

体系结构量化指标对气候环境的重建 ——基于长江中游黄茅潭湖泊沉积粒度、元素指标体系

周雅文, 贾玉连*

闽南师范大学历史地理学院 福建漳州

【摘要】重建过去气候环境, 研究气候环境的变化特点、过程和规律, 是全球变化研究的基础性工作之一。其基本思路, 就是通过易受温度、降水及其他气候环境因素影响的物理、化学或生物指标, 来定性、定量重建气候环境记录。但是, 需要明确的是, 这种记录直接反映的是气候环境状态及其变化, 并可能因指标的敏感性差异而使重建结果具有畸变特征。为克服这种缺点, 本文利用长江中游一小型吞吐湖泊黄茅潭湖泊柱状沉积, 在高精度年代时标的控制下, 基于 17 个粒度指标和 17 个元素(含量)指标, 在各指标的异常变化及指标两两相互关系异常变化的基础上, 建构了 Ai-1、Ai-2 两个系列的体系(粒度指标体系和元素指标体系)结构量化指标; 尝试通过研究指标体系的结构变化, 来研究气候环境变化。研究认为, Ai(G)-1、Ai(G)-2 和 Ai(E)-1、Ai(E)-2 均具有对降水等水文情势信息的敏感响应, 但对温度变化无显著响应。由此, 研究基于 Ai(G)-2 系列中的 Ai(G)-1-2 定量重建了流域 C.E 1950-2010 年间的年降水(mm/a); 与 30km 外九江气象站同期实测降水 3 年滑动平均相关系数为 0.58 (n=51), 通过了 P<0.001 的显著性水平检验, 初步实现了基于碎屑沉积粒度信息对降水等水文情势信息的定量重建。研究使我们深刻认识到, 可视可感的宏观气候环境因素---降水, 可以通过粒度指标体系的结构变化这种体现系统"复杂性"的指标来定量重建, 这丰富了我们对于气候环境因素的认知, 对全球变化研究具有重要的科学意义。

【关键词】长江中游; 湖泊沉积; 结构量化指标; 异常指数; 降水重建

【基金项目】国家自然科学基金项目(41262007); 闽南师范大学校长基金项目(4103/L22013)

【收稿日期】2023 年 8 月 10 日 **【出刊日期】**2023 年 9 月 8 日 **【DOI】**10.12208/j.aes.20230013

Reconstruction of climatic environment by quantitative index of architecture---based on the grain size and element index systems of sediments from Huangmaotan Lake in the middle reaches of the Yangtze River

Yawen Zhou, Yulian Jia*

School of Historical Geography, Minnan Normal University, Zhangzhou, Fujian

【Abstract】It is one of the basic work of global change researches to reconstruct the past climate and environment and to study the characteristics, process and law of environment changes. The basic idea is to qualitatively and quantitatively reconstruct climatic and environmental records from physical, chemical or biological indicators that are susceptible to temperature, precipitation and other climatic and environmental factors. However, it should be made clear that such records directly reflect the state of the climatic-related environment and its changes, and usually the reconstruction results may have distorted due to the difference in sensitivity of the indicators. In order to overcome this shortcoming, this paper uses the columnar sediments of Huangmaotan Lake, a small swallow and spit lake in the middle reaches of the Yangtze River, and, under the control of high-precision

第一作者简介: 周雅文(2002-)女, 福建三明, 本科, 主要从事全球变化与人地关系研究;

*通讯作者: 贾玉连(1971-)男, 山东莱芜, 教授, 主要从事全球变化与人地关系研究。

time scale, based on 17 particle size indexes and 17 element (content) indexes and the abnormal changes of each index and the abnormal changes of their pair-pair relationship, The structural quantitative indexes of Ai-1 and Ai-2 series of systems (particle size index system and element index system) were constructed. This paper attempts to study the change of climatic environment by studying the structural change of index system. It is concluded that Ai (G) -1, Ai (G) -2, Ai (E) -1, Ai (E) -2 are sensitive to hydrological information such as precipitation, but have no significant response to temperature change. Therefore, based on Ai (G) -1-2 in the Ai (G) -2 series, the annual precipitation (mm/a) during C.E 1950-2010 was quantitatively reconstructed with which The correlation coefficient of the 3-year sliding average of the measured precipitation at Jiujiang meteorological station 30km away is 0.58 ($n=51$), which passes the significance level test of $P<0.001$. The study makes us deeply realize that the visible and perceptible macro-climate and environmental factor, precipitation, can be quantitatively reconstructed through the structural change of the grain size index system, which reflects the "complexity" of the system. This enriched our cognition of climatic and environmental factors and has important scientific significance for the study of global change.

【Keywords】 The Middle Reaches of Yangtze River; Lacustrine deposits; Structural Quantitative Index of System; Anomaly Index; Precipitation reconstruction

在全球变化研究中, 基于各种沉积档案, 利用物理、化学、生物的代用指标所进行的气候环境的重建, 是过去全球变化研究的基础性工作之一^[1]。其基本假定是这些物理、化学、生物的代用指标, 易受降水、温度及其他气候环境因素的影响; 气候环境的变化, 直接或者间接导致了这些代用指标所指示的物理、化学、生物的某些特征和属性的变化。在地表过程, 这些信息被保存在相关沉积档案中^[2], 高保真存储。全球变化研究, 就是基于这些沉积档案, 恢复与重建这些被存储的信息, 通过这些信息反演气候环境状态及其变化^[3-7]。

毋庸置疑, 这种反演是对气候环境状态的重建, 并可能会因夸大或缩小气候环境状态, 使重建结果失真^[1]。譬如, 基于碎屑沉积对降水等水文情势的研究, 由于涉及到包括降水强度及由此引起的洪水过程、规模、强度及其变化与土壤侵蚀特点、碎屑来源、受水盆地形态、水位及具体沉积点上水环境和沉积环境背景等诸多因素^[8,9]的影响, 对相同强度的洪水水文事件, 某些指标若是对这次具有敏感性的响应, 对下次则不一定敏感^[8,9]。也就是说, 指标的敏感性会随着诸多环境背景的改变而改变。无法苛求每一次洪水水文事件的背景都是一致的, 因此, 也就不能指望所有粒度指标, 都能一致且敏感地响应所有相同或相似的洪水水文事件^[8,9]。众所周知, 在碎屑沉积序列中, 元素含量本身一般是无法直接

作为指标指示气候环境变化的, 基于元素地球化学的环境变化的研究, 可以通过考察元素之间相对富集或亏损, 来定性考察风化强度等气候环境信息的变化。例如, CIA、Rb/Sr、Ca/Al 等对中等风化强度的脱盐基作用具有较为敏感的指示^[10-12]; 但受风化程度、碎屑物质来源、矿物组成、粒度组成等的影响^[8,9,13], 这些指标的环境敏感程度会随着地理、地貌与气候环境背景的变化而有所变化, 从而影响重建结果的精度。其实, 环境背景条件的变化对指标的敏感性所造成的影响, 普遍存在于基于物理、化学、生物指标的气候环境重建工作中。

为克服指标的这种缺点, 本研究拟基于器测时期 (C.E 1950-2010) 长江中游黄茅潭湖泊柱状沉积, 尝试从粒度、元素指标体系各指标的异常变化和各指标 (两两) 相互之间关系异常变化中提取信息指数, 通过考察指标异常信息的变化, 来认识和理解气候环境的变化。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

黄茅潭位于江西省九江市湖口县凰村镇与流泗镇, 为长江南岸一小型吞吐湖泊, 湖泊面积约为 5.1km^2 , 流域面积约为 61km^2 。湖区属亚热带湿润季风气候, 年均温 17.4°C , 年均降水量为 $1400-1700\text{mm}$ 。湖泊冬枯夏潦, 平均水位 (黄海高程) 在 14m 左右, 中心水深在 $3-5\text{m}$ 之间^[14]。湖泊东北面

有一条 2km 长的人工水道与长江相通, 将湖水排入长江。

有资料表明, 这种江湖关系至晚始自 1910-1920 年间, 尤其是建国以来在湖滨不断整修堤坝所造成的。湖盆处于怀玉山与大别山之间的湖口地堑内, 丘陵平原地貌。基岩主要为侏罗系、白垩系及第三系砂岩 (位于流域东北侧), 第四系主要为红色、黄色土, 属风成堆积^[15], 在流域广布。

HMT-01 钻孔 (29°48'N, 116°21'E) 位于湖心, 于 2012 年 7 月间用 Becker core 便携式重力钻采得, 长 80cm。同时在相距不足 400m 的东南湖心利用刀式采样器采集了 1 个平行柱 (HMT-04 孔, 长度为 48cm) (图 2)。岩芯采集后, 现场描述并严格以 1cm 间隔分样, 封装于聚乙烯样品袋中, 贮存于 -4℃ 的冰柜中, 待处理。

1.2 实验测试

放射性元素测试: 称取 5-6g 左右样品于烘箱内烘干 (<45℃), 研磨, 全部通过 200 μ m 筛网, 充分混合后充填到长 6cm、直径为 1.5cm 聚氯乙烯标准管中, 蜡封放置 3 周, 使用 OrtecHP-GeGWL 井式检测仪测试样品的 ¹³⁷Cs、²¹⁰Pb、²²⁶Ra 甚至 ²⁴¹Am 等放射性元素的活度^[16,17]。计数时间为国际通用的 43200 秒 (12 小时), 分别在检测谱 46.5keV、662keV、295keV 处读取上述放射性元素的活度, 计算样品的质量活度 (Bq/kg)。对 HMT-01 孔样品进行了放射性元素的活度测试^[18]。

粒度测试: 称取烘干样品 0.25~0.30g 用于激光粒度测试。前处理过程如下: 样品用蒸馏水浸泡, 加适量 10% H₂O₂ 去除有机质, 然后加适量 10% HCL 去除钙质胶结物和钙质生物壳体, 适当搅拌待充分反应后, 高速离心滤除上层清液, 重复 3 次稀释酸度近中性; 加入适量六偏磷酸钠溶液作为分散剂, 超声震荡 5 min 后上机测试。对 HMT-01 孔样品进行了粒度分析 (顶部两样品由于采样扰动, 未测), 所用仪器为 HORIBA particle sizer LA-950^[18,19]。

常量元素测试: 取烘干样品适量, 在研钵中充分研磨并全部过 200 目筛, 然后用 1mol 过量醋酸浸泡 5 小时, 离心后驱除清液, 烘干样品并研磨, 约 4-5g 压制成直径 40mm、厚约 5mm 的高压饼, 进行 XRF 元素测试分析。测试过程中, 每 10 个样品加一个平行样, 以检测测试结果的稳定性, 归一法获得

各元素的质量百分组成^[15,19]。所用仪器为德国 S4PIONEER X 射线荧光光谱仪。

SCP (球状碳粒) 计数: 实验步骤遵循 Rose N.L.^[20,21]提供的方法, 考虑到其硅酸盐消解时间偏短, 本实验加入 HF 后水浴时间延长至 5 小时并静置 4 小时。处理好的样品, 线状均匀构展到载玻片上, 统计了 $\geq 20\mu$ m (HMT-01) 的 SCP (球状碳粒) 的颗粒数, 以每克干质量沉积物 (gDM-1) 所含的颗粒数 (counting numbers/g) 为标识进行了 SCP 统计。

2 结果与分析

2.1 钻孔地层年代控制

放射性测试表明, HMT-01 孔 ¹³⁷Cs 比活度为 10-20Bq/kg, 远高于当地现代土壤 (0.3~6Bq/kg) 的活度, 钻孔剖面总存量达 4683Bq/m², 比区域土壤约 1680Bq/m² 的背景值^[18,22]大得多, 揭示 ¹³⁷Cs 在黄茅潭具有强烈的富集特点。¹³⁷Cs 首次出现在 29cm 深度上, 第一个主蓄积峰在 23cm 深度处; 结合粒度特点^[18]和北半球 ¹³⁷Cs 散落特点^[16], 这两个时标大致对应 1953-1954 年和 1963-1964 年沉积层节, 其他蓄积峰, 无时标意义。

根据 HMT-01 孔 $\geq 20\mu$ m SCP 的计数与方圆 130km 范围内的四大电厂 (江西景德镇发电厂 (100km)、南昌发电厂 (130km)、安庆发电厂 (110km)、黄石发电厂 (120km) 众多机组相继并网发电, 1957-1959 年、1975-1977 年是黄茅潭周边 200km 范围内区域火电电力发展井喷阶段。1983-1984、1991-1992、2003 年九江电厂 (15km) 几个机组的并网发电和 2002 年黄梅濯港发电厂 (47km) 并网发电, 可能对黄茅潭的 SCP 计数的影响是巨大的。据此将黄茅潭 SCP 计数的阶段性跃迁分别定为 1958、1976、1985、1992 和 2002-2003 年。由此厘定了 1953-1954、1963-1964、1958、1976、1985、1992 和 2002-2003 年 7 个时标节点。

HMT-01 岩芯的过剩 ²¹⁰Pb_{ex} 活度垂向分布, 随深度增加而显著降低, 但不具有典型的指数变化的特点, ²²⁶Ra 活度较为稳定; 在 33-35g/cm² 的质量深度 (对应孔深 38-40cm) 上, 二者基本达到平衡。分别基于稳定输入通量-稳定沉积物堆积速率 (CFS) 模式、常量初始浓度 (CIC) 模式与恒定补给速率 (CRS) 模式^[23]计算的岩芯年代 (0-30cm 深度) 与

上面获得的时标相比, 相差分别为<3-15 年、<3-12 年与<2-6 年。这种差异, 一般归因于不稳定的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 输入和不稳定的沉积速率等^[16,17]; 以 CRS 模式最小, 视为最优。为此, 岩芯 0-30cm 深度的年龄, 以恒定补给速率 (CRS) 模式计算; 30-80cm 深度的年龄, 以质量深度线性外推; 从而获得整个钻孔的时标 (见图 2)。

2.2 粒度与元素指标的提取与选取

采用矩值 (算术) 方法 (Arithmetic method of moments) 求得了平均粒径 (Mz)、分选系数 (St)、偏态 (Sk) 和峰态 (Ku) (μm 单位, 下同) 等粒度参数^[24], 粒度组份参考了 Udden J.A.^[25] 的分类标准: 3.9、15.6、62.5 μm 为粘土、极细-细粉砂、中-粗粉砂、砂之间的界限。参数端元分析 (parametric end member analysis) 利用 Paterson G A 等^[26] 提供的软件执行, 通过平均决定系数 R^2 (>0.99) 与角偏差 ($<5^\circ$) 确定了 6 个端元组份。上述粒度参数 (4 个)、粒度组份 (包括粘土、细粉砂、中粗粉砂、粉砂、砂含量 (%)) 5 个)、端元组份 (6 个)、C 值 (百分之一含量的粒度) 和中值粒径 (Md) 一起构成了包含 17 个粒度指标在内的粒度指标体系。众所周知的事实是, 粒度指标来自于总和为 100% 的粒度组成体系。

如此, 粒度参数指标, 不论是基于局部信息、还是全局信息, 相互之间均存在一定的关联^[24,26-29], 揭示了粒度指标具有此消彼长、相互影响、相互制约的特点^[24,26]。考虑到 XRF (X 射线荧光光谱) 法所测试的常量元素均具有约 2-5% 的误差, 且绝对含量越低, 误差也就越大。本研究只考察了 Rb_2O 、 V_2O_5 、 ZnO 、 BaO 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 SO_3 、 MnO 、 P_2O_5 、 Na_2O 、 TiO_2 、 SiO_2 、 ZrO_2 、 SrO 等 17 个含量较高的元素, 由这些元素的质量组份组成了元素指标体系。与粒度指标体系相似, 碎屑堆积的元素含量, 同样可以看成质量总和为 100% 的一个封闭体系; 元素的组成, 因为粒度组成、矿物含量的差异及元素之间不同程度的类质同象关系等, 同样存在密切而复杂的关系, 也并非相互独立^[13]。

2.3 信息指数的提取

基于粒度、元素指标体系, 分别提取了 Ai-1、Ai-2 两种信息指数系列。基于粒度指标体系提取的指数系列标记为 Ai (G) -1、Ai (G) -2; 基于元素

指标体系提取的指数系列标记为 Ai (E) -1、Ai (E) -2。

指数 Ai (G) -1 的获取: 首先, 对上述 17 个粒度指标序列分别进行 Max-Min 标准化; 之后, 考察标准化的各指标相对于 3 点滑动平均的异常变化情况; 约定高于滑动平均值的 5% (或 10%) 视作正异常, 低于滑动平均值的 -5% (或 -10%) 视作负异常, 分别对这 2 种异常赋值为 1、-1; 对各粒度指标对应的各样品点赋值的绝对值累加得到粒度异常指数 Ai (G) -3-1 序列 (3 代表 3 点滑动平均)。按照滑动跨度 (点数) (3、5 与 7 点) 和异常阈值的界定 (5%、10%), 分别提取了 6 个粒度异常指数 Ai (G) -1: Ai (G) -3-5-1、Ai (G) -3-10-1、Ai (G) -5-5-1、Ai (G) -5-10-1、Ai (G) -7-5-1、Ai (G) -7-10-1。同理获取 Ai (E) -1 系列的 6 个指数, 与粒度异常指数相似, 分别命名为: Ai (E) -3-5-1、Ai (E) -3-10-1、Ai (E) -5-5-1、Ai (E) -5-10-1、Ai (E) -7-5-1、Ai (E) -7-10-1。

指数 Ai (G) -2 的提取: 考察了上述 17 个粒度指标两两之间相互关系的异常情况, 分别在 99.9999%、99.99%、99.95%、80%、30% 的置信水平上, 累加统计了各置信区间之外的异常样品点 (图 3), 由此构建了粒度异常指数 Ai (G) -2。对应上述置信水平, 分别命名为 Ai (G) -1-2、Ai (G) -2-2、Ai (G) -3-2、Ai (G) -4-2、Ai (G) -5-2。同理, 提取了 5 个元素异常指数 Ai (E) -2, 对应上述置信水平, 分别命名为 Ai (E) -1-2、Ai (E) -2-2、Ai (E) -3-2、Ai (E) -4-2、Ai (E) -5-2。根据回归曲线对散点图中各指标之间的拟合优度, 指标之间可以是简单的线性关系, 也可能是复杂的非线性关系。但统计结果表明, 无论是线性还是非线性拟合, 异常指数的绝对数值可能有所不同, 但时间序列上的变化, 基本是一致的 (详细情况拟另文专门论述), 本研究拟基于线性拟合 (图 3) 统计各异常指数。

2.4 异常指数序列变化及其特点

异常指数 Ai (G) -1 系列的若干指数, 相同的滑动点数之间, 变化较为相似, 相互之间的相关系数分别为 0.87 (3 点)、0.73 (5 点)、0.84 (7 点) ($n=78$); 而不同的滑动点数之间, 指数差异较大 (图 4), 相互之间的相关系数为 0.45~0.69, 但均为显著的正相关关系。异常指数 Ai (E) -1 系列的

若干指数之间的关系, 与此有所差异(图 5): 相同的滑动点数之间, 不同的滑动点数之间, 相关系数均在 0.35~0.70 之间, 无规律性差异。异常指数 $A_i(G)$ -2 系列的若干指数, 置信水平从 99.999%、99.99%、99.95%、80%到 30%, 是逐渐变化的(图 4、5), $A_i(G)$ -5-2 值最大, 相对变化幅度最小, $A_i(G)$ -1-2 值最小, 相对变化幅度最大。也就是, 置信水平高, 异常点较少, 异常指数相对变化幅度加大; 置信水平低, 异常点较多, 异常指数相对变化幅度减小。

异常指数 $A_i(E)$ -2 系列的若干指数, 变化情况与此相仿(图 4、5)。不难想象, 随着置信水平降低到极小值(近零值), 所有的样品点都可被视为异常点, 异常指数就是一条直线, 没有变化; 而置信水平提高到极大值(近 100%), 所有的样品点都是正常点, 不会提取到异常点。这两种极端情况, 都没有现实意义。理论上, 只有在某种置信水平约束下^[30], 统计的异常点中, 尽量剔除了正常点而最大可能地保留了异常点, 这种异常指数可能就具有某种环境意义。

由上分析, 根据统计的置信水平($\geq 90\%$)设置和指数的变化幅度特点^[30], 本文选择置信水平 99.9999%约束下获得的异常指数 $A_i(G)$ -1-2、 $A_i(E)$ -1-2 分别作为 $A_i(G)$ -2 和 $A_i(E)$ -2 的代表; 并分别选择与 $A_i(G)$ -1-2、 $A_i(E)$ -1-2 最相关的 $A_i(G)$ -3-10-1、 $A_i(E)$ -3-10-1 (3 点滑动平均、阈值为 10%的情形)作为 $A_i(G)$ -1 与 $A_i(E)$ -1 的代表。

2.5 异常指数与 C. E 1950-2010 年间降水与温度对比特点

HMT-01 孔粒度和元素地球化学特点已在相关文献^[18,19]有所论述, 在此不再赘述。并且, 为便于对比阐明异常指数的特点及其气候环境意义, 下文只关注附近九江气象站点有实测降水与温度记录的 C.E 1950-2010 时段; 此时段 HMT-01 钻孔的分辨率约 2.1 年/样品。

图 6 揭示, 在 HMT-01 孔年代误差范围内(2-5 年), 粒度异常指数 $A_i(G)$ -3-10-1、 $A_i(G)$ -1-2 能辨识出 C. E 1950-2010 年 19 个相对丰水、较丰水年份(组)中的 13 个, 分别为 1950、1954、1957、1961、1967、1973、1983、1986、1989-1990、1998-1999、

2002 和 2008、2010 年; 18 个相对枯水、偏枯水年份(组)中的 13 个, 分别为 1952、1955-1956、1958、1963、1968、1971、1978、1986-1987、1988、1992、2000-2001、2007、2009 年。相对丰水、较丰水年份, 异常指数增大, 而相对枯水与偏枯水年份, 异常指数减小; 异常指数与降水成正相关关系。基于上述 26 个关键对应(图 6), $A_i(G)$ -3-10-1、 $A_i(G)$ -1-2 与九江降水显著线性相关, 相关系数 r 分别达到了 0.72、0.81 ($n=26$), 分别通过了 $P<0.001$ 的显著性水平检验。并且, 在十年-数十年尺度上, $A_i(G)$ -3-8-1、 $A_i(G)$ -1-2 均指示 1968 年前后是 C. E 1950-2010 年间九江地区降水的转折点, 在这之前降水偏低并渐趋减少, 之后则渐趋增加(图 6)。这与基于长江中下游区域降水序列的阶段分析、跃变和趋势性分析所得到的结论是相似的^[31,32]。而一般粒度参数指标, 如平均粒径、分选系数及砂含量(%)等, 虽然也能辨识一些极端水文年份(组), 但往往表现出显著的不确定性和不稳定性特征。不确定表现为指标指示不显著、不明确, 辨识能力低; 不稳定表现为粒度的变粗(细)、分选变好(差), 并不总是对应相对丰(枯)水、偏丰(枯)水年份。例如, 上述 13 个相对丰水、偏丰水年份组, 有 3 个对应为粒度变细、分选变好、6 个无明显响应, 4 个为粒度变粗、分选变差; 13 个相对枯水、偏枯水年份组, 有 5 个为粒度变细、分选变好、2 个无明显响应, 6 个为粒度变粗、分选变差。这是传统粒度指标对洪水响应的特点^[8,9,18], 辨识能力远低于粒度异常指数, 即便是确定性地辨识出了某种水文情势的变化, 但指标尚具有某种程度的不稳定性。

图 7 揭示, 在上述对应关系基础上(图 6), 元素异常指数 $A_i(E)$ -3-10-1 与 $A_i(E)$ -1-2 同样能辨识出 C. E 1950-2010 年间上述各 13 个相对丰水、偏丰水年份组和相对枯水、偏枯水年份组。与粒度异常指数不同的是, 元素异常指数具有显著的不稳定性, 这种情况与一般粒度指标(如平均粒径、分选系数等)相似。就 $A_i(E)$ -3-10-1 而言, 表现为: 13 个相对丰水、偏丰水年份, 8 个对应元素异常指数降低、5 个对应异常指数升高; 就 $A_i(E)$ -1-2 而言, 表现为: 13 个相对枯水、偏枯水年份, 5 个对应元素异常指数降低, 8 个对应升高。元素异常指数 $A_i(E)$ -3-10-1 与九江降水之间为负相关, 相

关系数可达-0.35 (n=26), 通过了 $P<0.005$ 的显著性水平检验; $A_i(E)$ -1-2 与九江降水为弱相关, 相关系数仅为 0.04 (n=26)。而 Ti、Zr/Rb 等可用来反演洪水水文的重元素、元素比值^[33,34]等指标, 对极端降水有一定响应, 但是它们对降水等水文情势的响应, 与一般粒度指标一样, 均具有一定程度的不确定性和不稳定性特征。

总之, 不论是粒度异常指数还是元素异常指数, 均具有对极端降水等洪水水文情势的良好辨识能力。其中, 粒度异常指数 ($A_i(G)$ -3-8-1、 $A_i(G)$ -1-2) 与降水等水文情势信息存在稳定的正相关关系, 相关系数通过了 $P<0.001$ 的显著性水平检验; 元素异常指数 $A_i(E)$ -3-10-1 与降水存在稳定的负相关关系, 相关系数通过了 $P<0.005$ 的显著性水平检验。元素异常指数 $A_i(E)$ -1-2, 尽管对极端降水等水文情势信息具有较强的辨识能力, 但具有一定程度的不确定性和不稳定性。而经常应用的一般粒度指标和元素指标等, 尽管也具有一定的辨识能力, 但均具有显著的不确定性和不稳定性特征。不过, 值得注意的是, 不论是粒度异常指数还是元素异常指数, 均对温度的变化没有规律性响应 (图 6、7)。

据此, 研究基于敏感性与稳定性最好的 $A_i(G)$ -1-2, 在 HMT-01 孔平均 2.1 年/样品分辨率的基础上, 以异常指数辨识出的上述 26 个水文年份 (组) 为基准点, 通过线性内插获得其他年份的 $A_i(G)$

-1-2 值, 重建了 C. E 1950-2010 流域逐年降水记录 (图 8) (1σ 的标准偏差)。与 30km 外九江气象站同期实测降水 3 年滑动平均相关系数为 0.58 (n=51), 通过了 $P<0.001$ 的显著性水平检验, 二者相差均小于 250mm/a, 九江降水基本处于重建降水的 1σ 的标准偏差范围之内, 其最大误差, 可能更多来自于定年和钻孔的分辨率 (较低); 重建的流域降水量记录, 清晰揭示了长江中游年代际降水的波动特征^[18,31,32]。研究初步实现了基于碎屑沉积粒度信息对降水等水文情势信息的定量重建。

3 讨论与结论

3.1 异常气候事件及其背景环境的形成

在沉积序列中, 任何一个指标, 不论是物理的、化学的亦或是生物的, 对于气候、环境的指示, 都是非线性的、复杂的, 具有一定程度的不确定性, 这其实正是地球表层系统复杂特点^[35,36]的具体体现。但是, 在特定流域, 一定的地质、地貌与土壤环境下, 某些常态洪水水文环境的频繁出现, 使流域水文特点、土壤侵蚀、碎屑物质及其来源等具有一定程度的稳定性, 从而形成所谓的常态洪水水文情势, 及其相关的碎屑侵蚀、搬运及沉积环境; 其碎屑堆积的颗粒组成、指标参数及其相互关系也就相对稳定; 由此, 造成矿物组成及元素组成、指标参数及其相互关系也就相对稳定^[8,13], 而具有一定的特征。

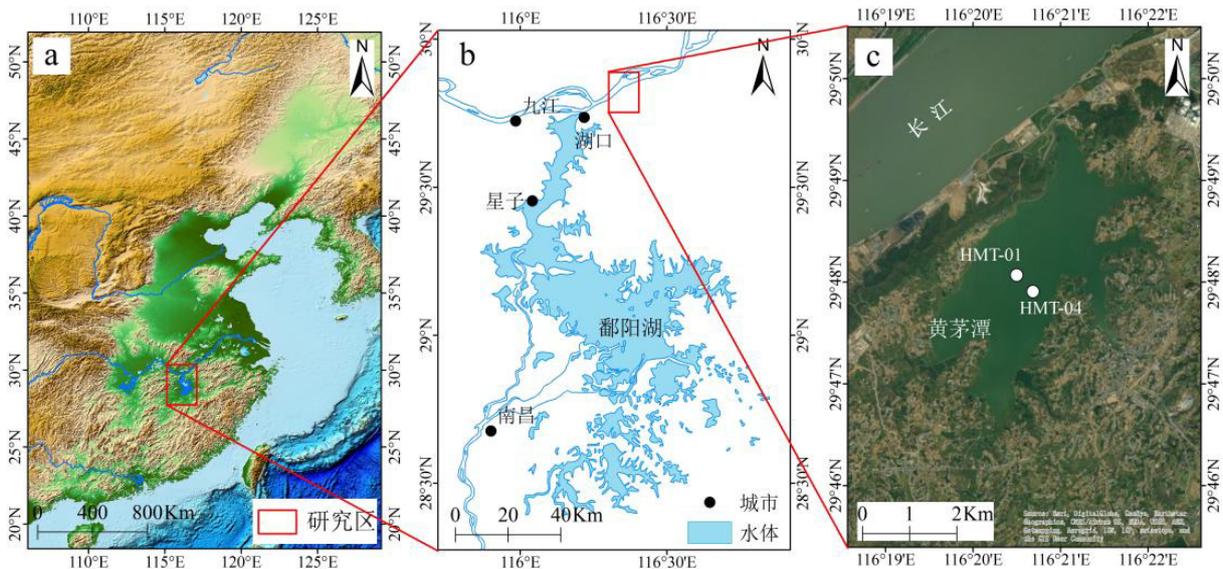


图 1 黄茅潭及其两个湖泊钻孔的位置图 (HMT-01、HMT-04)

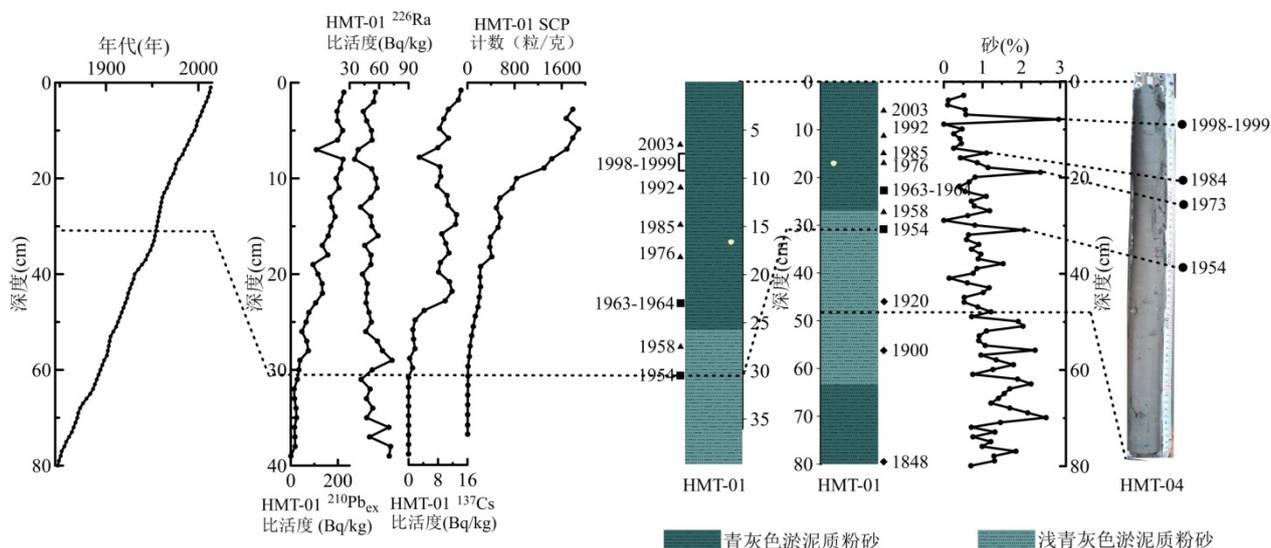


图 2 HMT-01、HMT-04 钻孔地层剖面及其年代控制

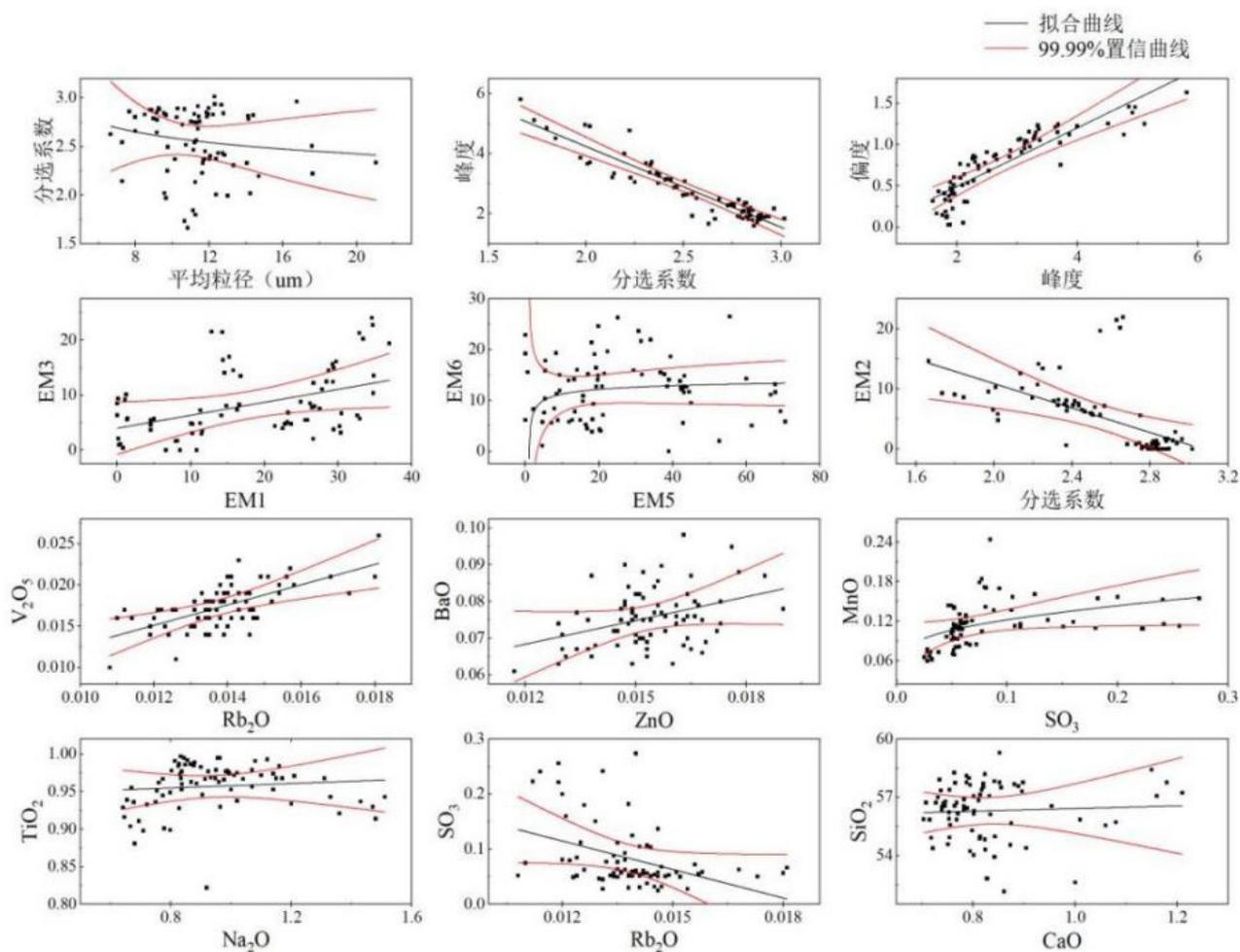


图 3 HMT-1 剖面各粒度、元素指标散点图 (置信区间之外为异常点) (仅列 12 对, 其余略)

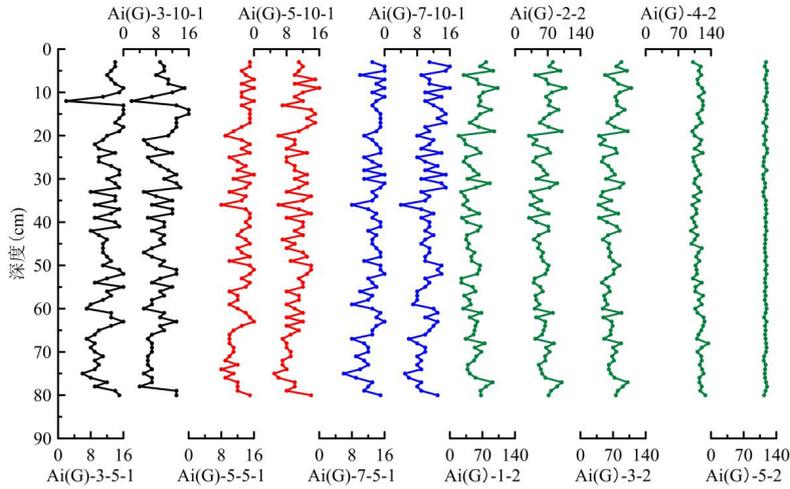


图 4 HMT-01 钻孔记录的粒度异常指数 Ai (G) -1 与 Ai (G) -2 变化特点对比

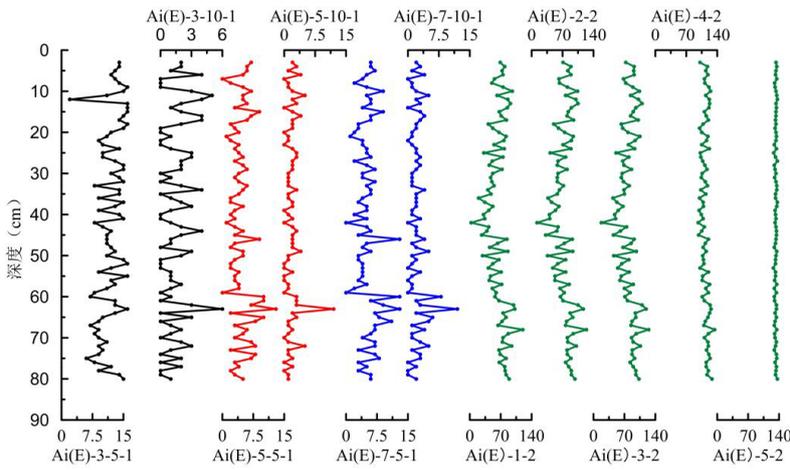


图 5 HMT-01 钻孔记录的元素异常指数 Ai (E) -1 与 Ai (E) -2 变化特点对比

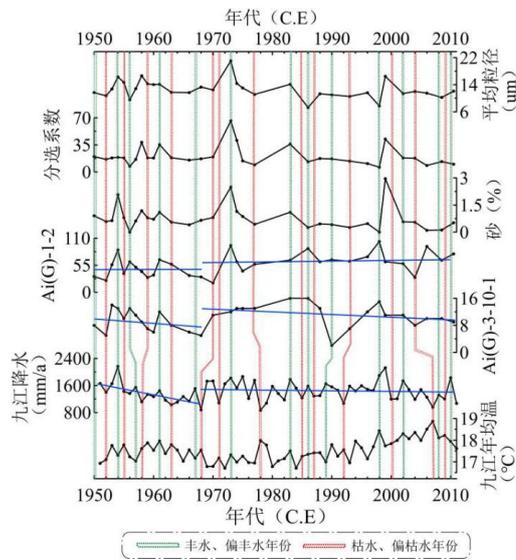


图 6 HMT-01 钻孔记录的 C.E 1950-2010 年间砂 (%)、分选系数、平均粒径 (μm)、粒度异常指数 Ai (G) -3-10-1、Ai (G) -1-2 及九江降水量与温度对比关系

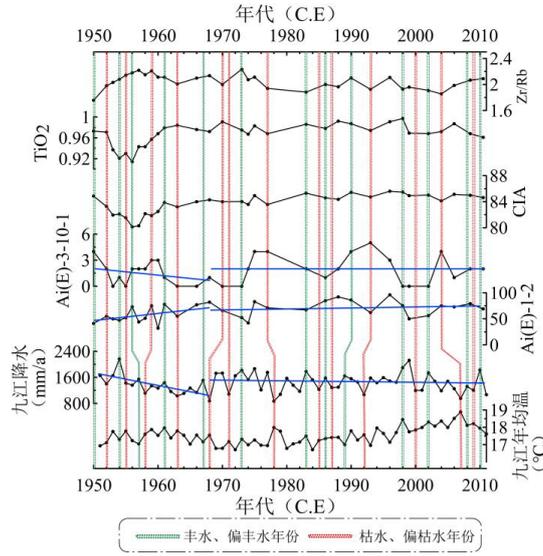


图 7 HMT-01 钻孔记录的 C.E 1950-2010 年间 CIA、TiO₂ (%)、Ai (E) -3-10-1、Ai (E) -1-2 与 C.E 1950-2010 年间九江降水 (mm/a) 与对比关系

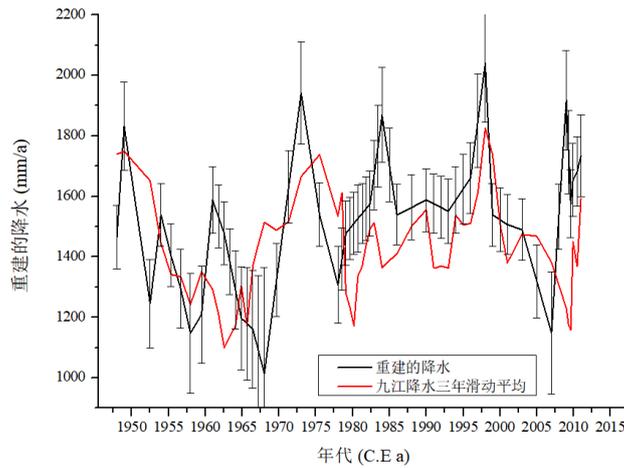


图 8 基于异常指数 Ai (G) -1-2 重建的黄茅潭流域 C.E 1950-2010 年间逐年降水及其与九江实测降水 3 年滑动平均的关系

众多监测数据显示^[37,38], 东亚季风区河湖悬浮泥沙, 主要来自于汛期(雨季), 这期间大大小小的洪水所携带的泥沙往往占全年的 90%以上。这些洪水每年均有几次到十几次, 它提供了一个常态洪水水文环境背景及与此有关的碎屑侵蚀-搬运-沉积的表生作用背景。而叠加于这种常态背景环境中的是一些异常洪水水文事件, 包括几年、几十年甚或更长时间尺度上一遇的大洪水水文年份(事件)和极端低洪年份(事件); 前者如中华人民共和国国家标准“水文情报预报规范”(GB/T22482-2008)中的 1998-1999、1954 年这类丰水年, 1980、1983、

1994 年这类偏丰水年, 后者如 1961-1962、1975、2006 年这类偏枯、枯水年份。因其洪水流量、强度及碎屑沉积来源(包括地理范围及土壤侵蚀深浅的变化)等因素可能异于常态洪水水文事件, 而造成碎屑沉积的粒度总体(粒度指标体系中的各个指标)和元素总体(元素指标体系中的各元素含量)结构出现变化。这样, 流域洪水水文情势可以划分为近常态洪水水文情势背景和异常洪水水文情势事件两种模态。

近常态洪水水文背景, 其碎屑堆积粒度总体(也就是粒度指标体系)结构具有一定的特征。降水升

高及其相关水文情势（湖泊水位、水文流量）的变化，引起碎屑堆积粒度指标体系的结构发生变化、粒度异常指数相对于近常态洪水水文背景增大；降水减少及其相关水文情势的减弱，同样引起碎屑堆积粒度指标体系的结构变化、粒度异常指数相对于近常态洪水水文背景降低。这便实现了在近常态洪水水文背景及其与此有关的表生作用（侵蚀-搬运-沉积）背景中考察异常降水及其相关水文情势的变化。

也就是说，自然状态下，降水及其相关水文情势可以划分为近常态背景和异常事件（包括高降水和低降水事件）；只要通过一致的统计学分析和一致的数学编辑，将水环境直接影响的粒度指标体系进行量化，定义近常态洪水水文背景情势和高降水、低降水的洪水水文情势的数字化特征，就可以实现对降水及其相关水文情势的定量重建。

就方法学而言， $A_i(G)-1$ ，统计的是相对于3、5、7点等滑动平均的异常变化，其背景是几年~十年际尺度的，是短尺度的。 $A_i(G)-2$ ，统计的是相对于研究所涉的整个时段的某种置信水平（或者说某种“平均”状态）下的异常变化，其背景是百年甚或更长时间尺度的，相较而言，是长尺度的。这体现了 $A_i(G)-1$ 与 $A_i(G)-2$ 的某种差异，但它们均指示了指标体系的某种程度的结构性变化，属于系统学指标；与传统粒度指标甚至其他建立在生物学、物理学和化学的因果联系上的指标相比，它们是一类新型指标。

相较而言，元素异常指数变化有些复杂，异常指数的增大（或缩小），并不单调地对应降水的升高（或降低）。这可能在于，相对于粒度异常指数，元素异常指数对水文情势的响应是间接的。降水和水文情势往往直接影响的是粒度组成，通过粒度组成而间接影响矿物和元素组成，而粒度组成与矿物组份、元素组成之间存在着复杂的关系^[8]。另外，元素异常指数可能还受温度等其他气候环境因素的影响，其近常态背景和异常事件模态，可能不像基于降水及其相关水文情势定义的那样简单，需要重新考量。

3.2 表象源于结构

各种粒度参数指标，在不同沉积环境下具有多解性，这种多解性无法明确，限制了粒度指标广泛

而深入的应用^[8,9]。但是，作为一个体系，粒度参数指标提供了一个考察降水及其水文情势、水动力过程的独立视角^[8]。降水及其洪水水文驱动的碎屑侵蚀-搬运-沉积的过程，是一个系统内部碎屑粒度各参数指标要素之间相互联系、相互影响、相互作用的自组织过程^[2,39]。这个过程所形成的各指标要素相对于滑动平均的异常变化和指标要素之间在一定的置信区间约束下的相互关系的异常变化，均为相对于某种环境背景的变化，称之为异常指数；同时，它们又指示了粒度指标体系的结构变化，又可称之为体系结构量化指数。与敏感指标（也就是部分指标，如上文所说粒度指标体系中的平均粒径、分选系数，孢粉学中某（些）种属的孢粉含量等）相比，粒度异常指数是基于本文粒度指标体系内全部17个指标获取的；它们的构建，并不建立在物理学、化学或生物学的因果联系上，但它体现了粒度指标体系的某种结构性变化，属于系统学指标。

这种实践的哲学基础或者说理念，就是所谓的结构与功能、结构与表象、形式与内容等的相关系统学与哲学概念^[40,41]所涉及的范畴内容。系统学认为，开放系统演化过程中，系统诸要素之间形成了紧密的相互联系、相互影响和相互作用，彼此改变着对方的状态和状态特征，其结果就是“涌现”出个体和要素间简单的互动行为所无法预知的复杂样态的宏观有序情势^[39,40]。这种实践往往在生物学与医学领域应用较多^[42-45]，其量化方法与方式各有不同，但其根本目的，在于阐述体系的功能与结构特点。在地质学领域，鲜有涉及。主要在于静止的结构量化既无意义也无必要。随着全球变化的深入，沉积序列上的指标体系（例如孢粉、粒度、元素等）的连续变化，为深入研究表生作用系统中相关体系的结构与表象之间的关系，提供了理论可能与现实意义。

在这里，气候环境要素之一，降水及其有关的水文情势（譬如流量、水位等）这种表象，源于它控制和影响的碎屑沉积粒度指标体系的结构变化。这表明，传统沉积学上经常应用的粒度组份、粒度参数等指标这种“相”成分^[1,2]，不一定对水文环境过程总具有敏感响应，但是，指示碎屑沉积粒度指标体系的结构量化指标这种系统指标却具有对降水及其水文情势的敏感响应，这深化了“相”的指示能力，同时也

实证了结构涌现秩序的系统学论断^[40]。

当然, 基于这一思路提取开展相关研究之前, 还需基于更多地层或现场观测资料的进一步深化论证, 包括厘清异常状况产生的机理和过程、异常指数表征系统结构变化的精度、其适用范围等问题, 有待逐步开展。另外, 元素异常指数的含义及其与气候环境的联系, 也尚待明确。

4 结论

基于 17 个粒度指标 (粒度指标体系) 和 17 个元素 (含量) 指标 (元素指标体系), 在各指标的异常变化及指标两两相互关系的异常变化的基础上, 建构了 A_i-1 、 A_i-2 两个系列的体系 (粒度指标体系和元素指标体系) 结构量化指数或者异常指数, 尝试通过研究指标体系的结构变化, 来研究气候环境变化特点。

研究认为, 表征粒度和元素指标体系结构性变化的结构量化指数 $A_i(G)-3-8-1$ 、 $A_i(G)-1-2$ 和 $A_i(E)-3-8-1$ 、 $A_i(E)-1-2$ 均具有对降水等水文情势的敏感响应, 显著高于一般粒度和元素指标。其中, $A_i(G)-1-2$ 、 $A_i(G)-3-8-1$ 与附近九江降水相关关系显著。

研究基于 $A_i(G)-1-2$ 定量重建了流域 C.E 1950-2010 年间的年降水 (mm/a) (1σ 的标准偏差), 与九江监测降水 3 年滑动平均极为吻合; 研究初步实现了基于碎屑沉积粒度信息对降水等水文情势信息的定量重建。

参考文献

- [1] Bradley R S. Paleoclimatology: reconstructing climates of the Quaternary[M]. Amsterdam: Elsevier, 1999: 329-332.
- [2] Reading H G. Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy[M]. New Jersey: Wiley-Blackwell, 1996: 112-126.
- [3] Kang S, Xu Y, You Q, et al. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau[J]. Environmental Research Letters. 2010, 5(1): 15101.
- [4] Bauer E, Claussen M, Brovkin V, et al. Assessing climate forcings of the Earth system for the past millennium[J]. Geophysical Research Letters. 2003, 30(6): 1276.
- [5] Liepert B G. The physical concept of climate forcing[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change. 2010, 1(6): 786-802.
- [6] Wang P, Jian Z. Exploring the deep South China Sea: Retrospects and prospects[J]. Science China Earth Sciences. 2019, 62(10): 1473-1488.
- [7] Atwood A R, Donohoe A, Battisti D S, et al. Robust longitudinally variable responses of the ITCZ to a myriad of climate forcings[J]. Geophysical Research Letters. 2020, 47(17): e2020G-e88833G.
- [8] Schillereff D N, Chiverrell R C, Macdonald N, et al. Flood stratigraphies in lake sediments: A review[J]. Earth-Science Reviews. 2014, 135: 17-37.
- [9] Lapointe F, Francus P, Lamoureux S F, et al. 1750 years of large rainfall events inferred from particle size at East Lake, Cape Bounty, Melville Island, Canada[J]. Journal of Paleolimnology. 2012, 48(1): 159-173.
- [10] Shao J, Yang S, Chao L. Chemical indices (CIA and WIP) as proxies for integrated chemical weathering in China: Inferences from analysis of fluvial sediments[J]. Sedimentary Geology, 2012, 265-266(6):110-120.
- [11] Sheldon, N.D., Tabor, N.J., 2009. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols. Earth-Science Reviews 95, 1-52.
- [12] Nesbitt, H.W., Markovics, G., 1997. Weathering of granodioritic crust, long term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliclastic sediments. Geochimica et Cosmochimica Acta 61, 1653-1670.
- [13] Garzanti E, Andò S, France-Lanord C et al., Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments 1. Bedload sand (Ganga-Brahmaputra, Bangladesh). Earth and Planetary Science Letters, 2010, 299: 368-381.
- [14] 江西省湖口县志编纂委员会.湖口县志[M].南昌:江西人民出版社,1992:1-694. [Compilation Committee of Hukou County Chronicle of Jiangxi Province. Hukou County Chronicle[M]. Nanchang: Jiangxi People's Publishing House, 1992:1-694.]
- [15] Jia Y, Lai Z, Zhang J, et al. Chronology and provenance of aeolian sediments from Poyang Lake area in the middle reaches of the Yangtze River in China[J]. Quaternary Geochronology. 2012, 10: 44-49.

- [16] Appleby P G. Radiometric dating of sediment records in European mountain lakes[J]. *Journal of Limnology*. 2000, 59: 1-14.
- [17] Arnaud F, Lignier V, Revel M, et al. Flood and earthquake disturbance of 210Pb geochronology (Lake Anterne, North French Alps)[J]. *Terra Nova*. 2010, 14: 225-232.
- [18] 冷雪, 吴霜, 王昕梅, 等. 赣北黄茅潭近代湖泊 137Cs 蓄积特点、SCP 计数和事件性沉积及其对 210Pb 计年的修正[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(05): 944-951. [Leng Xue, Wu Shuang, Wang Xinmei, et al. 137Cs buildup, dating, and tuning for the recent lake sediment in Huangmaotan lake, Jiangxi, South China[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2017, 48(05): 944-951.]
- [19] 吴霜, 刘倩, 曹向明, 等. 赣北黄茅潭湖泊沉积记录的 240 年以来古洪水事件[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(11): 1413-1422. [Wu S, Liu Q, Cao X M, et al. 2017. A 240-year sedimentary record of paleoflood events from the Huangmaotan Lake, northern Jiangxi Province[J]. *Progress in Geography*, 36(11): 1413-1422.]
- [20] Rose N L. A note on further refinements to a procedure for the extraction of carbonaceous fly-ash particles from sediments[J]. *Journal of Paleolimnology*. 1994(11): 201-204.
- [21] Rose N L. Spheroidal Carbonaceous Fly Ash Particles Provide a Globally Synchronous Stratigraphic Marker for the Anthropocene[J]. *Environmental Science & Technology*. 2015, 49(7): 4155-4162.
- [22] 齐永青, 张信宝, 贺秀斌, 等. 中国 137Cs 本底值区域分布研究[J]. *核技术*, 2006, 29(01): 42-50. [Qi Yongqing, Zhang Xinbao, He xiubin, et al. 137Cs reference inventories distribution pattern in China[J]. *Nuclear Techniques*, 2006, 29(01): 42-50.]
- [23] 万国江. 现代沉积的 210Pb 计年[J]. *第四纪研究*, 1997(03): 230-239. [Wan Guojiang. 210Pb dating for recent sedimentation[J]. *Quaternary Sciences*, 1997, 03: 230-239.]
- [24] Blott S J, Pye K. Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2001, 26(11): 1237-1248.
- [25] Udden J A. Mechanical composition of clastic sediments[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*. 1914, 25(1): 655-744.
- [26] Paterson G A, Heslop D. New methods for unmixing sediment grain size data[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2015, 16(12): 4494-4506.
- [27] Walling D E, Moorehead P W, Anonymous. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment; an overview[J]. *Hydrobiologia*. 1989, 176-177(1): 125-149.
- [28] Royse J R, Chester F. Recognition of fluvial environments by particle-size characteristics[J]. *Journal of Sedimentary Research*. 1968, 38(4): 1171-1178.
- [29] Visher G S. Grain size distributions and depositional processes[J]. *Journal of Sedimentary Research*. 1969, 39(3): 1074-1106.
- [30] 刘爱利, 王培法, 丁圆圆 (编著), 地统计学概论[M], 北京: 科学出版社, 2012, 1-183. [Liu Aili, Wang Peifa, Ding Yuanyuan (Ed.), *Introduction to Geostatistics* [M], Beijing: Science Press, 2012, 1-183.]
- [31] Li Xiaodong, Zhu Kaifen, Qian Weihong. Spatiotemporal Variation of Summer Rainfall over Eastern China during 1880-1999. *Advances in Atmospheric Sciences*[J], 2002, 06: 1055-1068.
- [32] 吕俊梅, 琚建华, 江剑民. 近一百年中国东部区域降水的年代际跃变[J]. *大气科学*, 2009, 33(3): 524-536. [Lü Junmei, Ju Jianhua, Jiang Jianmin. Interdecadal regime shifts of regional precipitation over eastern China during the last 100 years[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*(in Chinese), 2009, 33(3): 524-536.]
- [33] Haug G H, Günther D, Peterson L C, Sigman D M, et al. Climate and the Collapse of Maya Civilization. *Science*, 299 (5613): 1731-1735.
- [34] Dypvik H, Harris N B. Geochemical facies analysis of fine-grained siliciclastics using Th/U, Zr/Rb and (Zr+Rb)/Sr ratios[J]. *Chemical Geology*, 2001, 181(1-4): 131-146.
- [35] Fisher R A, Koven C D. Perspectives on the future of land surface models and the challenges of representing complex terrestrial systems[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2020, 12(4): e2018MS001453.

- [36] de Rosnay P, Polcher J. Modelling root water uptake in a complex land surface scheme coupled to a GCM[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1998, 2(2/3): 239-255.
- [37] Tang Q, Collins A L, Wen A, et al. Particle size differentiation explains flow regulation controls on sediment sorting in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of The Total Environment*. 2018, 633: 1114-1125.
- [38] Wei X, Cai S, Ni P, et al. Impacts of climate change and human activities on the water discharge and sediment load of the Pearl River, southern China[J]. *Scientific Reports*. 2020, 10(1): 1-11.
- [39] Holland J H. *Emergence: from chaos to order*[M]. New York: Oxford University Press, 1998: 78-88.
- [40] 颜泽贤, 范冬萍, 张华夏, 等. 系统科学导论-复杂性探索[M]. 北京: 人民出版社, 2004, 1-480. [Yan Ze xian, Fan Dongping, Zhang Huaxia, et al., *Introduction to System Science-Complexity Exploration*[M]. Beijing: People's Publishing House, 2004, 1-480.]
- [41] 叔本华. 作为意志和表象的世界 (石冲白译) [M]. 上海: 商务印书馆, 1982, 1-698. [Schopenhauer. *the World as Will and Representation* [M]. Shanghai: Commercial Press, 1982, 1-698]
- [42] Cale J A, Teale S A, West J L, et al. A quantitative index of forest structural sustainability[J]. *Forests*, 2014, 5(7): 1618-1634.
- [43] Palágyi K, Tschirren J, Hoffman E A, et al. Quantitative analysis of pulmonary airway tree structures[J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2006, 36(9): 974-996.
- [44] Wilson L Y, Famini G R. Using theoretical descriptors in quantitative structure-activity relationships: some toxicological indices[J]. *Journal of medicinal chemistry*, 1991, 34(5): 1668-1674.
- [45] Kumar A, Kumar P. Construction of pioneering quantitative structure activity relationship screening models for abuse potential of designer drugs using index of ideality of correlation in monte carlo optimization[J]. *Archives of toxicology*, 2020, 94(9): 3069-3086.

版权声明: ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS