

海岸带地区 ^{137}Cs 沉积剖面类型划分及其意义

王 福, 王 宏

WANG Fu, WANG Hong

中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

Tianjin Center of Geological Survey, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

摘要:作为一种人工核素, ^{137}Cs 年代学方法已在海岸地区得到广泛应用,并成为重建现代地质过程的重要方法。搜集了海岸带地区报道的 200 余组 ^{137}Cs 沉积剖面数据(其中中国海岸带地区 121 个站位,其它地区 100 余站位),通过对 ^{137}Cs 沉积剖面形态的分析,并与理想 ^{137}Cs 沉积剖面对比研究,结果显示,海岸带地区 ^{137}Cs 沉积剖面表现为以下 6 种主要类型:①不连续 ^{137}Cs 曲线、②无特征峰型的连续 ^{137}Cs 曲线、③特征峰型偏下的连续 ^{137}Cs 曲线、④特征峰型偏上的连续 ^{137}Cs 曲线、⑤比活度向下增大的 ^{137}Cs 曲线和⑥比活度向下减小的 ^{137}Cs 曲线。各种类型的沉积剖面反映的沉积环境是多样的;侵蚀作用、混合作用和沉积物供给变化是控制 ^{137}Cs 沉积剖面的主要因素;同时, ^{137}Cs 定年的取样要尽量做到无扰动,数据解释要考虑到取样分辨率的影响;在没有大气沉降监测的海岸带地区,其附近沉积环境相对稳定地区的 ^{137}Cs 沉积剖面可作为潮间带、浅海区的背景参考值。

关键词: ^{137}Cs ; 沉积剖面; 沉积过程; 海岸带

中图分类号: P512.32

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2011)07-1099-12

Wang F, Wang H. The division of ^{137}Cs vertical profile types on coastal area and its implications. *Geological Bulletin of China*, 2011,30(7):1099-1110

Abstract: As an anthropogenic radionuclide, the ^{137}Cs tracer dating method has been widely used in coastal areas, and has served as an important means for reconstructing modern geological processes. Based on an analysis of the shape of the ^{137}Cs vertical profiles and a comparison with ideal ^{137}Cs vertical profiles, the authors collected more than 200 ^{137}Cs vertical profiles, which included 121 stations in China's coastal areas, and more than 100 stations in other areas of the world. The results show that there exist six main types, i.e., (1) discontinuous ^{137}Cs curves, (2) continuous ^{137}Cs curve without characteristic peak, (3) characteristic peak on the lower part of the continuous ^{137}Cs curve, (4) characteristic peak on the upper part of the continuous ^{137}Cs curve, (5) increasing activity of ^{137}Cs with depth, and (6) decreasing activity of ^{137}Cs with depth. The main ^{137}Cs vertical profiles reflect a variety of sedimentary environments and imply that the main factors controlling the profiles of ^{137}Cs are erosion, mixing and sediments supply; The key points of the application of ^{137}Cs are undisturbed sampling and the consideration of the influence of sampling resolution on the interpretation of the data. In the coastal area without atmosphere fallout monitoring, the profile in a relative stable environment could serve as a background reference for tidal flat and shallow sea area.

Key words: ^{137}Cs ; vertical profile; deposition processes; coastal area

1 材料和方法

海岸带地区百年以来的现代地质过程(沉积物供给变化、污染历史等)重建必须以精确的年代学研

究为基础。 ^{137}Cs 是一种人工核素, 半衰期为 30.23 年, 由于核试验被释放到自然界中。具有最大检出深度对应 1954 年时标^[1-5]、最大峰值检出深度对应 1963 年时标、最后一个峰值检出深度对应 1986 年

收稿日期: 2010-08-04; 修订日期: 2011-05-13

资助项目: 中国地质调查局国土资源大调查项目《中国泥质海岸带对全球变化响应的研究与趋势预测》(编号: 1212010911069)

作者简介: 王福(1979-), 男, 博士, 从事海岸带现代地质环境变化研究。E-mail: wfu@cgs.cn

时标^[6-7](图1),有些地方还具有1973年峰值^[8-9]的特征。因此,自1970年代末期Delaune等^[2]首次利用¹³⁷Cs测定海岸盐沼沉积速率以来,¹³⁷Cs年代学方法已在沿海冲积平原、入海河口、潮间带、浅海区等不同海岸带沉积环境中得到广泛应用^[2-4,10-24]。1990年代,中国开始在海岸带地区有¹³⁷Cs相关成果的报道^[11,15-18,20,25-29]。此外,Wright等^[30]对1945~1980年的全球大气核试验次数进行了总结,提出了芬兰、俄国(Russia)的大气¹³⁷Cs沉积通量和直布罗陀、新加坡、Milford Haven、Tromso的¹³⁷Cs沉积通量(基于AEA的数据^[31],1955~1985年)。本文图1中选取了北半球逐年大气总沉降量变化曲线^[32]、南北半球¹³⁷Cs逐年沉降量变化曲线^[33]、日本东京地区¹³⁷Cs逐年大气总沉降量变化曲线(直接引自参考文献[34]中的图件)和美国南部¹³⁷Cs大气沉降量变化曲线^[3],供读者参考。

海岸带地区沉积物中¹³⁷Cs的来源主要有2种,大气沉降和水平搬运。大气沉降受到空间上(不同区域)的影响,目前的研究结果显示,北半球的¹³⁷Cs沉降量大于南半球(图1-A),主要是因为多数的核试验发生在北半球。Wright等^[30]总结了北纬60度以北地区的¹³⁷Cs沉降量,结果显示,俄罗斯远东东北部、北格陵兰和加拿大北部地区来自核武器实验产生的地面¹³⁷Cs沉降量最低,而最高的地区位于阿拉斯加海岸带地区、格陵兰南端地区、加拿大西部地区、冰

岛和挪威西部海岸带地区。虽然说¹³⁷Cs沉降的量各地有所不同,但是其反映出来的¹³⁷Cs特征峰型是基本一致的,并不影响其作为时标定年的能力。水平搬运的¹³⁷Cs则完全受控于当地的沉积物供给,尤其是海岸带地区受到河流沉积物供给变化、当地的潮位情况、极端天气事件(如洪水、风暴潮等)等的影响,使实测的¹³⁷Cs沉积剖面的形态有一定的不确定性。因此,首先了解海岸带地区¹³⁷Cs沉积剖面中的曲线形态是十分必要的。

以往的文献中主要对¹³⁷Cs比活度深度剖面进行年代学方面的分析,较少对¹³⁷Cs沉积剖面的实测形态特征及其反映的环境意义进行讨论。笔者通过多年海岸带地区工作的积累,在渤海湾地区获得了40余组¹³⁷Cs比活度深度剖面,同时在工作中重点对国内外报道的海岸带地区的¹³⁷Cs沉积剖面进行了搜集和整理,在此基础上,从剖面实测形态的角度对这些数据重新进行了梳理、分类和与标准剖面对比,以期总结出海岸带地区沉积物中¹³⁷Cs沉积剖面的主要形态特征,并对其指示的环境意义进行讨论,希望这些工作能够对今后海岸带地区的相关调查和研究有一定帮助。

2 结果

在中国泥质海岸带地区,共获得公开发表的

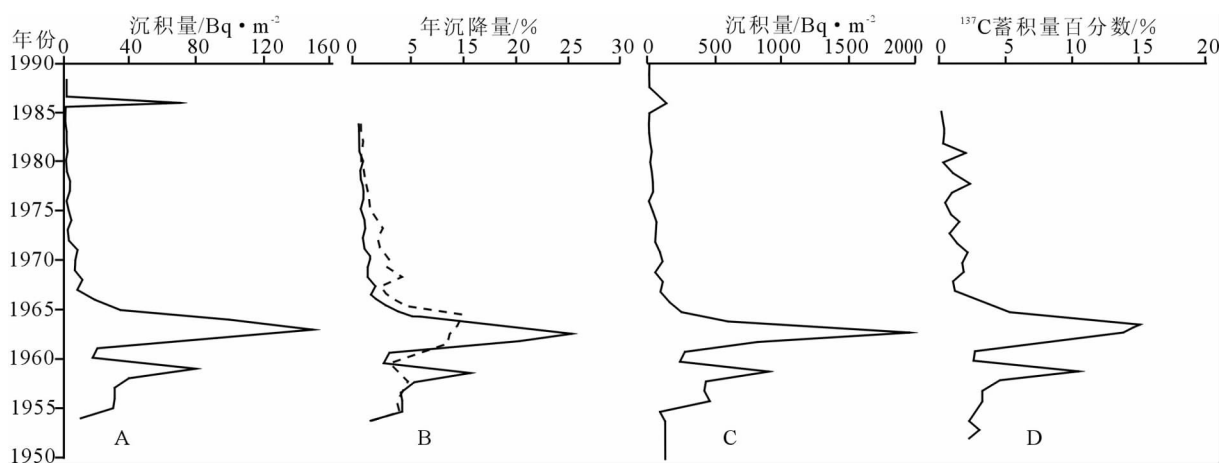


图1 理想的¹³⁷Cs沉积剖面

Fig. 1 Ideal ¹³⁷Cs activity-depth profiles

A—北半球逐年大气总沉降量变化曲线^[32];B—根据参考文献[35]的数据计算获得的¹³⁷Cs逐年沉降量变化曲线^[33],实线为北半球,虚线为南半球;C—日本东京地区¹³⁷Cs逐年大气总沉降量变化曲线(直接引自参考文献[34]中的图件);D—美国南部¹³⁷Cs大气沉降量变化曲线^[3];Bq—放射性活度单位,放射性元素每秒有一个原子发生衰变时,其放射性活度即为1贝可,Bq/m²就是每平方米的放射性强度

121 个站位的 ^{137}Cs 沉积剖面数据(表 1)。这些数据主要集中在渤海湾^[15-20]、长江三角洲^[11-12,14,27,36-39]和珠江三角洲地区^[11,25,27,29,40],此外胶州湾有少量报道^[28]。同时还获得了分布在世界其它海岸带地区的 100 余组公开发表的 ^{137}Cs 沉积剖面数据(见讨论部分),这些数据基本涵盖了全球的主要海岸带地区。

3 ^{137}Cs 沉积剖面的划分及其意义

3.1 ^{137}Cs 沉积剖面的划分

以理想的 ^{137}Cs 沉积剖面为基础,对取自海岸带地区的 200 余个站位的 ^{137}Cs 沉积剖面形态进行了对比和分析。结果显示,海岸地区的 ^{137}Cs 沉积剖

表 1 中国泥质海岸带地区 ^{137}Cs 示踪定年样柱一览表

Table 1 List of ^{137}Cs tracer dating cores of Chinese muddy coast

地区	序号	样柱名称	地 理 位 置	资料来源
渤海地区	1	L1	老狼坨子堤后盐沼, 38°17.582'、117°46.845'	[16]
	2	L2	老狼坨子堤后盐沼, 38°17.105'、117°47.596'	
	3	L3	老狼坨子堤后盐沼, 38°17.413'、117°46.116'	
	4	L4	老狼坨子 MHWST 处高潮坪, 38°17.902'、117°48.005'	
	5	L5	老狼坨子 MHWST 处高潮坪, 38°17.902'、117°48.005'	
	6	L6	老狼坨子 MHWST 处高潮坪(被充填的堤间洼地), 38°17.838'、117°48.083'	
	7	Q1	青静黄排水渠河口潮控漫滩, 38°39.655'、117°33.132'	[17]
	8	S1	独流减河堤后盐沼, 38°48'38.4"、117°27'54.6"	
	9	S2	独流减河堤后盐沼, 38°48'39.6"、117°28'03.0"	
	10	C1	驴驹河村北东潮间带中上部, 38°55.390'、117°42.266'	[18]
	11	C3	独流减河河口北东潮间带上部, 38°49.002'、117°36.013'	
	12	C4	青静黄排水渠河口以北潮间带上部, 38°39.983'、117°34.013'	
	13	54-1	天津三河岛北侧潮滩, 39°06'47.4"、117°43'16.2"	[19]
	14	102	天津三河岛南侧潮滩, 39°06'39.0"、117°43'24.6"	
	15	HHG1	黄骅港北侧浅海区, 38°18'31.2"、117°49'13.2"	
	16	HHG2	黄骅港北侧浅海区, 38°20'37.8"、117°52'12.0"	
	17	HHG3	黄骅港北侧海区, 38°22'53.6"、117°57'07.5"	
	18	HHG5	黄骅港南侧海区, 38°22'42.5"、118°01'31.5"	
	19	HHG6	黄骅港南侧浅海区, 38°20'51.6"、117°57'34.8"	[20]
	20	HHG7	黄骅港南侧浅海区, 38°18'59.4"、117°55'15.0"	
	21	908-1	独流减河, 117°34'11.9"、38°46'10.8"	
	22	908-2	马棚口剖面, 117°33'52.1"、38°38'53.9"	
	23	908-3	马棚口剖面, 117°33'02.7"、38°39'03.9"	
	24	908-4	大沽排污河剖面, 117°43'07.2"、38°57'35.4"	
	25	908-5	驴驹河剖面, 117°39'10.7"、38°53'10.0"	
	26	908-7	大神堂剖面, 117°57'08.6"、39°12'51.9"	
	27	908-8	大港油田围海处潮滩, 117°34'23.3"、38°41'53.5"	
	28	908-9	永定新河河口潮滩, 117°43'37.4"、39°05'38.0"	
胶州湾	29	908-10	蛭头沽潮滩, 117°47'29.5"、39°08'35.5"	[28]
	30	908-11	蔡家堡潮滩, 117°50'24.1"、39°10'38.9"	
	31	908-12	双桥潮滩, 117°55'24.1"、39°12'31.5"	
	32	CH21	天津北部浅海区, 39°09'58.3"、117°58'09.4"	
	33	CH23	天津北部浅海区, 39°08'26.3"、117°55'15.3"	
	34	CH80	天津北部浅海区, 39°07'52.3"、117°48'10.7"	
	35	CH81	天津北部浅海区, 39°07'13.0"、117°47'53.6"	
	36	DXP	河北南部大辛堡潮滩, 38°23'04.6"、117°42'33.9"	
	37	NPH	河北南部南排河潮滩, 38°29'15.3"、117°38'16.1"	
	38	D-L1	河北南部潮滩, 38°20'46.7"、117°46'58.5"	
胶州湾	39	C23	胶州湾中部海区, 36°05'23"、120°14'36"	[28]



续表 1

地区	序号	样柱名称	地 理 位 置	资料来源
长江三角 洲及 其附 近地 区	40	XIANG02	浙江象山港	[27]
	41	XIANG04	浙江象山港	
	42~51		长江口外侧海区(Inner Shelf): 493-8、493-9、499-13、499-14、499-15、460-8、460-11、493-5、493-6、493-7	[36]
	52~55	493-	长江口外侧海区(Mid-Shelf): 493-19、493-18、493-11、493-10	
	56~65	460-	长江口外侧海区(Outer Shelf and Continental Slope): 460-42、460-34、460-40、460-35、460-39、460-17、460-20、460-21、460-22、493-15	
	66	MJ114	长江口-杭州湾马迹山南侧, 水深 30m	[11]
	67~70	499-	长江口外侧海区: 499-32、499-37、499-28、499-16	[14]
	71~76	525-	长江口外侧海区: 525-15、525-13、525-12a、525-8、525-23、525-A	
	77~95	551-	长江口外侧海区: 551-24、551-27、551-34、551-12、551-23、551-28、551-33、551-14、551-21、551-30、551-31、551-15、551-20、551-37、551-36、551-17、551-42、551-41、551-40	
	96	Y4	长江口外侧浅海区	
	97	Y5	长江口外侧浅海区	[37]
	98	Y6	长江口外侧浅海区	
	99	Y7	长江口外侧浅海区	
	100	Y8	长江口外侧浅海区	
	101	Y9	长江口外侧浅海区	[12]
	102	FG17	长江口南槽口门南侧	
	103	YS5	上海洋山港东端航道北侧	
	104	MJ96	长江口-杭州湾马迹山港区	[38]
	105	ZH4	上海洋山港	
	106	N6	江苏王港盐沼	[39]
	107	N9	江苏王港盐沼	
珠江三角 洲及其 附近地 区	108	西港 I	厦门西港, 24°31'43" 、 118°04'10"	[25]
	109	西港 II	厦门西港, 24°30'01.5" 、 118°03'53"	
	110	九龙江口	九龙江口, 24°25'52" 、 118°01'26"	
	111	Y004	海南岛洋浦港	[27]
	112	Y007	海南岛洋浦港	
	113	XIA04	福建厦门外港	
	114	XIA06	福建厦门外港	
	115	DS2	舟山岱山水道, 水深 5m	[11]
	116	XS2	象山港口外拦门浅滩顶部, 水深 9m	
	117	P1	香港贝澳湿地	[40]
	118	P2	香港贝澳湿地	
	119	P3	香港贝澳湿地	
	120	ZLO	环厦门海域厦门岛东北	[29]
	121	XD2	环厦门海域厦门岛西南浅海区	

面表现为以下 6 种主要类型(图 2):①不连续 ^{137}Cs 曲线(图 2-A),②无特征峰型的连续 ^{137}Cs 曲线(图 2-B),③特征峰型偏下的连续 ^{137}Cs 曲线(图 2-C),④特征峰型偏上的连续 ^{137}Cs 曲线(图 2-D),⑤比活度向下增大的 ^{137}Cs 曲线(图 2-E)和⑥比活度向下减小的 ^{137}Cs 曲线(图 2-F)。除 C 和 D 之外,其它 ^{137}Cs 沉积剖面均不能反映来自大气的 ^{137}Cs 沉降历史。

3.1.1 不连续的 ^{137}Cs 曲线

该类曲线表现为: ^{137}Cs 曲线不连续,有部分地层中未检出 ^{137}Cs (图 3)。取自中国海岸带地区 L4、L5、HHG1、HHG6、C1、C3、54-1、102、908-4、908-5 和 908-10 剖面的(表 1)属于这种类型。该类曲线的 ^{137}Cs 比活度和蓄积量一般均较低,以 L4、L5、908-4 和 908-5 剖面为代表,其 ^{137}Cs 蓄积量低于大气沉降量。在国外其它海岸带地区也有相同类型的

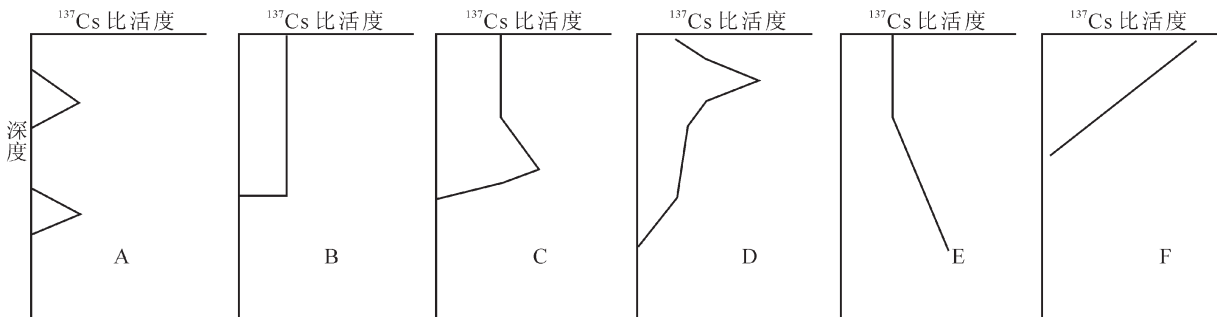


图 2 不同的 ^{137}Cs 沉积剖面类型

Fig. 2 Different ^{137}Cs vertical distribution patterns

A—不连续 ^{137}Cs 曲线; B—无特征峰型的连续 ^{137}Cs 曲线; C—峰型偏下的连续 ^{137}Cs 曲线; D—峰型偏上的 ^{137}Cs 曲线;
E—比活度向下递增的 ^{137}Cs 曲线; F—比活度向下递减的 ^{137}Cs 曲线

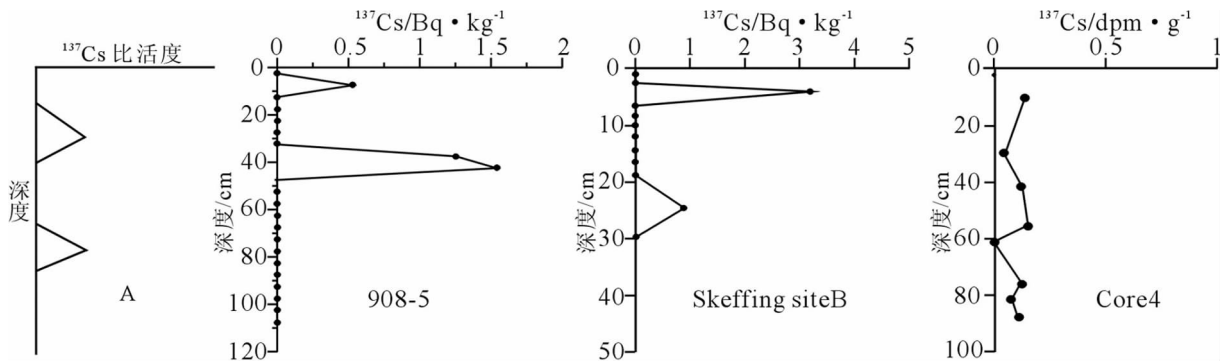


图 3 不连续的 ^{137}Cs 曲线理想模式和不同地区实测的典型 ^{137}Cs 沉积剖面

Fig. 3 Ideal discontinuous ^{137}Cs curves and typical ^{137}Cs vertical profiles in different parts of the coastal area

A—理想模式下的不连续曲线形态, 908-5—取自渤海湾潮间带上部地区^[20], Skeffing site B—取自英格兰东海岸的 Humber 河口地区^[13], Core 4—取自孟加拉恒河(布拉马普特拉河沿海冲积平原^[4];放射性元素每分钟有一个原子发生衰变时,其放射性活度即为 1dpm, 1Bq=60dpm, dpm/g 即每克样品每分钟原子发生衰变的个数

^{137}Cs 曲线报道, 如英格兰东海岸 Humber 河口地区的 Skeffing site B 柱状样也属于该类型^[13], 还有孟加拉恒河-布拉马普特拉河沿海平原的 Core 4 剖面^[4]和巴伦支海西北部的 Stn VIII 剖面、Stn XII 剖面^[22]等。

与理想的 ^{137}Cs 沉积剖面(图 1)对比发现, 此种类型沉积剖面仅有部分层位检出 ^{137}Cs , 此类剖面不能反映 ^{137}Cs 大气沉降历史, 无法采用时标进行定年。以图 3 中的 Skeffing site B 为例, 其主要为侵蚀作用所致。而以巴伦支海西北部的 Stn VIII 剖面、Stn XII 剖面为例, 其反映的仍以沉积作用为主, 仅在某一短时期内发生侵蚀作用, 造成相应层位缺失 ^{137}Cs 。该类剖面由侵蚀作用形成, 在潮间带环境、河口环境和沿海低地环境下均有报道。

3.1.2 无特征峰的连续 ^{137}Cs 曲线

该类曲线表现为: ^{137}Cs 曲线连续, 但是 ^{137}Cs 比活度在地层中比较均一或表现为等幅摆动, 特征峰型无法辨识(图 4)。取自中国海岸带地区 Q1、L1、DS2、ZLO、CH23、908 -7、908 -8、908 -9、Y4、Y9、551-24、551-14、551-21、551-30、551-37、551-36、551-17、551-42、551-41、551-40、525-A、551-12、551-23 剖面的(表 1)均属于此种类型。

此种类型的曲线在海岸带较常见, 根据表层的扰动和沉积物加积的情况, 可以被进一步细分为表层检测到 ^{137}Cs 和未检测到 2 种。表层检测到 ^{137}Cs 可能由以下一种或多种原因造成: ①(水平搬运来的)新近沉积的沉积物中含有 ^{137}Cs , ②1986 年以来无沉积或沉积后又被侵蚀, ③物理或生物扰动引起混合

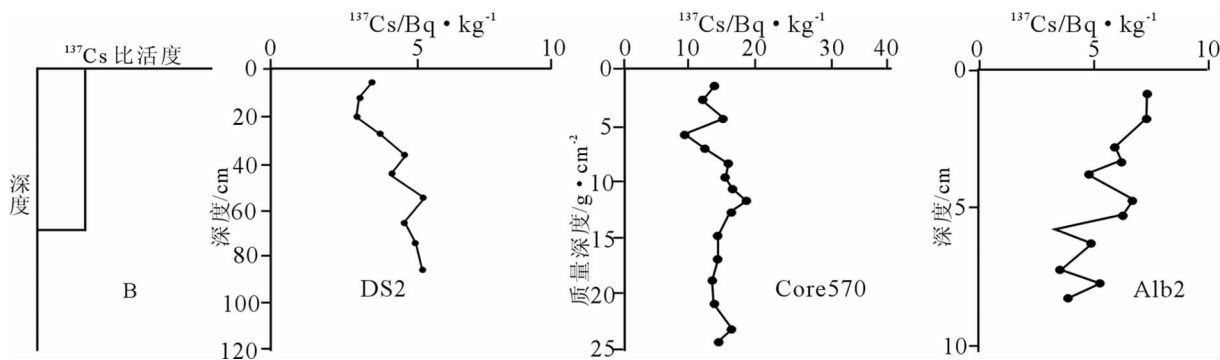


图4 无特征峰型的连续 ^{137}Cs 曲线理想模式和不同地区实测的典型 ^{137}Cs 沉积剖面

Fig. 4 Ideal no-peak continuous ^{137}Cs curves and typical ^{137}Cs vertical profiles in different parts of the coastal area

B—无特征峰型的连续 ^{137}Cs 曲线;DS2—取自珠江三角洲舟山岱山水道^[41];Core570—取自澳大利亚

东北部大堡礁泻湖^[44],该图纵坐标的量和单位意为某一深度以上沉积物的累计值;Alb2—取自 Alboran Sea 深海地区^[43]

作用。不同取样地区的结果需要结合当地的实际情况进行分析。此种类型的曲线可以通过 ^{137}Cs 检测深度进行现代沉积速率的计算,但要考虑到混合作用的影响。该类曲线在国外其它地区也有报道,如 BREAD AND BUTTER2, CRAB HAUL CREEK1^[41], Gangs-Brahmaputra 河地区的 Core 3^[4],孟加拉湾的 32Kh 剖面、52KH 剖面^[42],欧洲 Dollard 湾的 D1+D2 剖面、Skeffling 地区的 Site D、Humber 湾的站位 A^[13]等。表层未检测到 ^{137}Cs 、峰值无法辨认的连续曲线少见报道,在海岸带地区混合作用(生物或物理作用)很常见,易造成 ^{137}Cs 垂直迁移,因此该类曲线只有在极少数海岸带地区有报道,如 Skeffling 地区的 Site E^[13],Alboran Sea 深海的 Alb-2 剖面^[43],澳大利亚东北部大堡礁泻湖的 Core570 剖面^[44],孟加拉恒河-布拉马普特拉河沿海平原的 Core3 剖面、Core5 剖面^[4],巴伦支海西北部的 Stn IV 剖面^[22]等。

与理想的 ^{137}Cs 沉积剖面(图1)对比发现,此种类型沉积剖面中没有特征峰型保存下来,且沉积剖面中的 ^{137}Cs 比活度相近或表现为等幅摆动,主要是由混合作用造成的(包括物理过程、生物过程、化学过程等造成的混合作用),或为水平搬运来的沉积物快速沉积造成的。以 Sharma 等^[41]报道的 BREAD AND BUTTER2 和 CRAB HAUL CREEK1 剖面为例,柱状样品的描述结合 ^7Be 沉积剖面结果显示,其为强烈的生物(螃蟹)扰动所致;欧洲 Skeffling 地区的 Site E 亦为混合作用所致。因此,该类型 ^{137}Cs 沉积剖面主要为混合作用造成的。此种类型的曲线在盐沼环境、河口环境和潮间带环境均有报道。此外,

需要结合当地大气沉降的 ^{137}Cs 蓄积量理想值来进行判断沉积作用的快慢,一般情况下蓄积量越高,其沉积作用越活跃。

3.1.3 峰位偏下的 ^{137}Cs 曲线

该类曲线表现为至少有一个特征峰型在剖面偏下的位置可辨识(图5)。取自中国海岸带地区 L2、L3、L6、HHG2、HHG3、HHG5、HHG7、MJ114、XS2、C4、FG1、MJ96、XIA04、XIA06、XIANG02、XIANG04、Y004、Y007、C23、P1、CH80、CH81、CH21、DXP、NPH、D-L1、908-1、908-2、908-3、908-11、908-12、Y6、Y7、525-15、499-32、499-37、493-9、493-7、525-12a、493-6、499-16、499-14、493-8、493-5、551-33、551-15、493-14、QR499-16、西港 I、西港 II 剖面的(表1)均属于此种类型。

根据表层的扰动和沉积物加积的情况,可以进一步细分为表层检测到 ^{137}Cs 和未检测到2种。表层检测到 ^{137}Cs 的相对理想型连续曲线,且至少能够检测到一个峰值,如最大峰值对应的1963年、切尔诺贝利的1986年等。取自渤海湾潮间带的908-2、908-3、908-11属于这种类型,且均通过峰值进行了现代沉积速率的计算。在国外其它海岸带地区也有相同类型的 ^{137}Cs 曲线报道,如 Mussel Beds 地区的 Core A2 和 Core B^[46],孟加拉恒河-布拉马普特拉河沿海平原的 Core6 剖面^[4],Geul Catchment 地区的 N3 剖面 and VZ1 剖面^[5],Richardson 湾的 RB92-3 剖面, San Pablo 湾的 SP90-8 剖面^[47],美国加州 Eel 陆架上的 W9509 U-70 剖面、W9509 O-70 剖面、W9509 C-90 剖面、W9509 B-70 剖面^[48],Kongsmark 和

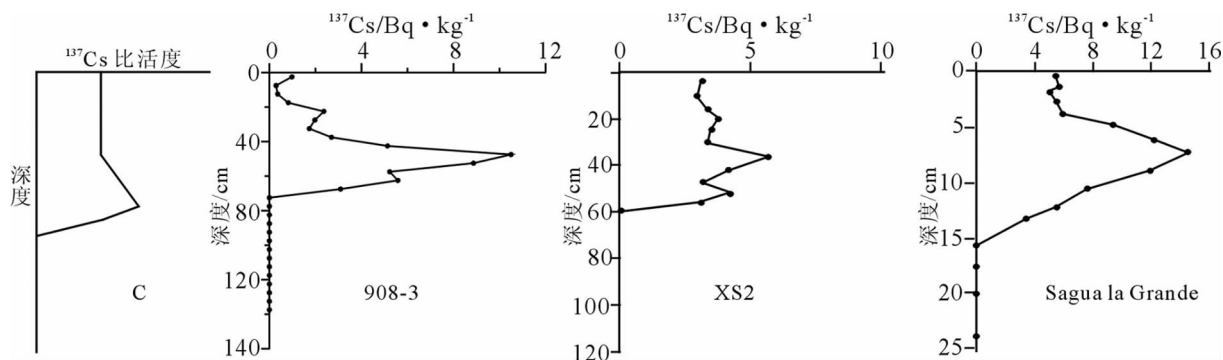


图 5 峰型偏下的 ^{137}Cs 曲线理想模式和不同地区实测的典型 ^{137}Cs 沉积剖面

Fig. 5 Ideal peak on the lower part of the ^{137}Cs curves and typical ^{137}Cs vertical profiles in different parts of the coastal area

C—理想模式下的 ^{137}Cs 曲线; 908-3—取自渤海湾地区^[20]; XS2—取自长江三角洲南部的象山港^[11]; Sagua la Grande—取自古巴 Sagua la Grande 河口湾地区^[45]

Humber A^[13], 孟加拉湾的 31KH 剖面^[42], Thane Creek 地区的 S2 站位^[9], Barneville-Carteret 地区的 BAR3 站位^[49], Trinity 河的 Core8^[50], Alboran Sea 深海的 T-1 剖面^[43], 巴西 Guaratuba Bay 的 GE4^[51]。表层未检测到 ^{137}Cs 的相对理想型连续曲线, 且至少能够检测到一个峰值, 以 C1、C3、Y007 为代表, 这种曲线的报道亦不多见, 如路易斯安纳盐沼的 TH1A 和 TH2A 站位^[3], 荷兰 Oosterschelde 的 CoreB 剖面、CoreC 剖面^[46], 美国得克萨斯州 Trinity 湾的 Core8 剖面^[50], 德国 Greatham 河潮控河口地区的 SSM 剖面、LM 剖面、CH 剖面^[52], 古巴 Sagua la Grande 河口湾的沉积剖面^[45], 巴伦支海西北部的 Stn I 剖面、Stn II 剖面、Stn X 剖面、Stn XIII 剖面^[22]等。

与理想的 ^{137}Cs 沉积剖面(图 1)对比发现, 此种类型沉积剖面与理想的 ^{137}Cs 沉积剖面类似, 反映了沉积物供给和速率均较稳定的沉积环境。该类型的 ^{137}Cs 沉积剖面在沿海低地、潮间带和浅海区均有报道。

3.1.4 峰位偏上的 ^{137}Cs 曲线

该类曲线表现为至少有一个特征峰型在剖面偏上的位置可辨识(图 6)。取自中国海岸带地区 YS5、P2、P3、Y8、ZH4、460-11、460-17、460-22、460-34、460-40、525-8、525-23、493-19、493-18、499-13、499-15、499-28、551-28、551-31 和九龙江口站位的(表 1)属于此种类型。在国外其它海岸带地区也有相同类型的 ^{137}Cs 曲线报道, 如路易斯安纳 Baratari

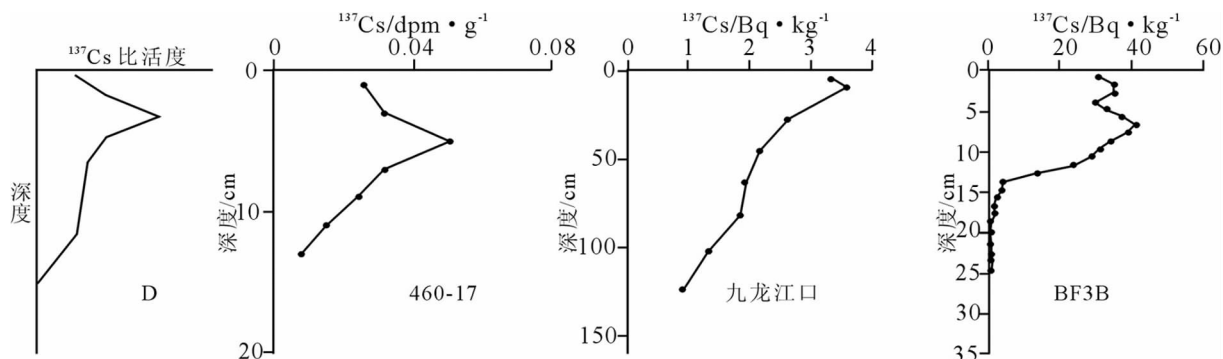


图 6 峰型偏上的 ^{137}Cs 曲线理想模式和不同地区实测的典型 ^{137}Cs 沉积剖面

Fig. 6 Ideal peak on the upper part of the ^{137}Cs curves and typical ^{137}Cs vertical profiles in different parts of the coastal area

D—理想模式下峰型偏上的 ^{137}Cs 曲线; 460-17—取自长江三角洲地区^[36]; 九龙江口—取自珠江三角洲九龙江口^[25]; BF3B—取自地中海西北 Lion 湾的 Rhône 三角洲^[10]

盆地附近盐沼的 a 剖面、b 剖面和 c 剖面^[2], TOWN CREEK4、BREAD AND BUTTER4^[41], 密西西比河三角洲的 Core a 剖面、Core c 剖面^[53], 荷兰 Oosterschelde 的 CoreA2 面^[46], 加拿大的不列颠哥伦比亚省弗雷泽三角洲 Sturgeon Bank 潮控盐沼剖面 4^[54], 孟加拉恒河-布拉马普特拉河沿海平原的 Core1 剖面^[4], 美国加州 Eel 陆架上的 W9509 G130 剖面、W9509 CC-90 剖面^[48], 地中海西北 Lion 湾 Rhône 三角洲的 BF3B 剖面、BF11 剖面、BF9 剖面、BF8 剖面、BF10 剖面、BF4 剖面^[10], 孟加拉湾的 95KL 剖面^[42], Alboran Sea 深海的 Alb-1 剖面、M-1 剖面、T-4 剖面^[43], 美国得克萨斯州 Trinity 湾的 Core1~Core7 和 Core9 剖面^[50], 印度 Deccan belt 南部的 S2 剖面, 德国 Greatham 河潮控河口地区的 GCS2 剖面、GCS1 剖面、SS 剖面、UM 剖面、SF 剖面^[52], 澳大利亚东北部大堡礁泻湖的 Core1241 剖面、Core1827 剖面^[44], 巴伦支海西北部的 Stn III 剖面、Stn X VIII 剖面^[22]等。

与理想的 ^{137}Cs 沉积剖面(图 1)对比发现, 该类曲线特征峰型以上段较理想 ^{137}Cs 沉积剖面对应段短, 推测为 1960 年代以来沉积速率变缓或接受沉积后近期受到侵蚀造成的, 但并未对特征峰型产生明显的影响。此外, 在混合扩散作用下, ^{137}Cs 在沉积物中检出层位下移也是峰位相对偏上的成因之一。该类型的 ^{137}Cs 沉积剖面在沿海低地、潮间带和浅海区均有报道。

3.1.5 比活度向下递增的 ^{137}Cs 曲线

此种类型曲线的 ^{137}Cs 比活度随着深度的增加

呈现增强的趋势, 并且检测到的 ^{137}Cs 最大值在沉积剖面的最下层(图 7), 该类 ^{137}Cs 沉积剖面无法进行时标定年。取自中国海岸带地区 XD2、N6、N9、Y5、525-13 剖面的(表 1)属于此种类型。在国外其它海岸带地区也有相同类型的 ^{137}Cs 曲线报道, 如 CRAB HAUL CREEK1 剖面^[41], 地中海西北 Lion 湾 Rhône 三角洲的 BF Roustan 剖面、BF14 剖面^[10], 巴伦支海西北部的 Stn IV 剖面、Stn XI 剖面、Stn X VI 剖面^[22]等。

与理想的 ^{137}Cs 沉积剖面(图 1)对比发现, 该类曲线与理想 ^{137}Cs 沉积剖面的上半部分形态类似, 属于下部沉积剖面“缺失”。因此, 该类曲线可能为未检测到 ^{137}Cs 峰型所在层位造成的 ^{137}Cs 沉积剖面缺失, 该 ^{137}Cs 沉积剖面并不完整, 再向下检测, 应该还可以检测到 ^{137}Cs , 即取样长度不够。该类曲线在盐沼环境和三角洲环境报道较多。

3.1.6 比活度向下递减的 ^{137}Cs 曲线

此种类型曲线, ^{137}Cs 最大峰值形态出现在表层, 并且随着深度的增加 ^{137}Cs 比活度呈现降低的趋势(图 8)。取自中国海岸带地区的 S1、S2、460-8、460-20、460-21、460-35、460-39、460-42、493-10、493-11、493-15、551-27、551-34、551-20 剖面的(表 1)属于此种类型。在国外其它海岸带地区也有相同类型的 ^{137}Cs 曲线报道, 如 GOAT ISLANG2 剖面^[41], 荷兰 Oosterschelde 的 CoreA1 剖面^[46], 孟加拉恒河-布拉马普特拉河沿海平原的 Core2 剖面、Core7 剖面 and Core8 剖面^[4], 地中海西北 Lion 湾 Rhône 三角洲的 BF2 剖面、BF13 剖面^[10], Alboran

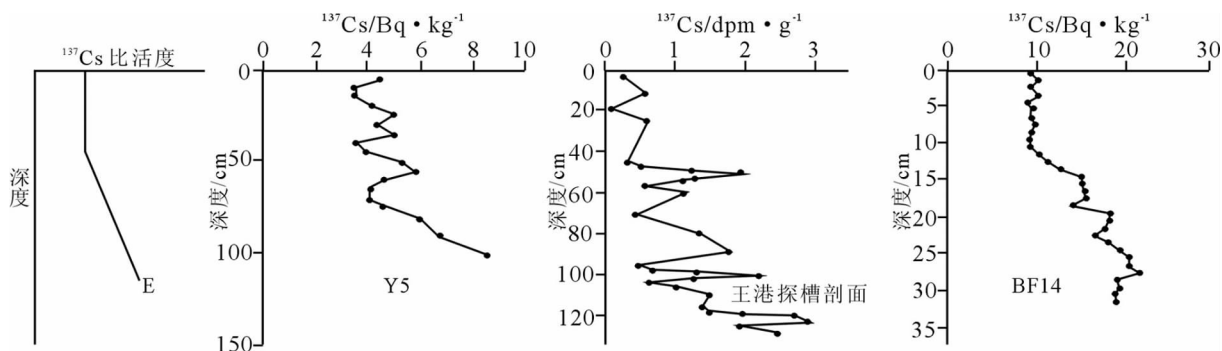


图 7 比活度向下递增的 ^{137}Cs 曲线理想模式和不同地区实测的典型 ^{137}Cs 沉积剖面

Fig. 7 Ideal curves of ^{137}Cs activity that increases with depth and typical ^{137}Cs vertical profiles in different parts of the coastal area

E—理想模式下比活度向下递增的 ^{137}Cs 曲线; Y5—取自长江三角洲^[37]; 王港探槽剖面—取自江苏王港盐沼^[39]; BF14—取自地中海西北 Lion 湾的 Rhône 三角洲地区^[10]

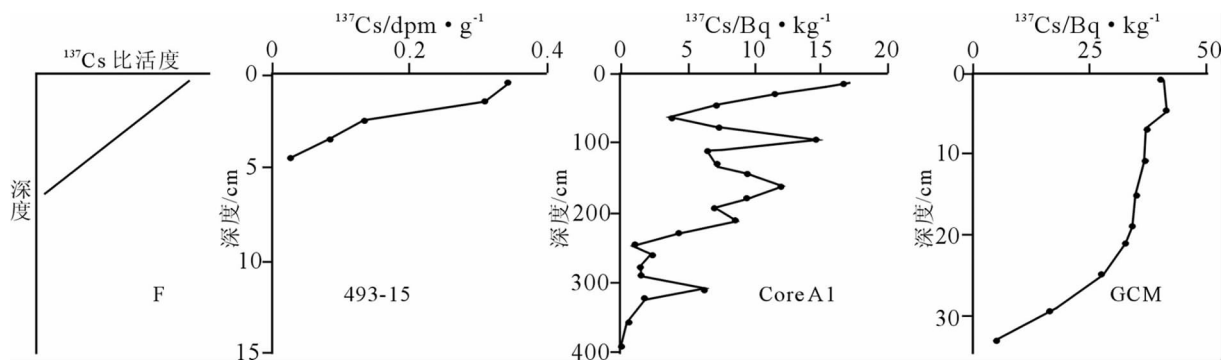


图 8 比活度向下递减的 ^{137}Cs 曲线理想模式和不同地区实测的典型 ^{137}Cs 沉积剖面

Fig. 8 Ideal curves of ^{137}Cs activity that decreases with depth and typical ^{137}Cs vertical profiles in different parts of the coastal area

F—理想模式下比活度向下递减的 ^{137}Cs 曲线; 493—15 取自长江三角洲地区^[50]; Core A1—取自荷兰 Oosterschelde 地区^[46]; GCM—取自德国 Greatham 的潮控河口湾^[52]

Sea 深海的 T-6 剖面^[43], 德国 Greatham 河潮控河口地区的 BF 剖面、GCM 剖面^[52]等。

与理想的 ^{137}Cs 沉积剖面 (图 1) 对比发现, 这种类型的曲线与理想的 ^{137}Cs 沉积剖面下部 (即 1963 年) 的形态相似, 属于上部沉积剖面“缺失”。因此, 这种类型的 ^{137}Cs 曲线可能是由表层的沉积物被侵蚀掉或者 1960 年代以来沉积速率极低造成的。该类型的 ^{137}Cs 沉积剖面在沿海低地、潮间带和海区均有报道。

3.2 海岸带地区控制 ^{137}Cs 沉积剖面的

主要因素分析

海岸带地区沉积环境复杂多样, 主要包括沿海低地、盐沼、泻湖、河口、潮间带、浅海环境等。理论上讲, 不同的沉积环境的动力特征和沉积物供给不同, 形成的 ^{137}Cs 沉积剖面也将不同。取自海岸带地区的 200 余个 ^{137}Cs 沉积剖面, 70% 以上都能检测到明显的峰型, 证实了 ^{137}Cs 具有在海岸带地区进行定年的能力。 ^{137}Cs 沉积剖面虽主要表现为 6 种类型, 但是, 并未发现哪一种类型的剖面可以反映单一的沉积环境, 其反映的沉积环境是多样的。那么, 在海岸带地区, 除大气沉降供给的 ^{137}Cs 之外, 控制 ^{137}Cs 沉积剖面形态的主要因素是什么呢?

海岸带地区 ^{137}Cs 的来源主要有 2 部分, 即大气沉降和水平搬运。研究显示, 侵蚀作用可造成 ^{137}Cs 沉积剖面不连续, 混合作用可以造成 ^{137}Cs 沉积剖面连续而无特征峰型, 而沉积作用的强弱 (沉积速率的

高低) 变化导致了其余 4 种类型的 ^{137}Cs 沉积剖面的形成。Plater 等^[52]的研究显示, 在 Tees 湾潮间带地区, ^{137}Cs 蓄积量与沉积速率具有很好的相关性, 并且其主要为侵蚀—搬运—沉积的结果。天津潮间带上部地区的研究结果显示^[55], ^{137}Cs 蓄积量与现代沉积速率同样具有很好的相关性 ($R^2=0.85\sim0.93$), 该结果进一步揭示了潮间带地区的沉积作用主要为搬运沉积作用。虽然是 2 个不同的地区, 但以上 2 处的结果均显示, 物理搬运控制的沉积过程是 ^{137}Cs 沉积剖面形成的另一主要控制因素。

3.3 海岸带地区应用 ^{137}Cs 定年需要注意的问题

3.3.1 取样时需要注意的问题

通过 ^{137}Cs 进行现代沉积物定年需要获取无扰动柱状岩心。海岸带由于取样位置的不同, 所采取的取样方法亦不同, 目前主要可以分为 2 种, 一种是陆上取样, 另一种是水下取样。陆上取样主要通过挖取人工探坑进行侧壁取样, 或采用 Eijkelkamp 槽形取样器获取无扰动柱状岩心。这 2 种方法已经在渤海湾地区得到广泛的应用, 并取得较好的效果。海区由于受潮流影响较强, 因此在海区取样时必须保证取样船的固定, 通过船载的重力取样器和箱式取样器取样。重力取样器可以获得较厚的沉积物, 最长可达 10 余米, 缺点是可能造成一定的扰动和压缩, 尤其是对表层沉积物的影响。箱式取样器可以获得扰动较小的沉积物, 但是取样的深度较浅, 一般为 60cm 左右, 所以其应用同样受到一定的限制。无论是采用

哪一种方法进行取样, 都要尽量保证获取的样品是无扰动的(避免混合和压缩), 具体的取样方法、测试过程和在海岸带地区的应用另文已有介绍^[56]。

3.3.2 数据解释时需要注意的问题

因为 ^{137}Cs 进行现代沉积物定年是以 ^{137}Cs 沉积剖面的形态为主的, 因此取样的分辨率对定年结果的影响很大。如本文图6中取自九龙江口的 ^{137}Cs 沉积剖面1m多的岩心只有8个样品, 从现有的 ^{137}Cs 沉积剖面结果看, 其属于峰型偏上的类型, 但是也可能在剖面中有其它峰型存在, 由于取样分辨率较低而未被检出。因此, 在实际工作中需要根据研究区的实际情况, 对取样的分辨率进行一定的控制。此外, 并非有峰值即对应1963~1964年的峰值, 最好有其它方法一起进行验证。如吉林小龙湾地区的 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 测年研究显示^[57], ^{137}Cs 沉积剖面中的最大峰值是1986年峰值, 而不是1963~1964年峰值。海岸地区沉积过程复杂, 易受到风暴潮等海洋高动能事件的影响, 使得 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 测年可信度降低, 这也在一定程度上限制了 ^{137}Cs 沉积剖面定年在海岸带地区的应用。笔者建议, 在海岸带地区选取陆上相对稳定的沉积环境开展背景研究, 如在盐沼、泻湖地区首先开展背景研究, 对 ^{137}Cs 的蓄积量、沉积剖面形态进行研究, 作为潮间带、浅海区的参考剖面。在渤海湾地区获得的S1和S2剖面^[58]就具有这一参考价值。

随着时间的推移, 距 ^{137}Cs 在地层中被检测出来的时间已经过了2个半衰期, 其在地层中被检测出来的时标特性将逐渐被削弱, 因此寻找其它现代沉积物定年方法是必要的。近年来, 各国研究者已经开始了尝试性的工作, 最常用的是与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 、 $^{239, 240}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 等数据对比研究。其中 ^{210}Pb 测年技术最为成熟, 同样, 由于海岸带地区环境复杂, 该方法也受到了一定的限制。因此, 今后还需要不断地完善该方法或探索新的测年方法。

4 结 语

本文讨论了海岸带地区 ^{137}Cs 沉积剖面的特征, 虽然海岸带地区的沉积过程很复杂, 易受到风暴潮等海洋高动能事件的影响, 但是对取自海岸带地区的200余个站位的 ^{137}Cs 沉积剖面数据的重新梳理、对比和分析, 还是划分出了海岸带地区6种常见的 ^{137}Cs 沉积剖面类型: 侵蚀作用为主造成了 ^{137}Cs 沉积剖面不连续, 混合作用造成了 ^{137}Cs 沉积

剖面连续而无特征峰型, 沉积作用的强弱变化造成了其余4种类型的 ^{137}Cs 沉积剖面。但是, 并未发现哪一种类型的剖面可以反映单一的沉积环境, 其反映的沉积环境是多样的。同时, 对取样如何避免样品扰动、数据解释时如何尽量客观等进行了论述, 希望这些工作对今后海岸带地区的相关工作有一定的帮助。

致谢:渤海湾地区 ^{137}Cs 数据的获得, 受益于作者所在天津地质调查中心海岸带与第四纪地质研究所的多年积累, 裴艳东助理研究员、李建芬副研究员、田立柱博士、范昌福博士、刘志广硕士、耿岩硕士参与了相关的工作, 吴良英工程师、南京地理与湖泊研究所现代沉积物测年实验室夏威岚高级工程师、美国地质调查局海岸带与流域研究中心 Chuck Holmes 博士和 Marci Marot 女士参与了实验测试工作, 在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] Pennington W, Tutin T G. Observation on Lake Sediments using Fallout ^{137}Cs as a Tracer[J]. Nature, 1973, 242: 324-326.
- [2] DeLaune R D, Patrick Jr W H, Buresh R J. Sedimentation rates determined by ^{137}Cs dating in a rapidly accreting salt marsh[J]. Nature, 1978, 275: 532-533.
- [3] Milan C S, Swenson E M, Uner R E, et al. Assessment of the ^{137}Cs method for estimating sediment accumulation rates: Louisiana salt marshes[J]. Journal of Coastal Research, 1995, 11(2): 296-307.
- [4] Goodbred S L, Kuehl S A. Floodplain processes in the Bengal Basin and the storage of Ganges-Brahmaputra River sediment: An accretion study using ^{137}Cs and ^{210}Pb geochronology[J]. Sedimentary Geology, 1998, 121(3): 239-258.
- [5] Stam M H. The dating of fluvial deposits with heavy metals, ^{210}Pb and ^{137}Cs in the Geul Catchment (the Netherlands)[J]. Phys. Chem. Earth (B), 1999, 24(1/2): 155-160.
- [6] Callaway J C, DeLaune R D, Patrick W H. Chernobyl Cs-137 used to determine sediment accretion rates at selected north European coastal wetlands[J]. Limnology and Oceanography, 1996, 41 (3): 444-450.
- [7] 项亮, 王苏民, 薛滨. 切尔诺贝利核事故泄漏 ^{137}Cs 在苏皖地区湖泊沉积物中的蓄积及时标意义[J]. 海洋与湖泊, 1996, 27 (2): 132-137.
- [8] Mishra U C, Lalit B Y, Sethi S K, et al. Some observations based on the measurements on fresh fallout from the recent Chinese and French nuclear explosion[J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80(36): 5045-5049.
- [9] Jha S K, Chavan S B, Pandit G G, et al. Geochronology of Pb and Hg pollution in a coastal marine environment using global fallout ^{137}Cs [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2003, 69: 145-157.

- [10]Radakovitch O, Charmasson S, Arnaud M, et al. ^{210}Pb and Caesium accumulation in the Rhone Delta Sediments[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, 48(1): 77-92.
- [11]夏小明, 谢钦春, 李炎, 等. 东海沿岸海底沉积物中的 ^{137}Cs , ^{210}Pb 分布及其沉积环境解释[J]. 东海海洋, 1999, 17(1): 20-26.
- [12]夏小明, 杨辉, 李炎, 等. 长江口-杭州湾毗连海区的现代沉积速率[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 130-135.
- [13]Andersen T J, Mikkelsen O A, Moller A L, et al. Deposition and mixing depths on some European intertidal mudflats based on ^{210}Pb and ^{137}Cs activities[J]. Continental Shelf Research, 2000, 20:1569-1591.
- [14]Su C C, Huh C. ^{210}Pb , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ in East China Sea sediments: sources, pathways and budgets of sediments and radionuclides [J]. Marine Geology, 2002, 183:163-178.
- [15]王宏, 李建芬, 康慧, 等. 泥质海岸带现代地质作用(沉积、剥蚀及岸线变迁)与精细测年[R]. 天津地质矿产研究所地调项目研究报告, 2002: 1-62.
- [16]李建芬, 王宏, 夏威夷, 等. 渤海湾西岸 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 ^{137}Cs 测年与现代沉积速率[J]. 地质调查与研究, 2003, 26(2): 114-128.
- [17]Meng W, Lei K, Zheng B H, et al. Modern sedimentation rates in the intertidal zone on the west coast of the Bohai Gulf[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 24(3): 46-53.
- [18]刘志广, 王福, 裴艳东, 等. 天津三河岛潮间带 ^{137}Cs 与 ^{210}Pb 的分布及现代沉积过程[J]. 地质通报, 2007, 27(7): 864-868.
- [19]王福, 裴艳东, 刘志广, 等. ^{137}Cs 示踪的黄骅港两侧海区的沉积特征[J]. 地质通报, 2008, 27(7): 1054-1059.
- [20]王福. 渤海湾海岸带 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 示踪与测年研究: 现代沉积及环境意义[D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2009: 1-101.
- [21]Zaborska A, Carroll J, Papucci C, et al. Recent sediment accumulation rates for the Western margin of the Barents Sea[J]. Deep-Sea Research II, 2008, 55: 2352-2360.
- [22]Zaborska A, Mietelski J W, Carroll J, et al. Sources and distributions of ^{137}Cs , ^{239}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$ radionuclides in the north-eastern Barents Sea [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2010, 101: 323-331.
- [23]Appleby P G. Tree decades of dating recent sediments by fallout radionuclides: a review [J]. The Holocene, 2008, 18(1): 83-93.
- [24]Irbien M, Cearreta A, Leorri E, et al. A 130 year record of pollution in the Suances estuary (southern Bay of Biscay): Implications for environmental management[J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56: 1719-1727.
- [25]李文权, 李淑英. ^{137}Cs 法测定厦门西港和九龙江口现代沉积物的沉积速率[J]. 海洋通报, 1991, 10 (3): 63-68.
- [26]潘少明, 王雪瑜. 海南岛洋浦港现代沉积速率[J]. 沉积学报, 1994, 12(2): 86-93.
- [27]潘少明, 朱大奎, 李炎, 等. 河口港湾沉积物中的 ^{137}Cs 剖面及其沉积学意义[J]. 沉积学报, 1997, 15(4): 67-71.
- [28]刘广山, 李冬梅, 易勇, 等. 胶州湾沉积物的放射性核素含量分布与沉积速率[J]. 地球学报, 2008, 29(6): 769-777.
- [29]李冬梅, 刘广山, 李超, 等. 环厦门海域沉积物放射性核素分布与沉积速率[J]. 台湾海峡, 2009, 28(3): 63-68.
- [30]Wright S M, Howard B J, Strand P. Prediction of ^{137}Cs deposition from atmospheric nuclear weapons tests within the Arctic[J]. Environmental Pollution, 1999, 104: 131-143.
- [31]AEA. General reference to: Radionactive fallout in air and rain[R]. Annual reports of the UK Atomic Energy Authority, Harwell (formerly Atomic Energy Research Establishment),1957-1997.
- [32]Mcmanus J, Duch R W. Geomorphology and sedimentology of lakes and reservoirs[M]. Chichester: John Wiley&Sons Ltd., 1993: 55-71.
- [33]Smith J T, Appleby P G, Hilton J, et al. Inventories and Fluxes of ^{210}Pb , ^{137}Cs and ^{241}Am Determined from the Soils of Three Small Catchments in Cumbria, UK[J]. J. Environ. Radioactivity, 1997, 37 (2): 127-142.
- [34]曾理, 吴丰昌, 万国江, 等. 中国地区湖泊沉积物中 ^{137}Cs 分布特征和环境意义[J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 1-9.
- [35]Cambray R S. Radioactive fallout in air and rain: results to the end of 1987[M]. Harwell, England, Atomic Energy Establishment, AERE-R 13226, June, 1989.
- [36]Huh C, Su C C. Sedimentation dynamics in the East China Sea elucidated from ^{210}Pb , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ [J]. Marine Geology, 1999, 160: 183-196.
- [37]Chen Z Y, Saito Y, Kanai Y, et al. Low concentration of heavy metals in the Yangtze estuarine sediments, China: a diluting setting [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 60: 91-100.
- [38]赵庆英, 陈荣华, 王小波, 等. 洋山港内及航道水域沉积环境分析[J]. 海洋工程, 2005, 23(2): 77-81.
- [39]王爱军, 高抒, 贾建军, 等. 江苏王港盐沼的现代沉积速率[J]. 地理学报, 2005, 6(1): 61-70.
- [40]潘少明, 郭大永, 刘志勇. ^{137}Cs 剖面的沉积信息提取——以香港贝澳湿地为例[J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 655-660.
- [41]Sharma P, Gardner L R, Moore W S, et al. Sedimentation and bio-turbation in a salt marsh as revealed by ^{210}Pb , ^{137}Cs , and ^7Be studies [J]. Limnol. Oceanogr., 1987, 32(2): 313-326.
- [42]Suckow A, Morgenstern U, Kudrass H R. Absolute dating of recent sediments in the cyclone-influenced shelf area off Bangladesh: of Gamma spectrometric (^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{228}Ra), radiocarbon, and ^{32}Si ages [J]. Radiocarbon, 2001, 43: 917-927.
- [43]Masque P, Fabres J, Canals M, et al. Accumulation rates of major constituents of hemipelagic sediments in the deep Alboran Sea: a centennial perspective of sedimentary dynamics[J]. Marine Geology, 2003, 193: 207-233.
- [44]Pfitzner J, Brunskill G, Zagorskis I. ^{137}Cs and excess ^{210}Pb deposition patterns in estuarine and marine sediment in the central region of the Great Barrier Reef Lagoon, north-eastern Australia[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2004, 76: 81-102.
- [45]Díaz-Asencio M, Alonso-Hernández, Bolanos-álvarez, et al. One century sedimentary record of Hg and Pb pollution in the Sagua estuary (Cuba) derived from ^{210}Pb and ^{137}Cs chronology[J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 59: 108-115.
- [46]Wilfried B M, ten Brinke, Pieter G E F, et al. Fine-grained Sedi



- ment Deposition on Mussel Beds in the Oosterschelde (The Netherlands), Determined from Echosoundings, Radionuclides and Biodeposition Field Experiments[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1993, 40: 195–217.
- [47] Fuller C C, Geen A C van, Baskaran M, et al. Sediment chronology in San Francisco Bay, California defined by ^{210}Pb , ^{234}Th , ^{137}Cs , and $^{239,240}\text{Pu}$ [J]. Marine Chemistry, 1999, 64: 7–27.
- [48] Sommerfield C K, Nittrouer C A. Modern accumulation rates and a sediment budget for the Eel shelf: a flood-dominated depositional environment[J]. Marine Geology, 1999, 154: 227–241.
- [49] Haslett S K, Cundy A B, Davies C F C, et al. Salt marsh sedimentation over the past c. 120 years along the west Cotentin coast of Normandy (France): Relationship to sea-level rise and sediment supply[J]. Journal of coastal research, 2003, 19(3): 609–620.
- [50] Williams H. Modeling Shallow Autocompaction in Coastal Marshes Using Cesium-137 Fallout: Preliminary Results from the Trinity River Estuary, Texas[J]. Journal of Coastal Research, 2003, 19(1): 180–188.
- [51] Sanders C J, Santos I R, Silva-Filho E V, et al. Mercury flux to estuarine sediments, derived from Pb-210 and Cs-137 geochronologies (Guaratuba Bay, Brazil)[J]. Marine Pollut. Bull., 2006, 52: 1085–1089.
- [52] Plater A J, Appleby P G. Tidal sedimentation in the Tees estuary during the 20th century: radionuclide and magnetic evidence of pollution and sedimentary response [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 60: 179–192.
- [53] Chumra G L, Kesters E C. Storm Deposition and ^{137}Cs Accumulation in Fine-grained Marsh Sediments of the Mississippi Delta Plain [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1994, 39: 33–44.
- [54] Williams H F L, Hamilton T S. Sedimentary dynamics of an eroding tidal marsh derived from stratigraphic records of ^{137}Cs fallout, Fraser Delta, British Columbia, Canada[J]. Journal of Coastal Research, 1995, 11(4): 1145–1156.
- [55] Wang F, Wang H, Andersen T J, et al. Modern sedimentation rates in the supratidal zone, based on vertical profiles of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^{137}Cs , Tianjin, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, in preparation.
- [56] 王福, 吴良英. 低本底高纯锗 γ 能谱仪在天津海岸带现代地质环境变化研究中的应用[J]. 地质调查与研究, 2009, 32(4): 310–316.
- [57] 夏威岚, 薛滨. 吉林小龙湾沉积速率的 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 年代学方法测定[J]. 第四纪研究, 2004, 24(1): 124–125.
- [58] Wang F, Wang H, Li J F, et al. ^{210}Pb and ^{137}Cs measurement on the Circum Bohai Sea (CBS) Region: sedimentation and implication[J]. Frontiers of Earth Science in China, 2008, 2(3): 276–282.