

杨汉波, 杨大文, 李萍云, 等. 五台山区地形雨减少与能见度减小的可能联系[J]. 气象, 2010, 36(4): 16-20.

# 五台山区地形雨减少与能见度减小的可能联系<sup>\*1</sup>

杨汉波<sup>1</sup> 杨大文<sup>1</sup> 李萍云<sup>2</sup> 雷志栋<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 清华大学 水利水电工程系, 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084

<sup>2</sup> 陕西省气象台, 西安 710014

**提 要:** 为了揭示气溶胶对地形雨的影响, 以五台山站为研究站, 其南部山下的原平、阳泉为对比站, 采用相关性分析研究五台山站与对比站年降水量、降水日数的比值与能见度的关系。结果表明, 五台山区能见度显著降低, 年降水量及降水日数显著减少; 研究站与对比站的年降水量比值、年降水日数的比值均显著减小, 并且与能见度显著正相关( $p < 0.05$ )。究其可能原因, 能见度的降低反映出气溶胶浓度的增加, 气溶胶浓度的增加抑制了山区地形雨的形成。山区地形雨的减少导致山区水资源的减少; 在缺少山顶站的情况下无法捕捉地形雨减少对面平均降水量计算的影响, 导致低估面平均降雨量的减少量, 低估山区水资源的减少量。

**关键词:** 地形雨, 水资源, 气溶胶

## Possible Relation of Decreasing Orographic Precipitation with Declining Visibility in the Wutai Mountain Region

YANG Hanbo<sup>1</sup> YANG Dawen<sup>1</sup> LI Pingyun<sup>2</sup> LEI Zhidong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Hydro-Science and Engineering & Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

<sup>2</sup> Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014

**Abstract:** Based on the observations of precipitation and visibility ranges from 1961 to 2005 at the top of the Wutai Mountain, the ratios between the precipitation amount at Wutai Mountain and at the nearby plain stations (Yuanping and Yangquan), together with the relation between visibility and aerosol concentration were analyzed to reveal the effect of aerosols on orographic precipitation. Over the Wutai Mountain region, visibility, together with precipitation and number of wet days have a significant decline. Precipitation amount and number of wet days at Wutaishan Station, which are much larger than those the plain stations. Further, the ratios of precipitation amount, and numbers of wet days and the days with precipitation less than 5 mm between Wutaishan Station and the contrast stations also have a significant decline, which has a significant correlation ( $p < 0.05$ ) with visibility. It can be speculated that declining visibility indicates enhancing aerosol concentration, which possibly suppresses orographic precipitation. Decreasing orographic precipitation results in declining water resources in mountain regions; if no precipitation gauges at the top of peaks, the precipitation monitoring network can not capture the effect of declining orographic rainfall on areal precipitation, which leads to an underestimation of the decrease in areal precipitation, as well as water resources.

**Key words:** orographic rainfall, water resources, aerosols

\* 水利部公益性行业科研专项经费项目(200801012)资助

2009年7月15日收稿; 2009年11月23日收修定稿

第一作者: 杨汉波, 主要从事水文水资源及水文气象方面的研究. Email: yanghb99@gmail.com

## 引言

早在1957年,Gunn和Phillips<sup>[1]</sup>就用实验证实大气污染会导致云滴变小而抑制降水的形成。这是因为被污染大气中高浓度的云滴凝结核产生了高浓度的云滴,形成更多但更小的云滴,这样会延缓云滴的融合增大过程<sup>[2-4]</sup>,增加以云滴形式存在的水分形成降水所需要的时间,从而抑制降水的形成,尤其是对山区地形雨的抑制<sup>[5-6]</sup>。对山区地形雨的抑制,通常用地形强化因子 $R_0$ 来定量描述, $R_0$ 定义为山区的降水量和上风平原区降水量的比值<sup>[7]</sup>。气溶胶浓度增加导致的 $R_0$ 减小在许多山区已被发现,如美国的加利福尼亚<sup>[7]</sup>,以色列<sup>[5,8]</sup>,我国的华山地区<sup>[6,9-10]</sup>以及东部几个山区<sup>[11]</sup>。

海河流域是中国经济最为发达的地区之一,同时又是中国水资源严重短缺的地区之一。近年来地表水资源量大幅度减少<sup>[12-14]</sup>,由1956—1960年的平均值 $301.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,减少到1991—2000年的平均值 $183.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[15]</sup>,再到2007年的 $101.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[16]</sup>。关于水资源减少的原因,有研究<sup>[17]</sup>认为人类活动影响是主要的,具体表现为人类活动造成的土地利用类型变化、上游截流等<sup>[12-13,18]</sup>。对于人类活动造成的气溶胶浓度增加可能对海河流域降水产生的影响还很少考虑。关于这种影响,Givati和Rosenfeld的一项研究就表明约旦河上游山区地形雨的减少导致可利用水量每年减少了约 $1.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,占以色列总耗水量的6.5%<sup>[8]</sup>。海河流域山区面积 $18.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占流域总面积的59%<sup>[15]</sup>,山区降水的变化极大地影响着流域水资源的多少。

因此,本文选择位于海河流域西部山区的五台山区进行研究,通过分析年降水量、年降水日数、地形强化因子 $R_0$ 、能见度的变化趋势,并结合气溶胶影响降水的物理机制,以揭示气溶胶浓度增加与山区地形雨减少之间的可能联系。

## 1 数据及方法

本研究采用了中国气象局所属的五台山区的3个气象站(五台山站、原平站和阳泉站)1961—2005年逐日降水量。由于气溶胶的直接观测数据很少,而能见度能一定程度上反映气溶胶的浓度<sup>[19-20]</sup>;因此本研究收集了这3个气象站1980—2002年每天

4次的能见度观测资料及观测时的天气现象(即烟、霾、尘、沙、雾及降水等)。

为了研究地形对降水的影响,本研究中对五台山站的降水变化趋势进行了分析,同时选择位于其南部山下的原平、阳泉站作为对比站点,相关信息见表1。根据每天4次的观测资料,剔除受雨、雾等天气现象影响的数据,得到年平均能见度的时间序列。

表1 五台山站其对比站点的相关信息

站名	经度/°E	纬度/°N	海拔/m	离五台山站的距离/km
五台山	113.53	39.03	2896	0
原平	112.72	38.73	828	78
阳泉	113.55	37.85	742	180

## 2 五台山区降水的变化

### 2.1 降水变化趋势

五台山站与两个对比站年降水量的线性相关系数分别为0.69、0.60,显著性水平 $p < 0.01$ ,这表明影响各站点降水的因素相近,可以进行后续的分析。

利用统计软件SPSS对年降水量的变化趋势进行回归分析,并给出其回归方程及显著性水平,见图1。对比分析位于山顶的五台山站年降水量与南部山下

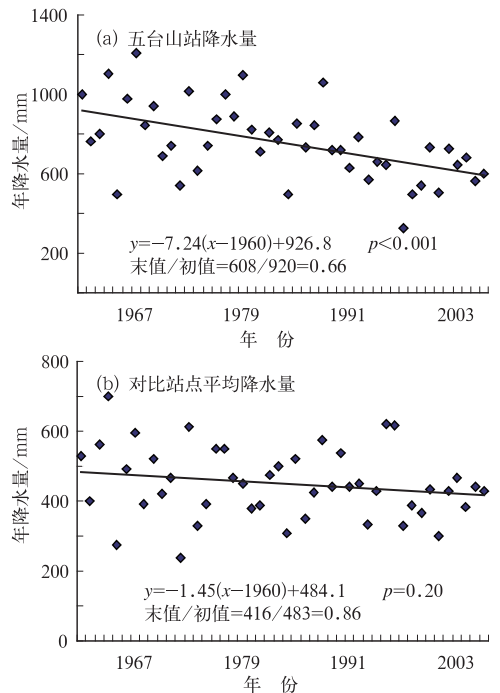


图1 五台山区年降水量的变化趋势  
Fig. 1 Observed trend of annual precipitation in Wutai Mountain region

两个对比站年降水量平均值的比值变化趋势,见图 2。五台山站及对比站降水日数、弱降水(定义为日降水量小于 5 mm)日数分析见图 3、4。

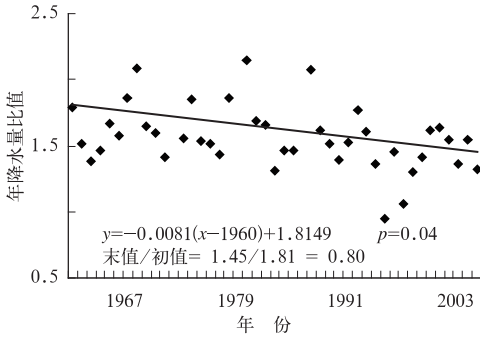


图 2 五台山区年降水量的比值  $R_0$  的变化趋势  
Fig. 2 Observed trend of  $R_0$  in Wutai Mountain region

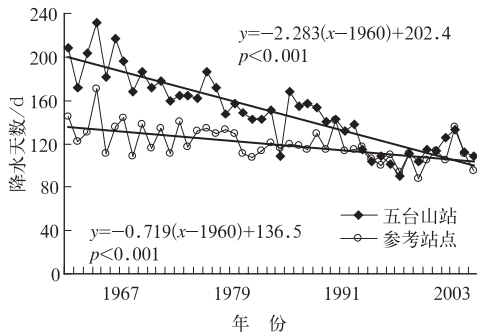


图 3 五台山站与对比站年降水天数变化趋势

Fig. 3 Observed trends of wet day number at Wutai Mountain Station and its contrast stations

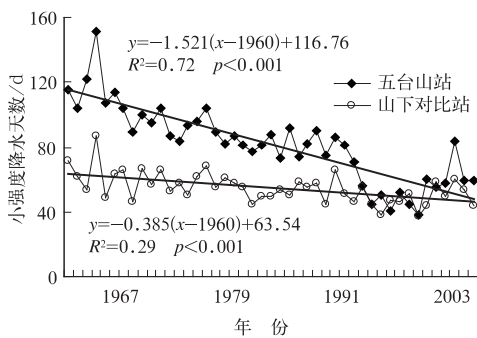


图 4 五台山站与对比站年弱降水天数变化趋势

Fig. 4 Observed trends of the wet day number with daily rainfall less than 5 mm at Wutai Mountain Station and its contrast stations

五台山站的年降水量显著减少 ( $p < 0.001$ ), 45

年间减少了 34% (312 mm), 远高于南部山下两个对比站平均年降水量的减少量 20% (109 mm)。图 2 表明, 在 45 年间, 五台山站与对比站平均年降水量比值显著减小 ( $p < 0.05$ ), 反映了地形雨显著减少, 幅度为 20%。同期, 五台山站及对比站发生降水的日数及弱降水日数显著减少 ( $p < 0.001$ ), 与 1961 年相比, 五台山站 2005 年发生降水的日数减少了 103 天 (51%), 对比站的减少量为 32 天 (24%) (见图 3); 两者比值的减少量为 0.52 (35%)。五台山站发生弱降水的日数年减少了 68 天 (59%), 对比站的减少量为 17 天 (27%) (见图 4); 两者比值减少了 0.81 (42%)。这表明近 50 年来, 五台山发生降水的日数显著减少, 山区尤为明显; 其中又以弱降水日数减少为主。

## 2.2 地形雨减少与能见度降低的关系

回归分析表明, 在 1980—2002 年间, 五台山区的能见度 (三个站点能见度的算术平均值) 显著降低 ( $p < 0.001$ ), 由 25.7 km 降至 21.9 km。利用 SPSS 进行的分析表明 (见表 2), 五台山站与对比站年降水量的比值、年降水日数的比值及年弱降水日数的比值, 均与平均能见度显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 即随着能见度降低这三个比值均减小。

表 2 五台山区降水的比值与能见度的线性相关系数及显著性水平

Table 2 Correlation coefficients and their significance level between the ratios of precipitation and visibility in Wutai Mountain region

要素	年降水量	年降水日数	年小降水日数
线性相关系数	0.46	0.57	0.67
显著性水平	$p = 0.03$	$p = 0.005$	$p < 0.001$

## 3 分析及讨论

近 20 多年, 五台山地区能见度的降低意味着大气中颗粒污染物 (气溶胶) 的增加, 能见度与大气颗粒污染物的关系被相关研究所证实, 如宋宇等<sup>[20]</sup>以北京为例建立的能见度与颗粒污染物的函数关系, 范引琪等分析得到的海河流域能见度的下降与能源消耗和机动车增多存在很好的正相关关系<sup>[21]</sup>。

大气中颗粒污染物 (气溶胶) 对地形雨的影响可以从机理上进行分析。云滴的形成 (即由水汽转化为水的过程) 需要同时具备两个条件: 吸湿性的微粒

(凝结核)及空气达到饱和或过饱和状态。而其中凝结核的浓度基本决定了云滴的浓度。大气的污染会导致云滴变多、变小而抑制降水的形成<sup>[1-4, 22-23]</sup>。水平运动的空气遇到山岭等阻挡,气流被抬升冷却,其中水汽发生冷却凝结形成云滴。地形对气流的抬升作用通常会增加降水的发生,称之为地形对降水的增加效应,可以用 $R_0$ 来定量描述。云滴随着气流顺着山坡上升时不断合并增大,而大气污染会导致这个过程中形成更多、更小的云滴,可能的结果就是云滴还没能大到足够形成降水就已经随气流翻过了山脊。这样就减弱了地形对降水的增加效应,表现为 $R_0$ 的减小。

五台山气象站观测到的年降水量45年间减少了约320 mm,与山下对比站年降水量的比值 $R_0$ 减小了20%。Givati等<sup>[5]</sup>在以色列北部地区的研究发现,在1950—2002年间,由于气溶胶的影响, $R_0$ 减小了15%。Rosenfeld等<sup>[6]</sup>在中国华山的研究表明,气溶胶的影响导致 $R_0$ 减少了10%~25%。地形雨对气溶胶浓度的变化很敏感,Rosenfeld等<sup>[6]</sup>在中国华山的研究发现,在山顶的能见度小于8 km的环境下,污染可能导致山区降水减少30%~50%;Borys等<sup>[3]</sup>证明,在美国科罗拉多州的落基山 $1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 硫酸盐气溶胶的增加量,能减少地形雪的降雪率高达50%。近50年来,五台山站发生降水的日数显著减少,减少率近50%,而对比站点的减少率约20%;两者的比值减少了约30%。可以推测由于气溶胶浓度的增加延缓云滴增大形成雨滴降落的过程,导致气流在沿山坡上升过程碰撞增大形成雨滴下落的难度增大,降低了降水发生的概率。同时还发现发生弱降水的日数减少更快,五台山站减少率约为60%,对比站点减少率约为30%,两者比值约为40%。可能原因是气溶胶对降水的抑制效应,使得原来可以形成的小雨无法形成。类似的,Ferek等<sup>[24]</sup>发现了轮船尾气对小雨的产生会有抑制作用,Gong等<sup>[25]</sup>对中国29个城市以星期为周期的气溶胶排放量的变化和小雨发生的相关性进行的分析也揭示气溶胶对小雨的抑制作用。

近几十年,社会经济的高速发展增加了对矿物能源的消耗产生大量气溶胶排放到大气中,在五台山区周边地区,如山西煤炭的大量开采及消耗,华北平原京津冀地区矿物能源的大量消耗<sup>[21]</sup>;同时,海河流域32个国家气象站的观测数据表明该地区年平均风速降低<sup>[26]</sup>,太原、北京、邢台、张家口的探空

气象资料表明该地区大气稳定度增加<sup>[27]</sup>,这进一步抑制气溶胶的扩散。

气溶胶浓度的大幅度增加,产生的对降水的抑制可能是导致海河流域山区降水显著减少,山区河流径流系数减小的重要原因之一。山区径流是海河流域平原区的主要水资源来源,大气污染带来山区降水的减少趋势可能将进一步加剧流域的水资源危机。此外,还有一个事实值得注意:雨量站的分布通常是平原区多,山区少;而对于山区站点而言,通常又是位于山下的多,而位于山顶的少。在进行面雨量插值时,由于缺少相应的观测,山上的降雨量通常由山下站点的雨量通过地形修正得到,而这种插值方法无法估计由于 $R_0$ 减小(即地形雨减少)带来的山区面雨量的变化,即低估面雨量的减少量,低估水资源减少的严峻形势。

## 4 结 语

伴随着能见度的下降,五台山地区年降水显著减少,降水的地形强化因子 $R_0$ 显著减小;发生降水的日数显著减少,山上与山下降水日数的比值减小,其中弱降水(日降水量小于5 mm)日数的比值减少更快。可能的内在联系是大气污染导致能见度降低,也抑制了地形雨的形成。

值得注意的是,大气污染抑制地形雨的形成,导致山区水资源的减少;在普遍缺少位于山上的雨量站的情况下,可能导致进行面平均雨量插值时无法反映地形雨减少的影响,导致对面平均雨量减少量的低估,对山区水资源减少量的低估。

## 参考文献

- [1] Gunn R, Phillips B B. An experimental investigation of the effect of air pollution on the initiation of rain[J]. *Journal of Meteorology*, 1957, 14: 272-280.
- [2] Andreae M O, Rosenfeld D, Artaxo P, et al. Smoking rain clouds over the Amazon[J]. *Science*, 2004, 303(5662): 1337-1342.
- [3] 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[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(10), 1538, doi:10.1029/2002GL016855.
- [4] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution[J]. *Science*, 2000, 287(5459): 1793-1796.
- [5] Givati A, Rosenfeld D. Separation between cloud-seeding and

- air-pollution effects[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44(9): 1298-1314.
- [6] Rosenfeld D, Dai J, Yu X, et al. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation[J]. *Science*, 2007, 315(5817): 1396-1398.
- [7] Givati A, Rosenfeld D. Quantifying precipitation suppression due to air pollution[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43(7): 1038-1056.
- [8] Givati A, Rosenfeld D. Possible impacts of anthropogenic aerosols on water resources of the Jordan River and the Sea of Galilee[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43, W10419, doi:10.1029/2006WR005771.
- [9] 戴进,余兴, Daniel Rosenfeld, 等. 秦岭地区气溶胶对地形云降水的抑制作用[J]. *大气科学*, 2008, 32(6): 1319-1332.
- [10] 徐小红, 余兴, 戴进. 气溶胶对秦岭山脉地形云降水的影响[J]. *气象*, 2009, 35(1): 37-47.
- [11] Yang H, Yang D, Li P, et al. Possible impact of aerosols on orographic precipitation in eastern China[J]. *IAHS-AISH Publication*, 2008, 322: 48-53.
- [12] 程大珍, 陈民, 史世平, 等. 永定河上游人类活动对降雨径流关系的影响[J]. *水利水电工程设计*, 2001, 20(02): 19-21.
- [13] 王静怡, 王晓燕. 密云水库流域径流变化特征及影响因素分析[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(02): 89-92.
- [14] 夏军. 华北地区水循环与水资源安全: 问题与挑战(一)[J]. *海河水利*, 2003(03): 1-3.
- [15] 任宪韶, 户作亮, 曹寅白, 等. 海河流域水资源评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [16] 水利部海河流域委员会. 海河水资源公报[R]. 天津: 水利部海河流域委员会, 2007.
- [17] 王纲胜, 夏军, 万东晖, 等. 气候变化及人类活动影响下的潮白河月水量平衡模拟[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(01): 86-90.
- [18] 郝杰. 潘家口水库入库径流减小的原因及对策分析[J]. *水利水电技术*, 2007, 38(06): 8-10.
- [19] 王淑英, 张小玲, 徐晓峰. 北京地区大气能见度变化规律及影响因子统计分析[J]. *气象科技*, 2003, 31(02): 109-114.
- [20] 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(04): 468-471.
- [21] 范引琪, 李春强. 1980—2003年京、津、冀地区大气能见度变化趋势研究[J]. *高原气象*, 2008, 27(06): 1392-1400.
- [22] Cui Z Q, Carslaw K S, Yin Y, et al. A numerical study of aerosol effects on the dynamics and microphysics of a deep convective cloud in a continental environment[J]. *Journal of Geophysical Research-atmospheres*, 2006, 111, D05201, doi:10.1029/2005JD005981.
- [23] 康凤琴, 银燕, 张逸轩. 中国北方沙尘气溶胶对云和降水影响的数值模拟研究[J]. *气象*, 2009, 35(06): 36-45.
- [24] Ferek R J, Garrett T, Hobbs P V, et al. Drizzle suppression in ship tracks[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57(16): 2707-2728.
- [25] Gong D Y, Ho C H, Chen D L, et al. Weekly cycle of aerosol-meteorology interaction over China[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2007, 112, D22202, doi: 10.1029/2007JD008888.
- [26] 杨贵羽, 王知生, 王浩, et al. Potential evapotranspiration evolution rule and its sensitivity analysis in Haihe River basin[J]. *水科学进展*, 2009, 20(03): 409-415.
- [27] Zhao C S, Tie X X, Lin Y P. A possible positive feedback of reduction of precipitation and increase in aerosols over eastern central China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L11814, doi:10.1029/2006GL025959.