

气溶胶对秦岭山脉地形云降水的影响

徐小红 余 兴 戴 进

(陕西省气象科学研究所, 西安, 710014)

提 要: 以华山站为影响站, 其周围华阴、渭南、西安为对比站, 通过对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 与能见度变化关系的分析, 研究了气溶胶对秦岭地形云降水的影响。结果表明: 有观测以来 R_o 逐年递减, 1980 年后 R_o 递减更快, 减幅达 20%; R_o 的减小趋势与能见度递减、气溶胶递增相吻合, 说明气溶胶的增加抑制了地形云降水; 华山 1980 年后的年平均雨量比 1980 年前减少了 15%, 达 132mm, 而平原地区的减少量不超过 3% (16mm)。分析气溶胶抑制地形云降水的物理过程发现, R_o 的递减主要是减少了中小雨 (日雨量小于 30mm) 的天数, 而对大于 30mm 的降水影响较小, 说明气溶胶对浅薄的生命期较短的地形云降水的抑制作用更明显; 在以动力强迫抬升为主的春秋季节, 气溶胶对地形云降水的抑制作用明显强于平原地区, 1980—2004 年间降水减少了 20%~30%; 在热力作用下, 气溶胶对地形云降水的抑制作用与平原地区相当。

关键词: 气溶胶 地形云降水 地形强化因子(R_o) 抑制作用

Effect of Aerosol on Orographic Precipitation in Qinling Mountains

Xu Xiaohong Yu Xing Dai Jin

(Meteorological Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710014)

Abstract: Based on the dataset of observations of precipitation and visibility range since 1954 at the top of Mountain Hua, the ratio between the precipitation at Mt. Hua 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 applied to quantitatively learn the ways that air pollution aerosols suppress orographic precipitation. R_o decreased gradually during the measurement period, and most of the decrease occurred after 1980, about 20%, matched with the decreasing visibility and increasing aerosol, which indicates that enhanced pollution aerosols

资助课题: 国家自然科学基金(40575004)和科技部公益项目(2005DIB3J099)

收稿日期: 2008年5月28日; 修定稿日期: 2008年9月28日

suppress the orographic precipitation. The decrement of average annual precipitation at Mt. Hua after 1980 was 132mm, 15%, compared with that before 1980, and while the decrease was about 16mm, 3%, at the plain stations. The decrease in R_o is mainly caused by days of the light and moderate rain (daily precipitation of less than 30 mm), but not by days with more than 30 mm, which suggested that the thin short living orographic clouds are much more susceptible to precipitation suppression by air pollution aerosols. Under dynamical uplift, the suppression of aerosol to clouds on the mountain top is stronger than that to clouds at plains, and causes 20%—30% decrease of precipitation at Mt. Hua from 1980 to 2004. On the contrary, for the thermo—dynamically driven clouds, the suppression of aerosol is equivalent to clouds on the mountain top and at plains.

Key Words: Aerosol orographic precipitation orographic enhancement factor R_o precipitation suppression

引 言

气溶胶粒子对云降水的影响主要是通过充当云凝结核(CCN)和成冰核(IN)来实现的。在云中,充当 CCN 的气溶胶粒子按大小分为三类,半径小于 $0.01\mu\text{m}$ 的粒子通常没有活性,不影响云的微物理结构,半径在 $0.01\mu\text{m}\sim 1\mu\text{m}$ 的粒子会延缓雨水的形成而抑制降水^[1-3],半径大于 $1\mu\text{m}$ 的粒子将增加降水^[4-5]。Gunn 和 Phillips^[6]利用云室实验表明,大气气溶胶增加了云凝结核数量,使小云滴浓度增大,减缓了云滴间的碰并,从而抑制降水。Rosenfeld 等^[7-9]通过卫星观测研究表明,城市和工业大气污染气溶胶会抑制对流云降水,对于云顶暖于 -10°C 的对流云,气溶胶会完全切断降水。Borys 等^[10]指出在美国科罗拉多州洛矶山脉干净大气中加入 $1\mu\text{gm}^{-3}$ 硫酸盐气溶胶,地形降雪减少达 50%。Rosenfeld 和 Givati^[11-13]利用城市和工业区附近山区降水与海岸边降水比值 R_o ,研究了气溶胶对降水的影响,结果表明以色列和加利福尼亚中部、南部城市地区的 R_o 减少了 15%~25%,加利福尼亚和俄勒冈州北部洁净区, R_o 保持稳定,但在人口与工业密集的西雅图东部地区, R_o 却明显降低,在

对太平洋沿海地区的研究也得到了相似的结果。Lynn 等^[14]通过显式微物理云模式模拟证明了当 CCN 浓度增加时,内华达地形云降水被抑制。Griffith 等^[15]运用 Rosenfeld 的分析方法,验证了冬季气溶胶对地形云降水的抑制作用。

地形云主要是气流流经山脉时受地形强迫抬升而形成的,此时在迎风坡低层堆积的气溶胶粒子极易随气流被抬升入云,大大地增加了地形云中凝结核数量,使小云滴浓度增大,削弱了云滴间的碰并,推迟了云水向雨水的转化,抑制降水。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度,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受气溶胶影响的程度总体上更高。故选取秦岭地形云受气溶胶影响程度较高的山顶华山站为影响站,将其周围平原云受气溶胶影响程度较低的华阴、渭南、西安为对比站,进行分析。

关中地区是陕西省乃至西北地区人口与城镇分布最密集、城镇化水平最高的地区,1950 年代至 1970 年代就是我国工业建设的重点区域,特别是 1980 年以来,关中地区 and 我国的许多地方一样,城市化工业化发展进

程明显加快,人口密集,其人口占全省的 60%,国民生产总值占全省的 73%。因此将 1980 年作为关中城市、工业快速发展的分界点,探讨城市污染气溶胶对地形云降水的影响问题。

1 研究区域

秦岭是我国一条重要的气候、地理分界线,在气候、水文、植被分布上南北之间有明显的差异。山脉以北气候比较干旱,以南温暖湿润。秦岭年降水量 1000mm 左右,是关中经济区的主要供水源区,也是“南水北调”中线的主要补水区。华山位于秦岭的东北部,山势陡峭,降水丰富,平均年降水量达 830mm 左右,关中平均年降水量 550mm 左右。因此开展秦岭地区云降水研究意义重大。

关中平原地处陕西的中部,城市化工业化发展水平较高,大气污染严重。其北有黄土高原,南有秦岭山脉阻隔,不利于气溶胶的输送扩散,造成该地区气溶胶浓度总体偏高。而关中的中心城市西安,自 1980 年开始进入城市化快速推进期,总人口由 511.9 万发展到 2001 年的 694.8 万,耕地面积由 1970 年的 $369.4 \times 10^3 \text{hm}^2$ 减少到 2001 年的 $287.8 \times 10^3 \text{hm}^2$,城市建设用地由 1990 年的 120.7km^2 增加到 2001 年的 183.7km^2 ,2003 年城市车辆已超过 30 万辆。随着经济活动、人口、车辆的增加,造成西安大气气溶胶浓度偏高,城市上空常出现气溶胶阴霾覆盖现象,成为中国北方典型的有显著大气污染问题的城市。与中国其它城市相比,西安的颗粒物负载与包头、兰州、北京、乌鲁木齐、成都相似^[16-17],有机碳和碳元素水平高于亚洲大多数城市^[18],污染严重,是开展气溶胶对云降水影响研究的较理想区域。故选取华山与关中平原为研究区域,讨论气溶胶对降水的影响问题。表 1 列出了各站的地理信息。

表 1 影响站和对比站地理信息

测站	经度	纬度	海拔高度(m)
华山站	110°05′	34°29′	2064.9
华阴站	110°05′	34°33′	351.3
渭南站	109°29′	34°31′	348.8
西安站	108°56′	34°18′	396.9

2 研究方法

气溶胶对降水的影响较为复杂,全球和区域的大气环流也影响着降水,要想从对降水影响的诸多因素中找出气溶胶对降水的影响量,一种方法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),当影响站与对比站的降水量高度相关(确保其它因素对降水量的影响是相似的)时,其比值 R_0 (地形强化因子:影响站与对比站的降水量之比)的变化主要反映出气溶胶对降水的影响,而其它因素对 R_0 的变化影响较小。

气溶胶排放到大气中数小时后,就能够活化成 CCN,其 CCN 的活性主要取决于气溶胶的大小(以粒径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 为主),对气溶胶的化学成分不敏感^[19]。在研究气溶胶对降水的影响中,表征入云气溶胶特性的最理想资料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 $\text{PM}_{2.5}$ 资料,它可以直接反映出近地层起 CCN 作用的气溶胶 ($2.5 \mu\text{m}$) 量,而入云的气溶胶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 1600m 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,能见度就可以反映出入云气溶胶状况。因此,选取华山站的能见度作为反映对

降水影响的气溶胶表征量,分析气溶胶对地形云降水的影响。研究中所用资料为华山站的降水、能见度及华阴、渭南、西安的降水资料,资料序列分别为西安及华山 1954—2004 年、渭南 1959—2004 年、华阴 1970—2004 年,对关中城市、工业快速发展的标志年份根据发展状况人为确定为 1980 年。

3 结果分析

3.1 降水相关性分析

首先检验影响站与各对比站的降水量是否相关,以确保对降水影响中,除气溶胶影响程度不同外,其它因素的影响相近。图 1 为华山与 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,但相关系数也达 0.75,均能满足相关性要求。

3.2 观测以来年降水的演变

图 2 给出了影响站和各对比站的年降水量及 R_0 的变化趋势,图中 P 表示 R_0 变化的线性回归 t 检验的概率值,此值越小,说明相关越显著,这里各值均符合显著性要求。由图可见:(1)各站年降水量均呈递减趋势,华山降水的递减明显快于三个对比站,说明地形云降水递减明显大于平原地区;(2)以华阴、渭南、西安为对比站的 3 个 R_0 均呈现递减趋势, R_0 递减斜率分别为 -0.0062 、 -0.0072 、 -0.0061 ,各站 R_0 (2004 年)与 R_0 (起始年)之比为 $0.80 \sim 0.86$,反映出这些年 R_0 减小了 $14\% \sim 20\%$,也说明影响站相对于对比站降水量减少了 $14\% \sim 20\%$ 。

从影响站降水递减快、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的这么

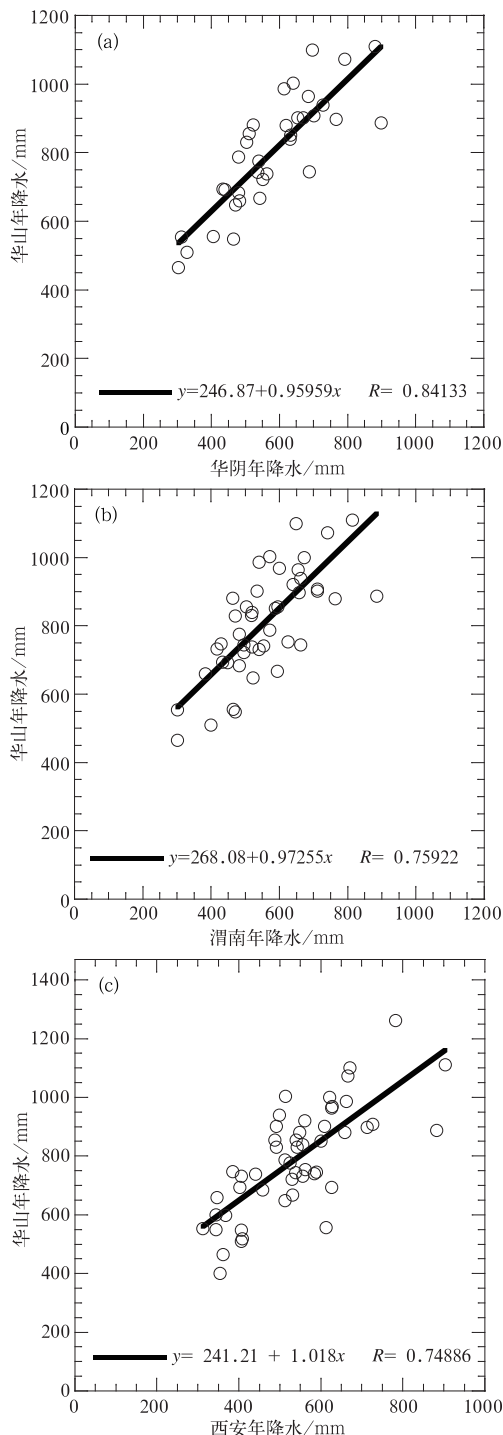


图1 华山和对比站华阴、渭南、西安年降水的线性相关

a. 1970—2004 年, b. 1959—2004 年, c. 1954—2004 年

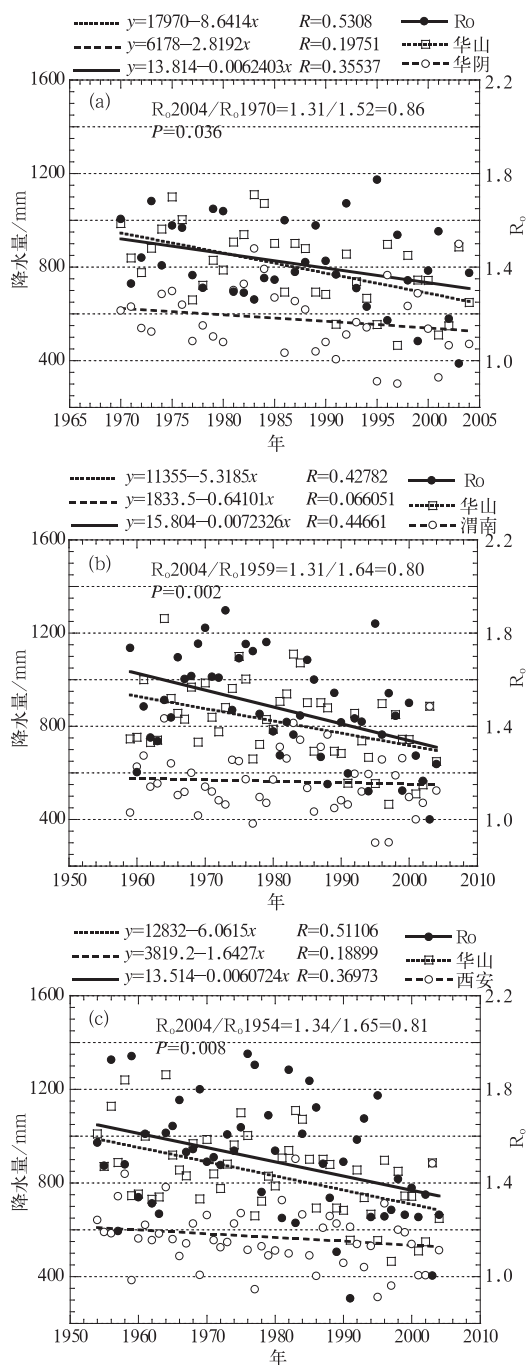


图2 华山和三个对比站的年降水量及 R_0 的变化趋势
a. 华阴 1970—2004 年, b. 渭南 1959—2004 年,
c. 西安 1954—2004 年, P 为 t 检验概率值

多,存在着其它的局地因素影响使华山地形云降水递减比平原要大得多,这其中大部分原因

可能是气溶胶增加引起的。为了分析 R_0 递减是否主要由气溶胶递增所致,进一步分析华山能见度(入云气溶胶表征量)的演变。

3.3 华山能见度演变

由于能见度观测方法在 1980 年做了调整,即:1980 年前按等级观测,1980 年后按距离观测,在分析中首先将能见度等级换算成距离,然后再进行相对湿度和降水的订正。如果相对湿度大于 40% 而小于 99%,对能见度进行订正,订正公式^[20]为:

$$VIS/VIS(\text{订正}) = 0.26 + 0.4285 \log(100 - RH)$$

RH 以百分数计, $\log$ 为常用对数。

如果一天的 4 次观测期间,有任何形态的降水或雾出现,那么这一天的能见度将会从订正的能见度时间序列中剔除。图 3a 给出了逐日能见度(4 次平均)值,图 3b 为订正的能见度值。由图可见:(1)能见度观测方法的调整带来了明显的系统差异,分析时分 1980 年前、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^[21-22];(3)1980 年后、前未订正的能见度下降斜率分别为 -0.203 和 -0.160 ,其比值为 1.27,订正的能见度下降斜率分别为 -0.321 和 -0.154 ,其比值达 2.08,反映出 1980 年后比 1980 年前能见度递减更快、气溶胶递增更明显;(4)1980 年前订正和未订正的能见度下降斜率分别为 -0.154 和 -0.160 ,其比值为 0.96,差异不大;1980 年后订正和未订正的能见度下降斜率分别为 -0.321 和 -0.203 ,其比值为 1.58,差异明显,说明相对湿度对能见度贡献显著(尤其当空气质量较差时),当用能见度作为气溶胶的表征量分析时,必须经相对湿度订正后才更加合理;(5)由第 4.2 节的分析看出,在同一时期,能见度与 R_0 的递减趋势一致,能见度的递减反映出空气污染程度增加、气溶胶浓度增大,

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,减小量为14%~20%。

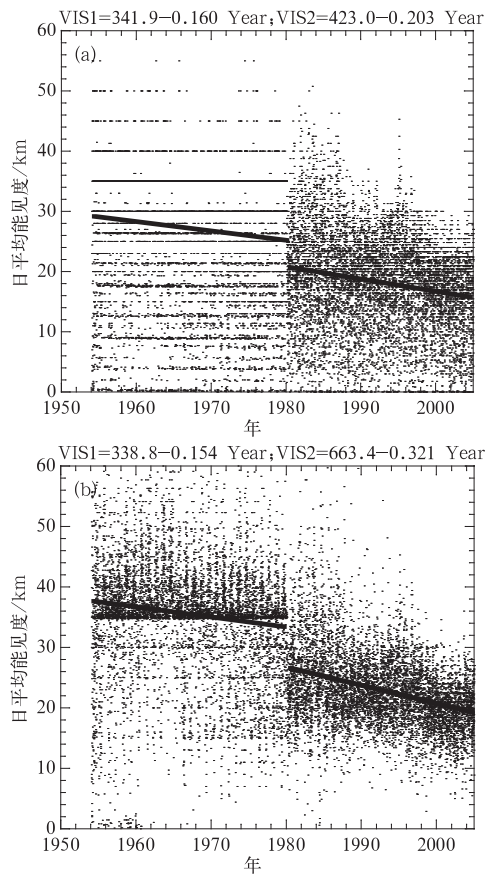


图 3 华山日平均能见度随时间的变化趋势
(a) 能见度观测值, (b) 能见度订正值

综上分析发现能见度的变化趋势在1980年前后存在明显差异,因此,将1980年定为关中城市、工业快速发展的标志年份与能见度时间序列较为一致,可以以此年代划分来开展进一步的分析。

3.4 城市、工业发展污染气溶胶对地形云降水的抑制作用

由以上的分析,初步得到了1954年以来气溶胶抑制地形云降水的观测事实,为了进一步了解城市、工业快速发展气溶胶对地形

云降水的影响,分1980年前、后两个时段进行分析。

3.4.1 1980年前后年降水演变

表2列出了各站年平均降水量及 R_0 值。由表可见,华山1954—1979年的平均年降水量为901mm,1980—2004年的平均年降水量为769mm,1980年后比1980年前降水减少了15%,达132mm;对比站西安1954—1979年的平均年降水量为576mm,1980—2004年的平均年降水量为560mm,1980年后比1980年前减少了3%,仅为16mm;渭南1959—1979年的平均年降水量为551mm(华山同期平均年降水量为871mm),1980—2004年的平均年降水量为573mm,1980年后比1980年前增加了4%,为22mm;华阴1970—1979年的平均年降水量为587mm(华山同期平均年降水量为876mm),1980—2004年的平均年降水量为572mm,1980年后比1980年前减少了3%,仅为15mm。对比站多年平均年降水量在1980年前、后变化幅度不大,减少仅在3%以内,而影响站1980年后的平均年降水量比1980年前明显减少,减少程度15%,达132mm, R_0 在1980年后比1980年前减少了10%~15%,与1980年后能见度的加速递减相吻合。

表 2 各站多年平均降水量(mm)及降水量比值

	华山	华阴	渭南	西安
1954—1979年	901			576
1959—1979年	871		551	
1970—1979年	876	587		
1980—2004年	769	572	574	560
R_1	0.85	0.97	1.04	0.97
R_{01}		0.90	0.85	0.88

注: R_1 为各站1980年后多年平均年降水量与其各自1980年前多年平均年降水量的比值, R_{01} 为1980年后与1980年前 R_0 的比值,即1980年后华山分别与华阴、渭南、西安多年平均年降水量的比值(R_0)同对应的1980年前 R_0 的比值。

图4给出了1980年前后各站年降水量及 R_0 的变化趋势,由图可见:(1)1980年前、

后各站年降水量都呈递减趋势;(2)华山年降水量递减斜率与华阴、渭南、西安之比,1980

年前分别为-1.26、-0.23和-1.03,1980年后分别为-2.18、-2.31和-3.42,反映

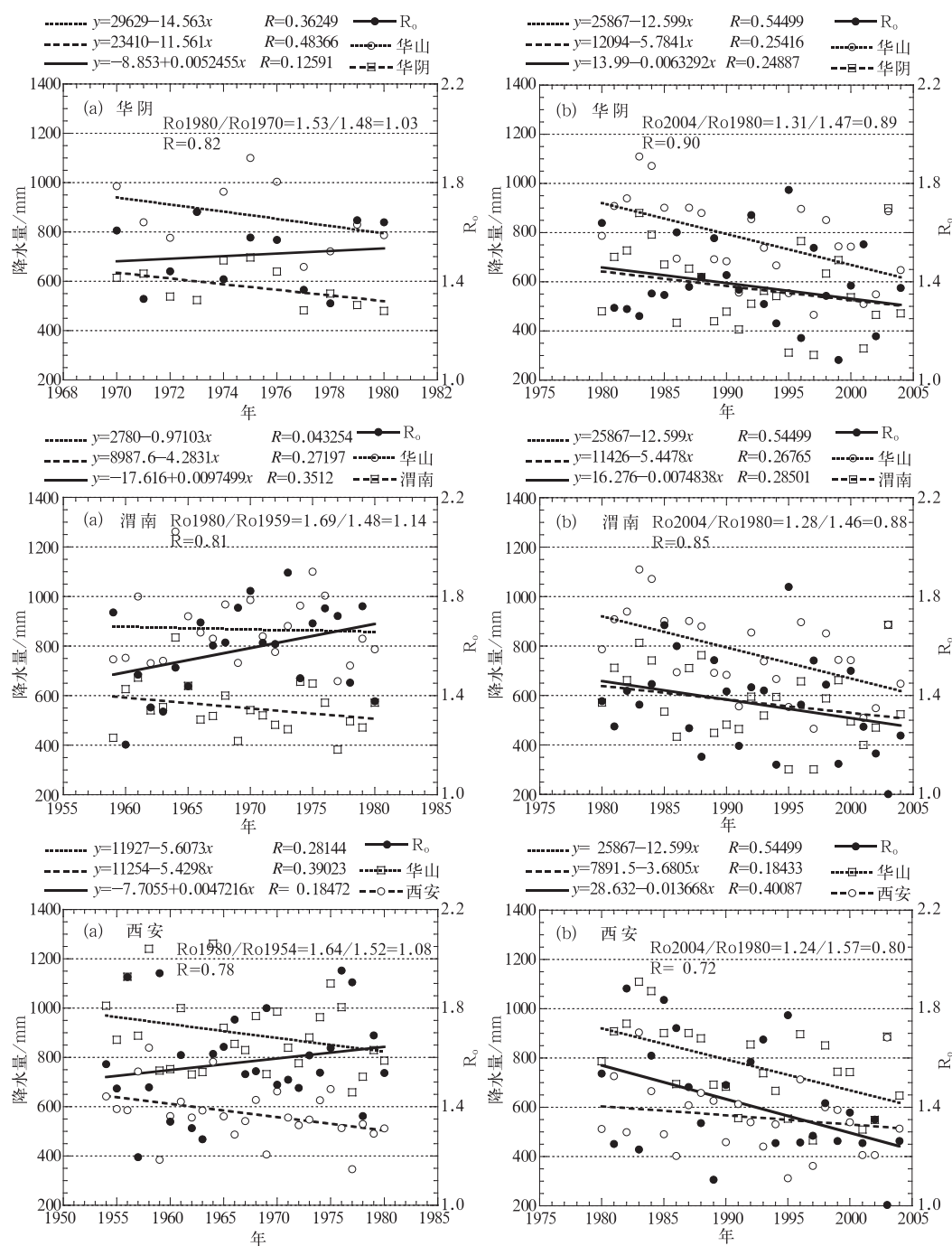


图 4 华山和华阴、渭南、西安三站在 1980 年前后的年降水量及 R_0 的变化趋势

(a) 1980 年前, (b) 1980 年后, R 为华山和各对比站年降水的相关系数

出 1980 年后华山的年降水量递减对比站快的多; (3) 1980 年前, R_0 相对稳定略有增加, 而 1980 年后 R_0 递减, 2004 年的 R_0 比 1980 年的 R_0 减小了 11%~20%, 反映出 1980—2004 年 25 年间华山降水相对平原地区减少了 11%~20%, 与 4.2 比较发现 R_0 递减主要是 1980 年后造成的。

综上所述, 在 1980 年前, 降水影响因子 R_0 基本保持稳定略有增加, 之后 R_0 明显递减, 1980—2004 年 25 年间减小了 11%~20%, 气溶胶对地形云降水的抑制作用突显; 平原地区 1980 年前后的年平均雨量变化幅度不大, 仅减小了 3%, 气溶胶对平原地区云降水的影响较小; 而对秦岭山脉地形云降水, 1980 年后比 80 年前的年平均雨量明显减少, 减少 15%, 达 132mm, 说明了城市工业发展气溶胶对地形云降水的抑制作用明显。对于水资源短缺的西部来说, 其影响很大, 持续下去造成的危害也相当严重, 应给予高度关注。

为了进一步了解气溶胶抑制地形云降水的物理过程, 一是分析不同日降水强度时的影响状况, 二是分析在热力、动力机制下抑制作用如何。

3.4.2 1980 年前后降水发生概率的变化

图 5a、b 分别给出了华山、西安的日降水发生概率(华山与西安的资料起始年份相同), 由图可见: (1) 华山 1980 年后与 80 年前相比, 中、小雨天出现概率明显减少, 1mm 以上的小雨天概率由 1980 年前的 25% 降低到 80 年后的 21%, 减少了 16%, 10mm 以上的雨天发生概率由 1980 年前的 8% 降低到 80 年后的 6.5%, 减少了 19%, 30mm 以上的雨天发生概率基本维持稳定; (2) 西安 1980 年后与 80 年前相比, 小雨天出现概率有所减少, 但减少程度明显低于华山, 1mm 以上的小雨天概率由 1980 年前的 18% 降低到 80 年后的 17%, 减少了 6%, 2mm 以上的雨天发生概率基本没有变化。

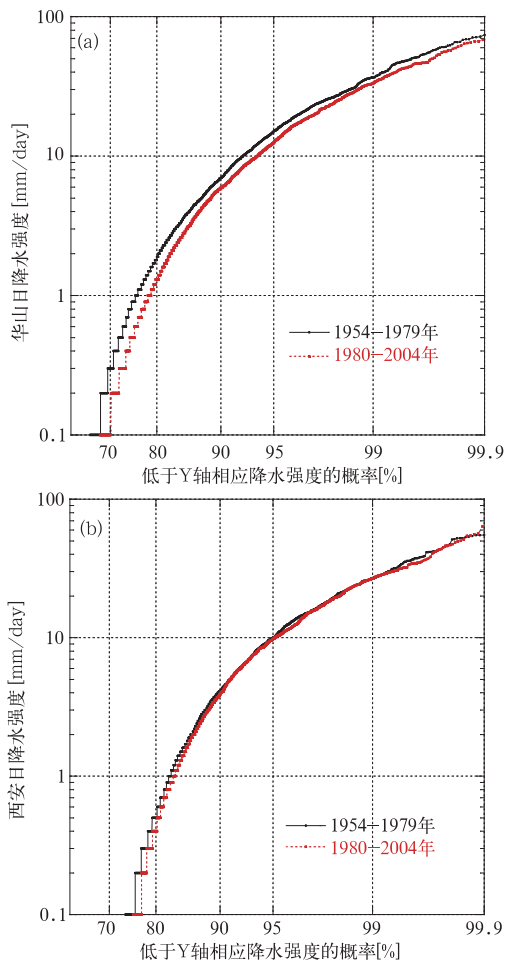


图 5 影响站与对比站 1980 年前后日降水发生概率
a. 华山站, b. 西安站

众所周知, 日降水强度越大, 云体相对越厚, 生命期越长。结合以上分析表明: 气溶胶抑制华山地形云降水主要是减少了发生中小雨的天数, 即气溶胶对浅薄的生命期短的降水云作用更明显, 这是由于此类云没有足够的时间使大量的云水转化为雨水而造成的。对于平原地区, 如西安站由于入云的气溶胶量较小, 只对 1mm 以下的降水云有抑制作用, 而对 2mm 以上的降水云基本没有影响; 对于秦岭山脉, 如华山站由于地形的强迫抬升作用, 使低层气溶胶随气流入云, 随着入云气溶胶量的大幅增加, 反映出对 30mm 以下

的降水云抑制作用明显,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。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也不同,对不同强度的降水云的影响也不同。

3.4.3 降水的季节分布

秦岭和关中地区的成云致雨过程在四季是不同的,春季主要以锋面过程为主,秋季存在着“秋淋”连阴雨天气过程,夏季以对流云降水过程为主,导致秦岭地形云降水在春秋两季以动力强迫抬升为主,夏季则以热对流为

主。因此,分析降水的季节变化趋势,寻找在热力及动力抬升作用下,气溶胶对地形云降水的影响状况,以进一步了解其影响的物理过程。

由于冬季干燥,降水少(仅占年降水 5% 以下),雨量相关性差,所以不分析冬季的情况。表 3、图 6 给出了华山与对比站 1980 年后春、夏、秋三季的降水及 R_0 演变,分析可见:各站夏、秋、春三季的降水占年降水量的比重分别是 45%、30% 左右及 20%~22%,夏季 R_0 变化与春秋两季明显不同,存在着不同的影响机制。

表 3 各站 1980 年后春、夏、秋三季的降水及 R_0 。

	春季				夏季				秋季			
	华山	华阴	渭南	西安	华山	华阴	渭南	西安	华山	华阴	渭南	西安
降水量	171	114	123	122	354	272	250	239	204	167	179	175
R_0		0.88	0.76	0.73		0.91	0.79	0.63		0.94	0.92	0.89
R_0 斜率		-0.017	-0.019	-0.021		0.001	-0.001	-0.012		-0.013	8-0.011	-0.0139
R_0 比值		0.77	0.73	0.70		1.01	0.99	0.83		0.78	0.80	0.77

注: R_0 为华山和各对比站年降水的相关系数, R_0 斜率为 R_0 变化的趋势线斜率, R_0 比值为 2004 年与 1980 年 R_0 之比。

热对流为主的夏季,以华阴、渭南为对比站的 R_0 。基本稳定、保持不变, R_0 (2004 年)与 R_0 (1980 年)之比约为 1,以西安为对比站的 R_0 。存在着递减趋势(也许是相关性较差所致,相关系数 0.63),但明显小于春秋两季。众所周知,热对流降水大多属局地过程,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,此时山区与平原对流云的气溶胶入云机制相同,入云的气溶胶量相当,受影响程度也相当,反映出 R_0 的大小基本稳定、保持不变,抑制降水程度相当。另外,降水性对流云相比较云体较厚、雨强较大,据 4.4.2 分析可知,气溶胶抑制降水主要表现为减少了中、小雨的天数,且对浅薄的云抑制降水作用明显,对云体较厚雨强较大的云抑制降水作用较弱。

以动力强迫抬升为主的春秋两季, R_0 之比

春季为 0.70~0.77,即春季降水在 25 年间减少了 23%~30%;秋季 R_0 之比为 0.77~0.80,即秋季降水在 25 年间减少了 20%~23%,秋季抑制降水作用弱于春季,可能是“秋淋”连阴雨对气溶胶冲刷清除作用所致。相对于平原地区,在动力作用下,秦岭低层堆积的气溶胶粒子随气流抬升入云,增加了云中凝结核数量,使小云滴浓度增大,削弱了云滴间的碰并,推迟了云水向雨水的转化,抑制了降水。

综上所述,热力作用下气溶胶对地形云降水的抑制作用与平原地区相当,动力作用下气溶胶对地形云降水的抑制作用明显强于平原地区,25 年间减少降水达 20%~30%,抑制作用也强于没有剔除热力作用的年降水变化(见第 3.4.1 节降水减小了 11%~20%)。

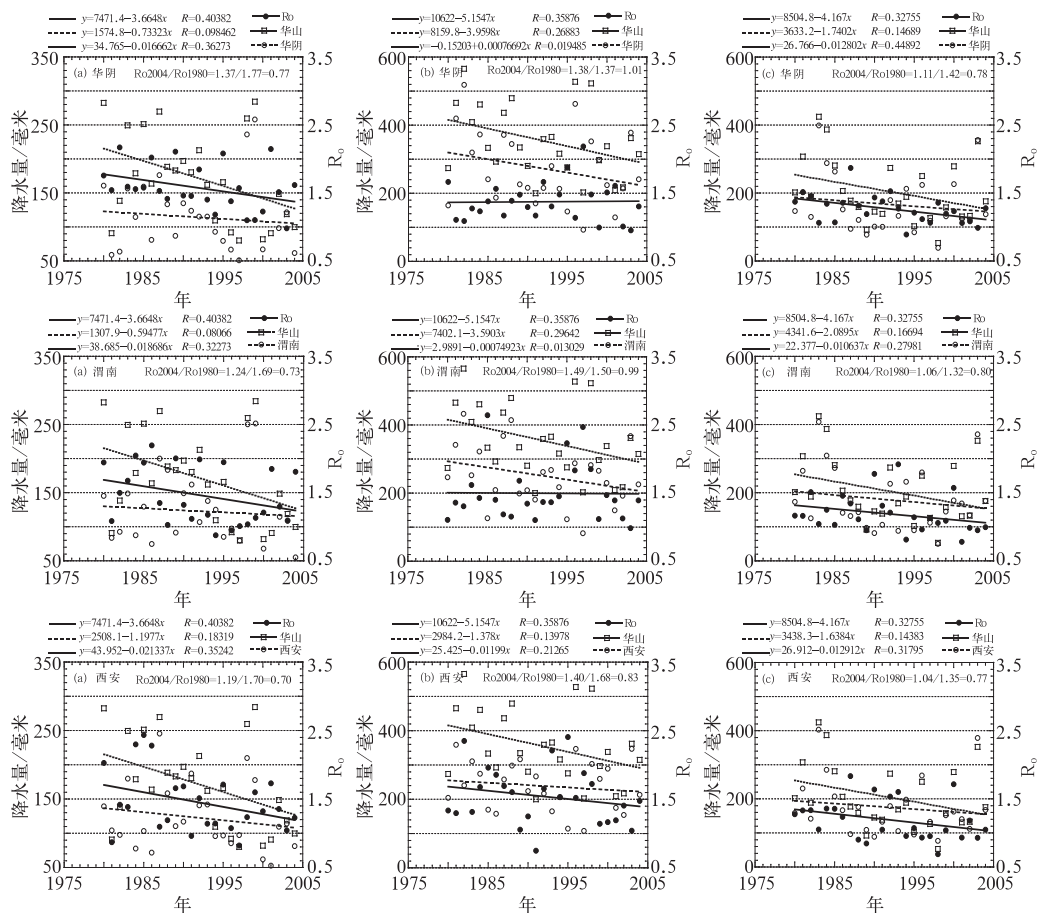


图6 华山和华阴、渭南、西安 1980—2004 年春、夏、秋三季的降水量及 R_0 的变化趋势
a. 春季 3—5 月, b. 夏季 6—8 月, c. 秋季 9—11 月

4 讨论

选取秦岭华山站为影响站,其附近平原的华阴、渭南、西安为对比站,利用有观测以来的降水、能见度资料,通过对降水、能见度及 R_0 的分析,研究了气溶胶对地形云降水的影响。

首先自 1954 年以来 R_0 逐年递减,与能见度的递减、气溶胶的递增相吻合,说明气溶胶的增加抑制了地形云降水,降水相对减少了 14%~20%。尤其是 1980 年后能见度递减加快,气溶胶递增明显,城市、工业快速发展的污染气溶胶对地形云降水的抑制作用突现,

1980—2004 年间 R_0 减小了 11%~20%,华山 1980 年后比 1980 年前的年平均雨量减少了 15%,达 132mm,而平原地区降水量仅减少了 3%,说明 1980 年后是造成观测以来 R_0 递减的主要时期。对于水资源短缺的西部来说,气溶胶抑制地形云降水会加重关中水资源的缺乏,持续下去会造成严重危害,应给予高度关注,并针对此类云实施人工催化,以减轻城市工业发展对环境带来的危害。

其次分析气溶胶抑制地形云降水的物理过程发现,气溶胶的增加主要是减少了发生中小雨(日雨量小于 30mm)的天数,而对大于 30mm 的降水影响较小,即气溶胶对浅薄的生命期较短的地形云降水抑制更明显;在动力作用下,秦岭低层堆积的气溶胶粒子随

气流抬升入云,增加了云中 CCN 数量,小云滴浓度增大,削弱了云滴间的碰并,推迟了云水向雨水的转化,抑制降水作用明显强于平原地区,1980—2004 年 25 年降水减少达 20%~30%(大于同期 11%~20%);在热力作用下,高山与平原地区入云气溶胶量相当,对地形云的抑制降水作用与平原地区也相当, R_0 约为 1。

以上研究结果仅为华山观测事实的分析结果,还需进一步深入研究,逐步完善。

参考文献

- [1] Segal Y, Khain A, Pinsky M. Effects of atmospheric aerosol on precipitation in cumulus clouds as seen from 2000-bin cloud parcel microphysical model: sensitivity study with cloud seeding applications [J]. Q. J. R. Meteorol. Soc., 2004, 130, 561-582.
- [2] Khain A, Pokrovsky A, Sednev I. Some effects of cloud-aerosol interaction on cloud microphysics structure and precipitation formation: Numerical experiments with a spectral microphysics cloud ensemble model [J]. Atmos. Res., 1999, 52, 195-220.
- [3] Andreae M O, Rosenfeld D, Artaxo P, et al. Smoking rain clouds over the Amazon [J]. Science, 2004, 303, 1337-1342.
- [4] Yin Y, Levin Z, Reisn T G, et al. The effects of giant cloud condensational nuclei on the development of precipitation in convective clouds: A numerical study [J]. Atmos. Res., 2000, 53, 91-116.
- [5] Rosenfeld D, Lahav R, Khain A, et al. The Role of sea spray in cleansing air pollution over ocean via cloud processes [J]. Science, 2002, 297, 1667-1670.
- [6] Gunn R, Phillips B B. An experimental investigation of the effect of air pollution on the initiation of rain [J]. J. Meteor., 1957, 14, 272-280.
- [7] Rosenfeld D. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall [J]. Geophys. Res. Lett., 1999, 26, 3105-3108.
- [8] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. Science, 2000, 287, 1793-1796.
- [9] Rosenfeld D, Lahav R, Khain A, et al. The Role of sea-spray in cleansing air pollution over ocean via cloud processes [J]. Science, 2002, 297, 1667-1670.
- [10] Borys R D, Lowenthal D H, Cohn S A, et al. Mountain and radar measurements of anthropogenic aerosol effects on snow growth and snowfall rate [J]. Geophys. Res. Lett., 2003, 30, 1538, doi: 10.1029/2002GL016855.
- [11] Givati A, Rosenfeld D. Separation between Cloud Seeding and Air Pollution Effects [J]. Journal of Applied Meteorology, 2005, 44, 1298-1314.
- [12] Givati A, Rosenfeld D. Quantifying precipitation suppression due to air Pollution [J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43, 1038-1056.
- [13] Rosenfeld D, Givati A. Evidence of Orographic precipitation suppression by air pollution—Induced aerosols in the western United States [J]. Journal of Applied Meteorology, 2006, 45, 893-911.
- [14] Lynn B, Khain A, Rosenfeld D, et al. Effects of aerosols on precipitation from orographic clouds [J]. In press, Journal of Geophysical Research, 2006.
- [15] Griffith D A, Solak M E, Yorty D P. Is Air pollution impacting winter orographic precipitation in Utah? [J]. Weather Modification Association, Journal of Weather Modification, 2005, 37, 14-20.
- [16] Hashimoto Y, Sekine Y, Kim H K, et al. Atmospheric fingerprints of East Asia, 1986 - 1991 an urgent record of aerosol analysis by the JACK network [J]. Atmospheric Environment, 1994, 28, 1437-1445.
- [17] Briant L D, Guo J X. Airborne particulate study in five cities of China [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34, 2703-2711.
- [18] Cao J J, Judith C C, Lee S C, et al. Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China [J]. Atmos. Chem. Phys. Discuss, 2005, 5, 3561-3593.
- [19] Dusek U, Frank G P, Hildebrandt L, et al. Size matters more than chemistry for cloud nucleating ability of aerosol particles [J]. Science, 2006, 312, 1375-1378.
- [20] Daniel Rosenfeld, Jin Dai, Xing Yu, et al. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation [J]. Science, 2007, 315, 1396-1398.
- [21] Qiu J, Yang L. Variation characteristic of atmospheric aerosol optical depths and visibility in North China during 1980-1994 [J]. Atmos. Environ., 2000, 34, 603-609.
- [22] 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 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10(2): 201-208.