

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.015; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.015.

刘引鸽, 罗紫薇, 郭慧君, 等. 基于遥感数据的河谷地区气候水文变化特征及区域差异:以宝鸡地区为例[J].水土保持研究, 2025, 32(1):181-194.
Liu Yingge, Luo Ziwei, Guo Huijun, et al. Characteristic of climatic and hydrological variations in river valley regions based on remote sensing data and associated regional differences: a case study in Baoji area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1):181-194.

基于遥感数据的河谷地区气候水文变化特征及区域差异 ——以宝鸡地区为例

刘引鸽, 罗紫薇, 郭慧君, 李丹丹, 林茂琦, 吕欣怡

(宝鸡文理学院 地理与环境学院 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721013)

摘要: [目的]探究不同分区气候水文多要素变化特征,为该地水资源管理及可持续开发利用提供区域性的科学依据。[方法]基于 1950—2021 年的卫星遥感数据,选取宝鸡地区 9 个县区的気温、地表温度、降水量、蒸发量、低层云量、总云量、紫外强度、相对湿度、径流、地表径流和地下径流 11 种要素,采用自适应噪声经验模态分解法(CEEM-DAN)和重标极差 R/S 分析方法,分析了近 70 年该区域多气象水文要素时空特征及区域差异,探讨了不同分区气候水文要素变化的延续性及未来趋势。[结果](1) 区域仅年气温和地温呈上升趋势,其余要素的年均趋势均呈下降趋势,各要素趋势率分别为 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $-40.97\text{ mm}/10\text{ a}$, $-0.59\text{ mm}/10\text{ a}$, $-1.14\%/10\text{ a}$, $-0.17\%/10\text{ a}$, $-4\,060.4\text{ J}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{ a})$, $-0.99\%/10\text{ a}$, $-3.6\text{ mm}/10\text{ a}$, $-1.61\text{ mm}/10\text{ a}$ 和 $-1.94\text{ mm}/10\text{ a}$ 。季节变化上,冬季气温和地温上升趋势最大,夏季降水减少幅度最大,紫外强度仅在春季表现为上升趋势,春季相对湿度减小最大,低层云量春季减小最大,径流和地表径流夏季的下降趋势最大,地下径流秋季的下降趋势最大。千陇丘陵区各要素的变率都较大;(2) 空间上,年气温、地温、蒸发量和紫外强度的高值多分布于千陇丘陵区 and 渭河川塬区,年降水量、低层云量、总云量、相对湿度、径流、地表径流和地下径流的高值区多分布在秦岭关山区。除凤县和眉县的蒸发量外,其他要素在各县区的升降趋势均与其在整个地区的趋势一致;(3) 各气象水文要素具有 2~3 a, 4~5 a, 7~9 a, 11~13 a, 19~35 a 为主的年代际振荡周期;(4) 未来宝鸡地区各气象水文要素均延续历史的上升或下降趋势,但延续时长不同,其中千陇丘陵区、渭河川塬区和秦岭关山区均存在最长延续时长 10 a 和最短延续时长 4 a。[结论]宝鸡地区气候整体朝暖干化方向发展,各分区气候水文变化具有明显差异,且均存在明显振荡周期和正持续特征。

关键词: 气象水文要素; 时空变化; 自适应噪声分解法; 重标极差分析法; 遥感数据

中图分类号: P467; K903

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0181-14

Characteristic of climatic and hydrological variations in river valley regions based on remote sensing data and associated regional differences — a case study in Baoji area

Liu Yingge, Luo Ziwei, Guo Huijun, Li Dandan, Lin Maoqi, Lyu Xinyi

(Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating in Shaanxi Province, College of Geography and Environment, Baoji University of Art and Science, Baoji, Shaanxi 721013, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the variation characteristics of climatic and hydrological multi factors in different regions, and to provide regional scientific basis for water resource management and sustainable development and utilization in the area. [Methods] According to the satellite remote sensing data of 9 counties in Baoji area spanning 1950 to 2021, a total of 11 factors including temperature, surface temperature, precipitation, evaporation, low-level cloud cover, total cloud cover, UV intensity, relative humidity, runoff, surface runoff, and groundwater runoff were selected for analysis. The complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise method (CEEMDAN) and R/S analysis method were used

收稿日期: 2024-04-08

修回日期: 2024-04-28

资助项目: 国家自然科学基金(41771048); 陕西省重点研发计划项目(2022SF-364)

第一作者: 刘引鸽(1965—), 女, 陕西兴平人, 博士, 教授, 主要从事气候变化、水资源管理及生态研究。E-mail: yingeliu@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

to analyze the spatiotemporal characteristics and regional differences of multiple meteorological and hydrological factors in the past 70 years. This was followed by the discussion on the continuity and future trends of changes in climate and hydrological factors in different regions. [Results] (1) The regional annual temperature and ground temperature showed an upward trend, while the annual precipitation, evaporation, low-level cloud cover, total cloud cover, UV intensity, relative humidity, runoff, surface runoff, and groundwater runoff showed a downward trend. Their trend rates were $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $-40.97\text{ mm}/10\text{ a}$, $-0.59\text{ mm}/10\text{ a}$, $-1.14\%/10\text{ a}$, $-0.17\%/10\text{ a}$, $-4\text{ }060.4\text{ J}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{ a})$, $-0.99\%/10\text{ a}$, $-3.6\text{ mm}/10\text{ a}$, $-1.61\text{ mm}/10\text{ a}$, and $-1.94\text{ mm}/10\text{ a}$, respectively. From the aspect of season, the temperature and ground temperature increased the most in winter, and the precipitation decreased the most in summer. In spring, only UV intensity showed an uplift, with the largest decrease in both relative humidity and lower cloud cover. Runoff and surface runoff exhibited the most significant decline in summer, while the underground runoff decreased the most in autumn. All the factors in the Qianlong hilly area varied greatly. (2) Spatially, the regions with high annual temperature, ground temperature, evaporation, and UV intensity are predominantly distributed in the Qianlong hilly area and the Weihe River plateau area. The regions with high annual precipitation, low-level cloud cover, total cloud cover, relative humidity, runoff, surface runoff, and groundwater runoff were primarily located in the Guanshan area of the Qinling Mountains. In addition to the evaporation in Fengxian county and Meixian county, all other factors in each county displayed a consistent upward or downward trend with the entire region. (3) Each meteorological and hydrological factor had an interdecadal oscillation period dominated by $2\sim 3\text{ a}$, $4\sim 5\text{ a}$, $7\sim 9\text{ a}$, $11\sim 13\text{ a}$, and $19\sim 35\text{ a}$. (4) All meteorological and hydrological factors in the Baoji area will continue their historical upward or downward trends in the future, but with different durations. The temperature, ground temperature, evaporation, and surface runoff in the Qianlong hilly area, the temperature and surface runoff in the Weihe Chuanyuan area, and the precipitation, relative humidity, runoff, and surface runoff in the Guanshan area of Qinling can last up to 10 a. The UV intensity in the Qianlong hilly area, and the low-level cloud cover in the Weihe Chuanyuan area and the Guanshan area of Qinling can be a minimum of 4 a. [Conclusion] The climate in Baoji area varies towards warming and drying, and the climate and hydrological changes between regions have significant differences, with obvious oscillation periods and positively persistent characteristics.

Keywords: meteorological and hydrological factors; temporal and spatial changes; complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise method; rescaled range analysis method; remote sensing data

由自然演化和人类活动共同驱动的全球变化愈演愈烈,气候变化正以前所未有的速率在各种时空尺度发生作用^[1-4],尤其从 20 世纪 80 年代以来,几乎每年都有比前年更剧烈的升温及降水的极端气候事件发生,因此针对气候、水文与生态环境变化及其影响研究受到学者们的关注,如黄小燕等利用 1960—2011 年逐日水文气象数据对我国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征进行分析^[5],邵晓梅等利用小波分析研究近 40 年黄河流域季节降水序列和年际降水系列的周期性^[6],韩知明等探究呼伦湖降水量多时间尺度周期性,同时对未来降水的丰枯情况进行预测^[7]。渭河流域区域气候水文变化研究也受到许多关注,如刘引鸽等探究渭河流域长时间序列的水文气象要素对径流及气候变化的影响^[8-10],任立良等分析了渭河水文干旱

演变特征及影响因素^[11],以上主要采用观测数据及气候模式数据针对气温及降水的变化趋势进行研究。然而,不同区域对全球变化的响应是不一致的,采用卫星遥感数据对多要素、长时间序列局地小区域进行区域气候生态环境要素精细综合变化研究提供了数据可能。随着遥感数据分辨率提高,遥感数据被很好应用于小区域精细分析气象水文要素的变化研究。

因此,本文以宝鸡地区为例,基于县域尺度提取 1950—2021 年宝鸡地区气温、地表温度、降水量、蒸发量、低层云量、总云量、紫外强度、相对湿度、径流、地表径流和地下径流多个气象水文因子的卫星遥感数据,分析近几十年来多要素的气候水文变化特征,探讨其周期及未来趋势变化,旨在为该地区灾害防治和水资源调配提供科学依据,弥补针对河谷地区气候

研究指标的不足,并为实测数据与卫星遥感数据对比及精度误差提供重要依据。

1 研究区概况

河谷地形的宝鸡地区地处秦岭纬向构造体系与其他构造体系的复合交接部位,属暖温带半干旱半湿润的大陆性季风气候,全年的气候变化主要受制于东南季风性气候与西北温带大陆性气候影响,冷暖干湿四季分明,是气象灾害频发的区域,也是全球气候变化重要的响应区域。宝鸡地区地形复杂,可划分为北部的千陇丘陵区、中部的渭河川塬区,南部的秦岭关山区。千陇丘陵区由黄土高原区南缘与渭河川塬以北的丘陵组成,包括麟游县全境和陇县、千阳、岐山、凤翔、扶风等县的部分地区。渭河川塬区谷地由渭河盆地、千河谷地和渭北台塬、渭面残塬等平原组成,跨越了千阳、凤翔、扶风、岐山、眉县、陈仓区等县区。秦岭关山区覆盖宝鸡地区的西部和南部,包括太白、凤县全境和眉县、宝鸡等县部分地区,宝鸡地区地形及分区见图 1。

2 数据与方法

2.1 数据来源及精度验证

研究所采用的气象水文卫星遥感数据均来源于农业气象大数据系统网站(<https://www.xiaomaiya.cc/>),分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,该数据是经过多卫星综合反演得到的再分析资料,源数据为 NASA Goddard Earth Sciences (GES) Data and Information Services Center (DISC) (GES-DISC MERRA2 inst1_2d_asm_Nx, <https://disc.gsfc.nasa.gov/>),通过插值及校正得到了

1950—2021 年渭滨区、凤县、岐山县、眉县、陇县、太白县、千阳县、麟游县和陈仓区逐月气温、地表温度、降水量、蒸发量、低层云量、总云量、紫外强度、相对湿度、径流、地表径流和地下径流要素数据。气温、降水量的实测数据来源于国家气象信息中心的中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0),径流量数据来源于千阳水文站实测数据。

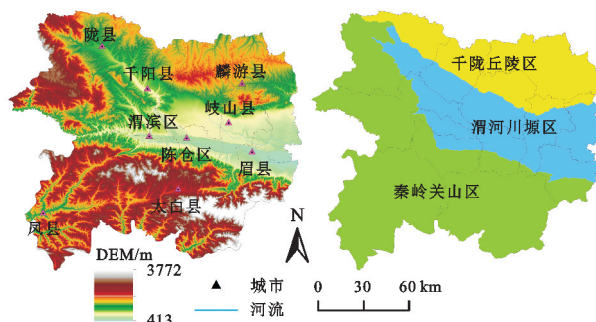


图 1 宝鸡地区 DEM 及地理分区

Fig. 1 DEM and geographic zoning of Baoji area

以 1950—2021 年气温和降水量观测数据为自变量,对应时间的卫星遥感数据为因变量,利用一元线性回归分析、相关系数和相对误差对精度进行检验,由图 2 可以看出,气温和降水量的实测数据与遥感数据的斜率分别为 1.02, 0.85, 相关系数分别为 0.90, 0.77, 相对误差为 -5.63% 和 -2.86%, 相对误差均小于 $\pm 10\%$, 均具有较好的一致性;由于径流深没有实测数据,故将实测径流量与遥感径流深数据的趋势进行比较见图 3,可以看出两因素具有较为一致的趋势变化,且其相关系数为 0.72,说明此遥感数据整体上的评估精度较高。

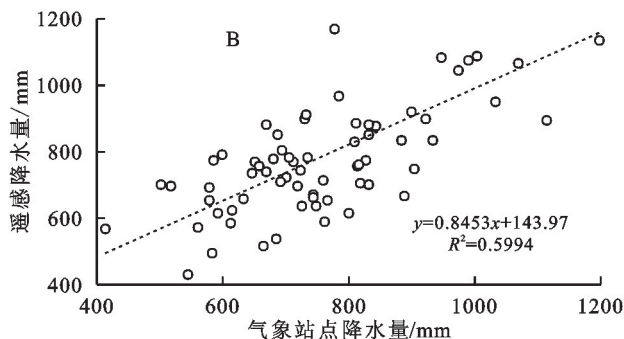
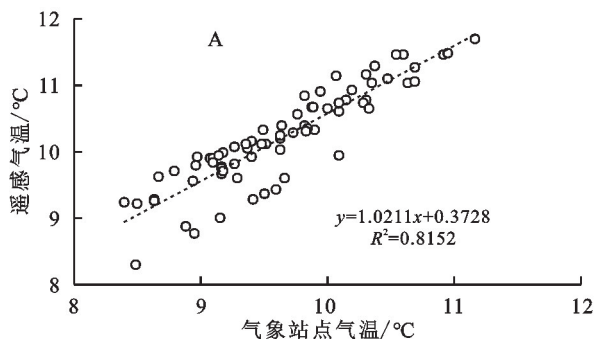


图 2 气象站点数据与遥感数据的相关性

Fig. 2 Correlation of meteorological station data with remote sensing data

2.2 研究方法

2.2.1 自适应噪声的完备经验模态分解法(CEEMDAN) 由于所使用气象水文数据为遥感数据,得到的气象水文要素可能存在误差,将未经过消噪预处理的数据直接用于后续分析可能会放大误差带来的影响,忽略包含在原始数据序列中的重要信息,因此需对数据进行降噪预处理。自适应噪声的完备经验模

态分解法(CEEMDAN)是基于 EMD, EEMD 改进后的方法,通过加入自适应的噪声优势,数据重构误差非常小,能有效处理模态混叠和端点效应^[12]。分解原理如下:

假设原始时间序列为 $x(t)$, 则第 i 次的信号表示为

$$x^i(t) = x(t) + \epsilon_0 \omega^i(t) \quad (1)$$

式中: $\omega^i(t)$ ($i=1, 2, \dots, I$) 为在原始序列添加的白噪声; I 为集合数; ϵ_0 为控制白噪声能量的参数; i 为噪声添加的次数。

然后, 对 $x^i(t)$ 进行 EMD 分解, 得到第一个模态分量为:

$$\text{IMF}_1 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \text{IMF}_1^i \quad (2)$$

计算第一阶段残差:

$$r_1(t) = x(t) - \text{IMF}_1 \quad (3)$$

计算二阶 IMF:

$$\text{IMF}_2 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \text{IMF}_2^i \quad (4)$$

第二阶残差为:

$$r_2(t) = r_1(t) - \text{IMF}_2 \quad (5)$$

重复执行上述步骤, 直至余量不能分解, 即达到 IMF 的最高阶次, 至此算法结束。

恢复出的原始序列表示为:

$$x(t) = r_n(t) + \sum_{i=1}^n \text{IMF}_i \quad (6)$$

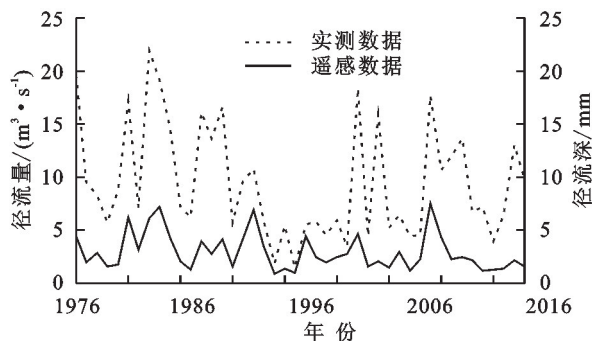


图 3 实测径流量与遥感径流深的趋势变化

Fig. 3 Trend changes in measured and remotely sensed runoff depths

2.2.2 重标极差 R/S 分析法 基于 R/S 方法计算的 Hurst 指数可有效分析样本时间序列未来变化趋势对过去数据的相互关系和依赖程度, 根据过去时间序列预测将来是否存在趋势性成分及其趋势强度^[13-14]。计算公式如下:

设有时间序列 x_i 的长度为 N , 将此时间序列均分为 L 个的相邻子区间, 每个子区间的长度为 n , 则 $L \times n = N$ 。用 I_α 表示任一子区间, 其中 $\alpha=1, 2, \dots, L$ 。用 $N(k, m)$ 表示 I_α 中的元素, $k=1, 2, \dots, n; m=1, 2, \dots, L$ 。

计算 I_α 的均值:

$$E_\alpha = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{k,\alpha} \quad (7)$$

计算 I_α 对于均值的累积截距定义为:

$$X_{k,\alpha} = \sum_{i=1}^k (N_{k,\alpha} - E_\alpha) \quad k=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

极差公式:

$$R_{I_\alpha} = \max(X_{k,\alpha}) - \min(X_{k,\alpha}) \quad (9)$$

子区间 I_α 的标准差公式:

$$S_{I_\alpha} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (N_{k,\alpha} - E_\alpha)^2}{n}} \quad (10)$$

每一个 R_{I_α} 均由对应的 S_{I_α} 标准化后得到:

$$\left(\frac{R}{S}\right)_n = \frac{1}{L} \sum_{\alpha=1}^L \frac{R_{I_\alpha}}{S_{I_\alpha}} \quad n=3, \dots, N \quad (11)$$

以 $\lg(n)$ 为自变量, $\lg(R/S)$ 为因变量进行线性回归, 公式:

$$\lg\left(\frac{R}{S}\right) = \lg c + H \lg n + \epsilon \quad (12)$$

式中: c 为常数; H 为 Hurst 指数的估计值。

通过 R/S 分析计算的 Hurst 指数可以揭示时间序列中的未来趋势性成分, 这种趋势将会持续一段时间, 但当超过一定的时间尺度, 序列就会表现出不相关的随机行为。通过统计量 V 可以判断时间序列是否有非周期性循环, 且能测定出平均循环长度, 即过去的趋势对未来的影响将会持续的时间长度^[15], 公式如下,

$$V_n = \left(\frac{R}{S}\right)_N / \sqrt{n} \quad (13)$$

在 $V - \ln(n)$ 的曲线上, 若时间序列是随机的 ($H=0.5$), V 统计量应为一条水平直线, 若时间序列呈反持续特征 ($H < 0.5$), 则直线应该向下倾斜, 反之直线应该是向上倾斜。若曲线出现明显转折时, 那么过去时间序列对未来的影响将会逐渐消失, 曲线发生转变的点所对应的时间长度 n 即为序列的平均循环长度, 此后的变化趋势与历史趋势无明显相关性。

3 结果与分析

3.1 气象水文要素年代际变化

年均气温和地温呈上升趋势, 趋势率分别为 $0.27^\circ\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.25^\circ\text{C}/10\text{ a}$, 降水量、蒸发量、低层云量、总云量、紫外强度和相对湿度均呈下降趋势, 趋势率分别为 $-40.97\text{ mm}/10\text{ a}$, $-0.59\text{ mm}/10\text{ a}$, $-1.14\%/10\text{ a}$, $-0.17\%/10\text{ a}$, $-4\ 060.4\text{ J}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{ a})$ 和 $-0.99\%/10\text{ a}$ 。气温和地温的年距平值变化在 1995 年之前主要为负, 之后则主要为正; 降水量和相对湿度年距平值在 20 世纪呈正负交替的形式, 之后则主要为负距平; 蒸发量的年距平值基本不变; 低层云量和总云量年距平值都在 20 世纪 50 和 60 年代时出现两次峰值, 之后年距平值整体变化较小; 紫外强度年距平值总体来说波动较大。

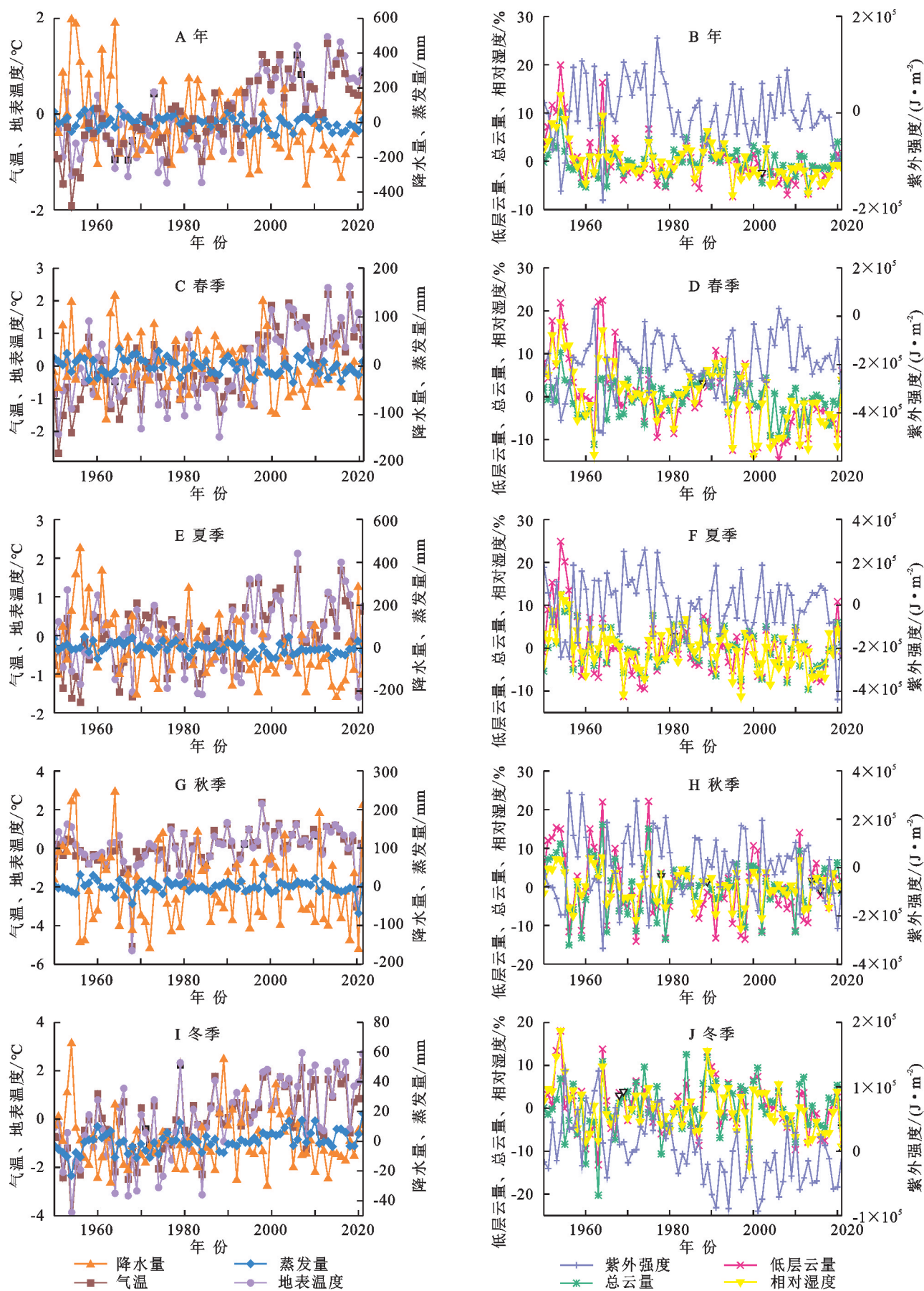


图 4 各气象要素年际和季节变化趋势

Fig. 4 Inter-annual and seasonal trends in meteorological elements

气象要素的季节变化表现出差异性,气温和地温四季均呈上升趋势,其中冬季上升趋势最显著,趋势率为 $0.40\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;降水量四季都呈下降趋势,但年内分配不均,夏季距平变幅最大,趋势率为 $-26.74\text{ mm}/10\text{ a}$,冬季距平变幅最小,趋势率为 $-0.78\text{ mm}/10\text{ a}$;蒸发量仅冬季呈上升趋势,趋势率为 $1.6\text{ mm}/10\text{ a}$,春夏两季相对于秋季下降趋势较明显,且春夏季距平值波动幅度大于秋季;低层云量春季变幅最大,为 $-2.12\%/10\text{ a}$,冬季变幅最小,为 $-0.52\%/10\text{ a}$;总云量仅冬季呈现上升趋势,趋势率为 $0.029\%/10\text{ a}$,其余季节均呈现微弱下降趋势,且年内分配较平均;紫外强度四季距平值均表现为正负波动,其中仅春季呈

现上升趋势,趋势率为 $11\ 884\text{ J}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{ a})$,其余季节均呈下降趋势;相对湿度从整体上看,四季距平值波动幅度和趋势率大小排列为春>冬>夏>秋(图 4)。

由图 5 看出,年均径流、地表径流、地下径流呈减小趋势,趋势率分别为 $-3.6\text{ mm}/10\text{ a}$, $-1.61\text{ mm}/10\text{ a}$ 和 $-1.94\text{ mm}/10\text{ a}$,且三者年距平值变化幅度基本一致,其中 1955 年和 1964 年变化振幅较大。季节变化与年变化基本相似,均为减小趋势,其中夏季地下径流和冬季地表径流距平值基本不变,径流和地表径流夏季的下降趋势最大,为 $-6.5\text{ mm}/10\text{ a}$ 和 $-4.49\text{ mm}/10\text{ a}$,地下径流秋季的下降趋势最大,为 $-3.67\text{ mm}/10\text{ a}$ (图 5)。

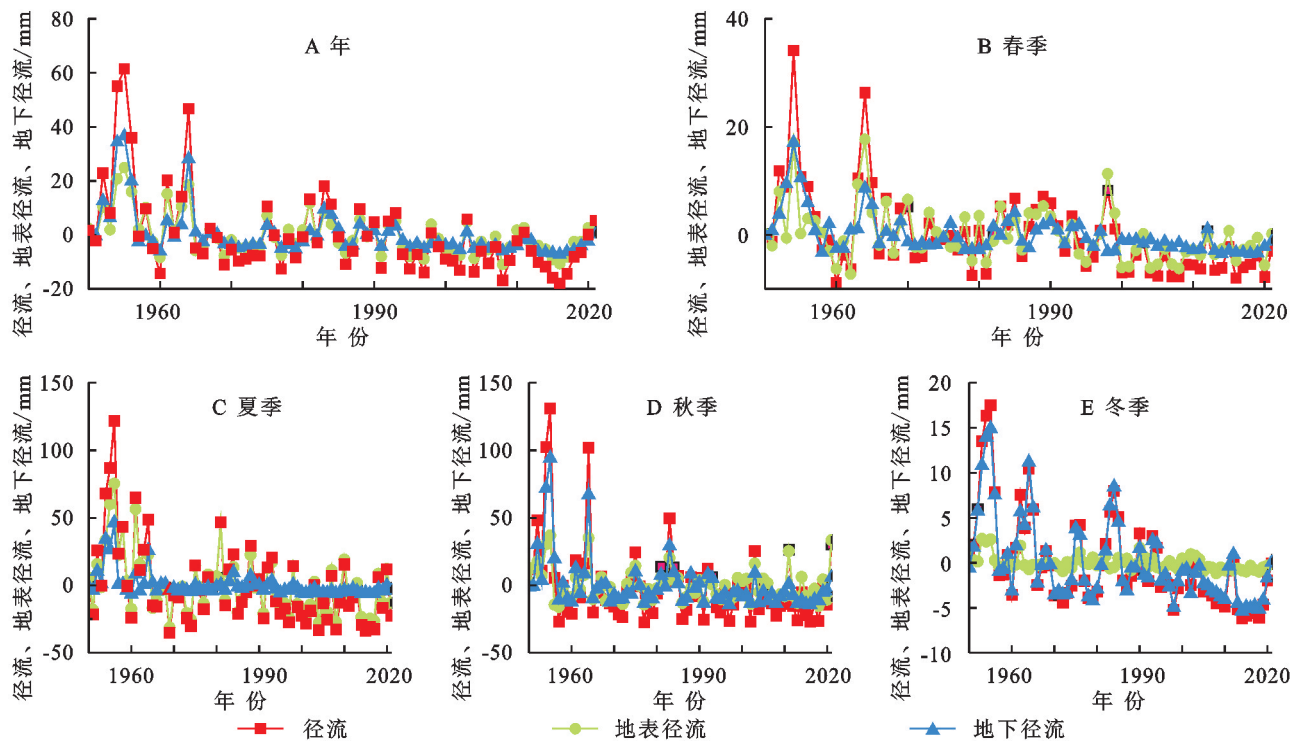


图 5 各水文要素年际和季节变化趋势

Fig. 5 Inter-annual and seasonal trends of hydrological elements

计算 3 个区域年际气候水文要素的变异系数结果见图 6,可以看出,秦岭关山区的年气温变异系数在 1970s 达到峰值为 0.076,在 2000s 之前,千陇丘陵区年气温变异系数较高,之后则较低,说明在 2000s 之前,千陇丘陵区的年气温波动较大,其中 1970s 年气温波动最显著的是秦岭关山区,之后则是渭河川塬区和秦岭关山区波动较大;三区年地温、降水量、低层云量、径流和地表径流在年际变率上具有相似特征,均表现为在 2010s 之前千陇丘陵区的变异系数较大,之后则是渭河川塬区和秦岭关山区的变异系数较大,三区年地温、降水量、低层云量、径流和地表径流的变异系数在 $0.003 \sim 0.074$, $0.071 \sim 0.247$, $0.034 \sim 0.243$,

$0.039 \sim 0.737$, $0.025 \sim 0.490$;年蒸发量、相对湿度和地下径流具有相似的年际变率特征,千陇丘陵区的变异系数总是高于渭河川塬区,再高于秦岭关山区,说明千陇丘陵区的年蒸发量、相对湿度和地下径流较不稳定,而秦岭关山区的则较为稳定,三区的年蒸发量、相对湿度和地下径流的变异系数为 $0.031 \sim 0.103$, $0.006 \sim 0.074$, $0.205 \sim 1.056$;三区的年总云量和紫外强度在近 70 年间波动差异极小,总的来说,三区的年总云量和紫外强度在 1960s 波动最大,变异系数为 $0.070 \sim 0.075$, $0.051 \sim 0.052$,年总云量在 1990s 波动最小,变异系数为 $0.019 \sim 0.021$,年紫外强度在 2020s 波动最小,变异系数为 $0.008 \sim 0.011$ 。

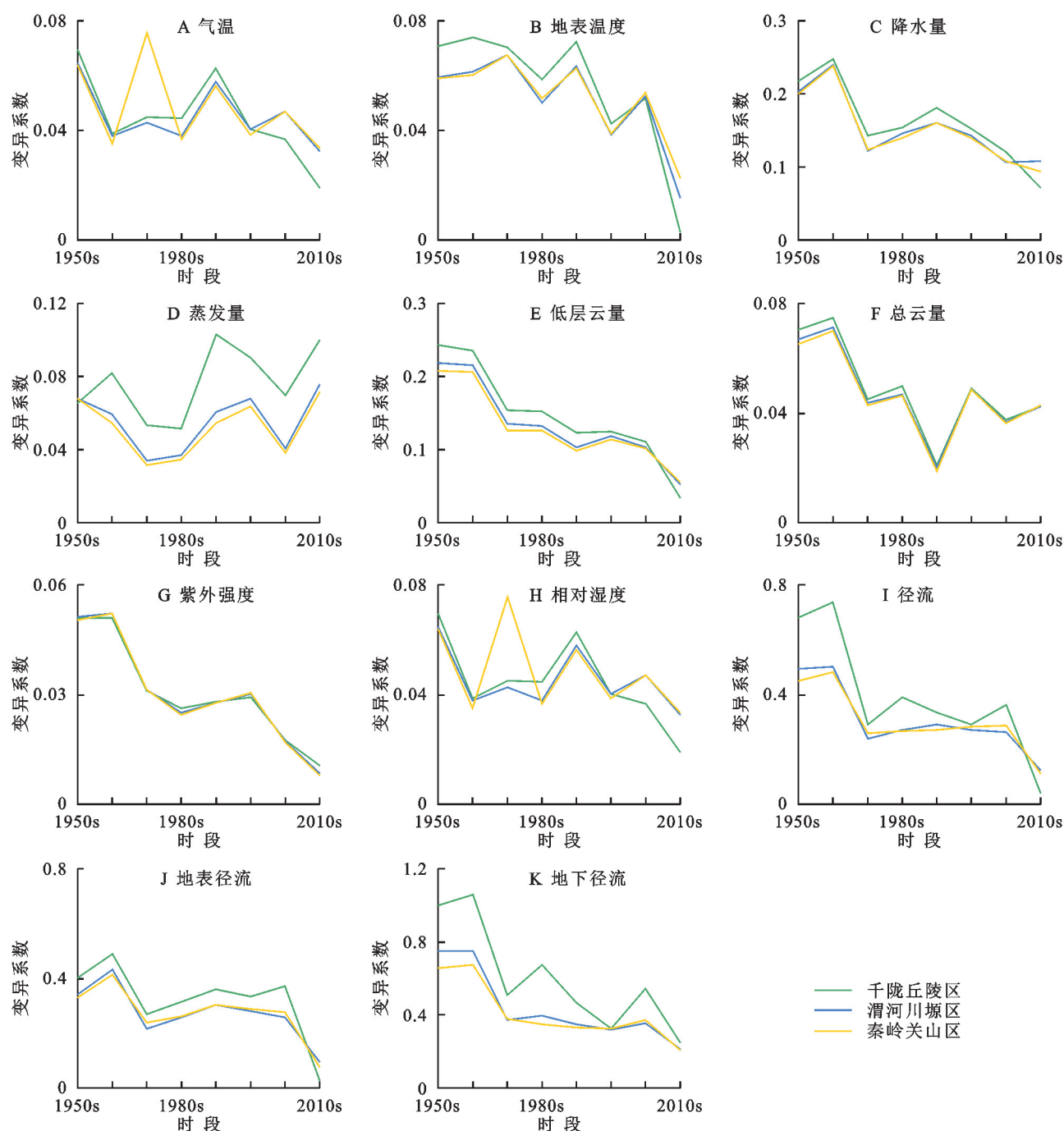


图 6 不同分区气象水文要素的年代变异系数

Fig. 6 Chronological coefficient of variation of meteorological and hydrological elements in different subzones

3.2 空间变化的差异性

该区域气候水文要素的空间变化具有较大差异性(图 7),气温和地温的年均值空间分布大致相同,千陇丘陵区 and 渭河川塬区的大部分地区年均气温和地温高于秦岭关山区,最大年均值均出现在岐山县,分别为 12.32°C 和 11.30°C ,气温最小年均值出现在陇县,为 8.81°C ,地温最小年均值出现在凤县,为 7.89°C ;年降水量和相对湿度的分布基本相同,秦岭关山区的高值多于渭河川塬区,再多于千陇丘陵区,以上两者的最大值均出现在眉县,分别为 $1\,621.06$

mm 和 74.83% ,年降水量最小值出现在岐山县,为 804.61 mm ,相对湿度最小值出现在千阳县,分别为 62.90% ;受海拔高度和地形的影响,年蒸发量和紫外强度与年降水量和相对湿度呈相反分布,即千陇丘陵区的高值多于渭河川塬区,再多于秦岭关山区,年均蒸发量和紫外强度的最大值均出现在陇县,分别为 732.47 mm 和 $1\,713\,350.74\text{ J/m}^2$,年均蒸发量最小值出现在千阳县,为 580.88 mm ,紫外强度最小值出现在眉县,为 $1\,596\,609.27\text{ J/m}^2$,年均低层云量和总云

量总体分布基本一致,从千陇丘陵区到渭河川塬区,再到秦岭关山区逐渐增大,凤县出现最大值,分别为

36.60%和 66.19%,最小值分别出现在岐山县和千阳县,分别为 19.23%和 58.29%。

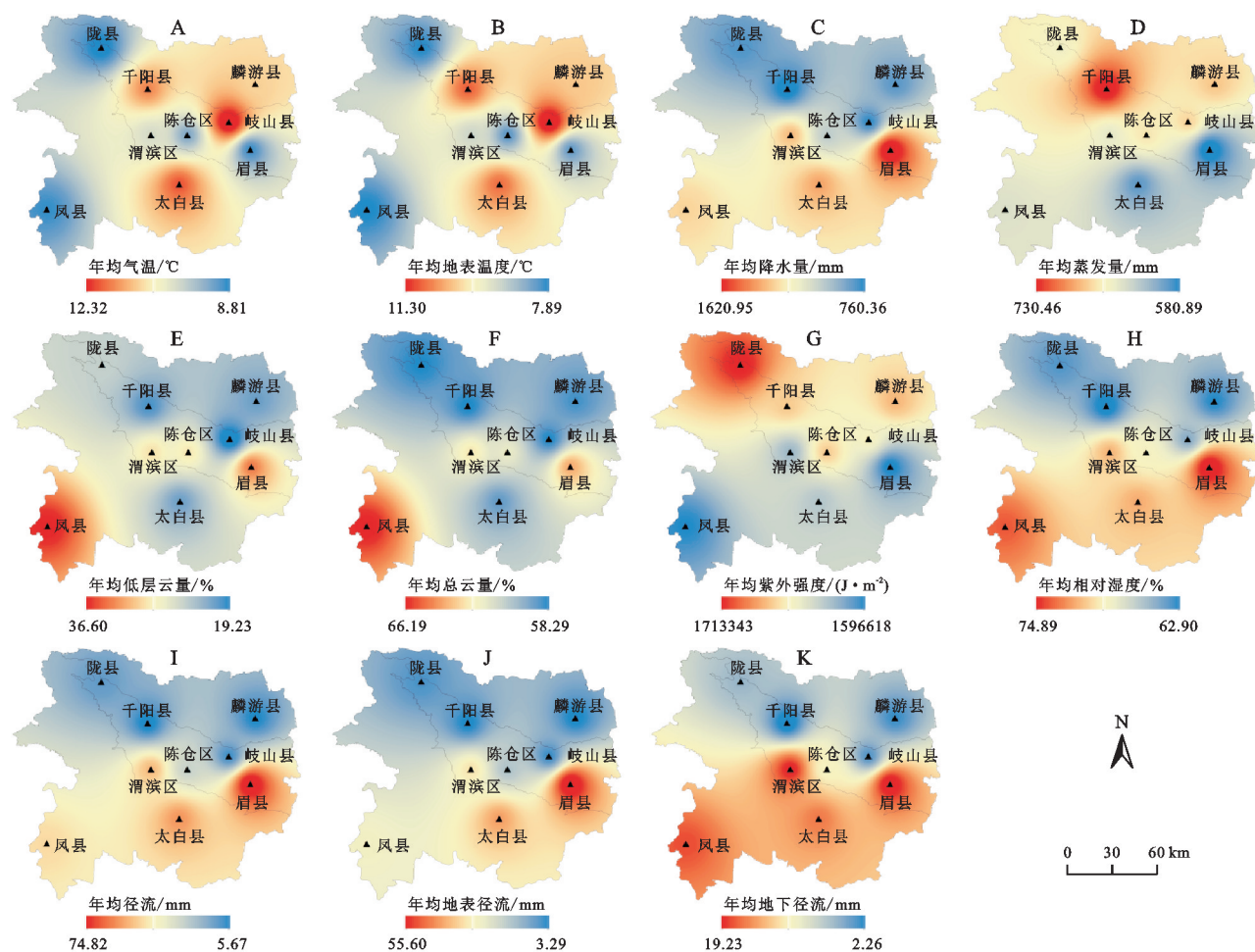


图 7 气象水文要素多年均值空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of multi-year averages of meteorological and hydrological elements

由年均水文要素分布可以看出,径流、地下径流和地表径流分布均呈南北分明的空间特征,总体来说秦岭关山区径流、地表径流和地下径流最大,其次是渭河川塬区,千陇丘陵区相对较小,三者的最大值均出现在眉县,分别为 74.82 mm, 55.60 mm 和 19.23 mm,年径流和地下径流最小值出现在千阳县,分别为 5.67 mm 和 2.26 mm,年地表径流最小值为 3.29 mm,出现在麟游县。

气象水文要素变化趋势的空间分布也有巨大差异(图 8),气温和地温的变化趋势率空间分布基本一致,各县区均表现为显著上升趋势,千陇丘陵区气温和地温上升趋势相比于秦岭关山区均较高,其中千阳县的气温和地温上升速率最大,均为 0.32 °C/10 a,眉县的气温和地温上升速率最小,为 0.21 °C/10 a 和 0.17 °C/10 a;各县区降水量变化均呈下降趋势,从千陇丘陵区到渭河川塬区,再到秦岭关山区的下降趋势逐渐增大,太白县的下降速率最大,为 -60.91 mm/10 a,陇县的下降速率最小,为 -24.40 mm/10 a,除陇县外其他地区均通过显著性检验。蒸发量仅在凤县和眉县呈上升趋势,分别处于秦岭

关山区和渭河川塬区,趋势率分别为 1.00 mm/10 a 和 6.21 mm/10 a,其余各县区均表现为下降趋势,整个千陇丘陵区均呈下降趋势,其中陈仓区、麟游县、千阳县和岐山县的下降趋势通过显著性检验。各县区低层云量和总云量的趋势空间分布基本一致且均呈下降趋势,趋势率由西南向东北逐渐减小,其中最大值均出现在凤县,速率分别为 -1.3%/10 a 和 -0.3%/10 a,低层云量最小值出现在岐山县,速率为 -1%/10 a,总云量最小值出现在眉县和太白县,速率都为 -0.1%/10 a,各县区低层云量的变化趋势均达到显著性,而总云量均未达到;各县区紫外强度均呈下降趋势,秦岭关山区的各县区变化差异较小,陇县是下降趋势明显,为 -62 069 J/(m²·10 a),千阳县下降速率最小,为 -2 206.7 J/(m²·10 a),未出现通过显著性检验的地区。相对湿度趋势率在千陇丘陵区的下降趋势最大,其次是渭河川塬区,最后是秦岭关山区,其中最大值出现在千阳县,为 -1.38%/10 a,最小值出现在眉县,为 -0.59%/10 a。

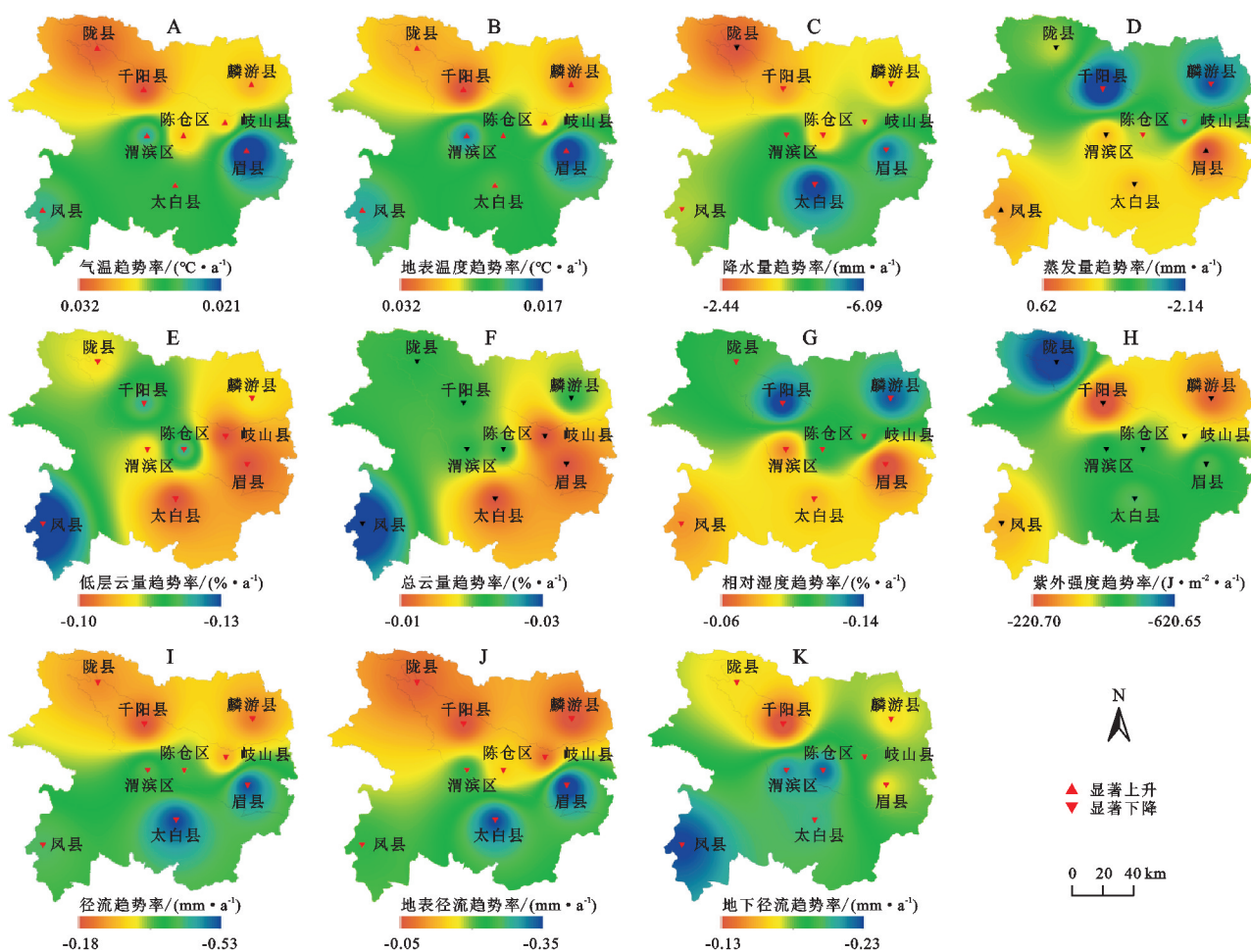


图 8 气象水文要素多年变化趋势率及 M-K 趋势检验空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of multi-year trend rates of meteorological and hydrological elements and MK trend test

径流和地表径流的趋势率在各县区分别基本相同且均为显著下降趋势,表现为从千陇丘陵区到渭河川塬区,再到秦岭关山区的下降趋势逐渐增大,太白县出现最大值,为 $-5.34 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 和 $-3.23 \text{ mm}/10 \text{ a}$,千阳县和麟游县出现最小值,为 $-1.81 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 和 $-0.46 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。各县区的地下径流趋势率均为显著下降且相差不大,总体来说秦岭关山区的下降趋势大于渭河川塬区,再大于千陇丘陵区,最大值和最小值分别出现在凤县和千阳县,且仅相差 $1.01 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。

3.3 多时间尺度周期变化特征

利用 CEEMDAN 方法对整个宝鸡地区气象水文要素进行信号分解结果见图 9,各 IMF 分量从高频到低频分别反映要素序列在不同的年际、年代际和百年际尺度上的振荡周期变化,IMF 分量振幅的大小分别代表相应周期振荡信号的强弱,其中,IMF1 分量振幅最大、频率最高、周期最小,其他 IMF 分量的振幅和频率随着阶数的增加而降低,周期随着阶数的增加而增加,残差项 Res 表示要素的整体演变趋势。

从各分量的方差贡献率来看,所有要素的 IMF1 分量对原始信号的方差贡献率最大,对降水量、蒸发

量、总云量、紫外强度的方差贡献率均超过 50%,对蒸发量和总云量的方差贡献率更是高达 69.40% 和 65.26%。降水量、总云量、径流、地表径流和地下径流的 IMF2 方差贡献率仅次于 IMF1。除蒸发量、低层云量、相对湿度的 IMF2 和紫外强度的 IMF5 外,其他要素的 IMF3-IMF6 方差贡献率均在 10% 以下,表明大多要素 IMF3-IMF6 对原始信号的贡献率较小。气温、地温和地下径流中 Res 的方差贡献率为 30.55%~66.47%,均大于其对应 IMF1 的方差贡献率,相对湿度和径流中 Res 的方差贡献率为 33.20% 和 30.59%,均略小于其对应 IMF1 方差贡献率(图 10)。

各 IMF 分量平均振荡周期表现为,IMF1-IMF3 的主周期在 2.8~8.9 a 的范围内,IMF4-IMF5 的主周期在 10~35 a,表明宝鸡地区气象水文要素序列具有年际和年代际的尺度周期变化特征。气温、地温、蒸发量、低层云量和相对湿度主要由 IMF1 和 IMF3 贡献,则其主导周期为 2.8~3.2 a 和 6.9~8.9 a;降水量、总云量、径流、地表径流和地下径流主要由 IMF1 和 IMF2 所贡献,则其主导周期为 2.8~3 a 和 5.1~5.6 a;紫外强度主要由 3 a 的年际周期和 35 a 的年代际周期主导。

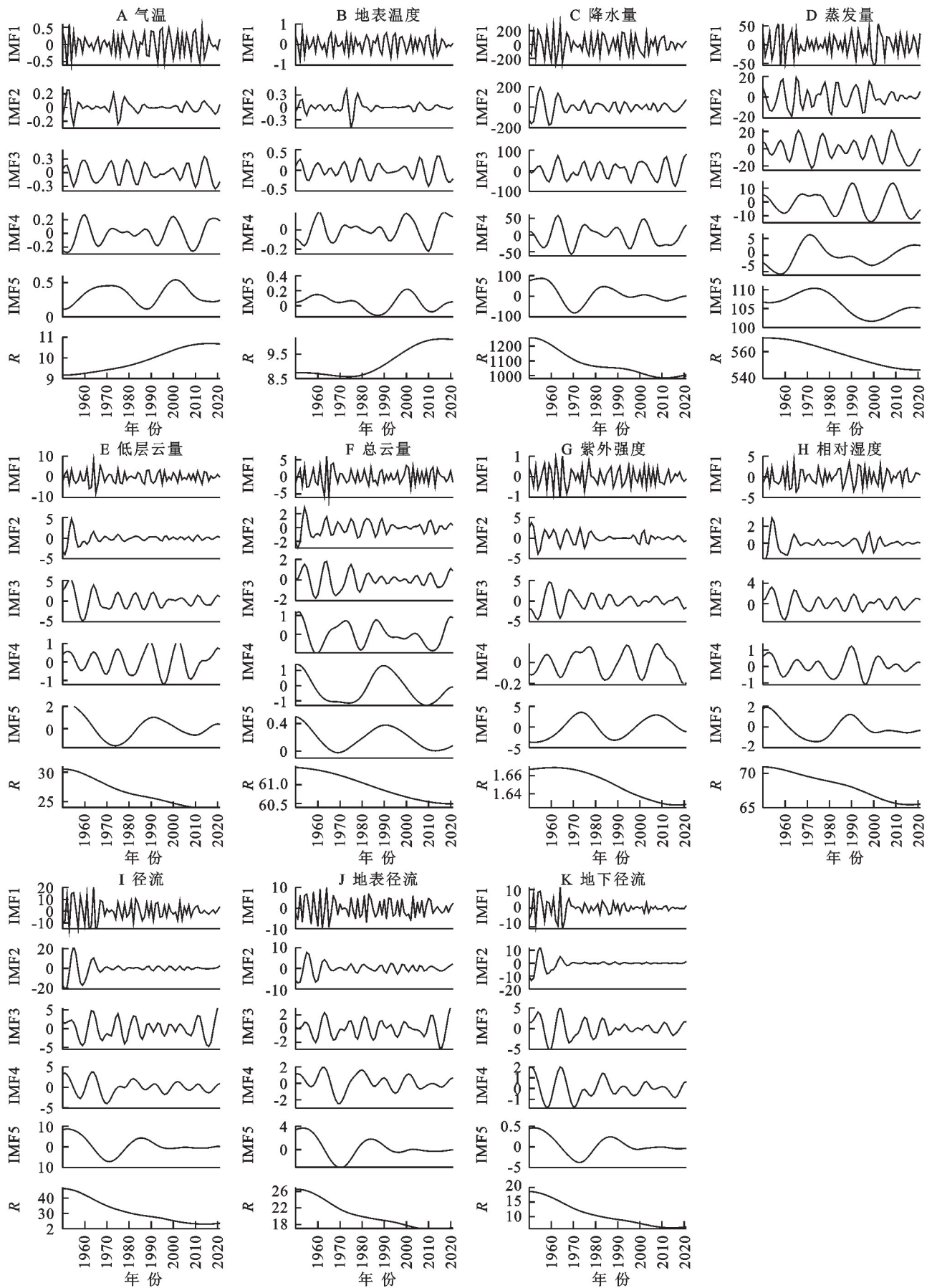


图 9 宝鸡地区 CEEMDAN 分解气象水文要素获得的内在分量

Fig. 9 Intrinsic components obtained from CEEMDAN decomposition of meteorological and hydrological elements in Baoji area

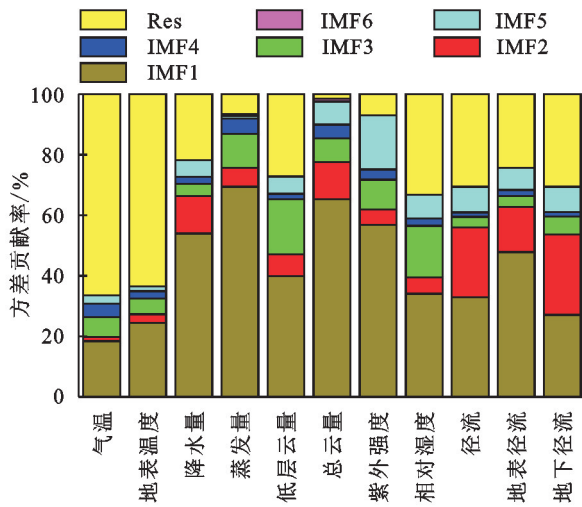


图 10 宝鸡地区气象水文要素 IMF 分量的方差贡献率

Fig. 10 Variance contribution of IMF components of meteorological and hydrological elements in Baoji area

从 Res 的长期变化趋势来看，除气温和地温外，其他要素均呈现下降趋势，与原始序列线性变化趋势基本一致，但 Res 更能体现出要素变化的特征。气温前期和后期的上升趋势都较中期趋于平缓，反映了其“先增大后减小”的趋势特征；地温在 1967 年出现速率略下降趋势，此后则一直呈上升趋势；在呈下降趋势的要素中，除降水量呈波动式下降趋势外，其余要素均具有“先增大后减小”的趋势特征。

以上统计结果说明原始序列变化的主要贡献是由分量 IMF1、IMF2 或 IMF3 和 Res 共同决定短周期及长周期的变化。

从方差贡献图 11 可以看出，3 个区域不同要素的方差贡献不同，仅千陇丘陵区地下径流 IMF2 的方差贡献率最大，三区其余所有要素均是 IMF1 分量对原始信号的方差贡献率最大，其中对千陇丘陵区的蒸发量和总云量与渭河川源区、秦岭关山区的降水量、蒸发量、总云量和紫外强度的方差贡献率更是超过 50%。大多要素的 IMF2 仅次于 IMF1，且 IMF3-IMF6 方差贡献率都较小，在 10% 以下，如三区中径流、地表径流和地下径流的 IMF2 方差贡献率均仅次于 IMF1。除此之外，还有千陇丘陵区的降水量和总云量与渭河川源区、秦岭关山区的降水量、蒸发量和总云量的 IMF3 仅次于 IMF1，如千陇丘陵区的蒸发量、低层云量和相对湿度与渭河川源区、秦岭关山区的低层云量和相对湿度，且均大于 10%。同时存在 IMF5 仅次于 IMF1，如千陇丘陵区、渭河川源区的气温和紫外强度与秦岭关山区的紫外强度和径流，且均大于 10%，表明在特定地理环境下，不同气候要素的分量随着阶数的增加，其方差贡献率不一定减小。千

陇丘陵区的气温、地温、相对湿度、径流和地下径流中 Res 的方差贡献率为 31.21%~61.05%，渭河川源区的气温、地温、相对湿度和地下径流中 Res 的方差贡献率为 31.61%~60.51%，秦岭关山区的气温和地温中 Res 的方差贡献率为 62.75%~66.47%，均大于其对应 IMF1 的方差贡献率。

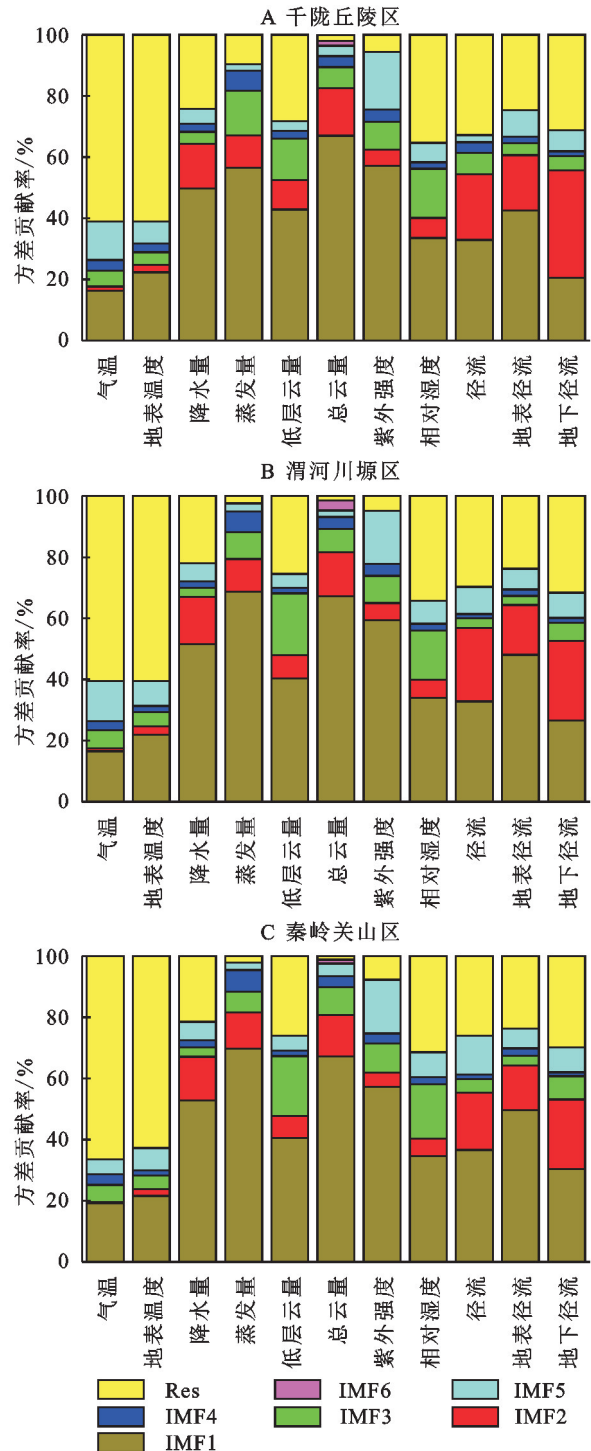


图 11 不同分区气象水文要素 IMF 分量的方差贡献率

Fig. 11 Variance contribution of IMF components of meteorological and hydrological elements in different subregions

由于区域差异性，3 个区域各要素分量所贡献的

周期不同,千陇丘陵区的降水量、总云量、径流、地表径流和地下径流与渭河川源区、秦岭关山区的降水量、蒸发量、总云量、径流、地下径流和地表径流主要由 IMF1 和 IMF2 所贡献,则其主导周期为 2.7~3.1 a 和 4.9~5.9 a。千陇丘陵区的蒸发量、低层云量和相对湿度、渭河川源区的低层云量和相对湿度与秦岭关山区的气温、低层云量和相对湿度主要由 IMF1 和 IMF3 所贡献,则其主导周期为 2.6~3.4 a 和 7.8~8.5 a。千陇丘陵区、渭河川源区的气温、地温和紫外强度与秦岭关山区的地温和紫外强度主要由 IMF1 和 IMF5 所贡献,则其主导周期为 2.8~3.2 a 和 30~35 a。

整体上,3 个区域的主要由 IMF1-IMF3 贡献的短主周期在 2.6~8.5 a 的范围内,IMF4-IMF5 贡献的长主周期在 10~44 a 之间,表明三区各气象水文要素序列具有年际和年代际的尺度周期变化特征。

3.4 气候变化的延续性及未来趋势分析

采用 Hurst 指数对 3 个区域气候变化的延续性和未来变化趋势进行分析,由表 1 可以看出,千陇丘陵区、渭河川源区和秦岭关山区的气温和地表温度的 H 值均大于 0.9,前后时间序列呈正相关且具有强延续性,意味着未来一段时间宝鸡地区的气温和地表温度保持与过去一致的变化趋势,即未来呈现持续性升温的态势非常强。三区的降水量、低层云量、紫外强度、径流、地下径流、地表径流和相对湿度的 H 值在 0.7~0.9,虽然延续性的强度弱于气温和地温,但其前后时间序列也呈较明显的正相关关系,未来水量、低层云量、紫外强度、径流、地下径流、地表径流和相对湿度的变化趋势同样会有较大概率延续近 72 年的变化趋势,即未来仍呈现下降趋势。3 个区蒸发量和总云量也呈正相关, H 值在 0.5~0.7,其相关程度和

延续性强度较其他气象水文要素较弱,但仍有一定概率延续以前的变化趋势,即延续其下降趋势。

为进一步判断气象水文要素未来变化的延续性,采用 V 统计量判断序列是否具有非周期循环及平均循环长度,由 $V-\ln(n)$ 变化曲线见图 12 可以看出,千陇丘陵区的気温序列曲线在 $\ln(n)=2.303$ 时首先出现拐点,对应的时间长度 $n \approx 10$,即千陇丘陵区气温的时间序列平均循环长度约为 10 a,说明过去对未来的有效影响时间为 10 a,超过 10 a 其持续性将逐渐减弱,由此可得千陇丘陵区地温、降水量、蒸发量、低层云量、总云量、紫外强度、相对湿度、径流、地表径流和地下径流序列平均循环长度分别约为 10 a,6 a,10 a,9 a,7 a,4 a,7 a,7 a,10 a 和 9 a。渭河川源区各气象水文要素的平均循环长度分别约为 10 a,9 a,6 a,7 a,4 a,9 a,6 a,9 a,7 a,6 a 和 10 a。秦岭关山区各气象水文要素的平均循环长度分别约为 6 a,9 a,10 a,7 a,4 a,9 a,6 a,9 a,10 a,10 a 和 10 a。

表 1 不同分区各气象水文要素的 H 值

Table 1 H -values of each meteorological and hydrological element in different subregions

气象要素	千陇丘陵区	渭河川源区	秦岭关山区
气温	0.9008	0.9025	0.9025
地表温度	0.9091	0.9124	0.9189
降水量	0.7996	0.8039	0.8092
蒸发量	0.6644	0.6418	0.6398
低层云量	0.8150	0.8178	0.8185
总云量	0.5977	0.6341	0.6404
紫外强度	0.8071	0.7979	0.8036
径流	0.8409	0.8262	0.8018
地表径流	0.8436	0.8357	0.8354
地下径流	0.7600	0.7760	0.7678
相对湿度	0.7857	0.7849	0.7838

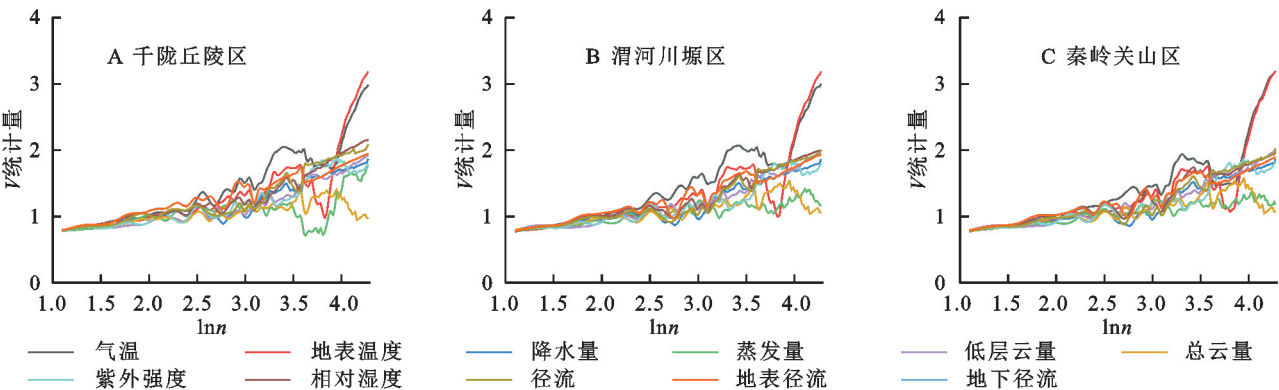


图 12 不同分区各气象水文要素的 $V-\ln(n)$ 变化曲线

Fig. 12 Variation curves of $V-\ln(n)$ for each meteorological and hydrological element in different subzones

4 讨论

通过分析可以看出,近 70 年宝鸡地区气候整体

朝暖干化方向发展,其中冬季气温的升高趋势和夏季降水的减少趋势最显著,与已有研究结论相同^[16]。年降水量、相对湿度、径流、地下径流和地表径流的空

间分布基本一致,受纬度、地形和季风的影响,与年蒸发量、紫外强度呈相反分布,秦岭关山区为雨量最充沛的地区,气温呈现自东向西、由南到北降低的分布规律^[17]。气温在冬季的上升趋势最显著,而蒸发量仅在冬季呈上升趋势,其余三季都呈下降趋势,说明气温在很大程度上影响着蒸发量,整个宝鸡地区的蒸发量呈下降趋势,其中眉县和凤县的蒸发量却呈上升趋势,同时眉县和凤县的相对湿度、低层云量和总云量也是最高的,在中国,影响蒸发量变化的关键因素是相对湿度^[18],眉县和凤县所处的渭河川塬区和秦岭关山区降水量丰富,相对湿度也就越大,从而导致眉县和凤县的蒸发量不降反增。

渭河川塬区和秦岭关山区的年径流、地下径流和地表径流总是高于千陇丘陵区,且三者的空间分布与降水量基本一致,说明降水量为该地区径流、地表径流和地下径流的主要补偿来源,造成这种情况的原因是千陇丘陵区中的黄土高原地貌降水量较不稳定,气候也相对干旱,而秦岭关山区中人类活动较少,降水量较为稳定,植被丰富^[19]。本研究采用遥感数据分析结果与文献^[9]采用实测数据分析的气温、相对湿度、降水量、蒸发量和径流相比趋势率偏小,可能是由于宝鸡地区复杂的地形和区域气候,卫星遥感数据受下垫面类型影响^[20],这也可能是造成径流、地表径流和地下径流在1955年和1964年出现异常高值的原因。

5 结论

(1) 年际变化上,仅年均气温和地表温度呈升高趋势,年均降水量、蒸发量、低层云量、总云量、紫外强度、相对湿度、径流、地表径流和地下径流均呈下降趋势,“暖干化”成为宝鸡地区气候变化的主要特征。

(2) 季节变化上,气温和地温冬季升温最剧烈,年降水量呈下降趋势,夏季贡献最多,蒸发量和总云量仅冬季呈上升趋势,紫外强度仅在春季表现为上升趋势,低层云量和相对湿度春季变幅最大,夏季的径流和地表径流与秋季的地下径流变化幅度最大。

(3) 除蒸发量外,三区各要素的变异系数在近70年间均明显减小,尤其是千陇丘陵区各要素变幅最明显,在21世纪之前千陇丘陵区的变异系数最大,之后则最小,逐渐成为最稳定的地区。

(4) 年均气温和地温高值多分布在千陇丘陵区 and 渭河川塬区,年低层云量和总云量高值多分布于渭河川塬区和秦岭关山区,年降水量、相对湿度、径流、地表径流和地下径流的分布基本一致且呈由北向南逐渐减小的分布特征,年蒸发量和紫外强度则表现为由北向南逐渐增加。

(5) 年气温和地温的上升趋势率由北向南逐渐减小,年降水量、径流和地表径流在各县区均表现为下降趋势且速率由北向南逐渐增大,年蒸发量和相对湿度均表现为下降速率由北向南逐渐减小,低层云量和总云量的最大下降速率均出现在凤县,紫外强度变化趋势率的最值主要出现在千陇丘陵区 and 渭河川塬区,地下径流在秦岭关山区的下降趋势大于渭河川塬区,再大于千陇丘陵区。各县区与整个地区的上升或下降趋势保持一致,除凤县和眉县的蒸发量。

(6) 气象和水文要素变化包含了多个不同时间尺度的周期变化特征,各要素存在2.8~3.2 a, 4.4~6 a 和7.1~8.9 a 的年际变化短周期和10~14.3 a, 19.5~35 a 的年代际变化长周期,其变化趋势主要受Res影响。3个分区的要素变化主要由IMF1和IMF2或IMF3或IMF5及Res所共同决定,各分区具有主导周期为年际周期和年代际周期变化特征。

(7) 千陇丘陵区、渭河川塬区和秦岭关山区3个分区的各气象水文要素均具有延续性变化趋势,未来气温和地表温度将长时间持续上升,降水量、蒸发量、低层云量、总云量、紫外强度和径流将持续下降,但各要素上升和下降的延续时间长度有差异,总体上为4~10 a的时间尺度趋势变化。

参考文献(References):

- [1] 李峰平,章光新,董李勤.气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J].地理科学,2013,33(4):457-464.
Li F P, Zhang G X, Dong L Q. Studies for impact of climate change on hydrology and water resources [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013,33(4):457-464.
- [2] Liu Y G, Wang S X, Wang Y, et al. Evaluation of potential evapotranspiration in the Weihe River Basin based on statistical downscaling[C]. Iop Conference Series: Earth and Environmental Science, Iop Publishing, 2018,191(1):012025.
- [3] 张红丽,韩富强,张良,等.西北地区气候暖湿化空间与季节差异分析[J].干旱区研究,2023,40(4):517-531.
Zhang H L, Han F Q, Zhang L, et al. Analysis of spatial and seasonal variations in climate warming and humidification in Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4):517-531.
- [4] 胡浩楠,刘引鸽.基于WRF模式的渭河上游夏季降水及气温模拟[J].水土保持研究,2023,30(4):256-264,274.
Hu H N, Liu Y G. Simulation of summer precipitation and temperature in the upper reaches of the Weihe River based on the WRF model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(4):256-264,274.
- [5] 黄小燕,李耀辉,冯建英,等.中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征[J].生态学报,2015,35(5):1359-1370.

- Huang X Y, Li Y H, Feng J Y, et al. Climate characteristics of precipitation and extreme drought events in Northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(5):1359-1370.
- [6] 邵晓梅,许月卿,严昌荣.黄河流域降水序列变化的小波分析[J].*北京大学学报:自然科学版*,2006(4):503-509.
- Shao X M, Xu Y Q, Yan C R. Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow River Basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2006(4):503-509.
- [7] 韩知明,贾克力,杨芳,等.基于 Morlet 小波的呼伦湖流域降水多时间尺度分析[J].*水土保持研究*,2018,25(1):160-166.
- Han Z M, Jia K L, Yang F, et al. Analysis on multi time scale yearly precipitation of Hulun Lake watershed based on wavelet morlet analysis[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018,25(1):160-166.
- [8] 刘引鸽,包江川,杨雨欣,等.渭河流域 1850—2005 年降水及蒸发量变化时空特征[J].*水土保持研究*,2022,29(6):224-232.
- Liu Y G, Bao J C, Yang Y X, et al. Temporal and spatial characteristics of precipitation and evaporation in the Weihe River Basin from 1850 to 2005[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(6):224-232.
- [9] 刘引鸽,郑润禾,龙颜,等.渭河中游气候变化及其对水文要素的影响[J].*水土保持研究*,2021,28(2):108-117.
- Liu Y G, Zheng R H, Long Y, et al. Climate change and its effect on hydrological elements in the middle reaches of Weihe River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(2):108-117.
- [10] 刘引鸽,龙颜,郑润禾,等.渭河流域上游气候变化及其对径流的影响[J].*水资源与水工程学报*,2020,31(6):1-8.
- Liu Y G, Long Y, Zheng R H, et al. Climate change and its impact on runoff in the upper Weihe River Basin [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020,31(6):1-8.
- [11] 任立良,沈鸿仁,袁飞,等.变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析[J].*水科学进展*,2016,27(4):492-500.
- Ren L L, Shen H R, Yuan F, et al. Hydrological drought characteristics in the Weihe Catchment in a changing environment[J]. *Advances in Water Science*, 2016,27(4):492-500.
- [12] 毛世榕,史水平,玉壮基,等.基于自适应噪声完全集合经验模态分解算法和 Hurst 指数的地震数据去噪方法[J].*地震学报*,2023,45(2):258-270.
- Mao S R, Shi S P, Yu Z J, et al. A seismic data denoising method based on complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise and Hurst exponent [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2023,45(2):258-270.
- [13] 潘雅婧,王仰麟,彭建,等.基于小波与 R/S 方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析[J].*地理研究*,2012,31(5):811-820.
- Pan Y J, Wang Y L, Peng J, et al. Precipitation change in middle and lower reaches of Hanjiang River: Based on wavelet analysis and R/S analysis[J]. *Geographical Research*, 2012,31(5):811-820.
- [14] 甄英,杨珊,何静,等.基于 M-K 检验法与 R/S 法的宜宾市降水量分析[J].*四川师范大学学报:自然科学版*,2017,40(3):392-397.
- Zhen Y, Yang S, He J, et al. Analysis of precipitation in Yibin city based on M-K test and R/S method[J]. *Journal of Sichuan Normal University: Natural Science*, 2017,40(3):392-397.
- [15] 李国栋,张俊华,王乃昂,等.基于重标极差分析和非周期循环分析的气候变化趋势预测:以兰州市为例[J].*干旱区研究*,2013,30(2):299-307.
- Li G D, Zhang J H, Wang N A, et al. Prediction of climate change trend based on rescaled range analysis and non-periodic cycle analysis: a case study in Lanzhou city [J]. *Arid Zone Research*, 2013,30(2):299-307.
- [16] 任志艳.关中地区气候变化适应方略与可持续发展模式选择[D].西安:陕西师范大学,2015.
- Ren Z Y. Climate change adaptation strategies and sustainable development model options for Guanzhong region[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2015.
- [17] 熊光红.关中降水与气温时空动态演变特征研究[D].西安:长安大学,2015.
- Xiong G H. Study on spatial and temporal variability regularity of precipitation and temperature on Central Shanxi Province[D]. Xi'an: Changan University, 2015.
- [18] 祁添垚,张强,王月,等.1960—2005 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及其影响因素分析[J].*地理科学*,2015,35(12):1599-1606.
- Qi T Y, Zhang Q, Wang Y, et al. Spatiotemporal patterns of pan evaporation in 1960—2005 in China: changing properties and possible causes[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015,35(12):1599-1606.
- [19] 詹晓红.宝鸡市土地利用变化及其驱动力研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.
- Zhan X H. Researches on land use change and its Driving force in Baoji city [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2009.
- [20] 周源珂.秦巴山地地气温时空变化规律及驱动因素[D].河南开封:河南大学,2021.
- Zhou Y K. Spatiotemporal Variation and driving factors of the surface temperature and temperature in Qinba Mountains[D]. Kaifeng, Henan: Henan University, 2021.