

文章编号: 1000-0550(2011)02-0381-07

湖泊沉积物不同粒级组分的元素含量特征 及其环境指示意义^① ——以内蒙古黄旗海为例

张静然^{1 2 4} 贾玉连¹ 申洪源³ 孙倩¹ 于玲玲¹ 吴敦银¹

(1. 江西师范大学地理环境学院 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室 南昌 330022;

2. 中国科学院青海盐湖研究所 西宁 810008; 3. 临沂师范学院地理与旅游系 山东临沂 276005; 4. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 黄旗海湖泊柱状沉积物的全样、77~20 μm、<20 μm 粒级的钛(Ti)、锰(Mn)、锶(Sr)、铷(Rb)、钡(Ba)、锆(Zr)等元素含量分析表明,元素在湖泊沉积物各粒级组分的丰度存在较大差异:Ti、Zr 倾向于在粗颗粒中富集,Mn、Sr、Rb 倾向于在细颗粒中富集,Ba 的富集粒级不明显。Ti、Zr 与 Mn、Rb 的颗粒粒级富集倾向可能是其硅酸盐矿物颗粒碎化过程的结果,而 Sr 则与湖泊自生碳酸盐有关。元素比值 $Zr_c/(Rb_c + Ba_c)$ 、 Zr_c/Rb_c 与 Ti、Zr 的粒度效应 Ti_c/Ti_f 、 Zr_c/Zr_f 指示了沉积物重、轻矿物的相对比率,是流域侵蚀强度与湖泊涨缩的信息指示;Ba、Rb 与 Sr 在细粒级的含量之比 Ba_f/Sr_f 、 Rb_f/Sr_f 指示了硅酸盐与碳酸盐矿物的相对含量,是流域风化、侵蚀搬运强度与湖泊过程(包括物理/化学/生物)等混合信息指示,没有明确的环境指向性。

关键词 黄旗海 湖泊沉积物 元素含量 粒度效应 环境意义

第一作者简介 张静然 女 1987 年出生 博士研究生 第四纪环境变化 E-mail: jingranzhang@yahoo.com.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

元素地球化学方法,是一种定性或定量重建古气候环境重要的地学手段。它可以通过分析沉积物中不同活动性化学元素从“源”到“汇”的过程或者生物化学过程中产生的“分馏”或“分离”,达到恢复古环境的目的^[1]。过去以沉积物中地球化学元素含量为古环境代用指标的研究,均着眼于全样品的地球化学元素含量的变化。然而,沉积物往往具有较宽的粒度分布范围,尤其是干旱区半干旱区湖泊沉积物,这些沉积物不同粒级组分的矿物颗粒种类的不同,可能会导致元素丰度存在差异^[2]。因此,同一湖泊的沉积物由于粒度组成的不同造成各元素丰度不同,使其环境指向与环境量度存在差异。将沉积物全样化学元素含量指标直接应用于古环境过程的重建时,可能使得古环境演变历史失真。因此,利用元素进行环境的重建,有必要识别或剔除粒度效应^[3]。对样品进行分粒级测试地球化学元素含量,是一种消除粒度效应从而获得定性或定量环境信息方便而快捷的手段^[2]。这种方法已经被一些学者应用到第四纪沉积物的研究中^[2,4~6]。本研究拟利用这种方法,分析黄旗海湖泊沉积物中不同粒级组成的元素富存特点,探

讨在消除或降低粒度组成影响的情况下,利用元素地球化学进行古环境重建的方法。

1 材料与测试方法

1.1 样品采集

样品采自内蒙古黄旗海湖积平原上被八台沟河流下切侵蚀形成的一个湖泊沉积剖面(H3剖面)。剖面总厚 320 cm,从上至下剖面主要分为 5 部分:顶部 30 cm 为现在耕作土层;距顶部 30~120 cm 为灰黄色粉砂;深度 120~282 cm 的沉积物主要由灰色粉砂组成,是典型的湖相沉积;剖面底部(282~320 cm)主要含中粗砂或灰黄色粉砂。对灰色粉砂进行了 2 cm 间隔的连续采样。利用 OSL 与 ¹⁴C 方法测定了剖面年代^[2],表明这是 8.0~2.0 kaBP 全新世较高湖面^[7,8]时的湖相沉积。流域内基岩主要为白垩纪与第三纪玄武岩和太古代变质火成岩等,岩石类型为单一^[8]。

1.2 元素含量的分粒级测试

分别称取 5 g、20 g 左右的风干样品,将前者研磨,过 200 目土壤分析筛,用作全样分析;将后者用蒸

^①江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室开放基金项目(编号:2009011)与江西省教育厅科技计划项目(编号:[2006]117)资助。
收稿日期:2009-11-05;收修稿日期:2010-01-15

馏水充分浸泡,置于超声波振荡仪中清洗 5 min,使其分散,过 200 目土壤分析筛,再将样品分离成 $>77 \mu\text{m}$ 和 $<77 \mu\text{m}$ 两个粒级组分。将 $<77 \mu\text{m}$ 粒级的样品用蒸馏水沉降法分成 $77 \sim 20 \mu\text{m}$ 与 $<20 \mu\text{m}$ 两个粒级组分,低温烘干,研磨;利用 VP-320 型 X 荧光光谱仪测试 $77 \sim 20 \mu\text{m}$ 与 $<20 \mu\text{m}$ 粒级及全样的钛 (Ti)、锰 (Mn)、锶 (Sr)、铷 (Rb)、钡 (Ba)、锆 (Zr) 等元素含量,误差 $\leq 0.5\%$,并对 $<20 \mu\text{m}$ 粒级的样品进行了 X 衍射实验,用于测试方解石、白云石与文石含量,从而获得碳酸盐含量,矿物含量的测试与计算方法可见相关文献^[9]。样品测试均在南京大学分析测试中心完成。

2 测试结果

整个剖面沉积物颗粒相对较粗,主要为砂质粉砂与粉砂质砂,黏土粒级平均含量仅有 2.7%,个别样品黏土可达 10%~30%。在剖面下部 100 cm 的范围内,黏土含量一般不足 5%,剖面上部,总体有所升高,不过平均也仅为 5.5%。

几种元素在不同粒级中的含量,具有显著差异。其中 Mn、Rb 与 Sr 具有相同的粒级富存特点:在 $<20 \mu\text{m}$ 粒级的样品中含量最高, $77 \sim 20 \mu\text{m}$ 粒级的样品中含量较低,全样含量最低,指示 Mn、Rb 与 Sr 元素趋向富集于细颗粒沉积物中。Zr 与 Ti 具有相似的粒

级富存特点:在 $<20 \mu\text{m}$ 粒级的沉积物中含量最低,且较为稳定,全样与 $77 \sim 20 \mu\text{m}$ 粒级的样品中含量较高,指示这两种元素趋向富集于粗颗粒中。Ba 在细粒级与粗粒级含量几乎相等,并以粗粒级略高;在全样品中,剖面下部较低,不过到中、上部突然增大,似乎揭示在更粗粒级 ($>77 \mu\text{m}$) 中 Ba 的含量存在陡然增加的态势。

基本趋势是易于淋溶的 Sr 在细粒沉积物中富集, Mn、Rb 也在细粒级中富集,而 Ti、Zr 在粗颗粒中富集,而 Ba 的富集粒级不明显。

3 讨论

3.1 各元素的地球化学特征与环境指示

如上文所述,碎屑沉积,无论是古风化壳,还是水下载体,都会存在因粒度组成不同造成的粒度效应。就湖泊沉积而言,不同粒度组成的沉积,由元素组成所揭示的流域与湖泊环境信息指向,理论上也有所不同。如粗颗粒,本身就是较强的湖泊水动力环境或较强的流域水文侵蚀与搬运能力的指示,如果 Zr 与 Ti 等赋存于重矿物的惰性元素在其中的含量较高,上述环境指向就越强烈。细颗粒碎屑,表面倾向于有过剩的表面能,在湖泊沉积过程中,这种作用往往加速颗粒物的聚沉和对溶质形态的吸附作用^[10]。并且,细颗粒沉积体比表面大,颗粒本身沉降速度慢,其表

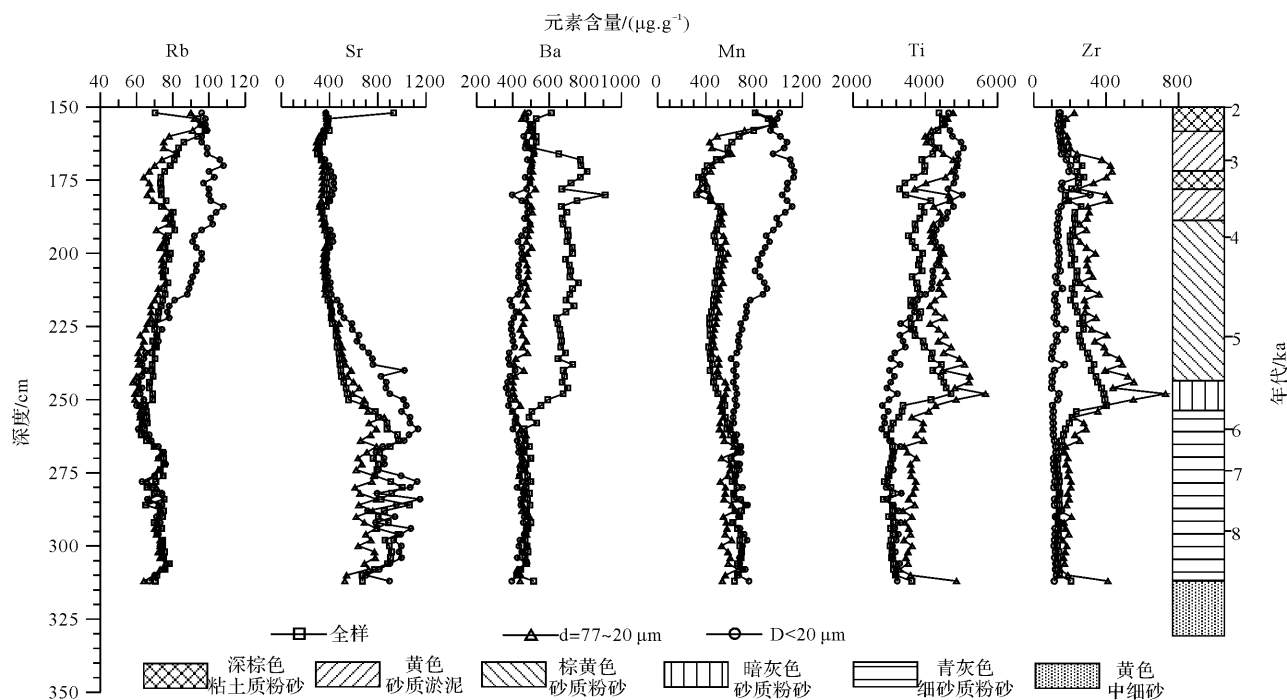


图1 H3剖面各元素在不同粒级的含量变化

Fig. 1 Rb, Sr, Ba, Mn, Ti, Zr content in the entire sample and the fraction of grain size of $20 \sim 77 \mu\text{m}$ and $<20 \mu\text{m}$, respectively, in H3 profile

面与水体接触时间长, 湖泊沉积过程中的化学与生物沉淀便较为发育^[5]。因此, 越细的颗粒蕴涵的环境信息越丰富^[2, 5], 并且这种信息是与湖泊水环境中的化学与生物过程密切相关, 而与粗颗粒沉积反映环境物理信息有所不同。因此, 只有相同或相似粒度组成的沉积, 才能获得等量或等向的环境信息。

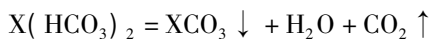
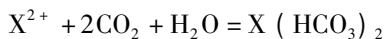
按照地球化学性质, Zr、Ti、Rb、Ba、Mn、Sr 等元素可以分为惰性元素 Zr、Ti, 次惰性元素 Rb、Ba、Mn 与活动性元素 Sr, 化学活动性差异显著。

Rb 为碱金属, 典型的分散元素。其性质与钾 (K) 相近似, 在内生循环与表生作用中, 其行为皆受 K 控制; 在自然界中主要分散在含 K 的矿物如黑云母、白云母、钾长石等。表生作用中, 风化溶出的 Rb 主要被吸附于粘土等细颗粒矿质中, 且其聚积于粘土矿质中的程度比钾还要高^[11]。

Ba 为碱土金属, 其性质与 K、Ca 近似, 更接近于前者, 因此与 K 产生类质同象, 常赋存于含钾的矿物中; 另外, 斜长石、辉石、角闪石中的钙 (Ca) 也可部分被钡取代; Ba²⁺ 在水溶液中极易被水解沉淀的粘土物质所吸附, 这使 Ba 与 Rb 性质相似。

Sr 为碱土金属, 典型的分散元素, 在自然界中主要以 Ca 的类质同像的形式分布于各类造岩矿物, 如斜长石、角闪石、辉石和碳酸盐等。在风化成壤过程中, 含 Rb、Ba、K 的矿物稳定性相对较高, 且溶出的 Rb 与 Ba 主要吸附在粘土矿物中, 滞留在原地, 地球化学行为相对稳定; 而含 Ca、Sr 的矿物较易风化, 溶出的 Sr²⁺ 与 Ca²⁺ 进入溶液, 随水流失, 从而造成风化壳中 Rb、Ba 和 Sr 的分离^[12, 13]。

湖泊沉积物 Sr 的变化, 是湖泊碳酸盐阶段的重要指示。在这个阶段, Sr 与 Ca 结晶析出, 并与如下的化学反应有关:



大量研究认为浮游生物光合作用引起的二氧化碳同化作用是湖泊内生碳酸钙沉淀的重要因素^[14, 15]。气温高, 浮游生物光合作用增强, 湖泊水体中的 CO₂ 被大量吸收, 致使 X + 2HCO₃⁻ = XCO₃ + H₂O + CO₂ 的反应平衡向右移动, 导致碳酸盐沉淀; 同时, 气温高时, 湖水蒸发浓缩当然也有利于碳酸盐沉淀^[16]。因此, 湖泊沉积物中 Ca、Sr 的含量受气候冷暖变化控制。

Zr 为典型的情性元素, 富集矿物大部分是氧化物和硅酸盐, 化学稳定性较高。风化过程中颗粒细碎

化后, Zr 滞留在残一坡积层, 形成各种类型的砂矿。Zr 富集的矿物颗粒, 一般都是重矿物^[11, 17], 以锆石 (ZrSiO₄) (比重为 4.2 ~ 4.7) 和斜锆石 (ZrO₂) (比重为 5.4 ~ 6.0) 为主, 性质非常稳定。由于重矿物颗粒输移的能力比石英、长石等轻矿物要弱的多, 因此 Zr 可能会与活性组分 Sr、与富集于长石等轻矿物中的 Rb, 甚至是 Ba 的分离。

Ti、Mn 等是铁族元素, 为造岩的常量元素。但岩浆阶段一般不形成独立的矿床, 往往呈副矿物的形式出现, 或者以类质同象的形式进入造岩矿物和其他金属矿物的晶格。表生过程中, 铁族元素不同程度均能形成复杂的络阴离子, 这一性质对于其表生迁移具有重要意义。不过, 钛是比较稳定的元素, 一般不形成可溶性化合物。在风化过程中, 由于易于流失的元素减少, 造成风化壳中其他元素的淋溶而钛以砂矿 (TiO₂) 金红石 (比重 4.2 ~ 5.6) 的形式相对富集^[11]。

3.2 各元素的粒度效应

显而易见, 地球化学性质的差异与表生环境下富存的颗粒状态的不同, 是 H3 剖面各元素在全样与各粒级颗粒出现差异 (也就是粒度效应, 用粗、细颗粒中元素含量的比值 X_f/X_c 表示)。

如图 2 所示, Sr 的粒度效应在剖面下部较大 (Sr_f/Sr_c > 1), 且波动强烈, 剖面中、上部渐趋平稳, 并接近于 1, 粒度效应降低。Rb 与 Mn 的粒度效应具有相似的线形变化, 在剖面下部 Rb_f/Rb_c、Mn_f/Mn_c 接近于 1, 指示粗、细颗粒中元素含量接近, 从中部开始细颗粒中含量逐渐增加, 而粗颗粒中的含量有所减小, Rb_f/Rb_c、Mn_f/Mn_c 有所增大。Ti 与 Zr 的粒度效应具有相似的线形变化, 剖面下部粗、细颗粒中元素丰度接近, Ti_f/Ti_c 与 Zr_f/Zr_c 比值接近于 1, 在剖面中、上部粗颗粒中元素含量明显增加, Ti_f/Ti_c 与 Zr_f/Zr_c 比值减小。而 Ba 在粗、细颗粒中差异小, 其粒度效应不明显, Ba_f/Ba_c 波动于 0.9 ~ 1.0 之间。

如上文所述, Sr 在表生作用过程中是与碳酸盐息息相关的, 是湖泊碳酸盐阶段的指示元素, 由于黄旗海流域没有碳酸盐出露, 因此除了残渣态外, Sr 的湖泊自生组分占有很大的比例, 与湖泊的生物化学过程有关。而自生碳酸盐矿质, 主要有两种颗粒存在方式: 1) 附着晶 (包括隐晶), 在较大的碎屑颗粒表面, 表现为皮壳状; 2) 独立的自形晶, 存在于细碎屑颗粒中。

水土界面上, 细颗粒物质与湖水具有较多的接触

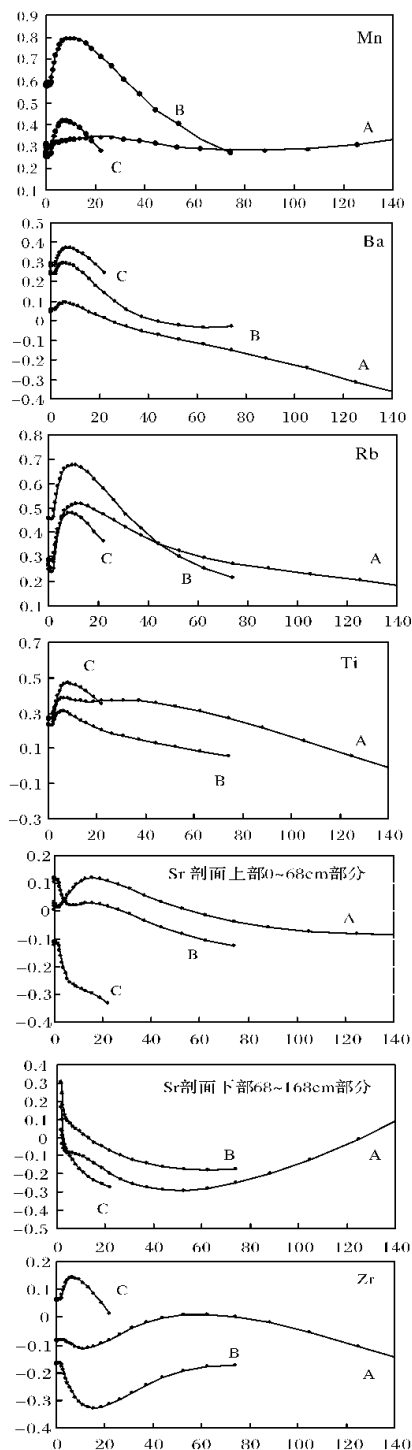


图2 H3剖面元素在各粒级(A.全样, B. $<77 \mu\text{m}$, C. $<20 \mu\text{m}$)的含量与各粒级粒度累积含量之间的相关关系(横坐标为粒径(μm)纵坐标为相关系数)

Fig. 2 The relationship of the element content in different grain-size fractions, i. e. bulk sample (A), $<77 \mu\text{m}$ (B) and $<20 \mu\text{m}$ (C), and the content of the corresponding cumulative grain size, which is shown by grain size in μm (X-axis) against correlative coefficient (Y-axis)

时间与接触机会,因此其表面附着的无定形自生碳酸盐的量要高,而自形晶往往为泥晶^[18],为细颗粒。因此,细碎屑颗粒中的自生碳酸盐的含量一般要高于粗颗粒中。这是 Sr_f/Sr_c 在剖面下部较大的原因,与碳酸盐的自生产率较高(图4)有关。而在剖面上部,由于沉积速率的增加与湖泊自生碳酸盐产率降低(图4),粗、细颗粒物中自生碳酸盐含量均降低,而 Sr_f/Sr_c 比值也减小。分散元素 Rb、Ba、Mn 与沉积物粒度组成^[19]的关系分析表明,各元素具有自有的富存粒级。Rb 与 $<88 \mu\text{m}$ 粒级均具有显著的相关性($r > 0.21$, $\alpha = 0.05$, $n = 83$),而与 $3 \sim 22 \mu\text{m}$ 粒级相关性更高($r > 0.40$) (图3),表明 Rb 具有在此粒级富存的特点。Mn 与 $3 \sim 44 \mu\text{m}$ 颗粒粒级具有显著的相关性($r > 0.21$, $\alpha = 0.05$, $n = 83$),指示 Mn 具有富存于 $3 \sim 44 \mu\text{m}$ 粒级的特点。Ba 与 $5 \sim 12 \mu\text{m}$ 颗粒粒级具有显著的相关性($r > 0.21$, $\alpha = 0.05$, $n = 83$),指示 Ba 具有富存于 $5 \sim 12 \mu\text{m}$ 粒级的特点。比较而言, Ba 的丰度与富存粒级的相关性要显著弱于 Rb 与 Mn, 指示 Ba 的富存状态要弱的多,这是其粒度效应低的原因。总体而言,各元素与粘土颗粒并没有密切的关系,这或许是因为本剖面粘土颗粒含量低,其对相关矿物没有明显制约作用,也说明以硅酸盐矿物为主的残渣态是元素的主导相态。元素受控于其独特的颗粒粒级,与富含这些元素的矿物颗粒在风化崩解、颗粒细化的过程中,这些颗粒粒级物理稳定性较高有关,这或许是这些矿物碎屑的细碎化特点,有待深入研究。

Zr 与 Ti 的粒度效应,应该是一种简单的机械分离的缘故。如上文所述,它们富集于粗颗粒中,且富存的矿物颗粒,一般都是重矿物,颗粒输移的能力比石英、长石这些轻矿物要弱的多。因此,在 5.8 kaBP 以前(对应剖面 260 cm 以下深度)的大湖期^[7, 8],由于流域植被盖度高,侵蚀能力较低,且剖面所在的位置为湖泊中心,含 Zr、Ti 的粗颗粒即使从流域内被侵蚀搬运到湖泊中,也无法搬运到此处,因此,这个时期 Zr、Ti 在粗细颗粒中均较低,粒度效应不显著。5.8 kaBP 以来,湖泊萎缩^[8],流域侵蚀强烈,湖泊碎屑沉积加剧,造成富 Zr 的粗颗粒矿物的富集, Zr、Ti 的颗粒效应显著增加。因此, Zr、Ti 的颗粒效应是流域侵蚀能力与湖面波动的指标指示,是水动力环境分选的结果。

3.3 元素对其环境意义

元素比是利用性质相近的元素化学活动性的差

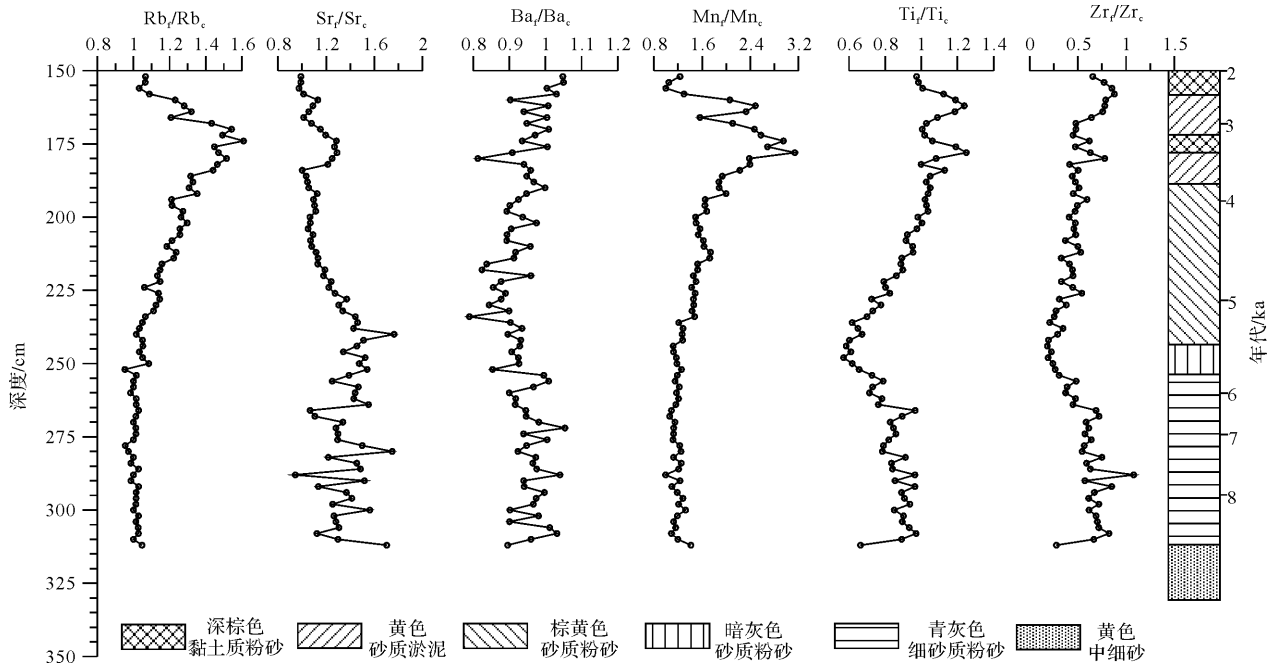


图 3 颗粒累积含量与各元素在粗、细与全样中含量之间的相关性

Fig. 3 Correlation of Rb content in entire sample , the fraction of <20 μm and 20 ~ 77 μm and accumulative content of corresponding grain size

异造成分离的特点,来考察影响元素分离过程中环境特点的有效方法。其实,不论是元素性质相近或是相去甚远,在表生过程中,只要从源到汇的过程,元素相互之间产生分馏,广义上都可以作为有效指标。不过不同元素对的环境指向,需要具体分析。例如,由于元素富存的颗粒特点不同、矿物颗粒的轻重差异与湖泊的内生碳酸盐作用,元素对便具有不同的环境意义。对于 H3 剖面具有明确含义的,大致有如下两组: 1) Zr (或 Ti) / Mn 、 Zr (或 Ti) / ($Ba + Rb$)、 Zr (或 Ti) / Ba (或 Rb) 2) Ba/Sr 、 Rb/Sr 与 Mn/Sr Zr_c/Mn_c 、 $Zr_c/(Ba_c + Rb_c)$ 、 Zr_c/Rb_c : 由于 Zr 与 Ti ,特别是前者,主要富存于粗颗粒重矿物中; Mn 的表生矿物尽管也是重矿物,不过在岩浆阶段,主要富集于硅酸盐矿物中,而这些矿物都是一些次重矿物; Ba 与 Rb 主要富存于钾长石、云母等轻矿物中。因此,碎屑颗粒中的 Zr 、 Ti 与 Mn 与 Ba 、 Rb 可分别是重矿物、次重矿物与轻矿物丰度的指标指示。由于 Mn 与 Ba 、 Rb 在细颗粒中具有富存粒级,轻重矿物的相对丰度可用其粗颗粒的含量比,也就是 Zr_c/Mn_c 、 $Zr_c/(Ba_c + Rb_c)$ 、 Zr_c/Rb_c 等。图 4 表示,在自生碳酸盐发育的大湖阶段^[7,8],由于 H3 剖面处于湖泊中心,即使存在粗颗粒被搬运之湖心,其 Ti 与 Zr 的含量也是很低的,颗粒以轻矿物为主。而在湖泊强烈萎缩期,剖面渐至湖

滨,随着气候环境的恶化^[7,8],流域侵蚀加剧,河流对其直接影响趋于强烈,从而被搬运之湖泊的重矿物,在水动力较强的湖滨环境中相对富集,粗颗粒中的 Zr 与 Ti 随之增加。因此,与 Zr 、 Ti 的粒度效应(Zr_f/Zr_c 、 Ti_f/Ti_c)一样, Zr_c/Mn_c 、 $Zr_c/(Ba_c + Rb_c)$ 、 Zr_c/Rb_c 是流域侵蚀能力与湖面波动的指标指示。

Ba_f/Sr_f 、 Rb_f/Sr_f 与 Mn_f/Sr_f : 由于 Sr_f 的波动比较剧烈, Rb_f 与 Mn_f 波动比较相似, Ba_f 波动平稳,因此, Ba_f/Sr_f 、 Rb_f/Sr_f 与 Mn_f/Sr_f 比值具有极为相似的变化趋势(图 4)。如上文分析, Ba_f 、 Rb_f 与 Mn_f 的主导相态为残渣态,是硅酸盐矿物态;而细颗粒中的 Sr_f 与碳酸盐具有极为相似的波动趋势($r=0.92$, $\alpha=0.05$, $n=14$)。因而, Ba_f/Sr_f 、 Rb_f/Sr_f 与 Mn_f/Sr_f 比值的变化,是对硅酸盐矿物与湖泊自生碳酸盐相对丰度的描述。其中的自生碳酸盐,在全新世早中期相对湿热的大湖阶段^[7,8] 相对发育,相反, H3 所在的湖泊中心,外源碎屑沉积速度低,碳酸盐含量高, Ba_f/Sr_f 、 Rb_f/Sr_f 与 Mn_f/Sr_f 比值低。而进入全新世中晚期,随着湖泊萎缩,河流携带的大量碎屑物质可直接影响湖心,碎屑沉积加剧,而这时湖泊水介质碱性增加,湖泊初级生产力降低^[7] 碳酸盐沉积减弱,而使沉积物中碳酸盐含量剧减, Ba_f/Sr_f 、 Rb_f/Sr_f 与 Mn_f/Sr_f 比值增大。因此, Ba_f/Sr_f 、 Rb_f/Sr_f 与 Mn_f/Sr_f 比值是对流域风化强度

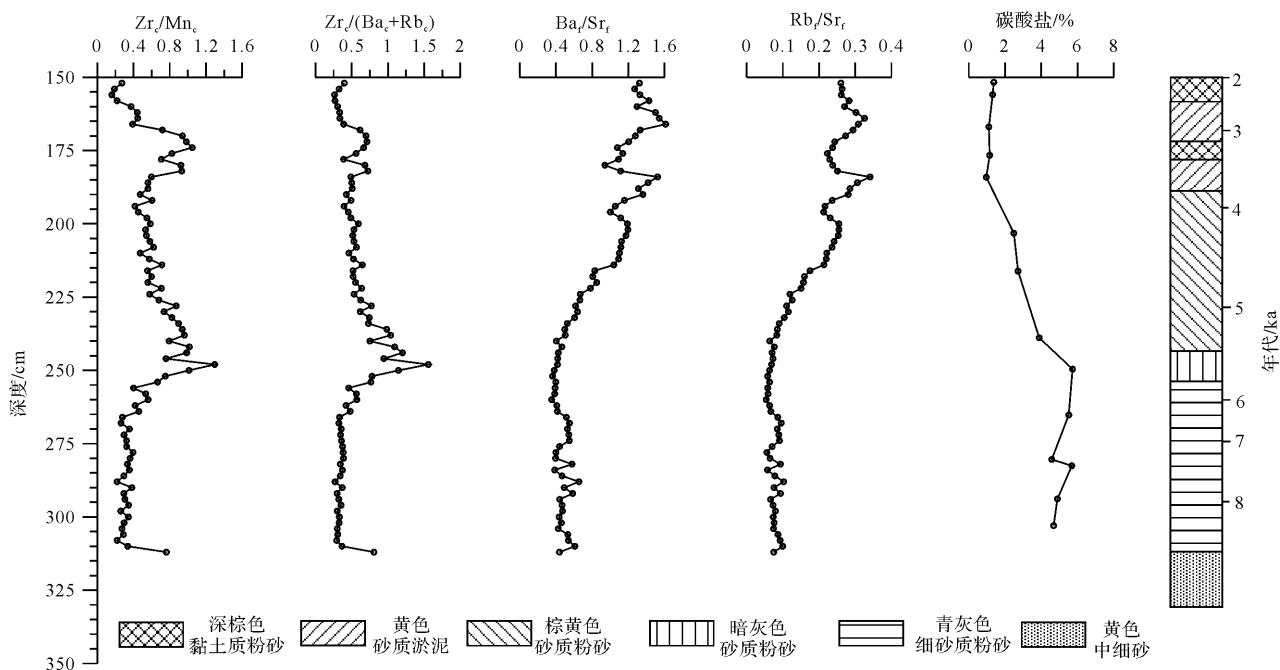


图4 典型元素对与碳酸盐含量(%)变化

Fig. 4 The typical element ratios in different grain size and carbonate of H3 profile

(它为湖泊提供了大量的可溶性 Sr)、侵蚀搬运(决定了湖泊外源碎屑的沉积)与湖泊过程(包括化学/生物过程)的混合信息的指示,环境指向并不单一。

3.4 黄旗海 8.3 kaBP 以来气候波动

由上述分析,可知 H3 剖面揭示了黄旗海自 8.3 kaBP 以来,大体经历了三个演化阶段:

第 I 阶段: 8.3 ~ 5.8 kaBP (314 ~ 252 cm) 沉积物(无论是细颗粒还是粗颗粒还是全样)中重矿物含量低,不同颗粒中轻重矿物分化低。表明剖面所在的位置远离湖滨,直接受河流的影响较小,水动力环境较弱,湖泊为稳定的大湖面;自生碳酸盐较为发育,表明浮游生物的光合作用强。大暖期鼎盛阶段。

第 II 阶段: 5.8 ~ 4.6 kaBP (252 ~ 210 cm) 粗颗粒沉积中重矿物突然增加,而细颗粒中变化较少,表明流域侵蚀强烈,湖面萎缩,河流对剖面所在的湖区直接影响显著,湖泊碎屑沉积加剧,自生碳酸盐产率低。气候恶化阶段。

第 III 阶段: 4.6 ~ 2.0 kaBP (210 ~ 150 cm) 粗颗粒沉积中重矿物含量维持较高水平,而细颗粒中较为稳定,表明流域侵蚀强烈,湖面较低;自生碳酸盐含量低,湖泊碎屑沉积速率较高。3.6 ~ 3.0 kaBP,气候曾一度回暖。

参考文献 (References)

- Martin J M, Meybeck M. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers[J]. *Marine Chemistry*, 1979, 7: 173-206
- 申洪源,贾玉连,吴敬禄,等. 内蒙古黄旗海不同粒级湖泊沉积物组成与 Rb、Sr 组成与环境变化[J]. *地理学报*, 2006(a), 61(11): 1208-1217 [Shen Hongyuan, Jia Yulian, Wu Jinglu, *et al.* Environmental change inferred from distribution of Rb and Sr in different grain size fractions from lacustrine sediments in Huangqihai Lake, Inner Mongolia[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006 61(11): 1208-1217]
- 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994 [Zhao Yiyang, Yan Mingcai. *Sedimentary Geochemistry in China Sea*[M]. Beijing: Science Press, 1994]
- Ackerman F. Monitoring of heavy metals in coastal and estuarine sediments: a question of grain size: < 20 μm versus < 60 μm [J]. *Environmental Technology and Letters*, 1983, 4: 317-328
- Singh A K, Benerjee D K. Grain size and geochemical partitioning of heavy metals in sediments of the Damodar River: a tributary of the lower Ganga, India[J]. *Environmental Geology*, 1999, 39(1): 91-98
- Zhu Y, Zou X D, Feng S P, *et al.* The effect of grain size on the Cu, Pb, Ni, Cd speciation and distribution in sediments: a case study of Dongping Lake, China[J]. *Environmental Geology*, 2006, 50: 753-759
- 李华章, 刘清泗, 汪家兴, 等. 内蒙古高原黄旗海/岱海全新世湖泊演变研究[J]. *湖泊科学*, 1992, 4(1): 31-39 [Li Huazhang, Liu Qingsi, Wang Jiaying. Study on evolution of Huangqihai and Daihai lakes in Holocene in Inner Mongolia plateau[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1992, 4(1): 31-39]

- 8 李栓科. 全新世内蒙南缘黄旗海湖面波动[J]. 湖泊科学, 1993, 5(4): 128-137 [Li Shuanke. Study on fluctuations of closed lake-level of Huangqihai Lake in Inner Mongolia since Holocene [J]. Journal of Lake Sciences, 1993, 5(4): 128-137]
- 9 武兵, 张根娣, 徐彩珍. 南海某海域海底淤泥中非粘土矿物的 X 射线定量分析[J]. 南京大学学报: 地球科学, 1992, 4(4): 79-83 [Wu Bing, Zhang Gendi, Xu Caizhen. X-ray diffraction quantitative analysis for non-clay minerals within sea-floor silts from South China Sea [J]. Journal of Nanjing University: Earth Sciences, 1992, 4(4): 79-83]
- 10 王晓蓉. 环境化学[M]. 南京: 南京大学出版社, 1993: 76-91 [Wang Xiaorong. Environmental Chemistry [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1993: 76-91]
- 11 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984 [Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, et al. Element Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1984]
- 12 Nesbitt H W, Markovics G. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1997, 61: 1653-1670
- 13 Hill I G, Worden R H, Meighan I G. Yttri μm : the immobility-mobility transition during basaltic weathering [J]. Geology, 2000, 28: 923-926
- 14 Lerman A. Lakes-Chemistry, Geology, Physics [M]. New York: Springer-Verlag Inc, 1978: 179-236
- 15 Camoin G F, Gautret P, Montaggioni L F, et al. Nature and environmental significance of microbialites in Quaternary reefs: The Tahiti paradox [J]. Sedimentary Geology, 1999, 126: 271-304
- 16 陈敬安, 万国江, 陈振楼, 等. 洱海沉积物化学元素与古气候演化[J]. 地球化学, 1999, 28(6): 562-270 [Chen Jing'an, Wan Guojiang, Chen Zhenlou, et al. Chemical elements in sediments of Lake Erhai and palaeoclimate evolution [J]. Geochimica, 1999, 28(6): 562-270]
- 17 牟保磊, 编著. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1999: 29-35 [Mou Baolei. Element Geochemistry [M]. Beijing: Peking University Press, 1999: 29-35]
- 18 王云飞. 青海湖、岱海的湖泊碳酸盐化学沉积与气候环境变化[J]. 海洋与湖沼, 1993, 1: 33-38 [Wang Yunfei. Lacustrine carbonate chemical sedimentation and climatic-environmental evolution: a case study of Qinghai lake and Daihai lake [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1993, 1: 33-38]
- 19 申洪源, 贾玉连, 张红梅. 内蒙古黄旗海湖泊沉积物粒度指示的湖面变化过程[J]. 干旱区地理, 2006(5): 457-462 [Shen Hongyuan, Jia Yulian, Zhang Hongmei, et al. Environmental change inferred from granular size character of lacustrine sediment in Inner Mongolia Huangqihai [J]. Arid Land Geography, 2006, 29(5): 457-464]

Element Features in Different Grain Size Fractions of Lacustrine Sediment and Their Environmental Implication: A case study of Huangqihai Lake

ZHANG Jing-ran^{1, 2, 4} JIA Yu-lian¹ SHEN Hong-yuan² SUN Qian¹ YU Ling-ling¹ WU Dun-yin¹

(1. Geography and Environment School Jiangxi Normal University, Wetland and Watershed Research of

Poyang Lake Educational Ministry Key Laboratory, Nanchang 330026;

2. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008;

3. Environment and Tourism School, Linyi, Shandong 276005; 4. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract The terminal Huangqihai Lake is located at the northern margin of the modern East Asian summer monsoon, and its evolution is sensitive to climate changes. Profile H3 is a few kilometers away to the southeast of the lake which was consisted of fine sand and silt deposited during ca 8.5 ~ 2.0 ka BP. During this period, Huangqihai Lake experienced its highest lake level in Holocene as well as largest summer monsoon precipitation. Analysis of Rb, Sr, Ba, Mn, Ti, Zr elements in entire sample, the fraction of grain size of 20 ~ 77 μm and < 20 μm , and Carbonate Minerals content in < 20 μm fraction indicated that element abundance in different grain size exhibited different features. Ti and Zr has enrichment tendency in the fraction of grain size of 20 ~ 77 μm ; Mn, Sr and Rb was apt to enrich in the fraction of grain size of < 20 μm , and the enrichment of Ba was not distinct. The enrichment of Ti, Zr, Mn and Rb probably were the fragmentating characteristics of their silicate minerals, and that of Sr was caused by lacustrine autogenic carbonate. $Zr_c / (Rb_c + Ba_c)$ ratio, Zr_c / Rb_c ratio, and the grain size effect of Zr and Ti (or Ti_c / Ti_f , Zr_c / Zr_f) showed the relative content of heavy and light minerals, which indicated the intensity of erosion in basin and transportation from basin to lake, and lake enlarging and reducing information. The information which indicated by Ba_f / Sr_f ratio, Rb_f / Sr_f ratio in < 20 μm fraction was complicated and has no directly environmental implication.

Key words Huangqihai Lake; lake sediment; element analysis; grain size effect; environmental implication