1962—2011 年来宁夏不同等级降水的变化特征*

李 菲 张明军** 李小飞 汪宝龙 王圣杰 王 琼
(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘 要 为了了解宁夏地区不同等级降水的结构特征,以 1962—2011 年宁夏地区 9 个气象台站逐日降水资料为基础,运用线性趋势法、相关分析法、Hurst 趋势分析法及 IDW 空间插值法,分析了宁夏地区不同等级降水量、降水日数和降水强度的变化特征。结果表明:年降水量、降水日数整体呈减少趋势,而年降水强度则表现为微弱增加,未来的年降水量将呈反持续性,而年降水日数、降水强度则表现为持续性;从空间变化来看,受不同因素影响,年降水量、降水日数及降水强度均表现为由南至北的减少趋势,且降水量、降水日数的空间分布具有一致性;从时间变化来看,夏季降水量丰、降水日数多、降水强度大,其中暴雨的降水强度最大,冬季则降水量枯、日数少、强度小;年、季不同等级降水事件气候趋势分析表明,年降水量和降水日数呈减小趋势,而受冬、夏、秋小雨及暴雨的影响,年降水强度呈微弱增加之势。

关键词 降水量; 降水日数; 降水强度; 气候变化; 宁夏
中图分类号 P426.6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)8-2154-09

Variation characteristics of different-level precipitation in Ningxia of Southwest China in 1962-2011. LI Fei, ZHANG Ming-jun**, LI Xiao-fei, WANG Bao-long, WANG Sheng-jie, WANG Qiong (*College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(8): 2154-2162.

Abstract: Based on the daily precipitation data from 9 meteorological stations in Ningxia in 1962-2011, and by using linear trend method, correlation analysis, Hurst trend analysis method, and IDW spatial interpolation method, this paper analyzed the variation characteristics of different levels precipitation, precipitation days, and precipitation intensity, aimed to understand the structural characteristics of different levels precipitation in Ningxia. Overall, the annual precipitation and the precipitations days showed a decreasing trend, while the annual precipitation intensity had a slight increase. In the future, the annual precipitation would be reversely persistent, while the precipitation days and precipitation intensity would be persistent. Spatially, due to the effects of different factors, the annual precipitation, precipitation days, and precipitation intensity decreased from southeast to northwest, and the spatial pattern of the precipitation and precipitation days was in consistency. Temporally, the precipitation in summer was abundant, precipitation days were more, and precipitation intensity was large, with the largest precipitation intensity of rainstorm. In winter, the precipitation was short, precipitation days were less, and precipitation intensity was small. The climate change trend analysis of different levels precipitation events on different time scales showed that the annual precipitation and precipitation days presented a decreasing trend, while the annual precipitation intensity, as affected by the light rain and storm rain in winter, summer and autumn, showed a slight increase.

Key words: precipitation; precipitation days; precipitation intensity; climate change; Ningxia.

IPCC 第四次评估报告中指出,1906—2005 年地表温度升高了(0.74±0.18)℃,较 IPCC 第三次报告得出的 1901—2000 年升温幅度 0.4~0.8 ℃又有所增大,并提出在过去 50 年的增温速率几乎是过去

*科技部全球变化重大科学研究计划重大科学目标导向项目(2013CBA01801)、国家自然科学基金项目(41161012、41240001)和甘肃省高等学校基本科研业务费项目资助。
** 通讯作者 E-mail: mjzhang2004@163.com
收稿日期: 2013-01-01 接受日期: 2013-04-26

100 年增温速率的 2 倍(IPCC,2007)。在气候变暖背景的影响下,中国降水格局也发生了显著变化。Li 等(2012)、王小玲和翟盘茂(2008)对中国降水量变化趋势进行分析得出,近百年来中国年降水量平均下降了 5 ~ 8 mm,近 50 年年降水量平均下降了 1 ~ 2 mm,西北西部、青藏高原和华北地区年降水量有明显增多趋势,华北、东北和西北东部降水量明显减少。王绍武等(2002)对西北地区降水的研究也指出,近 50 年是中国西部年降水量最丰沛的时期,多雨主要发生在气候剧烈变暖的 20 世纪后 30 年,近 10 多年来降水有明显的上升之势,且西北地区强降水事件呈增多的趋势;Gong 等(2004)将中国北方的降水分成 4 个等级,即弱(< 10 mm · d^{-1})、中(10 ~ 25 mm · d^{-1})、强(25 ~ 100 mm · d^{-1})和极端降水(>50 mm · d^{-1}),并对其分别进行了研究;其后,郭军等(2010)和赵志鹏等(2012)分别对环渤海地区和黑龙江省不同等级降水事件的特征也进行了研究;同时,已有研究还表明(汪青春等,2003;王颖等,2006;刘德祥等,2007):中国年季降水日数呈现明显的减少趋势,且降水日数减少的范围远远大于降水量减少的范围,并存在区域性和季节性。中国西北地区气候由暖干向暖湿转型成为近年来中国气候变化研究领域的热点问题(施雅风等,2003;张永等,2007;吴永萍等,2011),气候变暖必将导致降水量时空分布的变化,从而对区域水资源的可持续利用、生态系统脆弱性和社会经济发展等产生深刻的影响。气候变暖促使地球系统水循环的加速,不仅加剧了区域间降水的分布不均,同时也使得酷热、干旱和洪涝等极端气候事件增加(潘敖大等,2011)。由于降水变化格局及其区域分异存在着不确定性,因此研究不同区域降水的变化特征和极端降水事件已成为当前全球气候变化研究的重要内容之一。

宁夏位于西北内陆,处于中国三大自然区域的交汇地带和半湿润区、半干旱区向干旱区的过渡带,是中国典型的农牧交错区。该区地形条件复杂,贺兰山绵亘于其西北部,对西北寒风起到削弱作用的同时,又阻挡了腾格里沙漠流沙的东移,形成银川平原;六盘山位于南部,地形南高北低,南部山区多水土流失,中部及东部地区土地沙漠化、沙尘暴严重,北部地区土壤盐渍化问题突出,生态环境十分敏感、脆弱,而这些生态环境问题都与降水有着密切的关系(信忠保等,2005)。在全球气候变化的背景下,尤其在西北地区气候转型期,宁夏气候变化对研究中国西北地区气候转型非常有意义(陈豫英等,2008)。郑广芬等(2006)对宁夏气候研究中指出,秋季降水有下降趋势,冬季降水呈上升趋势,宁夏整体气候呈变干趋势;陈豫英等(2008)对宁夏降水的研究也局限于秋季降水的时空变化特征,并且众多学者的研究主要集中于降水事件的变化方面(信忠保等,2005;陈海波等,2009;徐利岗等,2011),对于不同等级降水事件气候特征的研究还很不明确。基于此,本文选取宁夏实测资料完整的 9 个气象站资料(图 1),对不同等级降水的降水量、降水日数和降水强度的气候变化特征进行了分析,研究了其长时间序列的时空变化特征,并对其变化趋势进行了预测,以期为水资源的合理利用、生态环境建设及社会经济发展提供参考依据,对于评估气候变化的可能性影响具有重要意义。

1　材料与方法

1.1　数据来源

本文使用的是中国气象局国家气象信息中心在中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn/)公布的长时间序列的气象数据。基于研究所需,考虑到资料的完整性,并通过严格的质量控制,选取了 9 个气象站(图 1),时间序列为 1962 年 1 月 1 日—2011 年 12 月 31 日的逐日降水资料,进行月、季、年变化的统计。由于研究领域的差异,干旱所对应的日降水量大小不一样(Reiser *et al*.,

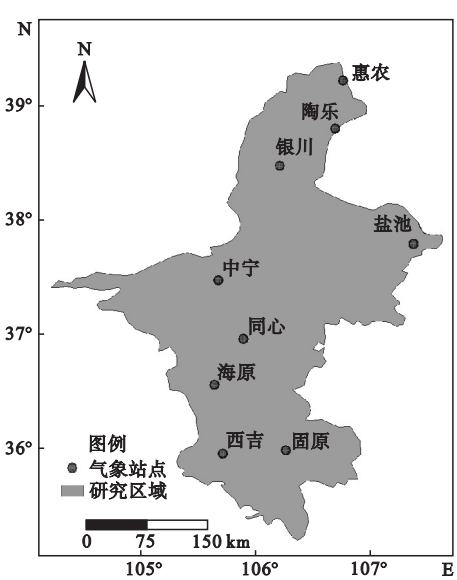


图 1　研究区概况及站点分布示意图

Fig. 1　Location of the study area and distribution of the sampling stations

2009)。基于此,本文年(月、季)降水日定义为日降水量≥0.1 mm日数的总合;年(月、季)降水强度定义为年(月、季)降水总量与该时段降水日数之比(黄锡荃等,1985)。文章采用全国统一的降水强度等级划分标准,日降水量在0.1~9.9 mm为小雨,日降水量在10~24.9 mm为中雨,日降水量在25~50 mm为大雨,日降水量≥50 mm为暴雨(黄锡荃等,1985)。季节降水日数定义为:冬季为12月—次年2月,春季为3—5月,夏季为6—8月,秋季为9—11月的雨日数累加。降水量、降水日数与降水强度的多年平均值的时间范围为1962年1月1日—2011年12月31日。

1.2 研究方法

1.2.1 气候倾向率 气象要素 y 随时间变化的回归方程为:

$$y=a+bt \tag{1}$$

式中,y 为要素逐年值,t 为时间,a 为常数,b 为每年的气候倾向率,要素值单位为年(黄小燕等,2011)。

1.2.2 相关性分析 本文同时使用无量纲的气候趋势系数 r_{xt}:

$$r_{xt}=\frac{\sum_{t=1}^{n}(x_t-x)(t-\frac{n+1}{2})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{n}(x_t-x)^2(t-\frac{n+1}{2})^2}} \tag{2}$$

式中,r_{xt} 为趋势系数,可以用 t 分布统计检验其显著性,而倾向率 b 与趋势系数 r_{xt} 有如下关系:

$$b=r_{xt}(\sigma_x/\sigma_t) \tag{3}$$

式中,σ_x 与 σ_t 分别为要素序列与自然数列的均方差。由于 r_{xt} 为无量纲的,所以可以根据它的数值大小比较不同的气象要素在不同地带或不同时间尺度的气候趋势大小(郭军等,2010)。

1.2.3 Hurst分析 Hurst分析法最早是由赫斯特(H. E. Hurst)在研究尼罗河水文资料时提出的,而后通过Mandelbrot等(1967)不断补充与完善,并在近年的分析研究中得到广泛应用,在地理研究中也应用甚广(江田汉和邓莲堂,2004;李珊珊等,2012;Gu *et al.*,2012)。根据 H 值不同,所代表的意义也不相同,即:(1)当 $H=0.5$,表示各要素时间序列相互独立,即任意时刻 t 的数值与过去情况无关;(2)当 $0<H<0.5$,表示要素时间序列具有反持续性,即过去增加趋势指示未来将表现为减少趋势,而过去减少趋势预示将来具有增加的趋势,H 值越接近0,其反持续性越强烈;(3)当 $0.5<H<1$,表示要素时间序列的持续性,即过去增加趋势指示未来具有增加趋势,过去的减少趋势预示将来的减少趋势,H 值越向1靠近,这种持续性越显著。

1.2.4 反距离加权法 在ArcGIS环境下通过反距离加权(IDW)插值法绘制宁夏降水量、降水日数和降水强度变化趋势的空间分布图,并对其空间差异进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同等级降水的气候特征

2.1.1 不同等级降水量的变化特征 1962年以来,宁夏年降水量整体上呈减少趋势,但波动较大,降水量变化速率为-0.822 mm·a^{-1},而其变化与我国年降水量呈减少趋势相一致(王英等,2006)。由图2可知,1962—2011年宁夏50年平均降水量为277.4 mm,20世纪60—70年代降水量偏多,最大降水量出现在1964年,降水量为484 mm;80年代初期降水偏少,1982年出现最小值,降水量为163 mm;80年代后期至90年代,降水量在均值附近变化,2000年以后降水量大体在均值以下变动。

迎风坡对气流具有抬升作用,有利于降水的形成。六盘山区位于东亚季风水汽输送带的边缘部位,地形抬升使得降水较多,其他地区由于纬度较高,水汽很难到达,故年降水量自南向北呈逐渐减少之势(图2)。在宁夏北部地区,包括惠农站、陶乐站和银川站,属于引黄灌区,降水量相对较少,多年平均降水量在200 mm左右,其中惠农站多年均降水量最少,为171.8 mm;中部干旱区,多年平均降水量为200~400 mm,包括盐池站、中宁站、同心站和海原站;南部山区,多年平均降水量在400 mm以上,包括西吉站与固原站,其中固原站年平均降水量最多,为440.7 mm。

宁夏不同地区降水量随时间变化整体呈现减少之势,不同地区降水量的年际变化速率示意如图2所示。西吉站与盐池站是降水量年际变化速率较大的一个极值区,西吉站的减小速率最大,值为-1.880 mm·a^{-1},趋势系数为-0.313,并通过了95%的显著性检验,表明降水减少明显;陶乐站、银川站、同心站与海原站是降水量年际变化速率的极小值区,陶乐的减小速率最小,值为-0.038 mm·d^{-1},趋势系数为-0.009,没有通过显著性检验,表明降水的减少不明显。

宁夏降水量的季节变化如表1所示,夏半年受

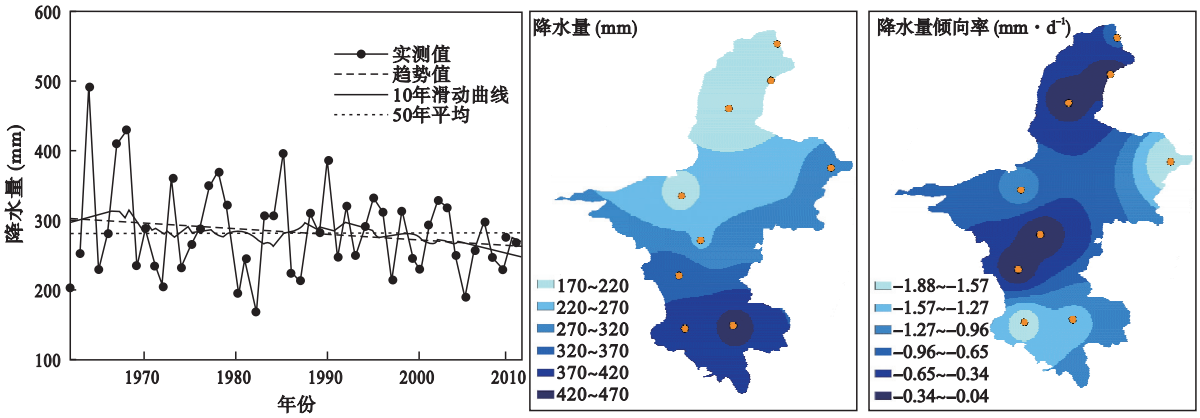


图 2　宁夏年平均降水量时间变化及空间分布示意图

Fig. 2　Spatial and temporal variations of annual average precipitation amount in Ningxia

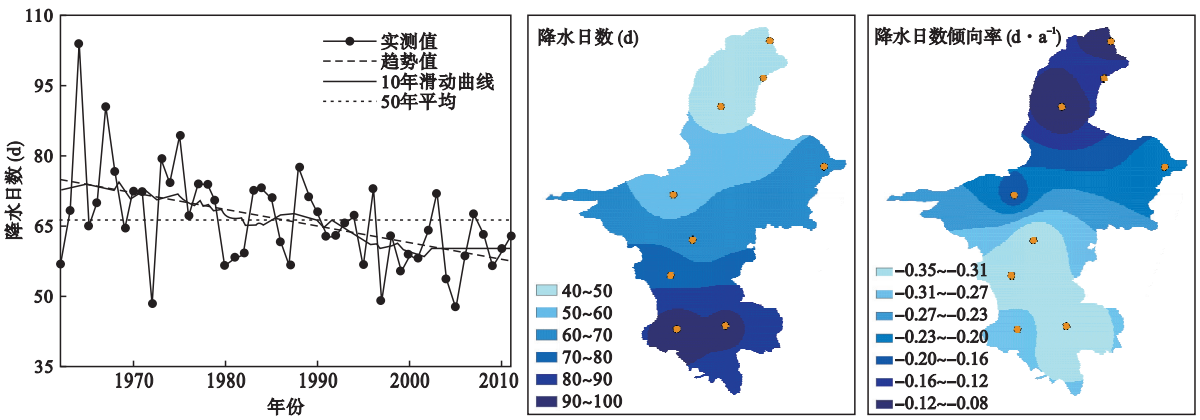


图 3　宁夏年平均降水日数时间变化及空间分布示意图

Fig. 3　Spatial and temporal variations of annual average precipitation days in Ningxia

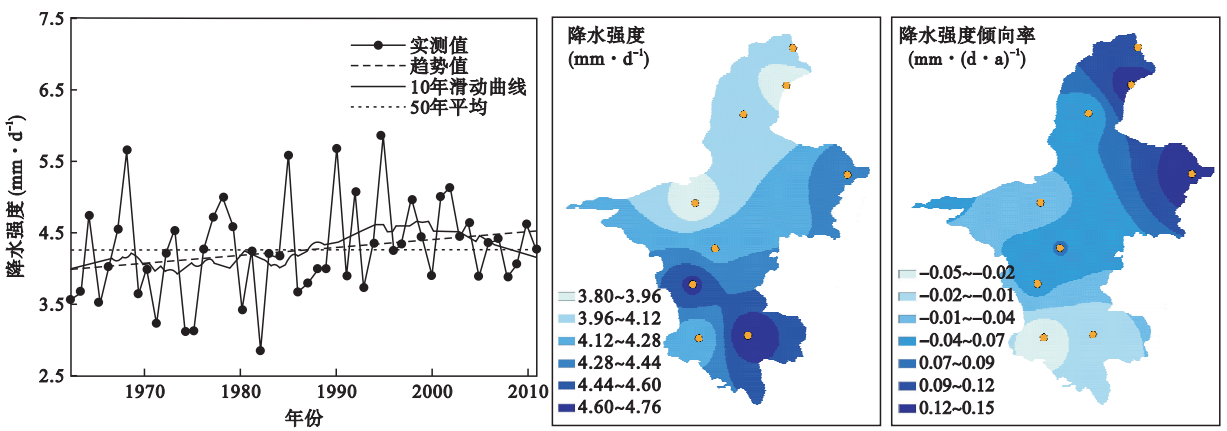


图 4　宁夏年平均降水强度时间变化及空间分布示意图

Fig. 4　Spatial and temporal variations of annual average precipitation intensity in Ningxia

印度季风与东亚季风共同影响,降水较为集中,且降水量大,夏季平均降水量为 158 mm,占四季降水量的 56.9%;冬半年受西伯利亚冬季风的影响(陈晓光等,2008),降水少,降水量仅为 5.5 mm,占四季降水的 2%;春秋季节降水量处于冬夏之间,为季节变化的两个过渡时期。冬季主要以小雨为主,夏季则以小雨和中雨为主,占夏季降水的 70% 以上,春秋降水组成基本一致,都以小雨为主。

表1 宁夏四季不同等级年平均降水量(mm)
Table 1 Seasonal average precipitation amount of different categories in Ningxia

季节	合计	小雨	中雨	大雨	暴雨
冬季	5.5	5.5	0.0	0.0	0.0
春季	49.2	28.2	16.1	4.7	0.2
夏季	158.0	53.8	57.2	33.5	13.4
秋季	64.7	34.7	24.0	5.8	0.3

表2 宁夏四季不同等级年平均降水日数(d)
Table 2 Seasonal average precipitation days of different categories in Ningxia

季节	合计	小雨	中雨	大雨	暴雨
冬季	6.2	6.2	0.0	0.0	0.0
春季	14.3	13.1	1.1	0.2	0.0
夏季	27.0	22.1	3.7	1.0	0.2
秋季	17.4	15.5	1.6	0.2	0.0

2.1.2 不同等级降水日数的变化特征 宁夏多年平均降水日数波动较大,总体上呈减小趋势,减小速率为0.231 d·a^{-1}(图3)。多年平均降水日数为64.9 d,其中,20世纪60—70年代,降水日数偏多,1964年降水日数出现最大值,为90 d;80至90年代初期,降水日数在均值附近波动,90年代后期,降水日数在均值以下波动,降水日数极小值出现于2005年,仅有47 d。

宁夏降水日数空间分布表现为由南至北逐渐减少(图3)。其中,南部地区的固原和西吉站降水日数最多,其降水日数分别为97.60和92.56 d;中部次之,而北部地区降水日数最少。惠农站、陶乐站及银川站降水日数属同一值域,降水日数分别为42.70、44.98和46.43 d。年际变化上,对降水量与降水日数进行相关分析发现,二者相关系数为0.751,通过了99%的显著性水平检验,与王大钧等(2006)研究结果一致,即降水量的多寡主要由降水日数的多少决定。对降水日数与降水量进行空间比对发现,二者具有一致性,即总降水量的空间分布与总雨日的空间分布一致,该结论与前人对中国降水量及降水日数相关关系的研究相一致(王大钧等,2006;王颖等,2006)。

宁夏不同地区降水日数随时间变化整体表现出减少趋势,不同地区的年际变化速率如图3c所示:南部地区降水日数减少最多,中部次之,北部最少。同心站减少速率最大,为-0.354 d·a^{-1},趋势系数为-0.479,通过了99%的显著性检验,这表明降水日数减少趋势明显;银川站的减小速率最小,为-0.076 d·a^{-1},趋势系数仅为-0.13,没有通过显著性检验,表明变化不明显;固原站、海原站与西吉站降水日数的减小速率分别为-0.339 d·a^{-1}、-0.342 d·a^{-1}、-0.3 d·a^{-1},趋势系数为-0.395、-0.488、-0.395,均通过了99%的显著性检验;盐池站、中宁站降水日数的减小速率分别为-0.129 d·a^{-1}、-0.185 d·a^{-1},趋势系数为-0.344、-0.320,通过了95%的显著性检验。

夏季降水日数最多,占四季平均降水数的41.6%;冬季最少,仅占四季平均降水日数的9.5%,春季与夏季降水日数相当(表2)。在不同等级降水事件中,小雨平均降水日数为56.9 d,占四季的比例最大,贡献率为87.6%;暴雨的全年贡献率最小,不足1%。如表2所示,夏季平均降水日数最多为27 d,占四季平均日数的41.6%,春夏次之,冬季最少,占总降水日数的9.6%。

2.1.3 不同等级降水强度的变化特征 宁夏地区多年平均降水强度为4.3 mm·d^{-1}(图4),其中,降水强度的变化起伏较大,60—70年代降水强度在均值附近波动较小,80—90年代降水强度在均值附近波动较大,极小值出现在1982年,值为2.85 mm·d^{-1},极大值出现在1995年,值为5.81 mm·d^{-1},进入21世纪以后,降水强度的波动最为平缓,为3.91~5.07 mm·d^{-1}。

近50年来降水强度的分布格局表现为是由南向北逐渐减小的趋势(图4),固原站与海原站是多年降水强度的极大值区,分别为4.81和4.71 mm·d^{-1};中宁站与陶乐站为多年降水强度的极小值区,分别为3.91和3.97 mm·d^{-1}。

不同地区降水强度随时间变化速率如图4,宁夏降水强度减小的极大值区位于宁夏南部,其中西吉站降水强度减少的最多,值为0.051 mm·d^{-1}·a^{-1};降水强度增大的极大值区分别为盐池站与陶乐站,盐池站降水强度增加速率最多,值为0.153 mm·d^{-1}·a^{-1}。

夏季降水强度最大,值为5.8 mm·d^{-1};春秋相差不大,均在3.5 mm·d^{-1}左右;冬季降水强度最小,值为0.9 mm·d^{-1}(表3)。不同等级降水事件中,小雨的年平均降水强度为2.1 mm·d^{-1},中雨的年平均降水强度为15.1 mm·d^{-1},大雨的年平均降水强度为32.1 mm·d^{-1},暴雨的年平均降水强度为62.1 mm·d^{-1},各季节不同等级降水强度也表现为夏季大,春秋次之,冬季最小。

表 3　宁夏四季不同等级年平均降水强度(mm · d^{-1})
Table 3　Seasonal average precipitation intensity of different categories in Ningxia

季节	平均	小雨	中雨	大雨	暴雨
冬季	0.9	0.9	0.0	0.0	0.0
春季	3.4	2.2	14.6	30.4	53.4
夏季	5.8	2.4	15.5	33.4	62.3
秋季	3.7	2.2	14.5	31.0	58.7

2.2　不同等级降水的气候趋势

2.2.1　不同等级降水量的变化趋势　如表 4 所示,年平均降水量的趋势系数为-0.192,通过显著性检验。冬季降水量呈现略微的增加趋势,增加速率为 0.046 mm · a^{-1};春季、夏季与秋季降水量均呈现减少趋势,减少趋势的顺序表现为秋季降水量减少最多,夏季次之,春季最少。在不同等级降水事件中,冬季小雨降水量增加最多,春季以小雨降水量减少最多,夏季则以暴雨降水量减少最为突出,秋季以中雨降水量减少最多。冬季大的降水过程并未出现,因此,大雨与暴雨的变化速率为 0 mm · a^{-1}。

2.2.2　不同等级降水日数的变化趋势　如表 5 所示,年平均降水日数呈下降趋势,趋势系数为-0.402,通过了显著性检验,表明降水日数减少的较为显著。冬季呈略微的增加趋势,增加速率为 0.015 d · a^{-1};其他季节均呈减少趋势,夏季、秋季的减少速率分别为-0.126 和-0.153 d · a^{-1},均通过了 99% 的显著性检验;春季降水日数减少速率为-0.078 d · a^{-1},未通过显著性检验。对比表 4 与表 5 发现,各季节不同等级降水量与降水日数变化趋势相同,因此,对同季节同等级降水量与降水日数做相关分析发现,均通过了 99% 的显著性检验,表明二者显著相关。冬季小雨降水日数呈增加趋势,增加速率为 0.015 d · a^{-1};春季小雨与中雨降水日数呈减小趋势,小雨减少速率大于中雨的减少速率,大雨与暴雨降水日数呈略微增加趋势,小雨的趋势系数为 0.280,表明在 95% 的显著性水平下呈负相关显著;夏季不同等级降水事件的降水日数均表现为减少,小雨降水日数减小速率为-0.119 d · a^{-1},趋势系数为-0.425,通过了 99% 的显著性检验;秋季不同等级降水日数呈减少趋势,小雨减少最为明显,减少速率为-0.138 d · a^{-1},趋势系数为-0.384,通过了 99% 的显著性检验。

2.2.3　不同等级降水强度的变化趋势　近 50 年来,宁夏平均降水强度呈增加趋势,趋势系数为 0.1,增加速率为 0.005 mm · a^{-1} · d^{-1},主要由于年降水日数下降幅度比年降水量的下降幅度更加明显所致。如表 6 所示,春季降水强度略微的减少,值为-0.001 mm · a^{-1} · d^{-1},冬季、夏季与秋季降水强度呈上升趋势,冬季降水强度的趋势系数为 0.304,通过了 95% 的显著性检验;冬季、夏季的小雨均呈上升趋势,趋势系数分别是 0.310、0.341,通过了 95% 的显著性检验;秋季小雨趋势系数为0.363,通过了

表 4　宁夏地区不同等级四季平均降水量气候变化趋势
Table 4　Climatic change trend of seasonal average precipitation amount with different categories in Ningxia

项目	冬季		春季		夏季		秋季		年	
	倾向率(mm · a^{-1})	趋势系数	倾向率(mm · a^{-1})	趋势系数	倾向率(mm · a^{-1})	趋势系数	倾向率(mm · a^{-1})	趋势系数	倾向率(mm · a^{-1})	趋势系数
雨量	0.046	0.199	-0.236	-0.132	-0.255	-0.079	-0.376	-0.202	-0.818	-0.192
小雨	0.046	0.199	-0.204	-0.271	-0.038	-0.049	-0.115	-0.132	-0.311	-0.211
中雨	–	0.035	-0.066	-0.074	-0.05	-0.043	-0.209	-0.19	-0.324	-0.171
大雨	–	–	0.02	0.041	-0.024	-0.018	-0.029	-0.071	-0.033	-0.022
暴雨	–	–	0.013	0.114	-0.143	-0.156	-0.023	-0.256	-0.153	-0.166

表 5　宁夏地区不同等级四季平均降水日数气候变化趋势
Table 5　Climatic change trend of seasonal average precipitation days with different categories in Ningxia

项目	冬季		春季		夏季		秋季		年	
	倾向率(d · a^{-1})	趋势系数	倾向率(d · a^{-1})	趋势系数	倾向率(d · a^{-1})	趋势系数	倾向率(d · a^{-1})	趋势系数	倾向率(d · a^{-1})	趋势系数
雨日	0.015	0.079	-0.078	-0.255	-0.126	-0.369**	-0.153	-0.387**	-0.228	-0.402**
小雨	0.015	0.079	-0.074	-0.280*	-0.119	-0.425**	-0.138	-0.384**	-0.393	-0.491**
中雨	–	0.035	-0.005	-0.082	-0.004	-0.062	-0.014	-0.236	-0.023	-0.209
大雨	–	–	0.001	0.055	-0.001	-0.032	-0.001	-0.096	-0.002	-0.035
暴雨	–	–	–	0.114	-0.002	-0.146	–	-0.255	-0.002	-0.154

*P<0.05, ** P<0.01。

表6 宁夏地区不同等级四季平均降水强度气候变化趋势

Table 6 Climatic change trend of seasonal average precipitation intensity with different categories in Ningxia

季节	冬季		春季		夏季		秋季		年	
	倾向率 (mm·a^{-1}·d^{-1})	趋势系数	倾向率 (mm·a^{-1}·d^{-1})	趋势系数	倾向率 (mm·a^{-1}·d^{-1})	趋势系数	倾向率 (mm·a^{-1}·d^{-1})	趋势系数	倾向率 (mm·a^{-1}·d^{-1})	趋势系数
雨强	0.006	0.304*	−0.001	−0.015	0.021	0.262	0.01	0.167	0.005	0.100
小雨	0.006	0.310*	−0.005	−0.191	0.011	0.341*	0.009	0.363**	0.006	0.451**
中雨	0.004	0.035	−0.006	−0.028	0.004	0.076	−0.005	−0.016	0.005	0.05
大雨	–	–	0.072	0.069	0.036	0.21	0.038	0.037	0.023	0.137
暴雨	–	–	0.059	0.114	−0.068	−0.032	−0.204	−0.256	−0.062	−0.029

* $P<0.05$, ** $P<0.01$。

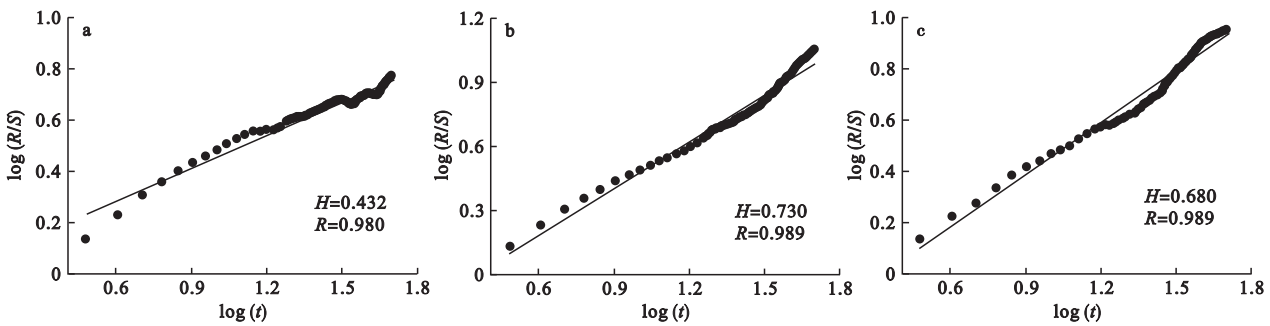


图5 宁夏年平均降水的Hurst分析结果

Fig. 5 Hurst analysis result of annual average precipitation in Ningxi

a:降水量;b:降水日数;c:降水强度。

99%的显著性检验。在各等级降水事件中,中雨降水强度变化较为微弱,暴雨的变化最大,春季暴雨强度呈增加趋势,夏秋两季呈减少趋势。

2.3 不同等级降水变化的Hurst预测

2.3.1 宁夏降水的趋势预测 在Hurst分析中,0.5为持续性与反持续性的分界点,因此,宁夏年平均降水的Hurst值具有如下特点:年平均降水量的H值为0.460(图5a),其反持续性较弱,未来的降水量有可能增多,也可能保持现状;年平均降水日数的H值为0.776(图5b),持续较强,即宁夏未来降水日数与过去的变化一致,呈减少趋势;年平均降水强度的H值为0.681(图5c),较年平均降水日数的持续性弱。

2.3.2 不同等级降水量的趋势预测 如表7所示:不同季节变化中,秋季降水量H值最大,说明宁夏秋季降水量未来变化与过去变化趋势具有较强的一致性,降水量的减少将持续下去,由此可能导致宁夏秋季干旱进一步扩大,小雨、中雨、大雨与暴雨也均表现出持续性。冬季的H值比秋季的小,持续性相对秋季较弱,小雨与中雨也同样具有弱持续性,即未来降水量的增减变化情况还需更长时间尺度,做进一步研究;春季与夏季H值都在0.5附近,变化不是很明显,只有夏季小雨H值为0.711,相对较大,表现出较强的持续性,即夏季小雨在以后的变化中具有持续减少的趋势。

2.3.3 不同等级降水日数的趋势预测 由表8可知,宁夏降水日数随时间变化趋势,对于不同等级降水日数的分析如下,秋季年均降水日数的H值为0.882,并且不同等级降水日数的H值均大于0.5,相对较大,由此可知,秋季未来降水日数的变化情况与过去保持一致,具有减少趋势,其中小雨日数减少最为强烈;春季年平均降水日数变化趋势较弱,大雨呈较弱的反持续性,小雨、中雨与暴雨呈现持续性;冬季与夏季的H值分别为0.482与0.570,均在0.5附近,说明其变化趋势不明显,这种变化趋势在未来具有不确定性,可能发生改变,也可能保持原来的状态,夏季小雨与中雨的H均大于0.7,表明其变化具有持续性。对比表7与表8发现,不同季节、不同等级年平均降水量与降水日数在未来的变化趋势具有

表7 宁夏地区不同等级降水量的Hurst指数

Table 7 Hurst Index of seasonal average precipitation amount with different categories in Ningxia

季节	年平均	小雨	中雨	大雨	暴雨
冬季	0.610	0.598	0.547	–	–
春季	0.570	0.590	0.613	0.459	0.547
夏季	0.570	0.711	0.690	0.570	0.570
秋季	0.785	0.788	0.686	0.622	0.664

表 8　宁夏地区不同等级降水日数的 Hurst 指数
Table 8　Hurst Index of seasonal average precipitation days with different categories in Ningxia

日数	年平均	小雨	中雨	大雨	暴雨
冬季	0.482	0.481	0.547	–	–
春季	0.634	0.636	0.593	0.452	0.547
夏季	0.570	0.749	0.711	0.562	0.570
秋季	0.882	0.872	0.753	0.611	0.664

表 9　宁夏地区降水强度的 Hurst 指数值
Table 9　Hurst Index of seasonal average precipitation intensity with different categories in Ningxia

季节	年平均	小雨	中雨	大雨	暴雨
冬季	0.674	0.668	0.547	–	–
春季	0.523	0.479	0.475	0.478	0.547
夏季	0.745	0.601	0.680	0.598	0.423
秋季	0.546	0.589	0.508	0.472	0.664

相对一致性,特别是暴雨的降水量与降水日数具有很强的一致性。

2.3.4　不同等级降水强度的趋势预测　如表 9 所示,春夏秋冬四季年均降水强度均具有持续性,但冬夏两季 H 值相对较大,表明未来降水强度与过去具有一致性,即降水强度在以后的变化过程中将持续增大,而夏季暴雨强度的 H 值为 0.423,低于 0.5,说明其具有反持续性;春秋两季的 H 值分别为 0.523、0.546,接近 0.5,表明该区降水强度的变化不明显,即现在这种变化趋势在以后有可能持续,也可能发生改变,而春秋两季不同等级降水强度的 H 也相对较小,只有秋季暴雨强度 H 值相对较大,即未来秋季暴雨强度在未来具有持续减少的趋势,由此表明,在以后的发展过程中,宁夏秋季洪灾强度可能减小,但是否如此需要结合相关因素进行综合分析,得出更加准确的结果,为防洪抗灾提供科学依据。

3　讨　论

本文通过选取降水量、降水日数与降水强度 3 个指标对宁夏地区降水的时空变化特征进行分析,从而得出该区的降水结构特征(表 10):宁夏地区干旱的发生与其降水量、降水日数、降水强度呈负相关,且均通过了 99% 的显著性检验,其与降水日数的相关程度最高;宁夏地区在未来的变化中将呈现变干的趋势,极端降水事件也将有可能进一步增多,最终导致该区出现极干、极涝的极端天气事件,这种极端气候的变化趋势也表明了中国西北东部将进一步趋于变干(张永等,2007)。研究表明,陕西年降水量减少率为 $-19.6\ \text{mm}\cdot10^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,秦岭南麓浅山区、汉江河谷及巴山地区降水减少趋势较为明显(姜创业等,2011);甘肃省年降水量减少速率为 $-6.2\ \text{mm}\cdot10^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,而河西呈增加趋势,河东呈减少趋势(瞿汶等,2007);可见,西北地区东部降水量自东向西减少趋势逐渐变缓,且陕西省与甘肃省均有不同程度的变干趋势。

表 10　1962—2011 年宁夏降水指数之间的相关系数
Table 10　Correlation coefficients of precipitation indices in study area in Ningxia from 1962 to 2011

	干旱	降水量	降水日数	降水强度
干旱	1			
降水量	-0.83^{**}	1		
降水日数	-0.894^{**}	0.739^{**}	1	
降水强度	-0.411^{**}	0.779^{**}	0.215	1

对宁夏地区不同等级降水的变化趋势分析表明,该区降水量的减少主要是由于降水日数的减少而引起的,特别是夏季降水日数的减少影响最大。各等级降水也呈现不同程度的减小,其中小雨降水日数的减少最为显著。降水变化的空间格局及其变化趋势不仅与全球气候变化的大背景有关,也受到区域局地环流的影响,如东亚季风(张存杰等,2002)、ENSO(信忠保等,2005)、西风环流(杨金虎等,2006)及极涡指数(梁旭等,2007)。同时,影响降水异常的物理因子很多,且各因子之间的相互关系及其影响机制比较复杂,受到现有条件的限制,很多原因尚不清楚。因此,针对现有的数据,对其降水的结构进行分析,而对于进一步明晰宁夏降水变化异常的原因,有待于借助其他科研手段和方法,并结合气温、风速等气象参数、ENSO 等环流事件以及地形条件等因子,进一步深入研究。

4　结　论

近 50 年来降水量与降水日数呈减少趋势,而降水强度则呈现微弱的增加趋势;在将来的趋势变化中,降水量呈弱反持续性,降水日数呈较强持续性,降水强度比降水日数持续性较弱。

宁夏地区降水事件主要发生在夏季,降水日数多,降水强度大,并以小雨及中雨为主,小雨出现日数最多,以暴雨的降水强度最大;冬季则降水量枯、日数少、强度小,降水以小雨为主,且出现日数较多。

四季各级降水事件的气候趋势分析表明:同季节同等级降水量与降水日数变化趋势一致,冬季降

水日数呈微弱的增加趋势,春季小雨的减少较为明显,在未来的变化中具有持续性;夏季与秋季降水日数呈减少趋势,未来这种变化将继续保持,秋季减少势头最为强烈,小雨日数的减少最为明显。

冬季、夏季与秋季降水强度呈增加趋势,小雨强度呈显著增加趋势;春季暴雨强度呈增大趋势,但未来的持续性较弱,因此,春季洪灾可能增多,也有可能减少。夏秋暴雨强度呈减小趋势,未来夏季暴雨强度呈弱反持续性,秋季暴雨强度呈现持续性。

参考文献

陈海波, 严华生, 陈 文, 等. 2009. 宁夏六盘山区多年降水的时空变化分析. 干旱气象, **27**(2): 103-110.

陈晓光, Conway D, 陈晓娟, 等. 2008. 1961-2005 年宁夏极端降水事件变化趋势分析. 气候变化研究进展, **4**(3): 156-160.

陈豫英, 陈 楠, 郑广芬, 等. 2008. 近45a 宁夏气温、降水及植被指数的变化分析. 自然资源学报, **23**(4): 626-634.

郭 军, 任国玉, 李明财. 2010. 近47 年环渤海地区不同级别降水事件变化. 地理研究, **29**(12): 2271-2280.

黄锡荃, 李惠明, 金伯欣. 1985. 水文学. 北京: 高等教育出版社.

黄小燕, 张明军, 王圣杰, 等. 2011. 中国西北地区近 50 a 夏季 0℃层高度及气温时空变化特征. 地理学报, **66**(9): 1191-1199.

江田汉, 邓莲堂. 2004. Hurst 指数估计中存在的若干问题——以在气候变化研究中的应用为例. 地理科学, **24**(2): 177-182.

姜创业, 魏 娜, 程肖侠, 等. 2011. 1961—2008 年陕西省年际气温和降水区域想变化特征分析. 水土保持研究, **18**(1): 197-200.

瞿 汶, 刘德祥, 赵红岩, 等. 2007. 甘肃省近 43 年降水资源变化对农业的影响. 干旱区研究, **24**(1): 56-60.

李珊珊, 张明军, 汪宝龙, 等. 2012. 近 51 年来三江源区降水变化的空间差异. 生态学杂志, **31**(10): 2635-2643.

梁 旭, 冯建民, 张 智, 等. 2007. 宁夏干旱气候变化及其成因研究. 干旱区资源与环境, **21**(8): 68-74.

刘德祥, 白虎志, 梁东升, 等. 2007. 甘肃不同强度降水日数变化对干旱灾害的影响. 干旱地区农业研究, **25**(2): 212-217.

潘敖大, 李忠贤, 倪东鸿, 等. 2011. 欧洲冬季 500 hPa 环流异常及与中国气候异常的关系. 气象科学, **31**(2): 129-134.

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的特征和趋势探讨. 第四纪研究, **23**(2): 151-163.

汪青春, 李 林, 刘 蓓, 等. 2003. 青海省近 40 年雨日、雨强的气候变化特征. 气象, **30**(4): 69-73.

王 英, 曹明奎, 陶 波, 等. 2006. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征. 地理研究, **25**(6): 1031-1040.

王 颖, 施 能, 顾骏强, 等. 2006. 中国雨日的气候变化. 大气科学, **30**(1): 162-170.

王大钧, 陈 列, 丁裕国. 2006. 近 40 年来中国降水量、雨日变化趋势及与全球温度变化的关系. 热带气象学报, **22**(3): 283-289.

王绍武, 蔡静宁, 慕巧珍. 2002. 中国西部年降水量的气候变化. 自然资源学报, **17**(4): 415-422.

王小玲, 翟盘茂. 2008. 1957—2004 年中国不同强度级别降水的变化趋势特征. 热带气象学报, **24**(5): 459-466.

吴永萍, 王澄海, 沈永平. 2011. 1960—2009 年塔里木河流域降水时空演化特征及原因分析. 冰川冻土, **33**(6): 137-141.

信忠保, 谢志仁, 王 文. 2005. 宁夏降水变化及其与 ENSO 事件的关系. 地理科学, **25**(1): 49-55.

徐利岗, 汤 英, 杜 历, 等. 2011. 宁夏降水空间分布格局及其多时间尺度变化特征分析. 安徽农业科学, **39**(34): 21303-21310.

杨金虎, 杨启国, 姚玉璧, 等. 2006. 西北东部夏季干湿演变及环流特征. 气象, **32**(10): 94-101.

张 永, 陈发虎, 勾晓华, 等. 2007. 中国西北地区季节间干湿变化的时空分布——基于 PDSI 数据. 地理学报, **62**(11): 1142-1152.

张存杰, 谢金南, 李栋梁, 等. 2002. 东亚季风对西北干旱气候的影响. 高原气象, **21**(2): 193-198.

赵志鹏, 曹立国, 魏锦烨, 等. 2012. 近 52 年黑龙江省不同级别降水特征分析. 水土保持研究, **19**(2): 48-52.

郑广芬, 陈晓光, 孙银川, 等. 2006. 宁夏气温、降水、蒸发的变化及其对气候变暖的响应. 气象科学, **26**(4): 412-421.

Gong DY, Shi PJ, Wang JA. 2004. Daily precipitation changes in the semi-arid region over Northern China. *Journal of Arid Environments*, **59**: 771-784.

Gu SX, He DM, Cui YL, *et al*. 2012. Temporal and spatial changes of agricultural water requirements in the Lancang River Basin. *Journal of Geographical Sciences*, **22**: 441-445.

IPCC. 2007. Summary for policymakers of climate change 2007: The physical science basis contribution of working group Ito the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press.

Li QX, Pang JD, Shen Y. 2012. Development of China homogenized monthly precipitation dataset during 1990 - 2009. *Journal of Geographical Sciences*, **22**: 579-593.

Mandelbrot BB. 1967. How long is the coast of Britain: Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, **156**: 636-638.

Reiser H, Kutiel H. 2009. Rainfall uncertainty in the Mediterranean: Definitions of the daily rainfall threshold (DRT) and the rainy season length (RSL). *Theoretical and Applied Climatology*, **97**: 151-162.

作者简介 李 菲,女,1987 年生,硕士研究生,主要从事全球变化与可持续发展方面的研究。E-mail: flysnowlee@163.com

责任编辑 李凤芹