

# Fundamental Climatic Characteristics of Rainfall Events of Different Intensities over the Badanjara Desert's Southwestern Border Area

Wanyuan Li<sup>1\*</sup>, Guangzhou Fan<sup>2</sup>, Yueqing Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu

<sup>2</sup>Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

<sup>3</sup>Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu Sichuan  
Email: \*ywl@lzb.ac.cn

Received: Nov. 26<sup>th</sup>, 2018; accepted: Dec. 4<sup>th</sup>, 2018; published: Dec. 11<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Through analysis on the rainfall intensity, frequency and its spatial scale, together with the precipitation amount, over the Badanjara Desert's southwestern border area, the following results have been disclosed: 1) Each intensity grade of rainfall events happen most frequently (infrequently) and the precipitation amount resulting from them reaches the maximum (minimum) in summer (winter), with their frequency and amount in spring being both equivalent to those in autumn; Each season is always seeing a less frequency of heavier rainfall events; In winter the precipitation amount due to heavier rainfall events is always smaller, but in spring, summer and autumn, that due to rainfall events up to the Chinese traditionally-determined middle intensity grade (10.1 - 17 mm·day<sup>-1</sup>) always reaches the largest of all. 2) In each season, rainfall events of each intensity grade happen more frequently and the precipitation amount due to them becomes larger at higher places, and especially in warmer seasons, heavy (light) rainfall events make a larger (smaller) contribution over there. 3) In each season the rainfall events on a larger spatial scale often happen more infrequently; The rainfall events on each scale occur most frequently (infrequently) in summer (winter), and their frequency in spring is equivalent to that in autumn; The larger-scale (smaller-scale) rainfall events are more ready to happen in summer (winter and spring); On average, the rainfall spatial scale reaches the largest (smallest) in summer (winter) and it is larger in autumn than in spring. 4) The higher place is always more ready to become the rainfall center in each season, for example, Minle, as the highest station, is much more possible to act as that center. 5) The rainfall event whose center sees a higher grade of intensity always has a larger spatial scale in each season, however, the large-scale and high-intensity-grade events seldom occur, and especially winter can mainly see light rainfall events.

\*通讯作者。

## Keywords

Rainfall Intensity, Rainfall Frequency, Precipitation Amount, Rainfall Spatial Scale, Seasonality

# 巴丹吉林沙漠西南缘不同强度降水的基本气候特征

李万元<sup>1\*</sup>, 范广州<sup>2</sup>, 李跃清<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院寒区旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州

<sup>2</sup>成都信息工程学院高原大气与环境四川省重点实验室, 成都

<sup>3</sup>中国气象局成都高原气象研究所, 成都

Email: ywl@lzb.ac.cn

收稿日期: 2018年11月26日; 录用日期: 2018年12月4日; 发布日期: 2018年12月11日

## 摘要

经分析巴丹吉林沙漠西南缘降水的强度、雨量、频次及空间尺度, 发现: 1) 夏(冬)季各级强度降水发生最多(少)、雨量最大(小), 春、秋季相当; 各季都是越强的降水越少发生; 冬季较强降水所致雨量总是较小, 其余三季都是中雨所致雨量最大; 2) 各季各级强度降水的雨量和频次都随海拔升高而增加, 尤其在暖季, 海拔越高, 较强(弱)降水的贡献越大(小)。3) 各季都是尺度越大的降水越少发生; 所有尺度的降水都以夏季最多, 冬季最少, 春、秋季相当; 尺度较大(小)的降水在夏(冬、春)季的配额较大; 平均而言, 夏季降水的空间尺度最大, 秋季次之, 冬季最小。4) 在任何季节, 海拔越高的地方越易成为降水中心, 相对而言, 民乐在各季成为降水中心的可能性远高于其它测站。5) 四季都是降水中心强度越大其空间尺度也越大, 但大尺度强降水很少发生, 冬季更是以弱降水为主。

## 关键词

降水强度, 降水频次, 雨量, 降水空间尺度, 季节变化

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

鉴于巴丹吉林沙漠特殊的地理位置(位于世界最大的中纬度干旱半干旱区——我国西北干旱半干旱区——东部、东亚季风区西北边缘, 及青藏高原和祁连山东北侧[1] [2])、地形地貌和周围环境(高大沙山与沙漠湖泊并存[3] [4]), 及其在我国干旱与季风气候形成和演变中的重要作用(作为我国第二大沙漠, 其强感热输送是我国西北干旱气候形成的重要因子, 同时也强烈影响着我国乃至东亚季风系统的变异

[5]-[12]),与其在干旱区水资源研究方面的重要价值(沙漠湖泊的水源早已受到全球关注[13]-[18]),文献[19][20]已基于现有历史资料,对其周边地区降水频次和雨量(降水是表征气候的重要参数,也是地下水和沙漠湖泊的重要水源,对全球气候变化极为敏感[21]-[27])的时空变化特征进行了较为详细的分析。

一般而言,不同时空尺度的云雨天气系统会导致不同强度的降水,而不同强度的降水是由不同性质的云雨天气过程或系统所致;云雨天气系统通常会在时空尺度及水汽来源上表现出明显的季节性差异,这就会导致不同强度降水的频次和雨量表现出各不相同的空间差异和季节性变化:例如,暴雨一般由强对流天气过程导致,大多发生在夏季,而小雨(雪)却不需要很强的对流系统激发[28][29][30][31]。降水的这种季节性变化可在某种程度上直接或间接地反映出云雨天气系统及局地乃至整个大气环流系统的变化。为此,本文将利用搜集到的有限降水资料(由甘肃省气象局和中国气象科学数据共享服务网提供),详细分析巴丹吉林沙漠西南缘8个测站(图1)在1951~2005年间(某些测站某些年份的资料有所缺失,表1)各季各级强度降水的雨量和频次,以期深入理解该区域不同强度降水在不同季节的分配情况及其空间差异和影响因子,并试图据此把握导致该区域降水的主要天气系统在不同季节间的演变,最终为理解巴丹吉林沙漠周边降水气候对全球气候变化的响应提供依据。

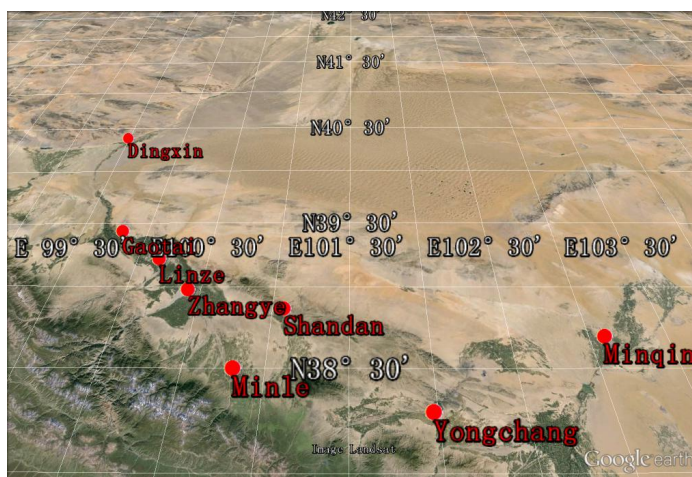


Figure 1. Selected gauge stations over the Badanjilin Desert's southwestern border area  
图1. 巴丹吉林沙漠西南缘的站点分布

Table 1. Beginning year of the precipitation data at each selected gauge station

表1. 所选测站降水资料的起始年份

测站	鼎新	临泽	民乐	永昌	高台	张掖	山丹	民勤
起始年份	1955	1967	1958	1959	1953	1951	1953	1953

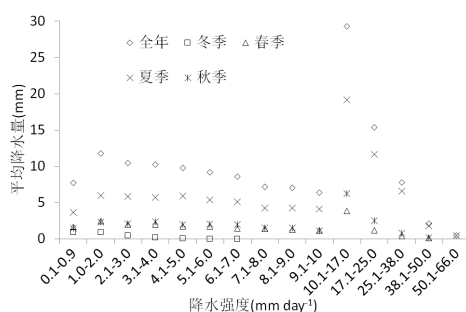
气象学上常用日降水量定义降水强度[32][33][34],强度为 $0.1\sim 5\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ 的降水为小雨, $5.1\sim 10\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ 为“小到中雨”, $10.1\sim 17\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ 为中雨, $17.1\sim 25\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ 为“中到大雨”, $25.1\sim 38\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ 为大雨, $38.1\sim 50\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ 为“大到暴雨”, $50\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ 以上为暴雨。就巴丹吉林沙漠西南缘各站的日降水量而言,只有民乐95%的分位点超过 $17\text{ mm}$ ,各站各季大部分降水强度都在 $10\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ 以下,中雨以上(特别是“大到暴雨”)很少发生[19][20]。以下将降水强度划分为15个等级: $0.1\sim 0.9$ 、 $1\sim 2$ 、 $2.1\sim 3$ 、 $3.1\sim 4$ 、 $4.1\sim 5$ 、 $5.1\sim 6$ 、 $6.1\sim 7$ 、 $7.1\sim 8$ 、 $8.1\sim 9$ 、 $9.1\sim 10$ 、 $10.1\sim 17$ 、 $17.1\sim 25$ 、 $25.1\sim 38$ 、 $38.1\sim 50$ 、 $50.1\sim 66\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ ,特别将 $0.1\sim 0.9\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ 的小雨称为弱降水;降水日可视为降水事件,故降水频次即为降水日数[31][32][33][34][35]。

## 2. 分析和讨论

### 2.1. 不同强度降水的季节和空间变化

#### 2.1.1. 不同强度降水量的季节和空间变化

不同季节出现的主要天气过程不同, 不同性质的天气过程和云雨系统在同一季节出现的概率也各不相同[36]。图 2 给出巴丹吉林沙漠西南缘各季和全年各级强度降水所致的平均雨量, 下称各级雨量(降水量)。显然, 各级雨量均以夏季最大, 冬季最小, 春、秋季相当(其中小雨和“小到中雨”, 以及大雨及以上各级雨量春、秋季基本相等, 秋季中雨和“中到大雨”共比春季大 3 mm 以上), 夏季各级雨量多或远多于其它三季之和, 尤以中雨及以上各级雨量最为明显; 中雨以下各级雨量在夏季基本都维持在 5 mm 左右, 在春、秋季都维持在 1.1~2.4 mm 之间, 夏季中雨、“中到大雨”和大雨雨量均超过其它各级雨量, 分别达到 19.2, 11.6 和 6.6 mm, 秋、春季的中雨量也明显高于其它各级, 分别为 6.2 和 3.9 mm, 这使全年中雨和“中到大雨”分别多达 29.3 和 15.3 mm; 冬季只有弱降水所致雨量在 1 mm 以上, 其余各级均未达到 1 mm, 且明显有强度越强雨量越小的趋势; 除冬季外, 弱降水量均小于  $1\sim 2\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  的小雨量, 这使春、夏、秋季及全年中雨以下的雨量在  $1\sim 2\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  处达到极大, 强度在弱降水以上、中雨以下的降水强度越强雨量越小, 中雨以上降水也是强度越强雨量越小。



**Figure 2.** Spatially-averaged seasonal and annual precipitation amounts due to each intensity-grade of rainfall events over the Badanjilin Desert's southwestern border area

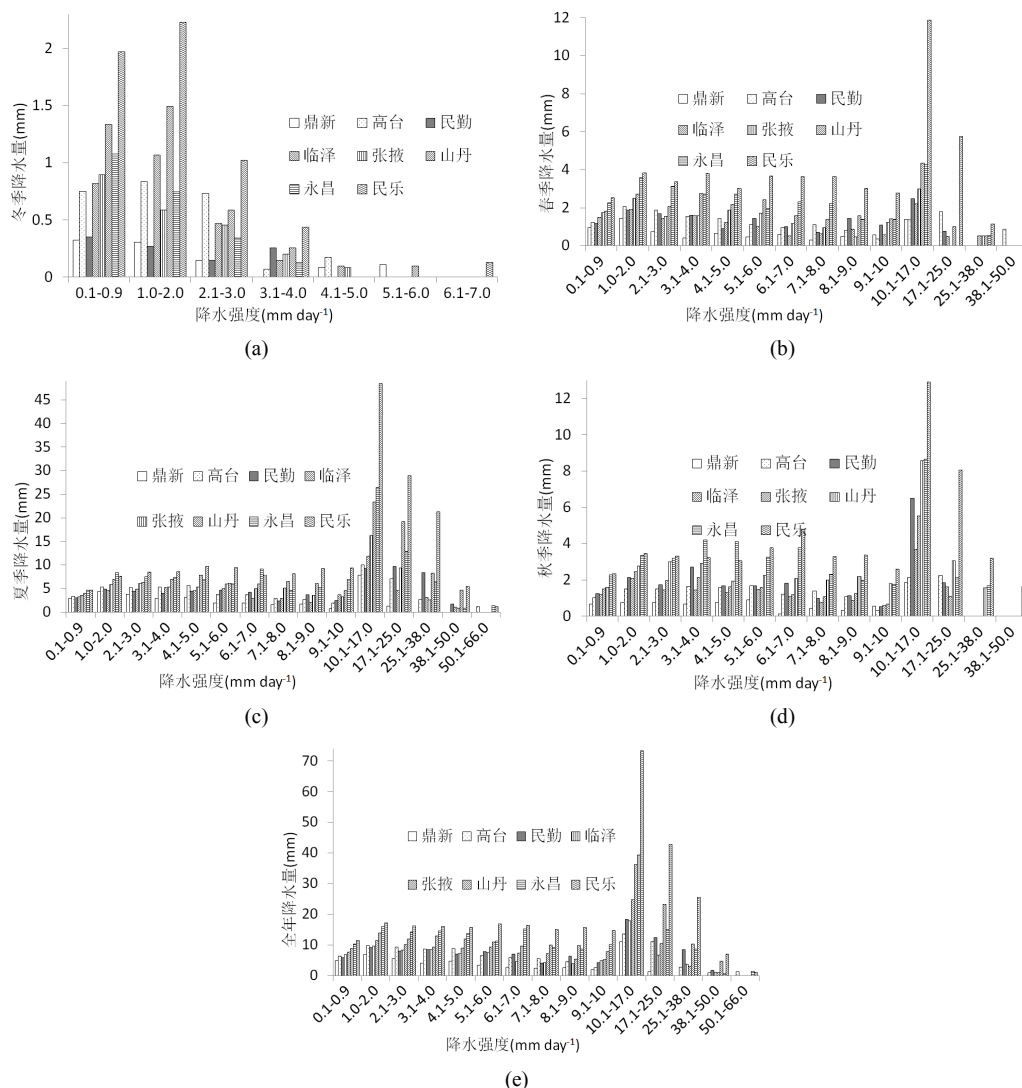
**图 2.** 巴丹吉林沙漠西南缘各季及全年各级强度降水所致平均雨量

为了揭示地形高度对降水量的影响, 图 3(a)~(e)给出各季和全年各站的各级雨量, 很明显, 除冬季强度在  $4\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  以上的雨量外, 各季各级雨量都随海拔升高而升高, 足见地形抬升对该区域各季各级降水过程的重要作用; 夏季中雨雨量由最低处鼎新的  $7.9\text{ mm}$  升高到最高处民乐的  $48.5\text{ mm}$ , 从最低处到最高处, 春、秋季的中雨雨量也分别升高  $10\text{ mm}$  以上。

#### 2.1.2. 不同强度降水频次的季节和空间变化

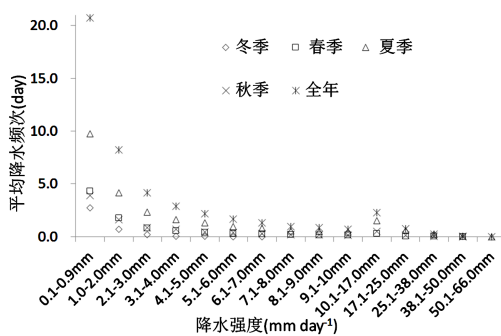
图 4 给出巴丹吉林沙漠西南缘各季和全年各级强度降水的平均频次。显然, 该区域各级降水都在夏季频次最高, 冬季最低, 春、秋季相当; 各季都以弱降水最为频发, 夏、春、秋、冬季分别约为  $9.7$ 、 $4.3$ 、 $3.9$ 、 $2.7\text{ day}$ , 冬(春、秋季和夏季)季强度在  $1\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  ( $2\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  和  $5\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ ) 以上的各级降水均不超过  $1\text{ day}$ ; 四季降水频次都随降水强度增加而减小, 夏、春、秋季均在中雨处出现极大值, 但都未超出  $1.5\text{ day}$ ; 全年降水频次也明显随强度增加而下降, 中雨处的极大值为  $2.3\text{ day}$ , 与  $4.1\sim 5\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  处的频次( $2.2\text{ day}$ )相当, 中雨外  $7\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  以上的各级降水均不超过  $1\text{ day}$ 。

为了揭示地形影响, 图 5 给出各季和全年各站的各级降水频次, 很明显, 各季各级降水频次都随海拔升高而升高, 足见海拔升高可使各种强度的降水事件更多发生; 由最低处鼎新到最高处民乐, 各季(全年)弱降水可增多  $3.6\sim 4.6\text{ day}$  (近  $12\text{ day}$ ), 夏季中雨可增多  $2.9\text{ day}$  ( $4.5\text{ day}$ )。



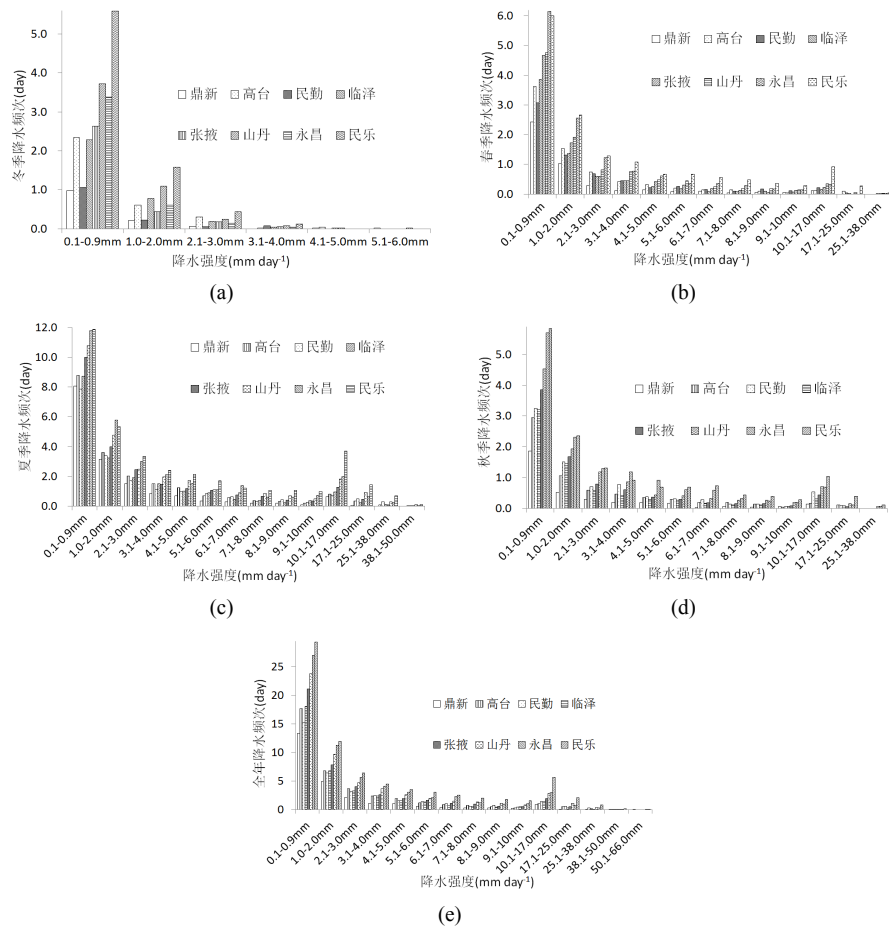
**Figure 3.** The seasonal and annual precipitation amounts due to each intensity-grade of rainfall events at each station: (a) winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn; (e) annual (Stations are horizontally lined in the order from the lowest to highest altitude)

**图 3.** 巴丹吉林沙漠西南缘各站各季及全年各级强度降水所致雨量: (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季; (e) 全年(测站依海拔从低到高顺序排列)



**Figure 4.** Spatially-averaged seasonal and annual frequencies of rainfall events of each intensity-grade over the Badanjara Desert's southwestern border area

**图 4.** 巴丹吉林沙漠西南缘各季及全年各级强度降水的平均频次



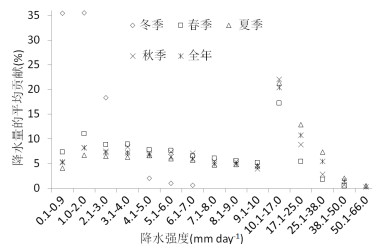
**Figure 5.** Seasonal and annual frequencies of rainfall events of each intensity-grade at each station: (a) winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn; (e) annual (Stations are lined in the order from the lowest to highest altitude)

**图 5.** 巴丹吉林沙漠西南缘各站各季及全年各级强度降水的发生频次: (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季; (e) 全年(测站依海拔从低到高顺序排列)

## 2.2. 不同强度降水的贡献

### 2.2.1. 不同强度降水对总雨量的贡献

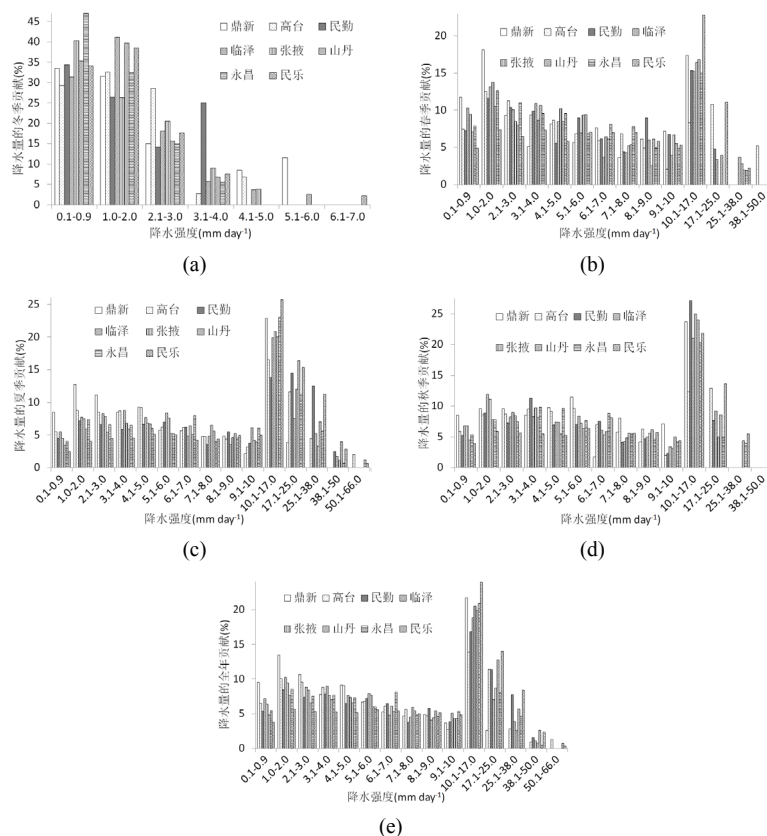
各季总降水都是由不同强度的降水累加而成; 由于各季导致降水的主要天气系统, 以及各种天气系统出现的几率都极不相同, 不同强度降水对同季雨量的贡献, 以及同强度降水对不同季雨量的贡献都各不相同。图 6 给出巴丹吉林沙漠西南缘各级强度降水对各季和全年总雨量的平均贡献。显然, 各级强度降水对春、夏、秋季雨量的贡献最为接近, 最大相差不超过 8%, 其中秋季贡献大多居于春、夏季之间, 强度在中雨以下的降水对夏季贡献小于对春、秋季的贡献, 而中雨及以上降水对夏季贡献则明显高于对秋、春季的贡献; 在所有强度级别中, 中雨对春、夏、秋季的贡献最大(分别达 17.2%、21.3%和 22%), “中到大雨”对夏季的贡献次之(约 12.9%), 再其次就是 1~2 mm·day<sup>-1</sup> 的小雨对春季的贡献约为 11.1%, 中雨以下各级降水对春、夏、秋季的贡献大多在 5%~10%之间, 大雨对春、秋季的贡献以及“大到暴雨”和暴雨对各季的贡献都在 3%以下; 中雨以下降水对春、夏、秋季的贡献在 1~2 mm·day<sup>-1</sup> 处达到极大值, 2 mm·day<sup>-1</sup> 以上中雨以下降水越强对春、夏、秋季贡献越小; 对于冬季, 降水越强, 贡献越小, 约 70% 的雨源于强度不超过 2 mm·day<sup>-1</sup> 的弱、小降水, 强度在 4 mm·day<sup>-1</sup> 以上的降水贡献还不到 4%; 各级降水对年降水量与对秋季(春、夏季)的贡献基本完全相同(一致), 足见该区域暖季降水之重要(图 6)。



**Figure 6.** Spatially-averaged seasonal and annual contribution to the total precipitation amount of each intensity-grade of rainfall events over the Badanjaran Desert's southwestern border area

**图 6.** 巴丹吉林沙漠西南缘各季及全年各级强度降水对总雨量的平均贡献

各级降水对各季和年雨量的贡献在测站间也有所不同，差别有时可达 15% 以上；冬季弱降水的贡献似随海拔升高而增大，4~6 mm·day<sup>-1</sup> 小雨的贡献似随海拔升高而减小(图 7(a))；3 mm·day<sup>-1</sup> (5 mm·day<sup>-1</sup>) 以下的小雨对春、秋(夏)季的贡献随海拔升高而降低，9~38 mm·day<sup>-1</sup> (7~8、7~10 mm·day<sup>-1</sup>) 的降水对夏季(春、秋季)的贡献随海拔升高而升高(图 7(b)~(d))；对年雨量而言，随海拔升高，小雨(5 mm·day<sup>-1</sup> 以下)贡献显有降低，而 9~50 mm·day<sup>-1</sup> (从“小到中雨”到“大到暴雨”)降水的贡献则趋于升高，这就是说，地形会明显影响某些强度降水对总雨量的贡献，一般而言，海拔越高，小雨贡献越小，较强降水的贡献越大(图 7(b)~(e))。

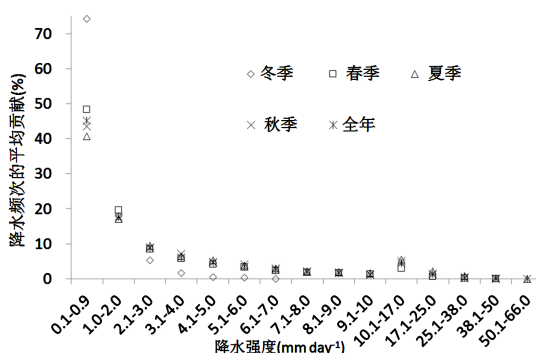


**Figure 7.** Seasonal and annual contribution to the total precipitation amount of each intensity-grade of rainfall events at each gauge station: (a) winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn; (e) annual (Stations are lined in the order from the lowest to highest altitude)

**图 7.** 巴丹吉林沙漠西南缘各站各季及全年各级强度降水对雨量的贡献：(a) 冬季；(b) 春季；(c) 夏季；(d) 秋季；(e) 全年(各测站依海拔从低到高排列)

### 2.2.2. 不同强度降水对总频次的贡献

图 8 给出巴丹吉林沙漠西南缘各级强度降水对各季和全年降水总频次的平均贡献。很明显, 各级降水对春、夏、秋季频次的贡献基本完全相同, 只有弱降水( $0.1\sim 0.9\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ )和中雨( $10.1\sim 17\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ )对此三季的贡献差异较大, 但也不超过 8%, 这与各级雨量对此三季的贡献一致; 冬季弱降水频次的贡献远高于其它三季, 差异可达 25%~35%,  $1\sim 2\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  的小雨贡献与其它季节基本无异, 但  $2\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  以上各级降水的贡献都低于其它三季; 各季都是弱降水贡献(冬季 75%以上, 其余三季为 40%~50%)最大, 然后依次是  $1\sim 2$ 、 $2.1\sim 3$  和  $10.1\sim 17\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ ,  $2\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  以上各级降水对四季的贡献都在 10%以下; 四季都是越强的降水贡献越小, 尽管春、夏和秋季在中雨处有一极大值, 但很不明显; 各级降水对全年总频次的贡献和对春、夏、秋季基本完全相同, 再次表明暖季对全年降水贡献之大。总之, 各级降水对各季和全年频次的贡献远不同于对雨量的贡献, 虽然频次和雨量都能表征降水气候, 但似乎前者更着重于描述天气条件, 后者更着重于描述水汽条件, 二者不能相互取代。



**Figure 8.** Spatially-averaged seasonal and annual contribution to the total frequency of each intensity-grade of rainfall events over the Badanjara Desert's southwestern border area

**图 8.** 巴丹吉林沙漠西南缘各季及全年各级强度降水对总频次的平均贡献

各级降水对各季和年频次的贡献在测站间也有所不同, 有时差别可达 15%以上; 冬季  $4\sim 6\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  小雨的贡献似随海拔升高而减小(图 9(a));  $2.1\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  ( $1\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ )以下各级小雨对春、夏(秋季)的贡献随海拔升高而降低,  $3\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  以上( $1\sim 5$ 、 $6\sim 7$  及  $10.1\sim 17\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ )各级降水对春、夏季(秋季)的贡献均随海拔升高而升高(图 9(b)~(d)); 对年总频次而言, 随海拔升高,  $2.1\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  以下小雨的贡献显有降低, 而  $3\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  以上各级降水的贡献均趋于升高, 可见, 和对雨量的贡献一致, 地形也会影响某些强度降水对总频次的贡献, 一般而言, 海拔越高, 小雨贡献越小, 较强降水的贡献越大(图 9(b)~(e))。

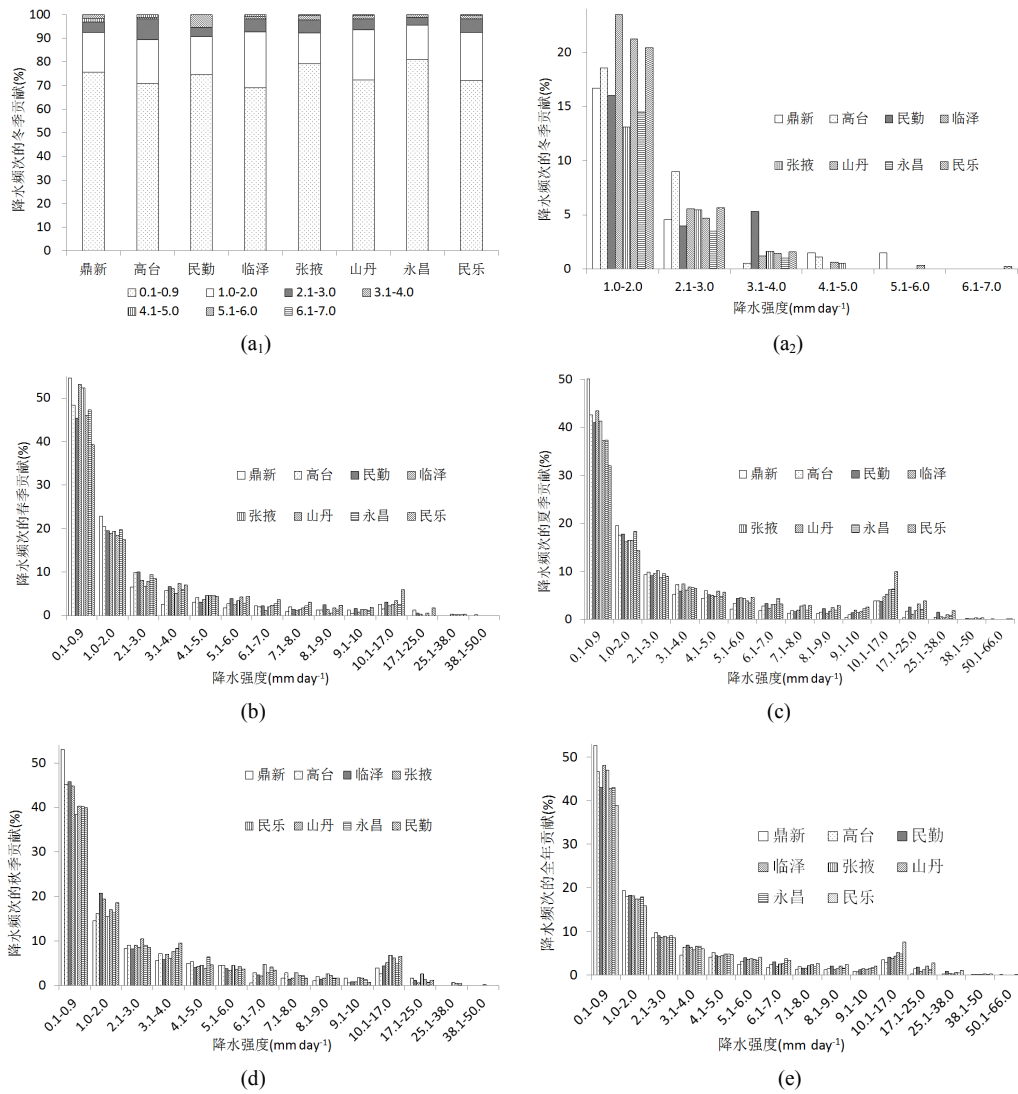
## 2.3. 不同强度降水的季节配额

### 2.3.1. 不同强度降水所致雨量的季节配额

就全区平均而言, 与年降水量的季节配额一致[19] [20], 巴丹吉林沙漠西南缘各级降水所致雨量都以夏季配额最大(各级基本都在 50%以上), 冬季最小(弱降水外, 各级配额均在 10%以下), 春、秋季基本相当(中雨及以下各级配额都维持在 20%左右); 夏季配额明显随降水强度增大而增大, 冬季相反, 随强度增大而减小, 说明较强降水发生在夏(冬季)的可能性更大(小), 强度在“中到大雨”以上的降水基本都发生在夏季, 其配额均在 70%以上(图 10)。

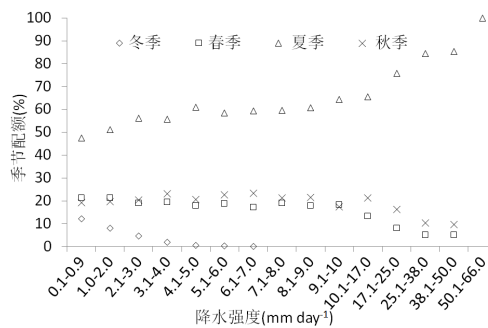
各站各级降水量的季节配额均与区域平均一致: 随着降水强度增大, 冬季配额明显减小, 夏季配额明显增大; 各季各级降水量配额在不同测站间有所不同, 差距有时可达 10%~20%左右; 同总降水量一致[19] [20], 地形高度对各级降水量的季节配额也无规律性影响(图 11(a)~(d))。





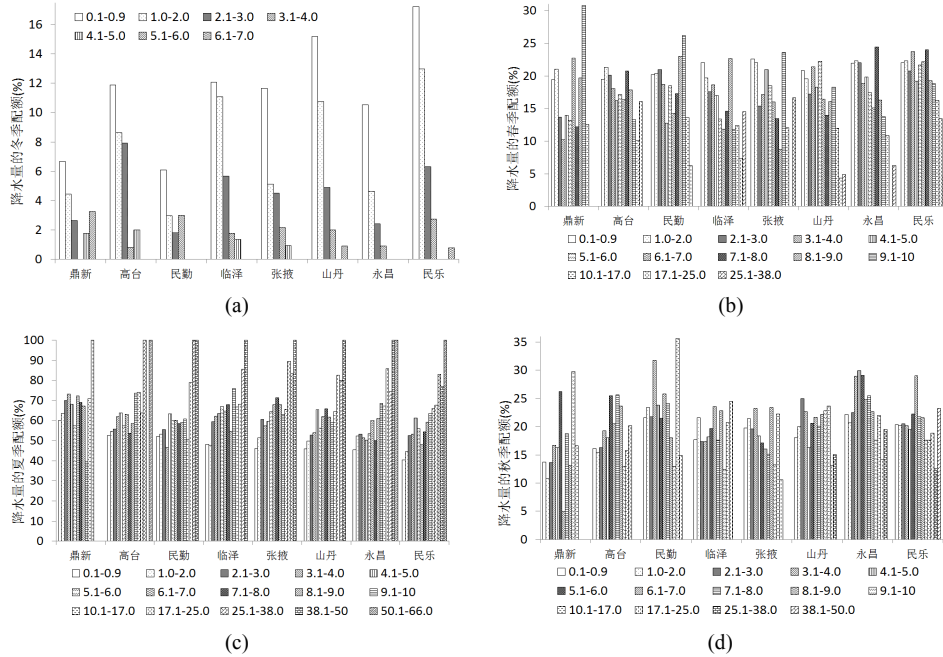
**Figure 9.** Seasonal and annual contribution to the total frequency of each intensity-grade of rainfall events at each gauge station: (a<sub>1-2</sub>) winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn; (e) annual (Stations are lined in the order from the lowest to highest altitude)

**图 9.** 巴丹吉林沙漠西南缘各站各季及全年各级强度降水对总频次的贡献: (a<sub>1-2</sub>) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季; (e) 全年(各测站依海拔从低到高排列)



**Figure 10.** Spatially-averaged seasonal percentages among the annual total precipitation amount due to each intensity-grade of rainfall events over the Badanjara Desert's southwestern border area

**图 10.** 巴丹吉林沙漠西南缘各级强度降水所致雨量的平均季节配额

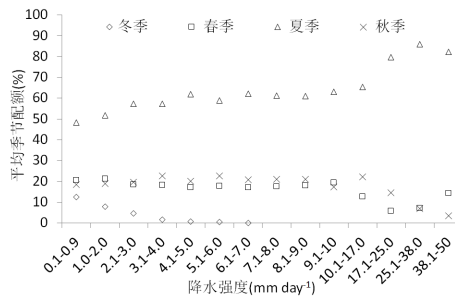


**Figure 11.** Seasonal percentages among the annual total precipitation amount due to each intensity-grade of rainfall events at each station: (a) winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn (Stations are lined horizontally in the order from the lowest to highest altitude)

**图 11.** 巴丹吉林沙漠西南缘各站各级强度降水量的季节配额: (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季(测站依海拔从低到高排列)

**2.3.2. 不同强度降水频次的季节配额**

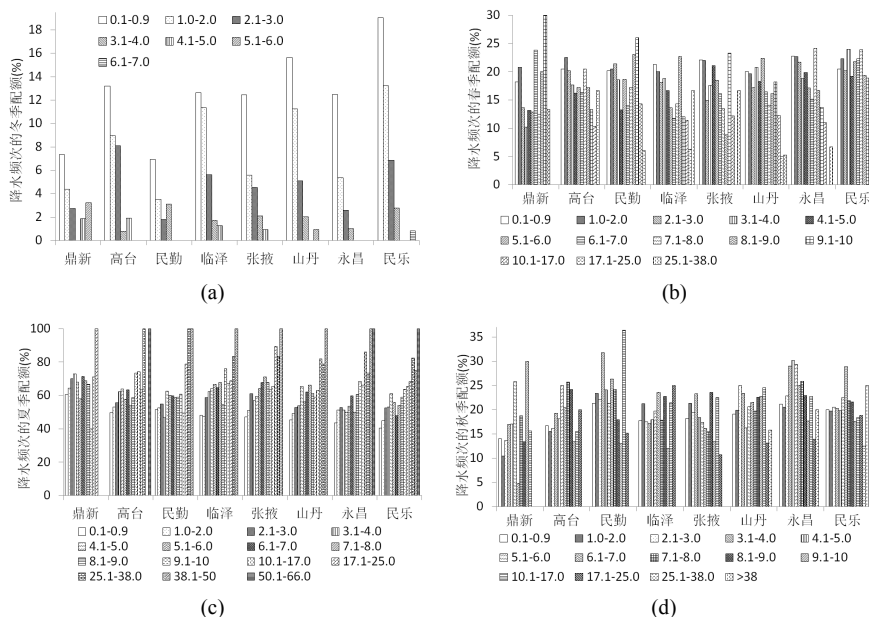
与各级降水量的季节配额一致, 巴丹吉林沙漠西南缘各级降水频次也都以夏季配额最大(弱降水配额稍低外, 各级都在 50%以上), 冬季最小(弱降水略高外, 各级配额均在 10%以下), 春、秋季基本相当(中雨及以下各级配额都维持在 20%左右, 中雨和“中到大雨”的秋季配额约比春季高 10%); 降水强度越大夏季配额越大, 冬季配额越小, 可见较强降水发生在夏季的可能性更大, 发生在冬季的可能性更小, 且前者远大于后者, 强度在“中到大雨”以上的降水基本都发生在夏季(图 12)。



**Figure 12.** Spatially-averaged seasonal percentages among the annual total frequency of each intensity-grade of rainfall events over the Badanjara Desert’s southwestern border area

**图 12.** 巴丹吉林沙漠西南缘各级强度降水频次的平均季节配额

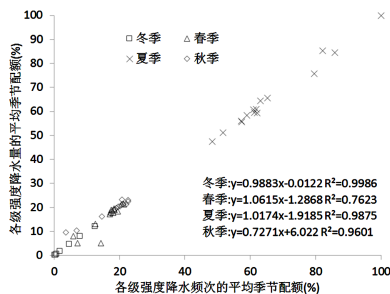
各站各级降水频次的季节配额均与区域平均一致: 降水越强, 冬季配额越小, 夏季配额越大; 各级降水频次的各季配额在不同测站间的差距有时可达 10%以上; 同降水量一样, 地形高度对各级降水频次的季节配额也无规律性影响(图 13(a)~(d))。



**Figure 13.** Seasonal percentages among the annual total frequency of each intensity-grade of rainfall events at each station: (a) winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn (Stations are horizontally lined in the order from the lowest to highest altitude)

**图 13.** 巴丹吉林沙漠西南缘各站不同强度降水频次的季节配额: (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季(测站依海拔从低到高排列)

为了验证降水频次和雨量在季节配额上的一致性,图 14 给出各级降水频次和雨量在各季配额间的对比情况。就总体平均而言,无论何种强度的降水,其频次在各季的配额基本相当于雨量配额,夏季配额远远大于其余季节配额;只是在春、秋季频次和雨量的配额出现了较为明显的不一致,这主要由大雨和“大到暴雨”所致,在春季它们的频次配额明显较大,在秋季则是其雨量配额较大。

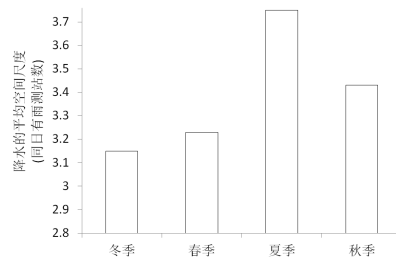


**Figure 14.** Comparison of the spatially-averaged seasonal percentage among the annual total frequency against that among the annual total precipitation amount due to each intensity-grade of rainfall events over the Badanjara Desert's southwestern border area

**图 14.** 巴丹吉林沙漠西南缘各级强度降水的频次和雨量在各季平均配额间的对比

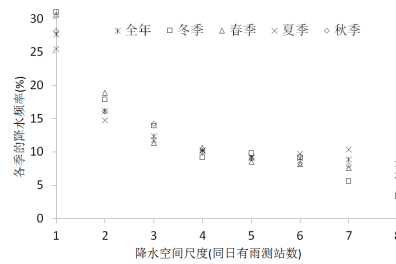
## 2.4. 降水范围(空间尺度)及其季节变化

不同天气系统导致的降水范围一般不同。限于资料,以下假设同日有雨的测站属于同一天气系统,并将同日有雨测站的总数定义为由当日天气系统导致的降水范围(空间尺度)。降水的季节性变化不仅表现在降水量和降水频次上,降水范围也有一定的季节性变化。由图 15 可知,巴丹吉林沙漠西南缘夏季降水的平均空间尺度最大,秋季次之,冬季最小,这应与各季导致该区域降水的主要天气系统的空间尺度有关。



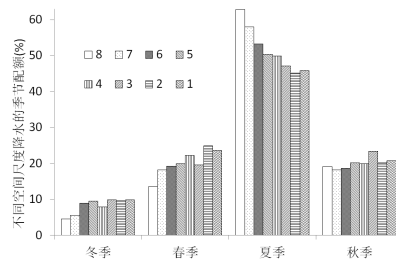
**Figure 15.** Seasonality of the rainfall event's average spatial scale (measured by the average number of stations having encountered rainfall on the same day) over the Badanjara Desert's southwestern border area  
**图 15.** 巴丹吉林沙漠西南缘各季降水的平均空间尺度(由同日降水测站数表征)

图 16 给出各季不同空间尺度降水频次的多年平均比重, 因是多年平均, 且样本数(即降水日数, 春、夏、秋和冬季分别为 1162、2701、1107 和 480)足够多, 故可视为各季发生各种尺度降水的相对可能性(相对于降水日而言)。显然, 各季都以小范围降水发生的比重或可能性最大, 同日所有测站都有降水的可能性最小, 范围越大的降水发生的可能性越小; 冬季和春季各种尺度降水出现的可能性基本相当; 夏季和秋季, 特别是前者, 较小(大)范围降水发生的频率小(大)于冬、春季, 只有 1 个测站有降水的事件在夏季的比重比在冬、春季约小 5%, 而 8 个测站都有降水的事件在夏季的比重则比冬、春季约大 5%; 全年情况与秋季最为一致, 尺度越大的降水发生频率越小, 降水范围由 4 站增加到 7 站, 其频率基本维持不变。



**Figure 16.** Seasonal or annual variation of the rainfall frequentness with its spatial scale over the Badanjara Desert's southwestern border area  
**图 16.** 巴丹吉林沙漠西南缘各季及全年降水在不同空间尺度上的频率分布

图 17 给出巴丹吉林沙漠西南缘各空间尺度降水的季节配额, 显然, 各种空间尺度的降水在各个季节都会发生, 所有尺度的降水都以夏季配额最大, 冬季最小, 春、秋季相当; 在冬、春季, 尺度越小的降水配额越大, 尺度越大的降水配额越小, 秋季似乎也是如此, 但很不明显; 最明显的是, 在夏季, 尺度越大的降水配额越大, 范围覆盖 8 个测站比仅覆盖 1 个测站的降水在夏季的配额约大 20%。



**Figure 17.** Seasonal percentages among the annual total frequency of rainfall events on each spatial scale (the integer in the legend is the number of stations having encountered rainfall on the same day) over the Badanjara Desert's southwestern border area  
**图 17.** 巴丹吉林沙漠西南缘不同空间尺度(图例中数字表示同日降水测站数)降水的季节配额

## 2.5. 降水中心及其强度的空间和季节变化

### 2.5.1. 降水中心的空间变化

同一天气系统所致降水范围内各地的降水量不尽相同，一是因雨云系统中水分的空间分布不均，二是因各地所处的位置、地形、环境和气候不同，使其对降水天气系统的感应也有所不同；单次降水过程中总是一些地方降水量较大，另一些地方降水量较小，降水量最大的地方可视为降水中心，其对天气系统的感应也被视为最大，或者说此处与降水系统的相互作用最强[28] [29] [30] [31] [36]；一般而言，某区域总有一些地带与降水天气系统的相互作用更为强烈，这些地带更易成为降水中心；同理，一些测站在单次降水过程中总倾向于拥有最大雨量，为便于论述，以下将某雨日降水量在该日降水范围内居于最大的测站定义为当日的降水中心。图 18 给出各季各站成为降水中心的多年平均比重，为了突出测站间的对比，计算该比重时不计降水范围只覆盖 1 个测站的样本。冬、春、夏和秋季的样本数分别多达 331、806、2011 和 795，故以上比重可视为各季各站成为降水中心的可能性。总体而言，在任何季节各站都可能成为降水中心，海拔越高的地方越易成为降水中心，最高处民乐在各季降水过程中成为降水中心的可能性远远高于其它测站，其次是永昌和山丹；冬季民勤(春季和夏季临泽、秋季鼎新)成为降水中心的可能性最小；就特定测站的季节间对比而言，民勤在秋季，临泽在冬季，比在其他季节更易成为降水中心。

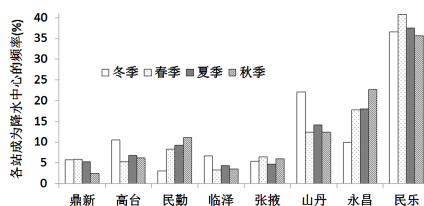


Figure 18. Seasonal frequentness of each station's becoming the rainfall center over the Badanjara Desert's southwestern border area (Stations are horizontally lined in the order from the lowest to highest altitude)

图 18. 巴丹吉林沙漠西南缘各季各站成为降水中心的频率(测站由左到右依海拔从低到高顺序排列)

### 2.5.2. 降水中心强度的季节变化

为便于叙述，将某日降水中心的降水量定义为该日的降水中心强度，和降水范围一样，降水中心强度也是表征降水过程强弱的重要指标。图 19 给出巴丹吉林沙漠西南缘各季降水中心强度的频率分布。显然，春、夏和秋季降水中心强度的频率分布曲线基本重合，总体而言，三季都是中心强度越大的降水发生频率越小，但在中雨处有一极大值，该极大值基本相当于中心强度为 2.1~3 或 3.1~4 mm·day<sup>-1</sup> 的频率，三季降水中心发生中雨的频率都大于发生中雨以上降水的频率。冬季降水强度较小，中心强度从未超过 7 mm·day<sup>-1</sup>，冬季中心强度越大的降水发生频率越小，冬季中心发生弱降水的频率高达 68.3%，比春、夏或秋季约高 1 倍左右(图 19)。

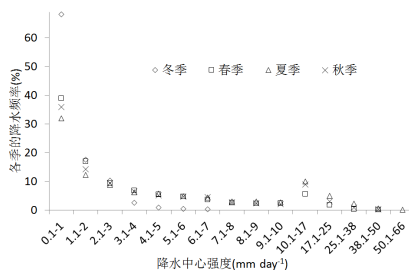
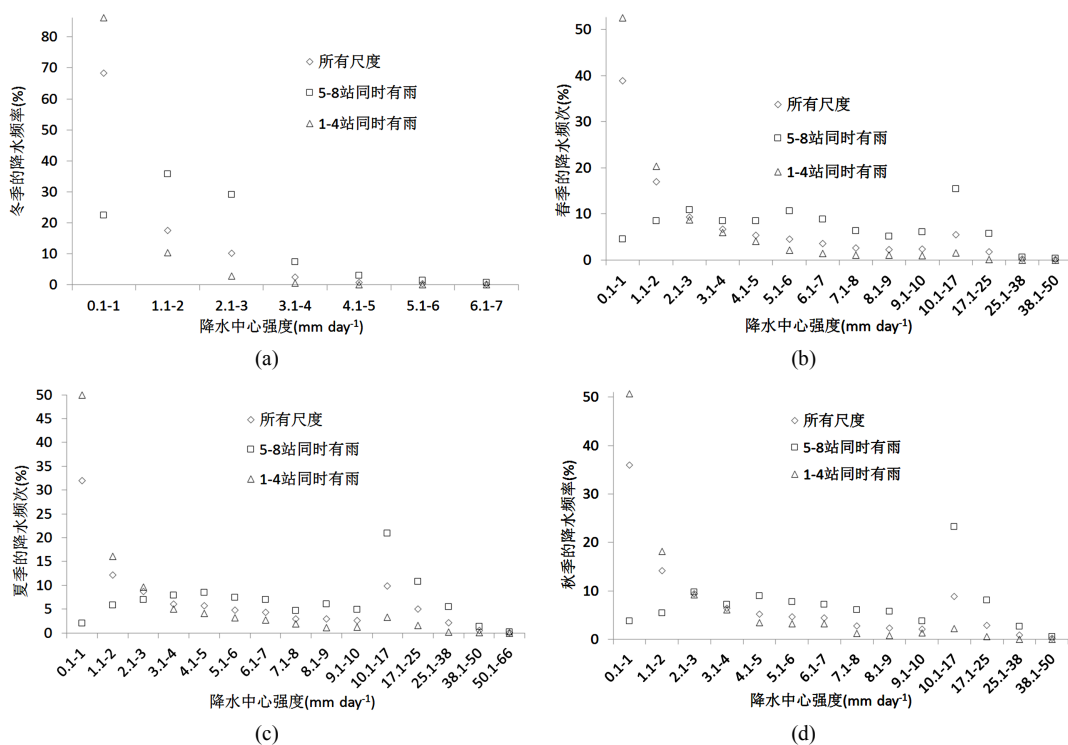


Figure 19. Seasonal rainfall frequentness distribution against the rainfall center intensity grade over the Badanjara Desert's southwestern border area

图 19. 巴丹吉林沙漠西南缘各季降水中心强度的频率分布

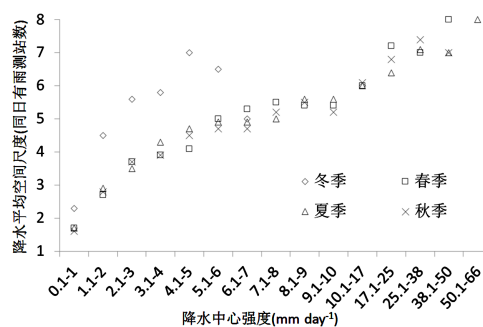
一般而言,降水范围越大,说明导致降水的天气过程发展得越充分,降水中心强度也越强。为了揭示降水中心强度随降水范围的变化,以下将降水分为小、大范围两种尺度,前者指同日1~4个测站有降水,后者指同日5~8个测站有降水。图20(a)和图20(b)分别给出各季两种尺度降水中心强度的频率分布。各季总是大范围降水的中心发生较强降水的频率大于甚至远大于小范围降水,但发生弱降水的频率却远小于小范围降水,也就是说,降水范围越大,中心发生较强降水的频率(或可能性)越大,而发生弱降水的频率却越小。具体而言,各季大范围降水中心发生弱降水的频率远小于小范围降水,差距可达1个量级,在春、夏、秋季,大范围降水中心强度为1.1~2 mm·day<sup>-1</sup>的频率也明显小于小范围降水,前者还不及后者一半;然而对于中心发生较强(冬季1.1 mm·day<sup>-1</sup>以上,春、夏、秋季3.1 mm·day<sup>-1</sup>以上)降水的频率而言,大范围降水总是大于或远大于小范围降水:冬季中心强度为1.1~3 mm·day<sup>-1</sup>的频率约为后者的3~9倍,在春、夏、秋季,中心强度为4.1~10 mm·day<sup>-1</sup>的频率约为后者的2~9倍,中雨及以上的频率比后者甚至大1个量级。



**Figure 20.** Seasonal frequentness distributions of rainfall events on different spatial scales against the rainfall center intensity grade over the Badanjaran Desert's southwestern border area: (a) winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn (There are three spatial scales respectively covering 1 - 4, 5 - 8 and 1 - 8 stations)

**图 20.** 巴丹吉林沙漠西南缘各季不同空间尺度降水中心强度的频率分布: (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季(空间尺度分3类: 分别覆盖1~4、5~8和1~8个测站)

图21给出各季降水范围随降水中心强度的变化。显然,春、夏、秋季降水范围随其中心强度的变化趋势基本完全一致,都是中心强度越大降水范围越大,且三季各中心强度的降水范围几无太大差别;冬季中心强度在6 mm·day<sup>-1</sup>以下的降水范围都大于或远大于其它三季,只有强度为6.1~7 mm·day<sup>-1</sup>的降水范围与其它季节基本相同,原因可能与冬季导致相应强度降水的天气过程不同或相同于其余三季有关;冬季也是强度越大降水范围越大,但在4.1~5 mm·day<sup>-1</sup>处有一极大值,极大值之后强度越大降水范围明显越小,原因值得深究。



**Figure 21.** Seasonal variations of the average rainfall spatial scale with the rainfall center intensity grade over the Badanjara Desert's southwestern border area

**图 21.** 巴丹吉林沙漠西南缘各季降水的平均空间尺度随其中心强度的变化

### 3. 结论

为了揭示巴丹吉林沙漠西南缘各级强度降水的空间和季节性变化,以便进一步把握导致该区域降水的主要天气系统在不同季节间的演变规律,本文首先将该区域 8 个测站在 1951~2005 年间的日降水量(即降水强度)分为 15 个等级,分别对各站各季各级强度降水的雨量和频次,以及降水空间尺度与中心强度间的关系等进行了统计分析,主要得出以下结论:

1) 各级强度降水的雨量和频次都以夏季最大,冬季最小,春、秋季相当;四季和全年降水频次都随降水强度增加而减小,但雨量不同,除冬季越强的降水导致的雨量越小外,春、夏、秋季及全年都以中雨雨量为最大,强度在弱降水以上中雨以下,以及中雨以上的降水都是强度越强雨量越小;地形抬升对该区域降水过程有重要作用,各季各级雨量和频次都随海拔升高而升高。

2) 就各级降水对各季和全年雨量的贡献而言,除冬季越强降水的贡献越小外,春、夏、秋季及全年都以中雨贡献最大,强度在弱降水以上中雨以下,以及中雨以上的降水都是强度越强贡献越小;而对于频次贡献,四季和全年都是越强的降水贡献越小;地形会影响某些强度降水对暖季雨量和频次的贡献,一般而言,海拔越高,小雨贡献越小,较强降水贡献越大。

3) 各级降水频次和雨量的季节配额相当一致,都以夏季最大,冬季最小,春、秋季基本相当;降水越强,其频次和雨量的夏季配额越大,冬季配额越小,即较强降水发生在夏(冬)季的可能性更大(小);地形高度对各级降水频次和雨量的季节配额均无规律性影响。

4) 相关天气系统强度及空间尺度的季节性差异使降水范围表现出明显的季节性差异,夏季降水范围最大,秋季次之,冬季最小;各季都是范围越大的降水发生的频率越小,夏季较小(大)范围降水发生的频率小(大)于冬、春季;所有尺度的降水都以夏季配额最大,冬季最小,春、秋季相当,范围越小(大)的降水在冬、春(夏)季的配额越大。

5) 在任何季节各站都可能成为降水中心,海拔越高的地方越易成为降水中心,最高处民乐在各季降水过程中成为降水中心的可能性远远高于其它测站。

6) 四季都是降水中心强度越大降水范围越大,相反,降水范围越大,中心发生较强(弱)降水的频率越大(小),但中心强度越大的降水发生频率越小;冬季降水中心发生弱降水的频率比春、夏或秋季约高 1 倍左右。

### 致 谢

本文由国家自然科学基金项目“巴丹吉林沙漠沙尘暴对大气边界层物质和能量循环的影响及其局地气候效应研究”(41275015)、高原大气与环境四川省重点实验室开放基金资助课题“近期青藏高原热力作

用的改变及其对东亚夏季风的影响研究”(PAEKL-2011-C3)、中国气象局成都高原气象研究所高原气象开放实验室基金课题“变暖情况下青藏高原对东亚夏季风热力作用的改变”(LPM2011003)等联合资助,在此深表谢意!

## 参考文献

- [1] 朱金峰,王乃昂,陈红宝,等. 基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1087-1094.
- [2] 钱正安,宋敏红,李万元,等. 全球、中蒙干旱区及其部分地区降水分布细节[J]. 高原气象, 2011, 30(1): 1-12.
- [3] 赵景波,邵天杰,侯雨乐,等. 巴丹吉林沙漠高大沙山区沙层含水量与水分来源探讨[J]. 自然资源学报, 2011, 26(4): 694-702.
- [4] 陈建生,赵霞,盛雪芬,等. 巴丹吉林沙漠湖泊群与沙山形成机理研究[J]. 科学通报, 2006, 51(23): 2789-2796.
- [5] 张强,黄荣辉,王胜. 西北干旱区陆-气相互作用试验(NWC2ALIEX)及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 427-440.
- [6] 鲍艳,吕世华. 干旱、半干旱地区陆气相互作用研究进展[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 454-460.
- [7] 黄荣辉,陈文,马耀明,等. 中国西北干旱区陆-气相互作用及其对东亚气候变化的影响[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 28-56, 100-135, 337-354.
- [8] Piao, S.L., Ciais, P., Huang, Y., et al. (2010) The Impacts of Climate Change on Water Resources and Agriculture in China. *Nature*, **467**, 43-51. <https://doi.org/10.1038/nature09364>
- [9] Trenberth, K.E. (2011) Changes in Precipitation with Climate Change. *Climate Research*, **47**, 123-138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
- [10] Qian, W.H., Shan, X.L., Chen, D.L., et al. (2012) Droughts near the Northern Fringe of the East Asian Summer Monsoon in China during 1470-2003. *Climatic Change*, **110**, 373-383. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0096-7>
- [11] Zhang, Q., Xu, C.Y., Chen, X.H., et al. (2011) Statistical Behaviors of Precipitation Regimes in China and Their Links with Atmospheric Circulation 1960-2005. *International Journal of Climatology*, **31**, 1665-1678. <https://doi.org/10.1002/joc.2193>
- [12] Wang, Y. and Yan, Z.-W. (2009) Trends in Seasonal Precipitation over China during 1961-2007. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **2**, 165-171. <https://doi.org/10.1080/16742834.2009.11446798>
- [13] 黄天明. 应用环境同位素研究巴丹吉林沙漠地下水补给来源[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [14] Shao, T.J., Zhao, J.B., Zhou, Q., et al. (2012) Recharge Sources and Chemical Composition Types of Groundwater and Lake in the Badan Jaran Desert, Northwestern China. *Journal of Geographical Sciences*, **22**, 479-496. <https://doi.org/10.1007/s11442-012-0941-2>
- [15] 宏伟,王贵玲. 巴丹吉林沙漠湖泊形成的机理分析[J]. 干旱区研究, 2007(1): 1-7.
- [16] 刘建刚. 巴丹吉林沙漠湖泊和地下水补给机制[J]. 水资源保护, 2010, 26(2): 18-23.
- [17] 郭永海,王海龙,董建楠,等. 关于巴丹吉林沙漠湖泊形成机制的初步看法[J]. 中国地质大学学报(地球科学), 2012, 37(2): 276-282.
- [18] 常兆丰,仲生年,韩福贵. 降水在沙丘中的渗透过程研究[J]. 防护林科技, 2002, 53(4): 5-8.
- [19] 李万元,吕世华,董治宝,等. 巴丹吉林沙漠周边地区降水量的时空变化特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 276-282.
- [20] 李万元,吕世华,范广州,等. 巴丹吉林沙漠西南缘降水的季节、年和年代际变化规律及其空间差异[C]//中国气象学会. 第31届中国气象学会年会. 北京: 中国气象学会, 2014: 1-30.
- [21] 马宁,王乃昂,李卓仑,等. 1960-2009年巴丹吉林沙漠南北缘气候变化分析[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 242-250.
- [22] 马宁,王乃昂,朱金峰,等. 巴丹吉林沙漠周边地区近50年来气候变化特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1541-1547.
- [23] 常兆丰,仲生年,韩富贵. 民勤沙漠区气候特征的分析[J]. 防护林科技, 1999, 40(3): 15-18.
- [24] Wang, W.C. and Li, K.R. (1990) Precipitation Fluctuation over Semiarid Region in Northern China and the Relationship with the El Nino/Southern Oscillation. *Journal of Climate*, **3**, 769-783. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1990\)003<0769:PFOSRI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1990)003<0769:PFOSRI>2.0.CO;2)



- [25] Wang, Y. and Zhou, L. (2005) Observed Trends in Extreme Precipitation Events in China during 1961-2001 and the Associated Changes in Large-Scale Circulation. *Geophysical Research Letters*, **32**, L09707. <https://doi.org/10.1029/2005GL022574>
- [26] Li, Y.F. and Leung, L.R. (2013) Potential Impacts of the Arctic on Inter-Annual and Inter-Decadal Summer Precipitation over China. *Journal of Climate*, **26**, 899-917. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00075.1>
- [27] Ma, J., Chen, L., He, J., *et al.* (2013) Trends and Periodicities in Observed Temperature, Precipitation and Runoff in a Desert Catchment: Case Study for the Shiyang River Basin in Northwestern China. *Water and Environment Journal*, **27**, 86-98. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2012.00329.x>
- [28] Benjamin, J. (2010) Moore, Synoptic-Scale Environments and Dynamical Mechanisms Associated with Predecessor Rain Events Ahead of Tropical Cyclones. Thesis for Master Degree of Science, College of Arts & Sciences, Department of Atmospheric and Environmental Sciences.
- [29] Neil, C.G. (2012) Hart, Synoptic-Scale Rainfall Patterns over Southern Africa: Scale-Interactions with Large-Scale Modes of Variability. Thesis for Doctoral Degree of Philosophy, Department of Oceanography, University of Cape Town, Cape Town.
- [30] 谢义炳, 等. 中国夏半年几种降水天气系统的分析研究[J]. 气象学报, 1956, 27(1): 1-23.
- [31] 陈志昆, 张书余. 地形在降水天气系统中的作用研究回顾与展望[J]. 干旱气象, 2010, 28(4): 460-466.
- [32] 陈冬冬, 戴永久. 近五十年我国西北地区降水强度变化特征[J]. 大气科学, 2009, 33(5): 923-935.
- [33] 杨晓丹, 翟潘茂. 我国西北地区降水强度、频率和总量变化[J]. 2005, 23(6): 24-26.
- [34] 方思达. 全球变暖背景下中国地区降水强度分布结构变化的特征分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [35] Fu, J.L., Qian, W.H., Lin, X., *et al.* (2008) Trends in Graded Precipitation in China from 1961 to 2000. *Advances in Atmospheric Sciences*, **25**, 267-278. <https://doi.org/10.1007/s00376-008-0267-2>
- [36] 吴岩峻. 不同天气系统对海南岛降水的贡献及其变化的研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2008.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-5711, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ccrl@hanspub.org](mailto:ccrl@hanspub.org)