

# 北京地区盐碱尘暴粉尘物质的主要来源

刘艳菊<sup>1</sup>, 韩同林<sup>1,2</sup>, 庞健峰<sup>2</sup>, 郑柏峪<sup>3</sup>, 林景星<sup>2</sup>,

王绍芳<sup>4</sup>, 孙珍全<sup>1</sup>, 张婷婷<sup>1</sup>, 夏晓飞<sup>4</sup>

LIU Yan-ju<sup>1</sup>, HAN Tong-lin<sup>1,2</sup>, PANG Jian-feng<sup>2</sup>, ZHENG Bai-yu<sup>3</sup>, LIN Jing-xing<sup>2</sup>,

WANG Shao-fang<sup>4</sup>, SUN Zhen-quan<sup>1</sup>, ZHANG Ting-ting<sup>1</sup>, XIA Xiao-fei<sup>4</sup>

1. 北京市理化分析测试中心, 北京 100089; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

3. 阿巴嘎旗绿草原生态治理有限责任公司, 内蒙古阿巴嘎旗 011400; 4. 北京自然博物馆, 北京 100050

1. Beijing Center for Physical and Chemical Analysis, Beijing 100089, China;

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. Abagqi Green Grassland Ecological Management Co. Ltd., Abagqi 011400, Inner Mongolia, China;

4. Beijing Natural History Museum, Beijing 100050, China

**摘要:**北京的“沙尘暴”在地质学研究分类中应属于尘暴,且属含大量盐碱物质(水溶盐物质)的盐碱尘暴。盐碱尘暴对人体健康和经济发展造成严重威胁,已引起普遍关注。通过调查北京尘暴源区蒙古国东南部和中国内蒙古中部、河北省西部地区表土和部分降尘的理化特性,为探讨北京盐碱尘暴粉尘物质的来源提供新的证据。对尘源区农耕地、沙化土地、退化草地、撂荒地、沙漠、沙地等不同代表性区域的表土进行较系统的采样,收集北京和部分尘源区附近城镇的大气降尘,分析其水溶盐和水溶性元素或离子的含量、酸碱度、粒度、比重、起尘风速。结果表明,干盐湖盆区以高百分含量的细微粉尘物质(<200目)、水溶盐含量和部分水溶性元素或离子(如 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>)为主要特征,其较高的 pH 值、极小的粒径、很大的比表面积、偏小的比重、偏低的起尘风速等,与北京及尘源区附近城镇大气降尘的特性相对应,明显不同于沙漠、沙地、沙堆和农耕地、撂荒地、退化草地等,因此推断干盐湖盆区是现阶段北京盐碱尘暴最主要、最关键的源区之一。而水溶盐含量、粒度大小、酸碱度、比重、起尘风速等,是判断北京盐碱尘暴粉尘物质来源的关键性指标。

**关键词:**北京; 盐碱尘暴; 大气降尘; 干盐湖

中图分类号:P512.2<sup>1</sup> 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2010)05-0713-10

Liu Y J, Han T L, Pang J F, Zheng B Y, Lin J X, Wang S F, Sun Z Q, Zhang T T, Xia X F. Origin of the salt dust storm, Beijing, China. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(5):713-722

**Abstract:** "Sandstorm" in Beijing should be classified geologically as "dust-storm", more accurately as "salt dust", containing quantities of saline (water-soluble salt materials). It has aroused widespread concern due to its posing a serious threat on human health and economic development. This study aims to provide new evidence for Beijing "salt dust storm" origin by investigating the source region including the south-eastern Mongolia, central Inner Mongolia, and western Hebei Province for physical and chemical properties of topsoil and some dust. Systematic topsoil was sampled in different sources of land sand, landform types, including agricultural land, sandy land, degraded grasslands, abandoned land (named after "farmland etc." in the following) and the desert. Meanwhile dustfall was also collected from Beijing and some areas of sand source. The samples were analyzed for water-soluble salts and cation-anion concentration, pH, artificial and laser particle size, the proportion, and wind speed generating dust. The results show that the dried salty

收稿日期:2009-08-13; 修訂日期:2010-03-23

基金项目:北京市科学技术研究院创新团队项目(编号:IG200807C1)、中国地质科学院地质研究所所长基金项目(编号:J0728)和国家自然科学基金项目(批准号:40745027、40875082)资助

作者简介:刘艳菊(1969-),女,博士,研究员,从事大气环境、环境生物学研究。E-mail:sunflower8008@gmail.com

lake is featured by its high percentage of the <200 dust materials, water-soluble substances and some cation-anion ions such as  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ . Its high pH, very tiny particle size, large specific surface area, low proportion and low wind speed generating dust, are well correlated with dustfall features of Beijing and of cities and towns near dust origin, while these features are different from those of the desert, sand, beach, agricultural land, abandoned land, degraded grass, etc.. This implies that dry salt lake basin area could be one of the most important and key sources of Beijing "salt dust storm". The soluble salt content, particle size, pH, proportion and wind speed generating dust could be considered as key indicators to determine the source of Beijing "salt dust storm".

**Key words:** Beijing, "salt dust storm"; dustfall; dry salt lake

## 1 北京“沙尘暴”的历史背景和研究现状

发生在北京的“沙尘暴”被很多学者认为是尘暴<sup>[1-2]</sup>,且是对人体健康具有极大危害、对设备具有极强腐蚀性、含大量水溶盐物质的盐碱尘暴<sup>[3]</sup>,或被称为化学尘暴<sup>[4]</sup>。

治理“沙尘暴”要先治源,对北京盐碱尘暴的治理同样需要找准最关键的尘暴源区。气象卫星遥感监测和卫星图片分析<sup>[4-6]</sup>、数值模拟和概率计算<sup>[7]</sup>、“沙尘暴”期间大气气溶胶单颗粒物和XPS表面元素结构分析<sup>[8]</sup>等的研究结果表明,北京盐碱尘暴源的主要外源区为蒙古国东南部,内源区为中国内蒙古中部和河北省西部地区。韩同林等<sup>[9]</sup>通过对沙源区不同土地和地貌类型个别表土样品的分析研究,以及对北京2006年4月16日发生的特大“沙尘暴”粉尘的物理化学特性的对比研究,初步推断干盐湖区也可能是北京“沙尘暴”的又一重要源区,认为沙漠、沙地等的贡献很少。本研究进一步全面分析对比沙源区不同土地、地貌类型典型区域的表土和不同

地区的大气降尘,为北京盐碱尘暴来源的确定提供更全面的实验依据。

## 2 样品采集和分析方法

### 2.1 样品采集

本研究自2006年4月16日—2009年4月22日,在北京盐碱尘暴沙源区(图1)的不同土地和地貌类型区,包括农耕地、退化草地、撂荒地、草场(以下简称“农耕地等”)、干盐湖、沙堆、沙地、沙漠等,选择有代表性的区域进行表土样品的采集,并收集北京市和部分尘源区的大气降尘样品进行分析(表1),包括自然降落于汽车顶、阳台、楼顶等的灰尘。

### 2.2 样品分析方法

采集大气粉尘样品后装入密封袋进行编号、保存。表土样品带回实验室,去除草根、石块,然后风干。样品处理好后分别装入密封袋以备分析用。

#### (1) 常温水溶盐含量和水溶性元素、离子分析

在北京市理化分析测试中心实验室进行常温水

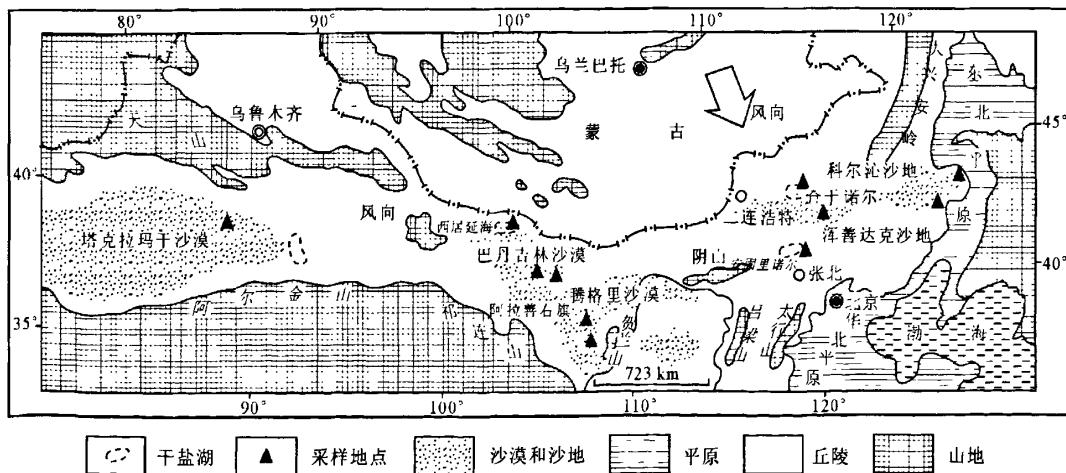


图1 样品采集位置分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites

表 1 采样区、测定项目和样品数量  
Table 1 Sampling localities, parameters measured and samples amount

样品来源	采样区	样 品 激光 粒度	测 定 人工 粒度	项 目 比重	目 / 个 起尘 风速	数 主要化学 成分分析	常温 水溶盐
大气降尘	北京	4	1	4	4	1	3
	阿拉善右旗	2	2	2	2	2	3
	多伦	1	1	1	1	1	0
农耕地、退化草场、 撂荒地、草场 (简称“农耕地等”)	阿巴嘎旗	2	4	2	2	2	0
	张北	4	2	4	4	5	5
	锡林浩特	0	2	0	0	0	0
	达尔湖南	0	2	0	0	0	0
	内蒙古	0	0	0	0	5	5
干盐湖	西居延海	4	0	4	4	4	4
	安固里诺尔	2	7	2	2	6	6
	查干诺尔	0	4	0	0	6	4
	九连城	0	2	0	0	0	2
	硝碱湖	0	1	0	0	0	0
	阿巴嘎旗	0	1	0	0	0	0
	达尔湖南	0	2	0	0	0	0
沙堆	腾格里	2	2	2	2	2	2
	阿济额旗	1	1	1	1	0	0
	阿巴嘎旗	0	2	0	0	1	1
沙地	浑善达克	3	8	3	3	5	5
	科尔沁	2	2	2	2	2	2
沙漠	巴丹吉林	4	0	4	4	4	4
	腾格里	2	0	2	2	2	2
	塔克拉玛干	1	0	1	1	1	1
沙漠(<200 目)	巴丹吉林	2	4	2	2	2	2
	腾格里	2	2	2	2	2	2
	塔克拉玛干	0	1	0	0	0	0

溶盐含量测定和水溶性元素、离子分析。采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定水溶性元素 Na、K、Mg、Ca 和 B, 用离子色谱仪测定水溶性阴离子  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$ 。常温水溶盐含量测定方法如下: 用万分之一天平(德国 sortorius sp 224s 公司生产)称约 10g 样, 加入去离子水约 50mL, 搅拌使样品充分溶解, 静置至样品完全沉淀后吸出上清液 30~40mL, 烘干后称出干盐重量, 计算 100g 被测样品(土样或降尘)中水溶盐的百分含量。

#### (2) 粒度分析

粒度分析在北京市理化分析测试中心实验室进行, 利用 LA-920 激光粒度分析仪对小于 200 目的

样品进行激光粒度分析。人工分析粒度时, 称 100g 处理好的样品, 用 80 目、120 目、160 目和 200 目 4 种不同粒径的筛孔过筛得到大于 80 目、80 目、120 目、160 目和小于 200 目 5 个粒级的样品, 再用万分之一天平分别称出各粒级样品的重量, 即代表被测样品粒度分布的百分含量, 即得“人工粒度”。

#### (3) 主要化学成分分析

采用国家地质实验测试中心的 X-射线荧光显微镜对土壤样品进行主要化学成分的分析。

#### (4) 比重分析

在北京市理化分析测试中心实验室, 对尘源区不同土地和地貌类型中小于 200 目的表土样品的比

重进行粗略测定:用一小容器(约盛 10mL 水的小酒杯),将杯注满水,并用万分之一天平称重 A,对同体积待测比重的表土样品称重 B(<200 目),获得被测样品的比重  $D=B/A$ 。

### (5) 最低起尘风速测定

这里是指不同土地和地貌类型中小于 200 目粒径的样品,在人工设置的风扇的吹拂下开始移动的最小风速(m/s)。测定方法如下:选择一长条桌(长约 2m),一端安放小电风扇,另一端置放被测样品。电扇开启后,将样品缓慢地向风扇方向推进,密切观察样品开始启动的地点,并记下确定的位置,然后用风速仪在确定的位置上测出风速。所得风速即代表被测样品的最低起尘风速。本实验在国家地质实验测试中心完成。

数据统计分析采用 SPSS 17.0 软件进行。

## 3 分析结果与讨论

### 3.1 常温水溶盐、水溶性元素和离子

干盐湖区的 16 个样品常温水溶盐平均含量高达 22.5%,是沙漠的 2250 倍,是沙地的无穷倍,是沙堆的 450 倍,是农耕地的 1125 倍,是北京大气降尘的 6.4 倍。可见,不同土地和地貌类型水溶盐物质(或盐碱物质)的含量是相当稳定的,沙漠、沙地几乎不含水溶盐物质或含量极少,农耕地等虽然含有一定量的水溶盐物质,但总量一般都在 0.1%~0.3% 之

间。干涸盐渍湖盆区含有极高含量的水溶盐物质,与北京盐碱尘暴粉尘物质的水溶盐含量最为接近,其次是农耕地等,与沙堆、沙漠和沙地的含量相差最大(表 2,图 2)。干盐湖的水溶盐含量和水溶性  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  的含量显著高于其他土地和地貌类型,且 3 个参数之间存在显著的相关性。进一步对不同土地和地貌类型的各个采样区进行分析发现,干盐湖的常温水溶盐含量、水溶性元素(如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{B}$ )和水溶性阴离子( $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$  等)的百分含量均高于其他土地和地貌类型采样区(表 2,图 2)。就干盐湖类型内部而言,西居延海的水溶盐含量高达 30.6%,明显高于其他几个采样区,水溶性元素(如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ )的含量也高于其他采样区(图 2)。相关性分析表明,水溶盐含量与水溶性元素  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  具有显著的相关性,表明高含量的水溶性元素具有共存的特性。水溶性  $\text{B}$  以安固里诺尔的较高,水溶性  $\text{SO}_4^{2-}$  以九连城的较高,原因可能在于二者具有不同的地球化学特征。其他地貌类型如沙堆、沙地、沙漠(含<200 目),由于水溶盐含量太少,已无法反映出其地球化学特征。 $\text{pH}$  值和水不溶物在不同土地和地貌类型之间没有显著的差异,不宜作为判断尘暴粉尘物质来源的因子。

北京大气降尘中含一定量的水溶性元素  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{B}$ ,与这些元素在干盐湖相应的高含量值形成了很好的呼应(表 2,图 2);同时,北京大气降尘中的

表 2 不同来源样品的常温水溶盐、水溶性离子的百分含量及 pH 值

Table 2 Water soluble salt, ions percentage and pH in samples of different origins

项目	大气降尘	农耕地等	干盐湖	沙堆	沙地	沙漠	沙漠(<200 目)
$\text{Na}^+$	0.22±0.06 <sup>b</sup>	0.10±0.08 <sup>b</sup>	3.01±0.90 <sup>a</sup>	0.01±0.01 <sup>b</sup>	0.01±0.00 <sup>b</sup>	0.00±0.00 <sup>b</sup>	0.00±0.00 <sup>b</sup>
$\text{Mg}^{2+}$	0.08±0.06 <sup>a</sup>	0.02±0.01 <sup>a</sup>	0.35±0.20 <sup>a</sup>	0.00±0.00 <sup>a</sup>	0.00±0.00 <sup>a</sup>	0.00±0.00 <sup>a</sup>	0.00±0.00 <sup>a</sup>
$\text{K}^+$	0.20±0.18 <sup>a</sup>	0.03±0.01 <sup>b</sup>	0.13±0.04 <sup>ab</sup>	0.00±0.00 <sup>ab</sup>	0.00±0.00 <sup>b</sup>	0.00±0.00 <sup>b</sup>	0.00±0.00 <sup>ab</sup>
$\text{Ca}^{2+}$	0.32±0.11 <sup>a</sup>	0.04±0.01 <sup>c</sup>	0.16±0.04 <sup>b</sup>	0.01±0.01 <sup>bc</sup>	0.00±0.00 <sup>c</sup>	0.00±0.00 <sup>c</sup>	0.0035±0 <sup>c</sup>
$\text{B}$	2.09±1.26 <sup>a</sup>	0.01±0.01 <sup>a</sup>	2.00±0.91 <sup>a</sup>	0 <sup>NA</sup>	0 <sup>NA</sup>	0.00 <sup>NA</sup>	NA
$\text{Cl}^-$	0.29±0.22 <sup>b</sup>	0.08±0.04 <sup>b</sup>	0.99±0.27 <sup>a</sup>	0±0 <sup>b</sup>	0.02±0.01 <sup>b</sup>	0.01±0.01 <sup>b</sup>	0±0 <sup>b</sup>
$\text{NO}_3^-$	0.18±0.12 <sup>a</sup>	0.01±0.00 <sup>b</sup>	0.03±0.01 <sup>b</sup>	0±0 <sup>b</sup>	0±0 <sup>b</sup>	0.00±0 <sup>b</sup>	0.0005±0 <sup>b</sup>
$\text{SO}_4^{2-}$	0.63±0.40 <sup>a</sup>	0.03±0.02 <sup>a</sup>	1.36±0.72 <sup>a</sup>	0±0 <sup>a</sup>	0±0 <sup>a</sup>	0.00±0 <sup>a</sup>	NA
水不溶物	96.59 <sup>NA</sup>	99.34±0.31 <sup>a</sup>	89.60±1.94 <sup>b</sup>	NA	100.00±0.38 <sup>a</sup>	99.52 <sup>NA</sup>	NA
水溶盐含量	3.51±1.92 <sup>b</sup>	0.02±0.00 <sup>b</sup>	22.50±12.83 <sup>a</sup>	0.05±0.05 <sup>b</sup>	0.00±0.00 <sup>b</sup>	0.01±0.01 <sup>b</sup>	0.00 <sup>b</sup>
pH	8.24±0.03 <sup>ab</sup>	7.71±0.14 <sup>bc</sup>	8.53±0.17 <sup>a</sup>	7.16±0.14 <sup>c</sup>	7.18±0.11 <sup>c</sup>	7.33±0.07 <sup>c</sup>	NA

注:数据为平均值±标准误差,数据右侧的上标 abc 表示各分析项目在不同来源样品之间是否具有显著的差异,即差异性分析在同一行不同样品来源的数据之间进行。若某行 2 个数据的上标具有 1 个或 1 个以上相同字母,则该行代表的分析项目百分含量在这 2 个数据所在列代表的 2 个来源地的样品之间无显著的差异,反之,在 95% 的置信水平( $\alpha=0.05$ )上具有显著差异。NA—缺数据。水溶盐、水溶性离子含量为%

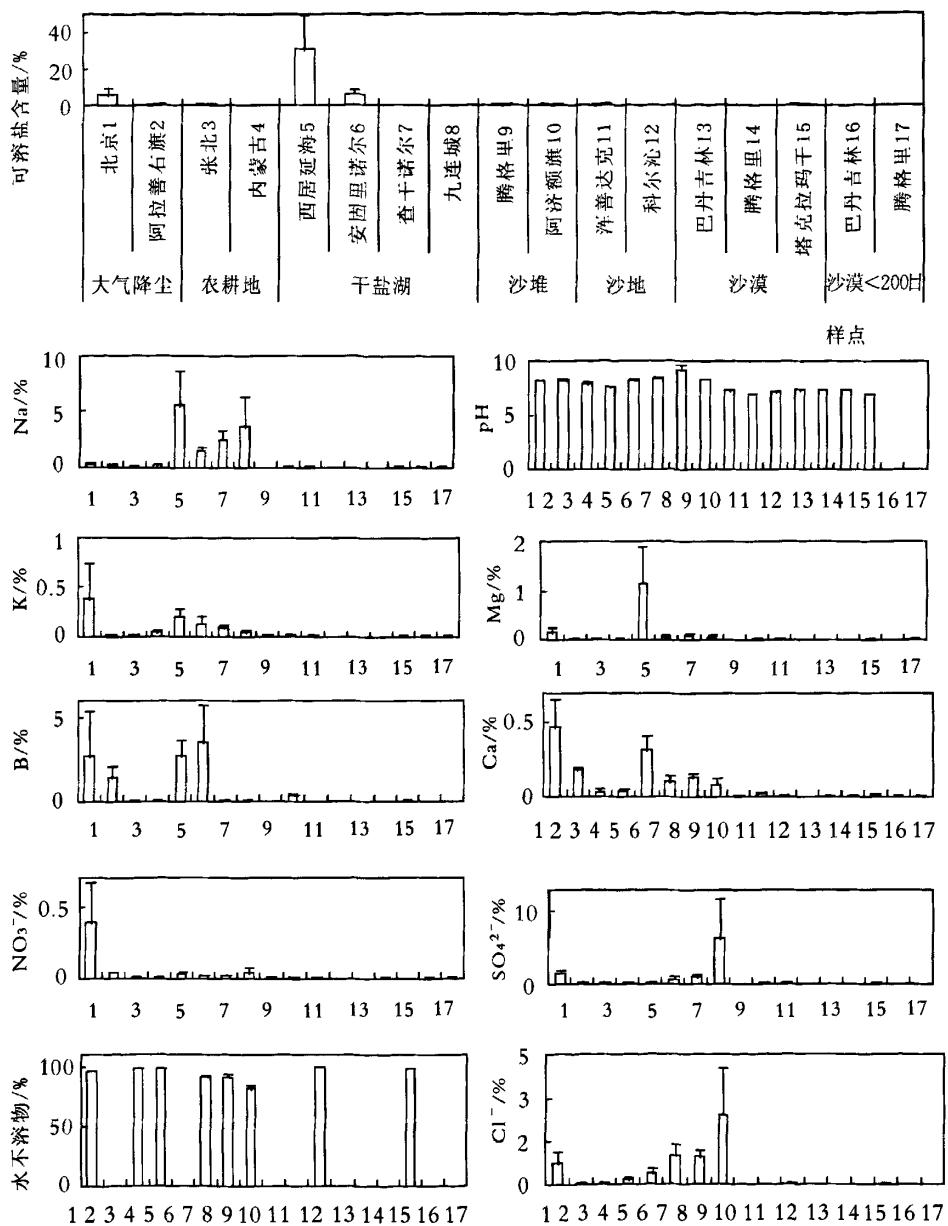


图2 不同来源样品的常温水溶盐、水溶性离子的百分含量及pH值

Fig. 2 Water soluble salt, ions percentage and pH in samples of various origins

横坐标1~17为地点编号,如北京为1……腾格里为17。柱状图高度为平均值,柱状图上的T形符号为标准误差

$\text{NO}_3^-$ 含量显著高于各土地和地貌类型(表2,图2),可能暗示着本地存在其他更严重的氮污染源。干盐湖的水不溶物显著低于农耕地等、沙地和沙漠,水不溶物与水溶盐含量、水溶性  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  存在显著的负相关。

干盐湖样品的pH值达8.53,显著高于其他土地和地貌类型的样品,与以往认为的盐碱地等非耕作系统中pH值相对较高(通常>8.5)的结论一致<sup>[9]</sup>。大气降尘的pH值也达到了8.24,偏碱性,显著高于沙堆、沙地、沙漠等地貌类型,与农耕地和干盐湖无

显著的差异。统计分析表明, pH 值与水溶性 K、Ca、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>也存在显著的相关性。

可以推断, 北京盐碱尘暴粉尘物质中的水溶盐含量与其他不同土地和地貌类型来源的表土样品水溶盐物质的比值, 将是评估北京盐碱尘暴粉尘物质来源的重要指标, 比值越大, 粉尘物质来自干盐湖的可能性就越大。

### 3.2 主要化学成分

主要化学成分分析结果(表 3, 图 3)表明, 对于所有的土地和地貌类型, SiO<sub>2</sub> 均为其主要成分, 符合 Si 属于地壳中含量丰富的元素的普遍规律。干盐湖中 SiO<sub>2</sub> 的含量显著低于其他土地和地貌类型。干盐湖地貌中的 Na<sub>2</sub>O、MgO 含量显著高于其他土地和地貌类型, 与前面提到的其水溶性元素中 Na、Mg 的高含量相一致, Na<sub>2</sub>O 与 MgO 显著的正相关关系和前述 Na 与 Mg 呈显著正相关的结果相一致。干盐湖中 Na<sub>2</sub>O 与 SiO<sub>2</sub> 呈显著的负相关关系, 与 Si 的含量较低的结果相一致。进一步分析不同土地和地貌类型各样点的数据资料发现, 干盐湖中所有样点的 Na<sub>2</sub>O、MgO 含量均明显高于其他样点, SiO<sub>2</sub> 含量明显低于其他样点, 可能反映出干盐湖相应不稳定的地球化学特征(表 3, 图 3)。沙漠的细颗粒部分(<200 目)的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、CaO、TiO<sub>2</sub> 显著高于同一沙漠的粗颗粒部分, 表明细颗粒物上更容易富集 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、CaO、TiO<sub>2</sub>。阿济额旗沙堆的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、CaO 的含量较高(表 3, 图 3), 可能与这些沙堆靠近牧民住地,

与他们的日常消费品污染有关。其他主要成分未发现明显的变化规律。

### 3.3 人工粒度和激光粒度

人工粒度分析结果表明, 大气降尘和干盐湖均有 70%以上的粒度小于 200 目, 这一比例显著高于其他土地和地貌类型(表 4, 图 4)。干盐湖中小于 200 目的粉尘粒级的平均含量为 86%(最高含量达 99%以上), 是沙漠的 89 倍, 是沙地的 51 倍, 是农耕地等的 8 倍, 是北京大气降尘的 0.85 倍。农耕地等地貌类型 50%以上的土壤粒径大于 80 目, 沙堆、沙地、沙漠等地貌类型的土壤粒径 50%以上大于或等于 120 目。沙漠地貌类型中粒径小于 200 目的沙粒比例很小, 仅占全部样品的 0.97%(表 4, 图 4)。以往的研究表明, 植物种植年限越长沙含量越低, 而粉沙和粘沙的含量越高<sup>[10]</sup>。本研究中小于 200 目的粉尘粒级含量最高的为干盐湖和大气降尘, 其次为农耕地等土地类型, 表现出干盐湖的细微颗粒最集中的特征。进一步对不同土地、地貌类型各采样区的人工粒度进行分析, 证实干盐湖 200 目以下细微颗粒物含量普遍较高的稳定特征(表 4, 图 4)。

对样品的激光粒度分析表明, 干盐湖和大气降尘的颗粒的比表面积显著高于其他土地和地貌类型(表 5, 图 5-A), 平均粒径和模式粒径(表 5, 图 5-B、C)显著低于其他土地和地貌类型, 进一步说明干盐湖和大气降尘的颗粒物更容易富集有毒元素, 对人体健康构成的威胁更大。沙漠中的细颗粒成分

表 3 不同来源样品主要化学成分的百分含量

Table 3 Percentage contents of main chemical components in samples of different origins

主要化学成分	大气降尘	农耕地等	干盐湖	沙堆	沙地	沙漠	沙漠(<200 目)
Na <sub>2</sub> O	2.40±0.14 <sup>b</sup>	2.23±0.14 <sup>b</sup>	6.94±1.23 <sup>a</sup>	1.64±0.21 <sup>b</sup>	1.96±0.11 <sup>b</sup>	2.09±0.13 <sup>b</sup>	1.55±0.44 <sup>b</sup>
MgO	2.83±0.27 <sup>b</sup>	1.82±0.27 <sup>bc</sup>	5.13±0.42 <sup>a</sup>	1.54±0.29 <sup>bcd</sup>	0.26±0.03 <sup>d</sup>	1.10±0.16 <sup>cd</sup>	2.29±0.48 <sup>bc</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.05±0.24 <sup>a</sup>	12.23±0.30 <sup>a</sup>	10.92±0.67 <sup>ab</sup>	8.81±1.31 <sup>bc</sup>	8.69±0.38 <sup>c</sup>	8.51±0.22 <sup>c</sup>	9.30±0.70 <sup>bc</sup>
SiO <sub>2</sub>	60.52±1.58 <sup>c</sup>	68.10±1.50 <sup>NA</sup>	44.70±2.54 <sup>d</sup>	71.40±6.90 <sup>bc</sup>	82.74±0.76 <sup>b</sup>	77.40±3.27 <sup>b</sup>	60.99±2.06 <sup>c</sup>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.23±0.10 <sup>b</sup>	0.16±0.02 <sup>b</sup>	0.16±0.01 <sup>b</sup>	0.64±0.40 <sup>a</sup>	0.06±0.02 <sup>b</sup>	0.11±0.03 <sup>b</sup>	0.50±0.17 <sup>a</sup>
K <sub>2</sub> O	2.38±0.11 <sup>cd</sup>	2.97±0.16 <sup>bc</sup>	2.28±0.12 <sup>de</sup>	3.20±0.34 <sup>ab</sup>	3.47±0.15 <sup>a</sup>	2.54±0.22 <sup>bcd</sup>	2.45±0.33 <sup>bcd</sup>
CaO	7.80±0.65 <sup>ab</sup>	3.01±0.53 <sup>cd</sup>	6.68±0.53 <sup>b</sup>	5.41±4.05 <sup>bc</sup>	0.61±0.10 <sup>d</sup>	4.27±2.09 <sup>bc</sup>	10.99±1.44 <sup>a</sup>
TiO <sub>2</sub>	0.65±0.02 <sup>cd</sup>	0.72±0.05 <sup>bc</sup>	0.57±0.03 <sup>cd</sup>	0.67±0.35 <sup>bcd</sup>	0.34±0.06 <sup>d</sup>	0.52±0.22 <sup>cd</sup>	1.79±0.41 <sup>a</sup>
MnO	0.07±0.01 <sup>ab</sup>	0.07±0.01 <sup>ab</sup>	0.13±0.04 <sup>a</sup>	0.08±0.05 <sup>ab</sup>	0.02±0.01 <sup>b</sup>	0.03±0.00 <sup>b</sup>	0.15±0.03 <sup>ab</sup>
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.12±0.41 <sup>ab</sup>	6.82±3.36 <sup>a</sup>	4.48±0.40 <sup>ab</sup>	5.45±2.18 <sup>ab</sup>	0.95±0.09 <sup>b</sup>	3.19±1.23 <sup>ab</sup>	9.00±1.83 <sup>a</sup>

注: 数据为平均值±标准误差, 数据右侧的上标 abcde 用来表示同一种化学成分的含量在不同来源样品之间是否具有显著差异, 若某行 2 个数据的上标具有 1 个或 1 个以上相同字母, 则该行所代表的化学成分含量在这 2 个数据所在列代表的 2 个来源地样品之间无显著差异, 反之, 在 95%的置信水平( $\alpha=0.05$ )上具有显著差异。氧化物含量为%

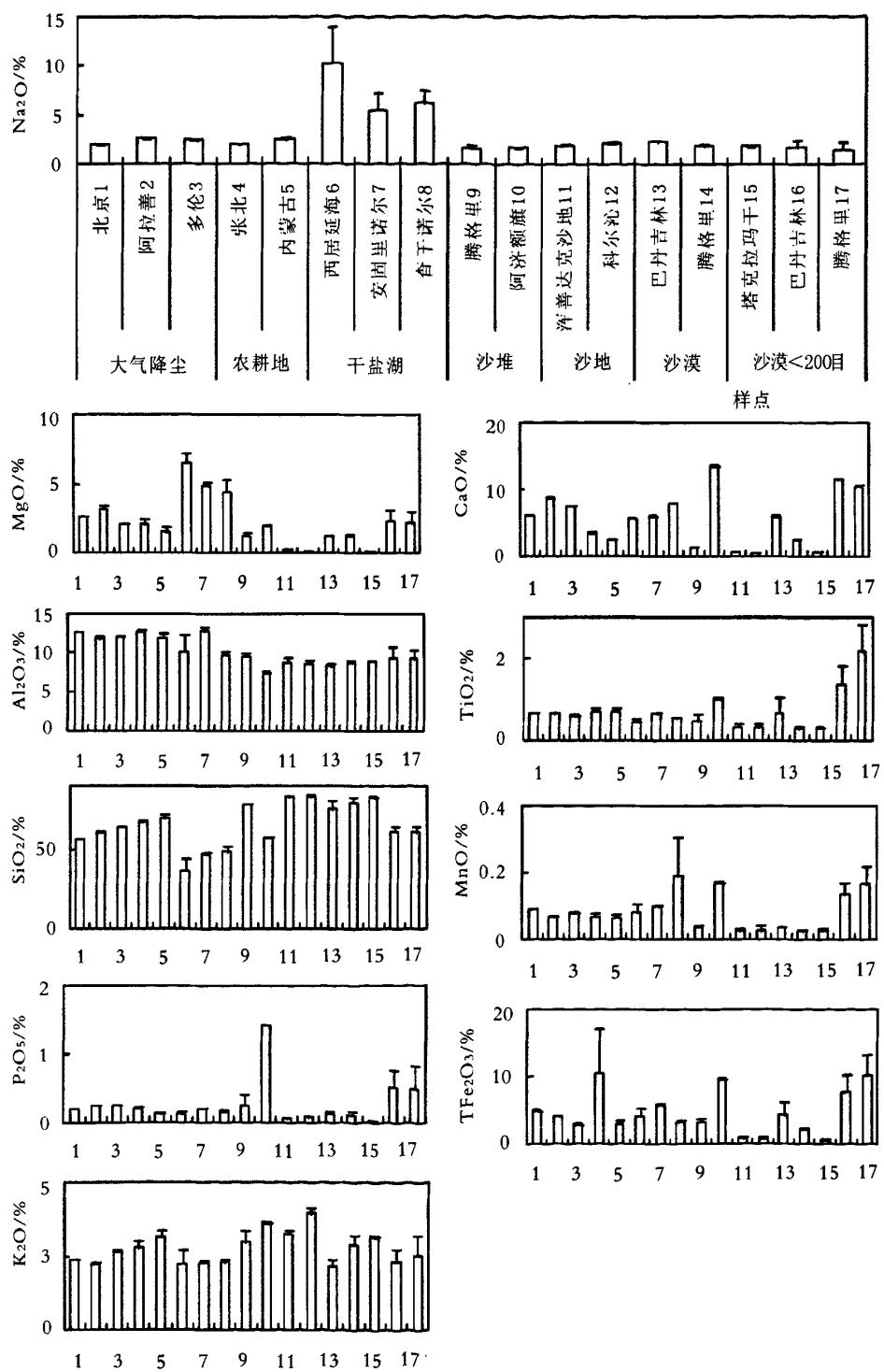


图 3 不同来源样品主要化学成分的百分含量(图内说明同图 2)

Fig. 3 Percentage contents of the main chemical components in samples of different origins

表 4 不同来源样品人工粒度的百分含量

Table 4 Percentage of artificial granularity in samples of different origins

测试项目	大气降尘	农耕地等	干盐湖	沙堆	沙地	沙漠
大于 80 目	3.60±2.37 <sup>c</sup>	61.24±5.64 <sup>a</sup>	8.85±3.52 <sup>c</sup>	28.40±14.37 <sup>bc</sup>	37.67±9.14 <sup>b</sup>	36.33±7.55 <sup>b</sup>
等于 80 目	9.10±6.40 <sup>bc</sup>	14.00±1.92 <sup>b</sup>	2.40±0.68 <sup>c</sup>	34.40±4.34 <sup>a</sup>	47.84±7.65 <sup>a</sup>	46.56±7.83 <sup>a</sup>
等于 120 目	8.94±4.81 <sup>bc</sup>	7.57±1.04 <sup>b</sup>	1.44±0.35 <sup>c</sup>	25.92±8.29 <sup>a</sup>	9.41±1.58 <sup>b</sup>	12.17±1.04 <sup>b</sup>
等于 160 目	14.28±2.62 <sup>a</sup>	5.16±0.94 <sup>b</sup>	1.29±0.30 <sup>c</sup>	6.96±1.79 <sup>b</sup>	1.92±0.73 <sup>c</sup>	2.59±0.49 <sup>c</sup>
小于 200 目	71.72±13.49 <sup>a</sup>	10.83±2.43 <sup>b</sup>	85.40±4.32 <sup>a</sup>	2.52±0.63 <sup>b</sup>	1.69±0.49 <sup>b</sup>	0.97±0.35 <sup>b</sup>

注:数据为平均值±标准误差,数据右侧的上标 abc 用来表示同一粒级的百分含量在不同来源样品之间是否具有显著差异。若某行 2 个数据的上标具有 1 个或 1 个以上相同字母,表明该行代表的粒级百分含量在这 2 个数据所在列代表的 2 个来源地之间无显著差异,反之,说明在 95% 的置信水平( $\alpha=0.05$ )上具有显著差异。粒度含量为%

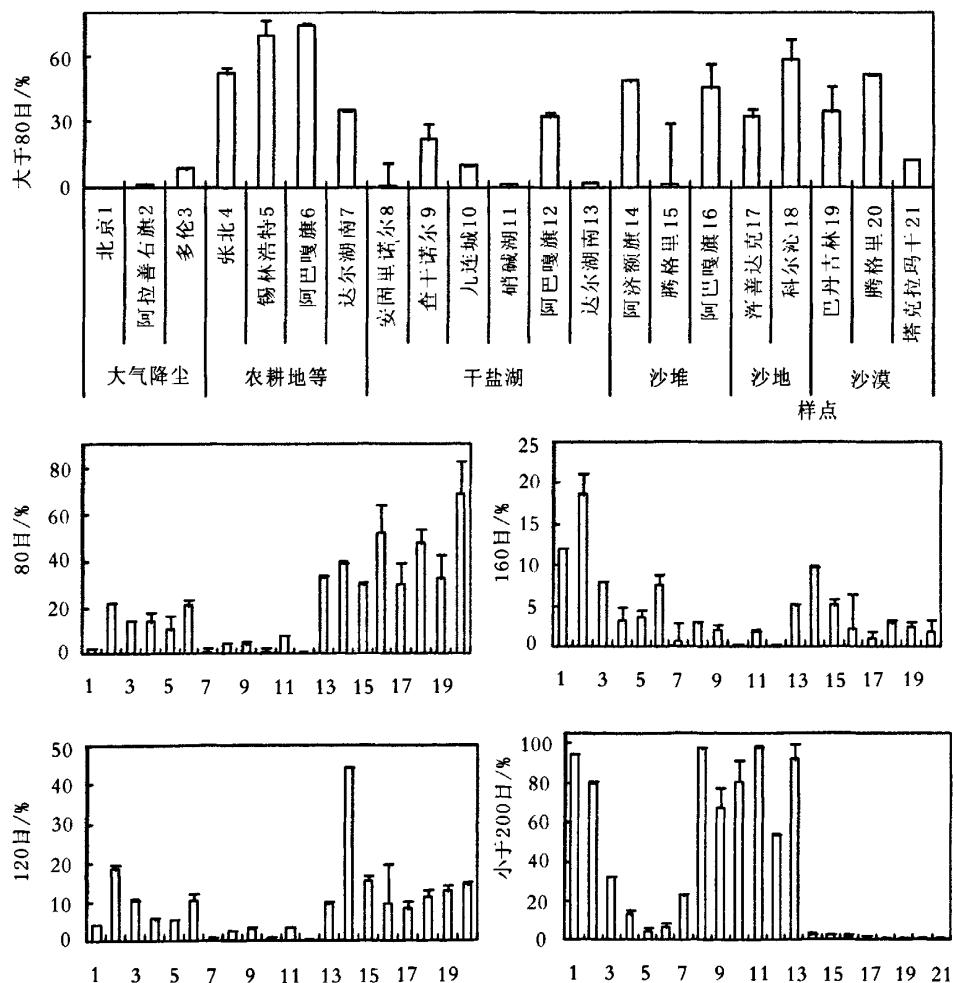


图 4 不同来源样品人工粒度的百分含量(图内说明同图 2)

Fig. 4 Percentage of artificial granularity in samples of different origins

表5 不同来源样品的激光粒度、比重、最低起尘风速分析结果

Table 5 The analysis results of laser granularity, proportion and minimum dust-moving wind speed

样品来源	比表面积 /cm <sup>2</sup> ·cm <sup>-3</sup>	平均粒径 /μm	模式粒径 /μm	比重 /g·cm <sup>-3</sup>	起尘风速 /m·s <sup>-1</sup>
大气降尘	3912.1±482.5 <sup>b</sup>	42.6±5.7 <sup>d</sup>	44.5±7.6 <sup>e</sup>	0.8±0.1 <sup>c</sup>	2.6±0.1 <sup>cd</sup>
农耕地等	1802.9±105.9 <sup>c</sup>	85.5±8.9 <sup>c</sup>	91.9±10.7 <sup>c</sup>	1.1±0.1 <sup>b</sup>	2.9±0.2 <sup>c</sup>
干盐湖	4965.8±698.0 <sup>a</sup>	44.9±6.9 <sup>d</sup>	58.2±9.4 <sup>de</sup>	0.8±0.1 <sup>c</sup>	2.2±0.1 <sup>d</sup>
沙堆	513.3±65.4 <sup>d</sup>	167.1±15.5 <sup>b</sup>	156.9±15.5 <sup>b</sup>	1.3±0.0 <sup>a</sup>	3.5±0.1 <sup>b</sup>
沙地	1243.6±155.6 <sup>cd</sup>	183.9±23.8 <sup>b</sup>	219.8±10.6 <sup>a</sup>	1.5±0.0 <sup>a</sup>	4.5±0.2 <sup>a</sup>
沙漠	344.6±32.8 <sup>d</sup>	223.8±9.0 <sup>a</sup>	204.0±14.2 <sup>a</sup>	1.5±0.0 <sup>a</sup>	4.3±0.1 <sup>a</sup>
沙漠(<200目)	842.1±50.6 <sup>cd</sup>	84.5±3.4 <sup>c</sup>	77.7±2.9 <sup>cd</sup>	1.2	3.6±0.1 <sup>b</sup>

注:数据为平均值±标准误差,数据右侧的上标abcde用来表示同一分析项目的值在不同来源样品之间是否具有显著差异。若某列2个数据的上标具有1个或1个以上相同字母,则该列代表的分析项目的值在这2个数据所在行代表的2个来源地之间无显著差异,反之,在95%的置信水平( $\alpha=0.05$ )上具有显著差异。

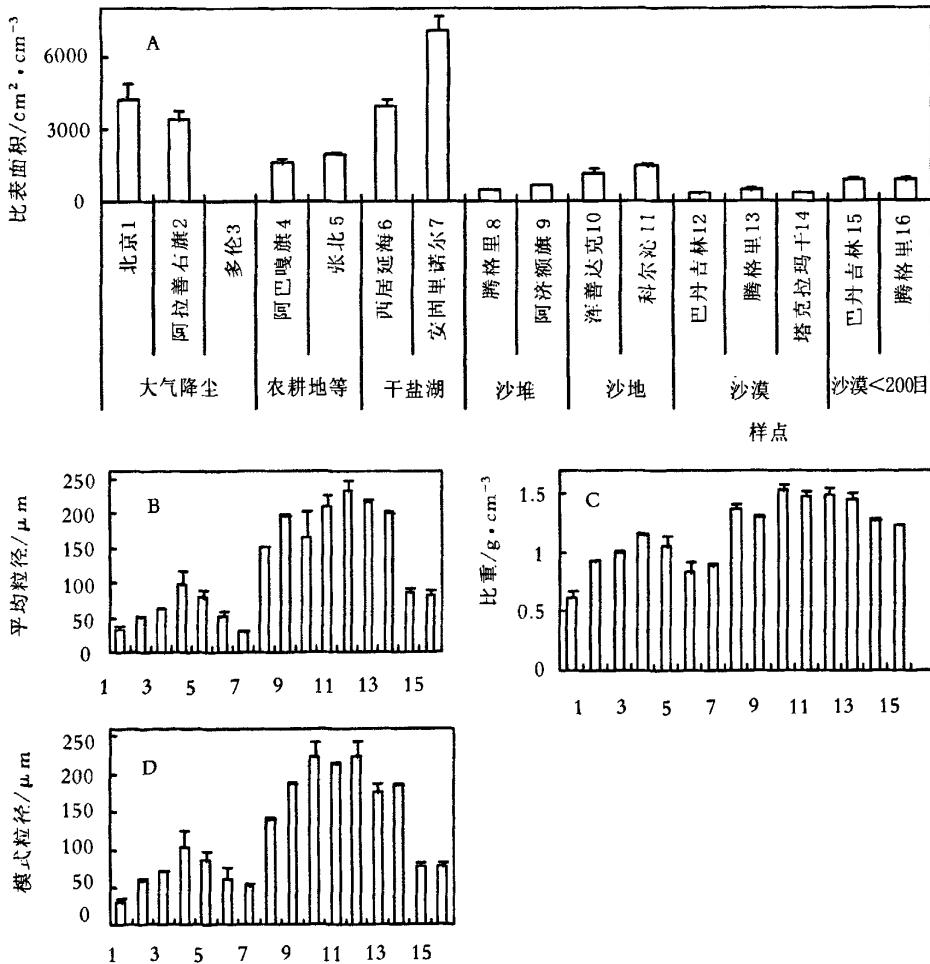


图5 不同来源样品的激光粒度、比重、最低起尘风速分析结果(图内说明同图2)

Fig. 5 The analysis results of laser granularity, proportion and minimum dust-moving wind speed

(<200目)的比表面积比粗颗粒的大,但仍明显小于干盐湖和大气降尘(表5,图5-A);其平均粒径和模式粒径比粗颗粒的小,但却明显大于干盐湖和大气降尘(表5,图5-B)。大气降尘和干盐湖的颗粒物的比重显著低于其他土地和地貌类型的样品,农耕地等比沙堆、沙地和沙漠的比重小一些(表5,图5-D)。干盐湖的起尘风速显著低于其他土地和地貌类型(表5,图5-E),以往有关粉尘在空气中悬浮和搬运性能的实验结果表明,粉沙(0.05~0.01mm)颗粒易浮动、易分散<sup>[11]</sup>,从侧面证明了干盐湖的颗粒物更容易升到空中被远程运输,为可能的盐碱尘暴源。起尘风速与比表面积、平均粒径和模式粒径显著的相关性也进一步证明了这一结论的科学性。

## 4 结 论

本文对北京尘暴源区不同土地、地貌类型的地表土壤样品,以及北京及部分尘源区的大气降尘样品进行了分析。结果表明,干涸盐渍湖盆区以高百分含量的小于200目的粉尘物质、高含量的水溶盐物质和部分水溶性元素、离子(如Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>等)为特征,区别于沙漠、沙地、沙堆和农耕地、撂荒地、退化草场,与此相一致,北京大气降尘中的水溶盐和水溶性元素、离子高于其他地貌类型。干盐湖和北京大气降尘均具有较强的偏碱性特征,也不同于其他土地和地貌类型。干盐湖颗粒物具有相对偏小的比重和偏低的起尘速率,更易升至高空进行远距离传输;偏大的比表面积使其成为携带各种污染物的良好载体。总之,根据北京大气降尘与干盐湖在水溶盐含量、部

分水溶性元素及离子含量、颗粒物细微特征、比表面积、比重、起尘风速、酸碱性等诸多方面的近似特征可以推测,干涸的盐渍湖盆区是现阶段北京盐碱尘暴最重要、最关键的尘源区之一。因此,水溶盐含量、粒度大小、酸碱度、比重和起尘风速是判断北京盐碱尘暴粉尘物质来源的重要指标。

## 参 考 文 献

- [1]韩同林,林景星,王永,等.京津地区“沙尘暴”的性质和治理——以北京2006年4月16日的尘暴为例[J].地质通报,2007,26(2):117~127.
- [2]张宏仁.沙粒不能“远走高飞”——有关“尘暴”的一条根本原理[J].地质力学报,2007,13(1):1~6.
- [3]韩同林.京津地区沙尘暴与盐碱尘暴浅析[J].科学(上海),2008,60(1):27.
- [4]任陈海,高庆先,苏福庆,等.北京大气环境的区域特征与沙尘影响[J].中国工程科学,2003,5(2):49~56.
- [5]郑新江,杨义文,李云.北京地区沙尘天气的某些特征分析[J].气候与环境研究,2004,9(1):14~23.
- [6]李令军,高庆生.2000年北京沙尘暴源地解析[J].环境科学研究,2001,14(2):1~3.
- [7]邱玉婧,牛生杰,邹学勇,等.北京沙尘天气成因概率研究[J].自然灾害学报,2008,17(2):93~98.
- [8]张兴羸,庄国顺,袁惠.北京沙尘暴的干盐湖盐渍土源——单颗粒物分析和XPS表面结构分析[J].中国环境科学,2004,24(5):533~537.
- [9]罗格平,许文强,陈曦.天山北坡绿洲不同土地利用对土壤特性的影响[J].地理学报,2005,60(5):779~790.
- [10]许文强,罗格平,陈曦,等.干旱区绿洲不同土地利用方式和强度对土壤粒度分布的影响[J].干旱区地理,2005,28(6):800~804.
- [11]Moldvay L. On the governing sedimentation from eolian suspension[J]. Acta Universitatis Szegediensis, 1962, 14:75~109.
- ①宋怀龙.盐碱尘暴影响北京.第八届国际干旱区土地开发大会,2006.