

文章编号: 2096-1618(2024)05-0589-08

# 四川省近60年夏季夜雨时空变化特征

董自正<sup>1</sup>, 毛文书<sup>1</sup>, 白磊<sup>2,3</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 四川 成都 610225 ;2. 海南大学生态与环境学院 海南 海口 570208;  
3. 海南省农林环境过程与生态调控重点实验室,海南 海口 570208)

**摘要:**为更有效地对四川省近60 a夏季夜雨的时空变化特征进行分析与研究,利用四川省126个气象台站1961–2019年的逐日降水数据资料,采用线性趋势估计法、Mann-Kendall突变检验、Morlet小波分析法和旋转经验正交函数分解(EOF)等方法,分析四川省夏季夜雨的时空变化特征。结果表明:四川省夏季夜雨量的空间分布为东多西少、南多北少型,四川省大部地区夜雨率占50%以上,最高的川南和雅安等地夜雨率可达70%以上,夏季夜雨量整体呈下降趋势,空间分布为西增东减,夜雨相对变率大值中心出现在川东北部,其相对变率数值在2倍以上,最高值中心的阆中、剑阁和旺苍3地可达到6倍。四川省夏季夜雨量 EOF 分析表明可以分为川西高原区(I区)、川西南山区(II区)、川西北区(III区)、川东南区(IV区)和川东北区(V区)。四川省夏季夜雨量长期变化趋势显著,其中I、II、V区夏季夜雨量呈现明显上升趋势,III、IV区夏季夜雨量则出现下降趋势。上述各区域夜雨量突变的时间点主要发生在1970年代附近,四川省夏季夜雨量变化周期特征为长周期内包含有短周期并存在周期性的振荡,且在5个区域内夏季夜雨的变化周期以20~30 a及5~10 a的周期最普遍。

**关键词:**四川省;夏季夜雨;EOF;变化趋势;小波分析

**中图分类号:**P463.1

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2024.05.011

## 0 引言

据IPCC第六次评估报告指出,以2010–2020年代的历史排放趋势来看,全球温室气体排放量持续增加,年均排放量高于以往任何10年平均,但其增长速度有放缓趋势<sup>[1]</sup>。全球气候变暖的趋势日益明显,预计这一状况将持续到2100年及更长时间。工业革命以来,全球气候变暖的影响力不断加剧,大气温度不断上升,导致气候极端事件频发。夜间降雨是一种特殊的降雨现象,即20:00–8:00的降水量多于8:00–20:00降水量。这种现象的形成受季风、中尺度对流系统、地形特征以及其他气候因素的共同影响。夜雨是一种极具影响力的气候现象,不仅可以反映出该地区的气候变化,还可以用于气候研究。研究表明,夜雨存在于世界上许多地区,较为显著的地区有:北美落基山脉和阿巴拉契亚山脉之间的中部平原、中国青藏高原及其周边地区,如拉萨、青藏高原东侧的云贵川区域。由于受青藏高原地区复杂地形的影响,独特的地域特色令青藏高原及附近地区的夜雨现象为全世界所关注。随着社会经济水平的不断发展和进步,气象灾害造成的各种损失也在不断增加,除地中海气候外,夏季降水占全年降水的

比重极大,同时四川省大多又属山地地形,夜间降雨量较大,高夜雨频率与山地地形的结合,极易在夜间诱发山洪、泥石流等地质灾害,夜间灾害给人们带来的经济损失和人身危害更为严重,且给防灾减灾工作带来很大阻碍。目前对于四川省夏季夜雨的相关研究较少,四川夏季夜雨的变化特征及其时空变化成因研究还需进一步深入,夏季汛期的夜雨天气预报水平仍不能满足国家层面对于防灾减灾的要求。因此,研究四川省夏季夜雨变化特征及成因,不仅有利于开发利用当地的农业气候资源,更有利于进一步加深对于四川省夜雨变化规律的认识,并做好对汛期降水预报工作的理论指导作用。

四川省(26°N~35°N,97°E~109°E)地处青藏高原与长江中下游之间,特殊的地理状况及特殊的中亚季风、东南亚季风乃至青藏高原的全球大气季风环流<sup>[2]</sup>,使其成为一个具有独特亚洲季风特征的省份,受季节性气候变化及其复杂地质构造的深远影响,“巴山夜雨”已是中国古代历史上一个深入人心的概念<sup>[3]</sup>。四川盆地的夜雨量占年降水量的70%以上,与同纬度的青藏高原和长江中下游地区相比较,形成明显的差异,夜雨成为四川地区降水日变化的一种独特性区域特点。目前对四川地区夜雨展开了一些研究。根据余忠水等<sup>[4]</sup>的研究,夜雨的空间分布很有可能与周围的地貌有关,尤其是与周围的山脉或盆地有关。

收稿日期:2023-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(32260294)、高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放研究基金资助项目(SZKT202105)

胡迪等<sup>[5]</sup>研究表明四川地区的夜雨具有明显区域性特征,且存在明显的高值和低值区域。范江琳等<sup>[6]</sup>研究结果显示,青藏高原的地形复杂多变,加上大气环流的交互影响,使四川地区具有独特的气候特征。四川地区的夜雨降水频次随时间呈现明显的单峰特征,02:00–05:00为峰值时段。张博等<sup>[7]</sup>研究表明四川地区夜晚的年降水量存在一个周期且无明显突变。四川大部分地区夜雨率超过60%,雅安、乐山高达72%。在夏季的夜晚,四川各地的降水量与东亚夏季风指数存在着明显的负相关性,特别是雅安等地。

本文旨在深入探讨四川省内不同区域夏季夜雨的时空分布特征,通过对126个气象站点近60 a的逐日降水数据集的分析,揭示夜雨的空间分布、演变周期及长期变化趋势。采用旋转经验正交函数(EOF)分解,更清晰地把握四川省夜雨变化划分为几个独立的区域,更细致地研究这些区域内夏季夜雨的时空变化规律。

## 1 资料和方法

为研究四川省1961–2019年近60 a夏季(6–8月)夜雨变化特征,选取四川省126个气象观测站点,其台站的海拔高度分布如图1所示。高海拔区域为甘孜、阿坝、凉山和攀枝花4地,平均海拔高度大于2500 m,其余地区为低海拔地区。采用省126气象台站逐日降水数据集(包括20:00–08:00(夜雨),08:00–20:00(昼雨),20:00–20:00(日雨)3个时段),通过对每个站点6–8月逐日降水资料数据集分析获得每个站点的夏季夜雨量、昼雨量及日雨量数据集,以便更好地分析四川省夏季夜雨的时空变化特征。然后,使用旋转经验正交函数(EOF)分解对这些数据进行分区,确定夏季夜雨的高载荷区从而进行本区域内的空间分区,然后对不同空间分区域内的数据结果进行线性趋势分析、MK突变分析以及小波分析。经由对比分析,发现夏季夜间的降水量会随着时间的推移而发生变化,并且这种变化可能会在某些特定的时间段出现突变。

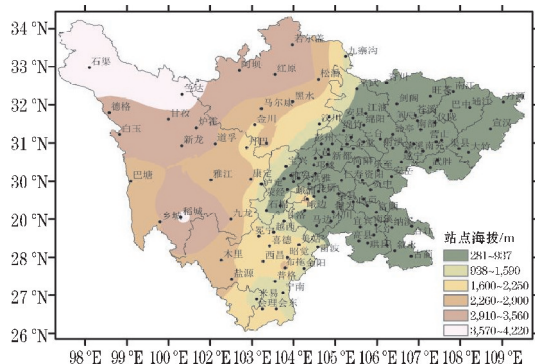


图1 四川省126个站点及海拔分布图

## 2 四川省夏季夜雨的空间变化

### 2.1 夏季夜雨量的空间分布

四川省近60 a夏季夜雨量空间分布见图2。由图2可知:近60 a以来四川省夏季夜雨量空间分布不均,四川省夜雨量空间分布呈西高东低型,夏季夜雨量分界线大致与四川地形分界线一致,沿马尔康—康定—九龙一线相重叠,夜雨量也相应的呈现为东多西少、南多北少、川西高原少于四川盆地地区,四川省夏季夜雨量的高值区出现在西南山地及四川盆地西侧,夜雨量的峰值区集中在米易、会理与雅安、眉山等地,夜雨量达800 mm以上。曾庆存等<sup>[8]</sup>、李跃清等<sup>[9]</sup>关于“雅安天漏”的研究表明,夜间降水的强度一般会在午夜时刻达到最高,并且表现出明显的夜间降水特征。夏季夜雨量的低值区则分布在川西高原地区,夜雨量普遍在300~500 mm。

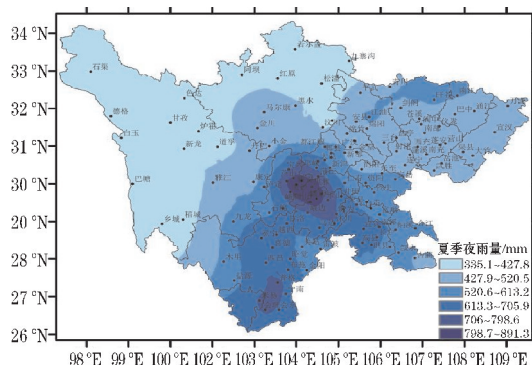


图2 四川省近60 a夏季夜雨量的空间分布

### 2.2 四川省夏季夜雨率

夜雨率表示夜雨量与日雨量之间的比率,由四川省夏季夜雨率空间变化(图3a)可知:四川省夏季夜雨率总体呈现为川东南高、川西其次、川东北最低的空间分布型态,除川东北地区夜雨率在50%左右外,其余地区夜雨率均达到60%以上,尤其是川西南山地的米易、会理和盆地西侧的雅安及周围地区,夜雨率均达到70%左右,这与段春锋等<sup>[10]</sup>的研究结果相似。总体来看,四川省夏季夜雨率都在50%以上,说明四川省夜雨占日降水总量的比例很高。

由四川省夏季夜雨量与昼雨量比率(图3b)可知:四川省夏季的夜雨量远高于昼雨量,除川东北部分地区外,四川省绝大部分地区夜雨量都远高于昼雨量,即四川省夏季降水主要是以夜雨为主。夜雨与昼雨比率的空间分布与四川省夏季夜雨率的空间分布大致相

似,尤其是在四川盆地的西侧地区,夜雨与昼雨比率普遍都在 2 倍以上,部分地区如越西、冕宁、金川、丹巴等地,其夏季夜雨量是昼雨量的 3 倍多。这表明在四川盆地的西南侧,夏季夜雨发生的概率与省内其他地区相比要大很多。

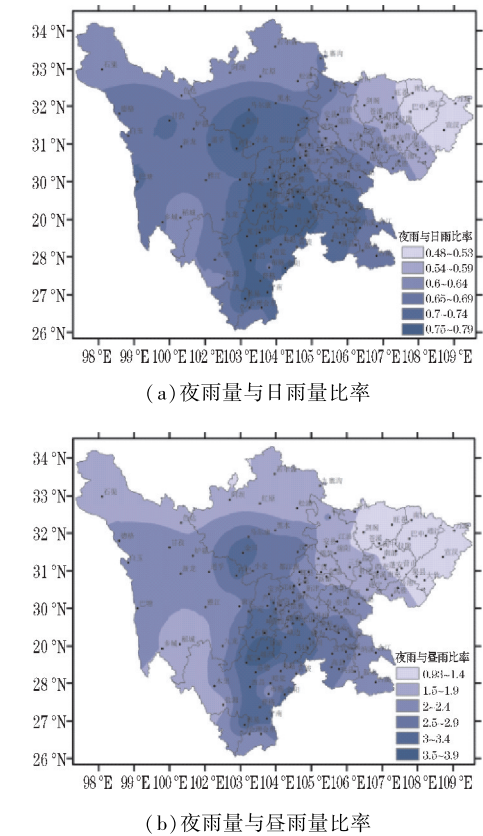


图 3 四川省夏季夜雨量与日雨量比率及与昼雨量比率

2.3 四川夏季夜雨量变化趋势及相对变率

由四川省夏季夜雨量趋势系数(图 4a)可知四川省近 60 a 夏季夜雨量变化趋势存在明显的分界线,且此分界线与四川省地形分界线也相似。分界线以西的川西高原地区,夜雨趋势系数都呈增长趋势;分界线以东的四川盆地大部地区,夜雨趋势系数呈减少趋势。分界线以西,除川西高原的南部地区夜雨降水趋势有所减少外,整个川西高原地区近 60 a 的夜雨都呈增加趋势,尤其是集中在越西地区和甘孜州、阿坝州的交界地带。分界线以东,除川东北地区夜雨趋势表现为增加趋势,四川盆地地区近 60 a 夜雨趋势都呈明显减少态势,尤其是处于川西高原和四川盆地的地形交接地,夜雨趋势的减少态势尤为明显。

夜雨量相对变率也是一个重要的指标,反映一段时间内降水量的变化情况,用来评估降水的稳定性。由四川省夏季夜雨量相对变率(图 4b)可知:四川省夏季夜雨量相对变率的负值区位于攀枝花和凉山州南

部、雅安、阿坝州大部分地区,相对变率数值小,表明此地的夜雨变化相对稳定且波动较小。川西高原大部分地区降水相对变率数值在 1~2 倍,而四川盆地大部分地区尤其是东北部降水相对变率数值在 2 倍以上,最高达到 6 倍,表明这些区域日雨量变化幅度和波动大。以上分析表明四川省夏季夜雨的空间变化存在较大差异,有必要进行更细致地分区以揭示其区域变化特征。

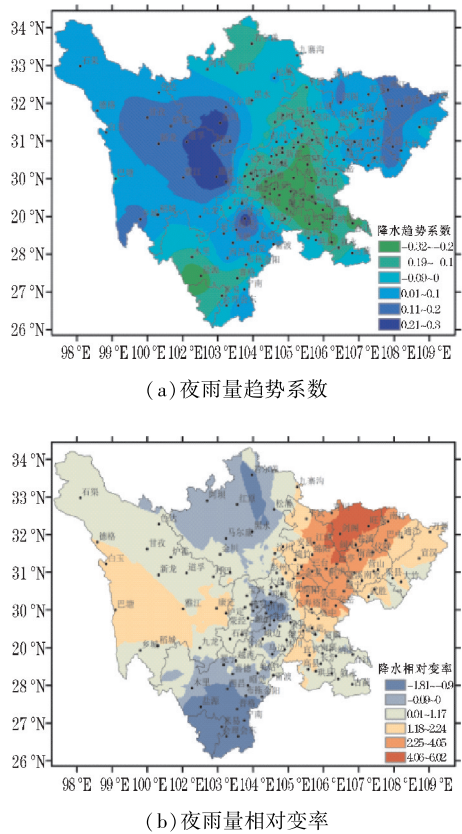


图 4 四川省夏季夜雨量趋势系数及相对变率

2.4 四川夏季夜雨量的 REOF 分解

通过对四川省夏季夜雨数据进行旋转经验正交函数(EOF)分解发现,前 4 个特征向量场可以有效地反映四川省的空间分布特征,其累计方差贡献率高达 62%,有助于更深入地研究四川省夏季降水的空间变化规律。根据图 5(a~d)可以看出前 4 个模态的高载荷区(特征值绝对值超过 0.3)结合四川省的地形和海拔等重要因素,将四川省夜雨变化分为 5 个区域(图 5e): I 区包含甘孜州、阿坝州在内的川西高原区, II 区包含西昌、攀枝花等地区的西南山地区。I 和 II 区主要受到高原季风的影响,王颖等<sup>[11]</sup>讨论了夏季高原季风强度和中心经度位置对中国西南地区气候特别是降水方面的影响,当高原季风偏强时,降水也随之变多。I 区、II 区同属川西高原地区, I 区的夜雨量和夜雨率相比 II 区要少,但夜雨降水趋势和降水相对变率



则增加,胡豪然等<sup>[12]</sup>将西南区域划分为几部分进行的研究,其中夏季降水在川西高原北部呈增加趋势,这与前文分析一致。将川西高原大致划分为南、北两区域,两地气候特征有明显不同,充分体现了川西高原海拔的地理因素对本区降水的影响。Ⅲ区是川西北区,夜雨量最大,夜雨现象最明显的地点位于雅安附近。段春锋等<sup>[10]</sup>发现,雅安地区的夜雨现象更加普遍,与当地的地貌有关。雅安山区盆地独有的地貌结构,使不同的山峰、山坡之间的温度变化,并产生局部空气循环,造就了雅安的夜雨现象。张博等<sup>[7]</sup>也发现,雅安

的降水量过高,与当地的地貌、空气循环有关。Ⅳ区为川东南区,由于受西太平洋副热带高压(以下简称副高)的影响,副高的东西变化对四川东南地区的降水具有明确的正相关性,即当它朝西方倾斜,四川东南地区的降水就会更丰富<sup>[13]</sup>。Ⅴ区为四川东北部区,Ⅴ区夜雨变化呈现增加趋势,而其余地区的降水趋势都呈现为减少。近年来,熊光洁等<sup>[14]</sup>发现,川东渝北和川西高原地区夏季降水量大幅度增加,而四川盆地的降雨量却有所下降。

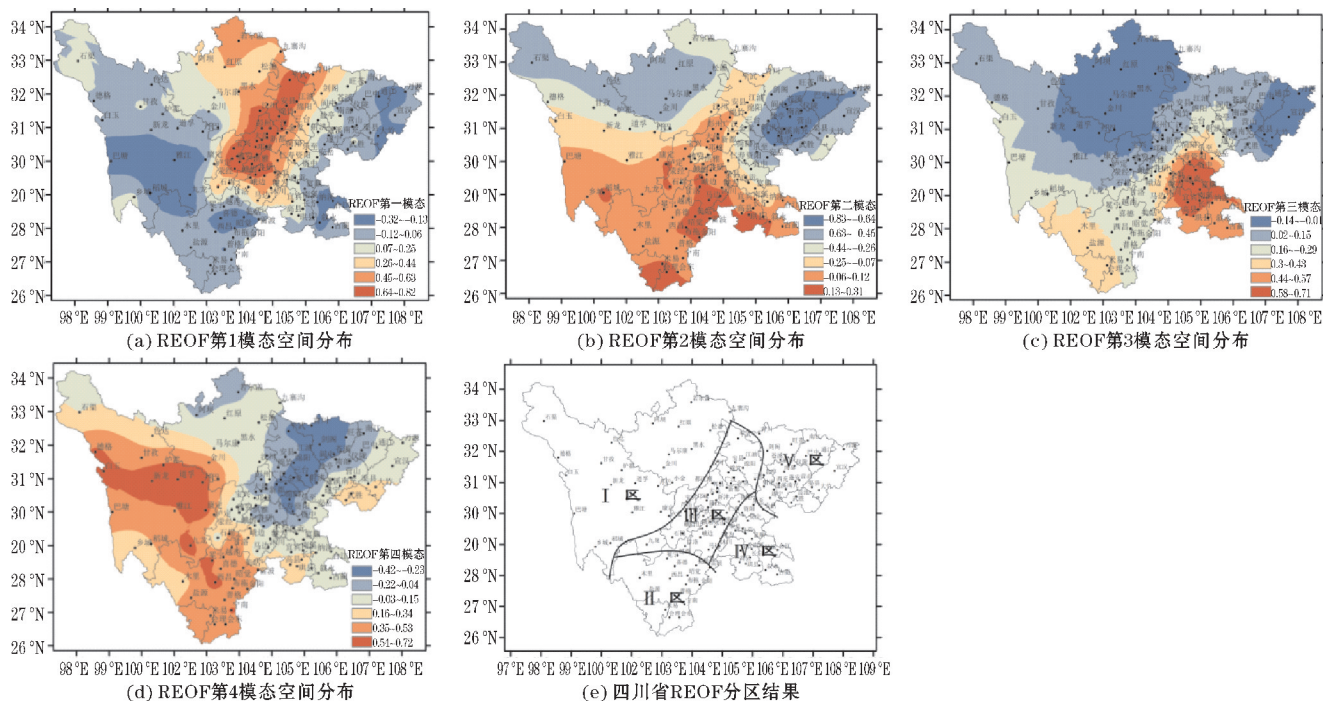


图5 四川夏季夜雨 REOF 前4个模态空间分布与分区结果

### 3 四川省各区夏季夜雨量的时间变化特征

#### 3.1 川西高原区(Ⅰ区)

根据分区结果,利用5个区域的夏季夜雨量,研究各个区域夏季夜雨的时间变化特征。根据图6(a)显示,Ⅰ区川西高原区夏季夜雨量显著增加,其年代际变化率达到1.418 mm/10 a,这与胡豪然等<sup>[12]</sup>将西南地区划分为多个区域的研究结果相符,在过去的几十年中,夏季夜雨量一直在增加,在1980年代末至2010年代中期,夜雨量呈现出波动性,该区域夏季夜雨量的最小值出现在1971年和1997年,最大值出现在1998年。由图6(b)可知,在1960年代中后期到至1980年代前期,UF统计量为负值,表明该区域在这段时间内

夏季夜雨量总体呈现下降的趋势,从1980年代中期至今,UF统计量基本上都是正值,说明该区域在此时间段夏季夜雨量呈上升趋势。根据UF和UB曲线的交点可以推断出,这一地区夏季夜雨量在1961年、1965–1967年、1981年、1985年、1991–1998年、2001–2005年和2008–2015年均有变化,且这些交点均处于显著水平线之内,从图像来看,这些突变时间点的变化并不显著。由图6(c)得出该地区存在准5 a、10 a、25 a以下的变化周期,5 a以下周期并不很明显。从1970年代中期开始到2010年左右,5~10 a经历了一段时间的多—少—多的准3 a周期性波动,但总体上周期性变化相对稳定。15~25 a的时间尺度,则是从1960年代中期持续到1995年,经历了多—少—多—少的准8 a周期震荡,而且由图可以看出到2020年本区域夜雨量呈持续增加趋势<sup>[15]</sup>。



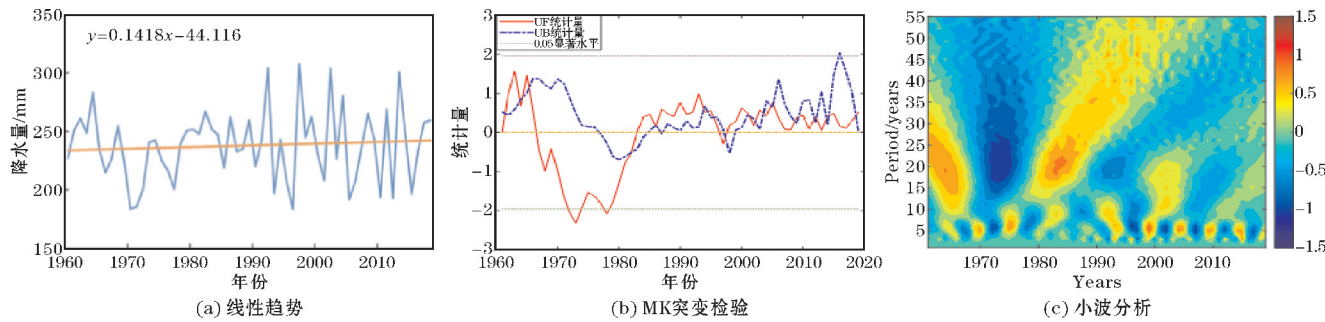


图 6 川西高原区夜雨量的线性趋势、MK 突变检验及小波分析

3.2 川西南山地区(Ⅱ区)

根据图 7(a)Ⅱ区川西南山地夏季夜雨变化情况表明,其变率约为 3.778 mm/10 a,从 1980 年代到 2000 年代,夏季夜雨量的增加趋势趋于稳定,其中在 1972 年夏季夜雨量最低,最大值则出现在 1998 年。由图 7(b)可知该地区夏季夜雨在 1961–1962 年、1965–1972 年、1978 年、2005–2010 年均存在突变。1978 年夏季夜雨量出现了突变,突变后呈增加趋势,但并未超出 0.05 的置信区间,说明此时夏季夜雨量变化幅度

并不是特别明显。上述所有的突变点都位于显著性水平线之内,表明上述交点显示的时间节点都是不显著突变,且该地区存在准 10 a、20 a、35 a 以下的降水周期。由图 7(c)可以看出 10 a 以下的周期变化并不明显,10~20 a 的时间尺度则是从 1970 年代中期至 2010 年,经历了多—少—多—少交替的准 5 a 周期震荡,贯穿全程且趋势稳定,20~35 a 的周期是从 1970 年代中期至 2000 年代前期,经历了少—多—少的准 12 a 周期震荡,由此趋势可以推测未来一段时间直到 2030 年左右该地区的夜雨量都极可能呈现增长趋势。

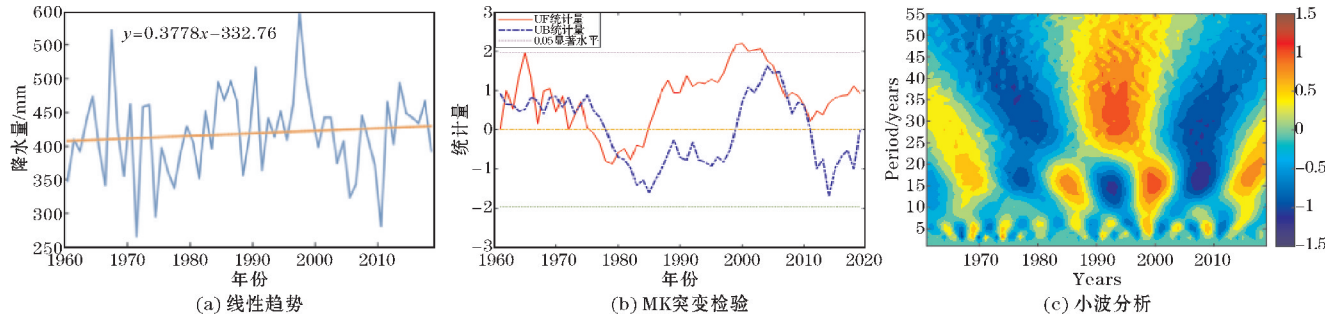


图 7 川西南山地区夜雨量的线性趋势、MK 突变检验及小波分析

3.3 川西北区(Ⅲ区)

根据图 8(a)显示,Ⅲ区夏季夜雨量显著减弱,其变化率达到 -11.501 mm/10 a,从 1980 年代初到 1990 年代末,本区域夏季夜雨量呈减少趋势,1970 年代中期和 2000 年代初开始夏季夜雨量都呈现为波动减少的状态。从总体上可以看出本区域夜雨量逐年波动递减,最大值出现在 1961 年,最小值出现在 2015 年,由此极值点也可看出本区域降水趋势呈减少状态。分析图 8(b)可知该区域夜雨降水在 1962 年、1965 年、1872 年、1975 年、

1980 年、1985 年、1989 年存在突变,在 1989 年发生突变后,本区域降水呈减少趋势,但也未超过 0.05 的置信区间,且上述所有突变点都位于显著性水平线内,故上述交点显示的时间节点都是不显著突变。分析图 8(c),该地区存在有准 5 a、15 a、30 a 以下的降水周期,5 a 以下周期的变化并不明显,10~15 a 周期存在于 1960 年代中期至 2090 年代,并存在有多—少—多—少相互交替的准 6 a 周期震荡,20~30 a 的周期变化出现于 1960 年代中期至 2018 年,经历了多—少—多—少—多的准 12 a 周期震荡,并且周期内的变化稳定。

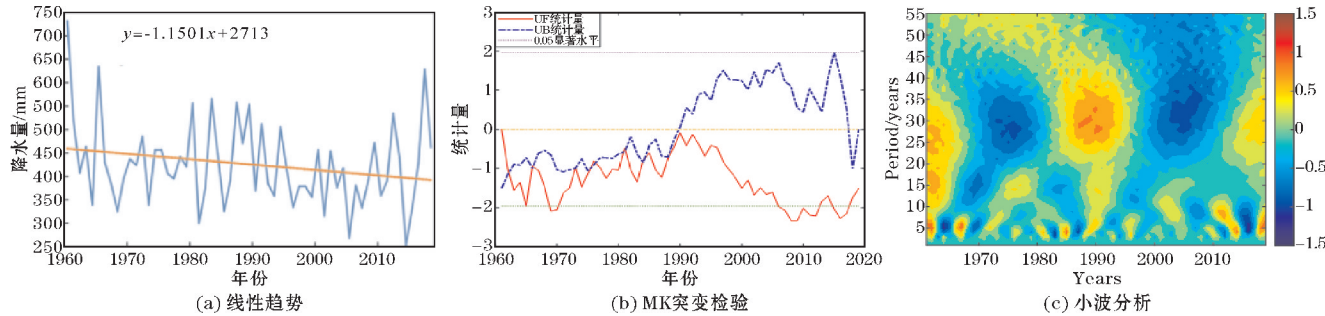


图 8 川西北区的线性趋势、MK 突变检验及小波分析

### 3.4 川东南区(Ⅳ区)

Ⅳ区夜雨特征如图9(a)所示,整个区域的夏季夜雨量有下降趋势,年代际变率为 $-8.937\text{ mm}/10\text{ a}$ ,1970年代中期到1980年代中后期该地区夏季夜雨量呈减少趋势,1960年代初到1970年代初及1990年初到2019年,夏季夜雨量则呈波动型变化,最小值出现在1994年,最大值出现在1998年。由图9(b)可知,自1965年以来,该地夜雨量变化剧烈,此时间点后夜

雨量减少甚至超出0.05的置信区间,表明从1970年代到1980年代,夜雨量下降趋势非常明显。分析图9(c),该区域存在有准5 a、10 a、25 a以下的降水周期,其中5 a以下的周期变化并不明显,特征时间尺度在5~10 a之间则存在于1970年代中期至1980年代,并有着3 a的小周期变化,且在此期间其周期变化不稳定,10~25 a周期变化存在于1960年代中期至2000年代,其周期震荡频率为8 a。

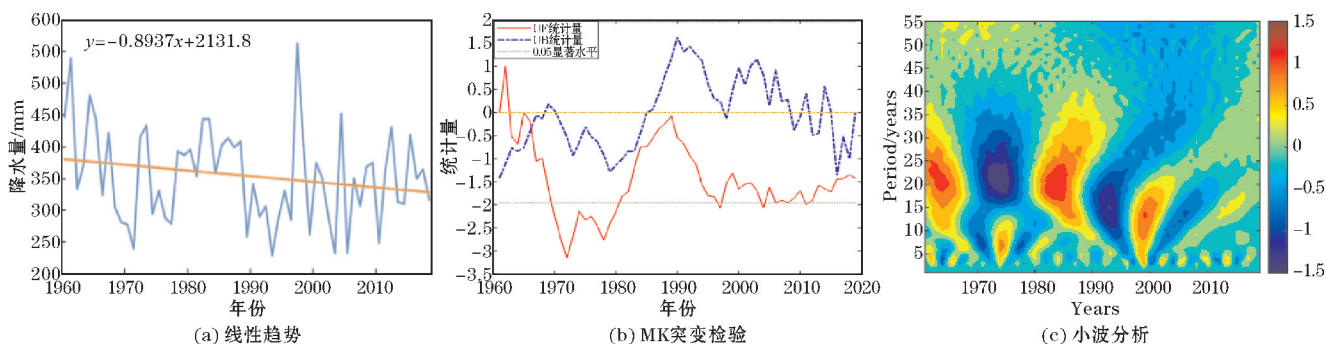


图9 川东南区夜雨量的线性趋势、MK突变检验及小波分析

### 3.5 川东北区(Ⅴ区)

Ⅴ区夜雨特征如图10(a)所示,夜雨量整体呈上升趋势,年代际变化率为 $7.456\text{ mm}/10\text{ a}$ ,这与熊光洁等<sup>[14]</sup>研究的结果一致。整个川东地区,除川东北之外,降水都呈现下降趋势,只有川东北呈上升趋势。从1960年代中期开始,夜雨量逐渐减少,直至1970年代末。而在1960年代初至中期和1980年代初至2019年,夜雨量出现了波动性的增长。其中夏季夜雨量的最大值则出现于1981年,最小值出现在2006年,由图10(b)可知此区域突变点发生在1980年,并且在突变之后呈增加趋势;在1985年也发生了突变,且突变后也同样呈增加趋

势;1995–2000年发生突变,同时在2015年也存在有突变点,但在这几个突变后无明显趋势,趋近于平稳状态。上述突变点全部都位于显著性水平线之内,故上述交点显示的时间点都是不显著突变,且分析图10(c)后,该地区存在有准5 a、10 a、30 a以下降水周期,其中5 a以下的周期变化并不显著,时间尺度5~10 a的变化周期呈现于1970年代中期至2000年代初,周期内有4 a的交替变化周期,且贯穿整个过程,在10~30 a的时间尺度上变化周期则主要存在于1970年代中期至2010年,周期为8a且变化周期比较稳定。由图10(c)可以推测出未来一段时间直到2030年左右,此区域内的夜间降雨量仍呈现增加趋势。

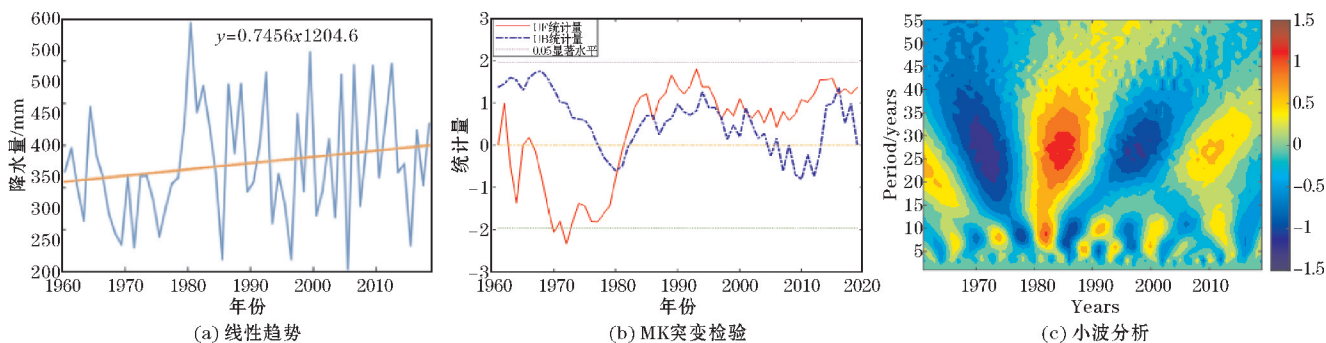


图10 川东北区夜雨量的线性趋势、MK突变检验及小波分析

## 4 结论和讨论

利用四川省126个气象台站1961–2019年共59年

的逐日降水量数据,采用旋转经验正交函数(REOF)分解、线性趋势分析、MK突变分析以及Morlet小波分析的方法,对四川省夏季夜雨量的空间分布和夜雨变化趋势进行分析,通过REOF分解把四川省分为5个区域,

并对5个区域分别研究,得到的主要结论如下。

(1)近60 a以来,四川省的夏季夜雨量总体呈下降趋势,四川省夏季夜雨量主要有2个降水高值区域,分别是川西南山地的米易、会理附近及四川盆地西缘的雅安、眉山地区,夜雨量极值点超800 mm,且在高值区附近降水梯度较大。西侧川西高原地区的夏季夜雨量则普遍较少,年平均夏季夜雨量不超过500 mm,分布也比较均匀。从总体上来看,四川省夏季夜雨量自东南向西北方向呈现逐步减小。四川省的夏季夜率总体呈现为川东南高、川西北低,尤其是川东北地区最低,为50%左右,最高处的川南和雅安等地可达70%。且四川省夜雨量变化趋势也存在明显分界线,川西夜雨量呈增长趋势,川东大部分地区夜雨量呈减少趋势,但川东北地区近年来夜雨量波动大且呈明显增加趋势。

(2)通过REOF分解并综合考虑地形等其他因素的情况下,将该省夜雨量变化划分为5个区域,其中Ⅰ区(川西高原区)、Ⅱ区(川西南山地区)和Ⅴ区(川东地区)夏季夜雨量呈长期变化的上升趋势,而Ⅲ区(川西北区)和Ⅳ区(川东南区)夏季夜雨量则呈现出相反的长期变化下降趋势。

(3)夏季夜雨量突变在四川省的5个区域中都有所体现,其中Ⅰ区的变化主要出现在2000年和2012年左右,Ⅱ区的变化主要出现在1970年前后和2006年,Ⅲ区的变化主要出现在1974年以后,Ⅳ区的变化则出现在1965年,并且在1969年突变后,降水量的减少趋势超过0.05的置信区间,夏季夜雨的降水量显著减少,Ⅴ区的变化出现在1985年左右和1995年前后。5个区域内夏季夜雨的突变年份主要集中在1970年代及2000年代初期。

(4)四川省的夏季夜雨量存在周期性特征并有周期性震荡,在5个区域内,夏季夜雨量的变化周期主要以20~30 a及5~10 a的周期最为普遍存在:Ⅰ区主要存在准5 a、10 a、25 a以下的变化周期;Ⅱ区主要存在准10 a、20 a、35 a以下的变化周期;Ⅲ区主要存在准5 a、15 a、30 a以下的变化周期;Ⅳ区主要存在准5 a、10 a、25 a以下的变化周期;Ⅴ区则主要存在着准5 a、10 a、30 a以下的变化周期。

由于青藏高原地区复杂地形地貌的影响及控制四川省的周围洋流系统有着多样性和复杂性,使四川省夏季降水分布存在很大的不同。本文的研究只是通过各种诊断分析方法讨论了四川省几个区域夏季夜雨的空间分布特征以及时间变化特征,对于其他方面如在如今全球变暖的气候大背景之下,大气环流对区域性

降水差异是否产生影响、产生怎样的影响、影响本区域夏季夜间降雨差异的主要原因究竟是洋流还是地形的影响等问题并未做出详细的研究和讨论,但是有关问题的研究对指导本区域的天气预报及防灾减灾工作有重要影响,值得更加深入的讨论与研究。

致谢:感谢海南大学科研基金项目(KYQD(ZR)-22083)对本文的资助

## 参考文献:

- [1] 梁媚聪,秦圆圆,樊星,等. IPCC第六次评估报告第三工作组报告主要结论解读及对策建议[J]. 环境保护,2022,50(13):72-76.
- [2] 徐裕华,王宗德,王明,等. 西南气候[M]. 北京:气象出版社,1991:19-22.
- [3] 吕炯. 巴山夜雨[J]. 气象学报,1942(Z1):36-53.
- [4] 余忠水,康世昌,蒋建莹. 青藏高原夏季夜雨率空间分布及其变化特征[J]. 山地学报,2011,29(5):627-632.
- [5] 胡迪,李跃清. 青藏高原东侧四川地区夜雨时空变化特征[J]. 大气科学,2015,39(1):161-179.
- [6] 范江琳,曹萍萍,冯良敏,等. 1961-2018年四川盆地夜雨特征分析[J]. 高原山地气象研究,2019,39(4):24-30.
- [7] 张博,李国平. 全球气候变暖背景下四川地区夜雨的变化特征[J]. 中国科技论文,2015,10(9):1111-1116.
- [8] 曾庆存,宇如聪,彭贵康,等. “雅安天漏”研究Ⅲ:特征、物理量结构及其形成机制[J]. 大气科学,1994(6):649-659.
- [9] 李跃清,张晓春. “雅安天漏”研究进展[J]. 暴雨灾害,2011,30(4):289-295.
- [10] 段春锋,曹雯,缪启龙,等. 中国夏季夜雨的空间分布特征[J]. 自然资源学报,2013,28(11):1935-1944.
- [11] 王颖,李栋梁. 变暖背景下青藏高原夏季风变异及其对中国西南气候的影响[J]. 气象学报,2015,73(5):910-924.
- [12] 胡豪然,梁玲. 近50年西南地区降水的气候特征及区划[J]. 西南大学学报(自然科学版),2015,37(7):146-154.
- [13] 晏红明,王灵. 西北太平洋副高东西变动与西南地区降水的关系[J]. 应用气象学报,2019,30(3):360-375.



- [14] 熊光洁,王式功,尚可政,等. 中国西南地区近50年夏季降水的气候特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2012,48(4):45-52.
- [15] 高焕昕,毛文书,师春香,等. 近60 a 西南雨季降水变化特征[J]. 成都信息工程大学学报,2022,37(1):88-95.

## Temporal and Spatial Variations of Summer Night Rain in Sichuan Province in the Last 60 Years

DONG Zizheng<sup>1</sup>, MAO Wenshu<sup>1</sup>, BAI Lei<sup>2,3</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, CUIT, Chengdu 610225, China; 2. College of ecology and environment, Hainan University, Haikou 570208, China; 3. Key Laboratory of Agro-Forestry Environmental Processes and Ecological Regulation of Hainan Province (Hainan University), Haikou 570208, China)

**Abstract:** To effectively analyze and study the temporal and spatial variation characteristics of summer night rain in Sichuan Province over the past 60 years, the daily precipitation data of 126 meteorological stations in Sichuan Province from 1961 to 2019 were used to analyze the temporal and spatial variation characteristics of summer night rain in Sichuan Province in detail by using linear trend estimation, Mann Kendall mutation test, Morlet wavelet analysis and rotating empirical Orthogonal functions decomposition (REOF) and other methods. The results show that the spatial distribution of summer night rain in Sichuan Province is more in the east and less in the west, and more in the south and less in the north. The night rain rate in most areas of Sichuan Province accounts for over 50%, with the highest night rain rates in southern Sichuan and Ya'an reaching over 70%. The overall trend of summer night rain is decreasing, with a spatial distribution of increasing in the west and decreasing in the east. The center of the relative variability of night rain is located in northeastern Sichuan, with a relative variability value of over 2 times, and the highest value is located in Langzhong, Jiange, and Wangcang can reach up to six times. The REOF analysis of summer night rainfall in Sichuan Province shows that it can be divided into the western Sichuan plateau region (Zone I), the southwestern Sichuan mountain region (Zone II), the northwestern Sichuan region (Zone III), the southeastern Sichuan region (Zone IV), and the northeastern Sichuan region (Zone V). The Secular variation trend of summer night rainfall in Sichuan Province is significant. The summer night rainfall in areas I, II, and V shows an obvious upward trend, while the summer night rainfall in areas III and IV shows an opposite downward trend. The time points of sudden changes in night rain in the above regions mainly occurred near the 1970s. The cycle characteristics of summer night rain in Sichuan Province are characterized by long periods containing short periods and periodic oscillations, and the cycle of summer night rain in the five regions is most common with periods of 20-30 years and 5-10 years.

**Keywords:** Sichuan Province; summer night rain; REOF; changing trends; wavelet analysis