

doi:10.3799/dqkx.2016.081

开放潮坪地区 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 测年 CIC 和 CRS 计算模式的选择

王 福^{1,2,3}, 杨 彪^{1,4}, 田立柱^{1,2,3}, 李建芬^{1,2}, 商志文^{1,2}, 陈永胜^{1,2},
姜兴钰^{1,2,3}, 杨吉龙^{1,2}, 王 宏^{1,2}

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170
2. 中国地质调查局泥质海岸带地质环境重点实验室, 天津 300170
3. 天津地质矿产研究所年轻沉积物测年实验室, 天津 300170
4. 中国地质大学海洋学院, 北京 100083

摘要: 现代沉积物测年方法已经在海岸带地区得到了广泛应用,但在开放潮坪地区还存一定的问题,尤其是在通过 ^{210}Pb 进行沉积速率计算时,常量初始浓度(constant initial concentration,简称CIC)模式和恒定补给速率(constant rate of supply,简称CRS)模式给出的结果通常差别很大,即使是与 ^{137}Cs 时标法进行比对时,有时也不易解释.这严重制约了现代沉积物测年方法在开放潮坪及浅海区的应用效果.鉴于此,选取了其中的1个典型站位的柱状样品,同时开展 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 过量的 ^{210}Pb 的CRS模式和CIC模式计算,并与 ^{137}Cs 时标法进行对比,结合区域沉积历史数据,对 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 的CRS模式和CIC模式的选择进行了综合分析,为现代沉积物测年在海岸带地区的应用和解释提供了过程参考.结果显示,对 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 数据分段采用CIC模式获得的结果较CRS模式获得的更为可靠.这是因为海岸带地区,被潮流搬运来的沉积物更容易满足CIC计算模式所要求的前提条件,即沉积物中的 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 初始比活度是恒定的.作为一般数据使用者,更倾向于通过 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 测年方法(也就是CRS模式)能够获得每一层的年龄,但在海岸带地区应用该方法时就需要更加慎重.

关键词: 常量初始浓度模式;恒定补给速率模式;海洋沉积物;渤海湾;海洋地质.

中图分类号: P67

文章编号: 1000-2383(2016)06-0971-11

收稿日期: 2015-11-16

The Choice of CIC and CRS Models of $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ Dating for Tidal Flat Area

Wang Fu^{1,2,3}, Yang Biao^{1,4}, Tian Lizhu^{1,2,3}, Li Jianfen^{1,2}, Shang Zhiwen^{1,2}, Chen Yongsheng^{1,2},
Jiang Xingyu^{1,2,3}, Yang Jilong^{1,2}, Wang Hong^{1,2}

1. Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China
2. Key Laboratory of Muddy Coast Geo-environment, China Geological Survey, Tianjin 300170, China
3. Young Sediments Dating Laboratory, Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China
4. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Although modern sediment dating method has been widely used in coastal areas, applications in the open tidal flat are still challenged. Especially, $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ dating results given by CIC (constant initial concentration) model and CRS (constant rate of supply) model in the same core are sometimes very different, which is difficult to interpret even compared with the ^{137}Cs data. In this paper, one typical short core collected from open tidal flat was chosen for a comparison study to facilitate future applications of $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ methods in open coastal areas. The $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ CIC and CRS models were employed for the calculation, and the two $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ dating models were analyzed and compared with ^{137}Cs method on the basis of sedimentary history data. It is found that the results given by CIC model are more reliable than those by CRS model, which is attributed to the fact that it is easier for the sediments transported by currents to meet the prerequisites for CIC model, in other words, the initial concentration of $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ is constant in most instances in coastal areas. As data users generally are expecting to obtain the age of each layer by

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41206069);中国地质调查局百名青年地质英才培养计划项目.

作者简介: 王福(1979-),男,副研究员,从事现代沉积物测年与海岸带地质环境研究. E-mail: wfu@cgs.cn

引用格式: 王福,杨彪,田立柱,等,2016. 开放潮坪地区 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 测年 CIC 和 CRS 计算模式的选择. 地球科学,41(6): 971-981.

$^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ dating method (e. g. CRS model), its applications in open coastal area require prudence.

Key words: constant initial concentration model; constant rate of supply model; marine sediments; Bohai Bay; marine geology.

海岸带地区距今约 100 年以来的现代地质过程(沉积物供给、污染、现代海平面与海岸带开发的影响等)的重建必须以精确的年代学研究为基础。20 世纪 70 年代初期, Koide *et al.* (1973) 首次利用 ^{210}Pb 年代学法测定了海洋沉积速率; 20 世纪 70 年代末期, DeLaune *et al.* (1978) 首次利用 ^{137}Cs 年代学方法测定了海岸盐沼沉积速率。自那时以来, ^{137}Cs 时标法和 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 测年法在海岸带地区被广泛应用于定年和获取沉积速率。

海岸带沉积物 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 和 ^{137}Cs 的来源主要有两种, 即大气沉降和水平搬运。后者的 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 过量的 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 完全受控于当地的沉积物供给, 尤其是受到海岸带地区河流沉积物供给变化、当地潮位情况、极端天气事件(如洪水、风暴潮等)等的影响, 使得 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 和 ^{137}Cs 实测剖面的形态具有一定的不确定性, 因而制约了海岸带地区现代沉积速率的高分辨率定量研究。在海岸带地区该方法应用成功率较低, 但是一旦成功便可以获得很好的研究成果, 主要包括在盐沼地区(DeLaune *et al.*, 1978; Patrick and DeLaune, 1990; Milan *et al.*, 1995; Andersen *et al.*, 2000; Gehrels *et al.*, 2012; Andersen *et al.*, 2011)、开放潮坪(李建芬等, 2003; Plater and Appleby, 2004; Meng *et al.*, 2005; Teasdale *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2014) 和海区(Su and Hu, 2002; Zaborska *et al.*, 2008; 王昕等, 2013; Wang *et al.*, 2016) 获得的一些成果。

利用 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 计年的常用模式有两种, CIC (constant initial concentration) 模式和 CRS (constant rate of supply) 模式(Krishnaswamy *et al.*, 1971; Appleby and Oldfield, 1978; Robbins, 1978)。通过 CIC 模式可以直接获得研究区的平均沉积速率, 通过 CRS 模式可以直接获得每一层对应的沉积年龄。由于高分辨率研究的需要, 大家更倾向于通过 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 计年获得每一层的年龄。因此, CRS 模式是大家常用的结果表示方法。理论上讲, 当 ^{210}Pb 测年的前提条件都满足时, CIC 模式和 CRS 模式给出的结果应该是一样的; 然而, 由于海岸带地区的开放性, 计算模式假设条件一般很难完全满足, 造成同一组数据通过两种模式给出的结果差别很大, 这种现象非常普遍。那么, 这样的数据应该如何应用和解释呢?

以往对改进现代沉积物测年方法的研究主要涉及基本原理(万国江, 1997)、采样、制样、测定、测试误差(邹汉阳和余兴光, 1984)、数据处理(康兴伦, 1986)、 ^{210}Pb 剖面的粒度标准化(业渝光等, 1992)、压实效应、深度校正、盐度效应、混合作用、 ^{210}Pb 与 ^{137}Cs 计年的对比等方面(苏贤泽等, 1984; 范德江等, 2000; 孙丽等, 2007)。渤海湾地区, ^{210}Pb 测年工作始于 20 世纪 80 年代末, 杜瑞芝等(1990) 当时在天津新港航道附近的海区开展了现代沉积速率调查; 而后, 该工作进入了停顿期, 直至 20 世纪 90 年代末期, 学者们才在中国地质调查局国土资源大调查项目的支持下重新开展相关工作(王宏, 2003; 李建芬等, 2003), 主要的实施单位为天津地质矿产研究所(天津地质调查中心), 并且较之前的工作增加了 ^{137}Cs 示踪定年; 至今, 该区的现代沉积速率研究柱样已经累积达到 50 余组(Meng *et al.*, 2005; 刘志广等, 2007; 王福等, 2008; 王福, 2009; Wang *et al.*, 2014, 2016)。这些工作更多的仅是将其作为一种测年工具, 报道以其结果为依据开展的相关工作, 对于计算过程、选择依据和区域沉积历史结果的可靠性缺乏详细论述。有鉴于此, 本文以取自渤海湾歧口开放潮坪的钻孔样品为例, 在详细介绍了 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 计年的 CRS 模式和 CIC 模式的计算原理和可以直接进行应用的计算公式及其推导过程的基础上, 结合区域水文资料, 开展了 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 计年的 CRS 模式和 CIC 模式计算结果与 ^{137}Cs 时标法结果的对比研究, 探讨了海岸带地区 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 计年的 CRS 模式和 CIC 模式的选择及其原因, 为现代沉积物测年在海岸带地区的应用和解释提供了过程参考。

1 地质概况

渤海湾是中国北方的半封闭海, 平均水深为 12.5 m, 平均潮差为 2.4 m(图 1)。海岸超过 200 km 长, 面积为 15 900 km², 占渤海面积的五分之一。构造位置总体位于华北拗陷区, 区内主要三级构造单元为济阳拗陷、呈宁隆起、黄骅拗陷和沧县隆起呈 NE-SW 向相间分布, 第四系沉积物厚为 400~500 m(何继山等, 2015; 张克信等, 2015)。黄河从渤海湾西南部入海, 还有一些小河流从西部和西北部入海, 包括从天津入海的海河、独流减河等。由于 20 世纪 60 年代

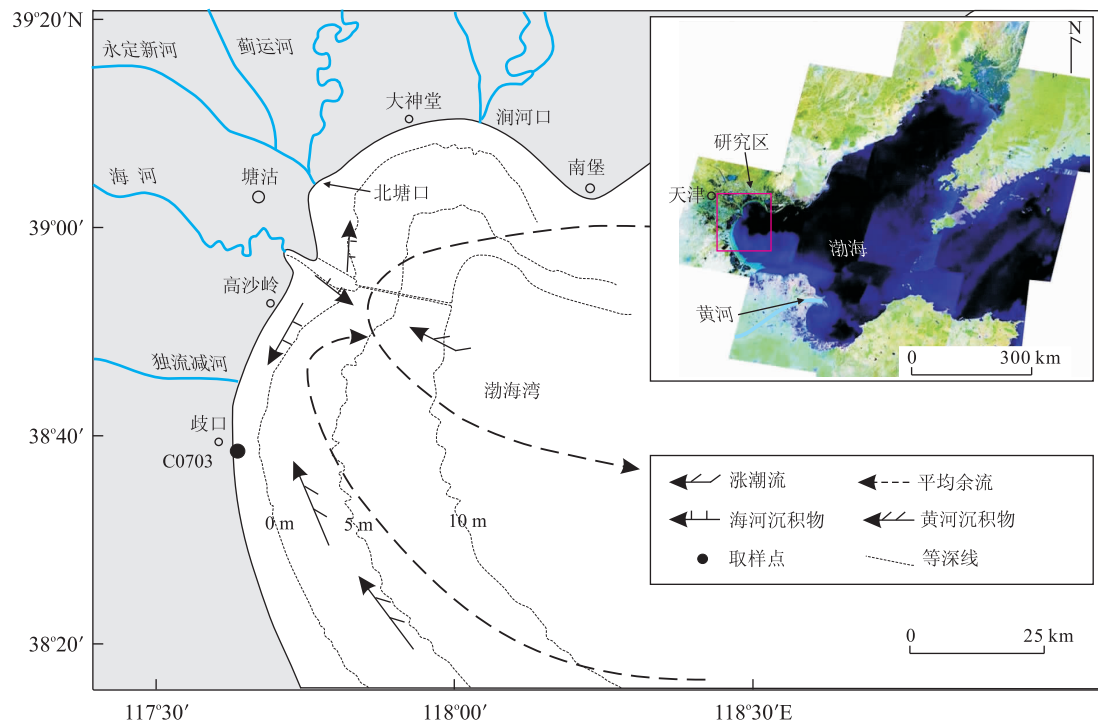


图 1 渤海湾概况和取样位置

Fig. 1 Study area and location of sampling sites in the supratidal zone of Bohai Bay, China
沉积物运移数据基于吕先进和翟乾祥(1987),潮流数据基于赵宝仁等(1995)发表的数据

河流上游大量建闸,河流携带的沉积物入海量迅速降低(胡世雄和齐晶,2000),在以潮流为主搬运动力的沉积物作用下,河口地区的河道淤积严重(钟新宝和康慧,2002;王宏,2003,李建芬等,2007)。

从南、北两个方向分别有沿岸流进入渤海湾,在天津海岸交汇,并向东流回大海(图 1)。根据沉积物粒度特征可将天津开放潮坪分为 3 个岸段(裴艳东等,2009),涧河到海河段为泥质(粘土质粉砂)潮坪,海河向南至独流减河段为粉细砂质潮坪,独流减河以南至黄骅港为泥质潮坪。在过去的 100 年,特别是近 10 年,在人类活动和自然因素共同作用下,渤海湾潮间带发生了巨大变化。天然岸线基本都被人工岸线替代,潮间带上部地区被围海造陆(王福等,2010)。本文将要讨论的 C0703 孔取自歧口,位于渤海湾湾顶泥质潮坪上部,平均高潮位附近,仅在天文大潮和极端潮位时被淹没(图 1)。

2 研究方法

本文以在渤海湾开放潮坪上部获得的 C0703 孔样品为研究对象(图 1),对其测得的²¹⁰Pb_{exc}比活度数据同时开展 CIC 模式和 CRS 模式计算(表 1,图 2),获得的测年结果与¹³⁷Cs 时标法结果开展对比

研究。C0703 孔的取样,分样、样品处理及测试见 Wang *et al.* (2014)。

CIC 模式:常量初始浓度模式,也称为常量活度(constant activity,简称 CA)模式,应用的前提条件是沉积物沉积时的初始比活度是恒定的。通过该方法可以直接获得被测样柱的平均沉积速率。可以通过以下公式计算平均沉积速率:

$$S = \lambda D / \ln(A_0/A_x), \tag{1}$$

其中, S 为沉积速率(cm/a); λ 为²¹⁰Pb 衰变常数($\lambda=0.031/a$); D 为深度 x (cm); A_0 为表层沉积物比活度(dpm/g 或 Bq/kg); A_x 为 x 深度的沉积物比活度(dpm/g 或 Bq/kg)。

公式(1)经过推导可以变为公式(2):

$$Y = E \times \ln(A_x) + B, \tag{2}$$

其中, Y 为深度, A_x 为该深度对应的比活度, E 为斜率($-\lambda/S$), B 为常数。换句话说深度和比活度之间呈指数关系(图 2a),通过常用的软件(Excel)可以很容易获得拟合的结果,即 E 的数值。平均沉积速率可以由以下公式计算获得:

$$S = E \times (-\lambda), \tag{3}$$

其中, S 为平均沉积速率, λ 为²¹⁰Pb 衰变常数。由此,可以获得平均沉积速率,这就是通过 CIC 模式获得平均沉积速率的计算过程。

表 1 C0703 孔 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 ^{137}Cs 比活度及 CRS 年龄
Table 1 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^{137}Cs activity and CRS age of C0703

C0703 样品 编号	平均深度 (cm)	干密度 (g/cm ³)	^{137}Cs 比活度 (Bq/g)	^{137}Cs 误差 ±(Bq/kg)	$^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 比活度 (Bq/kg)	$^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 误差 ±(Bq/kg)	^{226}Ra 比活度 (Bq/kg)	^{226}Ra 误差 ±(Bq/kg)	$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度 (Bq/kg)	$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 误差 ±(Bq/kg)	^{137}Cs 蓄积量 (Bq/cm ²)	$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 蓄积量 (Bq/cm ²)	深度 x 以上的 蓄积量 (Bq/cm ²)	深度 x 以上的 沉积物的沉 积时间(a)	每一层 年份(年)
1	2.5	1.82	0.98	0.27	113.43	8.60	34.66	3.47	78.77	5.97	0.008 9	0.72	0.72	3.21	2004
2	7.5	1.52	0.29	0.16	106.79	6.94	46.88	4.69	59.91	3.90	0.002 2	0.46	1.17	5.43	2001
3	12.5	1.54	0.36	0.16	112.30	6.70	38.55	3.85	73.76	4.40	0.002 8	0.57	1.74	8.43	1998
4	17.5	1.44	0.82	0.22	90.02	5.45	32.40	3.24	57.62	3.49	0.005 9	0.41	2.15	10.81	1996
5	22.5	1.61	2.37	0.52	84.43	4.91	29.85	2.98	54.58	3.17	0.019 0	0.44	2.59	13.54	1993
6	27.5	1.55	1.98	0.56	84.11	7.63	43.97	4.40	40.14	3.64	0.015 3	0.31	2.91	15.63	1991
7	32.5	1.59	1.73	0.57	85.27	6.19	36.24	3.62	49.03	3.56	0.013 8	0.39	3.30	18.45	1988
8	37.5	1.56	2.70	0.60	66.79	5.60	33.99	3.40	32.80	2.75	0.021 0	0.26	3.55	20.45	1986
9	42.5	1.69	5.13	0.79	42.98	5.87	39.18	3.92	3.81	0.52	0.043 4	0.03	3.58	20.71	1986
10	47.5	1.52	10.50	1.18	61.02	4.65	33.97	3.40	27.04	2.06	0.079 8	0.21	3.79	22.42	1984
11	52.5	1.60	8.87	1.02	83.79	5.31	30.70	3.07	53.09	3.36	0.070 9	0.42	4.21	26.28	1981
12	57.5	1.45	5.23	0.83	47.17	5.06	34.06	3.41	13.11	1.41	0.037 9	0.10	4.31	27.21	1980
13	62.5	1.56	5.58	0.88	77.52	6.60	31.92	3.19	45.61	3.88	0.043 6	0.36	4.66	30.95	1976
14	67.5	1.61	3.09	0.64	61.35	4.97	18.92	1.89	42.43	3.44	0.024 9	0.34	5.01	35.01	1972
15	72.5	1.69	0.00	0.00	59.44	4.16	29.75	2.97	29.70	2.08	0	0.25	5.26	38.36	1968
16	77.5	1.77	0.00	0.00	65.64	5.05	34.56	3.46	31.07	2.39	0	0.27	5.53	42.48	1964
17	82.5	1.80	0.00	0.00	61.15	4.53	32.51	3.25	28.64	2.25	0	0.26	5.79	46.89	1960
18	87.5	1.87	0.00	0.00	56.56	7.33	46.22	4.62	10.34	1.34	0	0.10	5.89	48.72	1958
19	92.5	1.91	0.00	0.00	66.22	4.65	37.39	3.74	28.82	2.03	0	0.28	6.16	54.56	1952
20	97.5	2.02	0.00	0.00	48.72	6.90	41.18	4.12	7.53	1.07	0	0.08	6.24	56.39	1950
21	102.5	1.70	0.00	0.00	43.32	5.15	32.89	3.29	10.43	1.24	0	0.09	6.33	58.65	1948
22	107.5	1.92	0.00	0.00	79.16	5.56	37.97	3.80	41.20	2.89	0	0.40	6.72	71.31	1936
23	112.5	1.64	0.00	0.00	54.92	5.54	42.52	4.25	12.40	1.25	0	0.10	6.82	75.57	1931
24	117.5	1.71	0.00	0.00	50.24	6.33	40.12	4.01	10.12	1.28	0	0.09	6.91	79.70	1927
25	122.5	1.76	0.00	0.00	60.76	4.96	39.48	3.95	21.28	1.74	0	0.19	7.10	91.02	1916
26	127.5	1.82	0.00	0.00	74.09	4.33	42.57	4.26	31.52	1.84	0	0.29	7.38	124.49	1882
27	132.5	1.84	0.00	0.00	43.85	5.84	33.33	3.33	10.52	1.40	0	0.10	7.48	155.54	1851
28	137.5	1.80	0.00	0.00	42.35	0.00	35.47	0.00	6.88	0.00	0	0.06	7.54		

注: $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 比活度是指 ^{210}Pb 总比活度。

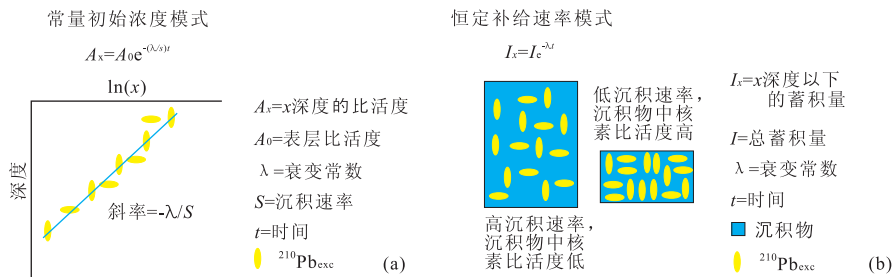


图 2 CIC 模式(a)和 CRS 模式(b)
Fig. 2 CIC model (a) and CRS model (b)

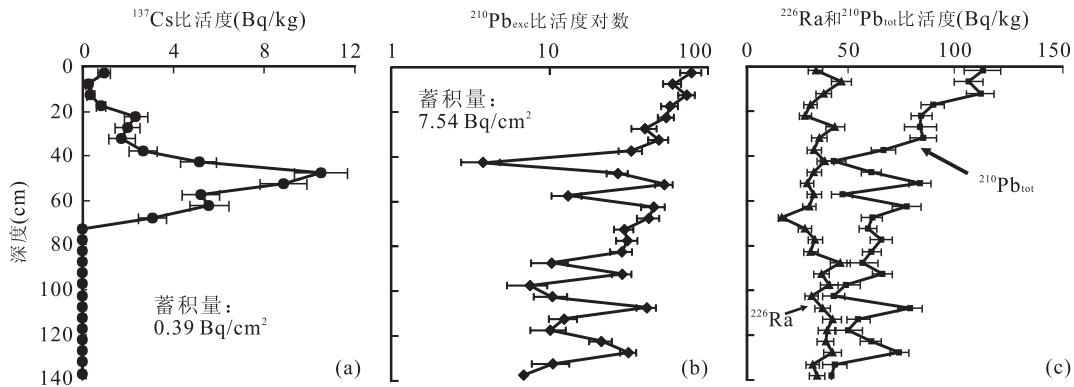


图 3 C0703 孔 ²¹⁰Pb 和 ¹³⁷Cs 比活度—深度剖面
Fig. 3 ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs activity-depth profiles of C0703

a. ¹³⁷Cs 比活度—深度剖面; b. ²¹⁰Pb_{exc} 比活度—深度剖面; c. ²²⁶Ra 和 ²¹⁰Pb_{tot} 比活度—深度剖面

CRS 模式: 恒定补给速率模式, 也称为恒定通量(constant flux, 简称 CF)模式, 应用的前提条件是输入的沉积物中²¹⁰Pb_{exc} 通量(蓄积量)是恒定的, 通过该方法可以直接获得被测样柱每一层的年龄. 通过以下公式计算获得每一层沉积物的年龄(将图 2b 中的公式进行推导后获得):

$$t = -\ln(1 - I_{x1}/I)/\lambda,$$
 (4)

其中, t 为每一层沉积的时间(a), I_{x1} 为 x 深度以上的蓄积量(Bq/cm²), I 为总蓄积量(Bq/cm²), λ 为²¹⁰Pb衰变常数.

每一层的蓄积量可通过以下公式计算获得:

$$I_x = C \times P \times T/1\,000,$$
 (5)

其中, I_x 为 x 层蓄积量(Bq/cm²), C 为 x 层比活度(Bq/kg), P 为 x 层干密度(g/cm³), T 为 x 层厚度(cm).

总蓄积量可以通过以下公式计算获得:

$$I = (I_1 + I_2 + I_3 + \dots).$$
 (6)

本部分提到的公式基本都是最终的计算公式, 即经过推导后可以直接应用的公式. 具体的²¹⁰Pb_{exc} 测年原理和 CRS 和 CIC 模式的计算公式和公式的推导过程可参见万国江(1997)的文章, 该文对这一

方法做了非常详细的介绍.

3 结果

3.1 ²¹⁰Pb_{exc}和¹³⁷Cs 曲线的基本特征

C0703 孔样品¹³⁷Cs 曲线表现为单峰连续, 最大峰位出现在 47.5 cm 处, 最大检测深度为 70.0 cm (图 3a). 该曲线类型在开放潮坪和浅海区非常常见(王福和王宏, 2011). 笔者通过公式(5)和公式(6)计算获得该孔¹³⁷Cs 蓄积量为 0.39 Bq/cm²(表 1).

²¹⁰Pb_{exc} 曲线上部(0~50 cm)呈比较理想的指数衰减趋势, 下部在近等幅摆动中略有衰减(图 3). 笔者通过公式(5)和公式(6)计算获得该孔²¹⁰Pb_{exc} 蓄积量为 7.54 Bq/cm²(表 1).

3.2 CRS 模式计算

笔者首先将表 1 中的密度数据、比活度数据、样品比活度代表的厚度数据(该柱状样按照 5 cm 的厚度进行的连续取样, 因此, 每个样品厚度为 5 cm)带入公式(5), 计算每一层的蓄积量(I_1 、 I_2 、 I_3 、 $\dots$). 然后再将获得的每一层蓄积量数据带入公式(6), 计算 x 层以上的蓄积量 I_{x1} . 总蓄积量 I 就是将所有的层

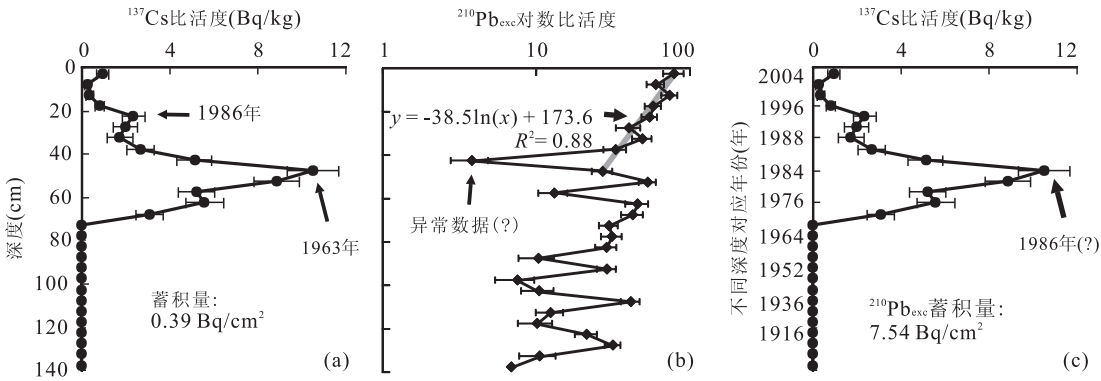


图 4 基于²¹⁰Pb_{exc} CIC 模式和 CRS 模式的¹³⁷Cs 峰值年龄剖面

Fig. 4 Age profiles of ¹³⁷Cs given by ²¹⁰Pb_{exc} CIC model and CRS model

a. ¹³⁷Cs 比活度—深度剖面及根据²¹⁰Pb_{exc} CIC 模式计算的¹³⁷Cs 峰值年龄; b. ²¹⁰Pb_{exc} 对数比活度—深度剖面及²¹⁰Pb_{exc} CIC 模式计算结果; c. ¹³⁷Cs 比活度—年份关系, 据²¹⁰Pb_{exc} CRS 模式计算获得

的蓄积量进行累加获得. 本文采用的²¹⁰Pb_{exc} 蓄积量为 7.54 Bq/cm² (表 1). 在获得 x 层以上的蓄积量 I_{x1} 和总蓄积量 I 之后, 将数据带入公式(4), 计算每一层沉积所需的时间 t , 然后根据取样时间计算每一层的年龄(表 1).

²¹⁰Pb_{exc} 的 CRS 模式计算结果显示, ¹³⁷Cs 曲线最大峰值对应 1986 年前后, 最大检测深度对应 1964 年(图 4c, 表 1)(这一结果是不对的, 本文第 4 部分将对该结果的可靠性进行详细讨论).

3.3 CIC 模式计算

笔者根据 C0703 孔样品²¹⁰Pb_{exc} 的曲线形态, 选择表层 0~50 cm 样品, 去除异常数据干扰后(通常异常数据是指在比活度—深度曲线中, 较邻近深度的比活度数据表现为极端低值或者高值的数据, 在数据处理或者计算时通常先将该类数据去除, 这类数据往往可以记录到“事件沉积”, 因此, 在数据解释时需要给出合理解释), 通过公式(2), 将比活度和深度进行指数拟合后, 计算获得 $E = -38.5$, 带入公式(3)计算, 结果显示, 表层平均沉积速率为 1.2 cm/a (图 4b), 根据此数据反推年龄结果显示, ¹³⁷Cs 最大峰值对应 1963 年, 上部的小峰值对应 1986 年(图 4a).

基于相同的²¹⁰Pb_{exc} 数据, 但是两种计算方法获得的年龄却截然不同, 哪一种计算模式获得的数据更可信? 又是为什么呢?

4 讨论

单从¹³⁷Cs 最大峰值对应的时标来看, CRS 模式和 CIC 模式给出的结果都是可以解释的, 但是这其中必然有一种模式给出的结果是错误的, 而哪一种

模式给出的结果是正确的呢? 下面笔者从 3 个方面来分析哪一种模式获得的结果更可信和导致这一结果的原因.

首先, ¹³⁷Cs 峰要与全球性的¹³⁷Cs 参考曲线进行比对, 特别是与区域性的参考曲线, 比如中国的¹³⁷Cs 参考曲线对比效果最好, 但目前为止在中国尚无相关报道, 因此只能参考全球的或者邻近国家的数据. 这里笔者选择北半球和日本地区监测到的¹³⁷Cs 曲线作为参考(图 5), 通过这些参考曲线可以发现: (1) 1963 年的¹³⁷Cs 峰在全球范围内存在, 而且在我国的一些湖泊地区有过很多的该峰值的报道(Xiang, 1998; 储国强等, 2005), 但在海岸带地区鲜见通过其他方法证明过该峰值的报道; (2) 1986 年由于切尔诺贝利核电站事故造成的峰在局部地区也存在. 该 1986 年的峰值在欧洲的一些地区作为重要“时标”已经有了很多报道(图 5e)(Callaway *et al.*, 1996; Andersen *et al.*, 2011; Teasdale *et al.*, 2011), 但是在欧洲其他很多地方并未检测到该峰值, 这与当时的局地降雨有关(因为¹³⁷Cs 主要是随着降雨沉积在沉积物中). 典型的例子就是在 Plymouth 未检测到该峰值, 但是在 150 km 以外的南英格兰就检测到该峰值了(具体数据引自: <http://www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html>). 在我国仅在东北的部分湖泊地区有过该峰值的报道(Xiang, 1998; 夏威夷和薛滨, 2004). 再看 C0703 孔通过 CRS 模式获得的¹³⁷Cs 比活度—年份曲线, 最大峰值对应 1986 年, 理论上讲得通, 可与 1986 年切尔诺贝利核泄漏事故对应. 但是, 该曲线的¹³⁷Cs 最大检测深度为 1964 年以后, 即 1963 年无¹³⁷Cs 沉积, 这是说不通的. 因此, 通过 CRS 模式计算获得最

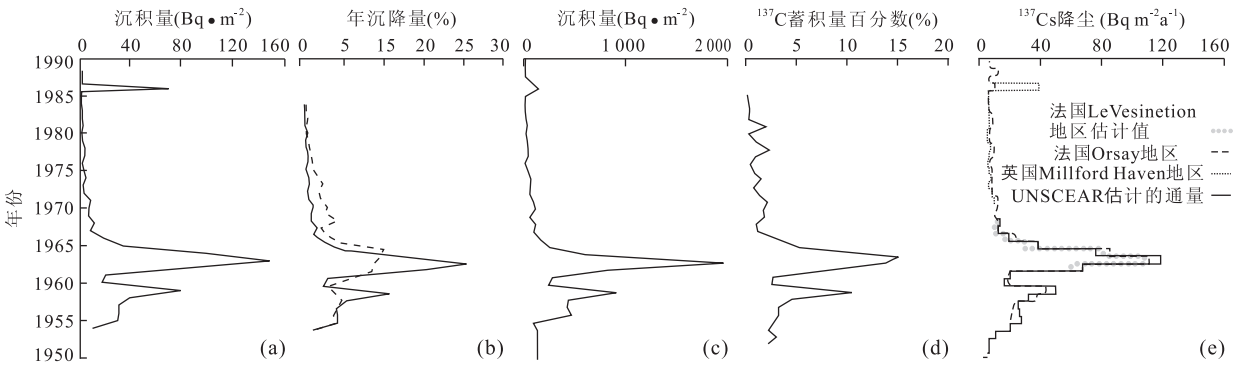


图 5 理想¹³⁷Cs 沉积剖面
Fig. 5 Ideal ¹³⁷Cs activity-depth profile

a. 北半球逐年大气总沉降量变化曲线 (Mcmanus and Duch, 1993); b. ¹³⁷Cs 逐年沉降量变化曲线 (Smith *et al.*, 1997), 实线为北半球、虚线为南半球; c. 为日本东京地区¹³⁷Cs 逐年大气总沉降量变化曲线 (曾理等, 2009); d. 为美国南部¹³⁷Cs 大气沉降量变化曲线 (Milan *et al.*, 1995); e. 为欧洲地区的¹³⁷Cs 降尘 (Roux and Marshall, 2010)

大峰值和最大检测深度对应的年份存在一定问题, 即图 4c 中峰值标注的 1986 年是存在问题的。

其次,²¹⁰Pb_{exc} 还有另一种模式 (CIC 模式) 用于计算平均沉积速率, 然后反推年龄。C0703 样品的²¹⁰Pb_{exc} 曲线表层 (0~50 cm) 表现为指数衰减趋势, 笔者将表层 0~50 cm 通过 CIC 模式进行计算, 获得该层的平均沉积速率为 1.2 cm/a (图 4b)。通过该速率反推¹³⁷Cs 最大峰值对应的年龄结果显示, 该峰值对应 1963 年的全球性峰。¹³⁷Cs 曲线上部较小的峰值对应 1986 年。这一结果与全球性的¹³⁷Cs 参考曲线吻合较好。在不考虑区域沉积影响的情况下可信度相对更高。

再次, 从区域沉积过程来看, 海岸带开放潮坪地区的沉积主要受控于潮流和沉积物供给的变化。特定区域潮流作用短期内基本稳定, 那么沉积物供给的变化会直接影响到沉积记录。该区自 20 世纪 50 年代末海河和独流减河建闸以来, 沉积物供给较建闸前明显降低, 除 1963 年发生特大洪水造成记录到的入海径流量较高之外, 沉积物供给一直在较低水平波动, 并未发生明显的变化 (图 6)。因此, 20 世纪 50 年代以来, 该区属于沉积环境相对较稳定的区域, 理论上可以记录到¹³⁷Cs 的 1963 年的全球性峰。而且, 1963 年 8 月上旬, 在华北地区发生了一场持续时间较长的特大暴雨, 造成海河流域发生特大洪水 (刘宗耀, 1993)。大气中的¹³⁷Cs 主要是随着降水沉积在沉积物中, 监测显示 1963 年大气中的¹³⁷Cs 浓度达到最大, 华北地区此时发生强降雨, 为¹³⁷Cs 沉积提供了良好的条件。因此, 在华北地区的地层中是具备记录到 1963 年的¹³⁷Cs 峰值的条件的。综合分析表明, 该峰值所在层位理应对应 1963 年。那么,

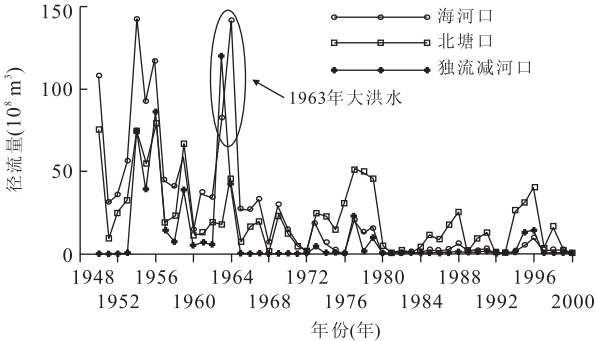


图 6 海河口、北塘口以及独流减河口 1950—2000 年入海径流量

Fig. 6 Water discharges at the Haihe River estuary, Beitang estuary and Duliujianhe estuary between 1950 and 2000

据雷坤等 (2007)

CRS 模式给出的最大峰值对应 1986 年, 从区域沉积的角度也是说不通的。因此, CIC 模式给出的峰值对应 1963 年是更可信的。

那么, 是什么原因造成的²¹⁰Pb_{exc} 的两种模式给出的结果如此不同, 而 CIC 模式给出的结果又更可信呢?

这需要从这两种模式的假设条件开始追溯, 首先 CRS 模式假设条件为恒定补给速率, 即不论沉积速率如何变化,²¹⁰Pb_{exc} 的输入通量 (蓄积量) 保持不变, 即当沉积物供给多时, 沉积物中²¹⁰Pb_{exc} 的比活度就低, 反之则高 (图 2b)。而海岸带开放潮坪地区的沉积物都是经过潮流搬运、混合后的沉积物, 其²¹⁰Pb_{exc} 的比活度基本是恒定的。当沉积物供给多时, 沉积物中²¹⁰Pb_{exc} 的蓄积量必然高, 因此, CRS 模式的假设条件在开放潮坪地区很难满足, 进而造成通

过该模式获得的结果不可信. 而 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 的比活度恒定正好满足了 CIC 模式的假设条件, 即沉积物中的初始比活度恒定. 但是如果沉积速率因为沉积物供给或者水动力发生变化而频繁发生变化, 那么该模式也无法获得较好的结果. 而 C0703 所在的区域, 除了 20 世纪 50 年代河流建闸造成沉积物供给明显减少之外, 并未发生其他的重大事件. 因此, 建闸后的这段时间应该属于沉积环境相对比较稳定的时期, 满足 CIC 模式应用的前提条件, 所以 CIC 模式获得结果更可信. 这也说明了, 在开放潮坪或浅海区通过 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 进行现代沉积测年时, 分段开展的 CIC 模式计算较 CRS 模式获得的结果更为可信.

通过以上的分析, 笔者发现开放潮坪地区 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 计年的模式选择对于数据的结果会产生很大影响. 如果选择了不恰当的计年模式, 必然会导致错误的结果. 一般情况下, 开放潮坪地区通过分段开展 CIC 模式计算获得的结果较 CRS 模式获得的更可靠, 这是由该区的特殊沉积环境造成的. 而当开放潮坪地区存在侵蚀和混合作用时, 那么就需要有另一种或多种独立的测年方法来验证或者辅助 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 计年法. 目前最常用的就是 ^{137}Cs 时标法, 其 1963 年时标和 1986 年时标是目前应用最广的时标. 该方法基于全球性和区域性的 ^{137}Cs 大气沉降监测数据, 在欧洲、美国及日本都有关于 ^{137}Cs 大气沉降较详细的报道. 然而, 在我国, 尤其是海岸带地区基本没有相关报道, 通常的报道多是参考其他地区已建立的 ^{137}Cs 剖面进行时标定年的. 而海岸带地区的沉积受到区域性沉积物供给的影响又很大, 因此, 建立区域性的 ^{137}Cs 参考剖面非常必要. 以 ^{137}Cs 剖面 1963 年最大峰值为例, 需要在区域内对其进行验证. 本文取自歧口钻孔记录的 ^{137}Cs 最大峰值对应 1963 年, 可以作为区域性的参考剖面. 这只是初步结果, 建议在不同的海岸带地区开展更多的 ^{137}Cs 区域性参考剖面研究, 建立中国海岸带地区的 ^{137}Cs 参考剖面.

4 结论

相同的 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 数据, 但是两种常用的计算模式给出了截然不同的结果, 说明在数据处理方面需要谨慎, 要选合适的数据处理模式. 在海岸带地区对 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 数据分段采用 CIC 模式获取的结果较 CRS 模式计算获得的结果更可靠. 而作为一般数据使用者来说, 大家更倾向于应用能够获得每一层年龄的 CRS 模式; 但在一些特殊区域该模式的使用需要更

加慎重, 尤其是海岸带地区. 对于 ^{137}Cs 数据而言, 如果能够建立区域性的参考剖面, 可以帮助人们更好的解释数据. 笔者在渤海湾开放潮坪地区获得的 C0703 孔中 ^{137}Cs 最大峰值对应 1963 年, 可以初步作为区域性 ^{137}Cs 定年参考.

致谢: 匿名审稿人对本文给予了肯定并提出了宝贵的建议, 本刊编辑也给予了具体的修改意见, 在此一并表示感谢!

References

- Andersen, T. J., Mikkelsen, O. A., Moller, A. L., et al., 2000. Deposition and Mixing Depths on Some European Intertidal Mudflats Based on ^{210}Pb and ^{137}Cs Activities. *Continental Shelf Research*, 20(12–13): 1569–1591. doi: 10.1016/S0278-4343(00)00038-8
- Andersen, T. J., Svinth, S., Pejrup, M., 2011. Temporal Variation of Accumulation Rates on a Natural Salt Marsh in the 20th Century—The Impact of Sea Level Rise and Increased Inundation Frequency. *Marine Geology*, 279(1–4): 178–187. doi: 10.1016/j.margeo.2010.10.025
- Appleby, P. G., Oldfield, F., 1978. The Calculation of ^{210}Pb Dates Assuming a Constant Rate of Supply of Unsupported ^{210}Pb to the Sediment. *Catena*, 5(1): 1–8. doi: 10.1016/S0341-8162(78)80002-2
- Callaway, J. C., DeLaune, R. D., Patrick, W. H., 1996. Chernobyl ^{137}Cs Used to Determine Sediment Accretion Rates at Selected North European Coastal Wetlands. *Limnology and Oceanography*, 41(3): 444–450. doi: 10.4319/lo.1996.41.3.0444
- Chu, G. Q., Gu, Z. Y., Xu, B., et al., 2005. Varvechronology and Radiometric Dating (^{137}Cs , ^{210}Pb) from the Sihailongwan Maar, Northern China. *Quaternary Sciences*, 25(2): 202–207 (in Chinese with English abstract).
- DeLaune, R. D., Patrick, Jr. W. H., Buresh, R. J., 1978. Sedimentation Rates Determined by ^{137}Cs Dating in a Rapidly Accreting Salt Marsh. *Nature*, 275: 532–533. doi: 10.1038/275532a0
- Du, R. Z., Liu, G. X., Yang, S. L., et al., 1990. Modern Sedimentation Rate and Sedimentation Process in Bohai Bay. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 10(3): 15–22 (in Chinese with English abstract).
- Fan, D. J., Yang, Z. S., Guo, Z. G., 2000. Review of ^{210}Pb Dating in the Continental Shelf of China. *Advance in Earth Sciences*, 15(3): 297–302 (in Chinese with English abstract).

- Gehrels, W. R., Callard, S. L., Moss, P. T., et al., 2012. Nineteenth and Twentieth Century Sea-Level Changes in Tasmania and New Zealand. *Earth and Planetary Science Letters*, 315—316; 94—102. doi: 10. 1016/j. epsl. 2011. 08. 046
- He, J. S., Liang, X., Li, J., et al., 2015. Environmentally Sensitive Grain-Size Extraction of Deep Hole Sediment from Tianjin Coastal Plain and Its Significance. *Earth Science*, 40(7): 1215—1225 (in Chinese with English abstract).
- Hu, S. X., Qi, J., 2000. Shrink of Estuaries in Haihe Basin and Its Effects on the Flood Disaster. *Haihe Water Resources*, (1): 11—13 (in Chinese).
- Kang, X. L., 1986. On the Data Treatment of ^{210}Pb Dating Method. *Marine Sciences*, 10(6): 13—17 (in Chinese with English abstract).
- Koide, M., Bruland, K. W., Goldberg, E. D., 1973. ^{228}Th / ^{232}Th and ^{210}Pb Geochronologies in Marine and Lake Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(5): 1171—1187. doi: 10. 1016/0016—7037(73)90054—9
- Krishnaswamy, S., Lal, D., Marin, J. M., et al., 1971. Geochronology of Lake Sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 11(1—5): 407—414. doi: 10. 1016/0012—821X(71)90202—0
- Lei, K., Meng, W., Zheng, B. H., et al., 2007. Variations of Water and Sediment Discharges to the Western Coast of Bohai Bay and the Environmental Impacts. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 27(12): 2052—2059 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. F., Kang, H., Wang, H., et al., 2007. Modern Geological Action and Discussion of Influence Factors on the West Coast of Bohai Bay, China. *Geological Survey and Research*, 30(4): 295—301 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. F., Wang, H., Xia, W. L., et al., 2003. $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ and ^{137}Cs Dating and Modern Sedimentation Rate on the Western Coast of Bohai Bay. *Geological Survey and Research*, 26(2): 114—128 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. G., Wang, F., Pei, Y. D., et al., 2007. ^{137}Cs and ^{210}Pb Distribution and Modern Sedimentation in the North and South Intertidal Zones of Sanhe Island, Tianjin, China. *Geological Bulletin of China*, 26(7): 864—868 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. Y., 1993. Review of Haihe 1963 Flood. *Haihe Water Resources*, (5): 9—12 (in Chinese).
- Lü, X. J., Zhai, Q. X., 1987. The Evolution of the West Coast of Bohai Bay during Historical Period. In: Tianjin Geography Name Committee, ed., Tianjin Names Series; Tianjin Knowledge of History and Geography (1), Jinghai Daqiuzhuang Printing, Tianjin (in Chinese).
- Mcmanus, J., Duch, R. W., 1993. Geomorphology and Sedimentology of Lakes and Reservoirs. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 55—71.
- Meng, W., Lei, K., Zheng, B., et al., 2005. Modern Sedimentation Rates in the Intertidal Zone on the West Coast of the Bohai Gulf. *Acta Oceanologica Sinica*, 24(3): 46—53.
- Milan, C. S., Swenson, E. M., Turner, R. E., et al., 1995. Assessment of the ^{137}Cs Method for Estimating Sediment Accumulation Rates; Louisiana Salt Marshes. *Journal of Coastal Research*, 11(2): 296—307.
- Patrick, W. H., DeLaune, R. D., 1990. Subsidence, Accretion, and Sea Level Rise in South San Francisco Bay Marshes. *Limnology and Oceanography*, 35(6): 1389—1395. doi: 10. 4319/lo. 1990. 35. 6. 1389
- Pei, Y. D., Wang, Y. S., Fan, C. F., et al., 2009. The Surface Sediment Types and Distribution of Tianjin Intertidal Zone, China. *Geological Bulletin of China*, 28(7): 915—922 (in Chinese with English abstract).
- Plater, A. J., Appleby, P. G., 2004. Tidal Sedimentation in the Tees Estuary during the 20th Century; Radionuclide and Magnetic Evidence of Pollution and Sedimentary Response. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60: 179—192. doi: 10. 1016/j. ecss. 2003. 12. 006
- Robbins, J. A., 1978. Geochemical and Geophysical Applications of Radioactivity Lead. In: Nriagu, J. D., ed., The Biogeochemistry of Lead in the Environment. Elsevier/North Holland Biomedical Press, Amsterdam, 285—383. doi: 10. 1007/978—3—642—84077—7_11
- Roux, G. L., Marshall, W. A., 2010. Constructing Recent Peat Accumulation Chronologies Using Atmospheric Fall-Out Radionuclides. *Mires and Peat*, 7(8): 1—14.
- Smith, J. T., Appleby, P. G., Hilton, J., et al., 1997. Inventories and Fluxes of ^{210}Pb , ^{137}Cs and ^{241}Am Determined from the Soils of Three Small Catchments in Cumbria, UK. *Journal of Environmental Radioactivity*, 37(2): 127—142. doi: 10. 1016/S0265—931X(97)00003—9
- Su, C. C., Hu, C., 2002. ^{210}Pb , ^{137}Cs and ^{239}Pu , ^{240}Pu in East China Sea Sediments; Sources, Pathways and Budgets of Sediments and Radionuclides. *Marine Geology*, 183: 163—178. doi: 10. 1016/S0025—3227(02)00165—2
- Su, X. Z., Ma, W. T., Xu, S. L., et al., 1984. The Method of Lead-210 Geochronology for Marine Sediments. *Taiwan Strait*, 3(1): 50—58 (in Chinese with English abstract).

- Sun, L., Jie, D. M., Pu, L. J., 2007. An Overview on the Application of ^{210}Pb and ^{137}Cs Dating in the Research of Recent Sediment Accumulation Rate of Coastal Zone. *Progress in Geography*, 26 (2): 67—76 (in Chinese with English abstract).
- Teasdale, P. A., Collins, P. E. F., Firth, C. R., et al., 2011. Recent Estuarine Sedimentation Rates from Shallow Intra-Tidal Environments in Western Scotland: Implications for Future Sea-Level Trends and Coastal Wetland Development. *Quaternary Science Reviews*, 30: 109—129. doi:10.1016/j.quascirev.2010.08.002
- Wan, G. J., 1997. ^{210}Pb Dating for Recent Sedimentation. *Quaternary Sciences*, (3): 230—239 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., 2009. ^{210}Pb , ^{137}Cs Tracing and Dating on Bohai Bay Coast: Modern Sedimentation and Implication (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Pei, Y. D., Li, J. F., et al., 2010. Current Elevation of Tianjin Tidal Zone and the Urban Safety of Bohai New Area, China. *Geological Bulletin of China*, 29 (5): 682—687 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Pei, Y. D., Liu, Z. G., et al., 2008. Sedimentary Characteristics of the Sea Area on the Both Sides of the Huanghua Harbor Traced by ^{137}Cs . *Geological Bulletin of China*, 27(7): 1054—1059 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Wang, H., 2011. The Division of ^{137}Cs Vertical Profile Types on Coastal Area and Its Implication. *Geological Bulletin of China*, 30(7): 1099—1110 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Wang, H., Zong, Y., et al., 2014. Sedimentary Dynamics along the West Coast of Bohai Bay, China, during the 20th Century. *Journal of Coastal Research*, 30 (2): 379—388. doi: 10.2112/JCOASTRES-D-13-00073.1
- Wang, F., Zong, Y., Li, J., et al., 2016. Recent Sedimentation Dynamics Indicated by $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ and ^{137}Cs Records from the Subtidal Area of Bohai Bay, China. *Journal of Coastal Research*, 32 (2): 416—423. doi: 10.2112/JC-DASTRES-D-15-0074.1
- Wang, H., 2003. Geo-Environmental Changes on the Bohai Bay Muddy Coast (II): Results and Discussions. *Quaternary Sciences*, 23 (4): 393—403 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Shi, X. F., Wang, G. Q., et al., 2013. Sedimentation Rates and Its Indication to Distribution of Yangtze Sediment Supply around the Yangtze (Changjiang) River Estuary and Its Adjacent Area, China. *Earth Science*, 38(4): 763—775 (in Chinese with English abstract).
- Xia, W. L., Xue, B., 2004. The ^{210}Pb and ^{137}Cs Chronological Measurement on Sedimentation Rate of Xiaolongwan, Jilin. *Quaternary Sciences*, 24 (1): 124—125 (in Chinese).
- Xiang, L., 1998. Dating Sediments on Several Lakes Inferred from Radionuclide Profiles. *Journal of Environmental Sciences*, 10(1): 56—63.
- Ye, Y. G., He, J., Diao, S. B., et al., 1992. Standardization of ^{210}Pb Profile in the Modern Huanghe River Delta-The Correlation Method of Grain Size. *Scientia Geographica Sinica*, 12(4): 379—386 (in Chinese with English abstract).
- Zaborska, A., Carroll, J., Papucci, C., et al., 2008. Recent Sediment Accumulation Rates for the Western Margin of the Barents Sea. *Deep-Sea Research II*, 55: 2352—2360. doi:10.1016/j.dsr2.2008.05.026
- Zeng, L., Wu, F. C., Wan, G. J., et al., 2009. The Distribution Characteristic and Environmental Significance of Cesium-137 Deposit Profile in Chinese Lacustrine Sediment. *Journal of Lake Sciences*, 21(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. X., Pan, G. T., He, W. H., et al., 2015. New Division of Tectonic-Strata Superregion in China. *Earth Science*, 40(2): 206—233 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, B. R., Zhuang, G. W., Cao, D. M., et al., 1995. Circulation, Tidal Residual Currents and Their Effects on the Sedimentations in the Bohai Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 26(5): 466—473 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, X. B., Kang, H., 2002. Recent Geo-Environmental Changes in the Bohai Bay Coast. *Quaternary Sciences*, 22(2): 131—135 (in Chinese with English abstract).
- Zou, H. Y., Yu, X. G., 1984. The ^{210}Pb Measurement of Marine Sediments and Its Application in Geochronology. *Acta Oceanologica Sinica*, 6 (6): 793—802 (in Chinese).

附中文参考文献

- 储国强, 顾兆炎, 许冰, 等, 2005. 东北四海龙湾玛珥湖沉积物纹层计年与 $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}$ 测年. 第四纪研究, 25 (2): 202—207.
- 杜瑞芝, 刘国贤, 杨松龄, 等, 1990. 渤海湾现代沉积速率和沉积过程. 海洋地质与第四纪地质, 10(3): 15—22.
- 范德江, 杨作升, 郭志刚, 2000. 中国陆架 ^{210}Pb 测年应用现状与思考. 地球科学进展, 15(3): 297—302.

- 何继山,梁杏,李静,等,2015. 天津滨海平原区深孔沉积物环境敏感粒度提取及其意义. 地球科学, 40(7): 1215—1225.
- 胡世雄,齐晶,2000. 海河流域入海河口萎缩及其对洪灾的影响. 海河水利, (1): 11—13.
- 康兴伦,1986. ^{210}Pb 测年法的数据处理问题. 海洋科学, 10(6): 13—17.
- 雷坤,孟伟,郑炳辉,等,2007. 渤海湾西岸入海径流量和输沙量的变化及其环境效应. 环境科学学报, 27(12): 2052—2059.
- 李建芬,康慧,王宏,等,2007. 渤海湾西岸海岸现代地质作用及影响因素分析. 地质调查与研究, 30(4): 295—301.
- 李建芬,王宏,夏威夷,等,2003. 渤海湾西岸 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 和 ^{137}Cs 测年与现代沉积速率. 地质调查与研究, 26(2): 114—128.
- 刘志广,王福,裴艳东,等,2007. 天津三河岛潮间带 ^{137}Cs 与 ^{210}Pb 的分布及现代沉积过程. 地质通报, 27(7): 864—868.
- 刘宗耀,1993. 回顾 1963 年洪水. 海河水利, (5): 9—12.
- 吕先进,翟乾祥,1987. 历史时期渤海西岸的演化. 见:天津市地名委员会办公室主编,天津地名丛刊:天津史地知识(一),天津:静海县大邱庄印刷厂.
- 裴艳东,王云生,范昌福,等,2009. 天津潮间带表层沉积物的类型及其分布. 地质通报, 28(7): 915—922.
- 苏贤泽,马文通,徐胜利,等,1984. 海洋沉积物的铅-210 地质年代学方法. 台湾海峡, 3(1): 50—58.
- 孙丽,介冬梅,濮励杰,2007. ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 计年法在现代海岸带沉积速率研究中的应用评述. 地理科学进展, 26(2): 67—76.
- 万国江,1997. 现代沉积的 ^{210}Pb 计年. 第四纪研究, (3): 230—239.
- 王福,2009. 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(博士学位论文). 北京:中国地质科学院.
- 王福,裴艳东,李建芬,等,2010. 天津潮间带高程现状与滨海新区城市安全. 地质通报, 29(5): 682—687.
- 王福,裴艳东,刘志广,等,2008. ^{137}Cs 示踪的黄骅港两侧海区的沉积特征. 地质通报, 27(7): 1054—1059.
- 王福,王 宏,2011. 海岸带地区 ^{137}Cs 沉积剖面类型划分及其意义. 地质通报, 30(7): 1009—1110.
- 王宏,2003. 渤海湾泥质海岸带近现代地质环境变化研究(Ⅱ):成果与讨论. 第四纪研究, 23(4): 393—403.
- 王昕,石学法,王国庆,等,2013. 长江口及邻近海域现代沉积速率及其对长江入海泥沙去向的指示意义. 地球科学, 38(4): 763—775.
- 夏威夷,薛滨,2004. 吉林小龙湾沉积速率的 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 年代学方法测定. 第四纪研究, 24(1): 124—125.
- 业渝光,和杰,刁少波,等,1992. 现代黄河三角洲 ^{210}Pb 剖面的标准化方法——粒度相关法. 地理科学, 12(4): 379—386.
- 曾理,吴丰昌,万国江,等,2009. 中国地区湖泊沉积物中 ^{137}Cs 分布特征和环境意义. 湖泊科学, 21(1): 1—9.
- 张克信,潘桂棠,何卫红,等,2015. 中国构造—地层大区划分新方案. 地球科学, 40(2): 206—233.
- 赵保仁,庄国文,曹德明,等,1995. 渤海的环流、潮余流及其对沉积物分布的影响. 海洋与湖沼, 26(5): 466—473.
- 钟新宝,康慧,2002. 渤海湾海岸带近现代地质环境变化. 第四纪研究, 22(2): 131—135.
- 邹汉阳,余兴光,1984. 海洋沉积物中 ^{210}Pb 的测定及其在地质年代学中的应用. 海洋学报, 6(6): 793—802.