

王雪飞, 叶思源, 韩宗珠, 等. 近 33 ka 以来辽河口沉积环境演变与生物硅记录[J]. 中国地质, 2015, 42(4): 1092–1102.

Wang Xuefei, Ye Siyuan, Han zongzhu, et al. The sedimentary environment evolution and biogenic silica records of the Liaohe Estuary since 33 ka BP[J]. Geology in China, 2015, 42(4): 1092–1102(in Chinese with English abstract).

近 33 ka 以来辽河口沉积环境演变与生物硅记录

王雪飞^{1,2} 叶思源^{2,3} 韩宗珠¹ 袁红明^{2,3} 杨士雄^{2,3} 丁喜桂^{2,3} 赵广明^{2,3} 何磊^{2,3} 王锦^{2,3} 刘瑾^{2,4}

(1. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 2. 中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室, 山东 青岛 266071;
3. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 4. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘要: 沉积物岩心记录着沉积环境的演变过程, 其中生物硅(BSi)记录能反映硅质生物的生产力时间和空间变化, 2012年5月在下辽河平原西南缘得到了ZK2钻孔柱状样, 通过对其沉积物原位密度、生物硅、碳埋藏、粒度、AMS¹⁴C和OSL测年、有孔虫鉴定、孢粉鉴定, 将ZK2孔的沉积环境主要划分为上三角洲平原相沉积、海洋主导的沉积、湖相沉积、河道沉积4个沉积单元, 其相应的生物硅(BSiO₂)浓度分布依次为(2.85±0.23)%、(1.55±0.10)%、(1.96±0.10)%、(0.92±0.05)%, 并且生物硅的波动与颗粒有机碳浓度的波动同步。特别是在17~25 cal ka BP冰期形成的湖沼沉积出现较大的颗粒无机碳(PIC)浓度的波动, 推测与当时干冷气候条件下CaCO₃过饱和和从湖水中沉淀析出有关。钻孔沉积物生物硅浓度记录对格陵兰冰芯¹⁸O同位素值的响应存在大约300 a的滞后现象。

关键词: 辽河口; 生物硅; 堆积速率; 粒度; 沉积环境

中图分类号:P534.63 文献标志码:A 文章编号: 1000-3657(2015)04-1092-11

The sedimentary environment evolution and biogenic silica records of the Liaohe Estuary since 33 ka BP

WANG Xue-fei^{1,2}, YE Si-yuan^{2,3}, HAN Zong-zhu¹, YUAN Hong-ming^{2,3},
YANG Shi-xiong^{2,3}, DING Xi-gui^{2,3}, ZHAO Guang-ming^{2,3}, HE Lei^{2,3}, WANG Jin^{2,3}, LIU Jin^{2,4}

(1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeosciences, China Geological Survey, Qingdao 266071, Shandong, China; 3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, Shandong, China; 4. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Buried biogenic silica (BSi) in sediments is regarded as making up only 3% of the global silica production in surface water, and the abundance of BSi in the sediments can provide unique information for past environmental dynamics in continental settings. ZK2 core was taken from the southwest of the lower Liaohe River plain in May, 2012. The laboratory analysis focused on bulk densities, content of BSi, carbon and other nutrients, sedimentary characteristics, AMS¹⁴C and OSL dating, foraminiferas and

收稿日期: 2014-08-27; 改回日期: 2014-11-24

基金项目: 国土资源部公益性行业基金(201111023)、国家自然科学基金(40872167、41240022和41406082)、山东省自然科学基金(ZR2014DQ010)、海洋地质保障工程项目(GZH201200503)以及中国地质调查局地质大项目(1212010611402)联合资助。

作者简介: 王雪飞, 女, 1988年生, 硕士生, 从事环境地球化学与生物硅研究; E-mail: xuefei2508@sina.com。

通讯作者: 叶思源, 女, 1963年生, 研究员, 从事环境地球化学与碳循环研究; E-mail: ye_siyuan@sina.com。

pollens to document sediment provenance changes and environmental evolution. The sedimentary environments were mainly divided into 4 units, namely upper delta plain environment, marine dominant environment, lacustrine depositional environment and riverine environment, with the corresponding biogenic silica (BSiO₂) concentrations being (2.85±0.23)%, (1.55±0.10)%, (1.96±0.47)%, and (0.92±0.05)%, respectively. The concentrations of BSi were positively correlated with particle organic carbon concentrations. Remarkably, at the time span of 17–25 cal ka BP, great fluctuations of inorganic carbon (PIC) concentrations took place in lacustrine depositional sediments formed in the last glacial period. It is inferred that at that time, CaCO₃ was precipitated and deposited from the supersaturated lake water due to the dry and cold climate, as indicated by pollen assemblages. Moreover, in response to ¹⁸O fluctuations of Greenland ice core, ZK2 BSi concentrations had a about 300 year lag.

Key words: Liaohe Estuary; biogenic silica (BSi); accumulation rate; grain size; sedimentary environment

About the first author: WANG Xue-fei, female, born in 1988, master candidate, engages in the study of environmental chemistry and biogenic silica; E-mail: xuefei2508@sina.com.

About the corresponding author: YE Si-yuan, female, born in 1963, professor, mainly engages in the study of marine geochemistry and carbon cycle; E-mail: ye_siyuan@sina.com.

硅(Si)是地球上重要的矿质元素,在许多生物地球化学过程中起着重要作用^[1-2],如作为陆地^[3]和海洋生物的营养,可缓冲土壤pH值,调节大气CO₂和全球气候^[4]。特别是海洋沉积物中的生物硅(BSi),可反映地质历史时期水系统中古生产力的波动^[5]。而生产力的变化又与营养物质和水体表层温度密切相关,因而海洋沉积物中生物硅的含量也可以反映一定时期气候环境变化。因此,研究海洋沉积物中BSi,从小的时间尺度上可反映工业化以来,人类活动导致的海区的富营养化情况^[6]。从大的时间尺度上,BSi的沉积记录可对地质历史时期气候变化进行响应^[5]。生物硅(又称蛋白石)主要来源于硅藻、植物、放射虫、硅鞭藻等从海水中吸收溶解硅酸盐形成其骨架。其中硅藻是浮游生物的重要类群,是海洋表层沉积物中生物硅的主要来源,占海洋初级生产力的40%^[7-8]。当这些生物死亡后,被富集的部分生物硅会在真光层发生溶解并重新进入硅循环,另一部分被埋藏保存在海底沉积物中^[9]。因此,沉积物中生物硅的含量在一定程度上能反映上层水体中含硅浮游生物初级生产力分布。生物硅埋藏速率(Burial rates)则受控于沉积物输入速率、生物硅聚积与溶解动力条件以及沉积物本身的物理化学性质等多重因素^[10]。因此对生物硅的研究具有重要的生态环境意义。然而,目前对生物硅的研究较C、N以及P等元素的研究少得多^[11-12],且研究的对象大都集中于湖泊沉积物的记录^[10,13-14]。近年来,我国学者对生物硅在滨海湿地植物中的分布特征、利用生物硅指示古生产力演变以及利用生物硅厘定沉积速率做过精细的研究工作^[15-17],但所研究的海区主要集中分布于热带或亚

热带东海和南海^[18],对于地处温带的辽河口沉积物生物硅的研究很少有人问津。

研究区位于下辽河平原西南缘,为7 ka前海平面达到今天水平后由5条河流共同作用形成的复合三角洲。钻孔位于上三角洲平原湿地分布区,主要植被类型为芦苇、翅碱蓬和水稻。目前对辽河口生物硅的研究不论是在表层沉积物还是在较长时间尺度上的研究均较少,本文通过对下辽河平原西南缘的ZK2钻孔沉积物中生物硅含量和埋藏速率的研究,进而探讨辽河口地区距今33 ka以来生物硅记录及其埋藏速率对古气候的响应。

1 材料与方法

1.1 样品采集

ZK2孔(40°45′18.33″N, 122°07′11.23″E)沉积柱样,采样时间为2012年5月,位于辽宁省盘锦市大洼县荣兴乡,大辽河主河道南2 km,大辽河口西北10 km,辽河口(双台子河)以东25 km,系青岛海洋地质研究所执行“辽河三角洲海岸带综合地质调查与监测”专项课题过程中采集。使用GJ-240型钻机钻探套管取心,心长41.4 m,取心率>90%。将岩心在实验室剖开清理后,据沉积物颜色、粒度组成和沉积物结构等特征,进行岩心编录与二次分样,样品分别用于原位密度、生物硅、粒度分析、AMC¹⁴C和OSL测年、有孔虫鉴定、孢粉鉴定等。

1.2 生物硅与碳含量的测定方法及其堆积速率的计算

生物硅采用连续提取法,以2 mol/L Na₂CO₃为提取液,每隔1 h提取125 μL上清液,共提取8次,所

提取的上清液用分光光度法(分光光度计型号:UV2802PCS)测定。

碳含量测定时,将待测沉积物样品烘干过200目筛,在Perkin-Elmer model 2400元素分析仪上进行测定。总碳(PC)直接上机测定,有机碳(POC)需用4 mol/L的HCL去除无机碳(PIC)后再上机测定。PIC含量通过计算PC含量与POC含量的差值得到。

硅和碳堆积速率按照如下公式计算:

硅/碳堆积速率($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{ka}^{-1}$)=硅/碳含量(%) \times 沉积速率($\text{cm}\cdot\text{ka}^{-1}$) \times 原位密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

原位密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)采用环刀法,其值=环刀内的干样重(g)/环刀体积(cm^3)。

1.3 粒度分析

粒度分析样品共335个,由中国地质调查局海洋地质实验检测中心进行样品处理与分析。样品前处理包括3个步骤:去除有机质、去除钙胶结物和洗盐。将经过上述处理的样品使用英国马尔文(MALVERN)公司生产的Mastersizer2000型激光粒度分析仪进行测试。

1.4 年代分析

年代分析采用光释光(OSL)和AMS¹⁴C测年技术,获OSL测年数据4个,AMS¹⁴C测年数据11个。AMS¹⁴C年代测试样品为贝壳和有孔虫,测试工作在美国Beta公司(Beta Analytic Inc)完成。OSL测年是第四纪年代学研究的主要方法^[19-20],其测年由国土资源部海洋地质测试中心实验室完成:将样品通过直径约5 cm的黑色硬质塑料圆筒打进岩心采集,做密封、防震保存;在实验室红色光源条件下,剥离样品外层可能的曝光部分,低温烘干后用于剂量率测量;选取(未曝光)核心部分约10 g样品用于等效剂量测量。

1.5 微体古生物鉴定

将样品置于烘箱中50℃恒温烘干,称取定量干样;加入10%的双氧水浸泡使样品充分散开,以0.063 mm的标准铜筛过水筛,冲至筛下液体干净透明无杂质颗粒;最后将筛上部分置于烘箱内50℃恒温烘干,收集并扫入样品袋内以供显微镜镜下鉴定。特别地,若样品中沉积物颗粒粗组份含量过多,则采用CCl₄进行浮选,并对浮剩底样在显微镜镜下检查,将未浮出的壳体挑出鉴定,保证不遗漏有孔虫壳体。

2 结果与讨论

2.1 地层年代与沉积速率确定

ZK2孔测年数据如表1所示。本钻孔获得的最新年龄是2180 a BP,位于孔深4.33 m处;最老年龄是32900 a BP,位于孔深39.25 m。第一海相地层底部13.1 m年龄为8820 cal a BP,指示其发育于全新世海侵时期,对应于MIS(深海氧同位素阶段)1阶段,该结果与前人的8450 cal a BP时间^[21]十分吻合。本研究在深度为20.3 m、27.15 m和39.25 m所测得的OSL年龄依次为20.8 cal ka BP、29.6 cal ka BP和32.9 cal ka BP,前二者对应于MIS2阶段(MIS2底界为29 cal ka BP),后者对应于MIS3阶段^[21]。

沉积速率选取zk2FA-1、zk2FA-3、zk2FA-7、OSL-1、OSL-3、OSL-4 6组地层的测试数据进行计算。共得到6组沉积速率,4.33 m以上部分沉积速率为0.193 cm/a;4.33 m~9.96 m部分的平均沉积速率为0.174 cm/a;9.96 m~13.05 m部分的平均沉积速率为0.107 cm/a;13.05 m~20.3 m部分的平均沉积速率为0.058 cm/a;20.3 m~27.15 m部分的平均沉积速率为0.078 cm/a;27.15 m~39.25 m部分的平均沉积速率为0.367 cm/a。岩心9.96 m以上部分沉积速率较为稳定,由此推断此段时期并没有出现类似于风暴潮等极端环境搅动而再次沉积的层序,其下伏地层沉积速率开始下降,至13 m以下地层沉积速率非常低,推测当时是静水环境,扰动不大,与下面分析的湖相沉积环境是一致的。此层的下伏地层沉积速率略有显著的上升。

校正后的测年结果与取样深度对应较好,基本没有出现年龄与深度倒置现象,只有样品zk2FA-4和OSL-2测得年龄及其深度与其相邻深度样品的测试结果差别较大:推测zk2FA-4对应地层的贝壳为外力搬运而来,非原生贝壳;特别需指出的是于孔深23.5 m所测得的OSL年龄为34.2 cal ka BP,存在年龄倒转,作者根据该区历史时期的沉积速率推测该年龄值应剔除。OSL-2年龄值高估的原因推测是由于该地层是水成堆积的,样品中的光释光信号在埋藏前没有被完全晒退,残留信号导致样品的年龄值被高估^[23]。

2.2 岩性与沉积环境划分

ZK2孔,孔深41.4 m,孔口高程4.24 m,整个岩

表1 ZK2孔 AMS¹⁴C和OSL年代数据
Table 1 AMS¹⁴C and OSL data of Core ZK2

实验室编号	深度/m	测试材料或手段	校正后年龄/a BP	校正后年龄均值/a
				BP
zk2FA-1*	4.33	贝壳/AMS ¹⁴ C	2320~2040	2180
zk2FA-2	5.4	贝壳/AMS ¹⁴ C	3140~2800	2970
zk2F39	5.6~5.7	有孔虫/AMS ¹⁴ C	4770~4390	4580
zk2FA-5	7.42	贝壳/AMS ¹⁴ C	4820~4500	4660
zk2F54	7.8~7.9	有孔虫/AMS ¹⁴ C	4420~4120	4270
zk2FA-3*	9.96	贝壳/AMS ¹⁴ C	5560~5280	5420
zk2F75	9.9~10.0	有孔虫/AMS ¹⁴ C	5940~5690	5815
zk2FA-4	10.72	贝壳/AMS ¹⁴ C	7590~7410	7500
zk2F85	11.1~11.2	有孔虫/AMS ¹⁴ C	7160~6880	7020
zk2FA-6	12.9	贝壳/AMS ¹⁴ C	8100~7850	7975
zk2FA-7*	13.05	贝壳/AMS ¹⁴ C	8410~8190	8300
OSL-1*	20.3	OSL	\	20800
OSL-2	23.5	OSL	\	34200
OSL-3*	27.15	OSL	\	29600
OSL-4*	39.25	OSL	\	32900

注: "*"表示可靠测年数据, 被选取用来计算沉积速率。

心以褐色、灰、灰黑、深灰、青灰色、黄褐色粉砂、粘土质粉砂和细砂为主, 局部夹薄层极细砂, 部分层位见少量贝壳及碎屑。根据沉积学观察、有孔虫丰度和分异度、测年数据、地层高程、粒度、孢粉等资料将其层序自下而上分为4个沉积单元(图1):

河流相(U1)位于孔深23.9~41.4 m, 高程-19.66 m~-37.16 m, 厚17.5 m, 灰褐色、褐色极细砂、细砂, 平均含量较高为83%, 含极少量孢粉, 很少见有孔虫, 只有少量的广盐种偶尔出现, 仅在33.8 m、40.4 m两个样品中分别发现2枚和20枚磨损严重的有孔虫, 属种主要是 *Protelphidium tuberculatum* 与 *Ammonoia beccarii* var., 推断本段为陆相河流相沉积。其中23.9~29.8 m为浅灰色粗粉砂、极细砂, 粒度较下层细, 可能为堤岸亚相沉积, 垂向上常发育在河床亚相沉积的上部; 29.8~41.4 m为青灰色和黄褐色细砂, 分布较均匀, 局部有互层构造, 见铁锈色斑和少量泥砾, 推测为决口扇沉积。据孔深为27.15 m和39.5 m处测得的OSL测年数据分别为27.15 cal ka BP、39.25 cal ka BP, 指示对应全球氧同

位素 MIS3。该段沉积环境分析及年代学证据说明渤海湾北岸地区在 MIS3 阶段并未发生规模较大的海侵。MIS3 期间, 全球海平面 90~60 m^[24-25], 海侵规模较小, 影响范围局限于外陆架^[26], 说明当时海水未能进入渤海继而向陆形成大范围的海侵。此外, 新近纪以来渤海湾及沿岸地区进入拗陷期, 呈整体沉降特征^[27], 即便极端情况下发生海水沿潮道上溯形成的小范畴海水影响记录, 应在 60 m 以下地层中, 而不会出现在 -19.66 m~-37.16 m, 因此前人在此区域发现的 MIS3 阶段的海相地层有待于年代学的进一步确定。

湖沼沉积(U2)位于孔深13.1~23.9 m, 高程-8.86~-19.66 m, 厚10.8 m, 以灰色粉砂、粉砂质粘土及粘土质粉砂为主, 局部见互层状水平层理, 偶见灰黑色炭斑, 含少量贝壳碎片; 本段有孔虫群落呈现分异度低, 丰度低的特征, 出现的属种主要为 *Ammonoia beccarii* var.、*Protelphidium tuberculatum*、*Cribronion subincertum*、*Elphidium advenum* 等, 并且在地层中偶尔出现, 伴随少量陆相介形虫, 推测

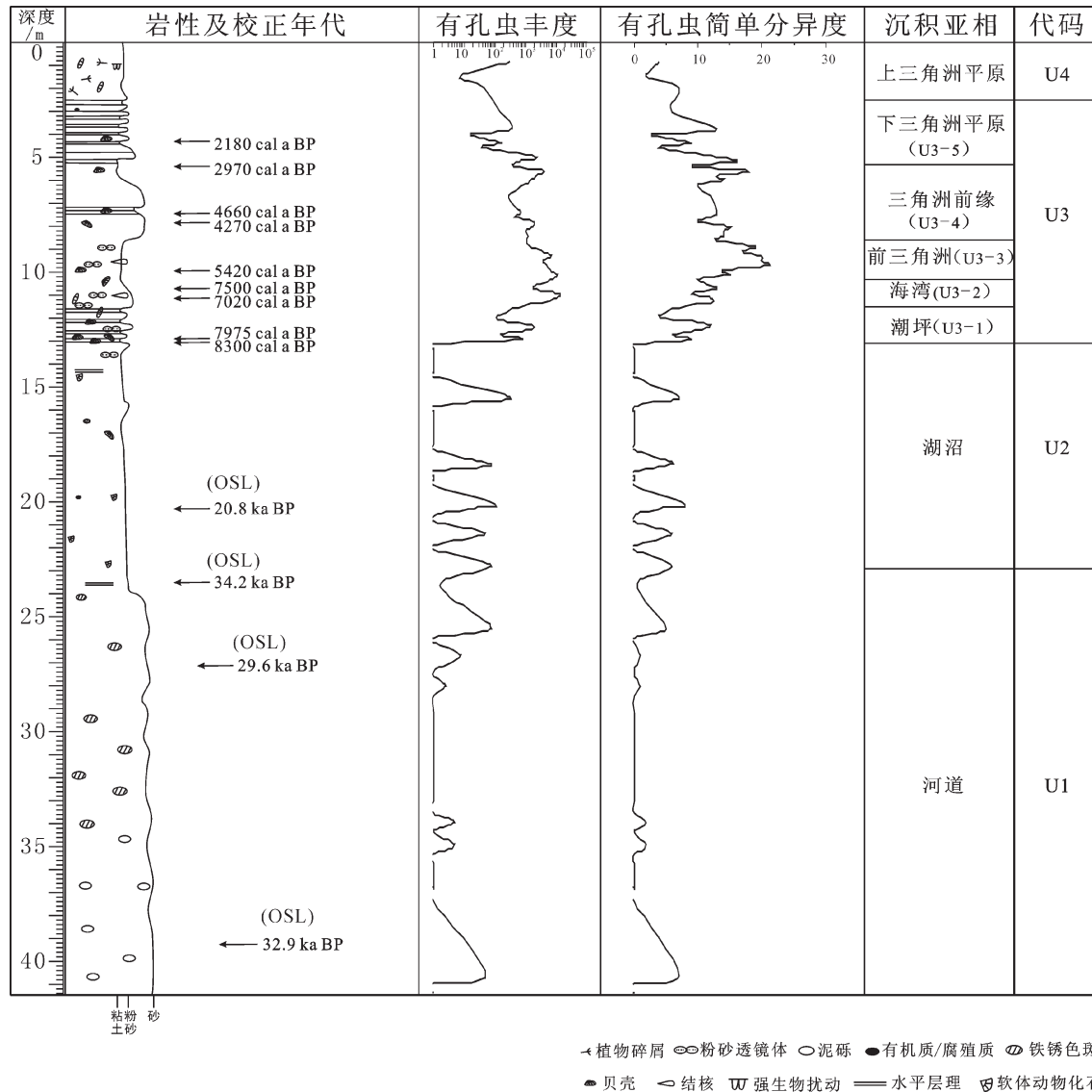


图1 ZK2综合地层划分图

Fig.1 Multiple sequence division diagram of Core ZK2

本段出现的有孔虫为河流切割携带而来,或者是风暴潮等外力搬运而来。孢粉浓度较低,仅见少量针叶植物杉科、银杏科、柏科,草本植被也少见。综上推断为湖相沉积。据分布于20.3 m处的OSL测年数据,该湖相沉积对应的年龄20.8 cal ka BP,推测该沉积相形成年龄为25.65~8.82 cal ka BP,对应于MIS2阶段。

海洋主导的沉积(U3)位于孔深2.5~13.1 m,高程1.74 m~-8.86 m,厚10.6 m,以灰色粘土质粉砂为主,中部见大量粉砂透镜体,有孔虫含量较多,丰度平均为2865,简单分异度平均为12。优势组合为

*Protelphidium tuberculatum*与*A.beccarii* var.,该组合在本段群落中的优势度高,超过75%。建群种由沿岸浅水分子组成,水深变深,反映稳定水深<50 m内陆架浅滨海环境。木本植物与草本植物含量增加,蕨类植物含量增加,推断本段为海洋主导下的沉积环境,由下而上依次分为5段:U3-1位于孔深11.5~13.1 m,常见粉砂与粘土质粉砂互层,13 m处见大量贝壳碎片,多为完整双壳类,经鉴定为中国蛤蜊*Macra chinensis*,对13.05 m深度的地层进行AMS¹⁴C测年,测定结果为8300 a BP,推测本段为潮坪沉积;U3-2位于孔深10.3~11.5 m,主要为灰色粘

土质粉砂,有孔虫数较多,推测为海湾沉积;U3-3位于孔深8.6~10.3 m,深灰色粘土质粉砂,本段有孔虫含量迅速升高至最高值,推测为前三三角洲沉积;U3-4位于孔深5.2~8.6 m,灰色粉砂和灰黑色粘土质粉砂为主,见互层构造,局部有贝壳碎片,有孔虫数较前三三角洲沉积有所下降,推断为三角洲前缘的河口砂坝沉积,是夹砂河水进入海水并与其相互作用的地区,沉积物分布呈环带状,是河流携带的沉积物的主要堆积地区;U3-5位于孔深2.5~5.2 m,为青灰色粉砂夹粘土质粉砂条带,有贝壳碎片,有孔虫含量较高,有孔虫群由沿岸浅水冷分子组成,代表了由海向陆过渡的滨岸浅水环境,为下三角洲平原相沉积,即潮坪沉积。

上三角洲平原相沉积(U4)位于孔深0~2.5 m,高程4.24 m~-1.74 m,厚2.5 m,为黄色、黄褐色粘土质粉砂,有孔虫含量少,属种单一,以 *Ammoia beccarii* var. 与 *Pseudonionella variabilis* Zheng 两种为绝对优势种,优势度98%以上,介形虫仅见陆相介形虫,发现似轮藻属,样品中多植物根系,孢粉样品中草本植物含量较多,沉积环境属于富含有机质的滞留还原环境。

上述 AMS¹⁴C 测年数据证明了 U3 沉积层形成底界时间为 8820 cal a BP, 属 MIS1 阶段。并且从钻孔揭露的信息可以看出,最近一次海侵在该地区形

成的厚度约 3 m, 随后是三角洲进积形成的水下三角洲沉积。

2.3 各指标分析

根据各段的沉积速率,通过线性内插和外推方法获得生物硅、碳、粒度等指标每个样品的模式年龄。ZK2 孔岩心中总碳(PC)、总有机碳(POC)、总无机碳(PIC)、生物硅、粒度随年代剖面的变化如图 2 所示,所划分的 4 个沉积阶段,依次为上三角洲平原相沉积(U4)、海洋主导的沉积(U3)、湖沼沉积(U2)、河道沉积(U1)。

2.3.1 不同沉积相中生物硅、碳、粒度的分布特征

(1)ZK2 孔整个柱样生物硅(BSiO₂)含量范围是 0.19%~3.52%, 平均值 1.50%(表 2)。硅堆积速率的范围是 0.20~10.28 mg SiO₂ cm⁻²a⁻¹, 平均值 3.70 mg SiO₂ cm⁻²a⁻¹。ZK2 孔生物硅含量及其堆积速率在各个沉积阶段发生不同程度的变化,其中生物硅含量最高值是最低值 18.5 倍左右,堆积速率最高值是最低值的 51.4 倍。前人研究证明,生物硅含量及其堆积速率的变化可以作为替代性指标直接反映过去表层水体初级生产力的变化^[28-30],因而具有指示古生产力的作用,ZK2 孔发生的这些变化表明了研究区近 33 ka 以来初级生产力具有十分显著的差异。

从全球范围上来看,沉积物中高 BSiO₂ 含量区主要分布在环南极带、赤道太平洋区、北太平洋区、

表 2 物理化学参数在 ZK2 孔及其各沉积相中的分布特征

Table 2 Physical and chemical parameters in ZK2 and the distribution features of sedimentary facies

参数	ZK2*	上三角洲平原相 (U4)	海洋主导的 沉积相(U3)	湖沼沉积 (U2)	河道沉积 (U1)
中值粒径/ Φ	3.89±1.52	5.71±0.39	4.53±0.96	5.69±0.73	2.52±0.46
平均粒径/ Φ	4.25±1.49	6.00±0.29	4.88±0.89	5.96±0.57	2.93±0.72
BSiO ₂ 含量/%	1.50±0.66	2.85±0.23	1.55±0.65	1.96±0.47	0.92±0.29
BSiO ₂ 堆积速率/(mg SiO ₂ cm ⁻² a ⁻¹)	0.96±0.58	2.36±0.13	0.96±0.48	0.53±0.14	1.27±0.29
PC 含量/%	0.37±0.27	0.73±0.14	0.42±0.19	0.65±0.31	0.18±0.06
PC 堆积速率/(g cm ⁻² a ⁻¹)	2.57±1.38	5.79±1.10	2.51±0.92	1.82±0.83	2.70±1.42
POC 含量/%	0.25±0.22	0.61±0.14	0.31±0.18	0.43±0.27	0.11±0.03
POC 堆积速率/(g cm ⁻² a ⁻¹)	1.62±0.96	4.84±1.00	1.78±0.73	1.18±0.54	1.50±0.70
PIC 含量/%	0.12±0.12	0.12±0.05	0.11±0.07	0.21±0.19	0.08±0.06
PIC 堆积速率/(g cm ⁻² a ⁻¹)	0.94±0.84	0.96±0.43	0.73±0.54	0.65±0.61	1.20±1.00

注: *包括了该孔所揭露的所有的沉积相。

南北美洲的西海岸等营养物质丰富初级生产力较高的上升流区^[31]。在河口三角洲环境中,水环境与河水与海水的混合态,从而使溶解态硅的移出和 BSiO_2 的沉积集中在河口陆架沉积边缘,形成活动性硅埋藏的潜在地区。然而,大多数分析测试结果表明,与深海沉积环境相比,河口陆架沉积物中 BSiO_2 的含量很低,是 BSiO_2 埋藏较少的地区。出现这种矛盾,推断可能是以下两方面原因造成的。一方面是由于河口三角洲随河道冲刷而负载的大量陆源碎屑物质沉积作用,稀释了可能存在的高 BSiO_2 埋藏,大大降低了其含量;另一方面是海陆过渡相浅水环境中广泛存在的 BSiO_2 反向风化作用,前人一系列研究表明,生源蛋白石可以在大陆边缘三角洲沉积物早期成岩过程中转化为自生粘土矿物,导致生物硅含量下降^[32]。

(2)沉积物是全球碳的重要源与汇,在碳循环中起重要作用^[33]。ZK2孔沉积物中总碳(PC)含量介于0.09%~1.49%,平均0.37%;POC(颗粒有机碳)含量介于0.06%~1.43%,平均0.25%;PIC(颗粒无机碳)介于0.00~0.63%,平均0.12%(表2)。

PC和POC含量在上三角洲平原相平均含量最高,海相沉积阶段开始下降,湖沼相有所回升后至河道沉积阶段又下降,呈现出一个高-低-高-低旋回变化的趋势。上三角洲平原相和湖沼相沉积阶段的碳含量最高,主要是由于这两个阶段初级生产力高,因此光合作用生产的有机碳较高,同时该沉积阶段潮流及波浪作用较弱,有机碳不易向外输送^[34],从而造成该沉积阶段POC含量较高,PC含量也相应较高。PIC含量在各沉积阶段变化不大,但在湖沼沉积阶段早期有显著的增高现象。从该时间段孢粉组合揭示的信息发现,此时山地落叶阔叶植被消失,仅见少量针叶植物杉科(9.25%~59.3%)、银杏科(1.85%~15.2%)、柏科(0.61%~10.46%),草本植物含量显著降低,蕨类植物中单缝孢(5.06%~33.33%)含量显著升高。该阶段总体孢粉浓度较低,推测当时处于干冷的气候条件。干冷气候条件下的高蒸发和低温,导致 CaCO_3 过饱和而从湖水中沉淀析出,从而造成阶段性的高PIC分布。

(3)沉积物粒度分析是研究沉积环境、沉积过程和搬运机制的重要手段,本文粒度分析采用当前应用最广的福克-沃德(Folk-Ward)公式来计算相关粒度

参数。ZK2孔沉积物粒度参数组成特征见表2。

ZK2孔岩心沉积物平均粒径为1.80~6.93 Φ ,平均值为4.25 Φ 。U2和U4段平均粒径类似,分别为(5.96±0.07) Φ 和(6.00±0.08) Φ ,上三角洲平原相沉积(U4)的最小为(6.00±0.08) Φ ,河流相沉积(U1)的最大,为(2.93±0.06) Φ ,平均粒径均值呈低-高-低-高的变化趋势。

中值粒径(Md)是粒度累积频率曲线上颗粒累积含量50%处对应的粒径,它能敏感地反映水动力条件的变化。ZK2孔岩心沉积物中值粒径为1.76~6.95 Φ ,平均值为3.89 Φ 。上三角洲相至海相沉积阶段中值粒径 Φ 值有所下降,到湖沼沉积阶段 Φ 值升高,粒度变细,河流相沉积 Φ 值又下降,粒度变粗。中值粒径总体变化趋势与平均粒径类似。

粒径数据是研究沉积物物质来源以及沉积环境的主要手段,通过粒径值的变化,可以了解物质来源及沉积环境的变化。上述粒径数据也从另一个侧面为本研究沉积相划分提供了证据。

2.3.2 生物硅、碳、粒度在地质历史时期的演化特征

(1)生物硅含量随年代出现了数次“高-低”变化的旋回性演变过程(图2),其中相对高值期分别对应的时间为5 ka BP、10 ka BP、16 ka BP、17.5 ka BP、22.5 ka BP、24 ka BP,指示这些时期对应的古生产力有显著的增强。从6 ka BP到33 ka BP的时间范围,生物硅埋藏速率总体趋势比较稳定,随年代变化幅度较小。

(2)PC和POC含量变化趋势基本一致,在25 cal ka BP之前随年代无明显变化,保持在较低含量水平,在随后的湖相沉积中,其含量有较大的波动,其中在9 cal ka BP和13.5 cal ka BP出现两个峰值。全新世以来的海侵沉积中PC和POC含量显著地减少,直至现代的上三角洲平原沉积的上述同名参数值有所上升。特别地,PIC在湖沼沉积阶段变化较大,17 ka cal BP到25 cal ka BP出现了几次高低旋回的波动。

(3)沉积物粒度参数特征

ZK2孔沉积物平均粒径出现了低-高-较低交替变化,变动幅度不大,揭示沉积物颗粒相应出现粗-细-粗交替变化。U1段沉积物中值粒径、平均粒径的 Φ 值较低,此时期沉积物中砂含量也相应地增高,进入湖相沉积(U2)后,沉积物中值粒径、平

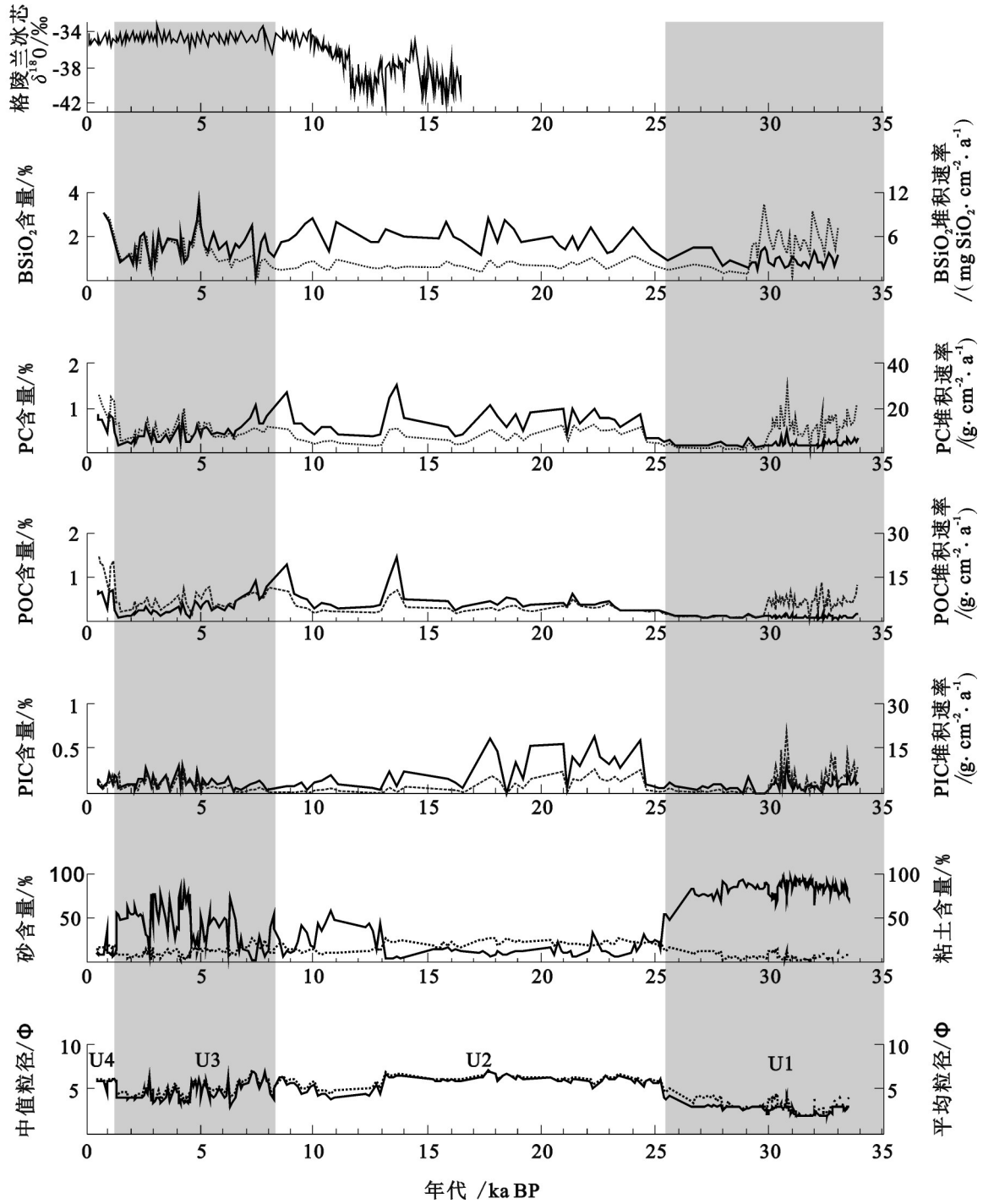


图2 生物硅、碳、粒度在地质历史时期的演变(左侧指标为实线, 右侧指标为虚线, 格陵兰冰芯氧同位素数据引自文献[36])
Fig.2 The evolution of biogenic silica, carbon, and granularity in the geological history (GISP2 $\delta^{18}O$ data after reference [36])

均粒径的 Φ 值在较高的水平中波动,其中相应的砂含量也较低(图2)。海相沉积环境(U3)中的中值粒径、平均粒径的 Φ 值介于U1和U2,沉积物中砂含量显著增高。上三角洲沉积(U4)阶段,沉积物砂含量骤然减少。从ZK2所揭露的钻孔中可以看出,其沉积物中粘土含量相对稳定,只在湖相沉积阶段(U2)呈略微增高分布。

2.3.3 各参数之间的关系

ZK2孔生物硅含量及其埋藏速率曲线与格陵兰冰芯氧同位素(GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线)记录对比发现,近16.5 ka BP以来,格陵兰冰芯氧同位素含量在5 ka BP、16 ka BP为相对高值期,8 ka BP、11.5 ka BP、12.5 ka BP为相对低值期,这几次古生产力增强期与减弱期基本与生物硅含量高值期和低值区相对应,生物硅浓度记录与格陵兰冰芯 O^{18} 同位素值的响应存在大约300 a的滞后现象,说明辽河口研究区的生物硅的富集规律与全球性的气候变化过程具有可对比性,进一步反映了全球气候变化的中国辽河地区区域性的响应。

碳含量总体小于生物硅的含量,但与沉积物中生物硅含量相比,PC、POC和 BSiO_2 的分布特征基本一致,其高值对应的时间大约为9 cal ka BP、13.5 cal ka BP、18 cal ka BP、21.5 cal ka BP,而在1.5 cal ka BP、7.5 cal ka BP分别存在一个含量的低值分布。生物硅的来源和有机质的来源有密切关系,同源时期两者均以硅藻类浮游植物为主,对应性较强。但同时两者在埋藏过程中发生的一系列物理、化学过程有不一致性,从而使两者的变化既密切相关,又有差异。

无机碳在沉积物中占有相当份额,在全球碳循环中扮演重要角色。沉积物中PIC与POC无显著对应关系,但与 BSiO_2 有一定的相关关系。无机碳以碳酸盐为主,除大量碎屑沉积物的注入对碳酸盐沉淀有重大影响外,碳酸盐的发育与藻类的大量繁殖密切相关,藻类的光合作用对水体理化性质的改变可能是导致碳酸钙过饱和进而导致碳酸盐沉淀的重要因素之一^[35]。

3 结 论

通过对位于下辽河平原西南缘ZK2钻孔沉积物原位密度、生物硅(BSiO_2)、粒度、AMS¹⁴C和OSL

测年、有孔虫鉴定、孢粉鉴定等的分析,得到以下几点结论:

(1) ZK2孔获得的最年轻是2180 a BP,位于孔深4.33 m处;最老年龄是32900 a BP,位于孔深39.25 m。通过测年数据推算出各段的沉积速率,再通过线性内插与外推手段得出各个指标样品对应的年代,整个钻孔年代跨度为33 ka。

(2) 平均粒径(Mz)、中值粒径(Md)、沉积物砂和粘土含量等粒度参数特征分析得出41.4~24 m沉积物颗粒较粗,指示水动力较强;24~13 m沉积物颗粒由粗变细的趋势明显,该段沉积物粘土含量增高;13~2.5 m沉积物颗粒粒径略有增高,至2.5 m以上呈下降趋势。

(3) 根据本钻孔沉积物粒径的研究、沉积学观察、有孔虫丰度和分异度、测年数据、地层高程、粒度、孢粉等资料,研究区发育4个沉积单元,依次为上三角洲平原相沉积、海洋主导的沉积、湖沼沉积、河道沉积。

(4) ZK2孔整个柱样生物硅含量范围是0.19%~3.52%,平均值1.50%。理论上应该为生物硅高埋藏的辽河口地区,与全球范围对比显示,含量却很低,本文推断为两方面因素造成。一方面是由于河口三角洲随河道冲刷而负载的大量陆源碎屑物质的稀释作用,另一方面是 BSiO_2 反向风化作用,早期成岩过程中生物硅转化为自生粘土矿物。

(5) 生物硅含量高值期和低值区与格陵兰冰芯氧同位素含量的高值区和低值区基本对应,证明辽河口研究区的生物硅的富集规律是全球性的气候变化的一个很好响应。沉积物中生物硅含量与总碳、有机碳的分布特征基本一致,两者可能是同源,均以硅藻类浮游植物为主,埋藏过程中发生的一系列复杂的物理、化学过程又导致两者变化的局部不一致。特别地,在本研究所划分的湖沼相沉积物中发现有较高的PIC的分布。

致谢: 本文沉积环境划分部分中得到薛春汀教授的帮助和指导;匿名评审员及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

[1] Alexandre A, Meunier J D, Colin F, et al. Plant impact on the

- biochemical cycle of silica and related weathering processes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61: 677–682.
- [2] Cao Lu, Liu Sumei, Ren Jingling. Seasonal variations of particulate silicon in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and its adjacent area[J]. *Acta Oceanol. Sin.*, 2013, 32(4): 1–10.
- [3] Norris A R, Hackney C T. Silica content of a mesohaline tidal marsh in North Carolina[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, 49: 597–605.
- [4] DeMaster D J. The supply and accumulation of silica in the marine environment[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45: 1715–1732.
- [5] Colman S M, Peck J A, Karabanob E B. Continental climate response to orbital forcing from biogenic silica records in lake Baikal[J]. *Nature*, 1995, 378: 769–771.
- [6] Smith V H. Response of estuarine and coastal marine phytoplankton to nitrogen and phosphorus enrichment[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51: 377–384.
- [7] 商志文, 田立柱, 王宏, 等. 渤海湾中北部表层沉积硅藻分布及环境指示意义[J]. *中国地质*, 2012, 39(4): 1099–1107.
Shang Zhiwen, Tian Lizhu, Wang Hong, et al. Diatom assemblages from surficial sediments in north-central Bohai Bay and their implications for environments[J]. *Geology in China*, 2012, 39(4): 1099–1107(in Chinese with English abstract).
- [8] Nelson D M, Treguer P, Brzezinski M A, et al. Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 359–372.
- [9] Dirk R, Michael S, Klaus W. Dissolution kinetics of biogenic silica from the water column to the sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(3): 439–455.
- [10] Johnson T C, Brown E T, McManus J, et al. A High-Resolution Paleoclimate Record Spanning the Past 25, 000 Years in Southern East Africa[J]. *Science*. 2002, 296(113): 113–114 and 131–132.
- [11] Bernal B and Mitsch W J. Comparing carbon sequestration in temperate freshwater wetland communities[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(5): 1636–1647.
- [12] 余雪洋, 叶思源, Nicholas L, 等. 辽河三角洲翅碱蓬湿地不同植被覆盖度下的土壤对碳的扣留[J]. *中国地质*, 2014, 41(2): 648–657.
Yu Xueyang, Ye Siyuan, Nicholas Lawrence Yuknis, et al. Carbon sequestration along vegetation coverage gradient in the Suaeda salsa marsh from the Liaohe Delta, China[J]. *Geology in China*, 2014, 41(2): 648–657(in Chinese with English abstract).
- [13] Prokopenko A A, Hinnov L A, Williams D F, et al. Orbital forcing of continental climate during the Pleistocene: a complete astronomically tuned climatic record from Lake Baikal, SE Siberia[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25: 3431–3457.
- [14] 姜珊, 刘晓东, 徐利强, 等. 生物硅在东南极湖泊古初级生产力研究中的应用[J]. *极地研究*. 2011, 23(1): 26–34.
Jiang Shan et al. Application of biogenic silica on reconstruction of palaeo-primary productivity in east Antarctica lakes[J]. *Chinese journal of polar research*. 2011, 23(1): 26–34(in Chinese with English abstract).
- [15] Hou L J, Liu M, Yang Y, et al. Biogenic silica in intertidal marsh plants and associated sediments of the Yangtze Estuary[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(3): 374–380.
- [16] 李建, 王汝建. 南海北部一百万年以来的表层古生产力变化: 来自 ODP1144 站的蛋白石记录[J]. *地质学报*. 2004, 78(2): 228–233.
Li Jian, Wang Rujian. Paleoproductivity Variability of the Northern South China Sea during the Past 1Ma: The Opal Record from ODP Site 1144[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(2): 228–233(in Chinese with English abstract).
- [17] 范德江, 齐红艳, 孙晓霞, 等. 长江水下三角洲现代沉积速率厘定的新途径: 季节性 Bio-Si 记录[J]. *中国海洋大学学报*, 2009, 39(5): 1025–1028.
Fan Dejiang, Qi Hongyan, Sun Xiaoxia, et al. A new method to evaluating sedimentary rate on the Yangtze River subaqueous Delta: Seasonal sedimentary Record of Bio-Si[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(5): 1025–1028(in Chinese with English abstract).
- [18] 王汝建, 成鑫荣, 刘传联, 等. 赤道西太平洋暖海区更新世以来的生源沉积物沉积特征及其古海洋学意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(4): 67–72.
Wang Rujian, Cheng Xinrong, Liu Chuanlian, et al. Depositional characteristics of biogenic sediments and their paleoceanographic implications in the west Pacific warm pool during Pleistocene[J]. *Marine geology & Quaternary Geology*, 2009, 39(5): 1025–1028 (in Chinese with English abstract).
- [19] 张克旗, 姚海涛, 乔彦松, 等. 黄联关组形成时代的光释光测年初步研究[J]. *中国地质*, 2012, 39(3): 645–650.
Zhang Keqi, Yao Haitao, Qiao Yansong, et al. A preliminary study of the formation age of Huanglianguan Formation based on OSL dating[J]. *Geology in China*, 2012, 39(3): 645–650(in Chinese with English abstract).
- [20] 郭良田, 王萍, 张珂, 等. 珠江三角洲晚第四纪沉积的 OSL 和 ^{14}C 年龄探讨[J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1842–1849.
Guo Liangtian, Wang Ping, Zhang Ke, et al. OSL and ^{14}C ages of

- the Late Quaternary sediments in the east Pearl River Delta[J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1842–1849(in Chinese with English abstract).
- [21] 陈永胜, 王宏, 李建芬, 等. 渤海湾西岸BT113孔35 ka 以来的沉积环境演化与海陆作用[J]. *吉林大学学报*, 2012, 42(增刊1): 344–354.
Chen Yongsheng, Wang Hong, Li Jianfen, et al. Sedimentary Environment Since 35 ka and Terrestrial– Marine Interaction Revealed by Borehole BT113 in the Western Coast of Bohai Bay, China[J]. *Journal of Jilin University*, 2012, 42(Suppl. 1): 344–354 (in Chinese with English abstract).
- [22] Yao Z Q, Shi X F, Liu Q S, et al. Paleomagnetic and astronomical dating of sediment core BH08 from the Bohai Sea, China: Implications for glacial– interglacial sedimentation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 393: 90–101.
- [23] 张家富, 莫多闻, 夏正楷, 等. 沉积物的光释光测年和对沉积过程的指示意义[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(1): 23–36.
Zhang Jiafu, Mo Duowen, Xia Zhengkai, et al. Optical dating of sediments from China and its implication for depositional process[J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(1): 23–36(in Chinese with English abstract).
- [24] Chappell J, Omura A, East T, et al. Reconciliation of Late Quaternary Sea Levels Derived from Coral Terraces a Huon Peninsula with Deep– Sea Oxygen Isotope Records[J]. *Earth Planetary Science Letter*, 1996, 141: 227–236.
- [25] Bintanja R, Van de Wal R, Oerlemans J. Modeled Atmospheric Temperature and Global Sea Levels over the Past Million Years[J]. *Nature*, 2005, 437: 125–128.
- [26] 刘振夏, Berne S, LATALANTE 科学考察组. 中更新世以来东海陆架的古环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(2): 1–10.
Liu Zhenxia, Berne S, et al. Paleo–environment in the continental shelf of the east China sea since the mid–pleistocene[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(2): 1–10(in Chinese with English abstract).
- [27] 李三忠, 索艳慧, 周立宪, 等. 华北克拉通内部的拉分盆地, 渤海湾盆地黄骅坳陷结构构造与演化[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(5): 1362–1379.
Li Sanzhong, Suo Yanhui, Zhou Lichong, et al. Pull–apart basins within the north China Craton: Structural pattern and evolution of Huanghua depression in Bohai bay Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(5): 1362–1379(in Chinese with English abstract).
- [28] Thomas C, Johnson, Erik T Brown, Junmin Shi. Biogenic silica deposition in Lake Malawi, East Africa over the past 150, 000 years[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 303: 103–109.
- [29] Yoko Shibamoto, KohHarada. Silicon flux and distribution of biogenic silica in deep– sea sediments in the western North Pacific Ocean[J]. *Deep–Sea Research I*, 2010, 57: 163–174.
- [30] 黄永建, 王成善, 汪云亮. 古海洋生产力指标研究进展[J]. *地学前缘*, 2005, 12(2): 163–170.
Huang Yongjian, Wang Chengshan, Wang Yunliang. Progress in the study of proxies of paleocean productivity[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 163–170(in Chinese with English abstract).
- [31] Koning E, Brummer G J, Van R W, et al. Settling, dissolution and burial of biogenic silica in the sediments off Somalia–northwestern Indian Ocean [J]. *Deep– Sea Res.*, 1997, 44(6*7): 1341–1360.
- [32] Michalopoulos P, Aller R C. Rapid clay mineral formation in Amazon delta sediments: reverse weathering and oceanic elemental cycles[J]. *Science*, 1995, 270: 614–617.
- [33] Xiang Yu, Feng QingLai, Shen Jun et al. Changhsingian radiolarian fauna from Anshun of Guizhou, and its relationship to TOC and paleo– productivity[J]. *Science in China(Series D)*, 2013, 56(8): 1334–1342
- [34] 欧莉华, 伊海生, 王刚, 等. 桂西地区乐平统合山组底部海绵骨针硅质岩的发现及古环境意义[J]. *中国地质*, 2012, 39(5): 1280–1289.
Ou Lihua, Yi Haisheng, Wang Gang, et al. The discovery of sponge chert on the bottom of the Lopingian Heshan Formation in western Guangxi and its palaeoenvironmental[J]. *Geology in China*, 2012, 39(5): 1280–1289(in Chinese with English abstract).
- [35] Stuiver M, Grootes P M, Braziunas T F. The GISP2 $\delta^{18}O$ climate record of the past 16500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes[J]. *Quaternary Research*, 1995, 44: 341–354.