

文章编号:1000-0550(2014)05-0846-09

# 南黄海北部晚更新世以来常量元素记录的 化学风化作用<sup>①</sup>

梅 西<sup>1,2</sup> 张训华<sup>1,2</sup> 李日辉<sup>1,2</sup> 蓝先洪<sup>1,2</sup>

(1.国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室 山东青岛 266071;2.青岛海洋地质研究所 山东青岛 266071)

**摘 要** 以南黄海北部高沉积速率柱状样 DLC70-3 孔作为研究对象,对沉积物的黏土矿物和常量元素地球化学组成进行了综合分析。结果显示,DLC70-3 孔沉积物中黏土矿物组合以伊利石为主,其次为蒙皂石,绿泥石和高岭石含量较低;绝大部分样品中伊利石与蒙皂石含量的比值 $<6$ ,表明沉积物主要来源于黄河物质的输送。研究认为 DLC70-3 孔沉积物的化学风化指标 CIA 值受到海平面变化和源区气候变化共同控制,其中源区的气候变化为主要控制因素,而海平面变化造成的机械沉积分异作用主要影响 27.80~38.00 m(MIS 4)层位沉积物的 CIA 值。CIA 值显示在 MIS 5 和 MIS 3 期大陆化学风化作用较强,与内陆黄土高原地区夏季风和化学风化指标的变化趋势一致,尤其是在 MIS 3 早期(40~60 ka)记录的化学风化作用非常强,反映了黄河流域地区出现强夏季风降雨过程。

**关键词** 常量元素 黏土矿物 化学风化 晚更新世 南黄海

**第一作者简介** 梅 西 男 1981 年出生 博士 助理研究员 海洋沉积学 E-mail:meassy@gmail.com

**通讯作者** 张训华 男 研究员 E-mail:xunhuazh@vip.sina.com

**中图分类号** P736.2 **文献标识码** A

## 0 引言

南黄海为典型的半封闭陆架浅海,位于中国大陆和朝鲜半岛之间,长江、黄河等河流每年输入巨量的泥沙,因此南黄海陆架沉积物记录了海陆的相互作用、海侵和海退过程。南黄海陆架区的地层学、沉积动力学以及古环境等的深入研究对于解析海陆相互作用过程并预测不同尺度的海洋—气候系统演化具有重要意义。

南黄海地区冰期—间冰期旋回尺度上的研究主要集中在地层格架和物源方面,如 Liu 等(2010)通过南黄海西南部 3 口 60~71 m 深度不等的浅钻(SYS-0701,0702,0803)和 4 100 km 地震剖面的对比,结合测年结果,获取了 MIS 6~MIS 1 期以来的沉积地层记录<sup>[1]</sup>;杨子庚等(1993)通过对南黄海南部 QC2 孔的综合研究,建立了南黄海地区 1.6 Ma 年来的沉积地层格架<sup>[2]</sup>;在南黄海东部,韩国地质资源研究院(KIGAM)和青岛海洋地质研究所于 1995 年合作钻取了 6 口浅钻(YSDP102,103,104,105,106 和 107)并进行了综合分析,其中最长的 YSDP104 孔记录了

MIS 3 期以来的沉积历史<sup>[3]</sup>;Ge 等(2006)建立了南黄海中部泥质区 EY02-2 孔 880 ka 以来的磁性地层剖面<sup>[4]</sup>;李双林等(2001)对南黄海北部的 YA01 孔进行了稀土元素分析<sup>[5]</sup>,梅西等(2011)对临近的 DLC70-3 钻孔沉积物通过稀土元素分析进行了物源探讨<sup>[6]</sup>。但是南黄海地区晚更新世以来的古气候和古环境演化研究相对薄弱,仅有南黄海 B10 孔的微体古生物以及地球化学指标的少量研究报道<sup>[7~9]</sup>。

元素地球化学在古环境、古气候研究中扮演着重要角色。如常微量元素常常用来作为东亚边缘海沉积物的物源分析指标<sup>[10~12]</sup>,化学风化指数(CIA)可以定量地表示硅酸盐岩的化学风化强度,可以作为一个判断源区化学风化程度的指标<sup>[10,13,14]</sup>。可见,对海洋沉积物进行元素地球化学研究,可以追踪大陆风化以及沉积环境变化等信息。此外,不同的元素或元素组合可反映不同侧重的气候环境变化记录,彼此之间可进行相互补充、印证,再结合其他替代性指标,可以灵活、宽泛地对古气候和古环境变化展开研究。本文对采自南黄海北部的钻孔沉积物进行常量元素地球化学分析,主要目的是利用化学风化指数 CIA 值来

<sup>①</sup>国土资源部海洋地质调查专项(编号:GZH200800501,GZH201100202,1212011220113)、自然科学基金(41206051)与国土资源部海洋油气与环境地质重点实验室开放式基金(编号:MRE201227)联合资助  
收稿日期:2013-08-05;收修改稿日期:2014-06-04

恢复源区的化学风化作用变化并探讨 CIA 值变化的主要控制因素。

## 1 地质背景

黄海属于西太平洋边缘陆架浅海,位于中国和朝鲜半岛之间,总面积约为  $40 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[15]</sup>,黄海绝大部分区域水深  $< 100 \text{ m}$ ,平均水深为  $55 \text{ m}$ <sup>[16]</sup>。陆源物质经由河流搬运注入黄海,虽然黄河和长江现在的入海口都不在南黄海,但是由它们携带的沉积物仍被认为是南黄海全新世以来陆源物质最主要的来源<sup>[17]</sup>。黄河每年输入海洋的细粒沉积物为  $1.08 \times 10^9 \text{ t}$ ,其中  $9\% \sim 15\%$  向南输送并沉积在南黄海中部地区<sup>[17,18]</sup>。长江每年输送海洋的细粒沉积物为  $5 \times 10^8 \text{ t}$ ,沉积物主要在南黄海西南部和东海北部沉积<sup>[19]</sup>。中国其他小河流输入黄海的沉积物每年少于  $2 \times 10^7 \text{ t}$ ,其中,淮河每年输送的沉积物超过了  $1 \times 10^7 \text{ t}$ <sup>[12]</sup>。朝鲜半岛河流输入黄海的沉积物每年少于  $1 \times 10^7 \text{ t}$ ,主要沉积在黄海东部地区<sup>[20,21]</sup>。此外,黄海暖流携带的细粒沉积物估算也可达到  $10^6 \text{ t/a}$ <sup>[22]</sup>。南黄海是典型的半封闭型陆架海,各种海洋动力包括风浪、潮流及环流等的综合作用导致沉积环境复杂,对河流输入的陆源物质的搬运、扩散以及沉积物的侵蚀和改造起着直接的控制作用;南黄海中部为黄海冷水团中心区,细粒沉积物的供应和低能环境共同控制泥质沉积体系的形成;东南部呈现斑状分布的泥质沉积是低能环境下的反气旋沉积<sup>[23]</sup>;东部、南部等高动力区形成了砂质沉积体系,发育了砂质沉积<sup>[24]</sup>。

## 2 材料和方法

研究所用 DLC70-3 孔岩芯样品,由上海海洋石油局第一海洋地质调查大队“勘 407”轮海洋工程地质综合调查船于 2009 年 9 月在南黄海北部钻取 ( $36^\circ 38'15'' \text{ N}$ ,  $123^\circ 32'56'' \text{ E}$ ;水深  $73.0 \text{ m}$ ) (图 1)。该孔岩芯长  $71.20 \text{ m}$ ,取芯率为  $93.0\%$ ,主要由粉砂、砂质粉砂和粉砂质砂组成。

常量元素分析按照  $30 \sim 50 \text{ cm}$  间距取样,避开生物碎片含量较高层位,共取得 172 个样品,在国土资源部海洋油气与环境地质重点实验室利用荷兰帕纳科公司 Axios PW4400 X-射线荧光光谱仪进行。流程如下:将样品在  $120^\circ \text{C}$  的烘箱内烘  $8 \text{ h}$ ,称取已烘干的样品  $4.0 \text{ g}$ ,放入模具内拨平,用低压聚乙烯镶边垫底,在  $30 \text{ t}$  压力下压制成试样直径为  $32 \text{ mm}$ 、镶边外径为  $40 \text{ mm}$  的圆片,送仪器测试,获得各种氧化物

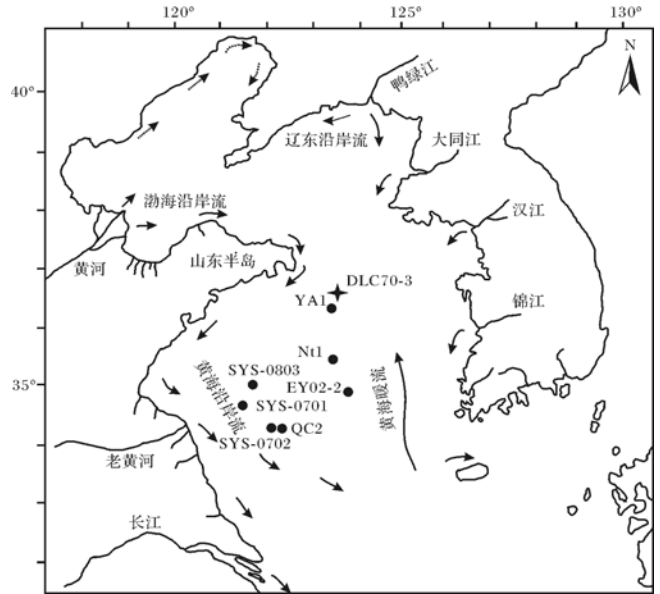


图 1 南黄海 DLC70-3 孔和文中提及钻孔位置及周边海流示意图(据文献[12]修改)

Fig.1 Location of Core DLC70-3 and other cores mentioned in the text, superimposed by surface currents in the South Yellow Sea (modified from reference[12])

$\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  的质量分数。测试过程中利用海洋沉积物标样 GBW07315 对测试结果进行标定,结果表明元素质量分数的相对标准偏差  $< 5\%$ 。

黏土矿物分析也按照  $30 \sim 50 \text{ cm}$  间距取样,共取得 172 个样品,取  $10 \sim 20 \text{ g}$  沉积物样品加入适量  $\text{H}_2\text{O}_2$  去除有机质。待有机质去尽后,加浓度为  $0.1 \text{ mol/L}$  的六偏磷酸钠分散剂静置过夜;依据 Stokes 沉降原理提取  $< 2 \mu\text{m}$  的悬浮液,至少提取 5 次;将提取到的黏土组分,分别制成甘油饱和定向片及自然定向片,然后进行上机分析。所用仪器为日本产 D/max-RA 型高功率转靶衍射仪。进行黏土矿物含量估算时所用强度因子为蒙皂石:伊利石:(高岭石+绿泥石) =  $2:4:1.5$ ,本文测试方法和计算方法与文献<sup>[25]</sup>一致。

年代测定在美国伍兹霍尔海洋研究所、国土资源部海洋油气与环境地质重点实验室利用 AMS(加速质谱仪器)和 OSL(光释光)对原生有孔虫、贝壳和粉砂质砂进行测年测试,在区分了“样品年龄”和“真实年龄”后确定了测点年龄,在此基础上结合底栖有孔虫群落分布特征,建立了钻孔的年代地层框架<sup>[26]</sup>。

## 3 结果

### 3.1 常量元素

DLC70-3 孔的常量元素化学成分主要为  $\text{SiO}_2$  和

$\text{Al}_2\text{O}_3$ ,二者含量总和的平均值为 75.72%;其次为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (全铁)、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{K}_2\text{O}$ ,它们含量的均值在 2%~5.5%之间;另外还含有少量的  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{MnO}$ ,三者含量总和的平均值不到 1%。DLC70-3 孔沉积物常量元素氧化物含量随深度变化特征如图 2 所示,含量变化具有较好的分层性,结合岩性变化,将其分为 5 层,各层变化简述如下:

(1) 0~4.20 m:各常量元素含量变化不大, $\text{SiO}_2$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  百分含量总体处于高值,特别是  $\text{Na}_2\text{O}$  含量值在整个钻孔中为最高值,其它常量元素则均在第 1 层出现较低值。

(2) 4.20~27.80 m: $\text{SiO}_2$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  百分含量总体处于低值, $\text{Na}_2\text{O}$  百分含量从上部到下部逐渐降低, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$  和  $\text{K}_2\text{O}$  的百分含量值变化趋势则基本相反,总体为较高值,从上到下整体逐渐增高, $\text{MnO}$  和  $\text{CaO}$  含量总体处于高值,但在 20.00~27.00 m 含量值变得极低。

(3) 27.80~38.00 m:本层位沉积物粒度较粗<sup>[26]</sup>,元素含量变化明显受到粒度的制约, $\text{SiO}_2$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  含量在此层位为最高值,平均含量都远高于整个钻孔中的平均含量。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、

$\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MnO}$  和  $\text{CaO}$  含量全处于低值,较上段都有明显下降。

(4) 38.00~54.30 m: $\text{SiO}_2$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  含量在此层位为低值,较上一层位明显下降。 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MnO}$  和  $\text{CaO}$  含量全处于高值,较上层位明显增加,而  $\text{K}_2\text{O}$  含量变化较上一层位不明显。

(5) 54.30~71.20 m: $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{TiO}_2$  百分含量较上一层位变化不明显,都略有增加。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{K}_2\text{O}$  较上一层位明显增加,而  $\text{MnO}$  和  $\text{CaO}$  的百分含量则显著下降。

### 3.2 黏土矿物

南黄海北部 DLC70-3 孔的黏土矿物主要由伊利石、蒙皂石、绿泥石和高岭石组成(图 3)。伊利石组分含量最高,在 49%~73% 范围内变化,平均为 63%;蒙皂石组分含量其次,在 4%~35% 范围内变化,平均为 20%,含量变化总体趋势上与伊利石相反;绿泥石组分含量较低,在 1%~19% 范围内变化,平均为 10%,在 0~19.00 m 含量较高,之后显著降低;高岭石组分含量最高值为 16%,最低值为 2%,平均为 6%,整体变化与绿泥石含量有相反的趋势,在 0~19.00 m 含量较低,之后显著增加。

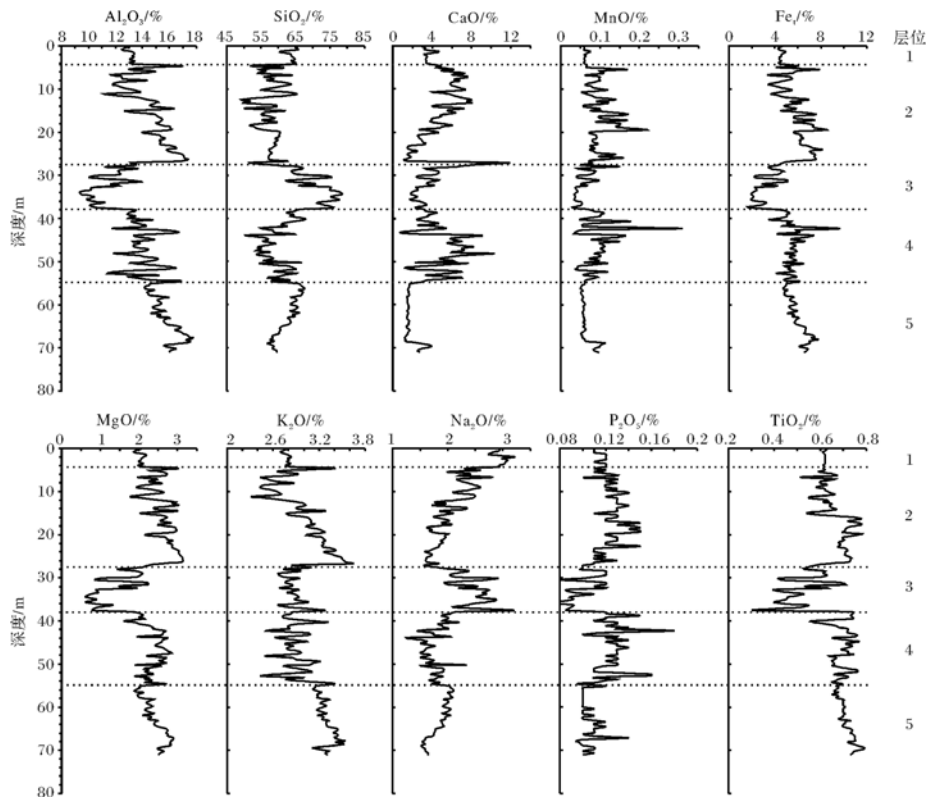


图 2 DLC70-3 孔常量元素含量随深度变化

Fig.2 The variations of the contents of macroelements with depth in DLC70-3 Core

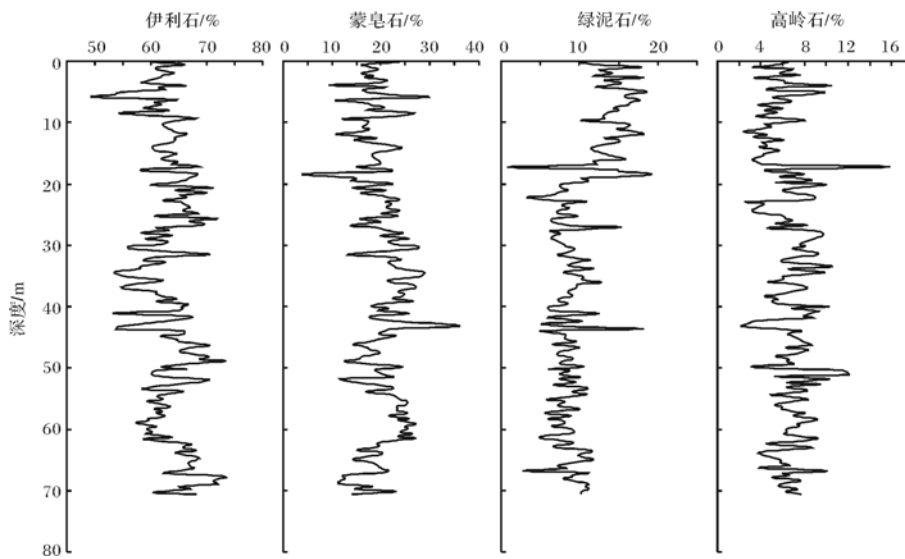


图3 DLC70-3 孔黏土矿物相对含量变化特征

Fig.3 Relative proportion changes of clay minerals in DLC70-3 Core

## 4 讨论

### 4.1 DLC70-3 孔沉积物物源分析

DLC70-3 孔沉积物的可能物源主要有长江、黄河以及朝鲜半岛河流(汉江、锦江、荣山江)的输送。本钻孔沉积物 REE 元素上地壳(UCC)标准化后的分布模式呈现近直线型,REE 分异弱,与长江和黄河沉积物稀土元素 UCC 标准化分布模式较为接近,而与韩国河流富集 LREE 的曲线形态有着明显不同,表明本钻孔沉积物受朝鲜半岛河流影响非常小<sup>[6]</sup>。虽然稀土元素能较好地地区分中韩河流沉积物,但在区分长江、黄河物源时可能不够敏感<sup>[27]</sup>。长江与黄河沉积物的常量元素组成特征不同,长江相对富 K、Fe、Al 等常量元素,而黄河相对富 Ca、Na 等元素。长江 CIA 值平均为 69,而黄河的化学风化指数 CIA 值平均为 55,这表明长江沉积物所处的硅酸盐风化阶段要强于黄河<sup>[14]</sup>。此外,长江与黄河由于地质环境和气候条件的差异,黏土矿物组合和化学成分有所差异。长江入海物伊利石贫 K,蒙皂石富 Fe;黄河入海沉积物伊利石富 K,蒙皂石富 Ca<sup>[28]</sup>。虽然黄河和长江的沉积物具有相同的黏土矿物组成(伊利石+绿泥石+高岭石+蒙皂石组合),但是在黏土矿物含量上有区别,比如黄河以伊利石含量低(60%左右)、蒙皂石含量高(15%左右)、伊利石与蒙皂石比值<6 为特征;而长江沉积物以伊利石含量高(70%左右)、蒙皂石含量低(5%左右)、伊利石与蒙皂石比值>8 为特征<sup>[25]</sup>。所

以通过沉积物的 CIA 值,结合黏土矿物组合特征,可以较好地沉积物中长江和黄河来源进行区分。

沉积物的化学风化程度可以用化学风化指数(CIA)、Al/Na 和风化 ACNK 图解来反映<sup>[14]</sup>。

$$CIA = \left\{ \frac{n(\text{Al}_2\text{O}_3)}{[n(\text{Al}_2\text{O}_3) + n(\text{CaO}^*) + n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O})]} \right\} \times 100$$

式中:氧化物取用摩尔质量百分比,CaO\* 指岩石硅酸岩中的 CaO,除了要去除碳酸盐之外,该值还取决于全岩的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 Na<sub>2</sub>O 含量,McLennan 提出  $n(\text{CaO}') = n(\text{CaO}) - 10 \times n(\text{P}_2\text{O}_5) / 3$ ,若计算后的  $n(\text{CaO}') < n(\text{Na}_2\text{O})$ ,则认为需要的  $n(\text{CaO}^*) = n(\text{CaO}')$ ;若计算后  $n(\text{CaO}') > n(\text{Na}_2\text{O})$ ,则认为需要的  $n(\text{CaO}^*) = n(\text{Na}_2\text{O})$ <sup>[29]</sup>,本文用此方法校正后计算得到 DLC70-3 孔沉积物的 CIA 值。如图 4 所示,CIA 值在 42.8~66.5 之间变化,平均值为 58.7,Al/Na 值与 CIA 值具有非常好的相关性,表明其也可以作为硅酸盐化学风化的替代性指标,本钻孔 CIA 值与图中所示现代长江沉积物 CIA(均值 69)和黄河沉积物的 CIA 值(均值 55)<sup>[14]</sup>相比,更接近黄河沉积物。此外,本钻孔沉积物中蒙皂石组分含量较高,平均为 20.0%,伊利石/蒙皂石值在 1.5~15.5 之间变化,均值为 3.5,其中比值>6 的样品数仅为 6 个,与黄河沉积物伊利石与蒙皂石比值<6<sup>[25]</sup>的特征较为一致(长江、黄河黏土矿物数据来源文献<sup>[12,25,30]</sup>)。综上所述,本钻孔 CIA 值和黏土矿物的特征都表明沉积物主要来源于黄河物质的输送。

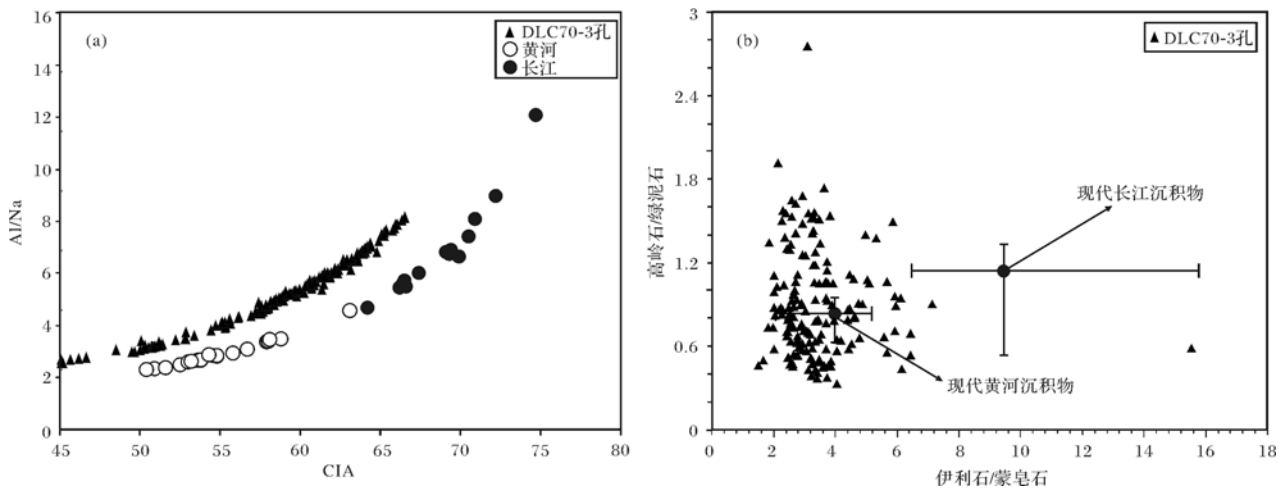


图4 DLC70-3孔CIA和Al/Na相关图(a)、伊利石/蒙皂石和高岭石/绿泥石相关图(b)

(黄河和长江沉积物CIA和Al/Na数据来源文献[14],黏土矿物数据来源文献[12,25,30])

Fig.4 Plot of Al/Na ratio and CIA(a), plot of illite/smectite and kaolinite/chlorite ratios(b) of Core DLC70-3

(Al/Na ratio and CIA data are from reference[14], clay mineral data are from references[12,25,30])

## 4.2 CIA值变化及其控制因素

影响沉积物CIA值的因素主要有源区化学风化变化、沉积物搬运过程中的沉积分异作用对矿物组成的影响以及物源变化<sup>[31]</sup>。黄河所搬运的物质是本钻孔沉积物的主要组成部分,所以物源不会成为本孔化学风化强度整体变化趋势的影响因素。而碎屑物质搬运过程中,沉积分异作用引起矿物组成变化会影响沉积物中元素组成,此外,沉积物源区化学风化强度的变化也会影响到沉积物CIA值,本文从这两方面来讨论DLC70-3孔沉积物CIA值的主要控制因素。

### 4.2.1 海平面变化引起的沉积分异作用

DLC70-3孔保存了130 ka以来的沉积记录,有孔虫分布较为连续,主要为浅海以及海陆过渡相的沉积<sup>[26]</sup>。海平面频繁的波动使得沉积物输送距离发生较大的变化,导致搬运过程中发生明显的机械沉积分异作用,而使得沉积物粒度发生变化。前人对长江下游地区沉积物CIA值的研究发现,河漫滩沉积物和悬浮物CIA值与平均粒度的相关性都很好,但粒度的影响在不同的粒度有所不同,对于较粗粒沉积物( $\phi < 7.0$ ),平均粒度与CIA值的相关性高,说明水动力分选可以影响长江河流悬浮物CIA值在空间上的变化,粒度越细、黏土组分相对富集,CIA值就高<sup>[32]</sup>。DLC70-3钻孔碎屑物质在远源搬运过程中经历了高度混合过程,成份变得相对均一,沉积物以黏土、粉砂为主,搬运过程中的机械沉积分异作用对上述元素比值的影响很小。如图5所示,虽然MIS 5和MIS 3期

海平面发生了较大的变化(海平面变化曲线据文献[33]),但是对应的DLC70-3孔71.20~38.00 m(MIS 5)和27.80~4.20 m(MIS 3)两个层位的沉积物粒度均较细,CIA值也都处于高值,并未随着海平面的变化而波动。去除27.80~38.00 m层位后,计算本钻孔CIA值和平均粒径Mz值的相关性,结果为 $R^2 = 0.20$ (粒度数据来源于文献[26])(图6),表明海平面变化对这些细粒沉积的层位的CIA值影响有限。但是DLC70-3孔38.00~27.80 m沉积物粒度较粗( $\phi < 6.0$ ),本层位的沉积对应MIS4期低海平面时期,沉积环境为滨岸沉积,较强的水动力使得沉积物的粒度明显比其他层位粗很多。本层位沉积物的CIA值也为全钻孔最低值(均值为50.1),所以粒度对本层位沉积物CIA值的影响较大。比较大陆硅酸盐化学风化时最好选用代表性的悬浮物,或者是相同粒级的沉积物来做比较<sup>[32]</sup>。所以,将本层位的CIA值与其他层位的CIA值直接比较来讨论硅酸盐风化作用的变化,会产生较大的误差。综上分析,认为海平面变化引起的机械沉积分异作用对本钻孔38.00~27.80 m层位(MIS4期)沉积物的CIA值起主要控制作用,而对其他层位影响很小。

### 4.2.2 源区的化学风化作用

东亚夏季风的强度变化会引起降水量的巨大变化,进而影响沉积物物源区的化学风化程度。夏季风强盛时,明显增多的降水使黄河流域的化学风化作用增强,因此黄河运输物质含相对较多的伊利石、蒙皂

石等风化程度较高的黏土矿物;反之,黄河运输物质含更多的斜长石、石英等未风化或弱风化的矿物<sup>[34]</sup>。源区沉积物矿物组成的变化将直接决定沉积物的元素组成,进而影响沉积物化学风化指标 CIA 值。此外,Al 和 Ti 等元素在风化过程中非常稳定,几乎被等量地迁移到碎屑沉积物中,而 K、Ca 和 Na 等元素则更容易从源岩分解出来而被溶液带走,因此 Ti/Na 和 Al/K 等也常用来作为反映沉积物源区化学风化强度的指标<sup>[35]</sup>, DLC70-3 孔沉积物 CIA 值与  $TiO_2/Na_2O$  值垂向变化有着较好的相关性(如图 6,  $R^2 = 0.88$ )。DLC70-3 孔沉积物主要为黄河输入海沉积的物质,其化学风化指标 CIA 值主要反映了黄河流域的累积化学风化程度。洛川剖面黄土—古土壤序列中的磁化率值<sup>[36]</sup>和  $^{87}Sr/^{86}Sr$  值<sup>[37]</sup>可以指示黄土高原地区化学风化及季风降雨的变化。如图 5 所示, DLC70-3 孔沉积物 CIA 值、 $TiO_2/Na_2O$  值与黄土高原磁化率值<sup>[36]</sup>和  $^{87}Sr/^{86}Sr$  值<sup>[37]</sup>的变化趋势在冰期—间冰期旋回上具有较好的一致性:

(1) 71.20~38.00 m 为 MIS 5 期时的沉积,本阶段是以东亚夏季风强盛为基本特征,是晚更新世以来最温暖湿润的时期。洛川黄土剖面磁化率记录表明 MIS 5 期黄土高原整体较潮湿<sup>[36]</sup>,化学风化指标  $^{87}Sr/^{86}Sr$  亦指示同期化学风化作用非常强<sup>[37]</sup>。DLC70-3 孔沉积物 CIA 和  $TiO_2/Na_2O$  值在本层位均为高值,指示了较强的化学风化作用。表明当时黄河流域受控于较强的夏季风作用以及相对温暖湿润的

气候条件。

(2) 38.00~27.80 m 为 MIS 4 期的低海平面沉积,沉积物粒度较粗导致 CIA 值受到机械沉积分选作用的强烈影响,难于与其他层位直接比较,用来作为气候指标可能会造成较大的误差。

(3) 27.80~4.20 m 对应于 MIS 3 (60~30 ka) 的沉积, CIA 值和  $TiO_2/Na_2O$  值在 27.80~12.00 m (60~40 ka) 处于整个钻孔的最高值,在 12.00~4.20 m (40~30 ka) 却明显降低(图 5),反映了化学风化作用在 MIS 3 早期非常强,晚期减弱。虽然有研究表明在 MIS 3 晚期(40~30 ka) 青藏高原处于特殊的暖湿气候阶段,夏季风极为强盛<sup>[38]</sup>。但是在黄土高原地区的黄土—古土壤序列中, MIS 3 晚期(40~30 ka) 并没有记录到这样的“暖湿期”<sup>[39]</sup>,如洛川剖面黄土—古土壤序列中的磁化率和  $^{87}Sr/^{86}Sr$  都指示了在 MIS 3 早期黄土高原地区存在非常强的夏季风<sup>[36,37]</sup>。中国亚热带地区的石笋指标也指示 MIS 3 早期的季风降雨强度要超过 MIS 3 晚期<sup>[40]</sup>。南海南部 MD05-2896 Ba/Ti 指标反映的生产力在 MIS 3 期早期时达到高值,表明了季风降雨在 MIS 3 早期明显增强<sup>[41]</sup>。本钻孔记录的 CIA 值也指示 MIS 3 早期黄河流域化学风化作用非常强,与前人对黄土高原地区研究的结果较为一致。

(4) 4.20~0 m 为全新世早期 11.5~11.0 ka 的沉积。CIA 值在本层位为低值,反映了非常弱的化学风化作用,与洛川黄土磁化率和  $^{87}Sr/^{86}Sr$  指标一致,指

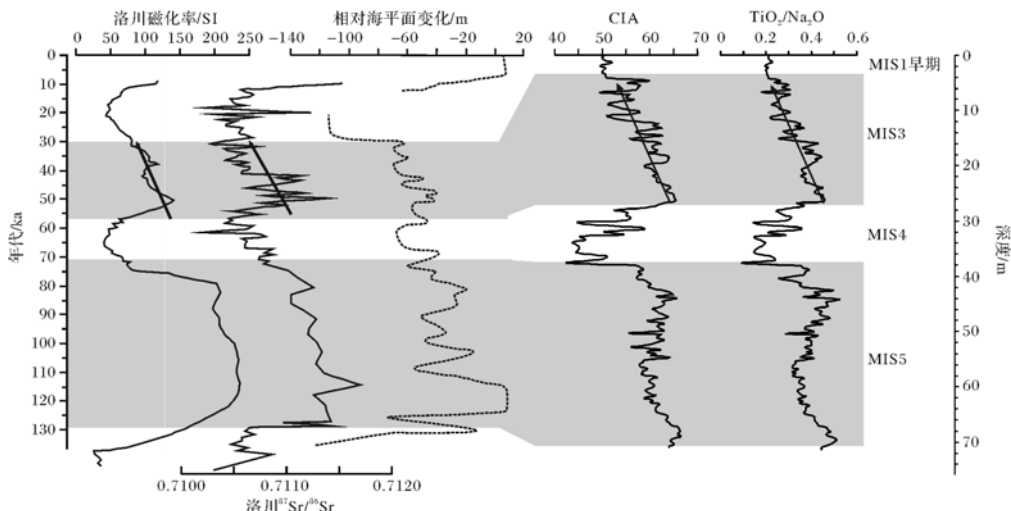


图5 黄土洛川剖面风化指标、全球相对海平面变化、DLC70-3 孔 CIA 值以及  $TiO_2/Na_2O$  值对比

(磁化率数据来源文献[36]、 $^{87}Sr/^{86}Sr$  数据来源文献[37]、海平面变化数据来源文献[35])

Fig.5 Comparison of the chemical weathering indicators of Luochuan profile, relative sea level, CIA and  $TiO_2/Na_2O$  values of DLC70-3 Core (magnetic susceptibility data is from reference [36],  $^{87}Sr/^{86}Sr$  data is from reference [37] and relative sea level curve from reference [35])

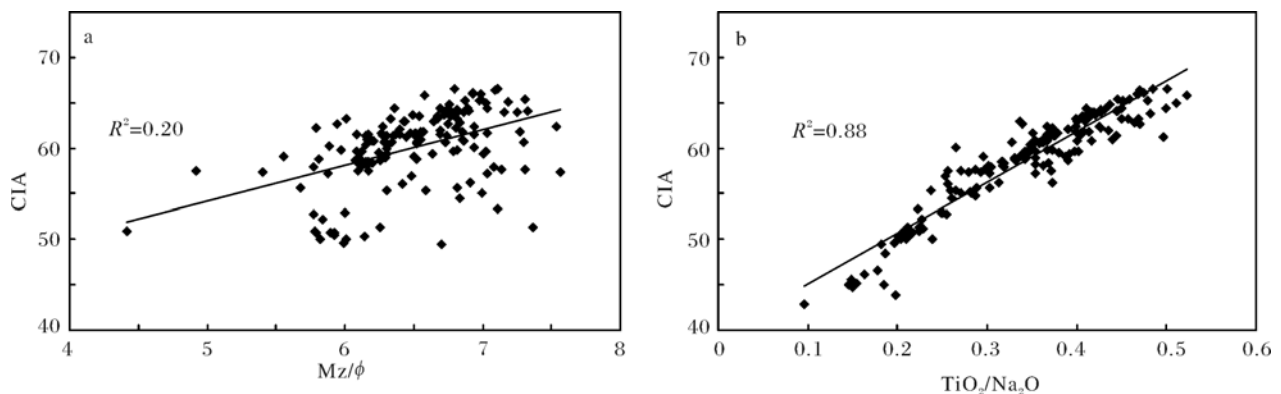


图6 DLC70-3孔沉积物粒度平均粒径(Mz)与CIA值(a)  
(不包括27.8~38.0 m层位)、TiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O与CIA值(b)相关性分析(平均粒径数据来源文献[26])

Fig.6 Correlation between (a) Mz( $\phi$ ) and CIA  
(excludes position of 27.8~38.0 m); (b) TiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O and CIA (mean grain size data is from reference [26])

示了全新世早期干冷的气候环境。

综上所述,DLC70-3孔CIA值与黄土高原化学风化指标具有较好的相关性;CIA值可以指示黄河流域地区的累计化学风化作用;源区的化学风化作用是控制本孔CIA值的主要因素。

## 5 结论

通过对南黄海北部DLC70-3柱状样黏土矿物和常量元素地球化学特征的初步分析,可以得出以下认识:

(1) DLC70-3孔沉积物来源主要为黄河沉积物。

(2) DLC70-3孔化学风化指标CIA值受到海平面变化和源区化学风化作用控制,其中源区的化学风化作用为主要控制因素,海平面变化造成的分异作用主要影响27.80~38.00 m层位沉积物的CIA值。

(3) DLC70-3孔沉积物的CIA值可以很好地指示黄河流域的化学风化作用,表明在MIS 5和MIS 3期化学风化作用较强,尤其是在MIS 3期的早期,黄河流域出现强季风降雨过程。

致谢 青岛海洋地质研究所刘锐和李杰博士参与有益讨论,审稿专家提出建设性的意见,在此一并表示衷心的感谢。

## 参考文献 (References)

- Liu J, Saito Y, Kong X, *et al.* Delta development and channel incision during marine isotope stages 3 and 2 in the western South Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2010, 278(1): 54-76
- 杨子庚. Olduvai 亚时以来南黄海沉积层序及古地理变迁[J]. *地质学报*, 1993, 67(4): 357-366 [Yang Zigeng. The sedimentary sequence and palaeogeographic changes of the South Yellow Sea since the Olduvai subchron [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1993, 67(4): 357-366]
- Chough S, Lee H, Chun S, *et al.* Depositional processes of Late Quaternary sediments in the Yellow Sea: a review [J]. *Geosciences Journal*, 2004, 8(2): 211-264
- Ge S, Shi X, Zhu R, *et al.* Magnetostratigraphy of borehole EY02-2 in the southern Yellow Sea and its paleoenvironmental significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7): 855-865
- 李双林, 李绍全. 黄海 YA01 孔沉积物稀土元素组成与源区示踪 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(3): 51-56 [Li Shuanglin, Li Shaoquan. REE composition and source tracing of sediments from core YA01 in Yellow Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2001, 21(3): 51-56]
- 梅西, 张训华, 李日辉. 南黄海中部泥质沉积区 DLCT0-3 孔稀土元素及环境意义 [J]. *地质科技情报*, 2011, 30(4): 21-28 [Mei Xi, Zhang Xunhua, Li Rihui. REE of DLC70-3 Core sediments from mud areas in the central South Yellow Sea and its environmental significance [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(4): 21-28]
- 陈志华, 石学法, 王湘芹, 等. 南黄海 B10 岩心的地球化学特征及其对古环境和古气候的反映 [J]. *海洋学报*, 2003, 25(1): 69-77 [Chen Zhihua, Shi Xuefa, Wang Xiangqin, *et al.* Geochemical changes in Core B10 in the southern Yellow Sea and implications for variations in paleoenvironment and paleoclimate [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(1): 69-77]
- Cheng Z, Shi X, Chen Z, *et al.* Microfossil assemblage characteristics in Core B10 and implication for paleoenvironmental evolution in the southern Yellow Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(Suppl. 1): 49-55
- Fu M, Li Z, Xu X, *et al.* Sporopollen analysis of Core B10 in the southern Yellow Sea and the reflected characteristics of climate changes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(Suppl. 1): 42-48
- Yang S, Yim W, Huang G. Geochemical composition of inner shelf Quaternary sediments in the northern South China Sea with implica-

- tions for provenance discrimination and paleoenvironmental reconstruction[J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 60(3): 207-221
- 11 Yang S, Youn J. Geochemical compositions and provenance discrimination of the central south Yellow Sea sediments[J]. *Marine Geology*, 2007, 243(1): 229-241
- 12 Yang S, Jung H, Lim D, *et al.* A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 63(1): 93-120
- 13 Nesbitt H, Young G, McLennan S, *et al.* Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies[J]. *The journal of geology*, 1996, 104(5): 525-542
- 14 Yang S, Jung H, Li C. Two unique weathering regimes in the Changjiang and Huanghe drainage basins: geochemical evidence from river sediments[J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 164(1): 19-34
- 15 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 黄海地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1989 [ Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Chen Lirong, *et al.* *Geology of the Yellow Sea*[M]. Beijing: Ocean Press, 1989 ]
- 16 Lee S, Shinn Y, Lee K, *et al.* Depositional development of an isolated mound and adjacent area in the southern Yellow Sea during the last postglacial sea-level rise [J]. *Marine Geology*, 2009, 265(1): 19-30
- 17 Milliman J, Beardsley R, Yang Z, *et al.* Modern Huanghe-derived muds on the outer shelf of the East China Sea: identification and potential transport mechanisms[J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1): 175-188
- 18 Alexander C, DeMaster D, Nittrouer C. Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 1991, 98(1): 51-72
- 19 Milliman J, Meade R. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(1): 1-21
- 20 Schubel J, Shen H, Park M. A comparison of some characteristic sedimentation processes of estuaries entering the Yellow Sea[C]// Park Y A, Pilkey O H., Kim S W. *Marine Geology and Physical Processes of the Yellow Sea*. Seoul: Proc. Korea-U.S. Seminar and Workshop, 1984: 286-308
- 21 Ren M, Shi Y. Sediment discharge of the Yellow River (China) and its effect on the sedimentation of the Bohai and the Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1986, 6(6): 785-810
- 22 Gao S, Park Y, Zhao Y, *et al.* Transport and resuspension of fine-grained sediments over the southeastern Yellow Sea [C]// Lee C, Zhao Y. *Proceedings of the Korea-China International Seminar on Holocene and Late Pleistocene Environments in the Yellow Sea Basin*. Seoul: Seoul National University, 1996: 83-98
- 23 Park S, Lee H, Han H, *et al.* Evolution of late Quaternary mud deposits and recent sediment budget in the southeastern Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2000, 170(3): 271-288
- 24 Liu Z, Xia D, Berne S, *et al.* Tidal deposition systems of China's continental shelf, with special reference to the eastern Bohai Sea[J]. *Marine Geology*, 1998, 145(3): 225-253
- 25 范德江, 杨作升, 毛登, 等. 长江与黄河沉积物中粘土矿物及地化成分的组成[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(4): 7-12 [ Fan Dejiang, Yang Zuosheng, Mao Deng, *et al.* Clay minerals and geochemistry of the sediments from the Yangtze and Yellow rivers [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2001, 21(4): 7-12 ]
- 26 梅西, 张训华, 李日辉. 南黄海北部晚第四纪底栖有孔虫群落分布特征及对古冷水团的指示[J]. *地质论评*, 2013, 59(6): 1024-1034 [ Mei Xi, Zhang Xunhua, Li Rihui. Distribution of Late Quaternary benthic foraminifera in South Yellow Sea and its implication of paleo-water mass[J]. *Geological Review*, 2013, 59(6): 1024-1034 ]
- 27 Yang S, Li C, Lee C, *et al.* REE geochemistry of suspended sediments from the rivers around the Yellow Sea and provenance indicators[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(11): 1135-1139
- 28 何良彪, 刘秦玉. 黄河与长江沉积物中粘土矿物的化学特征[J]. *科学通报*, 1997, 42(7): 730-734 [ He Liangbiao, Liu Qinyu. Chemical characteristics of clay minerals of Yangtze and Yellow Rivers [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(7): 730-734 ]
- 29 McLennan S. Weathering and global denudation [J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303
- 30 杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中粘土的矿物组合、化学特征及其与物源区气候环境的关系[J]. *海洋与湖沼*, 1988, 19(4): 336-346 [ Yang Zuosheng. Clay mineral assemblages and chemical characters in Changjiang, Huanghe and Zhujiang sediments, and its relation with the climate environment in the source areas [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1988, 19(4): 336-346 ]
- 31 Fralick P, Kronberg B. Geochemical discrimination of clastic sedimentary rock sources [J]. *Sedimentary Geology*, 1997, 113(1): 111-124
- 32 Shao J, Yang S. Does chemical index of alteration (CIA) reflect silicate weathering and monsoonal climate in the Changjiang River basin? [J] *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(10): 1178-1187
- 33 Lambeck K, Esat T, Potter E. Links between climate and sea levels for the past three million years [J]. *Nature*, 2002, 419(6903): 199-206
- 34 季峻峰, 陈骏, 鹿化煜. 陕西洛川黄土中伊利石成因的透射电镜证据[J]. *科学通报*, 1998, 43(19): 2095-2098 [ Ji Junfeng, Chen Jun, Lu Huayu. TEM evidence for illite origin in Luochuan loess, Shanxi Province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(19): 2095-2098 ]
- 35 McLennan S. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes [J]. *Rev Mineral*, 1989, 21: 169-200
- 36 An Z, Kukla G, Porter S, *et al.* Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130,000 years [J]. *Quaternary Research*, 1991, 36(1): 29-36
- 37 Yang J, Chen J, An Z, *et al.* Variations in  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios of calcites in Chinese loess: a proxy for chemical weathering associated with the East Asian summer monsoon [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 157(1): 151-159
- 38 施雅风, 于革. 40~30ka BP 中国暖湿气候和海侵的特征与成因探讨[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(1): 1-11 [ Shi Yafeng, Yu Ge. Warm humid climate and transgressions during 40-30ka BP. and their potential mechanisms [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(1): 1-11 ]
- 39 Porter S, An Z. Correlation between climate events in the North Atlan-



- tic and China during the last glaciation[J]. *Nature*, 1995, 375: 305-308
- 40 Wang Y, Cheng H, Edwards R L, *et al.* Millennial-and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years[J]. *Nature*, 2008, 451(7182): 1090-1093
- 41 梅西,张训华,郑洪波,等. 南海南部 120ka 以来元素地球化学记录的东亚夏季风变迁[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2010, 29(2): 134-141 [Mei Xi, Zhang Xunhua, Zheng Hongbo, *et al.* Element geochemistry record of Southern South China Sea sediments during the past 120 ka and its implications for East Asian Summer Monsoon variation[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2010, 29(2): 134-141]

## Chemical Weathering Recorded by Major Element of Northern South Yellow Sea since Late Pleistocene

MEI Xi<sup>1, 2</sup> ZHANG Xun-hua<sup>1, 2</sup> LI Ri-hui<sup>1, 2</sup> LAN Xian-hong<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Petroleum Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao, Shandong 266071; 2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong 266071)

**Abstract:** The chemical weathering of silicate rocks in continents as an important sink of atmospheric CO<sub>2</sub> is of great significance for global environmental change. The chemical index of alteration (CIA) has been widely used as a proxy for chemical weathering in sediment source area. This study presents combined clay minerals and major elements analyses on bulk sediments from a 71-m-long core with high sedimentation rate from northern South Yellow Sea and containing a Late Pleistocene record. After examining the variations of clay minerals and major elements compositions of the core sediment, we develop clay minerals and geochemical proxies to identify the origins of the DLC70-3 Core sediments, especially to discriminate the Yangze River-derived and Yellow River-derived sediment provenances. Furthermore, CIA indices are also applied to decipher the chemical weathering record in sediment source area. Results show that combination of clay minerals is given priority to illite, followed by smectite, with low chlorite and kaolinite. In the vast majority of samples the ratios of illite to smectite is less than 6, indicating that the sediments are mainly transported by the Yellow River. The research suggests that the chemical weathering index (CIA) of the sediment in DLC70-3 Core is controlled together by the sea level change and the climate change of the source area, of which the latter one is the major controlling factor. However, the mechanical sedimentary differentiation caused by the sea level change might have affects CIA values at the depth of 27.80~38.00 m corresponding to MIS 4 of coarse grained sediments greatly. CIA values reveal that during MIS 5 and MIS 3 the continental chemical weathering is relatively strong, which is consistent with the trend of summer monsoon and chemical weathering index of the inland Loess Plateau area, especially in the early stage of the MIS 3 (40~60 ka), the record of chemical weathering is very strong, which reflects a strong summer monsoon rainfall process in the Yellow River basin. Although the high resolution paleoenvironmental changes can not be easily reconstructed due to ubiquitous unconformity in the sedimentary strata and weak age controls compared to the deep sea sedimentation, the present study sheds new lights on the understanding of the East Asian palaeomonsoon activity in the Yellow River Basin.

**Key words:** major elements; clay minerals; chemical weathering; Late Pleistocene; South Yellow Sea