

DOI: 10.5846/stxb201806241388

宋一凡, 卢亚静, 郭中小, 徐晓民, 郝伟罡, 刘慧文, 韩振华. 荒漠草原脉动性降水格局及其时空变化特征分析——以达尔罕茂明安联合旗为例. 生态学报, 2019, 39(16): - .

Song Y F, Lu Y J, Guo Z X, Xu X M, Hao W G, Liu H W, Han Z H. Precipitation pulse patterns and their spatiotemporal variation in desert steppes: a case study in the Darhan Muminggan Joint Banner. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): - .

荒漠草原脉动性降水格局及其时空变化特征分析 ——以达尔罕茂明安联合旗为例

宋一凡^{1,2}, 卢亚静^{3,*}, 郭中小¹, 徐晓民¹, 郝伟罡¹, 刘慧文⁴, 韩振华¹

1 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020

2 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038

3 北京市水科学技术研究院, 北京 100048

4 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024

摘要: 在全球变化背景下, 荒漠草原降水格局受到不同程度扰动, 识别荒漠草原变化环境下脉动性降水格局及其时空变化特征具有重要生态学和水文学意义。利用达尔罕茂明安联合旗位于不同雨量带的 3 个气象站 1960—2013 年日降水数据, 分析荒漠草原地区降水格局及其时空变化特征。研究表明, 研究区 0—5 mm、5—10 mm 和大于 10mm 降水事件及降水量所占的比例分别为 77%—80.9%、11.5%—12.2%、7.6%—10.9% 和 25.2%—32.2%、21.9%—25.4%、42.4%—52.9%。不同等级降水事件日均降水量分别为 1.2—1.3 mm/d、7.0—7.1 mm/d、17.8—19.2 mm/d。研究区降水量较降水日数具有更强的时空变异性, 全年和生长季降水日数和降水量主周期在 2.84—4.5a 左右。研究区不同雨量带不同降水等级降水日数和降水量普遍呈增加趋势, 尤以 0—5mm 小降水事件的增加为主。

关键词: 荒漠草原; 脉动性; 降水格局; 变化特征; 时空分析

Precipitation pulse patterns and their spatiotemporal variation in desert steppes: a case study in the Darhan Muminggan Joint Banner

SONG Yifan^{1,2}, LU Yajing^{3,*}, GUO Zhongxiao¹, XU Xiaomin¹, HAO Weigang¹, LIU Huiwen⁴, HAN Zhenhua¹

1 Institute of Water Resources Science of Pasturing Area of the Ministry of Water Resources, Huhhot 010020, China

2 Water Resources Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

3 Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China

4 Power China Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China

Abstract: Against the backdrop of global climate change, precipitation patterns in desert steppes have undergone varying degrees of disturbance. There is a particular significance in recognizing these alterations for both the hydrology and ecology of the changing environments of desert steppes. In this study, daily data from three meteorological stations located in regions of different precipitation gradients in the Darhan Muminggan Joint Banner were used to analyze precipitation patterns in desert steppes and their variation characteristics. Unlike previous studies on this topic, this research utilized precipitation events from areas of different precipitation gradients for comparison at the same temporal scale. Precipitation events of different levels were analyzed to determine the precipitation composition of desert steppes and its spatiotemporal variation. The results indicated that, overall, as the annual precipitation decreased, the fluctuation in the number of precipitation days

基金项目: 中国水利水电科学研究院科研专项项目 (MK2016J16, MK2016J15), 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2017MS0516)

收稿日期: 2018-06-24; **网络出版日期:** 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luciahary@163.com

and the precipitation amount in the study area gradually increased. Also, the fluctuations in precipitation amount were significantly greater than the fluctuations in the number of precipitation days, which meant that precipitation amount had greater spatiotemporal variability than the number of precipitation days. The proportions of the number of precipitation days of 0—5 mm, 5—10 mm, and >10 mm precipitation events were 77%—80.9%, 11.5%—12.2%, and 7.6%—10.9%, respectively, while the precipitation amount proportions of 0—5 mm, 5—10 mm, and >10 mm precipitation events were 25.2%—32.2%, 21.9%—25.4%, and 42.4%—52.9%, respectively. The mean precipitation amounts on a rainy day with 0—5 mm, 5—10 mm, and >10 mm precipitation events were 1.2—1.3 mm/d, 7.0—7.1 mm/d, and 17.8—19.2 mm/d. From the annual distribution of precipitation events of different levels, which were affected by the combination of the southeast monsoon and the terrain, it could be seen that the 0—5 mm precipitation events were mainly concentrated from June to September in the growing season. The 5—10 mm precipitation events occurred mostly in July, and the >10 mm precipitation events predominantly occurred in August. Both the amount of precipitation and the number of precipitation days showed an increasing trend in the study area. A major feature of pulse precipitation from 1960 to 2013 in the desert steppe region of the study area was that 0—5 mm precipitation events showed an increasing trend in terms of both the precipitation amount and the number of precipitation days. In the Bailingmiao and Mandulla regions, where annual precipitation was relatively low, both the number of precipitation days and the precipitation amount showed an increasing trend for all precipitation levels. This was another significant feature of precipitation events in the study area. However, in the Xilamuren region, where the annual amount of precipitation is relatively high, there has been a shift in the internal precipitation structure from large and medium precipitation events to small precipitation events, although the annual precipitation continues to show an increasing trend. The annual precipitation and growing—season precipitation had 2.84—4.5 a main periods. The differences among the precipitation gradients are inconspicuous, and from the perspective of the precipitation events of different levels, the overall trend indicates that the higher the precipitation level, the shorter the cycle of precipitation events.

Key Words: desert steppe; pulse; precipitation pattern; variation; spatiotemporal analysis

草地生态系统是我国最大的陆地生态系统,我国现有各类型天然草地面积约占国土面积的 41.7%^[1-2]。荒漠草原作为草原到荒漠的过渡地带,在日益严重的荒漠化侵蚀威胁下首当其冲,已成为生态治理的前沿地带与热点地区。在众多因素中,降水被认为是影响荒漠草原植被盖度时空动态变化的主控环境因子^[3-6],干旱半干旱地区气候因素时空变异性显著,其中一个鲜明的特点即是降水的脉动性^[7-8]。脉动性降水引发的资源脉动性(Resource pulse)通常是干旱半干旱地区生态系统演替的核心驱动力^[9-11],因此,识别脉动性降水特征对于理解荒漠草原地区生态水文机制具有重要生态学和水文学意义^[12]。

降水格局在很大程度上塑造了区域的生态格局,不同等级降水事件在塑造区域生态格局中发挥的作用不同。总体来说,干旱半干旱地区降水次数少且变率大。从不同等级的降水事件来看,小降水事件发生频率高,对年降水总量的贡献较小,而大降水事件发生频率低,却对年降水总量的贡献大^[13-14],在全球范围内各种干旱区都有类似的降水格局。Sala 和 Lauenroth^[15] 研究发现北美草原<5 mm 的降水事件占总降水事件的 70% 和总降水量的 25%;陈军和王玉辉^[16] 利用 1956—2009 年日降水资料对苏尼特左旗荒漠草原降水格局进行分析,发现<5mm 降水事件比例为 81%;而在更为干旱的巴丹吉林沙漠腹地,这一比例超过了 90%^[17]。

降水作为在干旱半干旱地区生态系统中发挥主导性作用的关键环境因子,通常伴随着显著的时空变异特征,即使是同一地区的不同地点,其降水量、发生时间、强度都可能具有极大的差异性^[18]。在以往干旱半干旱地区降水事件的研究中,大多是针对来自某一地区单站的降水事件进行分析,不同雨量带脉动性降水事件较少被拿来进行同一时间尺度下的对比。此外,在气候变化和人类活动影响下,荒漠草原降水格局也受到不同程度扰动,分析不同雨量带、不同降水等级降水事件的时空变化特征有助于我们更好地理解荒漠草原生态脆

弱问题与生态演替规律^[19],然而目前关于变化环境下荒漠草原降水结构及其变化规律的认识尚不全面。本研究以内蒙古自治区典型荒漠草原地区达尔罕茂明安联合旗为例,分析位于研究区不同雨量带的3个气象站1960—2013年日降水格局及其时空变化特征,以调查全球变化背景下内蒙古荒漠草原降水事件变化趋势,为精确开展荒漠化治理与生态修复进行有益探索。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为位于内蒙古自治区中西部的达尔罕茂明安联合旗,隶属于包头市,全旗总面积 18177 km²,坐标范围为 109°16'—111°25'E,41°20'—42°40'N。研究区地形南高北低,平均海拔 1400m(图 1)。受东南季风和大陆气团影响,多年平均降水量 253.45 mm,多年平均气温 4.12℃,多年平均蒸发量 2480.57 mm (E601)。艾布盖河是达尔罕茂明安联合旗境内最长的河流,由南向北汇入腾格里淖尔。研究区土壤以栗钙土为主,典型植被有小针茅 (*Stipa klemenzi*)、克氏针茅 (*Stipa krylovii*)、无芒隐子草 (*Cleistogenes songorica*)、短花针茅 (*Stipa breviflora*) 等,平均植被盖度 30%—45%。

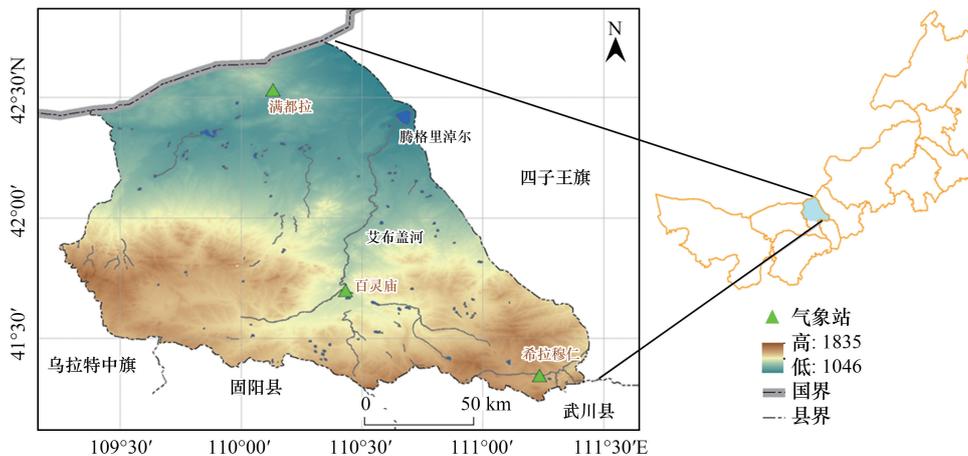


图 1 研究区地形图

Fig.1 Topographic overview of the study area

1.2 数据资料

研究区从南至北设有希拉穆仁、百灵庙和满都拉 3 个气象站(图 1),本研究选取位于不同雨量带的 3 个气象测站 1960—2013 年降水日值数据以调查研究区脉动性降水格局及其时空变化特征。数据来源为国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>)。

1.3 降水格局分析

干旱半干旱地区不同等级降水事件的结构与分布形成了该地区特有的降水格局,这种降水格局长期以来作为关键环境因子参与塑造了区域生态景观本底。

0—5 mm 降水通常只能湿润地表,大于 10 mm 降水能对深层土壤水分进行有效补给,从而更易被根系发育较深的木本植物利用^[20,21]。参照全球不同荒漠化地区研究成果^[9,20,22],本文将研究区降水等级划分为 0—5 mm 的小降水事件、5—10 mm 的中等降水事件和大于 10 mm 的大降水事件。降水量和降水时间的时空变异性及剧烈波动性是干旱半干旱的荒漠化地区降水脉动性突出的表现特征,对于脉动性降水事件的不均匀性或波动性,本研究采用变异系数进行分析,计算公式如下:

$$CV = \sigma/\mu$$

式中, CV 代表变异系数(Coefficient of variation); σ 为样本标准差; μ 为样本均值。

1.4 降水特征分析

本研究从降水趋势性、突变性和周期性几个方面分析荒漠草原地区达尔罕茂明安联合旗降水特征。

(1) 趋势性和突变性检验

对降水要素作 5a 滑动平均以突出较长时间序列的变化趋势。趋势性和突变性分析采用 Mann-Kendall 非参数检验方法,并结合 Yamamoto 方法判断突变点。Mann-Kendall 非参数统计检验法是由世界气象组织推荐的应用于环境数据时间序列趋势分析的方法,被广泛用于水文气象数据趋势性检验,该方法的优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,因而更适用于顺序变量和类型变量的检验^[23]。Yamamoto 方法引入信噪比确定序列差异,以判断时间序列是否发生突变。

(2) 周期性分析

本研究采用最大熵谱法(MEM)提取降水序列周期。最大熵谱原理是由 J.P.Burg 于 1967 年首次提出的,该理论以信息论中熵的概念作为基础。作为一种非线性的谱分析方法,最大熵谱法具有分辨率高,十分适用于较短时间序列的优势,因而得到人们的广泛应用。

2 结果与分析

2.1 研究区降水格局分析

2.1.1 不同雨量带降水日数与降水量

受研究区南部地形抬升影响,研究区形成了自东南向西北逐渐递减的降水分布格局(表 1)。从降水量来看,位于研究区东南部的希拉穆仁站比位于西北部的满都拉站多年平均降水量高出了 122.5 mm,生长季多年平均降水量高出 115.5 mm;从降水日数变化来看,希拉穆仁站较满都拉站多年平均降水日数多出了 29.2 d,生长季多年平均降水日数多出 19.8 d。研究区南北部降水梯度变化明显。

表 1 研究区不同雨量带降水日数与降水量

Table 1 Precipitation and precipitation days of different precipitation gradients

| 气象站 Station | 希拉穆仁 Xilamuren | 百灵庙 Bailingmiao | 满都拉 Mandula |
|----------------------|----------------|-----------------|-------------|
| 降水日数 | 79.3 | 61.7 | 50.1 |
| Precipitation days/d | 15.8 | 21.3 | 20.8 |
| 生长季 | 60.1 | 49.8 | 40.3 |
| 变异系数/% | 16.4 | 15.7 | 16.7 |
| 降水量 | 282.9 | 244.0 | 160.4 |
| Precipitation/mm | 24.8 | 26.3 | 32.0 |
| 生长季 | 266.6 | 232.6 | 151.1 |
| 变异系数/% | 25.6 | 26.5 | 32.8 |

从降水日数的波动情况来看,希拉穆仁地区多年平均降水日数较百灵庙、满都拉地区更为稳定。对于降水量较少的百灵庙和满都拉地区,生长季降水日数较全年降水日数更为稳定。从降水量的波动情况来看,3 个地区具有随着年降水量减小,降水量波动性逐渐增大的趋势,多年平均降水量和生长季降水量都能看到类似的规律。此外,降水量的波动程度要明显强于降水日数。可见,相较于降水日数,荒漠草原降水量具有更强的时空变异性。

2.1.2 不同等级降水事件降水日数与降水量

研究区不同等级降水事件在降水事件总体中所占的比例及变异系数情况见表 2。

从研究区不同降水等级降水事件和降水量的比例来看,0—5 mm、5—10 mm 和大于 10 mm 降水事件所占的比例分别为 77%—80.9%,11.5%—12.2%,和 7.6%—10.9%;0—5 mm、5—10 mm 和大于 10 mm 降水量在年降水总量中所占的比例分别为 25.2%—32.2%,21.9%—25.4%,和 42.4%—52.9%。可见,0—5 mm 的小降水事件在研究区降水事件中占据主体(77%—80.9%);而降水量所占比重最大的则为大于 10 mm 降水事件

(42.4%—52.9%)。

表 2 研究区不同等级降水事件特征

Table 2 Characteristics of precipitation events of different levels

| 降水等级 Precipitation level 气象站 Station | 0—5 mm | | | 5—10 mm | | | >10 mm | | |
|--|--------|------|------|---------|------|------|--------|-------|------|
| | 希拉穆仁 | 百灵庙 | 满都拉 | 希拉穆仁 | 百灵庙 | 满都拉 | 希拉穆仁 | 百灵庙 | 满都拉 |
| 降水日数 Precipitation days /d | 61.9 | 47.5 | 40.5 | 9.5 | 7.5 | 5.8 | 7.7 | 6.7 | 3.8 |
| 比例 Proportion /% | 78.1 | 77.0 | 80.9 | 12.0 | 12.2 | 11.5 | 9.7 | 10.9 | 7.6 |
| 变异系数 Coefficient of variation /% | 17.0 | 24.3 | 22.7 | 34.1 | 36.5 | 47.4 | 39.0 | 44.2 | 55.3 |
| 降水量 Precipitation /mm | 74.8 | 61.4 | 51.7 | 67.6 | 53.4 | 40.7 | 140.4 | 129.1 | 68.0 |
| 比例 Proportion /% | 26.5 | 25.2 | 32.2 | 23.9 | 21.9 | 25.4 | 49.6 | 52.9 | 42.4 |
| 变异系数 Coefficient of variation /% | 19.9 | 26.9 | 24.1 | 33.5 | 36.6 | 49.6 | 42.7 | 46.2 | 62.6 |
| 降水日雨量 Precipitation on a rainy day/mm | 1.2 | 1.3 | 1.3 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 18.2 | 19.2 | 17.8 |

从变异系数来看,位于研究区东南部的希拉穆仁气象站不论是降水日数还是降水量都具有最低的变异系数。总体来讲,研究区降水日数和降水量的波动程度与该区域多年平均降水量有关,其关系为,多年平均降水量越小,降水日数和降水量的波动越剧烈。从不同等级降水事件(0—5 mm、5—10 mm 和大于 10 mm)的波动程度来看,降水等级越高,波动幅度越剧烈。结合不同等级降水事件降水量所占的比重,可以发现,研究区荒漠草原年际降水量波动的主要原因是大降水事件(>10 mm,42.4%—52.9%)降水量的年际变化(42.7%—62.6%)。

2.1.3 研究区降水事件年内分布规律分析

位于研究区不同雨量带内的 3 个气象站不同等级降水日数年内分布情况见图 2。

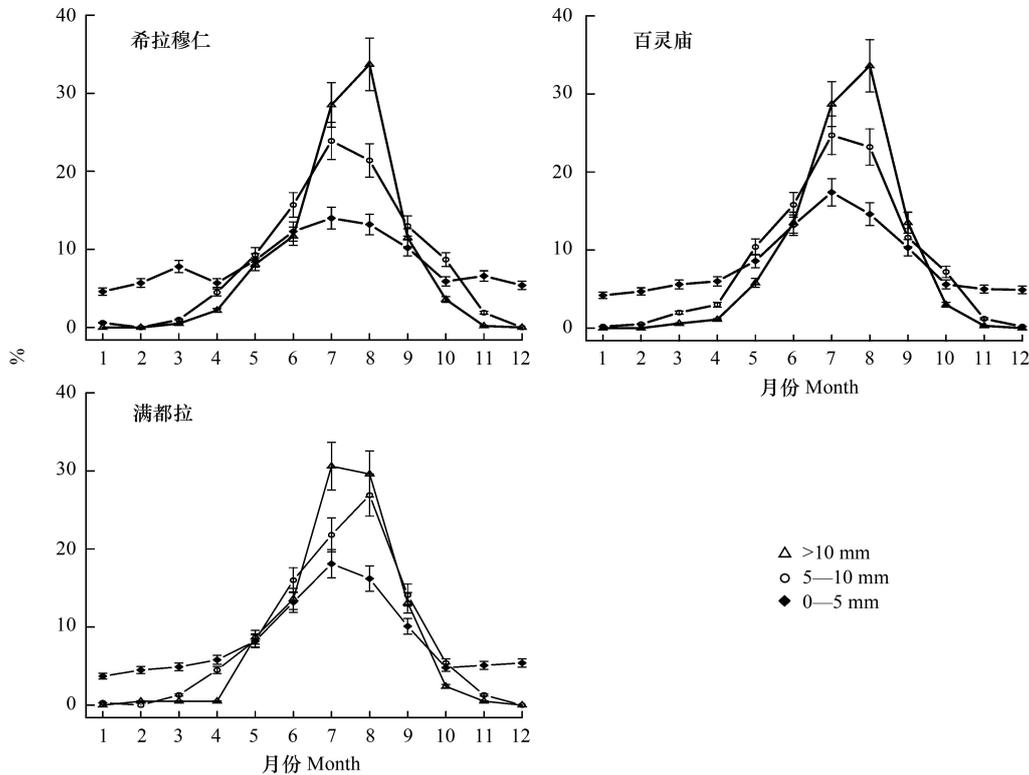


图 2 不同等级降水日数年内分布规律

Fig.2 Annual distributions of precipitation days of different precipitation levels

分析研究区 54 年 (1960—2013 年) 不同雨量带不同等级降水事件在年内的分布规律, 可以得到以下规律:

(1) 0—5 mm 降水日数在生长季 6—9 月份各月所占比例均超过 10% (12.9%、16.5%、14.7%、10.2%), 最大比例出现在 7 月, 其他各月除 5 月 (8.5%) 外都在 5% 左右; 从不同雨量带的变化情况来看, 随着年降水量的递减, 0—5 mm 降水事件发生日数在各月的波动性趋于增强, 希拉穆仁、百灵庙、满都拉三站变异系数分别为 39.7%、53.9%、59.4%。

(2) 5—10 mm 降水事件发生日数年内分布较 0—5 mm 降水事件更向植被生长季集中, 生长季 4—10 月份所占比例分别为 4.0%、9.3%、15.9%、23.5%、23.8%、12.9%、7.1%, 其他各月均不足 2.0%。希拉穆仁、百灵庙地区 5—10 mm 降水事件年内最大比例出现在 7 月份 (23.9%、24.7%), 满都拉地区出现在 8 月份 (26.9%)。此外, 5—10 mm 降水事件发生日数在各月的波动性明显强于 0—5 mm 降水事件。从不同雨量带来看, 随着年降水量的下降, 波动性也趋于增强, 希拉穆仁、百灵庙、满都拉三站变异系数分别为 102.2%、106.9%、111.2%。

(3) 大于 10 mm 降水事件发生日数年内分布较 0—5 mm、5—10 mm 降水事件在生长季内更为集中。生长季 5—9 月份降水日数比例分别为 8.7%、13.6%、30.6%、29.6%、13.1%、2.4%, 其他各月均未超过 1.0%, 希拉穆仁、百灵庙地区最大比例出现在 8 月份 (33.7%、33.6%), 满都拉地区出现在 7 月份 (30.6%)。

从不同雨量带降水量的分布情况来看, 不同等级降水量的年内分布也具有同降水日数大体相同的分布规律 (图 3)。

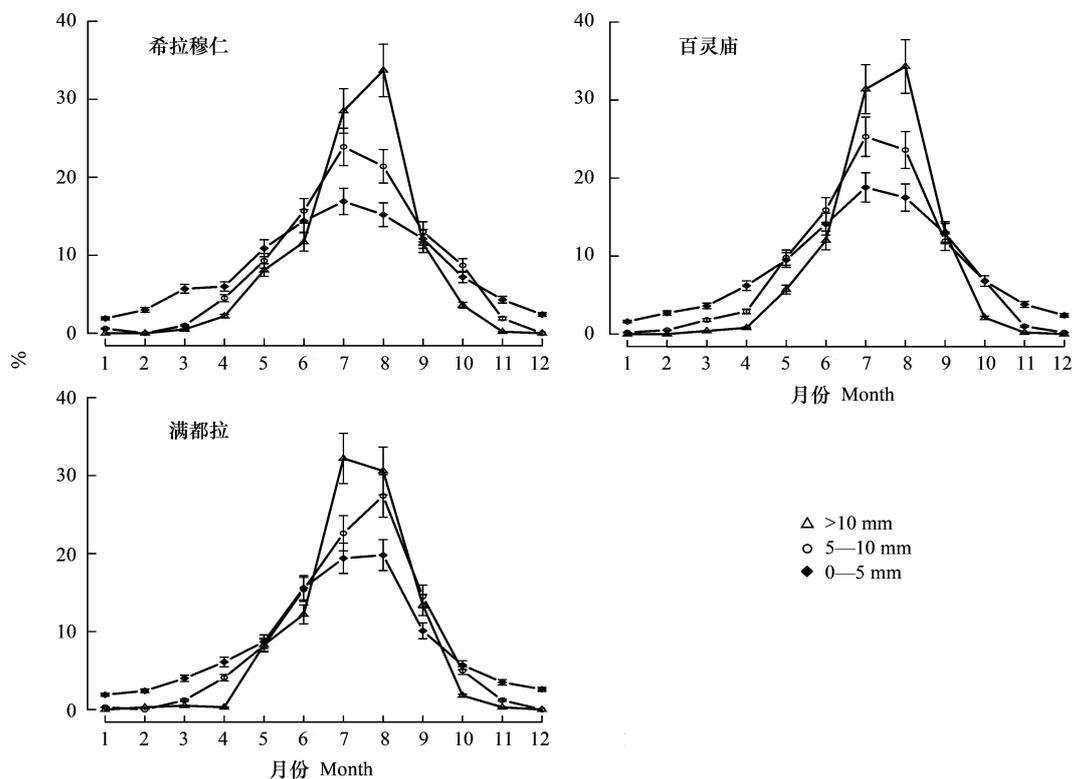


图 3 不同等级降水量年内分布规律

Fig.3 Annual precipitation distribution of different precipitation levels

2.2 研究区脉动性降水特征分析

2.2.1 不同雨量带脉动性降水特征分析

研究区不同雨量带 1960—2013 年降水过程变化趋势如图 4 所示。

由 Z 值可以判定, 研究区不同雨量带 1960—2013 年降水日数均呈增加趋势, 其中百灵庙地区、满都拉地

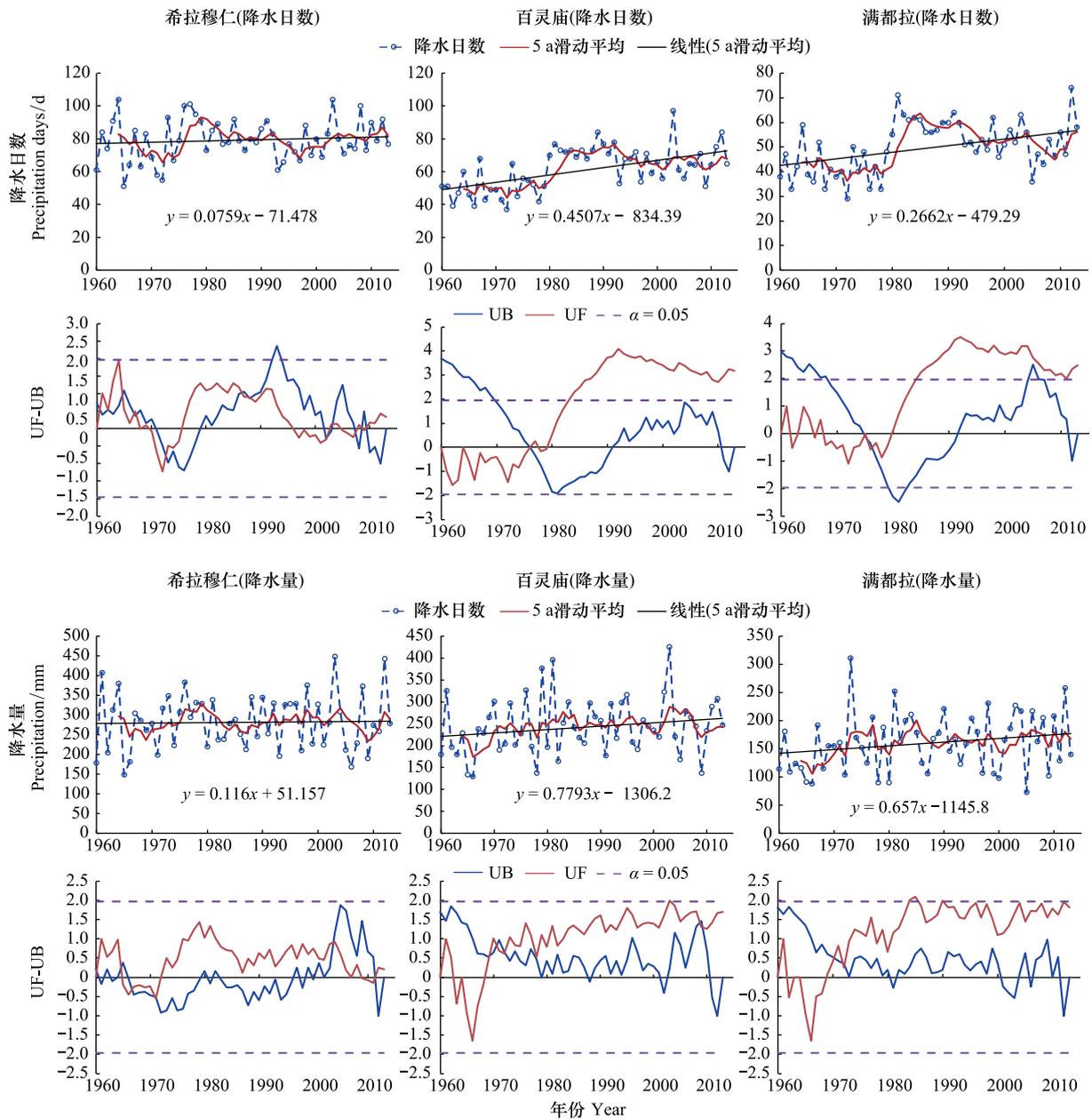


图 4 不同雨量带年降水变化趋势

Fig.4 Variation trends of annual precipitation of different precipitation gradients

区 1983—2013 年期间降水日数呈显著增加趋势($\alpha = 0.05$)。通过 UF 和 UB 曲线交点的位置结合 Yamamoto 方法,可判定两地区降水日数突变开始时间均为 1976 年。3 个地区降水量 Z 值均大于 0,说明 3 个地区降水量总体呈现增加趋势,但 3 个地区降水量增加均未达到显著性。

研究区不同雨量带 1960—2013 年生长季降水变化趋势,见图 5。

不同雨量带生长季降水日数均呈下降趋势,而不同雨量带生长季降水量均呈现增加趋势,但二者的变化趋势均未到达显著性水平。考虑到不同雨量带年降水日数都呈显著增加趋势(图 4),同时不同等级生长季降水日数均呈减少趋势,则降水日数增加应出现在非生长季。综合分析生长季降水日数和降水量的变化过程,研究区生长季日均降水量具有增加趋势。

研究区不同雨量带 1960—2013 年降水日数与降水量变化周期如图 6 所示。

通过最大熵谱法分析(图 6),希拉穆仁地区多年平均降水日数具有 2.84 a 和 4.91 a 的周期,多年平均降

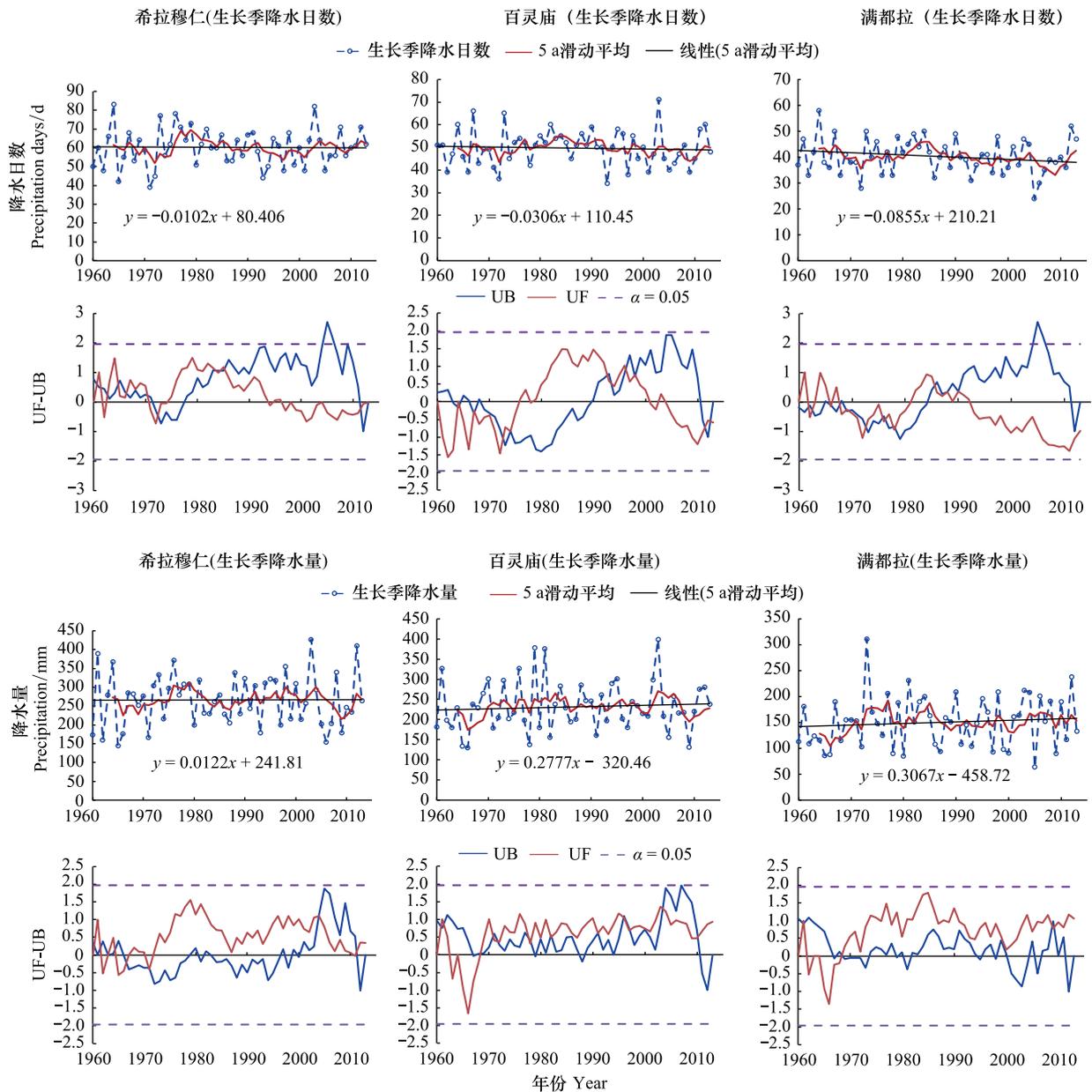


图5 不同雨量带生长季降水变化趋势

Fig.5 Variation trends of different precipitation gradients in growing season

水量周期分别为 2.7 a 和 4.5 a, 生长季降水日数周期为 3.0 a 和 4.19 a, 生长季降水量周期为 2.7 a 和 4.15 a。百灵庙地区年降水日数周期为 3.86 a, 年降水量周期为 2.84 a 和 4.5 a, 生长季降水日数周期为 4.15 a 和 7.71 a, 生长季降水量周期为 2.7 a、4.15 a 和 10.8 a。满都拉地区年降水日数、年降水量、生长季降水日数、生长季降水量的周期均为 3.18 a。

2.2.2 不同等级脉动性降水特征分析

下面通过不同等级降水事件变化趋势及周期性分析,进一步探讨研究区脉动性降水特征以及降水结构变化规律。

研究区 1960—2013 年 0—5 mm 降水事件变化趋势见图 7。通过分析 Z 值,研究区 1960—2013 年 0—5 mm 降水日数和降水量均呈增加趋势。其中,百灵庙和满都拉地区 0—5 mm 降水日数 1986—2013 年为显著性增加 ($\alpha = 0.05$),结合 Yamamoto 方法判定降水日数突变开始时间均为 1977 年前后。从降水量来看,满都

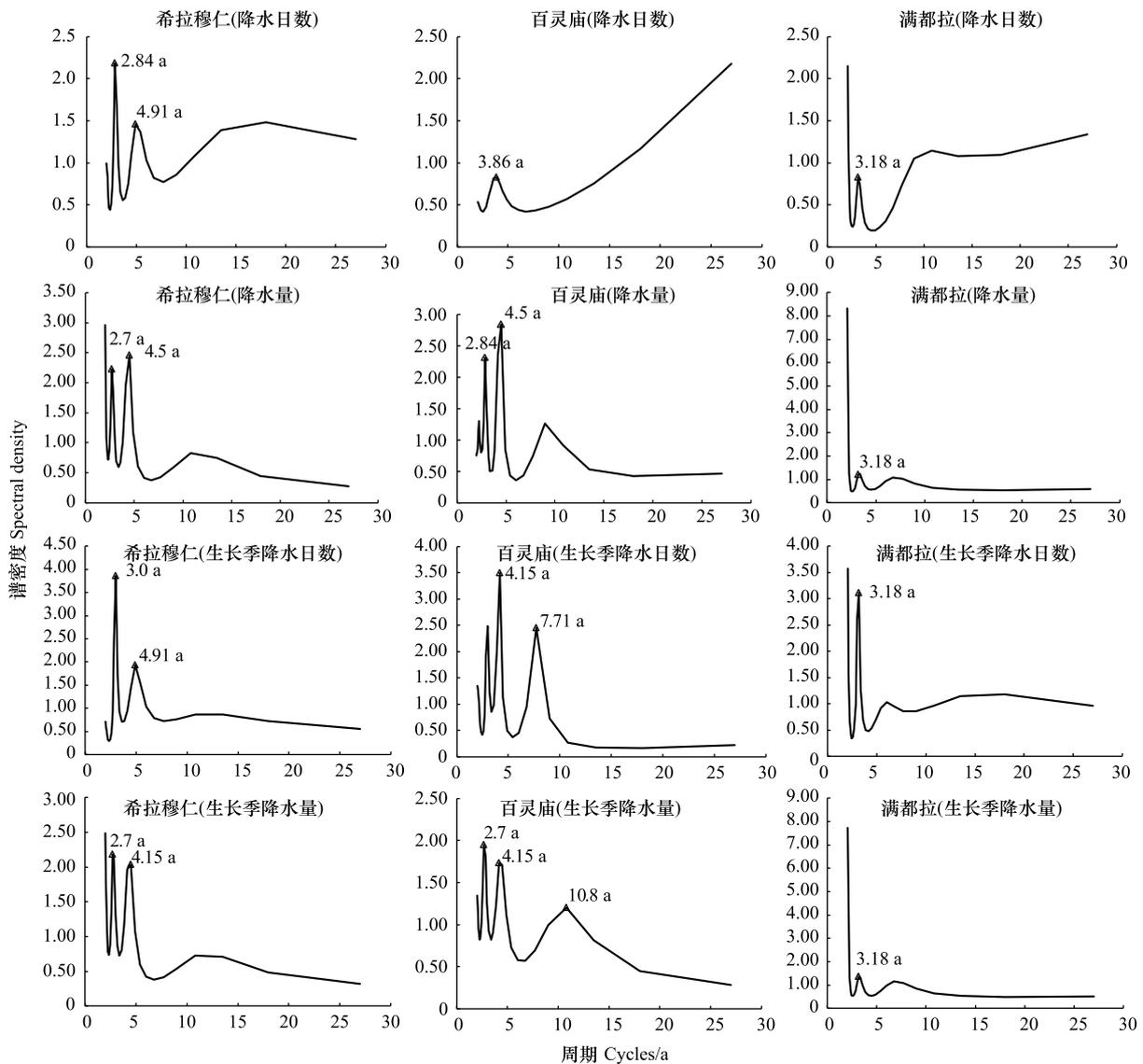


图 6 不同雨量带降水周期

Fig.6 Cycles of different precipitation gradients

拉地区 0—5mm 降水量 1990—2006 年间为显著性增加 ($\alpha = 0.05$), 突变点发生在 1979 年。

研究区 1960—2013 年 5—10 mm 降水事件变化趋势见图 8。通过 Z 值分析, 希拉穆仁站降水量和降水日数均呈减少趋势, 另两站降水日数和降水量均呈增加趋势。但以上变化趋势都未到达显著性水平。

研究区 1960—2013 年大于 10 mm 降水事件变化趋势见图 9。从降水日数来看, 三站大于 10 mm 降水日数均呈增加趋势, 但都未达到显著性水平。从降水量来看, 希拉穆仁站大于 10 mm 降水量呈现减少趋势, 百灵庙站、满都拉站均为增加趋势, 其中满都拉站大于 10 mm 降水量 1973—1982 年间增加趋势达到了显著性水平 ($\alpha = 0.05$), 结合 Yamamoto 分析判定突变点为 1967 年。

研究区不同降水等级 1960—2013 年降水日数与降水量变化周期如图 10、图 11 所示。从不同降水等级降水日数的周期来看 (图 10), 希拉穆仁地区 0—5 mm 降水日数具有 3.18 a 和 6.75 a 的周期, 5—10 mm 降水日数的周期为 4.15 a 和 10.8 a, 大于 10 mm 降水日数具有 2.0 a、4.5 a 和 10.8 a 的周期。百灵庙地区 0—5 mm 降水日数具有 4.15 a 和 7.71 a 的周期, 5—10 mm 降水日数具有 2.46 a 和 6.0 a 的周期, 大于 10 mm 降水日数具有 2.84 a 和 9.0 a 的周期。满都拉地区 0—5 mm 降水日数具有 3.18 a 和 6.75 a 的周期, 5—10 mm 降水日数具

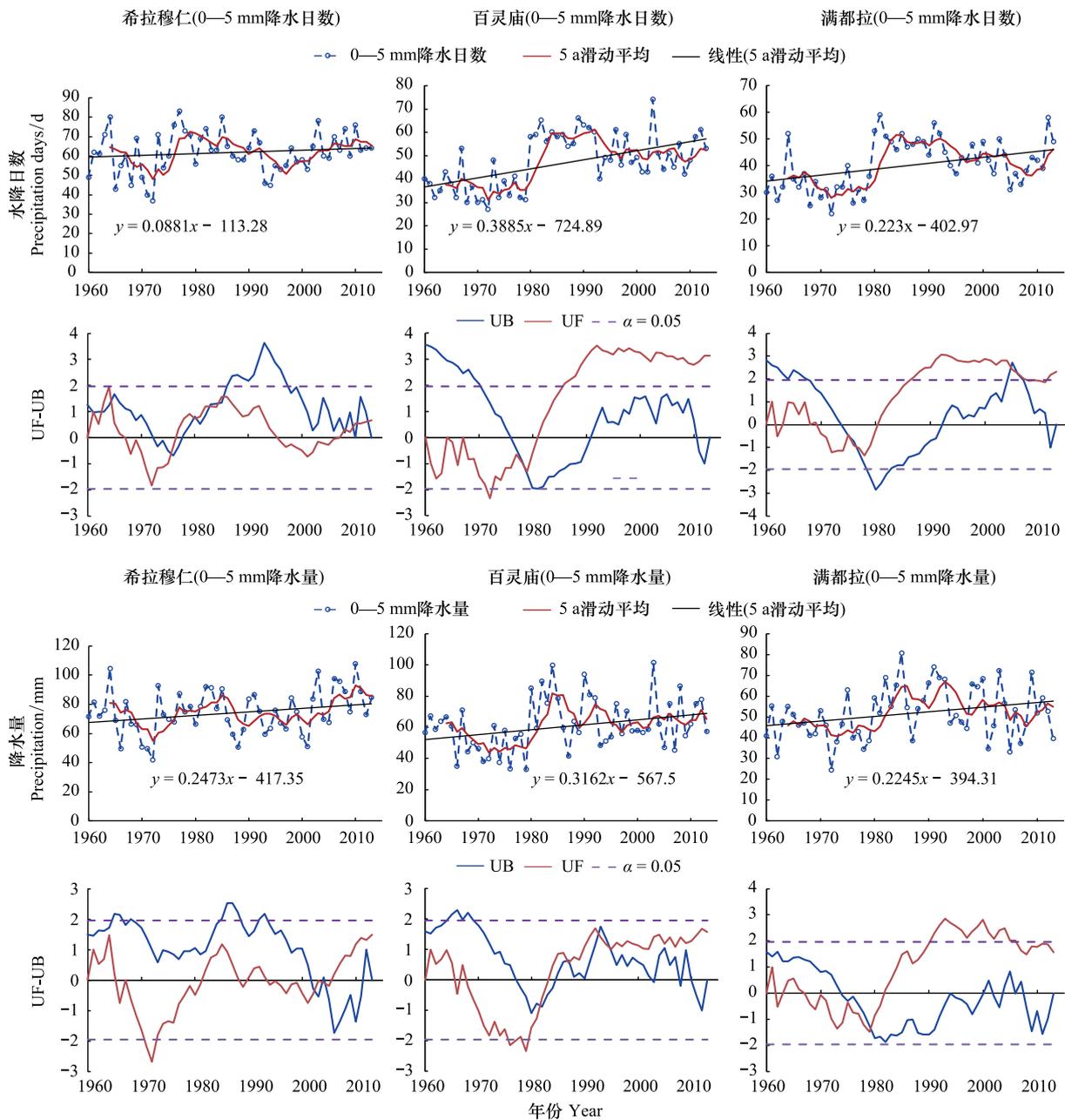


图7 0—5 mm 降水事件变化趋势

Fig.7 Variation trends of 0—5 mm precipitation events

有 2.35 a 和 3.0 a 的周期,大于 10 mm 降水日数周期为 2.0 a。

从不同降水等级降水量的周期来看(图 11),希拉穆仁地区 0—5 mm 降水量具有 4.15 a 的周期,5—10 mm 降水量周期为 3.86 a 和 10.8 a,大于 10 mm 降水量周期为 2.0 a。百灵庙地区 0—5 mm 降水量周期为 2.0 a 和 2.57 a,5—10 mm 降水量周期为 6.75 a,大于 10 mm 降水量周期为 2.57 a 和 10.8 a。满都拉地区 0—5 mm 降水量具有 2.7 a 和 6.0 a 的周期,5—10 mm 降水量周期为 2.25 a 和 3.18 a,大于 10 mm 降水量周期为 2.0 a。

3 讨论

受地形抬升作用影响,达尔罕茂明安联合旗自南向北形成了明显的降水梯度差异,不论是降水日数还是降水量都具有从东南到西北递减的趋势,且降水日数与降水量具有相同的变化趋势。当研究区发生降水事件

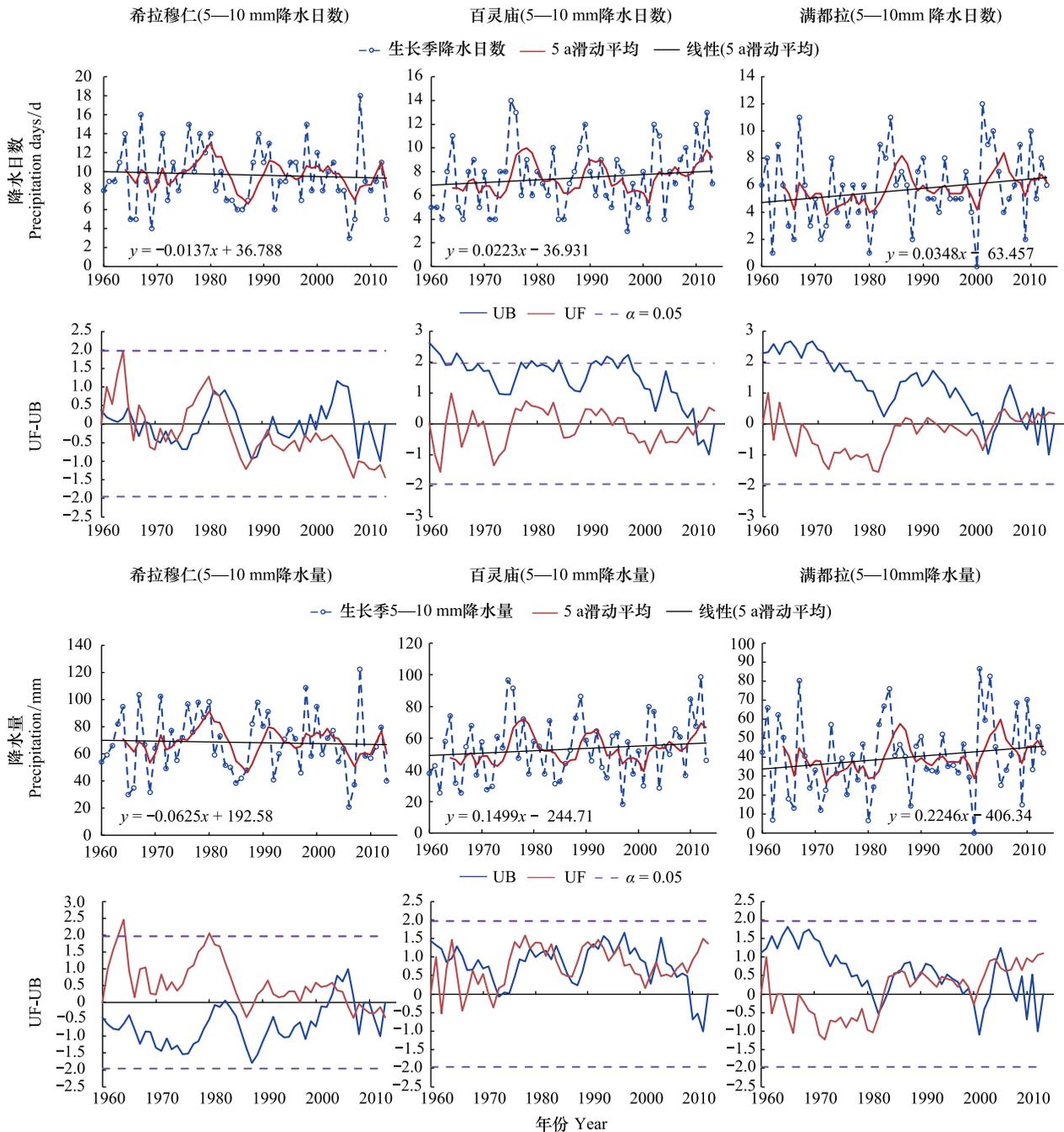


图 8 5—10 mm 降水事件变化趋势

Fig.8 Variation trends of 5—10 mm precipitation events

时,0—5 mm、5—10 mm 和大于 10 mm 日均降水量分别为 1.2—1.3 mm/d、7.0—7.1 mm/d、17.8—19.2 mm/d。由此可见,位于荒漠草原的研究区降水事件两极分化特征显著,即在降水事件中占主体(77%—80.9%)的 0—5mm 降水事件日均降水量仅为 1.2—1.3 mm/d;而在降水事件中仅占极少数的(7.6%—10.9%)大于 10mm 降水事件日均降水量却高达 17.8—19.2 mm/d,在荒漠植被生长发育中发挥着少数却关键的作用。这种水分分割效应深刻影响着不同根系埋深荒漠植被的水分利用策略^[9-10,13,24]。从图 2 可以看出,研究区大降水事件主要集中在 7、8 两个月,这种雨热同期的效应有利于植被生物量的快速积累。水汽在由东南向西北的传输过程中受到了研究区南部地形抬升的影响,一部分大于 10 mm 的降水事件到了研究区西北部被削弱为 5—10 mm 降水事件,从而加剧了降水梯度的形成,并造成了研究区不同地区大于 10 mm 降水事件的年内分布差异。可

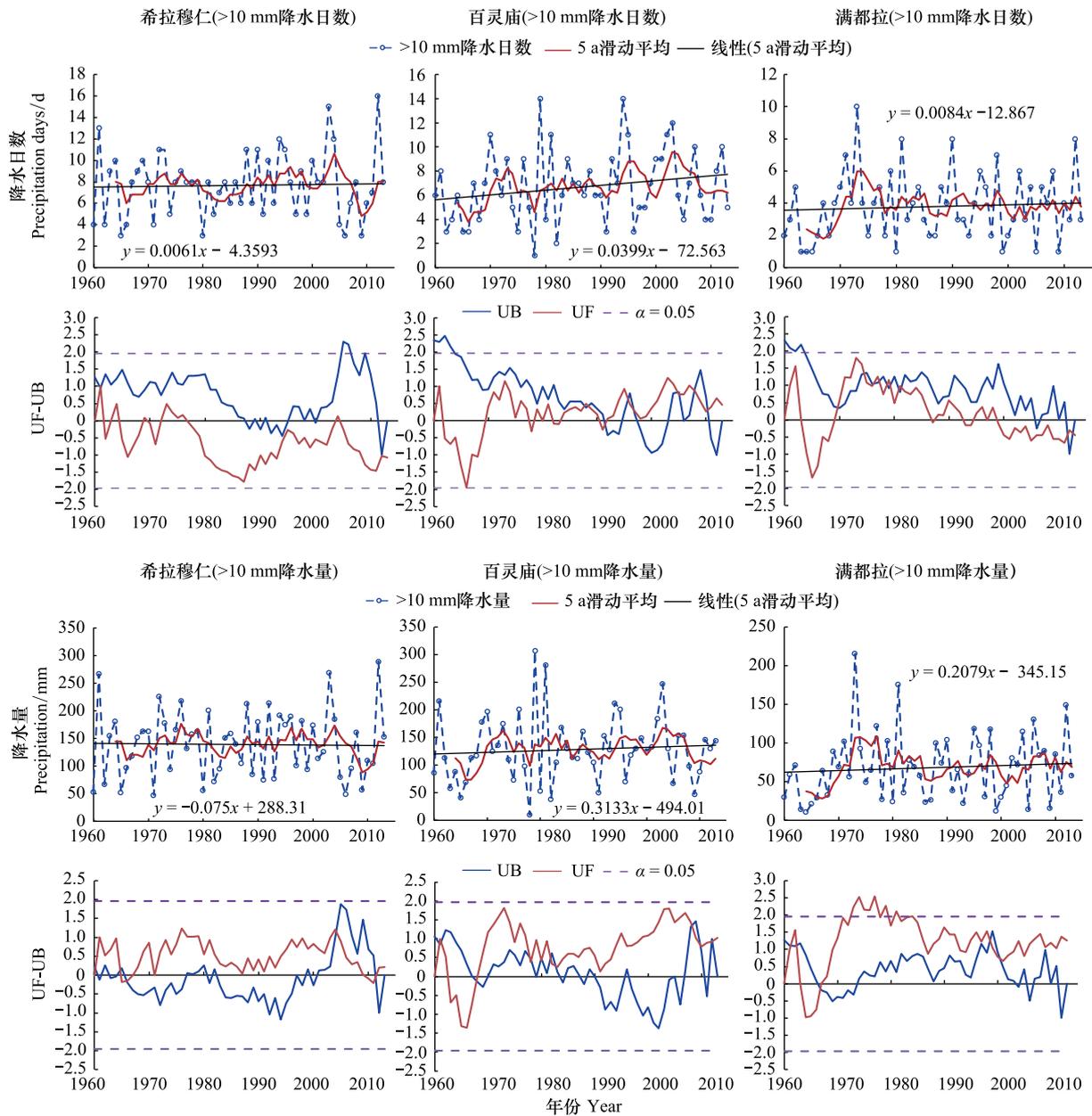


图9 大于 10 mm 降水事件变化趋势

Fig.9 Variation trends of precipitation events greater than 10 mm

见,这种地形的显著影响(“rain shadow”效应)进一步加剧了研究区降水的时空变异特征^[24]。

研究区不同雨量带不同降水等级降水事件降水特征见表3。从降水事件整体变化趋势来看,研究区不同雨量带不同降水等级降水日数和降水量普遍呈增加趋势,该变化趋势与内蒙古西部年降水量、降水日数和降水强度均以增加为主的结论一致^[25],符合近100年来东亚中高纬的西伯利亚、蒙古等地区年总降水量一般增加的总体趋势^[26]。在全年和生长季不同雨量带降水事件中,只有希拉穆仁地区生长季降水日数出现了下降趋势,其他情况均为增加趋势,其中百灵庙和满都拉地区全年降水日数呈显著增加趋势。

从不同降水等级降水事件来看,研究区不同雨量带0—5 mm降水事件降水量和降水日数均呈增加趋势,其中,百灵庙地区降水日数、满都拉地区降水日数和降水量达到了显著性水平。可见,0—5 mm降水事件降水日数和降水量呈增加趋势是研究区1960—2013年脉动性降水一大主要特征,而0—5 mm小降水事件对荒漠化地区土壤结皮、微生物呼吸以及浅根植被水分利用具有重要意义^[27,28]。在大于10 mm的降水事件中,除希

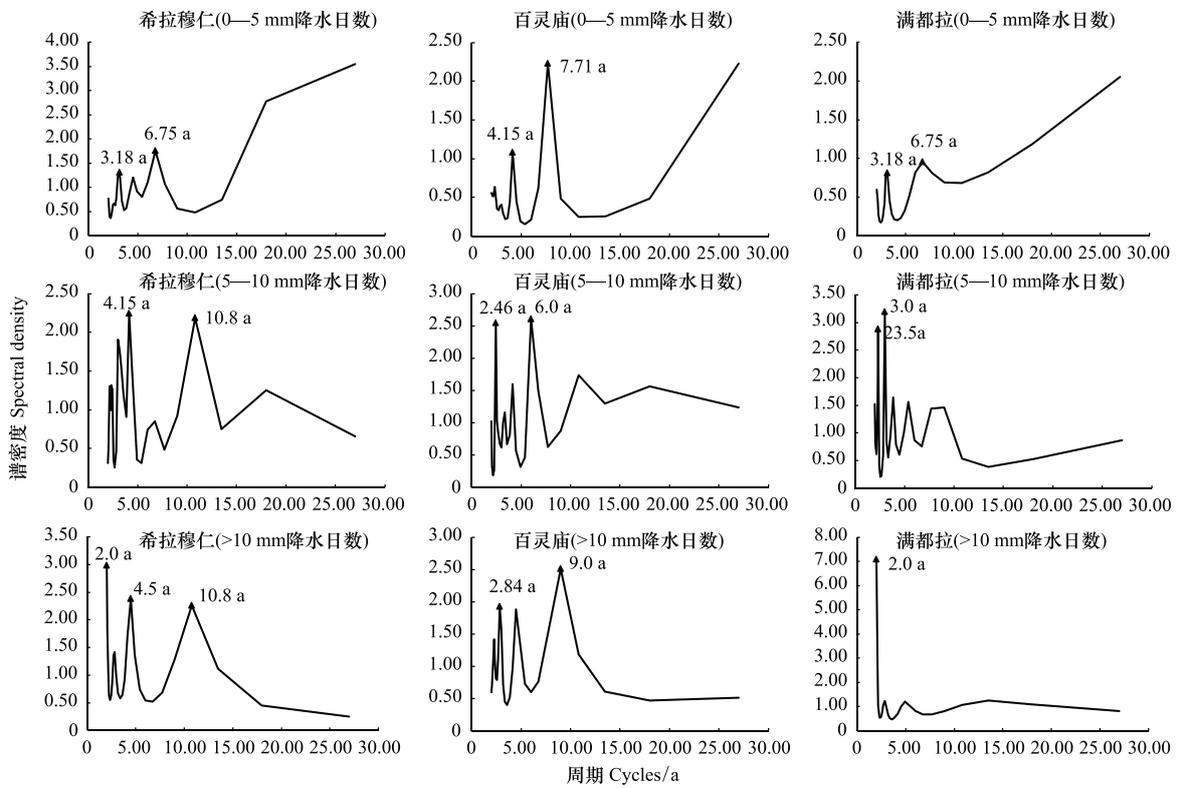


图 10 不同降水等级降水日数周期

Fig.10 Cycles of precipitation days of different precipitation levels

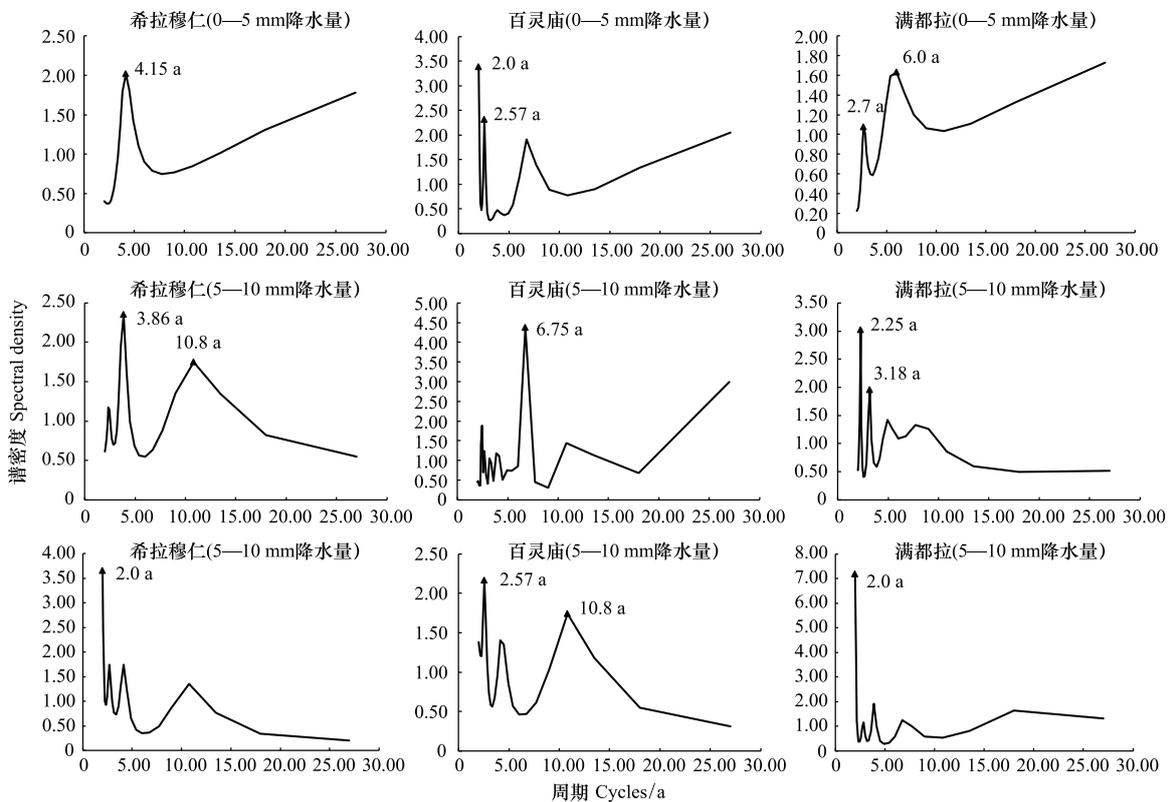


图 11 不同降水等级降水量周期

Fig.11 Cycles of different precipitation levels

表 3 研究区脉动性降水特征分析表

Table 3 Variation characteristics of precipitation in the study area

| 降水事件 Precipitation events | | 希拉穆仁站 Xilamuren Station | 百灵庙站 Bailingmiao Station | 满都拉站 Mandula Station |
|------------------------------|---------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 降水日数 Precipitation days | 全年 | + ,2.84 a* 4.92 a | ++ ,3.86 a* | ++ ,3.18 a* |
| | 生长季 | - ,3.0 a* 4.91 a | + ,4.15 a* 7.71 a | + ,3.18 a* |
| | 0—5 mm | + ,3.18 a 6.75 a* | ++ ,4.15 a 7.71 a* | ++ ,3.18 a 6.75 a* |
| | 5—10 mm | - ,4.15 a* 10.8 a | + ,2.46 a 6.0 a* | + ,2.35 a 3.0 a* |
| | >10 mm | + ,2.0 a* 4.5 a 10.8 a | + ,2.84 a 9.0 a* | + ,2.0 a* |
| 降水量 Precipitation | 全年 | + ,2.7 a 4.5 a* | + ,2.84 a 4.5 a* | + ,3.18 a* |
| | 生长季 | + ,2.7 a* 4.15 a | + ,2.7 a* 4.15 a 10.8 a | + ,3.18 a* |
| | 0—5mm | + ,4.15 a* | + ,2.0 a* 2.57 a | ++ ,2.7 a 6.0 a* |
| | 5—10 mm | - ,3.86 a* 10.8 a | + ,6.75 a* | + ,2.25 a* 3.18 a |
| | >10 mm | -2.0 a* | + ,2.57 a* 10.8 a | ++ ,2.0 a* |

“+”表示增加趋势,“-”表示减少趋势,“++”、“--”表示增加或减少趋势在 $\alpha = 0.05$ 水平显著;数值表示降水事件周期,带“*”表示主周期

拉穆仁地区降水量呈下降趋势外,其余均为增加趋势,其中满都拉地区大于 10 mm 降水量增加趋势达到了显著性水平。考虑到大降水事件在干旱半干旱荒漠化地区发挥的重要生态作用^[29],这种大于 10 mm 降水事件的增加趋势将可能对全年降水只有 160.4 mm 的满都拉地区生态格局将产生关键性影响。

从不同降水量地区来看,在年降水量相对较少的百灵庙和满都拉地区,不论是各降水等级的降水日数还是降水量均呈增加趋势,这是研究区脉动性降水事件的又一显著特征,这也支持并印证了 Song 等^[3]关于达尔罕茂明安联合旗 2000—2011 年间植被盖度向西北方向偏移的观点。而在年降水量相对较大的希拉穆仁地区,尽管年降水量呈现出上升趋势,但内部降水结构却发生了转变。具体来说,0—5 mm 小降水事件降水日数和降水量呈增加趋势,而 5—10 mm 和大于 10 mm 降水事件降水日数和降水量却出现不同程度减少,其中降水量均呈现出下降趋势。这种由大、中降水事件向小降水事件转化所带来的降水结构变化及其生态效应值得进一步关注。

从降水事件周期来看,研究区全年和生长季降水日数和降水量周期都较短促^[30],主周期在 2.84—4.5a 左右,不同雨量带差异不明显。从不同等级的降水事件来看,总体上呈降水等级越高周期越短的趋势,符合干旱半干旱地区降水等级越高波动性越强的整体规律。

4 结论

借助位于研究区不同雨量带内的三个气象观测站,本研究利用 1960—2013 年日值降水数据对比分析了研究区不同雨量带地区降水格局及其时空变化特征。主要结论如下:

(1) 总体来看,随着多年平均降水量减小,研究区降水日数和降水量波动性逐渐增强;此外,降水量的波动程度要明显强于降水日数,即降水量较降水日数具有更强的时空变异性。

(2) 研究区 0—5 mm、5—10 mm 和大于 10mm 降水日数所占的比例分别为 77%—80.9%,11.5%—12.2%,和 7.6%—10.9%;0—5 mm、5—10 mm 和大于 10 mm 降水量所占的比例分别为 25.2%—32.2%,21.9%—25.4%,和 42.4%—52.9%。当研究区发生降水事件时,0—5 mm、5—10 mm 和大于 10 mm 日均降水量分别为 1.2—1.3 mm/d、7.0—7.1 mm/d、17.8—19.2 mm/d,具有明显的两极分化特征。荒漠草原年际降水量剧烈波动的主要原因是大降水事件降水量的年际变化。

(3) 从年降水和生长季降水总体变化趋势来看,研究区不同雨量带不同降水等级降水日数和降水量普遍呈增加趋势,其中,0—5 mm 小降水事件的明显增加是研究区荒漠草原地区 1960—2013 年脉动性降水一大主要特征。

(4) 从不同降水量地区来看,在年降水量相对较少的百灵庙和满都拉地区,各等级降水事件降水日数和

降水量均呈增加趋势,这是研究区降水事件时空变化的又一显著特征。而在年降水量相对较大的希拉穆仁地区,尽管年降水量仍呈现增加趋势,却发生了由大、中降水事件向小降水事件转移的内部降水结构变化。

(5)研究区全年和生长季降水日数和降水量主周期在 2.84—4.5 a 左右,不同雨量带差异不明显。从不同等级的降水事件来看,总体上呈降水等级越高周期越短的趋势。

参考文献 (References):

- [1] 方精云. 我国草原牧区呼唤新的草业发展模式. 科学通报, 2016, 61(2): 137-138.
- [2] 沈海花, 朱言坤, 赵霞, 耿晓庆, 高树琴, 方精云. 中国草地资源的现状分析. 科学通报, 2016, 61(2): 139-154.
- [3] Song Y F, Guo Z X, Lu Y J, Yan D H, Liao Z I, Liu H W, Cui Y J. Pixel-level spatiotemporal analyses of vegetation fractional coverage variation and its influential factors in a desert steppe: a case study in Inner Mongolia, China. *Water*, 2017, 9(7): 478.
- [4] Liu T, Xu Z Z, Hou Y H, Zhou G S. Effects of warming and changing precipitation rates on soil respiration over two years in a desert steppe of northern China. *Plant and Soil*, 2016, 400(1/-2): 15-27.
- [5] Ait-Mesbah S, Dufresne J L, Cheruy F, Hourdin F. The role of thermal inertia in the representation of mean and diurnal range of surface temperature in semiarid and arid regions. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(18): 7572-7580.
- [6] Sala O E, Gherardi L A, Peters D P C. Enhanced precipitation variability effects on water losses and ecosystem functioning: differential response of arid and mesic regions. *Climatic Change*, 2015, 131(2): 213-227.
- [7] Lewandrowski W, Erickson T E, Dixon K W, Stevens J C. Increasing the germination envelope under water stress improves seedling emergence in two dominant grass species across different pulse rainfall events. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 54(3): 997-1007.
- [8] Fan Y, Li X Y, Wu X C, Li L, Li W, Huang Y M. Divergent responses of vegetation aboveground net primary productivity to rainfall pulses in the Inner Mongolian Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 2016, 129: 1-8.
- [9] Noy-Meir I. Desert ecosystems: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 25-51.
- [10] Sala O E, Lauenroth W K. Small rainfall events: An ecological role in semiarid regions. *Oecologia*, 1982, 53(3): 301-304.
- [11] 赵文智, 刘鹤. 干旱、半干旱环境降水脉动对生态系统的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 243-249.
- [12] Gao R R, Yang X J, Liu G F, Huang Z Y, Walck J L. Effects of rainfall pattern on the growth and fecundity of a dominant dune annual in a semi-arid ecosystem. *Plant and Soil*, 2015, 389(1/-2): 335-347.
- [13] Loik M E, Breshears D D, Lauenroth W K, Belnap J. A multi-scale perspective of water pulses in dryland ecosystems: climatology and ecohydrology of the western USA. *Oecologia*, 2004, 141(2): 269-281.
- [14] Liu L X, Zhao X Y, Meng Q L, Zhao H, Lu X Q, Gao J K, Chang X L. Annual precipitation fluctuation and spatial differentiation characteristics of the Horqin Region. *Sustainability*, 2017, 9(1): 111.
- [15] Sala O E, Lauenroth W K. Small rainfall events: an ecological role in semiarid regions. *Oecologia*, 1982, 53(3): 301-304.
- [16] 陈军, 王玉辉. 1956-2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局. *生态学报*, 2012, 32(22): 6925-6935.
- [17] 马宁, 王乃昂, 赵力强, 张振瑜, 董春雨, 沈士平. 巴丹吉林沙漠腹地降水事件后的沙山蒸发观测. *科学通报*, 2014, 59(7): 615-622.
- [18] Andrés P, Moore J C, Cotrufo F, Deneff K, Haddix M L, Molowny-Horas R, Riba M, Wall D H. Grazing and edaphic properties mediate soil biotic response to altered precipitation patterns in a semiarid prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 113: 263-274.
- [19] 宋一凡, 郭中小, 卢亚静, 廖梓龙, 徐晓民. 一种基于 SWAT 模型的干旱牧区生态脆弱性评价方法--以艾布盖河流域为例. *生态学报*, 2017, 37(11): 3805-3815.
- [20] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, Leffler A J, Ogle K, Pockman W T, Sandquist D R, Potts D L, Schwinning S. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 254-268.
- [21] Cheng X L, An S Q, Li B, Chen J Q, Lin G H, Liu Y H, Luo Y Q, Liu S R. Summer rain pulse size and rainwater uptake by three dominant desert plants in a desertified grassland ecosystem in northwestern China. *Plant Ecology*, 2006, 184(1): 1-12.
- [22] Schwinning S, Sala O E. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 211-220.
- [23] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999.
- [24] Odum E P. *Ecology: A Bridge Between Science and Society*. 3rd ed. Sunderland: Sinauer Associates, 1997.
- [25] 战云健, 任国玉, 任玉玉, 李娇. 1951-2009 年东亚地区日降水趋势特征分析. *气候与环境研究*, 2013, 18(6): 767-780.
- [26] Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L. *Climate Change 2007: the Physical Science Basis*. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [27] Hao Y B, Kang X M, Cui X Y, Ding K, Wang Y F, Zhou X Q. Verification of a threshold concept of ecologically effective precipitation pulse: from plant individuals to ecosystem. *Ecological Informatics*, 2012, 12: 23-30.
- [28] Liu Z, Zhang Y Q, Fa K Y, Qin S G, She W W. Rainfall pulses modify soil carbon emission in a semiarid desert. *CATENA*, 2017, 155: 147-155.
- [29] Heisler-White J L, Knapp A K, Kelly E F. Increasing precipitation event size increases aboveground net primary productivity in a semi-arid grassland. *Oecologia*, 2008, 158(1): 129-140.
- [30] 鱼京善, 王国强, 刘昌明. 基于 GIS 系统和最大熵谱原理的降水周期分析方法. *气象科学*, 2004, 24(3): 277-284.