中 国 科 学
1984 年 3 月　　B 辑　　第 3 期

我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析

张 德 二
（国家气象局气象科学研究院，北京）

摘 要

根据我国史料中的降尘记载、历史气候资料和现代气象记录，给出了我国近三千年降尘地点分布图和近一千七百年降尘频数曲线．文中指出：历史降尘地点与黄土分布及现代浮尘日数分布三者相近；降尘频繁期对应于冷干气候期；降尘由天气系统作用所致，沙尘的升空—运移—沉降皆与水平流场和垂直速度密切配合；我国西北干燥沙漠地带是沙尘的源地；我国黄土粉尘曾历经风力搬运过程．

粉尘沉降的研究涉及到环境科学、第四纪地质学和气象学等学科领域．我国的历史文献记载和现代气象观测记录表明，大气层中各种规模的降尘事件不断发生，它与各不同时期的气候背景密切相关．降尘记录的天气气候学分析，也为我国重要的第四纪沉积物——黄土的风成假说提供一方面的证据，这有助于人们考虑我国黄土的可能来源及黄土粉尘的搬运过程．

降尘现象在历史文献中常被记为“雨黄土”、“雨砂”、“土霾”、“黄雾”等等．在近代气象记录中则相当于严重的沙(尘)暴和浮尘现象．我国降尘现象的记载可远溯至公元前 1150 年[1]，近一千年来史籍中的记载是很丰富的．近些年，通过对地方志[1]、正史、笔记等有关记载进行了系统整理，获得了有关降尘记载共 1156 条(已摒除可判为火山灰和局地沙尘暴所致的降尘)，并作了初步分析[2]．本文欲进一步结合现代气象记录，系统地讨论历史时期以来降尘的时空分布、气候背景、天气过程和沙尘源地等问题．

一、降尘的时空特征

1. 空间分布

将史料中的“雨土”等降尘现象发生地点标注于图 1 中，可见其范围西起新疆、东至海滨，北自内蒙、南迄长江以南，华南亦有零星散布．值得注意的是：这些降尘地点的分布与我国黄土的分布（图 1 中斜线所示）[3]，也与我国近三十年浮尘日数分布图年平均日数大于 5 天的区域南界大致相当(参见图 9)．浮尘是尘土细粒均匀地浮游在空气中的现象，多为远处沙尘经上层气流传播而来，是降尘时必有的现象．浮尘、雨土和黄土三者分布区域的相似是值得注意的．图 1 中还标出日本的“雨土”、“雨砂”降落地点[4]，它们似乎是我国的降尘地带随西风气流

本文 1982 年 12 月 17 日收到，1983 年 7 月 11 日收到修改稿．

1) 部分援引中央气象局等单位“近 500 年旱涝史料会战”的整编材料．

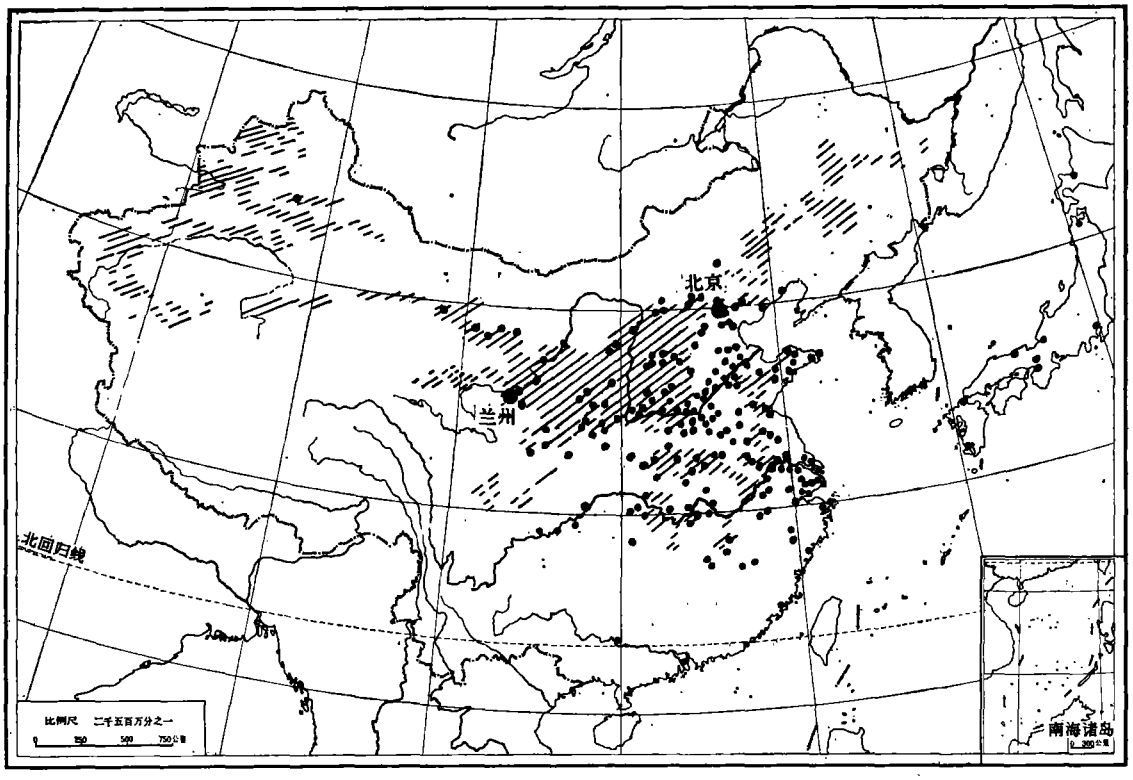

图 1　历史时期降尘地点(·)与我国黄土分布区域(划斜线)

向东的自然延伸.

2. 时间分布

以"雨土"、"雨霾"形式出现的降尘,可以在一年之内多次出现,一次降尘可广及数省范围。我们曾将有雨土记载的年份称为"雨土年",给出了我国历史时期雨土年表[2]. 由该表计算每十年中"雨土年"出现次数,即雨土年的频数,则可清楚地看到降尘现象有其相对的频发时期。图 2 给出公元 300 年以来的雨土年频数曲线,可见近一千年间其频发时期大约有五个,即 1060—1090, 1160—1270, 1470—1560, 1610—1700, 1820—1890. 每个频发时期大约为九十年左右. 这种频发时期可被视为大气浑浊时期.

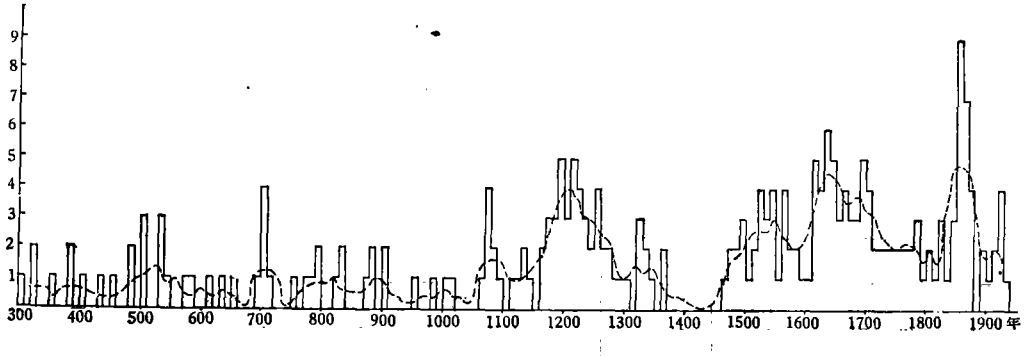

图 2　自公元 300 年以来我国雨土年频数曲线(虚线为五十年滑动均值)

二、气候背景

1. 与温度背景的关系

(1) 降尘频数与温度变化呈反位相关系，即降尘频发时期大致对应于气候寒冷期. 在气候研究中，常以冬季温度的升降来表示长期冷暖状况的变迁[5]. 对近五百年间我国大范围冷暖变化，用我国中部、南部五个区域的冬季温度指数序列[6]的平均值表示. 这不仅因为对近代温度资料的经验正交函数分析已指出：我国大范围(包括 100°E 以西大部份地区)温度变化具有经常一致的特点[7]，而且该冬温指数平均序列与我国西北地区反映冷暖变化的树木气候资料比较，两者长期趋势也一致[8]，从而被认为能代表我国大范围的平均温度状况. 将这冬温指数平均序列与雨土频数序列相比较，分别作五十年滑动平均处理，再计算两者相关系数 $r=-0.59$，信度达 0.01，这意味着两者变化的反位相关系. 这点也可直接由图 3 看出. 对近五百年间典型的冷暖时段分别统计其中雨土频数，亦可见其显著差异：冷期 (1621—1700，1811—1900 年)平均频数为 3.7 年/10 年；暖期 (1511—1620，1721—1780) 平均频数为 2.1 年/10 年. 据文献 [6] 知，上述冷、暖期的平均冬温相差 0.5℃ (长江中下游地区). 至于自公元 300 年以来的情况，与竺可桢[5]所拟的近五千年温度曲线中的相应段落对照，雨土频繁时段基本上都对应于低温时段，仅有个别例外.

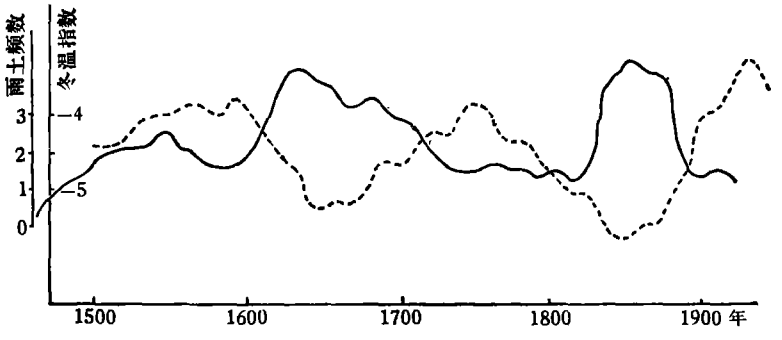

图 3 近五百年雨土年频数曲线(实线) 与冬温指数平均曲线(虚线)

(2) 降尘的沉积厚度在冷期中和暖期中有明显差异. 尽管史料中有关降尘厚度的记录不多，且仅是目测估计，尚不足用以推算其沉降量. 表 1 列出了近五百年间，黄河下游(山西省南部及河南省境内)仅有的 8 次降尘厚度记载. 将它们与所划分的冷暖气候期[4]相对照，出现于冷期的共 6 次，厚度为寸余至盈尺，出现在暖期的共 2 次，厚度仅分余至寸余，两者的差异是明显的. 由此看来，寒冷气候期，不仅降尘事件频繁，其沉积厚度也较大.

上述这种降尘频数及厚度在不同冷暖气候背景下的差异，可以归因于气候寒冷期和温暖

表 1 近五百年间黄河下游 (山西南部及河南省境内)降尘厚度记载

年 代	1825	1810	1644	1640	1611	1473	1774	1773
地 点	柘 城	青丰 南乐	闻 喜	砀 山	方 城	陈 留	济 源	开封、鄢陵
厚 度	(土)寸余	(沙)寸余	(沙)寸余	(沙)寸余	(土)寸余	(土)盈尺	(土)分余	(沙)寸余
气 候	冷	冷	冷	冷	冷	冷	暖	暖

期大气环流的明显变化．据吉野正敏[9]所推算，在较暖的气候适宜期（如 800—900A.D.）和寒冷的现代小冰期（如 1800 年左右），冬季西伯利亚高压、阿留申低压的中心位置和强度可知，在小冰期这些高压、低压中心位置较南，东亚气压梯度加大，冬季风强盛、极地锋带南移到 25°—30°N．显然这种强盛的冬季风和锋带南移，有利于沙尘物质的运移传送．

2. 与湿度背景的关系

降尘频发时期对应于干旱气候背景．

我国北方各区域的干湿状况，借用已有的历史气候序列表示．对 105°E 以东地区，采用郑斯中等[10]拟制的东部各纬度带近两千年湿润指数序列，取其 35°—40°N 地带的湿润指数曲线与雨土年频数曲线对照，各雨土频繁期大致对应于干旱时期（湿润指数＜1.24 的时段，图 4 中斜线所示）．对其中的近一千年段落，用每十年的平均指数值与每十年的雨土年频数值计算，两者的相关系数 $r = -0.53$，信度达 0.001．至于 105°E 以西地区，仅有近五百年的旱涝等级资料[11]．从中选取兰州、张掖、西宁三站计算各站每十年中旱年（等级值为 4，5）出现次数，再求三站平均值用来表示西北地区每十年的干旱状况．将它与近五百年雨土年频数曲线比较，算得两者相关系数 $r = 0.34$，信度达 0.02．这些计算都表明降尘频繁期对应于干旱气候背景．

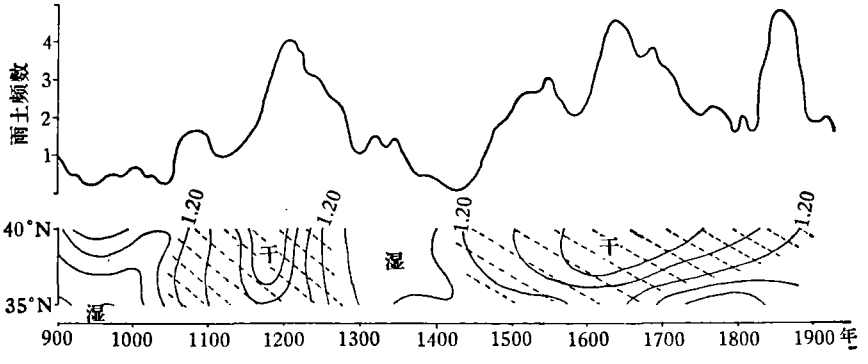

图 4　近一千年雨土频数曲线（上）与我国东部 35°—40°N 湿润指数（下）

三、降尘的天气过程

降尘现象可分成“大风降尘”和“无风降尘”两大类．它们都是天气系统作用所致．

1. 大风降尘

大风降尘常随强大的气旋活动出现，一般伴有狂风（西北风）自北向南递次发生，甚至席卷大半个中国．史料中常见记述为“黄风自西北来，拔树发屋、雨土如霰”，即相当于现代记录的大风（F）和尘暴（S）现象．

依据历史记载，可将若干降尘个例的发展过程给予复原（图 5a—c）．如图 5a 所示的个例是：1550 年 4 月 5 日 14 时大风尘暴起于大同（40°06′N、113°20′E）、怀安（40°15′N，114°25′E）一带，“昼昏晦不见，至夜风少止”[1]；保安（36°46′N，108°46′E）“大风拔木黄沙蔽空昼

1）光绪怀安县志，卷三．

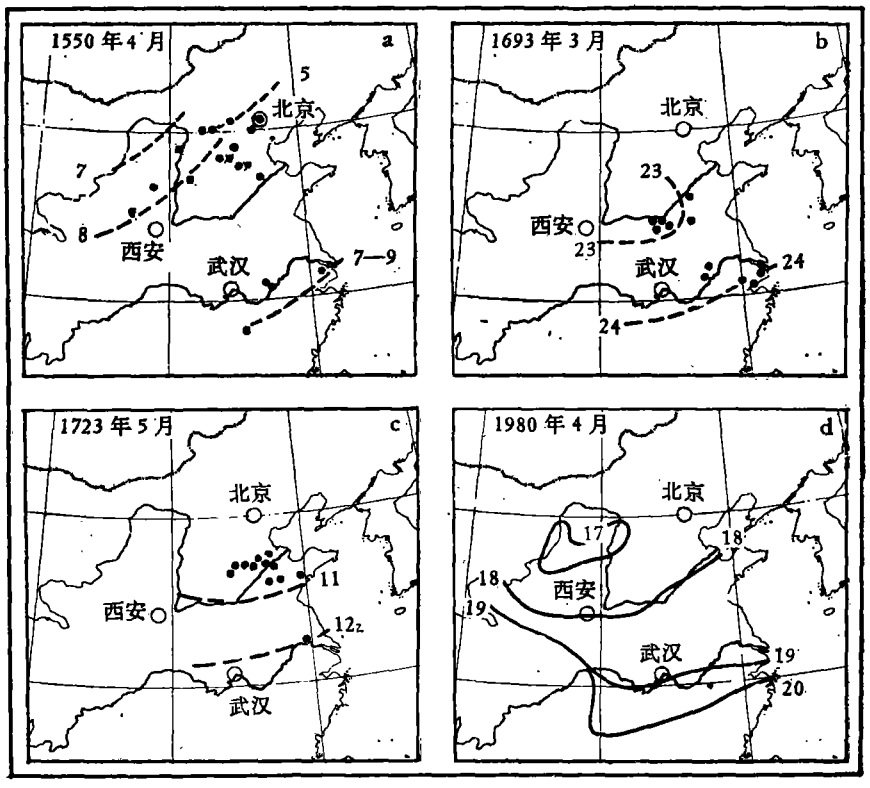

图 5 大风降尘个例动态图

(a, b, c 图中——为逐日大风降尘区的南界, ● 为降尘记载地点;
d 图中——为逐日大风尘霾区的南界; 图中数字为日期)

晦"[1];当夜至晋县 (38°01′N, 115°03′E) "夜黑风飞瓦"[2];途经安庆等地 (30°31′N, 117°02′E) "黄雾四塞"[3]; 至 3 月 7 日 12 时在上海一带开始持续三天的风霾和降尘"午刻大风扬沙, 雨黑霾三日"[4]. 据气象观测规范推算上述记载的平均风速可达 6—9 级,阵风最大可达 17—20 米/秒,能见度应小于 1 千米,相当于大风和尘暴现象. 推算其大风尘暴区前沿移动速度约为 550 千米/日. 另外, 还发现 4 月 7—9 日自内蒙、晋北向南又继续有大风尘暴递次发生,相当于紧接着的又一次冷锋活动,正是这后一过程,为南方持续三天的降尘输送了粉尘.

同样, 1693 年 3 月 24 日在上海等地出现的"雨黄沙",也可判断为一次气旋活动所致. 这次过程可追溯到 3 月 23 日夜开封 (34°46′N, 114°23′E)、尉氏 (34°24′N, 114°12′E) 等地"大风夜作,黎明天赤如血,雨土竟日"[5], 至 24 日 08 时汶上 (35°43′N, 116°29′E) "天色红如血, 稍间变为黑云、漫天大风昼晦,人对面不相见"[6]. 随后尘暴区递次南移,沿途沛县[7] (34°44′N,

1) 康熙保安州志,卷二.
2) 康熙晋州志,卷十.
3) 康熙安庆府志,卷六.
4) 光绪重修嘉善县志,卷三十四.
5) 同治开封府志,卷三十九.
6) 康熙汶上县志,卷五.
7) 民国沛县志,卷二.

116°51′E)、巢县[1] (31°37′N, 117°52′E)、无为[2] (31°17′N, 117°53′E) 均出现"大风沙蔽日"等. 最后 24 日夜,在上海 (31°07′N, 121°23′E)、湖州 (30°53′N 120°07′E)、桐乡 (30°38′N 120°33′E) 等地出现降尘"大风霾"[3]"雨黄沙两日方止"[4]. 其大风区、尘暴区移动速度约 500 千米/日. 再如 1723 年 5 月 12 日长江下游的降尘事件(图 5c),其前期天气过程、大风尘暴区的移动路径和速度也类似于前两例,都表现出气旋活动的特征.

这类降尘的近代个例,如 1980 年 4 月 17—20 日,我国东部的一次大风降尘. 北京地区尘暴及大风始于 18 日 18 时,止于 20 时 17 时. 笔者目睹的景象与史料中的用语"黄风昼晦、地面积若尘土"相当. 关于这次降尘已有若干研究报告[3,12,13], 文献 [3] 分析了逐日地面和高空气压场、流场后指出,这是一次蒙古气旋强烈发展所致的尘暴-浮尘-降尘天气过程. 由于在我国西北部气旋强烈发展以及高空西风带动量下传,在该地形成沙暴天气. 沙尘被强风吹起后,通过上升运动和湍流混合,被卷入高空西风带内,然后被运移、扩散,并降落在黄土高原及其以东地区. 该过程起源于内蒙中、西部及河西走廊,影响华北大部地区及华中. 其尘霾区逐日范围如图 5d 所示. 总之, 1980 年 4 月的降尘个例是第一类降尘的代表,它由气旋活动所致,源地的沙尘以风力为搬运营力,被携至东部地区而沉降.

2. 无风降尘

无风降尘即在几乎静风的条件下出现. 史料中常记述为"天无云,雨灰黄色""雨土濛濛如雾"、"无风飞沙"等等. 如莆田 (25°26′N, 119°00′E) 1727 年 4 月 7 日"连日雨土, 四望如雾"[5],梧州 (23°29′N, 111°18′E) 1768 年 5 月 12 日"下黄沙大雾一连六日"[6]. 相仿的近代例子,如 1958 年 3 月北京的一次降尘. 刘东生记述"3 月 20—24 日北京上空黄暗无风, 历时不久,即在房舍、街道和树木上沉积下来大量的尘土"[14]. 气象记录表明, 北京地区在 3 月 19 日 14 时 55 分开始出现浮尘, 19-24 日地面平均风速皆低于 1.8 米/秒, 20 日全日静风. 17—24 日对流层中低空接连出现西风短波槽东移,由新疆向东大致沿 35°—45°N 直到山西, 沿途相

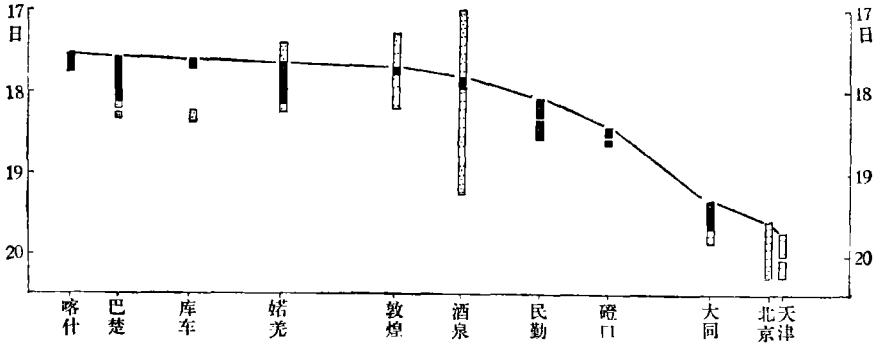

图 6　1958 年 3 月 17 日—20 日沿 40°N 11 站尘暴(黑长条)、浮尘(点长条)出现时间

1) 道光巢县志.
2) 嘉庆无为州志.
3) 乾隆湖州府志,卷三十八.
4) 光绪桐乡县志,卷二十.
5) 乾隆莆田县志.
6) 同治梧州府志.

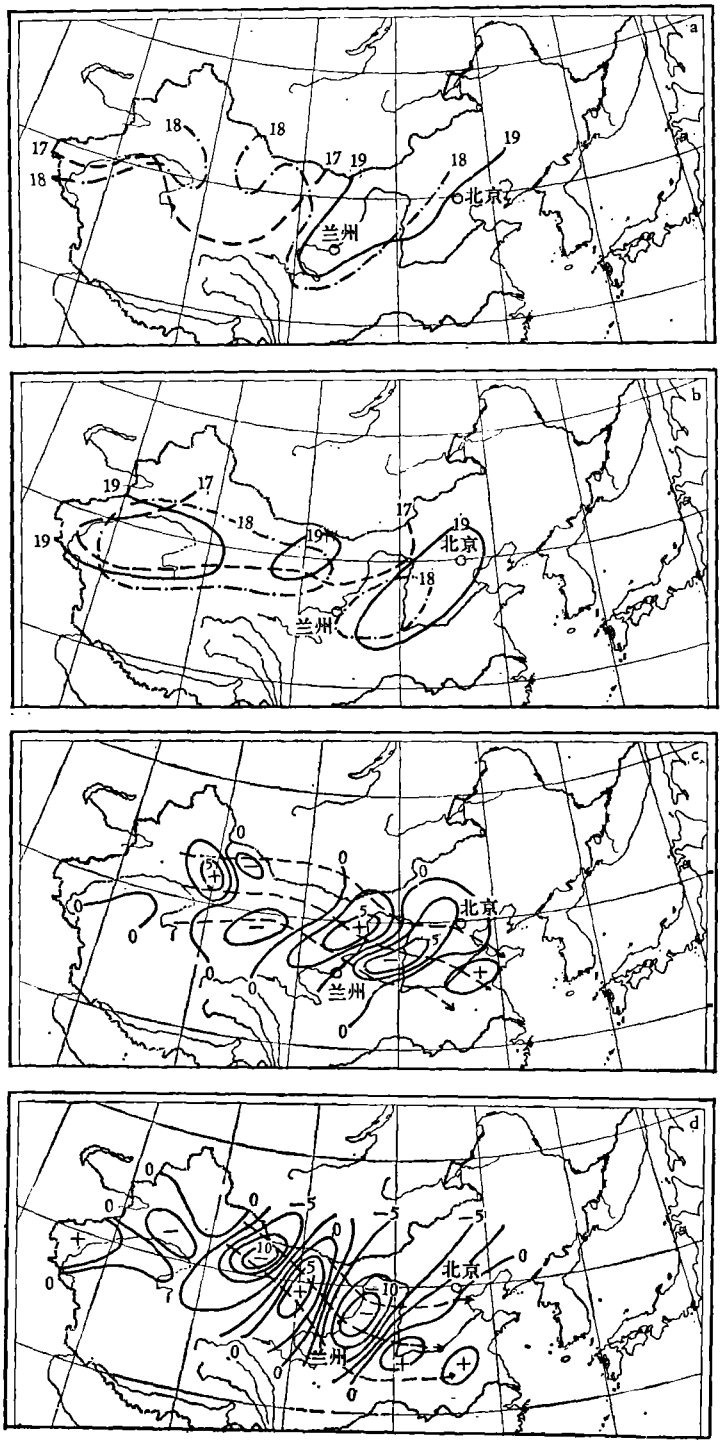

图 7 1958 年 3 月 17—20 日尘暴 (a)、浮尘 (b) 区界线及逐日 700 毫巴垂直速度 (w, 10^{-3} 毫巴/秒)和流线分布 (虚线箭头) (c 图 17 日，d 图 18 日)

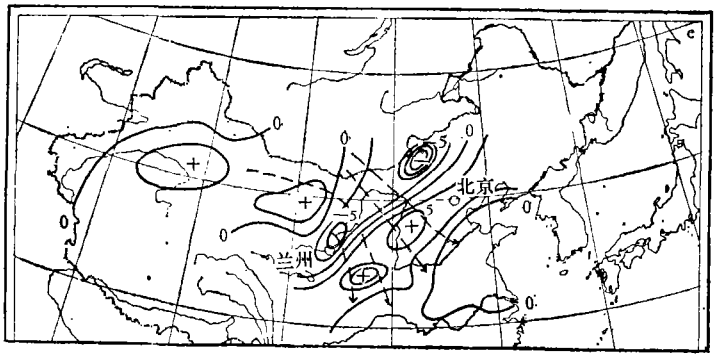

图 7(续)　e 图 19 日 700 毫巴垂直速度和流线分布

继出现尘暴．据观测报告，绘出了 3 月 17—20 日我国沿 40°N 附近各站尘暴及浮尘出现时间(图 6)，及逐日尘暴、浮尘区界线(图 7a, b)．这次降尘可追溯到 17 日新疆南部地区发生的尘暴．

分析沿途上空 17—20 日逐日的垂直运动分布及水平流场，可清楚地看出沙尘的升空—输送—沉降过程与气流的关系．用三点法[15]，由 30°—45°N, 85°—125°E 56 站的高空风资料，计算各等压面层次的水平散度 Div 分布，再由此得出各等压面的垂直速度 w_i 的水平分布．图 7c, d, e 分别给出各日 700 毫巴的垂直速度和流线分布．与图 7a 相对照可见，17 日南疆及敦煌皆有尘暴出现，各有一个较弱的上升气流区与之配合，这意味着仅有少量沙尘升空．18 日尘暴区主要出现在甘肃西部，并有一个大大加强了的上升气流区（中心值 13.2×10^{-3} 毫巴/秒)相配置．19 日尘暴区已移至内蒙、宁夏等地，亦有相应的上升气流区与之相配置．这都表明尘暴扬起的沙尘有条件被送至空中．同时，与图 7b 相对照，各日浮尘区域皆位于自尘暴区沿流线的下游方位上，且皆与下沉气流区相匹配．

另一方面，沙尘运移与水平气流的关系还可以由沙尘运移速度来表明．图 8 表示 3 月17—19 日沿 40°N，嵯羌(39°02′N, 88°10′E)以东各站尘暴出现时刻与经度差的关系，图中×点由每两站间尘暴出现的时间差和站间的经度差确定．虚线表示沙尘传递速度．由此算得沙尘由西向东传递的速度为 12 经度/日，即约为 11.8 米/秒．相当于这期间 700—500 毫巴的平均高

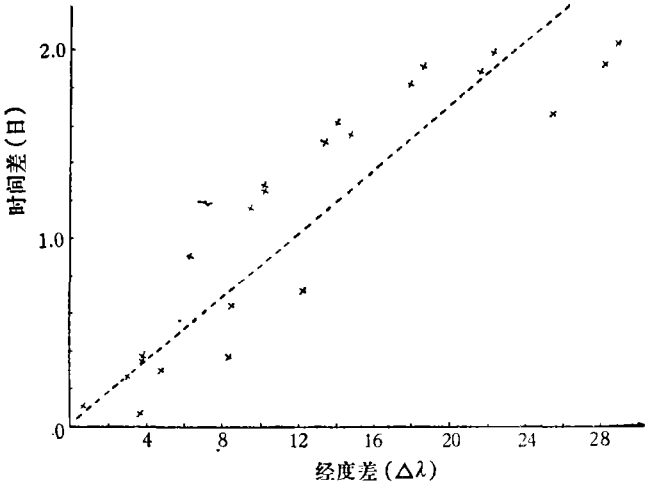

图 8　1958 年 3 月 17—19 日沿 40°N 尘暴出现时间差与经度差的关系

空风速的西风分量值(略低于 500 毫巴西风分量).这进一步表明沙尘是由偏西风气流携带的.

总之,这次降尘是由西风短波槽相继东移引起的,途经之处地面尘暴相继出现,再由相应的上升气流将沙尘送到空中,随 3000—5000 米高空的气流向东输送,然后在下沉气流区发生沉降.

综上所述可见,自历史时期以来这两类降尘都是天气系统作用所致,风力为粉尘的搬运营力. 这不仅可以理解为什么历史时期的雨土地点与现代浮尘分布区域两者相接近(见图 1 与图 9),而且结合若干现代降尘物质的实验室分析[12-14,3,16],还可说明黄土分布区域与浮尘分布区域亦相近的含义(尽管在不同气候期大气环流的变化可以使得浮尘区边界有所移动). 因为实验鉴定已指出:"这些现代降尘物质的颗粒和矿物成份与原生黄土极为相似,表示两者来自同一源地"[3]. 这样看来,两者既有同一来源,又有相近的沉降范围,而浮尘已被确认是由高空气流输送,那末可推知黄土也可能历经风力的传送过程.

四、关于沙尘的源地

大量历史记载中曾指出沙尘的来向,如陕、晋等地常有"黄风自西北来"的记述,这些都表明了源地的相对方位.

如前述,降尘过程总有尘暴或浮尘现象. 尘暴是强风从地面卷起尘沙、干土,致使空气浑浊的现象,水平能见度小于 1 千米,在上升气流配合下,沙尘可被送入空中. 浮尘则是尘土细

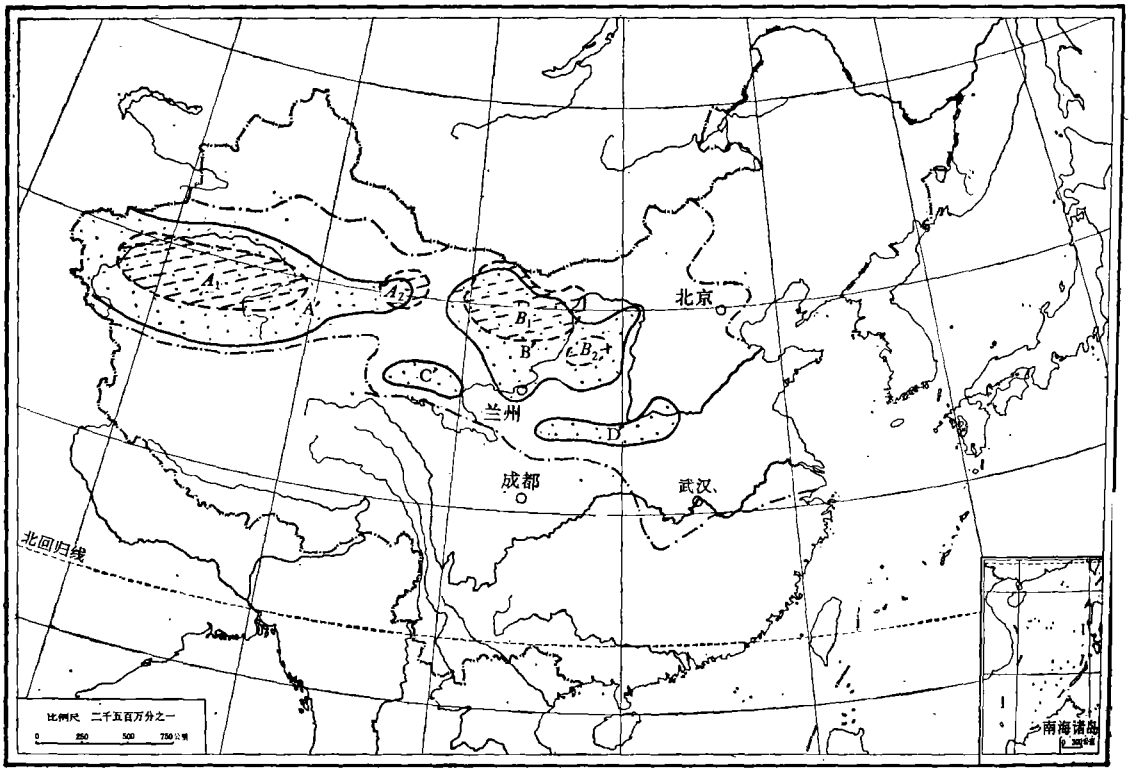

图 9 我国浮尘、尘暴年平均日数>30 天的区域(划点部分为浮尘区域,划斜线部分为尘暴区域)及浮尘年平均日数>5 天的区域界线(点划线)

粒均匀地浮游在空气中的现象，水平能见度小于 10 千米，多为远处沙尘经上层气流传播而来，或为尘暴之后尚未下沉的细粒浮游于空气中．于是我们可大致将尘暴发生区视为粉尘的源区，而将浮尘区视为粉尘的沉降区，利用现代气象记录来讨论两者的分布．我们选取了全国 498 个站，统计其逐年尘暴和浮尘天气日数及其三十年平均值（1951—1980 年），并画出尘暴、浮尘平均日数分布图（图 9）．由图 9 可见，尘暴高值区（>30 天图中斜线所示）有 4 个，即，A_1：南疆（37°—41°N, 77°—89°E），A_2：甘肃西部（39°—41°N, 94°—97°E）B_1：甘—蒙（38°—42°N, 100—107°E），B_2：宁—蒙（37°—38°N, 106°—109°E）；浮尘高值区（>30 天）有 4 个，即 A'：新—甘（35°42°N, 75°—96°E），B'：蒙—甘—陕（35°—42°N, 98°—111°E），C'：青海（36°—37°N, 94°—100°E），D'：渭河—洛河谷地（33°—35°N, 105°—118°E）．将两者对照可见：1）浮尘的 A' 区与尘暴的 A_1, A_2 区大体一致，这意味着南疆一带的浮尘主要是就地产生的；2）浮尘的 B' 区比尘暴的 B_1, B_2 区略有南移；3）浮尘的 C', D' 区皆远离 A, B 等尘暴中心，且在其东南侧，这种相对位移与地面反气旋活动平均路径[17]一致．

前述降尘个例的天气过程分析已指出沙尘源地．如 1980 年 4 月北京大风降尘的粉尘来源于内蒙中、西部的干燥沙漠及河西走廊；1958 年 3 月北京无风降尘的粉尘源地可远溯至南疆，但主要是由甘肃—内蒙干燥沙漠地带获得．这些由天气过程分析所得的源地，可以与实验室鉴定粉尘样品的结果相互印证．如对 1980 年 4 月北京降尘样品指出，其来源主要是“形成大风地区及其移动路径地区”[13]、“沙尘显然来自戈壁沙漠，而不是黄土高原”[12]．当然最值得注意的是指出这些现代粉尘的结构和成份与更新世黄土基本一致，从而认为它们可能有着同一源地[3]．

总之，由历史记载可知，沙尘源地的方位，从气候统计和天气过程分析认为：主要源地是甘肃、内蒙、宁夏等地干燥沙漠地带，也有部分来自新疆南部．

五、结　　语

关于黄土的风成说已有过大量论述和实验室分析，应用天气气候方法分析历史降尘记载和现代降尘记录所得结论，可与之相佐证．

1. 历史时期雨土地点分布与现代浮尘日数分布及黄土分布三者颇为近似．联系到降尘天气过程和粉尘鉴定结论，可认为这三者的相似意味着昔日黄土堆积也有着类似的风力传送过程．

2. 现代降尘的天气过程与历史记载的雨土过程十分相似，粉尘的升空—运移—沉降都与空气垂直运动和水平流场密切相关，风力是其搬运营力．

3. 由历史记载，现代浮尘、尘暴资料及降尘天气过程分析指出，粉尘主要源地是甘肃—内蒙的干燥沙漠地带，其次为南疆沙漠．

4. 降尘与气候背景有关．由历史气候数据分析可见，降尘频数与温度及湿度变化大致呈负相关．在干、冷气候期降尘频繁．然而，自更新世以来，曾有过多次远比近一千年更为寒冷、干燥的气候时期．从而推测，这些时期应有过比历史时期规模更大的降尘．

致谢：此项工作承刘东生先生热心指导，王宪钊、张家诚先生提出了宝贵意见，并与安芷生同志作过多次有益的讨论，谨一并致以诚挚的谢意．

参 考 文 献

[1] 王嘉荫,中国第四纪研究,**4**(1958),1,1—8.
[2] 张德二,科学通报,**27**(1982),5: 294—297
[3] Lui Tung-Sheng, et al., Geological Society of America, Special Paper 186, 1981, 149—157.
[4] 中央気象台等,日本の気象史料,原書房株式会社,1976.
[5] 竺可桢,中国科学,1973,2: 168.
[6] 张德二,科学通报,**25**(1980),6: 270—272.
[7] 王绍武等,全国气候变化学术讨论会文集,科学出版社,北京,1981,117—130.
[8] 张德二,气象科学技术集刊(4),气象出版社,北京 1983,1—10.
[9] Yoshino, M. M., Regionality of Climatic Change in Monson Asia, Climatic change and food production, University of Tokyo, 1978, 331.
[10] 郑斯中等,气候变迁和超长期预报文集,科学出版社,北京,1976,29—32.
[11] 中央气象局气象科学研究院等,中国近 500 年旱涝分布图集,地图出版社,1982.
[12] 周明煜等,科学通报,**26**(1981),10: 609—611.
[13] 王明星等,科学通报,**27**(1982),7: 419—422.
[14] 刘东生等,中国的黄土堆积,科学出版社,北京,1965,71.
[15] 文宝安,气象,1981,5: 32—56.
[16] 张淑媛,中国第二届第四纪研究委员会文献,1964.
[17] 中央气象局,中国气候图集,地图出版社,北京,1966,37－48.