

# 西藏拉萨市大气气溶胶 $^{10}\text{Be}$ 及其季节变化

黄杰<sup>①⑦</sup>, 康世昌<sup>①②\*</sup>, 沈承德<sup>③</sup>, 丛志远<sup>①</sup>, 刘克新<sup>④</sup>, 王伟<sup>⑤</sup>, 刘立超<sup>⑥</sup>

① 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100085;

② 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000;

③ 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素年代学和地球化学重点实验室, 广州 510640;

④ 北京大学核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871;

⑤ 西藏自治区气象局高原大气环境研究所, 拉萨 850000;

⑥ 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000;

⑦ 中国科学院研究生院, 北京 100049

\* 联系人, E-mail: shichang.kang@itpcas.ac.cn

2009-06-22 收稿, 2010-01-07 接受

国家重点基础研究发展计划(编号: 2005CB422004)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 40830743, 40771187, 40605034)、冰冻圈科学国家重点实验室自主研究课题(编号: SKLCS-ZZ-2008-01)和中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目资助

**摘要** 2006年8月~2007年7月, 在西藏拉萨市西郊(29°38'N, 91°01'E, 3640 m a.s.l.)采集了30个大气总悬浮颗粒物(TSP)样品, 利用加速质谱器(AMS)测试了样品的 $^{10}\text{Be}$ 浓度. 拉萨市近地面 $^{10}\text{Be}$ 全年平均浓度为 $14.14 \times 10^4 \text{atmos/m}^3$ . 大气对 $^{10}\text{Be}$ 的湿清除作用较小,  $^{10}\text{Be}$ 可以作为反映青藏高原地区上层大气动力过程的指标.  $^{10}\text{Be}$ 浓度春季较高, NCEP资料分析表明, 2~6月高空大气以从平流层向对流层输送为主, 可能是造成春季高 $^{10}\text{Be}$ 浓度的主要原因. 夏季末与秋季初(8~9月),  $^{10}\text{Be}$ 浓度的低值与青藏高原臭氧总量低值时间上表现出一致性, NCEP资料分析表明 $^{10}\text{Be}$ 和臭氧可能共同受到大气从对流层向平流层输送的影响.

## 关键词

气溶胶  
 $^{10}\text{Be}$   
季节变化  
拉萨

宇宙成因核素 $^{10}\text{Be}$ ( $t_{1/2}=1.5 \text{Ma}$ )按形成环境的不同可区分为原地成因 $^{10}\text{Be}$ (*in-situ*  $^{10}\text{Be}$ )和大气宇宙成因 $^{10}\text{Be}$ (atmospheric  $^{10}\text{Be}$ ). 原地成因 $^{10}\text{Be}$ 由宇宙射线与地表岩石物质进行散裂反应而产生. 大气宇宙成因 $^{10}\text{Be}$ 主要由宇宙射线高能粒子与大气氧、氮原子核进行散裂反应产生, 2/3的 $^{10}\text{Be}$ 在平流层中产生, 平均滞留时间超过1a; 剩余1/3产生于对流层, 滞留时间较短, 约1~3周.  $^{10}\text{Be}$ 产率在全球变化范围为 $(1\sim5) \times 10^{-2} \text{atmos}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ <sup>[1]</sup>.  $^{10}\text{Be}$ 一旦在大气圈中产生, 很快就被气溶胶吸附, 然后主要通过降水和降尘从大气中清除并迅速参与地表地球化学循环而进行迁移、转化. 目前国内关于大气气溶胶中Be核素的报道较少, 且都集中于 $^7\text{Be}$ 的研究. 万国江等人分析了观风山站近地面空气的 $^7\text{Be}$ 季节变化特征<sup>[2]</sup>; 郑向东等人利用 $^7\text{Be}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 示踪报道了青藏高原东北部

瓦里关山地区高层大气的对流变化过程<sup>[3]</sup>; 刘广山和林伟立等人报道了青藏高原南部珠穆朗玛峰地区近地面 $^7\text{Be}$ 浓度的变化<sup>[4,5]</sup>. 随着20世纪80年代加速质谱器(AMS)的出现, 分析极微量宇宙成因 $^{10}\text{Be}$ 核素现实可行, 同时大气宇宙成因 $^{10}\text{Be}$ 具有类似于 $^7\text{Be}$ 的地球化学性质, 具有确知的来源、赋存和运移特征, 大气宇宙成因 $^{10}\text{Be}$ 核素被用于平流层-对流层交换(stratosphere-troposphere exchange, STE)、对流层内部垂直向下传送和水平运动过程的研究被广泛报道<sup>[6~10]</sup>.

强烈的对流活动和上下层大气的大尺度垂直交换以及高原大地形所形成的特殊动力、热力效应使青藏高原地区STE成为全球活跃区, 成为全球平流层、对流层间能量、物质交换的重要“窗口”和“质量源”<sup>[11,12]</sup>. 类似于南、北极, 独特的地理位置使得青藏

英文版见: Huang J, Kang S C, Shen C D, et al. Concentration and seasonal variation of  $^{10}\text{Be}$  in surface aerosols of Lhasa, Tibet. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-0233-0

高原作为世界上独一无二的地球系统“天然实验室”，一直是全球科学研究关注的焦点地区。目前为止，关于大气  $^{10}\text{Be}$  的报道多见于高空对流层、平流层及高纬度和南、北极背景地区<sup>[6,13-16]</sup>。本文利用 AMS 技术分析了 2006 年 8 月~2007 年 7 月在拉萨市西郊采集的为期 1 a 的大气气溶胶样品，首次报道了青藏高原中部拉萨地区近地面大气中  $^{10}\text{Be}$  的浓度及季节变化特征，并结合气象要素和臭氧浓度变化进行了初步探讨。 $^{10}\text{Be}$  现代过程讨论将对青藏高原大气与古环境记录等相关研究提供有益的参考。

## 1 样品与分析

(i) 样品采集。2006 年 8 月~2007 年 7 月共采集到 30 个样品(表 1)，其中利用玻璃纤维滤膜(GFF<sub>01</sub>~GFF<sub>11</sub>)采集样品 11 个，利用特富龙(Teflon)滤膜(TF<sub>1</sub>~TF<sub>19</sub>)采集样品 19 个。大气气溶胶采样地点(29°38'N, 91°01'E, 3640 m a.s.l.)设在拉萨市西郊的中国科学院青藏高原研究所拉萨部办公大楼楼顶，气溶胶采样器距地面高度约为 30 m。采样仪器为大流量气溶胶采集仪 KC-1000(青岛崂山电子仪器总厂)，真空泵平均流量为 0.9 m<sup>3</sup>/min，采样时间设为 1 周，流量误差 ≤ 5%，空气流量按拉萨当地气象参数转化为标准体积。

(ii) 样品前处理分析及  $^{10}\text{Be}$  测量。首先，将滤膜放入烧杯，加 1 mL 6 mol/L 的 HCl 溶液和 2 mL 0.5 mg/mL 的  $^9\text{Be}$  载体溶液，滤析提取吸附在滤膜上的  $^{10}\text{Be}$ 。并将淋滤清液放置在电热板上加热(120~140℃)蒸干后加入 1 mL 1 mol/L 的 HCl 溶液溶解样品，离心溶液后将上清液转移至 10 mL 离心管中。之后，向离心管中加入 6 mL 4 mol/L 的 NaOH 溶液调节 pH=8.0，静置沉淀 2~4 h 后弃去上清液，再向 10 mL 离心管中加入 6 mL 4 mol/L 的 NaOH 溶液，调节 pH>14 并静置沉淀过夜。最后，将上清液移至新对应编号的 10 mL 离心管并调节 pH 8.0，静置沉淀 2~4 h 后离心弃去上清液。完成上述处理步骤之后，向新对应编号的离心管中加入 1 mol/L 的 HCl 溶液调节 pH 2.5，并在加入 1 mL 10% 的乙二胺四乙酸(EDTA, Ethylene Diamine Tetraacetic Acid)溶液后静置 2 h，接着向溶液中加入 6 mL 4 mol/L 的 NaOH 溶液调节 pH 8.0，再静置沉淀 2~4 h 并弃去上清液后得到的沉淀物即为  $\text{Be}(\text{OH})_2$ ，同时用阳离子树脂(DOWEX 100~200 目)除去沉淀物中的铝。

将沉淀物转移至小石英坩锅中，放入石英高温

炉内 850℃灼烧，转化为  $\text{BeO}$  后加入等量 Nb 粉，充分研磨混合制成 AMS 靶。 $^{10}\text{Be}$  测量在北京大学核物理与核技术国家重点实验室 PKUAMS 装置(6 MeV EN tandem)上完成。该装置本底为  $6 \times 10^{-15}$ ， $^{10}\text{Be}$  标准采用美国 NIST(National Institute of Standards and Technology)标样( $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}=2.67 \times 10^{-11}$ )，测量精度优于 5%，该实验室对  $^{10}\text{Be}$  的前处理方法和利用 PKUAMS 装置测得的  $^{10}\text{Be}$  数据得到国际同行的广泛认可<sup>[17]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $^{10}\text{Be}$ 浓度与全球背景区对比

固体表面对  $^{10}\text{Be}$  具有很强的吸附能力，沉降在土壤与地表物质表面的  $^{10}\text{Be}$  几乎被完全吸附<sup>[18]</sup>，土壤中的  $^{10}\text{Be}$  浓度( $10^8$  atmos/g)也远高于大气<sup>[19]</sup>。近地面大气气溶胶中  $^{10}\text{Be}$  除了来自于高层大气中的  $^{10}\text{Be}$ ，也受部分来自地表土壤和扬尘输入的影响。但 Dibb 等人<sup>[14]</sup>的研究结果表明，近地面气溶胶中来自土壤和扬尘的  $^{10}\text{Be}$  所占比例很少(resuspended  $^{10}\text{Be}$ /measured  $^{10}\text{Be} \leq 0.05$ )，其影响可以忽略不计，所以可以近似地认为近地面大气气溶胶  $^{10}\text{Be}$  主要是来自于大气层上部，与不同高度大气层中的  $^{10}\text{Be}$  浓度具有可比性。表 2 列出了拉萨地区与世界其他地区的大气气溶胶  $^{10}\text{Be}$  浓度，其中北极和南极为全球的背景地区。研究认为，对流层上部和平流层底部是地面  $^{10}\text{Be}$  的主要来源，其浓度要明显高于地面  $^{10}\text{Be}$  的浓度<sup>[20]</sup>。如表 2 所示，本研究中拉萨  $^{10}\text{Be}$  平均浓度为  $14.14 \times 10^4$  atmos/m<sup>3</sup>，明显小于对流层上部和平流层( $71.6 \sim 983.5$ ) $\times 10^4$  atmos/m<sup>3</sup>。由不同背景区的对比可见(表 2)，拉萨地区  $^{10}\text{Be}$  浓度较南、北极背景区明显偏高。影响近地面大气气溶胶  $^{10}\text{Be}$  浓度的主要因素有产率、在平流层和对流层中的滞留时间及衰变速率等。有研究表明， $^{10}\text{Be}$  在平流层和对流层中滞留时间远小于  $^{10}\text{Be}$  的半衰期( $t_{1/2}=1.5$  Ma)，说明大部分  $^{10}\text{Be}$  粒子都能进入近地表的大气中，因而产率可能是影响浓度的主要因素<sup>[20]</sup>，而大气圈  $^{10}\text{Be}$  产率主要受纬度效应、高度效应、地球磁场、太阳活动强度的控制。其中地球磁场和太阳活动强度对  $^{10}\text{Be}$  产率的影响多用于较长时间尺度(百年以上)的全球变化研究<sup>[21-25]</sup>，对短时间尺度如季节尺度的影响很小。拉萨本底  $^{10}\text{Be}$  浓度高值可能主要反映了该地区宇宙核素  $^{10}\text{Be}$  的高产率。青藏高原平均海拔在 4000 m 以上，接近对流层中部，

表1 拉萨大气气溶胶  $^{10}\text{Be}$  浓度测定结果

实验室编号	样品编号	采样日期 (年-月-日)		采样时间/h	采样体积/ $\text{m}^3$	$^{10}\text{Be}$ 浓度/ $10^4 \text{atmos} \cdot \text{m}^{-3}$
GZ2001	T <sub>11</sub>	2007-01-01	2007-01-05	121	4356	4.38
GZ2002	T <sub>12</sub>	2007-01-15	2007-01-20	103.5	3726	13.47
GZ2003	T <sub>13</sub>	2007-02-01	2007-02-05	124	4464	6.27
GZ1750	GF <sub>01</sub>	2007-02-05	2007-02-15	236	8496	25.26
GZ2004	T <sub>14</sub>	2007-02-15	2007-02-19	99.5	3582	17.24
GZ1751	GF <sub>02</sub>	2007-02-19	2007-03-01	216.4	7790.4	33.23
GZ2005	T <sub>15</sub>	2007-03-01	2007-03-05	124.5	4482	16.4
GZ1752	GF <sub>03</sub>	2007-03-05	2007-03-15	236.85	8526.6	25.35
GZ2006	T <sub>16</sub>	2007-03-15	2007-03-19	98.8	3556.8	17.90
GZ1753	GF <sub>04</sub>	2007-03-19	2007-04-01	301.5	10854	22.75
GZ2007	T <sub>17</sub>	2007-04-01	2007-04-07	124.3	4474.8	4.63
GZ1754	GF <sub>05</sub>	2007-04-07	2007-04-15	146.2	5263.2	32.12
GZ2008	T <sub>18</sub>	2007-04-15	2007-04-19	114	4104	8.98
GZ1755	GF <sub>06</sub>	2007-04-20	2007-05-01	226.4	8150.4	27.87
GZ2009	T <sub>19</sub>	2007-05-01	2007-05-05	123.8	4456.8	16.74
GZ1756	GF <sub>07</sub>	2007-05-05	2007-05-15	207.26	7461.36	31.59
GZ1757	GF <sub>08</sub>	2007-05-19	2007-06-01	265.5	9558	18.31
GZ1758	GF <sub>09</sub>	2007-06-05	2007-06-15	237.2	8539.2	30.08
GZ1759	GF <sub>10</sub>	2007-06-19	2007-07-01	250.7	9025.2	23.27
GZ1760	GF <sub>11</sub>	2007-07-05	2007-07-15	242.6	8733.6	9.83
GZ1831	T1	2006-08-05	2006-08-13	188	6768	1.99
GZ1832	T2	2006-08-15	2006-08-19	102.2	3679.2	1.00
GZ1833	T3	2006-09-01	2006-09-05	122	4392	1.16
GZ1834	T4	2006-09-15	2006-09-21	86	3096	7.19
GZ1835	T5	2006-10-01	2006-10-05	127	4572	2.15
GZ1836	T6	2006-10-15	2006-10-20	99.7	3589.2	4.56
GZ1837	T7	2006-11-01	2006-11-07	100.5	3618	6.64
GZ1838	T8	2006-11-15	2006-11-20	99.5	3582	5.40
GZ1839	T9	2006-12-01	2006-12-05	123.25	4437	2.83
GZ1840	T10	2006-12-15	2006-12-20	97.1	3495.6	5.55

表2 拉萨  $^{10}\text{Be}$  浓度与不同纬度、不同高度地区对比

采样地点或科学计划	纬度	距地面高度	采样时间	$^{10}\text{Be}$ 浓度/ $10^4 \text{atmos} \cdot \text{m}^{-3}$	参考文献
拉萨	29°38'N	近地面	2006年8月~2007年7月	14.14	本研究
Ljungbyhed	56.08°N	近地面	1994年	1.12	[16]
Visby	57.65°N	近地面	1994年	7.77	[16]
Kiruna	67.80°N	近地面	1994年	1.48	[16]
Alert, 北极	82.5°N	近地面	1990年10月~1991年4月	<8	[14]
南极点	75°S	近地面	1976年1和7月	5.02	[6]
低纬度高空	9°N	16.8 km	1978年7月	181	[6]
PEM WEST A 计划	30°~56°N	9.8~10.8 km	1991年9和10月	71.6	[15]
高纬度高空	65°N	10.7~19.2 km	1978年7月	983.5	[6]
AGASP3 计划	68°~82°N	8.1~9.1 km	1989年3月	166.1	[13]

大气对宇宙射线的遮挡较弱, 所产生的  $^{10}\text{Be}$  核素大量通过大气对流运动交换附着沉降到近地面颗粒物

上, 使近地面大气中  $^{10}\text{Be}$  浓度出现高值, 表现出显著的高度效应<sup>[26]</sup>. 尽管根据纬度效应的原理, 位于北

半球低纬度地区的拉萨  $^{10}\text{Be}$  产率和浓度均应小于  $60^\circ\text{N}$  以上的高纬度地区<sup>[1]</sup>, 但从表 2 浓度对比结果可以推测出, 相对于纬度效应的影响, 青藏高原地区  $^{10}\text{Be}$  产率受高度效应的影响更明显。

### 2.2 $^{10}\text{Be}$ 浓度季节变化及其与气象要素的关系

前人研究表明, 青藏高原 STE 主要发生在 100 hPa 气压所对应的高度位置<sup>[27]</sup>。本文利用 2006 年 8 月~2007 年 7 月网格为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  的 NECP 资料(垂直方向为 17 层, 时间分辨率为 4 次/d)分析了在 100 hPa 高度场的 STE 变化情况。结果表现为, 2~6 月以平流层大气下沉进入对流层的输送为主(图 1), 而在 8~9 月则以大气穿过对流层顶进入平流层的输送为主(图 2)。图 3 中给出了 2006 年 8 月~2007 年 7 月拉萨不同季节大气气溶胶  $^{10}\text{Be}$  浓度的分析结果。从图 3 可见, 2~6 月为全年浓度高值期, 其中春季(3~5 月) $^{10}\text{Be}$  浓度振荡幅度较大, 平均浓度为  $20.24 \times 10^4 \text{atmos/m}^3$  (表 2), 明显高于其他季节, 说明在春季可能有大量高空  $^{10}\text{Be}$  附着于气溶胶颗粒上经 STE 过程沉降到近地面。同时, 北半球不同地区的研究结果均表明, 春季  $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$  浓度及  $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$  比值都会出现明显的高值<sup>[6,20,28-31]</sup>, 说明青藏高原  $^{10}\text{Be}$  春季高值特征与北半球其他地区都具有较好的一致性。

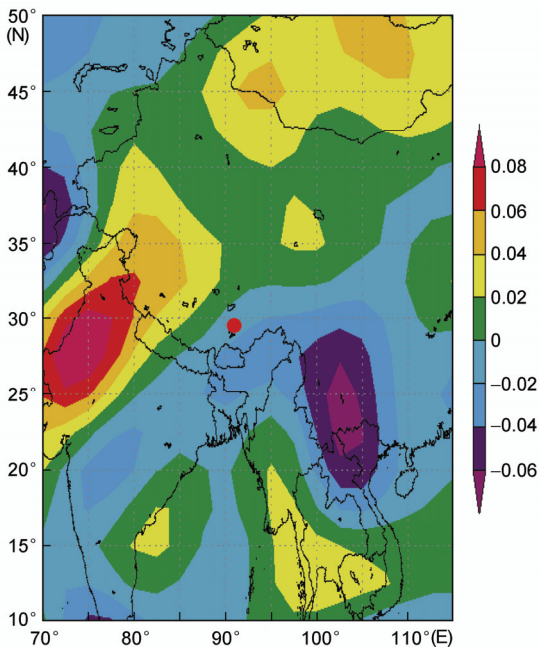


图 1 2007 年 2~6 月 100 hPa 气压高度位置  $\omega$  场分布  
单位: Pa/s, 正值表示向上, 负值表示向下

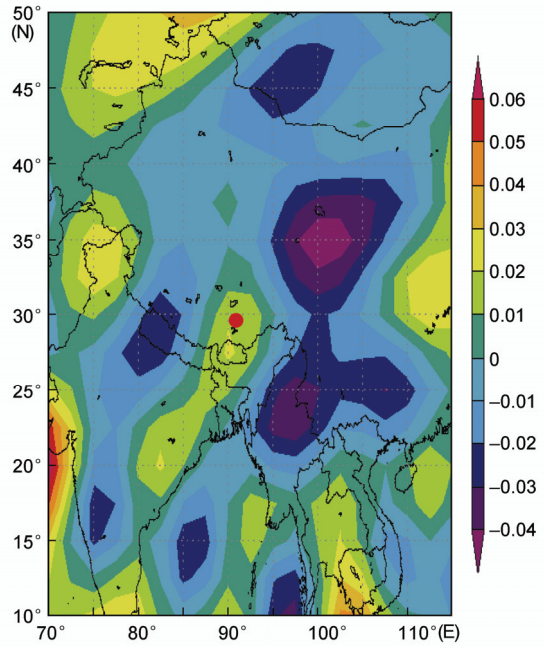


图 2 2006 年 8~9 月 100 hPa 气压高度位置  $\omega$  场分布  
单位: Pa/s, 正值表示向上, 负值表示向下

由于  $^{10}\text{Be}$  在传输和沉降过程中除受到大气动力学过程的影响外, 还主要受到大气湿清除过程的影响, 因此, 要讨论近地面  $^{10}\text{Be}$  浓度变化是否能作为反映上层大气动力过程的代用指标, 就需要讨论  $^{10}\text{Be}$  与相对湿度等气象要素的关系。相对湿度和降水一般被作为反映大气湿清除作用的代用指标<sup>[8,10]</sup>, 但从图 3 可以看出, 相对湿度(relative humidity, RH)、温度指标与  $^{10}\text{Be}$  浓度均没有表现出显著的负相关( $R^2=0.06, P<0.1, N=30$ ), 采样周期内降水量累积量与  $^{10}\text{Be}$  浓度的相关性也很差( $R^2=0.2, P<0.05, N=17$ )。这说明降水等气象要素对青藏高原拉萨地区上空  $^{10}\text{Be}$  的湿清除作用并不明显, 这种现象可能与高原中部较为干旱的气候相关(采样期间总降水量为 147.5 mm)。因此, 与降水量大、湿清除作用明显地域的  $^{10}\text{Be}$  变化不同<sup>[10,32]</sup>, 青藏高原地区  $^{10}\text{Be}$  变化表现出主要受控于上层大气的交换和传输的特征, 可以作为反映上层大气动力过程的代用指标。对  $^{10}\text{Be}$  现代特征的认识将有助于解释青藏高原古环境记录, 如冰芯历史记录等, 因为雪冰中的  $^{10}\text{Be}$  一旦保存就不会再迁移, 具有保真度高的优点<sup>[23,25,33]</sup>。同时, 青藏高原因其特有的高海拔地势接近大气对流层中上部, 其冰芯中的  $^{10}\text{Be}$  资料能提供比极地高纬度资料更清晰的  $^{10}\text{Be}$  与大气环流、地磁场屏蔽作用关系的

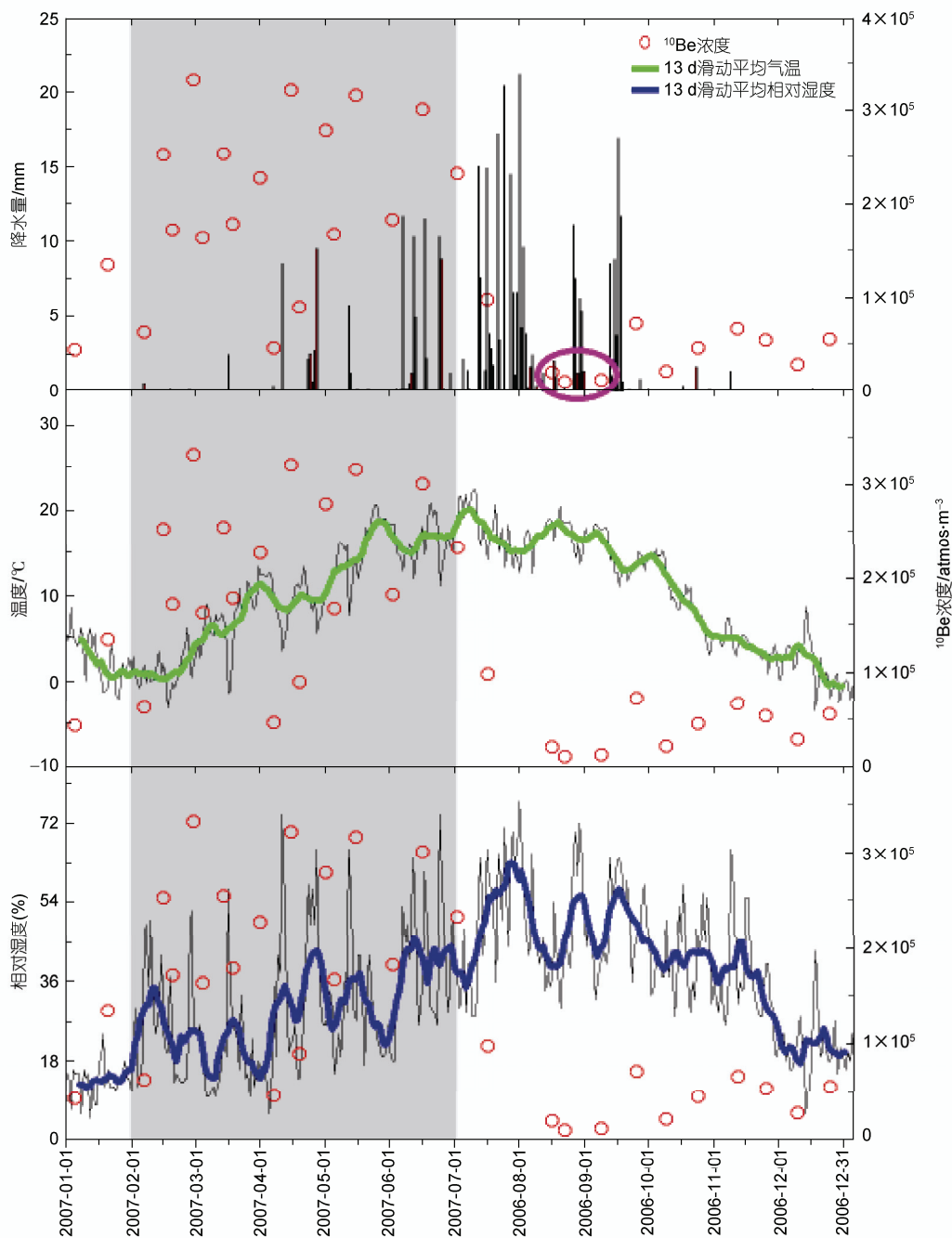


图3  $^{10}\text{Be}$  浓度与气象要素的关系

信息, 本研究对  $^{10}\text{Be}$  现代过程的认识将为解释高原地区冰芯长时间序列所记录的相关古环境信息提供十分有用的参考。

### 2.3 $^{10}\text{Be}$ 与臭氧的关系

20 世纪 90 年代, 周秀骥等人研究发现, 青藏高

原有类似南极的臭氧总量低值中心<sup>[34,35]</sup>, 这一低值中心地区的大气臭氧减少主要发生在 20 km 以下的对流层和平流层底层, 低值中心一般出现在 6~9 月, 该发现引起了科学界的广泛关注. 与南极臭氧空洞的出现明显受氟利昂(CFCs)的化学反应过程影响不同<sup>[36,37]</sup>, 青藏高原上空臭氧总量低值中心出现受到



STE 过程中化学反应的影响明显<sup>[27,38,39]</sup>, 当青藏高原高空大气以对流层向平流层的输送为主时, 这一输送过程可能将该地区中、低层气溶胶粒子携带到对流层顶附近, 致使对流层顶附近气溶胶浓度增大, 且在非均相化学反应作用下使臭氧浓度减小, 从而在 6~9 月间出现臭氧总量低值中心. 前人研究表明, 拉萨近地面臭氧浓度夏季出现低值<sup>[40]</sup>. 值得注意的是, 本研究中 7~12 月  $^{10}\text{Be}$  浓度也较低, 其中 8 月  $^{10}\text{Be}$  浓度出现全年最低值(平均浓度为  $10.82 \times 10^4 \text{atmos/m}^3$ )(图 3). 研究认为, 近地面观测到的  $^{10}\text{Be}$  浓度低值与对流层向平流层输送为主有关, 而该输送过程也将导致近地面臭氧浓度的降低, 从而  $^{10}\text{Be}$  与臭氧浓度两者表现正相关的变化趋势<sup>[6]</sup>. 同时, 本文利用 NECP 资料的分析结果也表明(图 2), 2006 年 8~9 月, 拉萨地区高空 100 hPa 高度场大气也是以对流层向平流层的输送为主, 说明  $^{10}\text{Be}$  浓度和臭氧总量低值可能共同受到 STE 大气动力过程的影响, 从而使近地面  $^{10}\text{Be}$  的急剧减少和臭氧总量浓度的低值中心出现时间相对应.

### 3 结论

本文通过 AMS 技术首次报道了青藏高原拉萨地区近地面大气气溶胶中的  $^{10}\text{Be}$  浓度, 并初步探讨了其季节变化特征. 结果表明,  $^{10}\text{Be}$  平均浓度为  $14.14 \times 10^4 \text{atmos/m}^3$ , 低于对流层上部和平流层下部, 但高于南北极等高纬度地区.  $^{10}\text{Be}$  浓度与气象要素相关性不显著反映了青藏高原的地域特点,  $^{10}\text{Be}$  可以直接作为反映上层大气动力过程的代用指标.  $^{10}\text{Be}$  浓度季节性变化明显, 春季明显高于其他季节, 春季  $^{10}\text{Be}$  浓度高值可能与平流层大气下沉到对流层有关. 8~9 月  $^{10}\text{Be}$  浓度低值与高原总量低值中心很好的对应, 表明  $^{10}\text{Be}$  和臭氧总量可能共同受大气从对流层向平流层输送的影响. 本文对青藏高原地区  $^{10}\text{Be}$  浓度变化的分析讨论, 将为后续开展高时间分辨率(小时、天)连续采样监测和利用  $^{10}\text{Be}$  及  $^7\text{Be}/^{10}\text{Be}$  更准确地示踪该地区上层大气动力学过程提供基础资料. 同时本文对  $^{10}\text{Be}$  现代特征的认识也将为今后青藏高原开展关于  $^{10}\text{Be}$  的古环境记录(如冰芯记录研究)提供有益的参考.

**致谢** 西洛为样品采集付出了辛勤的劳动, 中国科学院青藏高原所拉萨部工作人员对本文工作的完成提供很大帮助, 在此表示感谢.

### 参考文献

- 1 Monaghan M, Krishnaswami S, Turekian K. The global-average production rate of  $^{10}\text{Be}$ . *Earth Planet Sci Lett*, 1986, 76: 279—287
- 2 万国江, 郑向东, Lee H, 等. 瓦里关山与观风山近地面空气  $^7\text{Be}$  浓度季节性变化对比. *地球化学*, 2006, 35: 257—264
- 3 郑向东, 万国江, 汤洁, 等. 瓦里关山近地面气溶胶中  $^7\text{Be}$  和  $^{210}\text{Pb}$  的观测及其对臭氧浓度变化的示踪. *科学通报*, 2005, 50: 72—76
- 4 唐孝炎, 李金龙. *大气环境化学*. 北京: 高等教育出版社, 1991. 322—326
- 5 林伟立, 朱彤, 唐孝炎. 珠穆朗玛峰地区大气示踪剂 Be-7 的观测. *北京大学学报(自然科学版)*, 2003, 39: 462—466
- 6 Raisbeck G M, Yiou F, Fruneau M, et al. Cosmogenic Be-10/Be-7 as a probe of atmospheric transport processes. *Geophys Res Lett*, 1981, 8: 1015—1018
- 7 Koch D, Rind D. Beryllium 10/beryllium 7 as a tracer of stratospheric transport. *J Geophysical Res*, 1998, 103: 3907—3917
- 8 Gerasopoulos E, Zanis P, Stohl A, et al. A climatology of  $^7\text{Be}$  at four high-altitude stations at the Alps and the Northern Apennines. *Atmos Environ*, 2001, 35: 6347—6360
- 9 Jordan C E, Dibb J E, Finkel R C, et al.  $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$  tracer of atmospheric transport and stratosphere-troposphere exchange. *J Geophys Res*, 2003, 108: 4234
- 10 Priller A, Berger M, Gaggeler H W, et al. Accelerator mass spectrometry of particle-bound  $^{10}\text{Be}$ . *Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B*, 2004, 223-224: 601—607
- 11 Ye D Z, Wu G X. The role of the heat source of the Tibetan Plateau in the general circulation. *Meteorol Atmos Phys*, 1998, 67: 181—198
- 12 Duan A M, Wu G X. Role of the Tibetan Plateau thermal forcing in the summer climate patterns over subtropical Asia. *Clim Dyn*, 2005, 24: 793—807
- 13 Dibb J E, Talbot R W, Gregory G L. Beryllium 7 and lead 210 in the western hemisphere Arctic atmosphere: Observations from three recent aircraft-based sampling programs. *J Geophys Res*, 1992, 97: 16709—16715

- 14 Dibb J E, Meeker L D, Finkel R C, et al. Estimation of stratospheric input to the Arctic troposphere:  $^7\text{Be}$  and  $^{10}\text{Be}$  in aerosols at Alert, Canada. *J Geophys Res*, 1994, 99: 12855—12864
- 15 Hoell J M, Davis D D, Liu S C, et al. Pacific Exploratory Mission-West A (PEM-West A): September-October 1991. *J Geophys Res*, 1996, 101: 1641—1653
- 16 Aldahan A, Possnert G, Vintersved I. Atmospheric interactions at northern high latitudes from weekly Be-isotopes in surface air. *Appl Radiat Isot*, 2001, 54: 345—353
- 17 Liu K X, Gao H L, Zhou L P, et al. AMS measurements of  $^{10}\text{Be}$  concentration in Chinese loess using PKUAMS. *Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B*, 2004, 223: 168—171
- 18 Brown E T, Edmond J M, Raisbeck G M, et al. Beryllium isotope geochemistry in tropical river basins. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56: 1607—1624
- 19 Pavich M J, Brown L, Klein J, et al.  $^{10}\text{Be}$  accumulation in a soil chronosequence. *Earth Planet Sci Lett*, 1984, 68: 445—446
- 20 Lal D, Peters B. *Cosmic Ray Produced Radioactivity on the Earth*. Berlin: Springer-Verlag, 1967. 551—612
- 21 Raisbeck G M, Yiou F, Fruneau M, et al. Cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  concentrations in Antarctic ice during the past 30, 000 years. *Nature*, 1981, 292: 825—826
- 22 Yiou F, Raisbeck G M, Bourles D, et al.  $^{10}\text{Be}$  in ice at Vostok Antarctica during the last climatic cycle. *Nature*, 1985, 316: 616—617
- 23 Raisbeck G M, Yiou F, Bourles D, et al. Evidence for two intervals of enhanced  $^{10}\text{Be}$  deposition in Antarctic ice during the last glacial period. *Nature*, 1987, 326: 273—277
- 24 沈承德, 刘东生.  $^{10}\text{Be}$  与黄土的堆积演化. *中国科学 B 辑*, 1989, 19: 744—751
- 25 Jouzel J, Kubik P W, Lestringuez J, et al. Beryllium 10 in the Greenland Ice Core Project ice core at summit, Greenland. *J Geophys Res*, 1997, 102: 26783—26794
- 26 Salisbury R T, Cartwright J. Cosmogenic  $^7\text{Be}$  deposition in North Wales:  $^7\text{Be}$  concentrations in sheep faeces in relation to altitude and precipitation. *J Environ Radioact*, 2005, 78: 353—361
- 27 丛春华, 李维亮. 青藏高原及其邻近地区上空平流层-对流层之间大气的质量交换. *科学通报*, 2001, 46: 1914—1918
- 28 Hardy E P, Meyer M W, Allen J S, et al. Strontium-90 on the earth's surface. *Nature*, 1968, 219: 584—587
- 29 Dibb J E. Atmospheric deposition of beryllium 7 in the Chesapeake Bay region. *J Geophys Res*, 1988, 94: 2261—2265
- 30 Holton J R, Haynes P H, McIntyre M E, et al. Stratosphere-troposphere exchange. *Rev Geophys*, 1995, 33: 403—439
- 31 Yoshimori M, Hirayama H, Mori S, et al. Be-7 nuclei produced by galactic cosmic rays and solar energetic particles in the earth's atmosphere. *Adv Space Res*, 2003, 32: 2691—2696
- 32 Graham I, Ditchburn R, Barry B. Atmospheric deposition of  $^7\text{Be}$  and  $^{10}\text{Be}$  in New Zealand rain (1996-98). *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67: 361—373
- 33 Smith A M, Fink D, Child D, et al.  $^7\text{Be}$  and  $^{10}\text{Be}$  concentrations in recent firn and ice at Law Dome, Antarctica. *Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B*, 2000, 172: 847—855
- 34 周秀骥, 史久恩. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心. *科学通报*, 1995, 40: 1396—1398
- 35 Zou H. Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 1029—1032
- 36 McElroy M B, Salawitch R J, Wofsy S C, et al. Reductions of Antarctic ozone due to synergistic interactions of chlorine and bromine. *Nature*, 1986, 321: 759—762
- 37 Solomon S, Garcia R R, Rowland F S, et al. On the depletion of Antarctic ozone. *Nature*, 1986, 321: 755—758
- 38 刘煜, 郭彩丽, 李维亮, 等. 青藏高原平流层臭氧和气溶胶的变化趋势研究. *气象学报*, 2007, 65: 938—945
- 39 周秀骥, 李维亮, 陈隆勋, 等. 青藏高原地区大气臭氧变化的研究. *气象学报*, 2004, 62: 513—527
- 40 周凌晞, 郑向东, 周秀骥, 等. 拉萨地区夏季地面臭氧的观测和特征分析. *气象学报*, 2002, 60: 221—229