

渭河流域 1850—2005 年降水及蒸发量变化时空特征

刘引鸽^{1,2}, 包江川¹, 杨雨欣¹, 黄雪¹

(1.宝鸡文理学院 地理与环境学院, 陕西 宝鸡 721013;

2.宝鸡文理学院 灾害监测与机理模拟陕西省重点实验室, 陕西 宝鸡 721013)

摘要:为了探究渭河流域过去气候变化规律及其影响因素,基于 CMIP5 模式输出产品,采用双曲线插值方法获取渭河流域 56 个站点 1850—2005 年降水、蒸发及气温数据。采用最小二乘法、M-K 突变检验、小波分析及 ArcGIS 空间插值方法分析了渭河流域气候要素的多尺度时空特征。结果表明:渭河流域近 156 a 来年均气温、降水为上升趋势,趋势率分别为 $0.028^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.09\text{ mm}/10\text{ a}$,年蒸发量为减少趋势,趋势速率为 $-5.1\text{ mm}/10\text{ a}$,温度和降水季节变化与年变化基本趋于一致,蒸发量的减少主要发生在夏秋两季。渭河流域中游、下游与南部降水相对变率变化趋势基本一致,而上游与泾河及洛河支流降水相对变率趋势一致,相对变率在 $-2.8\% \sim 14.98\%$ 。整个流域温度、蒸发量相对变率为 $-2.3\% \sim -3.47\%$ 及 $-2.35\% \sim 6.54\%$ 。各气候要素均存在 5~20 a 的短周期变化以及 110 a 长周期变化,气温及蒸发分别在 1986 年及 1963 年发生突变现象,降水无突变点出现。总体而言,渭河流域近 156 a 气候呈现暖湿化趋向,降水及蒸发存在明显的空间分异以及周期性规律。

关键词:降水; 蒸发量及气温; CMIP5 模式数据; 渭河流域

中图分类号:P412; P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0224-09

Temporal and Spatial Characteristics of Precipitation and Evaporation in the Weihe River Basin from 1850 to 2005

LIU Ying^{1,2}, BAO Jiangchuan¹, YANG Yuxin¹, HUANG Xue¹

(1.School of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721013, China; 2.Shaanxi Provincial Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721013, China)

Abstract: In order to explore past climate change law and its influencing factors in the Weihe River Basin, based on the output products of the CMIP5 model, the hyperbolic interpolation method was used to obtain the precipitation, evaporation and temperature data of 56 stations in the Weihe River Basin from 1850 to 2005. Multi-scale temporal and spatial characteristics of climate elements in the Weihe River Basin were analysed by the least square method, M-K mutation test, wavelet analysis and ArcGIS spatial interpolation method. The results show that the average annual temperature and precipitation in the Weihe River Basin have been increasing for the past 156 years, with trend rates of $0.028^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ and $0.09\text{ mm}/10\text{ a}$, respectively. The annual evaporation is on a decreasing trend, with a trend rate of $-5.1\text{ mm}/10\text{ a}$, the seasonal changes of temperature and precipitation are basically consistent with the annual changes, and the decrease in evaporation mainly occurs in summer and autumn. In the middle reaches of the Weihe River basin, the trend of relative precipitation variability in the lower reaches is basically the same as that in the south, while the trend of relative precipitation variability in the upper reaches is the same as that of the Jinghe and Luohe tributaries. The relative variability is between -2.8% and 14.98% . The relative change rate of the temperature and evaporation in the entire basin is $-2.3\% \sim -3.47\%$ and $-2.35\% \sim 6.54\%$. All climatic elements have short-period changes of 5~20 a and long-period changes of 110 a. The temperature and evaporation had abrupt changes in 1963 and 1986, respectively, and there is no abrupt change in precipitation. In general, the climate of the Weihe River Basin has shown a trend of warming and humidification in the past 156 years, and there

收稿日期:2021-07-20

修回日期:2021-09-29

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);宝鸡文理学院重点项目(ZK16061)

第一作者:刘引鸽(1965—),女,陕西兴平人,博士,教授,主要从事气候变化与适应、水文循环、资源环境管理及生态研究。E-mail:yingeliu@163.com

are obvious spatial differences and periodic regularities in precipitation and evaporation.

Keywords: precipitation; evaporation and temperature; CMIP5 model data; Weihe River Basin

气候变化是全球变化的主要驱动力之一,全球变化的环境影响及极端气候事件的频繁发生,对人类的生活、生态环境和社会经济的发展产生重大影响^[1-3],气候变化特征及对水资源影响研究一直为国内外专家学者关注和研究的热点。过去气候环境重建、现代气候观测以及未来气候模拟预估成为气候环境变化研究趋势^[4-6]。采用地面观测资料、全球大气环流、海汽耦合模型及区域尺度模型进行几十年来气候模拟及预估得到不断发展^[7]。全球不同 CMIP5 模式数据在中国气候变化及降尺度模型上的区域应用研究取得了一定成果^[8-10]。采用树轮、同位素及历史文献对过去气候要素重建也已经取得一定成果^[11-13],尤其是过去几千年及百年气温、旱涝序列重建及影响因素分析取得显著成果^[14-17]。由于古环境信息源分辨率较低,只能辨识几百年尺度的气温,月季尺度的气温序列重建较少。降水及蒸发影响因素比较复杂,环境信息源提取信号的不确定性,百年及千年尺度的序列重建难度较大,而且较少。为了探讨气候变化及其环境影响,世界气候研究计划(WRCP)组织了多种全球尺度的 CMIP 模式计划,经过不断更新完善已经完成全球 20 多个研究机构的 50 多个全球模式^[18],CMIP5 的全球气候模式模拟数据已经被广泛应用到中国的降水、气温、极端气候事件及径流的模拟预估,并取得了显著成果^[19-20],这也表明 CMIP5 模式输出数据产品对我国区气候变化分析有一定的可靠性。

渭河流域位于 $33^{\circ}30' - 37^{\circ}25'N$, $103^{\circ}28' - 110^{\circ}40'E$ 。流域面积约 $1.351 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。流域内地貌复杂,既有黄土高原,又有冲积平原、山地等地貌,整体呈西高东低,属于温带大陆性季风气候,年降水分布不均,由于地理环境及气候差异,近百年气候要素及水文要素变化对生态环境影响加大,因此,本研究采用 CMIP5 的全球气候模式输出的 1850—2005 年的降水、温度及蒸发数据,对渭河流域的近百年气温、降水及蒸发长期变化规律进行研究,这对认识渭河流域过去气候变化规律,探讨其影响因素,对渭河流域经济发展及环境管理提供了依据。

1 数据来源及研究方法

本文数据来源于 CMP5 输出产品,由于 CMIP5 气候模式种类繁多,考虑到数据的可信度,参考李晓菲^[21]、吴晶^[22]、杨肖丽^[23]等采用 CMIP5 多模式对中国干旱区半干旱区模拟能力的研究认为,CMIP5 模

式数据中 NorESM1 对我国干旱区半干旱区的气候模拟能力较好。因此,本研究气温、降水及蒸发等气候要素数据也采用 CMIP5 气候模式中 NorESM1 (挪威气候模式)输出的 1850—2005 年月数据结果 (<http://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5>),选取该流域比较均匀分布的 56 个基准气象站点作为样点位置,进行数据的获取。采用函数转换、双线性内插法,将全球模式数据通过降尺度插值,并进行订正到渭河流域 56 个气象观测站点位置(图 1)。根据国际气候平均定义,以 1960—1989 年的 30 a 平均值作为基准值计算气温、降水及蒸发距平,采用线性回归最小二乘法计算气候要素趋势率,采用小波分析周期变化, Mann-Kendall 非参数法分析突变,采用 ArcGIS 反距离插值表征气候要素的空间特征。

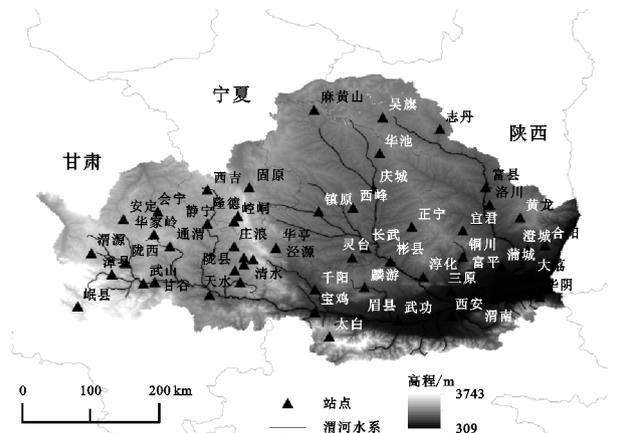


图 1 渭河流域气象站点分布

2 结果与分析

2.1 气温、降水及蒸发年代际变化特征

2.1.1 气候要素的空间分布差异性 将渭河流域 156 a 的所有站点的年均气温、降水及蒸发量数据分成 1850—1879 年、1880—1909 年、1910—1939 年、1940—1969 年、1970—1999 年、2000—2005 年 6 个时段进行地统计分析,利用反距离插值方法得到研究区年平均气、降水及蒸发量空间分布(图 2)。

从图 2A、表 1—2 可以看出,渭河流域多年平均气温空间分布特征表现为从西向东递减,西部气温普遍高于东部,岷县、渭源等西部地区气温全年段最高,吴旗和志丹等西北地区气温相对较低。1850—1939 年气温空间分布差异不大,经计算年平均最低气温为 15.5°C ,1910—2005 年整体在 14°C 以上,年平均 18°C 以上的区域扩大,高温区域向东北移动。从图 2B 可以看出,降水量空间分布表现为从流域东偏北

向西偏南方向递减,中部正宁站点降水低于其他地区,岷县地区降水量最多。1910—1939 年降水减少区域增大。2000—2005 年降水增加区域向西南部扩展。从图 2C 可以看出,渭河流域多年平均蒸发量空间分布特征表现为由北向南递减,北部地区蒸发量较高,西南地区和南部地区蒸发量较小,西南地区中部

蒸发量比周边地区较大。其中吴旗和志丹两个站点在所有年段中蒸发量最大,岷县蒸发量最小。但各时段空间分布有差异。1850—1969 年北部地区蒸发比较大在 1 290 mm 以上,南部较小,之后的 1970—2005 年整体上蒸发量减少,为 1 150~1 220 mm,蒸发减少区域向北扩展。

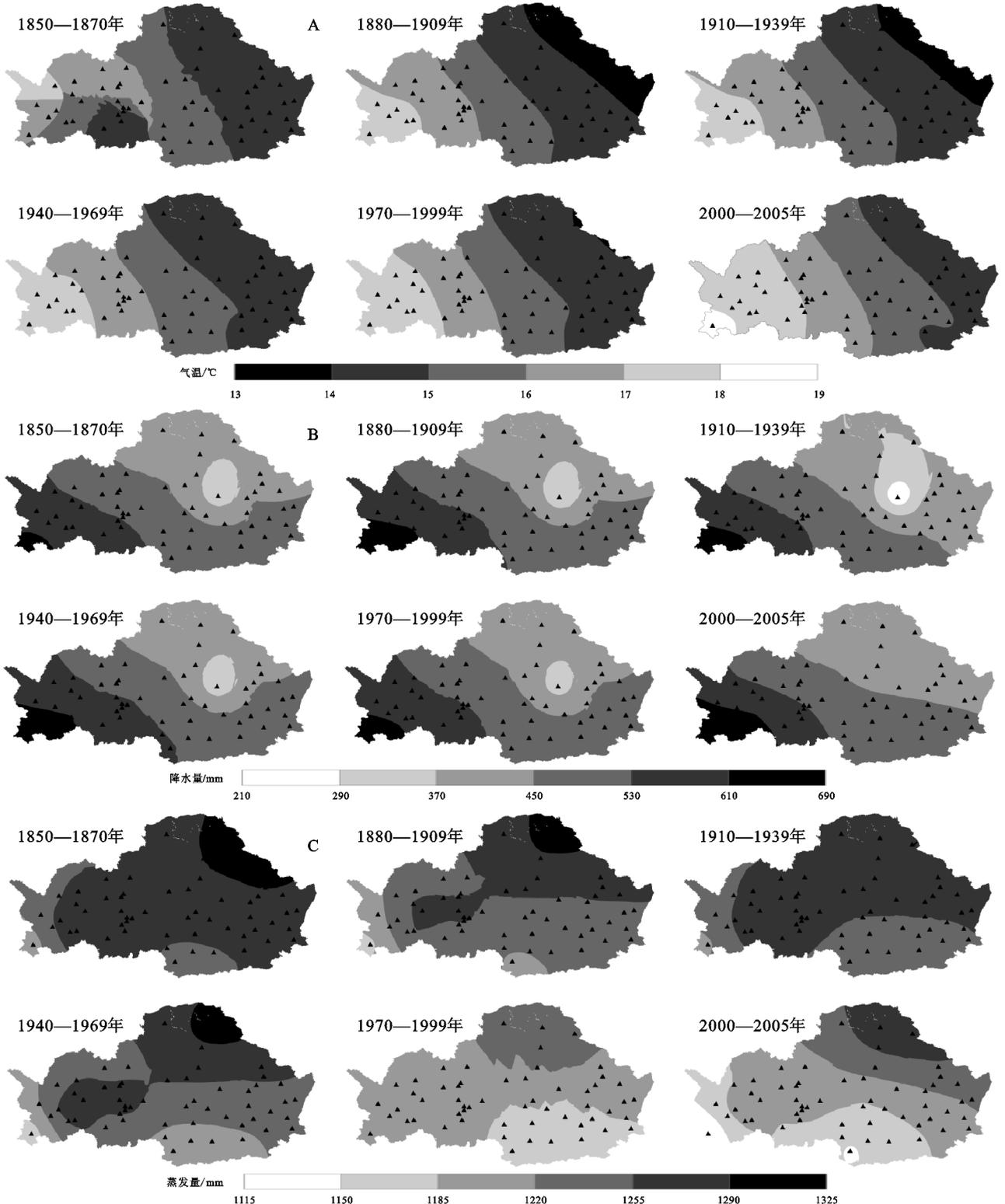


图 2 1850—2005 年平均气温、降水及蒸发空间分布

表1 各年段要素年平均值

时期	年均 气温/°C	年均 降水量/mm	年均 蒸发量/mm
1850—1879年	15.55	489.82	1271.91
1880—1909年	15.33	497.66	1247.69
1910—1939年	15.42	474.52	1260.91
1940—1979年	15.64	504.07	1245.02
1970—1999年	15.65	497.46	1199.07
2000—2005年	16.06	490.39	1203.04

图3为气温、降水及蒸发趋势率变化空间分布,从图3A可以看出,整个流域所有年段温度趋势率在 $-3\sim 0.3^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 变化。1850—1939年全流域气温升高,尤其是1910—1939年全流域气温增加趋势最大为 $0.2\sim 0.3^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。1910—1969年南部气温降低

表2 各年段要素极值站点

时期	T_{\max} 站点	T_{\min} 站点	PR_{\max} 站点	PR_{\min} 站点	ET_{\max} 站点	ET_{\min} 站点
1850—1879年	志丹	岷县	岷县	麻雀山	志丹	岷县
1880—1909年	志丹	岷县	岷县	麻雀山	吴旗	岷县
1910—1939年	志丹	岷县	岷县	麻雀山	志丹	岷县
1940—1979年	志丹	岷县	岷县	麻雀山	吴旗	岷县
1970—1999年	志丹	岷县	岷县	麻雀山	吴旗	岷县
2000—2005年	志丹	岷县	岷县	麻雀山	吴旗	岷县

注: T_{\max} 为最大年均气温; T_{\min} 为最小年均气温;PR为年均降雨量;ET为年均蒸发量。

从图3C可以看出,渭河流域各年段蒸发量变化趋势呈现明显的地域差异,在 $-70\sim 240\text{mm}/10\text{a}$ 变化,1850—1879年,流域蒸发量变化的趋势率由北向南递减,总体蒸发表现为下降趋势,北部地区下降趋势小于南部地区。在1880—1909年,流域蒸发量变化的趋势率由东北向西南递减,总体蒸发量也呈现下降趋势,西南地区下降趋势更为显著。1910—1939年,北部地区蒸发量呈下降趋势,而中部以及西部大部分地区蒸发量呈上升趋势,越靠南上升趋势越明显。1940—1969年,渭河流域地区蒸发量整体呈下降趋势,下降趋势分布表现为东低西高。1970—1999年,北部较小地区蒸发量呈上升趋势,其余大部分地区呈下降趋势,由北向南蒸发量下降趋势增大。2000—2005年,北部地区趋势率为正,蒸发量呈上升趋势。

2.1.2 气候要素年代际变化 从图4A可以看出,温度为波动变化。1850—1930年主要以负距平为主,多数年份的温度低于标准年份;1930—1980年距平呈波动变化;1980年之后则主要以正距平为主。1850—2005年温度整体呈波动增加趋势,趋势率为 $0.028^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。主要为1870—1890年温度呈减少趋势,之后为波动上升趋势。如图4B所示,1940年之前降水距平呈波动变化,但数值不大,降水量基本保持平稳。1940—1990年降雨量呈波动变化,降雨量先增加再减少,1990年之后以负距平为主。1850—

明显,1970—1999年整个区域北部气温上升较大,南部较小。2000—2005年气温出现较小下降波动。

从图3B可以看出,整个流域降水各年段趋势率在 $-130\sim 90\text{mm}/10\text{a}$ 变化,1850—1879年北部地区降水量呈减少趋势,南部地区呈增加趋势,1880—1909年区域趋势率继续为负,降水减少。1910—1939年,渭河流域从西向东趋势率递减,西部地区降水增加,而东部地区降水减少,1940—1969年,全流域降水量减少,中部地区尤其明显。1970—1999年渭河流域降水趋势率从西北向东南增加,降水减少的趋势越发减弱,2000—2005年北部大部分地区降水趋势率为正,降水增加,其余地区的降水量急剧减少,降水的空间变化趋势差异较大,与区域的地理环境相关。

2005年降水量变化呈波动变化,整体上变化不大,趋势率为 $0.09\text{mm}/10\text{a}$ 。主要为降水量在1940年前波动平稳变化,之后波动变化,1990年后为减少趋势。从图4C中可以看出,1976年之前主要以正距平为主,只有少数年份为负距平,1976年之后则主要以负距平为主。蒸发距平在2002年最小,为 83.84mm 。总体上,1850—2005年蒸发量呈波动减少趋势,趋势率为 $-5.1\text{mm}/10\text{a}$ 。蒸发量在1910年前主要为减少趋势,1910—1940年为增加趋势,1940年之后为减少趋势。

整体上,气温、降水及蒸发在1850—1940年时段表现为偏冷期波动变化模态、平稳变化模态、轻微的多蒸发波动模态;在1941—1970年时段表现为冷暖交替波动模态、干湿交替波动模态、轻微多蒸发波动变化模态;在1970—2005年时段表现为暖期的上升模态、平稳减少模态、平稳少蒸发模态。

图5为四季气温、降水及蒸发的距平变化,温度四季距平变化基本和年均温度距平变化一致,1980年以前为波动变化,1980年之后四季温度在增加。1850—2005年春季降水整体呈平稳态势,夏季降水在1920年前呈平稳态势,1920—1990年呈波动变化,1990年之后降水量趋于平稳,秋冬两季降水距平都呈波动变化。1850—2005年春季蒸发距平呈波动变化,整体蒸发量变化不大,夏秋两季蒸发距平与年

蒸发距平变化趋势相同,蒸发量呈波动减少趋势。冬季蒸发距平在 1950 年前主要以正距平为主,1950 年

之后距平变化不大,蒸发趋于稳定。年蒸发量的减少主要发生在夏秋两季。

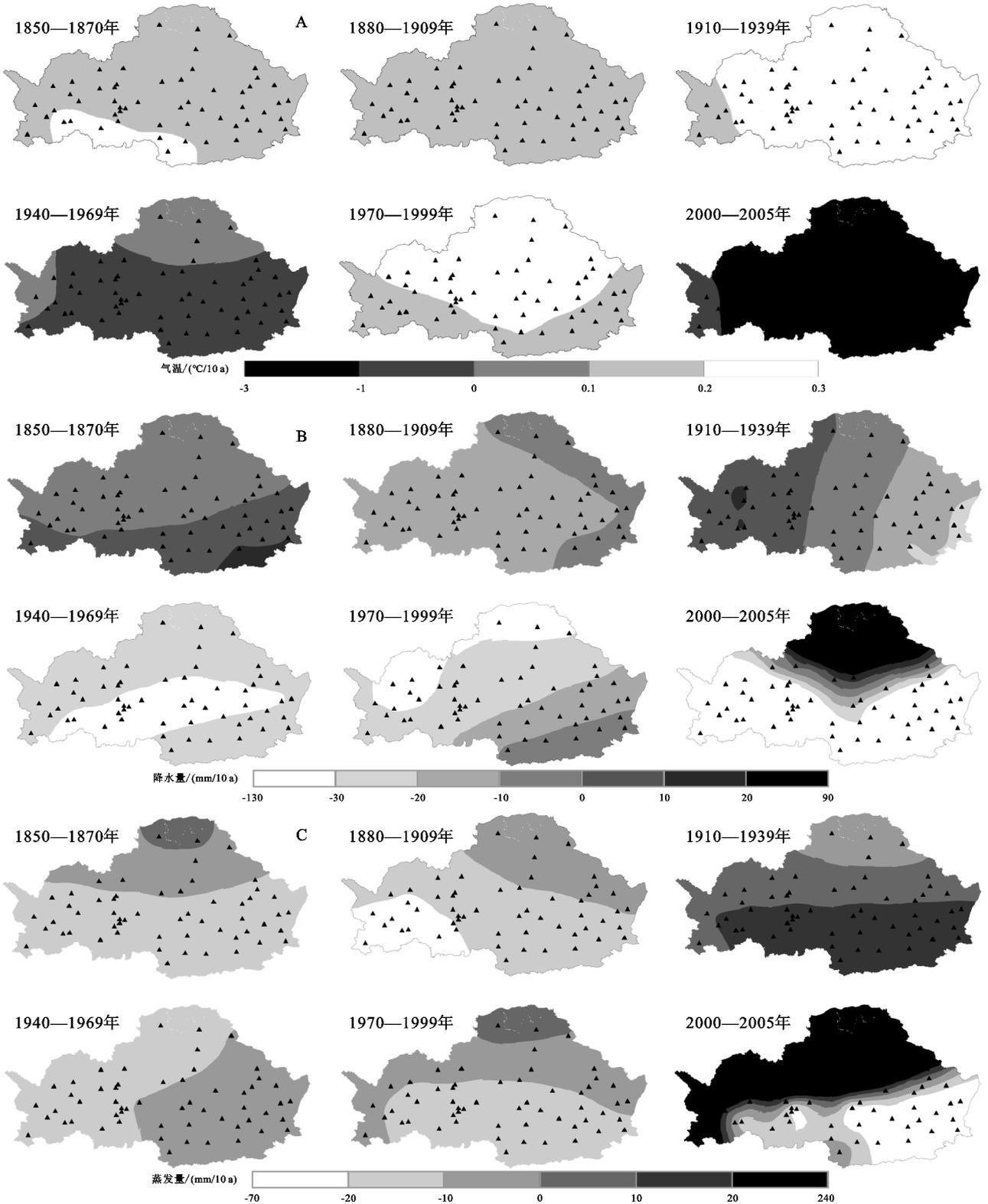


图 3 1850—2005 年气温、降水及蒸发趋势率变化空间分布

依据渭河流域水系及其地形条件,将渭河流域划分为 6 个小区域(上游,中游,下游,南部,泾河,洛河),分析各区域气候要素的变化幅度。渭河上游包括甘肃及宁县及其陕西林家村以西的区域,这些区域

地形主要以山地为主,中游及下游主要包括渭河干流、陕西省的关中地区,以咸阳为界。泾河区域主要包括泾河支流的整个区域,洛河区域主要包括洛河支流的整个区域,南部主要指渭河以南的区域。

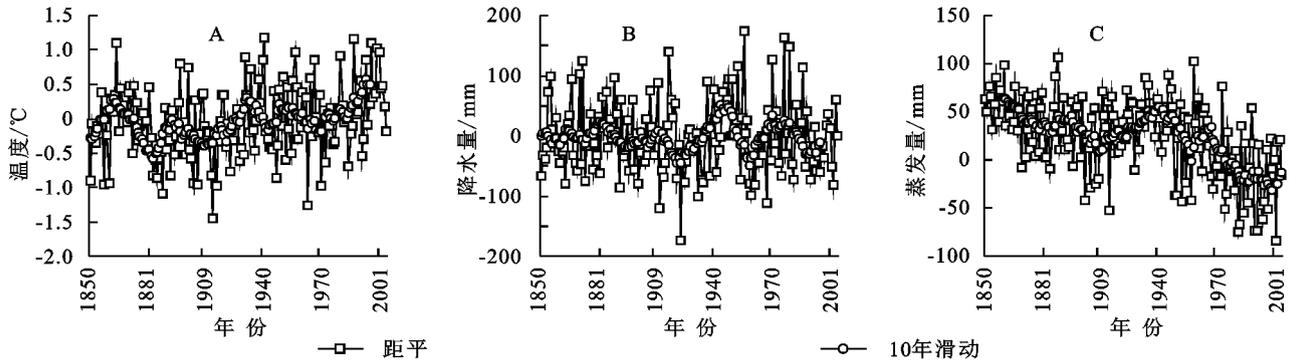


图 4 1850—2005 年年平均气温、降水及蒸发时间变化

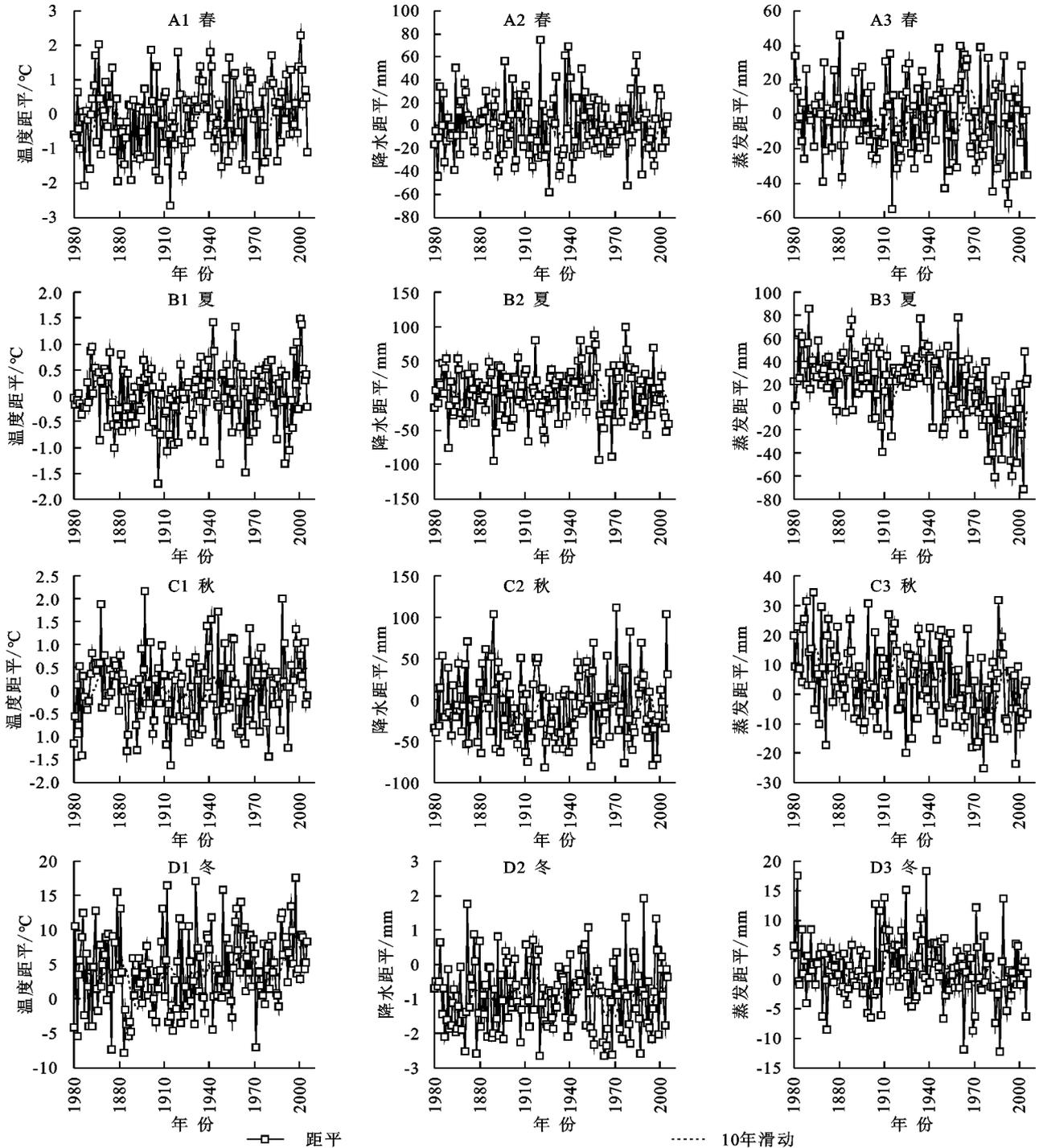


图 5 四季气温、降水及蒸发时间变化

通过计算 6 个区域的气温、降水及蒸发的相对变率(图 6),可以看出,温度与蒸发量各区域变化趋势基本一致,只是有变化幅度的小差异,表明影响渭河流域气温及蒸发的气候环境的一致性,最高气温及蒸发相对变率为 3.47%,6.54%,位于泾河及上游区域,最小分别为 -2.3%, -2.38% 在洛河及南部区域。洛河及下游的温度及蒸发变化幅度最小,南部及中游的变化幅度较大,最大为 6.54%。1940 年前气温相对变率为负,蒸发相对

变率为正,之后两者出现相反的变化,1970 年后温度变化幅度增大,蒸发变化幅度逐渐减小,2000 年变化幅度开始增大。降水各区域幅度差异较大,主要因为气候及地面环境各区域差异性影响。最大降水变率为 14.98% 位于泾河支流流域,最小变率为 -2.8%,位于渭河下游区域。降水变化幅度差异较大,表现在 1970—2005 年期间,上游、泾河及洛河降水增加的变化幅度增大,而中游、下游及渭河南部降水减少幅度增大。

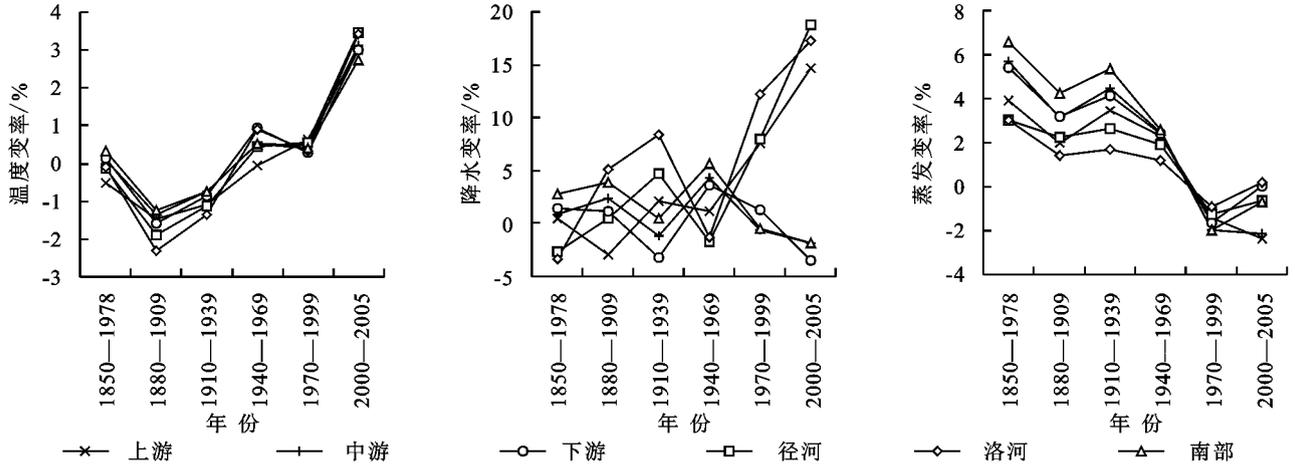


图 6 不同区域各时段气温、降水及蒸发相对变率

2.2 气温、降水及蒸发周期及突变特征

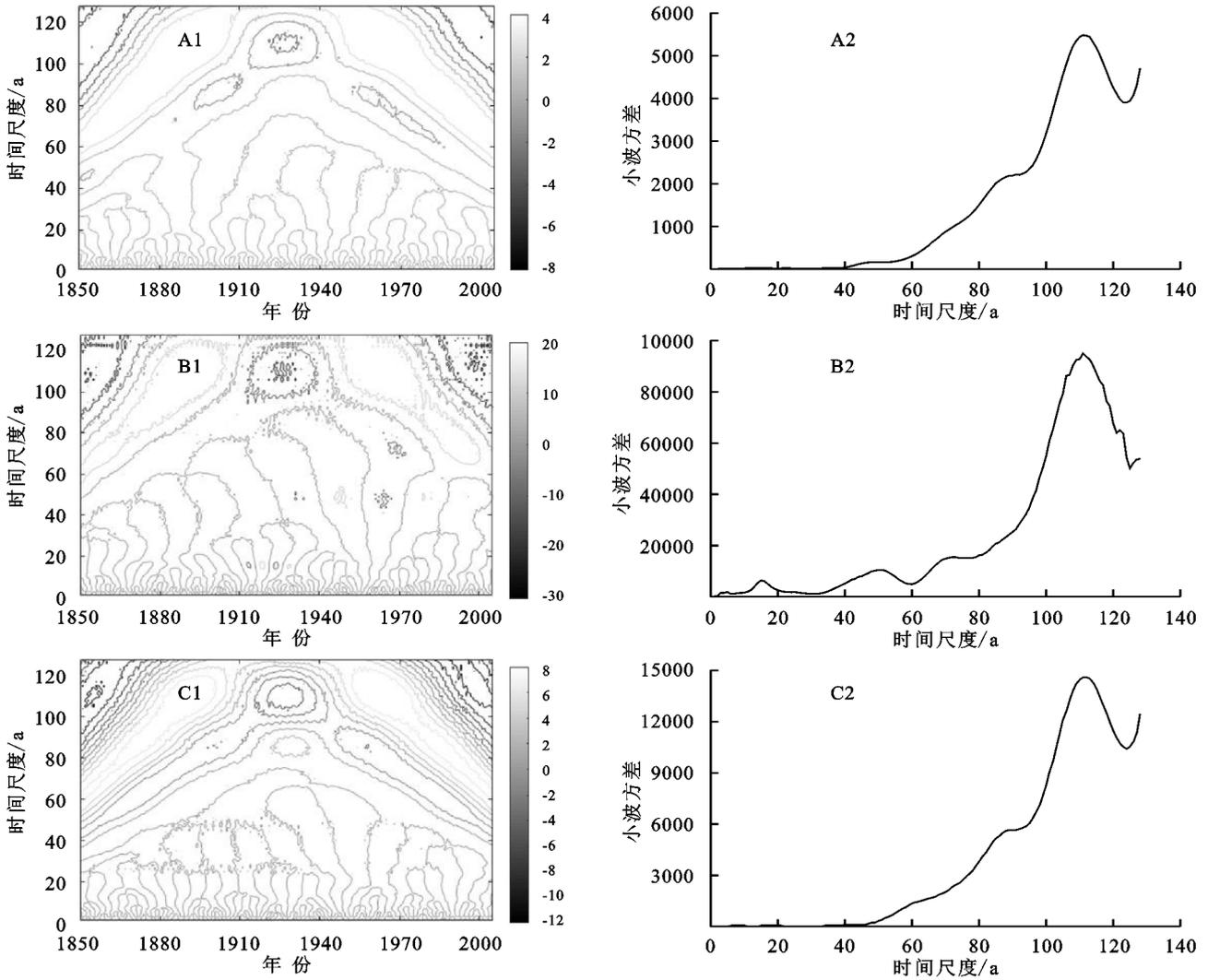
利用 MATLAB 小波周期分析方法得到渭河流域气温、降水量、蒸发量的小波周期图。从图 7 可以发现,渭河流域气温存在 5, 15, 23 a 的短周期变化以及 108 a 的长周期变化,降水量存在 5, 15, 50 a 短周期变化以及 110 a 长周期变化。蒸发量存在 110 a 左右的长周期变化以及 5, 8, 18 a 左右短周期变化。

使用 M-K 突变检验法对 1850—2005 年渭河流域蒸发量进行突变检验,给定显著性水平为 0.05, $U_{0.05} = \pm 1.96$,从图 8 可以看出,渭河流域年均蒸发量中的 M-K 曲线中,UF, UB 两条曲线在 1963 年左右有交点,并且该交点位于 ± 1.96 的置信区间内,UF 曲线负方向变化低于 -1.96,说明渭河流域年均蒸发量减少的突变发生在 1963 年左右。降水量虽然存在突变点,但是 UF 曲线未超过 ± 1.96 的置信区间,没有通过显著性检验,所有渭河流域降水量未发生突变。温度 UF, UB 曲线存在 1982 年、1986 年两个交点,但 1982 年交点的 UF 曲线未超过 ± 1.96 的置信区间,而 1986 年的交点位于置信区间之内且 UF 曲线上升超过了 1.96,说明渭河流域年均气温升高的突变发生在 1986 年左右。

2.3 影响因素分析

渭河流域气候要素变化主要受区域地理环境及人类活动影响。1970 年以前人类活动对下垫面影响较小,地表反射率变化不大,温度变化主要受大气环

流的影响,主要表现出蒸发量减少较小,降水、气温变化不大。1985 年后,人类活动增加,土地利用结构发生巨大变化,交通用地及工矿用地增加,城市化进程加快^[24-26],植被覆盖减小,使地表对太阳辐射的反射率增大,白天下垫面增温增大可能增加了大气温度的增加,同时人类活动增强,温室气体增加也加大了温度的升高。渭河流域降水变化受大气环流及下垫面环境影响较大,渭河流域干流的关中地区降水量变化呈现出小幅度减少趋势变化,主要与大气环流的异常变化相关^[27]。渭河上游及支流区域为海拔高度较高的山地,降水呈现出大幅度的增加趋势,与这些区域的地表环境改变相关。近几十年来,国家的植树造林以及山地的退耕还林措施实施,自然植被恢复较好,森林对降水有促进作用,从而使该区域降水有增加趋势。蒸发量变化受气温、风速、降水及环境影响较大。渭河流域在所有年段出现了温度高的地区蒸发量小,温度低的地区反而蒸发量较大的现象,气温增加但年均蒸发反而呈减少趋势,此结果与和宛琳等^[28]对 1958—1999 年年平均气温和蒸发量的时空分布及其长期变化趋势的研究结果一致。其原因可能与该流域太阳辐射的减少有关,人类活动增强,河流径流减小,地表水减少,城市建设发展阻碍了风速,风速减小,可能导致气溶胶以及空气中粉尘增多,进而导致日照时间减少,大气流动能量受到影响,进而蒸发减少^[29-31],具体原因需要进一步研究讨论。



注: A1, B1, C1 分别为气温、降水及蒸发实部, A2, B2, C2 分别为气温、降水及蒸发的方差变化。

图 7 气温、降水及蒸发小波实部

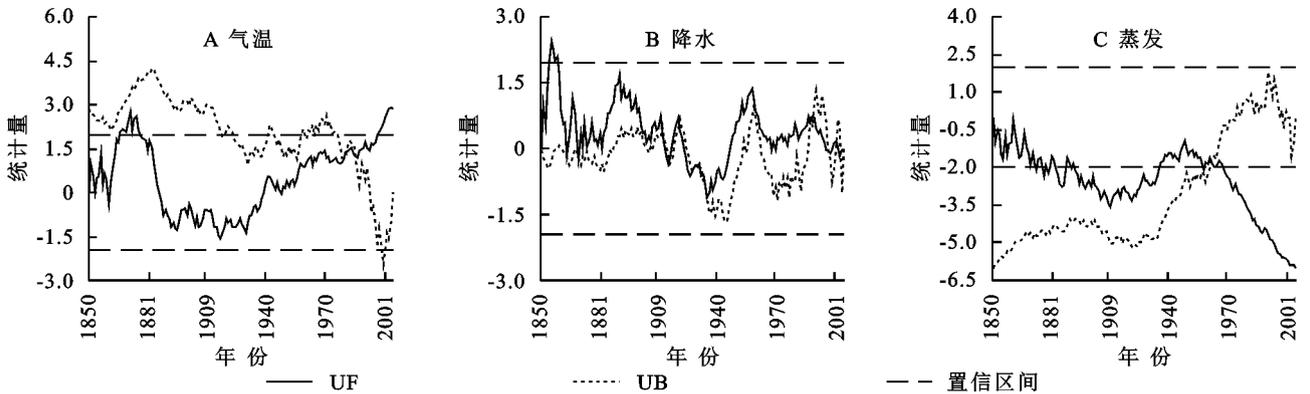


图 8 气温、降水及蒸发突变检验

3 结论

渭河流域近 200 年来年均气温及降水、蒸发 3 个要素存在长期的稳定和近期的波动变化。整体上气温、降水为增加趋势,年蒸发量为减少趋势,蒸发量夏秋两季与年变化趋于一致,春冬两季蒸发量少且变化平稳,年蒸发量的减少主要发生在夏秋两季。气温、降

水及蒸发在 1850—1940 年、1941—1970 年、1971—2005 年 3 个时段表现出不同的变化模式。

温度相对变率各区域变化趋势基本相同,1850—1940 年变率缓慢增加,之后变率较快增加。降水的空间变化趋势差异较大。1850—1940 年整个流域降水变化幅度不大,上游、泾河及洛河支流降水增加,而中游、下游及南部降水为减少趋势。渭河流域的中

游,下游和南部降水相对变率变化趋势基本趋于一致,泾河与洛河区域的降水相对变率在 1880—1909 年之后的变化趋势趋于一致。流域蒸发量变化的趋势率由北向南递减,总体蒸发量表现为下降趋势,北部地区下降趋势小于南部地区。流域西南地区气温上升趋势更为明显。

渭河流域气温存在 5,15,23 a 的短周期变化以及 108 a 的长周期变化,降水量存在 5,15,50 a 短周期变化以及 110 a 长周期变化,蒸发量存在 110 a 左右的长周期变化以及 5,8,18 a 左右短周期变化,年均蒸发量减少的突变发生在 1963 年左右,流域降水量未发生突变,年均气温升高的突变发生在 1986 年左右。

参考文献:

- [1] 丁一汇,王会军.近百年中国气候变化科学问题的新认识[J].科学通报,2016,61(10):1029-1041.
- [2] 董磊华,熊立华,于坤霞,等.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012,23(2):278-285.
- [3] Liu Y, Wang N, Wang L, et al. Variation of cloud amount over China and the relationship with ENSO from 1951 to 2014[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(8):2931-2941.
- [4] 余飞,夏栋,刘文景,等.模拟暴雨条件下植被混凝土坡面侵蚀的水动力学特征[J].水土保持通报,2021,41(3):152-158.
- [5] Liu Y, Wang N, Zhang J, et al. Climate change and its impacts on mountain glaciers during 1960—2017 in western China[J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(4):537-550.
- [6] Liu Y, Guo Z, Zhou Q, et al. The climate characteristics of the first date of $\leq 0^{\circ}\text{C}$ temperature in East China[J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2015, 47(2):243-253.
- [7] 李育,刘媛.末次盛冰期以来中国湖泊记录对环流系统及气候类型的响应[J].地理学报,2016,71(11):1898-1910.
- [8] 邓汝漳,储敏,任宏利,等.BCC_CSM 北极海冰模拟性能的改进对东亚冬季气候模拟的影响[J].大气科学学报,2021,44(1):61-74.
- [9] 赵天保,陈亮,马柱国.CMIP5 多模式对全球典型干旱半干旱区气候变化的模拟与预估[J].科学通报,2014,59(12):1148-1163.
- [10] 吕桂军,冷险险,刘小刚,等.基于 CMIP5 多模式集合预估贵州省干旱时空变化[J].江苏大学学报:自然科学版,2021,42(2):221-228.
- [11] 李佳瑞,牛自耕,冯岚,等.CMIP5 模式对长江和黄河流域极端气温指标的模拟与预估[J].地球科学,2020,45(6):1887-1904.
- [12] 蔡秋芳,刘禹,段丙闯.树轮多指标研究在亚热带古气候重建中的作用:以桂林地区为例[J].地球环境学报,2019,10(2):141-148.
- [13] 何则,何元庆,王世金,等.基于历史文献的 1470—2008 年中国西北地区气候干湿序列分区重建[J].中国沙漠,2016,36(5):1278-1285.
- [14] 刘引鸽,胡浩楠,周欢欢,等.近 200 年来渭河流域干旱洪涝事件特征[J].水土保持研究,2019,26(4):217-223.
- [15] 邓国富,李明启.树轮密度对气候的响应及重建研究进展[J].地理科学进展,2021,40(2):343-356.
- [16] 胡浩楠,刘引鸽,马凯.渭河流域百年尺度水旱特征及其影响因素[J].水土保持通报,2020,40(2):255-262.
- [17] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design[J]. Bulletin of the American meteorological Society, 2012, 93(4):485-498.
- [18] 王晓欣,姜大膀,郎咸梅.CMIP5 多模式预估的 1.5°C 升温背景下中国气温和降水变化[J].大气科学,2019,43(5):1158-1170.
- [19] 赵彦茜,肖登攀,柏会子.CMIP5 气候模式对中国未来气候变化的预估和应用[J].气象科技,2019,47(4):608-621.
- [20] 王琤浩,刘冀,董晓华,等.基于 CMIP5 RCP 情景的长江流域径流对气候变化的响应研究[J].华中师范大学学报:自然科学版,2016,50(3):449-456.
- [21] 李晓菲,徐长春,李路,等.CMIP5 模式对西北干旱区典型流域气温模拟能力评估:以开都—孔雀河为例[J].资源科学,2019,41(6):1141-1153.
- [22] 吴晶,王宝鉴,杨艳芬,等.CMIP3 与 CMIP5 模式对中国西北干旱区气温和降水的模拟能力比较[J].气候变化研究进展,2017,13(3):198-212.
- [23] 杨肖丽,郑巍巍,林长清,等.基于统计降尺度和 SPI 的黄河流域干旱预测[J].河海大学学报:自然科学版,2017,45(5):377-383.
- [24] 王晓颖,宋培兵,廖卫红,等.气候变化和人类活动对白河流域径流变化影响的定量研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(4):50-56.
- [25] Chen H, Sun J. Anthropogenic influence has increased climate extreme occurrence over China[J]. Science Bulletin, 2021, 66(8):749-752.
- [26] 司鹏,梁冬坡,陈凯华,等.城市化对天津近 60 年平均温度和极端温度事件的增暖影响[J].气候与环境研究,2021,26(2):142-154.
- [27] 薛春芳,董文杰,李青,等.近 50 年渭河流域秋雨的特征与成因分析[J].高原气象,2012,31(2):409-417.
- [28] 和宛琳,徐宗学.渭河流域气温与蒸发量时空分布及其变化趋势分析[J].北京师范大学学报:自然科学版,2006,42(1):102-106.
- [29] 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.
- [30] 邹磊,余江游,王飞宇,等.渭河流域极端降水时空演变规律及其对大气环流因子的响应[J].干旱区研究,2021,38(3):764-774.
- [31] 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.