

## 沙尘气溶胶对塔里木盆地降水的可能影响

韩永翔<sup>1,2\*</sup>, 陈勇航<sup>3</sup>, 方小敏<sup>2</sup>, 赵天良<sup>4</sup> (1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; 3. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 4. 加拿大环境署空气质量研究部, Toronto, Ontario M3H 5T4, 加拿大)

**摘要:** 通过分析塔里木盆地沙漠的风积地貌, 结合近 40 年气象站的风况观测资料, 探讨了沙尘暴形成的大气环流特征。研究结果表明, 从天气学理论上来看, 降水和沙尘暴天气相伴而生。在年际时间尺度以上, 沙尘暴发生日数与降水存在显著的负反馈机制。然而降水抑制沙尘暴发生的理论无法解释在月际尺度内降水与沙尘暴呈正相关的事实。通过分析云量、沙尘凝结核以及卫星计算的云滴有效半径表明, 由于沙尘气溶胶可以长时间悬浮在大气中并作为凝结核, 使云中的水汽分布到更多的粉尘颗粒中, 导致空中云滴有效半径剧减而无法达到形成降水的阈值, 从而抑制降水的产生。这从理论上可以很好地解释上述矛盾, 为解释降水和沙尘的互反馈机制提供了新的理论。

**关键词:** 塔里木盆地; 沙尘凝结核; 云滴有效半径; 沙尘暴

**中图分类号:** X16      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6923(2008)02-0102-05

**The possible effect of dust aerosol on precipitation in Tarim basin.** HAN Yong-xiang<sup>1,2\*</sup>, CHEN Yong-Hang<sup>3</sup>, FANG Xiao-min<sup>2</sup>, ZHAO Tian-liang<sup>4</sup> (1. Lanzhou Arid Meteorological Institute of China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. College of Environmental Sciences and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 4. Air Quality Research Branch, Meteorological Service of Canada, Toronto, Ontario M3H 5T4, Canada). *China Environmental Science*, 2008, 28(2): 102~106

**Abstract:** The characteristics of atmospheric circulation when dust storms occurred was discussed by analyzing the data of prevailing wind direction observed at the 25 surface stations for about 40 years and the Taklimakan Desert's shapes of dune which could show the prevailing wind direction in the Tarim basin during dust storm period. The mechanism to form dust storm and precipitation was almost same according to the principle of synoptic meteorology, namely, the dust storm and precipitation could occur simultaneously in theory. But, in inter-annual and longer time scale, there was a significant negative feedback mechanism between the number of dust storm days and precipitation. It was reverse compared with the positive feedback mechanism from the principle of synoptic meteorology. The theory that precipitation suppresses dust storm occurring might explain these facts that the negative relationship between the number of dust storm days and precipitation in inter-annual and long time scale, but could not explain the observed fact that the relationship was positive in monthly scale. By analyzing the cloud coverage, dust condensation nucleus and cloud drop effective radius from the Aqua satellite data, a mass of dust aerosol as condensation nuclei effectively caused the reduction of cloud drop effective radius to fail to reach the threshold and thus suppressed the precipitation. The theory may be a good explanation of the above-mentioned logic contradiction and provides a new view of the mechanism of feedback between precipitation and dust aerosol.

**Key words:** Tarim basin; dust condensation nuclei; cloud drop effective radius; dust storm period; precipitation

大气中的沙尘气溶胶作为云中的冰核和凝结核, 对一定区域的降水以及气候的变化产生影响, 但沙尘的这种间接气候效应具有不确定性。一种观点认为大气中粉尘的增加有利于凝结核的产生, 从而产生更多的降水<sup>[1-2]</sup>, 此猜测得到了数

值模拟的支持<sup>[3]</sup>。然而 Rosenfeld 等<sup>[4]</sup>在撒哈拉沙

收稿日期: 2007-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40675053); 国家“973”项目(2005CB422000); 干旱基金(IAM200714)

\* 责任作者, 研究员, han-yx66@126.com

漠地区进行的实验表明,大气中粉尘的增加导致云中的水汽分散到更多的粉尘颗粒中,这反而难以形成更大的雨滴降落,从而抑制降水的产生。Rosenfeld 等有关沙尘抑制降水的机制是否在塔克拉玛干沙漠也同样成立,至今没有见到任何的工作。由于塔克拉玛干沙漠中的沙尘可远程传输到北太平洋和北极地区<sup>[5-6]</sup>,其南、西、北面分别被海拔 4000~5000m 的昆仑山、帕米尔高原、天山所包围,特殊的地形使沙尘暴非常容易形成,成为中亚沙尘发生频率最高的地区<sup>[7-9]</sup>。作者前期通过分析塔克拉玛干沙漠的风积地貌,结合沙漠边缘绿洲气象站 40 年的风况观测资料,重建了塔里木盆地中的风场,探讨了塔里木盆地沙尘暴形成的大气环流特征<sup>[8,10]</sup>。在此基础上,结合沙漠边缘绿洲气象站及沙漠腹地短期气象观测资料,探讨了沙尘暴与降水的互反馈机制。

## 1 塔里木盆地降水与沙尘暴形成的天气学原理

在暖季(春、夏)的晴日,盆地下垫面受到太阳辐射使近地面空气温度升高,空气密度变小,湍流加强,大气形成垂直厚度不足 1000m 的浅薄热低压<sup>[9,11]</sup>。这种热低压一般不会形成区域性沙尘暴过程,但它是降水和沙尘暴天气形成的必要条件。

当从西方或西北方来的冷空气较弱时,不能翻越帕米尔高原和天山,主要从盆地的东部路径进入盆地。盆地东部和西北部的暖空气被迫抬升或向西部和南部流动,从而在东部和西北部形成稳定的空气层结。同时,冷气团和暖气团之间形成温度梯度,也使得气流向西南部流动。动力和热力作用使得暖空气在盆地西南部积聚,因盆地的地形作用,在西南部形成了呈逆时针旋转的弱低压性质的上升区,最终在克里雅河(于田附近)和柯坪分别形成风速辐合区,前者因是主气流所形成,强度和区域远大于后者。当强冷空气入侵时,气流从塔里木盆地的东部、西部和中部均可入侵塔里木盆地。这 3 股强冷空气进入盆地后下沉,形成高压性质的顺时针旋转的风场,它们在沙漠腹地相遇,形成倒“人”字型的风速切变线并在沙漠中西部摆动,锋前盆地的暖空气被向南激烈抬升<sup>[8]</sup>,由于北部昆仑山的存在,各个方向的风将携带沙尘

的气流压向以于田为中心的区域,暖空气最终在和田—于田—民丰一带辐合,形成椭圆形的辐合上升区,此区域中的风必然携带沙尘呈强烈的上升状态。同时,由于西部和中部的气流进入盆地后,在柯坪一带也形成了强大的辐合上升区,但范围和强度要小得多。

根据普通的天气学原理,辐合上升气流携带水汽、沙尘升入空中,形成局地降水或沙尘暴或扬沙天气。从风速切变线和辐合上升区的位置,推断沙尘暴或扬沙天气出现频率较高的应该在盆地西南部以及沙漠腹地<sup>[8]</sup>,这已经被观测事实所证明,沙漠腹地、南部、西部的沙尘暴远高于北部<sup>[8-9,11-12]</sup>。同样,降水概率最高的范围也应在盆地的西南部,并且沙漠腹地应该有较大的降水,并非是“死亡之海”。因此,在塔里木盆地,降水和沙尘暴天气学的形成机理是完全一致的,即理论上降水和沙尘暴天气相伴而生,而且发生区域大体相同。

这一推理得到了一些观测事实<sup>[13]</sup>的支持。沙漠边缘绿洲气象站观测资料的分析表明最大的雨区出现在西南部<sup>[12-13]</sup>，“死亡之海”也有较大的降水,如 1991~1997 年连续的 TIROS-N/NOAA 气象卫星观测到沙漠腹地中雨迹平均每年达 11 次,夏季占总次数的 80.8%,春秋只有 19.2%,雨迹的分布在沙漠腹地出现的次数占总次数的 52.5%,沙漠西部 20.5%<sup>[14]</sup>。短期的观测也表明,降水与沙尘相伴而生,呈现出正相关,如沙漠腹地塔中站(39°00'N,83°40'E)1996~1998 年将 3 年中既无沙尘暴又无降水的 8 个月份剔除,发现在月际尺度上,降水与沙尘暴有很好的相关。在有降水或沙尘暴发生的 16 个月内,沙尘暴伴随降水的月份为 11 次,有沙尘暴无降水的次数为 3 次,有降水而无沙尘暴的仅 2 个月,沙尘暴最多月对应最多的降水量月和降水日数,降水与沙尘暴有非常好的正相关<sup>[15]</sup>。盆地南部的和田是塔里木盆地沙尘的汇聚区,浮尘天气占主要优势。2003 年 7 月到 2004 年 6 月的观测表明,同样,在月际尺度上,此区的降水量同浮尘日数有非常好的正相关,相关系数达 0.62<sup>[16]</sup>(图 1)。因此,从天气学的角度来看,这些观测事实证明降水和沙尘暴相伴而生的天气学推

理具有合理性。

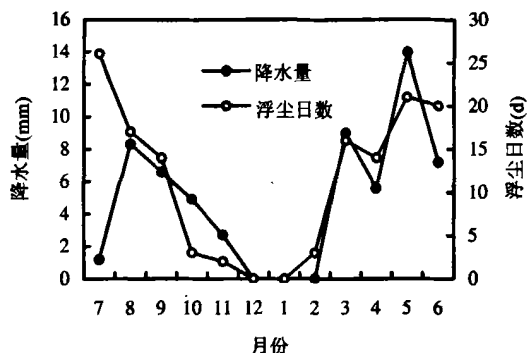


图1 2003年7月~2004年6月和田浮尘日数与降水量的关系

Fig.1 Relation between the days of floating dust and precipitation from July 2003 to June 2004 in Hetian  
据文献[16]改绘

## 2 降水与沙尘暴的气候关系

根据塔里木盆地 1961~2000 年 40 个地面气象观测站的资料,计算了 40 年来的降水量和沙尘暴日数的 2 个序列年变化,其结果同刘明哲等<sup>[17]</sup>相近。从 1961 年开始,降水量呈现出波动上升的趋势,而沙尘日数却呈现出波动下降的趋势。降水和沙尘暴日数 40 年的相关分析(图 2),表明沙尘暴日数与降水量呈显著的负相关,相关系数达  $-0.44$ ,通过了 0.05 的信度检验。

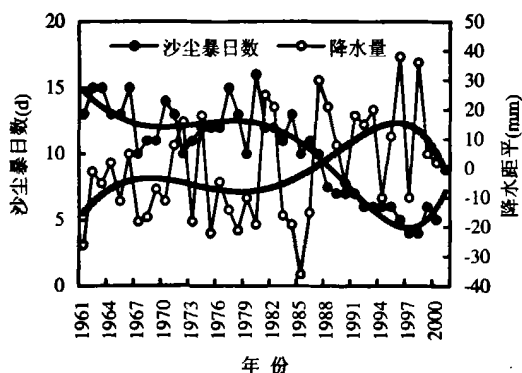


图2 塔里木盆地 40 站 1961~2000 年沙尘暴日数与降水距平的年际变化

Fig.2 Temporal change of annual precipitation and the days of dust storms in Tarim basin

为了解其长期变化,采用 5 次多项式分别提取了它们的趋势并进行了相关分析,二者之间的相关系数达到了  $-0.978$ ,通过了 0.0001 的信度检验,反转的降水趋势线同沙尘暴日数趋势线几乎一致。这一统计事实表明,时间尺度越长,沙尘暴与降水的负相关越显著。但这种相关分析并无法说明到底是降水抑制了沙尘暴的发生还是沙尘抑制了降水,其机理难以被相关分析所阐明。

综上所述,在年际或以上的的时间尺度内,沙尘暴与降水存在显著的负反馈机制,它与天气学推理并得到观测事实证明的降水和沙尘暴天气相伴而生的正反馈机制完全相反。

## 3 讨论

降水抑制了沙尘暴发生的理论可以解释年际及以上时间尺度的沙尘暴日数与降水量为负相关的事实,但无法解释在月际尺度内降水与沙尘暴呈正相关的事实。由于塔里木盆地年降水量大多在 50mm 以下且蒸发非常强烈<sup>[12-13]</sup>,几 mm 到几十 mm 的雨水在一个月内很快被蒸发掉。因此,从逻辑上来讲,降水对沙尘的抑制作用应该在月际时间尺度内更强,但观测表明二者却为正相关。这说明降水抑制沙尘暴的理论在塔里木盆地这个特殊地域内,其作用是非常有限的。推测形成这种矛盾的主要因素就是没有考虑沙尘气溶胶的云凝结核或冰核效应。

扬升的沙尘以游离态存在于大气中,大颗粒靠重力自然降落,小颗粒则在空气浮力和静电场作用下,长时间滞留于大气中,只有通过降水才会以湿沉降的方式降落到地面形成“雨土”<sup>[18]</sup>。通常认为,大气中悬浮的细粒粉尘可存在 1~2 周,但和田 2003 年 12 月~2004 年 1 月观测期间 2 个月没有沙尘暴和浮尘天气,能见度都大于 10km,但仍有  $207\sim 231\text{kg/hm}^2$  的自然降水<sup>[16]</sup>,这一事实提示在 2 个月内有大量的细粒粉尘在大气中悬浮。这些长时间悬浮在大气中的沙尘粒子可以作为云的凝结核或冰核,从而影响降水。Sassen<sup>[19]</sup>的研究表明,在适当的过冷高积云中,来自亚洲的沙尘与冰核的形成有很好的相关。在以色列,当沙尘暴发生期间,冰核的

浓度也相对增加<sup>[20]</sup>。在美国的佛罗里达州的研究表明,当非洲沙尘越过大西洋到达佛罗里达州时,在含沙云中,冰核的数量超过了  $1\text{cm}^{-3}$ ,是正常的冰核数量( $0.01\sim 0.05\text{cm}^{-3}$ )的 50~100 倍<sup>[21]</sup>。而中国北方,游来光等<sup>[22]</sup>也观测到沙尘暴发生时,冰核浓度是正常情况的 5.5~87 倍。

塔里木盆地作为亚洲降水稀少且沙尘暴发生最频繁的地区之一,属于封闭性盆地,特殊的地理位置使细粒粉尘在大气中存在的时间有可能超过了 2 个月,因此,作为沙尘源区的塔里木盆地供给大气的凝结核或冰核数量要远远超出沙尘远程传输区的北美佛罗里达州。同时,昆仑山北坡的黄土在 2900~3400m 左右最厚,在 3400m 以上厚度迅速减小,在 5340m 仍有分布,表明塔里木盆地在长时间尺度上沙尘的扬升高度在 2900~3400m 左右,强沙尘暴能够将粉尘扬升到 5500m 的西风急流区<sup>[8,10,23]</sup>。长期的观测表明盆地中云底的平均高度为低云 2200m;中云 3300m;高云 5700m<sup>[12]</sup>,所以在塔里木盆地,扬升的粉尘至少可以成为中、低云的凝结核,对降水产生影响。为了验证这种关系,选取了盆地边缘地区的 6 个代表站点(铁干里克代表东部;库车和阿克苏代表北部;喀什代表西部、于田和且末代表南部)1961~2000 年气象观测记录的总云量和低云量,其平均值可代表塔里木盆地云量的变化。发现不管是总云量还是低云量,它们与降水量均呈正相关,但低云量与降水量的相关远好于总云量,相关系数达 0.63,通过了 0.01 的信度检验,而总云量与降水仅 0.4,仅通过了 0.05 的信度检验,降水同低云的关系更密切。同时,沙尘暴日数同总云量无明显的相关,但却与低云量有非常高的负相关(图 3),二者的相关系数达 -0.6,通过了 0.01 的信度检验。这一事实表明扬升的粉尘对盆地中的云、尤其是低云能否形成降水产生了重要的影响。

利用 ICCP D2(1983.07~2001.09)的卫星数据,其计算的塔克拉玛干沙漠区水云水滴有效半径年变化为沙尘抑制降水提供了依据,其全年水滴有效半径均  $<10\mu\text{m}$ ,远小于引起云中降水所需要的临界水滴有效半径  $14\mu\text{m}$ <sup>[4,24]</sup>,形成降水的概率非常小。这意味着塔克拉玛干沙漠区空中水资源

非常缺乏,大量的沙尘气溶胶滞留在高空,大大增加了云中的凝结核,使云中的水汽分布到更多的粉尘颗粒中,必然使空中云滴有效半径剧减,从而抑制降水的产生。

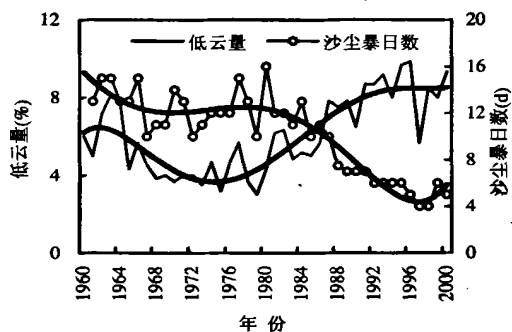


图 3 塔里木盆地低云量与沙尘暴日数

Fig.3 Temporal changes of low cloud and the days of dust storms in Tarim basin

在天气学尺度内,塔里木盆地降水和沙尘暴相伴而生。然而图 1 中的降水量同浮尘日数虽有显著的正相关,但月降水量最大仍没有超过 15mm,如果将  $>5\text{mm}$  月降水量与同期的月浮尘日数相除,则每次沙尘过程平均降水不超过 1mm,过量沙尘气溶胶抑制了降水的量级,推测沙尘暴的发生次数可能与降水的场次或弱降水相匹配。天气过程是气候系统的短期反映,当气候背景发生变化时,因沙尘气溶胶可以长时间悬浮在大气中,其抑制降水的效应得以凸现。研究表明,塔里木盆地的沙尘发生次数同温度呈现出显著的负相关<sup>[15]</sup>。当温度低时,四周山地冰川消融和蒸发减缓,盆地中大气水汽含量少,而沙尘含量高,过量的沙尘作为云凝结核或冰核抑制了降水的产生;当温度高时,冰川消融和蒸发加剧,水汽含量多,但沙尘含量低,少量的沙尘粒子增加使云中的凝结核增加,从而使潜在降水转化为有效降水的效率提高。在较长的时间尺度内,沙尘抑制降水的效应可以较好地解释沙尘发生日数与降水为负相关的观测事实。沙尘气溶胶抑制降水的理论,为解释降水和沙尘的互反馈机制提供了新的途径。

## 4 结论

4.1 在塔里木盆地的降水和沙尘暴天气过程相伴而生,而且发生区域大体相同。

4.2 在年际或以上的尺度内,沙尘暴与降水存在显著的负相关,它与天气学推理并得到观测事实证明的降水和沙尘暴天气相伴而生的正相关机制完全相反。

4.3 由于沙尘气溶胶可以长时间悬浮在大气中并作为凝结核,导致空中云滴有效半径剧减而无法达到形成降水的阈值,从而抑制降水的产生,为解释降水和沙尘的互反馈机制提供了新的理论。

## 参考文献:

- [1] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 2001,294:2114-2119.
- [2] Rosenfeld Daniel. Atmosphere: Aerosols [J]. *Clouds and Climate Science*, 2006,312(5778):1323-1324.
- [3] Yin Y, Levin Z, Reisn T G, et al. The effects of giant cloud condensation nuclei on the development of precipitation in convective clouds—a numerical study [J]. *Atmos. Res.*, 2000,53: 91-116.
- [4] Rosenfeld D, Rudich Y, Lahav R. Desert dust suppressing precipitation—a possible desertification feedback loop [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2001,98:5975-5980.
- [5] Iwasaka Y, Yamato M, Imazu R, et al. Transport of Asian dust particles; Importance of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles [J]. *Tellus Ser. B.*, 1988, 40:494-503.
- [6] Han Yongxiang, Xi Xiaoxia, Fang Xiaoming, et al. Dust storm in Asia continent and bio-environment effects in the North Pacific: A case study of the strongest dust event on April 2001 in Mid-Asia [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006,51(6):723-730.
- [7] Sun Jimin, Liu Tungsheng. The age of the Taklimakan Desert [J]. *Science*, 2006,312:1621.
- [8] 韩永翔,方小敏,宋连春,等.塔里木盆地中的大气环流及沙尘暴成因探讨—根据沙漠风积地貌和气象观测重建的风场 [J]. *大气科学*, 2005,29(4):627-635.
- [9] 陈洪武,王旭,马禹.塔里木盆地局地性和区域性强沙尘暴天气过程研究 [J]. *中国沙漠*, 2003,23(5):533-538.
- [10] 韩永翔,方小敏,宋连春,等.塔里木盆地大气环流及昆仑山北坡黄土堆积 [J]. *中国沙漠*, 2006,26(3):351-355.
- [11] 王训明,董治宝,陈广庭.塔克拉玛干沙漠中部部分地区风沙环境特征 [J]. *中国沙漠*, 2001,21(1):56-61.
- [12] 李江风.沙漠气候 [M]. 北京:气象出版社, 2001:44-79.
- [13] 张家宝,邓子风.新疆降水概论 [M]. 北京:气象出版社, 1987:149-255.
- [14] 徐希慧.塔里木盆地沙尘暴卫星云图特征分析 [J]. *甘肃气象*, 1997,15(2):1-3.
- [15] 薛红,胡列群,王旭.塔中地区沙尘暴天气气候学分析 [J]. *新疆气象*, 1999,22(3):13-15.
- [16] 赵丹丹,关欣,李巧云,等.新疆和田降尘的时空分布与影响因素 [J]. *新疆农业大学学报*, 2005,28(2):14-17.
- [17] 刘明哲,魏文寿.南疆近 60 年来的气候变化及其对沙尘暴发生条件的影响 [J]. *干旱区地理*, 2005,28(4):479-483.
- [18] Zhao T L, Gong S L, Zhang X Y, et al. Modeled size segregated wet and dry deposition budgets of soil dust aerosol during ACE-Asia 2001: Implications for trans-Pacific transport [J/OL]. *J. Geophys. Res.*, 2003,108(D23),8665,doi:10.1029/2002JD003363.
- [19] Sassen K. Indirect climate forcing over the western US from Asian dust storms [J/OL]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002,29(10), doi: 10.1029/2001GL014051.
- [20] Sassen K, DeMott P J, Prospero J M, et al. Saharan dust storms and indirect aerosol effects on clouds: CRYSTAL-FACE results [J/OL]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003,30(12), 1633, doi:10.1029/2003GL017371.
- [21] Demot P J, Sassen K, Poellot M R, et al. African dust aerosols as atmospheric ice nuclei [J/OL]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003,30(14): 1732, doi:10.1029/2003GL017410.
- [22] 游来光,杨绍忠,王祥国,等.1995 和 1996 年春季北京地区大气冰核浓度的观测与研究 [J]. *气象学报*, 2002,60(1):105-109.
- [23] Fang Xiaomin, Han Yongxiang, Ma Jinghui, et al. Dust storms and loess accumulation on the Tibetan Plateau: A Case study of dust event on 4 March 2003 in Lhasa [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 2004, 49(9):953-960.
- [24] Rosenfeld D, Gutman G. Retrieving microphysical properties near the tops of potential rain clouds by multispectral analysis of AVHRR data [J]. *Atmos. Res.*, 1994,34:123-150.

作者简介: 韩永翔(1966-),男,甘肃民勤人,研究员,博士,主要从事沙尘气溶胶和气候变化研究,发表论文 50 余篇。