

戴进, 余兴, Rosenfeld Daniel, 等. 秦岭地区气溶胶对地形云降水的抑制作用. 大气科学, 2008, **32** (6): 1319~1332

Dai Jin, Yu Xing, Rosenfeld Daniel, et al. The suppression of aerosols to the orographic precipitation in the Qinling Mountains. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (6): 1319~1332

秦岭地区气溶胶对地形云降水的抑制作用

戴进¹ 余兴¹ Daniel ROSENFELD² 徐小红¹

¹ 陕西省气象科学研究所, 西安 710015

² 以色列耶路撒冷希伯来大学地球科学学院

摘 要 以华山站为影响站, 周围的西安、渭南和华阴作为对比站, 通过影响站与对比站降水之比——地形强化因子 (R_o) 的变化趋势以及 R_o 与能见度关系的分析, 定量研究了秦岭地区气溶胶对地形云降水的抑制作用。 R_o 的演变分析表明: 有观测以来 R_o 逐年递减, 减幅为 14%~20%, 即影响站与对比站相比降水量减少了 14%~20%; R_o 的减少趋势与能见度递减、气溶胶递增相吻合, 说明气溶胶的增加抑制了地形云降水。 R_o 的递减主要是减少了中小雨 (日雨量小于 30 mm) 的天数, 这种影响对浅薄的生命期较短的地形云降水作用更明显, 对于华山站, 30 mm 以下的降水都会受到入云气溶胶的抑制作用, 而西安站为 5 mm 以下, 入云气溶胶浓度越高, 就有越厚的降水云受气溶胶影响而抑制降水; 在以动力强迫抬升为主的春秋季节, 气溶胶抑制华山地形云降水 20% 左右, 最大可达 25%; 在热对流条件下, 气溶胶对地形云和对平原地区云的抑制作用基本相当。不同风速风向向下 R_o 的变化趋势表明, R_o 递减随风速增大而加快, 迎风向 (240°~30°) 大风 (≥ 5 m/s) 时减少降水超过 30%。由 R_o 与能见度关系的定量分析发现, 当能见度在 14 km 时 R_o 为 1.8 左右, 随着能见度的降低 R_o 逐渐减小, 当能见度小于 8 km 时, R_o 约为 1.2, 减小了 30% 左右; 华山对于华阴的 R_o 与能见度呈线性关系, 相关系数达 0.81。最后, 根据研究结果归纳出气溶胶抑制秦岭地区地形云降水的初步物理模型。

关键词 气溶胶 地形云降水 地形强化因子 (R_o) 能见度 抑制

文章编号 1006-9895 (2008) 06-1319-14

中图分类号 P426

文献标识码 A

The Suppression of Aerosols to the Orographic Precipitation in the Qinling Mountains

DAI Jin¹, YU Xing¹, Daniel ROSENFELD², and XU Xiaohong¹

¹ Meteorological Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710015

² Institute of Earth Sciences, Hebrew University of Jerusalem, Israel

Abstract Based on the dataset of observations of precipitation, visibility and winds since 1954 at the top of Huashan Mountain, the ratio between the precipitation at Huashan Mountain and at the nearby plain stations, which is defined as the orographic enhancement factor (R_o), and the relationship between R_o and visibility, were used to quantitatively study the ways that air pollution aerosols suppress orographic precipitation. R_o decreased 14%-20% gradually during the measurement period, which means that the precipitation at the top of Huashan Mountain decreased 14%-20% compared with the precipitation at the plains stations. The indicated trend of R_o matched well with the decreasing visibility and increasing aerosol, which suggests that enhanced pollution aerosols suppress the orographic

收稿日期 2007-04-10, 2007-07-19 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40575004, 科技部公益项目 2005DIB3J099

作者简介 戴进, 男, 1966 年出生, 硕士, 研究领域: 云降水 and 人工影响天气. E-mail: daijohn@msn.com

precipitation. The decreasing trend of R_o is mainly caused by days of the light and moderate rain (daily precipitation less than 30 mm), but not by days with precipitation more than 30 mm, which suggested that the thin short living orographic clouds are much more susceptible to precipitation suppression by air pollution aerosols. The precipitation less than 30 mm and 5 mm, respectively, can be affected by the aerosols entering the clouds for Huashan Mountain and Xi'an stations, which suggests that the more aerosols enter the clouds, the deeper precipitation clouds will be influenced by the aerosols to suppress the precipitation. In the spring and autumn when dynamical lifting plays the leading role, the suppression of aerosol to clouds at the mountain top is stronger than that in plains, and causes about 20% decrease with a maximum of 25% in precipitation at Huashan Mountain. In the summer for the thermodynamically driven clouds, the suppression of aerosol to the clouds at the mountain top and in plains is equivalent. The variations of R_o in different wind directions show that the decreasing trend of R_o increases with the wind speed, and the decrease of orographic precipitation exceeds 30% for 240–030 wind direction and wind speed greater than 5 m/s. The quantitative analyses of R_o and visibility show that R_o decreases from about 1.8 to 1.2 when the visibility changes from 14 to 8 km, and the decrement exceeds 30%. R_o at Huashan Mountain to Huayin stations is linearly correlated with the visibility, and the regression coefficient is 0.81. Finally, a brief physical model that aerosols suppress orographic precipitation is summarized based on the results.

Key words aerosol, orographic precipitation, orographic enhancement factor (R_o), suppression

1 引言

随着社会的发展,人类活动向大气中排放的气溶胶越来越多。近年来,大气气溶胶增加导致的天气、气候变化等问题成为科学家关注的一个重要领域。气溶胶通过对云的影响,改变其辐射和光学特性,对气候与气候变化产生间接影响,同时,也改变降水形成的物理过程。

气溶胶对云降水的影响主要是通过云凝结核(CCN)和冰核实现的,在排入大气数小时后,气溶胶活化成 CCN 主要取决于其大小,而对其化学成份和来源不太敏感^[1]。人类活动增加了大气中的气溶胶,也增加了 CCN 的数目^[2,3]。CCN 的增加导致小云滴浓度增大,云滴半径显著减少,影响云滴碰并,阻碍降水的发展,抑制了降水^[4~6],改变了降水形成的物理过程和降水量分布^[7,8]。Kaufman 等^[9]在污染云中观测到:云滴浓度增加,云滴有效半径显著减少(从 15 μm 减少到 9 μm);Marittinson 等^[10]在污染的地形云中,也观测到云粒子浓度大量增加(最大可达 2000 cm^{-3} ,粒子有效半径显著减小)的现象。Andreae 等^[6]对 4 个不同气溶胶含量对流的云研究表明,气溶胶含量越高云滴谱越窄;Freud 等^[11]发现,森林大火的烟气气溶胶导致对流云要产生降水,云顶高度至少要发展到 4 km 以上,而对于清洁的对流云,顶高 1~2 km 就可以产生降水;在 0.5% 过饱和度下,若云中 CCN 增加

100 个/ cm^3 ,则形成暖云降水的平均云厚需增加大约 350 m。Rosenfeld 等观测到受森林大火烟气污染的云中,高浓度气溶胶粒子导致云顶温度高于 -10°C 的对流云降水完全切断^[12,13],在印度和澳大利亚的污染云中也观测到气溶胶抑制降水的现象^[4,14]。Borys 等^[5]研究表明,在科罗拉多州洛矶山脉干净大气中加入 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 硫酸盐气溶胶,地形降雪减少达 50%。

国内的研究主要集中在气溶胶光学厚度、谱分布特征、成分等理化性质和气溶胶与气候效应的数值模拟等方面^[15~19],在对降水的影响方面较少。黄梦宇等^[20]对 1990 和 1991 年春秋两季层状云探测的分析结果表明,云下气溶胶数浓度与云滴数浓度存在正相关。王京丽等^[21]对北京市 2001 年大气气溶胶小粒子与能见度的同步观测分析后认为,能见度与小粒子的质量浓度($\text{PM}_{2.5}$)呈现出很好的负相关性,小粒子增加是造成能见度下降的主要原因。

随着社会经济的发展,我国污染物排放总量不断增加,许多监测表明我国污染物中小粒子 $\text{PM}_{2.5}$ 有增加的趋势^[15]。已有的研究表明,气溶胶小粒子(直径 2.5 μm 以下)的增加会触发抑制降水,而气溶胶大粒子(直径在 2.5 μm 以上)会有利于增加降水^[22]。

Givati 和 Rosenfeld^[23]利用高山站及其附近的平原站的降水量之比——地形强化因子(R_o)研究了 California 和以色列冷季的地形云降水受气溶胶

的影响,降水量减少了 15%~25%。Lynn 等^[24]利用显式微物理云模式模拟了气溶胶对内华达山脉地形云降水的抑制作用,证明了 Givati 和 Rosenfeld^[23]提出的影响机制的可信性。Rosenfeld 和 Givati^[22]将研究范围扩展到整个美国西部,在 California 和 Oregon 北部污染较少的地区, R_o 保持稳定,但人口稠密、工业发达的东部 R_o 减小。 R_o 的这种减少趋势与诸如 El Niño、La Niña 等的环流变化没有太大的关系, R_o 的下降趋势是与气溶胶小粒子浓度增加紧密相联的。而 California 的飞机探测^[25]表明人类活动产生的气溶胶确实与云发生了相互作用,抑制了降水的形成过程。

秦岭是我国北方干冷空气南下和南方温暖空气北上的自然屏障,是地理、地质、水文、生态、环境和气候的天然分界线。秦岭地区的降水属于典型的地形云降水,而其周围如西安等大城市所排放的气溶胶通过地形的强迫抬升容易进入云中,对降水产生影响,故该地区是研究气溶胶对地形云降水影响的理想区域。

2 研究方法

要从影响降水的诸多因素中找出气溶胶对降水的影响量,一种方法就是在受气溶胶影响程度高的地方选择一个影响站,而在其附近受气溶胶影响程度低的地方选取若干个对比站(使分析结果具有更

好的代表性),那影响站和对比站的天气和环流形势就会非常相似,当影响站与对比站的降水量高度相关时,则 R_o 的变化能够主要反映气溶胶对降水的影响。

华山(图 1)位于秦岭山脉的东北部,其西北方的西安、渭南、华阴位于关中平原。由于地形的强迫抬升,气流在迎风坡爬升的过程中,易将低层堆积的气溶胶粒子带入云中,大大增加了地形云中凝结核数量,影响云降水。而平原地区由于没有地形的强迫抬升,低层的气溶胶粒子只能通过湍流扩散或者热力抬升入云,加之云底一般离地有好几百米高,大多在大气边界层顶以上,使得入云的气溶胶浓度较低,因此地形云比平原地区的云更容易受气溶胶影响,且受影响的程度更高。虽然这种影响是一个缓慢的过程,但这种缓变经过积累,再加上我国近 30 年来的快速发展所带来的气溶胶的明显增加,气溶胶对地形云降水的影响是可以显现出来的。因此选取受气溶胶影响程度较高的华山作为影响站,受气溶胶影响程度较低的西安、渭南、华阴作为对比站。

在研究气溶胶对降水影响中,表征入云的气溶胶特性的最理想资料应该是云底附近的气溶胶浓度与分布,但没有这方面的资料可用;其次也可以用地面 $PM_{2.5}$ 资料,它可以直接反映出近地面层起 CCN 作用的气溶胶 ($2.5\ \mu m$) 量,而入云的气溶胶

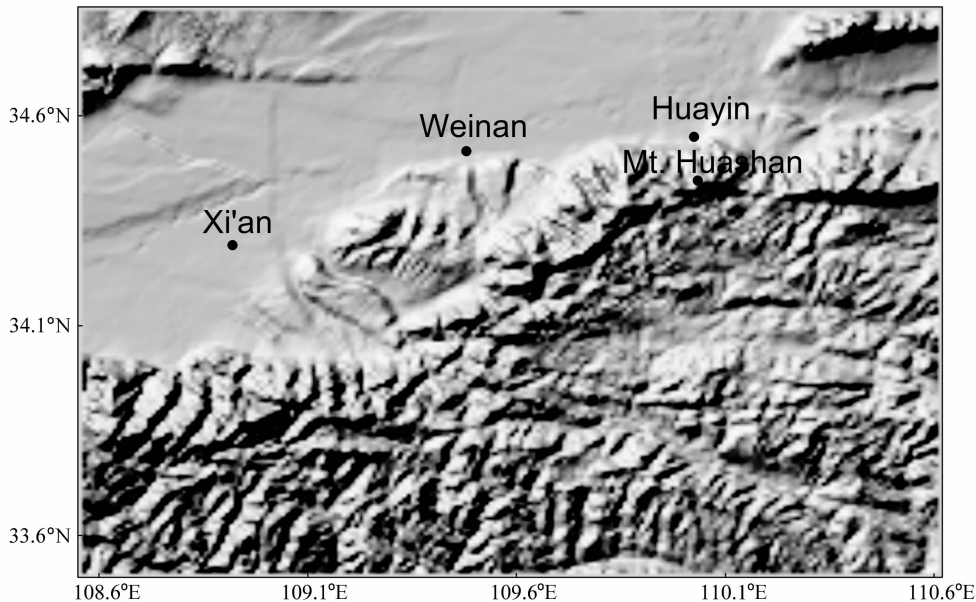


图 1 研究区域的地形特征和站点位置
Fig. 1 Topography and meteorological stations for the study area

量还取决于大气的湍流和热、动力状况等, $\text{PM}_{2.5}$ 也是一种间接反映; 另外, 用云底附近(华山站距地面 1600 m 左右)的水平能见度来表征入云的气溶胶量也是可行的, 因为能见度主要受气溶胶、相对湿度、降水和沙尘暴的影响, 而华山站受沙尘暴影响的天数非常有限, 当对能见度进行相对湿度和降水的订正后, 那么能见度就可以反映出入云气溶胶状况。因此, 本文选取华山站的能见度作为反映影响降水的气溶胶表征量, 来研究气溶胶对地形云降水的影响。

3 资料

本项研究所用的资料包括华山站逐日的风速风向、相对湿度、天气现象、能见度、日降水量等以及华阴、渭南、西安三站的降水资料。各站的地理信息和资料长度参见表 1。

能见度资料在 1980 年以前纪录单位为级, 1980 年以后单位为 km (见表 2)。为了统一, 能见度等级资料按表 2 中的能见度距离的平均值进行转换。在分析时对 1980 年前后的资料分别分析, 以

表 1 高山和对比站的地理信息和资料长度
Table 1 Geographic information and data length for the high-land and lowland stations

站名	测站海拔高度/m	资料长度
华山 (34°29'N, 110°05'E)	2064. 9	1954~2004 年
华阴 (34°33'N, 110°05'E)	351. 3	1970~2004 年
西安 (34°18'N, 108°56'E)	396. 9	1954~2004 年
渭南 (34°31'N, 109°29'E)	348. 8	1959~2004 年

表 2 1980 年能见度级和能见度距离的对应关系
Table 2 Corresponding visibility ranges for ten classes before 1980

能见度等级	能见度距离 V_{is} /km
0	$V_{is} < 0. 05$
1	$0. 05 \leq V_{is} < 0. 2$
2	$0. 2 \leq V_{is} < 0. 5$
3	$0. 5 \leq V_{is} < 1. 0$
4	$1. 0 \leq V_{is} < 2. 0$
5	$2. 0 \leq V_{is} < 4. 0$
6	$4. 0 \leq V_{is} < 10. 0$
7	$10. 0 \leq V_{is} < 20. 0$
8	$20. 0 \leq V_{is} < 50. 0$
9	$V_{is} \geq 50. 0$

避免系统性的差异。能见度是相对湿度、降水和气溶胶的函数。为了降低相对湿度对能见度的影响, 如果相对湿度 H_R 大于 40% 而小于 99%, 对能见度进行订正, 其订正公式^[26]为 $V_{is}/V_{cor} = 0. 26 + 0. 4285 \lg (100 - H_R)$, H_R 以百分数计, V_{is} 和 V_{cor} 为未订正和订正的能见度, 如果一天当中 4 次能见度观测期间, 都有不管何种形式的降水出现, 那这一天的能见度将会从订正的能见度时间序列中剔除。

文中分析所用的风速为华山站的风速, 将每日 4 次风的观测进行矢量合成, 得到逐日平均风向和风速。

4 结果分析

图 2 为华山站和 3 个对比站的相关图, 由图可见: 华阴与华山距离最近, 相关最好, 相关系数达 0. 84, 华山与西安距离最远, 相关较差些, 但相关系数也达 0. 75, 均能满足相关性要求。

4. 1 气溶胶抑制地形云降水的观测事实

4. 1. 1 年降水递减的事实

图 3 给出了影响站和各对比站的年降水量及 R_o 的变化趋势, 图中的 P 表示 R_o 变化的线性回归 t 检验的概率值, 此值愈小, 说明相关愈显著。由图 3 可见: (1) 各站年降水量都呈递减趋势, 1954~2004 年间, 华山和西安的斜率为 -6. 06、-1. 60; 1959~2004 年间, 华山和渭南的斜率为 -5. 32、-0. 64; 1970~2004 年间, 华山和华阴的斜率为 -8. 64、-2. 82, 这说明影响站华山降水递减明显快于对比站。从影响站递减快、对比站递减慢的结果来看, 降水的系统性变化不会导致这个结果, 也很难解释这种现象, 说明区域性降水的下降不会导致华山站的降水减少得这么多, 那么应该存在其他局地因素的影响, 使华山地形云降水递减比平原要大得多, 这其中的大部分原因是气溶胶增加引起的。(2) 以华阴、渭南、西安为对比站的 R_o 都呈现递减趋势, R_o 递减斜率分别为 0. 0062、0. 0072、0. 0062, 各站 R_o (2004 年) 与 R_o (起始年) 之比在 0. 80~0. 86 之间变化, 反映出这些年 R_o 减小了 14%~20%, 即影响站与对比站相比降水量减少了 14%~20%。

4. 1. 2 华山能见度递减事实

图 4 给出了逐日能见度 (4 次平均) 值和订正的能见度值, 其中 V_1 和 V_2 分别代表 1980 年前后两段能见度的拟合值。由图 4 可见: (1) 能见度观

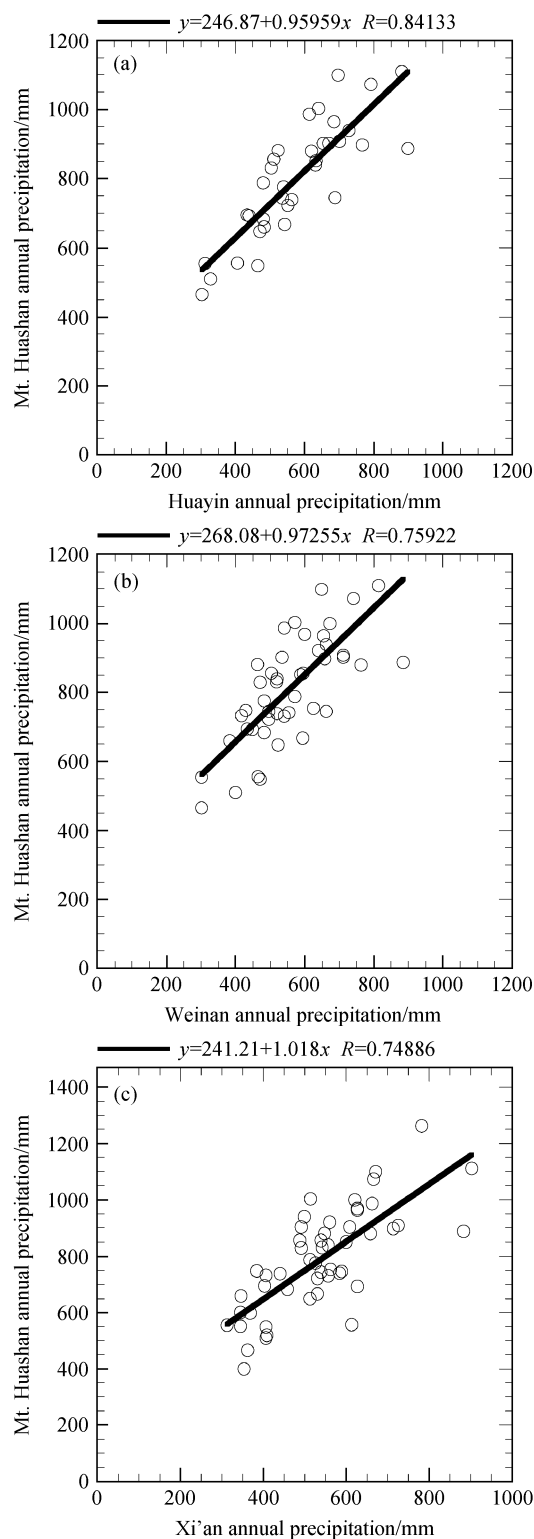


图2 华山站与3个对比站华阴(a)、渭南(b)、西安(c)年降水量的相关
Fig. 2 Regressions of annual precipitation between Mt. Huashan and the plain stations of (a) Huayin, (b) Weinan and (c) Xi'an

测方法的调整带来了明显的系统差异,分析时分为1980年前和1980年后两个时间序列;(2)订正和未订正的能见度都呈现出明显的下降趋势,反映了此段时间内大气气溶胶的增加趋势^[27, 28]; (3)1980年后、前未订正的能见度斜率分别为-0.203和-0.160,其比值为1.27,订正的能见度斜率分别为-0.321和-0.154,其比值达2.08,反映出1980年后能见度递减有加快趋势^[29]; (4)能见度的递减反映出空气污染程度增加、气溶胶浓度增大。Dusek等^[1]的观测研究表明,对于化学特性趋于稳定的气溶胶,大于100 nm的气溶胶数量和云中的CCN数浓度有很高的相关性。基于此,能见度的下降表明气溶胶的增加导致云中CCN增加,增加小云滴数量,减缓云水向雨水的转化,造成 R_0 的递减,与此同时,大的CCN($>2\text{ }\mu\text{m}$)形成的大云滴将会加快云水向雨水转化速率而增加降水,但模式研究结果表明大的CCN所增加的降水只能部分抵消小的CCN所抑制的降水^[30]。

由以上分析可以看出,在同一时期,能见度与 R_0 的递减趋势一致,由于 R_0 的变化主要反映气溶胶对降水影响,从这个意义上说,气溶胶的增加抑制了地形云降水,减幅达14%~20%。

为了进一步了解气溶胶抑制地形云降水,一是从日降水发生频率上分析抑制降水主要对哪类降水强度的天气产生影响;二是分析热力和动力作用下气溶胶抑制降水的差异;三是通过风速风向的分类,分析不同风速、风向条件下的抑制作用;四是通过 R_0 与能见度分析,建立统计关系。

4.2 气溶胶抑制降水的结果分析

4.2.1 降水日数的变化

对于华山站和3个对比站,10年际的小雨和中雨日数出现的概率都是减少的,并且减小的速率是随时间逐渐增加的。图5(见文后彩图)为西安和华山站低于对应于y轴上日降水强度日数的出现概率,由图可见:(1)华山站日降水大于1 mm的概率在1955~1964年的10年中为25%,到1995~2004年的10年中已经降为不足20%,即在过去的50年中,大于1 mm降水的日数减少超过了20%,10 mm以上的日降水概率从1955~1964年的8%降到1995~2004年的5%,即在过去的50年中,日降水10 mm以上的日数减少了1/3多,当日降水大于30 mm时,降水日数才基本不变;(2)

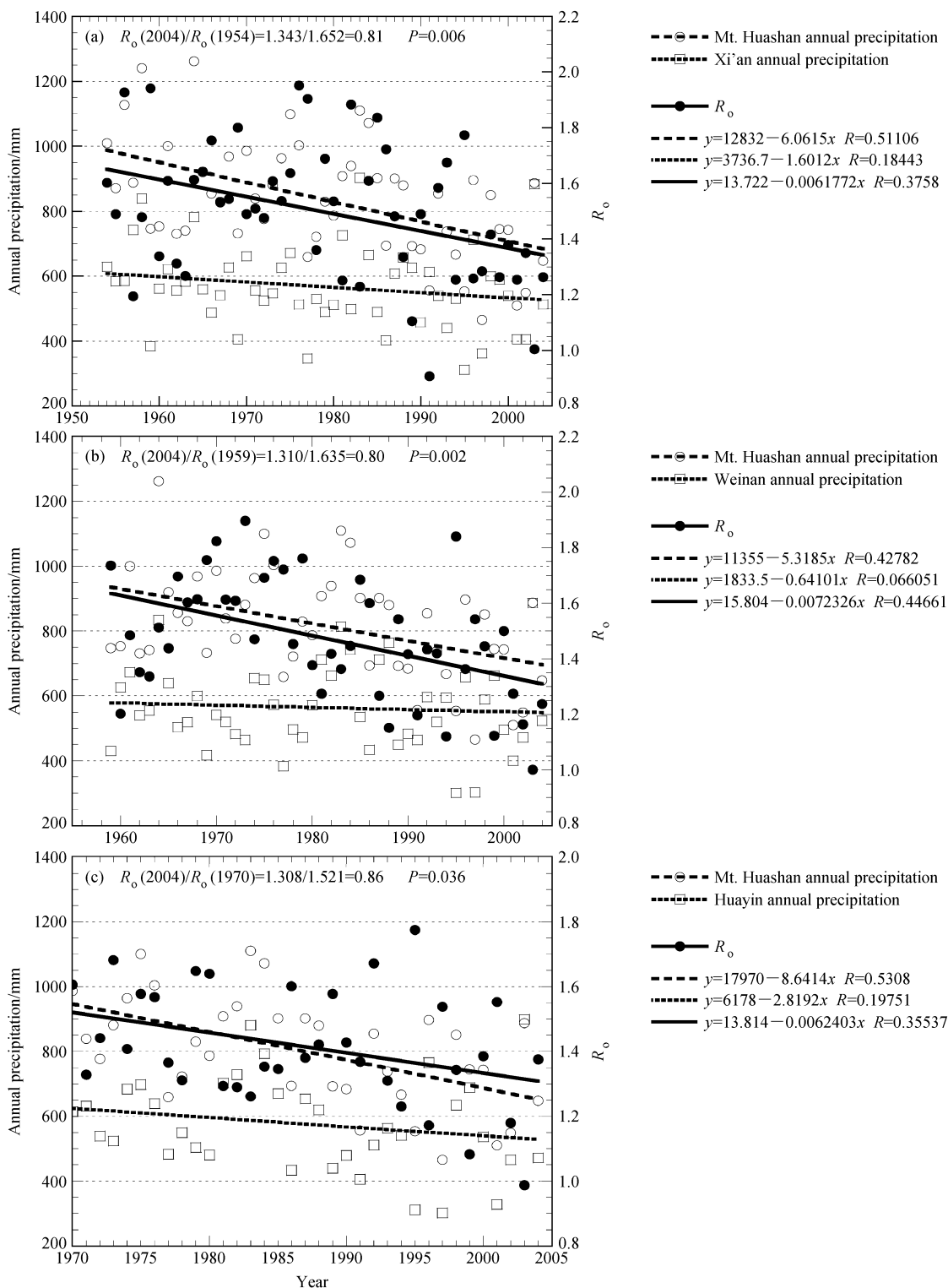


图3 华山站与3个对比站西安(a)、渭南(b)、华阴(c)年降水及 R_o 的变化趋势。 R 表示年降水量随时间变化的相关系数

Fig. 3 The trends of annual precipitations and their ratios between Mt. Huashan and the plain stations of (a) Xi'an, (b) Weinan and (c) Huayin. R stands for the regression coefficient of annual precipitation with time

西安站日降水大于1 mm的概率, 1954~1964年为19%, 到1995~2004年已经降为15%, 即日降水

大于1 mm的降水日数减小了21%, 而日降水大于5 mm的概率已没有变化, 表明气溶胶对西安站

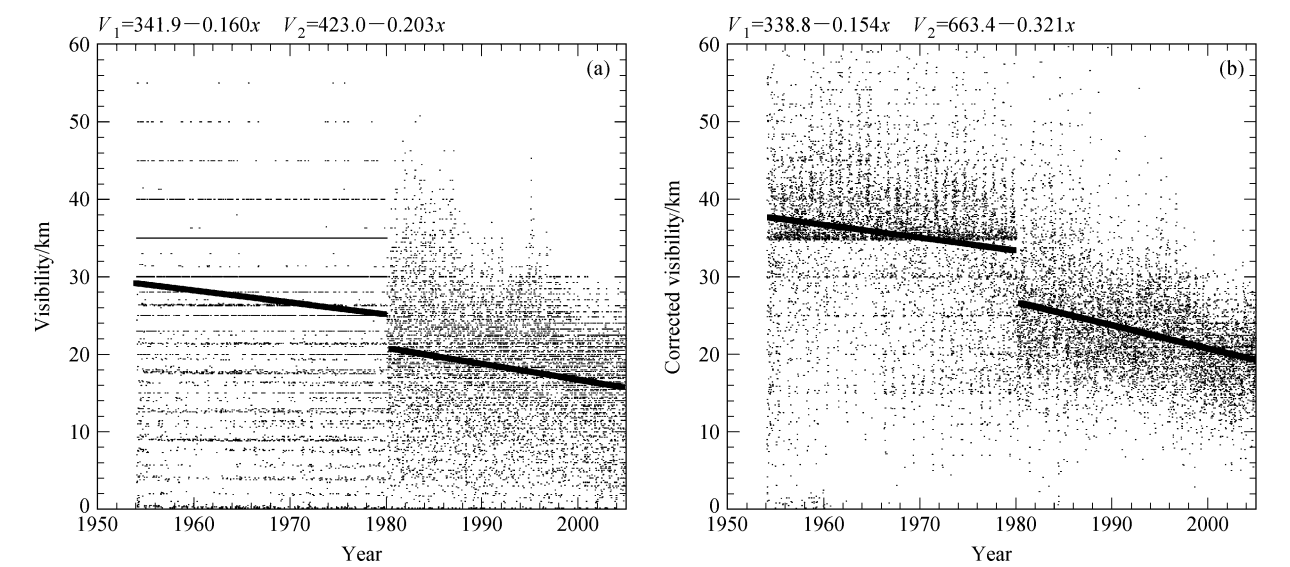


图 4 1954~2004 年华山站逐日平均能见度 (a) 和订正能见度 (b) 图
Fig. 4 The trends of mean daily (a) visibility and (b) corrected visibility at Mt. Huashan. The linear trends are calculated separately for the periods before and after 1980

5 mm 以上的降水影响不大; (3) R_0 递减主要是由华山站中小雨日数的减小所造成的, 而大雨一般发生在较强的天气系统条件下, 此时的云较为深厚、持续时间较长, 受气溶胶影响不明显。

日降水强度越大时, 云体相对越厚, 生命期越长。气溶胶抑制降水主要是减少了中小雨的天数, 这种影响对浅薄的生命期较短的降水云作用更明显, 由于这类云没有足够的时间使云水转化为雨水, 从而对降水的影响效果更加明显。对于平原地区的云, 如西安站由于入云的气溶胶量较小, 只对 5 mm 以下的降水云有抑制作用, 而 5 mm 以上的降水云影响很小。对于华山站, 30 mm 以下的降水都会受到入云气溶胶的抑制作用, 由此可以说明入云气溶胶浓度越高, 就有越厚的降水云会被气溶胶影响而减少降水, Khain 等^[31]对深厚暖底的对流云的模拟证实了这一机制。同时也表明, 山区和平原地区由于气溶胶输送入云的机制不同, 气溶胶抑制降水的程度不同, 对不同强度的降水云影响也不同。

4.2.2 热力和动力作用下气溶胶对地形云降水的抑制

秦岭山脉和关中平原的成云致雨过程在四季上是不同的, 春季以锋面降水过程为主, 秋季存在“秋淋”连阴雨天气过程, 夏季以对流云降水过程为主, 导致秦岭地区的降水在春秋季节以动力强迫抬升为主, 夏季以热对流为主。因此, 可以通过 R_0 。

表 3 华山站和对比站春、夏、秋季的降水多年平均值以及 R_0 比值

Table 3 The multi-year averages for spring, summer and autumn precipitation at Mt. Huashan, Xi'an, Weinan and Huayin Stations and ratio of R_0 at the ending to starting years

		降水量/mm	R	R_0 斜率	R_0 比值
春季	华山	191			
	华阴	119	0.84	-0.0094	0.82
	渭南	130	0.72	-0.0078	0.79
	西安	132	0.75	-0.0078	0.77
夏季	华山	370			
	华阴	264	0.85	-0.0036	0.92
	渭南	230	0.77	-0.0066	0.83
	西安	228	0.67	-0.0090	0.77
秋季	华山	232			
	华阴	173	0.93	-0.0081	0.81
	渭南	182	0.86	-0.0083	0.75
	西安	185	0.87	-0.0070	0.76

注: R 为华山与各对比站逐年降水的相关系数, R_0 比值为终止年 (2004 年) 与起始年 R_0 之比, R_0 斜率为 R_0 随时间变化的一元线性回归方程的斜率 (下同)。

的季节变化, 研究在热力、动力抬升作用下, 气溶胶对地形云降水的影响。

由于冬季干燥, 降水少 (仅占年降水 5% 以下), 雨量相关性差, 不满足统计要求, 所以不分析冬季情况。表 3 给出了华山与华阴、渭南、西安三

站春、夏、秋三季的降水及 R_0 ，各站春、夏、秋三季的降水占年降水量的比重分别约为 20%、45%、30% 左右。

华山站对华阴站的 R_0 比值，春秋季节为 0.81~0.82、夏季为 0.92，夏季抑制作用明显小于春秋季节；渭南站，春秋季节为 0.79~0.75、夏季为 0.83，夏季抑制作用也小于春秋季节；西安站，春秋季节为 0.76~0.77、夏季为 0.77，夏季与春秋季节相当，也许是夏季相关系数 (0.67) 较小所致。

在以动力强迫抬升为主的春秋季节， R_0 之比春季为 0.82~0.77，秋季 R_0 为 0.81~0.75，从中可以看出春秋季节气溶胶抑制华山地形云降水幅度在 18%~25% 之间变化，平均为 20% 左右，最大可达 25%。

在以热对流为主的夏季，以华阴、渭南为对比站的 R_0 之比为 0.92、0.83，即气溶胶抑制降水幅度仅为 8%~17%，明显小于春秋季节。由于夏季降水天气中也包含了部分动力作用在内，进一步从风速上来分离以剔除部分动力作用。

华山 1954~2004 年夏季降水日数为 1961 天，风速 ≤ 2.4 m/s (弱风) 天数为 977 天， > 2.4 m/s (强风) 天数为 984 天，样本数相当，按照统计学要求，故选择 2.4 m/s 来分析风速对 R_0 的影响。华山对华阴站 R_0 之比，弱风时为 0.98、强风时为 0.81；对渭南站弱风时为 0.90、强风时为 0.80；对西安站弱风时为 0.86、强风时为 0.64，弱风时抑制作用都明显小于强风 (表 4)。由以上分析可见，夏季热对流下气溶胶对降水的抑制作用基本相当，也就是说在热对流条件下，气溶胶对地形云和对平原地区云的作用基本相当，经过分离，可以进一步看

表 4 夏季不同风速的降水多年平均值及 R_0 比值
Table 4 The multi-year average summer precipitation and ratio of R_0 at the ending to starting years for different wind speeds at Mt. Huashan, Xi'an, Weinan and Huayin Stations

		降水量/mm	R	R_0 斜率	R_0 比值
≤ 2.4 m/s	华山	186			
	华阴	119	0.87	-0.0008	0.98
	渭南	106	0.75	-0.0044	0.90
	西安	113	0.74	-0.0055	0.86
> 2.4 m/s	华山	184			
	华阴	145	0.76	-0.0095	0.81
	渭南	124	0.74	-0.0083	0.80
	西安	115	0.58	-0.0164	0.64

清楚热力条件下气溶胶抑制降水的作用。由于弱风时入云气溶胶主要靠热力上升或湍流扩散将局地气溶胶输送入云，此时华山对流云与平原对流云入云机制不存在本质区别，入云的气溶胶量相当，受气溶胶影响的程度也相当，强风时华山对流云会部分受到地形动力抬升的影响，入云的气溶胶量会大于平原对流云。

综上所述，热力作用下气溶胶对地形云的抑制降水作用与平原地区相当 (2%~10%)，动力作用下，气溶胶对地形云的降水抑制作用明显强于平原地区，减少降水 20% 左右。

4.2.3 风速和风向的影响

根据华山的地形走向 (图 1) 和华山站雨日的风散点图 (图 6)，按每类样本数相当的原则，将风向分为 3 类，迎风： $240^\circ \sim 30^\circ$ 、背风： $30^\circ \sim 150^\circ$ 、侧风： $150^\circ \sim 240^\circ$ ，风速则分为小风 ($v < 2$ m/s)、中风 ($2 \leq v < 5$ m/s)、大风 ($v \geq 5$ m/s)。为了统计的有效性，保证序列样本数相当，由于在有些分类下降水量很小，分类后对资料进行三年滑动平均处理，不同风速和风向下的 R_0 及其统计量结果见表 5 和表 6。

华山降水中的 38%、45% 和 17% 的降水发生在小风、中等风速和大风下，在 62% 风速大于 2 m/s 的降水中，在迎风、侧风和背风方向分别占了 33%、16% 和 13% (表 5)。由表 6 分析可见：(1) R_0 递减随风速增大而加快；(2) 迎风向时， R_0 递减总体大于背风和侧风，也随风速增大而加快，减少降水超过 30%。由于对比站华阴 3 年滑动后的序列短，反映不够好。

4.2.4 能见度和降水的关系

图 7 (见文后彩图) 为 1980~2004 年华山和华阴日降水量与华山能见度的关系图，图中 R_0 为 y 方向 (对数坐标) 两条降水线之间的距离。由图 7 可见，能见度为 14~28 km 时，两站降水差值变化很小， R_0 为 1.7 左右，当能见度逐渐减小时差值逐渐减小，当能见度小于 8 km 时，差值趋于稳定， R_0 为 1.2 左右，减小了 30%。鉴于能见度为气溶胶的表征量，由此可见：能见度大于 14 km 时的气溶胶量，对华山降水的抑制作用不明显，小于 14 km 后抑制作用逐渐显现，当小于 8 km 时抑制作用最明显，程度趋于稳定。也就是说，在 14 km 附近存在一个气溶胶抑制华山地形云降水的阈值。

为了进一步定量分析能见度与 R_0 的关系，图 8

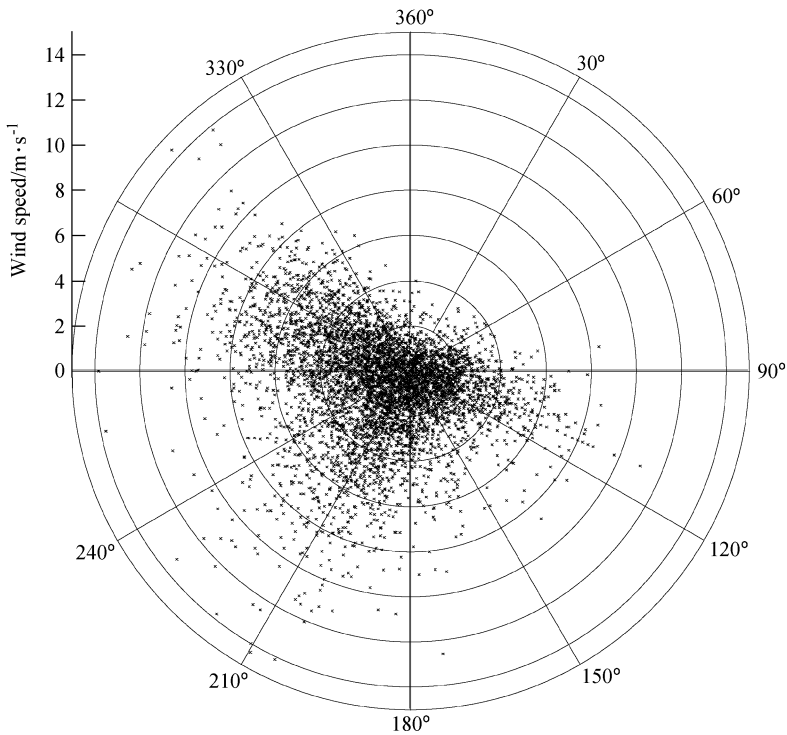


图 6 华山站雨日的风散点图
Fig. 6 Scatter diagram of wind speed and direction during rain days at Mt. Huashan station

表 5 华山站和对比站不同风速下的降水和 R_o 及其统计量

Table 5 The multi-year average precipitation, R_o and its statistics at Mt. Huashan, Xi'an, Weinan and Huayin Stations for different wind speed classes

	风速	降水/mm		R	P 值	R_o 比值	R_o 斜率
		华山	对比站				
西安 (1954~2004 年)	全风速	837	568	0.71	0.007	0.81	-0.0062
	弱风	318	227	0.85	0.232	0.88	-0.0037
	中等	373	247	0.69	0.010	0.75	-0.0091
	大风	146	94	0.68	0.017	0.65	-0.0145
渭南 (1959~2004 年)	全风速	816	563	0.76	0.002	0.80	-0.0072
	弱风	300	207	0.88	0.056	0.86	-0.0060
	中等	373	261	0.82	0.094	0.83	-0.0060
	大风	143	95	0.71	0.0004	0.55	-0.0206
华阴 (1970~2004 年)	全风速	800	576	0.84	0.036	0.86	-0.0062
	弱风	276	202	0.92	0.144	0.79	-0.0065
	中等	386	281	0.86	0.029	0.81	-0.0089
	大风	136	93	0.83	0.657	0.94	-0.0030

注： P 为 R_o 变化的线性回归 t 检验的概率值（下同）。

给出了 1980~2004 年不同能见度下华山和华阴累积降水量之比 R_o (表 7) 的线性拟合图。由表 7 和图 8 可见：(1) 当能见度为 1~8 km 时, R_o 围绕 1.2 上下波动, 为 1.1~1.3; 当能见度为 9~

13.5 km 时, R_o 从 1.3 逐渐上升到 1.42; 能见度为 14.22 km 时, R_o 最大达 1.83, 当能见度继续增加时, R_o 又围绕 1.7 上下波动, 1.6~1.8。(2) 总体上 R_o 随着能见度增加而增加, 并呈现出很好的线

表 6 华山站和对比站不同风向下的降水和 R_o 及其统计量

Table 6 The multi-year average precipitation, R_o and its statistics at Mt. Huashan, Xi'an, Weinan and Huayin Stations for different wind direction classes

风向	对比站	风速	降水/mm		相关系数	P 值	R_o 比值	R_o 斜率
			华山	对比站				
240°~30°	西安	中等	187	99	0.81	0.099	0.70	-0.0141
		大风	86	44	0.84	0.106	0.67	-0.0164
	渭南	中等	184	110	0.77	0.011	0.71	-0.0127
		大风	81	44	0.72	0.063	0.66	-0.0170
	华阴	中等	192	130	0.73	0.207	0.84	-0.0077
		大风	79	47	0.88	0.500	0.89	-0.0059
150°~240°	西安	中等	93	69	0.58	0.357	0.76	-0.0076
		大风	42	35	0.20	0.494	1.01	0.0082
	渭南	中等	94	80	0.63	0.633	0.85	-0.0043
		大风	43	36	0.29	0.052	0.63	-0.0126
	华阴	中等	97	74	0.91	0.664	0.93	-0.0029
		大风	41	34	0.45	0.518	1.25	0.0088
30°~150°	西安	中等	93	79	0.77	0.477	0.85	-0.0039
		大风	18	15	0.79	0.651	0.82	-0.0056
	渭南	中等	95	71	0.85	0.382	0.83	-0.0057
		大风	19	15	0.88	0.266	0.58	-0.0153
	华阴	中等	97	77	0.86	0.131	0.75	-0.0110
		大风	16	12	0.86	0.255	1.64	0.0243

性统计关系，相关系数为 0.81，相关显著 (t 统计检验 P 值为 1.21×10^{-5})，其关系式为： $R_o = 1.153 + 0.0209V_{is}$ ，其中 V_{is} 表示能见度。

这里假定能见度为气溶胶的表征量，即能见度的减小应该反映出气溶胶与 CCN 增加，抑制华山降水，导致 R_o 减少的现象。如果这一假定不成立，就可以认为能见度与 R_o 没什么关系。然而，图 8 中表现出很好的统计相关性，能见度降低， R_o 减小，说明假定是合理的。 R_o 减小的幅度和在洛矾山顶个例研究中以及内华达州地形云降水的数值模拟结果的降低幅度相当^[5, 24]。

根据能见度和粒子谱的关系，可以粗略推算出气溶胶抑制华山地形云降水的阈值浓度，关系式^[32]如下：

$$V = \frac{3.192}{\sum \pi r_i^2 n_i K},$$

其中， V 表示能见度； r_i 和 n_i 分别表示粒子半径和数浓度； K 表示散射截面比，一般取为 2。由表 7 取能见度阈值为 14.22 km，根据气溶胶抑制降水的粒子半径范围为 $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ ^[33]，不考虑雨滴、湿度对

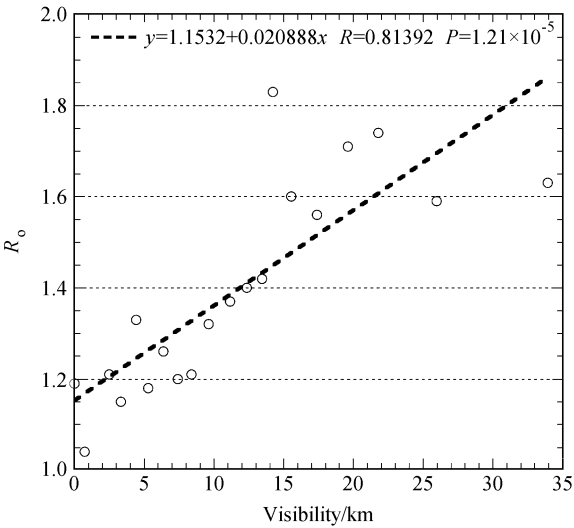


图 8 1980~2004 年华山能见度与华山和华阴累积降水量比值 R_o 的线性拟合

Fig. 8 Linear fitting of different visibilities at Mt. Huashan with the ratio of accumulated precipitation at Mt. Huashan to Huayin stations from 1980 to 2004

能见度的影响，取均一分布时，得出气溶胶浓度阈值为 $36 \sim 360000 \text{ cm}^{-3}$ 。

表 7 1980~2004 年华山不同能见度下华山和华阴累积降水量及其比值 R_0

Table 7 Accumulated precipitations at Mt. Huashan and Huayin stations from 1980 to 2004 and their ratios for different visibilities at Mt. Huashan

平均能见度/km	降水天数/d	华山降水/mm	华阴降水/mm	R_0
0.00	137	2019.0	1701.3	1.19
0.72	149	1970.4	1893.7	1.04
2.48	44	419.5	346.1	1.21
3.34	100	1129.5	981.8	1.15
4.41	112	1462.6	1102.9	1.33
5.28	110	980.6	830.9	1.18
6.38	115	1040.7	823.3	1.26
7.42	107	913.2	759.8	1.20
8.40	101	738.2	609.1	1.21
9.61	125	1136.8	864.3	1.32
11.15	162	1407.1	1026.2	1.37
12.37	91	672.2	481.4	1.40
13.45	106	682.4	480.2	1.42
14.22	80	631.8	344.8	1.83
15.54	154	1003.7	628.5	1.60
17.39	107	764.9	490.3	1.56
19.60	134	541.7	316.8	1.71
21.77	76	418.6	240.8	1.74
25.97	90	379.6	238.6	1.59
33.94	35	142.4	87.3	1.63

根据以上分析，我们可以归纳出气溶胶抑制秦岭地形云降水的初步物理模型：

(1) 当入云气溶胶浓度达到某一浓度（阈值）时，抑制作用开始显现，随着浓度增加抑制作用明显， R_0 递减越明显。

(2) 对浅薄的生命期短的降水云抑制作用明显，云越厚（日降水量越大），对应的气溶胶抑制降水的阈值越高。

(3) 热对流为主的夏季降水，抑制作用与平原地区相当，以系统性降水为主的春秋季节，抑制明显强于平原地区，减少降水 20% 左右。

(4) 抑制作用随风速增大而增强，迎风向的抑制作用总体上大于背风和侧风，并随风速增大而加快，减少降水可以超过 30%。

5 结论

以气溶胶入云较多的华山站作为影响站，以入云气溶胶较少的西安、渭南、华阴为对比站，通过影

响站与对比站降水之比 R_0 的变化趋势及与能见度关系，定量研究了秦岭地区气溶胶对地形云降水的抑制作用。

有观测以来 R_0 逐年递减，减幅为 14%~20%，说明影响站与对比站相比降水量减少了 14%~20%。 R_0 减少的趋势与能见度递减、气溶胶递增相吻合，表明气溶胶增加抑制了地形云降水。

气溶胶抑制降水主要是减少了中小雨的天数，这种影响对浅薄的生命期短的地形云降水作用更明显，由于没有足够的时间使云水转化为雨水，使得气溶胶对降水的影响效果更加明显。对于华山站，30 mm 以下的降水都会受到入云气溶胶的抑制作用。对于西安站由于入云的气溶胶量较小，只对 5 mm 以下的降水有抑制作用。入云气溶胶浓度越高，就有越厚的降水云会被气溶胶影响而减少降水。

在以动力强迫抬升为主的春秋季节，气溶胶抑制华山地形云降水 20% 左右，最大可达 25%。在热对流条件下，气溶胶对地形云和平原地区云的作用基本相当。

通过华山和华阴站能见度和 R_0 的定量分析后发现，能见度与 R_0 呈现出很好的统计线性关系，其相关显著达到 0.81。能见度大于 14 km 时 R_0 在 1.6~1.8 之间变化，随着能见度的降低， R_0 逐渐减小，当能见度小于 8 km 后变为 1.2 左右，减小了 30%。

R_0 减小的趋势基本上随风速增加而增加，迎风向时， R_0 递减总体大于背风和侧风方向，减少降水超过 30%。

根据以上研究结果，提出了气溶胶抑制秦岭地形云降水的初步物理模型。

参考文献 (References)

[1] Dusek U, Frank G P, Hildebrandt L, et al. Size matters more than chemistry for cloud-nucleating ability of aerosol particles. *Science*, 2006, **312**: 1375~1378

[2] Hobbs P V. *Aerosol-Cloud-Climae Interactions* (International Geophysics Series, Vol. 54). San Diego: Academic Press, 1993. 39

[3] Cantrell W, Shaw G, Leck C, et al. Relationships between cloud condensation nuclei spectra and aerosol particles on a south-north transect of the Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105D**: 15313~15320

[4] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and in-

- dustrial air pollution. *Science*, 2000, **287**: 1793~1796
- [5] Borys R D, Lowenthal D H, Cohn S A, et al. Mountaintop and radar measurements of anthropogenic aerosol effects on snow growth and snowfall rate. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**: 1538, doi: 10.1029/2002GL016855
- [6] Andreae M O, Rosenfeld D, Artaxo P, et al. Smoking rain clouds over the Amazon. *Science*, 2004, **303**: 1337~1342
- [7] Cotton W R, Pielke R A. *Human Impacts on Climate*. Cambridge University Press, 1995. 288
- [8] Mölders N, Olson M A. Impact of urban effects on precipitation in high latitudes. *J. hydrometeorology*, 2004, **6**: 409~429
- [9] Kaufman Y J, Nakajima T. Effect of Amazon smoke on cloud microphysics and albedo—Analysis from satellite imagery. *J. Appl. Meteor.*, 1993, **32**: 729~744
- [10] Marínsson B G, Frank G, Cederfelt S-I, et al. Droplet nucleation and growth in orographic clouds in relation to the aerosol population. *Atmos. Res.*, 1999, **50**: 289~315
- [11] Freud E, Rosenfeld D, Andreae M O, et al. Robust relations between CCN and the vertical evolution of cloud drop size distribution in deep convective clouds. *Atmos. Chem. Phys. Discuss*, 2005, **5**: 10155~10195
- [12] Rosenfeld D. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**: 3105~3108
- [13] Rosenfeld D, Woodley W L. Closing the 50-year circle: From cloud seeding to space and back to climate change through precipitation physics. Chapter 6 of *Cloud Systems, Hurricanes, and the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)*, Dr. Wei-Kuo Tao and Dr. Robert Adler, Eds, Meteorological Monographs 51, AMS. 2003. 59~80
- [14] Rosenfeld D, Lahav R, Khain A, et al. The role of sea spray in cleansing air pollution over ocean via cloud processes. *Science*, 2002, **297**: 1667~1670
- [15] 毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述. 气象学报, 2002, **60**: 625~634
Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2002, **60**: 625~634
- [16] 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 等. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析. 大气科学, 2002, **26**: 721~730
Luo Yunfeng, Lü Daren, Zhou Xiujie, et al. Analyses on the spatial distribution of aerosol optical depth over China in recent 30 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26**: 721~730
- [17] 柯宗建, 汤洁. 北京上甸子秋冬季大气气溶胶的散射特征. 大气科学, 2007, **31**: 553~559
Ke Zongjian, Tang Jie. An observation study of the scattering properties of aerosols over Shangdianzi, Beijing. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31**: 553~559
- [18] 牛生杰, 章澄昌, 孙继明. 贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究. 大气科学, 2001, **25**: 243~252
Niu Shengjie, Zhang Chengchang, Sun Jiming. Observational researches on the size distribution of sand aerosol particles in the Helan mountain area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25**: 243~252
- [19] 周秀骥, 李维亮, 罗云峰. 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟. 大气科学, 1998, **22**: 418~427
Zhou Xiujie, Li Weiliang, Luo Yunfeng. Numerical simulation of the aerosol radiative forcing and regional climate effect over China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22**: 418~427
- [20] 黄梦宇, 赵春生, 周广强, 等. 华北地区层状云微物理特性及气溶胶对云的影响. 南京气象学院学报, 2005, **28**: 360~368
Huang Mengyu, Zhao Chunsheng, Zhou Guangqiang, et al. Stratus cloud microphysical characters over North China region and the relationship between aerosols and clouds. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2005, **28**: 360~368
- [21] 王京丽, 刘旭林. 北京市大气细粒子质量浓度与能见度定量关系初探. 气象学报, 2006, **64**: 221~228
Wang Jingli, Liu Xulin. The discuss on relationship between visibility and mass concentration of PM_{2.5} in Beijing. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2006, **64**: 221~228
- [22] Rosenfeld D, Givati A. Evidence of orographic precipitation suppression by air pollution induced aerosols in the western U. S. *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2006, **45**: 893~911
- [23] Givati A, Rosenfeld D. Quantifying precipitation suppression due to air pollution. *J. Appl. Meteor.*, 2004, **43**: 1038~1056
- [24] Lynn B, Khain A, Rosenfeld D, et al. Effects of aerosols on precipitation from orographic clouds. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, D10225, doi: 10.1029/2006JD007537
- [25] Rosenfeld D. Aerosols suppressing precipitation in the sierra nevada; Results of the 2006 winter field campaign. http://www.climatechange.ca.gov/events/2006_conference/presentations/2006-09-14/2006-09-14_ROSENFELD.PDF, 2006
- [26] Daniel Rosenfeld, Dai Jin, Yu Xing, et al. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation. *Science*, 2007, **315**: 1396~1398
- [27] Qiu J, Yang L. Variation characteristic of atmospheric aerosol optical depths and visibility in North China during 1980~1994. *Atmos. Environ.*, 2000, **34**: 603~609
- [28] 宗雪梅, 邱金桓, 王普才. 近 10 年中国 16 个台站大气气溶胶光学厚度的变化特征分析. 气候与环境研究, 2005, **10**: 201~208
Zong Xuemei, Qiu Jinhuan, Wang Pucai. Characteristics of

atmospheric aerosol optical depth over 16 radiation stations in the last 10 years. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10**: 201~208

[29] 范引琪, 李二杰, 范增禄. 河北省 1960~2002 年城市大气能见度的变化趋势. *大气科学*, 2005, **29**: 526~535
Fan Yinqi, Li Erjie, Fan Zenglu. Visibility trends in 11 cities of Hebei Province during 1960 - 2002. *Chinese Journal of Atmospheric Science* (in Chinese), 2005, **29**: 526~535

[30] Teller A, Levin Z. The effects of aerosols on precipitation and dimensions of subtropical clouds: A sensitivity study using a numerical cloud model. *Atmos. Chem. Phys.*, 2006, **6**: 67~80

[31] Khain A, Rosenfeld D, Pokrovsky A. Aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2005, **131**: 2639~2663

[32] 麦卡特尼. 大气光学: 分子和粒子散射. 潘乃先, 毛节泰, 王永生译. 北京: 科学出版社, 1988. 311~319
McCarteny E J. *Optics of the Atmosphere: Scattering by Modules and Particles* (in Chinese). Translated by Pan Naixian, Mao Jietai, Wang Yongsheng. Beijing: Science Press, 1988. 311~319

[33] Segal Y, Khain A, Pinsky M, et al. Effects of atmospheric aerosol on precipitation in cumulus clouds as seen from 2000-bin cloud parcel microphysical model: Sensitivity study with cloud seeding applications. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2004, **130**: 561~582

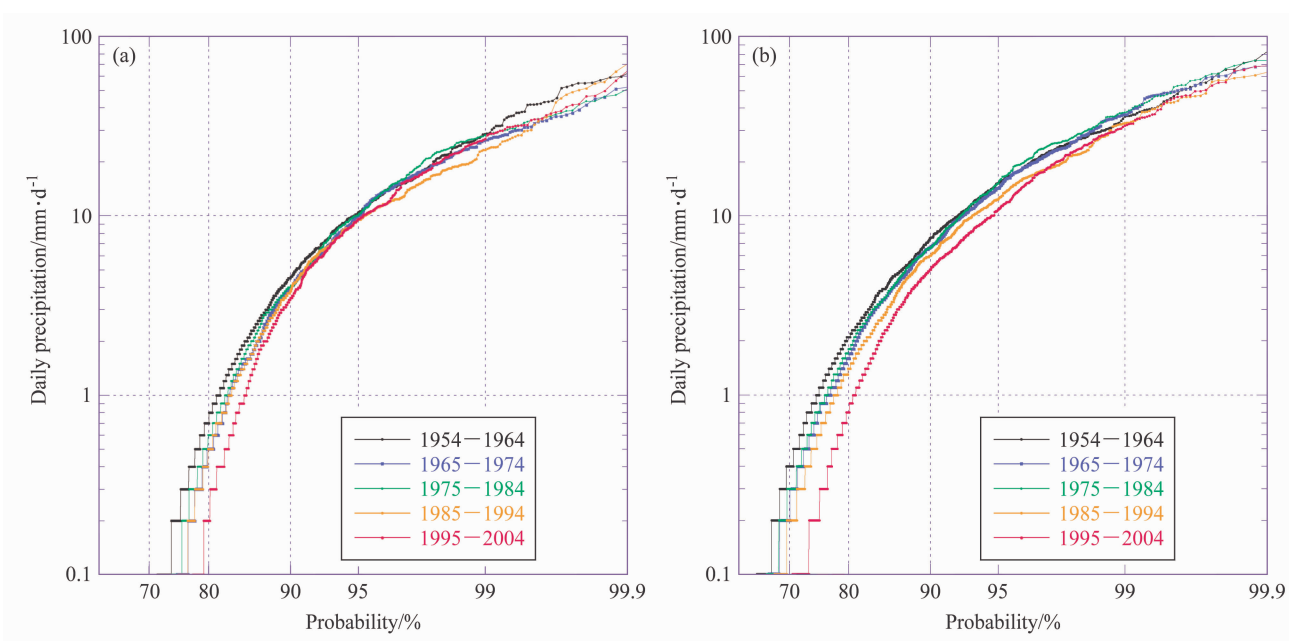


图 5 西安 (a) 和华山 (b) 站低于对应于 y 轴上日降水强度日数的出现概率
Fig. 5 The occurrence probability of daily precipitation not exceeding the amount shown on the y axis at (a) Xi'an and (b) Mt. Huashan stations for the decades of 1954 – 1964, 1965 – 1974, 1975 – 1984, 1985 – 1994, 1995 – 2004

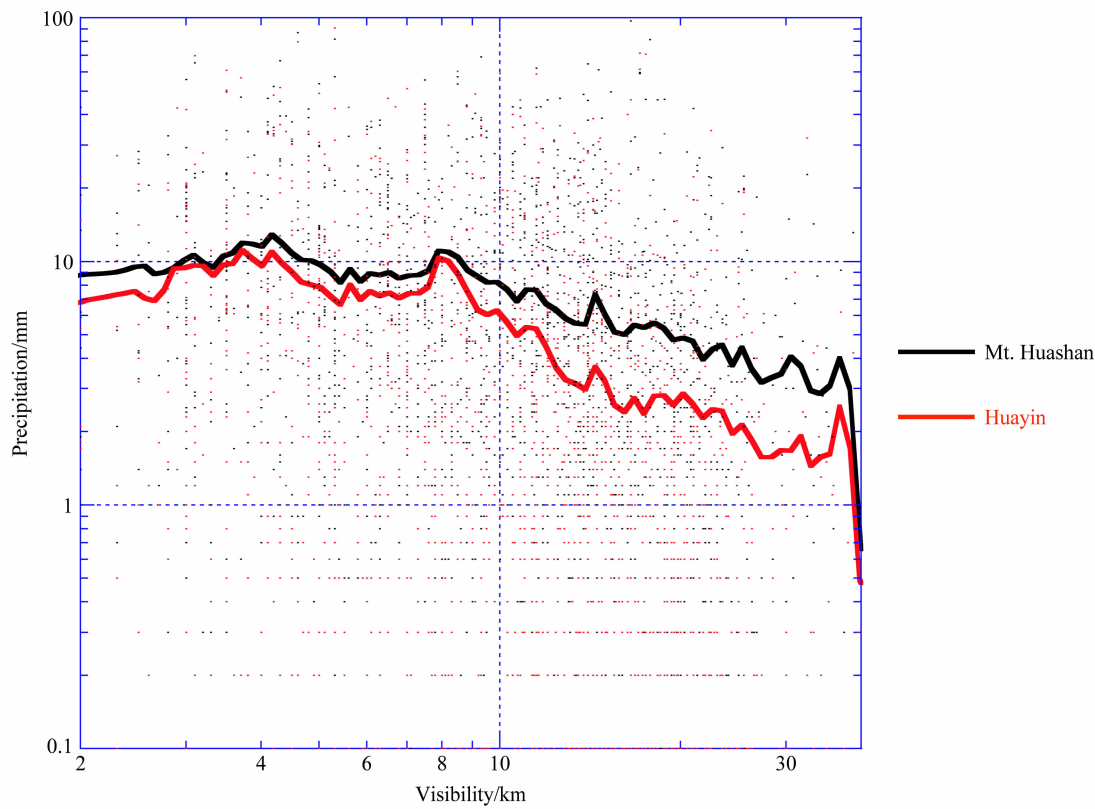


图 7 1980~2004 年华山和华阴日降水量与华山能见度的关系图
Fig. 7 The relation between daily rainfall at Mt. Huashan and Huayin stations with the visibility at Mt. Huashan from 1980 to 2004