

# 2008-2014年祁连山区夏季降水的日变化特征及其影响因素

刘雪梅, 张明军, 王圣杰, 王 杰, 赵培培, 周盼盼

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

**摘要:** 基于中国自动气象站与CMORPH降水产品融合的逐时降水量 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 网格数据集通过逐时降水量、降水频率和降水强度等指标研究了2008-2014年祁连山区夏季降水的日变化特征,并结合ERA-Interim再分析资料分析了气象要素对降水日变化的影响。结果表明:①祁连山区逐时平均降水量和降水频率的时空分布特征较为一致,即东中段大于西段,且7月最大,6月次之,8月最小;降水强度的空间分布则与降水量和降水频率的存在差异,且6月的降水强度平均值最大。②白天和夜间的降水量均表现出东中段多于西段、山区多于平原的特点,并有明显的夜雨现象;从年际差异来看,2008-2014年白天和夜间的降水量均呈增加趋势。③祁连山区夏季降水平均相对变率介于5%~38%之间,全区20:00平均相对变率最大;逐时降水量和降水频率普遍存在较好的相关性,尤其是在东中段。④对比再分析资料发现,祁连山区降水日变化与相对湿度和地面温度等气象要素有关。

**关键词:** 祁连山;夏季;降水;日变化

DOI: 10.11821/dlxb201605005

## 1 引言

随着全球气候变暖,北半球中纬度地区增温显著,促使水循环加速<sup>[1-2]</sup>。降水作为水循环的重要环节,在大气热力和动力过程的综合影响下往往表现出日变化特征<sup>[3]</sup>,是世界气候研究计划(WCRP)重点关注的科学问题之一<sup>[4]</sup>。降水日变化是地球自转对太阳辐射强迫的反映,对地表和大气中的能量流动、水文变化和人类生产生活有重要影响<sup>[5-6]</sup>。通过研究降水日变化特征可以揭示与之相关的环流和其他参数的日变化规律<sup>[7]</sup>,有助于解释降水的形成机制及评估区域气候模型<sup>[8]</sup>,从而进行合理的水资源调配。因此,对日尺度降水特征的研究有着重要的科学意义和现实意义<sup>[9-10]</sup>。

目前,国内外学者对全球不同区域的降水日变化特征展开了大量的研究工作<sup>[11-12]</sup>。受海陆分布、地形、海拔、纬度等因素影响,降水日变化区域差异显著:其中处于寒带的瑞典内陆,暖季日降水峰值为午后,而处于瑞典东海岸的降水则没有明显的昼夜差异<sup>[13-14]</sup>;在温带,除青藏高原地区外,一些学者得出降水日变化位相有明显向东传播的特征,在西风带的影响下北美的传播速度比东亚快<sup>[15-16]</sup>。卫星遥感技术的发展为研究热带降

收稿日期: 2015-11-20; 修订日期: 2016-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41461003); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CBA01801) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41461003; National Basic Research Program of China (973 Program), No.2013CBA01801]

作者简介: 刘雪梅(1990-), 女, 黑龙江牡丹江人, 硕士, 主要从事气候变化与可持续发展方面的研究。

E-mail: geolixuemei@163.com

通讯作者: 张明军(1974-), 男, 甘肃宁县人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110007775M), 主要从事气候变化与冰川方面的研究。E-mail: mjzhang2004@163.com

水的日变化提供了更为有效的手段, 利用TRMM卫星降水资料和地面观测资料融合发现, 各大洋热带气旋降水的昼夜循环是相似的<sup>[17]</sup>; 但在北大西洋, 受到西风带的影响, 降水日变化强度明显弱于其他大洋<sup>[18]</sup>; 东亚季风区的研究发现, 降水高度影响着降水强度的日变化, 并且一些地区的降水日变化峰值相位存在着明显的经向传播特征<sup>[15, 19]</sup>。除了大区域的降水日变化研究外, 也有学者针对特定小区域的降水日变化进行了研究, 相关结论完善了对当地降水机制的认识<sup>[20-23]</sup>。

祁连山区地处青藏高原东北部, 降水表现出了明显的空间差异, 总体而言山区降水多于平原, 东部降水多于西部, 其降水量变化对于毗邻区域尤其是河西走廊水资源具有至关重要的影响, 其降水的日变化特征值得深入研究<sup>[24]</sup>。地面观测资料是降水日变化研究的基础, 但已有气象监测网络对祁连山区的覆盖十分有限, 尤其是高海拔山区缺乏足够的实测气象站点, 不利于降水日变化的深入研究; 卫星反演资料可以在空间分布上弥补上述缺陷, 但是没有经过地面资料订正的卫星降水数据集往往具有不同程度的不确定性, 尤其是在中国西部的山区, 影响研究结果的可信性<sup>[25-29]</sup>。在这样的基础上, 中国气象局国家气象信息中心利用中国境内的自动气象站降水数据与CMORPH数据<sup>[27]</sup>融合, 发布了全国范围的逐时降水量 $0.1^\circ$ 网格数据集。Shen等<sup>[28-29]</sup>介绍了该产品的生成方法, 并从误差时空分布、不同降水量级差异、强降水刻画能力等方面评估了降水产品的质量, 发现该产品弥补了中国西部地区自动站分布较少和易受到寒冷天气影响的不足。近年来, 该款数据也越来越多地运用于不同区域降水研究, 表现出了较好的效果<sup>[30-33]</sup>。本文选取该降水融合数据, 利用逐时平均降水量、降水频率、降水强度和降水变率等指标对祁连山近年来降水的日变化特征进行分析, 并利用ERA-Interim再分析数据对日变化的影响因素进行探讨, 旨在增进对这一区域水文循环特征的认识, 理解降水形成的机理。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究区概况

祁连山处于亚欧大陆中部, 山峰海拔在4000~5000 m之间, 是青藏高原东北部最大的边缘山系, 北为河西走廊, 南为柴达木盆地, 祁连山区具有典型的大陆性气候和高原气候的特征(图1)。山区终年积雪并有现代冰川的分布, 根据第二次中国冰川编目数据, 现有冰川面积 $1597.81 \pm 70.30 \text{ km}^2$ , 储量约 $84.48 \text{ km}^3$ <sup>[34]</sup>, 在全球气候变暖的背景下冰川呈现出加速退缩的趋势<sup>[35-36]</sup>。祁连山区降水的时空分布特征复杂, 季节性和区域性特征较为显著, 为了便于分析, 本文将 $101^\circ\text{E}$ 和 $98^\circ\text{E}$ 分别作为祁连山区东段、中段和西段的分界线<sup>[37]</sup>。

### 2.2 数据来源

本文使用中国气象局国家气象信息中心发布的中国自动站与CMORPH降水产品融合的逐时降水量 $0.1^\circ$ 网格数据集(1.0版)(<http://cdc.cma.gov.cn>), 该数据集覆盖时段为2008-2014年。该数据集以地面逐时降水格点数据为基础, 使用最优插值(Optimal Interpolation, OI)的方法与卫星降水资料进行有效的结合<sup>[38]</sup>。在西风带、南亚季风 and 高原季风的共同影响下, 夏季祁连山区几乎为一个“水汽汇”, 在全年降水中占到很大的比例<sup>[39-40]</sup>, 故本文重点关注2008-2014年夏季(6-8月)降水的日变化特征。此外, 本文还使用了欧洲中期天气预报中心提供的ERA-Interim再分析数据集<sup>[41]</sup>分析祁连山区日降水的影响因素, 主要选取2008-2014年研究区内的相对湿度和气温数据, 空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ , 时间分辨率为6 h。

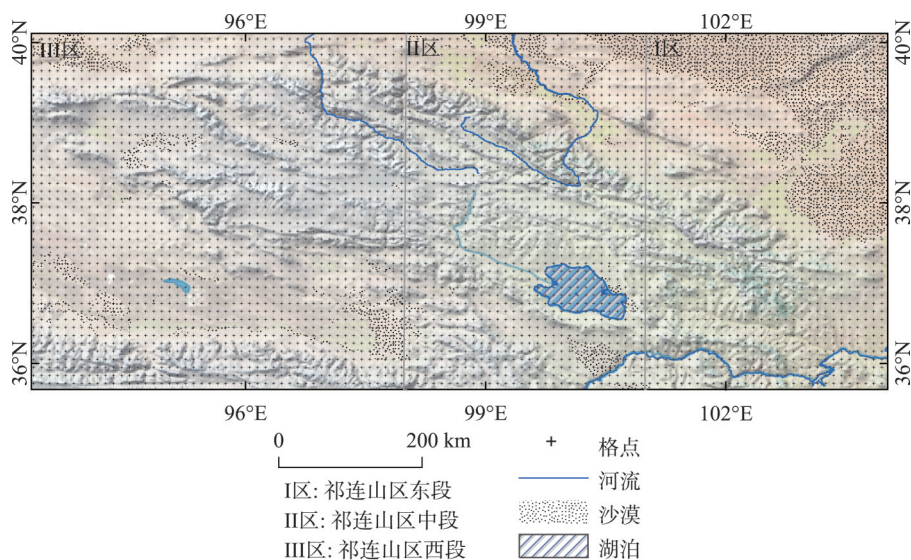


图1 祁连山区逐时降水量 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ 网格空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of grid boxes for hourly precipitation at  $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$  resolutions in the Qilian Mountains

## 2.3 研究方法

为描述祁连山区降水日变化特征,选取了逐时平均降水量、降水频率、降水强度、白天(北京时间08:00-20:00)和夜间(北京时间20:00-08:00)降水量和降水变率等6个指标用于表征祁连山区夏季降水日变化特征。

一般来说,降水变率的大小反映了降水的稳定性,某区域的降水丰富、变率小,表明该区域水资源利用价值高,不易发生旱涝灾害。本文利用降水平均相对变率来表征不同分区不同时刻的降水稳定性,计算公式如下:

$$P = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{\bar{x}} \times 100\% \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中:  $P$  表示降水平均相对变率;  $x_i$  指某小时的降水量 (mm/h);  $\bar{x}$  指1小时长期的降水量平均值 (mm/h)。

月尺度下的逐时平均降水量为:

$$P = \sum_{i=1}^n p_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中:  $P$  表示逐时平均降水量 (mm/月);  $p_i$  是表示逐时降水量 (mm/h)。

使用 Pearson 相关系数  $r$  来分析逐时平均降水量、降水频率和降水强度之间的相关关系,用  $T$  检验法来检验线性趋势的显著性,并利用 ArcGIS 软件绘制相关的空间分布图。

相关系数计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3)$$

式中: 当  $r > 0$  时, 表明要素之间为正相关; 当  $r < 0$  时, 表明要素之间为负相关。 $r$  的绝对值越接近1, 则表明相关性越好, 反之越差。



### 3 结果与分析

#### 3.1 不同分区逐时降水量的时空变化特征

2008-2014年祁连山区夏季逐时平均降水量的变化(图2),东中段的逐时平均降水量明显大于西段,这与以往基于格点降水数据<sup>[40]</sup>和地面监测资料<sup>[42]</sup>的祁连山区降水空间分布研究结果相一致。祁连山区大部分地区的逐时降水量呈现出7月最大,6月次之,8月最小的趋势;在祁连山区中段,7月和整个夏季的逐时平均降水量峰值出现时间是18:00(北京时间,下同),而6月和8月的峰值出现时间分别是17:00和20:00。总体而言,祁连山区的逐时平均降水量的峰值时间出现在17:00-20:00,这与以往研究的认识<sup>[43]</sup>也是大致相符的,即山地型降水的峰值时间主要集中于傍晚和前半夜。

就祁连山区的全区而言,降水主要集中在东中段,西段的降水较为稀少(图3)。从逐时降水量的空间分布(图3)来看,自08:00之后呈逐渐较少的趋势,直至12:00逐时降水量最少,此后开始增加,尤其是16:00之后逐时降水量显著增加且北坡的降水量比南坡的降水量更大,22:00至翌日07:00则表现为减少趋势且南坡的降水量逐渐大于北坡的。在17:00-21:00之间具有降水较为集中的特点,祁连山区东中段大部分地区的逐时降水量超过了4 mm/月。

#### 3.2 不同分区逐时降水频率的时空变化特征

研究时段内祁连山区降水频率的日变化特征(图4)可以看出,逐时降水频率的变化特征与逐时平均降水量的较为一致。祁连山东中段的逐时降水频率大于西段,尤其是中段的降水频率最大,西段在夏季发生降水的概率最小。从月份上看,东中段在7月的降水频率最大,6月次之,8月最小;在祁连山西段,6月的逐时降水频率最大,7月次之,8月最小。在祁连山中段,6月和整个夏季的逐时降水频率峰值时间均为17:00,7月的峰值时间是21:00,8月的峰值时间是18:00。综上所述,祁连山区逐时降水频率的峰值时间为17:00-21:00,与逐时平均降水量的峰值时间大致吻合,即集中于傍晚和前半夜。从祁连山区夏季逐时平均降水频率的空间分布(图5)来看,山区的降水频率一般大于周围地区,且东中段的逐时降水频率均较西段大,在东中段的大部分地区降水频率均超过了0.15。

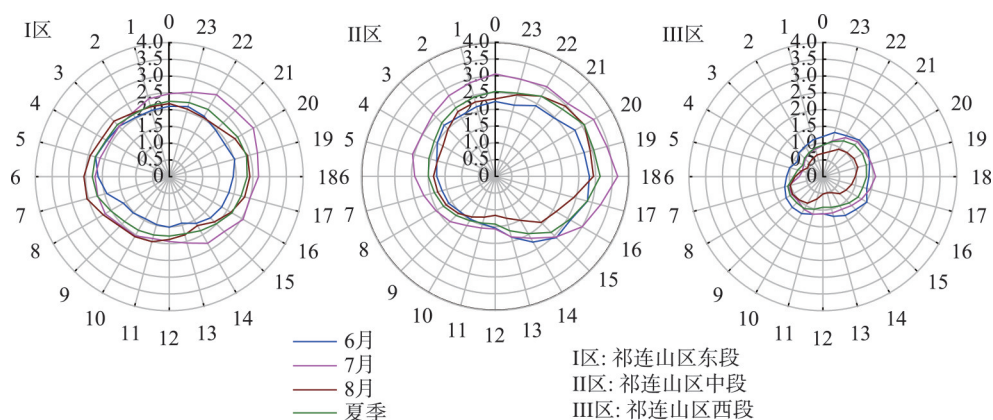


图2 2008-2014年祁连山区不同分区夏季逐时平均降水量变化(mm/月)

Fig. 2 Variation of mean hourly precipitation amount in different zones in the Qilian Mountains during the summer of 2008-2014 (mm/month)



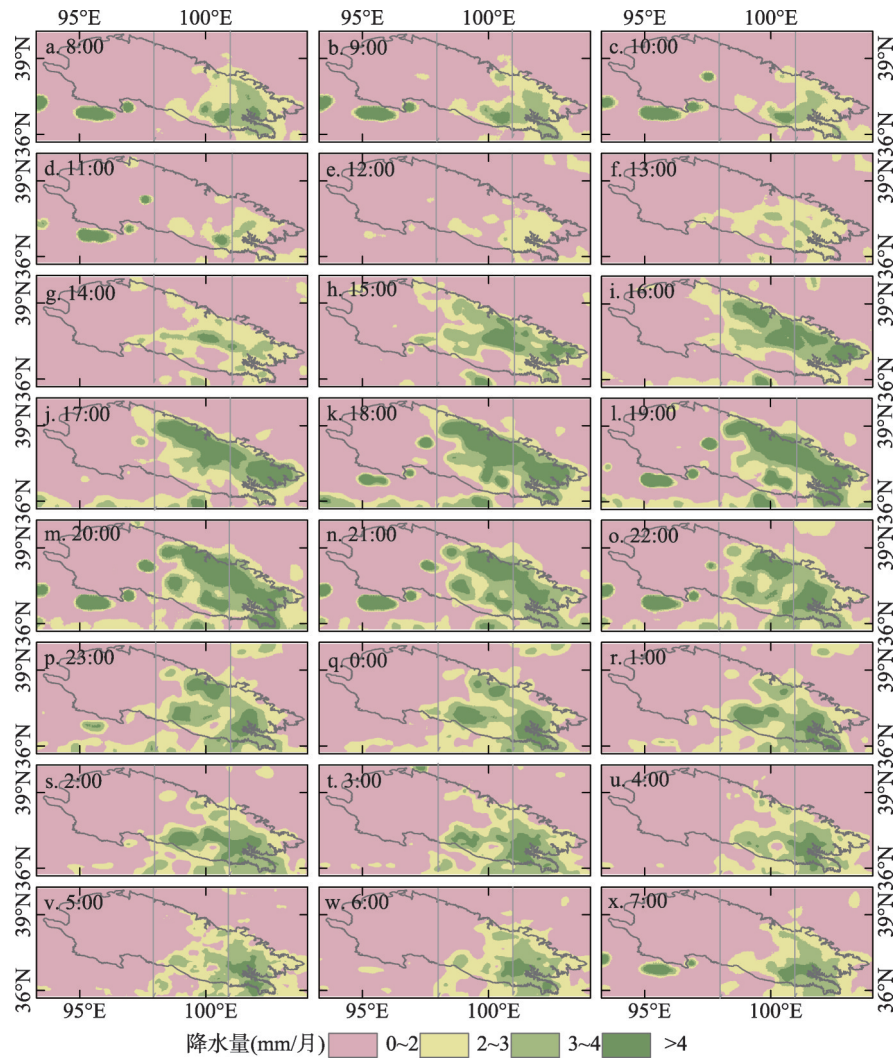


图3 2008-2014年祁连山区夏季逐时平均降水量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of mean hourly precipitation in the Qilian Mountains during the summer of 2008-2014

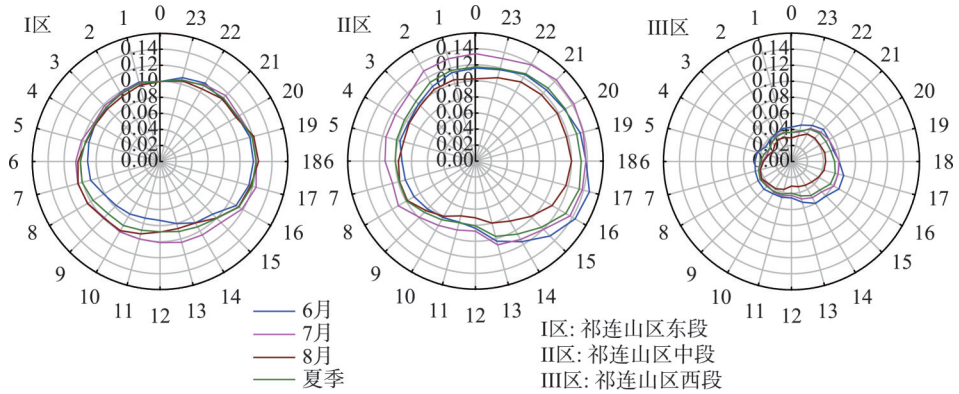


图4 2008-2014年祁连山区不同分区夏季逐时平均降水频率变化

Fig. 4 Variation of mean hourly precipitation frequency in different zones in the Qilian Mountains during the summer of 2008-2014

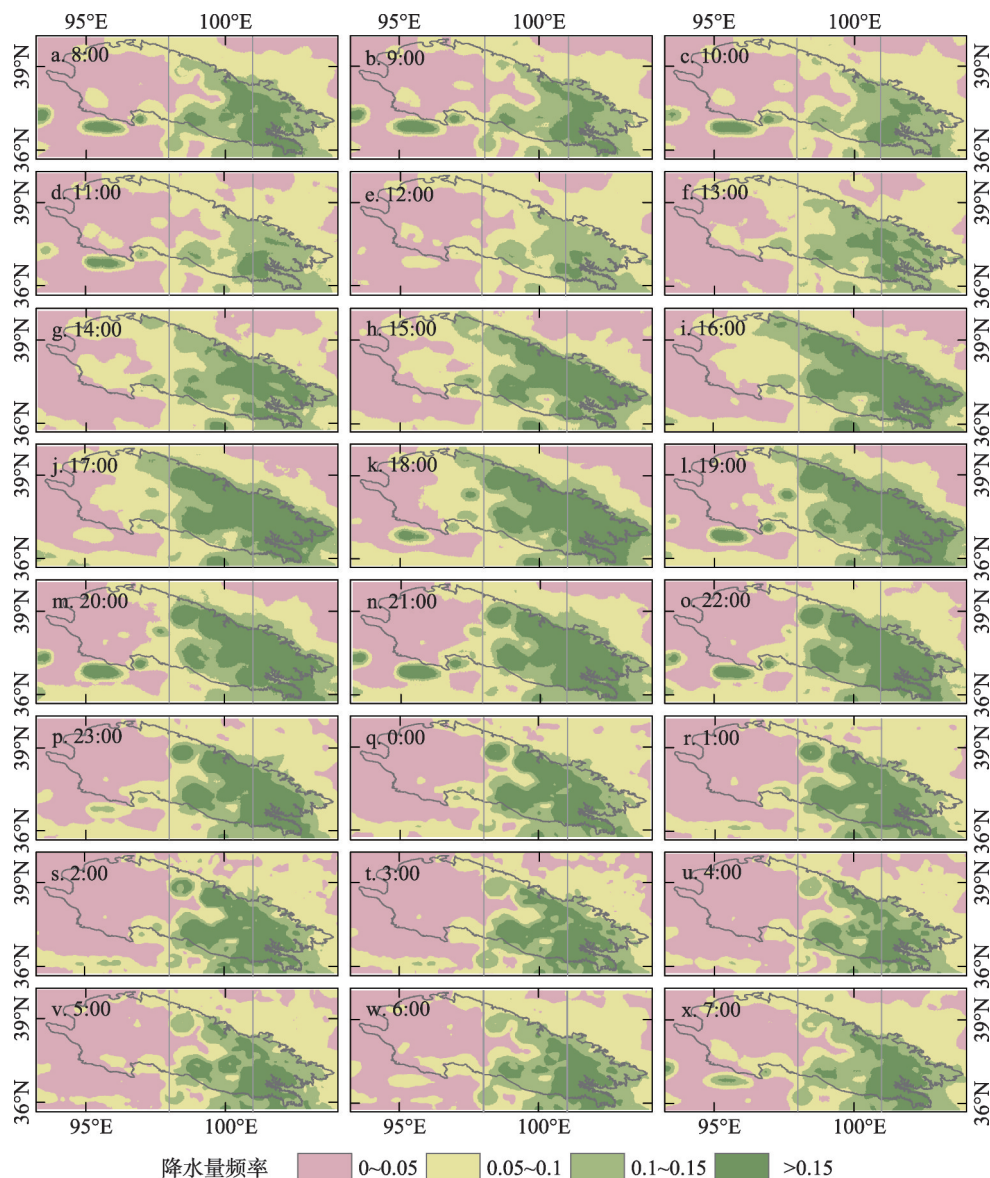


图5 2008-2014年祁连山区夏季逐时平均降水频率的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of mean hourly precipitation frequency in the Qilian Mountains during the summer of 2008-2014

### 3.3 不同分区逐时降水强度的时空变化特征

图6反映了2008-2014年祁连山区夏季逐时平均降水强度的变化。降水强度的日变化特征与上文中降水量和降水频率的日变化特征存在明显差异,祁连山大部分地区的降水强度相似,即东段、中段和西段没有明显的递变规律。从月份上看,东段和中段的降水强度7月最强,而西段的降水强度6月最强,7月次之,但是月份间没有太大的差异。中段的降水强度比较稳定,没有明显的峰值时间;东段6月、7月和8月份降水强度的峰值时间分别是05:00、20:00和07:00;西段6月的降水强度峰值时间在23:00-00:00,7月为12:00和07:00,8月则为06:00-07:00。祁连山区降水强度的高值区并非与逐时降水量和降水频率一样分布在降水丰富的山区(图7),与海拔并未表现出较好的一致性,东段、中

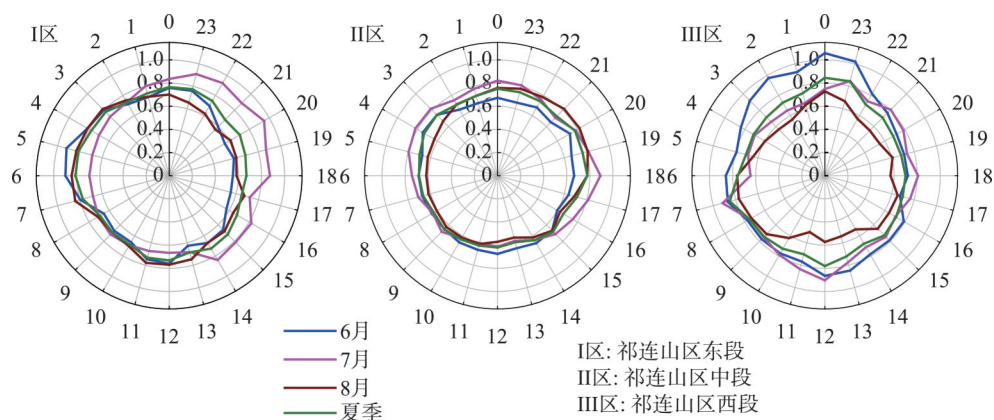


图6 2008-2014年祁连山区不同分区夏季逐时平均降水强度变化(mm/h)

Fig. 6 Variation of mean hourly precipitation intensity in different zones in the Qilian Mountains during the summer of 2008-2014 (mm/h)

段和西段的降水强度无明显差异。

### 3.4 昼夜降水量时空变化的比较

2008-2014年祁连山区以及东段、中段和西段的白天降水量均呈上升趋势(图8),且中段白天降水量的增加趋势最为显著( $r^2 = 0.5251$ )。东段白天降水量在2008-2011年波动相对较小,维持在较低水平,2012-2014年降水量则比前一时段偏高,尤其是2012年出现明显高值;中段和西段白天降水量的变化趋势与东段的类似,但2013年降水量更为偏大。全区和各分区夜间降水量呈上升趋势(图9),其中东段夜间降水量的增加趋势最为显著( $r^2 = 0.5588$ )。东段夜间降水量自2010年出现小波谷后逐渐上升,在2013年达峰值后逐渐降低;中段和西段夜间降水量与东段类似,但最大值出现在2012年。

图10反映了祁连山区夏季白天和夜间平均降水量及其差值的空间分布情况。白天和夜间降水量的空间特征基本一致,无论白天还是夜间东段和中段降水量都明显大于西段,且降水主要集中于山区(图10a、图10b);在祁连山区大部分地区夜间降水量大于白天,有明显的夜雨现象(图10c)。这种夜雨现象在其他地区也有报道,尤其是在四川盆地<sup>[44-45]</sup>。

### 3.5 降水变率及各指标间的相关性分析

2008-2014年祁连山区夏季逐时降水相对变率(图11)可以看出,所有分区不同时刻的逐时降水相对变率介于5%~38%之间。中段和西段夏季降水相对变率的最大值均出现在20:00,而东段的最大值则出现在19:00。在降水变率的高值区更易发生极端的天气事件,气象灾害频发<sup>[46]</sup>;全区相对变率的最低值普遍出现在12:00,此时降水的稳定性较好。

从祁连山区逐时平均降水量、降水频率和降水强度的相关性(表1)来看,逐时平均降水量和降水频率的相关性最好,各分区均通过了0.01信度的显著性水平检验,尤其是东段和中段。

### 3.6 降水日变化的影响因素

影响降水日变化的因素极为复杂,即使是临近区域受地形等因素影响也会产生不同的日变化特征。本文得出的逐时降水量的峰值时间为17:00-21:00,为傍晚和前半夜型。从ERA-Interim再分析资料(图12)来看,祁连山区东段和中段为相对湿度和地面温度的高值区域,这与逐时平均降水量的分布规律基本一致。祁连山区午后太阳辐射强度



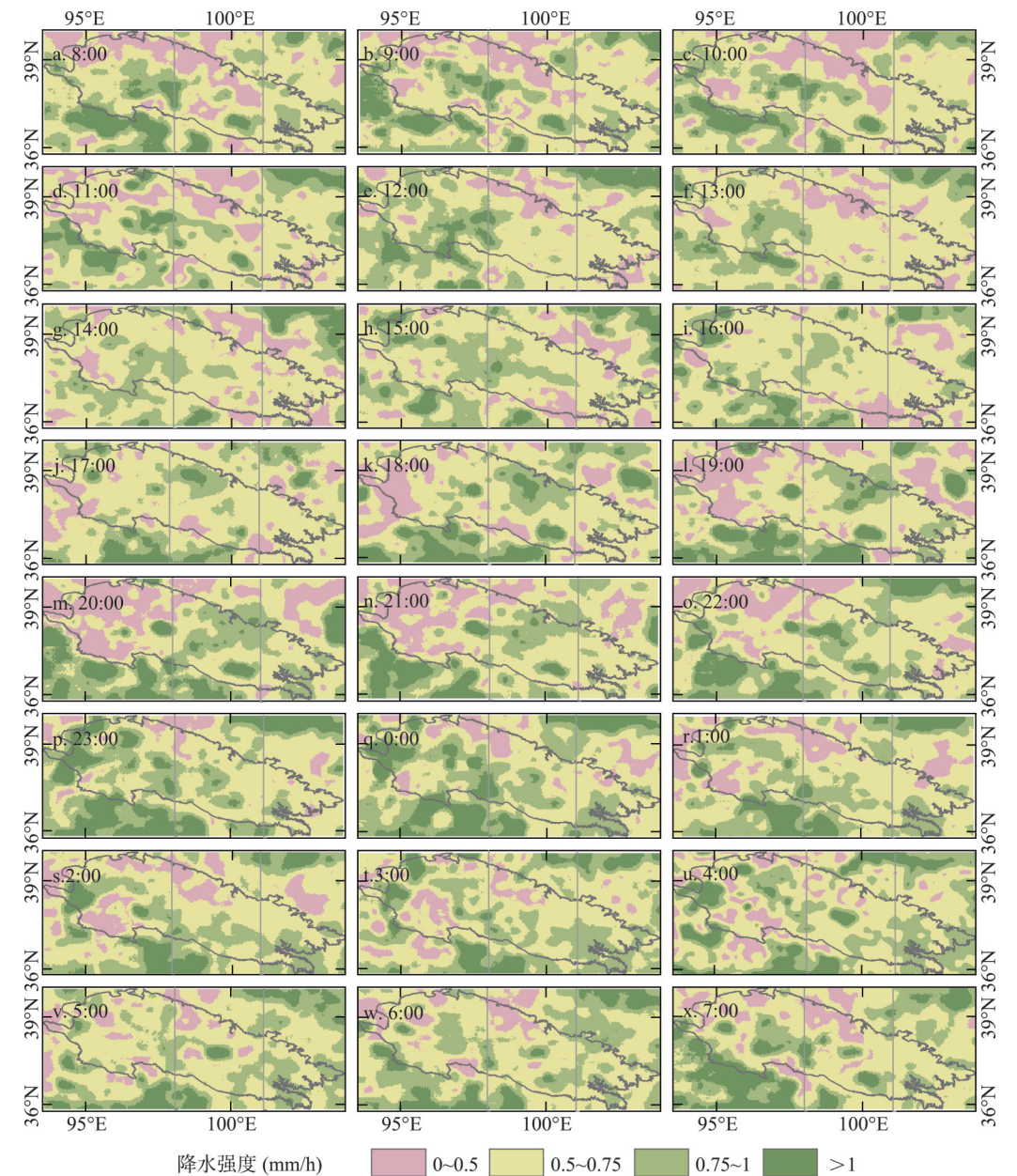


图7 2008-2014年祁连山区夏季逐时平均降水强度的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of mean hourly precipitation intensity in the Qilian Mountains during the summer of 2008-2014

表1 2008-2014年祁连山区夏季逐时平均降水量、降水频率和降水强度的相关系数  
Tab. 1 Correlation coefficients among mean hourly precipitation, frequency and intensity in the Qilian Mountains during the summer of 2008-2014

	祁连山区东段	祁连山区中段	祁连山区西段	祁连山区
$r$ (降水量—降水强度)	0.366	0.887**	-0.062	0.194
$r$ (降水量—降水频率)	0.834**	0.963**	0.598**	0.931**
$r$ (降水强度—降水频率)	-0.036	0.806**	-0.483*	-0.071

注: \*, \*\*分别表示通过了0.05和0.01信度的显著性水平检验。

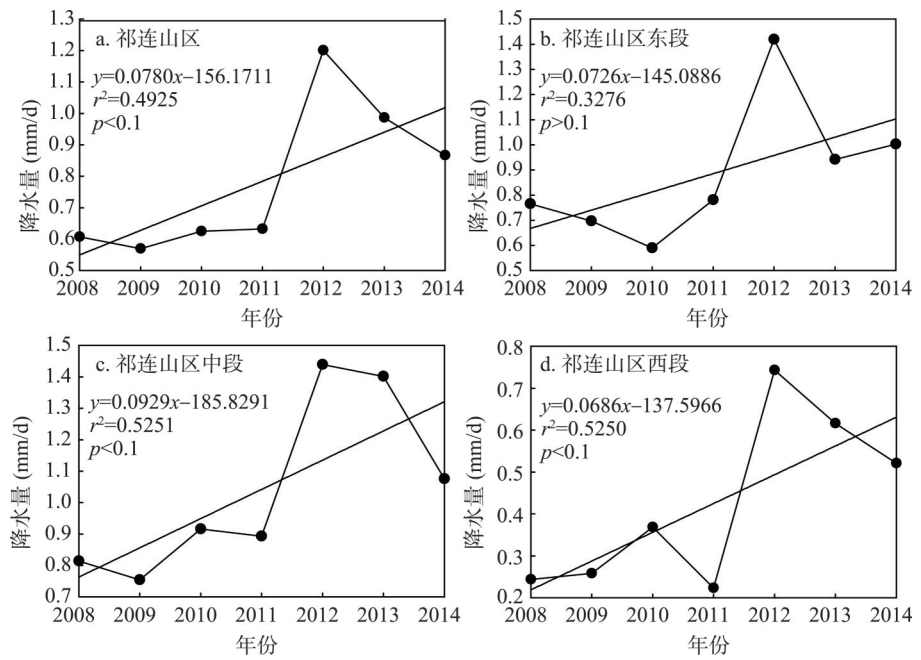


图8 2008-2014年夏季祁连山区白天降水量的年际变化

Fig. 8 Inter-annual variation of daytime precipitation in the Qilian Mountains during the summer of 2008-2014

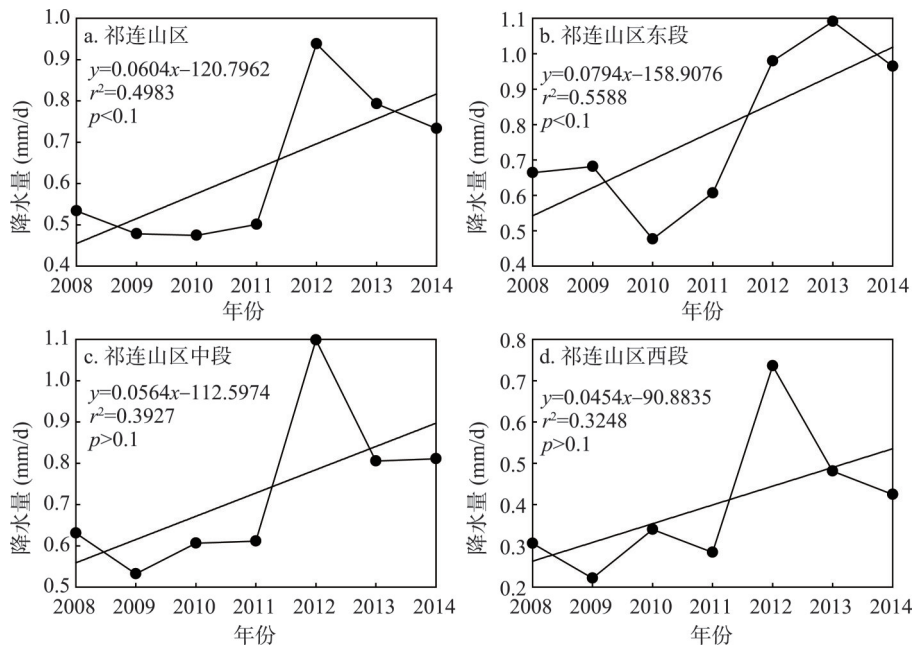


图9 2008-2014年夏季祁连山区夜间降水量的年际变化特征

Fig. 9 Inter-annual variation of nighttime precipitation in the Qilian Mountains during the summer of 2008-2014

大，山地温度升高，从而使山区地面蒸发和植被蒸腾作用加强，20:00左右相对湿度达到峰值，近地面形成高温高湿的气团；该气团迫使地面与高空的对流加强，且傍晚地面温度开始下降，空气冷却，易形成降水；至翌日凌晨，相对湿度减少，温度继续下降，故

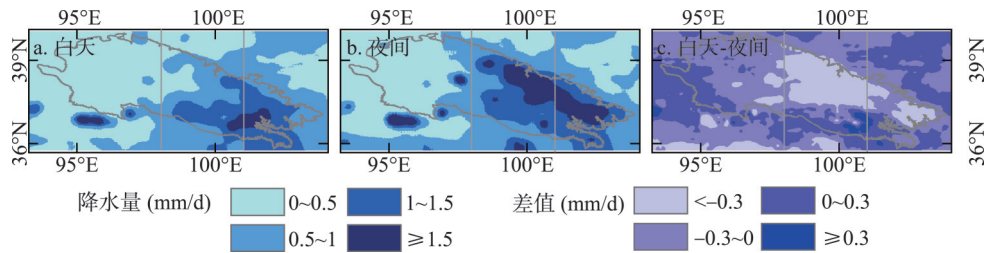


图 10 2008-2014年夏季祁连山区白天(a)和夜间(b)降水量及其差值(c)的空间分布  
Fig. 10 Spatial distribution of precipitation in daytime (a), nighttime (b) and their difference (c) in the Qilian Mountains during the summer of 2008-2014

山地的逐时降水量峰值集中于傍晚和前半夜。当然，进一步的机理分析还有待继续开展，从而加深对祁连山降水日变化的认识。

4 结论

本文选用中国自动站与CMORPH降水产品融合的逐时降水量 $0.1^{\circ}\times0.1^{\circ}$ 网格数据集分析了2008-2014年祁连山区夏季逐时平均降水量、降水频率、

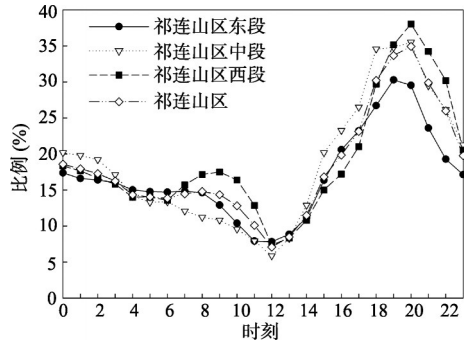


图 11 2008-2014年祁连山区逐时降水平均相对变率变化  
Fig. 11 Hourly variation of mean relative variation of precipitation in the Qilian Mountains during the summer of 2008-2014

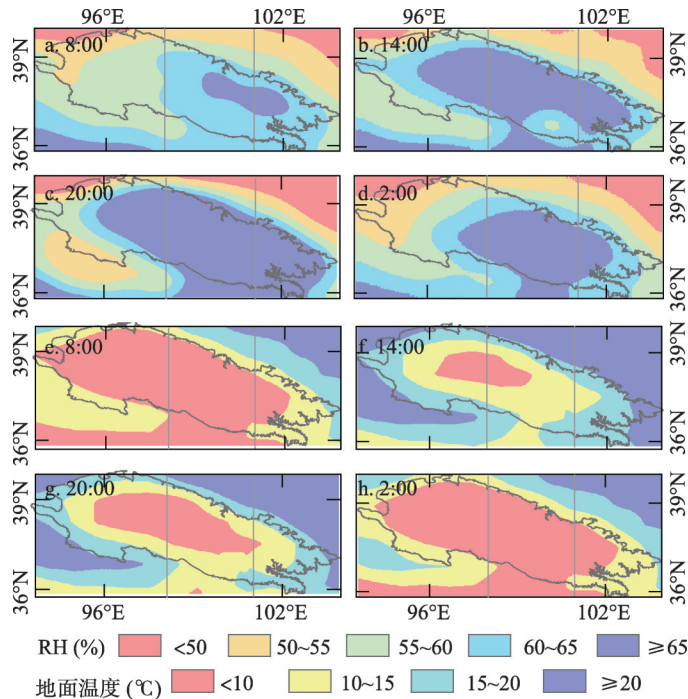


图 12 2008-2014年夏季祁连山区 500 hPa 相对湿度和地面气温的空间分布  
Fig. 12 Spatial distribution of relative humidity at 500 hPa and surface air temperature in the Qilian Mountains during the summer of 2008-2014



降水强度等指标的变化特征,并结合 ERA-Interim 再分析资料分析了降水日变化的影响因素,得到以下几点结论:

(1) 祁连山区逐时平均降水量和降水频率的日变化特征基本一致,即东中段的降水量和降水频率较西段的大;降水强度的高值区位置与逐时降水量和降水频率的不同,与海拔没有明显的联系;逐时平均降水量和降水频率均是7月最大,6月次之,8月最小;东中段的降水强度是7月最大,8月最小,但是西段的为6月最大,8月最小。

(2) 2008-2014年祁连山区白天和夜间降水量的年际变化大体呈增加趋势,峰值多出现在2012年;白天和夜间降水量的空间特征基本一致,即中东段的降水量大于西段,且集中于山区;祁连山区夜间降水量大于白天,有明显的夜雨现象。

(3) 祁连山区不同时刻降水相对变率介于5%~38%之间,全区在20:00时相对变率最大,更易发生极端降水事件;逐时平均降水量和降水频率之间普遍存在较好的相关性,有其在祁连山东中段。

(4) 结合 ERA-Interim 再分析资料分析发现,祁连山区降水日变化与相对湿度和地面温度等气象要素的日变化存在联系。

## 参考文献(References)

- [1] Ji Fei, Wu Zhaohua, Huang Jianping, et al. Evolution of land surface air temperature trend. *Nature Climate Change*, 2014, 4(6): 462-466.
- [2] Qin Dahe. Highlights of the IPCC Working Group I Fifth Assessment Report. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 10(1): 1-6. [秦大河. IPCC-第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.]
- [3] Yu Rongcong, Li Jian, Chen Haoming, et al. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 28(5): 877-902.
- [4] Sperber K R, Yasunari T. Workshop on monsoon climate systems: Toward better prediction of the monsoon. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 87(10): 1399-1403.
- [5] Bai Aijuan, Liu Changhai, Liu Xiaodong. Diurnal variation of summer rainfall over the Tibetan Plateau and its neighboring regions revealed by TRMM multi-satellite precipitation analysis. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3): 704-714. [白爱娟, 刘长海, 刘晓东. TRMM 多卫星降水分析资料揭示的青藏高原及其周边地区夏季降水日变化. 地球物理学报, 2008, 51(3): 704-714.]
- [6] Li Juan, Dong Wenjie, Yan Zhongwei. Changes of climate extremes of temperature and precipitation in summer in eastern China associated with changes in atmospheric circulation in East Asia during 1960-2008. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(15): 1856-1861.
- [7] Zhou Tianjun, Yu Rucong, Chen Haoming, et al. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: A comparison of satellite data with rain gauge observations. *Journal of Climate*, 2008, 21(16): 3997-4010.
- [8] Iizumi T, Takayabu I, Dairaku K, et al. Future change of daily precipitation indicates in Japan: A stochastic weather generator-based bootstrap approach to provide probabilistic climate information. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D11). doi: 10.1029/2011JD017197.
- [9] Takahashi H G, Yoshikane T, Hara M, et al. High-resolution modeling of the potential impact of land surface conditions on regional climate over Indochina associated with the diurnal precipitation cycle. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(13): 2004-2020.
- [10] Betts A K, Desjardins R, Worth D, et al. Impact of land use change on the diurnal cycle climate of the Canadian Prairies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(21): 11996-12011.
- [11] Folkins I, Mitovski T, Pierce J R. A simple way to improve the diurnal cycle in convective rainfall over land in climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(5): 2113-2130.
- [12] Zhong Jun, Su Buda, Zhai Jianqing, et al. Distribution characteristics and future trends of daily precipitation in China. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 9(2): 89-95. [钟军, 苏布达, 翟建青, 等. 中国日降水的分布特征和未来发展. 气候变化研究进展, 2013, 9(2): 89-95.]

- [13] Jeong J H, Walther A, Nikulin G, et al. Diurnal cycle of precipitation amount and frequency in Sweden: Observation versus model simulation. *Tellus A*, 2011, 63(4): 664-674.
- [14] Walther A, Jeong J-H, Nikulin G, et al. Evaluation of the warm season diurnal cycle of precipitation over Sweden simulated by the Rossby Centre regional climate model RCA3. *Atmospheric Research*, 2013, 119: 131-139.
- [15] Zhang Yuanchun, Zhang Fuqing, Sun Jianhua. Comparison of the diurnal variations of warm-season precipitation for east Asia vs. north America downstream of the Tibetan Plateau vs. the Rocky Mountains. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(19): 10741-10759.
- [16] Guo Jianping, Zhai Panmao, Wu Lu, et al. Diurnal variation and the influential factors of precipitation from surface and satellite measurements in Tibet. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(9): 2940-2956.
- [17] Bowman K P, Fowler M D. The diurnal cycle of precipitation in tropical cyclones. *Journal of Climate*, 2015, 28(13): 5325-5334.
- [18] Wu Qiaoyan, Ruan Zhenxin, Chen Dake, et al. Diurnal variations of tropical cyclone precipitation in the inner and outer rainbands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(1): 1-11.
- [19] Mao Jiangyu, Wu Guoxiong. Diurnal variations of summer precipitation over the Asian monsoon region as revealed by TRMM satellite data. *Science China Earth Science*, 2012, 55(4): 554-566.
- [20] Li Jian, Yu Rucong, Wang Jianjie. Diurnal variation patterns of summer precipitation in Beijing. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(12): 1933-1936.
- [21] Zhang Yunfu, Yan Xiaoyu, Zhao Chunyu, et al. Diurnal variation patterns of precipitation in Liaoning Province from May to September. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(7): 1529-1534. [张运福, 严晓瑜, 赵春雨, 等. 辽宁省5-9月降水日变化特征. *生态学杂志*, 2011, 30(7): 1529-1534.]
- [22] Wang Qing, Ma Qianqian, Xia Yanling, et al. Spatial-temporal variations and influential factors of summer precipitation in Shandong region during the last 50 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(2): 220-228. [王庆, 马倩倩, 夏艳玲, 等. 最近50年来山东地区夏季降水的时空变化及其影响因素研究. *地理科学*, 2014, 34(2): 220-228.]
- [23] Chen Guixing, Sha W, Iwasaki T, et al. Diurnal variation of rainfall in the Yangtze River Valley during the spring-summer transition from TRMM measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D6). doi: 10.1029/2011JD017056.
- [24] Jia Wenxiong, He Yuanqing, Li Zongxing, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of climate change in Qilian Mountains and Hexi Corridor. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(6): 1151-1155. [贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 祁连山及河西走廊气候变化的时空分布特征. *中国沙漠*, 2008, 28(6): 1151-1155.]
- [25] Joyce R J, Xie P, Yarosh Y, et al. CMORPH: A "morphing" approach for high resolution precipitation product generation//*Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*. Amsterdam: Springer Netherlands, 2010: 23-37.
- [26] Zhang Mengmeng, Jiang Zhihong. Analyses of high-resolution merged precipitation products over China. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18(4): 461-471. [张蒙蒙, 江志红. 我国高分辨率降水融合资料的适用性评估. *气候与环境研究*, 2013, 18(4): 461-471.]
- [27] Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(3): 487-503.
- [28] Shen Yan, Pan Yang, Yu Jingjing, et al. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China. *Transactions of Atmospheric Science*, 2013, 36(1): 37-46. [沈艳, 潘阳, 宇婧婧, 等. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估. *大气科学学报*, 2013, 36(1): 37-46.]
- [29] Shen Yan, Zhao Ping, Pan Yang, et al. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(6): 3063-3075.
- [30] Zhou Xuan, Luo Yali, Guo Xueliang. Application of a CMORPH-AWS merged hourly grided precipitation product in analyzing characteristics of short-duration heavy rainfall over southern China. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015, 31(3): 333-344. [周璇, 罗亚丽, 郭学良. CMORPH卫星—地面自动站融合降水数据在中国南方短时强降水分析中的应用. *热带气象学报*, 2015, 31(3): 333-344.]
- [31] Wang Hao, Luo Jing, Ye Jinyin, et al. Comparative analysis of area rainfall in Huaihe River Basin estimated by CMORPH-Gauge merged data and observed rain gauge data. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(3): 189-194. [王皓, 罗静, 叶金印, 等. CMORPH融合降水产品与地面观测雨量资料估算淮河流域雨量对比分析. *海河大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(3): 189-194.]

- [32] Kang Yanzhen, Chen Shihong, Zhang Ying, et al. Precipitation during 2008-2013 in the Kumtagh Desert and Altun Mountains. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(1): 203-210. [康延臻, 陈世红, 张莹, 等. 2008-2013 年库姆塔格沙漠及阿尔金山降水特征. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 203-210.]
- [33] Jiang Xiaoman, Yuan Huiling, Xue Ming, et al. Analysis of a torrential rainfall event over Beijing on 21-22 July 2012 based on high resolution model analysis and forecasts. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(2): 207-219. [姜晓曼, 袁慧玲, 薛明, 等. 北京“7.21”特大暴雨高分辨率模式分析场及预报分析. *气象学报*, 2014, 72(2): 207-219.]
- [34] Sun Meiping, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century: Based on the revised first and second Chinese glacier inventory. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1402-1414. [孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近 50 年来祁连山冰川变化: 基于中国第一、二次冰川编目. *地理学报*, 2015, 70(9): 1402-1414.]
- [35] Wang Puyu, Li Zhongqin, Gao Wenyu. Rapid shrinking of glaciers in the middle Qilian Mountain region of Northwest China during the last 50 years. *Journal of Earth Science*, 2011, 22(4): 539-548.
- [36] Tian Hongzhen, Yang Taibao, Liu Qinqing. Climate change and glacier area shrinkage in the Qilian mountains, China, from 1956 to 2010. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(66): 187-197.
- [37] Chen Zhikun, Zhang Shuyu, Luo Jiali, et al. Analysis on the change of precipitation in the Qilian Mountains. *Arid Zone Research*, 2012, 29(5): 847-853. [陈志昆, 张书余, 雒佳丽, 等. 祁连山区降水气候特征分析. *干旱区研究*, 2012, 29(5): 847-853.]
- [38] Pan Yang, Shen Yan, Yu Jingjing, et al. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China on the OI technique. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(6): 1381-1389. [潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验. *气象学报*, 2012, 70(6): 1381-1389.]
- [39] Yin Xianzhi, Zhang Qiang, Xu Qiyun, et al. Characteristics of climate change in Qilian Mountains region in recent 50 years. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(1): 85-90. [尹宪志, 张强, 徐启运, 等. 近 50 年来祁连山区气候变化特征研究. *高原气象*, 2009, 28(1): 85-90.]
- [40] Qiang Fang, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Estimation of areal precipitation in the Qilian Mountains based on a gridded dataset since 1961. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(1): 59-69.
- [41] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553-597.
- [42] Jia Wenxiong. Temporal and spatial changes of precipitation in Qilian Mountains and Hexi Corridor during 1960-2009. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 631-644. [贾文雄. 近 50 年来祁连山及河西走廊降水的时空变化. *地理学报*, 2012, 67(5): 631-644.]
- [43] Liang Hong, Liu Jingmiao, Chen Yue. Characteristics and cause of diurnal variation of precipitable water vapor derived from ground-based GPS in Qilian Mountains in summer. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(3): 726-736. [梁宏, 刘晶淼, 陈跃. 地基 GPS 遥感的祁连山区夏季可降水量日变化特征及成因分析. *高原气象*, 2010, 29(3): 726-736.]
- [44] Jin Xia, Wu Tongwen, Li L. The quasi-stationary feature of nocturnal precipitation in the Sichuan Basin and the role of the Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, 2013, 41(3-4): 977-994.
- [45] Hu Di, Li Yueqing. Spatial and temporal variations of nocturnal precipitation in Sichuan over the eastern Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 39(1): 161-179. [胡迪, 李跃清. 青藏高原东侧四川地区夜雨时空变化特征. *大气科学*, 2015, 39(1): 161-179.]
- [46] Fu Yuanhai. The projected temporal evolution in the interannual variability of East Asian summer rainfall by CMIP3 coupled models. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(8): 1434-1446.
- [47] Lv Xiang, Xu Haiming. Diurnal variations of rainfall in summer over the Indo-China Peninsula. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2007, 30(5): 632-642. [吕翔, 徐海明. 中南半岛地区夏季降水日变化特征. *南京气象学院学报*, 2007, 30(5): 632-642.]



## Diurnal variation of summer precipitation and its influencing factors of the Qilian Mountains during 2008-2014

LIU Xuemei, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie,

WANG Jie, ZHAO Peipei, ZHOU Panpan

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** To investigate the diurnal characteristics of precipitation in the Qilian Mountains during the summer of 2008-2014, the hourly mean precipitation, frequency and intensity were calculated using an hourly merged precipitation dataset derived from the national automatic weather stations and CMORPH (Climate Precipitation Center Morphing) product at a  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  resolution. In addition, the relative humidity and air temperature from ERA-Interim (European Reanalysis Interim) reanalysis database was also used to analyze the influence of meteorological variables on diurnal precipitation variation. The main results are as follows: (1) The spatial distribution and temporal variation of mean hourly precipitation and frequency are generally similar, and hourly precipitation in the eastern and central parts is larger and more frequent than that in the western part. On a monthly basis, the maximum values of precipitation and frequency usually occurred in July, while the minimum values usually occurred in August. The spatial distribution of precipitation intensity was different from that of amount and frequency, and the maximum was observed in June. (2) The increasing trends from west to east were detected for precipitation in both daytime and nighttime. The mountains usually had more precipitation in both daytime and nighttime, and the night rain was frequent for the study region. During 2008-2014, the precipitation in both daytime and nighttime increased. (3) The average relative change rate of precipitation was between 5%-38% with maximum value at 20:00 (Beijing Time). The hourly precipitation was significantly correlated with frequency, especially for the middle and eastern parts. (4) The reanalysis of data indicated that the diurnal variation of precipitation in the Qilian Mountains is related with other meteorological variables, such as relative humidity and air temperature.

**Keywords:** Qilian Mountains; summer; precipitation; diurnal variation