

王俊杰, 拾兵, 柏涛, 等. 黄河流域降水格局及影响因素[J]. 中国沙漠, 2022, 42(6): 94-102.

黄河流域降水格局及影响因素

王俊杰¹, 拾兵¹, 柏涛^{1,2}, 袁青云¹

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 黄河流域位于干旱、半干旱与半湿润过渡地带, 是中国重要的经济地带和生态屏障, 研究流域降水时空格局及其对多驱动因素的响应具有重要意义。本文分析了近70年降水的时空格局规律、多尺度特征以及降水对不同气象要素与环流因子的响应。结果表明: 黄河流域降水量呈下降趋势, 降水变率为 $-0.88\text{ mm}/10\text{a}$, 而上游地区呈增加趋势。流域降水存在显著的年周期尺度; 年际周期尺度为主导模态, 集合经验模态分解(EEMD)的累积方差贡献率为94.85%。偏小波相干性(PWC)分析表明蒸散量为降水多尺度特征的主导气象因素, 气象因素主要调制降水的季节性与年周期, 环流因子主导降水的年际和年代际周期; 不同类型因素的耦合可以增强对降水在所有周期尺度的解释能力。

关键词: 黄河流域; 降水; 集合经验模态分解; 偏小波相干性; 多尺度

文章编号: 1000-694X(2022)06-094-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00062

中图分类号: P333

文献标志码: A

0 引言

黄河流域是东亚季风与西风带交汇区域^[1], 在中国经济社会发展和生态安全战略格局方面具有重要地位^[2]。目前, 黄河流域环境正发生深刻变化, 气候变暖与人类活动相互作用是触发其演变的动力源^[3]。近30年来, 黄河源区升温速度为全球平均增温速率的3倍^[4], 冰湖溃决^[5]、冰川积雪退缩减少^[6]、湖泊湿地萎缩^[7], 对黄河流域水文循环过程、水资源时空格局以及流域生态保护和高质量发展有重要影响。

黄河流域处在干旱、半干旱与半湿润的过渡地带^[3], 气候分异特征显著^[5], 降水是流域主要水源^[3], 对流域降水时空格局进行研究, 揭示流域降水多尺度特征变率对多重驱动因子的响应规律, 有助于深化对变化环境下降水变率与不确定性的物理理解。降水过程不仅受到流域内部热力、动力过程驱动, 也受到复杂的非线性气候系统多因子多过程的协同作用^[3,8-9]。诸多研究表明黄河流域降水呈减少趋势, 同时存在空间差异性^[3,10], 且与东亚季风的强弱和进退关系密切^[1]。厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)的冷、暖位相与全球陆地降水有着较强联系, 并存在

强度、不稳定性等区域差异性^[11], 同时, ENSO对黄河流域不同尺度的干旱强度、历时、频次具有一定的诱导控制作用^[12]。不同研究均揭示出太平洋年代际振荡(PDO)的波动与冷、暖位相对东亚或华北地区的旱涝型转换以及降水和气温具有控制作用^[13-14], 而ENSO也受到PDO在年代际周期尺度位相转变的调制作用, 二者的叠加效应共同主导了中纬度及太平洋周边区域短周期尺度的气候演变^[15]。唐红玉等^[16]发现热带印度洋偶极子(TIOD)和ENSO的相互叠加会造成重庆夏季降水偏丰; 杨莲梅等^[17]指出北大西洋涛动(NAO)与新疆地区降水呈反相关关系。丁莹莹等^[18]发现南方涛动指数(SOI)对关中地区极端降水具有显著影响。流域其他气候要素如气温、蒸散量等与降水之间亦存在复杂的正负反馈作用及空间差异性^[19]。气温升高引起蒸散增强, 进而使得流域上空水汽含量增加; 而降水的多寡又将进一步制约流域蒸散量的变化^[10,19]。

目前对于多重可能驱动因素对降水过程多尺度特征的协同作用与尺度效应的研究却鲜有报道。本文在对降水时空格局演变与多尺度特征研究的基础上, 采用偏小波相干性(PWC)与多小波相干性

收稿日期: 2022-02-16; 改回日期: 2022-05-08

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(U2006227, U1906234)

作者简介: 王俊杰(1994—), 男, 河北邯郸人, 博士研究生, 研究方向为水文水资源。E-mail: junjiawang0907@163.com

通信作者: 拾兵(E-mail: sediment@ouc.edu.cn)

(MWC)方法对多种环流因子和气象要素对降水的尺度效应及协同作用关系进行探讨。研究对明晰黄河流域降水过程规律及维护地区生态安全具有重要意义。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

黄河横跨中国九省区,干流全长5 464 km,流域

面积79.5万 km²(图1),流域内气候分异特征显著,大部分区域属于干旱、半干旱区,同时受东亚季风和中纬度西风带的共同影响^[1,5]。黄河流域地貌类型复杂,从源头到下游分别穿越青藏高原、黄土高原、内蒙古高原以及华北平原,地质灾害与气候灾害类型及孕灾机制复杂^[1]。流域大部分地区降水量小于500 mm,在气候变化与人类活动加剧的双重作用下,该地区水资源供需矛盾加剧,已成为中国水资源极度短缺的流域之一^[20-21]。

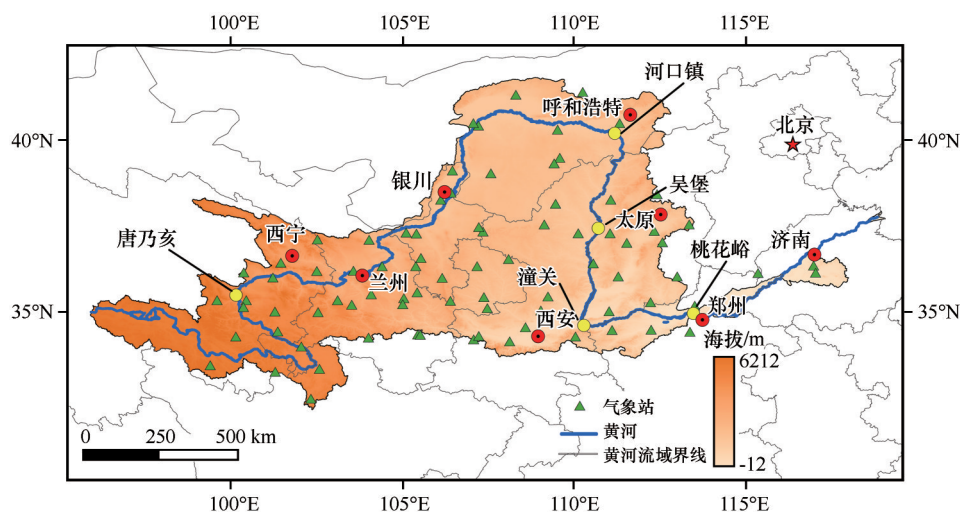


图1 研究区气象站分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in the study area

1.2 数据来源

选取1950—2019年为研究时段,气象数据包含82个气象站的月降水量、气温、蒸散发量、相对湿度,数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)。对于少数站点缺失数据的情况,采用有观测记录的临近站点数据进行插补延长。黄河流域年平均降水量通过泰森多边形法加权平均得到^[22]。

为揭示不同大气环流因子与降水之间的尺度效应,以及不同环流因子对降水作用的协同效应,选取厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、北极涛动(AO)和太平洋年代际振荡(PDO)为代表性环流因子。其中,以Niño 3.4表征ENSO状态,Niño 3.4指数是太平洋5°S—5°N和170°—120°W区域平均海温。PDO指数是北太平洋海表面温度年代际尺度变化的主导模态,由北太平洋(20°N)月SST异常计算得到。以北半球热带以外冬季海平面气压距平的EOF第一模态时间系数作为AO指数^[22]。Niño 3.4、PDO指数和AO指数均来源于美国国家海洋与大气

管理局(NOAA)的地球系统研究实验室(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>)。

1.3 研究方法

本研究采用集合经验模态分解(EEMD)和小波分析来揭示降水的多尺度特征,分别以偏小波相干方法(PWC)和多小波相干方法(MWC)来阐明单一和多驱动要素对降水变率的尺度效应与协同效应。EEMD与小波分析方法前人多有论述^[8,19,23],故不再赘述。本文只介绍偏小波相干和多小波相干理论方法。

1.3.1 偏小波相干(PWC)

二元小波相干(WTC)是研究两个地球物理变量之间尺度依赖关系的有效手段,然而,当两个研究变量均依赖于其他要素时,二者间的相干性则会出现偏差,因此,Hu等^[24]提出了可以消除多个相干变量干扰的偏小波相干方法。与二元小波相干性(BWC)类似^[24],偏小波相干性的计算亦是基于研究

变量之间的交叉小波功率谱和自小波功率谱,假设预测变量为 x ,响应变量为 y ,欲剔除的干扰变量为 $Z=(Z_1, Z_2, \dots, Z_q)$;则复PWC在尺度 s 和时间 τ 条件下可定义为^[24-25]:

$$\gamma_{y,x} \cdot Z(s, \tau) = \frac{(1 - R_{y,x,Z}^2(s, \tau))\gamma_{y,x}(s, \tau)}{\sqrt{(1 - R_{y,Z}^2(s, \tau))(1 - R_{x,Z}^2(s, \tau))}} \quad (1)$$

式中:符号 \cdot 表示剔除变量 Z 的干扰; $R_{y,x,Z}^2(s, \tau)$ 为复矩阵; $R_{y,Z}^2(s, \tau)$ 和 $R_{x,Z}^2(s, \tau)$ 为实矩阵,具体计算过程参见Hu等^[26]。偏小波相干的平方(以下称PWC)在时间 τ 和尺度 s 条件下可表示为:

$$\rho_{y,x \cdot Z}^2 = \frac{|1 - R_{y,x,Z}^2(s, \tau)|^2 R_{y,x}^2(s, \tau)}{(1 - R_{y,Z}^2(s, \tau))(1 - R_{x,Z}^2(s, \tau))} \quad (2)$$

式中: $R_{y,x}^2(s, \tau)$ 为变量 y 和 x 之间的二元小波相干性的平方:

$$R_{y,x}^2(s, \tau) = \frac{\overleftrightarrow{w}^{y,x}(s, \tau) \overleftrightarrow{w}^{y,x}(s, \tau)}{\overleftrightarrow{w}^{y,y}(s, \tau) \overleftrightarrow{w}^{x,x}(s, \tau)} \quad (3)$$

式中: $\overleftrightarrow{(\cdot)}$ 表示平滑算子; $\overline{(\cdot)}$ 表示复共轭算子; $\overleftrightarrow{w}^{A,B}(s, \tau)$ 代表在尺度为 s 和时间为 τ 时的平滑自小波功率谱(当 $A=B$)和交叉小波功率谱(当 $A \neq B$)。变量 x 和 y 在消除时间序列 Z 的效应后PWC的相位角为:

$$\vartheta_{y,x} \cdot Z(s, \tau) = \varphi_{y,x} \cdot Z(s, \tau) + \vartheta_{y,x}(s, \tau) \quad (4)$$

$$\varphi_{y,x} \cdot Z(s, \tau) = \arg(1 - R_{y,x,Z}^2(s, \tau)) \quad (5)$$

$$\vartheta_{y,x}(s, \tau) = \tan^{-1}(\text{Im}(W^{y,x}(s, \tau)) / \text{Re}(W^{y,x}(s, \tau))) \quad (6)$$

式中: \arg 定义为复数的参数; $W^{y,x}(s, \tau)$ 为变量 y 与 x 之间的交叉小波功率谱; Im 和 Re 分别代表 $W^{y,x}(s, \tau)$ 的虚部和实部。

1.3.2 多小波相干方法(MWC)

多小波相干方法用于探究某一地球物理变量对其他多个变量协同效应的依赖关系,该方法同样是基于研究变量之间的交叉小波功率谱和自小波功率谱,多预测变量 $X(X=X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的自小波与交叉小波功率谱矩阵为^[25-26]:

$$\overleftrightarrow{W}^{X,X}(s, \tau) = \begin{bmatrix} \overleftrightarrow{w}^{X_1, X_1}(s, \tau) & \overleftrightarrow{w}^{X_1, X_2}(s, \tau) & \cdots & \overleftrightarrow{w}^{X_1, X_n}(s, \tau) \\ \overleftrightarrow{w}^{X_2, X_1}(s, \tau) & \overleftrightarrow{w}^{X_2, X_2}(s, \tau) & \cdots & \overleftrightarrow{w}^{X_2, X_n}(s, \tau) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \overleftrightarrow{w}^{X_n, X_1}(s, \tau) & \overleftrightarrow{w}^{X_n, X_2}(s, \tau) & \cdots & \overleftrightarrow{w}^{X_n, X_n}(s, \tau) \end{bmatrix} \quad (7)$$

公式(7)各参数意义同式(3)。响应变量 Y 与多预测变量 X 之间的平滑交叉小波功率谱矩阵定义如下:

$$\overleftrightarrow{W}^{Y,X}(s, \tau) = \begin{bmatrix} \overleftrightarrow{w}^{Y, X_1}(s, \tau) & \overleftrightarrow{w}^{Y, X_2}(s, \tau) & \cdots & \overleftrightarrow{w}^{Y, X_n}(s, \tau) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $\overleftrightarrow{w}^{Y, X_i}(s, \tau)$ 表示时间为 τ 和尺度为 s 条件下 Y 与 X_i 之间的平滑交叉小波功率谱, MWC则可表述为:

$$\rho_m^2(s, \tau) = \frac{W^{Y,X}(s, \tau) W^{X,X}(s, \tau)^{-1} W^{Y,X}(s, \tau)^*}{W^{Y,Y}(s, \tau)} \quad (9)$$

式中: $(\cdot)^*$ 表示复共轭; $\rho_m^2(s, \tau)$ 的值为0到1,值越大表明响应变量 Y 与预测变量 X_i 之间的相干性越强。上述小波功率谱、偏小波相干性和多小波相干性的95%显著性检验均采用蒙特卡罗法^[25-26]。

2 结果与分析

2.1 降水时空格局特征

在过去70年间,黄河流域年平均降水量减少了约6 mm,降水变率为-0.88 mm/10a(图2A),而流域平均气温上升了1.39 °C^[27],因此流域呈暖干化态势。降水的Mann-Kendall趋势性检验的统计值为-0.06,表明整个流域降水下降趋势并不十分显著。20世纪70年代以前整个流域的降水量显著高于20世纪70年代之后的降水,由于黄河流域降水带的进退与旱涝变化对东亚夏季风强弱的响应较为敏感^[1],而20世纪70年代后东亚夏季风强度开始减弱,因此出现了流域降水量由多转少的年代际波动^[28]。夏季(6—8月)降水占比最高,为55.5%,而夏季中7月占比高达22.3%(图2B)。降水集中度越高,由此而诱发的极端降水频率则越高,因此,夏季是流域洪涝灾害天气最易发季节。东亚季风具有显著的季节性反转特征,夏季东亚夏季风易携带大量来自西太平洋的水汽进入黄河流域东部,而冬季流域气候受干冷的冬季风控制,水汽输送很弱,因此造成了黄河流域干湿季节的交替^[28]。

黄河流域降水的空间分布具有显著的差异性,纬向梯度尤为显著(图2C)。由于来自东海与渤海湾的纬向水汽输送受到太行山和吕梁山的先后阻挡,水汽量在翻越山区后锐减^[29],造成河套地区的年降水仅为300 mm左右。作为中国南北过渡带,流域35°N以南区域年降水量普遍在500 mm以上,

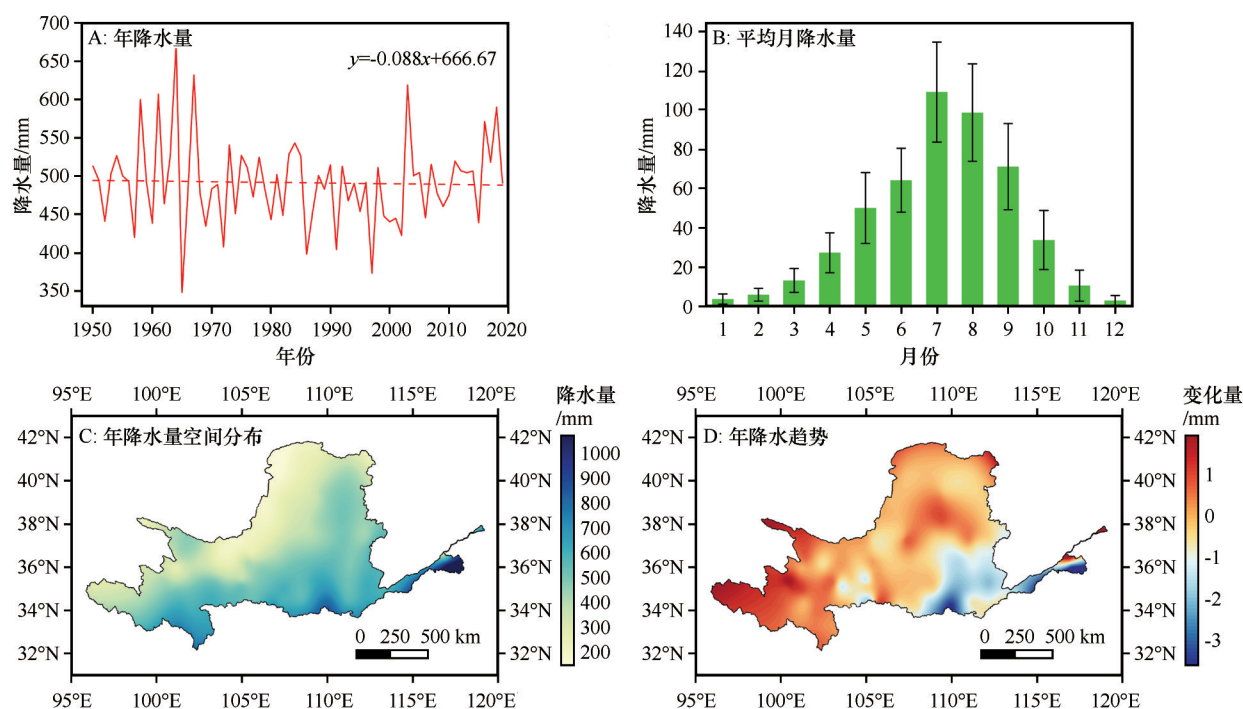


图2 黄河流域降水时空格局变化特征

Fig.2 Spatio-temporal pattern variations of precipitation in the Yellow River Basin

呈现出纬度地带性气候的“突变”特征^[30]。流域降水的趋势具有显著空间差异性,尤其具有径向变化的非对称特征(图2D)。黄河中游潼关以下区域降水呈下降趋势,降水量减少 $1.5\sim 3.5\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,这与黄建平等^[31]的研究结果基本吻合。黄河源及黄河上游部分区域降水呈现显著增加趋势,最大值超过 $1.5\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。黄河源地处青藏高原东部,生态系统脆弱,环流系统复杂,受东亚季风、南亚季风和西风带的共同作用^[29],该区域气温增速是全球气温平均增速的3倍,约为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}^{[4]}$,而气温的显著升高与黄河源降水的持续增加密切相关^[32]。

2.2 降水多时间尺度变化特征

对黄河流域1950—2019年月降水量进行EEMD分解得到9个IMF分量($c_1\sim c_9$)和残余项 $Res(c_{10})$,其中,白噪声指数为0.2,集合数为100,对各项分量进行重构发现与原始数据完全重合,表明EEMD分解具有可靠性与完备性。每一项分量均具有各自的物理意义与独立性, IMF_1 到 IMF_{10} 依次反映了降水从高频到低频不同尺度的准周期振荡变化,残余项 Res 表示序列的整体趋势(图3A)。不同尺度的准周期变化随时间呈现出强或弱的非均匀振荡,这种振荡的非均匀性反映了降水对气候系统内部动力过程及外强迫的共同非线性作用^[8]。

图3B和3C中黑色细实线所构成的锥形为小波影响锥(COI),由于数据的边缘效应,只分析影响锥内部区域;黑色粗实线包围部分为通过95%红噪声检验的区域^[19]。在整个研究时段内降水量存在显著的年周期振荡特征(图3B),这与EEMD分解中 IMF_4 方差贡献率最大的结论相一致,表明年尺度为黄河流域最显著的振荡周期。降水的季节性周期振荡较为显著,1970年之前的准3a周期尺度的周期振荡能量也较强(图3B)。流域平均年降水量的小波功率谱高能量区主要在小于7a左右的周期尺度(图3C),而EEMD结果亦表明小于准7a周期的累积方差贡献率为94.85%,二者结果基本一致。在1970s之前降水存在显著的1—6a的振荡周期,该区域通过了95%的显著性水平。总之,黄河流域降水同时存在多尺度周期,且不同周期强弱亦复杂多变,原因在于流域气候分异特征显著,同时流域地貌单元复杂,上下游海拔悬殊,使得水文循环过程存在较大空间差异性。

方差贡献率可用以表示不同尺度波动分量的振幅和频率对降水总体特征的影响程度,同时辅之以功率谱法对不同IMF的主周期进行检验,结果如表1所示。 IMF_1 到 IMF_4 为黄河流域降水的季节性或年周期尺度,累积方差贡献率达80.80%,表明季或年周期为流域降水的主导周期。另外,

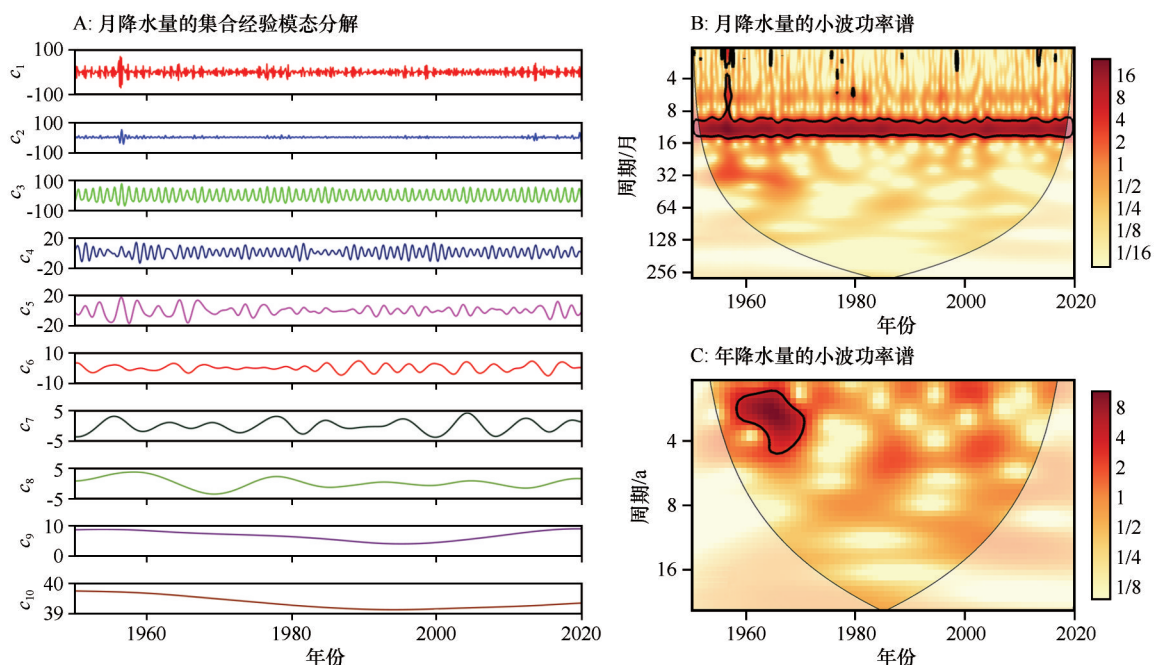


图3 黄河流域降水的多尺度特征

Fig. 3 Multi-scale characteristics of precipitation

年周期尺度的方差贡献率为 48.18%, 为所有准周期中最大, 由图 3A 中 c_4 可见, 降水年周期振荡的振幅呈非均匀的波动特征, 表明降水年准周期的气候变率受到多种驱动过程的调制作用。 IMF_1 所代表的小周期尺度的方差贡献率为 19.80%, 亦为流域降水的主导周期。 IMF_5 到 IMF_7 为降水的年际周期, 累积方差贡献率为 14.05%, 其中, IMF_5 为准 2 a 周期, 并且在 1970—1990 年 IMF_5 振荡较其他

时间段偏小, 属准 2 a 弱振荡周期时段; 而 IMF_6 和 IMF_7 分别属于降水的准 3 a 和准 7 a 周期振荡。在年代际周期尺度上, 流域降水具有准 18 a (IMF_8) 和准 24 a (IMF_9) 的气候变率, 累积方差贡献率为 4.57%。残差项 $Res(c_{10})$ 代表降水序列的整体趋势, 可见在 20 世纪末之前降水呈减少趋势, 之后则呈一定的增加态势, 这与马柱国等^[27]的研究结论基本一致。

表 1 黄河流域平均月降水量集合经验模态分解 (EEMD) 各 IMF 分量主周期与方差贡献率

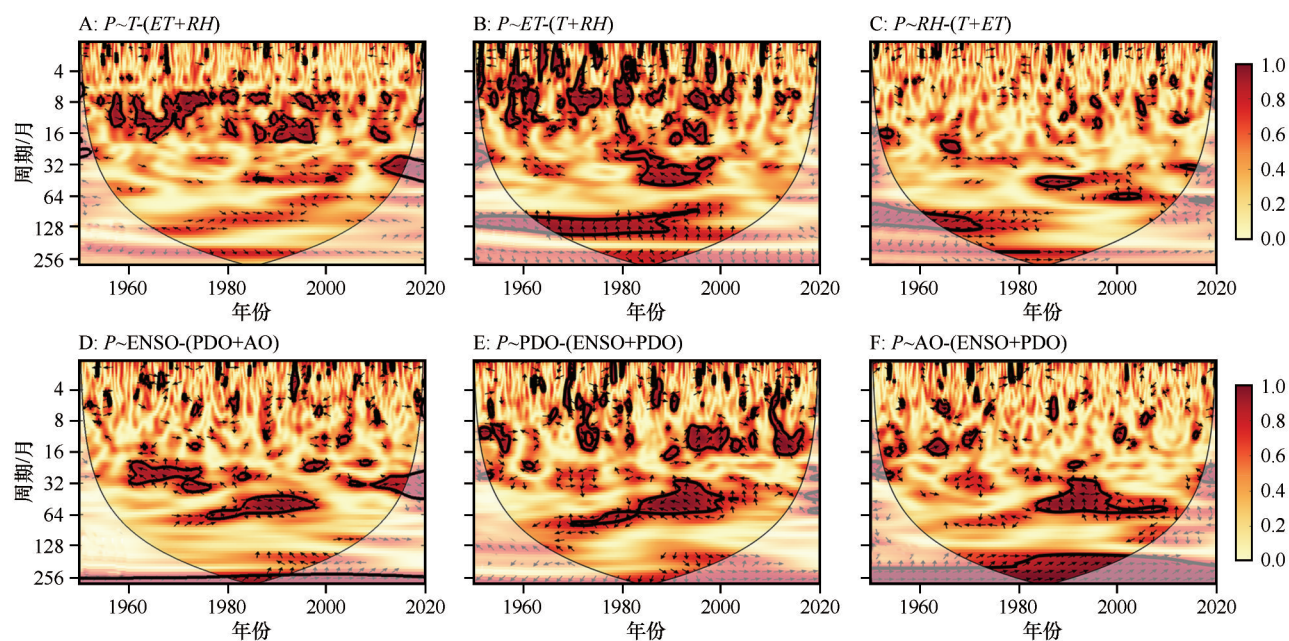
Table 1 The primary periods and variance contribution rates of each IMF decomposed by EEMD of mean monthly precipitation

项目	IMF 分量									Res
	IMF_1	IMF_2	IMF_3	IMF_4	IMF_5	IMF_6	IMF_7	IMF_8	IMF_9	
主周期/a	0.25	0.5	0.75	1.0	2.1	3.3	6.7	17.9	23.8	—
贡献率/%	19.80	7.97	7.85	45.18	8.16	3.23	2.66	2.57	2.00	0.58
累积贡献率/%	19.80	27.77	35.62	80.80	88.96	92.19	94.85	97.42	99.42	100

2.3 降水与单驱动因素的偏相干性

气温、蒸散发量和相对湿度等因素作为降水过程中重要的伴随量, 与降水的形成具有重要关联性, 同时, 降水也会受到不同类型的大气环流的直接或间接调节^[3]。本研究主要选取流域平均气温、蒸散发量和相对湿度, 以及环流因子 ENSO、PDO 和

AO 来阐述降水尺度变化对不同驱动因子的响应。图 4 显示的是消除某些变量干扰之后降水与某一可能驱动因素之间的偏小波相干性 (PWC), 箭头向右表示二者呈正相位, 向左为负相位, 向上表示降水提前影响因素 1/4 周期, 向下反之^[23]。在消除蒸散发量与相对湿度的影响后, 降水量与平均气温在时频域的相干性的高能量区主要集中在小尺度周期



P : 降水量, T : 平均气温, ET : 蒸散发量, RH : 相对湿度, ENSO: 厄尔尼诺-南方涛动, PDO: 太平洋年代际涛动, AO: 北极涛动

图4 黄河流域平均月降水量与不同气象因素和环流因子之间的偏小波相干性(值越大表明相干性越强)

Fig.4 The partial wavelet coherence analysis of precipitation between different meteorological factors of circulation factors (The higher the value, the stronger the coherence). P , precipitation; T , temperature; TE , evapotranspiration; RH , relative humidity; ENSO, El Nino-Southern Oscillation; PDO, Pacific interdecadal Oscillation; AO, Arctic Oscillation

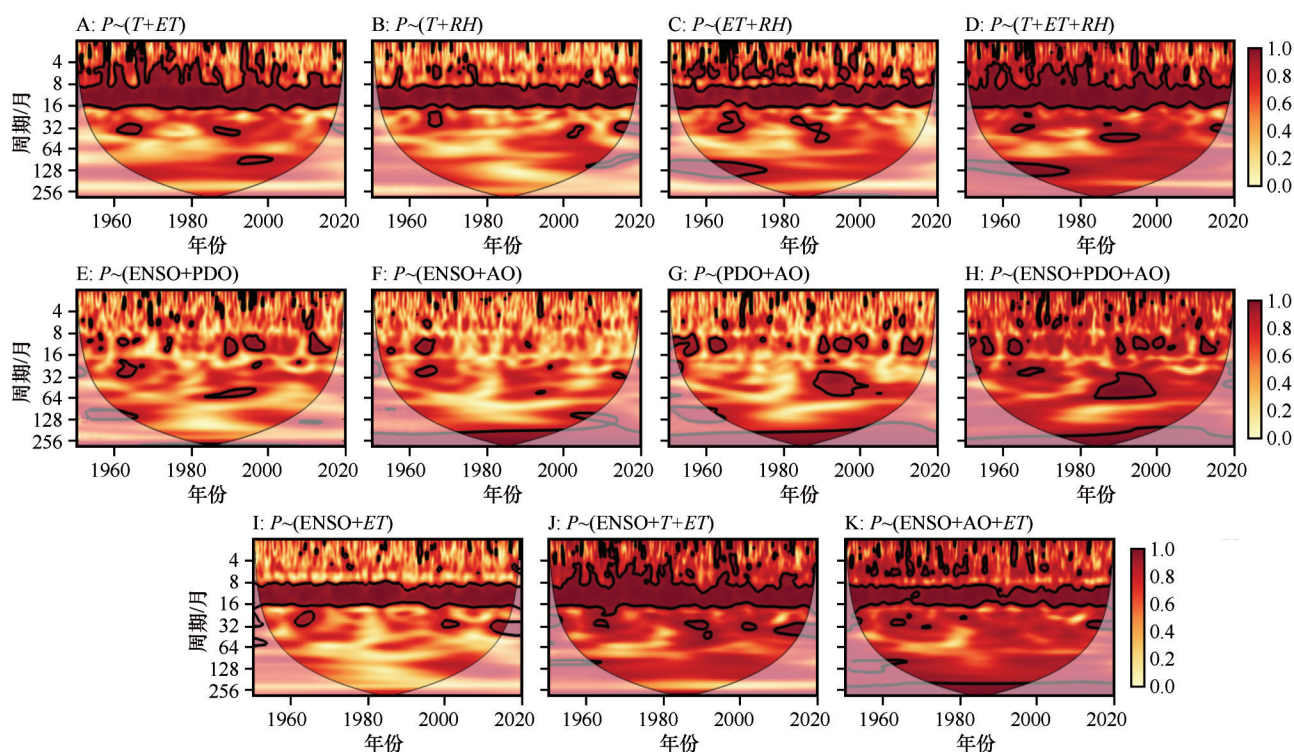
(8—16月),且在不同尺度下二者以正相位关系为主(图4A)。蒸散发量和降水量之间的偏相干性(消除平均气温、相对湿度的干扰)表明,二者在多个时间尺度下均具有较显著的间歇性共振周期(图4B),但在不同频域下二者的相位关系具有非一致性,这亦表明流域降水量和蒸散发量在不同周期尺度的相互作用过程中具有复杂的非线性特征。相比而言,流域降水量与相对湿度在不同频域下的共振周期则较弱,二者偏相干性显著的高能量区域主要分布在年际和年代际周期尺度(图4C)。

降水作为全球水文循环中的重要组成部分,与复杂的海洋-大气相互作用密切相关,而大气系统的遥相关波动具有年际到年代际的振荡模式与循环周期,这就为研究降水变率与未来趋势提供了有效的预测因子^[22]。通过降水与不同环流因子的偏小波相干性发现,环流因子与降水在时频域的高能量区主要集中在年际和年代际周期尺度。流域降水与 ENSO 的 PWC 显示二者在 3—5 a 的周期尺度存在显著的共振周期,且二者之间的相位在 1975 年左右发生转变(图 4D)。流域降水和 PDO 之间的高能量共振周期主要在年际振荡尺度,在 1970—2000 年 3—5 a 周期尺度范围内二者具有显著的负相位的相干性关系,并且通过了 95% 的显著性检验(图

4E)。此外, PDO 与降水存在显著的间歇性年共振周期,二者相位在不同时段存在较大差异,这也表明年周期尺度的降水变率具有复杂的调控机制。AO 对降水的影响主要在年际和年代际周期尺度,尤其 1982—2010 年 5 a 左右的周期范围内(图 4F),二者之间的共振周期较为显著,且降水提前 AO 约 1/4 个周期(1.5 a)。

2.4 多驱动因子对降水多尺度特征的协同效应

独立的影响因子难以解释降水在时频域的多尺度特征及复杂变率, MWC 方法则为揭示多驱动要素对降水的协同作用提供了一种新的途径^[26]。图 5 显示的是不同驱动因素对降水多尺度特征变率协同作用的 MWC。其中, MWC 中有两个评估不同类型组合因素对降水多尺度特征变率影响程度的参数,分别为平均多小波相干性(AMWC)和显著相干面积百分比(PASC)。气象因素(气温、蒸散发量、相对湿度)之间的耦合能够更好地解释流域降水的多尺度特征变化,两个气象要素或两个环流因子耦合的 AMWC 分别为 0.65 和 0.59, 而 PASC 分别为 27.4% 和 12.6%, 说明气象要素在降水变化过程中具有主导作用。此外, 当 3 个气象因子耦合时, 发现 MWC 的平均多小波相干性和显著相干面积百分比



P:降水量, T:平均气温, ET:蒸散量, RH:相对湿度, ENSO:厄尔尼诺-南方涛动, PDO:太平洋年代际涛动, AO:北极涛动
图5 降水与不同气象因子或环流因子之间的多小波相干性(A—D为不同气象因子组合; E—H为不同环流因子组合; I—K为不同气象因子与环流因子组合)

Fig.5 Multiple wavelet coherence analysis of precipitation between different meteorological factors of circulation factors
(A—D are the combinations of different meteorological factors; E—H are the combinations of different circulation factors; I—K are the combinations of different meteorological factors of circulation factors)

分别为0.81和33.79%,且耦合驱动要素对降水多尺度特征的解释在所有时频域下均有提高(图5D)。同时,图5A—D显示气象因素主要作用于降水的季、年小尺度周期,且在年周期尺度上均通过了95%的显著性检验。而环流因子的协同作用可以更好地解释降水在年际、年代际周期尺度的变化(图5E—H),随着环流因子的增加,多驱动因素对降水的解释能力显著增强,且存在于所有时间尺度(图5H)。

单一环流因子与双气象因子类型或单一气象因子与双环流因子类型能够显著提高耦合模式对降水多尺度变率的解释,二者的AMWC分别为0.86和0.85,均高于3种气象或环流因子的组合模式(图5A—K),原因在于同一类型驱动因素(如3种气象因素)之间存在较强的共线性,其中某一因素甚至会掩盖另一种要素对降水变率的解释能力^[17-18],而环流因子与气象因子所主导的降水尺度差异较大,因此两种类型的驱动因素的协同作用则能够更好地解释降水在所有时间尺度下的变化特征。

3 讨论

黄河流域地貌格局复杂,生态环境敏感脆弱,地处干旱、半干旱与半湿润过渡带,流域气候系统演变不仅受到自身内部热力、动力过程作用,也受到外部强迫因子与人类活动的共同驱动^[3]。PDO作为一种年代际周期尺度的气候变率强信号,其位相转换将导致东亚季风的减弱以及调制东亚季风和ENSO的年际关系,进而影响中国东部降水分布以及旱涝格局的年代际转型^[10],可以发现,PDO与其他因子的耦合对降水在年代际周期尺度下相干性的提高具有显著影响(图5G—H)。同时,黄河流域气温与ENSO强度具有显著正相关^[12],ENSO形成发生过程伴随的陆海热力差异变化导致东亚季风转型,进而对流域降水的年际周期起到调控作用(图4D和图5H)。此外,AO作为北半球热带外中高纬度地区重要的年际尺度大气振荡信号,通过影响西伯利亚高压、西风带与Rossby波等活动,进而影响流域暖湿水汽的输送,使得AO与流域冬季降水3—5 a周期尺度密切相关^[33]。

蒸散是陆地表面液态水转化为水汽的主要过程,流域上空水汽总量越大,气块上升至自由对流高度所获的抬升力越大,大气层的不稳定性增强,降水更容易形成^[34],而气温升高则会引起蒸发作用的加强^[31],黄河流域大部分区域为半干旱、干旱区,因此流域的蒸散量对水分的依赖性较强,降水量又成为了蒸散量的主控因素^[32]。流域气温、蒸散过程具有显著的季节性、年周期尺度,在多种气象因素的耦合作用下,降水量与气温、蒸散量在季、年周期尺度表现出显著相干性(图4A—B,图5A—D)。

人类活动在流域气候变化过程中扮演的角色越来越显著,温室气体排放速度的增加造成全球升温使得大气环流活动和区域蒸发作用增强^[19]。同时,气溶胶的增加通过改变地表辐射平衡过程和海陆热力差异从而影响季风环流,而伴随季风产生的水汽通量也对气溶胶的气候效应有敏感响应^[32],诸多研究亦表明气溶胶含量对不同类型的降水具有增强或抑制作用^[19,35]。人类活动造成的大尺度土地覆盖类型的转变使得区域下垫面及局部气候发生变化,由此引起气温、蒸散量格局的变化从而会对区域降水产生间接效应^[3,19]。总之,流域降水是多驱动因素多过程耦合作用的结果,在未来气候变化背景下需尊重气候变化的客观规律,对黄河流域水资源诸多问题要深入分析、科学论证,推动黄河流域生态保护和高质量发展。

4 结论

在过去70年,黄河流域降水呈减少趋势,降水变率为 $-0.88 \text{ mm}/10\text{a}$ 。黄河上游降水呈增加趋势,最大值超过 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$;而下游呈减少的趋势,减少 $1.5—3.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

黄河流域降水存在多尺度特征变化,EEMD分解与小波功率谱均显示年尺度周期最为显著,并且以年际周期为主导,EEMD分解的累积方差贡献率为94.85%。

偏小波相干性(PWC)表明气象因子主要作用于降水的季节性、年周期尺度(1、3—5 a),且蒸散量对降水的影响最大;环流因子主要作用于降水的年际、年代际周期尺度,且相位关系较为复杂。

多小波相干性分析(MWC)表明不论是气象因素还是环流因子的耦合均能提高对降水多尺度特征变率的解释能力,并且存在于所有时间尺度,在该两种类型因子的耦合作用下的AMWC均大于

0.85。此外,气象因子与环流因子的共线性较弱,且各自主导的降水周期尺度差异较大,因此二者的协同作用能够更好地解释降水在所有尺度下的变化规律。研究结果也为降水预测因子类型与数目的筛选提供了一种新的思路和方法。

参考文献:

- [1] 李夫星,陈东,汤秋鸿.黄河流域水文气象要素变化及与东亚夏季风的关系[J].水科学进展,2015,26(4):481-490.
- [2] 习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J].中国水利,2019(20):1-3.
- [3] 王有恒,谭丹,韩兰英,等.黄河流域气候变化研究综述[J].中国沙漠,2021,41(4):235-246.
- [4] Iqbal M, Wen J, Wang X, et al. Assessment of air temperature trends in the source region of Yellow River and its sub-basins, China[J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 54:1-13.
- [5] 兰恒星,祝艳波,李郎平,等.黄河流域地质-地貌-气候多过程相互作用及其孕灾机制研究[J].中国科学基金,2021,35(4):510-519.
- [6] 管晓祥,刘翠善,鲍振鑫,等.黄河源区积雪变化时空特征及其与气候要素的关系[J].中国环境科学,2021,41(3):1045-1054.
- [7] 段水强,范世雄,曹广超,等.1976-2014年黄河源区湖泊变化特征及成因分析[J].冰川冻土,2015,37(3):745-756.
- [8] 薛春芳,侯威,赵俊虎,等.集合经验模态分解在区域降水变化多尺度分析及气候变化响应研究中的应用[J].物理学报,2013,62(10):504-511.
- [9] 邹磊,夏军,张印,乔云峰.海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J].水资源保护,2021,37(1):53-60.
- [10] Huang J P, Chen W, Wen Z P, et al. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: climate and climate change[J]. Science China (Earth Sciences), 2019, 62(10):1514-1550.
- [11] 龚道溢,王绍武.近百年ENSO对全球陆地及中国降水的影响[J].科学通报,1999,44(3):315-320.
- [12] 周丹,张勃,安美玲,等.黄河流域不同时间尺度干旱对ENSO事件的响应[J].中国沙漠,2015,35(3):753-762.
- [13] 裴琳,严中伟,杨辉.400多年来中国东部旱涝型变化与太平洋年代际振荡关系[J].科学通报,2015,60(1):97-108.
- [14] 马柱国.华北干旱化趋势及转折性变化与太平洋年代际振荡的关系[J].科学通报,2007,52(10):1199-1206.
- [15] Yao J H, Xiao L X, Gou M M, et al. Pacific decadal oscillation impact on East China precipitation and its imprint in new geological documents[J]. Science China (Earth Sciences), 2018, 61(4):473-482.
- [16] 唐红玉,吴遥,董新宁,等.赤道印度洋偶极子对重庆夏季降水的影响分析[J].海洋气象学报,2020,40(2):52-61.
- [17] 杨莲梅,关学锋,张迎新.亚洲中部干旱区降水异常的大气环流特征[J].干旱区研究,2018,35(2):249-259.
- [18] 丁莹莹,邱德勋,吴常雪,等.关中平原极端降水时空变化及

- 其与大气环流的关系[J].干旱区研究,2022,39(1):104–112.
- [19] 任国玉,柳艳菊,孙秀宝,等.中国大陆降水时空变异规律:III.趋势变化原因[J].水科学进展,2016,27(3):327–348.
- [20] 张凡,史晓楠,曾辰,等.青藏高原河流输沙量变化与影响[J].中国科学院院刊,2019,34(11):1274–1284.
- [21] 杨玉霞,闫莉,韩艳利,等.基于流域尺度的黄河水生态补偿机制[J].水资源保护,2020,36(6):18–23,45.
- [22] Wang J J, Shi B, Zhao E J, et al. Synergistic effects of multiple driving factors on the runoff variations in the Yellow River Basin, China[J]. Journal of Arid Land, 2021, 13(8): 835–857.
- [23] Su L, Miao C Y, Duan Q Y, et al. Multiple-wavelet coherence of world's large rivers with meteorological factors and ocean signals [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(9): 4932–4954.
- [24] Hu W, Si B C. Improved partial wavelet coherency for understanding scale-specific and localized bivariate relationships in geosciences [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(1): 321–331.
- [25] Koopmans L. The Spectral Analysis of Time Series [M]. New York, USA: Academic Press, 1974: 119–164.
- [26] Hu W, Si B C. Technical note: multiple wavelet coherence for untangling scale-specific and localized multivariate relationships in geosciences [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 20: 3183–3191.
- [27] 马柱国,符淙斌,周天军,等.黄河流域气候与水文变化的现状及思考[J].中国科学院院刊,2020,35(1):52–60.
- [28] 丁一汇,司东,柳艳菊,等.论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化[J].大气科学,2018,42(3):533–558.
- [29] 张宇,李铁键,李家叶,等.西风带和南亚季风对三江源雨季水汽输送及降水的影响[J].水科学进展,2019,30(3):348–358.
- [30] 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.
- [31] 黄建平,张国龙,于海鹏,等.黄河流域近40年气候变化的时空特征[J].水利学报,2020,51(9):1048–1058.
- [32] 蓝永超,朱云通,刘根生,等.黄河源区气候变化的季节特征与区域差异研究[J].冰川冻土,2016,38(3):741–749.
- [33] He S P, Gao Y Q, Li F, et al. Impact of Arctic Oscillation on the East Asian climate: a review [J]. Earth-Science Reviews, 2017, 164: 48–62.
- [34] 孙赫,苏凤阁,黄敬恒,等.第三极西风和季风主导流域源区降水呈现不同梯度特征[J].科学通报,2020,65(1):91–104.
- [35] Wu G X, Li Z Q, Fu C B, et al. Advances in studying interactions between aerosols and monsoon in China [J]. Science China (Earth Sciences), 2016, 59(1): 1–16.

Spatio-temporal patterns of precipitation and its possible driving factors in the Yellow River Basin

Wang Junjie¹, Shi Bing¹, Bai Tao^{1,2}, Yuan Qingyun¹

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The Yellow River Basin is located in the arid, semi-arid and semi-humid transition zone, which is an important economic zone and ecological barrier in China. It's of great significance to study the spatio-temporal pattern of precipitation and its response to multiple driving factors. In this paper, the spatio-temporal pattern, multi-scale characteristics and response of precipitation to different factors are analyzed. The precipitation showed a decreasing trend, with a decreasing rate of $-0.88 \text{ mm}/10\text{a}$, while the precipitation in the upper reaches showed an increasing trend. The annual time scale was significant and the cumulative variance contribution rate of ensemble empirical mode decomposition (EEMD) was 94.85%. The partial wavelet coherence (PWC) analysis showed that evaporation was the dominant meteorological factor, meteorological factors mainly affected the seasonal and annual periods and circulation factors mainly dominated the inter-annual and decadal periods of precipitation. The synergistic effects of different types of factors can enhance the explanatory ability of precipitation at all time scales. The study is significant for understanding the precipitation variability and promoting the ecological protection and high-quality development of the basin.

Key words: Yellow River Basin; precipitation; ensemble empirical mode decomposition; partial wavelet coherency; multi-scale