

王晓玲, 任燕. 2012. 秦岭山区近 50 年降水差异及可能局地成因探讨 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 911–918, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.28.
Wang Xiaoling, Ren Yan. 2012. Analysis of precipitation differences and their local causes in the last 50 years around the Qinling Mountains [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 911–918.

秦岭山区近 50 年降水差异及可能局地成因探讨

王晓玲¹ 任燕²

¹ 陕西省气象学会, 西安 710014

² 陕西省气象培训中心, 西安 710014

摘 要 利用秦岭山区 54 个气象站 50 年以上日降水资料, 分析了复杂地形下小区域降水变化差异, 探讨了可能的局地成因, 结果表明: (1) 年均降水量总体为南高北低、西高东低, 反映出秦岭阻挡作用和山谷东风回流影响; (2) 近 50 年来区域年降水以减为主, 9 个增加站位于东部, 夏季降水以增加为主, 减少站集中在秦岭山上和区域西部, 降水向夏季集中倾向明显; (3) 日雨量小于 5 mm 的年雨量和雨日数减少趋势明显, 雨量 ≥ 50 mm 的年雨量和雨日数增加趋势明显, 即小雨减少大雨增多; (4) 降水变化的多个方面及其与海拔高度和经度对应关系的分析结果, 反映出气溶胶抑制地形降水以及成冰作用恢复被抑制降水的作用, 说明局地成因中气溶胶起了不可忽视作用; (5) 地形作用和区域能量平衡也是重要局地成因。

关键词 秦岭 降水变化 局地成因 气溶胶 地形作用 人工增雨

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0911-08

中图分类号 P462

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.28

Analysis of Precipitation Differences and Their Local Causes in the Last 50 Years around the Qinling Mountains

WANG Xiaoling¹ and REN Yan²

¹ Meteorological Society of Shaanxi Province, Xi'an 710014

² Meteorological Training Center of Shaanxi Province, Xi'an 710014

Abstract Using daily precipitation data for more than 50 years around the Qinling Mountains from 54 meteorological observation stations, precipitation differences in this area of complicated terrain are analyzed, and their local causes are discussed. The results showed that: (1) The annual rainfall is generally high in the south and low in the north, and also high in the west and low in the east, which reflects the barrier effect of the Qinling Mountains and the influence of a westward return current of valley wind. (2) A reduction in yearly precipitation dominates the last 50 years; only nine eastern stations among the 54 exhibited increased precipitation. Further, the summer precipitation increased in most stations and decreased only in a few stations on the flat-topped ridge of the Qinling Mountains and in the western part. The precipitation obviously tends to be concentrated in the summer. (3) The yearly amounts and number of days with daily precipitation of less than 5 mm decreased obviously, and the number of days of daily precipitation greater than 50 mm clearly increased, suggesting an increase in heavy rain and a decrease in light rain. (4) All of these results in the precipitation variation, as well as the precipitation variation with latitude and longitude, reflect the facts that aerosols inhibit orographic precipitation and that ice formation may restore at least some of the inhibited precipitation, which suggests that aerosols play an essential role in the local causes of precipitation differences. (5) The topographic effect and regional energy balance are also

收稿日期 2012-08-12 收到, 2012-09-30 收到修定稿

资助课题 国家自然科学基金 40975087, 中国气象局新技术推广项目 CMATG2009MS41

作者简介 王晓玲, 女, 1963 年出生, 主要从事气象科普与应用气象研究。E-mail: wxl804@gmail.com

important factors in the precipitation differences.

Keywords Qinling Mountains, Precipitation variation, Local cause, Aerosol, Topographic effect, Precipitation enhancement

1 引言

降水不仅是全球水循环中最重要因子之一,还是能量载体,它通过潜热释放为驱动全球大气环流提供了 3/4 能量(Kummerow et al., 2000; Li and Fu, 2005)。降水通过改变大气水分和热量再分布,对区域乃至全球天气气候产生重要影响(Simpson et al., 1988; Tao et al., 1993)。因此,研究降水时空变化、探讨成因对水循环和大气环流具有重要科学意义。

20 世纪以来,以变暖为特征及相应降水变化的世界性气候变化极大地影响了人类活动,气候变化成为当今热点,其科学问题备受科学家关注,促进了我国降水变化的研究工作。许多研究指出,中国夏季降水总体变化不明显,但在年代际尺度上表现为华北与长江中下游呈空间反向特征(Huang et al., 2003; Ding and Sun, 2004; 申乐琳等, 2010); 即 20 世纪 60 年代处于“南旱北涝”, 20 世纪 80 至 90 年代处于“南涝北旱”(王绍武等, 2002; 黄荣辉等, 2008)。众多学者从东亚夏季风、赤道中东太平洋海温、冬季北极海冰、北极涛动、ENSO 影响、对流层中上层大气环流变化以及东亚区对流层上部温度变冷等不同角度(陈隆勋等, 2004; 李建平和曾庆存, 2005; 张庆云等, 2007; 黄荣辉等, 2008; 魏凤英和张婷, 2009; 申乐琳等, 2010), 探讨外源强迫因子和大气环流变化对中国东部夏季风降水的影响, 研究形成机理。中国西北降水的许多研究指出, 降水地域性强(田荣湘等, 1995), 东部与西部呈反相变化, 即西部降水增多、东部季风边缘区降水明显减少(李栋梁等, 2003; 宋连春和张存杰, 2003; 张存杰等, 2003; 陈冬冬和戴永久, 2009)。施雅风等(2003)指出, 20 世纪 80 至 90 年代全球中高纬度大陆的大部分区域降水量明显增加, 中国西北地区降水增加显著, 变暖变湿明显。韦志刚等(2000)认为, 西北降水在 20 世纪 60 年代初多雨, 70 年代初少雨, 80 年代多雨, 90 年代少雨, 在陇南和陕西中南部特征最显著。

上述研究深化了对降水变化认识, 但主要以大尺度角度讨论大区域的降水变化, 对于秦岭山区这

么小范围降水变化研究很少, 尤其是探讨复杂地形下局地成因研究更少。区域降水量同样是重要的气候变量, 对工农业生产乃至整个国民经济发展具有重要影响, 还对区域气候变化具有十分重要意义。受季风气候影响, 秦岭山区降水年内集中, 年际变化大, 受复杂地形和局地气溶胶影响, 变的更加复杂, 山区暴雨局地性强、突发性强、雨量大、频次高, 常引发山洪泥石流等地质灾害, 是防灾减灾重点区。因此, 深入研究该区域降水时空变化, 探讨局地成因, 对提高地形降水科学认识、防灾减灾具有重要意义。

2 研究区域和资料

秦岭是我国中部东西向山脉, 北陡南缓, 高出谷地 1000~3000 m, 太白山峰海拔 3000 m 以上, 其周围构成中高山、中山等复杂地形; 主峰以西分为 3 支, 由北向南山势渐低, 至汉中盆地边缘为低山丘陵, 地势起伏和缓, 谷地开阔; 主峰以东山势逐渐递减, 在商洛地区山体呈掌状向东分开, 相间盆地、河谷。大巴山呈西北—东南走向, 高出谷地 1000~1500 m, 东西长约 300 km。秦岭以南汉中、安康、商洛和以北宝鸡、西安、渭南等市部分县(区)面积 82900 km², 其中山地占 85.3%, 丘陵占 6.9%, 海拔 170~3767 m, 三谷两山相间, 这些构成我国典型的复杂山地(见图 1), 是研究地形降水变化理想区域。

本文中秦岭山区选取(31.9°N~34.9°N, 106°E~110°E)范围, 陕西省境内 50 a 以上观测(始于 1961 年前)的 54 个气象站日降水资料, 海拔高度范围 285 m(旬阳)~2065 m(华山), 其中海拔 800 m 以上气象站有: 宁陕、柞水、佛坪、宁强、洛南、凤县、镇坪、留坝、太白、华山, 资料由陕西省气象信息中心提供。考虑到地形降水强局地性和不连续性, 为了比较差异, 探讨局地成因, 所有资料不进行平滑和插值。

3 地形降水特征及局地成因分析

地形云是湿空气在气流作用下经抬升成云。在

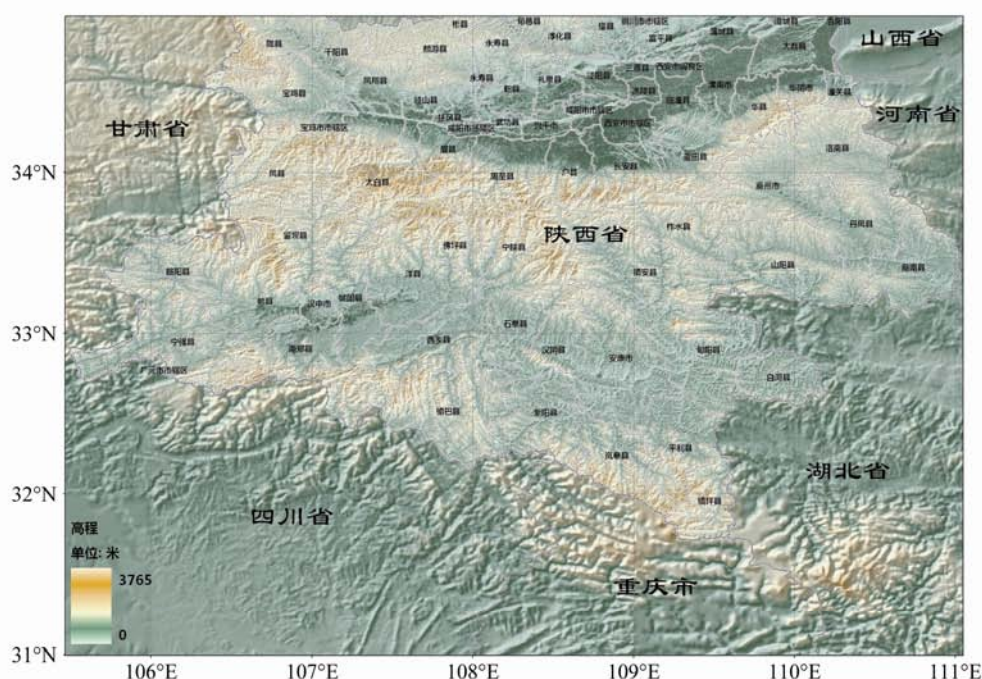


图 1 秦岭山区地形图

Fig. 1 Topography of the Qinling Mountains

稳定或中性层结时常形成沿山脊扩展的层状云,当气流较强时,易形成地形波状云;层结不稳定时,地形强迫易触发能量释放形成对流云。有时还会对中尺度系统产生影响,改变云降水特征。降水发生、发展不仅受大气动力、热力过程和云微物理过程共同影响,而且各种地形,如大的青藏高原、中的秦岭、小的丘陵也会对大气运动产生影响,地形与大气相互作用复杂性使降水变的更加复杂(廖菲等, 2007)。同时,气溶胶辐射效应和微物理效应加大了降水变化复杂性和不确定性,许多观测与模拟表明,气溶胶延长云生命期,亚微米级可能抑制浅薄云系降水,巨核气溶胶可能增加降水,虽然迄今还不能充分证明气溶胶是增加还是减少降水(Rosenfeld, 2000; Ramanathan et al., 2001; Andreae et al., 2004; Feingold et al., 2005; Koren et al., 2008; Rosenfeld et al., 2008; Stevens and Feingold, 2009; Khain et al., 2011),但局地影响是存在的。因此,地形降水不仅真实反映了大气环流变化,也真实反映出局地影响带来变化,本文不讨论大尺度环流影响,仅从差异上探讨局地影响。

3.1 多年平均年降水量分布特征

由图 2 可见:近 50 年,平均降水量总体为南高北低、西高东低,其值为 505~1268 mm,相差 2 倍多,低值集中在关中,反映出秦岭阻挡作用,西

高东低则反映出气流受山脉阻挡,中低层绕流在山谷川道形成偏东回流,遇地形阻挡抬升所致(慕建利等, 2007)。多个高值区分别为宁强、佛坪、宁陕,镇巴、紫阳、汉阴,镇坪、平利,为山区暴雨频发区,集中于巴山北坡和秦岭谷地。年值超过 800 mm 的站达 30%,夏季超过 300 mm 的站达 60%。

3.2 降水年际变化特征

由图 3a 可见,近 50 年来区域降水总体减少,减少站达 82%以上,年际变化差异大,相似地形、海拔高度、经纬度的站出现了有增有减情况,反映出地形局地影响的复杂性和多样性。区域西部降水减少,可能与气溶胶抑制降水有关(具体分析见 3.4 节)。9 个增加站均位于东部,集中于河流经过谷地,也许与局地湿度、局地辐合等有关。但影响程度大到摆脱区域整体下降趋势而变为上升的机理仍不清楚,值得今后进一步探究。

由图 3b 可见,近 50 年来夏季降水以增加为主,增加站达 72%以上,减少站主要集中在秦岭山上和区域西部,降水向夏季集中倾向明显。造成夏季降水增加的局地原因可能有以下 2 个方面。一是受气溶胶成冰作用影响(Rosenfeld et al., 2011),因为气溶胶充当冰核平均温度为 -22°C ,夏季降水云系深厚易满足成冰温度条件,那么,气溶胶能够通过启动冷云降水恢复被其抑制的暖云降水,减缓气溶

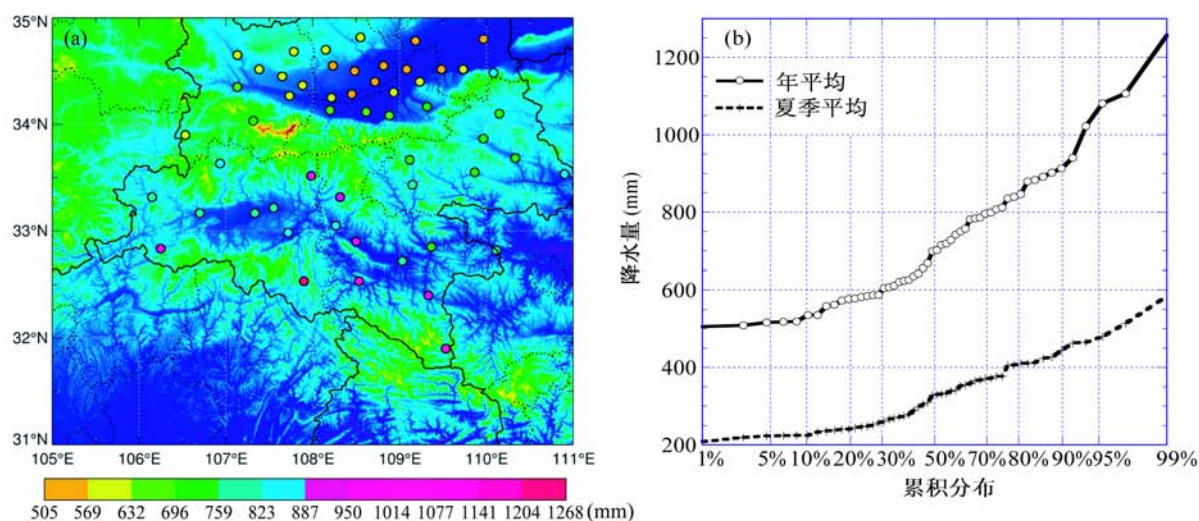


图 2 (a) 54 个站年均降水量(小圆圈填色, 小圆圈颜色对应彩色标尺上数值, 小圆圈代表测站位置)分布(底图填色表示海拔高度, 颜色越蓝表示海拔越低, 颜色越黄表示海拔越高)和 (b) 年、夏季平均降水量累积分布

Fig. 2 Distribution of (a) annual precipitation (the color of the small circle represents the amount of precipitation) of 54 meteorological stations (the small circles mark the station locations) around the Qinling Mountains, the color of the basic map indicates altitude, the bluer and yellower indicate the lower and higher altitude respectively; (b) cumulative probability of annual and summer precipitation

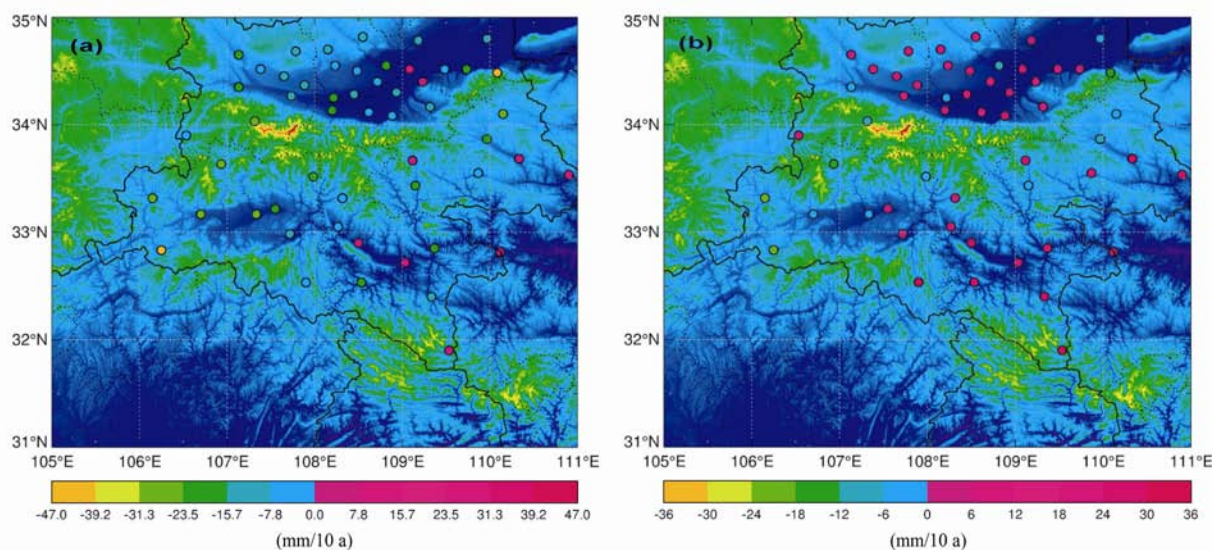


图 3 54 个站 (a) 年平均、(b) 夏季平均降水量年际变率, 图中说明同图 2a

Fig. 3 Interannual variability of (a) annal and (b) summer precipitation for the 54 stations, the others are same as Fig. 2a

胶抑制降水的作用。二是春秋冬季降水减少与夏季降水增多相对应(见图 4a), 为了更好地反映区域响应, 当剔除受局地影响站(华山、宁强站)后, 对应关系更好(见图 4b), 说明区域为了保持地气系统能量总体平衡, 春秋冬季降水减少势必引发夏季降水增多。当然, 真正机理仍需进一步探索。

3.3 不同雨强年际变化特征

由图 5 和图 6 可见, 不同雨强年际变化特征为, 近 50 a 来小雨减少暴雨增多。具体为: 对日雨量小于 5 mm, 年雨量减少站达 92%, 雨日数减少站达

96%; 夏季减少站达 70%, 雨日数减少站达 93%。对日雨量 ≥ 50 mm, 年雨量增加站达 73%, 雨日数增加站达 65%; 夏季增加站达 77%, 雨日数增加站达 73%。形成这一现象机制除了环流影响、地形作用外, 气溶胶可能是主要原因, 因为气溶胶抑制降水作用对薄云最明显, 而对深厚云系而言, 因成冰作用和冰相潜热释放大于水相, 有可能导致降水增加, 即小雨减少大雨增大(Rosenfeld et al., 2008; Li et al., 2011)。如果区域能量平衡主导了降水分布, 那么, 秦岭山区降水变化中反映出向夏季集中、暴

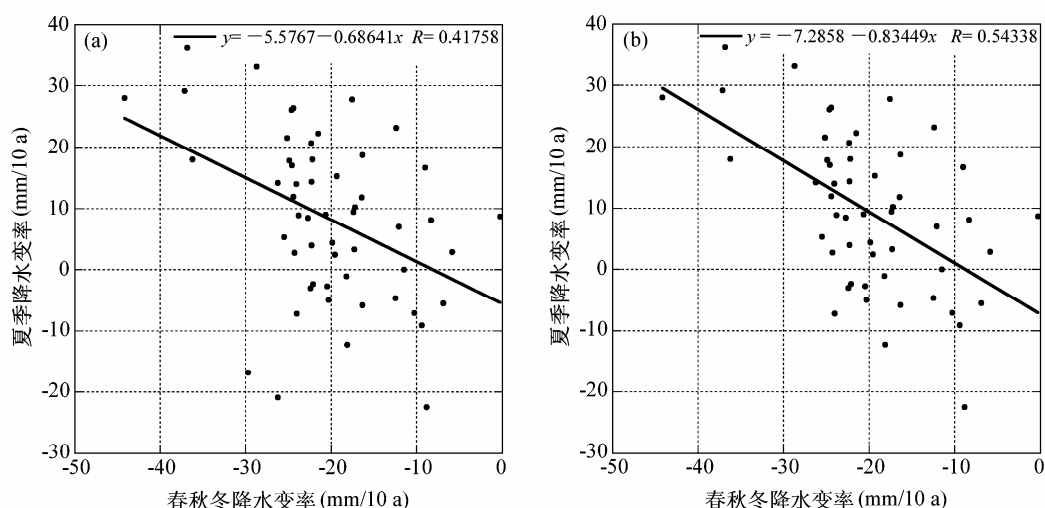


图 4 夏季降水变率与春、秋、冬季降水变率关系: (a) 54 个站; (b) 剔除华山、宁强站

Fig. 4 Relation of precipitation interannual variability between summer and the other three seasons: (a) All 54 stations; (b) 52 stations excluding Mountain Hua and Ningqiang stations

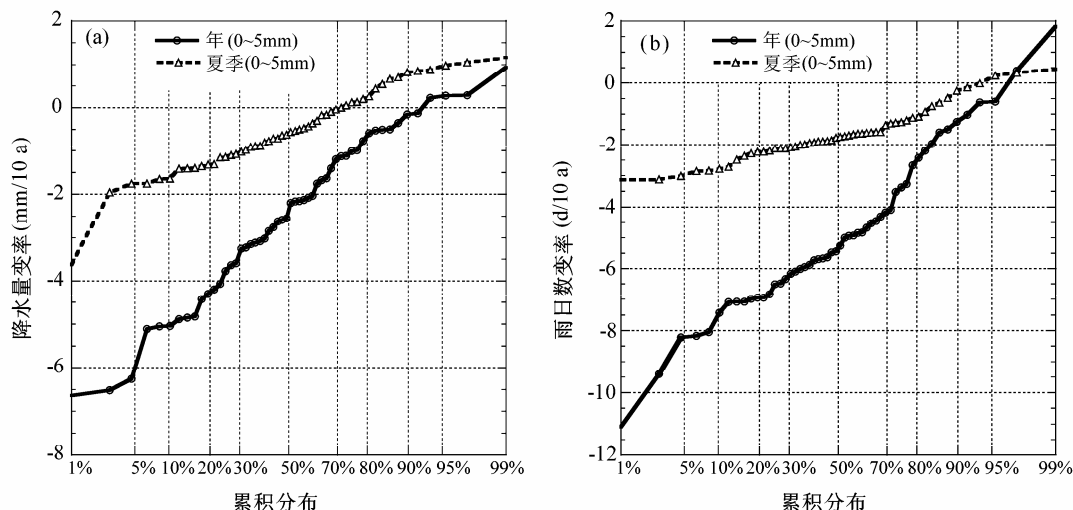


图 5 年、夏季日降水小于 5 mm 时 (a) 雨量和 (b) 雨日数累积分布

Fig. 5 Accumulated probabilities of annual and summer (a) precipitation amount and (b) rainy days with daily precipitation of less than 5 mm

雨增多的现象, 就有可能通过人工影响方式调节降水时空分布, 减缓山区暴雨灾害。

3.4 气溶胶对降水局地影响

3.4.1 区域气溶胶分布

由图 7 可见, 气溶胶水平分布差异大。气溶胶光学厚度 (AOD) 平均值总体上与海拔高度成反比, 即谷高山低。3 个高值区分别位于关中、汉中、安康, 其中关中最大为 1.042, 安康最小为 0.671, 两者相差 1.55 倍。低值区位于山上, 最小 0.127 仅为关中的 12.19%, 整个山区 AOD 分布极不均匀, 反映出局地污染和山谷堆积效应。波长指数 (Angstrom) 则显示秦岭以北粗粒子为主, 以南细粒子为主, 秦岭阻挡作用明显。年均 AOD 大于

0.3 占到 80% 以上, 夏季占 70%, 许多研究指出, 当 AOD 大于 0.3 时, 气溶胶对辐射、云、降水影响转变 (Koren et al., 2008; Rosenfeld et al., 2008)。在这么小区域内, 气溶胶浓度和粒径差异如此大, 更有利于研究气溶胶局地影响。

3.4.2 对降水影响探讨

为了探讨谷地气溶胶抬升入云对降水影响, 从研究区域中选取 2 个小区, 一是秦岭区, 去掉巴山北坡及其山脚影响的区域, 即研究区中 33.1°N~34.9°N 的 43 个观测站; 二是陕南盆地区, 秦岭南坡及谷地, 即陕南行政区中去掉巴山北坡的镇坪、镇巴、宁强共 21 个观测站。

为了了解谷地气溶胶随气流翻过秦岭对降水

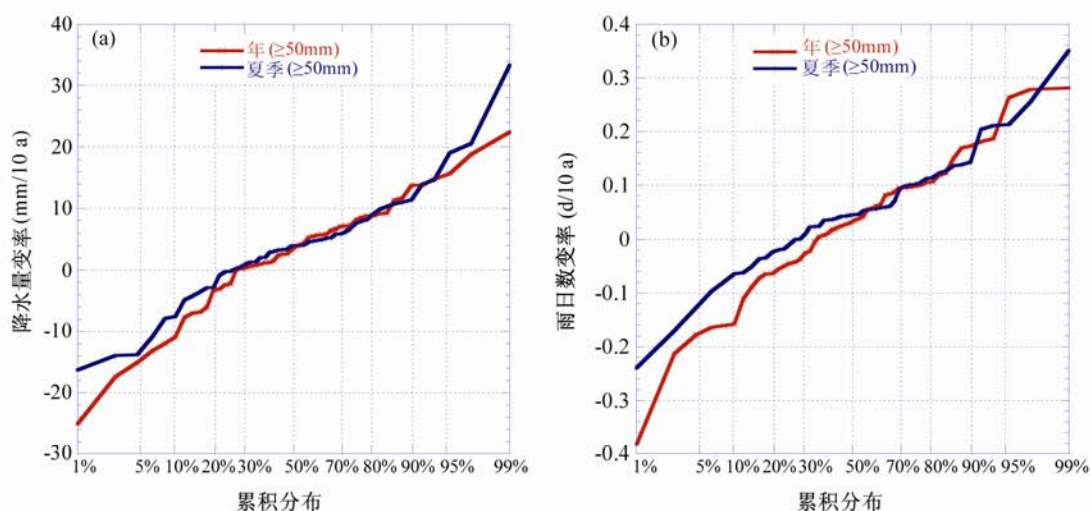


图 6 年、夏季日降水大于或等于 50 mm 时 (a) 雨量和 (b) 雨日数累积分布

Fig. 6 Accumulated probabilities of annual and summer (a) precipitation amount and (b) rainy days with daily precipitation of greater than or equal to 50 mm

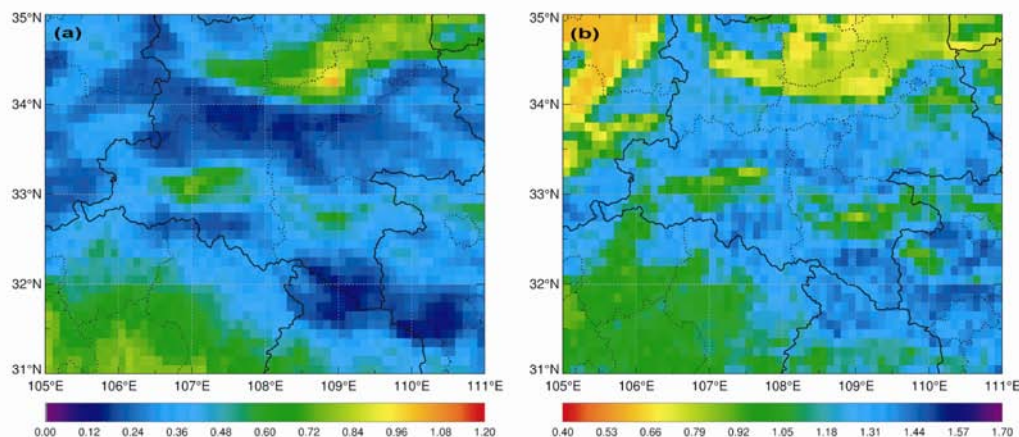


图 7 2000~2010 年 MODIS 卫星观测气溶胶 (a) 光学厚度和 (b) 波长指数分布

Fig. 7 (a) Optical depth and (b) wavelength exponent of aerosol from 2000 to 2010 around the Qinling Mountains derived from MODIS product

影响, 绘制秦岭区降水变率随海拔高度变化图 8a。由图 8a 可见, 随海拔高度增加年降水变率负值增大, 即减雨量增大; 夏季则由增变为减, 但减少程度比年降水变率要小, 与 3.2 节和 3.3 节看到现象吻合。为了了解谷地气溶胶随中低层偏东回流翻越地形入云对降水影响, 绘制陕南区降水变率随经度变化图 8b。由图 8b 可见: 随经度增加年降水变率负值减小, 即减雨量减小; 夏季则由减变增且逐渐增大, 与 3.2 现象吻合, 与区域西部减雨更明显的形成机制一样。也与气溶胶抑制地形降水和成冰作用恢复其抑制的降水相一致 (Rosenfeld et al., 2007; 2011; 戴进等, 2008; 徐小红等, 2009)。

因为, 在地形作用下, 气流爬升时易将山谷堆积气溶胶 (见图 7a) 沿迎风坡携带入云, 大大增加云内 CCN, 使云滴数浓度增加、滴径减小, 导致降

低了云水向雨水转化, 抑制降水。而山谷通过湍流扩散或者热力抬升作用, 将气溶胶输送入云, 通常云底一般离地 1 km 左右, 大多在边界层顶以上, 因此, 谷地上空的云与山坡相比, 入云的气溶胶量少。另一方面, 随山区海拔高度增加, 云底抬升云变薄, 气溶胶抑制降水作用进一步突出 (见 3.3 节), 这就是山坡抑制降水作用比谷地明显的原因。

综上所述, 在造成区域内降水变化差异的局地成因中气溶胶影响不可忽视, 从气溶胶抑制降水角度看, 区域内年降水减少与气溶胶作用有关, 减雨区更适合开展人工增雨作业, 恢复其被抑制降水, 从气溶胶增加云滴数、减小滴径角度看, 针对性播撒方式应为吸湿性核云底播撒最佳。春秋冬季减雨明显, 更适合增雨作业, 而夏季只有区域西部减雨适合增雨作业, 其余区域通常不需要增雨作业。

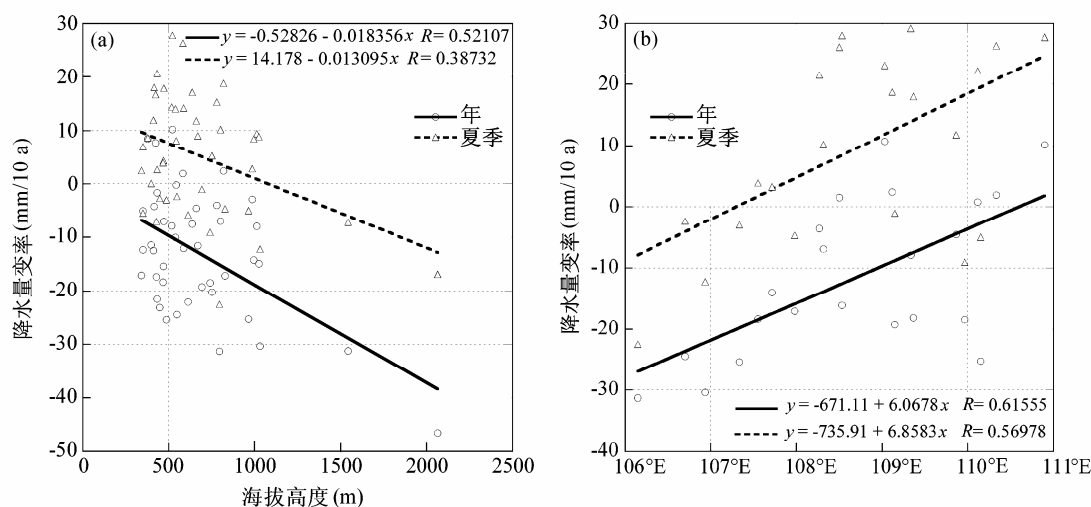


图 8 年、夏季降水变率 (a) 随海拔高度和 (b) 经度变化

Fig. 8 Variation of interannual variability of annual and summer precipitation varied with (a) latitude and (b) longitude

4 讨论

利用秦岭山区 54 个气象站 50 年以上日降水资料, 分析了复杂地形下小区域降水变化差异, 鉴于 50 a 以上资料在反映变化趋势上具有较高可靠性, 降水变化特征客观可靠, 有助于深化地形降水认识。考虑到降水影响因素多, 作用错综复杂, 又涉及不少前沿科学问题, 想要得出确切局地成因, 目前还十分困难。本文仅从可能性上做了粗浅探讨, 从年和夏季降水变化及其与海拔高度和经度对应关系、不同雨强降水变化等方面探讨气溶胶对降水影响, 提出些见解, 丰富了气溶胶对降水影响事实。但也有些是主观推断, 如区域地气能量平衡调节区域降水分布, 需要今后进一步探究。同时, 气溶胶影响降水仍需更多客观事实证实。

参考文献 (References)

- Andreae M O, Rosenfeld D, Artaxo A A, et al. 2004. Smoking rain clouds over the Amazon [J]. *Science*, 303: 1337–1342.
- 陈冬冬, 戴永久. 2009. 近五十年我国西北地区降水强度变化特征 [J]. *大气科学*, 33 (5): 923–935.
- Chen Dongdong, Dai Youjiu. 2009. Characteristics of Northwest China rainfall intensity in recent 50 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (5): 923–935.
- 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮. 2004. 中国近80年来气候变化特征及其形成机制 [J]. *气象学报*, 62 (5): 634–645.
- Chen Longxun, Zhou Xiujie, Li Weiliang, et al. 2004. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (5): 634–645.

- 戴进, 余兴, Rosenfeld Daniel, 等. 2008. 秦岭地区气溶胶对地形云降水的抑制作用 [J]. *大气科学*, 32 (6): 1319–1332.
- Dai Jin, Yu Xing, Rosenfeld D, et al. 2008. The suppression of aerosols to the orographic precipitation in the Qinling Mountains [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (6): 1319–1332.

- Ding Yihui, Sun Ying. 2004. Changes in Asian summer monsoon and possible mechanisms [J]. *News Letter on Climate Change*, 2003/2004: 47–49.

- Feingold G, Jiang H L, Harrington J Y. 2005. On smoke suppression of clouds in Amazonia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L02804.

- Huang Ronghui, Zhou Liantong, Chen Wen. 2003. The progresses of recent studies on the variabilities of East Asian monsoon and their causes [J]. *Advances Atmospheric Science*, 20: 55–69.

- 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 2008. 东亚季风系统的时空变化及其对中国气候异常影响的最近研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 691–719.
- Huang Ronghui, Gu Lei, Chen Jilong, et al. 2008. Recent progresses in studies of the temporal-spatial variations of the asian monsoon system and their impacts on climate anomalies in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 691–719.

- Khain A, Rosenfeld D, Pokrovskaya A, et al. 2011. The role of CCN in precipitation and hail in a mid-latitude storm as seen in simulations using a spectral (bin) microphysics model in 2D dynamic frame [J]. *Atmospheric Research*, 99: 129–146.

- Koren I, Martins J V, Remer L A, et al. 2008. Smoke invigoration versus inhibition of clouds over the Amazon [J]. *Science*, 321: 946–949.

- Kummerow C, Simpson J, Thiele O, et al. 2000. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39 (12): 1965–1982.

- 李栋梁, 魏丽, 蔡英, 等. 2003. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望 [J]. *冰川冻土*, 25 (2): 135–142.
- Li Dongliang, Wei Li, Cai Ying, et al. 2003. The present facts and the future tendency of the climate change in Northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 25 (2): 135–142.

- 李建平, 曾庆存. 2005. 一个新的季风指数及其年际变化和雨量的关系

- [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 351–365. Li Jianping, Zeng Qingcun. 2005. A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 351–365.
- Li R, Fu Y. 2005. Tropical precipitation estimated by GPCP and TRMM PR observations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 22 (6): 852–864.
- Li Zhangqing, Niu Feng, Fan Jiwen, et al. 2011. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation [J]. Nature Geoscience, 4 (12): 888–894, doi:10.1038/ngeo1313.
- 廖菲, 洪延超, 郑国光. 2007. 地形对降水的影响研究概述 [J]. 气象科技, 35 (3): 309–316. Liao Fei, Hong Yanchao, Zheng Guoguang. 2007. Review of orographic influences on surface precipitation [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 35 (3): 309–316.
- 慕建利, 李泽椿, 李耀辉. 2009. 高原东侧特大暴雨中秦岭山脉的作用 [J]. 高原气象, 28 (6): 1282–1290. Mu Jianli, Li Zechun, Li Yaohui. 2009. Effect of Qinling Mountains of a extremely heavy rain-storm process on the east side of Qinghai-Xizang [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (6): 1282–1290.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Rosenfeld D. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. Science, 294: 2119–2124.
- Rosenfeld D. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. Science, 287: 1793–1796.
- Rosenfeld D, Dai J, Yu X, et al. 2007. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation [J]. Science, 315: 1396–1398.
- Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, et al. 2008. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? [J]. Science, 321: 1309–1313.
- Rosenfeld D, Yu X, Liu G H, et al. 2011. Glaciation temperatures of convective clouds ingesting desert dust, air pollution and smoke from forest fires [J]. Geophys. Res. Lett., 38: L21804, doi:10.1029/2011GL049423.
- 申乐琳, 何金海, 周秀骥, 等. 2010. 近50年来中国夏季降水及水汽输送特征研究 [J]. 气象学报, 68 (6): 918–931. Shen Lelin, He Jinhai, Zhou Xiujie, et al. 2010. The regional variabilities of the summer rainfall in China and its relation with anomalous moisture transport during the recent 50 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68 (6): 918–931.
- 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估 [M]. 北京: 气象出版社. Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. 2003. An Assessment of the Issues of Climatic Shift from Warm Dry to Warm Wet in Northwest China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- Simpson J, Adler R F, North G R. 1988. A proposed Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 69 (3): 278–295.
- 宋连春, 张存杰. 2003. 20世纪西北地区降水量变化特征 [J]. 冰川冻土, 25 (2): 143–148. Song Lianchun, Zhang Cunjie. 2003. Changing features of precipitation over Northwest China during the 20th century [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 25 (2): 143–148.
- Stevens B, Feingold G. 2009. Untangling aerosol effects on clouds and precipitation in a buffered system [J]. Nature, 461: 607–613.
- Tao W K, Lang S, Simpsom J, et al. 1993. Retrieval algorithms for estimating the vertical profiles of latent heat release: Their application for TRMM [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 71 (6): 685–700.
- 田荣湘, 高玲, 高由禧. 1995. 中国西北干旱区降雨量的时空变化 [J]. 高原气象, 14 (1): 90–95. Tian Rongxiang, Gao Ling, Gao Youxi. 1995. Spatial and temporal variation of annual rainfall in the northwest arid areas of China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 14 (1): 90–95.
- 王绍武, 蔡静宁, 朱锦红. 2002. 19世纪80年代到90年代中国年降水量的年代际变化 [J]. 气象学报, 60 (5): 637–640. Wang Shaowu, Ca Jingning, Zhu Jinhong. 2002. The interdecadal variations of annual precipitation in China during 1880s–1990s [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (5): 637–640.
- 魏凤英, 张婷. 2009. 淮河流域夏季降水的振荡特征及其气候背景的联系 [J]. 中国科学 (D辑), 39 (10): 1360–1374. Wei Fengying, Zhang Ting. 2010. Oscillation characteristics of summer precipitation in the Huaihe River valley and relevant climate background [J]. Science China Earth Sciences, 53 (2): 301–316, doi:10.1007/s11430-009-0151-7.
- 韦志刚, 董文杰, 惠小英. 2000. 中国西北地区降水的演变趋势和年际变化 [J]. 气象学报, 58 (2): 234–243. Wei Zhigang, Dong Wenjie, Hui Xiaoying. 2000. Evolution of trend and interannual oscillatory variabilities of over the northwest of China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (2): 234–243.
- 徐小红, 余兴, 戴进. 2009. 气溶胶对秦岭山脉地形云降水的影响 [J]. 气象, 35 (1): 37–47. Xu Xiaohong, Yu Xing, Dai Jin. 2009. Effect of aerosol on orographic precipitation in Qinlin Mountains [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35 (1): 37–47.
- 张存杰, 高学杰, 赵红岩. 2003. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响 [J]. 冰川冻土, 25 (2): 157–164. Zhang Cunjie, Gao Xuejie, Zhao Hongyan. 2003. Impact of global warming on autumn precipitation in Northwest China during the 20th century [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 25 (2): 157–164.
- 张庆云, 吕俊梅, 杨莲梅, 等. 2007. 夏季中国降水型的年代际变化与大气内部动力过程及外强迫因子关系 [J]. 大气科学, 31: 1290–1300. Zhang Qingyun, Lü Junmei, Yang Lianmei, et al. 2007. The interdecadal variation of precipitation pattern over China during summer and its relationship with the atmospheric internal dynamic processes and extra-forcing factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31: 1290–1300.