

万恩源, 郑向东, 万国江, 等. 2012. 2011 年春季日本福岛核泄漏污染输送: 贵阳¹³¹I 和¹³⁷Cs 观测示踪分析[J]. 环境科学学报, 32(9): 2182-2188

Wan E Y, Zheng X D, Wan G J, et al. 2012. Transport of the radioactivity leakage from the Japan Fukushima Nuclear Power Plant in 2011 spring: ¹³¹I and ¹³⁷Cs as the tracers observed in Guiyang, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(9): 2182-2188

2011 年春季日本福岛核泄漏污染输送: 贵阳¹³¹I 和¹³⁷Cs 观测示踪分析

万恩源¹, 郑向东², 万国江^{1,*}, 王长生¹

1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

2. 中国气象科学研究院, 中国气象局大气化学开放实验室, 北京 100081

收稿日期: 2011-11-20

修回日期: 2012-01-04

录用日期: 2012-01-05

摘要: 2011 年 3 月 11 日, 日本本州 9.0 级地震引发了福岛核电站核泄漏, 以及由此引起的¹³¹I 和¹³⁷Cs 在全球大气环流传输已引起了重视. 理论上也对这种输送路径进行了研究. 本文报道 2011 年 3 月 17 日—4 月 28 日在贵阳观风山对气溶胶中天然核素(²¹⁰Pb、⁷Be) 和人为核素(¹³¹I、¹³⁷Cs) 近地面空气浓度逐周采样的系统对比观测, 并结合该时段贵阳离地面 500 m 高度逐周 315 h 的气团后向轨迹分析. 结果表明: 福岛核泄漏污染物通过两条显著的途径输送到贵阳地区. 第一条是首波核污染通过全球大气环流传输, 由西向东, 几乎环绕地球一周, 历经约 10 d 至两周, 最终在 3 月 24 日—31 日从我国的西北地区入侵抵至贵阳; 第二条途径则是福岛地区上空的核污染气团受东北天气系统的挤压南移并在低纬度地区再次先后受到东北和东南气流的影响, 于 4 月 7 日—14 日抵达贵阳. 核污染的第一条输送路径是全球尺度, 第二条是东亚区域尺度.

关键词: 福岛; 核泄漏; ¹³¹I-¹³⁷Cs-²¹⁰Pb-⁷Be; 气溶胶传输; 贵阳

文章编号: 0253-2468(2012)09-2182-07

中图分类号: X142

文献标识码: A

Transport of the radioactivity leakage from the Japan Fukushima Nuclear Power Plant in 2011 spring: ¹³¹I and ¹³⁷Cs as the tracers observed in Guiyang, China

WAN Enyuan¹, ZHENG Xiangdong², WAN Guojiang^{1,*}, WANG Changsheng¹

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002

2. Key Laboratory of Atmospheric Chemistry of China Meteorological Administration, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Received 20 November 2011;

received in revised form 4 January 2012;

accepted 5 January 2012

Abstract: The 9.0 Richter scale earthquake happened on March 11th, 2011 in the Honshu Island, Japan had caused the radioactivity leakage from the Fukushima Nuclear Power Plant. The leaked artificial nuclides, ¹³¹I and ¹³⁷Cs, and their transport processes in the global atmosphere had drawn great public attention. In this paper, the concentrations of radioactive isotopes ⁷Be, ²¹⁰Pb, ¹³¹I and ¹³⁷Cs at the surface level in weekly aerosol samples obtained at the Guanfenshan Mountain, Guiyang, China from March 17th to April 28th, 2011 were reported. The variations of the nuclide concentrations associated with their transport paths were analyzed with 315 h-backward trajectories initialized at 500m from the surface level at Guiyang. The results revealed that there were two evident transport paths for ¹³¹I and ¹³⁷Cs from Fukushima to Guiyang. The first path, along with which radioactive pollution tracers reached Guiyang faster, was from the north-western China. These tracers transported eastward and took 10 days to two weeks to arrive the north-western China before they were detected on March 24th—31st in Guiyang. The second path extended south-eastward by the north-east Asian synoptic system at the beginning, then transported south-westward and north-westward before their arrivals on April 7th—14th in Guiyang. The first transport path of radioactive pollution tracer from the Fukushima Nuclear Power Plant to Guiyang was in the global scale while the second was in the East Asian regional scale.

Keywords: fukushima; nuclear leakiness; ¹³¹I-¹³⁷Cs-²¹⁰Pb-⁷Be; aerosol transport; Guiyang

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40873086, 40773071, 40830102)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 40873086, 40773071, 40830102)

作者简介: 万恩源(1976—) 男, E-mail: wanenyuan@vip.skleg.cn; * 通讯作者(责任作者) E-mail: wanguojiang@vip.skleg.cn

Biography: WAN Enyuan(1976—) male, E-mail: wanenyuan@vip.skleg.cn; * Corresponding author E-mail: wanguojiang@vip.skleg.cn

1 引言(Introduction)

⁷Be、²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 是环境中广泛存在的放射性核素, 对于区域及全球气溶胶传输具有重要示踪意义. 自 20 世纪 90 年代以来, 全球大气中的人为核素¹³⁷Cs 已经处于检测线以下, 难于确定. 仅天然核素⁷Be 和²¹⁰Pb 的空气浓度可供观测记录, 通过对它们在近地面空气浓度的长期观测, 对于检验大气污染物的全球浓度分布和模拟沉降通量变化具有重要价值(Wan & Appleby, 1998; 万国江, Appleby, 2000; Santschi, 1983).

云贵高原是全球环境变化的敏感地区之一. 黔中地区位于云贵高原中部, 系青藏高原向东部丘陵平原过渡的斜坡面上的内陆区, 纬度较低、海拔较高. 该区既受控于西环流南支气流, 又受西环流北支西南气流的影响; 兼受东南季风和西南季风的作用, 南北冷暖空气常在此交绥, 形成云贵静止锋. 在黔中地区观测示踪核素的空气浓度和沉降通量具有特殊意义. 我们自 2001 年冬开始在贵阳观风山山侧(106°43′22.1″E, 26°34′19.3″N, 1080 m) (图 1) 开展了气溶胶逐周连续采样, 通过对近地面空气和降水中⁷Be 和²¹⁰Pb 浓度的长期观测, 取得了系统的研究进展, 其部分观测结果已经相继发表(Lee *et al.*, 2004; 万国江等 2005; Wan *et al.*, 2008; 万国江等 2010a, 2010b). 另外, 我们自 2002 年起还在青海瓦里关山全球大气本底站进行类似的观测(郑向东等 2005; 万国江等 2006; Zheng *et al.*, 2008; 郑

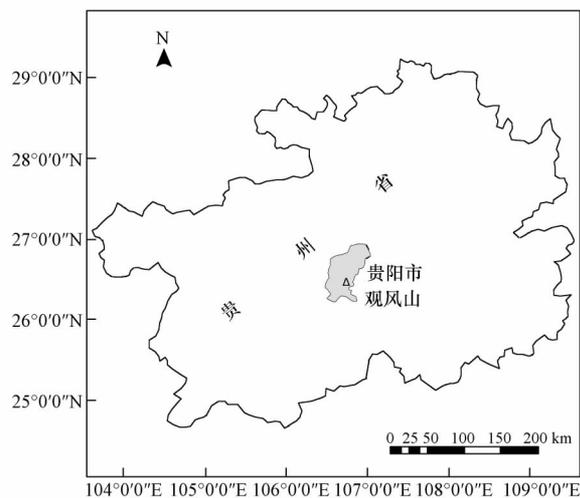


图 1 贵阳观风山观测点区位

Fig. 1 Surface air sampling location at Guiyang site (circle) in China

向东等 2011). 但是近 10 余年间从未检测到近地面空气中人为核素¹³¹I 和¹³⁷Cs 的存在.

⁷Be(半衰期 53.3 d) 是宇宙线轰击大气¹⁴N、¹⁶O 靶核而生成的放射性核素. ⁷Be 在大约 20 km 高度大气层中的产率最大, 在平流层的寄宿时间大约 1 a. 随着宇宙线辐射到大气圈强度的减弱, 其产率随大气层的厚度及空气密度的增加而减少(Lal & Peters, 1967; Feely, *et al.*, 1989). 当⁷Be 形成之后, 很快附着于亚微米级气溶胶微粒表面, 并随大气动力过程而迁移, 通过干-湿沉降进入地表环境而终结. 平流层作为⁷Be 产生和富集的源地, 通过全球尺度的 Brewer-Dobson 环流可以将⁷Be 输送到对流层; 或者当平流层与对流层发生交换时进入对流层(Feely *et al.*, 1989; Holton *et al.*, 1995; Zanis *et al.*, 1999). 因此, 近地面⁷Be 浓度的变化常作为垂直方向上的气团向下输送最给力的示踪剂. ⁷Be 在对流层空气中的浓度也随地表海拔高度而增加.

²¹⁰Pb(半衰期 22.3 a) 是²³⁸U 系列中²²⁶Ra(半衰期 1622 a) 衰变中间产物²²²Rn(半衰期 3.8 d) 的 α 衰变子体. ²²²Rn 作为一种惰性气体, 自岩石表面和土壤微粒中逸出后, 在低层大气中扩散并继续衰变. 由于岩石和土壤中矿物组成的差异, ²²²Rn 逸散与生成的比率自小于 1% 到大于 30% (Krishnaswami & Seidemann, 1988; Dörr & Münnich, 1990). 低层大气中的²²²Rn 因逸散比率和气流输送的地区差异而发生变化. ²²²Rn 自陆地表面向大气的平均逸散输送通量约为 0.015 Bq·m⁻²·a⁻¹; 自洋面和冰盖的逸散输送通量较陆地表面低 2~3 个数量级(Turekian *et al.*, 1977; Dörr & Münnich, 1990). 所以, 大气中的²¹⁰Pb 主要来自陆地表面, 并具有明显的区域性分布差异(Lee *et al.*, 2004; 万国江等 2010b).

按照近地面空气中⁷Be 与²¹⁰Pb 浓度的形成机制, 当⁷Be 浓度上升(或下降) 则寓意高空气团下沉加强(或减弱); 而当²¹⁰Pb 空气浓度明显上升(或下降) 时, 则表明大陆性气团入侵的加强(或减弱); 而海洋性气团入侵的加强, 则是⁷Be 与²¹⁰Pb 浓度均明显下降(万国江等 2010_a).

¹³¹I 是核裂变反应中早期混合裂变的重要产物之一(半衰期 8.02 d), 正常情况下自然界不会存在. 在核爆炸或核反应堆事故时, 如果环境中¹³¹I 含量增高, 即表明有早期混合裂变产物溢出. 因此, ¹³¹I 可以作为核爆炸或核反应堆泄漏事故的示踪核素. 1986 年 4 月前苏联切尔诺贝利核事故排放的¹³¹I

总量为 1.8×10^{18} Bq. ^{137}Cs 是核爆炸试验散落的裂变产物(半衰期 30.17 a),随大气放射尘而散落于地表环境. 进入大气圈的 ^{137}Cs 总活度与核裂变产物的量成比例. 自 1945 年到 1980 年间,进入全球大气层的 ^{137}Cs 总活度估计为 1400×10^{15} Bq. 切尔诺贝利核反应堆泄漏事故导致约 70 PBq 的 ^{137}Cs 进入大气圈,产生全球扩散影响.

2011 年 3 月 11 日,日本本州 9.0 级地震引发海啸及核泄漏. 福岛第一核电站(Fukushima Nuclear Power Plant, 141.033°E, 37.421°N)反应堆不同程度被损坏,造成放射核素(^{131}I 和 ^{137}Cs)的释放. 对于这次福岛核事故,中国环境保护部(国家核安全局)等相关部门已经实时、多次发布检测结果及其对我国大陆的影响,表明这些放射性物质给公众带来的附加辐射剂量很低,对我国环境和公众健康不会产生明显影响. 需要回答的科学问题是:福岛事故的核扩散物质在大气中是通过何种传输路径进入我国的? 其传输是否具有全球或区域尺度的示踪意义? 虽然国内外一些组织和研究机构通过数值模拟开展了核泄漏物质传输的预测(乔方利等, 2011),但仍有必要对此进行科学验证.

本文报道 2011 年 3 月 17 日至 4 月 28 日期间,笔者在贵阳观风山气溶胶逐周采样对 ^{131}I 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 和 ^7Be 近地面空气浓度的系统观测结果,并结合美国全球再分析气象数据 NCEP(National Center of Environment Prediction)计算抵达贵阳(106°43'22.1" E, 26°34'19.3"N)每日离地面 500 m 高度、为期 315 h 气团的后向轨迹在 XY 平面上的分布(Draxler & Rolph 2003),以了解核事故期间,贵阳每周采样的气溶胶样品中气团所经过的地理位置来验证核污染的输送路径. 由于观测到的 ^7Be 和 ^{210}Pb 本身就是很好的垂直方向上的示踪物,本文后向轨迹计算不给出气团在垂直方向上的输送过程.

2 样品及实验方法 (Samples and experiment methods)

采样设备是美国环境测量实验室(EML,即 Environmental Measurements Laboratory, USA)研发用于测量低水平核素的表层大气采样系统(SASS, Model 500NE Aerosol Sampler). 采样系统置于环境地球化学国家重点实验室实验楼顶,距地面约 30 m.

采样器(Fuji 型)配备有 20.3 cm × 25.4 cm 的矩形过滤器,在两层 100% 聚脂保护棉之间夹 3 层

100% 的聚丙烯网滤膜过滤材料(Dynaweb, DW7301L),有效过滤面积 407 cm². 采样流速为 0.4 ~ 1.6 m³·min⁻¹. 每周采集 1 个样品,即每个样品的采样时间约为 168 h. 每个样品的空气量校正到国际标准体积为 $0.9 \times 10^4 \sim 1.1 \times 10^4$ m³.

^{131}I 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 和 ^7Be 放射性活度系采用美国 Canberra 公司生产的 S-100 系列 16384 道能谱仪进行 γ -谱测定. 聚丙烯网滤膜气溶胶样品封装成一定形状直接置于 GR2019 同轴高纯锗(HPGe)探测器(效率 20%)计数测量. 能谱仪具有良好的稳定性,测试过程中无道漂,单个样品计数时间为 $4.7 \times 10^4 \sim 6.3 \times 10^4$ s. ^{131}I 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 和 ^7Be 计数峰的位置分别为 363.5 keV、660.2 keV、46.1 keV 和 476.5 keV; 样品测量计数按 1 个标准差控制,实际测量平均误差分别为: $\pm 7.1\%$ (^{131}I)、 $\pm 11.9\%$ (^{137}Cs)、 $\pm 1.9\%$ (^{210}Pb)、 $\pm 1.6\%$ (^7Be). 多核素放射性标准源(Catalog No.: 7500, Source No.: 586-26-6)由美国同位素产品实验室(Isotope Products Laboratories)提供,并以效率曲线进行不同核素的活度计算.

低水平核素的精确测量不仅需要高稳定性的测量装置和利用多核素综合标准源进行准确的能量刻度和效率标定,更需要国际间多实验室的数据比对. 为确保测量结果的国际可比性,前期曾就部分聚丙烯网滤膜气溶胶样品等份分割后,分别由中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室与美国环境测量实验室同步进行对比测量. 两个实验室测量数据散点之间具有很好的一致性(Lee *et al.* 2004; 万国江等 2010a).

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 观测结果

自 2011-03-17 起,在贵阳观风山近地面空气气溶胶逐周采样并对天然(^7Be 、 ^{210}Pb)及人为(^{131}I 、 ^{137}Cs)核素浓度变化的观测结果(表 1)表明:第一周(3.17—3.24), ^7Be 和 ^{210}Pb 核素浓度较低,显示出弱海洋性暖湿气团的影响;同时表明在福岛核事故后的十余天内,未检测出 ^{131}I 及 ^{137}Cs . 第二周(3.24—3.31), ^7Be 浓度达到 $11.7 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$,指示了高空气团下沉; ^{210}Pb 浓度为 $3.4 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$,指示出受内陆气团影响;此间, ^{131}I 浓度达到 $17.9 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$,接近于自由大气层中 ^7Be 的浓度, ^{137}Cs 浓度达 $0.03 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$. 第三周(3.31—4.7), ^7Be 和 ^{210}Pb 浓度正常下降, ^{131}I 及 ^{137}Cs 浓度也分别下降到

4.5 mBq·m⁻³ 和 0.02 mBq·m⁻³. 第四周(4.7—4.14) ⁷Be 和²¹⁰Pb 浓度变化不大,¹³¹I 及¹³⁷Cs 浓度分别上升至 5.4 mBq·m⁻³ 和 0.07 mBq·m⁻³, 出现了¹³⁷Cs 浓度的明显增大. 第五周(4.14—4.21), 虽然⁷Be 和²¹⁰Pb 浓度仍然指示出高空气团的弱下沉和内陆地域的影响; 但是人为核素的空气浓度已经明显下降,¹³¹I 浓度下降到 2.4 mBq·m⁻³,¹³⁷Cs 浓度低于 0.02 mBq·m⁻³, 指示出¹³¹I 的明显衰减和¹³⁷Cs 的扩散稀释. 第六周(4.21—4.28) ⁷Be 和²¹⁰Pb 浓度仍然分别指示了高空气团的下沉和内陆地域的影响; 但是人为核素的空气浓度明显低于检测线.

为进一步剖析本文所观测¹³¹I 和¹³⁷Cs 逐周浓度

变化与福岛核事故污染物大气传输的相互关系, 根据 NCEP 气象数据资料和后向轨迹模式(Draxler & Rolph 2003) 计算并绘出了 2011 年 3 月 17 日—4 月 28 日之间, 每周 7 日贵阳离地面 500 m 高度为期 315 h 的气团后向轨迹(图 2). 用 315 h(近两周的时间) 是因为福岛核电站位于贵阳的下风向, 核污染物可能通过全球尺度、环绕地球一周输送到我国境内所需要的时间可能也在近两周左右. 考虑到 3—4 月西南近地边界层混合高度至少在 500 m 以上, 本文后向轨迹计算的气团起始高度选择离地面 500 m.

表 1 贵阳观风山近地面空气天然(⁷Be、²¹⁰Pb) 及人为(¹³¹I、¹³⁷Cs) 核素浓度(2011-3-17—4-28)¹⁾

Table 1 Concentration of natural (⁷Be, ²¹⁰Pb) and anthropogenic (¹³¹I, ¹³⁷Cs) radionuclides in surface air at Guiyang

采样日期	采样体积 ²⁾ / m ³	⁷ Be /(mBq·m ⁻³)	²¹⁰ Pb /(mBq·m ⁻³)	¹³¹ I /(mBq·m ⁻³)	¹³⁷ Cs /(mBq·m ⁻³)
2011-03-17—2011-03-24	11076	3.1 ± 0.1	1.5 ± 0.1	0	0
2011-03-24—2011-03-31	10314	11.7 ± 0.1	3.4 ± 0.1	7.9 ± 0.8	0.03 ± 0.01
2011-03-31—2011-04-07	10587	5.1 ± 0.1	2.3 ± 0.1	4.5 ± 0.4	0.02 ± 0.01
2011-04-07—2011-04-14	10921	4.5 ± 0.1	2.7 ± 0.1	5.4 ± 0.5	0.07 ± 0.01
2011-04-14—2011-04-21	9753	8.7 ± 0.1	3.4 ± 0.1	2.4 ± 0.3	0.02 ± 0.01
2011-04-21—2011-04-28	9080	10.9 ± 0.1	3.6 ± 0.1	0	0

注: 1) 测量误差按 1 σ 计; 2) 采样体积已校国际标准.

3.2 福岛核泄漏经全球大气环流对贵阳影响

第一周(3.17—3.24) ⁷Be 和²¹⁰Pb 核素浓度较低, 显示出海洋性气团的影响; 未检测出¹³¹I 及¹³⁷Cs, 表明福岛核事故后的 10 d 内污染物未能到达贵阳. 由图 2a 可见: 贵阳站点的后向轨迹包括我国西北地区 and 南亚大陆印度半岛地区两个部分. 这两个扇区显然还未受到经过核泄漏点气团输送的影响; 同时, 气团来自纬度较低的南亚地区, 贵阳近地面空气⁷Be 和²¹⁰Pb 浓度也必然较低.

第二周(3.24—3.31), 在贵阳观测到⁷Be 浓度达 11.7 mBq·m⁻³, 指示了高空气团下沉;²¹⁰Pb 浓度为 3.4 mBq·m⁻³, 指示出兼受内陆气团的正常影响. 此间, 人为核素¹³¹I 及¹³⁷Cs 浓度分别达到 17.9 mBq·m⁻³ 和 0.03 mBq·m⁻³, 表明在贵阳首先观测到福岛核泄漏污染的气团具备高空下沉和内陆属性, 而污染物出现的时间距事故发生至少有 13 d 以上, 具备全球尺度的大气环流输送特点.

图 2b 可见, 此时段贵阳地区的后向轨迹气团均来自我国西北和中亚地区, 跨越纬度在 40°~60°N 之间, 属于典型高空低压槽过境天气特征. 高空存在明显的下沉气流, 在贵阳观测⁷Be 的高浓度值同

样验证了这一事实. 该时段内观测到高浓度¹³¹I 和一定浓度的¹³⁷Cs, 显示了自 2011 年 3 月 11 日福岛发生核泄漏以来, 经过约 10 d 至 2 周左右的时间, 已完成了首波的全球的扩散传输, 再途经我国西北进入贵阳. 上述观测结果与已经报道的模拟和预测结果在时序上具有可比性(乔方利等 2011).

日本福岛地处冬、春季北半球高空急流所控制的纬度范围. 当核泄漏发生后, 高浓度¹³¹I 进入大气, 在近地边界层经过充分混合、扩散或对流进入自由大气高度, 并在强劲的高空急流的输送下, 快速地由西向东沿其所在的纬度区域向全球传输. 根据观测浓度并对¹³¹I 按照大约 1 个半衰期的衰变估计, 福岛第一次核泄漏进入大气环流扩散的¹³¹I 和¹³⁷Cs 浓度比约为 1300.

3.3 东亚区域尺度下福岛核泄漏物的直接传输

由于后向轨迹的转变(图 2c), 南亚低纬气团因占据了主要部分. 4.1—4.7 间在贵阳观测到的人为核素浓度明显下降, 而⁷Be 和²¹⁰Pb 等天然核素的浓度也比较低. 但这种状况在尔后的一周(4.7—4.14) 又发生改变: 其间有 2 d 的气流轨迹经过福岛上空(图 2d), 在贵阳观测到的¹³¹I 和¹³⁷Cs 浓度再明

显上升,特别是 ^{137}Cs 浓度的明显增大,上升至 $0.07\text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$;同时,来自东北亚高空的下沉气流显然也增大了天然核素 ^7Be 和 ^{210}Pb 的浓度.由图2d及贵阳观测人为核素浓度的变化可以看出,尽管日本在我国的下风向,但是在特定的天气系统下,福岛的核泄漏物仍然可以直接输送到我国.郑向东等

(2004)早年在临安臭氧探空观测数据后向轨迹的诊断分析也曾注意到,来自韩国和日本的污染可以影响到我国东部地区.本文的观测和分析进一步说明这种污染直接传输影响到我国西南地区的可能性.

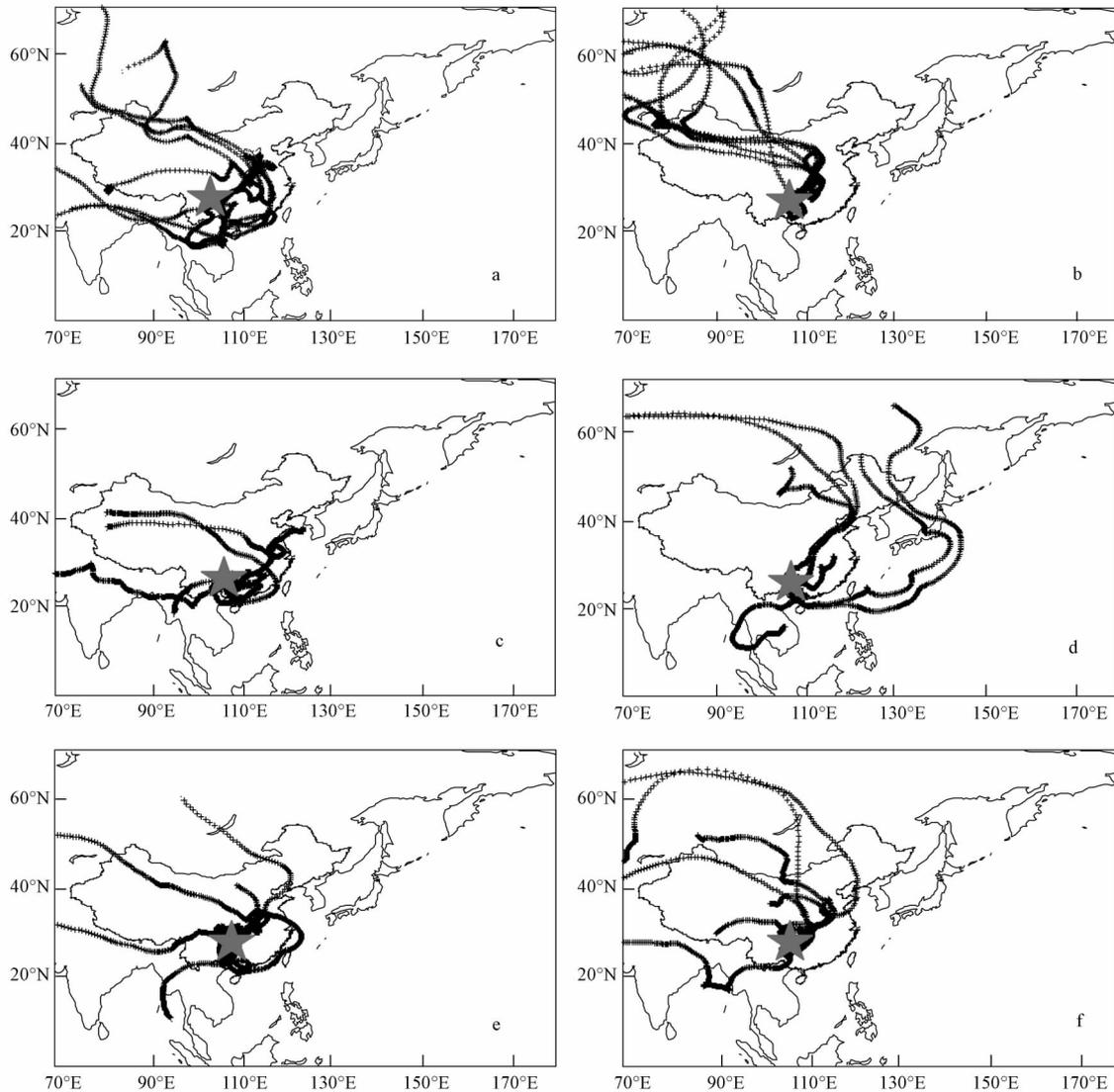


图2 贵阳(2011-3-17—4-28期间)315 h后向轨迹的分布(五星点为贵阳)(a: 3.17—24; b: 3.25—31; c: 4.1—7; d: 4.8—14; e: 4.15—21; f: 4.22—28)

Fig. 2 Distribution of back trajectories(2011-3-17—4-28) over 315 hours at Guiyang site in China

此现象还表明福岛第二次核泄漏(乏燃料水池的部分放射性物质释放)中,较长半衰期核素 ^{137}Cs 可能更加明显.

第五周(4.14.—4.21.)及尔后的观测表明,虽然 ^7Be 和 ^{210}Pb 浓度仍然指示出高空气团的弱下沉和内陆地域的影响;但随着气流的改变(图2e和图

2f)、 ^{131}I 经过4个半衰期的衰减和稀释及 ^{137}Cs 的扩散稀释变化,在贵阳观测到的人为核素空气浓度已经明显下降.

4 结论(Conclusions)

2011年日本福岛核泄漏污染物在全球尺度的

大气环流下,通过两条输送途径进入到我国西南地区。

1) 第一条输送路径是¹³¹I 及¹³⁷Cs 通过全球尺度的扩散,于3月下旬自中亚和我国西北地区上空进入贵阳。在环流区位上,这个季节福岛位于亚洲大陆冬季风区控制下的中国下风方位,污染物需要经过近于环球一周的扩散途径,滞后约10 d至2周左右。这一事实表明进入大气的核污染物通过大气环流传输,产生全球性的扩散影响。

2) 第二波污染物是在4月中旬,尽管福岛作为我国下风向的地点,但因东北亚高空低压天气系统的挤压南移,福岛核污染气团被输送到低纬度地区并在东南暖湿气流的影响再次输送到我国的西南地区。这一输送时间短,具有显著的东亚区域尺度特征。

责任作者简介:万国江(1940—),男,研究员,核子地球化学专业,主要从事区域环境演变、环境过程和核素示踪研究, Tel: 0851-5891298, E-mail: wanguojiang@vip.skleg.cn.

参考文献(References):

- Dörr H, Münnich K O. 1990. ²²²Rn flux and soil air concentration profiles in West-Germany. Soil ²²²Rn as a tracer for gas transport in the unsaturated soil zone [J]. *Tellus B*, 42: 20-28
- Draxler R R. 2003. Evaluation of an ensemble dispersion calculation [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 42: 308-317
- Feely H W, Larsen R J, Sanderson C G. 1989. Factors that cause seasonal variations in Beryllium-7 concentrations in surface air [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 9(3): 223-249
- Holton J R, Haynes P H, McIntyre E M, et al. 1995. Stratosphere-troposphere exchange [J]. *Reviews of Geophysics*, 33: 403-439
- Krishnaswami S, Seidemann D E. 1988. Comparative study of ²²²Rn, ⁴⁰Ar, ³⁹Ar and ³⁷Ar leakage from rocks and minerals: Implications for the role of nanopores in gas transport through natural silicates [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 52: 655-658
- Lal D, Peters B. 1967. Cosmic Ray Produced Radioactivity on the Earth. In: *Handbuch der Physik* [J]. New York: Springer-Verlag. 46(2): 551-612
- Lee H N, Wan G J, Zheng X D, et al. 2004. Measurements of ²¹⁰Pb and ⁷Be in China and Their Analysis Accompanied with Global model calculations of ²¹⁰Pb [J]. *JGR*, 109, D22203, doi: 10.1029/2004JD005061
- 乔方利,王关锁,赵伟,等. 2011. 2011年3月日本福岛核泄漏物质运输扩散路径的情景模拟和预测 [J]. *科学通报*, 56(12): 964-971
- Qiao F L, Wang G S, Zhao W, et al. 2011. Predicting the spread of nuclear radiation from the damaged Fukushima Nuclear Power Plant [J]. *Chinese Sci Bull*, 56(8): 1890-1896
- Santschi P H. 1983. Radioisotopes in aquatic sciences [J]. *EAWAG/News*, (14-15): 1-6
- Turekian K K, Nozaki Y & Benninger L K. 1977. Geochemistry of atmospheric radon and radon products [J]. *Ann Rev Earth Planet Sci* 5: 227-255
- Wan G J, Appleby P G. 1999. Radionuclides in ecological systems. (A. Farina ed). 《Perspectives in Ecology, A glance from the VII International Congress of Ecology (INTECOL), Florence, Italy, 19-25 July 1998》. [M]. Leiden: Backhuys Publishers. 369-379
- 万国江, Appleby P G. 2000. 环境生态系统散落核素示踪研究新进展 [J]. *地球科学进展*, 15(2): 172-177
- Wan G J, Appleby P G. 2000. Progress on Fallout Radionuclides as Tracers in Environ-Ecological Systems [J]. *Advance in Earth Sciences*, 15(2): 172-177 (in Chinese)
- 万国江,杨伟,王仕禄,等. 2005. 黔中地区近地面空气²¹⁰Pb的高浓度U型分布特征 [J]. *科学通报*, 50(14): 1498-1502
- Wan G J, Yang W, Wang S L, et al. 2005. Characteristics of U-pattern distribution of high-concentration ²¹⁰Pb in surface air at central Guizhou, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(16): 1750-1755
- 万国江,郑向东, Lee H N, 等. 2006. 瓦里关山与观风山近地面空气⁷Be浓度季节性变化对比 [J]. *地球化学*, 35(3): 257-264
- Wan G J, Zheng X D, Lee H N, et al. 2006. A comparison for seasonal variation of ⁷Be concentrations in surface air between Mt. Waliguan and Mt. Guanfeng [J]. *Geochimica*, 35(3): 257-264 (in Chinese)
- Wan G J, Lee H N, Wan E Y, et al. 2008. Analyses of ²¹⁰Pb concentrations in surface air and in rain water at the central Guizhou, China [J]. *Tellus B*, 60(1): 32-41
- 万国江,万恩源,王仕禄,等. 2009. 冰雪凝冻天气对气溶胶的传输影响—基于贵阳观风山大气²¹⁰Pb和⁷Be观测 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 28(增刊): 500-500
- Wan G J, Wan E Y, Wang S L, et al. 2009. Aerosol transfers during freezing weather — Based on the observation of ²¹⁰Pb and ⁷Be concentrations in surface air at Mt. Guanfeng, Guiyang, China [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry* 28(Suppl): 500-500 (in Chinese)
- 万国江,郑向东, Lee H N, 等. 2010a. 黔中气溶胶传输的²¹⁰Pb和⁷Be示踪: I. 周时间尺度的解释 [J]. *地球科学进展*, 25(5): 492-504
- Wan G J, Zheng X D, Lee H N, et al. 2010a. ²¹⁰Pb and ⁷Be as tracers for aerosol transfers at center Guizhou, China: I. The explanation by weekly interval [J]. *Advances in Earth Science*, 25(5): 492-504 (in Chinese)
- 万国江,郑向东, Lee H N, 等. 2010b. 黔中气溶胶传输的²¹⁰Pb和⁷Be示踪: II. 月及年时间尺度的剖析 [J]. *地球科学进展*, 25(5): 505-514
- Wan G J, Zheng X D, Lee H N, et al. 2010b. ²¹⁰Pb and ⁷Be as tracers for aerosol transfers at center Guizhou, China: II. The interpretation by monthly and yearly intervals [J]. *Advances in Earth Science* 25(5): 505-514 (in Chinese)
- Zanis P, Schuepbach E, Gäggeler H W, et al. 1999. Factors controlling

- beryllium-7 at Jungfraujoch in Switzerland [J], *Tellus B*, 51(4): 789-805
- 郑向东, 陈尊裕, 崔宏, 等. 2004, 长江三角洲地区春季低空大气臭氧垂直分布特征 [J]. *中国科学 D 辑*, 32(12): 1184-1192
- Zheng X D, Chan C Y, Cui H. *et al.* 2004. Characteristics of vertical ozone distribution in the lower troposphere in the Yangtze River Delta at Lin'an in the spring of 2001 [J]. *Sci in China Ser (D Earth Sci)*, 48(9): 1519-1528
- 郑向东, 万国江, 汤洁, 等. 2005. 瓦里关山近地面气溶胶中⁷Be 和²¹⁰Pb 的观测及其对臭氧浓度变化的示踪 [J]. *科学通报*, 50(1): 72-76
- Zheng X D, Wan G J, Tang J, *et al.* 2005. ⁷Be and ²¹⁰Pb radioactivity and implications on sources of surface ozone at Mt. Waliguan [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(2): 167-171
- Zheng X D, Wan G J, Chen Z Y, *et al.* 2008. Measurement and meteorological analysis of ⁷Be and ²¹⁰Pb in aerosol at Waliguan Observatory [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25(3): 401-416
- 郑向东, 万国江, 汤洁. 2011. ⁷Be 和²¹⁰Pb 示踪研究瓦里关山近地面 O₃ 和 CO₂ 浓度变化特征 [J]. *中国科学 D 辑(地球科学)*, 41(4): 562-572
- Zheng X D, Wan G J, Tang J. 2011. Source characteristics of O₃ and CO₂ at Mt. Waliguan Observatory, Tibetan Plateau implied by using ⁷Be and ²¹⁰Pb [J]. *Sci China Earth Sci*, 54: 550-560, doi: 10.1007/s11430-010-4121-x