

文章编号:1000-0240(2012)03-0609-09

青藏高原大气气溶胶研究进展

余光明, 徐建中*, 任贾文

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 大气气溶胶是地球大气成分中含量很少的组分之一, 但其对气候环境以及人类健康有着极其重要的影响. 由于青藏高原地理单元的独立性和特殊性, 该地区气溶胶特征和行为的研究引起越来越多的关注. 回顾了青藏高原大气气溶胶研究的历史和分析监测方法, 从气溶胶的基本特性、气候效应、环境效应三个方面综述了 20 世纪 90 年代以来青藏高原大气气溶胶研究的成果, 并对该地区研究的前景有所展望.

关键词: 青藏高原; 气溶胶; 研究进展

中图分类号: P402 **文献标识码:** A

0 引言

大气气溶胶通常指大气与悬浮在其中的固体和液体微粒共同组成的多相体系, 其粒径多在 $10^{-3} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 之间. 气溶胶在大气中的含量很少, 但通过诸多物理化学过程对气候变化、云的形成、能见度的改变、大气微量成分的循环及人类健康等产生重要影响^[1]. 高海拔地区对全球气候与环境变化十分敏感, 高海拔地区大气成分变化的监测在全球气候变化研究中起着举足轻重的地位^[2-4]. 青藏高原地处中亚腹地, 大多处在海拔 3 500~4 500 m, 现代冰川十分发育, 人类大规模的工农业生产活动较少, 大气环境较少受到人类活动的干扰, 为研究较大范围气溶胶的本底状况提供了理想场所. 通过监测青藏高原地区的气溶胶的变化, 不仅可以加深气溶胶传输过程和生成机制的认识, 获得全球有关重大环境事件的信息, 也为探讨人类活动对青藏高原的影响提供背景资料.

1 青藏高原气溶胶研究的历史和方法

青藏高原气溶胶研究起步相对较晚. 20 世纪 90 年代以来, 国内外气溶胶科学技术的进步, 特别是野外观测手段的提高以及雪冰化学、降水化学研

究的发展对本区域气溶胶研究起到了很大的推动作用. 除了城市地区监测外(如拉萨、西宁), 早期研究主要是伴随着冰川综合考察展开. Wake 等^[5] 较早地在青藏高原的冰川区开展了气溶胶可溶性化学成分的研究; 李忠勤^[6] 通过青藏高原及相邻地区近 10 条冰川采集的雪冰样品和 3 条冰川采集到的气溶胶样品离子浓度对比, 对青藏高原冰川中的气溶胶记录进行了研究. 条件的相对艰苦使开展研究的地区有限. 1994 年在青藏高原东北部建成大气本底基准观测台—瓦里关山本底站, 开始了大气化学成分的长期定点监测. 图 1 为目前在青藏高原设立的长期大气化学成分观测站点, 其中瓦里关站是位于欧亚大陆腹地的全球大气观测(GAW)体系中唯一的大陆型全球本底站. 近年来, 研究人员分别在青藏高原代表性地区(如纳木错流域、祁连山地区、喜马拉雅山地区等)建立了观测站进行连续性观测, 还在珠穆朗玛峰^[7]、念青唐古拉山^[8]及慕士塔格^[9]等冰川综合考察期间进行了短期的气溶胶样品采集. 在青藏高原牧区和农村的室内^[10-11]也进行了气溶胶样品的采集, 以研究室内空气质量状况. 仅通过有限站点的观测和短期野外考察所获得的气溶胶资料, 来了解这一广阔区域气溶胶理化特性和光学特性是远远不够的. 近年来, 利用地基遥感以及

收稿日期: 2011-10-16; 修订日期: 2012-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(40901043); 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题项目(SKLCSS-ZZ-2008-01)资助

作者简介: 余光明(1986—), 男, 安徽阜阳人, 2008 年毕业于安徽师范大学, 现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所博士研究生, 主要从事雪冰和气溶胶化学研究. E-mail: ygm19870803@163.com

* 通讯作者: 徐建中, E-mail: jzxu@lzb.ac.cn

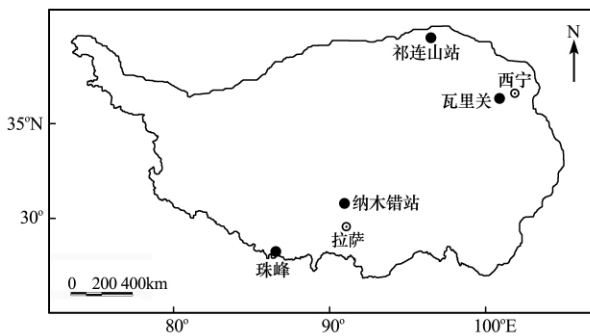


图 1 青藏高原气溶胶主要观测站点分布图

Fig. 1 Location of aerosol sampling stations on the Tibetan Plateau

卫星数据来获取气溶胶特性的资料也开展了一些工作^[12-13]。

气溶胶粒子来源广泛且在时空分布上具有较大的变率,加上其在大气中浓度很低,气溶胶基本特性的分析和预测,必须首先通过气溶胶粒子观测和采集,取得有代表性的资料。气溶胶常规采样与监测方法主要包括地面监测和垂直廓线监测。常见的地面监测分析手段有膜采样方法以及在线监测(飞行质谱仪、气溶胶粒径谱仪、气溶胶光度计等),其中滤膜累计连续采样过程中,样品采样方案的设计、样品采集和运输过程的质量控制非常重要。在线监测仪器主要是基于激光散射法、光学衰减法、振荡微天平技术(TEOM)、凝结核计数法等原理对气溶胶基本特性进行在线测量。气溶胶样品的分析有全样品分析(如 ICP-MS)和单颗粒物分析(如 SEM/EDX、TEM),详细的气溶胶观测和分析方法的介绍可参见文献^[14]。卫星遥感分析作为一种有效的分析手段可以同地面监测数据相验证,在区域气溶胶研究中已经得到了诸多应用^[15]。总的来说,研究的时间尺度从单一的短期的观测过渡到定点的长期监测和短期观测相结合;气溶胶研究的手段趋于多样化,研究的内容也更加全面,气溶胶的理化特征和气候效应都有所涉及。本文从青藏高原气溶胶的基本特性、气候效应和环境效应三个方面回顾了青藏高原气溶胶研究的成果,并对该研究的前景进行分析。

2 青藏高原气溶胶基本特性研究进展

2.1 青藏高原气溶胶物理性质研究

对青藏高原近地面层气溶胶物理特性的观测是研究较多的内容之一,气溶胶质量浓度监测是涉及的主要观测指标。由于受人类活动的影响较小,大多数采样点气溶胶的浓度水平较低,同时表现出明

显的季节变化。杨东贞等^[16]通过瓦里关站秋冬两季 TSP 质量浓度观测,表明该地区秋季高于冬季,两季的平均值为 $19.79 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。五道梁低层大气气溶胶春季的气溶胶浓度约为秋季的 1.75 倍,夏季可能与秋季接近^[17]。

由于高原上空特殊的地理环境,对流层中上层气溶胶开展的地基观测较少。Yutaka Tobo 等^[18]运用气球携带的粒子计数器对拉萨上空的观测发现,季风期间对流层顶亚微米颗粒物($0.15 \sim 0.6 \mu\text{m}$)数浓度相对较高($0.7 \sim 0.8 \text{cm}^{-3}$),认为这可能与青藏高原的对流传输机制有关。激光雷达也是测量气溶胶垂直分布特征的有效手段之一,白宇波等^[19]在拉萨等地开展了短期的激光雷达遥感气溶胶工作。周任君等^[20]利用 1991 年 10 月—2005 年 11 月的 HAIOE 资料,发现高原上空气溶胶在对流层顶附近存在一个极大值区,夏季该极大值区位于对流层顶下方(约 120 hPa),而其他季节则位于对流层顶上方(约 100 hPa)。

气溶胶的数谱分布也进行了相关的研究。1997—1999 年在西藏泽当、云南景洪得到的资料显示,两地 $0.3 \sim 12 \mu\text{m}$ 段气溶胶数浓度和体积浓度谱的日变化均为双峰分布^[21]。瓦里关站进行了较为详细的气溶胶数谱分布的观测^[22-24],利用实时测量气溶胶数谱分布的测量系统(DMPS),对 $10 \sim 500 \text{nm}$ 颗粒物的数谱分布进行了长期的测量,期间观测到新粒子生成的现象,为解释青藏高原气溶胶的形成机理提供了基础^[23-24]。这些研究不仅为认识不同模态颗粒物分布特点和演变过程提供了必要条件,也为研究气溶胶理化性质和环境影响提供了资料。

2.2 青藏高原气溶胶光学性质研究

气溶胶的光学特性取决于气溶胶粒子自身的物理化学性质相关参数。目前有很多方法用于获取气溶胶光学特性参数,如仪器观测、遥感反演等。李维亮等^[25]使用 1985 年 1 月—1993 年 12 月的美国 SAGE2 全球月平均格点卫星资料,分析了青藏高原地区的大气气溶胶状况表明,高原上空平流层大气气溶胶的光学厚度在冬季最大,春、秋季次之,夏季最小,存在明显的季节振荡现象。李韧等^[26]对藏北高原五道梁地区的气溶胶光学厚度分析发现,该地区气溶胶光学厚度有明显的日变化及季节变化特征,气溶胶光学厚度增大时月平均气温与年平均气温减小,纳木错地区光学特性的监测发现春季光学厚度(AOD)最大,500 nm 波长气溶胶的光学厚

度很低, 年均约 0.05; Angstrom 系数的平均值相对较低, 约为 0.42 ± 0.27 ^[27]. 根据白宇波等^[19] 1998 年夏季在拉萨使用激光雷达观测的结果, 拉萨地区气溶胶散射比、退偏振系数和 Angstrom 波长指数随着高度的增加而不断递减. 西藏那曲与北京郊区对流层气溶胶的微脉冲激光雷达测量结果的对比也发现那曲地区的近地面空气质量明显优于北京郊区^[28]. 杨军等^[21] 运用黑度法测量了景洪、泽当气溶胶的吸收系数, 并与北京、纽约、南京气溶胶吸收系数的比较, 发现景洪气溶胶粒子的吸收系数最小, 为 $2.12 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, 泽当受沙尘影响比景洪大 2 个数量级. 李放等^[29] 利用 1966 年与 1968 年珠穆朗玛峰地区科学考察期间得到的太阳直接辐射光谱资料, 求得该地区气溶胶光学厚度谱, 最高观测站东绒布冰川波长在 $0.5 \mu\text{m}$ 的气溶胶光学厚度春季平均为 0.044 ± 0.017 , 与南极地区有相似的数量级, 比内陆人口密集地区也小一个数量级. 这些结果说明青藏高原不同地区气溶胶光学参数差别较大.

2.3 青藏高原气溶胶化学性质研究

气溶胶的组成十分复杂, 但总体上由水溶性无机盐、含碳物质、不可溶矿物质及有机物等组成.

Wake 等^[5] 的研究表明, 夏季喜马拉雅山中东段和高原中部各拉丹东峰地区主要离子中 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Ca^{2+} 占主导地位, 其含量与其它处在对流层的偏远地区在同一水平. 这一结果和贡嘎山^[30] $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中分析结果相似, 贡嘎山 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 3 种主要离子 (NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^-) 含量之和分别占总离子浓度的 85% 和 82%. 新的气溶胶化学成分分析方法, 特别是基于气溶胶样品无损分析技术的应用, 大大提高了测量的精度. 表 1 列出了青藏高原部分地区气溶胶主要元素含量的对比. 可以看出, 青藏高原不同地区气溶胶的化学组成相差很大. 青藏高原气溶胶的元素含量可以和全球其他偏远地区相比较, 但明显高于南极大陆.

气溶胶中化学成分也表现出一定的时间变化特征. 五道梁地区气溶胶化学成分中地壳组成元素平均浓度在春季约为秋季的 1.2~2.2 倍, 与气溶胶浓度的季节变化完全相同; Na 元素的质量浓度在秋季约为春季的 1.15 倍, Na 与典型地壳元素 Al 和 Fe 的浓度比在春季与地壳平均值基本相同, 在秋季则约高 1 倍; 一些非地壳稀土元素的质量浓度各季节基本相同^[17]. 而珠峰北坡地区大气气溶胶

表 1 青藏高原部分地区气溶胶元素含量及与其他偏远地区对比 ($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$)

Table 1 Elemental concentrations of aerosols upon the Tibet plateau, together with that in King Sejong Station ($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$)

元素	瓦里关 ^[31]	纳木错 ^[32]	五道梁 ^[17]	珠峰北坡 ^[33]	墓士塔格 ^[9]	扎当冰川 ^[8]	珠峰南坡 ^[34]	南极半岛 ^[35]
Na	541~1150	—	11713.72	—	—	12.023	—	—
Mg	1430~3230	12	4118.56	47.77	—	17.793	490	—
Al	2110~3410	131	21390.48	499.69	509.20	57.071	—	1.875
Cl	436~867	18	—	154.21	—	—	175	—
K	1190~2200	82	—	177.14	—	26.997	392	—
Ca	2010~4280	251	—	261.02	—	51.139	483	—
Ti	106~220	10	716.13	36.35	—	3.675	73	—
V	3.02~5.88	0.06	—	0.96	—	0.281	1.30	0.036
Mn	27.5~52.9	3.7	192.50	3.57	—	0.839	11.4	—
Fe	1720~3190	94	10453.67	184.86	—	21.167	500	—
Zn	9.50~26.30	1.8	—	5.31	3.58	2.446	11.20	0.130
As	0.70~3.37	0.04	—	0.96	0.46	0.135	0.14	—
Se	0.05~0.19	0.08	—	0.91	—	—	0.17	—
Br	1.07~2.67	—	—	1.88	—	—	2.12	—
Pb	—	—	—	2.93	2.23	0.294	4.40	0.041

注: 瓦里关 ($36^{\circ}17' \text{ N}$, $100^{\circ}54' \text{ E}$, 海拔 3 814 m, 1992—1995 年); 纳木错 ($30^{\circ}46.44' \text{ N}$, $90^{\circ}59.31' \text{ E}$, 海拔 4 730 m, 2005 年 7—10 月); 五道梁 ($35^{\circ}17' \text{ N}$, $93^{\circ}36' \text{ E}$, 海拔 4 612 m, 1993 年 9 月—1994 年 8 月); 珠峰北坡 (绒布河谷附近, $28^{\circ}11'33'' \text{ N}$, $86^{\circ}49'59'' \text{ E}$, 海拔 4 950 m, 2000 年 6 月 2—5 日); 珠峰南坡 (Pyramid 站, 海拔 5 050 m, 2002 年 3—5 月); 墓士塔格 ($38^{\circ}17' \text{ N}$, $75^{\circ}01' \text{ E}$, 海拔 4 430 m, 2004 年 7 月—2006 年 4 月); 扎当冰川垭口 ($30^{\circ}28' \text{ N}$, $90^{\circ}39' \text{ E}$, 海拔 5 800 m, 2006 年 6—10 月); 南极半岛 (King Sejong 站, $62^{\circ}13' \text{ S}$, $58^{\circ}47' \text{ W}$, 2000 年 1 月—2001 年 12 月).

以 Al、Ca、Si、K、Fe 等地壳元素为主,地壳元素占总元素浓度的 82% 以上。S、Pb 等与人类活动影响有关的污染元素含量很低^[33]。气溶胶组成存在较大的时空变率,即使在同一采样点,不同时段大气气溶胶的化学组成也存在很大变化^[7]。

含碳物质是气溶胶的主要组成部分之一。瓦里关地区黑碳月浓度平均为 $130 \sim 300 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,较东部地区明显偏低^[36]。Cao Junji 等^[37]分析了慕士塔格的碳质气溶胶(EC、OC、CC)的季节变化,发现 EC、OC 浓度相关性较好,并且呈现由夏至春递减的变化,黑碳浓度和极地地区相当,同时分析了外部对本地 OC、EC 的贡献。西宁、拉萨等地区也开展了黑碳的观测^[38]。

由于全样品的分析测试仅代表了颗粒物组成和变化的平均态,单颗粒组成和形貌分析则提供精确的粒子短期变化过程的信息。拉萨市区及附近山区烟尘气溶胶理化特征和矿物学分析表明烟尘来源于宗教活动和居民生活中大量生物质的燃烧,而且指出青藏高原上居住区生物质燃烧产生的大量烟尘对大气成分循环的影响^[39]。Cong Zhiyuan 等^[40]对 2005 年 5—6 月珠峰考察期间采集的气溶胶进行 SEM-EDX 分析了 900 个颗粒的大小形貌和组成,并将这些颗粒归纳为烟尘、硅铝酸盐、富铁颗粒等 8 类。冰川区气溶胶以富含 Si、Ca 的粘土矿物颗粒为主,而与人类活动密切相关的含 S 颗粒物及烟尘飞灰等含量较少^[41]。

气溶胶来源比较复杂,一般分为人为源和自然源。瓦里关地区气溶胶来源的分析表明:气溶胶以土壤及地壳等自然来源为主;自然源的贡献率平均在 70% 以上;燃煤、交通及冶炼等人为源也占有一定比例;黑碳气溶胶的观测也表明人类活动影响的存在,人为源的影响多与来自东部及河西走廊等经济发达地区的气流有关^[31]。青藏高原气溶胶除源于外部海盐气溶胶、粉尘气溶胶等的输入外,由于本身所处海拔高度使其上的粉尘极易扬升到西风急流区,其自身也被认为是一个重要的粉尘源地。由于地理环境的影响,高原南部和北部也有差别。青藏高原沙尘气溶胶、海(湖)盐气溶胶的特征和传输的机制也有报道^[12-13, 42-43]。青藏高原气溶胶生成机制的研究开展的较少,通过对超细粒子的观测,在瓦里关发现新粒子生成的现象,由于缺少其他相关的观测资料,暂难以对气溶胶的生成做出全面的解释。

大气气溶胶通过干湿沉降在环境中清除,降水

是气溶胶主要的湿清除过程之一。通过对降水化学成分的分析,可以反映气溶胶的组成和变化。珠峰地区的新雪和气溶胶分析表明, SO_4^{2-} 的清除比率最高,显示降雪对 SO_4^{2-} 有较高的清除效率^[44]。Li Chaoliu 等^[45]通过对比纳木错站 2005 年 8 月—2006 年 8 月采集到降水样品和临近的扎当冰川雪坑离子含量,发现纳木错地区降水中主要离子由于本地气溶胶的输入含量较高,区域陆源气溶胶和当地居民生物质燃烧是这些离子的主要来源。在对同时采集的大气气溶胶和表层雪样化学成分分析的基础上,Sun Junying^[46]详细讨论了大气气溶胶和表层雪样化学成分的关系。发现对于颗粒相离子,雪中的离子浓度和大气气溶胶的离子浓度的相关性较好;对于气相和颗粒相并存的离子来说,雪中和气溶胶的离子浓度不相关。

3 青藏高原气溶胶气候效应的研究

气溶胶不仅可以通过散射和吸收太阳辐射和地面长波辐射改变地气系统的辐射平衡直接影响气候,而且作为云凝结核通过改变云的宏、微观特性,特别是改变云的生命期和光学特性来间接影响气候。气溶胶气候效应的研究主要采用数值模拟的方法。李维亮等^[25]利用 MM5 模拟了气溶胶的辐射强迫状况,结果表明,相对于设置均一的背景气溶胶而言,青藏高原地区的辐射强迫均为正值,高原上地面土壤温度和地面气温均有所增加,增加的量级相当,但增幅略小;高原上空的气温也有所增加,增幅比地面气温的增幅更小,但仍处于同一个量级。气溶胶含量变化对高原气候变化的可能影响也有较多的研究。初步的分析结果表明,当综合考虑气溶胶和温室气体含量共同增加时,青藏高原地表增暖比只考虑 CO_2 增加相比偏弱,春、夏和秋季增温也随海拔高度上升而加强,但冬季地面增温幅度随海拔上升反而下降,海拔 1.5~2 km、3~3.5 km 和 4.5~5 km 范围内对应的冬季增温趋势分别为 $0.02 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $0.03 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $0.13 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。对比分析发现,大气气溶胶增加造成青藏高原冬季增温不明显甚至出现变冷趋势,地面积雪也随之增多,这可能歪曲了青藏高原地区气候变暖对海拔高度的依赖性^[47]。

沙尘气溶胶对气候影响也引起了人们的重视。研究表明,青藏高原具备发生沙尘暴的前提条件,年沙尘暴发生频率非常高,大体有以羌塘高原为中心向东南逐渐减少的趋势^[48]。细粒物质被轻松地

扬升到西风急流区, 传往遥远的北太平洋地区, 青藏高原成为远程传输最高效的沙尘源地之一。沉降在北太平洋的沙尘, 加强了海洋生物泵的效率, 进而可能对全球气候产生影响。

雪冰中的气溶胶粒子的记录(不溶性微粒)是一个重要的气候环境指标, 不仅为恢复历史时期大气环流模式和揭示气候变化的机理提供了大量资料, 也为分析气溶胶在气候变化中的作用提供了良好的介质, 目前中纬度青藏高原冰芯(如敦德、古里雅、达索普、珠峰冰芯等)和雪坑中不溶微粒已开展了大量的工作。微粒研究主要涉及其浓度变化、成分、来源及其气候环境影响等。对近几十年来青藏高原不同地区冰芯微粒和气溶胶指数相关分析, 可以为反演更长时间序列的青藏高原气溶胶指数提供了参考^[49]。Ming Jing 等^[50-51]通过东绒布冰川 40 m 浅冰芯黑碳的研究, 首次恢复了 50 a 来喜马拉雅山地区黑碳沉降的历史; 通过模式的模拟, 认为 20 世纪 90 年代以来黑碳的辐射强迫呈现增加的局势, 2001 年夏季甚至达到 $4.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。近期, 通过青藏高原 5 支冰芯黑碳过去 50 a 变化历史的恢复, 显示 20 世纪 50—60 年代欧洲黑碳高排放对青藏高原西部、北部的冰川融化有重要贡献; 80 年代中期以来青藏高原东南部与南部雪冰黑碳含量的持续增长则显示南亚地区的黑碳排在青藏高原冰川中的积累占主导作用^[52]。此外, 由于冰川区环境通常较为洁净, 雪冰中的可溶性成分如离子、有机物等研究为探讨人为活动影响提供了许多资料, 填补了许多地区的空白^[53-55]。

4 青藏高原气溶胶环境效应的研究

随着人们对环境污染问题的关注, 气溶胶对环境的影响引起了人们的关注。1995—1999 年印度洋实验期间发现在南亚、东亚、印度洋、东南亚上空笼罩着的较厚的棕色污染尘埃, 被称为大气棕色云(ABC)。喜马拉雅山南侧的 Pyramid 站两年的气溶胶化学成分(EC、OC)监测表明, 喜马拉雅山南侧受到大气棕色云的影响^[56]。珠穆朗玛峰东绒布^[57]和扎当冰川区^[8]气溶胶元素组成也受到来自南亚地区的污染物质的干扰。

现有的监测表明青藏高原许多地区的气溶胶中人为污染元素含量较低, 但青藏高原部分地区已经受到了人为活动的影响。珠穆朗玛峰地区 Pb 含量的虽然较其他地区低, 可是已经有所增加, 表明已经受到了人为活动的影响^[58]。雪冰中重金属污

染^[59]和有机污染物^[60]的研究也为评估这一地区人类活动的影响提供了佐证。室内空气质量的监测和控制也是当前气溶胶的研究领域之一, 青藏高原纳木错游牧帐篷内空气质量的研究表明, 在做饭和供暖时间总悬浮颗粒物的含量较高, 其平均浓度达到 $4.45 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 日均浓度为 $3.16 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 室内的有毒元素 Cd、As、Pb 等含量平均浓度分别为 $3.16 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $35.00 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $81.39 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。不仅高于世界卫生组织的室内空气标准, 也比纳木错地区室外空气标准高 $10^4 \sim 10^6$ 量级^[10]。顾庆平等^[11]研究了西藏自治区扎囊、江孜和当雄县农村的民居室内 $\text{PM}_{2.5}$ 污染情况, 根据西藏民居因日常使用生物质燃料导致的室内颗粒物污染状况, 提出了相应的对策, 如综合考虑厨卧分离、推广沼气、更换炉具等。

青藏高原有关生物气溶胶的研究也有较多报道, 陈皓文^[61]通过对青海 3 个典型地区(西宁、青海湖和格尔木)的空气微生物含量的测定, 分析了三地空气微生物指标(空气细菌、真菌、总菌含量、真菌检出率、真菌与总菌量的比率)时空分布状态及其起因。拉萨、日喀则等地区的微生物污染状况也开展了类似的研究。

5 讨论与展望

近年来, 青藏高原大气气溶胶的研究虽然取得了显著进展, 但同全球其它区域的研究比较, 仍然相对滞后, 同时也存在着以下几个问题:

(1) 在青藏高原不同地区进行的气溶胶采样和分析方法之间缺乏可比性, 因此, 如何在青藏高原地区这一独特地理单元获取全面的、有代表性的资料仍是亟待解决的问题之一。

(2) 青藏高原气溶胶的研究多集中在气溶胶基本特性描述性的研究, 以化学成分分析为例, 目前还集中在主要阴、阳离子浓度等常规研究上。而气溶胶中的其它化学成分(如痕量元素、有机质等)的研究开展的较少, 特别是集中在关于气溶胶的形成、气溶胶表面的非均相化学反应以及气溶胶动力学的理论研究方面还不是很深入。另外青藏高原气溶胶的气候效应的研究已逐渐引起人们的重视, 可是一些初步的研究结果还存在较大的不确定性, 存在主要的问题是如何从大量分散和不连续的气溶胶观测资料中提取适用于数值模式输入资料和计算结果之间的对比。

(3) 从研究区域看, 大多数的研究集中在青藏

高原喜马拉雅地区,高原内部和其他边远地区的研究较少。加上极端天气条件下,供电和后勤补给的正常运转,仪器的使用与维护甚至数据的采集、样品的合理储存运输等过程中都会存在诸多困难。导致采集的资料不少是分散、不连续的。

综上所述,我们认为青藏高原气溶胶的研究应该从以下几个方面有所加强:

(1) 系统性的研究。迄今为止,在青藏高原开展连续定位观测的台站不是很多,大多数研究局限在短期的观测。青藏高原内部的区域差异很大,青藏高原气溶胶的观测需要在具有代表性的地区开展系统的观测。目前在青藏高原及周边已经有了一些知名站点,如瓦里关站、金字塔站等已经开始进行常规的观测。在室内大气污染、超级站点等方面要开发相应的气溶胶技术。通过气溶胶成分与大气痕量气体之间的化学反应过程的研究,可以为解释气溶胶形成机制以及区分自然/人为因素对大气环境变化的贡献提供资料。

(2) 气候环境效应的研究。青藏高原气溶胶对气候变化的影响对于全球变化研究具有很重要的意义。目前碳质气溶胶和硫酸盐气溶胶等气候效应研究都有了较大的进步。对青藏高原气溶胶的气候效应的研究需要我们加大其基本性质的全面系统的认知,特别需要对其光学属性测量获得一些参数的基础数据。青藏高原地区冰川广泛分布,雪冰中记录的气溶胶的变化及其反映的自然和/或人为污染的历史的研究,可以反映地球环境的变化历史。

(3) 研究内容的革新。目前大气气溶胶的研究室外与室内相结合,更加关注细颗粒物甚至超细粒子方面的研究。青藏高原气溶胶的研究已经开始从总悬浮颗粒物的研究逐步深入到 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 甚至超细粒子的研究。一些新样品的分析测量方法,如元素分析中的无损分析技术、单粒子的分析甚至实时单粒子的分析技术等青藏高原气溶胶研究中有很大的应用前景。一些新指标(如 POPs、微生物、黑碳、重金属等)用来反映人类活动的记录在许多研究中已经有了较多应用。同位素研究在示踪气溶胶来源^[62](如 ^{14}C 、 $^{206}Pb/^{207}Pb$)和了解青藏高原古环境记录^[63](如 ^{10}Be)方面同样具有广阔的发展空间。

参考文献(References):

[1] Ramanathan V, Feng Y. Air Pollution, greenhouse gases and climate change: global and regional perspectives[J]. Atmos-

pheric Environment, 2009, **43**(1): 37—50.

- [2] Lee H N, Tositti L, Zheng X, *et al.* Analyses and comparisons of variations of 7Be , ^{210}Pb , and $^7Be/^{210}Pb$ with ozone observations at two Global Atmosphere Watch stations from high mountains[J]. *Journal of Geophysical Research*(D, Atmospheres), 2007, **112**(D5): D05303.1 D05303.11.
- [3] Pochanart P, Kato S, Katsuno T, *et al.* Eurasian continental background and regionally polluted levels of ozone and CO observed in northeast Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(9): 1325—1336.
- [4] Reimann S, Vollmer M K, Folini D, *et al.* Observations of long-lived anthropogenic halocarbons at the high-alpine site of Jungfrauoch(Switzerland) for assessment of trends and European sources[J]. *Science of Total Environment*, 2008, **391**(2—3): 224—231.
- [5] Wake C P, Dibb J E, Mayewski P A, *et al.* The chemical composition of aerosols over eastern Himalaya and Tibetan Plateau during low dust periods[J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(4): 695—704.
- [6] Li Zhongqin. A study on the aerosol records in the glaciers over Qing-Zang Plateau [D]. Doctor Thesis, Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, 1994, 8. [李忠勤. 青藏高原冰川中的气溶胶研究记录[D]. 博士论文, 兰州: 中国科学院冰川冻土研究所, 1994.]
- [7] Sun Junying. Study on Chemistry of Aerosol and Snow/Ice from Cryosphere—Cases Studies at the Antarctic, the Arctic and Western China[D]. Doctor Thesis, Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2002, 11. [孙俊英. 冰冻圈大气气溶胶和雪冰化学研究——以南、北极和中国西部高山区为例 [D]. 博士论文, 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2002.]
- [8] Li Chaoliu, Kang Shichang, Cong Zhiyuan. Elemental composition of aerosols collected in the glacier area on Nyainqentanglha Range, Tibetan Plateau, during summer monsoon season[J]. *Chinese Science Bulletin*, **52**(17): 2057—2063. [李潮流, 康世昌, 丛志远. 青藏高原念青唐古拉峰冰川区夏季季风期间大气气溶胶元素特征[J]. *科学通报*, 2007, **52**(17): 2057—2063.]
- [9] Wu Guangjian, Xu Baiqing, Yao Tandong, *et al.* Heavy metals in aerosol samples from the Eastern Pamirs collected 2004—2006[J]. *Atmospheric Research*, 2009, **93**(4): 784—792.
- [10] Kang Shichang, Li Chaoliu, Wang Feiyue, *et al.* Total suspended particulate matter and toxic elements indoors during cooking with yak dung[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(27): 4243—4246.
- [11] Gu Qingping, Gao Xiang, Ding Kun, *et al.* Influence of domestic fuel consumption on indoor air pollution in rural Tibet [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **32**(4): 6—8. [顾庆平, 高翔, 丁鹏, 等. 西藏农村不同燃料利用类型对室内空气污染的影响[J]. *环境科学与技术*, 2009, **32**(4): 6—8.]
- [12] Huang Jianping, Minnis P, Yi Yuhong, *et al.* Summer dust aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(18): L18805.1—L18805.5.
- [13] Liu Z, Liu D, Huang J, *et al.* Airborne dust distributions o-

- ver the Tibetan Plateau and surrounding areas derived from the first year of CALIPSO LIDAR observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(16): 5045–5060.
- [14] Baron P A, Willeke K. *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001: 511–613.
- [15] Chu D A, Kaufman Y J, Zibordi G, *et al.* Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System—Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(21): 1–18.
- [16] Yang Dongzhen, Yu Xiaolan, Fang Xiumei, *et al.* A study of aerosol at regional background stations and baseline station [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology Science*, 1996, **7**(4): 396–405. [杨东贞, 于晓岚, 房秀梅, 等. 区域站和基准站气溶胶的分析[J]. *应用气象学报*, 1996, **7**(4): 396–405.]
- [17] Liu Haiyan, Zhang Xiaoye, Shen Zhibao. The chemical composition and concentration of atmospheric aerosol at WuDaoliang and its seasonal variation[J]. *Plateau Meteorology*, 1997, **16**(2): 122–129. [柳海燕, 张小曳, 沈志宝. 五道梁大气气溶胶的化学组成和浓度及其季节变化[J]. *高原气象*, 1997, **16**(2): 122–129.]
- [18] Yutaka Tobo, Yasunobu Iwasaka, Shi Guangyu, *et al.* Balloon-borne observations of high aerosol concentrations near the summertime tropopause over the Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Research*, 2007, **84**(3): 233–241.
- [19] Bai Yubo, Shi Guangyu, Tamura Koichi, *et al.* Lidar observations of atmospheric aerosol optical properties over Lhasa [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, **24**(4): 559–567. [白宇波, 石广玉, 田村耕一, 等. 拉萨上空大气气溶胶光学特性的激光雷达探测[J]. *大气科学*, 2004, **24**(4): 559–567.]
- [20] Zhou Renjun, Chen Yuejuan, Bi Yun, *et al.* Aerosol distribution over the Qinghai-Xizang Plateau and its relationship with Ozone[J]. *Plateau Meteorology*, 2008, **27**(3): 500–508. [周任君, 陈月娟, 毕云, 等. 青藏高原上空气溶胶含量的分布特征及其与臭氧的关系[J]. *高原气象*, 2008, **27**(3): 500–508.]
- [21] Yang Jun, Zhu Bin, Li Zihua. Physicochemical properties of atmospheric aerosol particles at Zetang and Jinghong of China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, **59**(6): 795–802. [杨军, 朱彬, 李子华. 泽当、景洪大气气溶胶粒子的物理、化学特性[J]. *气象学报*, 2001, **59**(6): 795–802.]
- [22] Zhan Mingjin, Sun Junying, Zhang Yangmei, *et al.* The influence of air mass sources on the particle number concentration and the size distribution at Mt. Waliguan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(4): 659–663. [占明锦, 孙俊英, 张养梅, 等. 气团来源对瓦里关地区颗粒物数谱分布的影响[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(4): 659–663.]
- [23] Zhan Mingjin. Particle size distribution measurements and research at Mount Waliguan[D]. Master Thesis, Beijing: The Chinese Academy of Meteorological Science, 2009. [占明锦. 瓦里关地区气溶胶数谱观测与研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2009.]
- [24] Kivekäs N, Sun J, Zhan M, *et al.* Long term particle size distribution measurements at Mount Waliguan, a high-altitude site in inland China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(15): 5461–5474.
- [25] Li Weiliang, Yu Shengmin. Numerical simulation of aerosol distribution, its radiative forcing and climate effect in Tibetan Plateau[J]. *Science in China(Series D)*, 2001, **31**(S1): 300–307. [李维亮, 于胜民. 青藏高原地区气溶胶的时空分布特征及其辐射强迫和气候效应的数值模拟[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, **31**(S1): 300–307.]
- [26] Li Ren, Ji Guoliang. Aerosol features over northern Tibetan Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2004, **23**(4): 501–505. [李韧, 季国良. 藏北高原五道梁地区的气溶胶特征[J]. *高原气象*, 2004, **23**(4): 501–505.]
- [27] Cong Zhiyuan, Kang Shichang, Smirnov Alexander, *et al.* Aerosol optical properties at Nam Co, a remote site in central Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Research*, 2009, **92**(1): 42–48.
- [28] Liu Cheng, Ming Hai, Wang Pei, *et al.* Measurements of the aerosol over Naqu of Tibet and suburb of Beijing by Micro Pulse Lidar (MPL) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1435–1439. [刘诚, 明海, 王沛, 等. 西藏那曲与北京郊区对流层气溶胶的微脉冲激光雷达测量[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1435–1439.]
- [29] Li Fang, Lü Daren. Optical properties of atmospheric aerosols over Mount Qomolangma[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1995, **19**(6): 755–763. [李放, 吕达仁. 珠穆朗玛峰地区大气气溶胶光学特性[J]. *大气科学*, 1995, **19**(6): 755–763.]
- [30] Zhan Yanan, Wang Yuesi, Wen Tianxue, *et al.* Observation and analysis on water-soluble inorganic chemical compositions of atmospheric aerosol in Gongga Mountain[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(1): 9–13. [赵亚南, 王跃思, 温天雪, 等. 贡嘎山大气气溶胶中水溶性无机离子的观测与分析研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 9–13.]
- [31] Wen Yupu, Xu Xiaobin, Tang Jie, *et al.* Enrichment characteristics and origin of atmospheric aerosol elements at Mt. Waliguan[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2002, **12**(4): 400–408. [温玉璞, 徐晓斌, 汤洁, 等. 青海瓦里关大气气溶胶元素富集特征及其来源[J]. *应用气象学报*, 2002, **12**(4): 400–408.]
- [32] Cong Zhiyuan, Kang Shichang, Liu Xiande, *et al.* Elemental composition of aerosol in the Nam Co region, Tibetan Plateau, during summer monsoon season[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(6): 1180–1187.
- [33] Zhang Renjian, Zou Han, Wang Mingxing, *et al.* Observation and analysis on elemental composition of atmospheric aerosols over Mount Qomolangma region[J]. *Plateau Meteorology*, 2001, **20**(3): 234–238. [张仁健, 邹捍, 王明星, 等. 珠穆朗玛峰地区大气气溶胶元素成分的监测及分析[J]. *高原气象*, 2001, **20**(3): 234–238.]
- [34] Giaveri G, Bergamaschi L, Rizzio E, *et al.* INAA at the top of the world: Elemental characterization and analysis of airborne particulate matter collected in the Himalayas at 5 100 m high[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2005, **263**(3): 725–732.
- [35] Mishra V K, Kim K H, Hong S, *et al.* Aerosol composition and its sources at the King Sejong Station, Antarctic peninsula[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(24): 4069–4084.
- [36] Tang Jie, Wen Yupu, Zhou Lingxi, *et al.* Observational

- study of black carbon in clean air area of western China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1999, **10**(2): 160–170. [汤洁, 温玉璞, 周凌晔, 等. 中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究[J]. *应用气象学报*, 1999, **10**(2): 160–170.]
- [37] Cao Junji, Xu Baiqing, He Jianqiao, *et al.* Concentrations, seasonal variations, and transport of carbonaceous aerosols at a remote mountainous region in western China[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(29): 4444–4452.
- [38] Zhao Yucheng, Deli Geer, Cai Yongxiang, *et al.* Variation of black-carbon aerosol concentration observed in Xining[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, **30**(5): 789–794. [赵玉成, 德力格尔, 蔡永祥, 等. 西宁地区大气中黑碳气溶胶浓度的观测研究[J]. *冰川冻土*, 2008, **30**(5): 789–794.]
- [39] Zhang Daizhou, Iwasaka Yasunobu, Shi Guangyu. Soot particles and their impacts on the mass cycle in the Tibetan atmosphere[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(34): 5883–5894.
- [40] Cong Zhiyuan, Kang Shichang, Dong Shuping, *et al.* Elemental and individual particle analysis of atmospheric aerosols from high Himalayas[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **160**(1–4): 323–335.
- [41] Zhao Shuhui, Li Zhongqin, Zhou Ping, *et al.* Morphological and element composition characteristics of the aerosol particles collected from the Glacier No.1 at the headwaters of Ürümqi river, Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(4): 714–722. [赵淑惠, 李忠勤, 周平, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川大气气溶胶的微观形貌及元素组成分析[J]. *冰川冻土*, 2010, **32**(4): 714–722.]
- [42] Wu Guangjian, Xu Baiqing, Zhang Chenglong, *et al.* Geochemistry of dust aerosol over the Eastern Pamirs [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, **73**(4): 977–989.
- [43] Zhang X Y, Arimoto R, Cao J J, *et al.* Atmospheric dust aerosol over the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(16): 18471–18476.
- [44] Ming Jing, Zhang Dongqi, Kang Shichang, *et al.* Aerosol and fresh snow chemistry in the East Rongbuk Glacier on the northern slope of Mt. Qomolangma (Everest)[J]. *Journal of Geophysical Research*, D, Atmospheres, 2007, **112**(15): D15307. 1–11.
- [45] Li Chaoliu, Kang Shichang, Zhang Qiangong, *et al.* Major ionic composition of precipitation in the Nam Co region, Central Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Research*, 2007, **85**(3–4): 351–360.
- [46] Sun Junying, Ren Jiawen, Qin Dahe, *et al.* Soluble species in aerosol and snow and their relationship at Glacier 1, Tien Shan, China [J]. *Journal of Geophysical Research*, **103**(D21): 28021–28028.
- [47] Li Xinzhou, Liu Xiaodong. A numerical study of the aerosol influence on climate change over the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2009, **27**(1): 1–9. [李新周, 刘晓东. 气溶胶对青藏高原气候变化影响的数值模拟分析[J]. *干旱气象*, 2009, **27**(1): 1–9.]
- [48] Han Yongxiang, Xi Xiaoxia, Song Lianchun, *et al.* Spatio-temporal sand-dust distribution in Qinghai-Tibet Plateau and its climatic significance [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, **24**(5): 588–592. [韩永翔, 奚晓霞, 宋连春, 等. 青藏高原沙尘及其可能的气候意义[J]. *中国沙漠*, 2004, **24**(5): 588–592.]
- [49] Gong Xiaoqian, Wu Guangjian, Zhang Chenglong, *et al.* Dust change over the Tibetan Plateau in recent years using ice core records and satellite remote sensing data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(2): 257–266. [宫晓倩, 邬光剑, 张成龙, 等. 基于冰芯记录与遥感数据的近期青藏高原粉尘变化研究[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(2): 257–266.]
- [50] Ming J, Cachier H, Xiao C, *et al.* Black carbon record based on a shallow Himalayan ice core and its climatic implications [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(5): 1343–1352.
- [51] Ming Jing, Xiao Cunde, Cachier Helene, *et al.* Black Carbon (BC) in the snow of glaciers in west China and its potential effects on albedos[J]. *Atmospheric Research*, 2009, **92**(1): 114–123.
- [52] Xu Baiqing, Cao Junji, Hansen James, *et al.* Black soot and the survival of Tibetan glaciers[J]. *PNAS*, 2009, **106**(52): 22114–22118.
- [53] Cui Xiaoqing, Ren Jiawen, Qin Xiang, *et al.* Climatic and environmental records within a shallow ice core at Laohugou Glacier No. 12, Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(6): 1251–1258. [崔晓庆, 任贾文, 秦翔, 等. 祁连山老虎沟12号冰川浅冰芯记录的气候环境信息[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(6): 1251–1258.]
- [54] Li Quanlian, Wang Ninglian, Wu Xiaobo, *et al.* Aliphatic and Polyaromatic Hydrocarbons in snow/ice and glacier meltwater in the Qiyi glacier, Qilian mountains: sources and distribution[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(4): 706–713. [李全莲, 王宁练, 武小波, 等. 祁连山七一冰川雪冰和冰川融水中正构烷烃和多环芳烃的分布特征及来源研究[J]. *冰川冻土*, 2010, **32**(4): 706–713.]
- [55] Li Quanlian, Wang Ninglian, Wu Xiaobo, *et al.* Environmental records within the snowpits in the Yuzhufeng glacier and Xiao Dongkemadi glacier on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **33**(1): 47–54. [李全莲, 王宁练, 武小波, 等. 青藏高原玉珠峰冰川和小冬克玛底冰川雪坑中的环境记录[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(1): 47–54.]
- [56] Decesari S, Facchini M C, Carbone C, *et al.* Chemical composition of PM₁₀ and PM₁ at the high-altitude Himalayan station Nepal Climate Observatory-Pyramid (NCO-P) (5079m a. s. l.) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(10): 4583–4596.
- [57] Cong Zhiyuan, Kang Shichang, Qin Dahe. Seasonal features of aerosol particles recorded in snow from Mt. Qomolangma (Everest) and their environmental implications[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(7): 914–919.
- [58] Zhang Renjian, Shen Zhenxing, Zou Han. Atmospheric Pb levels over Mount Qomolangma region[J]. *China Particology*, 2009, **7**(3): 211–214.
- [59] Kaspari S, Mayewski P A, Handley M, *et al.* Recent increase in atmospheric of Bi, U, Cs, and Ca from a 350-Year Mt Everest ice core record[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(D4): D04302. 1–D04302. 14.
- [60] Wang Xiaoping, Xu Baiqing, Kang Shichang, *et al.* The his-

- torical residue trends of DDT, hexachlorocyclohexanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in an ice core from Mt. Everest, central Himalayas, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(27): 6699–6709.
- [61] Chen Haowen. Content of air-borne microbes above Xining, Qinghai Lake and geermu in Qinghai Province[J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2002, **19**(1): 62–66. [陈皓文. 西宁青海湖格尔木的空气微生物含量[J]. *国土资源科技管理*, 2002, **19**(1): 62–66.]
- [62] Huang Jie, Kang Shichang, Sheng Chengde, *et al.* Composition and seasonal variations of carbon isotopes in aerosols of Lhasa, Tibet[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(5): 1139–1145. [黄杰, 康世昌, 沈承德, 等. 拉萨市气溶胶中碳同位素的组成及季节变化[J]. *环境科学*, 2010, **31**(5): 1139–1145.]
- [63] Huang Jie, Kang Shichang, Sheng Chengde, *et al.* Concentration and seasonal variation of ^{10}Be in surface aerosols of Lhasa, Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(13): 1274–1280. [黄杰, 康世昌, 沈承德, 等. 西藏拉萨市大气气溶胶 ^{10}Be 及其季节变化 [J]. *科学通报*, 2010, **55**(13): 1274–1280.]

The Progress of Aerosol Research in the Tibetan Plateau

YU Guang-ming, XU Jian-zhong, REN Jia-wen

(State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Atmospheric particles or aerosol recently received much attention due to the important role it plays in many aspects of climate and environmental issues. The high elevation, sparse human population and almost no industrial activities make the Tibetan Plateau being an ideal area for monitoring aerosol properties under background atmosphere conditions. Scientists have obtained many relevant data from high mountain stations and glacier expeditions in the last twenty years in this area. In this

paper, achievements of aerosol research in the Tibetan Plateau are summarized from three aspects: characteristics of aerosol, climate effect and its environmental effect. However, further research is necessary for systematic study and developing advanced methods. In addition, research on aerosol records in glaciers and ice cores, which could provide valuable information to the climate change studies, should be emphasized in the future study.

Key words: Tibetan Plateau; aerosol; review and prospect