

1990年春季两次沙尘暴特征分析^{*}

杨东贞 王超^{**}

温玉璞 于晓岚 徐晓斌

(中国气象科学研究院,北京 100081)

(国家卫星气象中心,北京 100081)^{**}

提 要

文章讨论了1990年4月发生的两次沙尘暴天气过程的特征及其产生的原因.通过分析沙尘暴的轨迹和在榆林、延安、太原、呼和浩特和北京等地采集的沙尘气溶胶样品的一些物理化学特征,追溯了沙尘的源地.得出沙尘气溶胶的TSP浓度在沙尘暴期间比无沙尘暴时要高数倍至一个量级左右.沙尘气溶胶中以地壳元素为主,主要存在于大粒子($d > 2.1\mu\text{m}$)中.一些人为排放污染元素主要分布在小粒子($d < 2.1\mu\text{m}$)中,在沙尘暴期间富集程度大大下降.沙尘气溶胶中的元素主要来自于自然源.

关键词:沙尘暴;气溶胶;轨迹;富集因子.

1 引 言

我国西北沙漠区和黄土高原一带是东亚沙尘暴发生地之一.沙尘暴的发生不仅给国计民生带来很大的损失和灾害,而且沙尘暴对太阳辐射、能见度及云物理过程等均有影响,注入高层大气的沙尘还参与大气环流过程.因此沙尘暴也是人们极为关注的大气环境和大气化学问题之一.本文通过对1990年春季两次沙尘暴的形成及沙尘气溶胶微粒的物理化学特征分析,为上述问题进一步探讨提供一些依据.

图1为1990年4月5~7日(第一次沙尘暴)和24~27日(第二次沙尘暴)两次沙尘暴分布.由图可知第一次沙尘暴覆盖面广,影响范围大.北起河西走廊、蒙古高原,南至长江流域部分地区;第二次沙尘暴(图中小圆圈)仅限于黄河下游山东济南一带,但其强度比第一次大.如北京第一次沙尘暴时最低能见度为1.2km,而第二次沙尘暴时只有0.2km.沙尘量也比第一次大1.3倍.

1993-02-26收到,1993-07-21收到修改稿.

* 本文得到《沙尘暴测量研究》项目资助.

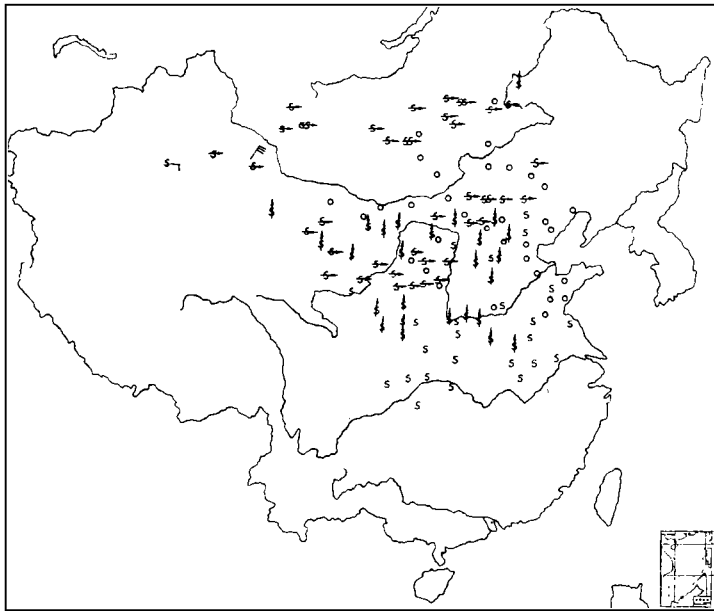


图1 1990年4月5~7日和4月25~27日(图中·)的沙尘暴分布
(S:浮尘 S:扬沙 S:沙尘暴)

2 形成沙尘暴的天气系统及其诱发的气象效应

2.1 形成两次沙尘暴的天气系统

造成两次沙尘暴的原因除了气候背景、下垫面条件具备外,其直接原因为:第一次沙尘暴主要是受欧洲大槽东移,诱发冷空气南下形成的。

4月5日20时锋面移至新疆东部,蒙古西部一带;6日08时锋面到河套西缘,河西走廊和蒙古高原西部一带,同时出现20m/s的大风和沙尘暴;当天晚上(20时)锋面抵达华北东部。约20时30分北京出现浮尘,并进一步发展为沙尘暴;7日14时锋面到达长江流域一带,武汉、合肥和南京等地出现浮尘天气。此时蒙古高原再度出现大风,沙尘暴又一次影响到北京等地。8日02时锋面入海,沙尘暴天气过程结束。

第二次沙尘暴是在蒙古气旋发展致使冷空气以偏北路径南下的天气形势下形成的。4月24~25日偏北路径冷空气影响了华北北部和中部。24日14时当锋面移至中蒙边境时,锋前对流层低层出现了强的辐合上升运动。此后,随着锋面南移,锋后出现大风、沙暴。至25日下午又有一股冷空气快速南下,在锋后的西北气流中,内蒙中部、河北北部、北京地区出现大风并伴有沙暴、吹沙、浮尘等天气现象。北京能见度降至0.2km。观测到的沙尘暴天气比第一次严重和恶劣。25日20时京、津、唐同时出现吹沙、浮尘。26日02时以后,京、津、唐逐渐转为地面高压后部,并开始出现偏南风。河北、山东一些地区再次出现沙暴、浮尘天气。

2.2 垂直速度

根据廖洞贤等人提出的垂直速度计算方法^[1],计算了这两次沙尘暴过程沙尘源区及沿途各地4月4~7日和24~27日的垂直速度.第一次沙尘暴自4月4日开始从沙尘源地至沿途各地从地面到6000m各个高度的垂直速度均为负值,即有上升运动.其值为-1~-3cm/s.最大负值中心位于巴丹吉林沙漠区(图略).5日垂直速度进一步增大,最大值达-11cm/s左右,而且垂直速度最大负值中心由原来的巴丹吉林沙漠移到黄土高原、内蒙浑善达克沙地至北京一带,见图2中站位编号4、5和7.(图2的站位编号1为巴丹吉林沙漠,2和3为内蒙库布齐沙漠,4为接近太原的黄土高原部分,5、6、7为蒙古高原和内蒙的浑善达克沙地,8为河北西南部、石家庄一带,9为山东德州一带).直到7日仍有垂直上升运动.沙尘微粒连续数日受到源地和沿途地区各个高度垂直向上运动的作用,使得沙尘直泻下游地区,致使该次沙尘暴最南可抵达长江流域的合肥、南京等地.

第二次沙尘暴过程的垂直速度从源地至沿途均比第一次大.如25日07时垂直速度最大值达-19.55cm/s(图略).这意味着大气层第二次比第一次有更强烈的上升运动,因此在北京观测到的沙尘暴第二次比第一次严重.但由于产生第二次沙尘暴的冷空气为偏东偏北路径,穿越大陆的范围小,锋面很快入海,所以沙尘暴的覆盖面比第一次小.

2.3 沙尘暴的轨迹

本文采用Harris方法^[2],计算了两次沙尘暴的轨迹.图3为第一次沙尘暴抵达北京和合肥的轨迹.图中数字1~3、4~6和7~9分别为4月6日20时,6日23时和7日14时抵达北京的500hPa,700hPa,和850hPa三个等压面上的轨迹.由图3看出同一时刻不同高度的轨迹及不同时刻同一高度的轨迹不尽一致,尤其是7日14时的各等压面上的轨迹比6日20时和23时的更为偏北.这意味各等压面上到达北京的沙尘,其源地是不完全相同的,即除6日23时850hPa上的轨迹源地在蒙古高原外,其余的6日20时的500,700和850hPa,6日23时500和700hPa及7日14时500,700和850hPa上的轨迹均以西北偏西的路径穿行内蒙西、中部的巴丹吉林、腾格里、毛乌素、库布齐及乌兰布和等沙漠.6日20时三层等压面上的轨迹为锋面刚过北京的情景;6日23时的三层等压面上的

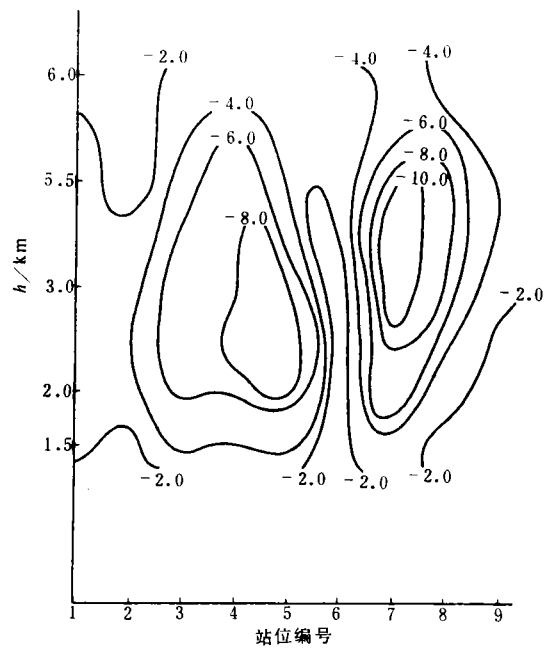


图2 1990年4月5日7时(北京时)垂直速度(cm/s)廓线

轨迹为沙尘暴开始减弱.上述轨迹与所表现的天气实况一致.7日14时三层等压面上的轨迹7~9比6日20时和23时各等压面上的轨迹1~6更偏北,它以西北偏北方向穿过蒙古高原直插北京.导致北京、张家口等地再次出现大风和沙尘暴.10、11和12为7日14时抵达合肥的500、700和850hPa三个等压面上的轨迹.850hPa等压面上的轨迹12穿行内蒙中部和东南部的沙漠区;700hPa等压面上的轨迹11源自腾格里沙漠,以西北至东南向穿行黄土高原腹地;500hPa等压面上的轨迹10起始于北疆,鉴于当时北疆沙尘暴较弱,加之地面刮偏东风,故沙尘难以翻越天山长途跋涉抵达合肥,在合肥观测到的浮尘主要来自黄土高原和内蒙古沙漠区.

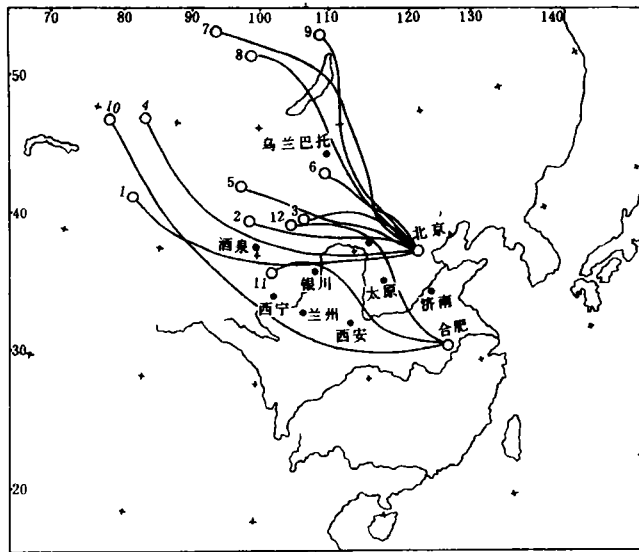


图3 第一次沙尘暴抵达北京和合肥的轨迹

我们还计算了4月25日14时和26日20时第二次沙尘暴到达北京的500、700和850hPa三个等压面上的轨迹(图略).这6条轨迹均穿行蒙古高原和内蒙古部分沙漠区.其中26日20时850hPa等压面上的轨迹处在河套东缘,其路径由西北转为西南抵达北京.轨迹上游穿行毛乌素沙漠,折向西南时,经过黄土高原北缘部分地区.轨迹的这个走向与当时北京处于地面高压后,近地层盛行偏西南风的形势一致.北京、山东等地又再次出现沙尘暴、浮尘天气现象.

由以上分析可知,第一次沙尘暴的源地是内蒙西、中部的沙漠为主,此外还有蒙古高原和黄土高原.路径为西北偏西方向.第二次沙尘暴源地是蒙古高原、内蒙古部分沙漠区和河北北部、西部的裸露沙地.路径为西北偏北方向.

2.4 沙尘暴诱发的气象效应

沙尘暴诱发的气象效应中以对能见度和直接太阳辐射的影响为最大.图4为第一次沙尘暴过程的能见度(V)和直接太阳辐射(S)低值区的位移(第二次沙尘暴图略).本文所指的能见度和直接太阳辐射低值是一个相对值,即指某一测站不同时刻的能见度或直接太阳辐射的最低值.等值线所包络的区域为低值区,等值线上的数字为低值出现的时间,

能见度(实线)标出日期和小时,直接太阳辐射(虚线)只标出日期。

由图4可知第一次沙尘暴能见度和直接太阳辐射低值区的移动方向是从西北向东南移。沙尘源地率先出现低值区,如西北的酒泉和敦煌在5日出现低值;6日低值区移向张掖、银川、陕坝和黄土高原等地;6日20时低值区向华北地区挺进;7日江淮流域形成低值区。低值区形成的时间和移动方向与锋面、沙尘暴的移动完全一致。

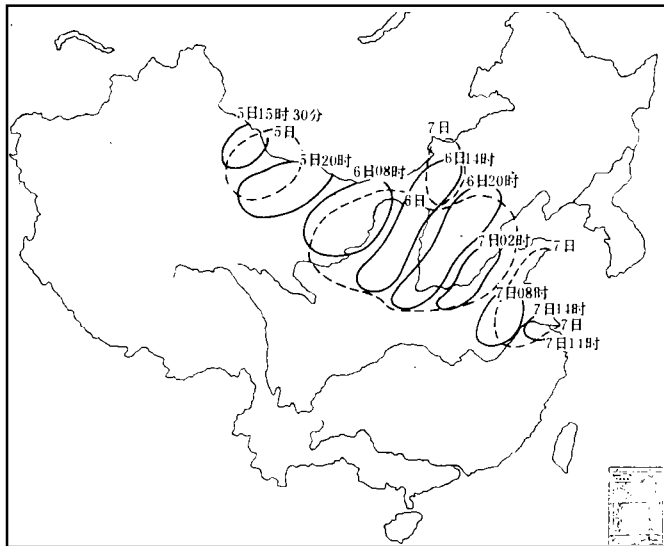


图4 第一次沙尘暴过程低能见度区和低直接太阳辐射区的位移

我们还统计了额齐纳旗、民勤、银川、榆林、太原、锡林浩特、二连浩特、朱日和、呼和浩特、北京、徐州和南京等站沙尘暴出现的时间(表略)。统计结果表明:第一次沙尘暴过程最早出现沙尘暴的地区是内蒙的额齐纳旗(4月5日19时35分),然后依次是民勤、银川、榆林、太原、北京等地相继出现沙尘暴,最晚是南京于7日14时出现沙尘暴。最早和最晚出现沙尘暴的时间相差约2天。这个时间差与沙尘暴东移的时间差相一致。

第二次沙尘暴过程是内蒙古的锡林浩特于4月24日7时36分最先出现沙尘暴,随后是二连浩特、朱日和、呼和浩特、北京依次相继出现,而徐州于26日8时最晚出现沙尘暴。与第一次沙尘暴一样,沙尘暴最先出现与最后出现的时间差也是两天,这与该次沙尘暴自北向南移动的时间差相一致。

3 沙尘样品的分析

沙尘样品的采集分为沙尘暴发生前、期间和结束三个阶段。第一次沙尘暴在延安、榆林、呼和浩特、太原和北京等地采集了沙尘样品。第二次沙尘暴只在北京采集。

各采样点均用KB-120大气采样器进行采样,其流量为100 l/min左右。北京外加一台日本产的安德森(Andersen)分级采样器,流量为28.3 l/min。采样时间视膜上气溶胶量而定。使用的膜是国产1号膜(新华滤膜)和红光49号玻璃纤维膜。采样膜经各种条件处理后使用。

沙尘样品除测定其悬浮微粒总量 TSP(Total Suspended Particle)浓度外,由安德森采集的样品用中子活化(NAA)和质子激发 X-射线能谱(PIXE)方法,由 KB-120 采集的样品用 X-射线荧光光谱和电感耦合等离子体发射光谱(ICP)法分析元素浓度.用离子色谱仪(IC)分析样品中能溶于水的离子浓度.其结果讨论如下:

3.1 总悬浮物 TSP 浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

由表 1a 可知,各站的 TSP 值均以沙尘暴期间为最高,比沙尘暴前可高数倍至一个量级左右.第二次沙尘暴较第一次沙尘暴严重,其 TSP 浓度为第一次的 2.3 倍.

表 1a 沙尘暴样品的 TSP 浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	北京	呼和浩特	榆林	延安	太原
发生前	808.0	2181.8	402.2	1383.3	379.7
期间	(1)4976.6 (2)11426.1	5616.2	5139.1	5944.4	1901.7
结束	475.4	800.0	471.8	1383.3	850.0

KB-120 大气采样器

表 1b 北京沙尘暴样品 TSP 浓度(体积百分比)的分布

粒径 (μm)	7.0	4.7	3.3	2.1	1.1	0.65
	>11.0					
发生前	12	15	20	10	3	15
期间	40	13	13	11	11	6
结束	32	10	15	7	17	9

Andersen 8 级采样器

由表 1b 看出,沙尘暴期间 TSP 浓度在大粒径段($d > 2.1 \mu\text{m}$)明显增加,由 60% 增加到 88%. 它们主要来源于自然土壤、沙尘等.沙尘暴发生前的 TSP 浓度以小粒径($d < 2.1 \mu\text{m}$)组的浓度为最高,约占 40% 以上.这些气溶胶微粒主要来自人为排放物.

3.2 沙尘样品中元素浓度和富集因子

我们计算了北京、呼和浩特、榆林、延安和太原 5 个站在沙尘暴发生前、期间和结束三个阶段的沙尘气溶胶中各元素的浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)和富集因子 EF (Enrichment Factor).富集因子 EF 的计算公式如下:

$$EF = (C_X/C_{Fe})_S / (C_X/C_{Fe})_G$$

式中 $(C_X/C_{Fe})_S$ 为沙尘样品中某元素 X 与 Fe 的浓度比, $(C_X/C_{Fe})_G$ 为地壳中某元素 X 与 Fe 的浓度比. Fe 为参比元素.地壳元素值取自 Mason^[3]值.

由计算结果可知:上述各站各元素浓度均以沙尘暴期间为最高,尤其是一些地壳元素如 Si、Al、Fe、Ca 等在沙尘暴期间其浓度大幅度增加,如北京的元素 Al 增加 40 倍.这些元素的富集程度不高,不管有无沙尘暴,它们的 EF 小于 5,绝大多数是在 1 左右,接近地壳的平均丰度.这表明它们主要来自土壤、沙尘等一些自然源.一些人为污染元素如 S、Pb 等的浓度在沙尘暴期间虽也有增加,但其量极少,如北京的元素 S 只增加 0.04 倍.这类元素的富集程度比沙尘暴前大大下降.北京地区的 S 在沙尘暴发生前 EF 为 441.4,而在两次沙尘暴期间 S 的 EF 值分别为 22.9 和 17.0.这表明在沙尘暴前,元素 S 主要来自人为排放^[4],沙尘暴期间其富集程度由于受沙尘暴的影响而大为降低.

3.3 沙尘元素浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)和富集因子的粒径分布

表 2a 为北京地区第二次沙尘暴过程的沙尘元素浓度(以百分值表示)的粒径分布.根据表中元素浓度分布特征可将元素分成三类:(1)元素浓度在沙尘暴发生前、期间和结束

三个阶段主要集中在大粒径组($d > 2.1 \mu\text{m}$)的有 Si、Al、Fe、Ca、Ti、Na、V、Ba、Sc、Ce、Sm、Co、Cr, 其值约为 70%~93%左右. 在沙尘暴期间浓度更高. 可达 80%~95%. 这类元素主要来自土壤沙尘等自然源. (2) 元素浓度主要分布在小粒径组($d < 2.1 \mu\text{m}$)的有 As、Br、Pb、S、Sb、和 Zn. 元素 As 与元素 S、Sb 和 Pb 不同, 在沙尘暴期间其大粒径组浓度明显增加, 这个现象表明地壳尘埃中含有丰富的 As, 而 S、Sb 和 Pb 主要来源于各种燃料燃烧的人为排放源.

表 2a 北京沙尘样品中元素浓度(%)的粒径分布

粒径	$> 2.1 \mu\text{m}$			$< 2.1 \mu\text{m}$			$> 2.1 \mu\text{m}$			$< 2.1 \mu\text{m}$			
	前	期间	后	前	期间	后	元素	前	期间	后	前	期间	后
Si	90.1	94.8	87.7	9.9	5.2	12.3	Pb	36.2	2.8	75.2	63.8	97.2	24.8
Al	82.9	90.9	87.5	17.1	9.1	12.5	Ba	85.4	93.7	86.4	14.6	4.3	13.6
Fe	80.4	91.5	87.0	19.6	8.5	13.0	Sc	84.6	91.9	87.5	15.4	8.1	12.5
Mg	66.3	83.4	79.5	33.7	16.6	20.5	As	43.2	86.4	75.3	56.8	13.6	24.7
Ca	78.4	86.0	70.6	21.6	14.0	29.3	Ce	78.6	92.0	87.5	21.4	8.0	12.5
Ti	78.8	88.6	87.6	21.2	11.4	12.4	Sm	83.5	91.8	87.2	16.5	8.2	12.8
K	62.4	91.8	91.6	37.6	8.2	8.4	Co	77.7	90.2	86.7	22.3	9.8	13.3
Na	74.0	92.8	83.0	26.0	7.2	17.0	Zn	10.1	19.2	(0)	89.9	80.8	(100)
Mn	62.3	91.0	68.2	37.7	9.0	31.8	Cr	75.1	89.3	82.1	24.9	10.7	17.9
Br	30.6	(74)	(0)	69.4	(25.4)	(100)	Se	25.6	/	(24.9)	74.3	/	(75.1)
V	77.2	90.1	85.7	22.8	9.9	14.3	Mo	49.1	(7.8)	(0)	50.9	(92.2)	(100)
S	23.7	21.4	32.7	76.3	78.6	67.3							

注: 分析方法: NAA 和 PIXE, 有括号的值仅作参考

表 2b 北京沙尘样品中元素富集因子的粒径分布

粒径 (μm)	> 11.0	11.0	7.0	4.7	3.3	2.1	1.1	< 0.65
		~ 7.0	~ 4.7	~ 3.3	~ 2.1	~ 1.1	~ 0.65	
Si 前	0.24	0.17	0.13	0.57	0.03	0.02	/	0.28
期间	0.55	0.35	0.01	0.23	0.01	0.31	0.46	/
后	0.11	0.16	0.29	0.47	0.21	0.18	0.46	0.14
Al 前	0.83	0.82	0.82	0.87	0.79	0.71	0.55	0.74
期间	0.84	0.86	0.81	0.84	0.74	0.79	0.93	0.98
后	0.88	0.89	0.74	0.89	0.90	0.89	0.86	0.90
Ca 前	3.11	3.37	3.31	4.25	2.83	3.31	3.07	4.41
期间	1.01	1.27	1.06	0.93	1.10	2.01	4.25	1.39
后	0.78	1.13	/	2.02	0.59	1.52	5.85	2.12
S 前	36.15	89.78	67.89	3.03	/	24.64	/	1410.93
期间	/	6.01	/	/	1.69	36.51	493.12	/
后	/	34.29	/	70.68	10.35	83.25	622.97	195.32
As 前	83.63	98.07	124.52	145.77	137.99	236.23	1091.03	970.76
期间	14.25	16.78	17.71	20.43	18.99	25.42	70.97	24.78
后	43.44	55.77	55.71	70.83	59.64	76.29	224.36	153.75

分析方法: NAA 和 PIXE

表 2b 为北京地区沙尘样品中元素浓度 EF 的粒径分布. 选用 Si、Al、Ca 为地壳元素的代表, S、As 为人为污染物的代表. 表中 Si、Al 的 EF 在不同粒径上均在 1 左右, 而 Ca 略大些, 最高值为 5.85, 该值出现在沙尘暴结束后, 沙尘暴时为 4.25. 这些元素的 EF 值

随粒径的变化不大,而且三个阶段样品的 EF 值无明显差异,这也表明了北京地区大气气溶胶中自然地壳元素是主要成分.元素 S、As(除了未检出的和粒径为 $1.1\sim 2.1\mu\text{m}$ 的 S 以外),它们的 EF 值是随着粒径变小而增大.在沙尘暴期间 EF 值为最小.这表明人为污染物主要富集在小粒径中,并且因受沙尘暴的影响,这些元素富集程度也大大下降.

3.4 沙尘样品的离子浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

表 3 为榆林、呼和浩特和北京沙尘样品的离子浓度.这三个测点的离子浓度除北京的 NO_3^- 外,均以沙尘暴期间的浓度为最高.各离子又以 Ca^{++} 离子浓度最高,其次是海盐离子 Cl^- 和 Na^+ .这表明沙尘暴对这些离子贡献很大,同时也反映出自然土壤沙尘中还含有丰富的海盐离子.北京的 NO_3^- 高值出现在沙尘暴前,这意味着北京受当地排放含 N 污染物的影响严重.另外,榆林、呼和浩特和北京三个测点的 Cl^- 、 SO_4^{--} 、 Na^+ 、 Ca^{++} 和 Mg^{++} 这 5 个离子的浓度又以呼和浩特为最高.各测点离子浓度分布特征与其相应的元素浓度分布特征相一致.

表 3 沙尘样品中离子浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

元素	榆 林		呼 和 浩 特			北 京			
	期 间	后	前	期 间	后	前	期 间	后	
							(1)	(2)	
F^-	1.3333	0.5778	0.0000	1.9697	0	0	3.2749	2.8997	0.4386
Cl^-	11.5873	1.1111	3.6364	19.1919	2.4242	7.0175	8.7719	7.7374	2.6316
NO_3^-	0	0.0000	0.0000	3.0303	0.0000	9.8246	4.0936	5.1087	5.2632
SO_4^{--}	13.2540	1.7778	14.5454	32.3232	9.6970	11.2281	16.9591	14.3293	8.7719
Na^+	5.7143	0.2222	1.2121	9.0909	0.0000	0.0000	5.2632	0.9748	0
Ca^{++}	31.8333	4.9111	18.3030	53.0303	2.5455	9.8246	38.5965	52.9548	9.6491
Mg^{++}	2.4603	0.4444	1.2121	5.0505	2.4242	1.0435	3.5088	3.2061	1.7544

表中“0”为未检出

4 结 论

(1)导致 1990 年 4 月 5~7 日和 24~27 日两次沙尘暴天气过程的直接原因:第一次是欧洲大槽东移;第二次是蒙古气旋发展引导冷空气侵入我国.(2)沙尘源地第一次以内蒙西、中部的沙漠区为主,其次是蒙古高原和黄土高原;第二次是蒙古高原、内蒙古部分沙漠区和河北北部、西部的裸露沙地.沙尘输送方向第一次与第二次分别以西北偏西和西北偏北为主的路径向下游输送和扩散.(3)沙尘样品 TSP 浓度以沙尘暴期间为最高,比无沙尘暴时要高数倍至一个量级.第二次沙尘暴较第一次沙尘暴严重;沙尘暴期间各元素浓度增加,尤其是一些地壳元素浓度增加的幅度最大,但其富集程度不高, EF 值小于 5.它们主要分布在大粒子中($d > 2.1\mu\text{m}$),主要来自于自然源;一些人为污染元素在沙尘暴期间较之无沙尘暴时富集程度大大降低,并且主要富集在小粒子中($d < 2.1\mu\text{m}$).各离子浓度分布特征与其相应的元素浓度分布特征相一致.

参考文献

- 1 廖洞贤等. 一个直接用观测资料计算大范围散度、温度和垂直速度方案. 气象学报, 1980, 38(4): 309~320.
- 2 Harris J M. The GMCC Atmospheric Trajectory Program. NOAA Technical Memorandum, ERL-116. 1982.
- 3 Mason B. Principles of Geochemistry. New York: John Wiley and Sons, 1960. 45.
- 4 毕木天. 关于富集因子及其应用问题. 环境科学, 1984, 5(5): 68.

AN ANALYSIS OF TWO SANDSTORMS IN SPRING 1990

Yang Dongzhen Wang Chao*

Wen Yupu Yu Xiaolan Xiu Xiaobin

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

(National Satellite Meteorology Center, Beijing 100081)*

Abstract

Two cases of sandstorm processes, which occurred in April 1990, were studied. The characteristics of this kind of weather and the reason causing the events are investigated. Through analyzing the samples collected in Yulin, Yan'an, Taiyuan, Hohhot and Beijing, and calculating the sandstorm trajectories, some chemical and physical features are revealed and the source areas are found. In the periods of sandstorm activity the total suspended particulates (TSP) concentrations are higher than normal by several times upto about one order of magnitude. The aerosols of sandstorm consist of mainly the natural lithosphere elements from the earth crust, which distribute in large particles ($d > 2.1\mu\text{m}$). The polluted elements from human activity exist in small particles ($d < 2.1\mu\text{m}$), and their enrichment factors are sharply reduced during the sandstorm.

Key words: Sandstorm; Aerosol; Trajectory; Enrichment factor.