

滇池流域双龙水库径流区人类活动的沉积物记录^①

郭文景¹, 王延华¹, 杨浩^{1*}, 吴丰昌², 秦宁², 常红², 牛晓音¹, 吴姗姗¹

(1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046; 2 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 采集滇池以南双龙水库的沉积物柱状样, 对不同层的沉积物使用 ²¹⁰Pb 进行定年; 分析了不同年代沉积物的粒度分布特征以及总有机碳(TOC)、总氮(TN)和总磷(TP)的含量; 在此基础上, 对环境指标与昆明市人口和经济发展数据关系进行了解析。结果表明: 双龙水库沉积物中值粒径的范围分布在 4.07~6.90 μm, 平均值为 5.71 μm, 沉积物中值粒径在 1986 年后突然减小; 沉积物中 TOC、TN 以及 TP 的含量的范围分别是 8.78~26.15、1.59~3.26 和 0.23~0.47 g/kg, 均值分别为 11.30、2.01 和 0.33 g/kg。TOC、TN 以及 TP 的含量在 1998 年之前相对稳定, 而在 1998 年之后有较大程度增长; 利用有机指数和有机氮指标评价双龙水库沉积物污染的变化情况, 结果发现两大指标有加速增长的趋势; 通过相关分析发现昆明市国内生产总值(GDP)与双龙水库沉积物有机指数和 TOC 含量存在较好的相关性。昆明市人口数量与双龙水库沉积物有机指数和 TOC 含量的相关性也较强。研究结果表明水体生态参数受到社会经济指标的显著影响, 人类活动是近几十年影响双龙水库水质的主要因素。

关键词: 滇池; 沉积柱; 总有机碳; 总氮; 总磷

中图分类号: X144

湖泊和水库沉积物是流域侵蚀和环境污染物的重要寄主体^[1], 是记录流域内环境变化的重要档案, 由于其具有连续性好、完整性好和信息量大的特点而备受关注^[2-6], 相较于黄土和冰芯, 其分布更广, 可以据此重建大范围空间尺度的流域内气候变化和人类活动过程^[7-9]。高分辨率的湖泊和水库沉积物能够准确地记录人与自然相互作用过程以及水体与流域环境的相互关系, 因此可通过分析湖泊和水库沉积物的年代、化学组分等特征反演自然演化和人类活动对湖泊水库的影响, 从而为湖泊水库富营养化治理提供指导。滇池是云南省最大的淡水湖, 兼具供水、渔业和航运等功能, 对滇池及其流域的研究从未间断^[10-13]。但是目前的研究主要集中于滇池及周边地区, 对于流域内水库的研究却十分欠缺。双龙水库作为滇池流域的重要部分, 是滇池流域南部重要的灌溉、养殖、发电和防洪枢纽, 因此有必要对滇池流域双龙水库地区水库沉积物进行研究。

自 20 世纪 80 年代以来, 有关于湖泊和水库沉积物的研究越来越深入^[14-20], 万国江等^[21]对洱海近代沉积物中碳氮磷进行了分析; 徐琳等^[22]对贵州中部

小河水库的沉积物柱芯矿物磁性进行了研究; 李春梅等^[23]利用 ¹³⁷Cs 和 ²¹⁰Pb 分析了近几十年贵州省麦岗水库的沉积速率的变化。目前的研究主要通过沉积组分特征分析人类对湖泊水库生态环境的影响, 但是在人类活动数据对沉积物组分特征影响的定量分析方面, 尚无系统的报道。

本研究拟利用 ²¹⁰Pb 对双龙水库的柱状沉积物样品进行定年分析, 并分析沉积物粒度的分布特征; 定量测定不同年代 TOC、TN 和 TP 的浓度水平; 进一步建立沉积物组分和流域内人口增长和经济活动指标的相互关系, 探讨人类活动对流域生态环境的影响, 为滇池流域富营养化治理提供支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域

双龙水库建于 1956 年, 位于云南省昆明市晋宁县境内, 属于滇池的流域范围。水库位于昆洛公路西侧的双龙村后, 建于双龙河河谷之中, 距县城 8 km, 离昆明市 70 km, 水流自南向北经东大河流入滇池, 环抱昆明坝子, 海拔 1 933.4 m, 集雨面积 54 km²,

基金项目: 国家自然科学基金项目(41273102, 41030751, 41273103)资助。

* 通讯作者(yanghao@njnu.edu.cn)

作者简介: 郭文景(1990—), 男, 安徽舒城人, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊沉积与环境演化。E-mail: gwj1990@163.com

主坝高 18.5 m, 设有副坝 4 座, 总长 795 m, 正常库容 1 216 万 m^3 , 是晋宁县县城重要水源基地。库区地形较为平坦, 长约 1.5 km, 宽约 80~100 m, 水库地形肚大口小, 周围地质为页岩, 谷口为板岩, 土壤类型以山原红壤和紫色土为主, 土地利用类型为林地、撂荒地以及少量居住用地和耕地, 水库流域受西南季风影响, 雨日约为 90~130 天。一般 6—10 月为雨季, 降雨量约占全年雨量的 75% 左右, 年最大雨量为 1 243.8 mm。流域内土质肥沃, 是晋宁县水稻、蚕豆、小麦和油菜主要产区, 晋宁县矿藏丰富, 采矿业较为发达, 是“世界四大磷都”之一, 此外还有轻工、食品和建材等加工业^[24]。

1.2 样品采集

采样时间为 2012 年 3 月, 双龙水库水流方向为自南向北, 南部区域水流平缓, 扰动较少, 水库接受来自上游径流区的陆源物质输入, 沉积底泥较为丰富, 鉴于水库中部和北部较快的水流不适于水上采样, 同时也造成水库沉积物不易沉降, 沉积物贫瘠, 因此在双龙水库南部不同位置按照均匀布点的原则用重力采样器采得 3 根长分别为 70、70、75 cm 的沉积物柱样, 采样地点如图 1 所示, 采集时柱芯和悬浮层均未受扰动, 水与沉积物界面水质清澈, 全部样品

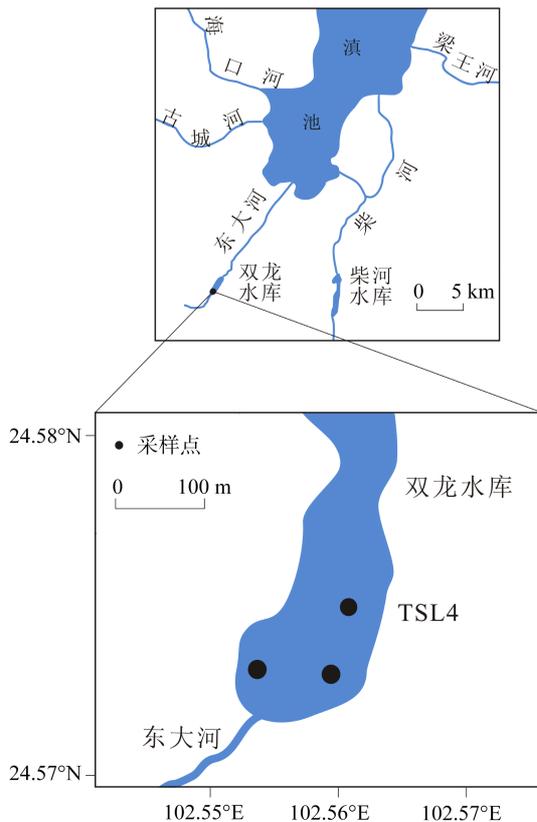


图 1 采样点地理位置

Fig. 1 The sampling sites of Shuanglong reservoir

采集后以每 1 cm 为一层进行分样, 装入塑料袋后运至实验室, 置于超低温冰箱中(温度设置为 -50°C)保存。实验室内将样品风干、研磨, 经过前期预实验, 选择柱芯连续的 TSL4(75 cm)柱样进行数据分析。

1.3 样品处理与分析

本文利用 ^{210}Pb 定年。称取风干研磨后的样品过 100 目筛, 装满与标准源相同规格的塑料容器中, 蜡封 20 天。沉积物定年的测量仪器为美国 EG & ORTEC 高纯锗多道能谱仪(GWL-120-15, USA)。主要指标为: Co1.33 MeV 的能量分辨率为 2.25 MeV, 峰康比大于 60:1, 相对探测效率为 62%, 单个样品的测定时间为 40 000 s。样品中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 由 ^{210}Pb 与 ^{226}Ra 的差值求出, ^{210}Pb 由 46.5 Kev 处射线谱峰面积求得, ^{226}Ra 由 ^{214}Pb 谱峰面积求出。

粒度测定使用 MASTERSIZER 2000 激光粒度仪(MALVERN)进行测定。首先需对测定的样品进行前处理, 称取 0.5~1.0 g 样品, 加入 10 ml 浓度为 10% 的 H_2O_2 并煮熟使其充分反应以除去样品中的有机质, 然后加入 10 ml 浓度为 10% 的 HCl 并煮熟使其充分反应以去除碳酸盐和有机质胶结, 加入蒸馏水反复清洗至水溶液呈中性, 加入 10 ml 浓度为 0.05 mol/L 的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 分散剂, 并用超声波清洗机振荡 10 min, MASTERSIZER 2000 激光粒度仪测量粒径的范围为 0.020~2 000.000 μm , 其重复测量精度 $< \pm 1\%$ 。

总有机碳(TOC)含量由测定的总碳(TC)和无机碳(IC)含量之差求出。采用 SHIMADZU 公司的 TOC 分析仪进行测量, 仪器型号为 CSH CN200。准确称取风干研磨后过 200 目筛的样品 200 mg 共两份, 将其中一份在 900°C 下灼烧用于测定 TC 含量, 另一份在 200 $^{\circ}\text{C}$ 下加磷酸灼烧测定 IC 含量。

总氮(TN)、总磷(TP)采用过硫酸盐消化法进行测量^[25]。使用 UV3600 紫外分光光度计(SHIMADZU)进行测定。称取 20 mg 风干研磨后过 200 目筛的样品, 加入氧化剂定容后在 120°C 下消煮 30 min, 冷却后取消化液, TN 测定选择在 220 nm 和 275 nm 波长测定消化液吸光度, 根据朗伯比尔定律由标准曲线计算 TN 浓度值。TP 测定则是在消化液中加入钼锑抗混合显色剂完成显色后, 在 660 nm 波长下测定, TP 的测定结果由标准曲线读出。TN 和 TP 测定中每个样品测定 3 个平行样。

2 结果与讨论

2.1 沉积物年代序列的确定

双龙水库受人类活动干扰大, 因此采用恒定放

放射性通量模式(CRS 定年模式)^[26], 在图 2a 中, 56~14 cm 阶段 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度变化幅度较大但整体保持较低的水平, 在 14~0 cm 阶段 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度明显增大, 主要是由于流域内人类活动加剧导致大量陆源泥沙携带 ^{210}Pb 汇入水库。据相关年鉴资料显示, 1998 年前后滇池流域内工农业发展加速, 人口规模开始膨胀^[27], 可能会造成流域内土壤侵蚀加剧, 使得 ^{210}Pb 大量沉积。由此本文利用 CRS 定年模式将 14 cm 处的沉积物定为 1998 年是较为可信的。此外沉积物因水库建于 1956 年, 而采样时间为 2012 年 3 月, 因此本文选取 1956—2012 年作为研究时间段(图 2b)。

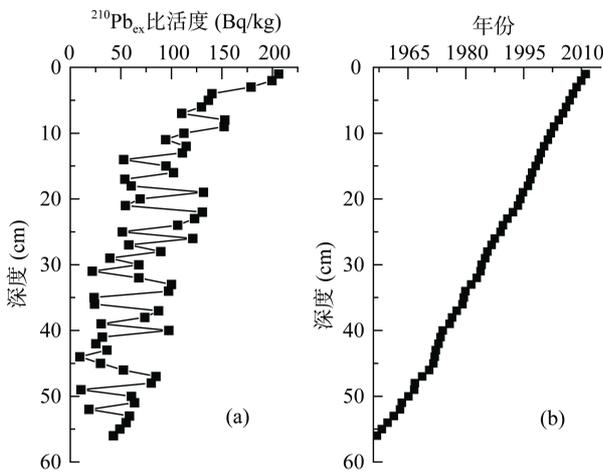


图 2 双龙水库沉积物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的垂直剖面以及深度与年代对应图
Fig. 2 Profile distributions of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and depth vs. sediments age

2.2 沉积物剖面粒度分布特征及分析

沉积物粒度是反映环境变化的重要代用指标^[28], 本文采用如下的分级方法: 砂(>64 μm)、粗粉砂(32~64 μm)、中粉砂(16~32 μm)、细粉砂(4~16 μm)、黏土(<4 μm)。沉积物中各个不同粒径组分的百分比含量随时间的变化总体呈现先稳定、再变细、最后稳定的趋势。这一趋势在沉积物中值粒径的变化中表现更为明显。如图 3 所示, 双龙水库沉积物中值粒径的范围分布在 4.07~6.90 μm , 平均值为 5.71 μm , 其中可以大致分为两个阶段: 在 1956—1986 年间沉积物颗粒较粗, 中值粒径的范围分布在 5.75~6.90 μm , 平均值为 6.38 μm , 整体处于高值范围, 而在 1986—2012 年间中值粒径的范围减少为 4.08~5.90 μm , 平均值为 4.99 μm 。

湖泊(水库)沉积物粒度特征在流域环境演化的研究中扮演了重要的角色, 其忠实记录了流域内气候的变化^[29-31], 最初的研究认为: 在封闭湖泊(水库)中, 由于降水量变化直接反映于湖泊水面的变化, 粗

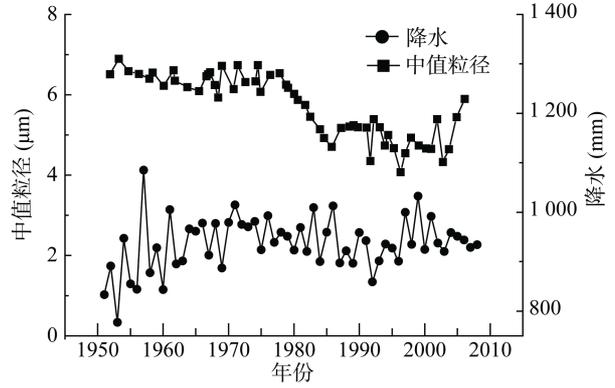


图 3 双龙水库流域中值粒径随时间变化趋势与平均降水量趋势

Fig. 3 Temporal variations of median grain size and average precipitation of Shuanglong reservoir

粒沉积物的出现指示了当时的降水较多, 气候较为干旱, 而细粒沉积物的出现则表明当时的气候处于湿润期^[32]。但是随着研究的深入, 研究者发现在开放性、高时间分辨率湖泊(水库)中, 这一指示结果则刚好相反。在开放性水域中, 降雨量的大小并不反映在湖泊(水库)水面的升降上, 而是作用于入湖水流的大小, 从而导致湖泊沉积物中颗粒的变化, 所以在开放性湖泊(水库)中, 粗粒沉积物占优势表示当时湖泊入湖水量大, 地表径流可将颗粒粗的地表物质输送进入水库中, 当时气候处于湿润期, 反之, 细粒沉积物占优势则表示当时的气候处于干旱期, 降水量较小^[29, 33]。

双龙水库中沉积物颗粒逐渐变细(图 3), 又因其属于开放性水域, 这一趋势表明双龙水库的气候从最初的较为湿润变为当前的较为干旱。但是从双龙水库附近的气象站点监测到的降雨数据中发现的情况却与此不同, 如图 3 为双龙水库流域附近 3 个站点: 昆明、泸西、玉溪的降水记录(昆明、泸西、玉溪水文站资料), 监测时间为 1951—2008 年, 取 3 个监测站点降雨量的平均值, 作为双龙水库流域的降水值。双龙水库流域内的降水量值的变异系数较小(仅为 5.73%), 沉积物粒度组分特征并未响应降水量在时间尺度的变化, 由此可以推断, 降水量的年际变化并不是导致双龙水库粒度特征在 1986 年前后发生突变的主因。而沉积物粒径变细表明湖泊(水库)的水动力条件减弱^[34], 短时间尺度内排除地质变化的因素, 最可能的原因是人为植被覆盖率增加, 从而地表径流对土壤的侵蚀能力和输送陆源物质能力减弱, 只能将一些细粒物质分选输入水库中, 使得沉积物中粒度特征呈现上述趋势。而据年鉴资料显示 1986 年前后该地区内实施了“飞播造林”和林业害虫更新工程造林等工程^[35], 大幅提高了流域内植被覆盖, 对上述推断

给予了支持。这说明了人类对地表的改造对双龙水库产生的影响已经超过了自然降水的因素,成为驱动水库变迁的主控因子。

2.3 沉积物污染代用指标及其分析

沉积样 TOC、TN 和 TP 浓度的剖面特征如图 4 所示,范围分布在 8.78~26.15、1.59~3.26 和 0.23~0.47 g/kg 之间,均值分别为 11.30、2.01 和 0.33 g/kg,其中 TOC 和 TN 有同步变化的趋势,结合定年数据,可以大致分为两个不同阶段:第一阶段为 1956—1998 年,TOC、TN 和 TP 的范围分别为 8.78~11.44、1.59~2.31 和 0.22~0.47 g/kg,平均值分别为 9.65、1.86 和 0.31 g/kg。该过程中 TOC 和 TN 含量变化较为稳定,反映水库环境未发生较大改变,在这一阶段人类活动的影响力较弱,湖泊沉积延续原有自然演化轨迹。第二阶段为 1998—2012 年,TOC、TN 和 TP 的范围分别为 11.81~26.14、1.80~3.26 和 0.29~0.47 g/kg,

平均值分别为 16.33、2.39 和 0.37 g/kg。TOC 整体呈增加趋势,在 2012 年出现峰值,这与 Zan 等^[36]在研究程海时所得到的 TOC 含量变化的结果较为类似;TN 的含量整体上都表现为逐渐增大的趋势,与杨洪等^[37]在研究武汉东湖时所得到的 TN 变化趋势相类似;TP 含量整体波动较大,这可能与磷在沉积物中存在的形式较为复杂有关^[38]。这一时间段,水体生产力急剧增加,富营养化程度加剧,而水库自身生产力有限,主要是流域内工农业发展迅速,大量携带氮磷的生活污水以及农业化肥随地表径流汇入水库中,其中一部分被颗粒物质吸附与颗粒态氮磷物质一同发生沉降,另一部分被水库中藻类及其他水生生物吸收从而大量繁殖,水生生物死亡后溶解态有机物被循环利用,最终矿化后发生沉降,积累于沉积物中^[37]。在这一阶段人类活动的影响范围和强度已经超过了水库生态环境自然演进的幅度。

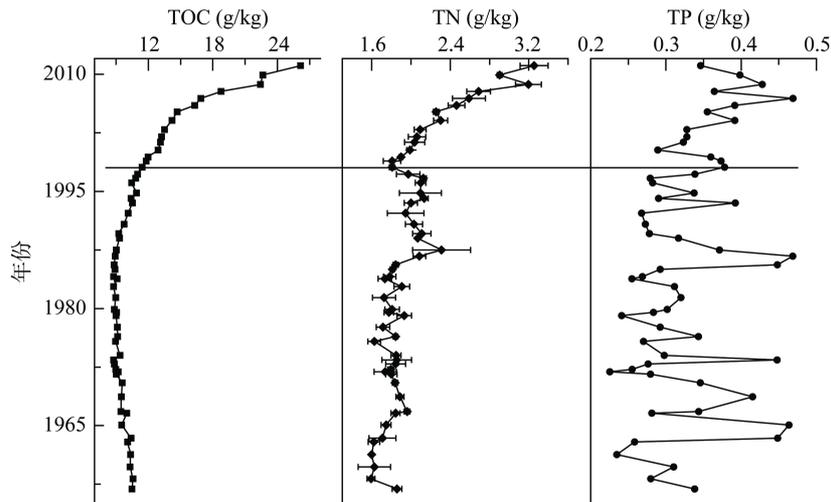


图 4 TOC、TN 和 TP 的剖面分布
Fig. 4 Vertical distributions of TOC, TN and TP

2.3.1 碳-氮相互关系 湖泊沉积物碳-氮-磷的相互关系是揭示沉积历史中自然演化和人类活动的重要踪迹。有机碳与总氮比值(TOC/TN)可以指示湖泊水库内源物质和外源物质对沉积物贡献的强弱^[39-41]。陆地植物体内富含纤维素而缺乏蛋白质,其 TOC/TN 一般较高(>20),而藻类和浮游植物由于体内富含蛋白质而缺乏纤维素,其 TOC/TN 一般较小(4~12)^[42-43]。通常来说,TOC/TN 增大表明陆源物质的输入对湖泊水库沉积物的贡献增加,反之亦然。

TOC/TN 随年份的变化如图 5 所示,可以分为两个阶段,在第一阶段(1956—1998 年),TOC/TN 均值为 5.19,变化较小,水生生物残体为水库沉积物主要贡献物质,水体环境以自然演变为主,人类影响并未

显现;第二阶段(1998—2012 年)TOC/TN 均值为 6.73,整体为逐渐增大的趋势,可能是人类干扰作用加剧导致水库中陆源植物输入量增大,从而使得 TOC/TN 升高。在第二阶段 TOC/TN 的突然增加也可能有其他原因,如短时间内大量降雨可能会导致陆源物质的输入急剧增加,也会导致沉积剖面的 TOC/TN 发生变化,如岱海中暴雨会导致湖泊沉积物中 TOC/TN 突然增加^[44],但是这种原因所带来的 TOC/TN 变化通常时间极短,与本样点剖面反映的情况不符,故可以排除;除此之外另外一个重要的原因是细菌对于有机氮的优先分解,研究发现,氮的化合物在初始较短时间内分解速度较快,在之后较长时间内与有机碳的分解速度相差不大,这一原因也会导致 TOC/TN 的增加^[38,45]。

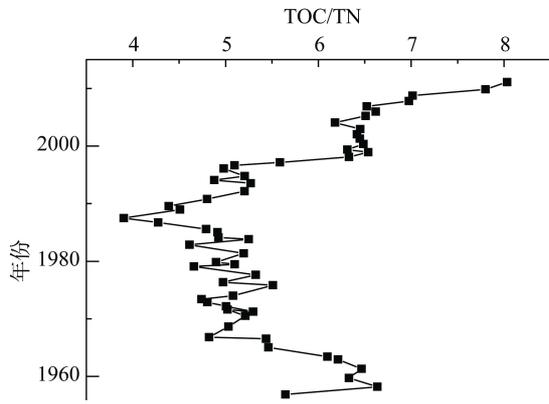


图 5 双龙水库沉积样 TOC/TN 的变化趋势

Fig. 5 TOC/TN variation of sediment core of Shuanglong reservoir

另外通过 Pearson 相关性分析得出 TOC 与 TN 呈

极显著相关($P < 0.01$, 相关系数达到 0.899), 这一结果与李亮歌等^[46]发现的台湾海峡中北部沉积物中有机碳和总氮的相关性较好的结论较为类似, 表明两者物质来源具有较强的一致性。

2.3.2 沉积物污染状况变化趋势 利用有机指数和有机氮指标可以评价双龙水库沉积物污染的变化情况。有机指数通常作为指示区域沉积物污染程度的指标, 有机氮指数通常表征沉积物受到氮污染的程度大小^[47-49], 两者的计算方法和评价标准如公式(1)~(3)所示^[48] :

$$\text{有机指数} = \text{有机碳}(\%) \times \text{有机氮}(\%) \quad (1)$$

$$\text{有机碳} = \text{有机质}(\%) / 1.724 \quad (2)$$

$$\text{有机氮}(\%) = \text{总氮}(\%) \times 0.95 \quad (3)$$

表 1 沉积物有机指数和有机氮评价指标

Table 1 Assessment standards of organic index and organic nitrogen in sediments

类型	清洁()	较清洁()	尚清洁()	有机(氮)污染()
有机指数	<0.05	0.05 ~ 0.20	0.20 ~ 0.50	>0.50
有机氮(%)	<0.033	0.033 ~ 0.066	0.066 ~ 0.133	>0.133

利用有机指数和有机氮指标对双龙水库污染状况进行评价, 其指标的变化趋势如图 6 所示。

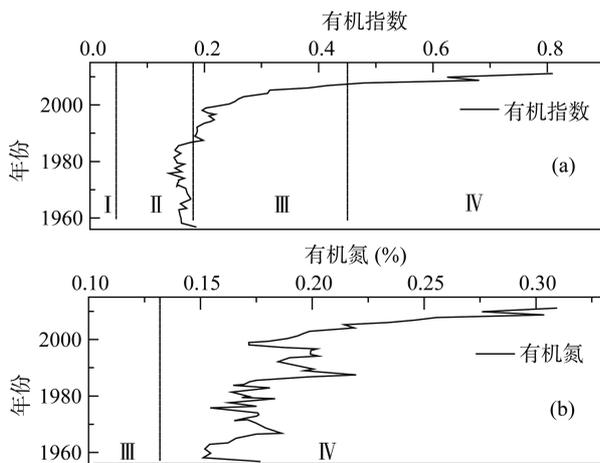


图 6 双龙水库沉积物中有机指数和有机氮的变化趋势

Fig. 6 Vertical variations of organic index and organic nitrogen in the sediments

有机指数和有机氮的变化较大, 有机指数变化介于 0.14 ~ 0.81 之间(图 6a), 均值为 0.23, 在有沉积记录至约 1998 年这一时间段都处于较清洁的水平, 同样的趋势也表现在有机氮的变化中(图 6b), 其变化介于 0.15% ~ 0.31%, 均值为 0.19%, 有机氮指数总体偏高, 水库的水质总体处于较重的有机氮污染水平, 主要原因是最近几十年来居民人口增加, 含氮磷有机物向水库中持续输入所致, 这一结果同李苗等^[50]研究那什那泡沉积物的研究结果相似。

2.4 流域内人类活动对水体生态环境的影响

作为昆明市经济发展的中心, 以双龙水库为代表的滇池流域生态环境受到人口增长与经济的影响, 自从 20 世纪八九十年代开始, 滇池流域人口增长明显, 经济发展迅速。由于缺乏双龙水库所在的晋宁县的相关数据, 而晋宁县所在的昆明市国内生产总值(GDP)的 79.5% 由滇池流域所贡献, 因此以昆明市的 GDP 数据(1962—2007 年)表征滇池地区的经济发展情况, 以昆明市的人口发展数据(1970—2005 年)表示滇池流域的人口增长情况^[27]; 筛选现有数据中反映水库生态环境状况的指标, 建立人类活动与流域生态环境的相关关系, 结果如图 7 所示。

从图 7a 与图 7b 可以看出, 昆明市流域经济发展与水体的污染有着紧密的联系。其中昆明市 GDP 与双龙水库沉积物有机指数和 TOC 含量存在较好的相关性($P < 0.01$), 表现为 GDP 的不断增长导致水体有机指数的增加, 而随着 GDP 的不断增长, 沉积物 TOC 含量不断增加。从历史统计资料中发现, 在 1998 年前后昆明市经济发展存在明显的转折点, 全市 GDP 年均增速从 5.45% 逐渐提升, 其中 2007 年增速达到 16.38%^[27]。主要原因一方面该地区自 1998 年开始以一些引进外资加工贸易的劳动密集型企业主, 与此同时生产工艺并未得到大规模改进的前提下, 工农业生产规模的提升带来了更多的废弃物的排放, 对周边环境尤其是水域造成了严重污染,

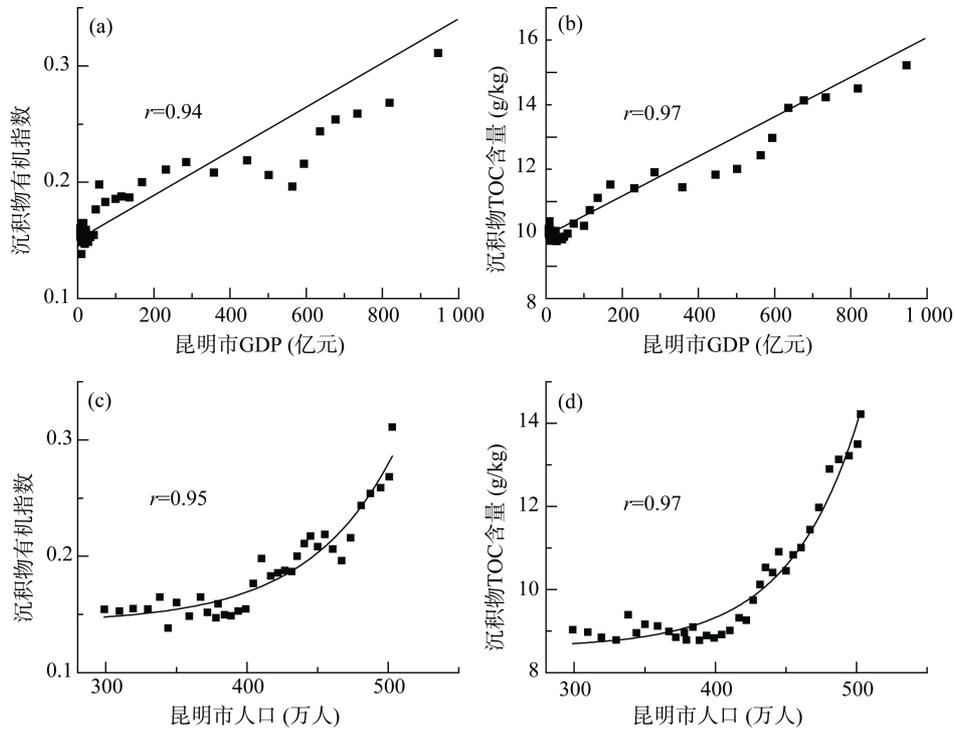


图 7 双龙水库污染参数和昆明市经济社会发展状况的相关性分析

Fig. 7 Correlations between pollution indicators and socio-economic parameters of Kunming

其中以 TOC 和 TN 的增加尤为明显,而这些人类活动造成的水体富营养程度的提高也在沉积物中留下相应的记录。这也同之前的研究中污染物代用指标在 1998 年前后发生骤增的结论相对应。也证实了在未改变经济发展方式和未进行相关污染治理的情况下,流域内经济的发展是流域水体污染加重的主因。

除经济发展指标外,可以发现昆明市人口数量与双龙水库沉积物有机指数和 TOC 含量的相关性也较强($P < 0.01$, 图 7c 和 7d),主要表现为伴随人口的不断增长,沉积物有机指数与 TOC 含量呈现加速的趋势,这同 Yu 等^[51]在太湖的研究报道相一致。主要是因为人类活动对生态环境演化的影响过程中,人口数量变化是决定性因素之一,人口规模的膨胀或萎缩决定了人类活动对生态环境干扰的范围和强度,在 1970—2005 年间,当地不断增大的人口规模导致需要大量的生产和生活用品,因此需要开垦新的耕地、增大化肥使用量并且扩大工业生产规模,与此同时当地居民生活方式也逐渐转变,突出表现为个人占有或相关的生活和生产资源不断增多,旺盛的需求刺激了更大规模的工农业生产,排放的废水废渣持续输入水库中,使得水库中富营养化呈现加速的趋势。这一系列关系表明在人类工作生活利用的资源不断增长的情况下,不断增长的人口规模对流域水体造成的污染

有加速的趋势。

以上人口和经济发展参数与流域水体的污染历史关系表明:人类的经济社会活动对水体的富营养化存在重要影响。相对应的也说明了流域内沉积物污染代用指标对人口增长和经济发展指标的变化较为敏感,某种程度上,人类活动已经成为滇池流域生态演变的主导力量。

3 结论

1) 双龙水库沉积物粒径在 1986 年之后发生突变,推测主要的原因是当地实施了播种造林的措施,流域植被覆盖率得以提高,减少了地表径流侵蚀,从而影响沉积物中粒度特征的变化。

2) 沉积物中 TOC、TN、TP、有机指数和有机氮指标在水库建成之初处于较低的水平,指示水库水体环境以自然演化为主,而在 1998 年之后上述富营养化指标均有较大程度增长,可能的原因是由于流域内人口增长和经济发展,导致含氮磷陆源物质输入持续增加,水库水体富营养化加剧。

3) 建立沉积物污染指标和昆明市经济发展人口增长指标的相互关系,结果表明水体污染伴随着 GDP 的增加而加重,而人口增长则促使这一过程呈现加速的趋势,主要是由于流域内工农业的发展和居民生产生活方式的改变。

综上所述,在水库建成之初水库生态系统的演变以自然演进而为主,但近几十年随着人工植被覆盖率的增加以及人口增长和工农业发展,人类活动对流域生态系统的干扰愈加强烈,这首先反映在双龙水库沉积物粒度指标的阶段性突变上,且这一干扰幅度已经超过了自然演变的影响,对于 TOC、TN 和 TP 的分析则更印证了这一结论,而通过对流域内人口和经济活动指标的分析,则可以得出结论:人类活动已经在某种程度上成为双龙水库水生态环境演进的主控力量。

参考文献:

- [1] 霍坎松, Hakanson L, 杨松, Jansson L, 郑光膺. 湖泊沉积学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 193
- [2] 张振克, 王苏民. 中国湖泊沉积记录的环境演变: 研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 417-422
- [3] 吴丰昌, 万国江, 黄荣贵. 湖泊沉积物-水界面营养元素的生物地球化学作用和环境效应: I. 界面氮循环及其环境效应[J]. 矿物学报, 1996, 16(4): 403-409
- [4] Xu LB, Wu FC, Wan GJ, Liao HQ, Zhao XL, Xing BS. Relationship between ^{210}Pb activity and sedimentary organic carbon in sediments of 3 Chinese lakes[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(12): 3 462-3 467
- [5] Xu LB, Wu FC, Zheng J, Xie QL, Li HX, Liao HQ, Zhao XL, Guo F. Sediment records of Sb and Pb stable isotopic ratios in Lake Qinghai[J]. Microchemical Journal, 2011, 97(1): 25-29
- [6] Zheng J, Yamada M, Wu FC, Liao HQ. Characterization of Pu concentration and its isotopic composition in soils of Gansu in northwestern China[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2009, 100(1): 71-75
- [7] Graney JR, Halliday AN, Keeler GJ, Nriagu JO, Robbins JA, Norton SA. Isotopic record of lead pollution in lake sediments from the northeastern United States[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(9): 1 715-1 728
- [8] 沈吉. 末次盛冰期以来中国湖泊时空演变及驱动机制研究综述: 来自湖泊沉积的证据[J]. 科学通报, 2012, 57(34): 3 228-3 242
- [9] 瞿文川, 张平中. 太湖 14000 年以来古环境演变的湖泊记录[J]. 地质力学学报, 1997, 3(4): 53-61
- [10] 庄艳, 王延华, 杨浩, 牛晓音, 徐美娜, 邹军, 谢标. 柴河小流域草地土壤环境的同位素示踪研究[J]. 环境科学研究, 2013, 26(8): 858-865
- [11] 王丽芳, 熊永强, 吴丰昌, 房吉敦, 李芸. 滇池的富营养化过程——来自结合态脂肪酸 $\text{C}_{16:0}$ $\delta^{13}\text{C}$ 的证据[J]. 湖泊科学, 2009, 21(4): 456-464
- [12] 薛传东, 刘星, 亓春英, 魏海霞, 宋雪丽, 刘勇强, 郝百武. 滇池近代沉积物的元素地球化学特征及其环境意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(6): 582-590
- [13] Xiao M, Wu FC, Zhang RY, Wang LY, Li XQ, Huang RS. Temporal and spatial variations of low-molecular-weight organic acids in Dianchi Lake, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(8): 1 249-1 256
- [14] 李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平. 淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立[J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3 301-3 307
- [15] 陈敬安, 万国江, 唐德贵, 黄荣贵. 洱海近代气候变化的沉积物粒度与同位素记录[J]. 自然科学进展, 2000, 10(3): 253-259
- [16] 顾成军, 戴雪荣, 张海林, 何小勤. 巢湖沉积物粒度特征与沉积环境[J]. 海洋地质动态, 2005, 20(10): 10-13
- [17] 房吉敦, 吴丰昌, 熊永强, 王丽芳, 李芸. 滇池湖泊沉积物中游离类脂物的有机地球化学特征[J]. 地球化学, 2009(1): 96-104
- [18] 吴丰昌, 万国江, 黄荣贵. 贵州红枫湖纹理沉积物中近代气温记录[J]. 地理科学, 1996, 16(4): 345-350
- [19] 刘晓端, 徐清, 葛晓立, 刘浏, 武佃卫. 密云水库沉积物中金属元素形态分析研究[J]. 中国科学: D 辑, 2006, 35(A01): 288-295
- [20] 张华俊, 陈修康, 韩博平, 罗勇, 杨浩文, 曾艳, 陈敬安. 鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1 167-1 175
- [21] 万国江, 白占国, 王浩然, 黄荣贵. 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
- [22] 徐琳, 王红亚, 蔡运龙. 黔中喀斯特丘原区小河水库沉积物的矿物磁性特征及其土壤侵蚀意义[J]. 第四纪研究, 2007, 27(3): 408-416
- [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] 昆明市水利志编纂委员会. 昆明市水利志[M]. 昆明: 云南人民出版社, 1997: 253-256
- [25] 钱君龙, 张连弟, 乐美麟. 过硫酸盐消化法测定土壤全氮全磷[J]. 土壤, 1990, 22(5): 258-262
- [26] 万国江. 现代沉积的 ^{210}Pb 计年[J]. 第四纪研究, 1997(3): 230-239
- [27] 徐晓青, 黄海风. 昆明市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006: 20-29
- [28] 孙千里, 周杰, 肖举乐. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1): 93-95
- [29] 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
- [30] 陈敬安, 万国江, 徐经意. 洱海沉积物粒度记录与气候干湿变迁[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 341-345
- [31] 刘兴起, 王苏民, 沈吉. 青海湖 QH-2000 钻孔沉积物粒度组成的古气候古环境意义[J]. 湖泊科学, 2003, 15(2): 112-117
- [32] 王小雷, 杨浩, 赵其国, 陈晔, 陈劲松, 王琳贤. 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
- [33] 陈敬安, 万国江, 张峰, 黄荣贵. 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: D 辑, 2003, 33(6): 563-568
- [34] 王小雷. 云南高原湖泊近现代沉积环境变化研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2011: 53-65
- [35] 晋宁县林业局. 晋宁县林业志[M]. 昆明: 云南人民出版社, 1999: 20-25
- [36] Zan FY, Huo SL, Xi BD, Zhang JT, Liao HQ, Wang Y, Yeager KM. A 60-year sedimentary record of natural and

- anthropogenic impacts on Lake Chenghai, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(4): 602–609
- [37] 杨洪, 易朝路, 谢平, 邢阳平, 倪乐意. 武汉东湖沉积物碳氮磷垂向分布研究[J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 507–514
- [38] Faganeli J, Planinc R, Smodiš B, Stegnar P, Ogorelec B. Marine geology of the Gulf of Trieste (northern Adriatic): Geochemical aspects[J]. *Marine Geology*, 1991, 99(1): 93–108
- [39] Meyers PA. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: A summary of examples from the Laurentian Great Lakes[J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(2): 261–289
- [40] Müller A, Mathesius U. The palaeoenvironments of coastal lagoons in the southern Baltic Sea, I. The application of sedimentary, II. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ ratios as source indicators of organic matter[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 145(1): 1–16
- [41] Kaushal S, Binford MW. Relationship between C:N ratios of lake sediments, organic matter sources, and historical deforestation in Lake Pleasant, Massachusetts, USA[J]. *Journal of Paleolimnology*, 1999, 22(4): 439–442
- [42] Filley TR, Freeman KH, Bianchi TS, Baskaran M, Colarusso LA, Hatcher PG. An isotopic biogeochemical assessment of shifts in organic matter input to Holocene sediments from Mud Lake, Florida[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(9): 1 153–1 167
- [43] Meyers PA, Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry—An overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments[J]. *Organic Geochemistry*, 1993, 20(7): 867–900
- [44] 王苏民, 余源盛, 吴瑞金. 岱海: 湖泊环境与气候变化[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990: 82–145
- [45] Seki H, Skelding J, Parsons TR. Observations on the decomposition of a marine sediment[J]. *Limnol Oceanogr*, 1968, 13(3): 440–447
- [46] 李亮歌, 许金树. 台湾海峡中、北部沉积物中有机碳、全氮及全磷的含量分布特征[J]. *热带海洋*, 1990, 9(1): 31–38
- [47] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 燕姝雯, 胡瑞娟, 陈雷, 张璐璐, 余建平. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J]. *环境科学*, 2010, 31(4): 961–968
- [48] 隋桂荣. 太湖表层沉积物中 OM, TN, TP 的现状与评价[J]. *湖泊科学*, 1996, 8(4): 319–324
- [49] 甘树, 卢少勇, 秦普丰, 金相灿, 焦伟, 王佩. 太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(9): 3 064–3 069
- [50] 李苗, 臧淑英, 张策, 肖海丰. 那什那泡沉积物氮磷有机质污染特征及评价[J]. *地理科学*, 2013, 33(12): 1 531–1 536
- [51] Yu T, Zhang Y, Wu FC, Mei W. Six-decade change in water chemistry of large freshwater Lake Taihu, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(16): 9 093–9 101

Records of Human Activities in Sediments from Shuanglong Reservoir Runoff Field in Dianchi Watershed

GUO Wen-jing¹, WANG Yan-hua¹, YANG Hao^{1*}, WU Feng-chang², QIN Ning²,
CHANG Hong², NIU Xiao-yin¹, WU Shan-shan¹

(1 *School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China*; 2 *State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China*)

Abstract: Sediment core samples were collected in Shuanglong reservoir to the south of Dianchi Lake. Sedimentary history was analyzed by ^{210}Pb dating method; the distribution characteristics of granularity of sediment cores, total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were investigated; the relationship between environmental parameters and socio-economic parameters of Kunming were established. The results showed that: 1) the granularity of sediment cores ranged from 4.07 μm to 6.90 μm , with an averaged value of 5.71 μm . The granularity of sediment cores decreased after 1986. 2) The averaged concentration of TOC, TN and TP were 11.30 g/kg (ranging from 8.78 to 26.15 g/kg), 2.01 g/kg (1.59 to 3.26 g/kg) and 0.33 g/kg (0.23 to 0.47 g/kg), respectively. The contents of TOC, TN and TP were relatively stable before 1998. However, the three indicators increased rapidly after 1998. 3) Organic index and organic nitrogen were employed to evaluate the water quality, the results showed that there are accelerate increase trends in both of the indicators. 4) Linear correlation was observed between TOC concentration versus gross domestic product (GDP), organic index versus GDP, and increasing TOC concentration had a significant correlation with population, as well as organic index versus population, respectively. The results indicated that water ecological parameters were significantly affected by socio-economic parameters, human activities are major factors influencing the water quality of Shuanglong reservoir in recent decades.

Key words: Dianchi Lake; Sediment core; TOC; TN; TP