

沙尘暴气候效应研究

■ 董险峰 / 国家教育行政学院

摘要 本文从沙尘暴产生原因、影响因素、研究方法和目前研究现状四个方面对沙尘暴引起的气候效应问题进行了论述。

关键词 沙尘暴 气候效应

沙尘暴是沙暴和尘暴的总称，是强风把地面大量沙尘卷入空中，使空气特别混浊并且水平能见度低于1km的天气现象。其中沙暴系指大风把大量沙粒吹入近地面气层所形成的携沙风暴；尘暴则是指大风把大量尘埃及其它细颗粒物质卷入高空所形成的风暴。大风、地面的沙尘物质和不稳定的大气是沙尘暴形成的基本条件。沙尘暴产生的沙尘气溶胶给人类的生产生活带来严重的危害，它能够恶化大气环境质量，降低大气能见度，增加大气多相化学反应的场所，通过直接和间接两种方式造成辐射强迫，影响人体健康。另外，沙尘气溶胶的长距离输送并沉降可导致区域性污染，影响沉降地区的生态环境。近年来，国内外对于沙尘暴的来源输送影响机制进行了很多的研究，但是迄今为止，这些研究多半是分散的、个例的、不系统的，科学深度仍然有待加强。

1 沙尘暴气候效应的产生原因

沙尘暴对人类生存的地球环境产生的一个重要影响就是气候效应。当沙尘

暴发生时，最初可能是沙漠地区的沙尘粒子首先注入大气，在随风输送过程中，大量的非沙漠地区的土壤尘埃粒子卷入其中，形成矿物气溶胶（包括土壤尘埃粒子和沙尘粒子）。矿物气溶胶是大气气溶胶含量和光学厚度的主要贡献者。它们通过对太阳短波辐射和地球长波辐射的散射和吸收产生重要的直接辐射强迫。但是，由于沙尘暴粒子成分以及粒径等的复杂性，目前对于沙尘气候强迫的估计仍然存在很大的不确定性。政府间气候变化委员会（IPCC）第三次评估报告曾对大气中各种辐射强迫做过估计，其中气溶胶强迫的估计值分布在-0.6~0.4W/m²之间。也就是说，迄今为止，这一强迫的正（使气候变暖）负（使气候变冷）还没有确定。沙尘暴粒子还可以作为云的凝结核（CCN）影响云的形成、云的辐射特征和降水，产生间接的气候效应。同时，沙尘粒子所携带的营养物质输送到海洋后，会对海洋的初级生产力产生影响，进而影响海洋碳循环，造成大气CO₂浓度的变化。目前，对于沙尘暴间接气候效应的研究不确定性更大。这些

不确定性直接影响对过去气候变化成因的判定以及对未来气候变化的预测。

2 沙尘暴气候效应的影响因素

从上面的气溶胶产生气候效应的原理可知，沙尘暴的气候效应取决于许多方面，如气溶胶的浓度、粒径和化学组分，在输送迁移过程中的物理的化学的反应，经过区域的大气环境状况等。要研究沙尘暴对气候变化的辐射强迫，有必要全面分析以下六个方面的内容：

2.1 沙尘气溶胶来源及注入大气中的含量

中国北方受地质地理和大气环流的影响，从东北到西北分布着大面积的沙区。2002年的地面观测资料和NCEP/NCAR的再分析资料对2002年3、4月沙尘暴发生频率以及相应的月和候的环流形势特征进行了分析，并使用GMS-5的卫星观测资料的亮温数据，对沙尘暴在冷涡天气下的沙尘输送情况进行了分析。他们的研究表明，沙尘暴的发生和移动路径与东亚大气环流形势有关，如2002年春天，东亚大槽十分活跃，北方路径的沙尘暴多，沙尘在向东输送的同

时, 还向东北方向移动造成东北部分地区的黑雪^[1]。钱正安等研究了近50年来中国沙尘暴的分布及变化趋势, 他们认为我国北方沙尘暴主要分布在河西走廊和阿拉善高原、南疆盆地南缘及内蒙古中部等三地区。沙尘暴活动的变化还与东亚大气环流的年代际变化和生态环境的变化有关^[2]。徐启运等分析西北地区的强沙尘暴及特强沙尘暴个例发现, 西北地区强和特强沙尘暴的移动路径有三条: 西北、北方和西方, 其中西北路径沙尘暴天气最多, 西方路径次之, 北方路径最少^[3]。

2.2 沙尘暴受灾区的天气和气候变化

利用太阳华盖辐射计对1991年春夏之交的北京地区大气气溶胶特性的测量结果, 发现当沙尘暴袭击北京时, 整层大气气溶胶的光学厚度、大粒子浓度及粒子散射函数等均有大幅度增加。胡隐樵等对甘肃省1993年5月5日出现沙尘暴时的太阳辐射进行观测, 平川出现沙尘暴时太阳辐射下降, 0.5 h以后太阳辐射降至100 W/m²以下, 并较长时问维持在这一水平。1.5 h后有一次回升, 反映了沙尘空间分布的不均匀性。同一沙尘暴到达民勤时, 当地太阳辐射下降迅速, 约30 min后太阳辐射下降为零, 该值维持了1 h^[3]。Carlson通过观测研究表明, 撒哈拉的沙尘对热带地区的太阳能量平衡有明显的影响^[4]。

2.3 沙尘粒子的粒径、复折射指数, 以及沙尘中的矿物成分的混合形式(内混外混)

庄国顺^[5]、王玮^[6]等对2000年春季北京的沙尘暴进行了研究, 结果表明沙尘暴气溶胶污染水平极高, 粗粒子占绝大部分。孙业乐^[7]对2002年北京春季的沙尘暴气溶胶研究得出了类似的结果: 以粗颗粒物为主, 同时还含有相当数量的细颗粒物。各种污染物在沙尘暴过后普遍增加, 证明了沙尘暴带来的大量矿物气溶胶尤其是其中的细粒子有利于污染物的转化和积聚。典型的沙尘粒子的

体积中值半径的数量级是1~2μm, 由于沙尘粒子的单次散射反照率明显小于1, 而且由于太阳辐射和热辐射强迫的部分抵消, 以及不同地理区域的正负强迫的抵消, 所以沙尘粒子总的辐射强迫的数值较小。然而, 来自不同地区的沙尘的复折射指数不同, 以其地面反照率的区域性差别, 使得大气层顶的沙尘强迫存在很大的不确定性。

2.4 沙尘粒子在输送过程中所发生物理、化学特性变化

有研究表明, 沙尘粒子在输送过程中, 特别是在它们经过高污染的工业地区或者大城市上空以及海洋上空时, 有可能吸附某些污染物质及海盐粒子, 使其物理和化学特征发生明显变化。庄国顺指出沙尘暴在传输过程中产生了相当数量的Fe(II), 当传输到海洋上空时, 作为生物体重要组成元素的铁和硫经由羟基自由基相互耦合转化, 可能在大气和海洋之间形成一个对全球气候有重大影响的产生非海盐硫酸盐气溶胶的正反馈体系。这一反馈体系可能影响到一些海洋地区的生物生产力变化以及气候的变化^[8]。黄美元等在比较国内外相关起沙机制模型的基础上, 结合中国北方大量气象台站的有关起沙过程的观测资料, 提出了一个适合我国北方的用于黄沙输送模拟与预报的新的起沙机制模型^[9]。

采用此起沙模型, 通过对黄沙输送过程中的干沉降过程、降水清除过程的参数化处理, 建立了适合东亚地区的分谱的黄沙输送模式, 模式考虑了黄沙的分谱机理及可能的微物理过程。通过与实测资料的对比, 表明模式可以较好地模拟黄沙的输送过程。

2.5 如果要对某区域的沙尘暴气候和环境影响进行预测和防治, 还需要知道这个区域的大气环境化学特征

庄国顺在对我国北方2000和2002年发生的沙尘暴的化学物质组成、来源及粒径分布做了研究之后发现, 沙尘暴中所增加的污染物主要来自于沙尘暴所

经过地区的二次扬尘, 以及二次形成的硫酸盐气溶胶、有机物气溶胶以及在其表面发生的多相反应, 包括对未量元素的表面吸附或液相络合; 沙尘暴在其长距离的传输中, 即输送比普通气溶胶高数十倍的微量污染元素, 同时又输送比普通气溶胶高的多的Fe(II), 以其高出数十倍尚未被还原的Fe(III)^[6-7]。

2.6 沙尘暴造成的气候影响有可能反过来影响沙尘粒子的性质以及作用

如庄国顺等对大气海洋物质交换中的铁硫耦合反馈机制的研究^[10]。另外, 胡隐樵等对甘肃省1993年5月5日出现沙尘暴的研究也证明了沙尘暴影响的反馈作用。但是目前对于沙尘暴反馈机制的研究还很不系统和完善, 并且对于这样的反馈机制, 存在很大的不确定性, 很难实行定量化的研究。

沙尘暴作为一种浓度极高的特殊的气溶胶, 能够削弱太阳辐射, 长期参与平流层的物理化学过程, 通过改变大气的辐射平衡对全球气候产生影响。但是, 由于沙尘暴来源、粒径、化学组分、迁移过程的复杂性和不确定性, 导致了对其的气候效应的研究存在很大的不确定性, 沙尘暴对气候系统的定量化一直缺乏系统有效的研究。

3 沙尘暴气候效应研究方法

沙尘暴引起的气候效应已经越来越引起重视, 要对沙尘暴引起的气候效应进行全面系统的研究, 必须结合沙尘暴气候效应的区域性特征, 可以选择典型城市和区域(如北京、沙尘经过的海洋上空等), 首先弄清这个地方的大气环境特征以及沙尘暴状况。在已有的关于沙尘暴的起沙机制模型基础上, 加入沙尘粒子在传输过程中的物理化学特征变化特征以及粒子分谱等内容, 完善和改进模型。加强对沙尘粒子的直接辐射强迫研究, 不同粒径和成分特征的沙尘粒子的吸收散射特征。利用已有的粒子成

云机制模型，结合地区或者区域的环境状况，尽可能准确估计沙尘暴中细粒子的间接辐射影响。通过对上述内容的综合，得到沙尘暴对区域气候的影响。根据沙尘暴产生的气候和环境影响结果，结合沙尘暴的产生输送条件等的研究，估算气候环境变化对沙尘暴的反馈机制。

3.1 建立完整的沙尘暴起沙机制

国内对沙尘输送的模拟工作已有不少工作，而对沙尘源的模拟，尚不太多。在沙尘暴数值模拟中，关键问题是起沙源的数值模拟，而沙尘源的范围、地表特征、启动的沙子通量以及粒子的尺度分布等都涉及到非常复杂的过程。结合已有的起沙机制和多年的观测资料，较为全面的考虑沙尘起沙过程中的物理过程和粒子分谱。

3.2 完善沙尘输送模拟机制

目前国内对于沙尘输送的模型很多，但是对于气候效应的针对性研究还很不完善。需要在已有的较好的传输模型基础上，不断深化和完整，考虑沉降和降水清除过程，以及沙尘在输送过程中的物理的和化学的特征变化。

3.3 强化对沙尘粒子的直接和间接辐射强迫研究

沙尘暴产生的沙尘气溶胶是一种特殊的气溶胶，其直接辐射强迫要比一般的气溶胶粒子散射吸收更为复杂。因此，以气溶胶粒子直接辐射强迫效应为基础，结合气溶胶粒子的浓度、粒径和成分的特征，定量化的研究沙尘气溶胶的直接辐射强迫效应。沙尘暴产生的粒子主要是粗粒子，但细粒子的数量也会大大增加，所以气溶胶的间接辐射作用也会大大加强。

3.4 针对不同的城市区域研究

沙尘暴所产生的环境状况与受灾区的大气环境化学状况密切相关。结合区域的空气污染状况，分析沙尘粒子在这种环境可能产生的物理化学转化以及对气候的影响。比如北京的二次污染严重，二次转化的硫酸盐气溶胶、有机物

气溶胶以及在沙尘粒子表面发生多相反应。另外还有沙尘粒子对微量元素的表面吸附或者液相络合等等。

3.5 考察气候环境的变化产生的对沙尘暴的反馈效应

结合以上沙尘暴对气候影响的研究，将改变后的气候条件运用到沙尘暴传输模型中去，考察气候环境的变化产生的对沙尘暴的反馈效应。反馈效应很重要的一方面是基于沙尘暴受灾区的环境状况，比如重污染城市上空和海洋上空具有完全不同的反馈机制。因此，在研究中，针对不同的影响因素，从反应机理上研究沙尘暴的反馈信息，得出综合性的和有针对性的结论。

4 沙尘暴气候效应研究现状

近年来，比较系统的国际大气气溶胶研究计划是已于2001年结束加强观测(IOP)的亚洲气溶胶特性实验(ACE-Asia)，其中曾将矿物(沙尘)气溶胶作为主要研究内容之一^[10]。中国科学院—日本文部科学省的“风送沙尘的形成、输送机制及其对气候与环境影响的研究(ADEC)”的合作项目于2001年开始，是系统性的研究亚洲沙尘暴的第一个科学计划，其目标是：阐明亚洲风送沙尘的发生、输送实况及其模式化；评价过去半个世纪以来沙尘向大气与海洋中的输送量，并在全球规模上，将亚洲沙尘对气候系统的影响定量化。

无论是在沙尘暴的发生机制，还是在其输送过程中所发生的物理和化学特征的变化方面，我们仍然知之甚少。目前对于亚洲地区的沙尘气溶胶的研究还处于起始阶段，已有的研究结果是分散的，沙尘气溶胶的物理、化学、光学特征以及影响沙尘疏松的物理过程(起沙机制、分谱机制、沉降机制、沙尘表面的非均相过程等)还不是非常清楚，与撒哈拉沙尘的研究相比还很不够。尤其是由于缺乏相应的观测资料，对于沙尘

气溶胶的输送过程采用的参数化方案均直接引用子撒哈拉沙漠的模型，这同亚洲的实际情况有较大的差距，因而无法准确的描述亚洲沙尘气溶胶的产生和输送过程。^[11]

主要参考文献

- [1] 方宗义，王炜. 2002年我国沙尘暴的若干特征分析[J]. 应用气象学报. 2003, 14 (5): 513—521.
- [2] 钱正安，宋敏红，李万元. 近50年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. 中国沙漠. 2002, 22 (2): 106—111.
- [3] 胡隐樵，光田宁. 强沙尘暴发展与干飑线—黑风暴形成的一个机理分析[J]. 高原气象. 1996, 15 (2): 178—185.
- [4] Carlson T N. Atmospheric turbidity in Saharan dust outbreaks as determined by analyses of satellite brightness data[J]. Mon Wea Rev. 1979, 107: 322—335.
- [5] 庄国顺，郭敬华，袁蕙. 2000年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响[J]. 科学通报. 2001, 46(3): 191—196.
- [6] 王伟，岳欣，刘红杰. 北京市春季沙尘暴天气大气气溶胶污染特征研究[J]. 环境科学学报. 2002, 22(4): 494—498.
- [7] 孙业乐，庄国顺，袁蕙，张兴赢，郭敬华. 2002年北京特大沙尘暴的理化特性及其组分来源分析[J]. 科学通报. 2004, 49 (4): 340—346.
- [8] 庄国顺，郭敬华，袁蕙，张兴赢. 大气海洋交换中的铁硫耦合反馈机制[J]. 科学通报. 2003, 48(4): 313—319.
- [9] 黄美元，王自发. 东亚地区黄沙长距离输送模式的设计[J]. 大气科学. 1998, 22: 625—637.
- [10] Hubert, B. J. , T. Bates , P. B. Russell et al. An overview of ACE-Asia: strategies for quantifying the relationships between Asia aerosols and their climatic impacts . J. Geophys. Res. , ACE-Asia Special Issue A . 2003.