

浑善达克沙地沙尘气溶胶的化学元素组成及含量

成天涛¹, 吕达仁², 于兴娜¹, 王庚辰², 陈建民¹

(1. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433; 2. 中国科学院大气物理研究所 LAGEO, 北京 100029)

摘要: 利用 2001 年 4 月下旬到 5 月上旬内蒙古桑根达莱和北京站的近地面大气气溶胶采样及其化学元素分析资料, 比较分析了晴天、一般沙尘天及沙尘暴天颗粒化学元素在 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{2.5-10}$ 、 PM_{10} 中的相对含量。结果表明, 颗粒化学元素质量浓度总和随着沙尘浓度增大而普遍增大, 但其在 PM 中相对含量的变化并不相同于绝对含量增长。在扬沙或浮尘天气, 表面粘附作用导致粗颗粒富集一定的污染元素, 而在沙尘暴期间, 受强天气过程影响大量污染元素被输送到下游区域。沙尘气溶胶中部分细颗粒来自富含 Al, Ca, Fe 等矿质元素的土壤, 粗颗粒主要来自富含 Si 元素的沙粒。Na 元素主要来自土壤而非沙地。

关键词: 浑善达克沙地; 沙尘气溶胶; 化学元素

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2006)S2-0100-05

1 前言

沙尘是大气气溶胶的主要种类之一, 对区域及全球生态环境和气候变化影响巨大。我国北方干旱半干旱地区是东亚沙尘的主要来源, 每年输入大气的沙尘达 800 Mt, 约占全球总量的 1/3^[1], 其中约有一半被输送到中国海区及北太平洋^[2]。大气沉降是海洋生物获得营养物质的重要途径, 沙尘气溶胶的远距输送为海洋浮游生物提供了丰富的营养元素铁, 导致某些海区初级生产力的大幅上升, 最终对温室效应和全球变暖产生深远影响^[3,4]。目前对沙尘气溶胶气候影响的评估仍存在很大不确定性, 原因在于对沙尘源汇、大气载荷及其与气候系统反馈机制的认识不足, 以及对沙尘物理、化学和光学特性及控制这些特性演变的诸多大气过程认识欠缺^[5-7]。

1949 年以来我国沙尘暴和强沙尘暴事件总体呈减少趋势, 但自 1998 年发生次数明显上升, 出现频次高、持续时间长、强度大及影响范围广等特点^[8,9]。近 50 年来北京沙尘天气中浮尘和沙尘暴分别占到 20% 和 9%, 其来源主要是内蒙古中部农牧交错带地区^[10]。浑善达克沙地是我国北方主要沙尘暴源地之一, 与周边农牧交错带是北路沙尘暴侵入北京的必经之地^[11]。在气候变化和人为活动共同作用下, 浑善达克沙地近年来植被退化非常严重, 东部沙尘暴日数趋减, 西部却波动增加^[12], 沙化发展区和退化草原耕地的沙尘释放能力较强^[13]。到目前为止, 有关浑善达克沙地沙尘气溶胶理化特性的观测和分析相对较少。

在基金重大项目“内蒙古半干旱草原土壤—植被—

大气相互作用”支持下, 2001 年春季在浑善达克沙地进行了综合观测, 并对沙尘气溶胶的 TSP、 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 样品进行分析, 本研究就其主要化学元素组成及含量进行讨论。

2 研究资料

内蒙古桑根达莱站观测时间为 2001 年 4 月 27 日到 5 月 10 日, 每天(24 h)采集一个样品, 地面仪器架设高度 1.5 m, 高塔仪器距地 8.0 m。北京站观测时间为 2001 年 4 月 21 日到 5 月 9 日, 仪器架设在 20 多米高的中国科学院大气物理研究所楼顶。两站均使用安德森撞击式采样仪进行 TSP, PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 采样, 滤膜为日产聚四氟乙烯, 内蒙地面采样器滤膜直径分别为 35, 40, 58 mm, 抽气流量为 100.0 L/min; 北京和内蒙高塔采样器滤膜直径均为 80 mm, 流量为 28.3 L/min。

所有样品均采用 ICP-1100 型电感耦合等离子发射光谱仪进行分析, 包括 Al, B, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sr, Ti, V, Zn 在内的 25 个化学元素, 分析原理是先将滤膜用混合酸消解定容(硝酸、高氯酸、氢氟酸混合液), 然后再用 ICP 进行定量分析。

3 结果与分析

3.1 总元素含量

利用地面的天气报告、颗粒物浓度及卫星图片等资料, 依据中国气象局规定的沙尘天气划分标准, 将观测期间的天气状况分为晴天(能见度>10 km)、一般沙尘天

气或扬沙、飘尘及浮尘天气($1 \text{ km} < \text{能见度} < 10 \text{ km}$)、沙尘暴天气(能见度 $< 1 \text{ km}$)。Aerosol Robotic Network (AERONET)的后向轨迹模拟资料表明, 浑善达克沙地是北京 2001 年 4 月 27~28 日、5 月 2~4 日沙尘天气中沙尘的主要来源之一, 因此, 本研究将北京作为源区桑根达莱的对比站, 用于进行浑善达克沙地沙尘化学元素组成及其含量的初步分析。

表 1 给出桑根达莱、北京两站沙尘样品中 25 个化

表 1 元素质量浓度总和及其在 $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{2.5-10}$, PM_{10-} 中的百分比

Table 1 Averages of the combined 25-element concentrations and their percentages in $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{2.5-10}$, PM_{10-} ($\text{PM}_{2.5-10}$ refers to PM_{10} minus $\text{PM}_{2.5}$, and PM_{10-} refers to TSP minus PM_{10})

Station	Sample	Clear day		Light dusty day		Heavy dusty day	
		Mass conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mass percent (%)	Mass conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mass percent (%)	Mass conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mass percent (%)
Beijing	$\text{PM}_{2.5}$	9.92	11.97	15.22	12.64	26.84	12.60
	$\text{PM}_{2.5-10}$	13.03	18.15	23.20	17.74	39.61	18.12
	PM_{10-}	11.44	17.55	15.72	19.26	30.33	13.70
Inner Mongolia (tall tower)	$\text{PM}_{2.5}$	2.97	6.30	4.31	4.89	18.49	2.85
	$\text{PM}_{2.5-10}$	3.19	9.58	12.81	13.06	6.42	3.38
	PM_{10-}	2.15	15.13	2.46	20.02	7.73	33.49
Inner-Mongolia (surface)	$\text{PM}_{2.5}$	3.91	8.90	6.13	5.12	24.97	7.37
	$\text{PM}_{2.5-10}$	2.87	14.35	8.51	4.16	12.60	8.65
	PM_{10-}	2.32	9.04	6.37	3.26	17.83	5.13

北京站在沙尘出现时元素质量浓度总和在 PM 中均有较大幅度增加, 沙尘暴天含量($26\text{--}40 \mu\text{g}/\text{m}^3$)普遍是晴天含量($9\text{--}13 \mu\text{g}/\text{m}^3$)的 3 倍左右, 特别在 PM_{10-} 中沙尘暴天比一般沙尘天平均增长了近一倍。但是, 元素质量浓度总和在 PM 中所占百分比, 除 PM_{10-} 中沙尘暴天有所降低外, 在 $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{2.5-10}$ 及 PM_{10-} 其余情况下并无明显变化。因此, 可以推断浑善达克沙尘的较小颗粒($D < 10 \mu\text{m}$)甚至少量粗颗粒($D > 10 \mu\text{m}$), 并不能影响北京 PM 中元素总和的相对含量, 只有沙尘暴天气大量粗颗粒的出现才会影响其相对含量, 这与沙粒等含 Si 颗粒的增多密切相关, 另外近局地源也是北京沙尘的不可忽视来源。

桑根达莱站的元素质量浓度总和普遍小于北京站, 除高塔 PM_{10-} 沙尘天外, 元素质量浓度总和在 PM 中所占百分比也均低于北京站, 可能的原因是北京 PM 中化学元素含量部分来自污染颗粒物, 而内蒙主要来自富含 Si 等元素的自然沙尘颗粒物。对比桑根达莱地面和高塔颗粒的元素质量浓度总和, 其在高塔 PM_{10-} 中的相对含量远远高于地面, 这主要与大粒径且富含 Si 元素的沙粒容易受到重力沉降作用影响有关。不论是地面还是高塔颗粒, 元素质量浓度总和在 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10-} 中沙尘暴天比一般沙尘天增长 2~3 倍, 在 $\text{PM}_{2.5-10}$ 中一般沙尘天比晴天净增 2~3 倍, 因此, 沙尘暴期间伴随粗粒子浓度的增大, 细粒子含量也大大升高。

3.2 单元素含量

就单个元素而言, 北京站 PM 中 Al, Ca, Fe, K, Mg,

学元素质量浓度的总和及其百分比的平均值, 其中 $\text{PM}_{2.5}$ 表示粒径 $D < 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒浓度, $\text{PM}_{2.5-10}$ ($\text{PM}_{10} \sim \text{PM}_{2.5}$) 代表粒径 $2.5 \mu\text{m} < D < 10 \mu\text{m}$ 的颗粒浓度, 而 PM_{10-} ($\text{TSP} - \text{PM}_{10}$) 代表粒径 $D > 10 \mu\text{m}$ 的颗粒浓度。不难看出, 元素质量浓度总和随着沙尘浓度增大而普遍增大, 即沙尘暴天>一般沙尘天>晴天, 但其在 PM 中所占百分比即相对含量的变化并不相同于绝对含量增长。

Na, S 的质量浓度大于 $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Ba, Mn, P, Pb, Ti, Zn 为 $0.1\text{--}1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 剩余元素均小于 $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 内蒙站相类似于北京, 只是 Mg, Na, S, Pb, Zn 等元素浓度相应更小一个量级。

北京颗粒主成分元素的浓度大小排序, 在 PM_{10-} 和 $\text{PM}_{2.5-10}$ 中为 $\text{Ca} > \text{Fe} > \text{Al} > \text{K} > \text{S} > \text{Mg} > \text{Na}$, $\text{PM}_{2.5}$ 中为 $\text{Ca} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{K} > \text{S} > \text{Na} > \text{Mg}$, 其中 Al, Ca, Fe, Mg, Na 浓度在 $\text{PM}_{2.5-10}$ 中相对较大, K 含量几乎不变, $\text{PM}_{2.5}$ 中 S 浓度大约是其他 PM 含量的 2 倍。内蒙站高塔颗粒主成分元素的浓度大小排序, 在 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5-10}$ 中为 $\text{Al} > \text{Fe} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{S}$, 在 PM_{10-} 中为 $\text{Fe} > \text{Al} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{S}$, 而地面颗粒 PM 的浓度排序为 $\text{Al} > \text{Fe} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg} > \text{S} > \text{Na}$, 各元素浓度均在 $\text{PM}_{2.5}$ 中相对较大。

图 1 到图 3 给出北京、内蒙两站晴天、一般及强沙尘天期间颗粒物化学元素在 $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{2.5-10}$ 及 PM_{10-} 中所占的平均质量百分比, 其中包括代表土壤的 Al, Ca, Fe, K, Mg, Ti 地壳元素, 代表海盐的 Na 元素, 代表人为污染的 P, Pb, S 元素。

从图 1 可以看出, 与晴天相比, 北京站 P 元素相对含量在沙尘天 $\text{PM}_{2.5-10}$ 中降低 1.3~1.5 倍, 在一般沙尘天 PM_{10-} 中增加 1.16 倍; Pb 元素在一般沙尘天 PM_{10-} 中所占百分比增加 2 倍; S 元素百分含量在一般沙尘天 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10-} 中分别增加 0.3%、1.0%, 而在一般沙尘天 $\text{PM}_{2.5-10}$ 中降低 0.4%; Na 元素在沙尘暴天 $\text{PM}_{2.5-10}$ 中升

图 1 北京站晴天、一般及强沙尘天气中颗粒化学元素所占 PM 的平均质量百分比

Fig.1 Average percents of individual element concentrations out of $PM_{2.5}$, $PM_{2.5-10}$ and PM_{10-} in clear, dusty and dust storm days of Beijing site ($PM_{2.5-10}$ refers to PM_{10} minus $PM_{2.5}$, and PM_{10-} refers to TSP minus PM_{10})

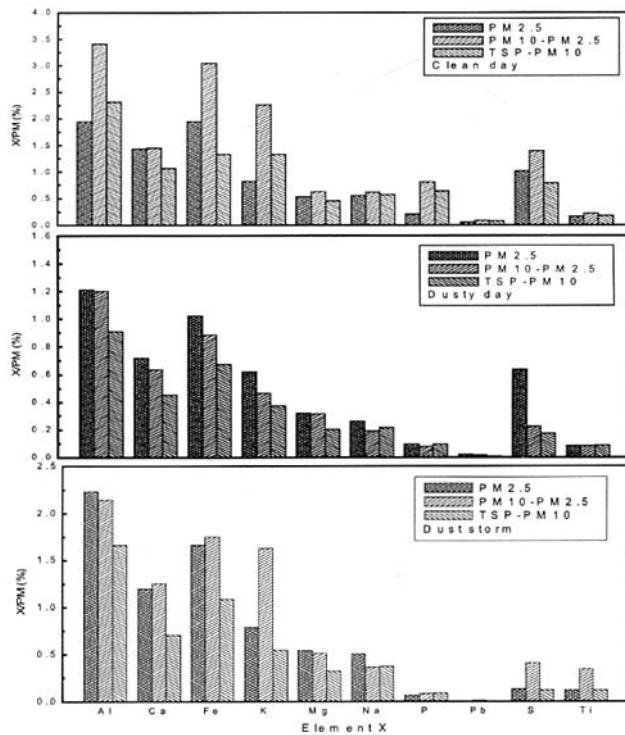


图 2 内蒙地面站晴天、一般及强沙尘天气中颗粒化学元素所占 PM 的平均质量百分比

Fig.2 Average percents of individual element concentrations out of $PM_{2.5}$, $PM_{2.5-10}$ and PM_{10-} in clear, dusty and dust storm days of Inner-Mongolia ground-based site ($PM_{2.5-10}$ refers to PM_{10} minus $PM_{2.5}$, and PM_{10-} refers to TSP minus PM_{10})

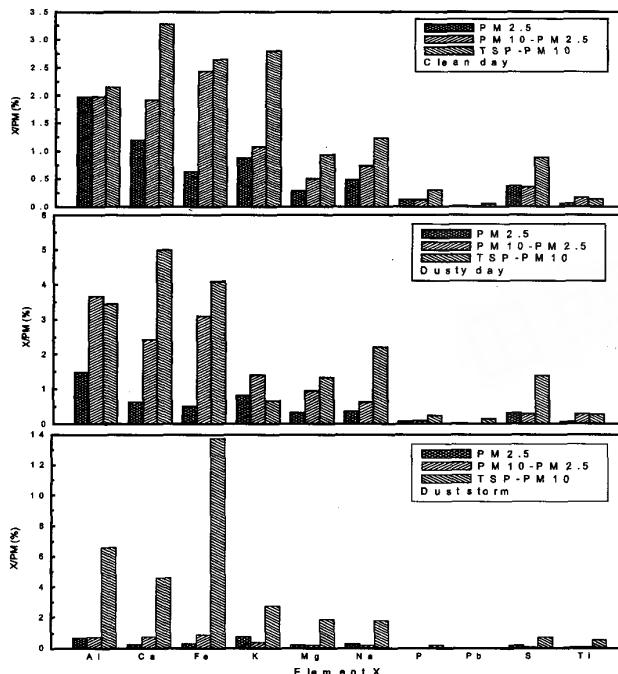


图 3 内蒙高塔站晴天、一般及强沙尘天气中颗粒化学元素所占 PM 的平均质量百分比
 Fig.3 Average percents of individual element concentrations out of $PM_{2.5}$, $PM_{2.5-10}$ and PM_{10-} in clear, dusty and dust storm days of Inner-Mongolia tall-town site ($PM_{2.5-10}$ refers to PM_{10} minus $PM_{2.5}$, and PM_{10-} refers to TSP minus PM_{10})

高 0.3% 及 PM_{10-} 中降低 0.3%，在一般沙尘天 PM_{10-} 中升高 0.3%；沙尘暴天 Al, Ca 在 $PM_{2.5}$ 增加 0.5%~0.7%，Al, Ca, Fe 在 PM_{10-} 中降低 0.3%~1.7%，且 Al 在 $PM_{2.5-10}$ 中下降 0.5%，而一般沙尘天 Al 在 PM_{10-} 中下降 0.7%，K 在 PM_{10-} 中上升 0.5%，Ca 在 $PM_{2.5-10}$ 中下降 0.7%，Fe 在 $PM_{2.5-10}$ 中增加 1.1%。由上述分析可推断，北京在少量沙尘出现的扬沙或浮尘天气，表面粘附作用导致粗颗粒富集一定的污染元素，而在沙尘暴期间，受强天气过程影响大量污染元素被输送到下游区域；沙尘中部分细颗粒来自富含 Al, Ca, Fe 矿质元素的土壤，粗颗粒主要来自富含 Si 元素的沙漠；颗粒 Na 元素主要来自土壤而非沙漠。

从图 2 可以看出，与晴天相比，内蒙地面站 Al, Ca, Fe, K 元素的相对含量在一般沙尘天 PM 中降低 0.6%~2.2%，在沙尘暴天 $PM_{2.5-10}$, PM_{10-} 中降低 0.36%~1.29%；Mg 元素百分含量在一般沙尘天 $PM_{2.5-10}$ 中降低 0.3%；Na 元素百分含量在一般沙尘天 PM 中降低 0.29%~0.43%；P, S 元素在一般沙尘天 PM 中降低 0.38%~1.17%，而在沙尘暴天 PM 中降低 0.55%~0.98%，Pb 元素的相对含量在沙尘天 PM 中比晴天降低 2~10 倍，Pb, S 污染元素在 PM 中的相对含量远小于北京站。

由上述分析结果可知，内蒙近地面颗粒物含量主要来自土壤和沙漠的起尘，特别是在沙尘天气期间，富含 Si 元素的粗颗粒大大增加，而污染元素及 Na 元素的相对含量急剧降低。

从图 3 可以看出，与晴天相比，内蒙高塔站 Al, Ca, Fe, K, Mg 元素的相对含量在一般沙尘天 PM 中升高 0.4%~1.7%，在沙尘暴天 $PM_{2.5}$, $PM_{2.5-10}$ 中降低 0.3%~1.25%，而在沙尘暴天 PM_{10-} 中升高 2~5 倍；Na 元素在一般沙尘天 PM_{10-} 中升高 0.98%，在沙尘暴天 $PM_{2.5-10}$, PM_{10-} 中分别降低和升高 0.55%；P, Pb, S 元素的相对含量在沙尘暴天 PM 中比晴天降低 1.25~4.0 倍，Pb, S 在一般沙尘天 PM_{10-} 中升高 1.6~2.5 倍，P 在一般沙尘天 PM 中降低 1.23~1.8 倍。与地面站相比较，由于重力沉降作用影响，高塔站沙尘天气期间富含 Al, Ca, Fe 等矿质元素的颗粒含量大大增加，而富含 Si 元素的粗颗粒含量降低；污染元素在沙尘天受天气过程影响而相对含量降低，扬沙和浮尘天气则在粗颗粒表面出现一定程度的富集。

4 结 论

本研究利用内蒙古桑根达莱、北京两站近地面的大

气溶胶采样及相关化学元素资料, 分析了浑善达克沙地沙尘的化学元素组成及其含量。主要结论如下:

(1) 25个元素质量浓度总和的均值随着沙尘浓度增大而普遍增大, 即沙尘暴天>一般沙尘晴天, 但其在PM中的相对含量变化并不相同于绝对含量增长。

(2) 北京站 Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S 质量浓度大于 $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Ba, Mn, P, Pb, Ti, Zn 为 $0.1\sim1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 内蒙站相似于北京且 Mg, Na, S, Pb, Zn 元素浓度更小一量级。

(3) 北京站一般沙尘天粗颗粒表面富集一定的污染元素, 而沙尘暴天大量污染元素被输送到下游区域, 部分细沙尘颗粒来自富含 Al, Ca, Fe 矿质元素的土壤, 粗颗粒主要来自富含 Si 元素的沙漠, Na 元素主要来自土壤而非沙漠。

(4) 内蒙近地面颗粒物主要来自土壤和沙漠的起尘, 沙尘天气期间富含 Si 元素的粗颗粒大大增加, 污染及 Na 元素的相对含量急剧降低, 重力沉降作用对 Al, Ca, Fe, Si 等相对含量的垂直分布影响巨大。

参考文献:

- [1] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust Emission from Chinese Desert Sources Linked to Variations in Atmospheric Circulation [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(D23): 28041-28047.
- [2] Arimoto R, Duce R A, Savoie D L, et al. Relationships among Aerosol Constituents from Asia and the North Pacific during PEM-West [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101(D1): 2011-2023.
- [3] Martin J H, Fitzwater S E. Iron Deficiency Limits Phytoplankton Growth in the North-east Pacific Subarctic [J]. *Nature*, 1988, 331: 341-343.
- [4] Zhuang G, Yi Z, Duce R A, et al. Link between Iron and Sulfur Cycles Suggested by Detection of Iron(II) in Remote Marine Aerosols [J]. *Nature*, 1992, 355(36): 537-539.
- [5] Sokolik I N, Toon O B. Direct Radiative Forcing by Anthropogenic Airborne Mineral Aerosols [J]. *Nature*, 1996, 381(20): 681-683.
- [6] Tegen I, Fung I. Modeling of Mineral Dust in the Atmosphere: Sources, Transport and Optical Thickness [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 22897-22914.
- [7] IPCC, Climate Chang 2001: The Science of Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [8] 周自江, 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954~2002年) [J]. 科学通报, 48(11): 1224-1228.
- [9] 周自江, 王锡稳, 牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究 [J]. 应用气象学报, 2002, 13(2): 193-200.
- [10] 陈广庭. 近 50 年北京的沙尘天气及治理对策 [J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 402-407.
- [11] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于中国华北地区沙尘天气的成因与治理对策 [J]. 地理学报, 2000, 55(5): 513-521.
- [12] 王革丽, 吕达仁, 尤莉. 浑善达克沙地沙尘暴气候特征分析 [J]. 气候与环境研究, 2002, 7(4): 433-439.
- [13] 刘鸿雁, 田育红, 丁登. 内蒙古浑善达克沙地和河北坝上地区不同地表覆盖类型对北京沙尘天气物源的贡献 [J]. 科学通报, 2003, 48(11): 1229-1232.

The Compositions of Chemical Elements Associated with Dust Particles from Hunshan Dake Sandland

CHENG Tian-tao¹, LU Da-ren², YU Xing-na¹, WANG Geng-chen², CHEN Jian-min¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;
2. LAGEO, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The data of chemical element analyses about aerosol samples collected at Sanggen Dalai and Beijing sites from 21 April to 10 May in 2001 were employed to examine the compositions of chemical elements associated with dust particles in PM_{2.5}, PM_{2.5-10}, PM₁₀ from Hunshan Dake sandland in clear, dusty and dust storm days. The concentrations of combined chemical elements increased with dust mass, which was not completely similar to the changes of chemical element percents in PM. During the common dusty days a part of pollution elements was uptaken and adhered to the dust surfaces, but most of them were transported into downwind regions by strong winds during the dust storm days. Large amounts of fine dust particles originated from the soils rich in the mineral elements of Al, Ca, Fe, etc., and most of coarse dust particles originated from the desert lands rich in Si. The element of Na mainly originated from soil but desert.

Key words: Hunshan Dake sandland; dust; chemical elements