

## 近 200 a 来泸沽湖沉积物色素记录与区域气候变化的关系<sup>\*</sup>

陈传红<sup>1,2</sup>, 汪敬忠<sup>1</sup>, 朱 迟<sup>1</sup>, 赵良元<sup>1</sup>, 蒋金辉<sup>1</sup>, 杨娇艳<sup>1</sup>, 杨 劭<sup>1\*\*</sup>

(1: 华中师范大学生命科学学院, 武汉 430079)

(2: 东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室, 抚州 344000)

**摘 要:** 近百年来云贵高原区域气候变暖明显. 为探讨湖泊生态系统变化与气候变化的关系, 本文采集泸沽湖沉积物柱, 分析测定了近 200 a 来沉积物柱芯中叶绿素及其衍生物(CD)、总胡萝卜素(TC)、颤藻黄素(Osc)和蓝藻叶黄素(Myx) 4 类色素及烧失量(LOI<sub>550℃</sub>)、生物硅、C/N 值等指标, 并与 1951—2010 年丽江地区气温和降雨量资料进行相关性分析. 结果表明, 以上 4 种色素含量及其比值(CD/TC, Osc/Myx)对区域气温变化较为敏感; 近 60 a 来 CD、TC、Osc、Myx、LOI<sub>550℃</sub> 和生物硅含量与年均气温呈显著正相关; 而 CD、TC、Osc、Myx 和 C/N 仅与 5 a 滑动年均降雨量呈正相关, 表明气温可能是驱动泸沽湖初级生产力升高的主要因素之一, 降雨量为次要因素. 1990 年后 4 种色素和有机质含量明显增加, C/N 值呈下降趋势, 湖泊初级生产力增强, 内源有机质在沉积物总有机质中的比重增高. 此外, Osc 和 Myx 含量及其比值升高, 反映蓝藻类生产力增长, 颤藻类比重呈增大趋势, 表明近 20 a 来在气温为主导因素的影响下不仅泸沽湖初级生产力增加, 初级生产者群落组成也发生了变化.

**关键词:** 气候变化; 沉积色素记录; 初级生产力; 泸沽湖

## Relationship between the sediment pigment records of Lake Lugu and the regional climate change over the last 200 a

CHEN Chuanhong<sup>1,2</sup>, WANG Jingzhong<sup>1</sup>, ZHU Chi<sup>1</sup>, ZHAO Liangyuan<sup>1</sup>, JIANG Jinhui<sup>1</sup>, YANG Jiaoyan<sup>1</sup> & YANG Shao<sup>1</sup>

(1: School of Life Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, P. R. China)

(2: Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, Ministry of Education, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, P. R. China)

**Abstract:** A great number of palaeoclimatic proxies and modern instrumental data have indicated that the climate of Yunnan-Guizhou Plateau has undergone a significant warming during the past hundred years. In this study to reveal the impact of the region climate change on lake ecosystems, physical and chemical proxies in sediment core from the Lake Lugu were examined, including Loss-on-ignition at 550°C (LOI<sub>550℃</sub>), the concentrations of pigments, chlorophyll derivatives (CD), total carotenoids (TC), Oscillaxanthin (Osc), Myxanthophyll (Myx), biogenic silicon and C/N values. The correlations of those proxies with climate data of both temperature and precipitation from nearby Lijiang station during 1951—2010 AD were analyzed. The results showed that four pigment contents and two ratios CD/TC and Osc/Myx were sensitive to regional temperature changes. The CD, TC, Osc, Myx, LOI<sub>550℃</sub> and biogenic silica content showed significantly positive correlations with average annual temperature in the last 60 years, while CD, TC, Osc, Myx and C/N had significantly positive correlations with the 5 years moving average precipitations. The result indicated that warming was possibly one of the main factors driving the increasing of primary productivity of the lake, while the effect of precipitation shows a secondary factor in the comparison. Since 1990, all the four pigments and LOI<sub>550℃</sub> increased significantly while C/N ratios decreased, which indicated that the lake primary productivity were enhanced and its contribution to the total organic matter in sediments increased as well. The increasing of Osc and Myx contents and Osc/Myx ratio in the lake sediments

<sup>\*</sup> 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2008ZX07105-004)资助. 2012-01-09 收稿; 2012-03-28 收修改稿. 陈传红, 男, 1973 年生, 博士研究生, 讲师; E-mail: cchuanhong@126.com.

<sup>\*\*</sup> 通信作者; E-mail: mryangshao@gmail.com.

reflected the increase of productivity of Cyanophyceae and the proportion of *Oscillatoria* in Cyanophyceae. The results indicated that the regional climate change over the last 20 years not only led to the increase of lake primary productivity, but also the change of composition of phytoplankton community, in Lake Lugu.

**Keywords:** Climate change; sediment pigment records; primary productivity; Lake Lugu

据 IPCC(2007) 报道,在 1906—2005 年的 100 a 里,全球年平均气温已上升了约  $0.74^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>. 而我国 1880 年以来的变暖速率为每百年升温  $0.5 \sim 0.8^{\circ}\text{C}$ , 1951—2009 年期间中国年平均气温上升了  $1.38^{\circ}\text{C}$ <sup>[2]</sup>. 云南地处低纬高原,受季风影响显著,近 50 a 来云贵高原增温趋势明显<sup>[2-3]</sup>. 此外,丽江及周边地区气象数据以及冰川、矿物学、树木年轮等的历史气候记录均揭示了该区域内近百年来有气候变暖趋势<sup>[4-9]</sup>.

湖泊生态系统对区域气候变化较为敏感,能综合反映整个流域对气候变化的响应<sup>[10]</sup>. 偏僻高山湖泊沉积物连续完整、高分辨地记录了历史时期区域气候、植被以及人类活动的演变过程,被广泛地应用于全球变化历史研究<sup>[11-12]</sup>. 泸沽湖地处云南丽江市境内,是一个半封闭高山深水贫营养湖泊,湖区人口密度小,流域植被盖度大,无工业污染,人为干扰小,水体营养水平相对稳定,一直保持 I 类水质<sup>[13-15]</sup>,是研究水生生态系统对气候变化响应的理想场所<sup>[16]</sup>.

湖泊沉积物生物记录中,沉积色素含量和种类变化被广泛应用于古生态环境研究. 近 20 a 来,在古湖沼学研究中也广泛用来估计藻类的生物量、指示过去水体营养条件和作为湖泊初级生产力的近似指标<sup>[17-18]</sup>. 古色素学研究常采用 7 个指标来估计初级生产力和群落结构:叶绿素及其衍生物(chlorophyll derivatives, CD)、总胡萝卜素(total carotenoids, TC)、蓝藻叶黄素(myxanthophyll, Myx)、颤藻黄素(oscillaxanthin, Osc)、自然叶绿素(native chlorophyll, NC)以及 CD/TC 比值、Osc/Myx 比值<sup>[19-23]</sup>. 而湖泊初级生产力、群落结构等与湖泊营养水平及气候相关. 本文利用泸沽湖沉积物柱芯样品,进行了色素和其他理化指标分析,重点探讨了最近 60 a 来泸沽湖初级生产力与区域气候变化的关系.

## 1 研究材料与方法

### 1.1 研究区域环境概况

泸沽湖( $27^{\circ}41' \sim 27^{\circ}45' \text{N}$ ,  $100^{\circ}45' \sim 100^{\circ}50' \text{E}$ )位于云南省和四川省之间横断山脉中段东缘尾部金沙江褶皱带,属雅砻江水系,湖面海拔 2690.8 m. 水域总面积  $50.1 \text{ km}^2$ , 最大水深 93.5 m, 平均水深 40.3 m. 湖水透明度在 6.0 ~ 12.0 m 之间,水体营养水平相对稳定,一直保持为 I 类水质<sup>[13-15]</sup>. 泸沽湖集水面积  $187 \text{ km}^2$ , 补给系数 3.54, 地表水、地下水极少,入湖河道短小,降雨是湖水补给的主要形式,年出入水量基本平衡,水位年平均变幅在 1.5 m 左右,湖泊唯一出口盖祖河位于东岸<sup>[24]</sup>. 每年 6—10 月为雨季,出湖流量为  $3 \sim 5 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 1—5 月湖水基本无外泄,湖泊换水周期达 18.5 a, 属半封闭湖泊. 湖区处于西南季风气候区、低纬度高原季风气候带,具有暖温带山地季风气候的特点,冬季受干燥的大陆季风控制,夏季盛行湿润的海洋季风,干湿季节分明,年均气温  $12.8^{\circ}\text{C}$ , 多年平均降水量为 920 mm, 全年降水量约 85% 集中在雨季, 1—2 月份有少量雨雪, 年相对湿度 70%. 全年日照时数为 2260 h, 日照率 57%. 湖周海拔 3000 m 以上的山峰多为森林和灌丛植被覆盖,森林覆盖率达 47.6%<sup>[25]</sup>.

### 1.2 样品采集

2010 年 8 月于泸沽湖南部湖区中心附近( $27^{\circ}40'10'' \text{N}$ ,  $100^{\circ}47'51'' \text{E}$ , 图 1), 水深 41.6 m, 用重力采样器采得保持完好的平行沉积柱状泥芯多根, 柱长 25.0 ~ 33.5 cm 不等, 悬浮层均未受扰动, 界面水清澈透明; 柱状泥芯按 0.5 cm 间隔于野外精细分割, 样品均封装于聚乙烯自封口塑料袋并迅速运回实验室, 立即置于  $-20^{\circ}\text{C}$  冷冻保存, 以备室内各项实验分析. 本文利用沉积柱芯(编号 LGH-6, 长 33.5 cm)进行年代、色素、生物硅和其他理化指标测定.

### 1.3 年代测定

样品于中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室进行  $^{210}\text{Pb}$  年代测定分析. 测试前首先测定样品含水率并计算样品的干容重, 然后每层取 2 ~ 5 g 干土样于测样盒密封 15 d. 分析仪器为美国 EG & G Ortec 公司生产的低本底高纯锗  $\gamma$  能谱仪井型探测器(HPGe GWL 120-15). 其中  $^{210}\text{Pb}$  标准样品由英

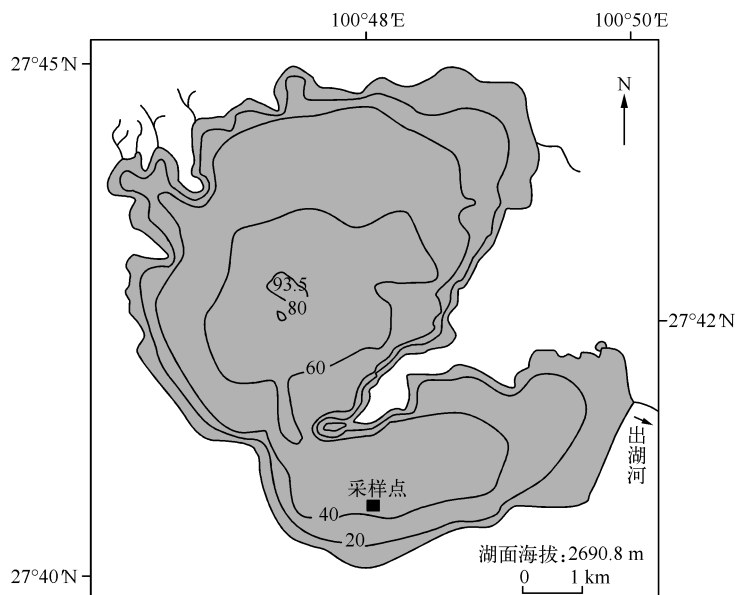


图1 泸沽湖地理位置及采样点

Fig. 1 Location of Lake Lugu and the sampling site

国利物浦大学提供,  $^{226}\text{Ra}$  标准样品由中国原子能研究院提供, 测试误差小于 10%.

#### 1.4 理化指标测定

总碳 (TC) 和总氮 (TN) 采用 Leeman CE440 元素分析仪测定, 相对误差小于 1%. 总有机碳 (TOC) 采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法<sup>[26]</sup>, 相对误差小于 0.5%; 含水量 (WC)、550°C 烧失量 ( $\text{LOI}_{550^\circ\text{C}}$ ) 采用 Heiri 等所描述的方法<sup>[27]</sup>. 生物硅 (Biogenic Silica, BSi) 测定参考 Mortlock 等的方法, 即利用 2 mol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  进行 85°C 水浴连续提取 8 h, 再利用比色法测定<sup>[28]</sup>.

#### 1.5 色素测定

色素含量测定参考 Swain 的方法<sup>[23]</sup>: 90% 丙酮萃取, 对萃取液经几种不同的处理方法后, 使用岛津 UV-2401 PC 紫外可见分光光度计, 根据各色素的特有波长测定吸光值, 并参照文献中提供的公式计算 CD、TC、Osc、Myx 和 NC 的含量. 其中 Osc 和 Myx 的单位为  $\mu\text{g/g org}$ , 代表每克干沉积物有机质中色素的含量; CD 和 TC 单位为  $\text{u (unit)/g org}$ , 代表每克干沉积物有机质中色素的吸光值.

#### 1.6 丽江站气象数据

丽江气象站 (海拔 2392.4 m, 距泸沽湖 101.2 km) 1951—2010 年期间日气温和降雨量气象数据来自中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>), 计算得到年均气温和年降雨量, 并进一步求得期间各年的 5 a 滑动年均气温 (5 years Moving Average Temperature, 5yMAT) 和 5 a 滑动年均降雨量 (5 years Moving Average Precipitation, 5yMAP), 据文献表明, 气温和降雨量的 5 a 滑动平均值消除了年际间气温与降雨量变化的影响, 能反映气温和降雨量一定变化趋势<sup>[3,29]</sup>.

#### 1.7 数据分析与作图

数据采用 SPSS 16.0 for Windows 软件对近 60 a 来 44 个沉积样品各层的色素和主要理化指标与它们对应时期年均气温和降雨量进行 Pearson 相关性分析. 44 个沉积样品所对应的实际气温和降雨量数据, 根据  $^{210}\text{Pb}$  年代测定的每个样品代表的年代与沉积年数推算出其沉积时期, 取对应期间各年的均值. 沉积深度—年代序列图采用 GraphPad Prism 5.0 程序执行; 年代、深度与色素及理化指标作图采用 C2 程序执行<sup>[30]</sup>. LGH-6 理化指标和色素变化区带的划分是根据其平行柱 LGH-7 硅藻属种组合相对丰度数据执行 Tilia 2.0 CONISS 程序来划分的 (另文发表).

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积柱年代序列

根据 LGH-6 沉积柱芯 $^{210}\text{Pb}$ 测定结果, $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 活度随深度增加呈指数降低, $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 随质量深度呈指数衰减(图 2a),在质量深度  $13.22\text{ g/cm}^2$ (即  $32.5\text{ cm}$  深度)处与 $^{226}\text{Ra}$  达到平衡. 利用 $^{210}\text{Pb}$ -CRS(constant rate of supply)模式对 LGH-6 沉积柱进行年代计算<sup>[31]</sup>,以此获得其年代系列. 柱芯不同深度对应年代结果见图 2b. LGH-6 沉积柱平均干物质沉积速率为  $0.15\text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ . 但根据 CRS 模式计算得到不同深度层位其沉积速率并不一致,由上至下干物质沉积速率略升高后又逐渐降低, $6.0\text{ cm}$  以上为  $0.14\text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ ;  $6.0 \sim 22.5\text{ cm}$  段和  $22.5 \sim 28.0\text{ cm}$  段分别为  $0.18\text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$  和  $0.13\text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ ;  $28.0 \sim 32.5\text{ cm}$  段为  $0.10\text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ . 根据沉积速率变化,可以看出本柱芯下部有一定的压实作用. 因此, LGH-6 沉积柱  $32.5\text{ cm}$  代表了泸沽湖近 200 a 来(2010—1800 AD)的沉积.

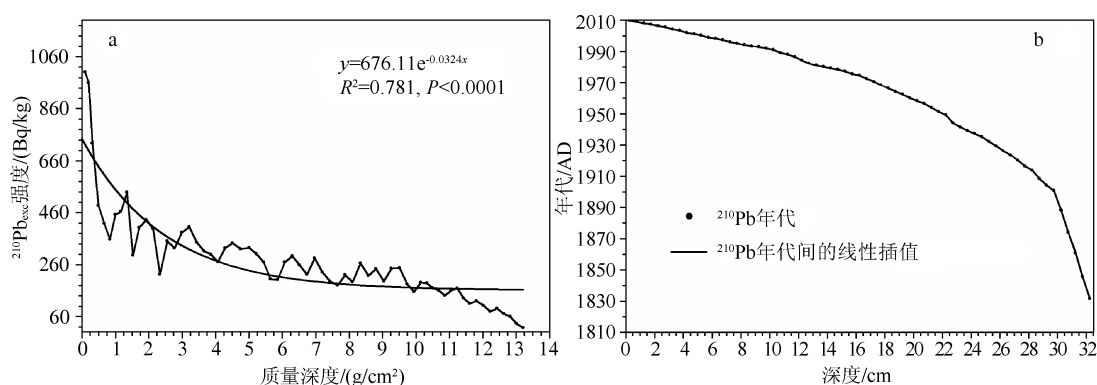


图 2 LGH-6 沉积柱质量深度 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 活度变化(a)与深度-年代序列(b)

Fig. 2  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  activity of quality depth (a) and age-depth plot for LGH-6 core (b)

### 2.2 沉积物理化指标变化

LGH-6 沉积柱样含水率在  $17\text{ cm}$  以下变化不大,而从  $14\text{ cm}$  以上逐渐增加(图 3),这可能是表层有机质较高和泥芯底部存在压实的共同结果.  $\text{LOI}_{550^\circ\text{C}}$  被广泛应用于评价沉积物中有机质的相对含量,并作为湖泊总生产力的代用指标<sup>[27]</sup>.  $\text{LOI}_{550^\circ\text{C}}$  和 TOC 在深度剖面上的变化趋势相似(图 3). 利用近 60 a 来(1951—2010 AD)丽江站气温和降雨量数据与  $\text{LOI}_{550^\circ\text{C}}$  和 C/N(TOC/TN)理化指标进行相关性分析,结果表明:近 60 a 来 44 个沉积样品各层的  $\text{LOI}_{550^\circ\text{C}}$  与它们对应时期的年均气温呈显著正相关( $r = 0.504, P = 0.0005, n = 44$ ), C/N 与年均气温间无显著相关性( $P > 0.05, n = 44$ ). 年降雨量与  $\text{LOI}_{550^\circ\text{C}}$  和 C/N 均无相关性( $P > 0.05, n = 44$ ),而 5 a 滑动年均降雨量(5yMAP)与  $\text{LOI}_{550^\circ\text{C}}$  和 C/N 存在正相关性( $r = 0.478, P = 0.0011; r = 0.473, P = 0.0012, n = 44$ ). 从整个近 200 a 来的沉积柱来看,在  $12 \sim 17\text{ cm}$  阶段  $\text{LOI}_{550^\circ\text{C}}$  出现一个较低值,可能与该时期(约 1973—1985 AD)区域内气温偏低和降雨量偏少有关;  $10\text{ cm}$  以上  $\text{LOI}_{550^\circ\text{C}}$  逐渐升高,且 TOC 含量相对较高,这与从 1992 AD 开始以来的年均气温较快升高趋势相吻合. 因此可认为,近 20 a 来气温升高可能促进湖泊和流域内生产力的升高.

沉积物中 TN 和 TOC 之间表现出显著的线性正相关关系( $r = 0.723, P < 0.001, n = 67$ ). C/N 比值可用于指示湖泊沉积物中有机质来源<sup>[32]</sup>,一般来说,湖泊内源藻类有机质 C/N 比值较小( $4 \sim 10$ ),而陆源有机质 C/N 较大( $> 22$ )<sup>[32]</sup>. LGH-6 湖泊沉积物 C/N 比值在  $8.75 \sim 15.27$  范围内(平均值为 11.28,中值为 10.73),说明泸沽湖沉积物有机质主要还是来自湖泊内源有机质. 整个柱芯 C/N 值在两个时期(约 1973—1985 AD 和 2005—2010 AD)相对偏低,一方面可能与这两个时期降雨量相对偏少有关,使得沉积有机质中来自陆源有机质的贡献率相对较小,另一方面与 2005 AD 以来气温的显著升高进一步促进了湖泊内源有机质的贡献有关,可能加剧了这一结果的出现.

生物硅(BSi)组成主要包括硅藻、金藻、海绵骨针和植硅体等,在古湖沼学研究中被广泛用作流域初级生产力的代用指标之一,含量的高低相应指示了总初级生产力的<sup>[33]</sup>. LGH-6 沉积柱 BSi 含量在 11.5 ~ 33.5 cm 之间(约 1800—1990 AD)相对稳定,在 7.0 ~ 11.5 cm(约 1990—1997 AD)出现一个相对较低时期,0 ~ 7 cm(约 1997—2010 AD)呈现逐渐升高趋势且大于过去历史时期,说明近 15 a 来流域内总初级生产力相对较高.此外,近 60 a 来(1951—2010 AD)沉积物中 BSi 含量与对应时期年平均温度之间存在正相关性( $r=0.317, P=0.0358, n=44$ );而与对应时期年降雨量无相关性( $P>0.05, n=44$ ).说明泸沽湖沉积物生物硅含量变化与该区域气温变化有关,BSi 的来源主要以湖泊内源为主;结合 C/N 值的分析表明,近 15 a 来湖泊内源初级生产力逐渐升高且成为沉积物有机质的主要贡献者.

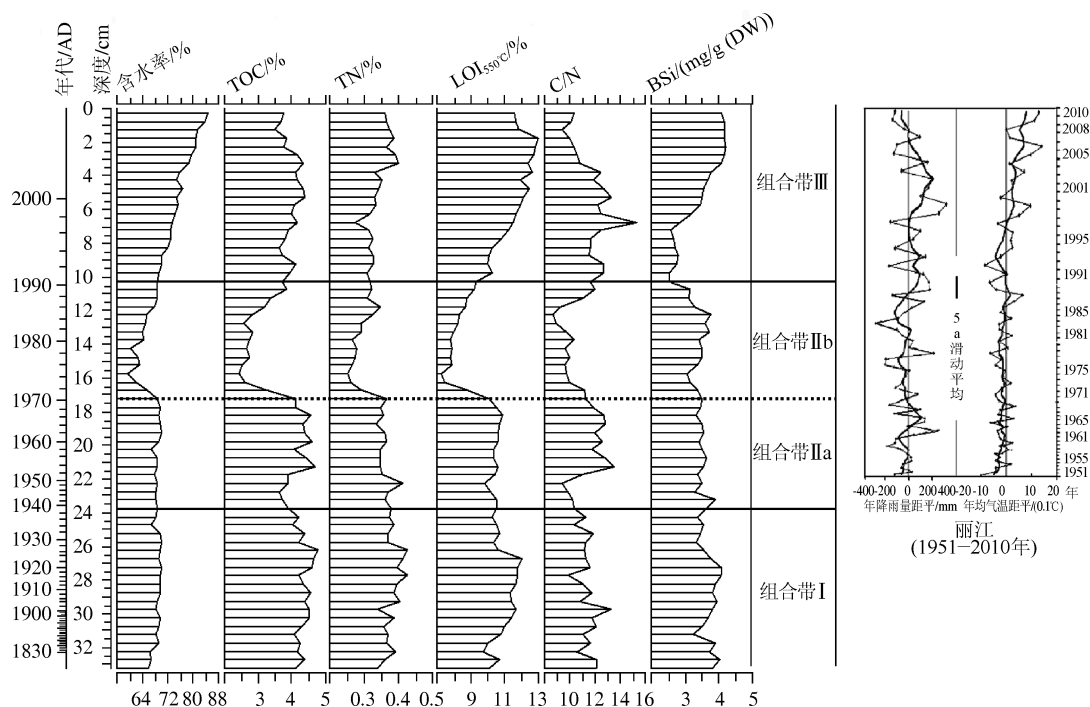


图 3 LGH-6 沉积柱不同深度年代生物硅和理化指标变化  
(图右侧丽江气象站 1951—2010 年平均气温与降雨量距平图,  
数据来自中国气象科学数据共享服务网 <http://cdc.cma.gov.cn>)

Fig. 3 Geochemical and BSi proxies versus depth and chronology in the LGH-6 core  
(The mean annual temperature and precipitation departure of 1951—2010 from LiJiang weather station,  
data from China Meteorological Data Sharing Service System <http://cdc.cma.gov.cn>)

### 2.3 沉积物色素含量变化

Swain 等认为沉积物中色素含量的高低定性地指示了沉积物的埋藏条件以及湖泊的古初级生产力状况,而湖泊的初级生产力与温度、光照、盐度、营养水平等密切相关<sup>[23]</sup>. 叶绿素及其衍生物(CD)和总胡萝卜素(TC)均可以指示湖泊的初级生产力水平,在水温较高、藻类生长茂盛的湖泊中,这两种色素含量相对较高<sup>[34]</sup>. 湖泊水温升高,可使蓝藻的竞争力加强,从而使得颤藻黄素(Osc)和蓝藻叶黄素(Myx)的浓度增加;Osc 仅存于颤藻科(Oscillatoriaceae)的颤藻属(Oscillaria)和节旋藻属(Arthrospira)两属中,由于 Oscillaria 被认为是湖泊明显富营养化时首先出现的浮游植物优势类群之一,因此 Osc 可以揭示历史时期湖泊富营养的时序<sup>[35-36]</sup>;Myx 指示浮游生物中蓝藻(Cyanophyceae)的含量<sup>[19,23]</sup>. CD 与 TC、Osc 与 Myx 具有相近的分解速率,其比值 CD/TC、Osc/Myx 指标可消除有机质稀释的影响,可以更好地反映湖泊初级生产力的状况<sup>[36]</sup>. CD/TC 可作为衡量内源和外源有机质贡献大小的指标,该比值高表明外源有机质贡献较大,值小则反映内

源有机质的比例较高;Osc/Myx 比值通常用来表示湖泊中颤藻科在蓝藻中的相对含量变化<sup>[23,36-37]</sup>。

LGH-6 柱芯色素含量变化情况如图 4 所示,整个柱划分为 3 个主要组合带:I(24~33.5 cm,约 1939—1800 AD)、II(10.5~23.5 cm,约 1990—1939 AD)和 III(0~10 cm,约 2010—1990 AD),其中 II 带划分为 II a(约 1970—1939 AD)和 II b(约 1990—1970 AD)2 个亚组合带。色素含量及其比值均表现出了明显的变化特征(图 4)。在约 1971—1985 AD 期间内,CD、TC、Osc 和 Myx 含量均处于低水平;且与该时期内 TOC、LOI<sub>550℃</sub>和 C/N 也处于低值的结果相一致(图 3),表明该时期初级生产力较低,与该时期气温偏低和降雨量偏少较为吻合。在约 1970 AD 之前,CD、TC 含量相对较低且呈现小幅震荡变化趋势;Osc 和 Myx 含量在约 1939 AD 之前相对较高,而在约 1939—1970 AD 期间 Osc 和 Myx 含量低于 1939 AD 之前的;在约 1990 AD 后,CD、TC、Osc 和 Myx 含量均显著升高,并要高于约 1939 AD 以前历史时期的最高色素含量。这一结果表明,近 20 a 来初级生产力有明显的增加,并高于过去历史时期(约 1800—1939 AD)。

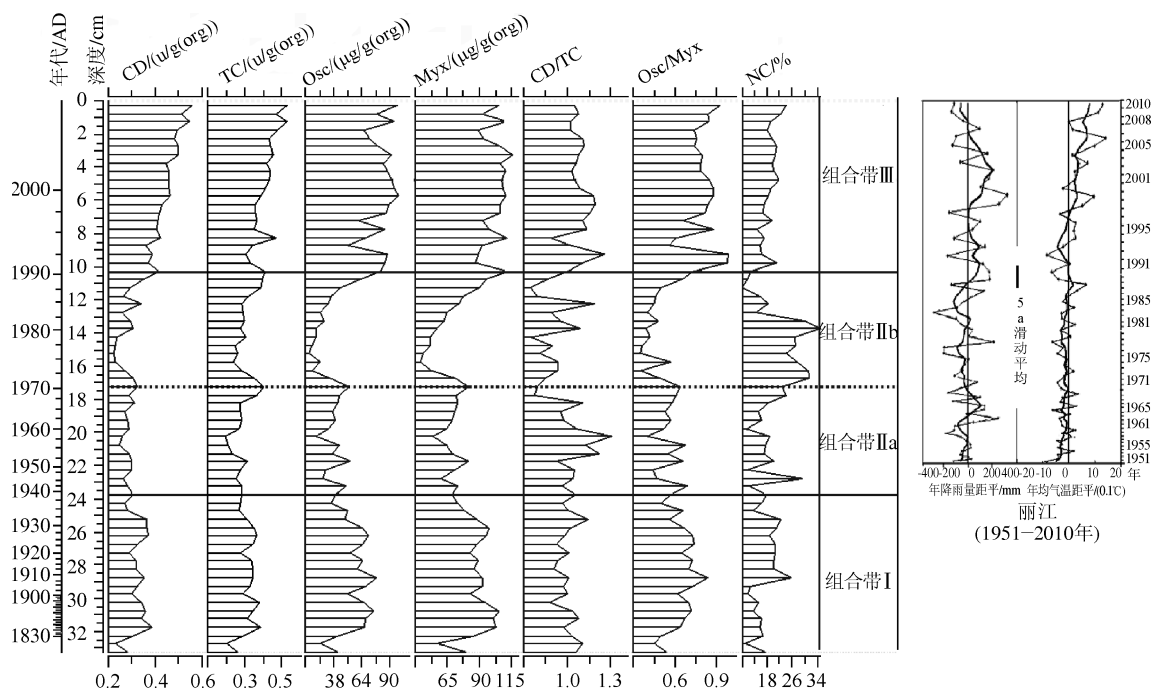


图 4 LGH-6 沉积柱不同深度年代沉积色素含量和比率变化

Fig. 4 Changes of sediment pigments and their relative ratios versus depth and chronology in the LGH-6 core

为揭示该区域气候对沉积色素含量的影响,对近 60 a 来 CD、TC、Osc 和 Myx 四种沉积色素含量记录与各层对应时期丽江站年均气温和降雨量进行了进一步相关性分析。结果表明,近 60 a 来年均气温与 CD 和 TC 含量呈显著正相关( $r_{CD} = 0.558, P < 0.0001$ ;  $r_{TC} = 0.461, P = 0.0016, n = 44$ );而与 Osc 和 Myx 含量之间有正相关性( $r_{Osc} = 0.345, P = 0.0218$ ;  $r_{Myx} = 0.368, P = 0.0141, n = 44$ )。说明近 60 a 来气温升高很可能是驱动泸沽湖沉积色素含量升高的主要因素之一,气温的升高使得湖泊表层水温升高,促进了湖泊初级生产力提高<sup>[34-35,38-39]</sup>。近 60 a 来实际年降雨量与以上四类色素含量之间无相关性( $P > 0.05, n = 44$ ),但期间 5yMAP 与 Osc 和 Myx 含量之间有显著正相关性( $r_{Osc} = 0.591, P < 0.0001$ ;  $r_{Myx} = 0.604, P < 0.0001, n = 44$ ),而与 CD 和 TC 含量之间有正相关性( $r_{CD} = 0.459, P = 0.0017$ ;  $r_{TC} = 0.369, P = 0.0138, n = 44$ ),表明近 60 a 来降雨量变化是影响色素含量的次要因素,这可能与泸沽湖以降雨补给为主的特征有关,降雨量是影响泸沽湖外来有机质和营养输入的主要因素<sup>[24,40]</sup>,它通过影响地表径流而间接影响外源营养物质的输入。对于泸沽湖这类贫营养湖泊,外来营养物质输入的增加促进了湖泊蓝藻类的生长,特别是颤藻科中颤藻属的增长<sup>[35]</sup>。以上分析发现,同年均气温相比,年降雨量与四类色素的相关性不显著,而仅与 5yMAP 有显著正相关性。其原因

可能是云贵高原降雨的空间变化不如气温相对稳定,即使同一区域内不同局部地区之间降雨量都会有较大变化<sup>[3]</sup>. 本文所采用的气象资料取自丽江气象站的数据,泸沽湖距丽江气象站 101.2 km,因此丽江气象站的降雨量数据与泸沽湖汇水区的实际降雨量可能有一定区别.

而 CD/TC 基本与 C/N 值所反映的沉积物中有机质的主要来源变化结果一致,即内源为主. 在蓝藻色素方面,近 200 a 来 Osc/Myx 值始终小于 1,且 Osc/Myx 值以及 Osc 和 Myx 含量从 1990s 初开始显著升高并保持较高水平(图 4),表明近 20 a 来泸沽湖蓝藻类及其颤藻科生产力均显著增长,且有颤藻科增长速率大于总蓝藻增长速率的趋势<sup>[19,35]</sup>. 一方面与近 20 a 来该区域气候变暖有关,另一方面可能与水体营养水平升高有关<sup>[35]</sup>. 总之,整个沉积柱色素结果反映:泸沽湖在 1940s 初至 1980s 末期间湖泊初级生产力相对较低,且特别是 1970s 初至 1980s 初期间;而从 1990s 初开始初级生产力逐渐升高且维持较高水平,其中蓝藻类生产力显著增加.

自然叶绿素 NC 代表沉积物中未分解叶绿素的含量,能够较好地指示沉积物中色素保存程度,高的 NC 值反映沉积物中色素保存程度较好<sup>[23]</sup>. NC 含量不低且其波动相对不大(图 4),表明近 200 a 来色素保存情况较为稳定且保存条件较好,特别是 1970s 初至 1980s 初期间 NC 量较高指示保存最好,可能与该时期气温偏低有利于色素保存有关. 而四类色素与 NC 的相关性分析结果表明,CD、TC 和 Osc 色素与 NC 之间无显著相关性(图 5a, b, c),而 Myx 和 NC 仅有较低的负相关性(图 5d),说明保存条件并不是控制 LGH-6 沉积柱样品中色素含量变化的主要因素<sup>[19]</sup>. 因此,泸沽湖沉积物 CD、TC、Osc 和 Myx 含量变化基本可指示湖泊初始生产力的变化情况,特别是近 20 a 来湖泊内源有机质增加且逐渐成为沉积物中有机质的主要来源.

此外,CD、TC、Osc 和 Myx 四类色素之间均存在正相关性( $r_{CD-TC}=0.595$ ,  $r_{CD-Osc}=0.818$ ,  $r_{CD-Myx}=0.811$ ,  $r_{TC-Osc}=0.696$ ,  $r_{TC-Myx}=0.742$ ,  $r_{Osc-Myx}=0.919$ ,  $P<0.001$ ,  $n=44$ ),CD 与 Osc、Myx 及 Osc 与 Myx 存在显著的正相关性( $r>0.8$ ). 结果表明,近 200 a 来泸沽湖沉积物中四类色素含量变化趋势较为一致. 而其中 Osc 与 Myx 之间的相关性最高,是由于这两类色素都属于蓝藻类.

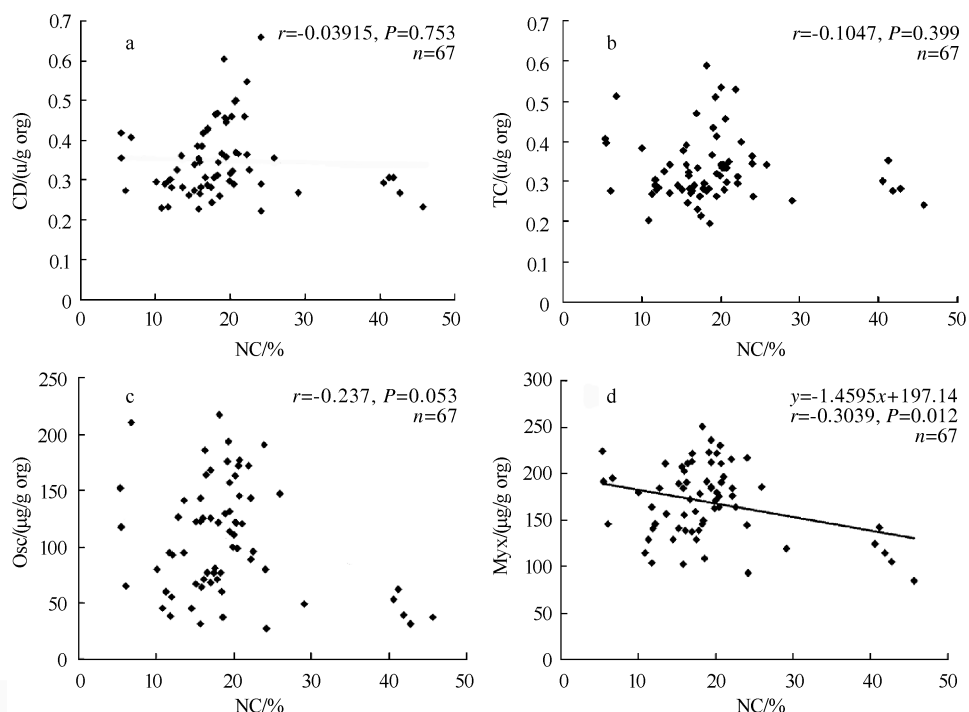


图 5 LGH-6 沉积柱中色素 CD、TC、Osc 和 Myx 与 NC 的相关性

Fig. 5 The correlations of CD, TC, Osc and Myx with the native chlorophyll in the LGH-6 core

### 3 结论

1) 泸沽湖从 1990s 初开始 CD、TC、Osc 和 Myx 色素含量明显增加,1997—2010 AD 的 LOI<sub>550℃</sub> 和 BSi 含量均明显增加,反映了最近 20 a 来泸沽湖区域湖泊初级生产力的增强,C/N 比值呈下降趋势,表明湖泊沉积中来自湖泊内源有机质比例增加。

2) 沉积色素保存情况较为稳定可以用来判断初级生产力变化。CD、TC、Osc 和 Myx 4 种色素含量及色素比值对区域气候变化较为敏感,近 60 a 来年平均温度与 CD 和 TC 含量呈极显著正相关,而与 Osc、Myx、LOI<sub>550℃</sub> 和 BSi 含量呈显著正相关。说明近 60 a 来气温升高可能是驱动沉积色素含量和初级生产力升高的主要因素之一;以上四种色素、LOI<sub>550℃</sub> 和 BSi 含量与年降雨量无直接相关性,但与 5yMAP 之间有正相关性,表明降雨量变化是影响色素含量的次要因素。

3) 1990s 初开始,沉积物中 Osc 和 Myx 色素含量及其比值较高,反映蓝藻类生产力增长显著,且其中颤藻类比重呈增大趋势,表明近 20 a 来丽江地区气候变化不仅导致了湖泊初级生产力增加,且导致浮游植物群落组成的变化。根据 IPCC 对未来气温变化预测结果表明未来气温上升趋势还将加快,并在相当长的一段时期全球将持续变暖,因此推测泸沽湖初级生产力将进一步增长,且蓝藻的贡献将进一步增大,由此将导致湖泊生态系统发生一系列变化。

致谢:感谢泸沽湖云南省自然保护区管理局李连翔办公室主任在野外采样中的帮助,感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所羊向东研究员、夏威夷高级工程师、陈旭博士在年代测定、实验和写作中给予的热心帮助!感谢中国科学院寒区旱区环境与工程研究所张宁宁博士在获取丽江站气象数据方面提供的帮助!

### 4 参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2007: report of working group of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007:16-72.
- [2] 《第二次气候变化国家评估报告》编委会. 第二次气候变化国家评估报告. 北京:科学出版社,2011:28-53.
- [3] 程建刚,解明恩. 近 50 年云南区域气候变化特征分析. 地理科学进展,2008,27(5):19-27.
- [4] 张实,谢先德,万国江. 云南泸沽湖矿物学沉积记录及其环境辨识意义. 矿物学报,1997,17(2):183-193.
- [5] 肖保华,万国江. 泸沽湖沉积物有机质碳同位素组成与气候变迁记录. 矿物岩石地球化学通报,1997,16(1):22-24.
- [6] Guo G, Li ZS, Zhang QB *et al.* Dendroclimatology studies of picea likiangensis and tsuga dumosa in Lijiang, China. *IAWA Journal*, 2009,30(4):435-441.
- [7] He YQ, Pu T, Li ZX *et al.* Climate change and its effect on annual runoff in Lijiang Basin-Mt. Yulong Region, China. *Journal of Earth Science*, 2010,21(2):137-147.
- [8] 姚远,张恩楼,沈吉等. 云南属都湖近百年环境演变的湖泊沉积记录与器测资料对比研究. 沉积学报,2008,26(2):294-299.
- [9] 张宁宁,何元庆,和献中等. 玉龙雪山冰川崩塌成因分析. 山地学报,2007,25(4):412-418.
- [10] Adrian R, Reilly CM, Zagarese H *et al.* Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, 2009,54(6):2283-2297.
- [11] Battarbee RW, Grytnes JA, Thompson R *et al.* Comparing palaeolimnological and instrumental evidence of climate change for remote mountain lakes over the last 200 years. *Journal of Paleolimnology*, 2002,28(1):161-179.
- [12] Brancelj A, Šiško M, Lami A *et al.* Changes in the trophic level of an alpine lake, Jezero v Ledvici (NW Slovenia), induced by earthquakes and climate change. *Journal of Limnology*, 2000,59(Suppl 1):29-42.
- [13] Wu G, Zhang QX, Zheng XX *et al.* Water quality of Lugu Lake: changes, causes and measurements. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2008,15(1):10-17.
- [14] 云南省水利厅. 云南省水资源公报(2000—2010). [http://lj.xxgk.yn.gov.cn/canton\\_model24/newslist.aspx?classid=143398](http://lj.xxgk.yn.gov.cn/canton_model24/newslist.aspx?classid=143398).
- [15] 于洋,张民,钱善勤等. 云贵高原湖泊水质现状及演变. 湖泊科学,2010,22(6):820-828.
- [16] 陈毅风,万国江. 泸沽湖沉积物  $\alpha$  纤维素的提取及其稳定碳同位素研究初探. 地质地球化学,1999,27(4):72-76.



- [17] 韩晓钟, 沈瀚, 王苏民. 青海湖沉积物的色素含量及其意义. 见: 刘东生, 安芷生编. 黄土·第四纪地质·全球变化. 北京: 科学出版社, 1992: 116-121.
- [18] Lami A, Guizzoni P, Marchetto A. High resolution analysis of fossil pigments, carbon, nitrogen and sulphur in the sediment of eight European Alpine lakes: the MOLAR project. *Journal of Limnology*, 2000, **59**(Suppl 1): 15-28.
- [19] 姜珊, 刘晓东, 徐利强等. 北极新奥尔松地区湖泊沉积物色素含量变化及环境意义. 极地研究, 2009, **21**(3): 211-220.
- [20] 吴敬禄, 蒋雪中, 夏威岚等. 云南程海近 500 年来湖泊初始生产力的演化. 海洋地质与第四纪地质, 2002, **22**(2): 95-98.
- [21] 瞿文川, 吴瑞金, 王苏民. 近 2600 年来内蒙古居延海湖泊沉积物的色素含量及环境意义. 沉积学报, 2000, **18**(1): 13-17.
- [22] Jiang S, Liu XD, Sun J *et al.* A multi-proxy sediment record of late Holocene and recent climate change from a lake near Ny-Alesund, Svalbard. *Boreas*, 2011, **40**(3): 468-480.
- [23] Swain EB. Measurement and interpretation of sedimentary pigments. *Freshwater Biology*, 1985, **15**(1): 53-75.
- [24] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 378-379.
- [25] Bai X, Ma KM, Yang L *et al.* Simulating the impacts of land-use changes on non-point source pollution in Lugu Lake watershed. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2008, **15**(1): 18-27.
- [26] 刘光崧, 蒋能慧, 张连第. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996: 166-167.
- [27] Heiri O, Lotter AF, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 2001, **25**: 101-110.
- [28] Mortlock RA, Froelich PN. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Oceanographic Research*, 1989, **36**(9): 1415-1426.
- [29] 尤卫红, 傅抱璞, 林振山. 云南近百年气温变化与 8 月低温冷害天气. 高原气象, 1997, **16**(1): 63-72.
- [30] Juggins S. Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation C2 Version 1.5 User guide. Newcastle upon Tyne: Newcastle University, 2007: 1-73.
- [31] 夏威岚, 薛滨. 吉林小龙湾沉积速率的<sup>210</sup>Pb 和<sup>137</sup>Cs 年代学方法测定. 第四纪研究, 2004, **24**(1): 124-125.
- [32] McGlynn G, Mackay AW, Rose NL *et al.* Palaeolimnological evidence of environmental change over the last 400 years in the Rwenzori Mountains of Uganda. *Hydrobiologia*, 2010, **648**(1): 109-122.
- [33] Swann GEA, Mackay AW. Potential limitations of biogenic silica as an indicator of abrupt climate change in Lake Baikal, Russia. *Journal of Paleolimnology*, 2006, **36**: 81-89.
- [34] Prahl FG, Bennett JT, Carpenter R. The early diagenesis of aliphatic hydrocarbons and organic matter in sedimentary particulates from Dabob Bay, Washington. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, **44**(12): 1967-1976.
- [35] Soma Y, Tanaka A, Soma M. Composition and vertical profiles of photosynthetic pigments in the sediment of Lake Kasumigaura. *Geochemical Journal*, 1995, **29**: 107-113.
- [36] Leavitt PR, Hodgson DA. Sedimentary Pigments. In: Last WM, Smol JP eds. Tracking environmental change using lake sediments. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002: 295-325.
- [37] McGowan S. Pigments in sediments of aquatic environments. In: Elias S ed. Encyclopedia of quaternary sciences. Amsterdam: Elsevier, 2007.
- [38] 薛滨, 潘红玺, 夏威岚等. 历史时期希门错湖泊沉积色素记录的古环境变化. 湖泊科学, 1997, **9**(4): 295-299.
- [39] 申慧彦, 李世杰, 舒卫先. 湖泊沉积物中色素的研究及其环境指示意义. 海洋地质与第四纪地质, 2007, **27**(3): 37-42.
- [40] 史正涛, 明庆忠, 张虎才. 云南高原典型湖泊演化及环境变化初步考察. 地质力学学报, 2004, **10**(4): 344-349.