

文章编号: 1001-8166 (2006) 03-0299-06

青藏高原冰雪不溶微粒研究进展

徐建中^{1,3}, 孙俊英^{1,2}, 任贾文¹, 秦大河¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈与环境联合重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国气象局中国气象科学研究院大气成分观测与服务中心, 北京 100081; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 不溶微粒是冰雪中重要的气候环境变化参数, 通过冰雪中微粒记录研究气候环境变化是冰雪研究的一个重要方向。20 世纪中后期对冰雪微粒的研究主要集中在南极和格陵兰, 到 20 世纪末期时一些研究人员开始关注中纬度的冰雪微粒的研究, 特别是青藏高原冰雪微粒的研究。到目前为止, 共有 4 根冰芯(敦德冰芯、古里雅冰芯、达索普冰芯和慕士塔格冰芯)和数个雪坑开展了微粒研究。青藏高原冰雪微粒研究主要从微粒定年、微粒浓度、粒径分布、特殊事件的记录以及与可溶性离子的关系等方面进行了研究。主要回顾了从 80 年代末开始的青藏高原冰雪微粒研究的一些主要方法和主要成果并且展望了今后微粒重点研究的方向。

关 键 词: 冰芯 不溶微粒 青藏高原

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

1 前 言

冰雪不溶微粒 (insoluble microparticle) 是指沉积在冰雪中的大气气溶胶的不溶解部分。冰雪微粒的研究主要集中在格陵兰和南极冰盖上钻取的深孔冰芯, 如南极冰盖的 Bryd^[1]、Vostok^[2,3]、Dome C^[4,5]、EPICA Dome C^[6,7] 等冰芯; 格陵兰的 Camp Century^[4]、Dye3^[8]、Crete GISP2^[9,10] 等冰芯。与冰芯中其它记录参数相比, 冰芯微粒记录有其独特的一面, 比较典型的是 Biscaye^[11] 和 Grousset^[12], 分别利用冰芯微粒中的 Pb 和 Sr 同位素证明了格陵兰和南极冰芯中粉尘的来源。极地深冰芯微粒研究很多集中在末次冰期的气候和环境的研究, 并且得到了很多有意义的结果, 如 Thompson^[4] 认为 Dome C、Byrd、Camp Century 冰芯末次冰期微粒含量分别是全新世的 6 倍、3 倍、12 倍; Petit (1999) 研究表明 Vostok 冰芯微粒含量从间冰期的 50 ng/g 上升到末次冰期的 1 000 ~ 2 000 ng/g。

青藏高原地处中亚腹地, 海拔大都处在 3 500 ~

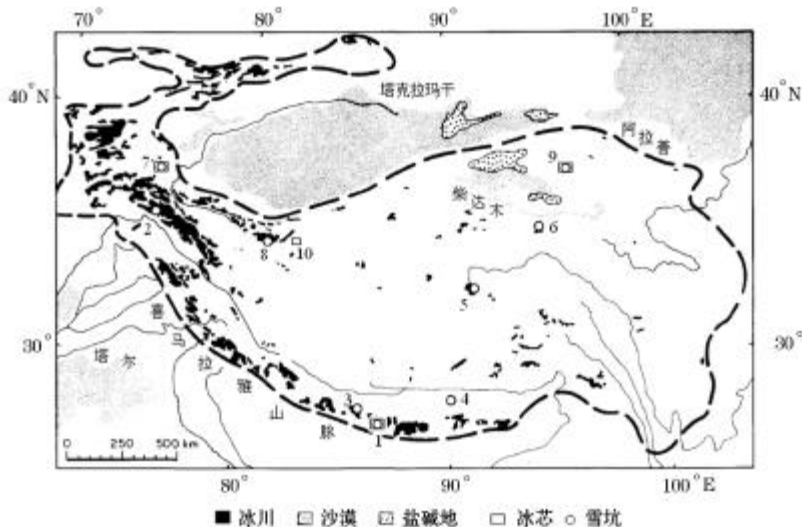
4 500 m, 其上的沙尘非常容易进入西风环流中, 因此是全球重要的沙尘源之一。与极地冰芯微粒研究相比, 青藏高原冰芯时间序列记录没有极地冰芯记录长, 但由于其地处居住人类最多的中纬度, 人类活动的影响以及气候环境变化势必会在青藏高原冰雪中留下痕迹, 因此通过高原冰雪微粒的记录反映人类历史时期的活动是非常有意义的。青藏高原冰芯微粒研究较晚, 目前已研究的冰芯有敦德 (Dunde)、古里雅 (Guliya)、达索普 (Dasuopu) 和慕士塔格 (Muztag Ata) 冰芯, 另外还有数个雪坑。所有研究主要从微粒定年、微粒浓度、粒径分布、特殊事件的记录以及与可溶性离子的关系等方面进行研究。本文主要回顾青藏高原从 20 世纪 80 年代末开始的冰雪微粒研究的一些主要方法和成果。

2 青藏高原冰雪微粒研究的方法和内容

图 1 是青藏高原冰雪微粒采样点, 其中敦德、希夏邦马峰和慕士塔格 3 个采样点既开展了雪坑微粒研究也有冰芯微粒研究。表 1 列出了青藏高原雪坑

* 收稿日期 2005-06-23; 修回日期 2005-10-31。

* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目“我国自然环境分异耦合过程与发展趋势”(编号: KZCX2-SW-118) 资助。
作者简介: 徐建中 (1978-), 男, 山西泽州人, 博士研究生, 主要从事冰雪化学研究。E-mail: jxzu78@hcm.ail.com



1. Ngozum pa 冰川 2. 希斯帕尔冰川 3. 希夏邦马峰 4. 枪勇冰川 5. 格拉丹东
6. 煤矿冰川 7. 慕斯塔格冰川 8. 崇测冰川 9. 敦德冰帽 10. 古里雅冰川

图 1 青藏高原冰雪微粒研究采样点(参考 Wake 等, 1994)

Fig. 1 Location map identifying glaciers where snow and ice samples were collected for microparticle analysis (Based on Wake et al., 1994)

微粒研究的相关信息,包括采样点的位置、海拔及微粒研究的粒径范围等。

3 微粒定年

如果冰芯微粒具有明显的季节变化,这将为冰芯定年提供了很大的帮助。根据高分辨率的微粒记录进行冰芯定年的方法有 2 种,一种是从上至下直接数出整个冰芯中不溶微粒含量的峰数;另一种是根据冰芯某段中不溶微粒含量的峰数计算出该段的年积累量 a_i ,然后把 a_i 应用到该冰芯的其它未知段来计算出冰芯的年龄^[13]。依据微粒周期性的变化敦德冰芯、达索普冰芯和慕斯塔格冰芯都直接采用或参考微粒进行了定年,敦德冰芯上部 70 m 主要通过计数微粒的峰值定年,70 ~ 127 m 通过统计的污化层进行了定年,冰芯达到 4 550 年,下部大约 20 m 由于冰年层比较薄,通过其它方法进行了定年^[14];达索普冰芯微粒周期性变化更明显,冰芯上部不论是微粒变化还是 ^{18}O 都很好的记录了年际变化的信息,根据微粒和 ^{18}O 冰芯定年在 145.4 m 处推算到公元 1440 + 3 年^[15];慕斯塔格也是根据微粒和 ^{18}O 进行了定年^[16];古里雅冰芯微粒周期性不明显^[17]。敦德雪坑的 2 次采样研究表明,在粒径 2.00 $< d < 50.8 \mu\text{m}$ 和 0.63 $< d < 16.0 \mu\text{m}$ 范围内微粒数

量浓度都有明显的年际变化,浓度峰值对应每年的秋季^[19]。随后 Wake 等^[19]在青藏高原多个点进行了雪坑采样,发现高原东南部的 Ngozum pa 冰川、中部的格拉丹东和西北部慕斯塔格雪坑中微粒数量和质量浓度都有季节变化。Ngozum pa 冰川因为不同季节受不同系统控制(夏季受南压季风影响,冬季受西风环流影响)雪坑微粒呈双峰型分布;而格拉丹东和慕斯塔格雪坑微粒都是单峰型变化,最大值出现在春季的沙尘暴期间;而地处青藏高原西南部的希斯帕尔(Hisper)雪坑则是多峰型变化,没有明显的季节变化。可见,在青藏高原不同区域雪坑记录是有差异的,不同地域微粒记录有其局地性,因此要采用微粒数量或质量浓度进行定年时,首先要确定其降雪中微粒的周期性变化,同时还必须选取恰当的粒径范围进行统计。

4 粒径分布及浓度变化

青藏高原冰芯和雪坑微粒数据都表明中小粒径的微粒占的数量比重最大。敦德冰芯中,细微粒($2 < d < 2.5 \mu\text{m}$)数量占总微粒数量的 87%,而粗微粒($d > 5.04 \mu\text{m}$)数量仅占总微粒数量($d > 2 \mu\text{m}$)的 13%^[20]。慕斯塔格冰芯 1 ~ 2 μm 细颗粒的数量占总颗粒(1 $< d < 30 \mu\text{m}$)的 73.38%,1 ~ 5 μm 的颗粒

占有所有颗粒的 97.8%^[16]。众多雪坑中微粒粒径 1 ~ 13 μm 间的几何平均质量浓度占总粒径范围 1 ~ 22 μm 的几何平均质量的 80% ~ 93%。希斯帕尔 (Hisper) 雪坑微粒质量浓度在 $d < 1 \mu\text{m}$ 和 $1 < d < 2 \mu\text{m}$ 处各有一个峰值, 格拉丹东、希夏邦马和枪勇雪坑微粒质量浓度—粒径分布峰值出现在 2 ~ 8 μm 间, 慕士塔格和崇测雪坑的峰值出现在 3 ~ 8 μm 间。已有的高原冰雪微粒研究表明, 在空间分布上, 无论质量浓度和数量浓度, Ngozum pa 雪坑都是最低的, 它的浓度和 GISP2 部分样品都很相似, 这主要是

因为中亚干旱和半干旱地区粉尘对喜马拉雅山东南部贡献较小的原因^[19]; 希夏邦马峰、枪勇冰川和格拉丹东冰川雪坑数量浓度比 Ngozum pa 雪坑高 3 ~ 9 倍, 质量浓度是 Ngozum pa 的 4.4 ~ 6.1 倍。敦德冰芯和慕士塔格冰芯微粒浓度在小于 10 μm 范围内能比较好的服从 Junge 分布, 而崇测冰川雪坑和慕士塔格雪坑微粒浓度大致服从质量—粒径的正态分布, 众数值出现在 3 ~ 8 μm , 格拉丹东和枪勇冰川雪坑等则不服从质量—粒径的正态分布, 但质量浓度最大值也出现在 3 ~ 8 μm ^[19]。

表1 雪坑采样综合表(参考 Wake 等, 1994)
Table1 Snow sampler record (Based on Wake et al, 1994)

	采样位置		采样时间	时间跨度	样品数	微粒数 ($\times 10^3$ / mL)		微粒质量 ($\mu\text{g} / \text{g}$) [*]		净积累量 (cm) (时间)	沉积量 ($\mu\text{g} / (\text{cm}^2 \cdot \text{a})$)	
	经纬度	海拔 (m)				1 ~ 2 μm	> 2 μm	1 ~ 13 μm	1 ~ 22 μm		1 ~ 13 μm	1 ~ 22 μm
Ngozum pa 冰川	28.0 N, 86.7 E	5 700	1990.10	1989—1990	23	14.1	4.07	0.379	nd	57	27	—
希斯帕尔冰川 Hisper Glacier	36.0 N, 75.5 E	5150	1988.07	1985—1988	81	357	17.4	2.28	2.66	146(1985—1986) 135(1986—1987) 116(1987—1988)	374 385 590	422 437 672
希夏邦马峰 Xixiabangma peak	28.3 N, 85.7 E	6 140 ~ 7 000	1991.09	1990—1991	27	83.8	18.5	1.84	2.30	68	152	217
枪勇冰川 Qiang Yong Glacier	28.8 N, 90.2 E	5 850	1992.10	1990—1991	16	75.7	14.6	1.67	1.95	62	139	169
格拉丹东 Mt. Geladandong	33.4 N, 91.1 E	5 950	1990.07	1988—1990	40	133	32.3	2.32	2.63	25(1988—1989) 56(1989—1990)	123 154	144 184
煤矿冰川 Meikuang Glacier	35.7 N, 94.2 E	5 480 ~ 5 770	1990.08		12	178	35.5	2.14	2.30			
慕士塔格 Mustagh Ata	38.2 N, 75.1 E	5 910	1992.10	1990—1992	30	202	74.4	6.10	6.78	21(1990—1991) 27(1991—1992)	227 546	247 607
崇测冰川 Chongce Glacier	35.2 N, 91.1 E	6 327	1987.07	1980—1987	26	499	117	7.53	8.22			
敦德冰帽 Dunde Ice Cap	38.1 N, 96.4 E	5 325	1984	1981—1986	44	nd	80.4	nd	nd			

* 微粒质量以密度为 2.6 g/cm^3 计算; nd 表示没日期

5 微粒记录的特殊事件

大的特殊事件如火山喷发、沙尘暴、干旱、火灾、冰期和间冰期等所引起的环境变化在冰雪中都有明确的记录。敦德冰芯研究表明微粒含量异常变化年代与中国东部地区历史所记载的沙尘暴事件具有一致性(图 2)^[22]。通过冰芯微粒恢复末次冰期的环境和气候变化一直是冰芯研究的热点, 目前青藏高原只有敦德冰芯和古里雅冰芯记录能恢复到 10 ka 前。敦德冰芯 129.2 m 以下微粒数浓度和 ^{18}O 值变化都比较明显, 认为是末次冰期沉积下来的, 冰芯记录发现在此期间微粒数浓度是平均浓度的 2.5 倍, 与之对应的 ^{18}O 值下降明显^[21]。古里雅冰芯所恢复的时间包含了整个末次冰期^[17], 在 150 ~ 260

m 间(约 20 ~ 100 ka BC), 微粒 ($0.63 < d < 50 \mu\text{m}$) 数浓度比其上部冰芯微粒平均值高 6%, 比紧接其下部冰芯样品微粒浓度值高 37%。无论是敦德冰芯还是古里雅冰芯其记录的末次冰期微粒浓度变化幅度都没有极地冰芯所记录的强烈, 造成这样的结果可能的原因是青藏高原末次冰期时存在比较特殊的气候环境^[24, 25]。达索普冰芯 (C3) 长 167.7 m, 恢复了近 1 ka 记录, 达索普冰芯积累量较敦德冰芯和古里雅冰芯的大, 因此达索普冰芯对微粒的记录更能真实的反映历史时期的气候环境变化。达索普冰芯中微粒及 ^{18}O 记录出现了几个明显的峰值, 历史文献记录表明, 几次南亚季风的异常和亚洲发生的大规模的干旱(印度干旱事件: 1790—1796 和 1876—1877) 正好与之对应, 特别是 1790—1796 年

间的干旱事件,全球很多地方都有记录^[15]。

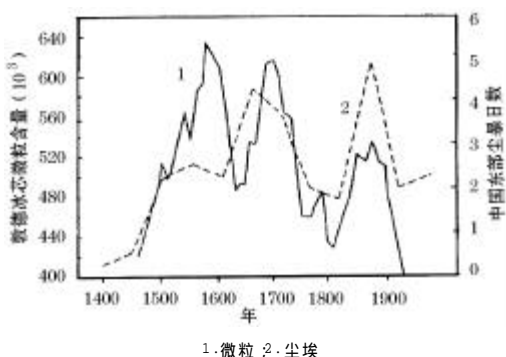


图 2 敦德冰芯微粒记录与中国东部尘埃记录的比较(姚檀栋, 1995)

Fig. 2 Relationship between microparticle concentration in Dundee ice core and dust in east China (Yao Tandong, 1995)

6 微粒对气候因子的响应

研究表明,微粒记录与温度、降雨量、太阳辐射等气候因子存在密切的关系。古里雅冰芯、敦德冰芯和慕斯塔格冰芯中 $\delta^{18}O$ 都是温度的指标,研究表明 β 支冰芯中微粒浓度和 $\delta^{18}O$ 有较好的对应关系——微粒浓度高, $\delta^{18}O$ 值越低;微粒浓度低, $\delta^{18}O$ 值升高。而达索普冰芯中 $\delta^{18}O$ 主要是降水量效应,1440—1997年间,冰芯中微粒记录和 $\delta^{18}O$ 有很好的正相关性,它们间的相关系数为0.25(显著水平为0.01)^[15];古里雅冰芯微粒变化和太阳辐射变化也有很好的对应关系^[17]。从110 ka BP开始,随着北半球高纬太阳辐射的减弱,太阳辐射与粉尘记录间开始存在明显的负相关关系,在太阳辐射较高的时段,粉尘浓度降低,而在太阳辐射减弱的时段,粉尘浓度增加,此后粉尘浓度变化的周期与地球轨道周期一致。与极地冰芯微粒记录相比,古里雅冰芯微粒记录表明末次冰盛期时冰芯微粒并没有像极地冰芯中那样剧烈变化,这是不同于极地冰芯微粒记录的一个突出特征,其中的原因还有待进一步的研究。

7 微粒和可溶性离子的关系

冰雪中微粒和离子是大气粉尘的2个组成部分,研究表明,它们之间存在一定的关系。通常所测的离子包括 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 等。极地冰芯微粒研究中,作为粉尘可溶部分的重要离子 Ca^{2+} 或非海盐 Ca^{2+} ($nssCa^{2+}$)经常被用作反映大气粉尘的指标^[26,29]。而青藏高原古

里雅冰芯中的 Ca^{2+} 亦可以作为大气粉尘的指标^[25]。尽管古里雅冰芯中 Ca^{2+} 浓度变化超前于微粒的变化,相位对应比较差,但来自干旱区的粉尘所占的比例十分重要,微粒与钙离子趋势上存在一定的相似性,整体的相关性还是存在的。造成相关性减弱的原因可能是由于古里雅冰芯中 Ca^{2+} 来源的多样性所造成的,研究表明,高原上众多的盐湖也含有较多的 Ca^{2+} ^[30]。可溶性离子除了 Ca^{2+} 和微粒在冰芯中有一定的相关性外, Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和微粒也有类似的相关。如慕斯塔格冰芯中 SO_4^{2-} 和微粒数量浓度和质量浓度之间有明显的相关性^[16]。

8 讨论

通过冰芯恢复历史时期的大气粉尘的状况是冰芯微粒研究的主要内容。青藏高原特殊的地理位置及其在气候系统中巨大的影响,必然是冰芯微粒研究的重要场所。尽管青藏高原冰芯不溶性微粒已经进行了多方面的研究,也得到了很多非常有意义的结论,但由于其上条件艰苦,取样相当困难,已经研究的采样地点分布不是很广泛,即使已经有研究的地点也有的仅限于雪坑样品,时间序列不是很长,因此仍然有大量的工作需要去做。尤其一些特殊的区域,如积累量比较高的喜马拉雅山东南部,以及对对中国北方沙尘暴记录较好的高原北部祁连山上的冰川等应该是冰芯微粒研究的关键地点。笔者认为今后冰雪微粒研究主要集中在以下3个方面进行:

(1) 微粒特征同位素的研究。特征同位素在极地冰芯微粒的研究已经有很多的应用,并且得到了很多非常有意义的结果^[11,12]。特征同位素在确定微粒来源是非常有用的工具,但在青藏高原冰雪中这方面的研究才刚刚起步。

(2) 微粒沉降和在雪中的迁移过程。不同类型的沉降过程对微粒在冰雪中的保存形式是不一样的,干沉降过程已经做了一些研究^[33,34],但对湿沉降过程了解的非常有限,正像Davidson^[35]指出的,太多的不确定性给推测微粒的沉降过程造成了非常大的困难。另外,了解微粒在冰雪中的迁移也非常重要,这直接决定着微粒能在多大程度上真实反映空气中粉尘浓度。

(3) 微粒对冰芯微生物的影响。研究表明微生物数量和冰芯中污化层有很好的对应关系,有污化层的层位微生物数量较多,可能的原因是大气粉尘为冰芯微生物提供了赖以生长的营养物质和微生态环境^[36]。但由于冰芯微生物研究刚起步,其中的一

些机制仍有待进一步的开展研究。

参考文献(References):

- [1] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Koci B R. A 1500-year record of tropical precipitation in ice cores from the Quelccaya Ice Cap, Peru [J]. *Science*, 1985, 229: 971-973.
- [2] de Angelis M, Barkov N I, Petrov V N. Aerosol concentrations over the last climatic cycle (160 kyr) from an Antarctic ice core [J]. *Nature*, 1987, 325: 318-321.
- [3] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica [J]. *Nature*, 1999, 399: 429-436.
- [4] Thompson L G, Mosley-Thompson E. Microparticle concentration variations linked with climatic change: Evidence from polar ice cores [J]. *Science*, 1988, 212: 812-815.
- [5] Insoluble particles in polar ice: Identification and measurement of the insoluble background aerosol [J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, 21(6): 437-440.
- [6] Jouzel J, Masson V, Cattani O, et al. A new 27 ky high resolution East Antarctic climate record [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(16): 3 199-3 202.
- [7] Delmonte B, Petit J R, Maggi V, et al. Glacial to Holocene implications of the new 270 000-year dust record from the EPICA Dome C (East Antarctica) ice core [J]. *Climate Dynamics*, 2002, 18: 647-660.
- [8] Hansson M. The Renland ice core, A Northern Hemisphere record of aerosol composition over 12 000 years [J]. *Tellus*, 1994, 46 B: 390-418.
- [9] Zielinski Gregory A, Mayewski Paul A, Meeker L David. Volcanic aerosol records and tephrochronology of the Summit, Greenland, ice cores [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C12): 26 625-26 640.
- [10] Ram M, Gerson Koenig. Continuous dust concentration profile of pre-Holocene ice from the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core: Dust stadials, interstadials, and the Eemian [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C12): 26 641-26 648.
- [11] Biscaye P E, Grousset F E, Revel M, et al. Asian provenance of glacial dust (stage 2) in the Greenland Ice Sheet Project 2 Ice Core, Summit, Greenland [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C12): 26 765-26 782.
- [12] Grousset Francis E, Biscaye Pierre E, Revel Marie. Antarctic (Dome C) ice-core dust at 18 ka BP: Isotopic constraints on origins [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 111(1): 175-182.
- [13] Xie Shucheng, Yao Tandong. Insoluble microparticles in the cores and their climatic and environmental implications [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1997, 19(4): 373-377. [谢树成, 姚檀栋. 冰芯不溶微粒记录极期气候和环境意义 [J]. *冰川冻土*, 1997, 19(4): 373-377.]
- [14] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, et al. 100 ka climate record from Qinghai-Tibetan plateau ice cores [J]. *Science*, 1989, 246(4 929): 474-477.
- [15] Thompson L G, Yao T, Mosley-Thompson E. A high-resolution millennial record of the south Asian monsoon from Himalayan ice cores [J]. *Science*, 2000, 289(5 486): 916-920.
- [16] Wu Guangjian. Study on Microparticle in the Mustangza and Guliyi Ice Core [R]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, 2004. [邬光剑. 慕斯塔格和古里雅冰芯中微粒记录研究 [R]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所博士后研究报告, 2004.]
- [17] Thompson L G, Yao T, Davis M E. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core [J]. *Science*, 1997, 276(20): 821-825.
- [18] Thompson Lonnie G, Wu Xiaoling, Mosley-Thompson Ellen. Climatic records from the Dundee ice cap, China [J]. *Annals of Glaciology*, 1988, 10: 178-182.
- [19] Wake C P, Mayewski P A. Modern eolian dust deposition in central Asia [J]. *Tellus*, 1994, 46 B: 220-223.
- [20] Liu Chunping. Studies on Microparticle Analysis, Climate and Environment from Dundee Ice Core, Qilian Mountain [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, 1999. [刘纯平. 祁连山敦德冰芯微粒与气候环境变化研究 [D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 1999.]
- [21] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E. Glacial stage ice-core records from the subtropical Dundee ice cap, China [J]. *Annals of Glaciology*, 1990, 14: 288-297.
- [22] Yao Tandong, Thompson L G. Environmental records in ice cores and their spatial coupling features [J]. *Quaternary Sciences*, 1995, (1): 23-31. [姚檀栋, Thompson L G. 冰芯所记录的环境变化及空间耦合特征 [J]. *第四纪研究*, 1995, (1): 23-31.]
- [23] Wu Guangjian, Yao Tandong, Thompson L G, et al. Microparticle record in the Guliyi ice core and its comparison with polar records since the last interglacial [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(5): 475-479. [邬光剑, 姚檀栋, Thompson L G, 等. 末次冰期以来古里雅冰芯微粒记录与极地冰芯的对比 [J]. *科学通报*, 2004, 49(5): 475-479.]
- [24] Shi Yafeng, Yu Ge. Warm humid climate and transgressions during 40-30 ka BP and their potential mechanism [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(1): 1-11. [施雅风, 于革. 40-30 ka BP. 中国暖湿气候和海侵的特征与成因探讨 [J]. *第四纪研究*, 2003, 23(1): 1-11.]
- [25] Yao Tandong, Wu Guangjian, Pu Jianchen, et al. Relationship between calcium and atmospheric dust recorded in Guliyi ice core [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(9): 888-892. [姚檀栋, 邬光剑, 蒲剑辰, 等. 古里雅冰芯中钙离子与大气粉尘变化关系 [J]. *科学通报*, 2004, 49(9): 888-892.]
- [26] Mayewski P A, Meeker L D, Morrison M C, et al. Greenland ice core "Signal" Characteristics: An expanded view of climate change [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(D7): 12 839-12 847.
- [27] Fuhrer K E, Welff W, Johnsen S J. Timescales for dust variability in the Greenland Ice Core Project (GRIP) ice core in the last

- 100 ka[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D24): 31 043-31 052.
- [28] Rohlisberger R, Mulvaney R, Wolff E W, et al. Dust and sea salt variability in central East Antarctica (Dome C) over the last 45 ka and its implications for southern high-latitude climate[J]. *Geophysical Research Letter*, 2002, 29(20): 1963.
- [29] Ruth U. Concentration and Size Distribution of Microparticles in the NGRIP Ice Core (Central Greenland) during the Last Glacial Period[D]. University Bremen, 2002.
- [30] Yu Shengong, Tang Yuan. The hydrochemical characteristics of the saline lakes on the Qinghai-Xizang plateau [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1981, 12(6): 498-511. [于癸松, 唐渊. 青藏高原盐湖的水化学特征[J]. *海洋与湖泊*, 1981, 12(6): 498-511.]
- [31] Kang Shichang, Qin Dahe, Yao Tandong, et al. Environment recorder in the glacier from mount Xixiabangma [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1): 55-65. [康世昌, 秦大河, 姚檀栋, 等. 西夏邦马峰冰川粒雪中环境变化记录研究[J]. *地理学报*, 2000, 55(1): 55-65.]
- [32] Li Yuefang, Yao Tandong, Sheng Wenkun, et al. Influence of arid dust on the Chemical records of the Guliya icecap [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(2): 103-108. [李月芳, 姚檀栋, 盛文坤, 等. 干旱区粉尘对古里雅冰帽中化学记录的影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(2): 103-108.]
- [33] Rujrook W, Davidson C I, Nicholson K W. Dry deposition of particles [J]. *Tellus*, 1995, 47B: 587-601.
- [34] Arimoto R, Ray B J, Lewis N F, et al. Mass-particle size distributions of atmospheric dust and the dry deposition of dust to the remote ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D13): 15 867-15 874.
- [35] Davidson C I, Bergin M H, Kuhns H D. The deposition of particles and gases to ice sheets [C]. Wolff E W, Beales R C, eds. *Chemical Exchange Between the Atmosphere and Polar Snow*. Berlin: Springer, 1996: 275-307.
- [36] Xiang Shurong, Yao Tandong, An Lizhe, et al. Change of bacterial community in the Manan Ice Core and its relation to climate and environment [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(17): 92-98. [向述荣, 姚檀栋, 安黎哲, 等. 马兰冰芯细菌群落结构变化与气候环境的关系[J]. *科学通报*, 2004, 49(17): 1 762-1 769.]

Advances in the Study of Insoluble Microparticle in Ice-Snow on the Qinghai-Xizang Plateau

XU Jian-zhong^{1,3}, SUN Jun-ying^{1,2}, REN Jia-wen¹, QIN Da-he¹
(1. Key Laboratory of Cryosphere and Environment, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China;
2. Center for Atmosphere Watch and Services CMA, Beijing 100081, China;
3. Graduate School, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract: The ice impurities are fractions of the atmospheric aerosol that have been deposited on the surface of the ice sheets via wet or dry deposition. In the study of ice core stratigraphy, insoluble microparticles are one of the components of ice impurities analyzed. Changes in impurity content of the ice core strata reflect change in atmospheric conditions of past climate. During the second half of the 20th century, scientists paid more attention to microparticle study in the polar ice, however many scientists started concern on the microparticle study on the Qinghai-Xizang plateau in the last ten years of the 20th century. As of now, there have been four ice cores and many snow samples that have been studied in microparticle on the Qinghai-Xizang plateau. The study is mainly focuses on calculating time by microparticle, microparticle concentration, size distribution, abrupt event record and relationship with soluble ions. This article reviews the methodologies and results of microparticle study on the Qinghai-Xizang plateau starting from last ten years of the 20th century, and some important tasks are also proposed, including (1) the studies of mineralogy and isotopic composition; (2) deposition process and post-deposition process; (3) the role in the microorganism research of ice-snow.

Key words: ice core; insoluble microparticle; Qinghai-Xizang plateau.