

文章编号:1009-2722(2015)02-0017-09

黄海第四纪年代学研究进展

刘建兴^{1,2}, 刘青松^{1*}, 石学法³, 王春娟³, 陈皎洁⁴

(1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2 中国科学院大学, 北京 100049;
3 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; 4 湖北省襄阳市地震局, 湖北襄阳 441000)

摘要: 陆架沉积物是研究海平面以及环境气候变化的理想载体, 黄海作为典型的陆架海一直以来是地学领域研究的热点地区。利用沉积物研究古环境首先要解决的就是年龄问题, 总结了黄海近 30 年来第四纪年代学研究所取得的成果以及存在的问题。南黄海的研究程度明显高于北黄海, 短尺度研究程度明显高于长尺度研究。从短尺度的测年结果来看, 不同部位的钻孔同一深度层位的年龄值存在一定差别, 这除了和该区复杂多变的环境有关以外, 还和所用的测年方法和材料有关; 长尺度研究目前仅集中于南黄海 3 个钻孔的磁性地层研究, 其结果显示南黄海的 B/M 界线基本可以限定在 60~70 m 之间。由于黄海长尺度年代学研究相对匮乏, 因此, 应该将其作为该区日后年代学研究的重点。

关键词: 黄海; 第四纪; 年代学; 短尺度; 长尺度

中图分类号: P761.21

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2015.02003

陆架作为连接陆地和大洋的桥梁, 其沉积物的搬运和保存都强烈受控于河流和海水动力条件、海平面变化以及构造活动等因素, 因此, 陆架沉积物详细地记录了海陆相互作用、海侵和海退等地质过程^[1,2]。尽管陆架只占全球海洋总面积的 7.5%, 作为陆源沉积物的重要储库, 却成为海洋沉积最集中和最活跃的地区, 也是陆源物质向深海盆地运移的主要通道^[3,4], 由于该区接受大量的陆源物质输入, 具有较高的沉积速率, 因此, 其又是高分辨率研究的理想靶区^[5]。陆架区的自然环境不仅深刻地影响着人类活动和国民经济的发展, 而且也极易受到人类活动的影响^[6,7], 深入研究其发展演化规律对于实现可持续发展具有重

要的指导意义。

陆架海在中国东部和南部广泛分布, 具体包括渤海、黄海以及东海和南海陆架。从构造背景上来讲, 中国陆架海处于太平洋板块、欧亚板块、澳大利亚和印度洋板块等大的地质体以及菲律宾和苏拉等小板块的交汇区, 就现代沉积作用的范畴而言, 囊括了从海岸带到滨海再到浅海等不同的沉积环境, 从热带海洋到北温带海洋等不同的气候条件, 因此, 中国陆架海一直是众多研究者研究的焦点^[8-12]。黄海作为典型的陆架海, 是黄河和长江两大河流以及其他一些流系搬运物质的重要汇集区和输运通道, 由于其水深较浅, 其沉积物对于第四纪以来的气候及海平面变化相当敏感, 是研究第四纪气候和环境变化以及海陆耦合作用的理想场所^[13]。在所有古环境研究中, 建立沉积物的年龄框架是首先需要解决的基础性问题。本文将对近 30 年以来黄海沉积物的年代学研究所取得的成果以及存在的问题进行系统地总结, 并在此基础上简要探讨下一步的工作方向。

收稿日期: 2014-12-01

基金项目: 中国大陆架科学钻探项目 (GZH201100202)

作者简介: 刘建兴 (1987—), 男, 在读博士, 主要从事古地磁与年代学以及环境磁学研究工作。E-mail: ljx880116@163.com

* 通讯作者: 刘青松 (1972—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事古地磁与年代学以及环境磁学方面的研究工作。E-mail: qslu@mail.iggcas.ac.cn

1 区域概况

黄海是一个位于中国大陆和朝鲜半岛之间的典型的半封闭陆架浅海,南北长约 870 km,东西宽约 556 km,总面积 380 000 km²,平均水深为 44 m^[12]。以山东半岛的成山角和朝鲜半岛的长山串联线为界,将黄海分为南黄海和北黄海两部分,其中北黄海西北经渤海海峡与渤海相通,南黄海南面以长江口北角启东嘴与济州岛西南端连线为界,并与东海相通^[9](图 1)。整个海域海底平坦宽阔,坡度较小且变化不大。黄海的水深由东南

向西北和北逐渐变浅,其中在南部存在一 SE—NW 向的低槽,通常称为“黄海槽”,槽内水深约在 60~80 m 间,是末次冰期水流运动的主要通路,也是全新世海水由南向北入侵的主要通道^[11,12]。地震资料所揭示的黄海第四系厚度为 20~300 m,表层沉积物分布趋势表明,黄海的沉积物主要是来自黄河的泥质沉积和长江的砂质沉积^[14,15]。构造演化的研究显示,古近纪和新近纪内黄海地区表现出“断陷—坳陷—区域沉降”的构造发展旋回,进入第四纪,全区稳定下沉,受水动力型海面变动的影响发生过多次海水进出,全新世海侵的发生造就了现代意义的黄海^[9]。

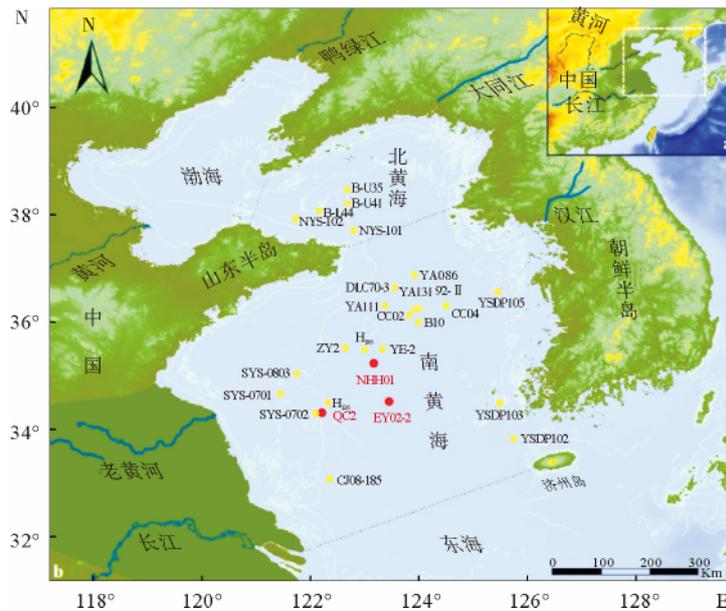


图 1 黄海已有年代学钻孔分布位置

(据文献[13]改绘;红色标记为长时间尺度研究钻孔,黄色标记为短时间尺度研究钻孔)

Fig. 1 Location of the chronology cores in the Yellow Sea

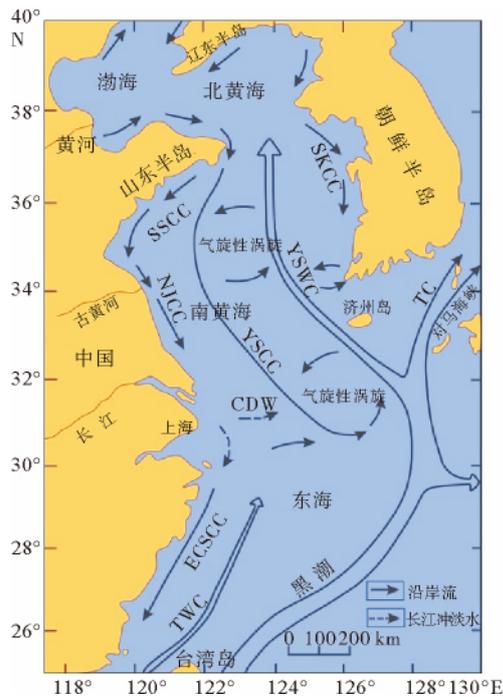
(modified form reference [13]; the red signs represent the cores of long time scales while the yellow ones for the short time scales)

源自赤道太平洋暖池海域的黑潮是太平洋中一支强大的西部边界流,具有高温、高盐、透明度大的特点^[12]。黑潮的主干通过吐噶喇海峡流回日本以南的太平洋。在日本九州的西南海域,黑潮分出一个北上的分支即为对马暖流。在济州岛东南,对马暖流又分成 2 支,主支经对马海峡和朝鲜海峡进入日本海,其分支转向西北,在济州岛西南插入黄海,称为黄海暖流^[9]。黄海暖流大体沿着“黄海槽”进入黄海,并与黄海沿岸流共同组成

黄海环流,深刻地影响着黄海水团分布和沉积环境^[16,17](图 2)。

2 年代学研究

由于第四纪的时限较短,测年的方法精度高、误差小,尤其是对全新世测年的要求更高。目前用于第四纪测年的方法大致可以划分为 3 类:物理年代学、放射性同位素年代学以及其他方法^[18]。



YSWC: 黄海暖流; TC: 对马暖流; YSCC: 黄海沿岸流; SKCC: 朝鲜南部沿岸流; TWC: 台湾暖流; CDW: 长江冲淡水; ECSCC: 东海沿岸流; SSCC: 山东半岛南部沿岸流; NJCC: 苏北沿岸流

图 2 黄海及其邻区的流系(据文献[16])

Fig. 2 Current system in the Yellow Sea and its adjacent area (from reference [16])

其中物理年代学测年方法是指利用岩石矿物的物理性质(如磁性、热、电等)测定沉积物的年龄,主要包括古地磁、热释光(TL)、光释光(OSL)、电子自旋共振(ESR)、裂变径迹等;放射性同位素年代学是指利用矿物和岩石中含有的微量放射性同位素的自行衰变计算年龄的方法,按照放射性同位素来源不同,可分为宇宙成因同位素法(^{14}C)、非宇宙成因同位素法(K—Ar 法、U 系法)、人工核放射沉降法等 3 类;另外还可以用于第四纪测年的方法有年轮年代学、纹泥年代学、氟法以及火山灰年代学等。

自 20 世纪 80 年代,针对黄海第四系的年代学研究陆续开展,并相应地取得了一系列的成果。以下将根据所研究时间尺度的长($>130\text{ ka}$)短($<130\text{ ka}$)分别进行论述。

2.1 短时间尺度

目前,海洋沉积物短时间尺度的定年最常用的方法是 ^{14}C 法,该方法适用的样品通常有泥炭、

软体动物壳体、化石碳酸盐等,就海洋沉积物而言,首选的测年材料为底栖有孔虫,其次为完整的贝壳,最后为贝壳碎片。 ^{14}C 法测年时限一般在 50 000 a 以内, $>40\ 000\text{ a}$ 时误差较大。另外,该领域可供选用的方法还有 ^{210}Pb 法($<100\text{ a}$)、ESR 法($<50\ 000\text{ a}$)、OSL 法($<100\ 000\text{ a}$)等。

黄海第四纪研究主要集中在南黄海,北黄海的研究相对比较薄弱。目前,关于北黄海沉积物的定年研究成果主要集中在几根钻孔。Liu 等^[17]对位于山东半岛附近一水下斜坡沉积体的两根钻孔(NYS-101 和 NYS-102,图 1)定年结果显示该处全新世沉积的厚度约为 15 m,而孙荣涛等^[19]对北黄海泥质区 3 根钻孔(B-L44, B-U35, B-U41,图 1)测年结果却显示此处全新世地层的厚度明显变薄,基本在 2~4 m 之间,最厚应该不超过 10 m(表 1)。这种相似深度层位上明显的年龄差距一方面可能和二者所使用的测年材料有关,更重要的在于上述钻孔所处的位置不同,所接受的物源通量存在显著差异,根本原因在于该区复杂多变的沉积环境。

相对于北黄海,南黄海第四纪的研究程度要高得多,钻孔几乎遍布整个海区(图 1)。该区早期的年代学研究的代表性钻孔当属位于南黄海西部的 QC2 孔, ^{14}C 测年结果显示该孔全新世的厚度接近 18 m,认为是巨厚的潮流砂脊沉积^[20]。此外,一些学者还尝试性地运用 ESR 法对 QC2 孔进行了测年(表 2),并对该方法在海洋沉积物定年中的可行性以及数据的可靠性进行了初步探讨^[21]。之后,大批钻孔陆续在该区获得,相应的年龄结果也陆续报道(详见表 2)。从这些测年结果可以发现,该区全新世地层的厚度明显受控于陆源物质的输入,即东西两侧靠近陆地的钻孔的全新世沉积较厚,而中部钻孔全新世明显变薄,厚度都在 10 m 以内。由于中部底流的存在,导致底流路径上某些区域的全新世地层遭受到侵蚀甚至是缺失(如 DLC70-3 孔)。除了 ^{14}C 方法以外,该区一些钻孔还运用了 OSL 法进行年龄测定。从 OSL 的结果可以发现,钻孔上下的年龄有时会出现明显的颠倒现象,尤其是年龄值接近 10 万 a 时,这种现象更加明显。虽然,OSL 方法在黄土、沙漠、考古等领域的年代学研究中已经日臻成熟,然而,其在海洋沉积物定年的应用方面还需要进一步的探究。

表1 北黄海短尺度研究代表钻孔测年信息

Table 1 Dating information of short time scales for representative cores in the North Yellow Sea

钻孔号	水深/m	地理坐标		测年信息		
		经度/E	纬度/N	材料	方法	(年龄结果/a)/ (对应深度/m)
NYS-101 ^[17]	49	122°48.25'	37°42.23'	贝壳	AMS ¹⁴ C	6 147/2.76
				贝壳碎片	AMS ¹⁴ C	6 626/9.10
				底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	10 393/14.09
NYS-102 ^[17]	34	121°43.84'	37°55.68'	底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	5 623/5.10
				底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	7 820/13.11
				底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	9 657/16.43
B-L44 ^[19]	53.12	122°10.05'	38°03.82'	沉积物	²¹⁰ Pb	49/0.29
				沉积物	²¹⁰ Pb	167/0.39
B-U35 ^[19]	52.70	122°41.23'	38°28.18'	沉积物	²¹⁰ Pb	69/0.13
				贝壳	AMS ¹⁴ C	5 832/2.89
				贝壳	AMS ¹⁴ C	10 790/4.23
B-U41 ^[19]	51.05	122°41.38'	38°11.84'	沉积物	²¹⁰ Pb	105/0.29
				贝壳	AMS ¹⁴ C	2 722/2.33
				贝壳	AMS ¹⁴ C	5 666/4.23

表2 南黄海短尺度研究代表钻孔测年信息

Table 2 Dating information of short time scales for representative cores in the South Yellow Sea

钻孔号	水深/m	地理坐标		测年信息		
		经度/E	纬度/N	材料	方法	(年龄结果/a)/ (对应深度/m)
QC2 ^[20]	49.05	122°16'	34°18'	?	¹⁴ C	9 910/15.06
				?	¹⁴ C	28 500/17.31
QC2 ^[21]				石英颗粒	ESR	4 100 a/3.62
				石英颗粒	ESR	7 700/14.77
				石英颗粒	ESR	88 700/35.19
				石英颗粒	ESR	101 300/54.59
92-II ^[22]	78.00	124°	36°15'	?	¹⁴ C	14 380/~3.70
H ₁₃₆ ^[22]	52.00	~122°20'	~34°30'	?	TL	11 400/1.55
				?	TL	14 400/3.05
H ₁₀₆ ^[22]	70.00	123°	35°30'	?	¹⁴ C	~19 000/~5.00
				?	¹⁴ C	~20 000/~6.00
YSDP102 ^[23]	62.00	125°45.009'	33°49.496'	有机碳	稀释 ¹⁴ C	4 720/11.85
				有机碳	稀释 ¹⁴ C	10 160/43.7
YSDP103 ^[23]	53.00	125°29.201'	34°29.246'	有机碳	稀释 ¹⁴ C	1 200/0.54
				有机碳	稀释 ¹⁴ C	4 020/8.41
				有孔虫	AMS ¹⁴ C	8 311/18.35
				有孔虫	AMS ¹⁴ C	11 780/27.1

续表 2

钻孔号	水深/m	地理坐标		测年信息		
		经度/E	纬度/N	材料	方法	(年龄结果/a)/ (对应深度/m)
YSDP105 ^[24]	45.00	125°27.152'	36°33.994'	有孔虫	¹⁴ C	11 045/~7.5
				泥炭	¹⁴ C	12 932/~17.5
				泥炭	¹⁴ C	20 350/~32
				有机质	¹⁴ C	27 160/~40
CC02 ^[25]	77.50	123°49.20'	36°07.70'	有孔虫(混合)	AMS ¹⁴ C	1 800/0.20
				有孔虫	AMS ¹⁴ C	57 20/0.95
				有孔虫(混合)	AMS ¹⁴ C	10 600/1.75
				有孔虫	AMS ¹⁴ C	12 910/2.75
CC04 ^[25]	83.00	124°30.00'	36°18.00'	有孔虫(混合)	AMS ¹⁴ C	12 130/0.75
				有孔虫(混合)	AMS ¹⁴ C	10 330/1.10
				有孔虫	AMS ¹⁴ C	12 450/1.40
				贝壳碎片	AMS ¹⁴ C	13 340/1.60
				贝壳碎片	AMS ¹⁴ C	15 090/2.10
B10 ^[26]	80.00	124°00'	36°00'	?	¹⁴ C	8 230/1.75
				?	¹⁴ C	10 140/1.85
				钙结体	¹⁴ C	37 400/~5.50
YA086 ^[16]	79.00	123°55.01'	36°52.466'	贝壳碎片	¹⁴ C	10 170/0.15
				泥炭	¹⁴ C	>35 300/1.76
YA111 ^[16]	77.00	123°22.482'	36°17.97'	贝壳碎片	¹⁴ C	10 540/1.69
				泥炭	¹⁴ C	36 880/3.15
YA131 ^[16]	77.00	123°55.00'	36°14.993'	有机质	¹⁴ C	12 520/1.74
				有机质	¹⁴ C	23 160/2.38
EY02-2 ^[15]	79.00	123°30.00'	34°30.00'	底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	7 920/1.05
				底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	10 160/2.00
YE-2 ^[27]	75.00	123°19.998'	35°29.996'	底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	1 620/0.96
				底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	4 782/3.58
				底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	8 020/5.90
				底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	8 020/5.90
CJ08-185 ^[28]	27.00	122°21.8'	33°4.695'	卷卷虫(混合)	AMS ¹⁴ C	2 453/0.42
				卷卷虫(混合)	AMS ¹⁴ C	6 498/1.18
SYS-0701 ^[29]	33.00	121°27.00'	34°39.75'	贝壳	AMS ¹⁴ C	690/6.18
				贝壳	AMS ¹⁴ C	43 640/16.64
				贝壳	AMS ¹⁴ C	>47 000/21.4
				砂	OSL	41 000/10.19
				砂	OSL	45 000/22.96
				砂	OSL	93 000/38.86
SYS-0702 ^[29]	32.00	122°05.75'	34°18.09'	砂	OSL	107 000/39.3
				贝壳碎片	AMS ¹⁴ C	1 340/11.35

续表 2

钻孔号	水深/m	地理坐标		测年信息		
		经度/E	纬度/N	材料	方法	(年龄结果/a)/ (对应深度/m)
				贝壳	AMS ¹⁴ C	2 660/18.64
				贝壳	AMS ¹⁴ C	10 360/26.61
				植物碎片	AMS ¹⁴ C	12 280/32.98
				植物碎片	AMS ¹⁴ C	33 770/39.36
				贝壳	AMS ¹⁴ C	>47 000/42
				砂	OSL	79 000/46.6
				砂	OSL	107 000/50.4
				砂	OSL	96 000/66.03
				砂	OSL	102 000/66.4
				SYS-0803 ^[29]	49.00	121°45.00'
腹足动物	AMS ¹⁴ C	9 180/3.40				
腹足动物	AMS ¹⁴ C	9 900/10.19				
贝壳	AMS ¹⁴ C	10 050/11.09				
腹足动物	AMS ¹⁴ C	>44 000/27.4				
ZY2 ^[30]	69.00	122°39'	35°31'	底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	1 964/1.29
				底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	3 947/2.38
				底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	5 941/3.30
NHH01 ^[31]	73.00	123°13'	35°13'	底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	10 200/4.59
				底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	13 500/5.69
DLC70-3 ^[32]	72.00	123°33'	36°38.25'	底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	10 963/0.02
				底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	11 286 /2.22
				底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	11 470/3.82
				底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	42 259/5.52
				贝壳+底栖	AMS ¹⁴ C	11 776/12.32
				底栖有孔虫	AMS ¹⁴ C	41 345/21.32
				?	OSL	80 000/42.64
?	OSL	87 000/50.45				
?	OSL	126 000/64.5				

2.2 长尺度研究

对于海洋沉积物乃至整个新生代地层而言,古地磁法(磁性地层)一直是最常用的定年方法。中国陆架早期的磁性地层研究多集中在几米的岩心,对较长时间尺度的磁性地层认识很少。截至目前,黄海第四系长尺度研究主要集中在南黄海3个钻孔(QC2, EY02-2, NHH01, 图1)。QC2

孔^[20]是早期南黄海研究最详细的钻孔,108.83 m的岩心揭示了~1.80 Ma 以来的沉积记录。钻孔的岩相分析以及海侵—海退旋回、生物地层、ESR测年和磁性地层所确定的布容—松山界线(B/M; 780 ka)位于钻孔 79.95 m(图3),除去顶部~18 m厚的全新世潮流砂脊沉积,则该孔 B/M界线大约位于 62 m。长期以来, QC2 孔一直被作为南黄海地区的标准性年代标尺。

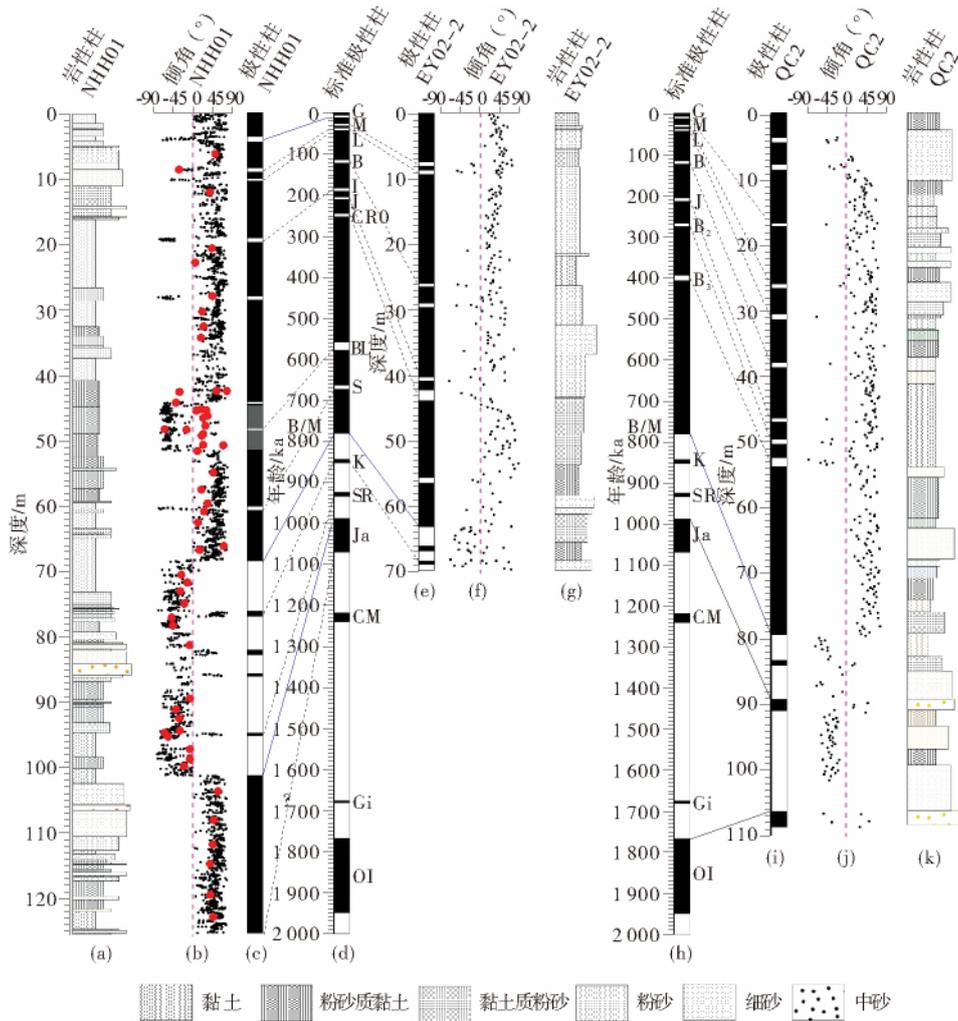


图 3 南黄海已有长时间尺度研究钻孔的磁性地层(据文献[13])

Fig. 3 Magnetostratigraphy for cores of long time scales in the South Yellow Sea (from reference[13])

2005年,葛淑兰等^[15]对取自南黄海中部泥质区70 m进尺的EY02-2孔开展了古地磁研究。结果表明,该孔的B/M界线位于63.29 m,同时在布容期内至少识别出7次极性漂移,可以与布容期内的6次极性事件对应;在松山期内也识别出3次正极性漂移,认为最下部的极性漂移可以与Kamikatsura正极性事件对应,最终推断该孔的底界年龄约为880 ka(图3)。据此,QC2孔和EY02孔在780 ka以来的平均沉积速率均为~8 cm/ka,这种沉积速率的一致性说明了B/M界线的可靠性。

上述2孔的古地磁结果为南黄海地区的古环境和沉积学研究提供了年代学约束,对促进该区第四纪研究具有重要的意义。然而,由于早期取

样技术和所用测量仪器精度的限制(主要是QC2孔),更重要在于缺乏系统的岩石磁学测试,对载磁矿物的性质研究不深,这是确定剩磁可靠性的基础,因此,对南黄海磁性地层的认识仍然存在争议和疑惑。针对这些问题,Liu等^[13,33]对南黄海中部的NHH01(图1)进行了系统的古地磁和岩石磁学研究。该钻孔总进尺为125.64 m,是目前黄海地区最长的一根钻孔,其平均采取率高达91%,较好地保留了地层的完整性。根据岩石磁学的结果发现,钻孔44.90~51.80 m层位的主要载磁矿物为胶黄铁矿(Fe_3S_4),其余层位的主要磁性矿物除了磁铁矿外,还有少量的赤铁矿。此外,与以往钻孔不同,该孔不但进行了高分辨率的交变退磁,同时还挑选特征样品进行了热退磁测

试,这就更加保证了剩磁记录的可靠性。通过综合研究发现,钻孔胶黄铁矿层位所揭示的负极性并非同沉积的磁学信息,最终将 B/M 界线定在 68.64 m,钻孔的底界年龄约为 1100 ka,该研究不仅为南黄海提供了更加可信的年代框架,同时也为陆架磁性地层研究提供了方法学实例。

3 结论

黄海第四纪年代学研究在近 30 年里取得了丰硕的成果。总体来看,南黄海的研究程度明显高于北黄海,短尺度研究程度明显高于长尺度研究。在短尺度定年方面,主要的方法为¹⁴C 法,所用的定年材料涵盖有孔虫、完整贝壳、贝壳碎片以及泥炭等。此外,ESR 和 OSL 也在该区短尺度定年方面得到了初步地应用,然而其定年结果的可靠性还有待于进一步考究。

短尺度研究的钻孔几乎遍布整个海域,但是不同部位的钻孔在同一深度层位上的年龄值差别明显,这一方面和该区复杂多变的沉积环境有关,同时又与所用测年材料和方法有直接关系,就¹⁴C 测年而言,底栖有孔虫结果较为可靠,贝壳碎片结果的可信度较低。因此,选择合适的测年方法和材料是得到可靠年龄的保障。

相对于短尺度研究所取得的成果,黄海长尺度研究的成果明显匮乏,仅有的几根钻孔都集中在南黄海中部和中—西部,北黄海到目前为止还没有长尺度研究的报道。就南黄海目前的研究成果来看,该区的 B/M 界线基本可以限定在 60~70 m 之间。就研究程度而言,NHH01 孔是目前整个黄海地区研究程度最高的一个钻孔,其不仅提供了该区可靠的年龄框架,同时也为陆架区磁性地层的研究提供了新思路。总之,今后还需要更多的长钻来填补黄海地区第四纪长尺度年代学研究的空缺。

参考文献:

- [1] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediments to the oceans[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(1): 1-21.
- [2] Coe A L, Bosence D W J, Church K D, et al. *The Sedimentary Record of Sea-level Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [3] Postma H. Physical and chemical oceanographic aspects of continental shelves[M] // Postma H, Zijlstra J J. *Continental Shelves*. Amsterdam: Elsevier, 1988: 5-37.
- [4] Satio Y, Katayama H, Ikehara K, et al. Transgressive and highstand systems tracts and post-glacial transgression, the East China Sea[J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 122(1-4): 217-232.
- [5] Zheng Y, Zheng H B, Kissel C, et al. Sedimentation rates control on diagenesis, East China Sea sediments[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2011, 187(3-4): 301-309.
- [6] Beardsley R C, Butman B. Circulation on the New England continental shelf: Response to strong winter storms[J]. *Geophysical Research Letter*, 1974, 1(4): 181-184.
- [7] Feely R A, Sabine C L, Hernandez-Ayon M J, et al. Evidence for upwelling of corrosive "Acidified" water onto the continental shelf[J]. *Science*, 2008, 320(5882): 1490-1492.
- [8] 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉,等. *东海地质* [M]. 北京:科学出版社, 1987.
- [9] 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉,等. *黄海地质* [M]. 北京:海洋出版社, 1989.
- [10] 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉,等. *渤海地质* [M]. 北京:海洋出版社, 1990.
- [11] 许东禹,刘锡清,张训华,等. *中国近海地质* [M]. 北京:地质出版社, 1997.
- [12] 何起祥. *中国海洋沉积地质学* [M]. 北京:海洋出版社, 2006: 171-189.
- [13] Liu J X, Shi X F, Liu Q S, et al. Magnetostratigraphy of a greigite-bearing core from the South Yellow Sea: Implications for remagnetization and sedimentation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(10): 7425-7441.
- [14] Yang S Y, Jung H S, Lim D H, et al. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea [J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 63(1-2): 93-120.
- [15] 葛淑兰,石学法,朱日祥,等. 南黄海 EY02-2 孔磁性地层及古环境意义[J]. *科学通报*, 2005, 50(22): 2531-2540.
- [16] 刘健,王红,李绍全,等. 南黄海北部泥质沉积区冰后期海侵沉积记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(3): 1-9.
- [17] Liu J, Satio Y, Wang H, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2007, 236(3-4): 165-187.
- [18] 田明中,程捷. *第四纪地质学与地貌学* [M]. 北京:地质出版社, 2006: 282-296.
- [19] 孙荣涛,李铁刚,常凤鸣. 全新世北黄海泥质区环境演化的底栖有孔虫记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(5): 83-90.
- [20] 周墨清,葛宗诗. 南黄海及相邻陆区松散沉积物磁性地层的研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1990, 10(4): 21-33.

- [21] 业渝光,和杰,刁少波. 南黄海 QC2 孔晚更新世 ESR 年代学的初步研究[J]. 科学通报, 1993, 38(4): 352-355.
- [22] 孟广兰,韩有松,王少青. 南黄海陆架区 15 ka 以来的古气候事件与环境演变[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(3): 297-305.
- [23] 刘健,李绍全,王圣洁,等. 末次冰消期以来黄海海平面变化与黄海暖流的形成[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(1): 13-24.
- [24] Jin J H, Chough S K, Ryang W H. Sequence aggradation and systems tracts partitioning in the mid-eastern Yellow Sea: roles of glacio-eustasy, subsidence and tidal dynamics [J]. Marine Geology, 2002, 184(3-4): 249-271.
- [25] Kim J M, Kucera M. Benthic foraminifer record of environmental changes in the Yellow Sea (Hwanghae) during the last 15,000 years [J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19(11): 1 067-1 085.
- [26] 程振波,石学法,刘东升,等. 南黄海 B10 岩心的微体古生物组合特征及古环境演化[J]. 科学通报, 2009, 46(S1): 45-51.
- [27] Xiang R, Yang Z S, Satio Y, et al. Paleoenvironmental changes during the last 8400 years in the southern Yellow Sea: Benthic foraminiferal and stable isotopic evidence[J]. Marine Micropaleontology, 2008, 67(1-2): 104-119.
- [28] 石丰登,程振波,石学法,等. 南黄海 CJ08-185 柱样大西洋期以来的孢粉组合及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 83-87.
- [29] Liu J, Satio Y, Kong X H, 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(1-4): 54-76.
- [30] 王利波,杨作升,张荣平,等. 南黄海中部泥质区 ZY2 孔 6200 年以来的海表温度记录及黄海暖流变化的影响[J]. 科学通报, 2011, 56(15): 1 213-1 220.
- [31] 刘建兴,石学法,葛淑兰,等. 全新世初期地磁极性漂移在南黄海中部泥质区的记录[J]. 第四纪研究, 2012, 32(4): 663-669.
- [32] 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指示[J]. 地质论评, 2013, 59(6): 1 024-1 034.
- [33] Liu J X, Shi X F, Ge S L, et al. Identification of the thick-layer greigite in sediments of the South Yellow Sea and its geological significances [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(22): 2 764-2 775.

PROGRESS OF QUATERNARY CHRONOLOGICAL RESEARCH IN THE YELLOW SEA

LIU Jianxing^{1,2}, LIU Qingsong^{1*}, SHI Xuefa³, WANG Chunjuan³, CHEN Jiaojie⁴

(1 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;

4 Earthquake Administration of Xiangyang City, Xiangyang 441000, Hubei, China)

Abstract: Sediments from the continental shelf are suitable for studies on sea-level and environmental-climatic changes. The Yellow Sea is a typically continental shelf sea and has always been a hot spot in geoscientific studies. Age determination of the sediments is the most fundamental problem to be solved in paleoenvironmental research. In this paper, we summarized the research products and problems of Quaternary chronology in the past ~30 years in the Yellow Sea. Generally, the chronological study in the South Yellow Sea is evidently higher than that in the North Yellow Sea and the chronological studies of short-time scales also precede the studies of long-time scales. Data of the short-time scales indicate that ages in equal depths vary at different sites, which could be resulted from not only the complicated sedimentary environment but also the dating methods and materials. Studies of long-time scale research are presently focused on the magnetostratigraphy of three cores in the South Yellow Sea, and the data reveal that the B/M boundary in this area can be constrained at 60-70 m interval. Since the studies of long-time scales in the Yellow Sea are quite scarce, it should be taken as the research focus in the future chronological studies.

Key words: Yellow Sea; Quaternary; chronology; short-time scale; long-time scale