科学通报 2009 年 第 54 卷 第 12 期: 1756 ~ 1760
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

珠穆朗玛峰东绒布冰芯微粒来源示踪

徐建中①, 侯书贵①*, 陈福坤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, 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000;
② 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029
* 联系人, E-mail: shugui@lzb.ac.cn

2008-04-15 收稿, 2008-10-27 接受
国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB411501)、国家自然科学基金(批准号: 90411003)、中国科学院“百人计划”和中国科学院知识创新工程项目(编号: KZCX3-SW-344)资助

摘要 首次通过 Sr-Nd-Pb 同位素示踪方法, 研究了珠穆朗玛峰(以下简称: 珠峰)东绒布冰芯中不溶性微粒的来源. 结果表明, 冰芯污化层样品中的微粒主要来源于局地粉尘源; 而非污化层样品的同位素组成和印度西北干旱区的结果接近. HYSPLIT 模式的空气轨迹分析表明, 印度西北部发生尘暴时, 到达冰芯采样点的气流首先要经过该地区, 进一步验证了东绒布冰芯中微粒来源于印度西北部的可能性.

关键词
珠穆朗玛峰
东绒布冰芯
微粒
Sr-Nd-Pb 同位素

冰芯记录研究中, 不溶性微粒的研究是其中一个重要部分. 微粒是大气粉尘沉降到冰雪表面的不溶解的部分, 它的变化能直接反映出历史时期大气粉尘的状况. 格陵兰深冰芯中不溶微粒浓度的结果表明, 在冰期-间冰期微粒浓度发生了明显的变化, 冰期时微粒浓度增长了 10~100 倍 [1~3]; 南极Vostok和Dome C冰芯的结果也类似 [4,5]. 表明冰期时大气粉尘比间冰期显著升高, 其可能原因之一是粉尘源区发生了显著的变化. 大气环流模式模拟的结果表明[6], 冰期时粉尘源区面积的扩大, 使得粉尘的输送通量大大增加. 而要清楚的了解粉尘源区的变化, 确定粉尘的来源成了首先要解决的问题.

Sr-Nd-Pb同位素组成分布具有地带性, 并且在大气迁移或沉积过程中很难被改变, 三者联立可以很好的作为粉尘源区的示踪物 [7~9]. Grousset等人 [10]首次通过此方法认为南极冰芯中冰期时的微粒可能来源于南美Patagonian高原; Delmonte等人 [4]最近又对这方面的工作进行了更深入的研究, 认为南美南部地区都有可能是东南极冰期时微粒的源区. Biscaye等人 [11]和Svensson等人 [12]先后分别鉴定了亚洲干旱区作为格陵兰冰芯中冰期时的主要源区.

本文试图通过 Sr-Nd-Pb 同位素组成来确定喜马拉雅山中部珠峰东绒布冰芯中微粒来的来源. 喜马拉雅山周围有多个沙尘源区, 如北部有青藏高原以及中国西北干旱半干旱区, 南部有塔尔沙漠及印度河-恒河流域, 西面有中亚及西南亚干旱半干旱地区, 甚至有更远的北非沙漠区. 从大气环流角度, 这几个源区都有可能传输到喜马拉雅山地区, 因此能有效地确定出冰芯中微粒的来源是非常必要的.

1 样品采集及实验分析

1.1 样品采集

2002 年 9~10 月中美联合科学考察队在珠峰东绒布冰川垭口处(28°01'05"N, 86°57'52"E, 海拔 6518 m)(图 1)钻取了两支长度分别为 108.83 和 95.80 m的透底冰芯, 以及一支 40 m浅冰芯 [13]. 冰芯钻取点位于冰川积累区, 该区域冰川水平流动微弱(1998和2002年GPS测量结果所证实). 冰芯(108.83 m)钻孔温度表明20 m深度处冰温最低(–9.6℃), 至钻孔底部冰温略微上升(–8.9℃). 上述特征表明东绒布冰川是进行冰芯研究的

引用格式: 徐建中, 侯书贵, 陈福坤, 等. 珠穆朗玛峰东绒布冰芯微粒来源示踪. 科学通报, 2009, 54: 1756~1760
Xu J Z, Hou S G, Chen F K, et al. Tracing the sources of particles in the East Rongbuk ice core from Mt. Qomolangma. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0050-5

理想地点. 冰芯在冻结状态下运回中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 并在–18℃冷库内进行冷藏.

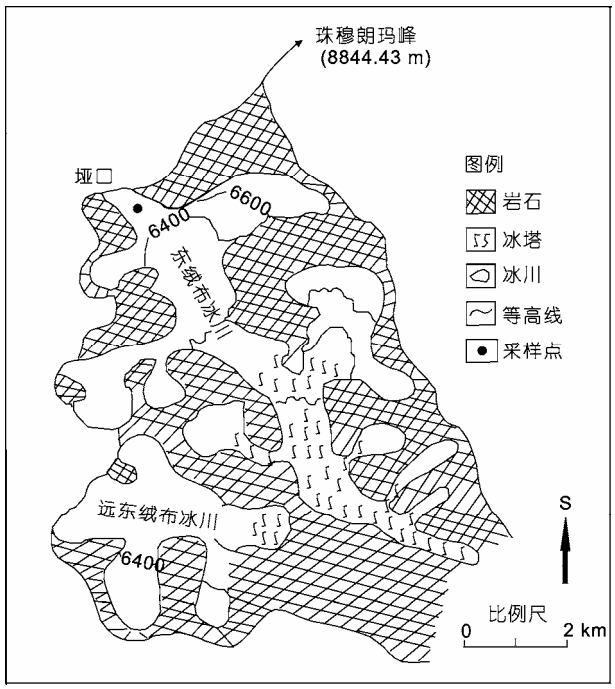

图 1　珠峰东绒布冰芯钻取点位置图

同位素测试样品取自 40 m 浅冰芯, 共 8 个样品, 可分为两类, 一类为污化层样品, 共 4 个, 每个样品收集污化层附近约 200 mL 溶液; 第二类为非污化层样品, 共 4 个, 每个样品收集约 500 mL 溶液. 对于污化层样品微粒的提取, 采用是离心+冷冻干燥的方法, 每次样品离心 20 min, 然后用移液器除去上清液, 剩下约 1~2 cm 高度的液体, 如此反复, 直至样品全部离完, 最后剩下 1~2 cm 高度的浓缩溶液, 然后冷冻干燥; 对非污化层样品微粒的提取, 采用的方法是离心+蒸发,每次样品离心 30 min, 然后步骤同上, 剩下的浓缩溶液在 100 级超净室内蒸干.

1.2　实验分析方法

分离出来的不溶微粒采用 HF-$HClO_4$-HNO_3 混合酸在 120℃加热 7 d, 直至样品完全溶解. 考虑到样品量较低, Sr-Nd-Pb 分离和纯化采用如下低本底流程: Sr 和 Pb 与稀土元素和其他杂质离子的分离在装有 80 μL 体积特效 Sr 树脂(Sr Spec®)的 Teflon®交换柱进行, 稀土元素的分离和纯化采用 Eichrom 公司的 2 mL 体积 RE®树脂交换柱, Nd 的分离和纯化采用 Eichrom 公司的 2 mL 体积 LN®树脂交换柱完成.

样品Sr-Nd-Pb同位素组成测定在英国GV公司的高精度IsoProbe-T固体质谱计进行, 采用静态多接受方式. 在测试过程中, 分别采用 $^{86}Sr/^{88}Sr$ = 0.1194 和 $^{146}Nd/^{144}Nd$ = 0.7219 校正Sr和Nd同位素质量分馏效应. 全流程Nd和Sr本底均低于 0.1 ng. 计算$\varepsilon_{Nd}(0)$时采用 $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR}$ = 0.512638. Pb同位素组成测定以硅胶作为发射剂, 采用标准溶液NBS981 的测量获得质量分馏系数. 根据NBS981 的测定值和推荐值的差别, 确定校正系数为每原子质量单位 0.1%, 全流程Pb本底低于 0.1 ng. 详细的测量流程见Chen等人 [14].

2　结果与讨论

珠峰东绒布冰芯中不溶性微粒的同位素组成如表 1. 污化层样品都进行了 Sr-Nd-Pb 同位素的测试, 而非污化层样品由于样品量少仅测试了 Sr-Nd 同位素组成. 比较发现, 所有样品的$\varepsilon_{Nd}(0)$值差别不大, 两组数据也没有明显的界线, 都位于–17.2 ~ –14.7 间; 而 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值变化范围很小(0.728~0.757), 但是两组数据区分明显, 非污化层样品的比值高于污化层样品的比值.

表 1　珠峰东绒布冰芯中微粒测试的 Sr-Nd-Pb 同位素比值 a)

样品	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	$\varepsilon_{Nd}(0)$
RBD-1	0.728869±12	0.511854±11	–15.29
RBD-2	0.728956±7	0.511802±14	–16.31
RBD-3	0.728129±8	0.511821±12	–15.94
RBD-4	0.728057±7	0.511832±12	–15.72
RB-1	0.752618±14	0.511756±18	–17.21
RB-2	0.757407±10	0.511839±7	–15.59
RB-3	0.741166±11	0.511816±15	–16.03
RB-4	0.743253±9	0.511883±15	–14.73
样品	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{204}Pb$
RBD-1	18.4814±46	15.6790±42	39.0391±55
RBD-2	18.7324±44	15.7279±44	39.5608±43
RBD-3	18.7214±102	15.7740±113	39.7219±125
RBD-4	18.6829±28	15.7192±33	39.5525±34

a) RBD, 污化层样品; RB, 非污化层样品

2.1　局地源

为了对比这些结果, 本文收集了一些可能沙尘源区的同位素测试结果, 分别有特提斯喜马拉雅山地带(珠峰位于此地带)[15,16], 撒哈拉沙漠 [9], 中国西北部分沙漠(包括塔克拉玛干、柴达木、巴丹吉林和腾格尔)[7]和印度塔尔沙漠及印度河和恒河流域 [17]. 相比较这些数据(图 2), 可以看出不同区域的同位素取值范围有明显的差异性. 东绒布冰芯中污化层样品Sr-Nd同位素组成都落在特提斯喜马拉雅地带同位素组成范围内. 污

化层样品中通常含有较大粒径的颗粒，不可能进行远距离传输，因此可以判断出污化层样品中微粒就是来源于局地粉尘；另外，在Pb同位素组成的对比图中(图3)，也显示出污化层4个样品微粒的Pb同位素组成与特提斯喜马拉雅山地带Pb同位素组成非常吻合，进一步说明了污化层样品中微粒来源于珠峰局地的环境(干涸的河谷、冰碛物及裸露的基岩等).

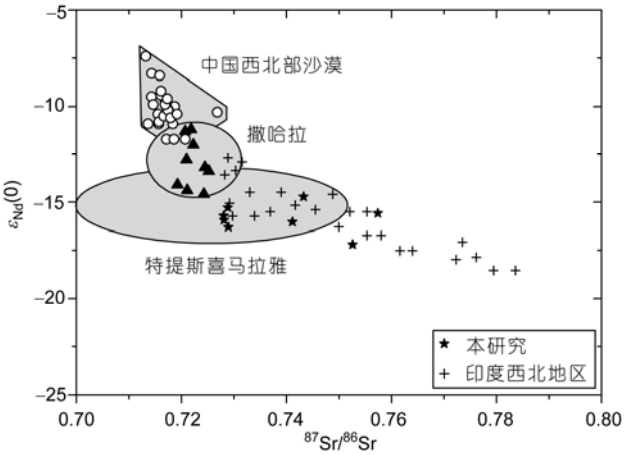

图 2　东绒布冰芯微粒与可能源区 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和 $\varepsilon_{Nd}(0)$ 组成比较

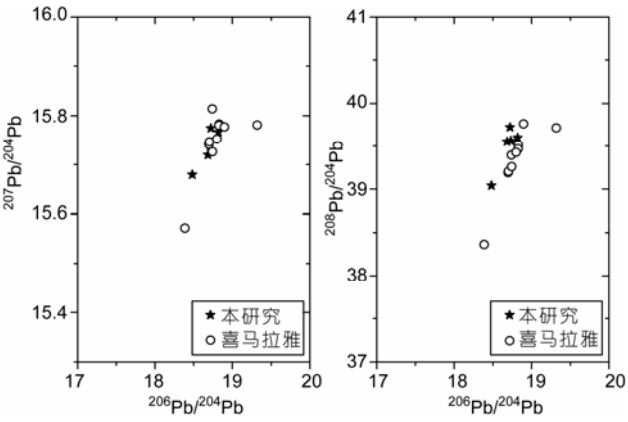

图 3　东绒布冰芯微粒与特提斯喜马拉雅山地带 Pb 同位素组成比较

在珠峰周围，冬春季节由于山谷中冰川的作用，在离地 1000 m以下，几乎昼夜恒吹下山风(偏南风)，即所谓的冰川风 [18]. 珠峰考察时，风速有时非常大,甚至可以把搭建的帐篷完全吹翻. 在这样的条件下，珠峰周围干涸的河谷、冰碛物及裸露的基岩等，提供了充分的沙尘源，有时大风卷起的沙石把帐篷敲打的直响. 沙尘天气发生时，珠峰周围的风速可能会更大，日喀则地区(包括珠峰)统计的沙尘天气过程中，几乎每次沙尘天气过程都伴随着强烈的大风 [19]. 在一些研究沙尘远距离传输的例子中，经常也会意外的发现收集到的样品来源于局地源 [20]，主要是因为沙尘天气发生时，大风首先会把局地粉尘卷起，和远距离传输的粉尘混合在一起，而在近地面层，可能几乎都是局地来源的粉尘. 但同时也要注意到，在距离地面一定的高度，远距离传输的粉尘可能也会占有一定的比重.

2.2　非局地源

非污化层样品和污化层样品同位素组成的差别主要表现在Sr同位素组成，符合喜马拉雅山不同地带的同位素组成通常的规律 [15]. Argles等人 [21]发现仅通过 $\varepsilon_{Nd}(0)$ 不能区分喜马拉雅山不同的地带，而必须通过联合Sr同位素才能进行区分. 从我们测试样品的结果可以看出，非污化层样品中的微粒的来源明显区别于污化层样品中的微粒的来源，因为同位素组成逐渐偏离特提斯喜马拉雅地带的取值范围，且有两个值完全不在这个范围内. 从已知一些源区同位素组成对比可以看出(图 2)，非污化层样品中微粒和印度塔尔沙漠及印度河和恒河流域的结果接近，明显不同与撒哈拉和塔克拉玛干等地. 表明东绒布冰芯中微粒有可能来源于印度西北部干旱区.

塔尔沙漠以及印度河、恒河流域的河谷是沙尘天气发生频率较高的区域 [22]，也是西南亚重要的沙尘源区 [23]. 每年3~4月份沙尘天气开始出现，最高频率发生在5~6月份(约占全年的40%)[24]. 沙尘天气中心从塔尔沙漠周围逐渐向东方向发展，到达恒河流域仍有较高的频率 [22]. 沙尘天气的发生与东移的低压气团和南支西风槽的发展有关 [22,25]. 沙尘天气不仅能影响印度西北部的天气和环境，还能影响到其下游很远的地方 [26]. 卫星图片表明，2006 年 6 月 12 日印度北部发生沙尘天气时，巨大的沙尘团经过塔尔沙漠及印度河流域，逐渐向东偏北方向传输(http://visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?id=20752). 这次沙尘天气过程中，建立在喜马拉雅山中部南坡的Nainital观测站(29.4°N, 79.5°E, 1958 m a.s.l)和珠峰附近建立在Pyramid上的观测站(27.9°N, 86.8°E; 5079 m a.s.l)都明显的观测到 [27,28]. Nainital站观测到在沙尘天气开始的时候，风速增大，平均风速(7.6±2.3 $m\cdot s^{-1}$)是当月剩余日平均风速的两倍；气溶胶浓度增加了 5~10 倍 [27]. 这也是首次直接观测到的印度沙尘传输到喜马拉雅山区的例子.

图 4 是印度北部 2001~2005 年 4~6 月间发生尘暴

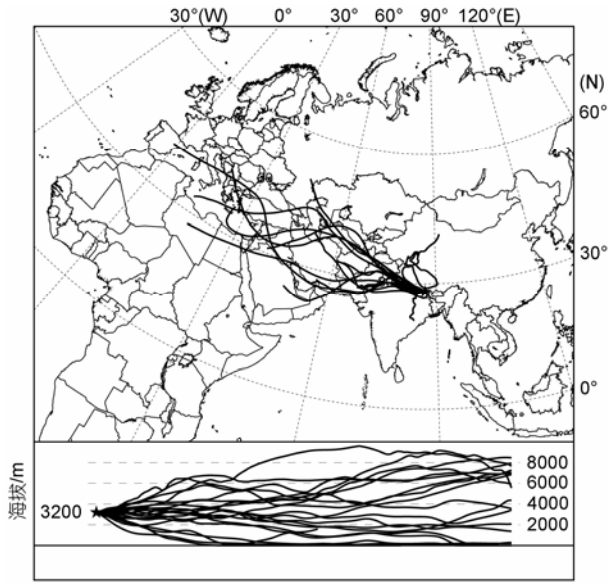

图 4

2001~2005 年间印度中央平原发生尘暴天气事件 HYSPLIT 5 d 后向轨迹，起始点位于东绒布冰芯采样点(★, 28.02°N, 86.96°E)

天气时[29]，珠峰东绒布冰芯采样点的 5 d空气后向轨迹图. 从图 4 上可以看到，气流到达珠峰前大部分都经过印度西北部，即印度西北部发生沙尘天气时，沙尘具有传输到珠峰地区的可能性. 但也要注意到，在 20 次气流轨迹图中，有 3 次是从青藏高原北部传输来的，因此东绒布冰芯中部分微粒也有可能来源于其他粉尘源区. 因此进一步工作有待提高微粒样品的分辨率.

3 结论

本文通过不溶性微粒 Sr-Nd-Pb 同位素组成，示踪了珠峰东绒布冰芯中不溶性微粒的来源. 结果表明，冰芯污化层样品同位素的组成和局地粉尘同位素组成一致，可以判断出微粒来源于局地的环境(干涸的河谷、冰碛物及裸露的基岩等). 非污化层样品的同位素组成明显区别于污化层样品中的同位素组成，和印度西北干旱区的结果接近，表明东绒布冰芯中微粒可能来源于印度西北部. 但由于样品分辨率低，不排除部分微粒来源于其他粉尘源区的可能性.

致谢 感谢 2002 年中美联合科学考察队全体队员.

参考文献

1 Ruth U, Wagenbach D, Steffensen J P, et al. Continuous record of microparticle concentration and size distribution in the central Greenland NGRIP ice core during the last glacial period. J Geophys Res, 2003, 108: 4098—4110[DOI]

2 Steffensen J P. The size distribution of microparticles from selected segments of the Greenland Ice Core Project ice core representing different climatic periods. J Geophys Res, 1997, 102: 26755—26763[DOI]

3 Ram M, Koenig G. Continuous dust concentration profile of pre-Holocene ice from the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core: Dust stadials, interstadials, and the Eemian. J Geophys Res, 1997, 102: 26641—26648[DOI]

4 Delmonte B, Basile-Doelsch I, Petit J R, et al. Comparing the EPICA and Vostok dust records during the last 220000 years: Stratigraphical correlation and provenance in glacial periods. Earth Sci Rev, 2004, 66: 63—87[DOI]

5 Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420000 years from the Vostok ice core, Antarctica. Nature, 1999, 399: 429—436[DOI]

6 Mahowald N, Kohfeld K E, Hansson M, et al. Dust sources and deposition during the Last Glacial Maximum and current climate: A comparison of model results with paleodata from ice cores and marine sediments. J Geophys Res, 1999, 104: 15895—16436[DOI]

7 Chen J, Li G J, Yang J D, et al. Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: implications for the provenances of Asian dust. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 3904—3914[DOI]

8 饶文波, 杨杰东, 陈骏, 等. 中国干旱-半干旱区风尘物质的 Sr, Nd 同位素地球化学: 对黄土来源和季风演变的指示. 科学通报, 2006, 51: 378—386

9 Grousset F E, Biscaye P E. Tracing dust sources and transport patterns using Sr, Nd and Pb isotopes. Chem Geol, 2005, 222: 149—167[DOI]

10 Grousset F E, Biscaye P E, Revel M, et al. Antarctic (Dome C) ice-core dust at 18 ky BP-Isotopic constraints on origins. Earth Planet Sci Lett, 1992, 111: 175—182[DOI]

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 Geophys Res, 1997, 102: 26765—26781[DOI]

12 Svensson A, Biscaye P E, Grousset F E. Characterization of late glacial continental dust in the Greenland Ice Core Project ice core. J Geophys Res, 2000, 105: 4637—4656[DOI]

13 Xu J, Hou S, Qin D, et al. Dust storm activity over the Tibetan Plateau recorded by a shallow ice core from the north slope of Mt. Qomolangma (Everest), Tibet-Himal region. Geophys Res Lett, 2007, 34: L17504[DOI]

14 Chen F, Li X H, Wang X L, et al. Zircon age and Nd-Hf isotopic composition of the Yunnan Tethyan belt, southwestern China. Int J Earth Sci, 2007, 96: 1179—1194[DOI]

15 Najman Y. The detrital record of orogenesis: A review of approaches and techniques used in the Himalayan sedimentary basins. Earth Sci Rev, 2006, 74: 1—72

16 Gariepy C, Allegre C J, Xu R H, The Pb-isotope geochemistry of granitoids from the Himalaya-Tibet collision zone: Implications for crustal evolution. Earth Planet Sci Lett, 1985, 74: 220—234[DOI]

17 Tripathi J K, Bock B, Rajamani V, et al. Is river Ghaggar, Saraswati? Geochemical constraints. Curr Sci, 2004, 87: 1141—1145

18 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979. 165

19 卓嘎. 日喀则地区沙尘天气的初步研究. 西藏科技, 2007, 2: 59—63

20 Chen B, Hiroyuki K, Jie D, et al. Dust transport from northeastern China inferred from carbon isotopes of atmospheric dust carbonate. Atmos Environ, 2008, 42: 4790—4796[DOI]

21 Argles T, Foster G, Whittington A, et al. Isotope studies reveal a complete Himalayan section in the Nanga Parbat syntaxis. Geology, 2003, 31: 1109—1112[DOI]

22 Middleton N J. A geography of dust storms in south-west Asia. J Climatol, 1986, 6: 183—196[DOI]

23 Prospero J M, Ginoux P, Torres O, et al. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. Rev Geophys, 2002, 40: 1002[DOI]

24 Goudie A S, Middleton N J. Desert Dust in the Global System. Berlin: Springer, 2006. 117—133

25 Middleton N J. Climatic controls on the frequency, magnitude and distribution of dust storms: Examples from India/Pakistan, Mauritania and Mongolia, In: Leinen M, Sarnthein M, eds. Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989. 97—132

26 Nair V S, Krishna Moorthy K, Alappattu D P, et al. Wintertime aerosol characteristics over the Indo-Gangetic Plain (IGP): Impacts of local boundary layer processes and long-range transport. J Geophys Res, 2007, 112: D13205[DOI]

27 Hegde P, Pant P, Naja M, et al. South Asian dust episode in June 2006: Aerosol observations in the central Himalayas. Geophys Res Lett, 2007, 34: L23802[DOI]

28 Marinoni A, Cristofanelli P, Laj P, et al. Observations of dust mixed with pollution transport event from Pakistan area to Himalayas, Geophys Res Abstr, 2008, 10, EGU2008-A-10068

29 Prasad A K, Singh R P. Changes in aerosol parameters during major dust storm events (2001~2005) over the Indo-Gangetic Plains using AERONET and MODIS data. J Geophys Res, 2007, 112: D09208[DOI]