

1960—2017 年黄土高原昼夜降水变化特征

安彬^{1,2,3}, 肖薇薇^{2,3}, 朱妮¹

(1.安康学院 旅游与资源环境学院, 陕西 安康 725000; 2.安康市汉江水资源保护与利用工程技术研究中心, 陕西 安康 725000; 3.陕西省科协院士专家工作站, 陕西 安康 725000)

摘 要:为了探究黄土高原气候暖干化背景下的昼夜降水变化规律,利用黄土高原 55 个气象观测站 1960—2017 年逐日降水数据,使用线性拟合和空间分析法研究了年际及雨季(5—10 月)降水量、降水日数、降水强度及夜雨率等降水指标的变化特征。结果表明:(1) 黄土高原历年和雨季的昼夜降水量、降水日数均呈下降趋势,降水强度则呈上升趋势。历年降水量和降水日数下降幅度高于雨季,降水强度上升幅度低于雨季。(2) 黄土高原地区雨季昼夜降水指标的空间格局差异明显。雨季降水量和降水强度自东南向西北递减,昼降水日数呈西南和东北偏多、西北偏少,夜降水日数呈西南偏多、西北偏少的空间特征。(3) 黄土高原历年及雨季的平均夜降水率分别为 50.44%,50.34%。晋豫交界及六盘山以西区域夜雨率高于 50%;陕西西部及中北部、内蒙包头至呼和浩特、祁连山以东等区域夜雨率呈上升趋势,山西中部及东北部、宁夏银川至内蒙鄂托克旗等区域下降趋势明显。综上,黄土高原地区未有明显的夜雨现象。

关键词:昼夜降水; 降水日数; 降水强度; 夜雨率; 黄土高原

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0132-07

Characteristics of Change in Diurnal Precipitation in the Loess Plateau During 1960—2017

AN Bin^{1,2,3}, XIAO Weiwei^{2,3}, ZHU Ni¹

(1.School of Tourism & Environment, Ankang University, Ankang, Shaanxi 725000, China; 2.Engineering Technology Research Center for Water Resource Protection and Utilization of Hanjiang River, Ankang, Shaanxi 725000, China; 3.Academician Expert Workstation of Shaanxi Association for Science and Technology, Ankang, Shaanxi 725000, China)

Abstract: In order to explore the diurnal precipitation variation in the Loess Plateau under the background of climate warming and drying, we used the daily precipitation data of 55 meteorological stations from 1960 to 2017 to analyze the variation characteristics of inter-annual and rainy season (May-October) precipitation, precipitation days, precipitation intensity and night rain rate by using linear fitting and spatial analysis method. The results show that the precipitation and precipitation days of diurnal precipitation over the annual and rainy season decreased in the Loess Plateau, while the precipitation intensity showed an upward trend; the decrease range of precipitation and precipitation days over the years were higher than those in rainy season, and higher at night than those in daytime; the increase range of precipitation intensity over the years was lower than that in rainy season, and higher at night than that in daytime; the spatial pattern of diurnal precipitation indices in rainy season in Loess Plateau were obviously different; in rainy season, precipitation and precipitation intensity decreased from southeast to northwest; the number of precipitation days was more in southwest and northeast, less in northwest, and the number of night precipitation days was more in southwest and less in northwest; the average night precipitation rate over the years and in the rainy season were 50.44% and 50.34%, respectively; the rate of night rain was higher than 50% in the area of Shanxi-Henan border and the west of Liupan Mountain; it was rising in the west and the north central part of Shaanxi, Baotou to Hohhot and the east of Qilianshan Mountain, and declining in the middle and northeast of Shanxi, Yinchuan to Etuoke Banner of Inner Mongolia. In conclusion, there is no obvious night rain phenomenon in the Loess Plateau.

收稿日期:2020-11-07

修回日期:2021-04-03

资助项目:陕西省教育厅项目(20JK0009);安康市科学技术研究发展计划项目(AK2019RK-04);安康学院校级科研项目(2021AYPT16)

第一作者:安彬(1988—),男,江西九江人,副教授,主要从事区域环境与 GIS 应用研究及教学工作。E-mail:leyang1007@126.com

Keywords: diurnal precipitation; precipitation days; precipitation intensity; night-precipitation rate; Loess Plateau

随着气象观测资料的日益丰富,多尺度的降水变化指标受到研究者的高度关注,尤其是最基础的降水日变化研究。受太阳辐射日变化规律所引起地表加热、大气对流等过程作用,降水经常发生在一天某个特定时间段,而不是随机的^[1-3]。相关研究表明,降水日变化规律存在区域差异,如美国东南部和西部多发生在午后^[4],而中国西南地区多发生在凌晨及下午时段^[5]。在我国,以四川盆地夜间降水量多于白天的“夜雨现象”最受关注^[6-7],印证了“巴山夜雨”说法^[8]。但已有研究表明,夜雨现象并不为四川盆地特有,在中国新疆^[2]、西藏^[9]、江苏^[10]、青藏高原^[11]、祁连山^[12]等也有类似现象,以上研究对于深入理解区域性天气系统、水汽循环等有着重要意义^[1-2,6-7,9-12]。

在全球气候变暖的大背景下,黄土高原地区表现出太阳总辐射减少^[13]、气候暖干化^[14]、蒸散发增加^[15]等特征。目前,关于黄土高原降水规律的研究多集中在年、季、月尺度分布^[14,16-17],王涛等^[18]仅分析了陕北黄土高原地区的不同等级降水日数的变化,鲜有涉及全区昼夜降水变化特征的研究。基于此,本文利用1960—2017年黄土高原逐12 h降水资料,运用气候统计分析方法,分析黄土高原昼夜降水变化规律,该研究将对黄土高原地区降水资源的有效利用、提高水土流失等防灾减灾能力等提供理论借鉴。

1 研究区概况

黄土高原地处我国东部季风区向西北干旱区的过渡地带(33°41′—41°16′N,100°52′—114°33′E)^[14],其边界范围东到太行山,南达秦岭,西止青海日月山,北抵阴山^[19];海拔整体上呈西北高、东南低的特点,沟壑纵横。该地区属于夏季高温暴雨,冬季寒冷干燥,年均气温为7.86~10.71℃,年降水量为302.39~645.16 mm,其中5—10月降水量占全年的80%以上,是全球生态环境脆弱带、气候变化敏感区之一^[20]。自1999年退耕还林草工程实施以来,黄土高原的植被面积大幅度提高,有效遏制了黄土高原土壤侵蚀,入黄泥沙显著降低^[21]。

2 数据与方法

降水实测数据全部来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。依据站点的缺失数据低于2%、观测时间最长等原则,确定了55个站点的1960年1月1

日—2017年12月31日降水数据,并对所获取数据进行了严格的质量核查(图1)。将每日8:00—20:00,20:00—次日8:00,20:00—次日20:00(北京时间)的降水依次统计为白昼降水、夜间降水、日降水,再以每年1—12月、5—10月生成年、雨季降水序列。此外,当日降水量>0 mm时,即可计算当日的“夜雨率”,其公式为:夜雨率=夜间降水量/日降水量×100%^[11]。降水的变化趋势采用线性拟合^[22]计算,并检验其显著性;所有图件均利用Origin 2017或ArcGIS 10.2软件制作。

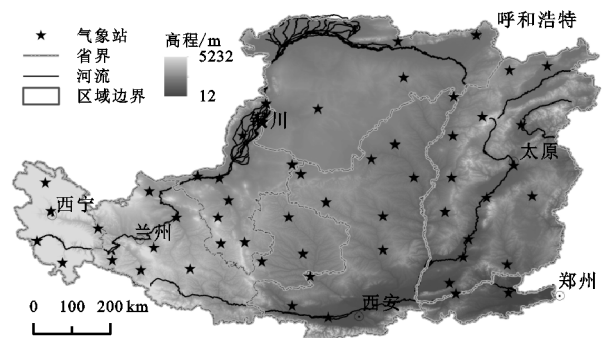


图1 研究区气象站点空间位置

3 结果与分析

3.1 昼夜降水长期变化趋势

3.1.1 昼夜降水量长期变化 图2A显示,1960—2017年黄土高原多年平均降水为420.29 mm,以-0.421 mm/a的速率呈不显著下降趋势($p>0.05$),与西北干旱区年均降水(1961—2015年)减少幅度相当^[23]。全区多年平均雨季降水量为362.37 mm,对全年降水贡献率达到86.22%,表明黄土高原降水集中度较高。雨季降水量每年以0.385 mm的幅度下降($p>0.05$),略低于四川的0.4 mm/a^[6],也低于黄土高原历年降水变化速率,与该区冬春季降水呈小幅增加的事实相符^[14]。结合图2B—C可以看出,黄土高原地区多年平均白昼、夜间降水量分别为207.62, 212.67 mm,且分别以0.129, 0.291 mm/a速率呈不显著的波动下降($p>0.05$)。全区多年平均雨季白昼、夜间降水量为179.22, 183.15 mm,均占到全年白昼、夜间降水量的86%左右;雨季白昼、夜间降水量的每年下降幅度分别为0.126, 0.259 mm($p>0.05$)。整体上看,黄土高原年降水下降速率高于雨季,而白昼降水下降速率则低于夜间降水,与黄河流域的降水昼夜同减类型一致^[24]。

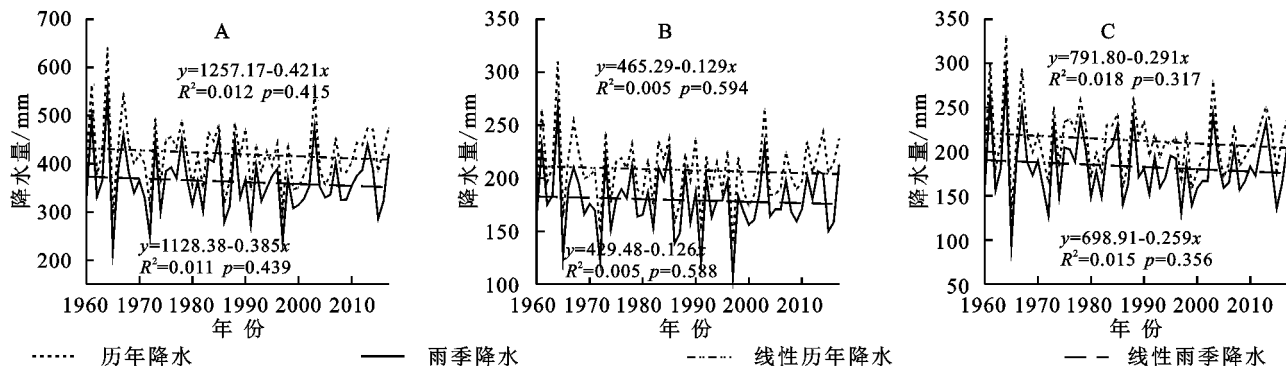


图 2 1960—2017 年黄土高原历年和雨季昼、夜降水的长期趋势

3.1.2 昼夜降水日变化特征 依据白昼(夜间)降水量 >0 mm 时,记为 1 次昼(夜)降水日数的原则,计算了黄土高原的降水日数。结果显示,1960—2017 年黄土高原历年和雨季的白昼、夜间降水日数均呈波动减少趋势,但减少幅度略有差异(图 3),与我国降水日数下降现象相吻合^[25]。具体看,历年和雨季的降水日数减幅分别为 0.239, 0.141 d/a ($p < 0.01$),历年和雨季的夜间降水日数减幅分别为 0.229, 0.133 d/a ($p < 0.05$),历年和雨季的白昼降水日数以 0.092,

0.058 d/a 减少,反映了黄土高原昼夜降水频率的降低。从具体昼夜降水日数上看,近 58 a 黄土高原雨季平均降水日数为 51.13 d,占到全年降水日数 81.00 d 的 63.12%;全年和雨季的降水日最大值分别为 120.40 d(1964 年), 80.22 d(1964 年),最小值分别为 61.09 d(1997 年), 40.06 d(1997 年)。雨季白昼平均降水日数为 35.26 d,占全年昼降水日的 64.76%,而雨季夜间平均降水日数 33.02 d,是全年夜降水日的 62.42%,最大值与最小值分别出现在 1964 年、1997 年。

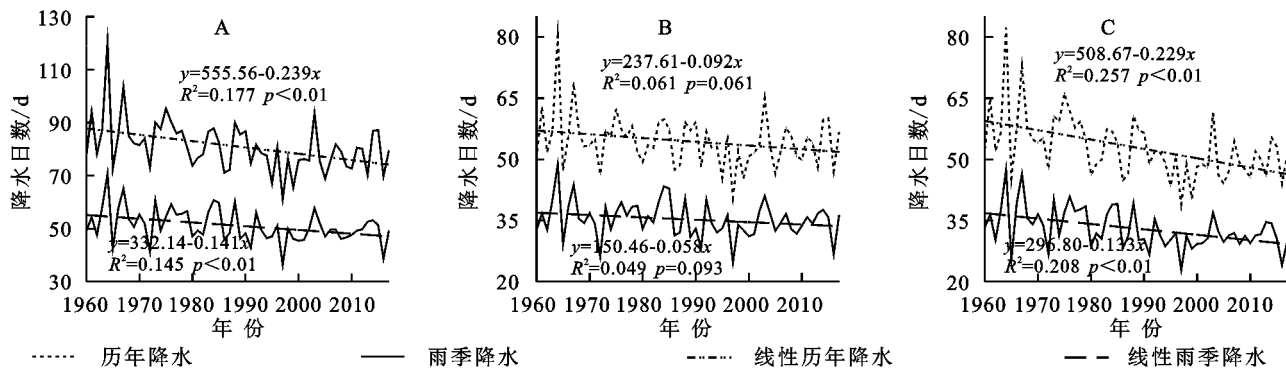


图 3 1960—2017 年黄土高原历年和雨季昼、夜降水日数的长期趋势

3.1.3 昼夜降水强度变化特征 总(昼/夜)降水强度指总(昼/夜)降水量与总(昼/夜)降水日数的比值^[7,24]。在黄土高原地区降水量和降水日数均呈减少趋势的背景下,其降水强度如何变化? 据此,分别计算了黄土高原逐年昼夜降水强度,结果见图 4A—B。可知,1960—2017 年黄土高原昼夜降水强度均呈上升趋势,与我国降水强度趋势变化相同^[26]。历年和雨季的多年平均白昼降水强度分别为 3.81, 5.07 mm/d, 每年以 0.004 6, 0.005 2 mm/d 速率上升,但均未通过 0.05 显著性水平检验。历年和雨季的多年平均夜间降水强度分别为 4.03, 5.54 mm/d, 每年上升的幅度分别是 0.013, 0.016 mm/d, 且均通过 0.05 显著性水平检验。可见,黄土高原地区夜间降水强度高于白昼降水强度,雨季明显高于历年。进一步计算黄土高原地区夜降水比例发现,历年夜降水率变化在 43.60%~56.42%,多年平均夜降水率为 50.44%,以 0.012%/a 的速率不显著

下降 ($p > 0.05$), 低于青藏高原 1961—2007 年夏季 ($-0.045\%/a$) 减少速率。雨季平均夜降水率略低于年均夜降水率, 多年平均值为 50.34%, 其变化介于 44.34%~55.80%, 以 0.009%/a 的速率不显著下降 ($p > 0.05$)。相比较我国新疆^[2]、四川^[6]等区域, 黄土高原地区并未有明显的夜雨现象。

3.2 雨季昼夜降水年代际分析

计算发现, 黄土高原地区降水在 5—10 月最为集中, 占全年 86.22%, 易形成洪涝等气象灾害。基于此, 本文重点分析雨季昼夜降水的年代际和空间变化特征。由昼夜降水年代际统计(表 1)可以看出, 黄土高原雨季昼夜降水量、降水日数均呈 V 型变化, 年代最高值在 1960s, 最低值则在 1990s; 各年代际的白昼与夜间降水量的年代际变率相差不大, 但白昼降水日数变率明显高于夜间降水, 这必然导致夜间降水强度高于白昼降水, 二者之差由 1960s 的 0.20

mm/d 增至 2011—2017 年的 0.69 mm/d。从夜降水率年代际变化情况看,以 1980s 末为界线,之前高于多年平均值,在 1970s 最大;之后持续下降至 2011—2017 年的 50.04%。

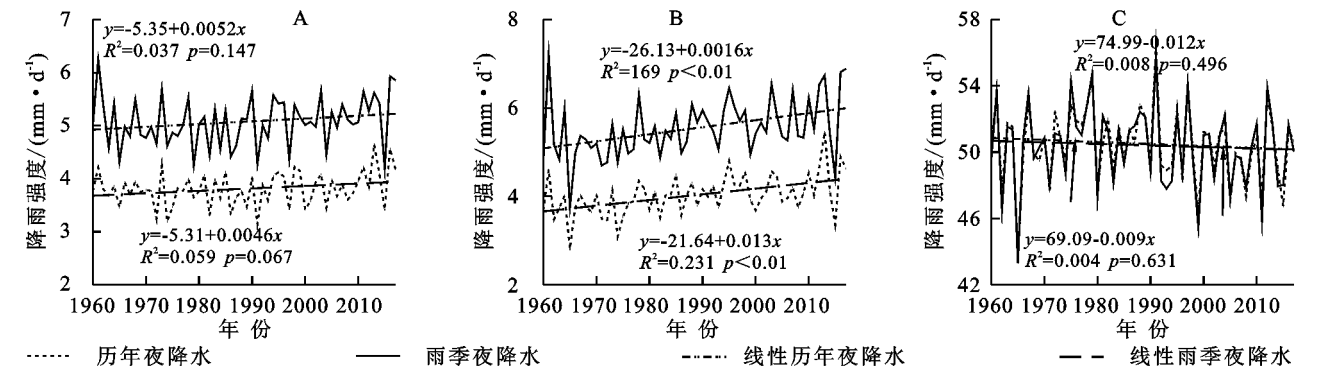


图 4 1960—2017 年黄土高原历年和雨季昼、夜降水强度的长期趋势

表 1 黄土高原雨季的昼夜降水指标年代际统计

年代	昼降水量/ mm	夜降水量/ mm	昼降水 日数/d	夜降水 日数/d	昼降水强度/ (mm · d ⁻¹)	夜降水强度/ (mm · d ⁻¹)	夜降水率/%
1960s	190.31	194.52	37.2	36.55	5.12	5.32	50.55
1970s	176.38	188.92	35.79	36	4.93	5.25	51.72
1980s	179.1	182.61	36.39	33.43	4.92	5.46	50.49
1990s	168.67	170.04	32.84	29.72	5.14	5.72	50.2
2000s	176.52	177.42	34.6	31.21	5.1	5.69	50.13
2011—2017	185.64	185.96	34.61	30.75	5.36	6.05	50.04

3.3 雨季昼夜降水指标空间变化特征

3.3.1 雨季昼夜降水量空间特征 整体上,黄土高原地区雨季白昼降水量呈东多西少、南多北少、自东南向西北递减的空间特征(图 5A),与该区(1961—2010 年)全年降水空间分布基本一致^[27];全区雨季白昼降水量最多的是陕西的洛川、延安等地。值得注意的是,黄土高原西部白昼降水达 150~200 mm,较偏东地区的降水略有增加。雨季夜间降水的空间特征与白昼降水类似(图 5B),但其纬度地带性特征更明显些,150 mm 和 200 mm 等降水线更偏南些,造成这种空间格局可能与大气环流因子变化密切相关。西部的门源、临夏和临洮等站是雨季夜间降水的高值区,达到 250~300 mm;甘肃民和至榆中一线以西地区的夜间降水量较白昼高出 50~100 mm。结合 5C—D 可知,多数地区 5—10 月份的白昼和夜间降水主要以-0.4~0 mm/a 的速度下降,但其空间分布特征略有差异。与雨季白昼降水相比,夜间降水下降速率高于 0.4 mm/a 的范围更广,集中分布在山西省的中部和南部、甘肃省临夏和定西等地,其中以临洮-1.487 mm/a 的下降速率最大。夜间降水呈上升趋势的集中分布在陕西西北部至陕宁蒙交界、陇东陕甘界和青海东部等,其中以西宁的 0.707 mm/a 最高;白昼降水呈上升趋势则集中分布在山西北部、宁蒙交界和青海东部等,以大同的 0.656 mm/a 最高。

3.3.2 雨季昼夜降水日数空间特征 由图 6A 可知,

黄土高原 5—10 月的白昼降水日数呈西南和东北偏多、西北偏少的空间格局,以门源的 65.33 d 最多,银川和陶乐的 20.84 d 最少;降水日数在 25~35 d 和 35~45 d 的分布面积相当。雨季夜间降水日数布呈西南偏多、西北偏少空间规律,多数地区的降水日数为 25~35 d,以门源的 58.97 d 最多、惠农的 17.98 d 最少(图 6B);15~25 d 的夜间降水日数分布面积远大于白昼降水日数。图 6C—D 显示,黄土高原雨季昼夜降水日数下降幅度空间上皆呈西北低、东南高。对白昼降水日数而言,其每年降幅以 0~0.06 d 和 0.06~0.12 d 为主,二者分布面积相当;以门源的一 0.232 d/a 减少最多、西宁的 0.119 d/a 增加最多,在鄂尔多斯高原的西部地区的白昼降水日数集中呈增加趋势。对于夜间降水日数而言,全区所有站点皆显示出减少态势,多数地区每年降幅在 0.06~0.24 d,远高于白昼降水日数降幅;以宁夏西吉的一 0.358 d/a 减少最多,临洮、吴起一线东南区域的减少幅度超过 0.18 d/a。

3.3.3 雨季昼夜降水强度空间特征 黄土高原雨季昼、夜降水强度整体表现出自东南向西北递减的空间格局(图 7A—B),其强度分别介于 2.310~7.683 mm/d,3.643~7.806 mm/d。白昼降水强度达到 4~7 mm/d 的占全区面积的 2/3,而同样的夜间降水强度占到了 90%以上;白昼降水强度低于 4 mm/d 的低值主要分布临夏、中宁一线以西区域,夜间降水强度低值区则只分布在中宁、景泰的黄土高原边界。此

外,晋豫交界处出现了 7~8 mm/d 的夜间降水强度,陕西横山、绥德和山西兴县、太原、原平等地的夜间降水强度均高于白昼,以上地区需更加防范夜间强降水造成的次生灾害。图 7C—D 为黄土高原地区昼夜降水强度变化趋势的空间格局,可以看出,多数地区的昼夜降水强度呈增加趋势,其增加趋势分别以 0.008~0.016 mm/(d·a),0.016~0.024 mm/(d·a)为

主,夜间降水强度增加幅度明显高于白昼降水。延安、孟津等地的白昼降水强度呈下降趋势,其降幅在 0.011 mm/(d·a)左右;夜间降水强度形成以内蒙古鄂托克旗为中心的下降趋势最大值,达到-0.016 mm/a。白昼降水强度增加趋势明显的地区集中分布在陕西东北部、关中中东部、山西中部和北部,而夜间降水则集中分布在陇东至渭北台塬、陕北横山至绥德一带。

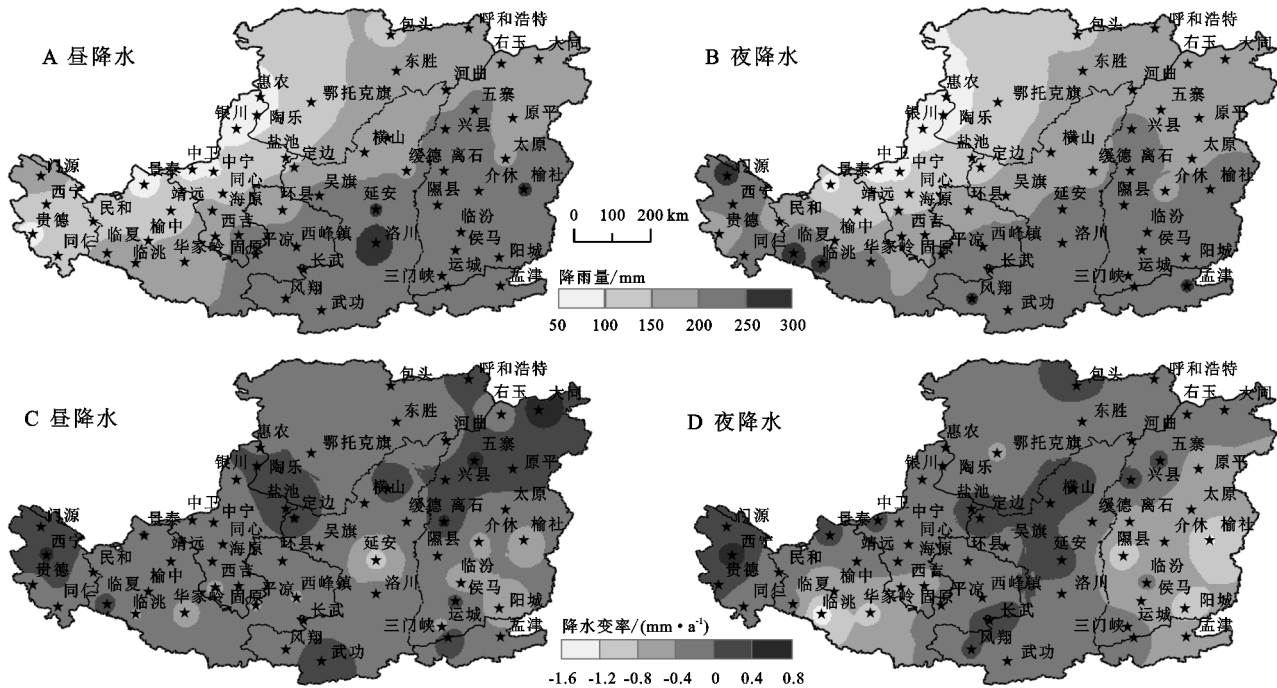


图 5 黄土高原雨季昼夜降水量及其变率空间分布

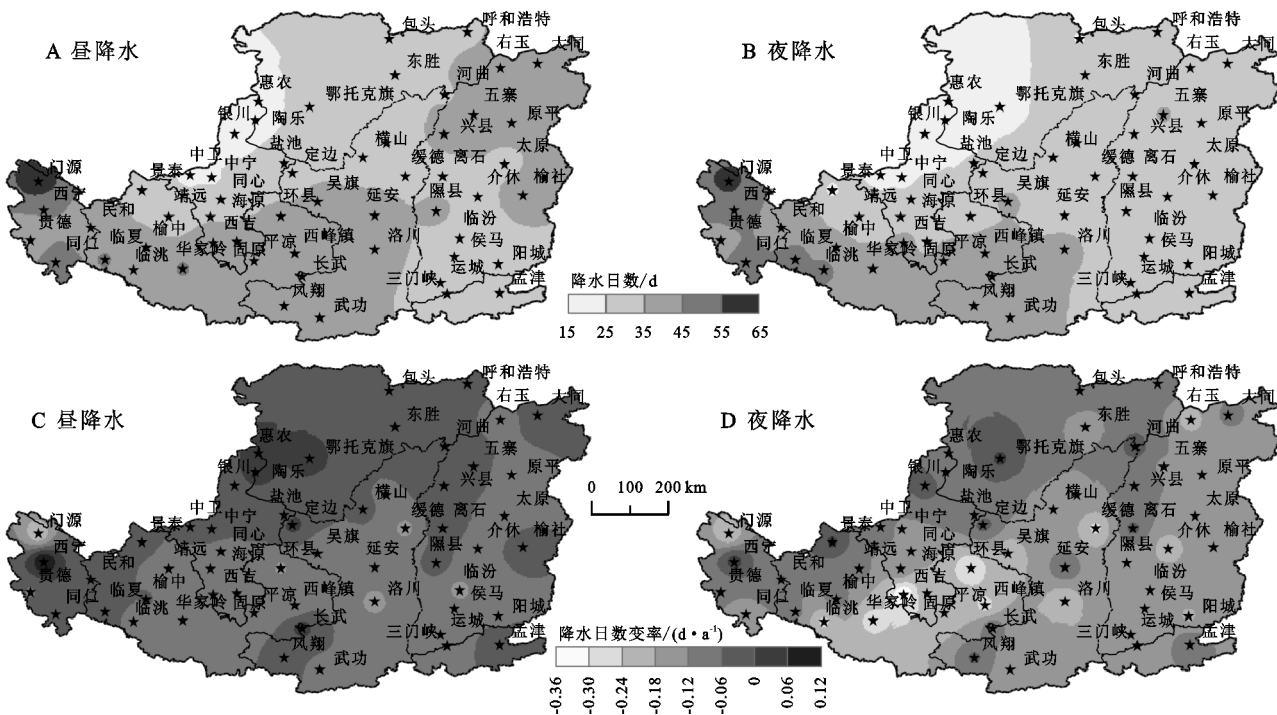


图 6 黄土高原雨季昼夜降水日数及其变率空间分布

从雨季夜降水比例的空间看(图 8A),1960—2017 年黄土高原多数地区的夜雨比例低于 50%,其

站点数达到 36 个,集中在区内东部、中部、北部,以惠农站的 44.59%最低。境内晋豫交界及六盘山以西地

区的夜雨比例高于 50%，尤其是西宁、临夏以西区域夜雨率高达 60%~65%，以贵德站的 64.73% 比例最高。黄土高原夜降水比例呈上升和下降的站点数分别为 30, 25 个，西部及中北部、内蒙包头至呼和浩特、祁连山以东等区域呈上升趋势，以中卫的 0.123%/a 上升最为明显；山西中部及东北部、宁夏银川至内蒙鄂托克旗等区域下降趋势明显，以陶乐的 -0.176%/a 下降最为明显（图 8B）。此外，依据 ArcGIS 分类区统计模

块计算黄土高原不同海拔范围内的夜雨率（图 9），海拔高于 2 000 m 区域的平均夜雨率最高，为 58.64%，1 000~2 000 m 区域的最低，为 49.08%；低于 200 m，200~500 m，500~1 000 m 区域的平均夜雨率分别为 50.71%，50.14%，49.47%。进一步计算发现，海拔与夜雨的相关系数为 0.865，当海拔低于 1 400 m 左右时，该区域夜雨率随着海拔的增加而降低，高于 1 400 m 时，则相反，说明黄土高原雨季存在最大夜雨率带。

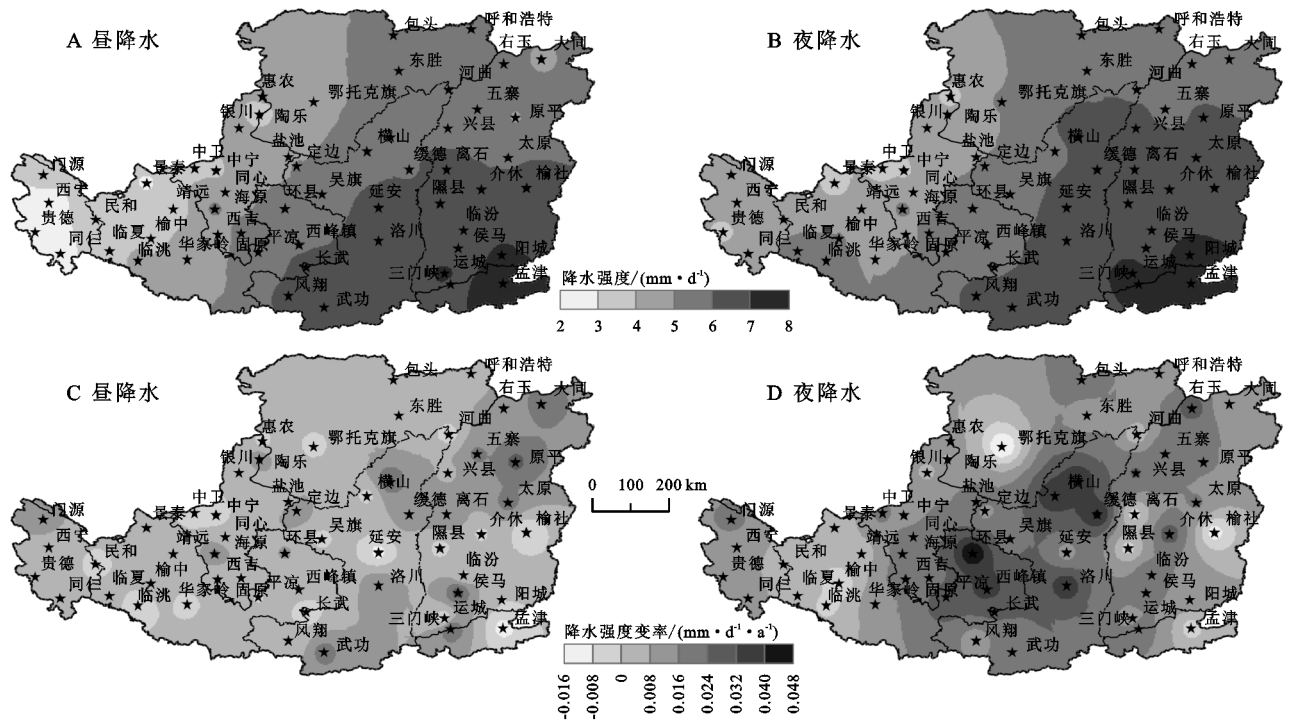


图 7 黄土高原雨季昼夜降水强度及其变率空间分布

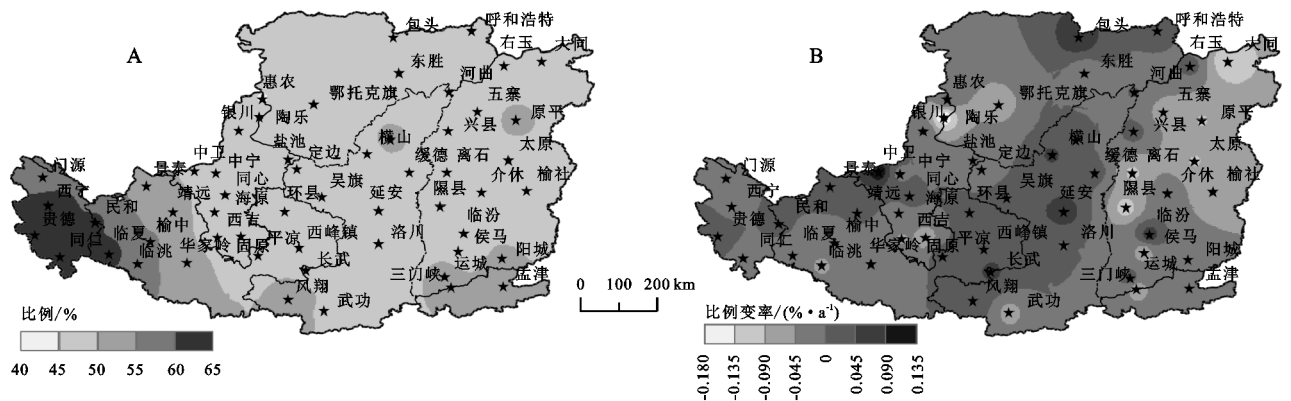


图 8 黄土高原雨季夜雨比例及其变率空间分布

4 讨论与结论

4.1 讨论

全球气候变暖的背景下，本研究发现 1960—2017 年黄土高原地区的降水量和降水日数均表现出昼夜同减特征，与同纬度的黄河流域、海河流域特征一致^[24]；加之黄土高原地区气温和地表温度上升明显^[14]、蒸散发过程加速等^[15]，导致暖干化现象愈加

严重，严重影响该地区的生态系统的稳定性，加剧了水资源供需矛盾。此外，黄土高原地区昼夜降水强度均呈上升趋势，某种程度上导致突发性降水增多、加剧水土流失和山洪的爆发，类似于 2013 年 7 月陕西延安、咸阳洪涝现象的发生^[28]。整体上，黄土高原地区多年平均夜降水率为 50.44%，夜雨现象并不明显；但在西宁、临夏以西区域（即青藏高原—黄土高原过渡区）夜雨率高达 60%~65%。相关研究表明青藏

高原、四川盆地和云贵高原的夜雨现象与山区地形形成的山谷风环流、高原上空积状云日变化等因素有关^[2-3],但因黄土高原大部分区域属半湿润与干旱半干旱气候的过渡带,水汽不足难以形成有效降水。进一步发现,黄土高原地区雨季的夜雨率在海拔上也存在一定的差异,当海拔低于1 400 m时,夜雨率随着海拔的增加而降低,高于1 400 m时,则相反,存在着最大夜雨率带,这种现象有待进一步研究。未来研究中,应结合时空尺度更加精细化的降水数据,以及大气环流、地形等地理因子,深入分析黄土高原地区昼夜降水时空演变规律的原因、降水日数与降水强度对降水变化的贡献特征。

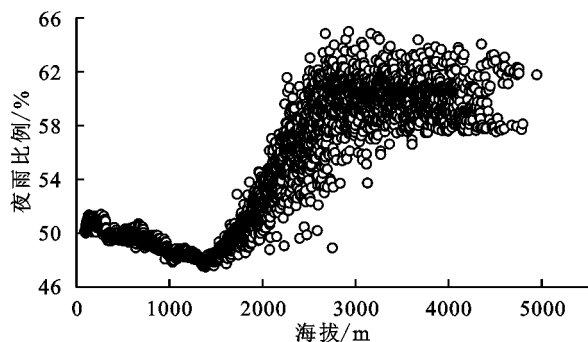


图9 黄土雨季夜雨比例与海拔关系

4.2 结论

(1) 长期趋势显示,黄土高原历年和雨季的昼夜降水量、降水日数皆表现出下降趋势,降水强度则表现上升趋势。历年降水量和降水日数下降幅度高于雨季,夜间高于白昼;历年降水强度上升幅度低于雨季,夜间高于白昼。

(2) 黄土高原地区雨季昼夜降水指标的空间格局差异明显。雨季降水量和降水强度自东南向西北递减,多数地区昼夜降水量以 $-0.4\sim 0$ mm/a的速度下降,降水强度分别以 $0.008\sim 0.016$ mm/(d·a), $0.016\sim 0.024$ mm/(d·a)的速度增加;白昼降水日数空间上呈西南和东北偏多、西北偏少,夜间降水日数则呈西南偏多、西北偏少,昼夜降水日数降幅分别以 $-0.12\sim 0$ d/a, $-0.24\sim -0.06$ d/a为主。

(3) 黄土高原地区未有明显的夜雨现象。历年及雨季的平均夜降水率分别为50.44%,50.34%,其下降速率分别为0.012%/a,0.009%/a;多数站点的夜雨率低于50%,晋豫交界及六盘山以西区域夜雨率高于50%;陕西西部及中北部、内蒙包头至呼和浩特、祁连山以东等区域呈上升趋势,山西中部及东北部、宁夏银川至内蒙鄂托克旗等区域下降趋势明显。

参考文献:

[1] Sorooshian S, Gao X, Hsu K, et al. Diurnal variability

of tropical rainfall retrieved from combined GOES and TRMM satellite information[J]. Journal of Climate, 2002,15(9):983-1001.

[2] 崔彩霞,李杨,杨青.新疆夜雨和昼雨的空间分布和长期变化[J].中国沙漠,2008,28(5):903-907,1002.

[3] 段春峰,曹雯,缪启龙,等.中国夏季夜雨的空间分布特征[J].自然资源学报,2013,28(11):1935-1944.

[4] Dai A, Giorgi F, Trenberth K E. Observed and model-simulated diurnal cycles of precipitation over the contiguous United States [J]. Journal of Geophysical Research, 1999,104(D6):6377-6402.

[5] 王夫常,宇如聪,陈昊明,等.我国西南部降水日变化特征分析[J].暴雨灾害,2011,30(2):117-121.

[6] 张博,李国平.全球气候变暖背景下四川地区夜雨的变化特征[J].中国科技论文,2015,10(9):1111-1116.

[7] 胡迪,李跃清.青藏高原东侧四川地区夜雨时空变化特征[J].大气科学,2015,39(1):161-179.

[8] 吕炯.巴山夜雨[J].气象学报,1942,16(Z1):36-53.

[9] 张核真,唐小萍,普布卓玛.近46年西藏高原昼夜降水变化趋势[J].气象科技,2010,38(2):205-208,283.

[10] 张灵玲,许遐祯,韩珏静,等.近30 a江苏夏季降水日变化的气候学特征[J].气象科学,2016,36(6):826-833.

[11] 余忠水,康世昌,蒋建堂.青藏高原夏季夜雨率空间分布及其变化特征[J].山地学报,2011,29(5):627-632.

[12] 刘雪梅,张明军,王圣杰,等.2008—2014年祁连山区夏季降水的日变化特征及其影响因素[J].地理学报,2016,71(5):754-767.

[13] 韩虹,任国玉,王文,等.黄土高原地区太阳辐射时空演变特征[J].气候与环境研究,2008,13(1):61-66.

[14] 顾朝军,穆兴民,高鹏,等.1961—2014年黄土高原地区降水和气温时间变化特征研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(3):136-143.

[15] 周志鹏,孙文义,穆兴民,等.2001—2017年黄土高原实际蒸散发的时空格局[J].人民黄河,2019,41(6):76-80,84.

[16] 王毅荣,张旭东,冯建英.黄土高原汛期降水年代际演变[J].水土保持通报,2007,27(6):67-70,119.

[17] 傅朝,王毅荣.中国黄土高原月降水对全球变化的响应[J].干旱区研究,2008,25(3):447-451.

[18] 王涛,于冬雪,杨强.陕北黄土高原地区降水时空变化特征[J].水资源与水工程学报,2014,25(6):24-28,33.

[19] 张耀宗,张勃,刘艳艳,等.1960—2013年黄土高原地区气温变化对Hiatus现象的响应[J].水土保持研究,2020,27(4):213-219.

[20] 赵一蕾,黄文婕,曹明,等.1961—2019年黄土高原植被潜在蒸散及影响因子[J].环境科学研究,2021,34(9):2208-2219.

[21] 张翀,白子怡,李学梅,等.2001—2018年黄土高原植被覆盖人为影响时空演变及归因分析[J].干旱区地理,2021,44(1):188-196.

径流量序列的变化均呈显著减少趋势,其减少过程在未来均存在一定的持续性。

(3) 北洛河上游径流量存在丰—枯交替的多尺度变化特征和多主周期变化规律。年径流量和汛期径流量序列呈现出相似的变化周期,其 3 个主周期依次为 3,11,19 a 左右。其中,当时间尺度为 3 a 时,径流量的平均振荡周期为 1.5 a 左右。

参考文献:

- [1] 田鹏,穆兴民,赵广举,等.近 549 年来黄河天然径流量时间变化特征研究[J].水土保持学报,2020,34(6):65-69.
- [2] 董喆.北川河流域径流变化特征及其影响因素分析[D].北京:北京林业大学,2018.
- [3] 郑红星,刘昌明.黄河源区径流年内分配变化规律分析[J].地理科学进展,2003,22(6):585-590.
- [4] 李二辉,穆兴民,赵广举.1919—2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J].水科学进展,2014,25(2):155-163.
- [5] 黄晨璐,杨勤科.渭河与泾河流域水沙变化规律及其差异性分析[J].干旱区地理,2021,44(2):1-16.
- [6] 张丽梅,赵广举,穆兴民,等.基于 Budyko 假设的渭河径流变化归因识别[J].生态学报,2018,38(21):7607-7617.
- [7] Zhao Guangju, Mu Xingmin, Tian Peng, et al. Climate changes and their impacts on water resources in semiarid regions: a case study of the Wei River basin, China[J]. Hydrological Processes, 2013,27(26):3852-3863.
- [8] 王小杰,姜仁贵,解建仓,等.渭河干流径流变化趋势及突变分析[J].水利水运工程学报,2019(2):33-40.
- [9] 晁智龙.1959—2011 年北洛河上游流域径流量及其组分变化趋势和时间分配特征[J].水资源与水工程学报,2020,31(1):23-28.
- [10] 董起广,周维博,刘雷,等.北洛河径流量变化特征分析[J].人民黄河,2014,36(2):20-22,29.
- [11] 葛芬莉.北洛河上游区水沙特性变化分析研究[J].水资源与水工程学报,2013,24(4):145-150.
- [12] 何亮.1980—2019 年北洛河流域土地利用和土地覆被变化分析[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [13] 孔波,樊晶晶,黄强.北洛河流域分期径流变异诊断及成因分析[J].水资源保护,2019,35(6):52-57.
- [14] 赵雪花.河川径流时间序列研究方法及应用[M].北京:中国水利水电出版社,2015.
- [15] 刘红英.降水变化和人类活动对北洛河上游水沙特性的影响研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012:45.
- [16] 肖鹏嵩,代俊峰,王娜.广西降雨量变化趋势分析[J].节水灌溉,2013(2):38-40.
- [17] 李艳,陈晓宏,张鹏飞.北江流域径流年内分配特征的变异性分析[J].水文,2014,34(3):80-86.
- [18] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [19] Sheng Y, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series [J]. Journal of Hydrology, 2002,259(1):254-271.
- [20] 燕爱玲,黄强,刘招,等.R/S 法的径流时序复杂特性研究[J].应用科学学报,2007,25(2):214-217.
- [21] 王生雄,魏红义,王志勇.渭河径流序列趋势及突变分析[J].人民黄河,2008,30(9):26-27,29.
- [22] 王兆礼,陈晓宏,杨涛.近 50 a 东江流域径流变化及影响因素分析[J].自然资源学报,2010,25(8):1365-1374.
- [23] 黄诒蓉,罗弈.论 R/S 分析法与股票市场的分形结构[J].现代管理科学,2006,3(1):105-107.
- [24] 叶茂,张鹏,王伟,等.塔里木河流域上游三源流径流变化趋势分析[J].水资源与水工程学报,2010,21(5):10-14.
- [25] Morlet J, Arens G, Fourgeau, et al. Wave propagation and sampling theory and complex waves[J]. Geophysics, 1982,47(2):222-236.
- [26] 潘国营,秦永泰,马亚芬,等.基于 R/S 和 Morlet 小波分析的丹河径流变化特征研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(3):41-45,50.
- [27] 冯禹昊,朱江玲.基于 Morlet 小波的辽河径流量变化及其成因分析[J].水土保持研究,2019,26(2):208-215.
- [28] 尹吉国,于福亮,李传哲.北洛河天然年径流特性分析[J].人民黄河,2008,30(4):25-27.
- [29] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005.

(上接第 138 页)

- [22] 徐建华.计量地理学[M].2 版.北京:高等教育出版社,2014.
- [23] 张亚宁,张明军,王圣杰,等.1961—2015 年中国降水面积变化特征研究[J].干旱区地理,2019,42(4):762-773.
- [24] 邓海军,郭斌,曹永强,等.1961—2016 年中国昼夜降水变化的时空格局[J].地理研究,2020,39(10):2415-2426.
- [25] 任国玉,任玉玉,战云健,等.中国大陆降水时空变异规律: II. 现代变化趋势[J].水科学进展,2015,26(4):451-465.
- [26] 徐新创,张学珍,戴尔阜,等.1961—2010 年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析[J].地理研究,2014,33(7):1335-1347.
- [27] 王麒麟,范晓辉,王孟本.近 50 年黄土高原地区降水时空变化特征[J].生态学报,2011,31(19):5512-5523.
- [28] 李斌,解建仓,胡彦华,等.1951—2013 年延安降水特征与典型暴雨分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(12):190-197.