

我国和东亚地区硫化物 跨边界输送态势研究

黄美元 王自发 何东阳
徐华英 周 玲 高会旺

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 本文利用污染物三维欧拉长距离输送实用模式, 较详细地模拟了我国和东亚地区硫化物跨地区、跨边界输送态势, 分析了东亚地区硫化物输送通量随高度、季节变化的分布特点, 讨论了不同地区边界上硫化物的跨边界输送通量及硫的收支平衡, 并给出了我国和周边国家和地区之间硫化物的相互输送量。结果表明, 我国向外输送的硫化物占周边国家和地区总硫沉降的比例并不大, 各地区硫沉降的主要来源是自身排放; 硫化物长距离输送中硫酸根的输送占重要地位, 各地区硫酸根沉降中的外来比例较大。我们初步总结出一个东亚地区硫化物输送的概念模式: 在低层, 夏季主要自西南向东北输送, 冬季长江以北自北向南输送, 长江以南由西南向北输送, 并在长江中下游地区形成一个较强的硫化物辐合带, 在高层, 无论冬夏均由西向东输送, 并随高空带变化, 中层为二者的过渡, 春秋季节的情形介于冬夏之间, 偏向冬季。

关键词 输送态势 硫化物 相互输送量 东亚

1 前言

我国和东亚经济蓬勃发展, 呈现欣欣向荣的景象, 但也带来了诸如大气污染、酸雨等环境问题。继北美和欧洲之后, 大约从 80 年代起东亚成为世界第三个重酸雨区, 并且有进一步发展的趋势。东亚地区的 SO_2 排放量也日益增加, 是世界上排放量最大的地区。从 1975 年到现在, 中、韩、朝等国 SO_2 排放量一直在增长。关于东亚地区酸性物质的输送问题, 最近几年来, 日、韩报刊和一些科学家发表了一些言论。因而, 东亚地区酸性物质的跨国输送也就成为东亚各国政府和公众十分关注的热点问题。另一方面, 为了制定科学的环境政策以控制我国酸雨的发展, 也迫切需要了解我国酸沉降量的分布和季节变化, 对照各地的临界负荷量, 确定酸沉降超标地区。另外, 还要弄清楚我国各大区、各省之间硫污染物的相互输送量。这样才能制定哪些地区需要削减排放量、削减多少的科学方案。

模式计算是研究区域酸性污染物沉降和输送的有效工具。它不仅有助于了解酸沉降的分布和跨边界输送态势, 而且可以预测未来的变化趋势并为经济可持续发展战略中控制污染源的排放提供科学依据。因而建立适用于我国的输送模式就有着重要的作用和意

义。在西欧和北美,已经有人开展了许多模式计算^[1~4],讨论了地区之间的输送。近年来,对东亚地区的硫污染物输送也有一些初步研究^[5,6],但从模式本身、源排放资料^[7]和一些参数的选用^[9,10]上看还很不成熟,且仅计算了一些典型天气条件下和短时间内的输送问题。因此,十分有必要建立有中国特点的硫污染物长距离输送模式,较详细地研究和计算我国和东亚地区硫污染物浓度和沉降量的时空分布、输送路径和输送通量,国内各省和东亚各国(地区)之间跨边界输送量等。本文使用的三维欧拉型污染物长距离输送实用模式^[8,11]介于同类简单模式和复杂模式之间,比较详细地考虑了源、输送、干、湿沉降、气、液相化学过程。用分裂解法对气相化学过程^[11]进行查表式处理,颇具特色。通过模式的灵敏度试验,模式具有较高的分辨率和灵敏度。根据与实测资料对比,模式有较好的可信度,能方便地计算长时间(月、季、年)的污染物沉降及远距离输送态势和许多地区之间相互输送量。模式的构造参见文献[8]。使用10年平均的气象资料作为模式的输入场,排放源中国大陆部分使用国家环保局公布的数据,其它部分取自Akimoto的资料^[7],对日本加上了火山排放源。应用该模式研究了长时间我国和东亚地区硫化物跨地区、跨边界输送态势。第二部分分析了东亚地区硫化物输送通量随高度、季节变化的分布特点,第三部分讨论了不同地区边界上硫化物的跨边界输送通量及硫的收支平衡,第四部分给出了我国和周边国家和地区之间硫化物的相互输送量。

2 冬、夏季输送通量分布特点

输送通量定义为风矢量与污染物浓度的乘积,即 $\bar{F} = \bar{u} C$ 。图1为不同高度 SO_2 输送通量分布图。冬季1月份,我国北方输送路径主要从西北向东输送到华北、河南、山东、然后向东南方输送进入黄海,另一路径从辽宁进入朝鲜半岛,然后影响到日本的九州。我国东南沿海地区顺西南风输送,在长江中下游地区形成一个输送的辐合带,势必造成沉降的堆积,这也说明了华中、华东外来源的影响1月份大于7月份。7月份输送形势明显不同,有一条明显的由西南向东北的输送通道,由云南、贵州、四川到甘肃,由河南、山东、河北经由渤海到辽宁和朝鲜。高空均受西风带影响,从西向东输送。高空冬、夏季均表现为自西向东输送,并且主输送通道随季节有明显偏移。计算还表明, SO_4^{2-} 高空输送大于低空输送, SO_2 则以低层输送为主。

3 硫化物跨边界输送通量及收支平衡

为了进一步了解东亚地区硫化物跨越边界输送的数值大小,我们计算了不同季节各地区四周边界上不同高度层硫化物的输送通量,并在此基础上讨论了各地区硫的收支平衡。

表1给出了东亚地区硫化物跨边界输送通量的冬夏季节变化,表中正值表示输入,负值表示输出。低层为0~2 km,中层为2~6 km,高层为6~10 km。由表1可见:

(1) 无论冬夏季,东西向通量均大于南北向通量,高层通量并不大。大部分地区净通量为输出,西边界流入,东边界流出。

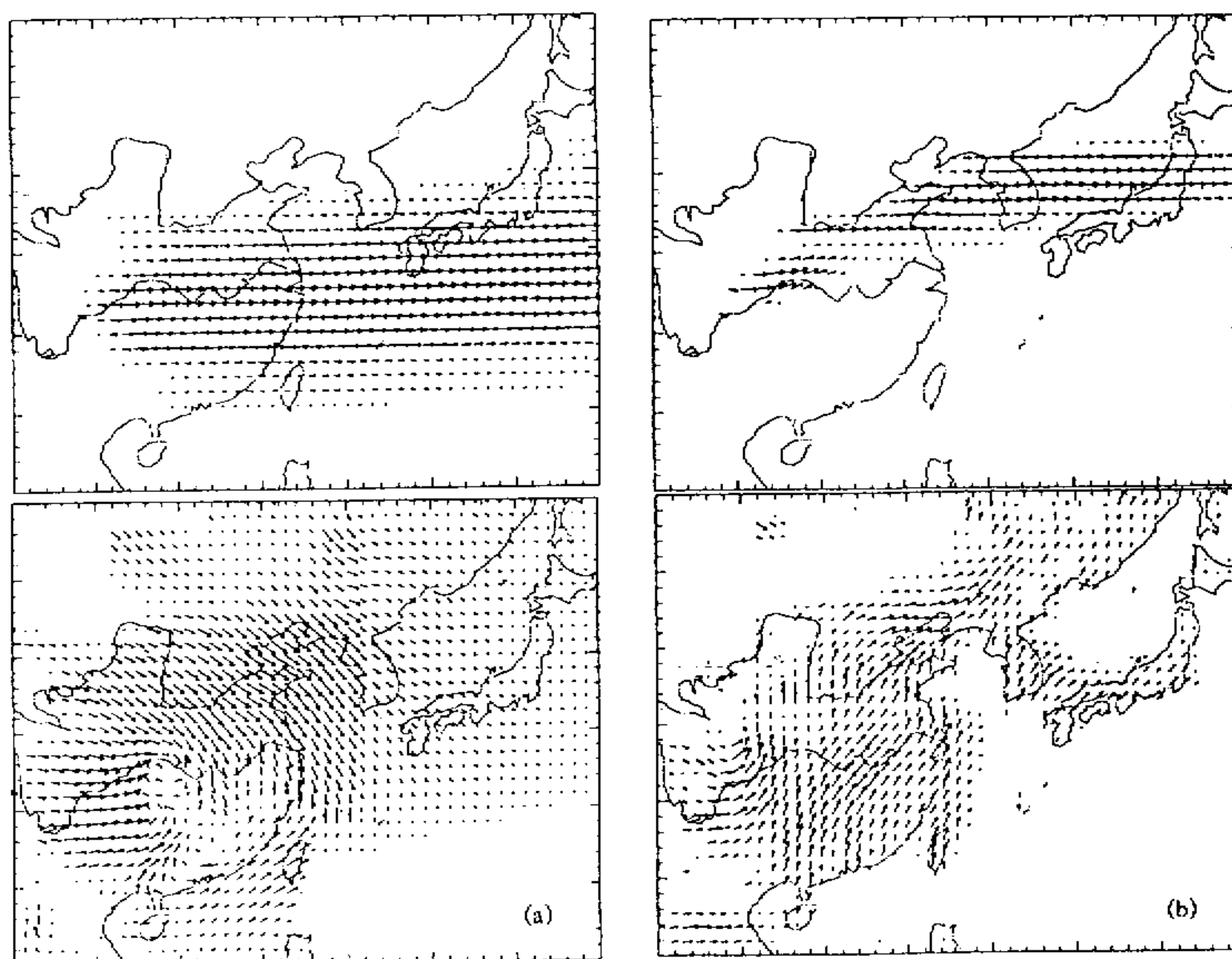


图1 SO_2 输送通量分布图，上图为高层（2~10 km），下图为低层（0~2 km）
(a) 冬季1月，(b) 夏季7月

(2) 东西方向通量集中在中、低层，以中层为最大。南北向通量则集中在低层。高层通量以东边界较大。

(3) 南北向通量的季节变化明显，冬季自北向南，夏季自南向北。

(4) 蒙古和香港的输送通量很小。台湾和香港冬季低层为东、北边界流入，西、南边界流出，夏季为西、南边界流入，东、北边界流出。

(5) 朝鲜、韩国为冬季西、北边界流入，东、南边界流出；夏季为西、南边界流入，东、北边界流出。韩国夏季中、高层净通量为正值。朝鲜夏季净通量为正值，中、低层都较大。

(6) 中国和日本输送通量较大，净通量均为负值，而且冬季远远大于夏季。西边界为输入，东边界为输出。南北方向的通量随季节变化较大。中国冬季中、低层输入都较大，但在夏季以低层输出为主；日本冬季以低层输出为主，夏季中层输出，低层输入，但量不大。

为得出我国及东亚各地区之间硫的收支的总体概念，我们计算了各地区硫化物的排放、输入、输出、沉降以及空中滞留量大小。表2表明了冬夏季东亚各地区硫污染物的收支情况，中国大陆的排放量最大，输出输入量及空中滞留量也最大，其次为日本和韩

表 1 东亚各地区边界上冬、夏季硫的输送通量

(单位: t/d)

		冬 季					夏 季				
		西边	东边	北边	南边	合计	西边	东边	北边	南边	合计
中国 大陆	总层	926.9	-6813.7	1534.8	-2590.5	-6942.5	314.2	-1617.8	-815.9	412.6	-1706.9
	高层	3.9	-699.4	-7.2	18.2	-684.6	14.9	-111.9	-11.1	8.8	-99.4
	中层	349.9	-3803.7	412.0	-360.7	-3402.5	188.5	-707.2	-119.8	88.7	-549.8
	低层	573.1	-2310.5	1130.0	-2248.0	-2855.4	110.8	-798.7	-685.0	315.1	-1057.7
台湾	总层	-116.8	-109.8	75.9	-97.9	-248.6	43.2	-63.7	-148.4	12.9	-156.0
	高层	20.7	-20.7	-1.3	0.5	-0.8	-0.6	0.3	-0.3	0.1	-0.5
	中层	125.7	-112.7	-18.5	6.0	0.5	2.7	-4.0	-18.9	2.1	-18.1
	低层	-263.2	23.6	95.8	-104.5	-248.3	41.0	-59.9	-129.2	10.8	-137.4
香港	总层	-24.9	-24.4	-6.1	-37.2	-92.7	5.5	-11.4	-43.0	0.1	-48.8
	高层	3.2	-3.3	-0.3	0.2	-0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	中层	32.3	-31.9	-7.3	3.0	-4.0	0.1	-0.2	-1.1	0.1	-1.0
	低层	-60.4	10.9	1.6	-40.4	-88.3	5.4	-11.2	-41.9	0.0	-47.8
日本	总层	2668.6	-3020.9	514.0	-1348.4	-1186.7	1834.0	-2269.8	-633.6	749.7	-320.0
	高层	252.2	-296.5	-2.3	50.5	3.9	133.6	-143.4	0.6	-2.7	-12.0
	中层	1764.5	-1816.6	196.5	-333.2	-188.8	877.6	-1568.6	-227.6	310.4	-608.2
	低层	651.9	-907.8	319.8	-1065.7	-1001.8	822.9	-557.8	-406.6	441.9	300.5
韩国	总层	847.5	-1029.0	484.3	-726.2	-423.3	258.9	-347.8	-288.4	197.1	-180.3
	高层	17.8	-20.0	0.4	0.1	-1.7	60.6	-58.9	-6.7	6.1	1.1
	中层	593.4	-537.7	170.8	-244.4	-17.9	192.9	-180.7	-68.7	68.8	12.4
	低层	236.3	-471.2	313.0	-481.9	-403.7	5.4	-108.2	-213.1	122.2	-193.8
朝鲜	总层	674.5	-497.0	246.5	-484.9	-61.0	176.7	-181.2	-49.8	227.5	173.1
	高层	1.0	-1.4	0.1	-0.3	-0.6	15.1	-23.0	-0.5	4.4	-4.0
	中层	215.6	-199.3	51.2	-136.9	-69.5	119.4	-117.2	-14.4	56.5	44.4
	低层	457.9	-296.3	195.1	-347.7	9.1	42.2	-41.0	-35.0	166.5	132.7
蒙古	总层	0.1	-29.8	5.5	-29.9	-54.2	0.1	-13.3	0.2	-2.1	-15.2
	高层	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	-1.0	-0.1	0.0	-1.1
	中层	0.0	-10.2	0.6	-12.6	-22.2	0.0	-9.0	0.2	-3.1	-11.9
	低层	0.0	-19.6	4.9	-17.2	-31.9	0.0	-3.3	0.1	1.0	-2.2

表 2 东亚各地区硫的收支平衡的季节变化

(单位: t/d)

地区	排放源	输入量		输出量		沉降量		空中滞留量	
		冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季
中国大陆	25373	2462	727	9404	2433	14702	22783	3732	884
台湾	735	76	56	325	212	372	571	155	8
香港	188	0	6	93	54	86	138	9	2
日本	2740	3182	2584	4370	2904	1746	2335	367	85
韩国	1408	1332	456	1775	636	814	1176	171	51
朝鲜	403	922	404	982	231	333	502	10	74
蒙古	121	6	0	60	15	54	103	12	3

国。除朝鲜外,各地区输出量均大于输入量,沉降量均小于排放量。冬季的输入输出量显著高于夏季,除朝鲜夏季输入量大于输出外,其余各地区均为输出大于输入,其结果是海洋接收了大量的硫沉降。由于夏季的降水量比较大,沉降量夏季高于冬季,空中滞

留量反之。东亚各地区中,以中国大陆、韩国、日本之间的输送量较大。日本的输入通量很大,但它的输出通量更大。由此可以看出,虽然一些地区输入量很大,但沉降到地面的并不很多,这从沉降量的外来源中可以看出,因而不能仅从输送通量外来量的比例断定别国的影响。

4 我国和东亚地区硫化物相互输送量

4.1 东亚各地区硫沉降的来源

表 3 为东亚各地区总硫沉降的来源表。各地的沉降量均大部分来自于本地源,外来源的比例不大。除朝鲜本地源仅占 55% 外,其余各地区均大于 90%,蒙古、中国大陆均大于 99%,台湾为 96.6%,日本为 92.7%。

表 3 东亚各地区总沉降来源表 (全年总量)

	中国大陆	台湾	香港	日本	韩国	朝鲜	蒙古
沉降量 / t	6541944	106240	40081	747060	349558	152414	25361
本地源 / %	99.47	96.62	90.74	92.67	90.89	55.21	99.71
外来源 / %	0.53	3.38	9.26	7.33	9.11	44.79	0.29

东亚各地区 SO_2 沉降中本地源的比例均大于总硫沉降中的比例 (表 4),除朝鲜占 60% 外,其余均大于 94%,可见 SO_2 沉降的外来源比例是很小的。 SO_4^{2-} 沉降中外来源的比例明显增大 (表 5)。本地源中除中国大陆和蒙古大于 98% 外,其余均小于 80%,朝鲜仅占 23%,这说明主要以 SO_4^{2-} 形式输送到远距离。虽然中国大陆和香港、台湾之间互有输送量,但最后的净输入量是台湾、香港各给了中国大陆 3000、6000 t 硫。

表 4 东亚各地区 SO_2 沉降来源表 (全年总量)

	中国大陆	台湾	香港	日本	韩国	朝鲜	蒙古
沉降量 / t	5557076	92065	36358	666752	315685	133209	23455
本地源 / %	99.96	99.25	94.12	96.10	94.02	59.81	99.72
外来源 / %	0.04	0.75	5.88	3.90	5.98	40.19	0.28

表 5 东亚各地区 SO_4^{2-} 沉降来源表 (全年总量)

	中国大陆	台湾	香港	日本	韩国	朝鲜	蒙古
沉降量 / t	984863	14173	3722	80308	33872	19204	1906
本地源 / %	98.40	79.59	57.76	73.44	61.72	23.31	99.54
外来源 / %	1.60	20.41	42.24	26.56	38.28	76.69	0.46

表 6 为东亚各地区硫总沉降中外来源的比例的季节变化。总沉降来源中以朝鲜的外来源占的比例最大,为 32%~54% 中国大陆和蒙古外来源的比例均不大 (小于 1%)。各个季节之中以秋冬占的比例最大,夏季比例最小。香港秋季外来源最大,达 29%,其次为冬季 (14.93%),春季最小 (2.24%)。日本冬季外来源为 17.7%,夏季仅为 1%。韩国外来源比例也不大,以冬季为最大,达 20%,夏季为最小,仅为 2.7%。

表 7 为 SO_4^{2-} 沉降的情况。可以看出,各地区 SO_4^{2-} 沉降的外来源的比例夏季最

表 6 东亚各地区总沉降外来源比例(%)的季节变化

地区	春季	夏季	秋季	冬季
中国大陆	0.35	0.38	0.98	0.53
台湾	0.57	0.20	6.43	6.75
香港	2.24	3.07	28.94	14.39
日本	3.93	1.10	4.93	17.71
韩国	6.46	2.74	10.11	20.31
朝鲜	44.25	31.79	53.79	53.66
蒙古	0.27	0.35	0.22	0.39

表 7 东亚各地区沉降外来源比例(%)的季节变化

地区	春季	夏季	秋季	冬季
中国大陆	0.72	1.14	2.68	2.38
台湾	3.89	0.66	60.51	37.4
香港	10.69	7.43	53.28	44.16
日本	23.03	2.65	31.94	64.79
韩国	38.63	22.13	42.65	61.50
朝鲜	77.76	64.47	86.87	85.75
蒙古	0.44	0.50	0.26	0.44

小, 春季次之, 秋、冬季最大。台湾、香港地区的季节变化很剧烈, 如台湾从夏季的 0.66% 变到秋季的 60.5%。蒙古和中国大陆的外来源的比例很小。朝鲜的外来源的比例最大, 占 64.5%~86.9%。其次为韩国和日本, 秋、冬季均大于 30%, 冬季高达 60%。各地区 SO_4^{2-} 沉降的外来源中, 我国占有一定比例。朝鲜的夏季、日本的各季节的外来源中, 韩国也占了不小比例。

4.2 东亚各地区硫排放量的去向

表 8 为欧拉实用模式计算的东亚各地区年平均硫排放源去向一览表。由表 8 可见, 各地区排放源, 很大一部分在本地沉降了, 一部分降到海洋, 向相邻的国家或地区有一定比例的输送。我国对周边国家有输送, 但比例不超过自身排放量的 2%。香港向大陆输送的部分占其排放源的比例很大。蒙古对周边国家的输送占其排放的 13%, 朝鲜、韩国对周边均有输送。而日本、朝鲜、韩国、台湾排放的硫输送到海洋和计算边界外的比例很大。

表 8 东亚各地区硫排放源去向一览表 (全年总量)

地区	中国大陆	台湾	香港	日本	韩国	朝鲜	蒙古
排放量 / t	9134125	300599	67600	986299	506700	145000	43700
本地 / %	71.24	34.15	53.80	70.19	62.70	58.03	57.87
他国地区 / %	1.64	2.81	26.45	1.03	5.04	6.86	12.98
海洋 / %	7.70	19.14	10.06	19.56	17.95	21.08	2.77
其它 / %	19.42	43.90	9.69	8.42	14.31	14.83	26.38

5 小结

本文较为完整地计算了东亚各地区硫污染物的输送通量的时空分布、硫的收支平衡、东亚各国(地区)之间硫污染物的相互输送量, 给出了定量数据, 分析了特点, 提出了看法。具体结果可归纳如下:

(1) 计算和分析了东亚地区硫的输送通量分布和季节变化。在低层, 夏季主要自西南向东北输送, 冬季长江以北自北向南输送, 长江以南由西南向北输送, 并在长江中下游地区形成一个较强的硫化物辐合带, 在高层, 无论冬夏均由西向东输送, 并随高空带变化, 中层为二者的过渡, 春秋季节的情形界于冬夏之间, 偏向冬季。

(2) 计算和分析了东亚各国(地区)跨边界输送通量及其季节变化。东亚地区除朝鲜为净输入区外, 其余各国(地区)均为净输出区。中国大陆各层均为输出大于输入, 以 2~6 km 层输出最大, 0~2 km 层次之。日本和韩国以 0~2 km 层输出为主。

(3) 计算和分析了东亚各国(地区)硫化物的收支平衡及季节变化。各国(地区)(朝鲜夏季除外)硫的沉降量均小于排放量, 即都有硫的输出, 冬季的输入输出量显著高于夏季。所以空中硫化物浓度冬季高, 但硫沉降量夏季高于冬季。

(4) 计算和分析了东亚各国(地区)之间相互输送量及季节变化。结果表明东亚各国(地区)硫的总沉降量均大部分来自本地区源。除朝鲜(占 55%)外, 本地区来源所占的比例均在 90%以上。对 SO_4^{2-} 沉降来说, 各国(地区)的外来源比例明显增加。冬、秋季跨边界输送量大于夏、春季。

(5) 计算和分析了东亚各国(地区)硫排放的去处。各国(地区)排放的硫降落到本地区的比例在 34%~71%之间, 中国大陆最大, 台湾最小。朝鲜、日本、台湾和韩国排放的硫沉降到海洋上的比例较大, 在 18%~21%之间。

参 考 文 献

- 1 Zlatev, Z., Christensen, J. and Hov, O., 1992, An Eulerian air pollution model for Europe with nonlinear chemistry, *Journal of Atmospheric Chemistry*, **15**, 1~37.
- 2 Langner, J. and Rodhe, H., 1991, A global three-dimensional model of the tropospheric sulfur cycle, *Journal of Atmospheric Chemistry*, **13**, 225~263.
- 3 Chang, J.S., Brost, R.A., Isaksen, I.S., Madronich, S., Middleton, P., Stockwell, W.R., and Walcek, C.J., 1987, A three-dimensional Eulerian acid deposition model: physical concepts and formulation, *Journal of Geophysical Research*, **92**, No.D12, 14681~14700.
- 4 Eliassen, A. and Saltbones, J., 1983, Modeling of long-range transport of sulfur over Europe: a two-year model run and model experiment, *Atmos. Environ.*, **17**, 1457~1473.
- 5 Murao, N., Katatani, N., Sasaki, Y., Okamoto, S., Koobayashhi, K., 1993, A modeling study on acid rain in East Asia, *International Conference on Regional Environment and Climate Changes in East Asia*, 305~309.
- 6 Kotamarthi, V.R. and Carmichael G.R., 1990, The long-range transport of pollutants in the Pacific rim region, *Atmos. Environ.*, **24A**, 1521~1524.
- 7 Akimoto Hajime, 1994, Distribution of SO_4^{2-} , NO_x and CO_2 Emissions from fuel combustion and industrial activities in Asai with resolution, *Atmos. Environ.*, **28**, 213~225.
- 8 Huang Meiyuan, Wang Zifa, He Dongyang, Xu Huaying, Zhou Ling, 1996, Modeling studies on sulfur deposition and transport in East Asia, *Water, Air and Soil Pollution*, **85**, No.4, 1921~1926.

- 9 彭红、秦渝, 1992, 气溶胶湿清除过程的参数化, 大气科学, 16(5), 622~631.
- 10 徐玲、秦渝, 1992, 云下气体清除过程的参数化, 环境化学, 11(1), 1~10.
- 11 黄美元、王自发、何东阳、徐华英、周玲, 1996, 我国冬夏季硫污染物沉降与跨地区输送模拟研究, 科学通报, 41, 1013~1016.
- 12 何东阳、黄美元, 1992, 一个适用于区域性大气环境模拟的大气光化学模式, 环境科学学报, 12(2), 182~192.

Studies on Cross-Boundary Transport of Sulfur in China and East Asia

Huang Meiyuan, Wang Zifa, He Dongyang, Xu Huaying,
Zhou Ling and Gao Huiwang

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract With our 3-D long-range transport Eulerian applied model for pollutants, we simulated in detail transport features of sulfur across boundaries in China and East Asia and analyzed the distribution characteristics of transport fluxes and its seasonal and spatial variation. On the basis of transport fluxes across boundaries, we discussed the sulfur budgets and obtained transport quantities of sulfur among China and different countries (regions) in East Asia. Simulation shows that in total deposition of sulfur of other countries, the ratio from mainland of China is small, the main origin of sulfur deposition in each country in East Asia is from itself. In the long-range transport process of sulfur, the role of sulfate is important and the ratio from other regions in sulfate deposition is larger. Preliminarily we concluded a concept model of sulfur transport in East Asia. In lower layers sulfur pollutants transport from southwest to northeast in summer while in winter pollutants transport from north to south in North China and from southwest to north in South China, furthermore, a transport convergence zone appears in middle and lower reaches of the Yangtze River. Sulfur pollutions are transported from west to east in higher layers in winter and summer and changed with westerly belt. In middle layer the situation exists between the high and lower layers and in spring and autumn it is between winter and summer and is more similar with winter.

Key words transport feature sulfur transport quantity East Asia