

^{210}Pb 和 ^7Be 近地面空气浓度和沉降量的观测 及其对大气物质传输的解释

万国江¹ 郑向东² H. N. Lee³ 万恩源¹
王仕禄¹ 杨伟¹ 汤浩² 王长生¹ 黄荣贵¹ 刘鹏⁴

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 北京 100081
3. Environmental Measurements Laboratory, New York, NY 10014 - 7447, USA
4. 中国气象局瓦里关山全球本底观象台 西宁 810001

摘要 自2001年12月连续逐周在贵阳观风山附近对近地面空气 ^{210}Pb - ^7Be 浓度和沉降量的观测表明:区域性降水和气温制约 ^{210}Pb 具高浓度“U”型年分布;数值模拟显示出全球空气 ^{210}Pb 高浓度区和高沉降通量环带分布,印证了洱海和红枫湖沉积物 ^7Be 蓄积的模拟结果; ^7Be 年均浓度显示低纬度、较高海拔地区的预期水平,短周期波动反映强下沉气流和低海拔上升气团影响分别在观风山和瓦里关山的滞后性;2008年冰冻极端天气过程 ^{210}Pb - ^7Be 空气浓度同步低谷及气溶胶低浓度与高比活度耦合。

关键词 区域环境 大气物质传输 环境核素示踪 地球化学过程 云贵高原

一、引言

无论地球大气、河湖海洋水体及其沉积物、地表浮土及各种土壤,还是各种动植物机体及人体内部,都普遍存在着放射性核素。人类关于地质历史演变过程、地质营力作用规律和地球化学环境演化的许多知识都源于放射性核素的示踪应用。在现代环境和生态科学领域中,在认识区域环境变化、环境影响及污染物传输过程和速率方面,放射性核素更具有重要的示踪价值。此外,作为环境质量的一个重要指标,同样需要了解环境遭受放射线辐照的影响,评价放射性核素产生的污染程度及其对人体健康的可能影响^[1]。

随着区域环境综合研究的深入,一些深层次的前缘科学问题急需解决。诸如:如何辨识人为释放与天然形成的污染物?在环境中污染物的性质和赋存状态如何转化?污染物在环境中具有什么样的运移途径和速率?污染物在环境中的积累类型和定量关系?污染物在环境中的降解过程和速率?一些污染事件发生时的环境条件等。化学元素或污染物的环境生物地球化学过程成为一个重要的研究领域。

在认识区域环境质量和全球环境变化中,查明环境物质(或污染物)的传输途径、速率和通量是最重要、最基础的科学判据。环境中存在的放射性核素具有3个基本来源:①原始的放射性核素;②宇宙射线作用产生的放射性核素;③人类社会经济活动过程中产生并释放到环境中的放射性核素。它们具有确知的物源和输入通量、固有的衰变特征和衰变常数。环境放射性核素的不同来源和不同半衰期,决定了它们之间在种类组合和赋存分布的明显差异,是示踪环境生物地球化学过程和标记环境变化速率的重要基础,提供了示踪环境物质的累积、交换、运移、转化过程和速率的前提^[2]。

环境核素示踪原理的研究主要包括:它们的生成来源、气溶胶微粒吸附、空气中的配比关系、大气传输过程、全球分布状况、干湿沉降作用、土壤微粒迁移与滞留、生物亲合作用、水体转移和沉降、沉积后作用及沉积归宿等。许多环境过程之间存在有重要的内在联系。认识环境核素在运移过程各个环节的作用机理、速率和通量是示踪应用的基础。特别是它们在不同地域空气中的浓度分布变化和沉降通量是整个运移过程的重要环节,对污染物全球扩散模型的建立和验

证、沉积过程示踪和沉积计年、流域侵蚀示踪对比,以及生态系统受天然辐照的评价等多个领域都是关键的依据。

^{210}Pb (半衰期为 22.3 年)、 ^7Be (半衰期为 53.3 d) 和 ^{137}Cs (半衰期为 30.3 a) 是环境中广泛存在的放射性核素,对于典型区域及全球环境物质传输途径具有重要示踪价值。通过这些核素在近地面空气浓度的长期观测,对于检验全球浓度分布和模拟沉降通量变化具有特殊意义。全球变化欧洲研究网于 1999 年 11 月在瑞典 Uppsala 召开“核素示踪全球物质循环国际研讨会”。

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斜坡中部,纬度较低、海拔较高,系青藏高原向东部丘陵平原过渡的斜坡面上的内陆区。该区地面起伏崎岖,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。我们继前期在云贵深水湖泊沉积作用和流域侵蚀过程方面积累丰硕翔实的资料后,为进一步了解全球性扩散污染物的区域分布差异,认识环境物质(及污染物)在这一典型环境区域的扩散运移而开展了长期连续观测。本文拟简介其观测结果和几点解释。

二、采样的科学性和分析数据的国际可比性是环境核素示踪应用的关键

对于大气核素运移研究,我们的观测点位于贵阳观风山侧($106^{\circ}43'22.1''\text{E}$, $26^{\circ}34'19.3''\text{N}$, a. s. l: 1080 m)。采样设备置于环境地球化学国家重点实验室楼顶,距地面约 30 m。作为比对的观测点还有位于青藏高原东北部的瓦里关山大气本底观象台(GAW)(100.898°E , 36.287°N , a. s. l: 3810m)。

采样是利用美国环境测量实验室(EML)测量低水平核素的表层大气采样系统。¹Fuji型采样器配备有 $20.3\text{cm} \times 25.4\text{cm}$ 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,有效过滤面积为 407cm^2 。采样流速为 $0.4 \sim 1.6$ 。每周采集 1 个样品,每个样品的采样时间约为 168h。每个样品的空气量校正到国际标准体积为 $5.9 \times 10^3 \text{m}^3 \sim 1.3 \times 10^4 \text{m}^3$ 。大气降尘样品转移至滤膜后测量;降水样品用自行设计加工的降水收集器采集,收集面积 0.48,以确保足够的样品量。降水样品经高倍浓缩后再转移至滤膜或瓶装测量或经 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 共沉淀后测量。

^{210}Pb 和 ^7Be 活度系用美国 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封装成一定形状直接置于 GR2019 同轴高纯锗(HPGe)探测器计数测量。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 $3.6 \times 10^4 \text{s} \sim 1.8 \times 10^5 \text{s}$ 。 ^{210}Pb 和 ^7Be 计数峰的位置分别为 46.5 KeV 和 447.7 KeV,计数测量按 1 个标准差控制,样品测量实际误差为 $\pm 1.4\% \sim \pm 6.4\%$ 。多核素放射性标准源由美国同位素产品实验室提供,并以效率曲线为基础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,部分聚丙烯网滤膜气溶胶样品经等份分割后,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(HDH)与美国环境测量实验室(EML)同步进行对比测量。两个实验室测量数据散点的具有很好的相关性(图 1)。

三、贵阳观风山近地面空气 ^{210}Pb 和 ^7Be 浓度的总体趋势特征

前期研究表明:云贵湖泊沉积物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度和累计值较其它地区高,土壤中 ^{226}Ra 也较高^[3-6]; ^{210}Pb 在中国西南地区近地面空气中的浓度明显地高^[7]。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 12 月 20 日-2006 年 10 月 3 日及 2008 年 1 月 1 日-2008 年 12 月 31 日期间,

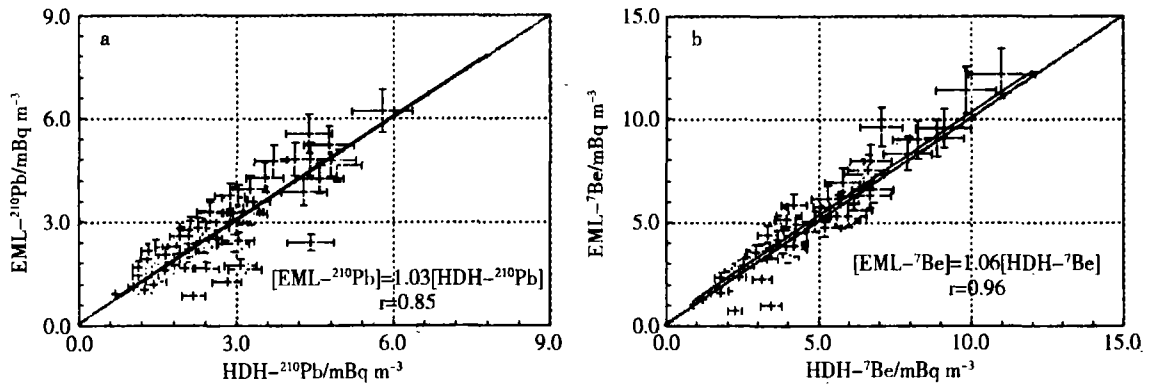


图1 HDH/CAS与EML/USA对贵阳观风山近地面空气 ^{210}Pb 和 ^7Be 浓度测量结果对比
连续逐周在贵阳观风山附近采集近地面空气滤膜样品和降水样品进行 ^{210}Pb 和 ^7Be 观测^[8,9]。图2
给出其近地面空气 ^{210}Pb 和 ^7Be 浓度的变化趋势、同期降水量和气温变化。

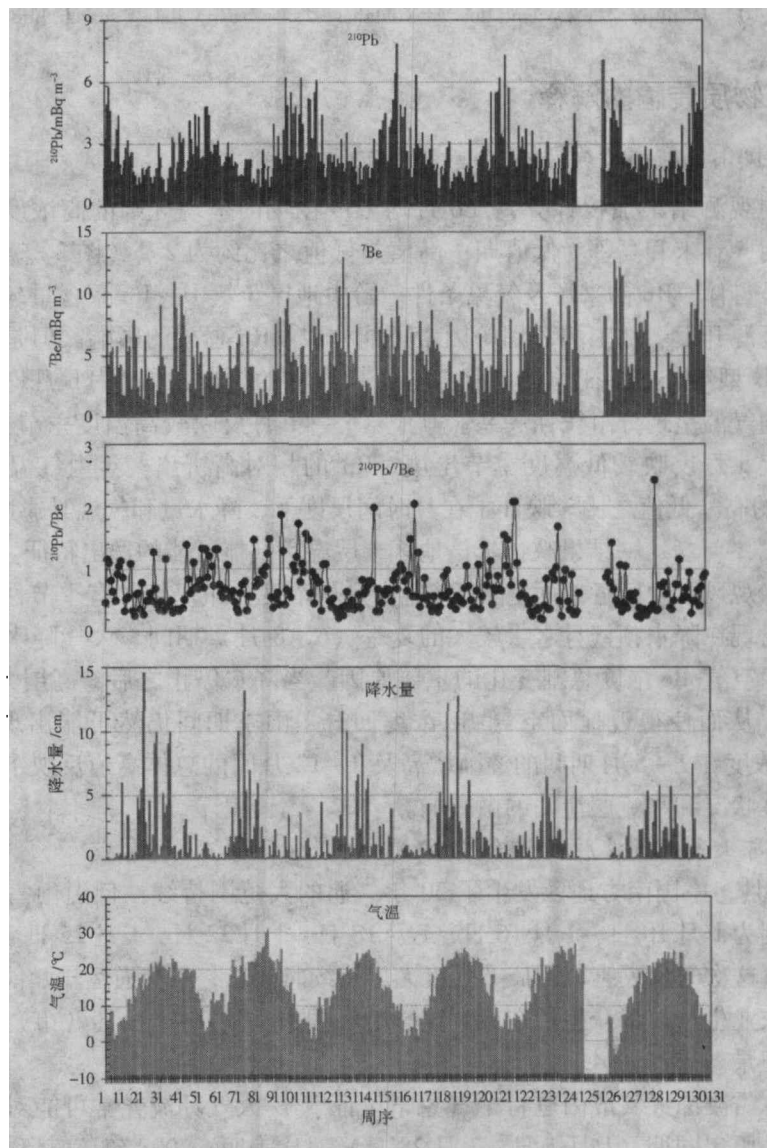


图2 贵阳观风山近地面空气 ^{210}Pb 和 ^7Be 浓度及比率逐周变化趋势与同期降水量和气温对比
(2001年12月20日-2006年2月7日, 2008年1月1日-2008年12月31日)(据文献^[8,9]及待刊资料综合整理)。横坐标为采样日期的周序; 第1周的样品2001年12月20日~2001年12月27日依此类推

贵阳观风山近地面空气 ^{210}Pb 的浓度具有相似的年际周期性变化特征;因气象条件变化导致年内有2~6周变幅不等的短周期变化;在95%的置信区间,几年间的平均变幅约为 $0.5\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 。年均浓度 $2.8\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}\pm 0.6\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$,为全球若干站点中最高平均浓度值的近4倍(表1)。 ^{210}Pb 月均浓度随降水量呈现良好的幂函数关系,并随气温呈现良好的分组线性关系,反映出 ^{210}Pb 浓度变化主要由区域性的降水和气温制约^[8,9]。 ^7Be 的年均浓度($4.8\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}\pm 0.6\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$)与全球高海拔站点长期观测的平均值相当(表1),约为北半球中纬度对流层顶部附近 ^7Be 浓度值(18.0)的1/3.6,显示出低纬度、较高海拔地区的预期水平。

表1 贵阳观风山近地面空气 ^{210}Pb 和 ^7Be 年均浓度观测结果 单位: $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$

核素	2002	2003	2004	2005	2006	2008	平均	全球若干站点多年平均 ¹⁾
^{210}Pb	2.5 ± 0.5	2.8 ± 0.7	3.0 ± 0.7	2.6 ± 0.6	2.6 ± 0.6	2.8 ± 0.8	2.8 ± 0.6	0.02 - 0.71
^7Be	4.5 ± 0.9	3.9 ± 0.8	5.4 ± 1.0	4.4 ± 0.7	5.3 ± 1.6	5.4 ± 1.4	4.8 ± 0.6	3.54 - 7.10

注:根据文献[10]从 http://www.eml.doe.gov/databases/sasp/sasp_data_search.htm 获得资料进行整理。

四、对大气物质传输的解释

(一) 贵阳观风山近地面空气 ^{210}Pb 呈现高浓度U型年分布

根据多年逐周观测结果加权计算, ^{210}Pb 月均浓度在年内呈现规则的高浓度“U”型分布特征。冬季为高值期,春末和夏季为低值期;高值与低值之比约为2.2(图3)。空气 ^{210}Pb 浓度变化的制约性因素是母体 ^{226}Rn 的来源及气象条件。黔中地区土壤U-Ra系含量较高,碳酸盐岩溶蚀作用,煤-磷资源开发、加工和利用等因素可能构成 ^{222}Rn 释放的影响。但是,制约黔中地区空气 ^{210}Pb 高浓度U型年分布特征的重要因素还在于 ^{222}Rn 的析出条件。 ^{210}Pb 月均浓度随降水量呈幂函数关系,并随气温呈现分组线性关系。其中:6-11月反映较高温度季节土壤 ^{222}Rn 的相对低释放;12-次年5月反映较低温度季节土壤 ^{222}Rn 的相对高析出。年内气温和降水变幅还制约 ^{210}Pb 月均浓度的高-低值之比。映证了在月时间尺度下,降水量和气温是影响土壤(岩石) ^{222}Rn 析出的主要因素^[8,9]。这一结果映付了该地区土层温室气体可能的逸出特征。

图3还可见,观风山地区近地面空气 ^7Be 年内月均浓度分布仍然具有季节性变化。月均浓度明显降低的现象出现在降水频繁且水量较大的夏季(6-8月)期间。大气降水对气溶胶的清洗可能是导致近地面空气 ^7Be 浓度急剧变化的重要原因。当降水停止之后,高层大气的高值 ^7Be 输送入近地面空气,从而使得近地面空气 ^7Be 浓度回升,雨季期间仍然可能出现 ^7Be 较高浓度周值。 ^7Be 年内月均浓度在1-5月期间的逐渐增高及9-12月间的总体高值反映了该地区降水量相对较少季节的总体状况和平流层泄漏的微影响。

(二) 冰雪凝冻天气对气溶胶的传输影响

2008年1-2月,中国南方地区发生了50年一遇的大范围持续性低温雨雪冰冻极端天气过程。其时间段分别为1月10日-1月16日,1月18日-1月22日,1月25日-1月29日,1月31日-2月2日。这次气象灾害范围广、强度大、持续时间长,对交通运输、能源供应、电力传输、通讯设施、农业生产、群众生活造成严重影响和损失。贵州43个县(市)的冻雨天气持续时间突破了历史记录。

丁一汇等对冰雪凝冻天气成因进行了气象学论证^[11]。大气环流异常可能对气溶胶物质的传输构成明显影响。历年同期(1月1日-2月28日)对比表明:2008年该时段低温和微弱降水,观风山地区空气 ^{210}Pb 与 ^7Be 浓度具同步低谷状态;而气溶胶低浓度又耦合了 ^{210}Pb 和 ^7Be 高比活度特征(图4)。2008年该时段 ^{210}Pb 和 ^7Be 的沉降量分别为 $23.5\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $62.6\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$,仅分

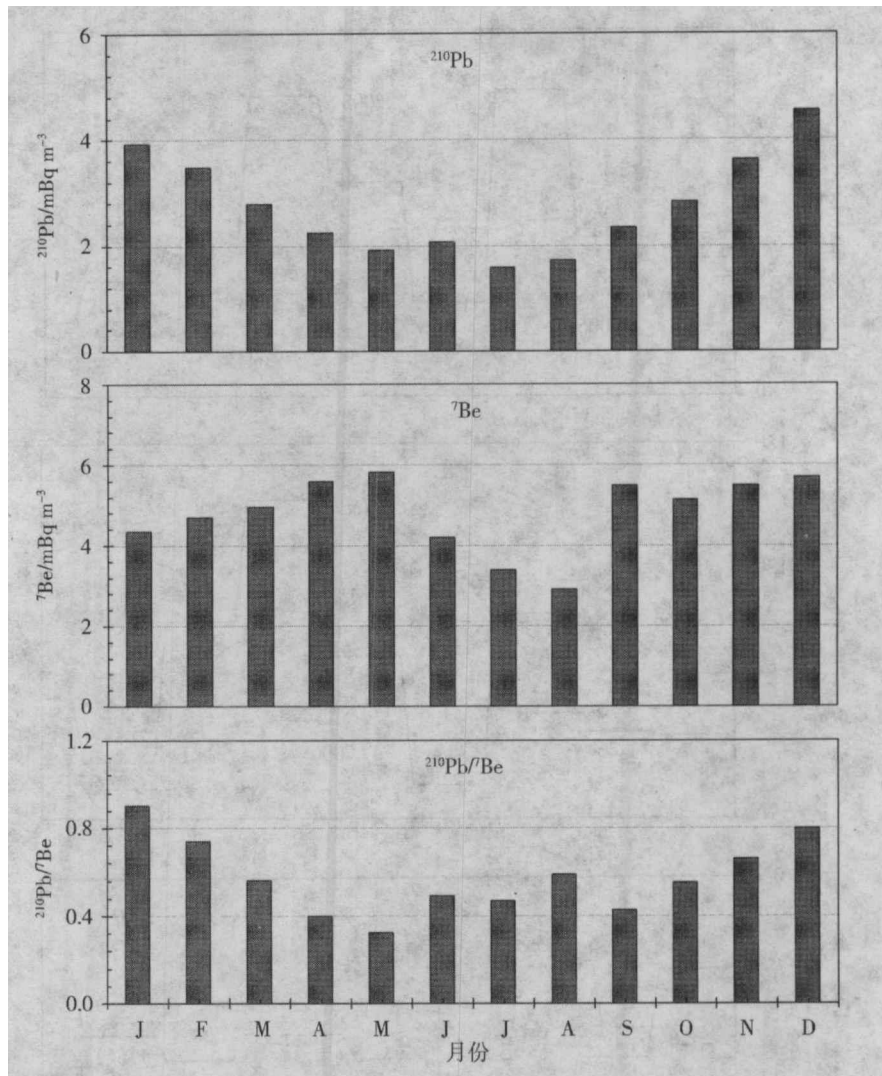


图3 贵阳观风山近地面空气 ^{210}Pb 和 ^7Be 月均浓度比较(2001年12月20日-2006年2月7日,2008年1月1日-2008年12月31日)(据^[6,9]及特刊资料综合整理)

别为2006年同期的61%和75%,为2009年同期的39%和63%。上述 ^{210}Pb 和 ^7Be 分布特征不仅表明雨雪冰冻极端天气过程对气溶胶传输的明显影响;同时,也显示出大气 ^{210}Pb 和 ^7Be 对极端天气过程的特殊示踪意义。

(三) 气流强下沉影响在观风山的滞后性和低海拔气团上升影响在瓦里关山的滞后性

基于宇宙线变化可能引起 ^7Be 产率变化,太阳黑子活动从源头上对 ^7Be 浓度产生重要影响,业已建立11年主周期、2~3年周期和1年周期。而近地面空气中 ^7Be 的浓度不仅受产率控制,还受平流层和对流层之间的物质交换、对流层垂直方向的物质输送、不同纬度之间水平方向的物质输送、干湿沉降等因素的综合影响^[12-15]。观风山地区近地面空气中 ^7Be 浓度呈现出周时间尺度的剧烈变化,连续不断的峰-谷交替出现(图2)。这种频繁的频率变化不仅表明 ^7Be 作为环境变化示踪剂的敏感特征,也说明影响 ^7Be 浓度变化的各种因素之间相互制约的复杂性。

瓦里关山大气本底观象台特殊的内陆、高海拔和中纬度区位,注定了它受平流层向下输送的敏感性。基于瓦里关山和观风山区位和海拔差异,对比观测其近地面空气 ^7Be 浓度变化不仅有助于区域尺度大气和地表环境过程的示踪,而且对认识全球尺度的污染物传输也具有重要意义。

图中,横坐标为采样日期的周序。第1周标记2002年10月9日~2002年10月16日的样

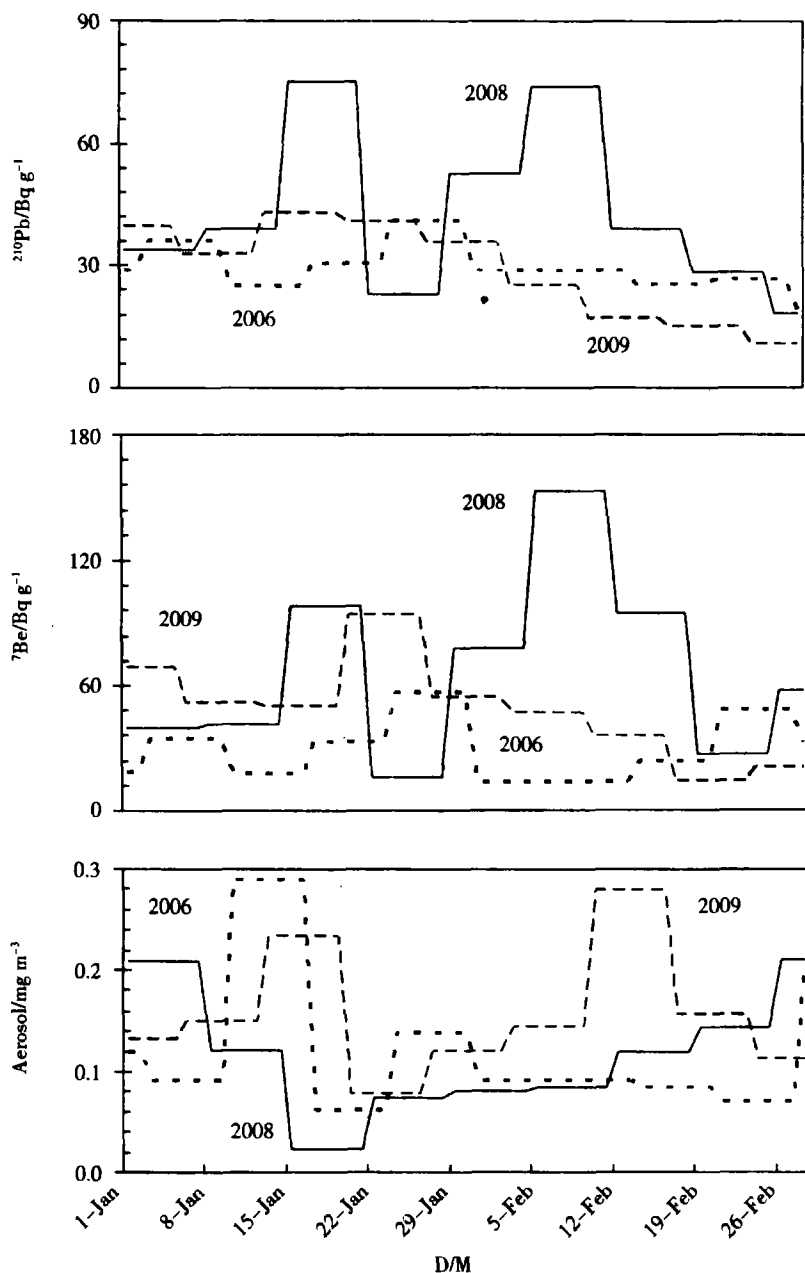


图4 2008年雨雪冰冻极端天气过程中贵阳观风山气溶胶²¹⁰Pb与⁷Be比活度变化

品, 相继为第2周、第3周……

2002年10月9日至2004年1月21日间, 在瓦里关山和观风山同步连续进行每周1个大气飘尘样品的采集观测表明, 两个站点⁷Be浓度逐周变化趋势总体相似, 具有2~6周的短周期波动, 显示出气流强下沉影响在观风山的滞后性和低海拔气团上升影响在瓦里关山的滞后性(图5)。2003年, 瓦里关山和观风山⁷Be的年均浓度分别为 $14.7\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2} \pm 1.5\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $3.9\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2} \pm 0.8\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2}$ 。⁷Be产率与中子通量模拟计算一致(瓦里关山顶部中子通量约较观风山高8倍,⁷Be浓度较观风山高2.8倍); 近地面空气⁷Be浓度与同期降水量的比较表明, 在周时间尺度上, 两者呈现出较好的预期负相关; 而在月均尺度上, 两地⁷Be浓度变化较稳定^[16]。

此外, 瓦里关山近地面空气⁷Be和²¹⁰Pb浓度具天气时间尺度的短期振荡特征,²¹⁰Pb在夏季有明显的低值, 而⁷Be的季节性特征并不明显; 与全球其他高山站点的结果相比, 瓦里关地区⁷Be、²¹⁰Pb浓度高, 近地面臭氧与⁷Be浓度变化趋势一致, 臭氧与⁷Be/²¹⁰Pb关系比臭氧与⁷Be间

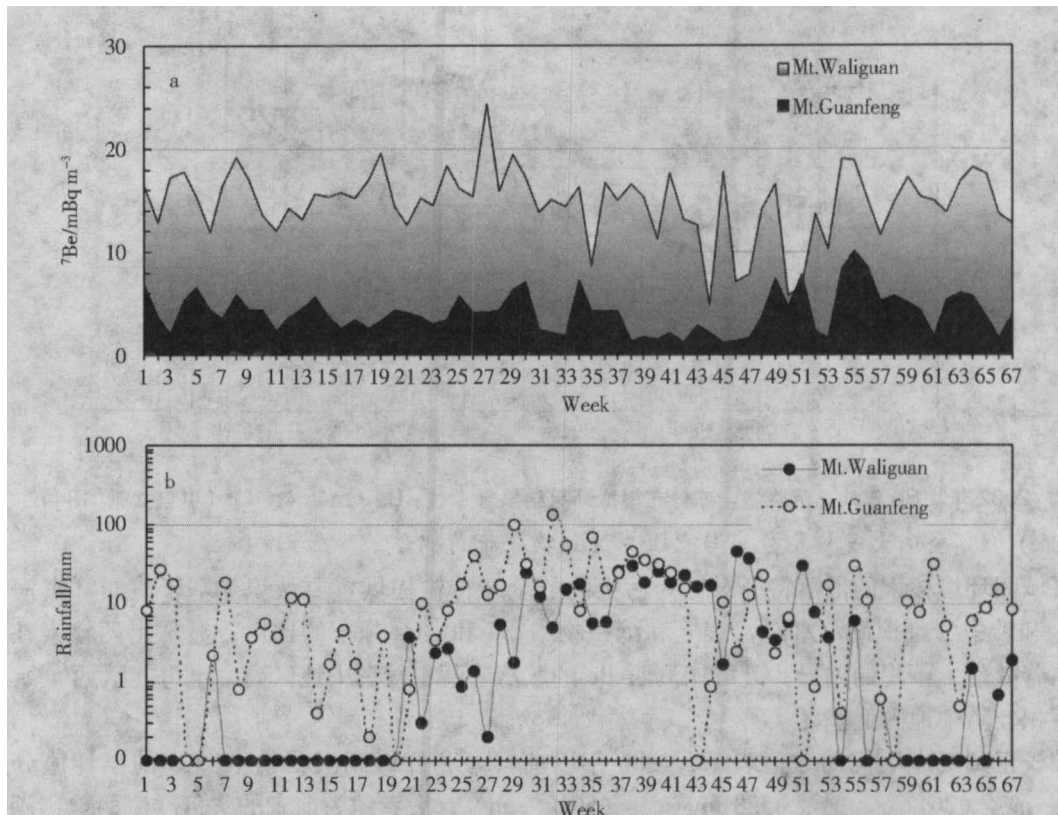


图5 瓦里关山与观风山近地面空气中 ^7Be 浓度逐周对比 (a) 及同期降水变化 (b) (2002年10月9日~2004年1月21日) (引自文献^[16])

关系具有更高的相关性；垂直输送对该区近地面臭氧的收支平衡有较显著的贡献^[17]。

(四) 全球近地面空气 ^{210}Pb 年均浓度和年均沉降量分布特征

利用 Météo - France 开发的大气化学传输模型 (MOCAGE) 模拟全球尺度的大气传输, 获得近地面空气 ^{210}Pb 年均浓度和年均沉降量的模拟结果^[18], 显示出中国、俄罗斯和北部非洲等地区近地面空气 ^{210}Pb 的高浓度分布区域 (图6) 和北非 - 南亚 - 东北亚 - 南美 ^{210}Pb 的高沉降通量环带分布特征 (图7)。

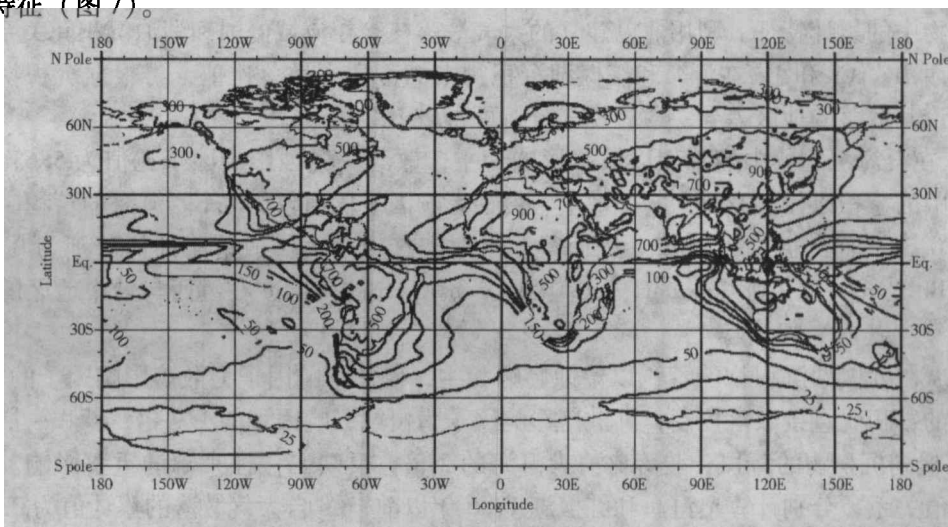


图6 2002年近地面空气 ^{210}Pb 年均浓度全球分布模拟计算结果 (单位: $\mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$) (引自文献^[18])

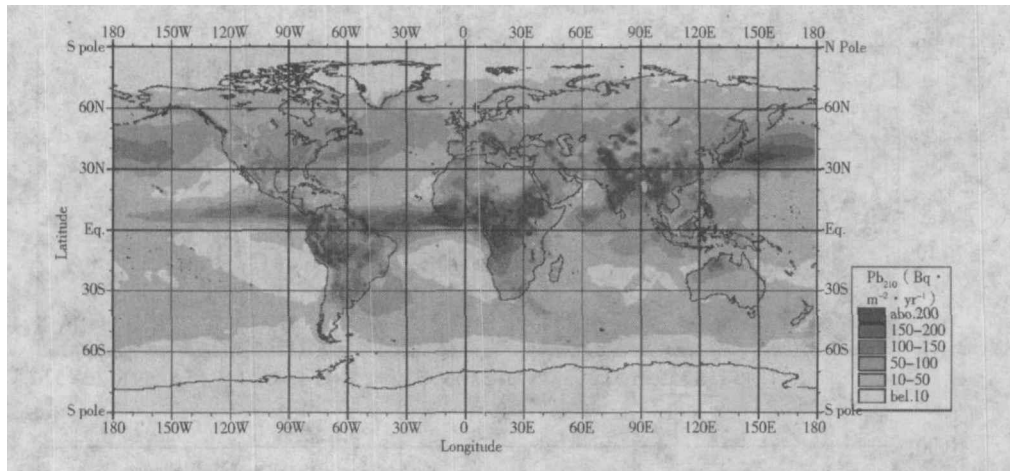


图7 2002年²¹⁰Pb年均总沉降量全球分布模拟计算结果(单位: $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) (引自文献[18])

(五) ²¹⁰Pb 全球大气模拟分布与表土-沉积物分布的耦合

区域间环境核素的散落特征对比为污染物的全球传输提供重要认识。基于滇西(洱海等汇水区)和黔中(红枫湖汇水区)表土和沉积物中⁷Be和¹³⁷Cs分布的比对,显示出两核素在两地区存在着散落-蓄积的差异:既可能滇西⁷Be的散落-蓄积较黔中地区高,也可能滇西¹³⁷Cs的散落-蓄积较黔中地区低。

按校正到沉降年代的数值表示,1986年以前洱海和红枫湖沉积物中¹³⁷Cs的累计值分别为 $519\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \pm 26\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ 及 $3528\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \pm 50\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$,后者约为前者的7倍。滇西地区湖泊沉积物中¹³⁷Cs的蓄积明显低于黔中地区^[19-21]。⁷Be在洱海和红枫湖沉积物中主要分布在沉积物顶部2cm深度以内,其累计值具有两点重要差异:①洱海沉积物中⁷Be的累计值($237\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \pm 73\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$)远较红枫湖沉积物中的累计值($783\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \pm 44\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$)小;②红枫湖沉积物中⁷Be的累计值远高于其汇水区表土中累计值的平均水平,而洱海沉积物中⁷Be的累计值较其汇水区表土的累计值小或相当。这不仅说明黔中地区流域侵蚀严重,表土中的⁷Be可能随土粒搬运进入湖底沉积物;而滇西地区表层土粒的选择性侵蚀不够明显^[19-21]。

大气散落核素在湖泊沉积物中的蓄积是大气直接散落、流域表土侵蚀和湖泊沉积共同作用的结果。为认识核素散落蓄积的地区差异,需要从流域侵蚀与湖泊沉积作用的耦合关系上综合分析它们在沉积物中的累计特征。利用业已建立的大气散落核素在流域侵蚀和湖泊沉积间关系的示踪模型^[22],计算出¹³⁷Cs和⁷Be在洱海和红枫湖沉积物中的蓄积-散落比值,再根据沉积物中实测的累计值讨论其散落的地区差异。通过模式分析可得以下结论。

(1)⁷Be在洱海沉积物中的蓄积以散落影响为主,散落-侵蚀影响因子比值为5.6;而在红枫湖沉积物中的蓄积以侵蚀影响为主,散落-侵蚀影响因子比值仅为0.6。洱海的蓄积-散落比值小,仅为0.34;而红枫湖为1.02。进而得知洱海和红枫湖大气散落累计值分别为 $0.07\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2} \pm 0.02\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$ 及 $0.08\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2} \pm 0.01\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。这说明⁷Be在滇西与黔中地区的大气散落通量相近^[19-21]。

(2)¹³⁷Cs在红枫湖沉积物的蓄积以侵蚀影响为主,侵蚀影响因子为散落影响因子的4.3倍;洱海沉积物的蓄积受直接散落控制,其散落影响因子为侵蚀影响因子的1.9倍,蓄积-散落比值为0.49。红枫湖沉积物的蓄积-散落比值为洱海的2倍,反映出侵蚀来源的重要影响。根据蓄积-散落比值关系,分别计算出洱海和红枫湖1986年以前¹³⁷Cs自大气散落的累计值为 $0.11\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2} \pm 0.01\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$ 及 $0.37\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2} \pm 0.01\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。¹³⁷Cs在滇西地区的大气散落远小于黔中地区^[19-21]。

贵阳观风山降水观测的²¹⁰Pb和⁷Be沉降通量分别为 $0.020\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} \sim 0.024\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

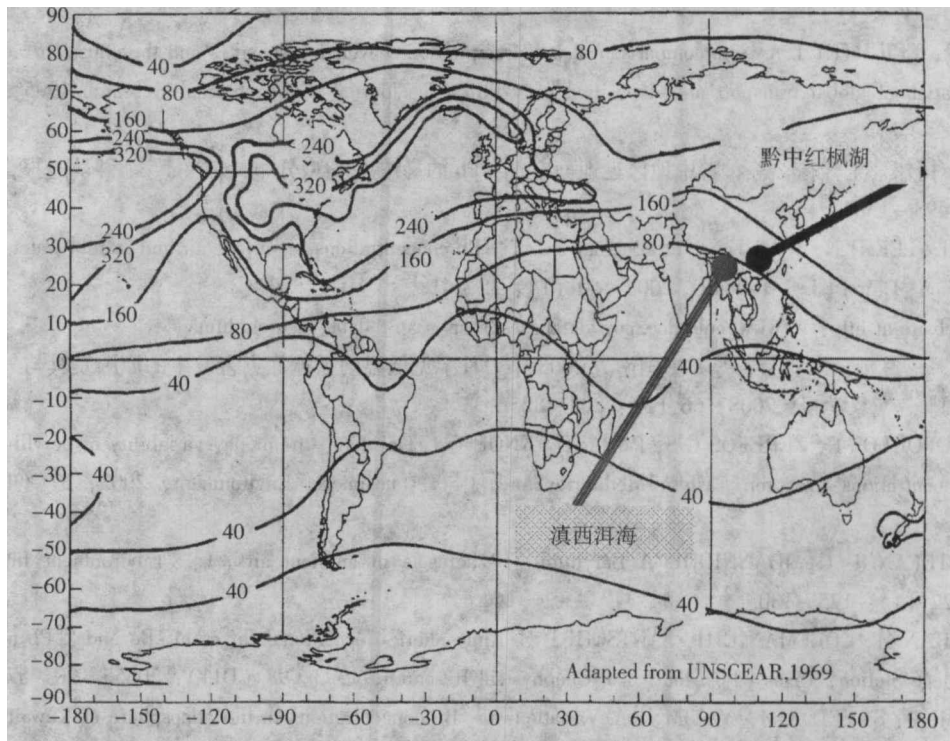


图8 ^{137}Cs 全球扩散散落累计值的区域分布图示 (原图引自文献[23])

a^{-1} 和 $0.05\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} \sim 0.07\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 与沉积物模式分析结果一致。

联合国原子能辐射效应科学委员会 (UNSCEAR) 曾就 ^{137}Cs 全球扩散散落累计值的区域分布给出模拟图示^[23]。滇西和黔中地区分别位于模拟累计值的不同等值线区域 (图8)。这与 ^{210}Pb 全球沉降通量分布模拟的区域性特点耦合。

环境问题是 21 世纪全球经济和社会可持续发展的主要障碍。解决区域性环境问题和预测全球性环境变化两个领域中存在的许多重要科学问题, 构成了环境学科发展的前沿。环境问题本身的研究就是环境演化的研究, 而在认识未来的时候, 更需要了解现在和过去的环境过程。地球环境是一个非常复杂的系统, 各圈层之间的相互作用在时间和空间上都无比精确。为适应国际科学发展的形势和高层次上满足我国环境保护事业的需要, 为了 21 世纪经济和社会可持续发展, 我们必须认识环境问题、维护环境质量, 必须深入开展环境演化与过程的研究。对于环境演化的核素示踪领域而言, 持久长期连续的系统观测、气溶胶载体的深入认识、多核素关系的综合比对以及 Pu 核素对 ^{137}Cs 的替代具有重要意义。

参考文献

- [1] WAN G J, APPLEBY PG. 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. Published by Backhuys of Leiden, NL, 1999, 369-379.
- [2] 万国江. 地球化学环境界面研究 [J]. 地球科学信息, 1987, (3): 11-14.
- [3] 万国江, 黄荣贵, 王长生, 等. 红枫湖沉积物顶部 ^{210}Po 垂直剖面的变异 [J]. 科学通报, 1990, 35 (8): 612-615.
- [4] 万国江. 现代沉积的 ^{210}Pb 计年 [J]. 第四纪研究, 1997, 17 (3): 230-239.
- [5] 徐经意, 万国江, 王长生, 等. 云南省泸沽湖、洱海现代沉积物中 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 的垂直分布及其计年 [J]. 湖泊科学, 1999, 11 (2): 110-116.
- [6] 胥思勤, 万国江. 云南省程海现代沉积物 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 的分布及计年研究 [J]. 地质地球化学, 2001, 29

- (1): 28 - 31.
- [7] LEE H N, FEICHTET J. An intercomparison of wet precipitation scavenging schemes and the emission rates of ^{222}Rn for simulation of global transport and deposition of ^{210}Pb [J]. *Journal of Geophysical Research*. 1995, 100: 253 - 270.
- [8] 万国江, 杨伟, 王仕禄, 等. 黔中地区近地面空气 ^{210}Pb 的高浓度U型分布特征 [J]. *科学通报*, 2005, 50 (14): 1498 - 1502.
- [9] WAN G J, LEE H N, WAN E Y, et al. Analyses of ^{210}Pb concentrations in surface air and in rain water at the central Guizhou, China [J]. *Tellus B*, 2008, 60 (1): 32 - 41.
- [10] EML website at http://www.eml.doe.gov/databases/sasp/sasp_data_search.htm.
- [11] 丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 中国南方2008年1月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系 [J]. *气象学报*, 2008, 66 (5): 808 - 825.
- [12] GERASOPOULOS E, ZEREFOS C S, PAPASTEFANOU C, et al. Low - frequency variability of beryllium - 7 surface concentrations over the Eastern Mediterranean [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37 (13): 1745 - 1756.
- [13] PAPASTEFANOU C, IOANNIDOU A. Beryllium - 7 aerosols in ambient air [J]. *Environment International*, 1996, 22 (1): 125 - 130.
- [14] BASKARAN M, COLEMAN C H, SANTSCI P H. Atmospheric depositional fluxes of ^7Be and ^{210}Pb at Galveston and College Station, Texas [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98 (D11): 20555 - 20 - 571.
- [15] AL AZMI D, SAYED A M, YATIM H A. Variations in ^7Be concentrations in the atmosphere of Kuwait during the period 1994 to 1998 [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2001, 55 (3): 413 - 417.
- [16] 万国江, 郑向东, LEE H N, 等. 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*, 2006, 35 (3): 257 - 264.
- [17] 郑向东, 万国江, 汤洁, 等. 瓦里关山近地面气溶胶中 ^7Be 和 ^{210}Pb 的观测及其对臭氧浓度变化的示踪 [J]. *科学通报*, 2005, 50 (1): 72 - 76.
- [18] LEE H N, WAN GUOJIAN, ZHENG XIANGDONG, et al. Measurements of ^{210}Pb and ^7Be in China and Their Analysis Accompanied with Global Model Calculations of ^{210}Pb [J]. *Journal of Geophysical Research*. 2004, 109. D22203, doi: 10.1029/2004JD005061.
- [19] 万国江, 白占国. 滇西与黔中表土及湖泊沉积物中 ^7Be 与 ^{137}Cs 对比 [J]. *第四纪研究*, 1999, 19 (4): 382.
- [20] 万国江, 白占国, 刘东生, 等. ^{137}Cs 在滇西与黔中地区散落的差异 - 青藏高原对滇西地区全球性扩散大气污染物散落屏蔽效应的推断 [J]. *第四纪研究*, 2001, 21 (5): 407 - 415.
- [21] BAI Z G, WAN G J, HUANG R G, et al. A Comparison on Accumulation Characteristics of ^7Be and ^{137}Cs in Lake Sediments and Surface Soils in Western Yunnan and Central Guizhou, China [J]. *CATENA*, 2002, 49: 253 - 270.
- [22] WAN G J, SANTSCI P H, STURM M, et al. Natural (^{210}Pb , ^7Be) and fallout (^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{90}Sr) radionuclides as geochemical tracers of sedimentation in Greifensee, Switzerland [J]. *Chemical Geology*, 1987, 63: 181 - 196.
- [23] AGUDO E G. Global distribution of ^{137}Cs inputs for soil erosion and sedimentation studies [R]. In: *Use of ^{137}Cs in the study of soil erosion and sedimentation*. IAEA - TECDOC - 1028, 1998: 117 - 121.