

一次黄沙天气过程的分析*

杨东贞 纪湘明 徐晓斌 符基萌 温玉璞

(国家气象局气象科学研究所)

提 要

本文通过天气图、气象要素、气象卫星云图和轨迹的分析,探讨了造成 1988 年 4 月 9 日至 16 日一次强黄沙过程的天气形势、气候背景,追朔了沙尘的源地及沙尘的输送方向、途径和影响范围。测定和分析了沙尘微粒的浓度、元素、组分等物理和化学特征。结果表明,沙尘的质量浓度较平时大 10 多倍,沙尘中的元素以亲石元素为主,主要来自于自然源,受人为污染的影响很小。

一、引 言

所谓黄沙天气过程可以理解为大气的天气尺度范围的运动所造成的大范围的沙暴、浮尘、吹沙等天气现象,这些天气现象能随高空西风带向东输送波及到日本及北太平洋上空。

由黄沙天气过程所引发的气候学效应,如对大气能见度、大气光学特性、地气辐射平衡的影响及导致自然生态环境的破坏等已是不可忽视的大气和生态环境问题之一。因此长期以来为国内外学者所关注,并做了大量工作。例如美国 NOAA 设在夏威夷岛上的 Mauna Loa 本底监测站长期来密切注视和监测东亚尘暴对其影响,对尘气溶胶的物理化学特征作了分析研究^[1]。日本利用气象卫星云图分析总结了 1982 年至 1988 年 21 个来自东亚的尘暴,他们称之为尘云(或尘暴)“kosa”,指出尘暴的源地、影响范围并将进一步估算尘暴输送过程中沙尘的沉降量^[2];日本有的研究人员还指出弱“kosa”对土壤微粒的地球化学循环作用的重要性^[3]。国内也有许多单位对此作了研究,如中科院大气所和高能所对尘暴的源地、沙尘的性质也作了较详细的探讨^[4]。

我国西北地区覆盖着大片的沙漠、戈壁,黄土高原拥有世界上最丰厚的黄土带,每到春季在一定的气候背景和天气形势下极易发生黄沙天气即为沙暴或叫尘暴。本文分析研究发生在 1988 年 4 月 9 日—16 日强黄沙天气过程的天气形势,沙尘的源地、输送路径及沙尘的一些物理化学特征。

二、1988 年 4 月 9 日至 16 日黄沙天气过程的概况和天气形势

1. 概况

本次黄沙天气过程始于 9 日 20 时,乌鲁木齐率先出现大风、沙暴。此后随着锋面东移南下,大风、沙暴也随之挺进,至 12 日 20 时黄沙天气所及范围南至长沙、桂林,西抵南

* 本文于 1989 年 9 月 2 日收到, 1989 年 12 月 17 日收到修改稿。

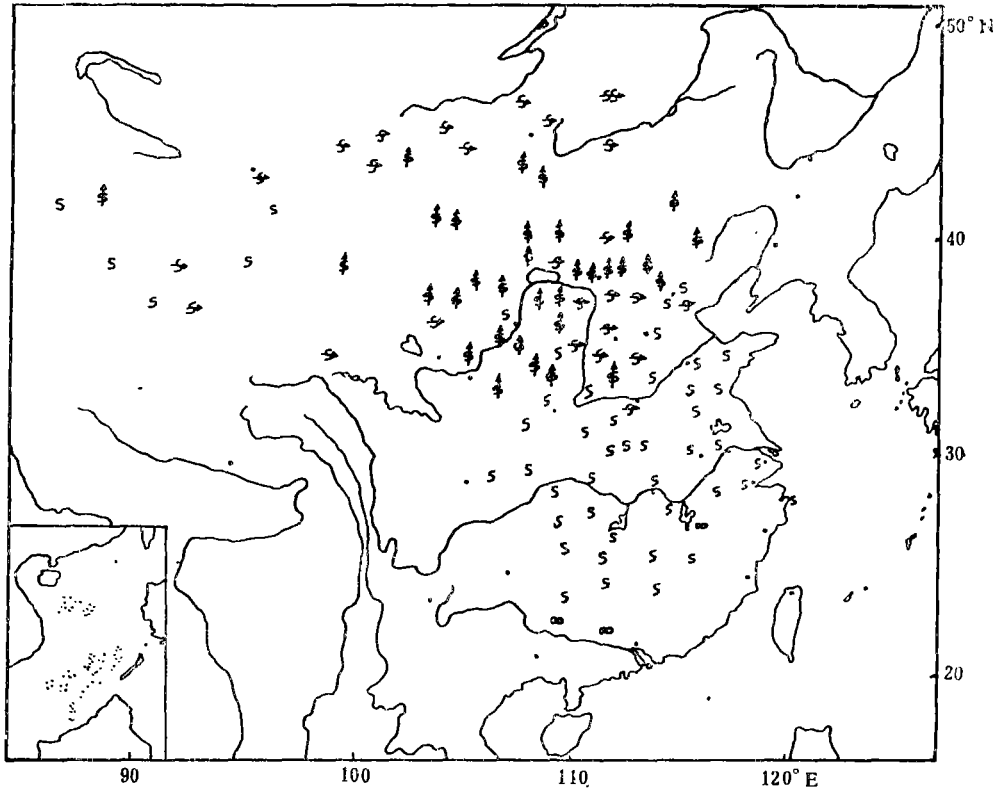


图1 1988年4月9日20时—12日20时全国沙暴、吹沙、浮尘分布

充、达县,东到上海、杭州(见图1)。13日沙暴开始减弱,在淮河以北地区很快消失。14日除南方少数城市如桂林等地外沙暴也基本结束。整个过程于16日结束。表现的天气现象,南方是浮尘,北方的新疆、内蒙、黄土高原一带及少数地面裸露严重的平坦地区以沙暴和吹沙为主。这与黄沙本身重力沉降、远距离输送及下垫面状况有关。

2. 天气形势

4月6日8时500 hPa图上,欧洲东北有一大槽,新地岛西部有一强冷中心(-43°C)与之配合,此槽东移,9日20时抵达我国境内,冷空气前锋侵入,新疆乌鲁木齐出现大风、沙暴。10日8时位于欧洲西部的另一深槽又相继东移,大大加剧了整个天气过程,同时极锋在欧洲南部因受高压阻挡而分成南北两支,东进到新疆东部、内蒙和黄土高原西部一带又汇合,致使冷空气强烈爆发,大量沙尘随风挟卷而起。10日20时前锋到达内蒙中部和黄河中上游一带;11日14时锋面已移至华北东部和江淮西部地区;12日08时锋面进入我国东部和南部海面。凡锋面所经之处,大风、阵风频频发生,沙尘飞扬,沙暴、浮尘铺天盖地,能见度骤降,最低只有0.1 km。

12日8时500,700 hPa槽后均为大片西北气流,而850 hPa从南京、武汉、南昌、长沙至桂林一线为强劲的东北气流,风速达12—14 m/s,这使得部分沙尘折向西南方向输送,于是长沙、桂林等地自12日14时至14日14时连续出现浮尘天气现象。

三、沙尘源地的追溯

1. 沙尘轨迹的分析

按照 Haris 提出的修正的欧拉方法^[5]计算了沙尘轨迹。

首先根据间隔 12 小时的风速分量按下面公式内插出其间的每 3 小时平均风速。

$$x_{i,j} = \frac{x_{i,j}(t_{12}) - x_{i,j}(t_0)}{12} \times \tau + x_{i,j}(t_0)$$

其中 $x = u, v$, $\tau = 1.5, 4.5, 7.5, 10.5$

i, j 是格点的坐标, t_0 和 t_{12} 分别表示前后两次分析场的时间, 时间步长为 3 h。

风速资料取自国家气象中心客观分析高度场算出的地转风。

轨迹计算过程大体如下: 由每天两次客观分析的风速资料内插出每 3 小时间隔的 1.5, 4.5, 7.5 和 10.5 小时风速及下午相应的风速做为 3 小时的平均风速再进行水平方向的内插, 算出在轨迹通过 P 处(图 2)的 3 小时平均风速。根据这个风速算出 3 小时轨迹段 PP_3 , 这就是所谓第一猜测值。然后在第一猜测值的中点 P_m 再内插其 3 小时平均风速。根据这个风速最后算出通过 P 点的轨迹段 PP_1 。如此往复可以算出所要求长度的轨迹。

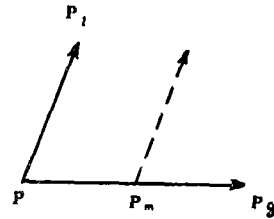


图 2 插值示意图

图 3 为沙尘抵达北京(A)、郑州(B)、济南(C)、武汉(D)和杭州(E)的轨迹。轨迹所经历的时间请见图。由图可知, 上述各地 500 hPa 和 700 hPa 的轨迹都穿过新疆北部沙漠区, 蒙古高原戈壁滩, 内蒙古的各沙漠区和黄土高原。但 500 hPa 与 700 hPa 的轨迹经由地区不尽一致, 即所谓两层不同高度其沙尘来源不同。如武汉与杭州的 500 hPa 轨迹始于新疆北部沙漠区, 经过黄土高原的南缘; 而其 700 hPa 轨迹和济南的 500 hPa 轨迹则主要通过内蒙古的沙漠区, 最后穿过黄土高原。北京 500 hPa 轨迹所经之地是新疆的沙漠区, 内蒙古的部分沙漠区; 北京和济南 700 hPa 轨迹是通过蒙古高原南部的戈壁滩和内蒙部分地区。郑州 700 hPa 轨迹整个横穿黄土高原。

轨迹表明了沙尘源地并非单一, 除了起风的新疆北部沙漠区外, 途径的内蒙古高原的各沙漠区和黄土高原是主要的源地。这两高原对本次沙尘的贡献最大, 因天气过程在该区西侧大大加强, 当锋面经过该区时将大量沙尘挟卷向上随风向下游输送扩散。这与 500 hPa 环流形势相吻合。轨迹与锋面、沙尘暴天气区的移动路径和方向基本一致。

2. 卫星云图图象识别

气象卫星云图上物象的色调与反照率、太阳高度角有关, 不同物质其反照率不同, 在云图上物象的色调也不同。卫星云图上黑色是水、陆, 白色是云, 浅灰色则是沙尘, 故可以根据卫星云图图象识别沙尘的来源和输送路径。

以北京为例, 4 月 10 日 8 时红外云图北京上空为黑色区, 即为晴好天气; 11 日 8 时北京处在一片白色之中, 地面天气图上未见沙尘现象, 该白色区系云系; 11 日 11 时北京上空为一灰色区, 而地面天气图上却是阴天, 难以确定该灰色是何物, 实况是从 8 时半后北京已出现浮尘。11 日 14 时位于北京上空的一片白色云系东移, 约在 $33^\circ - 45^\circ N$,

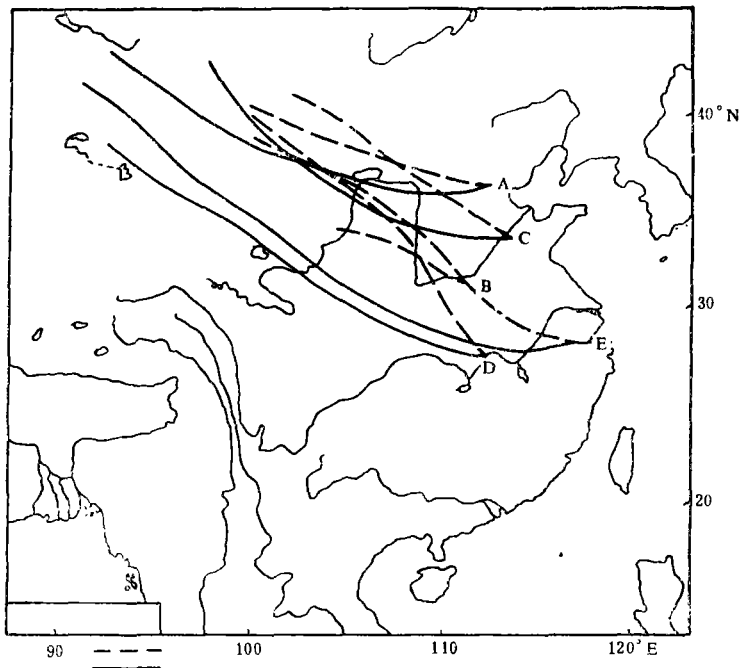


图3 沙尘的轨迹 ---700 hPa ——500 hPa

(1988年4月)

- A 北京, 10日5时至11日11时;
- B 郑州, 11日2时至11日14时;
- C 济南, 10日17时至11日23时;
- D 武汉, 10日11时至12日14时;
- E 杭州, 11日8时至12日20时)

105°—118°E区域内(包括北京地区)为一浅灰色图象(见图4中B区), 而地面天气图上测是碧空, 显然该浅灰色是沙尘, 而且其范围与地面天气图上所示的沙暴、浮尘所波及的范围一致。17时至20时云图仍表明有沙暴只是程度趋于缓和。与此同时上区西部由原来浅灰色变为黑色, 这表明沙暴已东移, 此刻又处于晴好天气。

12日极轨卫星云图(图略)图象表明沙暴已移出北京并继续向东南方向前进。

图4中A区是取自日本气象卫星中心云图图象——尘云“kosa”^[2], 为沙尘的源地。此区正是上述轨迹所经之地, 这与我们的分析较一致。因此根据气象卫星云图图象基本上能识别出沙尘的源地和输送方向。

3. 能见度(V)和直接太阳辐射(S)的分析

凡沙暴所到之处, 能见度骤降, 直接太阳辐射大大减弱。图5为低能见度(V)区和低直接太阳辐射(S)区的时空变化。所谓低 V 值和低 S 值是一个相对值, 即为某测站不同时刻的 V , S 值中的最低值。图中虚实线分别表示低 S 值区和低 V 值区, 等值线的数字为其出现的时间(日、时), 因 S 是日总量故只标明日期。由图可知低 V 和低 S 出现的时间、范围与锋面和沙尘暴天气区所经过的时间、范围、路径完全一致。

表1为北京市的 V 与 S 的时间变化。9日、10日北京尚未受沙暴的侵入, 天气晴好,

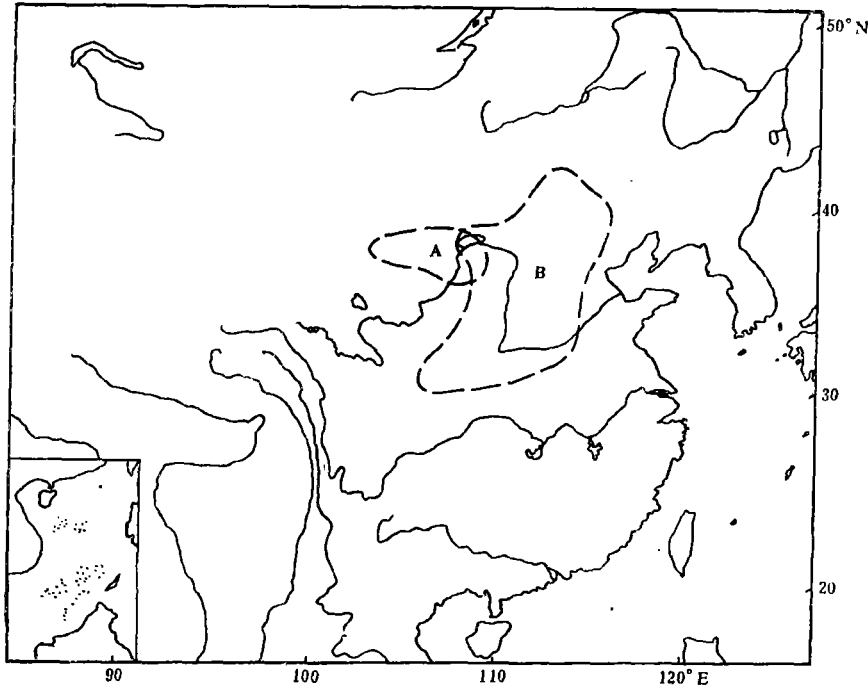


图4 卫星云图图象示意

(A区为源区(取自日本气象卫星中心), B区为11日14时沙尘、浮尘所及范围(红外云图))

表1 北京4月9日—13日
 $V(\text{km})$ 与 $S(\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}))^*$

项 目 \ 时 间	9日	10日	11日	12日	13日
\bar{V}	10.3	7.0	2.6	12.3	18.8
V_{14}	9.0	4.0	1.2	20.0	15.0
S	12.42	1.80	0.00	13.51	15.08

\bar{V} 为能见度日平均值, V_{14} 为能见度14时值, S 为直接太阳辐射日总量。

V 与 S 值较高。11日沙尘来临, V 与 S 降至最低, 分别为1.2 km和0.00 MJ/(m²·d), 12日沙尘已移出北京, 天气好转, V 与 S 值上升, 其值分别为20 km和13.51 MJ/(m²·d)。

表2为自西向东各测站低 V 出现的时间。随着沙尘向东移动, 低 V 出现的时间依次向后推迟。如乌鲁木齐9日20时, 张掖10日20时, 北京是11日14时。因此低 V 区和低 S 区的位移及低 V 出现时间同样也表明了沙尘的来源及其演变过程。

4. 沙尘源地的气候、环境

我国的新疆、内蒙古和黄土高原一带除含有大量的沙尘黄土微粒外, 自1987年冬至

表2 各测站低 $V(\text{km})$ 出现时间

地点	乌鲁木齐	张掖	银川	呼和浩特	北京
能见度	6.0	3.0	1.2	4.0	1.2
出现时间	9日20时	10日20时	11日2时	11日8时	11日14时

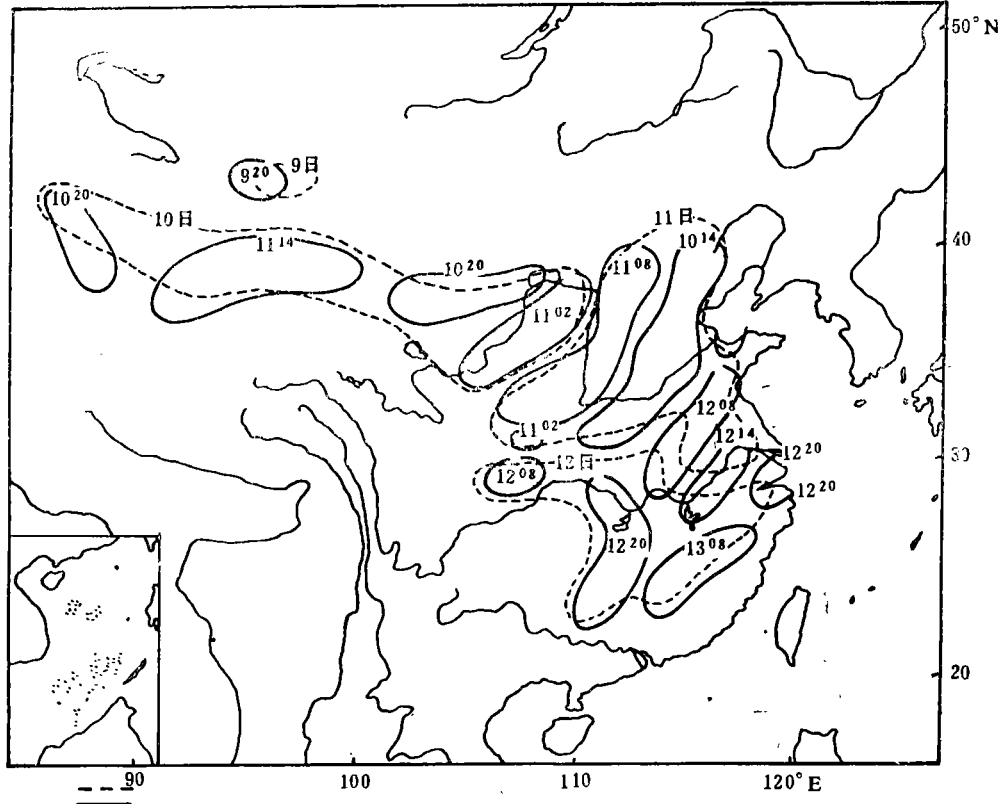


图5 1988年4月9日—13日低能见度区(实线)和低直接太阳辐射区(虚线)

1988年春,该地区长期干旱少雨,气候异常干燥,土壤墒情极差,如内蒙古和黄土高原较常年同期的降水量少八成。另外,该地区下垫面植被不断遭破坏,地表裸露严重。在这样的气候背景和环境状况下,只要一刮大风,黄土、黄沙就能随风吹起,有利沙暴的形成。这也是造成本次黄沙天气过程的重要原因之一。

四、沙尘的物理化学特征

黄沙天气期间我们在4月11日和12日分别在北京(国家气象局院内约15米高处)和浙江省临安WMO本底监测站(132米高)采集了沙尘样品。北京用KB-120型大气采样器,流量为122-124 L/min,采样时段1 h,用红光49号玻璃纤维膜。膜经硝酸浸泡,水冲洗,然后高温烘烤等处理。临安用大流量飘尘采样器(HV-100)24小时连续采样。

沙尘的总悬浮物TSP(Total Suspending Particles)用天平称重,沙尘中的元素含量用等离子体发射光谱仪测定(ICP),化学组分用离子色谱仪分析。结果如下。

1. 沙尘的TSP

在北京采集的沙尘,其TSP的平均值为 $5118 \mu\text{g}/\text{m}^3$,比其正常天气条件下要高15.7倍,比同过程的临安要高2.4倍。临安黄沙期间的TSP比其正常天气条件下要高14.7倍。北京与临安其正常天气条件下的TSP分别为 $306 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。可见由本次

黄沙天气过程所造成的沙尘输送量是相当可观的。

2. 沙尘中元素的测定

北京三个样品测得 21 个元素(见表 3)。按元素浓度平均值分,元素浓度 >500 ppm 的有 Al, Fe, K, Mg, S, P, Ti, Na; 浓度为 100—500 ppm 是 Mn, Ba, V; 浓度 1—100 ppm 是 Zn, Ni, Pb, Cr, Co, Cd; 余下的为未检出。三个样品未检出的元素不尽一致,可能是膜本底值分布不均之故。

表 3 沙尘元素的浓度*(ppm)

元 素	样品 (1)	样品 (2)	样品 (3)	平均值	元 素	样品 (1)	样品 (2)	样品 (3)	平均值	元 素	样品 (1)	样品 (2)	样品 (2)	平均值
Ba	24	456	219	233	Mg	27	13684	3811	5841	V	19	178	132	110
Ca	—	8964	—	—	Mn	81	780	603	488	Zn	—	64	12	38
Cd	—	11	2	7	Na	259	1350	720	776	B	—	1188	—	—
Co	3	27	17	16	Ni	5	44	36	28	Li	—	40	—	—
Cr	7	64	47	39	Pb	4	45	23	24	P	166	1952	1384	1167
Cu	—	—	—	—	Al	3789	91613	39474	44959	S	391	2825	1941	1719
Fe	4250	34092	28842	22395	Sr	—	254	—	—	Sn	—	175	—	—
K	2018	16492	13803	10771	Ti	147	1282	911	780					

*表中“—”表示该元素值在检测限以下

从沙尘元素浓度值可知,值高的元素如 Al, Fe, K, Mg, Ti, Mn 属八大主要亲石元素^[6]。Si 因仪器条件所限未能测得,而 Ca 在样品 2 中其值为 8960 ppm 也很高,与地壳背景值相近。因此我们可以初步认为沙尘中元素主要来自自然源,受人为污染的影响很小。

3. 沙尘元素的富集特征

元素的富集程度与元素的物理化学性质及其来源有着密切的联系。不同元素由于其来源和形成条件不同,其富集程度也有明显的差异,因此可以根据元素的富集程度来判别元素是来自于自然源或是人为排放源。

本文以 Fe 和 Ti 作为参比元素,取自 Mason 值。富集因子计算式为:

$$EF_{(Fe)} = \frac{(x/Fe)_{\text{沙尘}}^{[6]}}{(x/Fe)_{\text{地壳}}}$$

式中 $EF_{(Fe)}$ 是以 Fe 为参比元素的富集因子,脚标“沙尘”与“地壳”表明元素 x 与 Fe 分别取自沙尘样品测定值与地壳中平均丰度。各元素的富集因子计算结果列于表 4 和表 5。元素 Cd, Pb, B 和 Sn 在三个样品中测定值有量级之差,这可能是膜本底值分布不均或某种误差所致,缺乏代表性,文中不作讨论。

根据表 4 和表 5,元素富集因子值(平均值)有如下几个特点:a) 同一元素的 $EF_{(Ti)}$ 高于 $EF_{(Fe)}$; b) EF 值大于 10 的仅一个元素 S, 它的 $EF_{(Ti)}$ 和 $EF_{(Fe)}$ 分别为 39.45 和 15.52; c) 其余元素的 EF 值都小于 10 而且绝大多数接近 1, 尤其以 Fe 为参比元素的 EF 值接近 1 的元素更多,如 Al, Fe, K, Mg, Mn, Zn, Ni 等; d) Ti 和 Na 的 EF 值远小

表4 沙尘元素富集因子(EF)*

元 素	样品 (1)	样品 (2)	样品 (3)	平均值	元 素	样品 (1)	样品 (2)	样品 (3)	平均值	元 素	样品 (1)	样品 (2)	样品 (3)	平均值
Ba	0.66	1.57	0.89	1.04	Mg	0.02	0.96	0.32	0.43	V	1.66	1.93	1.70	1.76
Ca	—	0.36	—	—	Mn	1.00	1.20	1.10	1.10	Zn	—	1.34	0.30	0.82
Cd	—	80.66	17.34	49.00	Na	0.11	0.07	0.04	0.07	B	—	174.23	—	—
Co	1.41	1.58	1.18	1.39	Ni	0.78	0.86	0.83	0.82	Li	—	2.93	—	—
Cr	0.82	0.94	0.81	1.86	Pb	3.62	5.08	3.07	3.92	P	1.86	2.73	2.29	2.29
Cu	—	—	—	—	Al	0.55	1.65	0.84	1.01	S	17.69	15.94	12.94	15.52
Fe	1.00	1.00	1.00	1.00	Sr	—	0.99	—	—	Sn	—	128.33	—	—
K	0.92	0.93	0.92	0.92	Ti	0.39	0.43	0.36	0.39					

* 表中“—”为元素值在检测限以下，参比元素为 Fe。

表5 沙尘元素富集因子(EF)*

元 素	样品 (1)	样品 (2)	样品 (3)	平均值	元 素	样品 (1)	样品 (2)	样品 (3)	平均值	元 素	样品 (1)	样品 (2)	样品 (3)	平均值
Ba	1.69	3.68	2.49	2.62	Mg	0.04	2.25	0.88	1.06	V	4.21	4.53	4.72	4.49
Ca	—	0.85	—	—	Mn	2.55	2.82	3.07	2.81	Zn	—	3.14	0.83	1.99
Cd	—	188.77	34.32	74.36	Na	0.27	0.16	0.12	0.18	B	—	407.74	—	—
Co	3.60	3.71	3.28	3.53	Ni	2.00	2.01	2.32	2.11	Li	—	608.60	—	—
Cr	2.10	2.20	2.27	2.19	Pb	9.21	11.88	8.50	9.86	P	4.73	6.38	6.37	5.83
Cu	—	—	—	—	Al	1.39	3.86	2.35	2.53	S	45.00	37.29	36.06	39.45
Fe	2.54	2.34	2.79	2.56	Sr	—	2.32	—	—	Sn	—	300.31	—	—
K	2.33	2.19	2.57	2.36	Ti	1.00	1.00	1.00	1.00					

* 表中“—”为该元素值在检测限以下，参比元素为 Ti。

于 1。

由于沙尘样品没有分粒度，很难判别 $EF > 10$ 的元素是受人为污染影响或 $EF < 10$ 的是来自于自然源，但与北京市非尘暴天气时颗粒物中 S 的 EF 值超过 100^[6]，采暖期则更高相比，本次沙尘中 S 的 $EF_{(Fe)}$ 值仅 15.52 不算高，受污染影响极小，更何况其它诸元素的 EF 值都接近地壳的平均丰度。由此也可得出沙尘中的各元素主要来自于自然源。

4. 沙尘的化学组分

北京和临安沙尘中的化学组分测定结果见表 6。

表6 沙尘中化学组分浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

样 品	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁼	NH ₄ ⁺
北京 (黄沙)	0.72	5.61	2.38	15.01	2.27
临安 (黄沙)	0.28	4.35	4.83	28.03	0.94
临安 (正常天 气)	0.24	2.27	2.70	27.76	0.64

表中 F^- , Cl^- , NH_4^+ 是北京高于临安, NO_3^- , SO_4^{2-} 临安高于北京。临安与其正常天气时相比, 除 Cl^- , NO_3^- 在黄沙天气期间稍偏高外, 其他组分彼此相差不大。临安的 NO_3^- , SO_4^{2-} 高可能与其受当地大量中小工业排放的影响有关。

五、小 结

通过上述研究分析, 我们可以初步得出以下几点结论: (1) 导致本次强黄沙天气过程的直接原因是两次欧洲大槽相继东移, 致使强冷空气频繁活动, 并侵入我国; (2) 大气对沙尘的输送途径主要是由西、西北向东、东南方向输送扩散, 12日起 850 hPa 上南京、武汉、南昌、长沙和桂林等地一带有一支强劲的东北气流, 导致部分沙尘折向西南方向输送; (3) 沙尘的源地除起风的新疆北部的沙漠区外, 沿途的内蒙古各沙漠区, 戈壁滩和黄土高原是本次沙尘的主要源地, 对沙尘的贡献最大; (4) 由于本次沙尘暴天气过程非常强烈、风速大, 大气对污染物扩散输送能力很强, 沙尘中元素受人为影响很小, 主要来自于自然源。

致谢: 本工作得到国家气象中心数值室王超同志和中央气象台董立清同志的帮助, 在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] Darzi, M. D., and W. Winchester, Aerosol characteristics at Mauna Loa observatory, Hawaii, after east Asian dust storm episodes, *J. Geophys. Res.*, **87**, 1251-1258, 1982.
- [2] Muragama, N., Dust cloud "kosa" from the east Asian dust storm in 1982-1988 as observed by the GMS satellite, Japan Met. Satellite Centre Technical Report, NO. 17, 1988.
- [3] Swasaka, y., M. Yamato, R. Jmasu and A. Ono, Transport of Asian dust (KOSA) particles, importance of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles, *Tellus*, **40 B**, 494-503, 1988.
- [4] 曲绍原、李玉英、周明煜、杨绍晋、钱琴芳, 北京地区一次尘暴过程的来源, *环境科学学报*, **4**, NO. 1, 1984.
- [5] Haris, J. M., The GMCC atmospheric trajectory program, NOAA technical memorandum, ERL-116, 1982.
- [6] 汪安璞等, 北京地区大气飘尘的化学特征, *环境科学学报*, **1**, 3, 1981.

AN ANALYSIS OF ASANDSTORM WEATHER

Yang Dongzhen Ji Xiangming Xu Xiaobin
Fu Jimeng Wen Yupu

(Academy of Meteorological Science, State Meteorological Administration)

Abstract

The favourable synoptic situation and climate background for a sandstorm process, which occurred in the period from the 9th to the 16th of April 1988, has been studied through analyzing weather maps, meteorological elements, satellite cloud pictures and sandstorm trajectories. The sand dust origin area, the directions and the paths of sand dust transportation and the extent the sand dust reached were also investigated. The results of measurements and analysis indicate that the concentration of sand dust particles is 10 times greater than the normal. It is also shown that the elements in the sand dust are lithophile and come from natural source through the chemical composition analysis of the sand dust, so that the sand dust has not been seriously polluted by human activities.