

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.008

胡佳岚,李双双.1970—2020 年秦岭南北夏季昼晴夜雨强度变化趋势及其影响因素[J].水土保持学报,2024,38(1):149-157.

HU Jialan, LI Shuangshuang. Changing trends and influencing factors of the intensity of summer day sunny and night rainfall in the north and south of Qinling Mountains from 1970 to 2020[J].Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(1):149-157.

1970—2020 年秦岭南北夏季昼晴夜雨强度变化趋势及其影响因素

胡佳岚, 李双双

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

摘 要: [目的] 在陕西 3 大地理单元中,秦巴山区土壤侵蚀强度仅次于黄土高原。明晰秦岭南北夏季昼晴夜雨强度与气候变暖的响应关系,对区域土壤侵蚀防治具有重要的意义。[方法] 基于 1970—2020 年逐日降水数据,辅以 BG 分割法、经验正交函数和 Lasso 回归等方法,对秦岭南北地区夏季昼晴夜雨强度时空变化特征及其影响因素进行分析。[结果] 1970—2020 年,秦岭南北夏季昼晴夜雨强度呈现显著增加趋势。空间上,秦岭南北夏季昼晴夜雨强度主导模态为全区一致增强。其中,1 000 m 以下的谷地和平原区,是夏季昼晴夜雨强度变化的敏感区。在影响因素上,秦岭南坡、汉江谷地夏季昼晴夜雨强度变化与气象因子相关性高于关中平原。其中,秦岭南坡夏季昼晴夜雨强度主导气象因子为日照时间,而汉江谷地则受日照时间和平均风速的共同影响。[结论] 2003 年后秦岭南北夏季昼晴夜雨强度存在突变增强。以白天高温、夜间强降水为侵蚀形态的降水类型,将成为秦岭南北水土保持防治的重点。

关键词: 气候变化; 昼晴夜雨; 时空分析; Lasso 回归; 秦岭南北

中图分类号:P463.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242-(2024)01-0149-09

Changing Trends and Influencing Factors of the Intensity of Summer Day Sunny and Night Rainfall in the North and South of Qinling Mountains from 1970 to 2020

HU Jialan, LI Shuangshuang

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

Abstract: [Objective] In Shaanxi Province, the intensity of soil erosion in the Qinling-Daba Mountains is next only to that of the Loess Plateau. The study of response relationship between the intensity of summer day sunny and night rainfall (DSNR) and climate warming is of great importance for the control of soil erosion in China's north-south transition zone. [Methods] Based on daily precipitation data in summer (June to August) of 72 meteorological stations, assisted by B-G segmentation, empirical orthogonal function (EOF) method and Lasso regression model, we analyzed the spatiotemporal variation and influencing factors of the intensity of DSNR at summertime in the north and south of Qinling mountains during the period 1970—2020. [Results] From 1970 to 2020, the intensity of DSNR in summer exhibited a significantly increasing trend, which was more obvious in Hanjiang River Valley [0.30 mm/(d · 10 a)]. Spatially, the leading mode of the intensity of summer DSNR can be characterized by “consistent enhancement across the whole region, with a higher degree of anomalies in the valleys than in the mountains”. It indicated that valley—plain areas below 1 000 m were sensitive to variations in the intensity of DSNR at summertime. In terms of influencing factors, the correlation between evolution in the intensity of DSNR at summertime and meteorological factors in the Hanjiang River Valley and southern slopes of Qinling Mountains was higher than that in Guanzhong Plain. In

收稿日期:2023-03-25

修回日期:2023-06-05

录用日期:2023-07-01

网络首发日期(www.cnki.net):2023-10-26

资助项目:国家自然科学基金项目(41701592,42171095)

第一作者:胡佳岚(2000—),女,硕士研究生,主要从事气候变化和区域灾害防治研究。E-mail:hujialan06@163.com

通信作者:李双双(1988—),男,副教授,主要从事气候变化和区域灾害防治研究。E-mail:lss1988@snnu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

addition, cumulative duration of sunshine was the leading climatic factor driving the changes of summer DSNR intensity in the southern slopes of Qinling Mountains, while the variations of summer DSNR intensity in the Hanjiang River Valley was jointly influenced by cumulative duration of sunshine and average wind speed. [Conclusion] The year 2003 was a mutation year after which the intensity of DSNR at summertime began to be greater in the north and south of Qinling mountains. It informs us that, in the north and south of Qinling mountains, we should put the focus of soil and water conservation on the precipitation type with high temperature in the day and heavy precipitation at night.

Keywords: climate change; day sunny and night rainfall; spatiotemporal analysis; Lasso regression; north and south of Qinling Mountains

Received: 2023-03-25

Revised: 2023-06-05

Accepted: 2023-07-01

Online(www.cnki.net): 2023-10-26

土壤侵蚀是典型的土地退化问题^[1]。秦岭是暖温带和北亚热带的过渡区,是南水北调中线工程的水源地,也是我国生态环境和生态风险管控的重点区域^[2]。2021 年,秦巴生态功能区水土流失面积达 $3.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。陕西 3 大地理单元中,秦巴山区土壤侵蚀强度仅次于黄土高原^[3]。在中国东部季风区,夏季降雨是土壤侵蚀的主要动力因素^[4]。夏季降水变化涉及日变化、月变化、季节、年际、年代际等多个时间尺度。受研究资料的限制,精细刻画夏季降水日变化特征,是研究秦岭南北气候变化与侵蚀响应的薄弱环节。

值得一提的是,热浪与暴雨复合事件(the consecutive heat waves and heavy rainfall events)逐渐受到学界重视。更短、更加炎热的高温过后,暴雨发生的概率明显提升^[5]。对于秦岭南北而言,热浪与暴雨复合,与之关联的现象是夏季昼晴夜雨。同时,秦岭南北气候呈现出 2 个新特征:(1)持续性极端降水逐年减少,单日型极端降水显著增加^[6];(2)夏季昼夜复合高温不但发生天数在增加,而且发生范围也在扩大。汉中盆地和大巴山区东段是夏季昼夜复合高温天数增加的敏感区^[7]。结上可知,全球气候变暖背景下,秦岭南北夏季昼夜复合高温天气正在增加,耦合单日降水极端化,势必改变降水昼夜分布形态。当前,在秦岭南北夏季更加炎热的背景下,单日型极端降水增加,是否意味着昼晴夜雨强度增加,是否改变学界前期对降雨侵蚀能力的认知尚无定论。因此,准确评估昼晴夜雨强度时空变化,是理解秦岭南北降水侵蚀力变化的新视角,对土壤侵蚀调查、水土保持政策制定具有重要的实践意义。

在影响因素上,夜雨时空异常主要受大气环流条件和局地热对流共同作用。其中,大气环流决定水汽来源,局地热对流决定是否形成夜雨^[8]。前期研究中,许多学者从高山—平原热力环流效应^[9-12]、高原上空积状云日变化^[13-14]、海陆风^[15-16]等角度,对夜雨

变化物理机理进行了研究,并取得丰富的成果。但是,夜雨机理研究视角主要聚焦于单一夜雨事件,对降水昼夜分布差异现象及其影响因素研究相对较少。此外,以局地环流为切入,关注昼夜增温差异与夜雨强度响应关系的研究也较少。夏季昼夜气温极端化,是否导致夜雨强度增加尚不明晰。基于此,本文利用 1970—2020 年秦岭南北逐日降水数据,对夏季昼晴夜雨强度时空变化特征进行分析;采用 Lasso 回归模型,识别不同分区夏季昼晴夜雨强度的主导因素;以期为中国南北过渡带水资源管理、水土保持工作提供理论依据和方法参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

秦岭是横亘于中国中部的东西走向山脉,是气候变化响应的敏感区^[17]。秦岭地势西高东低,北陡南缓,北部为渭河盆地,南部为汉江谷地^[18]。作为我国重要的地理分界线,秦岭山地是北亚热带和暖温带的分界线,湿润季风气候和半湿润季风气候的分界线,也是常绿落叶阔叶林混交林和落叶阔叶林的分界线。

秦岭南北降水差异大,山脉以北属于黄河流域,气候较为干旱;山脉以南属于长江流域,气候温暖湿润。其中,陕南秦巴山区年平均降水量为 700~1 000 mm,关中平原的年平均降水量为 500~700 mm^[19]。

依据全国土壤侵蚀分类分级标准,秦岭南北皆属于水力侵蚀区。在侵蚀分区方面,秦巴山区属于西南土石山水力侵蚀区,其余地区属于西北黄土高原水力侵蚀区^[20]。为了更好地对比夏季昼晴夜雨强度的空间差异,以秦岭分水岭和秦岭南坡为界,将研究区分为关中平原、秦岭南坡和汉江谷地 3 个子区(图 1)。

1.2 数据来源

本研究使用数据为 1970—2020 年秦岭南北 72 个气象站点的逐日降水数据,来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>),个别缺失站点数据由临近站点

插值方法进行插补。本研究从中科院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台 (<http://www.cnid.cas.cn>) 获取了秦岭南北的 DEM 数据,空间分辨率为 90 m。

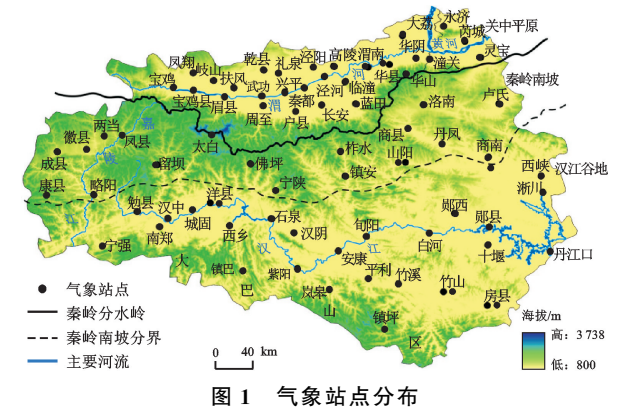


Fig.1 Location of the study area and spatial distribution of meteorological stations

1.3 研究方法

1.3.1 昼晴夜雨降水强度异常主导模态 经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)方法,可将原变量的主分量分解成空间特征向量和时间系数。其中,特征向量反映气候变量场的变率分布结构,对应的时间系数则反映该模态的时间变化特征^[21]。由此,本文应用 EOF 分解探究秦岭南北夏季昼晴夜雨强度的空间变化特征,并采用 NORTH 等^[22]特征值误差检验验证其有效性。

1.3.2 B-G 分割算法 B-G 分割算法是 BERNOLA-GALVÁN 等^[23]于 2001 年提出的检测时间序列突变的研究方法,因其对非线性、非平稳时间序列的适用性而受到广泛应用。该算法可将非平稳时间序列分割成多个均值不同的平稳子序列,其主要思想为:通过分割找出子序列均值间具有最大差值的位置,并将该位置定义为突变点^[21]。经特征根检验发现,秦岭南北 3 个分区夏季昼晴夜雨强度时间序列为非平稳序列。由此,应用 B-G 分割算法对秦岭南北夏季昼晴夜雨强度的突变年份进行分析。

1.3.3 高维数据 Lasso 回归分析 Lasso(least absolute shrinkage and selection operator)回归模型是一种将惩罚系数(λ)抑制为零的惩罚回归方法^[24]。Lasso 模型通过设定一些回归系数为 0,从而筛选出具有影响力的变量,可用于确定最重要的影响因素^[25]。本文利用高维数据 Lasso 回归对秦岭南北夏季昼晴夜雨强度影响因子进行分析。绘制回归模型、变量引入过程路线图并进行 0.618 黄金分割。其中,0.618 黄金分割线为界定“精简模型”的界限,认为在该线前引入的变量为具有影响力的变量,且越先引入模型的变量越重要。

为了消除量纲及趋势影响,在进行相关分析和 Lasso 回归分析前,对秦岭南北夏季昼晴夜雨强度及其影响因子进行正态标准化和去趋势处理。

2 结果与分析

2.1 秦岭南北夏季昼晴夜雨强度基本特征

1970—2020 年,汉江谷地夏季昼晴夜雨强度多年平均值为 2.98 mm/d,略高于秦岭南坡(2.86 mm/d)和关中平原(2.85 mm/d)。全球变暖背景下,秦岭南北降水以年代际波动为主,降水量近期增加,降水日数下降,蒸腾呈现极端化。与之相应,1970—2020 年,秦岭南北夏季昼晴夜雨强度显著增加(表 1)。其中,汉江谷地夏季昼晴夜雨强度变化速率为 0.30 mm/(d·10 a),高于秦岭南坡[0.26 mm/(d·10 a)]和关中平原[0.29 mm/(d·10 a)]。

1970—2020 年,秦岭南北夏季昼晴夜雨强度存在明显突变增强(表 1)。主要特征表现为:(1)突变前,1970—2001 年,关中平原昼晴夜雨强度多年平均值为 2.39 mm/d,低于同期秦岭南坡(2.60 mm/d)和汉江谷地(2.61 mm/d),空间格局整体呈现“南高北低”的分布特征;(2)突变后,2002—2020 年,关中平原昼晴夜雨强度多年均值增加至 3.62 mm/d,基本与汉江谷地昼晴夜雨强度(3.61 mm/d)量级相当。

表 1 秦岭南北夏季昼晴夜雨强度统计特征

Table 1 Statistics of the intensity of summer day sunny and night rainfall in the north and south of Qinling Mountains					
地理单元	突变年份	突变前后平均值/ (mm·d ⁻¹)	2001 年前后平均值/ (mm·d ⁻¹)	多年平均值/ (mm·d ⁻¹)	变化趋势/ [mm·d ⁻¹ ·(10 a) ⁻¹]
秦岭南北	2001	2.52→3.54	2.52→3.54	2.90	0.29**
关中平原	2004	2.44→3.73	2.39→3.62	2.85	0.29**
秦岭南坡	2001	2.60→3.31	2.60→3.31	2.86	0.26**
汉江谷地	2007	2.68→3.87	2.61→3.61	2.98	0.30**

注:**表示变化趋势通过 0.01 显著水平。

2.2 秦岭南北夏季昼晴夜雨强度与侵蚀性雨量的对应关系

为了明确夏季昼晴夜雨对土壤侵蚀的影响,以降水量≥12 mm 为标准^[26],筛选出侵蚀性昼晴夜雨事

件,计算逐年侵蚀性昼晴夜雨雨量占比,回答全球变暖背景下,中国南北过渡带夏季昼晴夜雨强度增加,是否意味着昼晴夜雨更具有侵蚀性。

结果表明,1970—2020 年,秦岭南北夏季昼晴夜

雨侵蚀性降雨量占总雨量的 50% 左右(图 2)。相关研究^[6-7]发现,全球变暖背景下,秦岭南北夏季昼夜复合高温事件在增多;持续性极端降水呈下降趋势,单日型极端降水显著增加。也就是说,假使未来秦岭南

北夏季降水以单日型为主,长时间、高强度的持续性极端降水造成的土壤侵蚀可能大幅减少;以白天高温、夜间强降水为侵蚀形态的降水类型,将成为秦岭南北水土保持防治的重点。

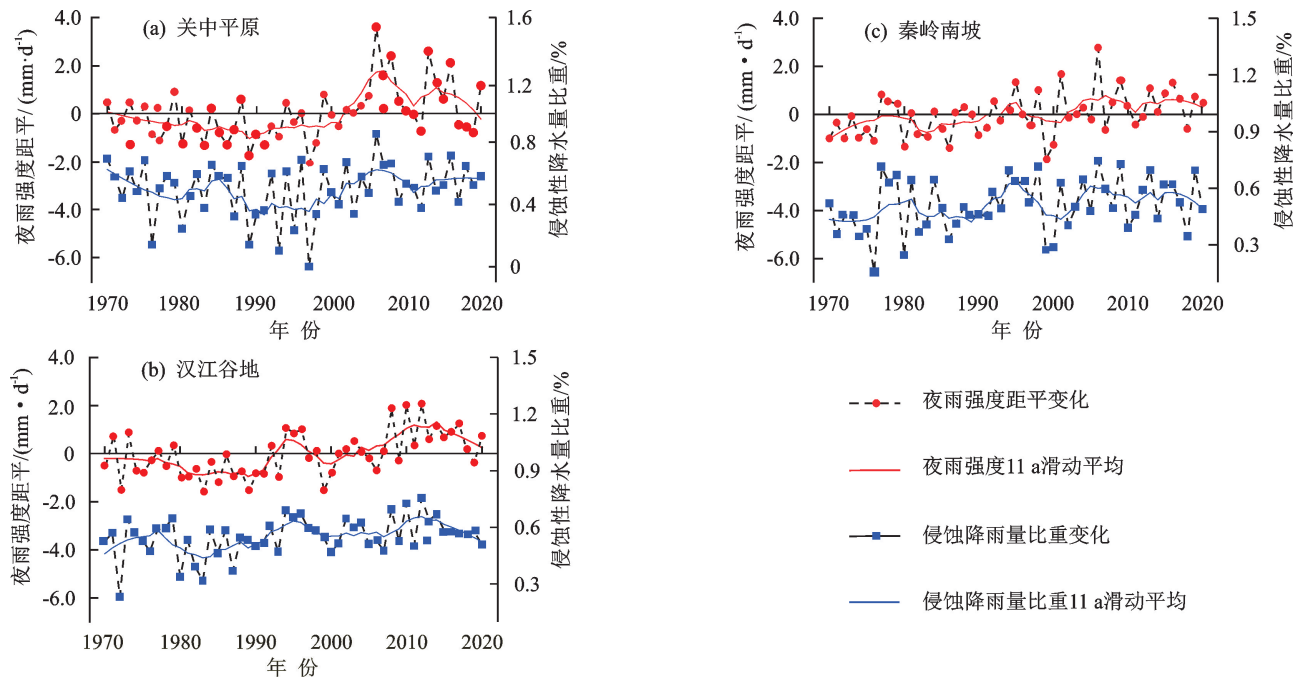


图 2 1970—2020 年秦岭南北夏季昼晴夜雨强度和侵蚀性降雨量比重趋势变化特征

Fig.2 Temporal variations of the intensity of summer day sunny and night rainfall and the proportion of erosive rainfall in the north and south of Qinling Mountains during 1970—2020

秦岭南北夏季昼晴夜雨强度与侵蚀性降雨量比重呈现显著正相关($p < 0.01$),即夏季昼晴夜雨强度越大,昼晴夜雨侵蚀性降雨量占比越多。空间上,相关系数高值区主要位于秦岭山地西部、嘉陵江流域附近(图 3a)。站点尺度上,秦岭南北 3 个分区相关系

数呈现不同的空间格局特征(图 3b)。其中,关中平原相关系数呈“东西高、中间低”的空间格局;秦岭南坡相关系数东西差异明显;汉江谷地为相关系数全区一致区;而高山气象站点(华山和太白站)相关性较弱。

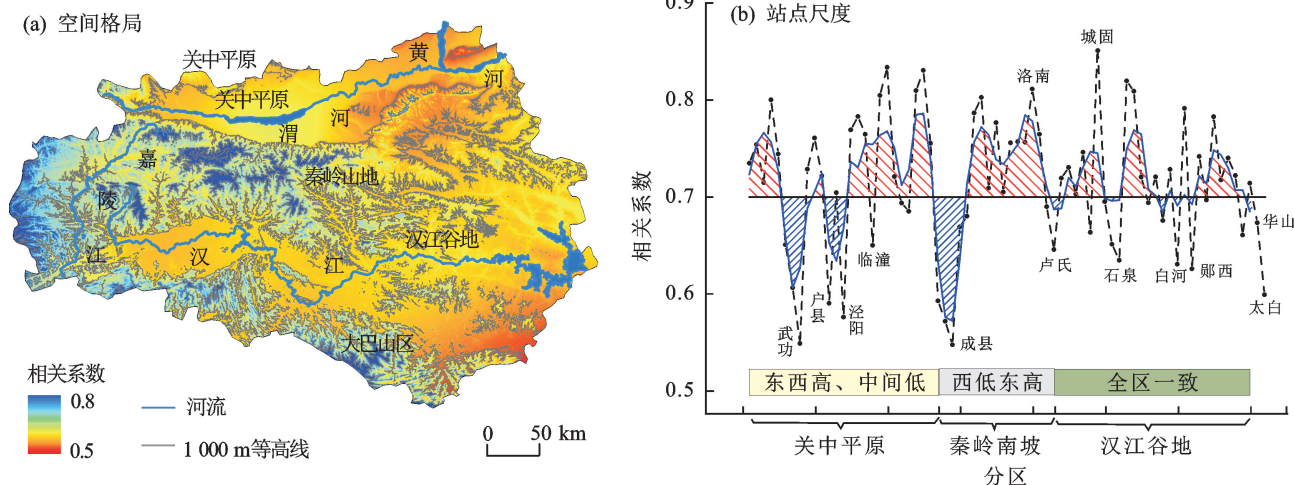


图 3 1970—2020 年秦岭南北昼晴夜雨强度与侵蚀性降雨量占比相关性分析

Fig.3 Correlation coefficients between the intensity of summer day sunny and night rainfall and the proportion of erosive rainfall in the north and south of Qinling Mountains during 1970—2020

2.3 秦岭南北夏季昼晴夜雨强度主导模态时空分布特征

为了分析 1970—2020 年秦岭南北夏季昼晴夜雨强

度主要空间分布特征,对夏季昼晴夜雨强度标准化场进行经验正交分解 EOF,并对前 10 个模态特征值误差范围进行显著性检验,获得主要空间分布类型(图 4)。

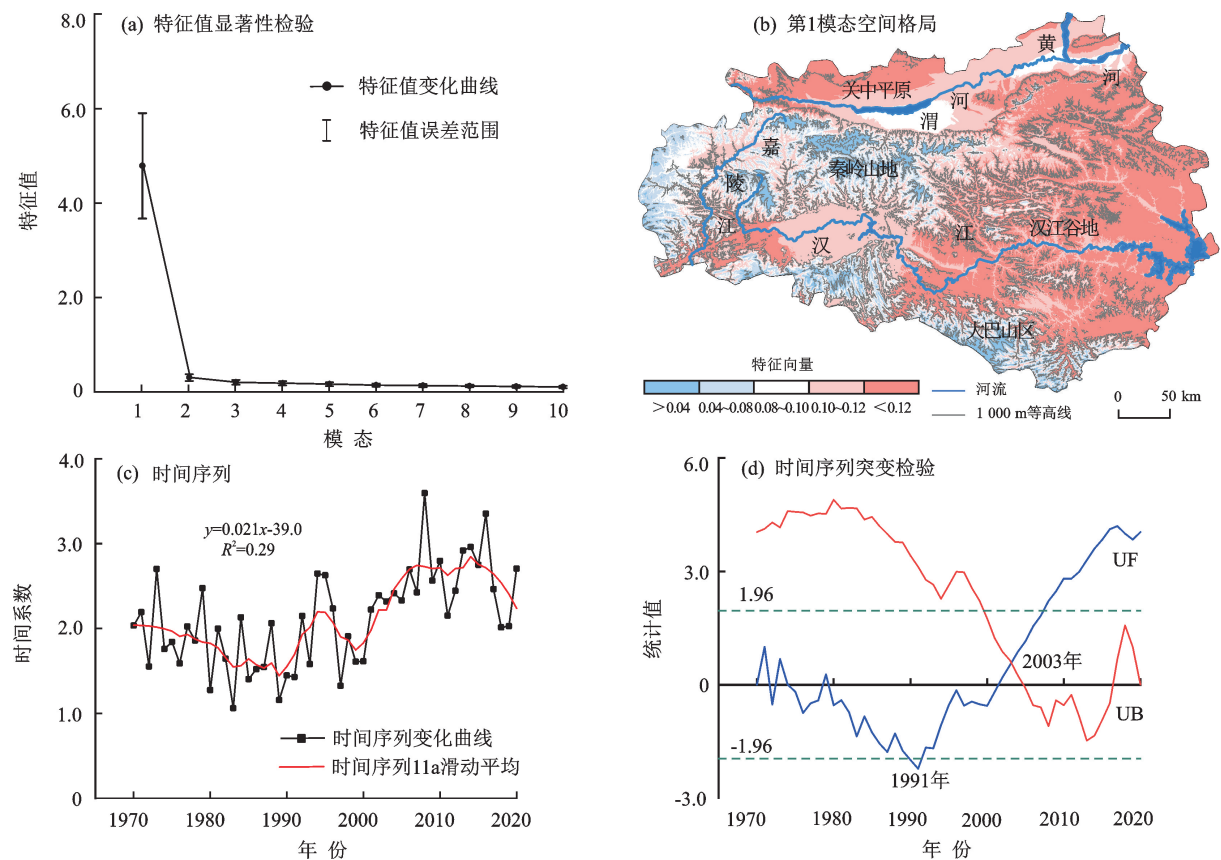


图 4 1970—2020 年秦岭南北夏季昼晴夜雨强度异常主导时空模态和突变检验

Fig.4 The leading mode and Mann—Kendall mutation test of the intensity anomaly of summer day sunny and night rainfall in the north and south of Qinling Mountains during 1970—2020

图 4a 为 EOF 分解前 10 模态特征值误差范围 North 显著性检验。由图 4a 和表 2 可知,秦岭南北夏季昼晴夜雨强度第 1 模态方差贡献率(62.2%)远高于其他模态,且通过了 North 显著性检验,说明第 1 模态为秦岭南北夏季昼晴夜雨强度空间变化的主导模态。

表 2 1970—2020 年秦岭南北夏季昼夜晴夜雨强度异常的 EOF 分解前 10 个模态贡献率

Table 2 Contribution rates of the first ten modalities obtained by EOF decomposition performed on the intensity anomaly of summer day sunny and night rainfall in the north and south of Qinling Mountains during 1970—2020

空间模态	贡献率/%	累积贡献率/%
1	62.2	62.2
2	4.4	66.3
3	2.8	69.1
4	2.5	71.5
5	2.2	73.8
6	1.9	75.7
7	1.8	77.5
8	1.7	79.1
9	1.6	80.7
10	1.5	82.2

第 1 模态全区符号一致为正,表明秦岭南北夏季昼晴夜雨强度变化趋势基本一致,仅是空间强弱存在差异。其中,低值区主要位于 1 000 m 以上高海拔地区,高值区连片分布于关中平原和汉江谷地。表明以 1 000 m 海拔高度为界限,相对于秦巴山地,河谷—平原区夏季昼晴夜雨强度变化更为敏感,即时间系数呈现下降趋势时,河谷—平原区夏季昼晴夜雨强度下降更加显著;反之,时间系数呈现上升趋势时,夏季昼晴夜雨强度上升更明显(图 4b)。

从该模态的时间系数看,第 1 模态空间分布整体呈现增强趋势(图 4c)。11 年滑动平均曲线显示,在 20 世纪 70—90 年代,全区夏季昼晴夜雨强度呈现下降趋势;20 世纪 90 年代开始,全区夏季昼晴夜雨强度呈现波动增加趋势。结合第 1 模态时间系数的 Mann—Kendall 突变检验发现,UF 和 UB 曲线交叉点为 2003 年,且交点在临界线之间,说明 2003 年后秦岭南北夏季昼晴夜雨强度存在突变增强(图 4d)。

由 UF 曲线可见,1970—2001 年,UF 值多处于 0 值以下,且以 1991 年为转折点,UF 曲线先波动下降后期快速增加,再次佐证了 20 世纪 70—90 年代秦岭南北夏季昼晴夜雨强度相对较弱的特征;2002 年,UF 曲线超过 0 值线,且在 2008 年超过 0.05 显著水

平线,表明近年来,秦岭南北夏季昼晴夜雨强度全区一致特征更为显著($p<0.05$)。

2.4 秦岭南北夏季昼晴夜雨强度时空异常的影响因素

气候变化背景下,局地气候因子的波动变化显著影响降雨变化。为此本文选取夏季昼晴夜雨发生同期累积最高气温、累积最低气温、累积日较差、累积日照时间、相对湿度和平均风速为影响因子,与年均夏季昼晴夜雨强度进行相关分析,进而通过 Lasso 高维数据回归分析,厘清不同分区夏季昼晴夜雨强度主导气象因子的重要性。表 3 为夏季昼晴夜雨强度与气象因子的相关系数矩阵。可以看出,关中平原夏季昼

晴夜雨强度与气象因子相关性较弱,不适于开展 Lasso 高维数据回归分析。张宏芳等^[27]对秦岭及周边地区暖季降水日变化及其成因分析发现,关中平原的夜雨主要受大尺度环流条件控制,即在青藏高原高压脊影响下,夜间对流层中上层主要为下沉气流,抑制了关中平原夜雨的发生,使关中平原在没有明显天气系统条件的情况下,夜雨异常偏少。这可能是关中平原夏季昼晴夜雨强度与局地气象因子呈弱相关的原因。与关中平原相比,除相对湿度之外,秦岭南坡、汉江谷地夏季昼晴夜雨强度与其他气象因子均呈显著正相关,适于进行 Lasso 高维数据回归建模。

表 3 1970—2020 年秦岭南坡夏季昼晴夜雨强度与气象因子的相关分析

Table 3 Correlation analysis between the intensity of summer day sunny and night rainfall and meteorological factors in the north and south of Qinling Mountains during 1970—2020

分区	累积最高气温	累积最低气温	累积日较差	累积日照时间	相对湿度	平均风速
关中平原	-0.11	-0.06	-0.19	-0.23 *	-0.04	-0.11
秦岭南坡	0.31 **	0.31 **	0.29 **	0.31 **	0.26 *	0.26 *
汉江谷地	0.32 **	0.30 **	0.34 **	0.41 **	0.22	0.42 **

注: * 和 ** 表示分别相关性通过 0.10 和 0.05 显著水平。下同。

在模型精度验证方面,秦岭南坡、汉江谷地模型拟合结果和原数据呈显著相关,拟合决定系数分别为 0.303($p<0.05$)和 0.425($p<0.01$),说明模型拟合状况良好(表 4),Lasso 高维数据回归建模对秦岭南坡、汉江谷地昼晴夜雨强度主导因素分析的解释具有较好的适用性。

表 4 1970—2020 年秦岭以南夏季昼晴夜雨强度和气象因子的 Lasso 高维数据线性回归

Table 4 Lasso linear regression analysis of meteorological factors on the intensity of summer day sunny and night rainfall in the north and south of Qinling Mountains during 1970—2020

分区	高维数据线性回归	λ	R
秦岭南坡	$y=0.061\ 9x_1+0.036\ 7x_2+0.127\ 2x_4$	0.095	0.303 *
汉江谷地	$y=0.140\ 4x_4+0.190\ 8x_6$	0.083	0.425 **

注: x_1 为累积最高气温; x_2 为累积最低气温; x_4 为累积日照时间; x_6 为平均风速; y 为昼晴夜雨强度。

秦岭南坡夏季昼晴夜雨强度与累积最高气温、累积最低气温和累积日照时间呈现显著正相关。当夏季昼晴夜雨同期累积最高气温、累积最低气温、累积日照时间增加 10% 时,秦岭山地夏季昼晴夜雨强度年均值分别增加 0.62%, 0.37% 和 1.27%; 对于汉江谷地而言,当夏季昼晴夜雨同期累积日照时间和平均风速增加 10% 时,汉江谷地昼晴夜雨强度年均值分别增加 1.40% 和 1.91%。可见,秦岭南坡、汉江谷地气象影响因子重要性排序呈现明显的差异性(图 5)。就秦岭南坡而言,同期累积日照时间、累积最高气温和累积最低气温重要性依次递减,累积日照时间是秦岭南坡夏季昼晴夜雨强度演替最重要的驱动因子;相比于秦岭南坡,汉江谷地夏季昼晴夜雨强度变化则受平均风速和累积日照时间共同影响,表征夜间温度的累积最低气温重要性相对较低。

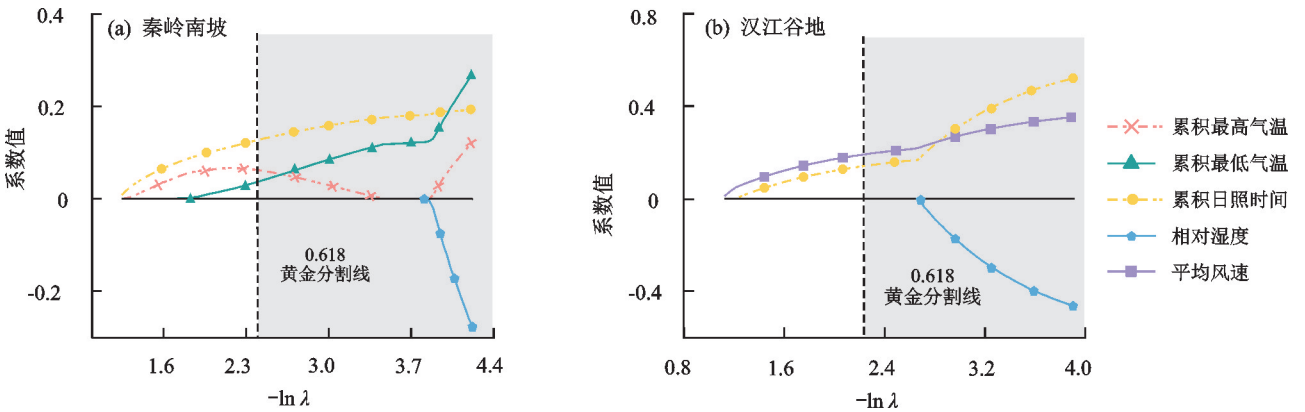


图 5 1970—2020 年秦岭以南夏季昼晴夜雨强度影响因子的变量引入过程

Fig.5 Variable introduction process of factors influencing the intensity of summer day sunny and night rainfall in the south of Qinling Mountains during 1970—2020

3 讨论

3.1 秦岭南北夏季昼晴夜雨强度变化的特殊性

全球变暖背景下,中国降水强度呈现显著增加趋势,显著上升区域主要分布在秦岭—淮河线以南地区^[28]。与上述结论一致,1970—2020 年,汉江谷地夏季昼晴夜雨强度增加速率高于秦岭南坡和关中平原。同时,关中平原昼晴夜雨强度低于同期秦岭南坡和汉江谷地;但是,2003 年后关中平原昼晴夜雨强度均值增加至 3.66 mm/d,基本与汉江谷地昼晴夜雨强度(3.63 mm/d)量级相当。

张宏芳等^[27]研究发现,受大尺度环流机制影响,秦岭南坡降水日峰值主要为夜雨,而秦岭北部黄土高原强降水多发于午后;且唐敏雨等^[29]研究发现,秦岭南侧夏季降水强度以清晨峰值为主,北侧降水强度则在午后较强。这些结论能印证并解释本文 1970—2020 年,秦岭南北夏季昼晴夜雨强度存在“南高北低”的空间格局。但大尺度环流机制并不能阐明 2003 年后关中平原和汉江谷地昼晴夜雨强度量级相当这一结论。

在中国热浪—暴雨复合极端事件多发的背景下,需要关注秦岭南北夏季昼晴夜雨强度变化的特殊性。需要结合昼晴夜雨强度的局地气象因子,对秦岭南北昼晴夜雨局地环流进行再认识。

3.2 夏季昼晴夜雨强度对土壤侵蚀的影响

1970—2020 年,秦岭南北夏季昼晴夜雨侵蚀性降雨量比重维持在 50% 左右,成为未来秦岭南北水土保持防治所需关注的重点。作为水力侵蚀区,邵伟婷等^[4]通过研究秦巴山区降雨侵蚀力时空变化特征发现,1961—2016 年,秦巴山区多年平均降雨侵蚀力并未呈现显著的变化趋势和突变特征。与上述结论不同的是,秦岭南北夏季昼晴夜雨强度显著增加,且昼晴夜雨强度与侵蚀性降雨量比重呈显著正相关。这说明在关注秦巴山区多年平均降雨侵蚀力趋势的同时,将逐日降水细分为昼晴夜雨、昼夜持续性降水、昼雨夜晴等类型,有利于更好地理解秦巴山区降雨侵蚀变化的规律。

值得关注的是,细分夏季降水日变化,也为水土保持试验提供了新的思路。相关研究^[30]表明,当植被盖度 $\leq 30\%$ 时,冲刷流量越大,坡面侵蚀越大。但是,白天高温与夜间暴雨耦合,是否增加土壤侵蚀风险,影响植被生长需要深入研究。在未来研究中,需设计不同覆盖度情境,加强昼晴夜雨期间不同坡面降水侵蚀量监测,量化夜雨强度、植被覆盖与土壤侵蚀的相互关系,为秦岭南北生态保护提供理论依据。

3.3 夏季昼晴夜雨强度南北响应差异的影响因素

关中平原夏季昼晴夜雨强度与气象因子相关性较弱,符合张宏芳等^[27]对秦岭以北降水日变化的机理解释结果认为,大尺度的环流条件是关中平原夜雨偏少的原因。至于 2003 年后关中平原昼晴夜雨强度异常偏高这一结果,推测可能是由于城市热岛效应加速局地热对流,使西安成为“热岛”中心,临近区域成为相对冷区。在夏季,降水量在冷区大部分区域增加,而降水日数呈现西部减少、东部(西安、长安等)增多趋势^[31],促进关中平原夏季昼晴夜雨强度异常上升。

此外,地表温度升高、水汽增加,大气不稳定性增加,可为强降水的形成提供热力和动力条件^[32]。Lasso 高维数据回归分析结果表明,秦岭南坡夏季昼晴夜雨强度与累积最高气温、累积最低气温和累积日照时间呈正向变动关系,而汉江谷地夏季昼晴夜雨强度与累积日照时间和平均风速呈正相关。下垫面提供低层大气热通量,增强大气层结的不稳定性^[33],加之夜晚地形造成辐射热力差异,所形成的山谷风环流促使暖空气抬升^[11],促进秦岭以南地区夏季昼晴夜雨强度增强。

本文对秦岭南北夏季昼晴夜雨强度的局地气象影响因子进行了探讨,结果充分反映秦岭南北夏季昼晴夜雨强度影响因子的空间分异,为研究中国南北过渡带夏季昼晴夜雨强度的空间分异提供新思路,在一定程度上可以弥补现有研究的不足。在未来,需要量化人类活动对秦岭南北地区夏季昼晴夜雨强度的影响,对区域夏季昼晴夜雨强度增加做出更加全面的解释。

4 结论

(1)1970—2020 年,秦岭南北夏季昼晴夜雨强度显著增加。秦岭南北夏季昼晴夜雨侵蚀性降雨量占比总雨量的 50% 左右,说明夏季昼夜复合高温增加背景下,以白天高温、夜间强降水为侵蚀形态的降水类型,将成为秦岭南北水土保持防治的重点。

(2)在空间变化上,1970—2020 年,秦岭南北夏季昼晴夜雨强度主导模态为全区一致型。2003 年后夏季昼晴夜雨强度“南高北低”的格局正在改变,关中平原与汉江谷地成为夏季昼晴夜雨强度增加的高值区。

(3)在影响因素上,1970—2020 年,秦岭南北夏季昼晴夜雨强度影响因子存在明显的空间分异。其中,秦岭南坡夏季昼晴夜雨强度主导因子为累积日照时间;汉江谷地夏季昼晴夜雨强度则受累积日照时间和平均风速共同影响。

参考文献:

- [1] 彭琼,刘宝元,曹琦,等.作物覆盖度对土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2022,36(5):97-103.

- PENG Q, LIU B Y, CAO Q, et al. Effect of crop coverage on soil erosion[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5): 97-103.
- [2] 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 J Y, FU B J, SUN J L, et al. Ecological civilization construction at Qinling Mountains in the New Era[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(10): 2449-2463.
- [3] 周晓晴, 马芊红, 张科利. 基于样带的陕西省水土流失规律研究[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 47-53.
- ZHOU X Q, MA Q H, ZHANG K L. Study on the characteristics of soil and water loss in Shaanxi Province based on transects[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(4): 47-53.
- [4] 邵祎婷, 何毅, 穆兴民, 等. 秦巴山区降雨侵蚀力时空变化特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(2): 416-425.
- SHAO Y T, HE Y, MU X M, et al. Spatiotemporal variation of rainfall erosivity in Qin-Ba Mountains region [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(2): 416-425.
- [5] YOU J W, WANG S. Higher probability of occurrence of hotter and shorter heat waves followed by heavy rainfall [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(17): e2021GL094831.
- [6] 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 S S, WANG C B, YAN J P, 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.
- [7] 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 S S, HU J L, HE J P, et al. Variation of summer-time 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.
- [8] 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(1): 30-37, 99.
- ZHANG Y C, YE Y F. An agroclimatic study on night rain features in mountainous regions in the western part of subtropical zone in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1994(1): 30-37, 99.
- [9] DENG H J, PEPIN N C, CHEN Y N, et al. Dynamics of diurnal precipitation differences and their spatial variations in China [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2022, 61(8): 1015-1027.
- [10] BAO X H, ZHANG F Q, SUN J H. Diurnal variations of warm-season precipitation east of the Tibetan Plateau over China [J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(9): 2790-2810.
- [11] 朱黎明, 张智欣, 魏庆伟. 基于 K 均值聚类的中国夏季降水日变化空间分布模式[J]. *气象科技*, 2021, 49(4): 552-560.
- ZHU L M, ZHANG Z X, WEI Q W. Spatial distribution of diurnal rainfall variation in summer over China using K-means Algorithm [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2021, 49(4): 552-560.
- [12] PAN H, CHEN G X. Diurnal variations of precipitation over North China regulated by the mountain-plains solenoid and boundary-layer inertial oscillation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36: 863-884.
- [13] 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 C F, CAO W, MIAO Q L, et al. Spatial distribution of night rainfall in summer over China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(11): 1935-1944.
- [14] YU R C, YUAN W H, LI J, et al. Diurnal phase of late-night against late-afternoon of stratiform and convective precipitation in summer southern contiguous China [J]. *Climate Dynamics*, 2010, 35: 567-576.
- [15] CHEN X C, ZHANG F Q, ZHAO K. Influence of monsoonal wind speed and moisture content on intensity and diurnal variations of the mei-yu season coastal rainfall over south China [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2017, 74(9): 2835-2856.
- [16] CHEN G X, LAN R Y, ZENG W X, et al. Diurnal variations of rainfall in surface and satellite observations at the monsoon coast (South China) [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(5): 1703-1724.
- [17] 周旗, 卞娟娟, 郑景云. 秦岭南北 1951—2009 年的气温与热量资源变化 [J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1211-1218.
- ZHOU Q, BIAN J J, ZHENG J Y. Variation of air temperature and thermal resources in the northern and southern regions of the Qinling Mountains from 1951 to 2009 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1211-1218.
- [18] 李双双, 何锦屏, 段克勤, 等. 秦岭南北降雪异常空间模式识别及其影响因素分析[J]. *地理科学进展*, 2023, 42(1): 161-172.
- LI S S, HE J P, DUAN K Q, et al. Identifying the spatiotemporal pattern of snowfall and influencing fac-

- tors in the south and north of the Qinling Mountains [J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(1): 161-172.
- [19] 张宏芳, 潘留杰, 卢珊, 等. 1901—2012年陕西降水、气温变化特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(6): 1674-1682.
ZHANG H F, PAN L J, LU S, et al. Variation characteristics of precipitation and air temperature from 1901 to 2012 in Shaanxi, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(6): 1674-1682.
- [20] 马琪, 李婷, 贺成民. 基于生态承载力预警的土壤侵蚀敏感红线划分研究: 以陕西省为例[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 93-99.
MA Q, LI T, HE C M. Zoning the sensitivity red-line of soil erosion based on an early-warning system of ecological carrying capacity: A case study of Shaanxi Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 93-99.
- [21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 69-113.
WEI F Y. Modern statistical diagnosis and prediction of climate [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 69-113.
- [22] NORTH G R, BELL T L, CAHALAN R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(7): 699-706.
- [23] 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): e168105.
- [24] TIBSHIRANI R. Regression shrinkage and selection via the lasso [J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1996, 58(1): 267-288.
- [25] 庞欣蕊, 葛森, 王晶, 等. 地理环境因子对肌酸激酶同工酶参考值的影响 [J]. *地理研究*, 2022, 41(6): 1700-1714.
PANG X R, GE M, WANG J, et al. Effect of geographical factors on reference values of creatine kinase isoenzyme [J]. *Geographical Research*, 2022, 41(6): 1700-1714.
- [26] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(4): 6-11.
XIE Y, LIU B Y, ZHANG W B. Study on standard of erosive rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 6-11.
- [27] 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 H F, PAN L J, CHEN H M, et al. Diurnal variations and causes of warm season precipitation in Qinling and surrounding areas [J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(5): 935-946.
- [28] 徐新创, 张学珍, 戴尔阜, 等. 1961—2010年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析 [J]. *地理研究*, 2014, 33(7): 1335-1347.
XU X C, ZHANG X Z, DAI E F, et al. Research of trend variability of precipitation intensity and their contribution to precipitation in China from 1961 to 2010 [J]. *Geographical Research*, 2014, 33(7): 1335-1347.
- [29] 唐敏丽, 肖潺, 原韦华. 秦岭南北降水小时尺度特征对比分析 [J]. *暴雨灾害*, 2022, 41(1): 24-32.
TANG M L, XIAO C, YUAN W H. Comparative analysis of hourly features of precipitation in the north and south areas of Qinling Mountains [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2022, 41(1): 24-32.
- [30] 边焄, 朱冰冰, 黎珩, 等. 不同植被空间配置下的坡面产沙及泥沙连通性变化特征 [J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2): 45-50.
BIAN H, ZHU B B, LI H, et al. Variation characteristics of slope sediment yield and sediment connectivity under different vegetation spatial distributions [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 45-50.
- [31] 王建鹏, 孙继松, 王式功, 等. 盆地地形下西安城市热岛效应对周边降水的影响 [J]. *干旱气象*, 2011, 29(2): 168-173, 181.
WANG J P, SUN J S, WANG S G, et al. Impact of basin terrain urban heat island effect on precipitation in surrounding region of Xi'an [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2011, 29(2): 168-173, 181.
- [32] 姚飞, 杨秀芹, 刘慕嘉, 等. 江淮流域梅雨过程识别及梅雨期分级降水时空特征 [J]. *地理科学进展*, 2023, 42(1): 145-160.
YAO F, YANG X Q, LIU M J, et al. Identification of Meiyu process and spatiotemporal characteristics of different precipitation levels during the Meiyu period over the Yangtze-Huai River Basin [J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(1): 145-160.
- [33] 卢萍, 宇如聪, 周天军. 2003年8月“巴蜀夜雨”过程的模拟和分析研究 [J]. *气象学报*, 2008, 66(3): 371-380.
LU P, YU R C, ZHOU T J. Numerical simulation of the mid-night rainfall over Sichuan basin during August 2003 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(3): 371-380.