

盛黎,周斌,孙明华,等. 2013. 日本福岛核事故对我国辐射环境影响的监测与分析. 气象, 39(11):1490-1499.

# 日本福岛核事故对我国辐射环境影响 的监测与分析<sup>\*</sup>

盛黎 周斌 孙明华 吕恺 佟华 胡江凯

国家气象中心,北京 100081

**提 要:** 2011 年 3 月 11 日,日本东北海域发生 9.0 级地震并引发海啸,受此影响日本福岛第一核电站发生核泄漏事故。3 月 26 日,我国黑龙江监测站首次在空气样品中监测到来自日本福岛的放射性元素 I-131,监测持续近一个月。基于我国 31 个省(区、市)的大气放射性浓度监测记录,综合利用 Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model(HYSPLIT)模式的扩散轨迹模拟技术和大气环流形势,分析讨论了日本福岛核事故泄漏期间我国大气放射性环境水平。整个监测期间,我国 I-131 的浓度最大值位于吉林省  $8.01 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$ ,发生在 4 月 7 日左右,与在此期间我国东部地区的持续东风紧密相关;此外,华北、东北和西北的整体 I-131 相对浓度较高。Cs-137 和 Cs-134 的最大值均发生在新疆地区,浓度分别为  $1.55$  和  $1.42 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$ ;与此同时,其全国平均浓度呈双峰型变化,峰值分别发生在 4 月 4 日和 9 日左右,其结果反映了大气环流和排放速率变化的综合影响。我国西北和华北的监测浓度值较高。此外,还就 Cs-137/I-131 和 Cs-134/Cs-137 的比值与其他国家的监测结果进行了对比分析,结果表明,我国监测到的 Cs-137/I-131 比值在  $0.04 \sim 0.9$  之间,其值变化范围较大,且整体呈上升趋势,与此同时,整个监测期间 Cs-134/Cs-137 比值在 1 附近摆动。

**关键词:** 日本福岛核事故,放射性物质监测, I-131 监测浓度, Cs-137 监测浓度, Cs-134 监测浓度

**中图分类号:** P422, X837

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.11.013

## Atmospheric Radioactive Fallout in China due to the Fukushima Nuclear Plant Accident

SHENG Li ZHOU Bin SUN Minghua LÜ Kai TONG Hua HU Jiangkai

National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** On March 11, 2011, the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant was severely damaged by the massive 9.0 earthquakes and tsunami that struck off the northeast coast of the Island of Honshu. The damage to the nuclear facility has resulted in substantial environmental releases of radioactive materials into atmosphere. As a consequence, on March 26, the radioactive material I-131 from Fukushima Daiichi nuclear accident (FDNA) was monitored in China's Heilongjiang air sampling for the first time. The monitoring of FDNA in China lasted for nearly a month, till April 22, the radioactive substances monitored in China mainland, which are I-131, Cs-137 and Cs-134, were close to basic values. Based on these monitoring data and HYSPLIT's forward and backward trajectory modeling, this paper estimates the impacts of Fukushima Daiichi accident on China's radioactivity levels. During the monitoring period, the maximum concentration of I-131 which is located in Jilin Province, is  $8.01 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$  and occurs in April 7. This value is closely related to the prevailing eastern winds during this period. Meanwhile, relatively high I-131 concentration is monitored in North China, the Northeast and Northwest of China. For Cs-137 and Cs-

\* 国家自然科学基金项目(41305104)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306061、GYHY201006017 和 GYHY201106033)共同资助  
2012 年 12 月 16 日收稿; 2013 年 7 月 15 日收修定稿

第一作者:盛黎,核及危险化学品泄漏应急响应和陆面过程. Email:shengli@cma.gov.cn

通信作者:周斌,核及危险化学品泄漏应急响应. Email:zhoubin@cma.gov.cn

134, the maximum values both are found in the Xinjiang Region, being  $1.55$  and  $1.42 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$ , respectively around April 4 and 9. At the same time, the trend of national averaged concentration shows two peaks around. Northwest and North China are found to have higher concentration of Cs-137 and Cs-134. Additionally, the ratios of Cs-137/I-131 and Cs-134/Cs-137 are analyzed and compared with the measurement results by other countries. The Cs-137/I-131 activity ratios ( $0.04-0.9$ ) are observed to increase with time as expected from radioactive decay, and Cs-134/Cs-137 activity ratio is measured near the line 1.0.

**Key words:** Fukushima nuclear plant accident, measurement of radionuclides, I-131 monitoring concentration, Cs-137 monitoring concentration, Cs-134 monitoring concentration

## 引 言

2011年3月11日5时46分(世界时),日本东北部海域发生里氏9.0级大地震,并引发强烈海啸;且海啸在1h后袭击日本东京电力公司(Tokyo Electric Power Company, TEPCO)福岛第一和第二核电站,14m的海啸大大超出了电站5.7m防洪设计标准,导致福岛第一核电站发生大规模核放射物质泄漏,并释放至大气和海洋。其中,主要释放的放射性核素是碘(I)和铯(Cs),这些核素主要通过气溶胶向大气释放,其中I-131的半衰期为8d,Cs-134约为2a,而Cs-137则长达30a。

日本福岛事故发生以来日本原子能安全委员会(Nuclear Safety Commission of Japan, NSC; NSC, 2011)、日本原子能保安院(Nuclear and Industrial

Safety Agency, NISA; NISA, 2011a; 2011b)、东京电力公司(TEPCO, 2011)和Stohl等(2011)分别评估了其向大气释放的放射性物质总量,其结果如表1所示。各研究机构的评估结果表明,日本福岛核事故向大气排放的核放射物总量在 $3.7 \times 10^{17} \sim 9.0 \times 10^{17} \text{ Bq}$ (I-131当量)之间,其量级比切尔诺贝利核电站排放总量约小一个量级(NEA, 2002)。有关放射性物质排放更进一步的信息如排放速率、排放高度等, Katata等(2012a; 2012b)、Chino等(2011)和Terada等(2012)分别就核事故的不同阶段进行了评估,日本福岛核事故的排放始于日本时间(JST)的3月12日05时,评估结果显示I-131和Cs-137的排放速率最大值分别为 $4.0 \times 10^{15} \text{ Bq} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $4.0 \times 10^{14} \text{ Bq} \cdot \text{h}^{-1}$ 排放集中在3月12日至4月4日之间,之后反应堆基本稳定,I-131和Cs-137排放速率下降至 $10^{12} \text{ Bq} \cdot \text{h}^{-1}$ 量级以下(见图1)。

表 1 日本福岛核事故和切尔诺贝利核事故放射性物质排放评估表

Table 1 Estimation of total released amount from Fukushima and Chernobyl Nuclear Plant Accident

	福岛第一核电站				TEPCO(2012) 2012-5-24	切尔诺贝利 核事故 (NEA, 2002)
	NSC(2011) 2011-4-12	NISA(2011b) 2011-4-12	NISA(2011b) 2011-5-16	Stohl et al, (2011)		
I-131(8 d)	$1.5 \times 10^{17} \text{ Bq}$	$1.3 \times 10^{17} \text{ Bq}$	$1.6 \times 10^{17} \text{ Bq}$		$5.0 \times 10^{17} \text{ Bq}$	$1.76 \times 10^{18} \text{ Bq}$
Cs-137(30.17 a)	$1.2 \times 10^{16} \text{ Bq}$	$6.1 \times 10^{15} \text{ Bq}$	$1.5 \times 10^{16} \text{ Bq}$	$3.58 \times 10^{16} \text{ Bq}$	$1.0 \times 10^{16} \text{ Bq}$	$8.5 \times 10^{16} \text{ Bq}$
Cs-134(2.06 a)			$1.8 \times 10^{16} \text{ Bq}$		$1.0 \times 10^{16} \text{ Bq}$	
Xe-133(5.2 d)			$1.1 \times 10^{19} \text{ Bq}$	$1.67 \times 10^{19} \text{ Bq}$		
其他			$0.1 \times 10^{17} \text{ Bq}$			
I-131 相当总量	$6.3 \times 10^{17} \text{ Bq}$	$3.7 \times 10^{17} \text{ Bq}$	$7.7 \times 10^{17} \text{ Bq}$		$9.0 \times 10^{17} \text{ Bq}$	$5.2 \times 10^{18} \text{ Bq}$

日本福岛核事故发生后,2011年3月15日日本茨城县最先在空气中检测到来自福岛核事故的放射性物质,随后福岛以南的东京都和其他县区均相继检测辐射峰值为正常时期的10~100倍;3月15日下午16时,东京市检测到的辐射量超出正常标准,高峰值为正常标准的23倍。3月17日,核事故辐射烟云抵达美国本土,20日抵达冰岛,22日左右

欧洲各国均相继有检测到。

作为日本最大的邻国——中国,3月26日我国黑龙江省的抚远、饶河、虎林和东宁四县最先检测出极微量的人工放射性核素I-131;随后,我国东部沿海各省市均检测到极微量的I-131;至4月3日,我国31个省(市、区)全部监测到来自日本福岛核事故的放射性元素I-131,监测时间持续20多天,至4月

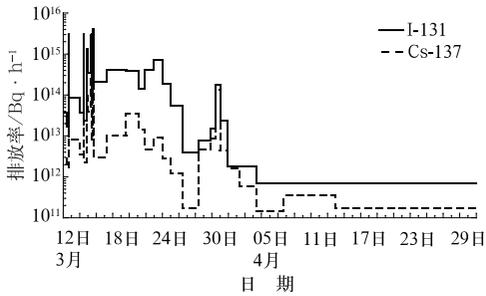


图 1 2011 年 3 月 12 日至 5 月 1 日日本福岛核事故放射性物排放率评估结果时间变化图

[评估结果来自 Chino 等(2011)、Katata 等(2012a;2012b)和 Terada 等(2012)]

Fig. 1 Temporal changes of estimated released rates of I131 and Cs137 from March 12 to May 1, 2011

[The estimated results are from Chino et al (2011), Katata et al (2012a; 2012b), and Terada et al (2012)]

22 日我国大陆地区仍在吉林等地的 13 个省(市)部分地区检测到来自日本核事故释放出的极微量人工放射性核素。

针对此次日本福岛核事故,国际禁止核试验公约组织(Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, CTBTO)和各国均开展了广泛的监测研究。到目前为止,有关此次事故的大量监测资料,一些数据整理和分析工作已陆续展开。除日本以外,俄罗斯(Bikit et al, 2012; Bolsunovsky et al, 2011; Melgunov et al, 2012)、韩国(Kim et al, 2011)、越南(Long et al, 2012)、希腊(Potiriadis et al, 2012; Manolopoulou et al, 2012)、意大利(Lozano et al, 2011)、德国(Pittauerova et al, 2011)、西班牙(Baeza et al, 2012)、美国(Leon et al, 2012; Thakur et al, 2012; Biegalske et al, 2012)、加拿大(Cleveland et al, 2012; Sinclair et al, 2012)等国已初步完成了对此次核事故的监测资料的分析 and 整理,并已得到一些初步结论。

国内方面,乔方利等(2011)利用气候和海洋环流模式大致评估了放射性物质在全球扩散所需要的时间,从气候模式的角度得出了放射性物质在全球的扩散时间以及状态。台湾 Hsu 等(2012)基于台湾的监测资料,对结果进行了整理和分析;同时还利用大气扩散模式,模拟了日本福岛核事故在北半球的扩散。与此同时,我国环保部门也针对此次核事故的放射性物质进行了大量的监测和分析工作,陈

晓秋等(2012)在北京监测资料的基础上对福岛核事故泄露总量进行了评估,认为其泄露总量约为  $8.5 \times 10^{17}$  Bq。娄云等(2012)和石二为等(2012)分别就我国北京、辽宁和西北地区的辐射监测数据进行了分析和整理,均认为我国虽检测到了极微量的人工放射性污染,但其剂量极微小,不会对公众健康产生影响,此外,聂新旺等(2012)应用 Models-3/CMAQ 模式对福岛核事故泄露从定性的角度进行了相关的数值模拟工作。

本文在环保部门监测数据的基础之上,利用天气环流形势和 HYSPLIT 的轨迹扩散和反模拟技术,对日本福岛核事故期间我国大气放射性监测数据进行了分析。

## 1 资料与方法

本文中所用到的大气放射性浓度监测数据来自于中华人民共和国环境保护部(国家核安全局)在日本福岛核事故期间公布的我国主要城市环境辐射水平监测数据。该数据是由我国环保部的全国辐射环境监测网<sup>①</sup>在日本福岛核事故期间采集监测到的。我国辐射环境监测网络由 36 个辐射环境自动监测站,328 个陆地辐射监测点组成,该网覆盖了全国近 30 个省会城市和青岛、大连、丹东、威海等重点城市。此外,还利用 CTBTO 在全球 38 个放射性物质监测站点,得到的一些放射性物质抵达时间的监测数据。

本文为了解释说明我国不同地区放射性物质浓度峰值大小以及时间分布特征,运用 HYSPLIT 模式的扩散轨迹模拟技术(Draxler et al, 1997)对福岛核事故的扩散轨迹进行了模拟。HYSPLIT 是由美国大气海洋局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)空气资源实验室(Air Resource Laboratory)开发的(Draxler et al, 1998)一个大气扩散模式。该模式基于拉格朗日的计算方法,主要适合于核事故或危险气体泄漏的中长距离输送模拟;在水平方向上采用烟团扩散模型,垂直方向上采用粒子随机游走模型,不仅能避免引入虚假扩散带来的误差,还能大大减少事故应急情况下的计算模拟时间。国家气象中心北京区域环境紧急响应中心从 2003 年引入该模式,对该模式的运用和发

① [http://www.mep.gov.cn/zxbd/rdzt/dzhaq/xwfb/index\\_4.htm](http://www.mep.gov.cn/zxbd/rdzt/dzhaq/xwfb/index_4.htm)

展研究积累了丰富的经验(孙明华等,2010)。

## 2 结果分析

### 2.1 放射性物质扩散轨迹的模拟

日本福岛核事故泄漏 5 d 以后(3 月 17 日),美国首次在本土检测到日本福岛的核放射物质(Thakur et al, 2012),8 d 以后(3 月 20 日)冰岛首都雷克雅未克检测到来自日本福岛的放射性物质,随后英国、挪威、瑞典、德国、法国、意大利和希腊等地相继在 3 月 22 日前后检测到来自福岛的放射性物质(Masson et al, 2011)。我国于 3 月 26 日首次在我国境内检测到来自日本福岛的放射性物质,这是因为虽然我国离日本的距离较近,但是由于处在日本的上风方向,受 3 月中下旬持续西风的影响,我国首次检测到放射性物质的时间较北美和欧洲国家晚,而与亚洲其他国家或地区(除日本外)情况一致。菲律宾在 3 月 23 日首次监测到来自日本福岛的放射性物质<sup>②</sup>,我国台湾(Hsu et al, 2012)、越南(Long et al, 2012)相继在 3 月 25 和 26 日监测到来自日本福岛的放射性物质,我国大陆地区在 3 月 26 日首次在位于黑龙江的饶河、抚远和虎林县分别监测到的。

为进一步了解福岛核事故在全球的扩散轨迹,本文利用 HYSPLIT 对日本福岛核事故的扩散轨迹进行了模拟,并利用全球的 CTBTO 观测网络对模拟结果进行了对比和验证,其结果如图 2 所示。模拟运用 HYSPLIT 模式在核事故发生地 5 km 高度处释放空气团,通过跟踪空气团在大气环流中的空间三维动态变化,来了解放射性污染物可能的扩散轨迹。日本核事故的轨迹模拟结果显示:气团自 3 月 12 日 00 时释放后,3 月 15 日扩散至北太平洋中部区域,3 月 18 日左右抵达美国西海岸,这与美国首次检测到放射性物质的时间基本一致;3 月 26 日左右而抵达欧洲,其模拟抵达时间较监测略晚;此外,模拟结果显示 3 月底放射性物质经极圈到达俄罗斯地区,并基本完成绕地球一圈的扩散过程。

### 2.2 我国监测站点气溶胶样品 I-131 浓度分析

3 月 26 日至 4 月 22 日,我国 31 个省(市、区)

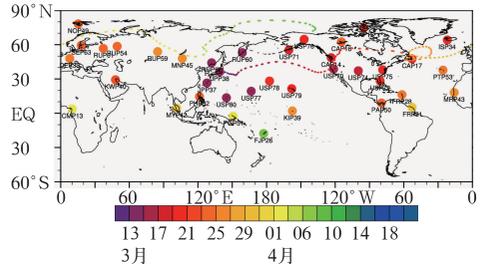


图 2 HYSPLIT 模拟的日本福岛核事故扩散轨迹与 CTBTO 监测比较

(CTBTO 的 38 个监测站点:JPP38,JPP37,RUP58,RUP60,USP80,USP77,USP70,USP74,CAP14,USP71,CAP17,USP75,USP79,USP76,ISP34,USP72,USP78,CAP15,KWP40,CAP16,PAP50,PHP52,RUP54,RUP61,SEP63,NOP49,PTP53,FRP28,DEP33,KIP39,MRP43,MNP45,RUP59,FRP31,MPY42,PGP51,CMP13,FJP26)

Fig. 2 Comparison between diffusing tracks of Fukushima simulated by HYSPLIT and the CTBTO observation

(38 observing sites of CTBTO:JPP38,JPP37,RUP58,RUP60,USP80,USP77,USP70,USP74,CAP14,USP71,CAP17,USP75,USP79,USP76,ISP34,USP72,USP78,CAP15,KWP40,CAP16,PAP50,PHP52,RUP54,RUP61,SEP63,NOP49,PTP53,FRP28,DEP33,KIP39,MRP43,MNP45,RUP59,FRP31,MPY42,PGP51,CMP13,FJP26)

的气溶胶样品均检测到了人工放射性核素 I-131,其 I-131 的浓度范围、平均值如表 2 所示。I-131 最大浓度值出现在吉林省,为  $8.01 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$ ;此外,华北地区的北京、天津、河南、河北、山东和陕西,西北的新疆和宁夏均检测到较大的 I-131 浓度值。我国检测到的 I-131 最大浓度值其大小约为美国最大监测值的十分之一( $103.6 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$ )(Thakur et al, 2012);与亚洲和欧洲国家(Hsu et al, 2012; Kim et al, 2012; Long et al, 2012; Pittauerova, et al, 2012; Baeza et al, 2012; Potiriadis et al, 2012; Bikit et al, 2012)的最大监测值量级相当。与此同时,我国广西、云南和西藏检测到的 I-131 相对较低,最大值均在  $0.35 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$  以下。

我国各省(市、区)监测到的大气 I-131 浓度具有显著的时空分布特征,图 3 是我国各省市监测到 I-131 浓度的时间演变图。3 月 28 日至 4 月 22 日监测期间,我国东北、华北、华东、江南和西北地区的

表 2 日本福岛核事故期间全国辐射环境空气中放射性核素检测结果(单位:  $\text{mBq} \cdot \text{m}^{-3}$ )  
(采样时间 3 月 26 日至 4 月 22 日)<sup>③</sup>

Table 2 Monitoring nuclides from China Radiation Monitoring Network (unit:  $\text{mBq} \cdot \text{m}^{-3}$ )

	I-131	Cs-137	Cs-134	Cs-137/I-131	Cs-134/Cs-137
黑龙江	0.073~2.38(0.66)	0.08~0.32(0.21)	0.1~0.28(0.18)	0.08~0.73	0.53~1.40
吉林	0.11~8.01(1.14)	0.05~0.23(0.13)	0.06~0.21(0.12)	0.08~0.24	0.77~1.20
辽宁	0.06~1.47(0.47)	0.05~0.17(0.09)	0.06~0.3(0.11)	0.07~0.54	0.77~1.76
北京	0.16~3.55(1.13)	0.05~0.65(0.21)	0.05~0.64(0.22)	0.05~0.29	0.83~1.39
天津	0.08~4.00(1.04)	0.06~0.39(0.2)	0.05~0.28(0.15)	0.06~0.35	0.66~1.50
河北	0.08~4.9(0.85)	0.09~0.26(0.15)	0.08~0.21(0.14)	0.05~0.24	0.73~1.33
河南	0.06~3.7(1.08)	0.08~0.3(0.19)	0.07~0.29(0.16)	0.04~0.36	0.45~1.17
山西	0.07~5.02(1.32)	0.07~0.54(0.25)	0.05~0.48(0.23)	0.05~0.19	0.88~1.27
内蒙古	0.05~0.75(0.25)	0.05~0.09(0.07)	*	0.11~0.25	—
山东	0.14~5.31(1.10)	0.06~0.34(0.16)	0.07~0.37(0.16)	0.05~0.61	0.67~1.15
上海	0.06~1.2(0.38)	0.08~0.65(0.18)	0.07~0.58(0.18)	0.10~0.54	0.78~1.18
江苏	0.07~1.36(0.32)	0.05~0.15(0.1)	0.05~0.14(0.09)	0.09~0.42	0.80~1.17
浙江	0.05~1.0(0.3)	0.06~0.22(0.12)	0.05~0.2(0.11)	0.14~0.50	0.63~0.93
安徽	0.08~1.59(0.41)	0.05~0.17(0.1)	0.06~0.13(0.08)	0.07~0.64	0.69~0.91
福建	0.05~1.15(0.35)	0.05~0.25(0.12)	0.06~0.23(0.11)	0.16~0.64	0.75~1.8
江西	0.06~2.1(0.55)	0.06~0.3(0.13)	0.06~0.23(0.12)	0.13~0.58	0.73~0.92
湖北	0.05~1.36(0.4)	0.05~0.21(0.09)	0.05~0.23(0.11)	0.07~0.18	1.10~1.50
湖南	0.05~0.79(0.36)	0.05~0.17(0.11)	0.05~0.17(0.10)	0.15~0.42	0.69~1.20
广东	0.07~1.4(0.25)	0.05~0.07(0.05)	0.01~0.08(0.06)	0.05~0.55	0.86~1.20
广西	0.05~0.3(0.12)	极微量	极微量		
海南	0.06~0.77(0.15)	0.06~0.12(0.08)	0.05~0.1(0.07)	0.10~0.86	0.60~1.17
重庆	0.06~0.18(0.1)	0.06~0.1(0.08)	0.05~0.08(0.07)	0.38~0.75	0.63~0.89
四川	0.06~0.44(0.18)	0.06~0.14(0.1)	0.05~0.12(0.08)	0.29~0.53	0.71~0.89
贵州	0.06~0.9(0.3)	0.05~0.12(0.08)	0.06~0.17(0.09)	0.09~0.60	0.78~1.42
云南	0.06~0.15(0.08)	*	*	—	—
西藏	0.06~0.32(0.18)	*	*	—	—
陕西	0.05~1.61(0.54)	0.05~0.45(0.21)	0.05~0.38(0.17)	0.16~0.58	0.35~0.88
甘肃	0.07~0.86(0.36)	0.08~0.18(0.11)	0.08~0.17(0.11)	0.14~0.26	0.75~1.33
青海	0.07~1.2(0.4)	0.05~0.28(0.18)	0.07~0.23(0.16)	0.11~0.23	0.47~0.86
宁夏	0.06~3.61(0.8)	0.01~0.64(0.19)	0.01~0.63(0.20)	0.08~0.21	0.93~1.08
新疆	0.12~7.77(1.7)	0.24~1.55(0.67)	0.09~1.43(0.48)	0.11~0.28	0.84~1.18

注: \* 代表没检测到数值。

趋势变化比较一致,以单峰型特征为主,最大浓度值出现在 4 月 6 日左右,这与 4 月 4—7 日期间我国东部地区至日本附近出现的持续偏东风有关。4 月 4—7 日,由于受东亚气旋东移影响,日本本土到我国东部沿海持续出现  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右的偏东风,日本福岛核电站释放的放射性物质受此东风影响向我国东部沿海输送,造成 4 月 6—7 日左右我国 I-131 浓度的极大值,其天气图如图 4 所示。与东北、华北、华东和江南地区的单峰型分布特征相比,华南和西南地区呈现双峰型时间演变特征,4 月 1 和 9 日分别对应两个极大值,与此期间低纬度地区的盛行东风气流有关。此外,云南和西藏的 I-131 浓度值

呈单峰型变化特征,整体浓度值较低均在  $0.35 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$  以下。

### 2.3 我国监测站点气溶胶样品 Cs-137 和 Cs-134 浓度分析

3 月 29 日,我国首次在安徽和宁夏等地监测到极微量的放射性元素 Cs-137 和 Cs-134。各地监测到 Cs-137 和 Cs-134 浓度值范围分别为  $0.01 \sim 1.55$  和  $0.01 \sim 1.42 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$ (如表 2 所示);其大小与我国台湾(Hsu et al, 2012)和韩国(Kim et al, 2012)监测到的极大值相当,但比越南(Long et al, 2012)监测到的最大值大一个数量级;同时是美国本

③ <http://www.mep.gov.cn/zxbd/rdzl/dzhaq/xwfb/index.htm>

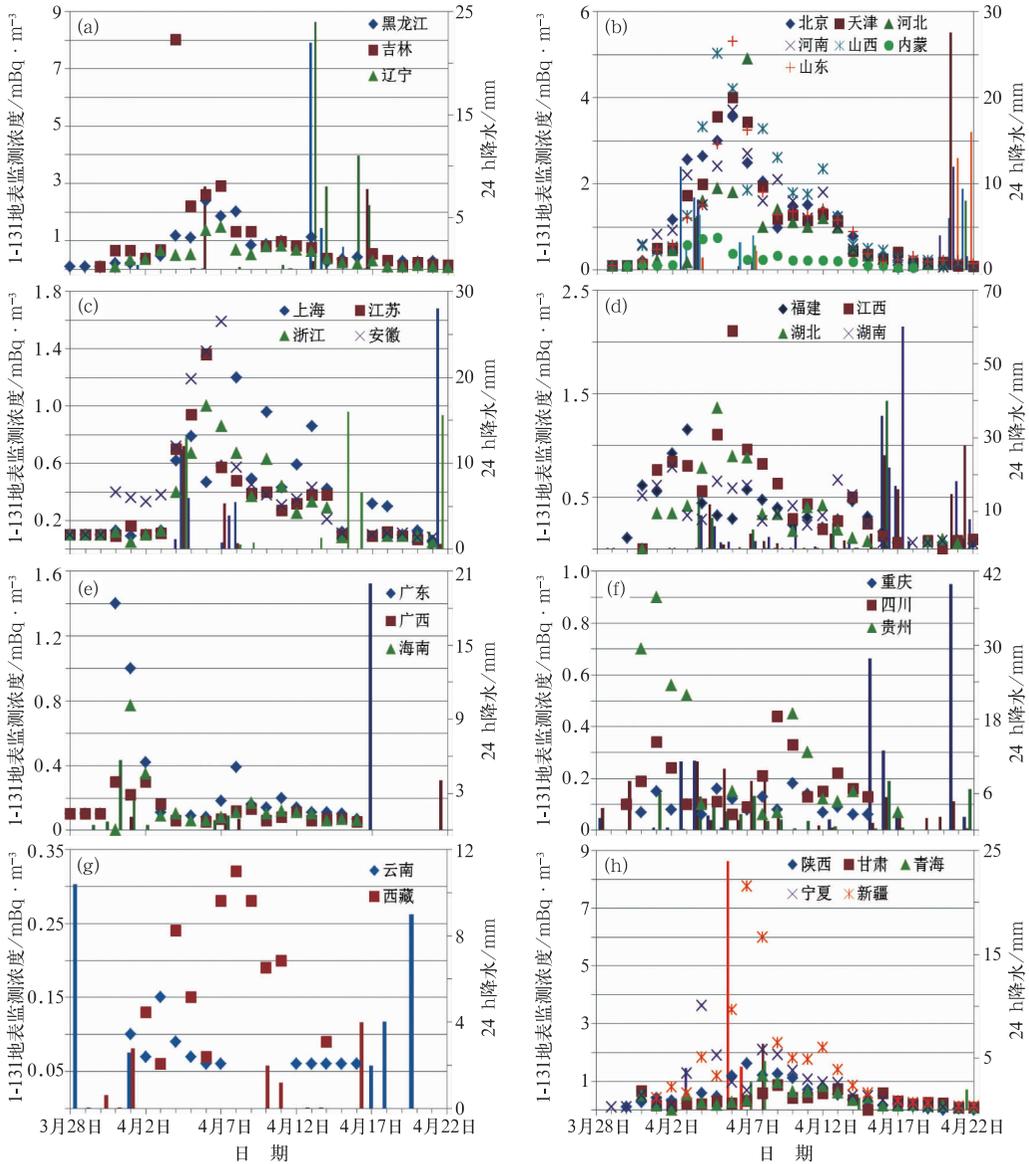


图 3 2011 年 3 月 28 日至 4 月 22 日我国各省(区、市)I-131 浓度趋势演变图

(a)东北(黑龙江、吉林、辽宁), (b)华北(北京、天津、河北、山西、内蒙古、河南、山东), (c)华东(上海、江苏、浙江、安徽), (d)江南(福建、江西、湖北、湖南), (e)华南(广东、广西和海南), (f)西南(四川、重庆、贵州), (g)其他地区(云南、西藏), (h)西北(陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆)

Fig. 3 Temporal trends of I-131 concentration for China 31 cities' monitoring data from March 28 to April 22, 2011 (a) Northeast (Heilongjiang, Jilin, Liaoning), (b) North China (Beijing, Tianjin, Hebei, Shanxi, Inner Mongolia, Henan, Shandong), (c) Huadong (Shanghai, Jiangsu, Zhejiang, Anhui), (d) Jiangnan (Fujian, Jiangxi, Hubei, Hunan), (e) Huanan (Guangdong, Guangxi, Hainan), (f) Southwest (Sishuan, Chongqin, Guizhou), (g) Other region (Yunnan, Xizang), (h) Northwest (Shaanxi, Gansu, Qinghai, Ningxia, Xinjiang)

土最大监测值的二分之一(Cs-137 和 Cs-134 分别为 3.4 和 3.44 mBq · m<sup>-3</sup>)(Thakur et al, 2012), 而较欧洲国家最大值偏大(Bikit et al, 2012; Potiriadis et al, 2012; Manolopoulou et al, 2012; Lozano et al, 2011; Pittauerova et al, 2011; Baeza et

al, 2012)。

为考察我国不同省(市、区)Cs-137 和 Cs-134 监测浓度时间演变趋势和空间特征, 各省(市、区)Cs-137 和 Cs-134 监测浓度变化如图 5 和图 6 所示。由图 5 和图 6 可知,Cs-137 和 Cs-134 监测浓度演变

趋势基本相似,因此,本文将以 Cs-137 为例进一步阐述说明。华北、华东、江南和西北地区的 Cs-137 浓度以双峰型特征为主,最大值分别出现在 4 月 4 日和 9 日左右。这种结果的出现是大气环流演变和排放速率变化(图 1)共同作用的结果,4 月 5—8 日左右正好对应 Cs-137 排放速率的低值区间。东北地区虽然也呈现双峰型变化,但是其最大值出现的时间与上述地区不尽相同,最大值主要出现在 4 月 7

和 17 日左右。华南和西南地区以单峰型特征为主,最大值均出现在 4 月 11 日左右。

就监测浓度的空间分布而言,华北地区的北京、天津和山西,西北地区的宁夏和陕西以及上海地区对应监测浓度的相对高值区;而华南和西南地区其浓度值最低。

### 2.4 Cs-137/I-131 和 Cs-134/ Cs-137 监测结果分析

一般而言,大气中监测到的放射性物质的比值如 Cs-137/I-131 和 Cs-134/Cs-137 与放射性物质在大气中扩散时间的长短或核事故的性质有关。例如,如果放射性物质的释放来自核武器,则放射性物质中 Cs-134 的含量极低或基本不含,此外,同一次核事故,随着核放射性物质在大气中扩散时间的长短 Cs-137/I-131 也会发生变化。

在同一次核事故期间,Cs-137/I-131 和 Cs-134/Cs-137 比值的大小亦随时间的演变与放射性元素的半衰期有关。由于不同的放射性元素的半衰期各

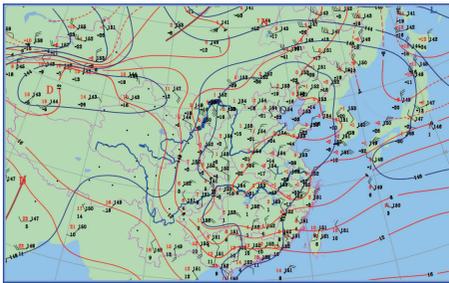


图 4 2011 年 4 月 4 日 08 时 850 hPa 东亚天气形势图

Fig. 4 850 hPa synoptic chart of Eastern Asian at 08:00 BT 4 April 2011

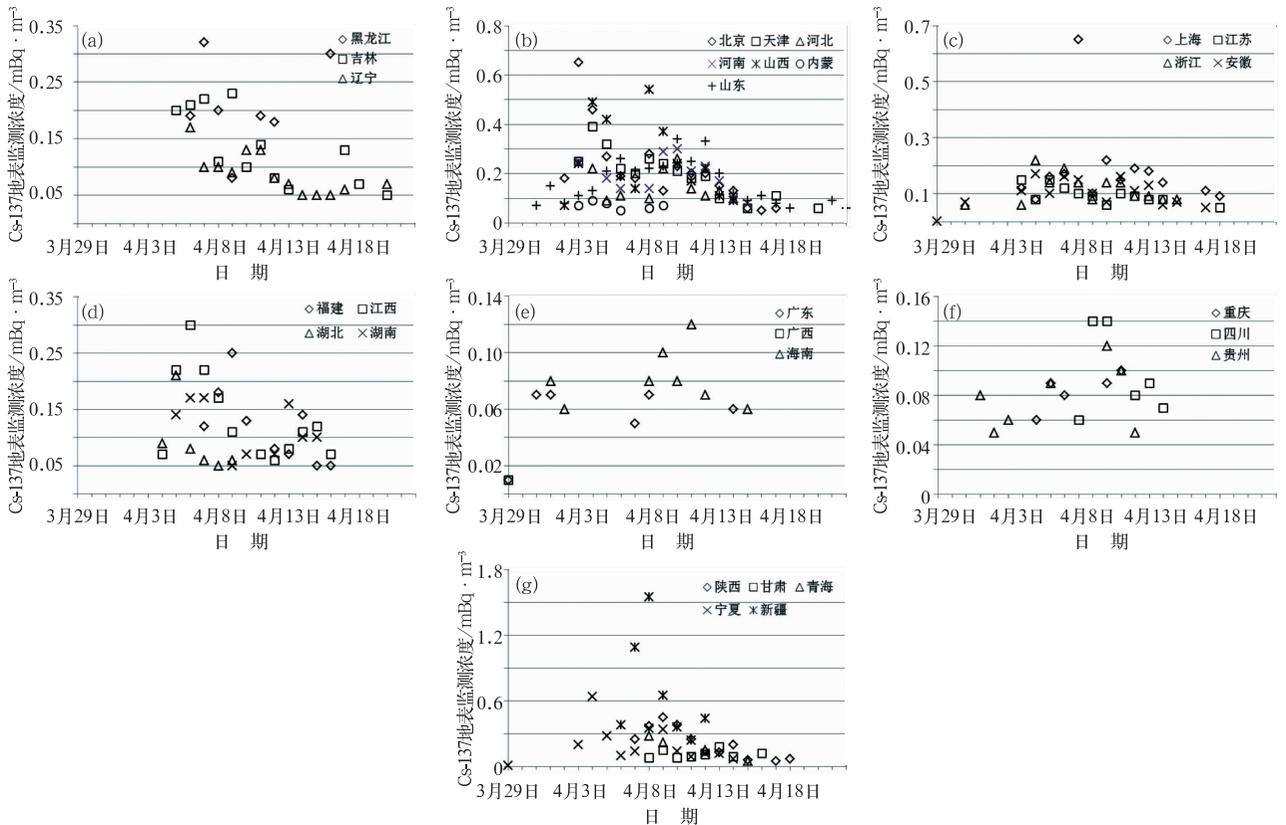


图 5 Cs-137 监测浓度趋势演变图,其余同图 3

(a) 东北, (b) 华北, (c) 华东, (d) 江南, (e) 华南, (f) 西南, (g) 西北

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for Cs-137

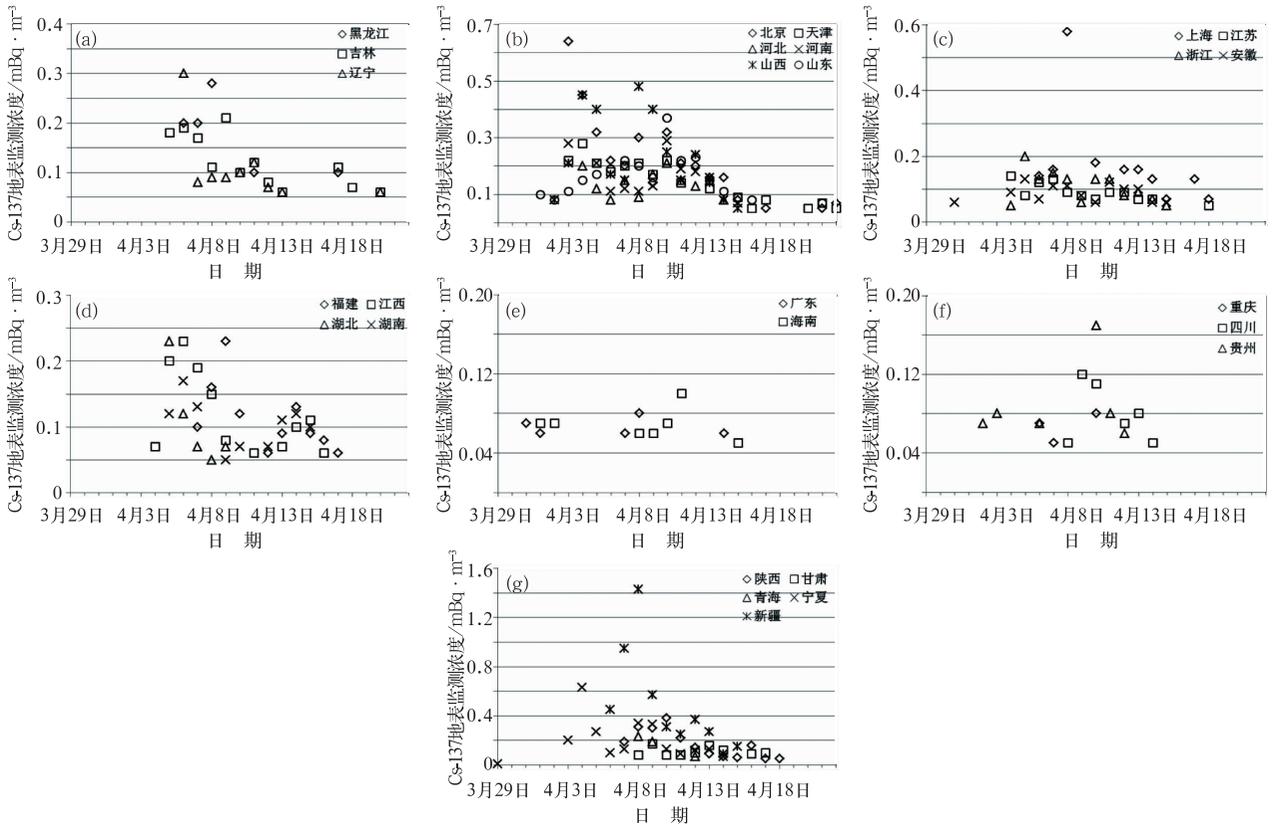


图 6 Cs-134 监测浓度趋势演变图,其余同图 3

(a) 东北, (b) 华北, (c) 华东, (d) 江南, (e) 华南, (f) 西南, (g) 西北

Fig. 6 Same as Fig. 3, but for Cs-134

不相同,如,I-131 半衰期为 8 d,Cs-137 约为 30.17 年,而 Cs-134 则为 2.06 a。根据半衰期的公式,Cs-137/I-131 或 Cs-134/Cs-137 的大小  $r$  可通过以下简单的指数衰减公式来表达:

$$r(t) = r_0 e^{-t(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2})} \quad (1)$$

式中, $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别代表不同放射性物质(如 Cs-137、Cs-134 或 I-131)的半衰期, $r_0$  是初始某一时刻 Cs-137/I-131 或 Cs-134/Cs-137 的比值。因此,Cs-137/I-131 或 Cs-134/Cs-137 比值的大小以及随时间的变化亦能从侧面反映出放射性物质离开释放源时间的长短。

图 7 显示的是 3 月 30 日至 4 月 22 日期间我国不同地区观测到的 Cs-137/I-131 时间演变趋势图。结果显示,我国不同地区大气中观测到的 Cs-137/I-131 比值在 0.04~0.9 之间,其值随时间有增大趋势。Thakur 等(2012)的结果显示,3 月 17—26 日美国观测到的 Cs-137/I-131 比值在 0.019~0.333 之间,且比值随时间增大。Masson 等(2011)等对欧洲的观测资料分析研究表明,3 月 11—22 日期间欧

洲地区的 Cs-137/I-131 值呈上升趋势,从 0.045 增加至 0.25,与此同时,希腊 Manolopoulou 等(2012)根据本国监测资料分析指出,3 月 24 日至 4 月 9 日期间 Cs-137/I-131 比值从 0.054 上升到 0.29。同样的结论(Cs-137/I-131 值大约在 0.059~0.31)亦出现在俄罗斯的监测资料中(Bolsunovsky et al, 2011)。

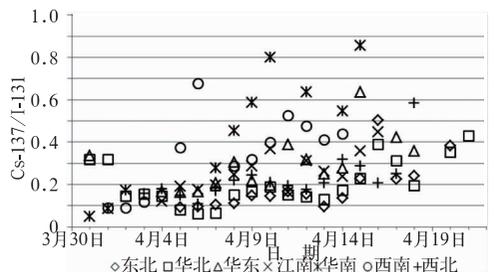


图 7 2011 年 3 月 30 日至 4 月 22 日期间我国不同地区 Cs-137/I-131 时间演变趋势图

Fig. 7 Temporal trends of Cs-137/I-131 rates for different regions of China from March 30 to April 22, 2011

与欧洲国家不同,我国大陆监测得到 Cs-137/I-131 变化范围要大得多(0.04~0.9),该结论与同处东亚的我国台湾(Hsu et al, 2012)和韩国(Kim et al, 2012)、越南(Long et al, 2012)等结果类似;这主要因为亚洲各国监测的时间较欧洲、北美国家晚,同时与日本距离较近的亚洲国家,其监测到放射性物质是一个从长期扩散到短期扩散叠加的结果。此外,我国监测到的 Cs-137/I-131 随时间呈明显上升趋势,这与随时间的延长 I-131 衰变量逐渐增多有关。

图 8 是我国监测到的 Cs-134/Cs-137 的时间演变趋势图。一般而言,Cs-134/Cs-137 的比值大小可以用来表征核事故的泄漏特征,对于短时间内剧烈的放射性物质泄漏过程,Cs-134/Cs-137 的比值较小,如切尔诺贝利核电站期间各国监测到的 Cs-134/Cs-137 均值约在 0.5~0.6 之间(Arvela et al, 1990; De Cort, 1998);而对于较为缓慢的放射性物质泄漏过程该值较大。对于此次日本福岛核事故,我国各地区 Cs-134/Cs-137 值在 1 附近摆动;且该结果与俄罗斯(Bikit et al., 2012)、美国(Thakur et al, 2012)、加拿大(Sinclair et al, 2011)、欧洲各国(Masson et al, 2011)及亚洲韩国(Kim et al, 2012)和越南(Long et al, 2012)所得到的结果均一致。

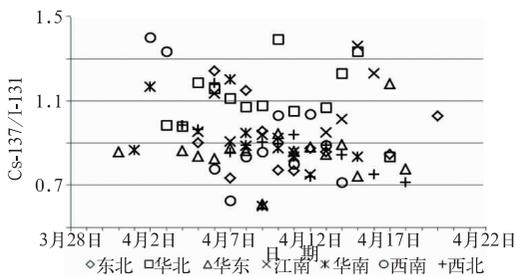


图 8 2011 年 3 月 30 日至 4 月 22 日我国不同地区 Cs-134/Cs-137 时间演变趋势图

Fig. 8 Temporal trends of Cs-134/Cs-137 rates for different areas

### 3 小 结

从 3 月 26 日我国首次在黑龙江监测到来自日本福岛核事故的放射性物质 I-131 至 4 月 22 日我国大陆境内大部分地区已基本监测不到来自日本福岛的放射性物质,我国大气辐射监测持续了近一个月时间。根据本文对这近一个月监测资料分析和模拟结果,可以得到以下结论:

(1) 日本福岛核事故对我国辐射环境影响的时

间偏晚,我国在 3 月 26 日才首次监测到源自此次核事故的放射性物质 I-131,与亚洲国家或地区一致,而较美国和欧洲国家晚。

(2) 日本福岛核事故期间,我国检测到的 I-131 最大浓度值位于吉林约为  $8 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$ ,其量级约为美国最大监测值的十分之一,与亚洲和欧洲国家量级相当;此外,其时间演变以单峰型变化特征为主,峰值在 4 月 7 日左右,这主要与在此期间我国东部至日本地区大气中低层的盛行东风有关。从各地区受影响的程度而言,我国东北、华北和西北地区 I-131 的辐射环境水平受此次核事故的影响最大。

(3) Cs-137 和 Cs-134 的监测浓度最大值均位于新疆地区分别为  $1.55$  和  $1.44 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$ ,其值约为美国最大监测值的二分之一;而较欧洲和亚洲其他国家监测值而言偏大。Cs-137 和 Cs-134 的时间演变与 I-131 不同,主要以双峰型特征为主,大浓度值主要在 4 月 4 日和 9 日左右,与日本福岛核事故核污染物的排放速率紧密相关。就 Cs-137 和 Cs-134 的空间分布而言,我国华北和西北地区浓度值较高。

(4) 日本福岛核事故监测期间,我国监测到的 Cs-137/I-131 比值在 0.04~0.9 之间,其值变化范围较大,且整体呈上升趋势,该结果与亚洲国家监测结果一致;与此同时,整个监测期间 Cs-134/Cs-137 比值在 1 附近摆动。

本文的研究着重于监测数据的处理分析,在后续的研究中将从模式模拟的角度出发分析和评估日本福岛核事故对我国以及全球环境的影响。

### 参 考 文 献

- 陈晓秋,杨端节,李冰. 2012. 环境监测资料反推事故释放源项. 核化学与放射化学, 34(2): 83-87.
- 娄云,万玲,马永忠,等. 2012. 日本福岛核事故所致北京地区放射性污染的监测与分析. 中华放射医学与防护杂志, 32(2): 129-132.
- 聂新旺,王益柏,孙守勋,等. 2012. 应用 Models-3/CMAQ 对 2011 年 3 月日本福岛核泄漏的数值研究. 气象, 38(10): 1182-1188.
- 乔方利,王关锁,赵伟,等. 2011. 2011 年 3 月日本福岛核泄漏物质输运扩散路径的情景模拟和预测. 中国科学, 56(12): 887-894.
- 石二为,崔勇,张谦,等. 2012. 日本福岛核事故对辽宁省局部地区环境放射性水平的影响. 中华放射医学与防护杂志, 32(2): 137-140.
- 孙明华,宋振鑫,吕终亮,等. 2010. 区域大气环境应急响应数值预报系统. 气象科技, 38(5): 635-641.
- Arvela H, Markkanen H, Lemmela H. 1990. Mobile survey of environmental gamma radiation and fallout level in Finland after-Chernobyl accident. Radiat Prot Dosim, 32(3): 177-184.
- Baeza A, Corbacho J A, Rodriguez A, et al. 2012. Influence of the

- Fukushima Daiichi nuclear accident on Spanish environmental radioactivity levels. *J Environ Radioac*. doi:10.1016/j.jenvrad.2012.03.001.
- Biegalske S R, Bowyer T W, Eslinger P W, et al. 2012. Analysis of data from sensitive U. S. monitoring stations for the Fukushima Daiichi nuclear reactor accident. *J Environ Radioac*,102:1-7.
- Bikit I, Mrda D, Todorovic N, et al. 2012. Airborne radioiodine in northern Serbia from Fukushima. *J Environ Radioac*. doi:10.1016/j.jenvrad.2012.01.020.
- Bolsunovsky A, Dementyev D. 2011. Evidence of the radioactive fallout in the center of Asia (Russia) following the Fukushima Nuclear Accident. *J Environ Radioac*,102:1062-1064.
- Chino M, Nakayama H, Nagai H, et al. 2011. Preliminary estimation of release amounts of <sup>131</sup>I and <sup>137</sup>Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into atmosphere. *J Nucl Sci Technol*,48(7):1129-1134.
- Cleveland B T, Duncan F A, Lawson I T, et al. 2012. Activities of  $\gamma$ -ray emitting isotopes in rainwater from Greater Sudbury. *Can J Phys*,90(6):599-603.
- De Cort M. 1998. Atlas of cesium deposition on Europe after the Chernobyl accident; office for official publications of the European Communities. ECSC-EEC-EAEC; Brussels-Luxemburg.
- Draxler R R, Hess G D. 1998. An overview of the HYSPLIT\_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition. *Aust Meteor Mag*,47(4):295-308.
- Draxler R R, Stunder B, Rolph G, et al. 1997. HYSPLIT 4 User's Guide, via NOAA ARL. [http://www.arl.noaa.gov/documents/reports/HYSPLIT\\_use\\_guide](http://www.arl.noaa.gov/documents/reports/HYSPLIT_use_guide).
- Hsu S C, Huh C A, Chan C Y, et al. 2012. Hemispheric dispersion of radioactive plume laced with fission nuclides from the Fukushima nuclear event. *Geophy Res Lett*, 39, doi: 10.1029/2011GL049986.
- Katata G, Ota M, Terada H, et al. 2012a. Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear PowerPlant accident. Part I: source term estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident. *J Environ Radioactiv*,109:103-113.
- Katata G, Terada H, Nagai H, et al. 2012b. Numerical reconstruction of highdose rate zones due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *J Environ Radioactiv*,111:2-12.
- Kim C K, Byun J I, Chae J S. 2011. Radiological impact in Korea following the Fukushima nuclear accident. *J Environ Radioactiv*. doi:10.1016/j.jenvrad.2011.10.018.
- Leon J D, Jaffe D A, Kaspar J, et al. 2012. Arrival time and magnitude of airborne fission products from the Fukushima, Japan, reactor incident as measured in Seattle, WA, USA. *J Environ Radioactiv*. 102:1032-1038.
- Long N Q, Truong Y, Hien P D, et al. 2012. Atmospheric radionuclides from the Fukushima Dai-ichi nuclear reactor accident observed in Vietnam. *J Environ Radioactiv*. doi: 10.1016/j.jenvrad.2011.11.018.
- Lozano R L, Hernandez-Ceballos M A, Adame J A, et al. 2011. Radioactive impact of Fukushima accident on the Iberian Peninsula; Evolution and plume previous pathway. *Environ Int*,37(7):1259-1264.
- Manolopoulou M, Vagena E, Stoulos S, et al. 2012. Radioiodine and radiocesium in Thessaloniki, Northern Greece due to the Fukushima nuclear accident. *J Environ Radioactiv*,102:796-797.
- Masson O, Baeza A, Bieringer J, et al. 2011. Tracking of Airborne Radionuclides from the Damaged Fukushima Daiichi Nuclear Reactors by European Networks. *Environ Sci Technol*,45(18):7670-7677.
- Melgunov M S, Pokhilenko N P, Straknovenko V D, et al. 2012. Fallout traces of the Fukushima NPP accident in southern West Siberia (Novosibirsk, Russia). *Environ Sci Pollut Res*. 19(4):1323-1325.
- NEA. 2002. Chernobyl-Assessment of Radiological and Health Impacts. Update of Chernobyl; Ten Years On. Paris; Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development.
- NISA. 2011a. Abstracts of the cross check analysis on the evaluation of the cores of Unit 1, 2 and 3 of Fukushima Dai-ichi NPP reported by TEPCO.
- NISA. 2011b. INES (the International Nuclear and Radiological Event Scale) Rating on the Events in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. [www.nisa.meti.go.jp/english/files/en20110412-4.pdf](http://www.nisa.meti.go.jp/english/files/en20110412-4.pdf).
- NSC. 2011. Trail estimation of emission of radioactive materials (<sup>131</sup>I, Cs-137) into the atmosphere from Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station. <http://www.nsc.go.jp/>.
- Pittauerova D, Hettwig B, Fischer H W, et al. 2011. Fukushima fallout in Northwest German environmental media. *J Environ Radioac*,102:877-880.
- Potiriadis C, Kolovou M, Clouvas A, et al. 2012. Environmental radioactivity measurements in Greece following the Fukushima Daiichi nuclear accident. *Radiat Prot Dosimetry*, 150(4):441-447.
- Sinclair L E, Seywerd H C J, Fortin R, et al. 2011. Aerial measurement of radioxenon concentration off the west coast of Vancouver Island following the Fukushima reactor accident. *J Environ Radioac*,102:1018-1023.
- Stohl A, Seibert P, Wotawa G, et al. 2011. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Daiichi nuclear power plant; determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. *Atmos Chem Phys*,11(10):28319-28394.
- TEPCO. 2011. IAEA issued May 30, 2012. Status of the Fukushima Daiichi NPP and related environmental conditions.
- Terada H, Katata G, Chino M, et al. 2012. Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, Part II; verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion. *J Environ Radioac*,112:141-154.
- Thakur P, Ballard S, Nelson R. 2012. Radioactive fallout in the United States due to the Fukushima nuclear plantacciden. *J Environ Monitor*,14(5):1317-1324.