

引用格式:李双双,胡佳岚,何锦屏,延军平. 秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量时空变化及其影响因素[J]. 山地学报,2023,41(3): 399-410.

LI Shuangshuang, HU Jialan, HE Jinping, YAN Junping. Spatiotemporal variation of diel composite precipitation in summer and influencing factors over the north and south of Qinling Mountains in China [J]. Mountain Research, 2023, 41(3): 399-410.

# 秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量时空变化及其影响因素

李双双,胡佳岚,何锦屏,延军平

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院,西安 710119)

**摘要:** 全球变暖趋势下,夏季昼夜复合高温频发,连续性降水减少,导致夏季降雨季节内昼夜配置关系发生改变。秦岭是中国重要的南北地理分界线。研究发现,近年来,秦岭南北 35.0% 的区域昼夜复合高温呈现显著增加趋势。然而,针对中国秦岭南北过渡带气候变化研究,过去以分析降水时空变化趋势为主,对全球变暖背景下昼夜降水组合的复杂性关注不足。本研究基于秦岭南北 72 个气象站点逐日降水数据,采用 BG 突变检测、趋势分析、投影寻踪回归模型等方法,对 1970—2020 年秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量时空变化特征进行分析,探讨关中平原、秦岭南坡和汉江谷地昼晴夜雨雨量变化的影响因素。结果表明:(1)1970—2020 年,秦岭南坡(3.08 mm/10a)和汉江谷地(3.10 mm/10a)夏季昼晴夜雨雨量显著增加,两者变化速率高于关中平原(1.14 mm/10a)。(2)1970—1982 年,秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量异常格局呈现“北多南少”,秦岭南坡、汉江谷地东段是昼晴夜雨偏少的集中分布区;1983—2020 年,昼晴夜雨空间格局经历了“一致偏少”向“一致偏多”转变,秦岭南坡和汉江谷地昼晴夜雨雨量增加尤为明显。(3)秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量主要受白天温度的影响。当夏季昼晴夜雨发生同期累积最高温增加 10℃,昼晴夜雨雨量增加 0.90 mm。本研究结论启示,夏季极端高温正在改变中国南北过渡带降雨昼夜形态,将增加区域水资源调配、粮食生产、生态服务等风险,上述结果可为区域综合风险防范体系构建提供理论依据与方法参考。

**关键词:** 气候变化;降水日变化;昼晴夜雨;时空分析;秦岭

**中图分类号:** P467

**文献标志码:** A

夜雨,是独特的气候资源,也是区域气候特征重要的刻画指标<sup>[1]</sup>。在中国,夏季夜雨峰值存在明显的地域分异规律。其中,东南、东北地区降水日变化表现为下午单峰型;青藏高原大部分为午夜单峰型;中东部为清晨和午后双峰型<sup>[2]</sup>。许多学者关注夜雨的区域差异性,对青藏高原<sup>[3]</sup>、四川盆地<sup>[4]</sup>、祁连山区<sup>[5]</sup>、新疆<sup>[6]</sup>、淮河<sup>[7]</sup>、长江流域<sup>[8]</sup>等夜雨时空变化特征进行了研究,探讨了不同区域夜雨异常的环流机制。值得关注的是,全球变暖背景下,夏季昼夜复合高温增加<sup>[9-11]</sup>,连续性降水减少,导致夏季降

雨季节内昼夜配置关系发生改变。然而,现有研究对昼夜降水组合的复杂性关注不足。在定义上,将昼夜连雨与昼晴夜雨简单合并为“夜雨”,易忽略两者形成环流机制的差异,进而低估区域变暖与夜雨异常的响应关系。因此,细分持续型和单日型夜雨,分析昼晴夜雨时空变化规律及其影响因素,其对系统认知气候变化与区域响应规律具有重要的现实意义。

秦岭是中国重要的南北地理分界线,是南水北调、引汉济渭等跨区域调水工程的核心水源

收稿日期(Received date): 2023-03-07; 改回日期(Accepted date): 2023-06-13

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41701592, 42171095)。[National Natural Science Foundation of China (41701592, 42171095)]

作者简介(Biography): 李双双(1988-),男,陕西潼关人,博士,副教授,主要研究方向:气候变化与区域灾害防治。[LI Shuangshuang (1988-), male, born in Tongguan, Shaanxi province, Ph.D., associate professor, research on climate change and regional disaster prevention] E-mail: lss1988@snnu.edu.cn

区<sup>[12-15]</sup>。受秦岭东西走向山脉的影响,关中平原、汉江谷地降水日变化存在明显南北差异<sup>[16]</sup>。近年来,秦岭南北 35.0% 的区域昼夜复合高温呈现显著增加趋势<sup>[17]</sup>。与昼夜复合高温相对,昼晴夜雨可在一定程度缓解区域高温影响,弥补生态系统水分亏缺,增强社会-生态系统应对极端气候的恢复力<sup>[18]</sup>。另外,有研究<sup>[19]</sup>发现,全球变暖背景下,更短、更强的热浪之后,7 日内发生暴雨的概率明显增加。也就是说,当昼晴夜雨雨量适中时,夜雨将是缓解热浪或干旱的气候资源;当昼晴夜雨雨量异常偏多时,将增加区域高温热浪与突发性洪水叠加的风险。因此,关注秦岭南北昼晴夜雨雨量变化规律,对构建区域综合风险防范体系具有重要的现实意义。

本文以秦岭南北为研究对象,采用 BG 突变检测、相关分析、趋势分析等方法,对 1970—2020 年夏季昼晴夜雨雨量时空变化特征进行分析;基于投影寻踪回归模型,识别昼晴夜雨雨量时空异常的影响因素,以期为认识中国南北过渡带气候变化规律提供理论依据和方法借鉴。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

秦岭是中国地理南北分界线,气候属于北亚热带和暖温带的过渡带,湿润和半湿润地区的过渡带<sup>[20]</sup>。秦岭以北的关中平原年均降水量为 450 ~ 800 mm,多集中于 6—10 月;秦岭以南的汉江谷地年均降水量为 800 ~ 1000 mm,多集中于 5—10 月。为了对比夏季昼晴夜雨雨量的空间差异,依据秦岭分水岭和秦岭南坡 800 m 等高线,将研究区分为关中平原、秦岭南坡和汉江谷地(图 1)。本文秦岭南北 72 个气象站点逐日降水数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>),个别站点缺失数据采用邻近站点插值方法进行插补。秦岭南北 2020 年土地利用数据,来源于全球 30 m 空间分辨率地表覆盖数据集(<http://www.globallandcover.com>)。

### 1.2 研究方法

以当日 20:00 至次日 8:00 划分昼夜,本文将持续型和单日型夜雨区分,选取白天无降水、夜晚有降水的单日型夜雨作为研究对象,对秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量时空特征和影响因进行分析,研究框架如图 2 所示。

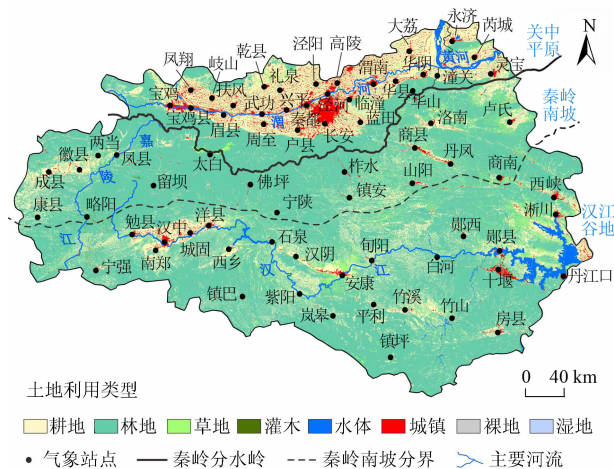


图 1 秦岭南北土地利用类型与气象站点分布图

Fig. 1 Distribution of land use types and meteorological stations in the north and south of Qinling Mountains, China

#### 1.2.1 Bernaola-Galván 分割算法

时间序列分析方法,常常假定数据为平稳随机过程,即气候要素(夜雨雨量)的期望(均值、方差和相关等)不随时间推移变化<sup>[21]</sup>。本文采用单位根方法,对夏季昼晴夜雨雨量时间序列进行非平稳趋势检验。结果表明秦岭南北 3 个子区昼晴夜雨雨量变化均呈现非平稳特征。

针对非平稳时间序列的特征, Bernaola-Galván<sup>[22]</sup>等提出了一种突变检测的分割算法,即 BG 分割算法。该方法可将非平稳时间序列分割为多尺度自平稳子序列,能够检测气象要素序列中不同尺度、不同幅度的转折,已被广泛应用于气候变化研究之中。本文利用 BG 分割算法,对秦岭南北昼晴夜雨雨量年代转折特征进行分析,为研究雨量空间变化的阶段性提供划分依据。

#### 1.2.2 去趋势相关分析

夏季昼晴夜雨雨量异常,主要受局地环流异常的影响,是大气热力、动力过程对水汽循环影响的综合反映<sup>[2]</sup>。在站点尺度,本文首先滤除夏季昼晴夜雨雨量、同期累积最高温、累积最低温、累积气温日较差和累积日照时数时间序列的线性趋势,进而量化不同分区昼晴夜雨雨量年代际异常与气温、辐射变化的响应关系。

其中,累积最高温表征夏季昼晴夜雨发生时白天温度的异常情况;累积最低温表征夏季夜晚温度的异常情况;累积气温日较差表征昼夜温度变幅的异常情况;累积日照时数表征夏季辐射强弱的情况。

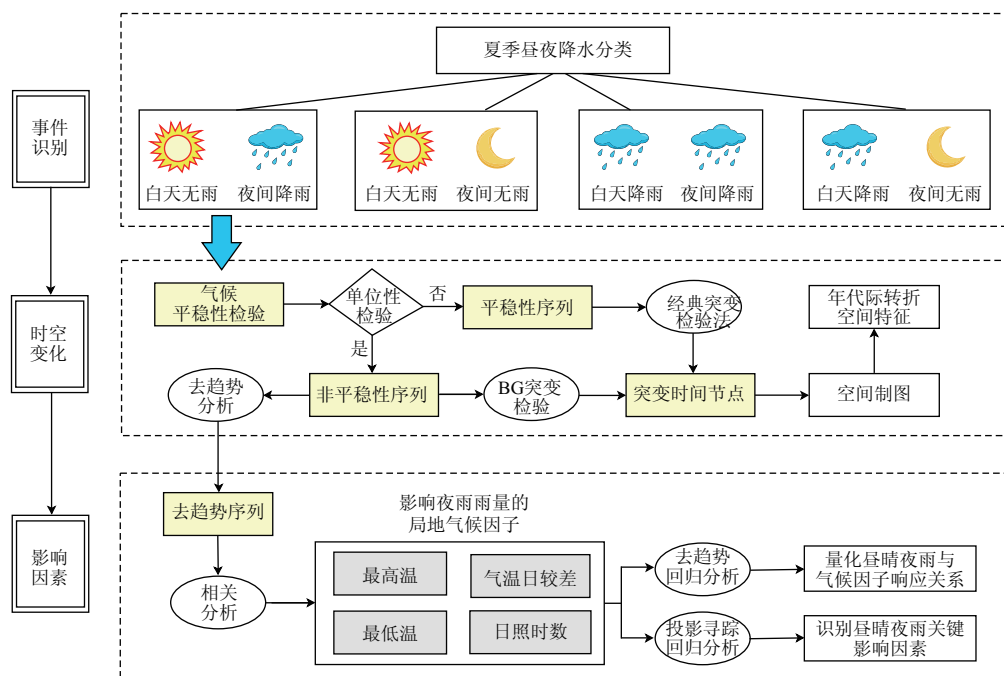


图2 夏季昼晴夜雨时空变化和影响因素的研究框架

Fig. 2 Framework of the spatiotemporal variation of diel composite precipitation in summer and influencing factors

去趋势相关系数计算公式如下:

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

式中,  $r$  为夏季昼晴夜雨雨量与同期气象要素的去趋势相关系数;  $x_i$  为第  $i$  年昼晴夜雨发生时, 对应气象要素的累积值;  $y_i$  为第  $i$  年夏季昼晴夜雨雨量;  $\bar{x}$  为气象要素多年均值;  $\bar{y}$  为夜雨雨量多年均值;  $n$  为研究时段长度。

投影寻踪回归 (Projection Pursuit Regression) 是一种适用于处理非线性和高维偏态分布数据的机器学习方法<sup>[23]</sup>。本文通过投影寻踪模型, 对昼晴夜雨雨量影响因子的相对重要性进行分析。投影寻踪回归模型有效性评估方面, 以 1970—2001 年数据为训练样本, 以 2002—2020 年数据为评估样本。通过计算预测值与评估样本的均方误差, 对回归模型预测效果进行评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量趋势变化特征

1970—2020 年, 秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量整

体呈现“南高北低”, 其中, 关中平原昼晴夜雨雨量多年均值为 24.98 mm, 低于秦岭南坡 (31.22 mm) 和汉江谷地 (32.08 mm)。上述结果符合已有学者<sup>[16]</sup>对秦岭及周边地区暖季降水日变化规律的研究, 即秦岭南部降水日峰值主要为盆地地形影响的夜雨, 秦岭以北降水为午后黄土高原的昼雨。秦岭南北夏季降水环流机制不同, 是秦岭以南夏季昼晴夜雨雨量高于关中平原的主要原因。

在变化趋势上, 1970—2020 年, 关中平原夏季昼晴夜雨雨量变化速率为 1.14 mm/10a, 低于秦岭南坡 (3.08 mm/10a) 和汉江谷地 (3.10 mm/10a) (表 1)。上述结果说明秦岭以南夏季昼晴夜雨雨量高于秦岭以北, 且雨量增加速率也高于秦岭以北。

在年代际变化上, 秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量存在明显空间差异 (图 3)。

(1) 对关中平原而言, 1970—2020 年, 夏季昼晴夜雨雨量经历了“轻微偏多→偏少→偏多”的变化过程 (图 3a)。其中, 第 1 个阶段为 1970—1982 年, 关中平原夜雨雨量整体呈现平稳波动, 雨量轻微偏多; 第 2 个阶段为 1983—2003 年, 区域夜雨雨量异常偏少, 多数年份夜雨雨量为负距平, 且呈现明显的下降趋势; 第 3 个阶段为 2004—2020 年, 区域气候持续变暖, 夏季极端高温频发, 昼晴夜雨雨量异常

表 1 秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量变化统计特征

Tab. 1 Statistics of diel composite precipitation in summer over the north and south of the Qinling Mountains, China

分区	突变时间	突变前后均值/mm	多年均值/mm	Sen 趋势/(mm/10a)
关中平原	1982 年、2003 年	26.00→19.98→30.39	24.98	1.14
秦岭南坡	1991 年	26.17→35.05	31.22	3.08 **
汉江谷地	1991 年、2007 年	26.51→32.57→40.91	32.08	3.10 **

注: \*\* 表示变化趋势通过 0.01 显著水平。

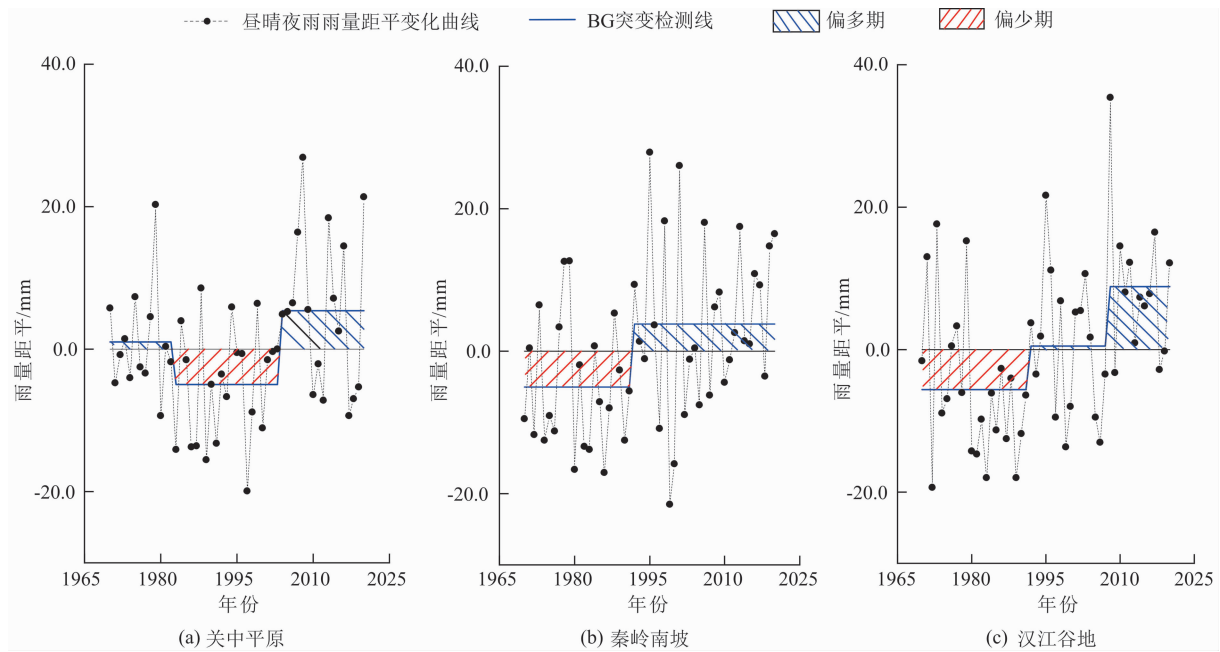


图 3 1970—2020 年秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量年代际变化特征

Fig. 3 Interdecadal variation of diel composite precipitation in summer over the north and south of Qinling Mountains, China during 1970–2020

偏多。相对于 1983—2003 年,该阶段关中平原昼晴夜雨雨量增加了 10.51 mm。

(2) 与关中平原不同,基于 BG 分割算法,秦岭南坡昼晴夜雨雨量时间序列仅识别出 1 个突变点,即 1991 年。整个变化过程可分为 2 个阶段:1970—1991 年,昼晴夜雨雨量处于异常偏少期;1992—2020 年,昼晴夜雨雨量先快速增加后维持高位波动,该阶段昼晴夜雨雨量整体偏多(图 3b)。

(3) 汉江谷地昼晴夜雨雨量年代际变化具有明显的特殊性,变化过程呈现“阶梯性”增加(图 3c)。其中,1970—1991 年为异常偏少期,尤其在 20 世纪 80 年代,昼晴夜雨雨量偏少更为明显。1992—2007 年,为正负振荡期。该阶段雨量轻微偏多,雨量变化曲线围绕 0 mm 上下波动,说明区域昼晴夜雨雨量年际差异较大;第 3 阶段为 2008—2020 年,昼晴夜雨雨量整体偏多。该阶段雨量维持长时间的正距

平,并在 2008 年达到峰值。

## 2.2 秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量空间变化特征

### 2.2.1 昼晴夜雨雨量空间格局基本特征

本文将夏季昼晴夜雨雨量划分 3 个等级,即低值区(< 25 mm)、中值区(25 ~ 40 mm)和高值区( $\geq 40$  mm)。结果表明:(1) 1970—2020 年,秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量具有明显的空间分异(图 4a)。昼晴夜雨雨量高值区面积占比为 11%,集中于汉江谷地东部;低值区面积占比为 16%,主要分布于关中平原中东部、嘉陵江流域的西部。(2) 2011—2020 年,秦岭山地中段、汉江谷地下游昼晴夜雨雨量高值区明显扩大;关中平原昼晴夜雨低值区则明显缩小至渭北旱塬(图 4b)。上述结果说明全球变暖背景下,秦岭南北夏季昼晴夜雨不但雨量存在年代际增加,而且夜雨雨量高值区的空间范围也在明显扩大。



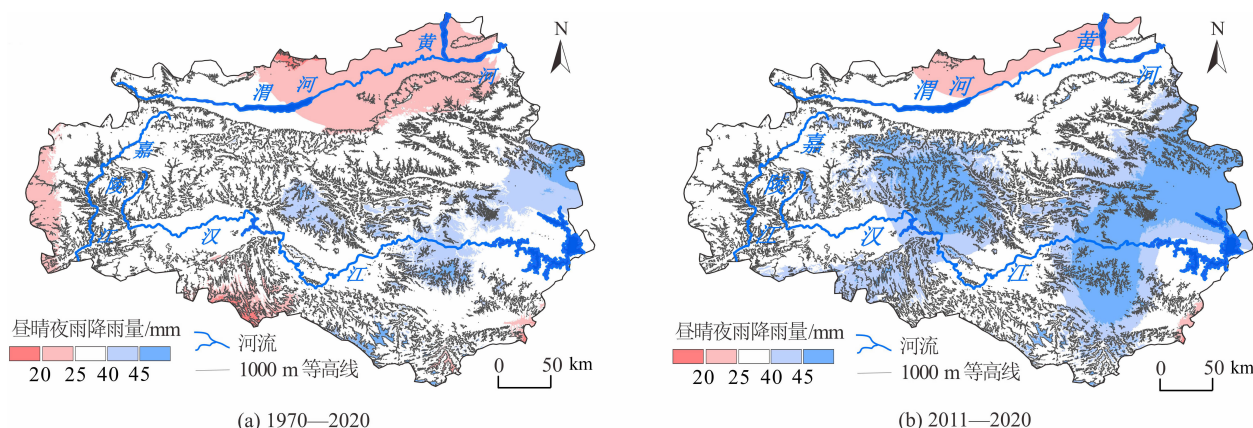


图4 秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量空间变化特征

Fig. 4 Spatial pattern of diel composite precipitation in summer over the north and south of the Qinling Mountains, China

### 2.2.2 不同时间段的夏季昼晴夜雨雨量空间变化特征

通过前文分析发现,秦岭南北不同子区雨量突变时间节点、变化量级和变化趋势均存在明显差异。若以1970—2020年为时间窗口,统计昼晴夜雨雨量变化,易忽略秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量的真实变化规律。本文选取3个分区7个时段,分析秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量不同阶段空间变化的差异性。

#### (1) 关中平原

1970—1982年,为关中平原昼晴夜雨雨量“轻微偏多期”。从图5a可以看出,关中平原昼晴夜雨雨量偏多时,秦岭南坡、汉江谷地除少数站点雨量偏多,其他站点昼晴夜雨雨量多处于负距平。尤其是秦岭南坡东段、汉江谷地东段偏少程度更为明显。

1983—2003年,为关中平原昼晴夜雨雨量“偏少期”(图5b)。这个时期对应于关中平原气温快速上升。除秦岭南坡雨量“西少东多”之外,其他区域昼晴夜雨雨量均呈现减少趋势。

2004—2020年,为关中平原昼晴夜雨雨量“偏多期”(图5c)。这个时期秦岭南北气温增速先停滞而后增加,秦岭南坡、汉江谷地与关中平原一致,夏季昼晴夜雨雨量整体偏多,但是不同子区内部站点雨量异常程度存在明显差异。

#### (2) 秦岭南

1970—1991年,为秦岭南坡、汉江谷地夏季昼晴夜雨雨量“偏少期”(图5d、图5g)。其中,秦岭南坡雨量异常偏少程度呈现“西少东多”,关中平原雨量异常偏少程度弱于汉江谷地。

1992—2007年,为汉江谷地昼晴夜雨雨量变化的“波动期”(图5e)。关中平原雨量呈现出“西部

多、东部少”的空间分布特征;秦岭南坡雨量则呈现出“中段少,两端多”的空间分布特征。

2008—2020年,为汉江谷地昼晴夜雨雨量“偏多期”(图5f)。关中平原、秦岭南坡与汉江谷地一致,昼晴夜雨雨量整体偏多。仅是关中平原空间格局由1992—2007年的“西多东少”转为“西少东多”,关中平原东部昼晴夜雨雨量增加高于西部。

1992—2020年,为秦岭南坡昼晴夜雨雨量“偏多期”(图5h)。关中平原和秦岭南坡西段雨量偏多幅度一致,秦岭南坡东段与汉江谷地雨量偏多幅度一致。整体而言,秦岭以南昼晴夜雨雨量增加幅度高于关中平原。

## 2.3 秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量变化的影响因素

### 2.3.1 夏季昼晴夜雨雨量与气象因子的响应关系

选取累积最高温、最低温、气温日较差、日照时数等4个指标,对秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量与同期昼夜气温变化的响应关系进行分析。结果表明:(1)4个指标与秦岭南北多数站点昼晴夜雨雨量变化呈现显著正相关( $p < 0.05$ )。(2)在空间上,秦岭南坡、汉江谷地显著正相关的气象站点占比高于关中平原;累积最高温、最低温、气温日较差显著正相关的气象站点占比高于累积日照时数。上述结果表明:夏季(6—8月)92天内,昼晴夜雨发生同期白天/夜晚温度越高、昼夜温差越大时,秦岭南北多数站点昼晴夜雨雨量越大(图6)。

为了量化夏季昼晴夜雨雨量与气象因子的响应关系,本文对昼晴夜雨雨量与同期累积最高温、最低温、气温日较差和日照时数进行了去趋势回归分析。结果表明:当夏季昼晴夜雨发生同期,累积最高温、

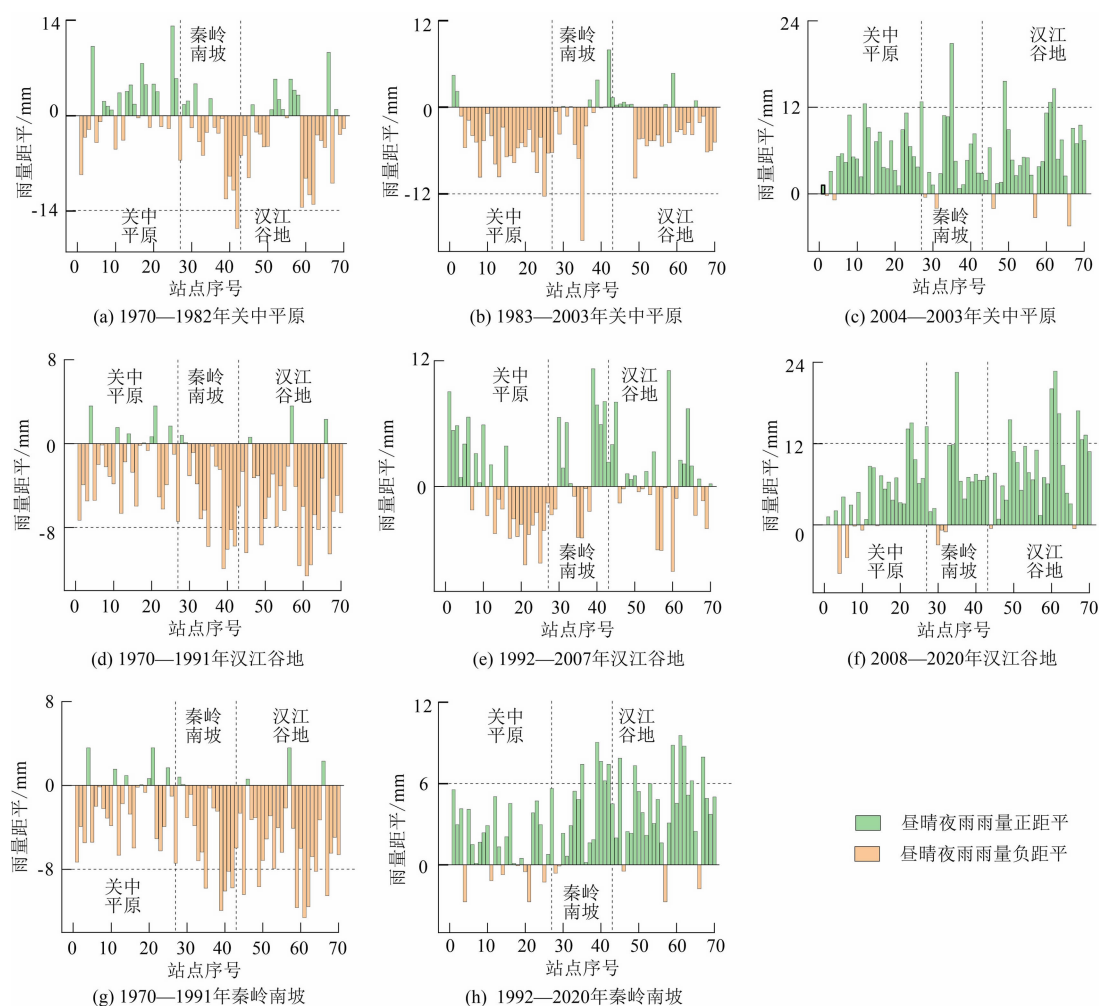


图 5 1970—2020 年秦岭南北不同时段夏季昼晴夜雨雨量空间变化特征

Fig. 5 Spatial pattern of diel composite precipitation in summer over the north and south of the Qinling Mountains, China at different stages during 1970–2020

最低温或气温日较差每增加  $10^{\circ}\text{C}$ , 昼晴夜雨雨量分别增加  $0.90\text{ mm}$ 、 $1.40\text{ mm}$  和  $2.27\text{ mm}$ 。当累积日照时数每增加  $10\text{ h}$ , 昼晴夜雨雨量将增加  $2.63\text{ mm}$ , 上述拟合关系均通过  $0.01$  显著水平检验。

在空间上, 当夏季昼晴夜雨同期累积最高温、累积最低温每增加  $10^{\circ}\text{C}$ , 秦岭南坡夜雨雨量增加高于汉江谷地、关中平原; 与之不同, 累积气温日较差增加  $10^{\circ}\text{C}$ 、累积日照时数增加  $10\text{ h}$  时, 汉江谷地昼晴夜雨雨量增加高于秦岭南坡、关中平原。对于高海拔山地站点而言, 昼晴夜雨雨量变化与累积日照时数拟合关系相对较差(表 2)。

### 2.3.2 夏季昼晴夜雨雨量年代际异常的主导因素

本文通过决定系数和均方误差, 对逐站点昼晴夜雨雨量变化投影寻踪回归模型有效性进行评估。其中,  $79\%$  的站点模型模拟决定系数高于  $0.95$ ;

$84\%$  的站点模型拟合均方误差低于  $25$ 。上述结果说明投影寻踪回归可有效识别秦岭南北昼晴夜雨雨量变化的主导因素。

1970—2020 年, 秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量变化主导因素存在空间差异: (1) 在主导类型上, 累积最高温、累积最低温、累积气温日较差和累积日照时数的重要性权重排首位的气象站点占比分别为  $50\%$ 、 $32\%$ 、 $9\%$  和  $11\%$ 。由此可见秦岭南北昼晴夜雨雨量年代际异常多数站点主要受白天最高温的影响。(2) 在空间上, 累积最高温重要性权重表现为全区一致偏高(图 7a); 累积最低温主要影响区域为关中平原(图 7b); 累积气温日较差、累积日照时数影响的站点空间分布则相对零散(图 7c、图 7d)。

在空间主导类型上, 关中平原、秦岭南坡气象站点昼晴夜雨雨量变化, 以累积最高温和最低温影响

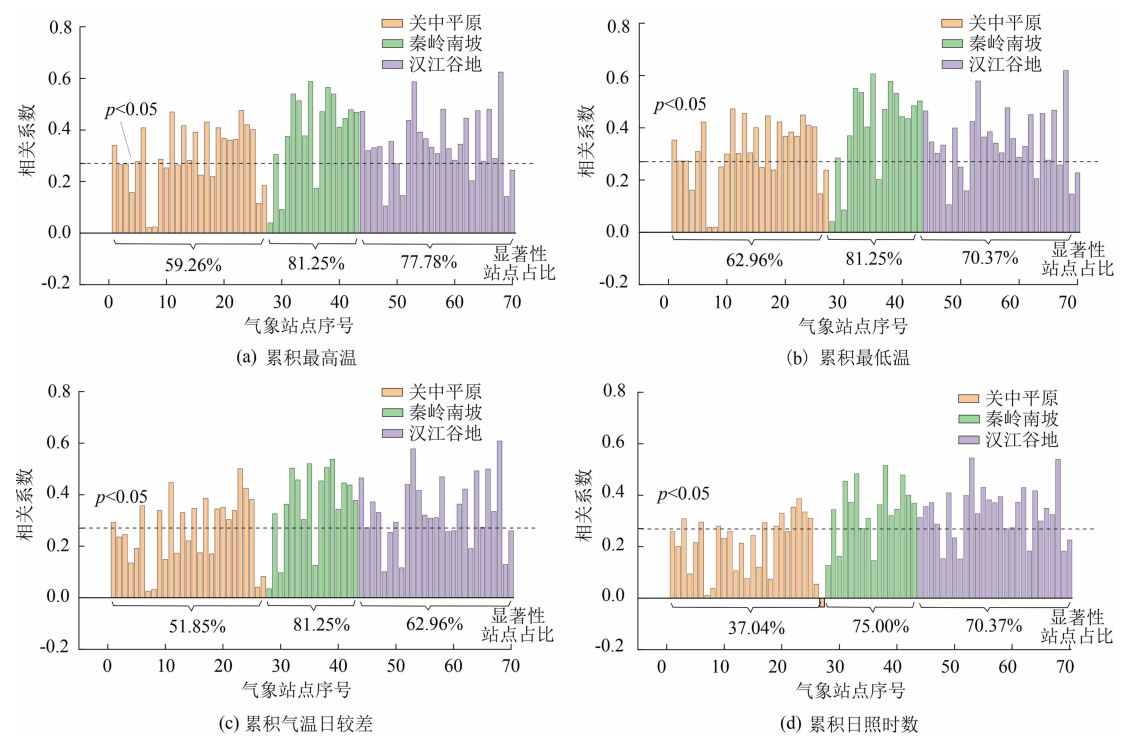


图 6 秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量与同期气候因子去趋势相关分析

Fig. 6 Detrend correlation analysis between summer diel composite precipitation and contemporaneous climatic factor in the north and south of the Qinling Mountains, China

表 2 夏季昼晴夜雨雨量与同期累积最高温、最低温、气温日较差和日照时数的去趋势回归分析

Tab. 2 Detrend regression analysis between summer diel composite precipitation and cumulative daily maximum temperature, daily minimum temperature, diurnal temperature range and cumulative duration of sunshine

分区	累积最高温/(mm/10℃)	累积最低温/(mm/10℃)	累积气温日较差/(mm/10℃)	累积日照时数/(mm/10h)
关中平原	0.73 **	1.14 **	1.79 **	1.76 **
秦岭南坡	1.02 **	1.69 **	2.29 **	2.88 **
汉江谷地	0.95 **	1.41 **	2.63 **	3.14 **
太白、华山	0.96 *	1.70 *	1.60 *	1.41
全区	0.90 **	1.40 **	2.27 **	2.63 **

注: \*\* 和 \* 为回归分析分别通过 0.01 和 0.05 显著水平检验。

为主(图 8a);汉江谷地累积最高温影响占主导的气象站点占比超过 60%, 远高于关中平原、秦岭南坡(图 8b)。上述结果说明在 4 个主导因子中,秦岭南南北夏季昼晴夜雨雨量年代际异常主要受白天温度的影响。累积最高温每增加 10℃,夏季昼晴夜雨雨量增加 0.90 mm 的响应关系更为可信。

3 讨论

3.1 秦岭南南北夏季昼晴夜雨的环流机制

为了更清楚反映秦岭南南北昼晴夜雨变化特征,

本文从夜雨定义、变化趋势、数据类型等角度,统计了中国不同区域夜雨研究结果。从表 3 可以看出,中国不同区域夜雨定义主要有 2 类:仅考虑夜间雨量,忽略是否为昼夜持续性降水;以降水的日峰值刻画降水类型,可再现夜雨前半夜、后半夜等特征。数据分辨率分为逐日 20:00~08:00 数据、小时数据;数据类型分为站点观测数据、CMORPH 降水产品、ERA-Interim 再分析数据。其中,小时数据时间相对较短,多数研究并未对夜雨雨量变化趋势进行分析。当前,仅有少数研究对夜雨环流机制进行分析;从年代际变化,分析夜雨雨量变化的影响因素研究也



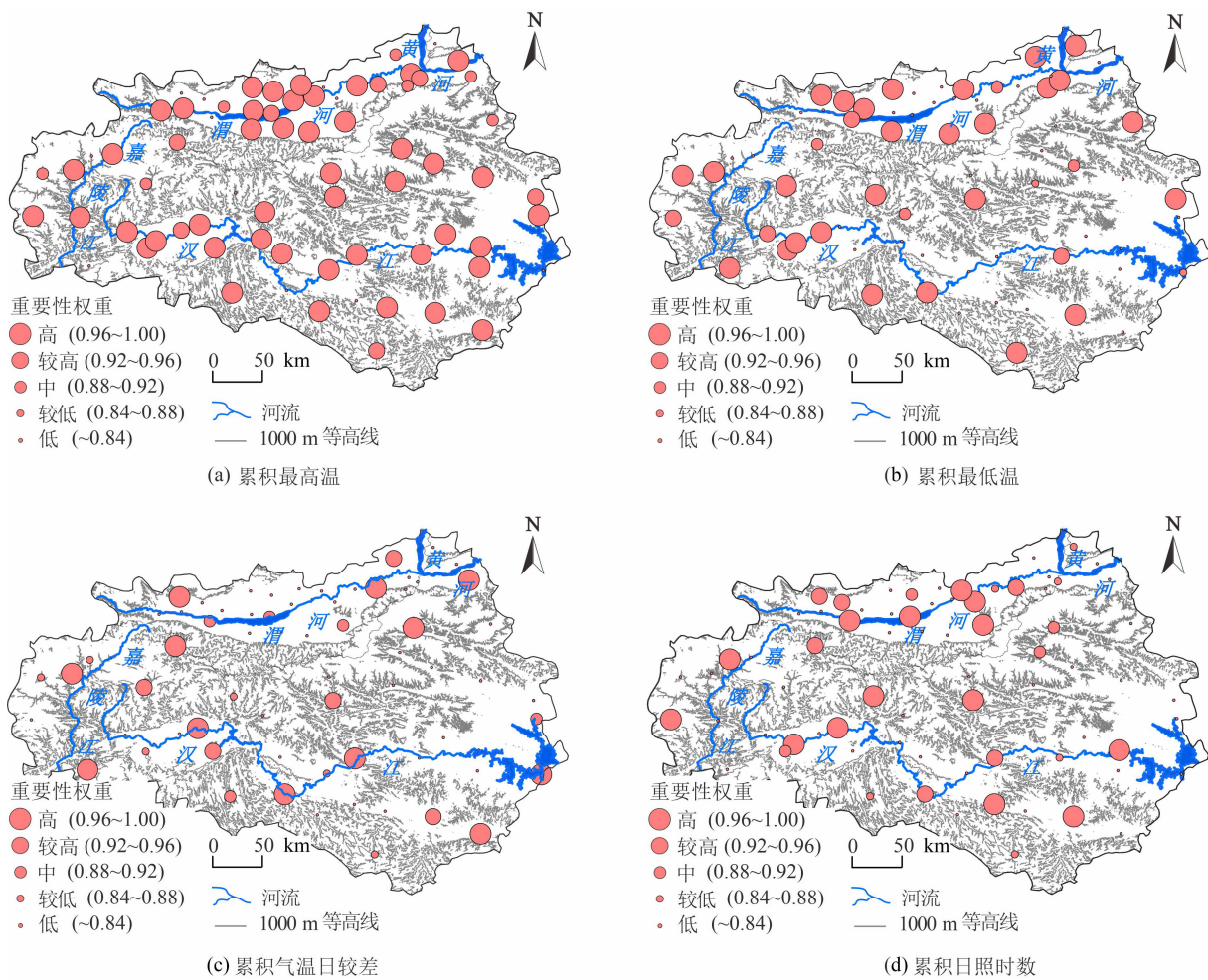


图 7 秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量影响因子重要性权重空间分布特征

Fig. 7 Spatial pattern of influencing factors' importance weights for summer diel composite precipitation in the north and south of the Qinling Mountains, China

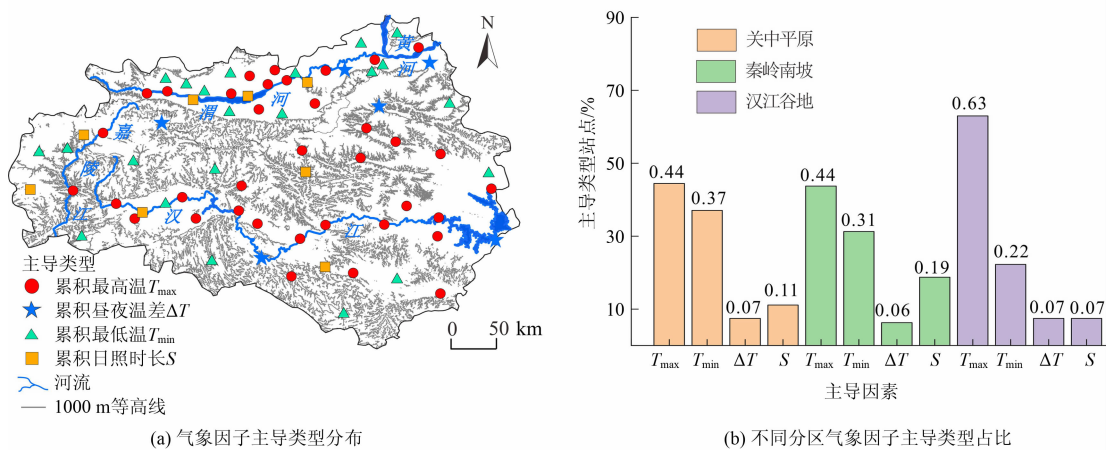


图 8 秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量主导因子空间分布特征

Fig. 8 Dominant influencing factor of diel composite precipitation in summer over the north and south of the Qinling Mountains, China

较少。

对于秦岭南北而言,暖季降水日变化存在明显的空间差异。其中,秦巴山区夜间降水量超过

白天的 1.0 倍以上<sup>[24]</sup>。在环流机制上,白天谷风减弱地形槽前上升气流,导致秦岭以南白天降雨较少;夜间山风与青藏高原南侧西南暖湿上升气



表 3 中国不同区域夜雨研究结果对比

Tab. 3 Comparison of night rain research results in different regions of China

序号	区域	夜雨定义	时段	变化趋势	数据类型	环流机理
1	淮河流域 <sup>[7]</sup>	仅考虑夜间雨量	1961—2018 年	波动	逐日数据	无
2	黄土高原 <sup>[25]</sup>	仅考虑夜间雨量	1960—2017 年	减少	逐日数据	无
3	青海高原 <sup>[26]</sup>	仅考虑夜间雨量	1961—2018 年	增多	逐日数据	无
4	内蒙古 <sup>[27]</sup>	仅考虑夜间雨量	1961—2018 年	波动	逐日数据	无
5	乌鲁木齐 <sup>[28]</sup>	降水的日峰值	2012—2019 年	无	小时数据	无
6	川渝地区 <sup>[29]</sup>	降水的日峰值	1991—2012 年	无	小时数据	无
7	陕西 <sup>[24]</sup>	降水的日峰值	2008—2015 年	无	小时数据	无
8	重庆地区 <sup>[30]</sup>	降水的日峰值	2008—2016 年	无	小时数据	有
9	峨眉山 <sup>[31]</sup>	降水的日峰值	1964—2016 年	无	小时数据	无
10	祁连山 <sup>[32]</sup>	仅考虑夜间雨量	2008—2014 年	增多	小时数据	无
11	秦岭及周边 <sup>[16]</sup>	降水的日峰值	2008—2016 年	无	小时数据	有
12	青藏高原 <sup>[3]</sup>	降水的日峰值	2008—2014 年	无	小时数据	有
13	新疆 <sup>[6]</sup>	降水的日峰值	2008—2019 年	无	小时数据	无
14	中国 <sup>[1]</sup>	降水的日峰值	2005—2007 年	无	小时数据	无
15	秦岭南北(本文)	昼晴夜雨雨量	1970—2020 年	增多	逐日数据	无

流的叠加,加强了秦岭以南 800 hPa 以上大气上升运动,导致夏季降水多以夜雨出现<sup>[16]</sup>。但是,夏季昼晴夜雨雨量年代际增加的环流机制尚不明晰。在未来研究中,需要结合海温、北极海冰异常,对秦岭南北夏季昼晴夜雨雨量年代际变化的机制进行系统研究。

3.2 夏季昼晴夜雨增强的社会-生态效应

与夏季高强度、长持续性的强降水相比,昼晴夜雨侧重于描述降水日变化特征,且气候资源特性更突出,其可以缓解白天高温对社会-生态系统的不利影响。需要关注的是,大规模森林砍伐、人工造林会明显增加日气温变化的极端性<sup>[33]</sup>。日气温变率增加,将导致更频繁的快速增温和降温事件。但是,以夏季昼夜降雨类型为切入,分析昼夜降水类型转化,对农业-生态资源影响的研究相对较少。

全球变暖背景下,降水昼夜相态变化,影响“水-能源-粮食”纽带关系,耦合区域土地利用变化,也将增加区域水资源调配、粮食灌溉、生态服务、农业生计等风险。因此,在未来研究中,关注秦岭山地的生态屏障作用,分析夏季昼晴夜雨增加对农业生产、生态服务供给和需求的影响,将有利于理解气候变化与山村可持续发展的协同关系。

4 结论

基于 1970—2020 年 72 个气象站点最高温、最低温、日照和降水数据,本文对秦岭南北夏季昼晴夜雨事件进行识别;利用 BG 突变检测和趋势分析等气候诊断方法,对区域昼晴夜雨雨量时空变化进行分析;基于投影寻踪回归模型,识别了昼晴夜雨雨量时空变化的影响因素。主要结论如下:

(1) 受益地形和青藏高原南侧西南暖湿上升气流叠加影响,秦岭以南的汉江谷地、秦岭南坡夏季昼晴夜雨雨量高于关中平原。同时,秦岭南坡和汉江谷地昼晴夜雨雨量增幅是关中平原的 2 倍,上述结果说明全球变暖背景下,秦岭以南是昼晴夜雨变化的敏感区,需关注夜雨雨量变化对生态-社会系统的综合影响。

(2) 年代际变化上,秦岭南北夏季昼晴夜雨变化雨量存在明显的南北差异。其中,关中平原昼晴夜雨雨量经历了“轻微偏多(1970—1982 年)—偏少(1983—2003 年)—偏多(2004—2020 年)”的变化过程。秦岭南坡和汉江谷地夜雨雨量变化具有相似性;20 世纪 90 年代前,昼晴夜雨雨量整体偏少;

1992年后,秦岭南坡昼晴夜雨雨量平稳增加,汉江谷地则呈现出阶梯状增加。

(3) 在变暖响应上,夏季昼晴夜雨发生同期,当白天温度越高、夜晚温度越高、昼夜温差越大、日照时数越长时,秦岭南北昼晴夜雨雨量越大。其中,秦岭南北昼晴夜雨雨量主要受白天温度的影响,气温日较差影响较小。同期累积最高温每增加 10℃,昼晴夜雨雨量增加 0.90 mm。

## 参考文献(References)

- [1] 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. [DUAN Chunfeng, CAO Wen, MIAO Qilong, et al. Spatial distribution of night rainfall in summer over China [J]. Journal of Natural Resource, 2013, **28**(11): 1935–1944] DOI: 10.11849/zrzyxb.2013.11.010
- [2] 宇如聪, 李建, 陈昊明, 等. 中国大陆降水日变化研究进展[J]. 气象学报, 2014, **72**(5): 948–968. [YU Rucong, LI Jian, CHEN Haoming, et al. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, **72**(5): 948–968] DOI: 10.11676/qxxb2014.047
- [3] WU Yang, HUANG Anning, HUANG Danqing, et al. Diurnal variations of summer precipitation over the regions east to Tibetan Plateau [J]. Climate Dynamics, 2018, **51**(11): 4287–4307. DOI: 10.1007/s00382-017-4042-x
- [4] XIA Rudi, LUO Yali, ZHANG Dalin, et al. On the diurnal cycle of heavy rainfall over the Sichuan basin during 10–18 August 2020 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, **38**(12): 2183–2200. DOI: 10.1007/s00376-021-1118-7
- [5] LI Liangliang, LI Jian, CHEN Haoming, et al. Diurnal variations of summer precipitation over the Qilian Mountains in northwest China [J]. Journal of Meteorological Research, 2019, **33**(1): 18–30. DOI: 10.1007/s13351-019-8103-4-tion over Xinjiang province in China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2022, **15**(2): 100113. DOI: 10.1016/j.aosl.2021.100113
- [7] ZHU Ying, LIU Xiaoli, ZHANG Yuqing, et al. The proportional characteristics of daytime and nighttime precipitation based on daily precipitation in Huai River Basin, China [J]. Atmosphere, 2022, **13**(8): 1287. DOI: 10.3390/ATMOS13081287
- [8] HUANG Ya, XIAO Weihua, HOU Guibing, et al. Changes in seasonal and diurnal precipitation types during summer over the upper reaches of the Yangtze River Basin in the middle twenty-first century (2020–2050) as projected by RegCM4 forced by two CMIP5 global climate models [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020, **142**(3): 1055–1070. DOI: 10.1007/s00704-020-03364-4
- [9] 方建, 陶凯, 牟莎, 等. 复合极端事件及其危险性评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2023, **42**(3): 587–601. [FANG Jian, TAO Kai, MU Sha, et al. Progress of research on compound extreme event and hazard assessment [J]. Progress in Geography, 2023, **42**(3): 587–601] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.03.014
- [10] WANG Jun, CHEN Yang, TETT S F B, et al. Anthropogenically-driven increases in the risks of summertime compound hot extremes [J]. Nature Communications, 2020, **11**(1): 528. DOI: 10.1038/s41467-019-14233-8.
- [11] AGHAKOUCHAK A, CHIANG F, HUNING L S, et al. Climate extremes and compound hazards in a warming world [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2020, **48**: 519–548. DOI: 10.1146/annurev-earth-071719-055228
- [12] 李双双, 芦佳玉, 延军平, 等. 1970—2015年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义[J]. 地理学报, 2018, **73**(1): 13–24. [LI Shuangshuang, LU Jiayu, YAN Junping, et al. Spatiotemporal variability of temperature in northern and southern Qinling Mountains and its influence on climatic boundary [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, **73**(1): 13–24] DOI: 10.11821/dlxb201801002
- [13] 李君轶, 傅伯杰, 孙九林, 等. 新时期秦岭生态文明建设: 存在问题与发展路径[J]. 自然资源学报, 2021, **36**(10): 2449–2463. [LI Junyi, FU Bojie, SUN Jiulin, et al. Ecological civilization construction at Qinling Mountains in the New Era [J]. Journal of Natural Resources, 2021, **36**(10): 2449–2463] DOI: 10.31497/zrzyxb.20211001
- [14] 张百平. 中国南北过渡带研究的十大科学问题[J]. 地理科学进展, 2019, **38**(3): 305–311. [ZHANG Baiping. Ten major scientific issues concerning the study of China's north-south transitional zone [J]. Progress in Geography, 2019, **38**(3): 305–311] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.03.001
- [15] 李双双, 汪成博, 延军平, 等. 面向事件过程的秦岭南北极端降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2020, **75**(5): 989–1007. [LI Shuangshuang, WANG Chengbo, YAN Junping, et al. Variability of the event-based extreme precipitation in the south and north Qinling Mountains [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, **75**(5): 989–1007] DOI: 10.11821/dlxb202005008
- [16] 张宏芳, 潘留杰, 陈昊明, 等. 秦岭及周边地区暖季降水日变化及其成因分析[J]. 高原气象, 2020, **39**(5): 935–946. [ZHANG Hongfang, PAN Liujie, CHEN Haoming, et al. Diurnal variations and causes of warm season precipitation in Qinling and surrounding areas [J]. Plateau Meteorology, 2020, **39**(5): 935–946] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00067
- [17] 李双双, 胡佳岚, 何锦屏, 等. 1970—2020年秦岭南北夏季昼夜复合高温时空变化及其影响因素[J]. 地理研究, 2023, **42**(5): 1410–1424. [LI Shuangshuang, HU Jialan, HE Jinping, et al. Variation of summertime compound hot extremes over the north and south of Qinling Mountains and its influencing factors during 1970–2020 [J]. Geographical Research, 2023, **42**(5): 1410–1424] DOI: 10.11821/dlyj20220690

- [18] 张养才, 叶一舫. 中国亚热带西部山区夜雨特征的农业气候学研究[J]. 地理科学, 1994, **14**(1): 30 – 37 + 99. [ZHANG Yangcai, YE Yifang. An agroclimatic study on night rain features in mountainous regions in the western part of subtropical zone in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 1994, **14**(1): 30 – 37 + 99] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.1994.01.005
- [19] YOU Jiewen, WANG Shuo. Higher probability of occurrence of hotter and shorter heat waves followed by heavy rainfall [J]. Geophysical Research Letters, 2021, **48**(17): e2021GL094831. DOI: 10.1029/2021GL094831
- [20] 孟清, 白红英, 赵婷, 等. 秦岭山地气候变化的地形效应[J]. 山地学报, 2020, **38**(2): 180 – 189. [MENG Qing, BAI Hongying, ZHAO Ting, et al. Topographic characteristic of climate change in the Qinling Mountains, China [J]. Mountain Research, 2020, **38**(2): 180 – 189] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000500
- [21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2007: 6 – 7. [WEI Fengying. Modern statistical diagnosis and prediction of climate [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 6 – 7]
- [22] BERNAOLA-GALVÁN P, IVANOV P C, AMARAL L A N, et al. Scale invariance in the nonstationarity of human heart rate [J]. Physical Review Letters, 2001, **87**(16): 168105. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.168105
- [23] FRIEDMAN J H, STUETZLE W. Projection pursuit regression [J]. Journal of the American Statistical Association, 1981, **76**(376): 817 – 823. DOI: 10.1080/01621459.1981.10477729
- [24] 张宏芳, 李建科, 潘留杰, 等. 陕西暖季降水的日变化特征及南北差异[J]. 干旱区地理, 2020, **43**(4): 889 – 898. [ZHANG Hongfang, LI Jianke, PAN Liujie, et al. Diurnal variation characteristics and north-south differences of precipitation in warm season in Shaanxi province [J]. Arid Land Geography, 2020, **43**(4): 889 – 898] DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2020.04.04
- [25] 安彬, 肖薇薇, 朱妮. 1960—2017年黄土高原昼夜降水变化特征[J]. 水土保持研究, 2022, **29**(2): 132 – 138 + 144. [AN Bin, XIAO Weiwei, ZHU Ni. Characteristics of change in diurnal precipitation in the Loess Plateau during 1960 – 2017 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, **29**(2): 132 – 138 + 144] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.02.013
- [26] 刘义花, 马元仓, 杨延华, 等. 1961—2018年青海高原昼夜雨量时空变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2020, **42**(3): 996 – 1006. [LIU Yihua, MA Yuancang, YANG Yanhua, et al. Research of the spatio-temporal variation characteristics of daytime and nighttime precipitation in the Qinghai Plateau from 1961 to 2018 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, **42**(3): 996 – 1006] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0072
- [27] 申露婷, 张方敏, 黄进, 等. 1961—2018年内蒙古生长季昼夜降水气候特征[J]. 干旱区研究, 2020, **37**(6): 1519 – 1527. [SHEN Luting, ZHANG Fangmin, HUANG Jin, et al. Climate characteristics of day and night precipitation during the growing season in Inner Mongolia from 1961 to 2018 [J]. Arid Zone Research, 2020, **37**(6): 1519 – 1527] DOI: 10.13866/j.azr.2020.06.17
- [28] 苗运玲, 宫恒瑞, 王健, 等. 2012—2019年乌鲁木齐市夏季降水日变化特征[J]. 干旱区地理, 2021, **44**(5): 1222 – 1230. [MIAO Yunling, GONG Hengrui, WANG Jian, et al. Diurnal variation characteristics of summer precipitation in Urumqi city from 2012 to 2019 [J]. Arid Land Geography, 2021, **44**(5): 1222 – 1230] DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2021.05.03
- [29] 董新宁, 吴遥, 黄安宁, 等. 川渝地区夏季极端降水日变化特征分析[J]. 大气科学, 2023, **47**(2): 259 – 272. [DONG Xinning, WU Yao, HUANG Anning, et al. Analysis of diurnal variation characteristics of summer extreme precipitation in Sichuan and Chongqing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2023, **47**(2): 259 – 272] DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2108.21032
- [30] 方德贤, 董新宁, 邓承之, 等. 2008—2016年重庆地区降水时空分布特征[J]. 大气科学, 2020, **44**(2): 327 – 340. [FANG Dexian, DONG Xinning, DENG Chengzhi, et al. Temporal and spatial distribution of precipitation in Chongqing during 2008 – 2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, **44**(2): 327 – 340] DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1907.18256
- [31] 吕晶, 李忠贤, 李跃清, 等. 峨眉山及其周边地区降水气候特征研究[J]. 高原气象, 2018, **37**(6): 1544 – 1562. [LYU Jing, LI Zhongxian, LI Yueqing, et al. Study on the climate characteristics of precipitation in Emei Mountain and its surrounding area [J]. Plateau Meteorology, 2018, **37**(6): 1544 – 1562] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00049
- [32] 刘雪梅, 张明军, 王圣杰, 等. 2008—2014年祁连山区夏季降水的日变化特征及其影响因素[J]. 地理学报, 2016, **71**(5): 754 – 767. [LIU Xuemei, ZHANG Minjun, WANG Shengjie, et al. Diurnal variation of summer precipitation and its influencing factors of the Qilian Mountains during 2008 – 2014 [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, **71**(5): 754 – 767] DOI: 10.11821/dlxb201605005
- [33] GE Jun, LIU Qi, ZAN Beilei, et al. Deforestation intensifies daily temperature variability in the northern extratropics [J]. Nature Communications, 2022, **13**: 5955. DOI: 10.1038/s41467-022-33622-0



# Spatio-Temporal Variation of Diel Composite Precipitation in Summer and Influencing Factors over the North and South of the Qinling Mountains, China

LI Shuangshuang, HU Jialan, HE Jinping, YAN Junping

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Under the trend of global warming, the frequent occurrences of summertime compound hot extremes lead to continuous precipitation reduction and have changed the diel precipitation pattern, even for whole summer rainfall season. The Qinling Mountains is an important geographical dividing line between the north and the south of China. It was reported that 35.0% of the areas in the north and south of the Qinling Mountains went through a significant increase in diel composite high temperature in recent years. Unfortunately, past study of climate changes in the transition zone between the north and south of the Qinling Mountains mainly concerned about the spatial-temporal variation of precipitation, less attentions to the implication of the diel composite precipitation under the background of global warming. Diel Composite Precipitation (DCP) refers to a pattern of precipitation to be observed on a 24-hour basis, particularly with emphasis on night rainfall ensuing from daytime serenity, which serves as a unique climatic resource, and a critical index of regional climate characteristics.

In this study, it collected daily summer precipitation records in the period of 1970 – 2020 at 72 meteorological stations sparsely located at the north and south of the Qinling Mountains; the spatial-temporal variation of DCP was analyzed by BG mutation detection, trend analysis, projection pursuit regression model and other methods; then it discussed factors influencing DCP in the Guanzhong Plain, southern slope of the Qinling Mountains and the Hanjiang valley.

The results showed that: (1) From 1970 to 2020, there was an increasing trends of DCP value in the southern slopes of the Qinling Mountains and the Hanjiang River valley, with an increase rates of 3.08 mm/10a and 3.10 mm/10a, respectively, which was twice higher than those in the Guanzhong Plain (1.14 mm/10a), and suggests that the variations of DCP responding to global warming in southern part of the Qinling were more sensitive as compared with those in the northern. (2) Between 1970 and 1982, the distribution pattern of abnormal DCP in the north and south of the Qinling could be characterized as more in the north and less in the south. To be specific, the southern slopes of the Qinling and the eastern part of the Hanjiang valley were areas with less DCP. Between 1983 and 2020, the spatial pattern of DCP anomalies shifted from less to more rainfall consistently; spatially, areas with high increase of DCP were in the southern slopes of the Qinling and Hanjiang valley. (3) Daytime temperature as main influencing factor contributed to the variations of DCP. In the case of cumulative daily maximum temperature with an up of 10 °C, DCP increased 0.9 mm.

Our findings reveal that hot extreme in summer has been changing the diel pattern of rainfall in the north-south transition zone of China. It possibly increases the risk of regional water resources allocation, food production, and ecological services, etc. It should be noted that above results shed new insights into diel variations in summer rainfall, which can offer implications for formulating integrated risk governance strategies in the north-south transitional zone of China.

**Key words:** climate change; daily variation of precipitation; Diel Composite Precipitation (DCP); spatial-temporal analysis; the Qinling Mountains