的对称程度以及沉积物搬运能力的强弱<sup>[18]</sup>。峰态是衡量频率曲线尖峰凸起程度的参数<sup>[19]</sup>,并反映粒度分布的集中和分散情况<sup>[20]</sup>。平均粒径表示沉积物颗粒的粗细,反映物质来源和沉积韵律的变化<sup>[21]</sup>。通过计算宝象水库沉积物的分选系数、偏度、峰态和平均粒径,并且对照 Folk-Ward 分选性、偏度、峰态分级表(表1),结果表明:宝象

河水库沉积物样品的分选系数范围集中在 1.50~1.80,平均值为 1.67,沉积物分选差,反映当时水动力作用较强或者离物源较近。宝象水库沉积物样品的偏度范围集中在−0.05~−0.44,从地表至地下 32 cm 处沉积物偏度值<−0.30;属于极负偏,−32 cm 以下沉积物偏度介于−0.30~−0.10,属于负偏。宝象水库沉积物的峰态值介于 0.76~0.98,表层 5 cm 沉积物峰态值介于 0.90~1.11,属于中等峰态;−5 cm 以下沉积物峰态值介于 0.67~0.90,峰态宽平。平均粒径介于 5.56~6.94  $\mu\text{m}$ ,−43 cm 以下沉积物平均粒径变化较小,表明沉积环境较为稳定;−43 cm 以上沉积物平均粒径随着深度的减小而减小(图3)。

表1 分选性、偏度、峰态分级<sup>[22]</sup>

分选性	$S_d$	偏度	$S_k$	峰态	$K_g$
分选很好	<0.35	极负偏	−1.30~−0.30	很宽平	<0.67
分选好	0.35~0.50	负偏	−0.30~−0.10	宽平	0.67~0.90
分选中等	0.50~1.00	近对称	−0.10~0.10	中等峰度	0.90~1.11
分选差	1.00~2.00	正偏	0.10~0.30	窄尖	1.11~1.50
分选很差	2.00~4.00	极正偏	0.30~1.00	很窄尖	1.50~3.00
分选极差	>4.00			极窄尖	>3.00

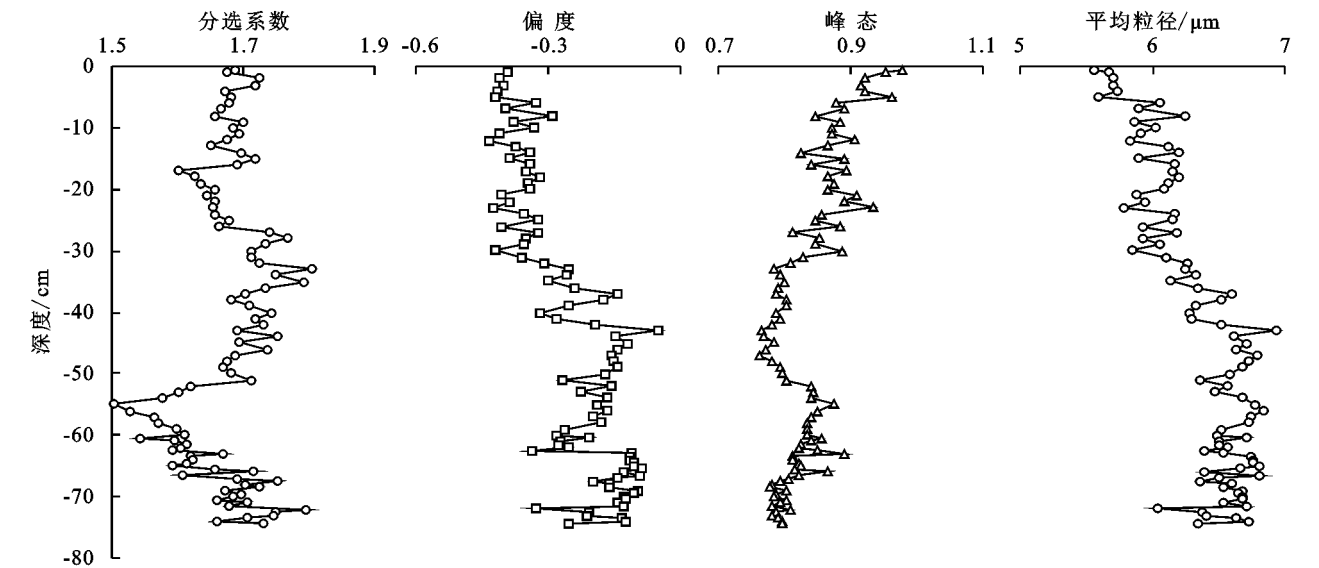


图 3 宝象河水库沉积物粒度基本参数特征

2.3 环境判别及敏感组分提取

Sahu 判别式<sup>[23]</sup>是萨胡通过对大量的砂石、砾石等碎屑物质进行分析建立的一系列判别公式。本文采用 Sahu 判别式(表 2)对沉积环境进行鉴别,将宝象河水库沉积物粒度数据代入判别式中计算,公式 1 计算结果显示最大值为-0.99,最小值为-9.11,沉积环境复杂,表层 5 cm 大于-2.74,属于海滩沉积环境,-5 cm 以下小

于-2.74,属于风成沉积环境;公式 2 计算结果显示最小值为 199.14,最大值为 232.47,均大于 65.37为浅海沉积环境;公式 3 计算结果显示最小值-12.87,最大值为-10.35,均小于-7.42 为河流或三角洲沉积环境。通过计算宝象河水库并非全年处于被河水覆盖的环境,部分时段裸露在空气中,经受风化影响。表明宝象河水库的入库河流属于间歇性河流。

表 2 沉积环境鉴别公式及标准<sup>[24-27]</sup>

公式序号	鉴别环境	公式表达	判别标准
1	风成和海滩	$Y_1 = -3.57M_z + 3.70S_d - 2.08S_k + 3.11K_g$	$Y < -2.74$ 为风成沉积环境; $Y > -2.74$ 为海滩沉积环境
2	海滩和浅海	$Y_2 = 15.65M_z + 65.71S_d + 18.11S_k + 18.50K_g$	$Y < 65.37$ 为海滩沉积环境; $Y > 65.37$ 为浅海沉积环境
3	浅滩和河流	$Y_3 = 0.28M_z - 8.76S_d - 4.89S_k + 0.05K_g$	$Y > -7.42$ 为浅海沉积环境; $Y < -7.42$ 为河流或三角洲沉积

标准偏差是数值相对于平均值的离散程度。标准偏差越小,数值偏离平均值的程度越低,离散程度越低<sup>[28]</sup>。粒径—标准偏差法<sup>[29-30]</sup>的基本原理是通过激光粒度仪分析计算样品每个粒级的标准偏差,获得不同粒度分布范围以及相对含量,并以粒级为横坐标,标准偏差为纵坐标做图。在图中出现的峰值越高,代表该粒级组分对沉积环境越敏感,即产生该粒级的沉积环境变化越大。运用粒径—标准偏差法来提取宝象河沉积物中的敏感组分。从图 4 可以看出,粒径—标准偏差曲线中出现了 3 个峰值,其粒径依次为 5.75 μm, 60.26 μm, 416.87 μm, 与其对应的边界为 22.91 μm, 181.97 μm。因此,将宝象河水库沉积物粒度划分为 A(粒径<22.91 μm)、B(粒径介于 22.91~181.97 μm)、C(粒径>181.97 μm) 3 个粒度组分。为了分析这 3 个粒径组分对沉积环境的敏感程度,分别计算了各组分的含量。组分 A 含量的变化范围为 41.26%~73.59%,平均值为 58.72%±8.28%;组分 B 含量的变化范围为 26.41%~56.79%,平均值为 40.82%±

8.04%;组分 C 含量的变化范围为 0~4.81%,平均值为 0.45%±0.91%,由于 C 组分的平均含量低于 1%,在此不讨论其环境指示意义。A、B 组分含量最多,因此,确定粒径组分 A、B 为宝象河水库沉积物中的环境敏感粒度组分,用来揭示宝象河水库沉积环境的变化。

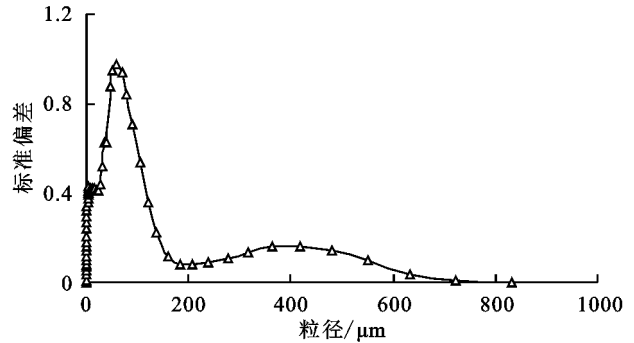


图 4 粒径—标准偏差曲线

A、B 组分含量垂向变化见图 5,从地下深处至地表,A、B 组分随埋藏深度的变化趋势相反。-56 cm 以下随着埋藏深度减小 A 组分含量增加,B 组分含量减少;-56 cm 以上随着埋藏深度的减小 A 组分含



量减少,B组分含量增加。中值粒径介于 $8.3\sim 29.2\mu\text{m}$ ,波动较大,随着埋藏深度的减小而逐渐增大。通过对比A,B组分以及中值粒径垂向变化特征,发现B组分含量的变化趋势与中值粒径的变化趋势存在明显的一致性,表明B组分才是对沉积环境最为敏感的颗粒组分,而A组分含量的变化则是受到B组分含量的影响。沉积物由细变粗,表明沉积环境的水动力条件有变高的趋势。研究表明在开放性湖泊(水库)中,粗粒沉积物较多表示入湖水量大,地表径流携带粗粒物质进入湖泊,气候湿润;反之,细粒物质较多表明气候干燥,降水量小<sup>[31-32]</sup>。

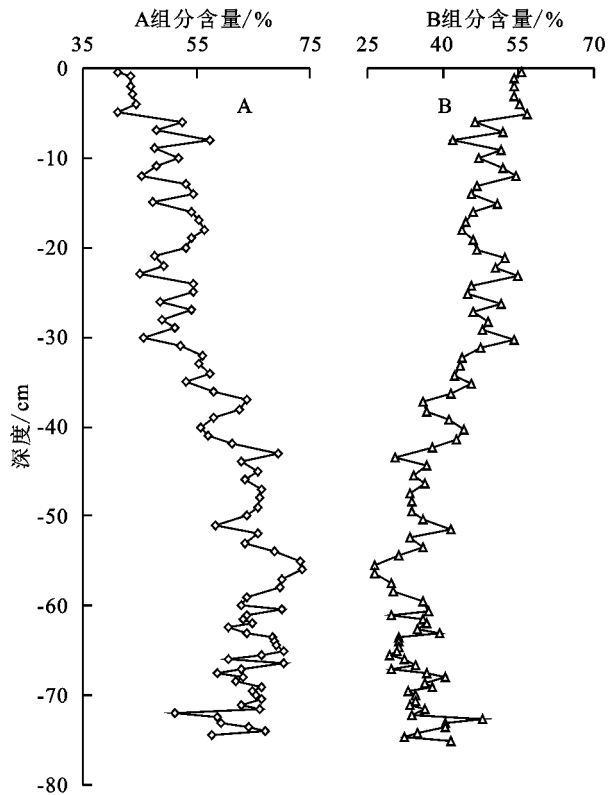


图5 宝象河水库沉积物不同粒径敏感组分含量变化特征

宝象河是昆明古六河之一,属于天然河道,下垫面多为山坡地和农田,宝象河水库于1958年修建在宝象河主流上,修建后未进行清淤处理。根据文献研究<sup>[33]</sup>宝象河水库平均沉积速率为 $0.72\text{ cm/a}$ ,宝象河水库沉积柱沉积年代可追溯至1915年左右,推测 $-22\text{ cm}$ 、 $-36\text{ cm}$ 、 $-46\text{ cm}$ 深度分别对应1963年、1984年、1999年并且 $50\text{ cm}$ 深度左右处为1958年。宝象河水库属于开放性水域,沉积物粒度在 $-56\text{ cm}$ 左右随着埋藏深度减小而变粗可能是由于修建水库蓄水导致水流搬运能力减弱,粗颗粒物在水库周边,故将A,B敏感组分以及中值粒径变化趋势与1958—2018年昆明地区年降水量进行对比。由图6看出,近60a昆明市年降水量的变化范围在 $565.80\sim$

$1\,449.90\text{ mm}$ ,均值为 $994.10\text{ mm}$ 。通过对比过去60a的年降水量与宝象河水库修建以来沉积物粒度的A,B组分含量变化以及中值粒径的波动,发现B组分含量、中值粒径的变化趋势与年降水量的变化趋势较为一致,表明降水量是影响宝象河水库沉积物粒径变化的一个重要因素。1958—1999年,降水量整体呈波动增加的趋势,气候湿润,地表径流携带粗粒物质进入水库,对应的A组分含量减少,B组分含量增加,沉积物粒度变粗;1999—2009年降水量逐渐减少,气候干燥,入库水流小,对应的A组分含量变多,B组分含量相对减少,沉积物粒径变细;2009—2018年,年降水量增加,入库水流增大,A组分含量减少,B组分含量增加,沉积物粒径变粗。

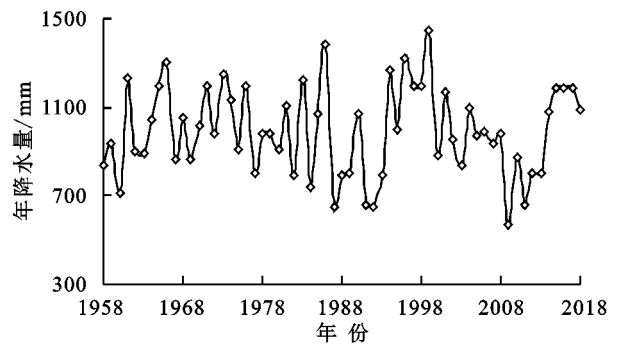


图6 昆明1958—2018年年降水量变化趋势

### 3 结论

宝象河水库岩芯沉积物中黏土质和细粉砂质两种组分含量合计超过50%,随着埋藏加深二者含量均呈现增加趋势,砂质含量最少,随深度增加而减小的趋势。沉积物分选性差,偏度属于负偏或极负偏,峰态宽平或属于中等峰态,平均粒径介于 $5.56\sim 6.94\mu\text{m}$ 。

利用Sahu判别式对沉积环境进行判别,揭示宝象河水库沉积物来源复杂,且入库河流属于间歇性河流。粒级—标准偏差法提取出的敏感组分表明,宝象河水库沉积物环境敏感组分A与组分B的含量随埋藏深度呈现反向变化趋势,而组分B垂向变化与中值粒径变化趋势一致,反映了宝象河水库沉积物粒度的整体变化受到组分B的影响。沉积物B组分随着埋藏深度减小由细变粗,水动力条件有由小变大的趋势,并且降水是影响宝象河水库沉积物粒径变化的一个重要原因。

#### 参考文献:

- [1] 孙华杰,臧淑英,孙德尧,等.呼伦湖沉积物粒度特征及其环境指示意义[J].地理科学,2018,38(9):1570-1578.
- [2] Macumber A L, Patterson R T, Galloway J M, et al. Reconstruction of Holocene hydroclimatic variability in

- subarctic treeline lakes using lake sediment grain-size end-members[J]. *the Holocene*, 2018,28(6):845-857.
- [3] Lu Y, Fang X M, Friedrich O, et al. Characteristic grain-size component-A useful process-related parameter for grain-size analysis of lacustrine clastics[J]. *Quaternary International*, 2018,479(20):90-99.
- [4] 郭晓阳,王维,王国良,等.季风边缘区湖泊表层沉积物粒度组分分布特征与影响因素[J].*地理研究*,2016,35(4):677-691.
- [5] Jia X P, Li Y S, Wang H B. Bed sediment particle size characteristics and its sources implication in the desert reach of the Yellow River[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016,75(11):950, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5760-9>.
- [6] 吴亚林,李帅东,江俊武,等.百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征[J].*环境科学*,2017,38(2):517-526.
- [7] Xiao D D, Shi Z T, Wu F, et al. Seasonal and spatial variations of heavy metals in surface sediments collected from the Baoxiang River in the Dianchi Watershed, China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2018,24(7):1916-1929.
- [8] Ma X H, Wan H B, Zhou J, et al. Sediment record of polycyclic aromatic hydrocarbons in Dianchi lake, south-west China: Influence of energy structure changes and economic development[J]. *Chemosphere*, 2020,248:126015.
- [9] 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,等.滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力[J].*环境科学*,2015,36(2):471-480.
- [10] 古正刚.云南省典型高原湖泊表层沉积物中几种重金属污染特性研究[D].昆明:昆明理工大学,2014.
- [11] 孙盼盼,谢标,周迪,等.滇池流域宝象水库沉积物中多环芳烃的垂直分布特征及来源解析[J].*环境科学学报*,2016,36(10):3615-3622.
- [12] 陈朝晖.宝象水库水质现状及保护对策[J].*环境科学导刊*,2009,28(1):48-49.
- [13] 董茸茸,张晶香.基于3S技术研究滇池周边土地利用对水环境的影响及治理对策[J].*乡村科技*,2019(4):113-116.
- [14] 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.
- [15] 刘静玲,李毅,史璇,等.海河流域典型河流沉积物粒度特征及分布规律[J].*水资源保护*,2017,33(6):9-19.
- [16] 华攸胜,马龙,吉力力·阿不都外力,等.新疆博斯腾湖近现代湖泊沉积物粒度分布特征及其环境记录[J].*干旱区研究*,2019,36(5):1109-1116.
- [17] 汤世凯,于剑峰,李金鹏,等.丁字湾近岸海域表层沉积物粒度特征及沉积动力环境[J].*海洋地质与第四纪地质*,2019,39(2):70-78.
- [18] 卢连战,史正涛.沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析[J].*环境科学与管理*,2010,35(6):54-60.
- [19] 张盼,吴建政,胡日军,等.莱州湾西南部表层沉积物粒度分布特征及其现代沉积环境分区[J].*海洋地质前沿*,2014,30(9):11-17.
- [20] 袁红旗,王蕾,于英华,等.沉积学粒度分析方法综述[J].*吉林大学学报:地球科学版*,2019,49(2):380-393.
- [21] 王丽琴,李红丽,董智,等.额济纳盆地戈壁纵剖面沉积物粒度参数分析[J].*水土保持研究*,2014,21(1):152-156,162.
- [22] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957,27(1):3-26.
- [23] Sahu B K. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1964,34(1):2-24.
- [24] 刘剑刚,张华,朱岩,等.辽东山地冰缘地貌表层土壤粒度特征[J].*中国水土保持科学*,2016,14(1):36-45.
- [25] 安庆,安萍,徐汝汝,等.青藏高原不同地区沉积物的粒度特征与沉积环境判别公式适用性对比研究[J].*聊城大学学报:自然科学版*,2017,30(4):37-47.
- [26] 张天文.粒度资料在沉积环境判别模式中的应用[D].重庆:西南大学,2011.
- [27] 徐春华,孙涛,宋子齐,等.应用粒度分析资料建立洪积扇沉积环境判别模式:以克拉玛依油田七中东区克拉玛依组为例[J].*新疆地质*,2007,25(2):187-191.
- [28] 周烨.中新世以来奄美三角盆地碎屑沉积物粒度特征及其物源和古气候意义[D].山东青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2016.
- [29] 孙有斌,高抒,李军.边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析[J].*科学通报*,2003,48(1):83-86.
- [30] Liu B, Jin H L, Yang F. A late Holocene winter monsoon record inferred from the palaeo-aeolian sand dune in the southeastern Mu Us Desert, northern China[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2016,8(5):388-399.
- [31] 陈敬安,万国江,张峰,等.不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录:以沉积物粒度为例[J].*中国科学:地球科学*,2003,33(6):563-568.
- [32] 王君波,朱立平.藏南沉错沉积物的粒度特征及其古环境意义[J].*地理科学进展*,2002,21(5):459-467.
- [33] 孙盼盼.滇北小流域土壤和沉积物中持久性有机污染物的地球化学特征[D].南京:南京师范大学,2017.