

基于封闭湖泊碎屑沉积粒度异常指数定量重建 黄旗海 1885~2010 年间湖面波动*

贾玉连¹ 周淑金¹ 王朋岭² 万智巍³ 凌超豪¹ 申洪源⁴

(1. 闽南师范大学历史地理学院 福建漳州 363000; 2. 国家气象中心 北京 100866; 3. 赣南师范大学地理与环境工程学院 江西赣州 341000; 4. 临沂大学资源环境学院 山东临沂 276000)

摘要 基于沉积序列重建古气候环境是研究全球变化的基础性工作。优选指标应该是各类指标体系中的敏感参数。但是, 各种环境背景变化会模糊其敏感程度, 使重建结果失真。我们创建了一个包含 17 个参数的粒度系统, 由此提供的粒度异常指数对位于东亚季风区农牧交错带的封闭湖泊黄旗海百余年湖面波动进行了定量重建。结果表明: 异常指数与湖面波动具有非常敏感的相关关系, 其敏感程度远高于普通粒度指标。1885~1895 年和 1950~1985 年间为黄旗海高湖面阶段, 1895~1950 年和 1985~2010 年间为低湖面阶段。这一结果与沉积相、流域降水记录、遥感及文献记录显示的结果一致。不过, 对 1990~2010 年而言, 粒度异常指数与湖面波动并不相关, 表明这个阶段的湖面升降原因复杂, 明显是受到了人类活动, 如拦河筑坝、开采地下水等的干扰。本研究创建了基于沉积物粒度异常指数定量重建封闭湖泊湖面波动历史, 对研究全球气候变化提供了方法学参考。

关键词 黄旗海; 湖泊沉积; 粒度异常指数; 湖面波动

中图分类号 P736.4 doi: 10.11693/hyhz20230800178

基于各种沉积档案, 利用物理的、化学的、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(Reading, 1996; Crowley, 2000; Bradley, 2014; 徐兆凯等, 2021)。不论是哪种类型的代用指标, 均为通过一些手段和方法获取的时间序列上一系列相互联系参数指标信息及其组合, 可以称之为(某类)指标体系。物理指标, 如粒度指标体系, 包括了平均粒径、中值粒径、分选系数、偏态与峰态等参数, 砂、粉砂、黏土等组分(Udden, 1914; 成都地质学院陕北队, 1978; Friedman *et al.*, 1978; Blott *et al.*, 2010)及各端元组份(Paterson *et al.*, 2015)等在内的十几个粒度参数指标。化学指标, 如元素地球化学指标体系, 包括了从常量元素 Si、Fe、Al、Mg、Ti 等到微量元素 Zr、Sr、Hf、Nb、Ta 等几十个元素及组合(Gupta *et al.*, 2001; Topal, 2002; White, 2020)。生物指标, 如孢粉指标体系, 则为几种到几十种孢粉

种属的含量及其组合(唐领余, 2016; Chen *et al.*, 2020; Chevalier *et al.*, 2020)。

各指标体系中, 均有一些所谓的敏感指标, 可以更为灵敏地指示气候环境状态及其变化。在粒度指标体系中, 这些指标为平均粒径、中值粒径、分选系数、砂的含量(%)、*C* 值(百分之一粒径, 即从粗粒端累积到占比为百分之一时对应的粒径)等百分位数值及某些端元组分等(Peng *et al.*, 2005; Parris *et al.*, 2010; Yin *et al.*, 2011; Lapointe *et al.*, 2012; Schillereff *et al.*, 2014; Xiao *et al.*, 2015; Lu *et al.*, 2018; Raja *et al.*, 2018); 在元素地球化学指标体系中, 有 Ti 含量、化学蚀变指数(chemical index of alteration, CIA)、Rb/Sr、Al₂O₃/Fe₂O₃ 等指标(Gupta *et al.*, 2001; Haug *et al.*, 2001; Jin *et al.*, 2006; Perri, 2020); 在孢粉指标体系中, 则是一些特定属种的孢粉及其组合(唐领余, 2016; Chevalier *et al.*, 2020; Liang *et al.*, 2020)。

* 国家自然科学基金项目, 41262007 号; 闽南师范大学校长基金项目, 4103/L22013 号。贾玉连, 教授, E-mail: 1476288868@qq.com

收稿日期: 2023-08-30, 收修改稿日期: 2023-11-02

毋庸置疑, 这种选择性地参数指标信息的利用, 确实能定性描述甚至定量重建某些气候环境状态记录及其变化特征; 在全球变化研究中, 这种具有因果关系属性的指标, 得到了广泛的应用。同样毋庸置疑的是, 这种方法也具有某些先天缺陷: 任何气候环境的变化, 都是处在某种背景条件下的变化, 背景条件发生变化, 会影响指标的敏感程度, 使重建结果出现偏差。例如, 在洪水水文记录的沉积学研究中, 由于涉及到包括降水强度、碎屑来源、土壤侵蚀及由此引起的洪水水文过程特点、规模、强度, 水体背景水位、具体沉积点上水环境和沉积环境背景等诸多因素的变化(Lapointe *et al.*, 2012; Schillereff *et al.*, 2014), 对相同强度的洪水水文事件, 某些指标若是对这次水文事件具有敏感的响应, 下次却不一定敏感(Schillereff *et al.*, 2014; 冷雪等, 2017; Wang *et al.*, 2021), 表明指标的敏感性会随着诸多环境背景或者其他不明因素的变化而变化。无法苛求每一次气候环境事件的背景都是一致的, 因此, 也就不能指望优选的指标, 每次都能一致且敏感地响应所有相同或相似的气候环境事件, 这是全球变化指标重建过程中一个普遍现象(贾玉连等, 2023)。

另外, 包括气候、环境状态变化这种系统变化, 涉及到的是地球表层系统中相互联系的诸多因素在结构和功能上全方位的变化(Alley *et al.*, 2003; Bradley, 2014; Bathiany *et al.*, 2018; 徐奎栋, 2021), 而不仅仅是某些敏感信息指标的变化, 而更可能是全员指标及其体系的变化(Bathiany *et al.*, 2018); 只不过背景条件的不同和变化, 某些指标并不敏感(Scheffer *et al.*, 2009)。

能否克服背景条件, 用某一指标体系中全员指标的信息变化来重建气候环境变化? 如何利用全员指标信息来定性, 甚至定量重建气候环境变化? 贾玉连等(2023)首次利用粒度指标体系中 17 个粒度指标, 通过考察各指标在时间序列上滑动平均的变化情况和指标两两之间相互关系(C_{17}^2 种组合)的异常变化, 分别提取了两个系列的异常指数: $A_i(G)-1$ 、 $A_i(G)-2$; 尝试从指标的异常变化和粒度指标体系的结构变化中挖掘气候环境变化信息。对吞吐湖泊碎屑沉积的研究, 发现异常指数对包括降水在内的洪水水文情势等信息具有极为敏感的响应, 甚至可以定量重建某些洪水水文情势信息(贾玉连等, 2023; 周雅文等, 2023), 极大地深化和拓宽了粒度这一沉积学指标的应用, 同时也为全球变化研究中指标信息的提取与应用提供了新的思路和理念。

本研究拟基于内陆湖泊黄旗海约 1885~2010 年间湖泊柱状沉积序列, 利用粒度异常指数来认识东亚季风边缘区封闭湖泊流域气候水文环境的变化特点及人类活动对于区域环境的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

黄旗海($40^{\circ}40' \sim 41^{\circ}00'N$, $113^{\circ}00' \sim 113^{\circ}30'E$)位于内蒙古自治区乌兰察布市察哈尔右翼前旗, 蒙古高原南部边缘地带、东亚夏季风的尾间地区(图 1a)。流域受夏季风和冬季风的相互影响, 冬季受蒙古高压控制, 夏季受大陆低压控制(杨建平等, 2005; 王志超等, 2021), 属于典型的大陆性半干旱气候: 冬季寒冷而干燥, 夏季温凉而多雨。年均气温为 $4.0 \sim 4.5^{\circ}C$, 年均降水量为 $250 \sim 520$ mm, 主要集中在夏季(7~9 月份), 占全年降水量的 79%左右; 年均蒸发量为 $1\ 964$ mm(王永等, 2010)。土壤以栗钙土为主, 半干旱草原植被, 为亚洲季风区农牧交错带生态环境脆弱区(李华章等, 1992)。

流域地势西北高东南低、四周高中间低, 为第三系断陷盆地; 湖盆为较平阔的冲积-湖积平原, 海拔 $1\ 300 \sim 1\ 262$ m, 中心是呈不规则三角形的黄旗海湖泊, 为一封闭的内陆湖泊(图 1b、1d)。湖盆四周环绕变质岩低山、丘陵及玄武岩台地, 平均海拔 $1\ 400 \sim 1\ 550$ m, 最高可达 2 000 余米, 集水面积为 $4\ 511$ km²。流域水系发达, 地表水主要由 6 条入湖河流组成, 最大为泉玉林河与霸王河(图 1b), 是黄旗海的主要水源。20 世纪五、六十年代, 黄旗海尚是一个水域面积为 $110 \sim 130$ km² 的中型湖泊, 近几十年来, 受区域气候变干和拦河筑坝、开采地下水等影响(付意成等, 2017; 潘世兵等, 2017), 湖泊成为仅在夏季可短暂成湖、冬春季完全干枯的季节性湖泊(图 1)。

HQH4 剖面($40^{\circ}48'N$, $113^{\circ}20'E$)大致位于湖泊的几何中心, 于 2010 年 5 月间在湖滩人工挖掘获得(图 1f), 取样深 56 cm。剖面中上部深度 $0 \sim 12$ cm 为灰黄色黏土质粉砂, 湖滩相(冲洪积相); 深度 $28 \sim 52$ cm 为灰黄色黏土质粉砂夹青灰色黏土质粉砂, 湖滩相夹湖相; 其余层段($12 \sim 28$ cm、 $52 \sim 56$ cm)为青灰色黏土质粉砂, 湖相层。为便于计算剖面的质量深度, 研究利用内径为 1 cm (厚) \times 5 cm (宽) \times 6 cm (长)的采样器(多个), 对剖面由上而下系统采样, 样品封装于聚乙烯样品袋中, 待处理。同时, 在湖滩上穿过 HQH4 剖面沿西北-东南方向上布置了一个断面(图 c), 沿断面采集了 24 个湖滩表土样品(1 cm 深), 用于开展对比分析。

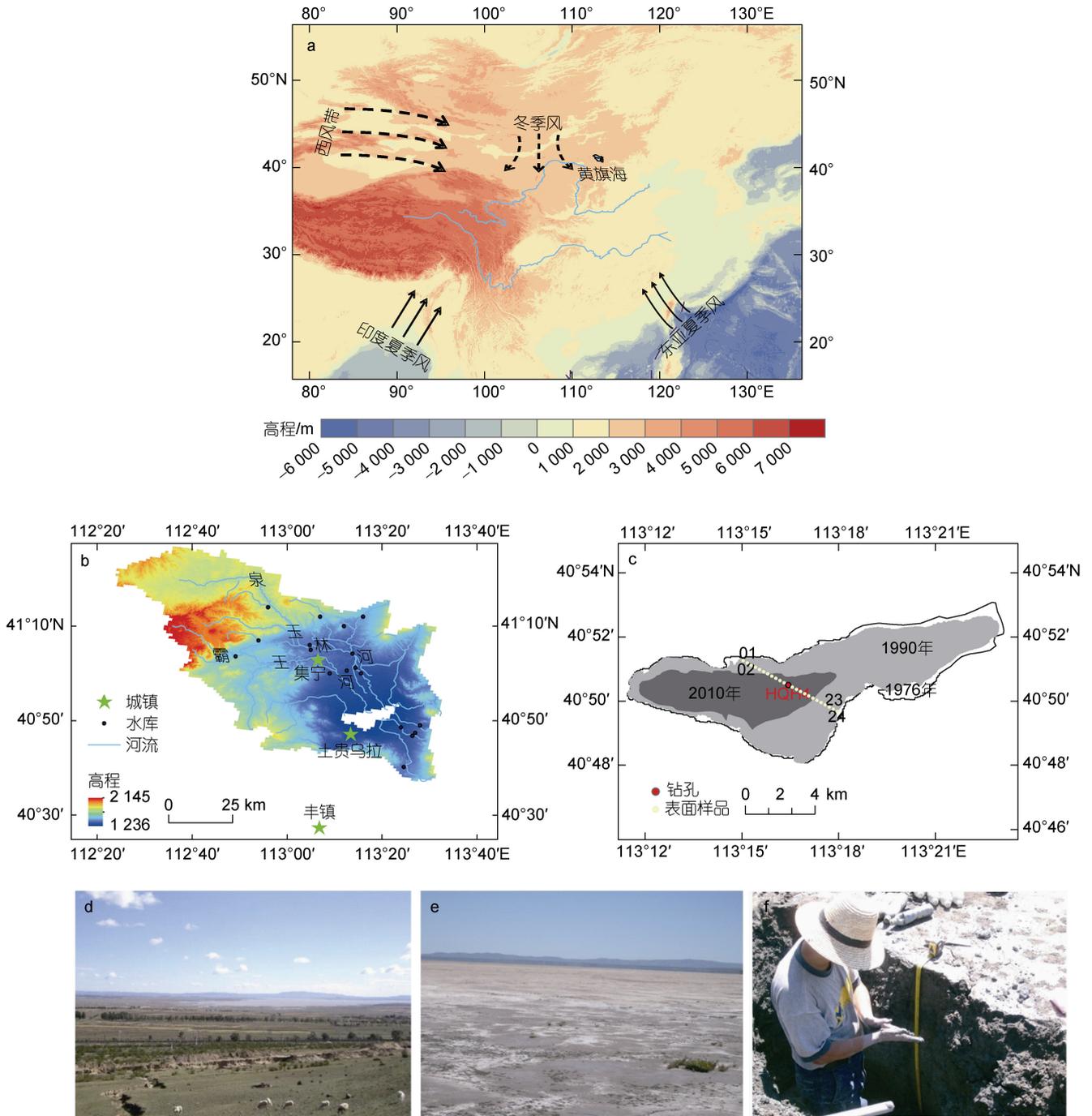


图 1 黄旗海流域地理位置(a), 流域内 19 座水库分布(b), HQH4 剖面、湖床表土样品(HQH-01~24)采集位置及 1976、1990、2010 年湖岸位置(c), 2004 年 8 月份湖区景观(d), 2010 年 5 月份湖区景观(e)及 HQH4 剖面采样(f)

Fig.1 Geographical location of Huangqihai Basin (a), distribution of 19 reservoirs in the basin (b), the HQH4 section and sampling site of present lake-bed sample (HQH-01~24), the lakeshore lines in 1976, 1990, 2010 (c), and geomorphologic landscape in August 2004 (d) and May 2010 (e), and on-site sampling at HQH4 profile (f)

注: HQH 是黄旗海的拼音的首字母

1.2 实验测试

样品全部烘干, 计算剖面的质量深度(g/cm^2), 之后进行了如下三项测试:

放射性元素测试: 称取烘干样品 4~5 g 左右, 研

磨, 全部通过 $200 \mu\text{m}$ 筛网, 充分混合后充填到长 6 cm、直径为 1.5 cm 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 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 、 ^{226}Ra 等放射性元素的活度(Appleby,

2000; Arnaud *et al.*, 2002; 冷雪等, 2017)。计数时间为国际通用的 43 200 s (12 h), 分别在检测谱 46.5、662、295 keV 处读取上述放射性元素的活度, 计算样品的质量活度(Bq/kg)。

粒度测试: 称取烘干样品 0.25~0.30 g, 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 5%的 H_2O_2 去除有机质, 然后分别加 8%的 NaOH、5%的 HCL 去除生物硅、钙质胶结物和钙质生物壳体; 各去除操作完成后, 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。分析在江西师范大学理化测试中心粒度实验室完成, 所用仪器为 HORIBA particle sizer LA-950 (冷雪等, 2017)。

球状碳粒(spherical carbon particle, SCP)计数: 实验步骤遵循 Rose (1994, 2015)提供的改进方法, 考虑到其硅酸盐消解时间偏短(贾玉连等, 2023), 本实验加入 HF 后水浴时间延长至 5 h 并静置 4 h。处理好的样品, 线状均匀构展到载玻片上, 统计 $>20 \mu m$ 的 SCP 的颗粒数, 以每克干质量沉积物所含的颗粒数为标识。

1.3 粒度异常指数的提取

基于 μm 单位, 采用矩值(算术)方法(arithmetic method of moments), 求得平均粒径、分选系数、偏态和峰态等粒度参数(Friedman *et al.*, 1978)。粒度组份参考了 Udden (1914)的分类标准: 3.9、15.6、62.5 μm 为黏土、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 等 (2015)软件求算, 通过决定系数 R^2 (>0.99)与角偏差 ($<5^\circ$)(贾玉连等, 2023)确定了 6 个端元(EM1~EM6)。

上述 4 个粒度参数、5 个粒度组份[包括黏土、细粉砂、中粗粉砂、粉砂、砂(%)等]、6 个端元组份(EM1~EM6)以及包括 C 值、中值粒径等在内的百分位数值, 构成了包含 17 个指标在内的粒度指标体系, 本文将这些指标称为一般粒度指标。大量研究表明, 这些粒度指标, 均具有一定的环境意义(Udden, 1914; Folk, 1966; Royse, 1968; Mcmanus, 1988; Walling *et al.*, 1989; Bernhardt, 1994; Blott *et al.*, 2001; Last *et al.*, 2001; Le Roux *et al.*, 2007; Paterson *et al.*, 2015)。散点图(图 3)显示它们之间均存在一定的关系(甚至是线性相关), 指示粒度指标体系是指标之间相互作用、相互

关联的一个有机体系(Udden, 1914; Folk, 1966; Orton *et al.*, 1993; Blott *et al.*, 2010)。

由此, 基于 56 个样品、17 个指标的粒度指标体系, 获取了 Ai(G)-1、Ai(G)-2 两类异常指数。

异常指数 Ai(G)-1 的获取: 首先, 对各粒度指标分别进行了 Max-Min 标准化处理, 之后, 考察标准化的各粒度指标相对于 3 点或 5 点滑动平均的异常变化情况: 约定高于滑动平均值的 3% (或 4%、5%、6%、8%、10%)视作正异常, 低于滑动平均值的-3% (或 -4%、-5%、-6%、-8%、-10%)视作负异常, 对这 2 种异常情况分别赋值 1、-1(端点的滑动平均值以全样品均值替代), 绝对值累加得到粒度异常指数 Ai(G)-1 序列。按照滑动跨度(点数)(3、5)和界定的异常阈值(3%、4%、5%、6%、8%、10%), 分别提取了 12 个粒度异常指数 Ai(G)-1: Ai(G)-3-3-1、Ai(G)-3-4-1、Ai(G)-3-5-1、Ai(G)-3-6-1、Ai(G)-3-8-1、Ai(G)-3-10-1、Ai(G)-5-3-1、Ai(G)-5-4-1、Ai(G)-5-5-1、Ai(G)-5-6-1、Ai(G)-5-8-1、Ai(G)-5-10-1。由于滑动跨度越大, 时间序列上两端有更多的样品点不能被一致地纳入考察范围, 而本剖面只有 56 个数据点, 故此本文只关注 3 点、5 点滑动平均的情形。

异常指数 Ai(G)-2 的获取: 考察上述 17 个粒度指标两两之间相互关系(C_{17}^2 种组合)的异常情况, 分别在 99.999%、99.99%、99.95%、80%、30%、10%的置信水平上, 累加统计了各置信区间外的样品点数(图 2), 由此构建了粒度异常指数 Ai(G)-2。具体构建过程, 以 99.99%为例, 详述如下: 如图 2 画出 17 个指标两两之间相互关系散点图(136 个), 布设拟合曲线(线性或最优拟合均可, 二者对异常点的数量有影响, 但对最终构建的异常指数的变化无影响, 这一现象已有文章(陈溢林等, 2023)详细论述, 本文不再赘述)和置信区间。置信区间之外的样品点, 视为异常点。读取每一个图上的异常点(也就是样品点), 然后累加同一样品的点数, 获得异常指数(序列)。

对应上述置信水平, 这样获得的异常指数依次命名为 Ai(G)-1-2、Ai(G)-2-2、Ai(G)-3-2、Ai(G)-4-2、Ai(G)-5-2、Ai(G)-6-2。同时统计了 99.999 9%、99.9999%、99.99%、99.95%、99%、95%、90%、80%、70%、60%、50%、40%、30%、20%、10%等各置信水平上的总异常点数(图 3)。

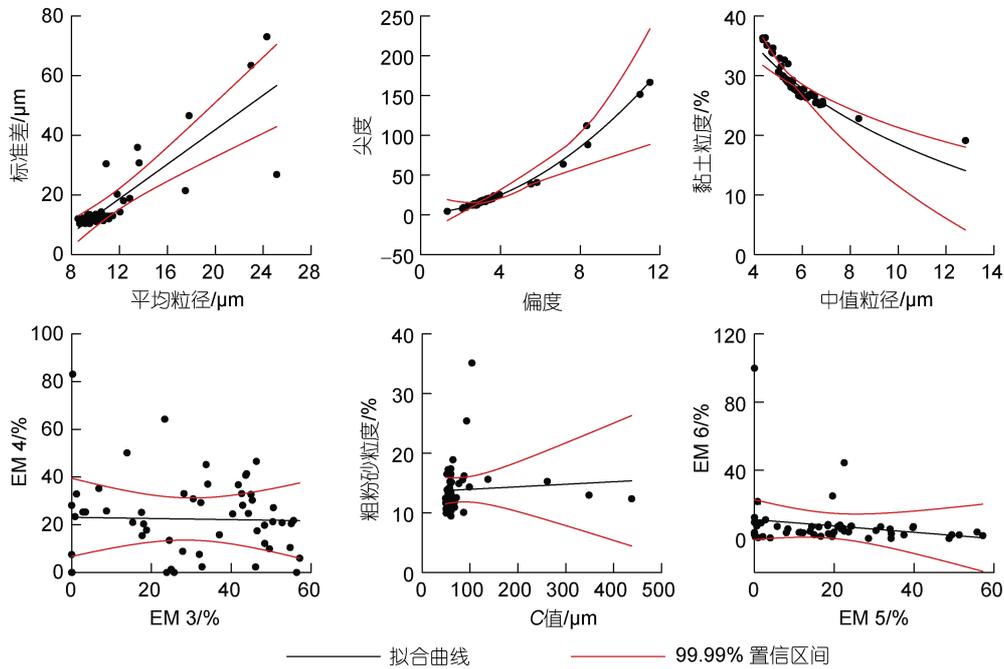


图 2 HQH4 剖面沉积物粒度参数指标散点图、拟合曲线及置信区间(共 136 对, 仅列 6 对)

Fig.2 Scatter plots of grain size indexes of sediments from HQH4 profile, the fit curves, and confidence intervals (only 6 pairs of 136 are listed)
注: EM 表示端元组分

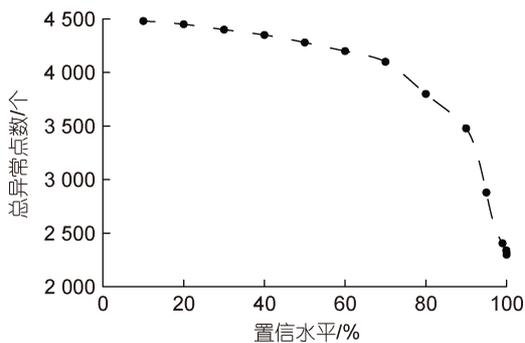


图 3 HQH4 剖面粒度异常指数系列 Ai(G)-2 各置信水平(%) 上的总异常点数

Fig.3 The total number of outliers at various confidence level (%) of Ai(G)-2 set in HQH4 profile

由上述指数的获取方式, 研究认为: Ai(G)-1、Ai(G)-2 并不关注指标本身绝对数值的大小所指示的环境状态(函数)的变化, 而是指示了环境演进过程中指标体系中各指标相对于某种时间尺度的环境状态背景的变化、一定置信水平上各指标之间相互关系的异常变化(贾玉连等, 2023)。也就是说, 不论 Ai(G)-1 还是 Ai(G)-2, 都是对某种背景环境下出现的异常状况的描述。这种描述, 可视作一种特征[或异常者(outliers)]提取(周志华, 2016), 指示的是粒度指标体系在演化轨迹上由各指标的变化而体现的体系的某

种结构性变化, 可以称之为结构量化指标(贾玉连等, 2023); 显著不同于全球变化研究中普遍采用的诸如粒度、孢粉、元素等物理、化学或生物学等具有因果属性的指标, 它属于系统学指标。

1.4 黄旗海过去 200 年来湖面波动、区域降水与流域拦河建坝记录搜集与整理

为了对比分析粒度异常指数、一般粒度指标对于区域降水、湖面波动及区域人类活动(主要是拦河筑坝)的响应特点, 研究还基于史料记录(《内蒙古历代自然灾害史料》编辑组, 1982; 察右前旗自然灾害史料编辑组, 1987; 内蒙古自治区人民政府参事室, 1988; 李华章等, 1992)及遥感图像(时相为夏季七、八月份)解译等, 获取了 1865 年来 69 个时间节点上的黄旗海湖泊面积(km²)、流域水库建成开始蓄水的时间(图 1、7、8)。同时, 搜集整理了东安格利亚大学气候研究中心(Climatic Research Unit in University of East Angli, www.cru.uea.ac.uk) (Harris *et al.*, 2020) (4 000, 11 250)栅格(规格: 2.5°×3.75°)上 1900~1998 年间降水记录、集宁气象站 1953~2010 年间的降水记录(图 7、8)和黄旗海 1980 年以来入湖水量(图 8), 以利于区域气候环境变化的对比分析。其中, 降水与入湖流量均在各自序列上进行了 Max-Min 标准化处理。

2 结果与分析

2.1 剖面地层年代控制

放射性测试表明, HQH4 剖面 ^{137}Cs 活度为 1.3~50.2 Bq/kg, 高值阶段比附近岱海(Zhang *et al.*, 2021)略高, 与新疆博斯腾湖(Chen *et al.*, 2006)大致相当, 显著高于中国南方长江中游诸多湖泊(刘恩峰等, 2009; 冷雪等, 2017)。HQH4 剖面 ^{137}Cs 活度具有单峰蓄积特点, 与附近安固里诺(Yin *et al.*, 2011)相似, 而与岱海(Zhang *et al.*, 2021)有些区别。 ^{137}Cs 首次出现在 31 cm 深度上, 峰值出现在 21 cm 处。结合 ^{137}Cs 在北半球的释放特点(Aoyama, 1988; Ritchie *et al.*, 1990; Appleby, 2008), 这两个时标大致对应 1954 年和 1963 年沉积层节。

根据黄旗海方圆 200 km 范围内近四十年来火电厂机组并网发电情况, 1989~1990 年不足 50 km 远的丰镇电厂 3 个机组的并网发电、2001~2002 年前后

区域火电发展的井喷阶段应是黄旗海 SCP 沉积记年的关键节点。HQH4 剖面 $\text{SCP} \geq 20 \mu\text{m}$ 的颗粒计数的跃升, 基本上对应这两个节点。据此确定了剖面 1990 年、2001 年沉积层节。

HQH4 剖面的过剩 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度, 其垂向分布, 除 22~34 cm 深度上略有增加外, 总体是波动下降的, 但不论是 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度-深度(cm)、还是 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度-质量深度(g/cm^2)剖面, 均不具有经典的指数变化的特点; ^{226}Ra 活度较为稳定, 在约 42 cm 深度上, 与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 基本达到平衡。由此, 基于 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度变化特点, 利用恒定补给速率(constant supply rate, CSR)模式(Appleby, 2008), 也称为恒定通量模型(沈吉等, 2010)。计算了剖面年代(图 4a), 与上面确定的 4 个年代时标(1954 年、1963 年、1990 年、2001 年)相比, 偏差分别为: 3~4、19~20、6~7 与 3~4 a(图 4a), 以 1963 年层节最大。

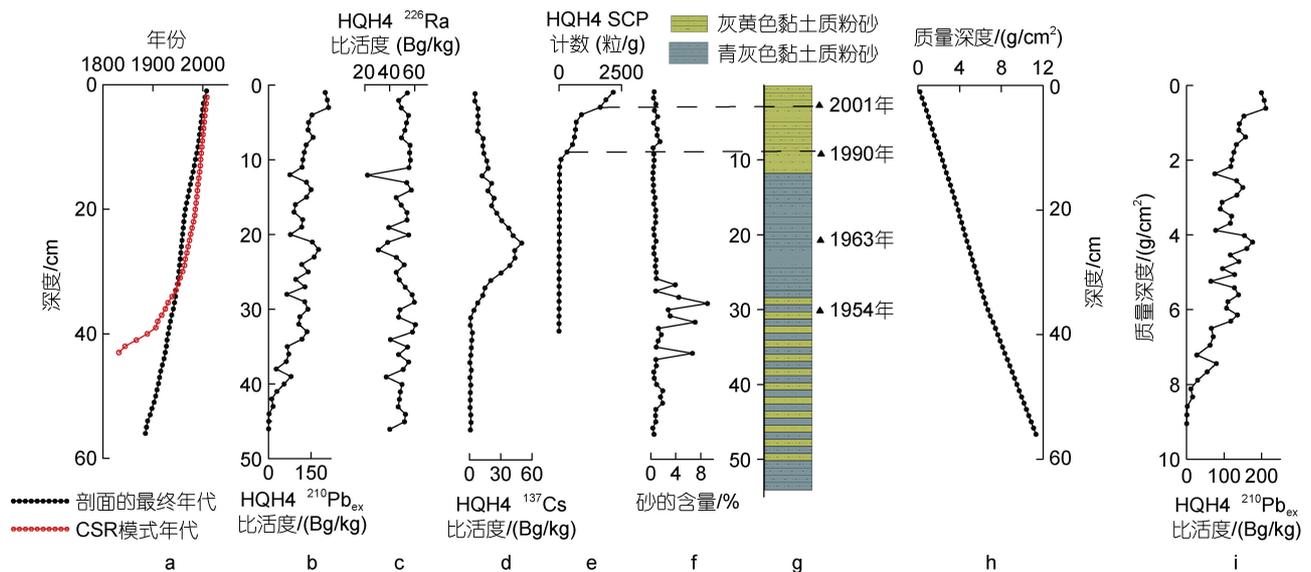


图 4 HQH4 剖面地层剖面及其年代控制

Fig.4 The stratigraphy of HQH4 profile in Huangqi Lake and its age control

众所周知, SCP 极为稳定, 在成岩作用阶段基本上不会发生移动(Rose, 2015)。元素 ^{137}Cs , 化学性质也较为稳定, 然而黏土与有机质结合态, 在碎屑沉积物中存在一定的扩散能力; 在某些特殊水化学环境(例如强碱性水环境和有机质丰富)中, 其分子扩散有时能够改变蓄积峰的位置(Davis *et al.*, 1984; 项亮, 1995; 周爱锋等, 2008)。但在一般水-沙环境中, 尚未观察到这种现象, ^{137}Cs 定年是可靠的(Robbins *et al.*, 1975; Ritchie *et al.*, 1990; 储国强等, 2005)。鉴于上述

1954、1990、2001 年等沉积层节与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 年代具有较好的匹配, 1963~1964 年沉积层节的不匹配推测可能是因湖泊环境变化造成的沉积速率的不稳定性和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 输入通量的变化(其活度在 22~34 cm 深度上较高)而引起的。由此断定基于 ^{137}Cs 和 SCP 确定的上述四个时标 1954 年、1963 年、1990 年、2001 年是可靠的。

由此, 本文以上述四个时标为基点, 基于质量深度内插和外推获得各样品的年代, 从而获得整个剖

面的年代。基于 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的 CSR 模式年代, 仅作为参考年代。图 4a 表明, 整个 HQH4 剖面记录了大约 1885~2010 年期间 125 a 的湖泊沉积。

2.2 异常指数序列变化特点及指数选择

异常指数 Ai(G)-1 系列的若干指数, 相同的滑动点数之间, 指数变化较为相似, 从界定阈值为 3%、4%、5%、6%、8%到 10%, 指数是逐渐变化的。而不同的滑动点数之间, 指数差异较大, 其线型变化差异也较大(图 5)。其中, Ai(G)-3-10-1 与 Ai(G)-5-10-1 线

型变化相似程度最高($r=0.74$), 且具有最大的相对变化幅度、最丰富的变化细节, 可以作为这个系列的代表性指数。

异常指数 Ai(G)-2 系列的若干指数, 置信水平从 99.999%、99.99%、99.95%、80%、30%到 10%, 也是逐渐变化的(图 6)。Ai(G)-6-2 值最大, 相对变化幅度最小, Ai(G)-1-2 值最小, 相对变化幅度最大, 细节变化也更丰富(图 6)。也就是说, 置信水平高, (总)异常点越少(图 3), 指数相对变化幅度越大, 细节变化

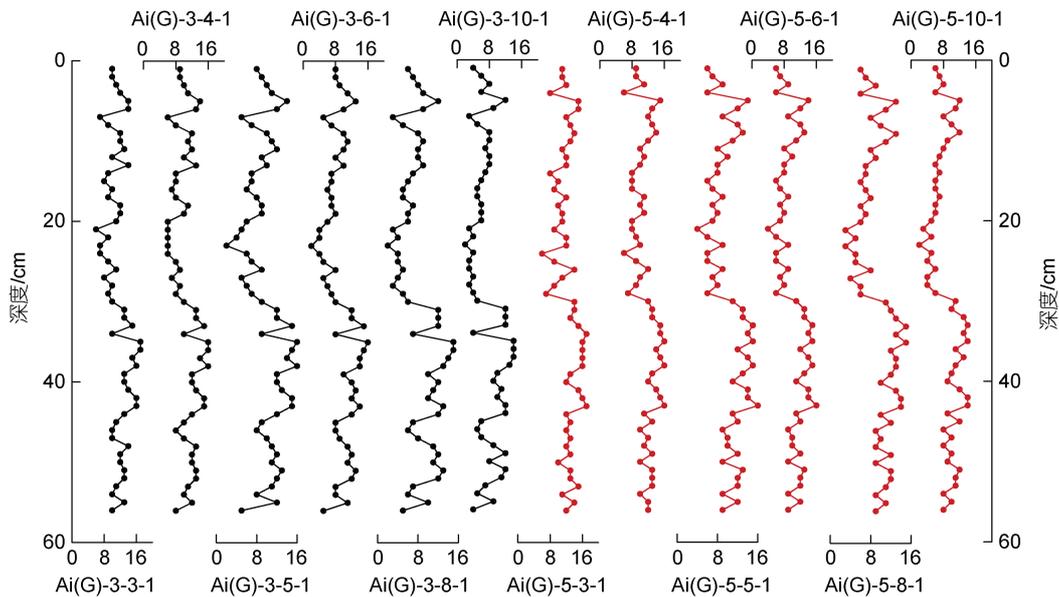


图 5 HQH4 剖面记录的粒度异常指数 Ai(G)-1 系列变化特点

Fig.5 Comparison of variation characteristics of grain size anomaly index (Ai(G)-1 set) of HQH4 profile

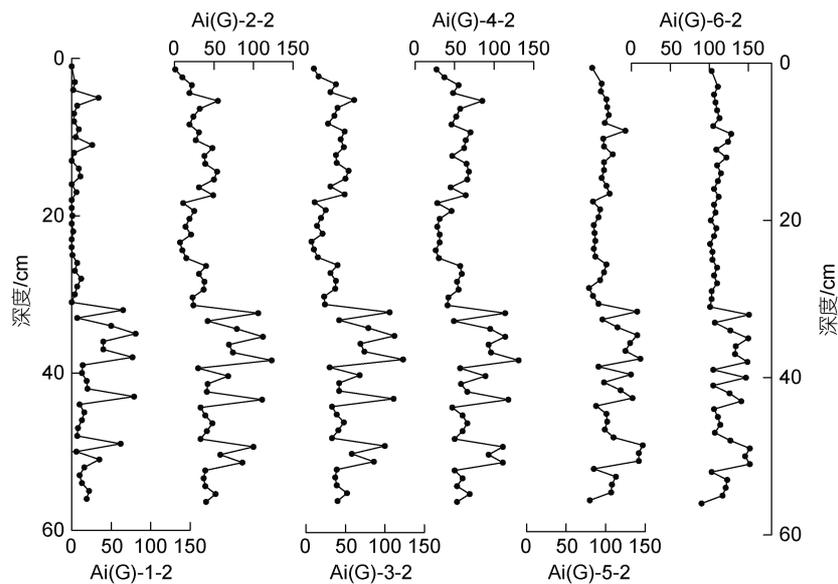


图 6 HQH4 剖面记录的粒度异常指数 Ai(G)-2 系列变化特点

Fig.6 Comparison in variation characteristics of grain size anomaly index (Ai(G)-2 set) of HQH4 profile

越丰富; 置信水平低, (总)异常点较多, 指数相对变化幅度越小, 其细节变化亦不明显(图 6)。不难想象, 随着置信水平降低到极小值, 所有的样品点都可被视为异常点, 这时的异常指数就是一条直线; 而置信水平增加到极大值(接近 100%), 所有的样品点都是正常点, 提取不到异常点。从统计学的角度而言, 两种极端情况, 都没有现实意义; 只有在某种置信水平约束下, 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; 理论上, 这种异常指数可能就具有某种环境意义(贾玉连等, 2023; 周雅文等, 2023)。

由上分析, 并根据统计的置信规范($\geq 90\%$)、指数的变化幅度、特点(图 6)及总异常点数随着置信水平的变化规律(图 3), 本文选择置信水平 $>95.000\%$ 情况下获取的异常指数 $Ai(G)$ -1-2 和 $Ai(G)$ -2-2 (置信水平分别为 99.999%、99.000%)作为 $Ai(G)$ -2 系列的代表。

2.3 异常指数对湖面波动、人类活动的指示

基于史料与遥感图像解译的黄旗海 1865~2010 年的湖面波动, 大致经历了如下四个阶段: 1865~1895 年、1944~1987 年间为高湖面阶段; 湖面海拔 1 265~1 275 m (现代湖床为 1 262 m), 对应湖泊面积为 60~130 km^2 。1895~1944 年、1987~2010 年为低湖面阶段, 黄旗海为湖面海拔低于 1 265 m, 水深小于 3 m、面积小于 60 km^2 的碟形浅水湖泊; 湖泊极易干枯或近干枯, 如 1900、1929 和 2004~2010 年间, 湖泊演变为夏季短暂积水、春季则完全干枯的季节湖泊(图 1d、1e)。在年代际尺度上, 湖泊波动与区域降水变化基本一致(图 7i、7j), 表明区域降水是湖泊变化的主控因素。1985~2010 年来, 降水无明显降低趋势, 但由于拦河筑坝(图 7m)和地下水过量开采(付意成等, 2017; 潘世兵等, 2017)等人类活动的影响, 入湖流量急剧降低(图 7l), 致使黄旗海水面逐渐下降并在 2004~2006 年前后干枯(图 1)。

高湖面阶段, 基本对应 HQH4 剖面的青灰色黏土质粉砂层(湖相); 低湖面阶段, 对应剖面的灰黄色黏土质粉砂层(湖滩相)或灰黄色黏土质粉砂层夹青灰色黏土质粉砂层(湖滩相夹湖相)。上部与底部青灰色湖相层, 平均沉积通量分别为 66 和 98 $mg/(cm^2 \cdot a)$; 顶部湖滩相和下部湖滩相-湖相层, 平均沉积通量分别为 101 和 92 $mg/(cm^2 \cdot a)$ 。大致表现为低湖面阶段, 沉积通量偏高, 高湖面阶段, 沉积通量偏低; 1950~1985 年高湖面时段, 沉积通量最低, 1985 年以来的低湖面阶段, 沉积通量最高。图 7 显示, 在 HQH4 剖面年代误差范围内(2~7 a), 粒度异常指数 $Ai(G)$ -3-10-1、

$Ai(G)$ -5-10-1、 $Ai(G)$ -1-2、 $Ai(G)$ -2-2、一般粒度指标[如砂(%), 分选系数、C 值(μm)、中值粒径(μm)]与湖面波动、区域降水量、人类活动在年代际尺度上, 存在如下关系:

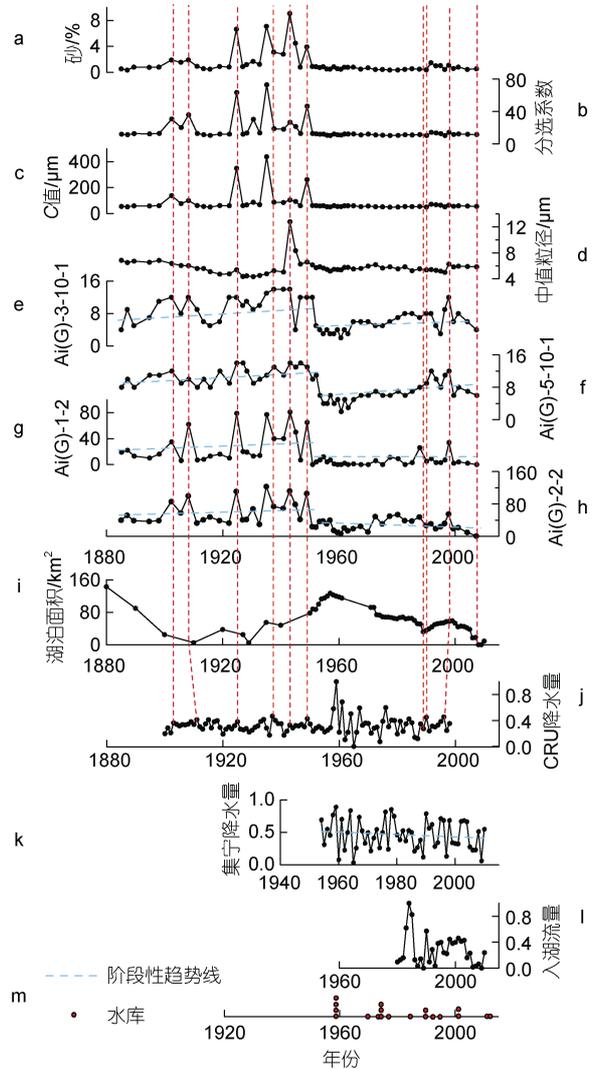


图 7 HQH4 剖面记录的 1885~2010 年间砂(%)(a)、分选系数(b)、C 值(μm)(c)、中值粒径(μm)(d)、粒度异常指数 $Ai(G)$ -3-10-1(e)、 $Ai(G)$ -5-10-1(f)、 $Ai(G)$ -1-2(g)、 $Ai(G)$ -2-2(h)、黄旗海湖面波动记录(1880~2010)(i)、区域降水[包括 CRU 与集宁气象站降水数据(标准化)记录](j、k)、1980 年以来年入湖水量(标准化)(l)及 1958 年以来流域拦河建坝等人类活动记录(m)的对比关系

Fig.7 Comparisons in sand content (%) (a), sorting coefficient (b), C value (μm) (c), median particle size (μm) (d), particle size anomaly indexes [$Ai(G)$ -3-10-1 (e), $Ai(G)$ -5-10-1 (f), $Ai(G)$ -1-2 (g), and $Ai(G)$ -2-2 (h)] in HQH4 profile, the fluctuation record of the Huangqi Lake surface during 1880~2010(i), the regional precipitation [including CRU(j) and Jining meteorological station precipitation data standardized (k)], the annual input amount of water to Huangqi Lake (l), and the record of human activities such as dam construction since 1958 (m)

注: 1865~1880 年湖面波动未标示

(1) 1885~1985 年间,基本上表现为降水增加→湖面上涨→指数降低;降水减少→湖面下降→指数增大(图 7)。就是说,降水与湖面变化为正相关关系,湖面变化与异常指数变化为负相关关系。1900~1950 年间,黄旗河流域降水低,为低湖面阶段,湖泊数度干枯,湖泊碎屑沉积异常指数高。1885~1895 年、1950~1985 年间,黄旗海为高湖面阶段,湖泊碎屑沉积异常指数低,前一阶段降水未知,但 1950~1985 年间降水是显著增加的。降水与湖面波动成正相关关系,是湖面波动的主要驱动因素,这是自然状态下农牧交错带湖泊涨缩的特点,对夏季风强弱具有敏感的响应(Yin *et al*, 2011; Xiao *et al*, 2015)。异常指数与湖面波动具有反相关关系,指示湖泊作用似乎能降低粒度异常指数,这其实表明未受湖泊作用的冲洪积碎屑沉积的粒度异常指数较高,这与现代湖滩碎屑沉积的粒度异常指数的分布是一致的:三角洲及湖滨异常指数高,湖泊中心异常指数低。

(2) 1985~2010 年间,降水与湖面波动、湖面波动与粒度异常指数之间的关系变得较为复杂。整体上,此时段湖面波动降低并在 2004 年前后接近干枯,而降水无明显趋势性变化;但入湖水量在 1985 年以后已不及八十年代初高峰期的一半,并且持续降低,湖面降低并近干枯也就是必然的结果。由于这期间降水无明显趋势性变化(图 7k),流域人类活动,例如拦河筑坝和过量开采地下水,被认为是入湖水量降低与湖面干枯的主要因素(付意成等, 2017; 潘世兵等, 2017)。随着湖面的波动,粒度异常指数也存在一定程度的波动变化,在 2004~2010 年间黄旗海干枯-近干枯阶段,湖泊沉积粒度异常指数达到最低,湖面波动与异常指数在此时段整体具有一定程度的正相关关系(图 7),而这种关系在 1985~2000 年间并不明确。同为低湖面近干枯阶段,1900~1950 年间,异常指数总体较高且波动剧烈,1985~2010 年间,异常指数总体较低并阶段性地表现出高湖面时所具有的特征低值,表明这两个低湖面时段,可能具有不同的水沙关系(水文-泥沙环境关系)特点。前者为一个自然湖泊过程,后者则叠加了拦河筑坝等人类活动的强烈影响对自然湖泊过程的改造作用。

(3) 一般粒度指标,除了对 1900~1950 年间的低湖面环境具有一定的辨识能力,对其他阶段的湖泊环境演化均没有明显指示。并且,任何一个粒度指标也未表现出对年代际尺度上湖面波动的严格响应(图 7),表明一般粒度指标对于湖泊环境演化的指示

能力具有很大的局限性(Peng *et al*, 2005; Parris *et al*, 2010; Lapointe *et al*, 2012; Schillereff *et al*, 2014; Raja *et al*, 2018)。

(4) 在 1900~1950 年、1980~2010 年等年代际低湖面阶段,异常指数能敏感地辨识出 1904、1911、1925、1937、1944、1949 年,1989、1990、1998、2008 年等偏丰水年份。而一般粒度参数指标,如平均粒径、中值粒径、 C 值以及中-粗砂含量(%),分选系数等,能部分辨识出上述偏丰水年中的部分年份,但辨识能力和敏感程度远不及异常指数(图 7)。

总体而言,不论在年-年际亦或年代际尺度上,人类活动影响偏弱还是偏强的时段,异常指数均具有比一般粒度指标更为敏感和更强的辨识能力,对封闭湖泊环境演变具有独特的敏感性,而一般粒度指标则不具有这种特点。

3 讨论

3.1 基于异常指数对湖面水文及降水波动指示的内在机制

从粒度异常指数、一般粒度指标对黄旗海湖面波动、区域降水记录等的指示特点,研究认为,基于粒度指标体系发展的粒度异常指数,具有对封闭湖泊流域湖泊涨缩、降水(特别是湖泊低水位时期)等流域水文情势信息的敏感响应,这是传统上广泛应用的一般粒度指标(Udden, 1914; Mcmanus, 1988; Blott *et al*, 2001; Schillereff *et al*, 2014; Wang *et al*, 2021)所不具备的;但在利用其进行定量重建湖泊水文情势信息之前,异常指数的内在机制需要明确。

在对长江之滨的吞吐湖泊黄茅潭近、现代沉积序列的研究中,粒度异常指数首先是这样界定的(贾玉连等, 2023): 在一定的地质、地貌与土壤环境下,某些常态洪水水文环境的频繁出现,使流域水文特点及其侵蚀、搬运、堆积)保持一定的稳定性,从而造成碎屑物质及其来源等具有某种程度的稳定性,进而形成所谓的常态水文环境及相关的碎屑侵蚀、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,形成某种常态特征。在东亚季风区,河湖悬浮泥沙,主要来自于汛期,这期间大大小小的洪流所携带的泥沙往往占全年的 90%以上。这些洪流,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(Chen *et al*, 2008; Tang *et al*, 2018; Wei *et al*, 2020)。而叠加或镶嵌于这种常态环境背景

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和极端低洪年份。在长江流域, 像 1998~1999 年、1953 年这类丰水年, 1980、1983、1994 年这类偏丰水年; 1961~1962 年、1975、2006 年这类偏枯、枯水年份便是这样的极端水文事件年份。因其洪水流量、强度及碎屑沉积来源(包括物源远近、分布、土壤侵蚀强弱)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出现异常变化, 而不仅仅是几个粒度指标的变化。前者(丰水、偏丰水年份)表现为正异常, 即相对于常态水文环境异常指数增大; 后者(偏枯、枯水年份)为负异常, 相对于常态水文环境异常指数减小或偏负。

相比于吞吐湖泊具有牵引流特征的弥散性地吐纳洪水-泥沙这种湖泊水文情势(Schillereff *et al.*, 2014)及相应的沉积环境, 封闭湖泊作为流域泥沙-水文过程的终端性静水水体, 有其独特的水-沙输移、沉积建造的过程, 表现为: (1) 随着流域降水、入湖径流的波动变化, 湖泊具有特有的涨缩特点, 可能是年际、年代际、百、千年尺度甚至轨道、亚轨道尺度(贾玉连等, 2004; Xiao *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2021); (2) 湖泊

沉积主要来自于湖泊周缘入湖河流搬运至湖滨的冲、洪积碎屑(图 8A、8B); (3) 湖滨冲洪积碎屑被搬运至湖泊中心成为湖相沉积(包括深湖-半深-浅湖相)(图 8C、8D)之前, 经历了程度不等的湖泊作用(包括湖流、波浪的侵蚀、搬运、分选和再沉积作用等)(Håkanson *et al.*, 1983; Schillereff *et al.*, 2014)。湖泊作用的强弱, 与湖泊大小、波浪、湖泊形态和湖泊水深等诸多水文、地貌和其他环境因素有关系。经历了一定程度的湖泊作用后, 湖泊中心的碎屑沉积, 相比于湖滨冲、洪积碎屑, 往往具有颗粒细、分选好等特点(Håkanson *et al.*, 1983; Lerman *et al.*, 2012; Schillereff *et al.*, 2014)。在湖泊萎缩甚至干枯的低湖面阶段, 随着湖泊水位下降、入湖河流河口向湖泊中心方向延伸, 河口三角洲沉积直接超覆于湖泊沉积之上, 形成基本没接受湖泊改造作用的冲、洪积碎屑(图 8B); 由于此时湖泊面积小、湖泊水深变浅等, 湖流和波浪作用会响应减弱, 造成对冲洪积碎屑的湖泊改造作用显著降低。而在湖泊扩涨的高湖面阶段, 随着湖面的扩展, 河口溯源退缩, 冲、洪积碎屑远离湖心, 同时水深增加, 湖流发育、波浪作用增强, 冲洪积碎

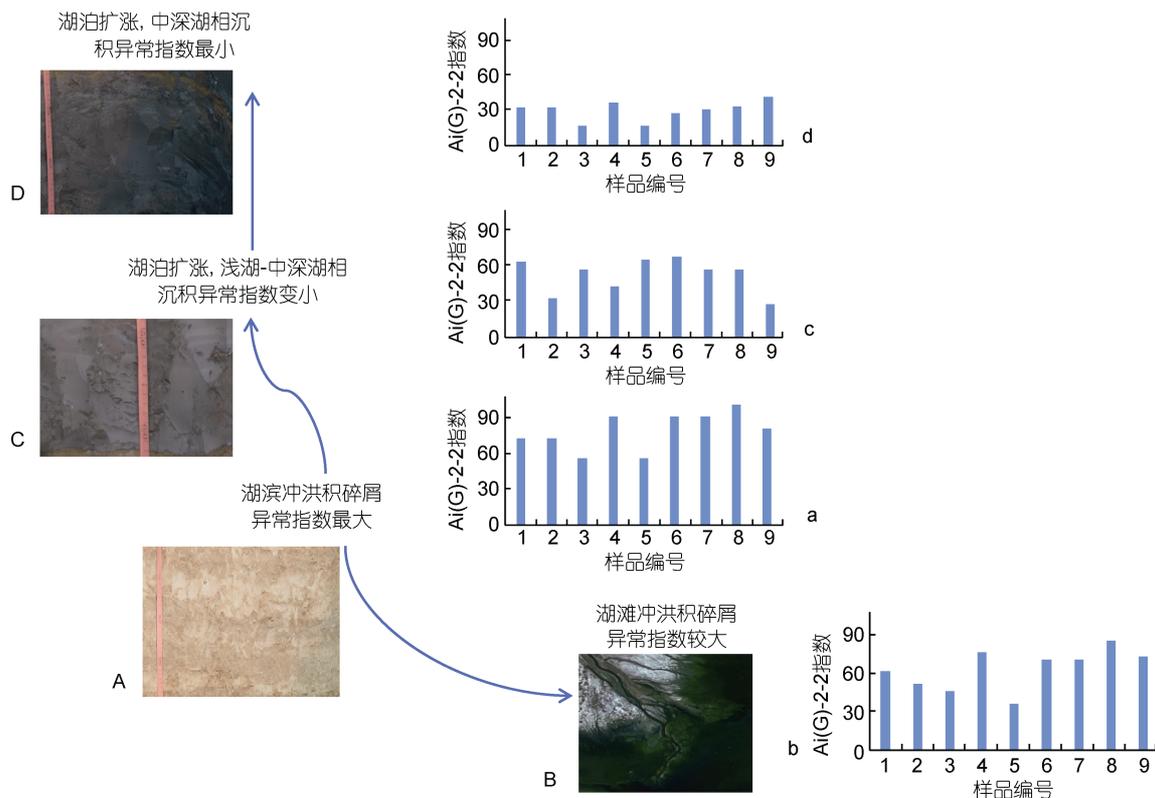


图 8 封闭湖泊沉积从湖滨冲洪积碎屑到湖泊中心深水-半深水沉积相的湖泊作用及其异常指数的变化示意

Fig.8 The transformation course of sediments from lakeshore alluvial clastic sediments to normal lacustrine sediments in closed lake basin with the variability of the grain size abnormal index

屑沉积从湖滨边缘地带搬运至湖泊中心,经历了较长时间的湖泊改造作用。显然,湖泊改造作用弱,也即湖泊作用弱,这应是浅湖或近干枯湖泊的特点,其湖泊沉积会保留着特定洪枯年份碎屑沉积的异常特点,如本文所揭示的黄旗海 1900~1950 年阶段(图 7)。湖泊改造作用强,也就是湖泊作用强,这应是大湖、深水湖泊的特点。强烈而长期的湖泊作用,湖滨冲、洪积碎屑抵达湖泊近中心附近,已远非特定洪、枯年份湖滨冲洪积碎屑沉积,而是正常的湖泊(碎屑)沉积(即深湖或半深湖相沉积)。湖滨冲洪积碎屑(图 8A)粒度异常指数高(图 8a),而正常湖泊沉积(图 8C、8D),其粒度异常指数低(图 8c、8d、图 9)。

黄旗海现代湖滩表层碎屑沉积指示(图 9),从北部湖滩穿过湖泊中部到达近南部湖滩和三角洲湖滨

地带(图 1c),碎屑沉积的一般粒度参数和粒度异常指数均表现出一定的规律性变化(图 9),就指示了湖泊作用对冲、洪积碎屑的改造作用。其中,趋势线显示,粒度异常指数的分化和分异表现最为显著:湖泊近中心沉积具有较低的异常指数,湖滨具有较高的异常指数,其环境意义与时间序列上异常指数变化是一致的。而一般粒度指标,包括广泛应用的平均粒径(μm)、中值粒径(μm)、分选系数、 C 值(μm)等,随着湖泊地貌环境的变化,远不如异常指数敏感,具体表现为:从三角洲到湖泊中心,指标变化不显著,例如,平均粒径、中值粒径、分选系数(标准偏差)、峰态(尖度)、 C 值;即使有显著变化,但本身数值波动较剧烈,例如,偏态(偏度),无明显环境指示能力。这表明粒度异常指数是一个比一般粒度指标更为敏感的环境指标。

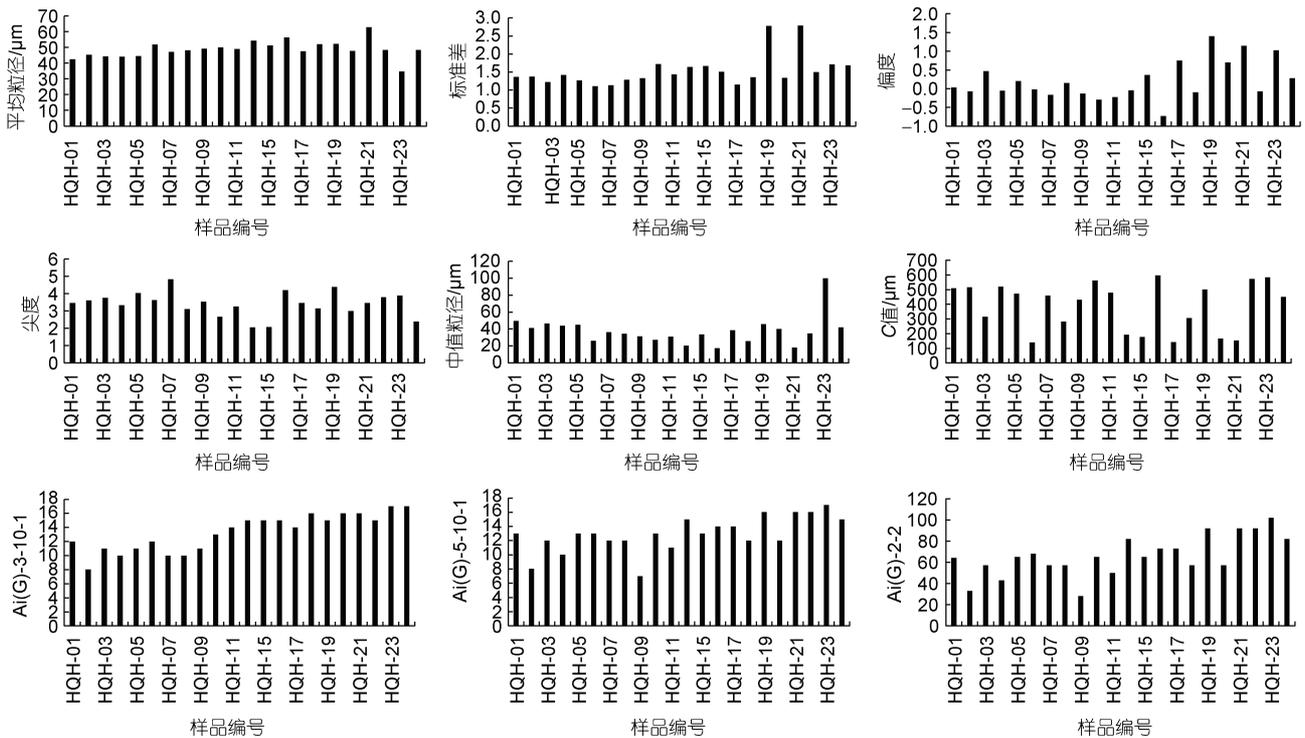


图 9 黄旗海现代湖滩碎屑沉积敏感粒度参数、异常指数 $[\text{Ai}(\text{G})-3-10-1$ 、 $\text{Ai}(\text{G})-5-10-1$ 、 $\text{Ai}(\text{G})-2-2$]变化特点

Fig.9 Characteristics of sensitive grain size parameters and grain size anomaly index of detrital deposition on modern Huangqi Lake bed

这是自然湖泊状态下,黄旗海湖泊沉积粒度异常指数能反演湖泊环境变化的内在机制。也就是说,如果没有人类活动的强烈影响,在年代际尺度上,可以利用粒度异常指数反演湖泊环境演变:如黄旗海 1990 年之前的历史时期,可以定性甚至定量重建湖面波动(见下文);在其低湖面阶段,可以利用粒度异常指数辨识流域洪水年份。而 1990 年以后,人类活动(包括拦河筑

坝及地下水开采等)显著改变了流域水文格局,使粒度异常指数与流域降水、湖面波动之间关系不再具有自然状态下的那种关系特点,可能在于:(1) 拦河筑坝及地下水开采破坏了流域水文平衡,使湖泊趋向于萎缩,湖泊作用减弱;(2) 拦河筑坝降低了入湖径流流量并选择性地截留了大量冲、洪积碎屑(尤其是粗碎屑颗粒),使进入湖泊的冲、洪积碎屑颗粒变细、分选较好

(图 7), 这种碎屑堆积粒度组成表面上表现为更接近于深湖相沉积, 使粒度异常指数与湖泊水文关系变化不再具有自然流域状态下的那种关系特点。

3.2 1885~1985 年间黄旗海湖面波动记录的定量重建

基于以上事实, 并考虑到如下两个方面的因素:

(1) 在低湖面阶段、异常指数较大的背景下, 异常指数显著增加, 可能意味着冲、洪积碎屑通过河口或三角洲向湖滩延伸的方式以牵引流直接入湖堆积; 而此时湖泊水深浅、湖泊小, 湖泊作用弱, 对冲、洪积碎屑的改造作用弱, 如图 7 中 1890~1951 年间低湖面阶段异常指数总体较高背景下的 6 个显著增大的层节。它们指示冲洪积对湖泊碎屑堆积的直接影响, 但由此并不能指示它与前后时段湖面相比具有巨大变化, 而仅仅指示了较为干旱的低湖面阶段强降水造成的洪水水文事件。因此, 有必要将其剔除, 并在样

品之间, 以线性内插补齐异常指数。(2) 1990 年以来的粒度异常指数, 受人类活动的强烈影响, 与湖面波动关系具有不确定性, 因此有必要剔除这个时段。由此, 研究基于 HQH4 剖面的分辨率(平均每个样品包含为 2.23 a 的信息), 以粒度异常指数 $A_i(G)-5-10-1$ 与湖面面积之间的统计关系(图 10a)(1885~1990 年间), 定量重建了人类活动影响较弱的 1885~1990 年间黄旗海湖泊面积的波动记录。其记录特点与基于史料和遥感图像解译的黄旗海湖面波动存在着如下的关系: (1) 在 1σ (σ 表示标准偏差) 误差范围之内, 二者基本是一致的(图 10b); (2) 在 1890~1900 年、1910 年前后、1900~1905 年等几个时段, 误差较大; 推测可能与定年误差、相应年份的湖泊面积数据缺乏有关。相较而言, 基于 $A_i(G)-5-10-1$ 重建的湖泊面积的变化可能更接近于实际的黄旗海湖面波动。

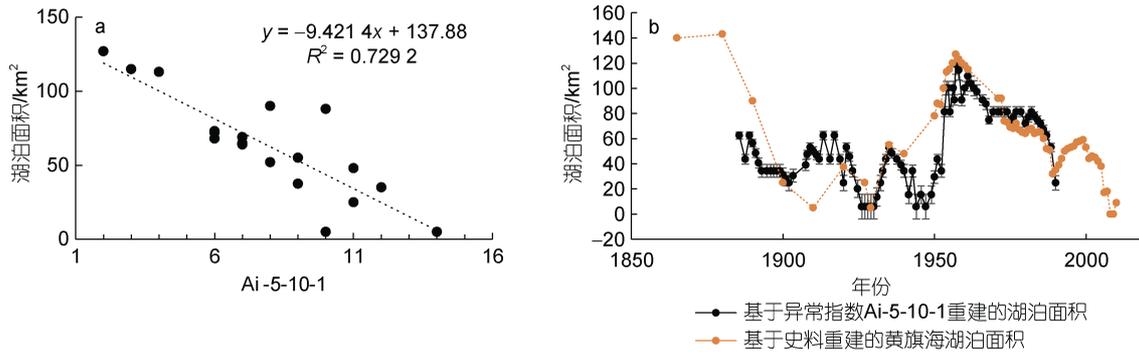


图 10 HQH4 剖面异常指数 $A_i-5-10-1$ 与 1885~1990 年间黄旗海湖泊面积(基于史料和遥感资料)散点图(a)、基于史料与遥感资料重建的黄旗海湖泊面积与基于异常指数 $A_i-5-10-1$ 重建的湖泊面积之间的关系(1885~1990)(b)

Fig.10 Relationship between grain size anomaly index ($A_i-5-10-1$) of sediments from HQH4 core and the area of Huangqi Lake reconstructed for the period of 1885-1990 based on historical data and remote sensing data (a), and the area of Huangqi Lake reconstructed for the same period based on the above relationship (b)

4 结论

利用东亚季风尾间区封闭湖泊黄旗海柱状沉积, 在 $SCP+^{137}Cs+^{210}Pb$ 年代时标的约束下, 基于粒度指标体系的 17 个粒度指标在时间序列上的变化及指标两两之间相互关系的异常变化, 建构了 $A_i(G)-1$ 、 $A_i(G)-2$ 两类异常指数, 尝试从粒度指标体系的结构变化来审视农牧交错带黄旗海 1885~2010 年间的湖泊环境变化。

研究表明: (1) 1885~1895 年、1950~1985 年间, 为黄旗海高湖面阶段, 1900~1950 年、1985~2010 年间为黄旗海低湖面阶段; (2) 异常指数 $A_i(G)-5-10-1$ 、 A_i-2-2 具有对湖面波动极为敏感的指示: 湖面越大(小)、湖泊水位越高(低)、湖泊碎屑沉积粒度异常指数越小(大), 湖面波动-粒度异常指数之间存在良好

的线性关系, 这是一般粒度指标不能比拟的; (3) 1990~2010 年间的低湖面, 是气候波动与人类活动(拦河筑坝等)叠加影响造成的结果, 人类活动改变了流域水文和输沙格局, 使湖泊碎屑堆积的粒度异常指数不再与湖面波动存在自然状况下那种关系特点。

研究基于 $A_i(G)-5-10-1$ 定量重建了 1885~1990 年间的黄旗海湖面波动(1σ 的标准偏差), 与基于遥感图像和历史资料所获取的湖面波动数据基本一致。

参 考 文 献

- 《内蒙古历代自然灾害史料》编辑组, 1982. 内蒙古历代自然灾害史料[M]. 呼和浩特: 内蒙古出版社: 23-48.
- 王永, 姚培毅, 迟振卿, 等, 2010. 内蒙古黄旗海全新世中晚期环境演变的沉积记录[J]. 矿物岩石地球化学通报, 29(2): 149-156.
- 王志超, 施青松, 李兴, 等, 2021. 定常风场和吞吐流对乌梁

- 素海流场的影响[J]. 海洋与湖沼, 52(3): 614-623.
- 内蒙古自治区人民政府参事室, 1988. 内蒙古历代自然灾害史料续编[M]. 呼和浩特: 内蒙古出版社: 280-480. <https://book.kongfz.com/1798/900408504/>
- 付意成, 赵进勇, 朱国平, 等, 2017. 基于 M-K 检验的黄旗海湖面面积退化成因分析[J]. 中国农村水利水电(7): 79-84.
- 成都地质学院陕北队, 1978. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京: 地质出版社: 18-23.
- 刘恩峰, 薛滨, 羊向东, 等, 2009. 基于 ^{210}Pb 与 ^{137}Cs 分布的近代沉积物定年方法——以巢湖、太白湖为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 29(6): 89-94.
- 李华章, 刘清泗, 汪家兴, 1992. 内蒙古高原黄旗海、岱海全新世湖泊演变研究[J]. 湖泊科学, 4(1): 31-39.
- 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等, 2005. 亚洲季风与中国干湿、农牧气候界线之关系[J]. 地理科学, 25(4): 441-447.
- 冷雪, 吴霜, 王昕梅, 等, 2017. 赣北黄茅潭近代湖泊 ^{137}Cs 蓄积特点、SCP 计数和事件性沉积及其对 ^{210}Pb 计年的矫正[J]. 海洋与湖沼, 48(5): 944-951.
- 沈吉, 薛滨, 吴敬禄, 等, 2010. 湖泊沉积与环境演化[M]. 北京: 科学出版社: 48-50.
- 周志华, 2016. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社: 114-118.
- 周爱锋, 强明瑞, 张家武, 等, 2008. 苏干湖沉积物纹层计年和 ^{210}Pb , ^{137}Cs 测年对比[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 44(6): 15-18, 24.
- 周雅文, 贾玉连, 2023. 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[J]. 资源与环境科学进展, 2(3): 7-19.
- 项亮, 1995. ^{137}Cs 湖泊沉积年代学方法应用的局限——以 Crawford 湖为例[J]. 湖泊科学, 7(4): 307-313.
- 贾玉连, 施雅风, 马春梅, 等, 2004. 40kaBP 来亚非季风演化趋势及青藏高原泛湖期[J]. 地理学报, 59(6): 829-840.
- 贾玉连, 高震东, 万智巍, 等, 2023. 基于吞吐湖泊碎屑沉积粒度定量重建降水及其水文情势记录的新方法研究[J]. 第四纪研究, 43(5): 1241-1253.
- 徐兆凯, 孙天琪, 常凤鸣, 2021. 澳大利亚古季风演化过程、主要控制因素及其海洋生物生产力效应[J]. 海洋与湖沼, 52(2): 298-313.
- 徐奎栋, 2021. 印太交汇区海洋生物多样性中心形成演化机制研究进展与展望[J]. 海洋与湖沼, 52(2): 262-273.
- 唐领余, 2016. 中国第四纪孢粉图鉴[M]. 北京: 科学出版社: 301-400.
- 储国强, 顾兆炎, 许冰, 等, 2005. 东北四海龙湾玛珥湖沉积物纹层计年与 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 测年[J]. 第四纪研究, 25(2): 202-207.
- 内蒙古察右前旗自治州人民政府参事室, 1987. 内蒙古历代自然灾害史料续编[M]. 呼和浩特: 160-190.
- 潘世兵, 杨贵羽, 唐蕴, 等, 2017. 黄旗海湿地水量模拟与平衡分析[J]. 干旱区研究, 34(2): 383-389.
- ALLEY R B, MAROTZKE J, NORDHAUS W D, *et al*, 2003. Abrupt climate change [J]. *Science*, 299(5615): 2005-2010.
- AOYAMA M, 1988. Evidence of stratospheric fallout of caesium isotopes from the Chernobyl accident [J]. *Geophysical Research Letters*, 15(4): 327-330.
- APPLEBY P G, 2000. Radiometric dating of sediment records in European mountain lakes [J]. *Journal of Limnology*, 59(S1): 1-14.
- APPLEBY P G, 2008. Three decades of dating recent sediments by fallout radionuclides: a review [J]. *The Holocene*, 18(1): 83-93.
- ARNAUD F, LIGNIER V, REVEL M, *et al*, 2002. Flood and earthquake disturbance of ^{210}Pb geochronology (Lake Anterne, NW Alps) [J]. *Terra Nova*, 14(4): 225-232.
- BATHIANY S, SCHEFFER M, VAN NES E H, *et al*, 2018. Abrupt climate change in an oscillating world [J]. *Scientific Reports*, 8(1): 5040.
- BERNHARDT C, 1994. Particle Size Analysis: Classification and Sedimentation Methods [M]. London: Chapman & Hall: 33-38.
- BLOTT S J, PYE K, 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11): 1237-1248.
- BRADLEY R S, 2014. Paleoclimatology: Reconstructing Climates of the Quaternary [M]. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier: 13-69.
- CHEN F H, HUANG X Z, ZHANG J W, *et al*, 2006. Humid little ice age in arid central Asia documented by Bosten Lake, Xinjiang, China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 49(12): 1280-1290.
- CHEN X Q, YAN Y X, FU R S, *et al*, 2008. Sediment transport from the Yangtze River, China, into the sea over the post-three gorge dam period: a discussion [J]. *Quaternary International*, 186(1): 55-64.
- CHEVALIER M, DAVIS B A S, HEIRI O, *et al*, 2020. Pollen-based climate reconstruction techniques for late Quaternary studies [J]. *Earth-Science Reviews*, 210: 103384.
- CROWLEY T J, 2000. Causes of climate change over the past 1000 years [J]. *Science*, 289(5477): 270-277.
- DAVIS R B, HESS C T, NORTON S A, *et al*, 1984. ^{137}Cs and ^{210}Pb dating of sediments from soft-water lakes in New England (U.S.A.) and Scandinavia, a failure of ^{137}Cs dating [J]. *Chemical Geology*, 44(1/2/3): 151-185.
- FOLK R L, 1966. A review of grain - size parameters [J]. *Sedimentology*, 6(2): 73-93.
- FRIEDMAN G M, SANDERS J E, 1978. Principles of Sedimentology [M]. New York: Wiley: 21-79.
- GUPTA A S, RAO S K, 2001. Weathering indices and their applicability for crystalline rocks [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60(3): 201-221.
- HÅKANSON L, JANSSON M, 1983. Principles of Lake Sedimentology [M]. Berlin: Springer: 21-39.
- HARRIS I, OSBORN T J, JONES P, *et al*, 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset [J]. *Scientific Data*, 7(1): 109.
- HAUG G H, HUGHEN K A, SIGMAN D M, *et al*, 2001. Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene [J]. *Science*, 293(5533): 1304-1308.
- JIN Z D, CAO J J, WU J L, *et al*, 2006. A Rb/Sr record of catchment weathering response to Holocene climate change in Inner Mongolia [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*,

- 31(3): 285-291.
- LAPOINTE F, FRANCUS P, LAMOUREUX S F, *et al*, 2012. 1750 years of large rainfall events inferred from particle size at East Lake, Cape Bounty, Melville Island, Canada [J]. *Journal of Paleolimnology*, 48(1): 159-173.
- LAST W M, SMOL J P, 2001. *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Volume 2: Physical and Geochemical Methods* [M]. Dordrecht: Springer.
- LE ROUX J P, ROJAS E M, 2007. Sediment transport patterns determined from grain size parameters: overview and state of the art [J]. *Sedimentary Geology*, 202(3): 473-488.
- LERMAN A, BACCINI P, 2012. *Lakes: Chemistry, Geology, Physics* [M]. New York: Springer: 21-36.
- LIANG C, ZHAO Y, QIN F, *et al*, 2020. Pollen-based Holocene quantitative temperature reconstruction on the eastern Tibetan Plateau using a comprehensive method framework [J]. *Science China Earth Sciences*, 63(8): 1144-1160.
- LU Y, FANG X M, FRIEDRICH O, *et al*, 2018. Characteristic grain-size component-A useful process-related parameter for grain-size analysis of lacustrine clastics? [J]. *Quaternary International*, 479: 90-99.
- MCMANUS J, 1988. Grain size determination and interpretation [M] // TUCKER M. *Techniques in Sedimentology*. Oxford: Blackwell: 63-85.
- ORTON G J, READING H G, 1993. Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size [J]. *Sedimentology*, 40(3): 475-512.
- PARRIS A S, BIERMAN P R, NOREN A J, *et al*, 2010. Holocene paleostorms identified by particle size signatures in lake sediments from the northeastern United States [J]. *Journal of Paleolimnology*, 43(1): 29-49.
- PATERSON G A, HESLOP D, 2015. New methods for unmixing sediment grain size data [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(12): 4494-4506.
- PENG Y J, XIAO J L, NAKAMURA T, *et al*, 2005. Holocene East Asian monsoonal precipitation pattern revealed by grain-size distribution of core sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of north-central China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(3/4): 467-479.
- PERRI F, 2020. Chemical weathering of crystalline rocks in contrasting climatic conditions using geochemical proxies: an overview [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 556: 109873.
- RAJA P, ACHYUTHAN H, GEETHANJALI K, *et al*, 2018. Late Pleistocene paleoflood deposits identified by grain size signatures, Parsons Valley Lake, Nilgiris, Tamil Nadu [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 91(5): 547-553.
- READING H G, 1996. *Sedimentary Environments: Processes, Facies, and Stratigraphy* [M]. 3rd ed. Cambridge: Blackwell Science: 1-20.
- RITCHIE J C, MCHENRY J R, 1990. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review [J]. *Journal of Environmental Quality*, 19(2): 215-233.
- ROBBINS J A, EDGINGTON D N, 1975. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137 [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(3): 285-304.
- ROSE N L, 1994. A note on further refinements to a procedure for the extraction of carbonaceous fly-ash particles from sediments [J]. *Journal of Paleolimnology*, 11(2): 201-204.
- ROSE N L, 2015. Spheroidal carbonaceous fly ash particles provide a globally synchronous stratigraphic marker for the anthropocene [J]. *Environmental Science & Technology*, 49(7): 4155-4162.
- ROYSE C F, 1968. Recognition of fluvial environments by particle-size characteristics [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 38(4): 1171-1178.
- SCHEFFER M, BASCOMPTTE J, BROCK W A, *et al*, 2009. Early-warning signals for critical transitions [J]. *Nature*, 461(7260): 53-59.
- SCHILLEREF D N, CHIVERRELL R C, MACDONALD N, *et al*, 2014. Flood stratigraphies in lake sediments: a review [J]. *Earth-Science Reviews*, 135: 17-37.
- TANG Q, COLLINS A L, WEN A B, *et al*, 2018. 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*, 633: 1114-1125.
- TOPAL T, 2002. Quantification of weathering depths in slightly weathered tuffs [J]. *Environmental Geology*, 42(6): 632-641.
- UDDEN J A, 1914. Mechanical composition of clastic sediments [J]. *GSA Bulletin*, 25(1): 655-744.
- WALLING D E, MOOREHEAD P W, 1989. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment: an overview [J]. *Hydrobiologia*, 176(1): 125-149.
- WANG X L, YANG H, KITCH J L, *et al*, 2021. Grain-size characteristics in lake Fuxian sediments: implication for dry-humid transformation of Indian summer monsoon over the past 150 years [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*: X, 6: 100073.
- WEI X, CAI S Q, NI P T, *et al*, 2020. Impacts of climate change and human activities on the water discharge and sediment load of the Pearl River, southern China [J]. *Scientific Reports*, 10(1): 16743.
- WHITE W M, 2020. *Geochemistry* [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons: 34-66.
- XIAO J L, FAN J W, ZHAI D Y, *et al*, 2015. Testing the model for linking grain-size component to lake level status of modern clastic lakes [J]. *Quaternary International*, 355: 34-43.
- YIN Y, LIU H Y, HE S Y, *et al*, 2011. Patterns of local and regional grain size distribution and their application to Holocene climate reconstruction in semi-arid Inner Mongolia, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 307(1/2/3/4): 168-176.
- ZHANG S, XU H, LAN J H, *et al*, 2021. Dust storms in northern China during the last 500 years [J]. *Science China Earth Sciences*, 64(5): 813-824.

QUANTITATIVE RECONSTRUCTION OF LAKE LEVEL FLUCTUATION IN HUANGQIHAI FROM 1885 TO 2010 BASED ON GRAIN SIZE ANOMALY INDEX FROM HQH4 CORE SEDIMENT

JIA Yu-Lian¹, ZHOU Shu-Jin¹, WANG Peng-Ling², WAN Zhi-Wei³,
LING Chao-Hao¹, SHEN Hong-Yuan⁴

(1. *School of Historical Geography, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China*; 2. *National climate center, Beijing 100866, China*; 3. *School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Ganzhou 341000, China*; 4. *College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi 276000, China*)

Abstract Reconstructing the paleoclimate environment based on sedimentary sequences is a basic task in studying global change. The preferred indicators should be sensitive parameters in various indicator systems. However, various environmental background changes will blur its sensitivity and distort the reconstruction results. We created a 17-parameter grain size index system to develop grain size anomaly indexes to quantitatively reconstruct the lake level fluctuations of Huangqihai (Huangqi Lake), a closed lake located in the agro-pastoral ecotone of the East Asian monsoon region from 1885 to 2010. Results show that the anomaly index has a very sensitive correlation with lake surface fluctuations, and its sensitivity is much greater than that of ordinary particle size indicators. The years 1885~1895 and 1950~1985 were the high lake level stage of Huangqihai, and the years 1895~1950 and 1985~2010 were the low lake level stage. This result is consistent with the results revealed by sedimentary facies, basin precipitation records, remote sensing, and literature records. However, for the years 1990~2010, the particle size anomaly index was not related to the lake level fluctuations, indicating that the reasons for the rise and fall of the lake level at this stage were complex and obviously disturbed by human activities, such as river damming and groundwater extraction. This study created a quantitative method to reconstruct the lake surface fluctuation history of closed lakes based on the sediment particle size anomaly index, which provided a reference for studying global climate change.

Key words Huangqihai; lake sedimentation; grain size anomaly index; lake surface fluctuation