

赣南九曲水流域降雨侵蚀力变化规律及其影响因素

李俊^{1,2}, 盛菲^{1,2}, 刘士余^{1,2}, 张婷^{1,2}, 余敏琪^{1,2}

(1.江西农业大学国土资源与环境学院,南昌 330045;2.江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室,南昌 330045)

摘要: 为有效防治流域土壤侵蚀、维护生态安全,基于九曲水流域 1982—2019 年逐日降雨数据,运用小波分析、交叉小波变换等方法分析了中雨、大雨、暴雨及年降雨侵蚀力的年际变化规律,并探讨了太阳黑子、厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)、北极涛动(AO)及太平洋年代际涛动(PDO)对它们的影响。结果表明:(1)中雨、大雨、暴雨及年降雨侵蚀力的年际变化趋势均不显著($p>0.05$),其变异系数(C_V)分别为 0.24,0.31,0.64,0.26,均属于中等变异。(2)不同量级降雨侵蚀力的周期变化差异明显,年降雨侵蚀力与暴雨侵蚀力均存在 15~23 年周期变化和 19 年主周期,二者联系更紧密。(3)年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力与太阳黑子、ENSO、AO、PDO 均分别存在 9~11,10~11,10~11,9~10 年的显著共振周期,暴雨侵蚀力受太阳黑子、ENSO、PDO 的影响大于中雨、大雨侵蚀力,大雨侵蚀力受 AO 的影响大于中雨、暴雨侵蚀力。研究成果可为赣南乃至我国土壤侵蚀预测预报与防治提供科学依据。

关键词: 九曲水流域;降雨侵蚀力;不同量级;影响因素;交叉小波变换

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)04-0063-11

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.04.009

Variation of Rainfall Erosivity and Its Influencing Factors in Jiuqushui Watershed, Southern Jiangxi Province

LI Jun^{1,2}, SHENG Fei^{1,2}, LIU Shiyu^{1,2}, ZHANG Ting^{1,2}, YU Minqi^{1,2}

(1.College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045;

2.Key Laboratory of Poyang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi Province, Nanchang 330045)

Abstract: In order to effectively prevent soil erosion in the watershed and maintain ecological security, based on the daily precipitation data from 1982 to 2019 in Jiuqushui watershed, the inter-annual variation rules of erosivity of moderate rain, heavy rain, rainstorm and annual rainfall were analyzed by using wavelet analysis and cross wavelet transform, the influences of Sunspots, El Niño-Southern Oscillation (ENSO), Arctic Oscillation (AO) and Pacific Decadal Oscillation (PDO) on them were discussed. The results indicated that: (1) The inter-annual variation trend of moderate rain erosivity, heavy rain erosivity, rainstorm erosivity and annual rainfall erosivity was not significant ($p>0.05$), and the coefficient of variation (C_V) was 0.24, 0.31, 0.64 and 0.26, respectively, which were all moderate variations. (2) The periodic variation of rainfall erosivity in different magnitudes was obviously different, the annual rainfall erosivity and rainstorm erosivity had a 15 to 23 years cycle and a 19-year main cycle, which were more closely related. (3) The annual rainfall erosivity and rainstorm erosivity had significant resonance periods of 9 to 11, 10 to 11, 10 to 11 and 9 to 10 years with Sunspot, ENSO, AO and PDO, respectively. The impact of Sunspot, ENSO and PDO on rainstorm erosivity was greater than that of moderate rain erosivity and heavy rain erosivity. And the impact of AO on heavy rain erosivity was greater than that of moderate rain erosivity and rainstorm erosivity. The research results could provide scientific basis for soil erosion prediction and prevention in southern Jiangxi and even China.

Keywords: Jiuqushui watershed; rainfall erosivity; different magnitude; influencing factors; cross wavelet transform

土壤侵蚀导致土壤肥力下降、江河泥沙淤积和生态环境恶化等,加剧区域贫困,是目前世界上最严重

的生态环境问题之一。降雨是引起土壤侵蚀的直接原因,雨滴的击溅作用和地表径流的冲刷作用是造成

土壤侵蚀的主要动力。降雨侵蚀力是表征降雨对土壤侵蚀影响的潜在能力^[1],随降雨量、降雨强度和降雨历时及降雨频率的变化而变化。

太阳黑子活动和气候涛动改变全球水循环状况,导致水资源时空重新分配^[2-3]。太阳黑子活动增强地球表面太阳辐射,加剧水体蒸发和植被蒸腾,造成暖湿气流中水分含量增加,从而改变降雨分布特征^[4]。气候涛动是控制一个地区的大气环流机制,通过改变雨带移动和水汽输送而影响区域水文要素^[5],如厄尔尼诺—南方涛动(el niño-southern oscillation, EN-SO)、北极涛动(arctic oscillation, AO)和太平洋年代际涛动(pacific decadal oscillation, PDO)等。其中,ENSO 是赤道太平洋地区乃至全球范围内最强的年际气候变率的自然信号之一,是全球气候变化的重要影响因子^[6];AO 能表征中纬度西风带的强度和位置,是大气基本环流形势最重要的依据和指标^[7];PDO 是一种具有长生命史的太平洋年代际振荡现象^[8]。迄今为止,已有学者开展过太阳黑子、气候涛动对降雨或降雨侵蚀力的影响研究。李慧芳^[9]研究显示,太阳黑子对降雨的影响具有显著的区域特性,我国东北地区夏季降雨与太阳黑子数呈显著负相关关系,而西北地区则相反;马岚等^[10]在渭河流域研究发现,太阳黑子、ENSO、AO 对降雨侵蚀力均有一定的影响,其中太阳黑子影响最为显著,ENSO 次之,AO 最弱;方国华等^[11]研究指出,ENSO 是造成亚洲季风异常和我国旱涝发生的关键因素;陈世发等^[12-13]研究表明,福建省降雨侵蚀力与南方涛动指数(SOI)和多变量 ENSO 指数(MEI)存在极显著相关;郭渠等^[14]研究表明,我国西北地区夏季降雨变化与同期 AO 具有显著的相关关系;韩进军等^[15]研究表明,近 57 年来柴达木盆地年降水量与 AO 主要存在近似正相关的 2~3 年和 1~2 年的共振周期;徐泽华等^[16]研究表明,在小波影响锥内,山东省降雨侵蚀力与 PDO 在高能量区、低能量区分别存在 4~5、4 年的共振周期;Liu 等^[17]在黄土高原探究显示,年降雨侵蚀力与 ENSO、PDO 分别呈负、正相关。

综上所述,太阳黑子、气候涛动对中雨、大雨、暴雨侵蚀力的影响及其程度差异分析鲜见报道。因此,本文以赣南九曲水流域为研究对象,分析年及不同量级降雨侵蚀力的变化规律,探讨其在时频域上与太阳黑子、ENSO、AO 及 PDO 的相互关系,并比较它们受上述因素影响的强弱,旨在为土壤侵蚀的预测预报与防治及生态安全的维护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

九曲水流域位于江西省最南端,是东江流域两大

主要水系之一,发源于安远和寻乌两县交界处的基隆嶂,自北向南由安远经定南流入广东龙川,与寻乌水汇流形成东江,其主河道长 91 km,集水面积 1 554 km²。流域地貌以低山丘陵为主,高程为 81~1 017 m;土壤母质以花岗岩、石英岩和泥质岩居多,少数为紫红色砂砾岩和砂岩;土壤类型主要包括水稻土、潮土、紫色土、红壤和山地黄壤。流域气候类型属亚热带季风湿润气候,年平均气温为 18.9 °C,多年平均降水量 1 560 mm,多年平均径流深为 870 mm,呈现出“气候温和、雨量充沛”的气候特点。植被类型主要有马尾松、杉木、毛竹、樟树以及各种阔叶林。

胜前(二)水文站(115°13'00"E,24°51'30"N)位于定南县龙塘镇,为九曲水流域的主要控制站点,本文选取该水文站控制范围作为研究区,集水面积为 758 km²。

1.2 数据来源

(1)由江西省水文局提供的胜前(二)水文站 1982—2019 年逐日降水量数据;(2)由比利时皇家天文台提供的长期太阳观测获得的太阳黑子数据(<http://sidc.oma.be/silso/dayssnplot>);(3)由美国国家海洋和大气管理局提供的 ENSO、AO 和 PDO 数据(<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>)。

1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力计算方法 本文基于章文波等^[18]建立的日雨量模型计算九曲水流域 1982—2019 年的降雨侵蚀力,其运算步骤为:

$$M = \alpha \sum_{i=1}^k (P_i)^\beta \quad (1)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (2)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (3)$$

式中: M 为某半月的降雨侵蚀力((MJ·mm)/(hm²·h·a)); k 为半月时段内的天数; P_i 为半月时段内第 i 天 ≥ 12 mm 的日降雨量,否则以 0 计算; P_{d12} 、 P_{y12} 分别为 ≥ 12 mm 的日平均降雨量和年平均降雨量(mm); α 、 β 为模型待定参数。

1.3.2 小波分析方法 小波分析是一种通过序列“时—频”信息反映不同时间尺度上信号周期变化特征的方法,是研究时间序列多尺度、非平稳信号的有效工具^[19]。本文采用 Morlet 小波变换的主要过程为:

设连续函数为 $f(t)$,则小波变换系数 $W_f(a, b)$ 为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (4)$$

小波方差为:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (5)$$

式中: a 为尺度伸缩因子; b 为时间平移因子; $\overline{\Psi(x)}$ 是 $\Psi(x)$ 的共轭。

1.3.3 交叉小波变换方法 交叉小波变换是由小波变换与交叉谱分析相结合产生分析 2 个时间序列相关性的新型信号分析技术,该方法提供了 2 个序列在时频域中能量共振和协方差分布规律,可从多个时间尺度研究其相互关系。主要手段是提取交叉小波能量谱和凝聚谱,其中能量谱能反映 2 个序列在高能量区的相互关系,而凝聚谱则重点突出 2 个序列在低能量区的相互关系^[20]。假设 2 个序列 X_n 和 Y_n 的连续变换结果分布为 $W_n^x(s)$ 和 $W_n^y(s)$,则交叉小波能量谱定义为:

$$|W_n^{xy}(s)| = W_n^x(s)W_n^{y*}(s) \quad (6)$$

交叉小波凝聚谱定义为:

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1}W_n^{xy}(s))|^2}{S(s^{-1}|W_n^x(s)|^2)S(s^{-1}|W_n^y(s)|^2)} \quad (7)$$

式中: $W_n^{y*}(s)$ 为 $W_n^y(s)$ 的复共轭; S 为平滑算子。

2 结果与分析

本文将 ≥ 12 mm 的日降雨量划分为不同量级,即中雨日(12.0~24.9 mm)、大雨日(25.0~49.9 mm)和暴雨日(≥ 50 mm)。根据日雨量模型计算得到中雨侵蚀力、大雨侵蚀力和暴雨侵蚀力,将三者相加得到年降雨侵蚀力。同时,采用变异系数(C_v)判定降雨侵蚀力变异程度, $C_v < 0.1$ 为弱变异, $0.1 \leq C_v < 1$ 为中等变异, $C_v \geq 1$ 为高度变异^[21]。

2.1 降雨侵蚀力年际变化规律

2.1.1 降雨侵蚀力趋势变化 由图 1a 可知,九曲水流域年降雨量与年降雨侵蚀力的趋势变化特征基本一致,二者的最大值和最小值分别为 2 028 mm、13 748 (MJ·mm)/(hm²·h·a)(2006 年)和 776 mm、2 486 (MJ·mm)/(hm²·h·a)(1991 年),多年平均值分别为 1 560 mm 和 8 667.76(MJ·mm)/(hm²·h·a)。其中,年降雨侵蚀力在 1982—2019 年的 C_v 值为 0.26,属于中等变异,总体呈不显著的增加趋势($p > 0.05$),每年增幅为 29.95(MJ·mm)/(hm²·h·a)。

从图 1b~图 1d 可以看出,各量级降雨及其降雨侵蚀力的最大、最小值均出现在同一年份。中雨、暴雨侵蚀力在 1982—2019 年总体上均呈不显著的增加趋势($p > 0.05$),每年增幅分别为 9.72、27.41(MJ·mm)/(hm²·h·a),多年平均值分别为 2 018、27、3 132.83 (MJ·mm)/(hm²·h·a)。而大雨侵蚀力呈不显著的减少趋势($p > 0.05$),每年减幅为 7.18(MJ·mm)/(hm²·h·a),多年平均值为 3 516.66(MJ·mm)/(hm²·h·a)。中雨、大雨和暴雨侵蚀力的 C_v 值分别为 0.24、0.31、0.64,均属于中等变异。其中,暴雨侵蚀力变异系数最大,说明九曲水流域暴雨侵蚀力的年际变化相对更大。

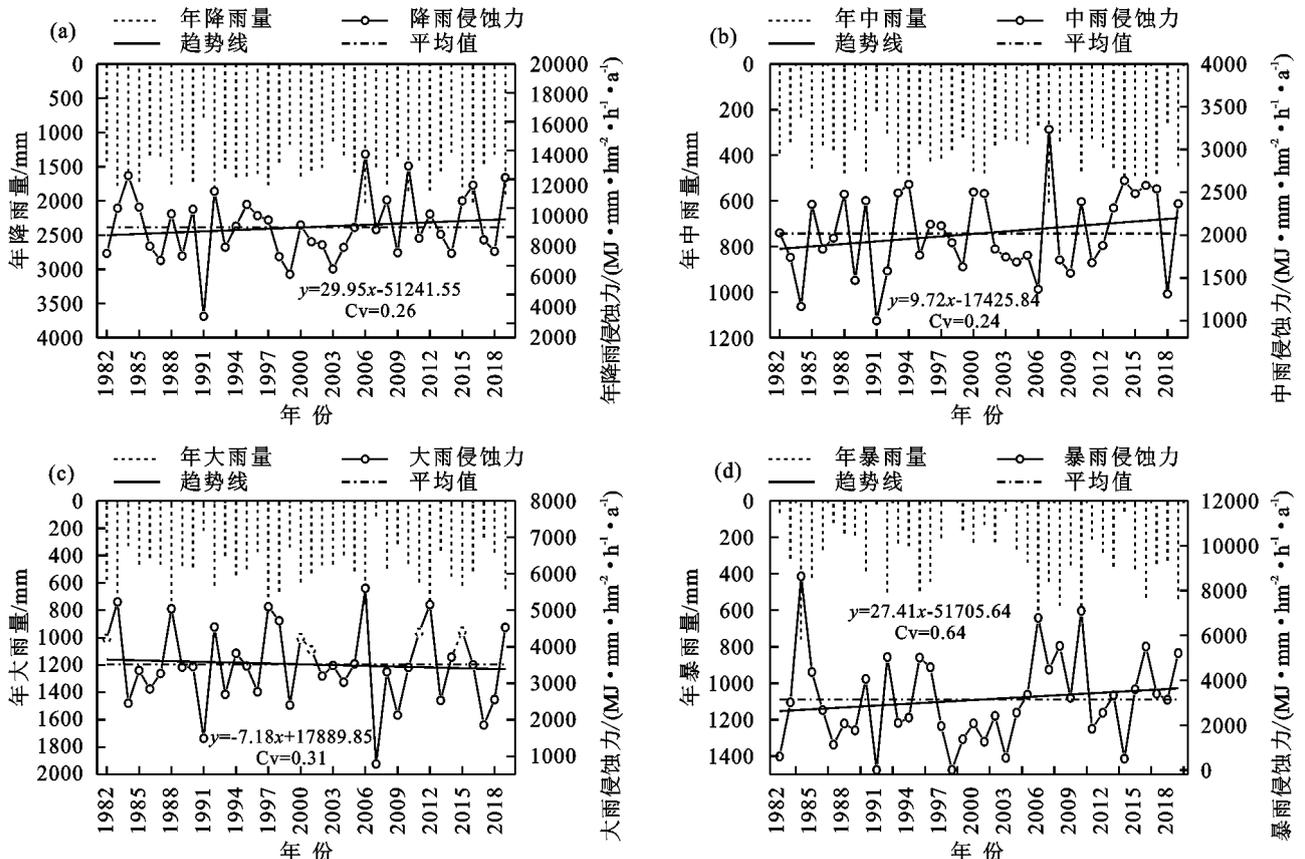


图 1 年降雨侵蚀力及不同量级降雨侵蚀力趋势变化

2.1.2 降雨侵蚀力周期变化 年及不同量级降雨侵

蚀力的周期变化规律见图 2 和图 3。从小波系数实

部等值线图(图 2)可知,年降雨侵蚀力在 15~23 年周期上出现“弱—强”交替准 3 次振荡;中雨侵蚀力在 3~7 年周期上呈“强—弱”交替不明显,而在 8~14 年周期上出现“弱—强”交替准 5 次振荡;大雨侵蚀力在 15~23 年周期上出现“弱—强”交替准 5 次振荡;暴雨侵蚀力在 6~10 年周期上呈“弱—强”交替不明显,而在 15~23 年周期上出现“强—弱”交替的准 3 次振荡。

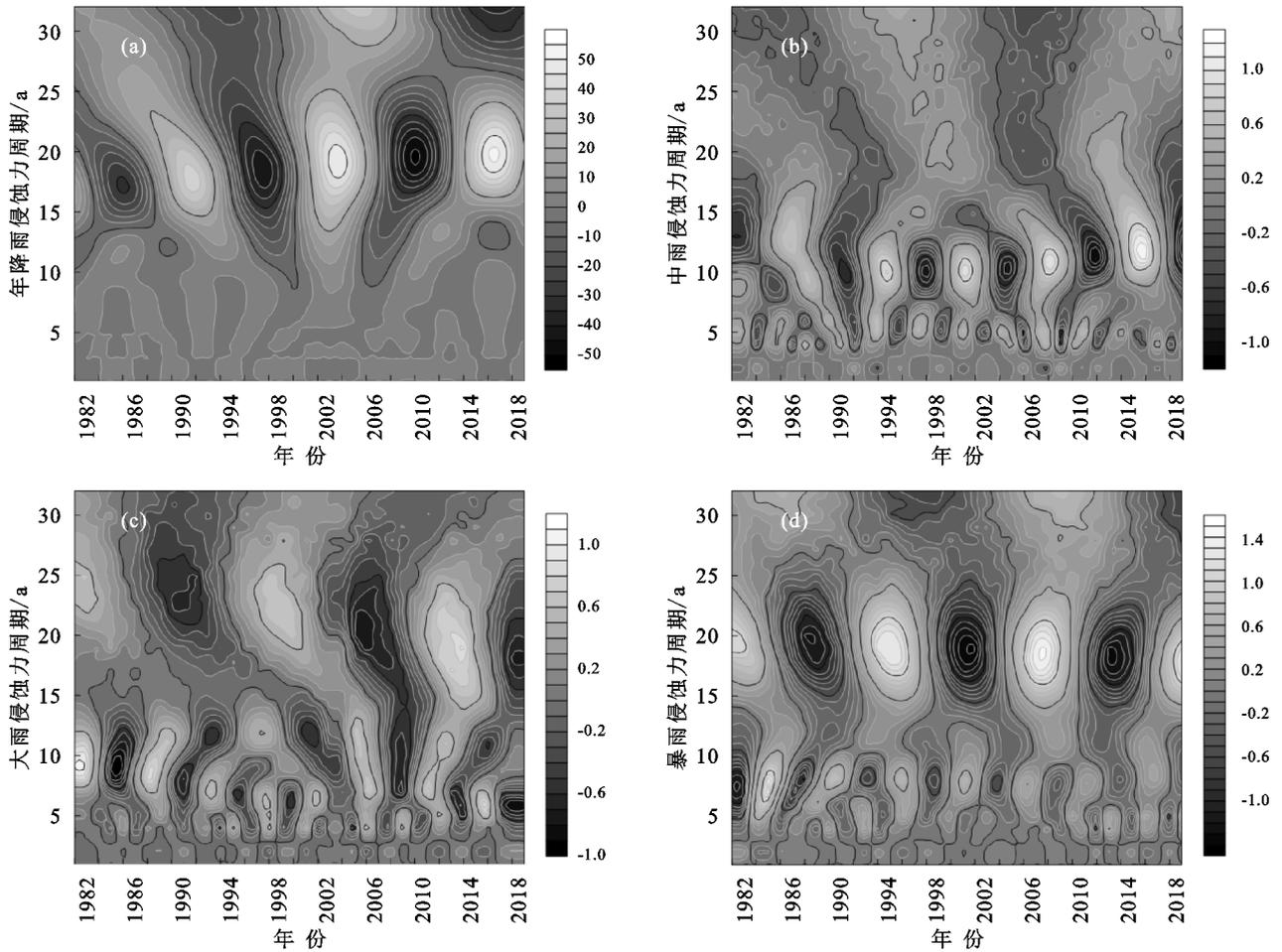


图 2 年降雨侵蚀力及不同量级降雨侵蚀力小波系数实部等值线图

小波方差图(图 3)表明,年降雨侵蚀力的方差峰值出现在 19 年,为其第 1 主周期。同理分析,中雨侵蚀力的第 1,2 主周期为 11,5 年,大雨侵蚀力的第 1,2 主周期为 9,20 年,暴雨侵蚀力的第 1,2 主周期为 19,8 年。可知,年降雨侵蚀力与暴雨侵蚀力均具有 15~23 年周期变化规律,且主周期 19 年相同,这说明二者关系更紧密,前者周期变化很大程度上由后者决定。

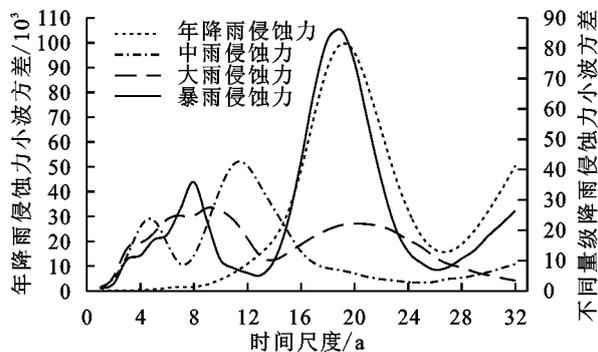


图 3 年降雨侵蚀力及不同量级降雨侵蚀力小波方差

在 6~12,15~25 年周期上分别出现“强—弱”交替准 6 次和准 3 次振荡;暴雨侵蚀力在 6~10 年周期上呈“弱—强”交替不明显,而在 15~23 年周期上出现“强—弱”交替的准 3 次振荡。

2.2 降雨侵蚀力影响因素

降雨侵蚀力与太阳黑子、ENSO、AO、PDO 在时频域中的相互关系见图 4~图 7。图中亮白色和暗黑色分别表示能量密度的峰值和谷值,黑色粗实线闭合区域表示通过 95% 置信水平红噪声标准谱检验;箭头方向表示二者之间的位相关系:→(←)表示降雨侵蚀力与影响因素同位相(反位相),呈正相关(负相关)关系;↑(↓)表示降雨侵蚀力超前(滞后)影响因素变化^[22]。为避免边界效应及小波高频虚假信息,小波影响锥边界(图中“V”形细弧线)以内区域为有效谱值。

2.2.1 太阳黑子对降雨侵蚀力的影响

太阳黑子对年降雨侵蚀力具有显著影响。在小波影响锥区域内:高能量区,太阳黑子与年降雨侵蚀力在 9~11 年(1994—2006 年)显著共振周期上呈负相关(图 4a);低能量区,二者仅在 2~3 年(2012—2015 年)显著共振周期上呈负相关(图 4b)。

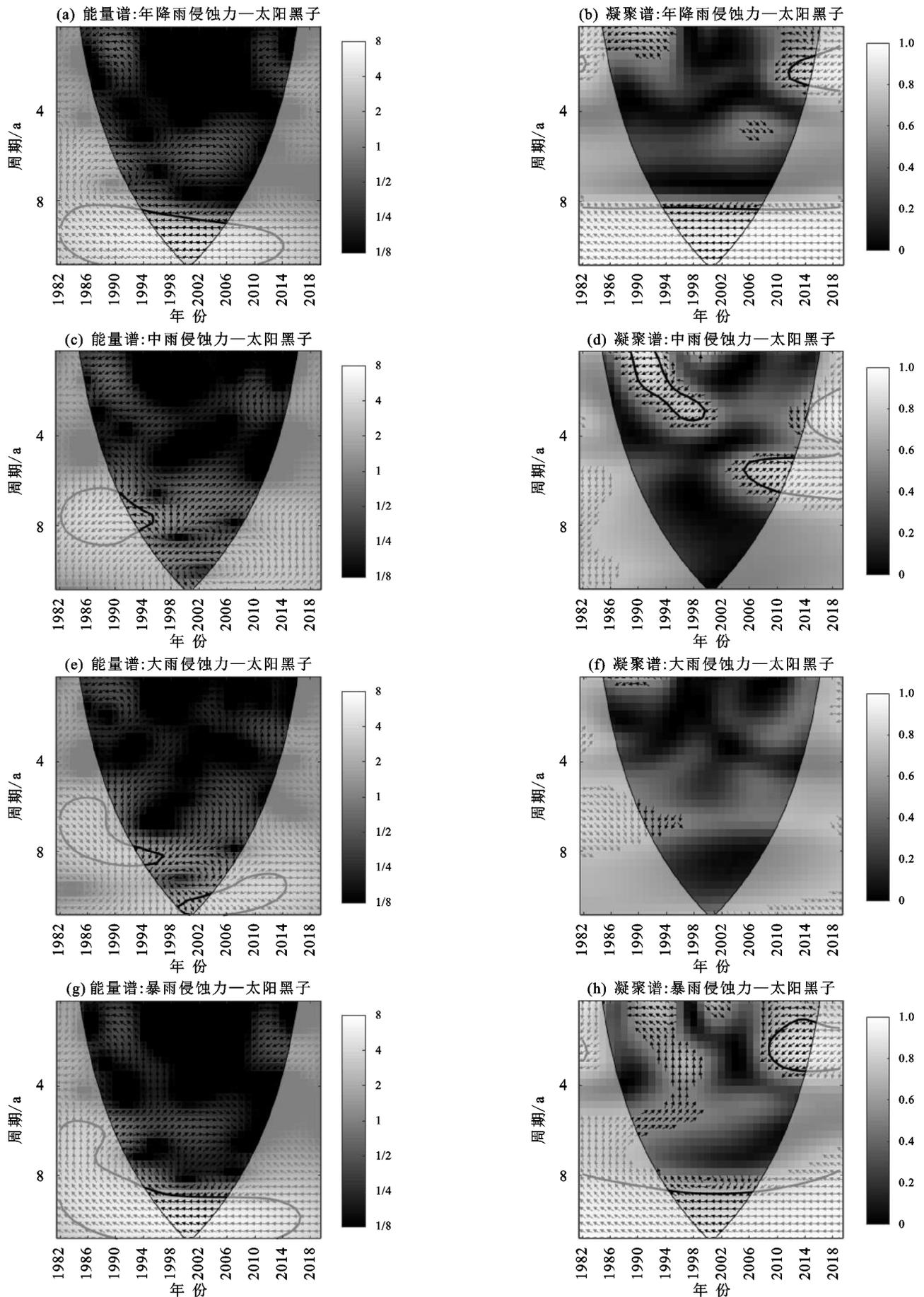


图 4 太阳黑子与年降雨侵蚀力及不同量级降雨侵蚀力的交叉小波能量谱和凝聚谱

太阳黑子对不同量级降雨侵蚀力的影响程度不同。 在小波影响锥区域内:(1)太阳黑子与中雨侵蚀力在高

能量区存在 6~8 年(1991—1995 年)显著共振周期且接近反位相,呈近似负相关(图 4c);低能量区,二者在 1~3 年(1989—1999 年)显著共振周期上接近反位相,呈近似负相关。在 5~7 年(2006—2012 年)显著共振周期上接近同位相,呈近似正相关(图 4d)。(2)太阳黑子与大雨侵蚀力在高能量区存在 8~9 年(1993—1997 年)和 10~11 年(1999—2003 年)显著共振周期且位相接近垂直向下(图 4e),表明此时大雨侵蚀力滞后于太阳黑子变化;低能量区,二者的相互关系不显著(图 4f)。(3)太阳黑子与暴雨侵蚀力在高能量区存在 9~11 年(1994—2006 年)显著共振周期,呈负相关(图 4g);低能量区,二者在 1~4 年(2009—2015 年)共振周期上接近反位相,呈近似负相关(图 4h)。

可知,太阳黑子与年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力均存在 9~11 年(1994—2006 年)显著共振周期且呈负相关;不同量级降雨侵蚀力中,太阳黑子与暴雨侵蚀力在时频域中的相互关系通过 95% 的红噪声标准谱检验范围最大,说明太阳黑子主要通过影响暴雨侵蚀力而对年降雨侵蚀力产生较大影响。

2.2.2 厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)对降雨侵蚀力的影响 由图 5a 和图 5b 可知,在小波影响锥区域内,高能量区,ENSO 与年降雨侵蚀力在 10~11 年(1996—2005 年)显著共振周期上位相垂直向上,表明此时年降雨侵蚀力超前 ENSO 变化;低能量区,二者在 2~5 年(2011—2015 年)显著共振周期上接近同位相,呈近似正相关。

ENSO 对不同量级降雨侵蚀力的影响见图 5c~图 5h。在小波影响锥区域内:(1)ENSO 与中雨侵蚀力在高能量区存在 2~3 年(2008—2010 年)、3~4 年(1994—1998 年)及 6~7 年(1997—2004 年)显著共振周期,位相变化频繁(图 5c),说明二者在时频域中的相互关系不稳定;低能量区,二者在 1~2 年(2004—2008 年)显著共振周期上位相垂直向上(图 5d),表明此时中雨侵蚀力超前 ENSO 变化。(2)ENSO 与大雨侵蚀力在高能量区存在 5~6 年(1988—1993 年)的显著共振周期,位相垂直向上(图 5e),表明大雨侵蚀力超前 ENSO 变化;低能量区,二者在时频域中的相互关系不显著(图 5f)。(3)ENSO 与暴雨侵蚀力在高能量区存在 10~11 年(1996—2005 年)的显著共振周期,位相垂直向上(图 5g),表明暴雨侵蚀力超前 ENSO 变化;低能量区,ENSO 与暴雨侵蚀力在 2~4 年(2009—2015 年)、5~7 年(1991—2000 年)显著共振周期上位相分别垂直向上、接近垂直向下(图 5h),表明此时暴雨侵蚀力分别超前、滞后 ENSO 变化。

由分析可知,年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力与 ENSO 均存在 10~11 年(1996—2005 年)显著共振周期且变化相对超前;与中雨、大雨侵蚀力相比,暴雨侵蚀力与 ENSO 在时频域中的相互关系通过 95% 的

红噪声标准谱检验范围最大,说明暴雨侵蚀力受 ENSO 的影响大于中雨、大雨侵蚀力。

2.2.3 北极涛动(AO)对降雨侵蚀力的影响 AO 对降雨侵蚀力的影响见图 6。在小波影响锥区域内:(1)AO 与年降雨侵蚀力在高能量区存在 1 年(2009—2011 年)和 5 年(2005—2010 年)显著共振周期且位相接近垂直向下,表明此时年降雨侵蚀力滞后 AO 变化,10~11 年(1996—2003 年)显著共振周期上接近反位相,呈近似负相关(图 6a);低能量区二者在 6 年(2008—2011 年)显著共振周期上位相垂直向下(图 6b),表明此时年降雨侵蚀力滞后 AO 变化。(2)AO 与中雨侵蚀力在高能量区、低能量区分别存在 1~4 年(2008—2012 年)、1~3 年(2013—2015 年)显著共振周期且接近反位相,呈近似负相关(图 6c、图 6d)。(3)AO 与大雨侵蚀力在高能量区、低能量区分别存在 5 年(2005—2010 年)、5~8 年(1989—2012 年)显著共振周期且位相垂直向下(图 6e、图 6f),表明此时大雨侵蚀力滞后 AO 变化。(4)AO 与暴雨侵蚀力在高能量区存在 1~3 年(2009—2013 年)和 10~11 年(1996—2003 年)显著共振周期且接近反位相,呈近似负相关(图 6g);低能量区,几乎不存在显著相关区域(图 6h)。

可知,年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力与 AO 均存在 10~11 年(1996—2003 年)显著共振周期且呈近似负相关,年降雨侵蚀力和大雨侵蚀力与 AO 均有 5 年(2005—2010 年)显著共振周期且变化相对滞后。大雨侵蚀力与 AO 在时频域中的相互关系通过 95% 的红噪声标准谱检验范围最大(呈带状分布),说明大雨侵蚀力受 AO 的影响大于中雨、暴雨侵蚀力。

2.2.4 太平洋年代际涛动(PDO)对降雨侵蚀力的影响 PDO 对年降雨侵蚀力的影响见图 7a 和图 7b。在小波影响锥区域内,PDO 与年降雨侵蚀力在高能量区存在 9~10 年(1996—2005 年)显著共振周期且接近同位相,呈近似正相关;低能量区,二者存在 2~3 年(1994—2002 年)显著共振周期且为同位相,呈正相关。

PDO 对不同量级降雨侵蚀力的影响见图 7c~图 7h。在小波影响锥区域内:(1)PDO 与中雨侵蚀力在高能量区存在 2~3 年(2007—2008 年)和 3~5 年(1991—1995 年)显著共振周期且位相接近垂直向上(图 7c),表明此时中雨侵蚀力超前 PDO 变化;低能量区,二者在 1~2 年(2009—2016 年)显著共振周期上位相变化紊乱,二者关系不稳定(图 7d)。(2)PDO 与大雨、暴雨侵蚀力在高能量区分别存在 4~6 年(1988—1997 年和 2010—2013 年)、9~10 年(1996—2005 年)显著共振周期且接近同位相,呈近似正相关(图 7e、图 7g);低能量区,PDO 与大雨侵蚀力存在 4~6 年(1988—1993 年)显著共振周期且接近同位

相, 呈近似正相关(图 7f), 而 PDO 与暴雨侵蚀力的

相互关系不显著(图 7h)。

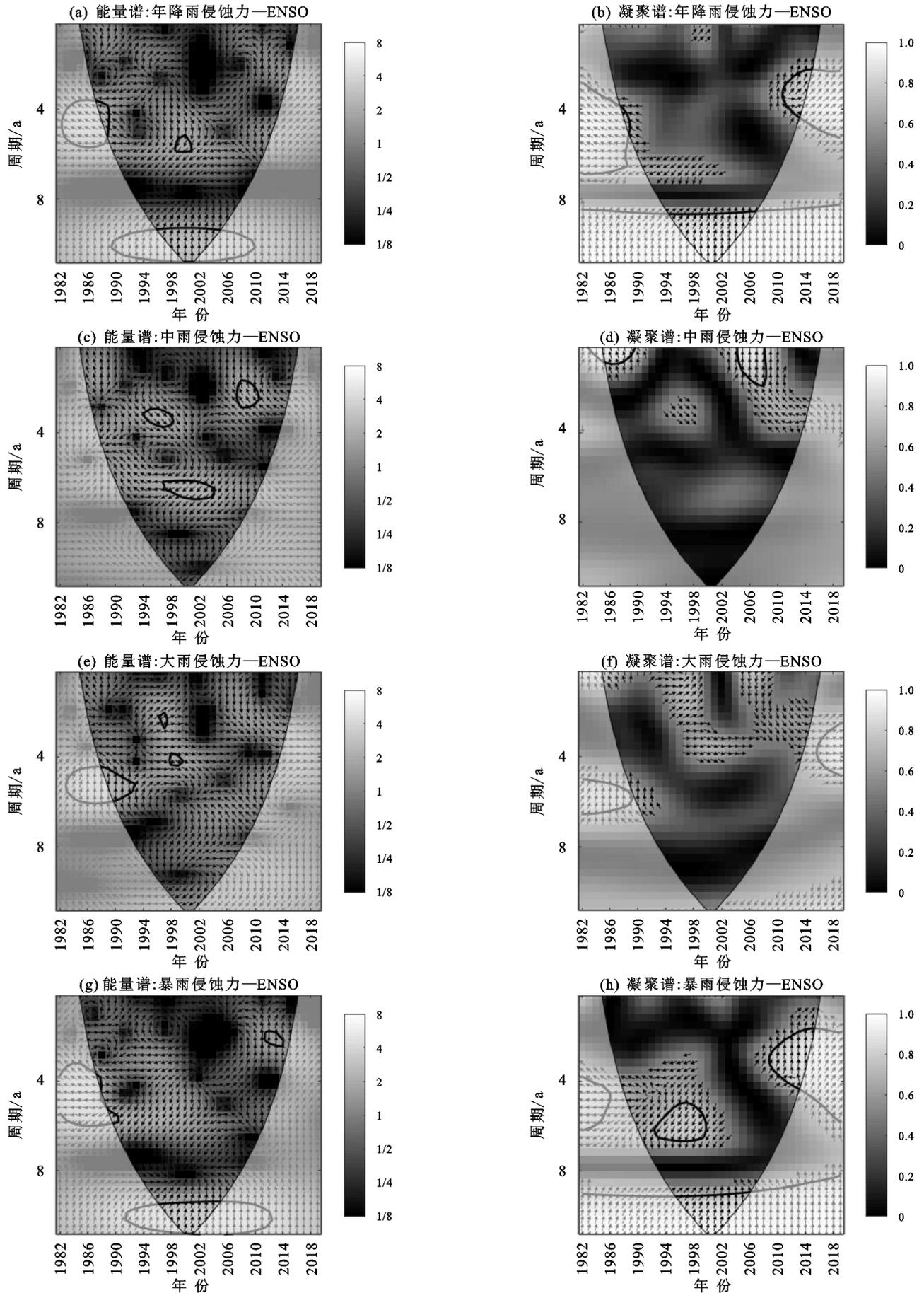


图 5 ENSO 与年降雨侵蚀力及不同量级降雨侵蚀力的交叉小波能量谱和凝聚谱

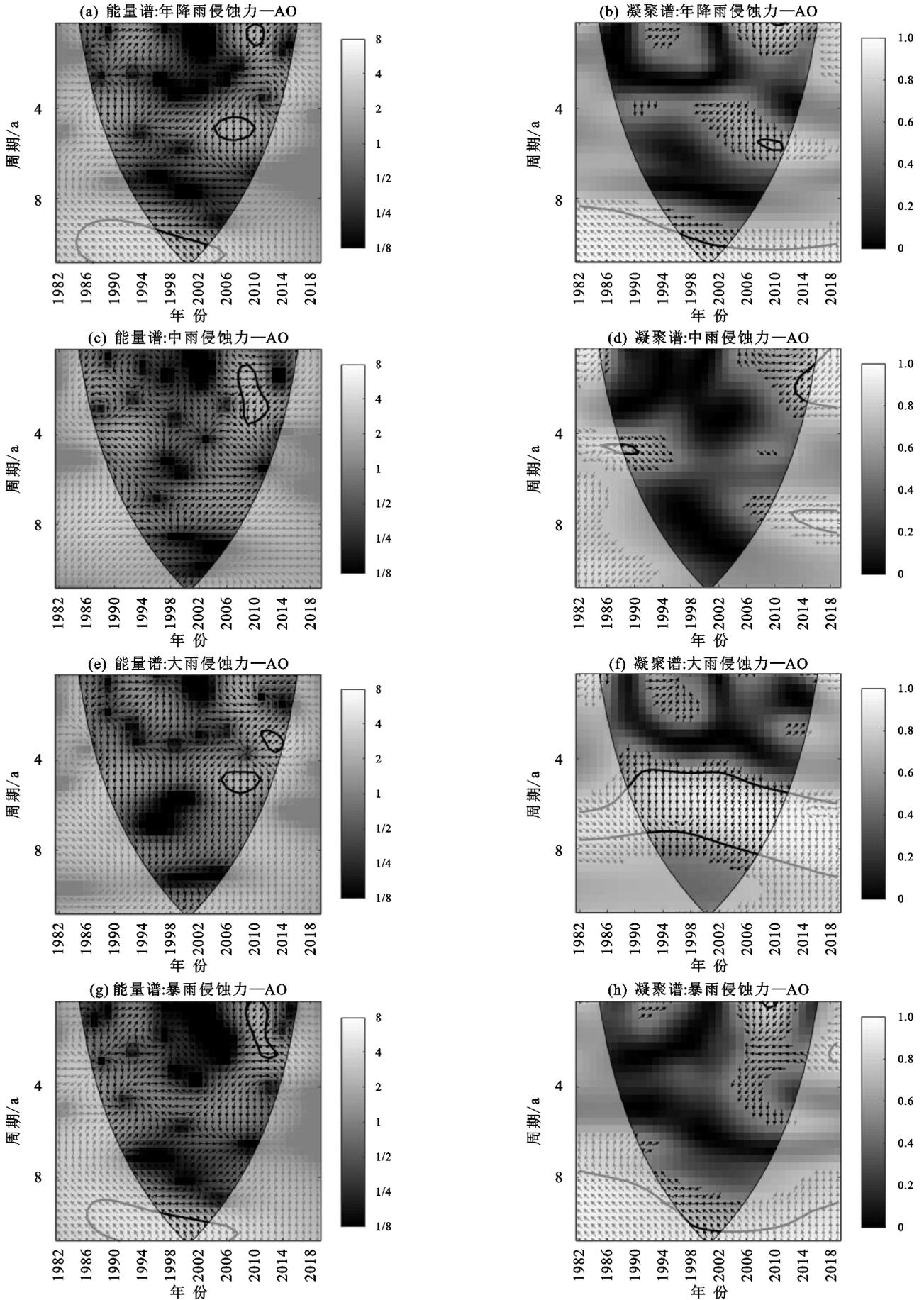


图 6 AO 与年降雨侵蚀力及不同量级降雨侵蚀力的交叉小波能量谱和凝聚谱

可知,年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力与 PDO 均存 在 9~10 年(1996—2005 年)显著共振周期且呈近似

正相关,说明 PDO 主要通过影响暴雨侵蚀力而对年降雨侵蚀力产生影响。

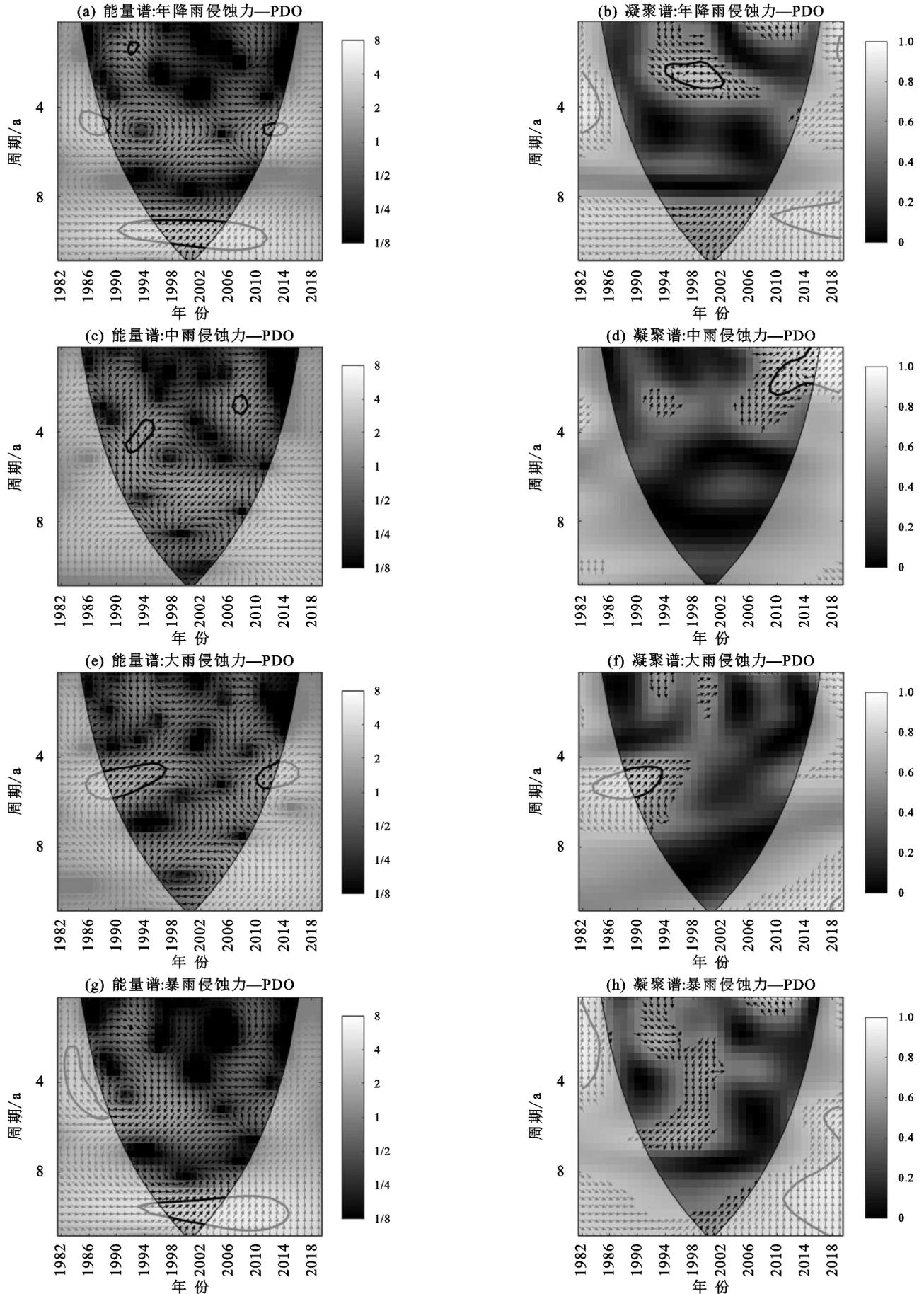


图 7 PDO 与年降雨侵蚀力及不同量级降雨侵蚀力的交叉小波能量谱和凝聚谱

3 讨论

本研究结果显示,赣南九曲水流域年降雨侵蚀力的多年平均值为 $8\ 667.76(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,与 Li 等^[23]在赣江流域 $8\ 756(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 的研究结果比较接近;而与钟科元等^[24]在松花江流域、郑哲等^[25]在怒江流域和陶望雄等^[26]在渭河流域低于 $2\ 000(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 的研究结果存在较大差异,这是因为降雨侵蚀力除受降雨特性的影响外,还是流域土壤、植被和地形等自然因素及人类活动等多种因素综合作用的结果^[27]。此外,九曲水流域各量级降雨侵蚀力变化趋势有增有减,其中暴雨侵蚀力的年际变化相对更大,这与李维杰等^[28]在太行山区、赵平伟等^[29]在云南省的研究结果一致。同时,该流域大雨和暴雨日数占年总降雨日数的 11.8%,年平均大雨和暴雨量占年总降雨量的 51.6%,而其降雨侵蚀力占年总降雨侵蚀力的比例却高达 76.7%。可见,降雨频率低、降雨量和降雨强度大的大雨和暴雨是造成九曲水流域土壤侵蚀的主要驱动力。

交叉小波变换表明,九曲水流域年及不同量级降雨侵蚀力与太阳黑子、ENSO、AO 和 PDO 均存在显著共振周期,说明上述因素对降雨侵蚀力都有一定的影响。但各因素与降雨侵蚀力之间的相互关系不仅是简单的正(负)相关或超前(滞后),而且也是在不同的共振周期上表现为不同的正相关、负相关或超前、滞后。可知,太阳黑子、ENSO、AO 和 PDO 对降雨侵蚀力的影响机制十分复杂。其中,年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力与太阳黑子在时频域上存在 9~11 年的显著共振周期,这与太阳黑子的总体变化周期大致为 11 年^[10]较吻合。太阳黑子通过增强地球表面太阳辐射,导致地表温度和气压梯度发生变化,进而引起大气环流变化,最终影响降雨侵蚀力^[30];年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力与 ENSO 均存在 10~11 年显著共振周期。这是由于 ENSO 影响大气环流,导致全球热带气团活动异常,使强降雨事件的发生频率升高,从而使暴雨场次增加、暴雨侵蚀力控制着年降雨侵蚀力;年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力与 PDO 均存在 9~10 年显著共振周期,这是因为 PDO 通过气候相关作用影响雨带移动和水汽输送,导致极端降雨事件发生^[5,31],使暴雨侵蚀力增强并成为年降雨侵蚀力的主要组成部分;与太阳黑子、ENSO 及 PDO 比较,AO 对暴雨侵蚀力影响相对较弱,这可能是由于 AO 通过改变大气动量及热量交换,主要影响中高纬度间大气环流,导致中高纬度地区极端降雨事件发生^[30],而九

曲水流域处于低纬度地区。同时,年降雨侵蚀力与 AO 在 5 年显著共振周期上滞后 AO 变化,这是因为冬春季 AO 造成的地面下边界条件异常通过较长时间的记忆而对数月之后的降雨产生异常^[32]。

4 结论

(1)九曲水流域年降雨侵蚀力的多年平均值为 $8\ 667.76(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。年际变化上,年降雨侵蚀力、中雨侵蚀力、暴雨侵蚀力呈增加趋势,而大雨侵蚀力呈下降趋势;中雨、大雨和暴雨侵蚀力及年降雨侵蚀力的 C_v 值分别为 0.24,0.31,0.64,0.26,均属于中等变异,其中暴雨侵蚀力的年际变化相对更大。

(2)年降雨侵蚀力存在 15~23 年周期变化,主周期为 19 年;中雨侵蚀力存在 3~7,8~14 年的周期变化,相应的主周期为 5,11 年;大雨侵蚀力存在 6~12,15~25 年的周期变化,相应的主周期为 9,20 年;暴雨侵蚀力存在 6~10,15~23 年的周期变化,相应的主周期为 8,19 年。

年降雨侵蚀力与暴雨侵蚀力均存在 15~23 年的周期变化和 19 年主周期,说明其周期变化联系更紧密。

(3)太阳黑子与年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力均存在 9~11 年(1994—2006 年)显著共振周期且呈负相关;年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力与 ENSO 均存在 10~11 年(1996—2005 年)显著共振周期且变化相对超前,暴雨侵蚀力受 ENSO 的影响大于中雨、大雨侵蚀力;年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力与 AO 均存在 10~11 年(1996—2003 年)显著共振周期且呈近似负相关,年降雨侵蚀力和大雨侵蚀力与 AO 均有 5 年(2005—2010 年)显著共振周期且变化相对滞后。大雨侵蚀力受 AO 的影响大于中雨、暴雨侵蚀力;年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力与 PDO 均存在 9~10 年(1996—2005 年)显著共振周期且呈近似正相关。

研究成果不仅可为降雨侵蚀力的时空变化及其归因分析提供参考,还可为赣南乃至我国土壤侵蚀预测预报与防治提供科学依据。但本文仅探讨了太阳黑子、ENSO、AO 及 PDO 分别对降雨侵蚀力的影响,上述因素对降雨侵蚀力的影响机制以及它们的耦合作用对降雨侵蚀力的影响尚需进一步深入探究。

参考文献:

- [1] 操玥,王世杰,白晓永,等.近百年中国西南降雨侵蚀力反演计算与时空格局演变[J].生态学报,2018,38(24): 8766-8773.
- [2] Okit K. Global hydrological cycles and world water resources[J].Science,2006,313(5790):1068-1072.
- [3] 夏军,石卫,雒新萍,等.气候变化下水资源脆弱性的适

- 应性管理新认识[J].水科学进展,2015,26(2):279-286.
- [4] Fu C, James A L, Wachachowiak M P. Analyzing the combined influence of solar activity and El Niño on river discharge across southern Canada[J]. Water Resource Research,2012,48(5):5507-5525.
- [5] 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.
- [6] Alexander M A, Blad I, Newman M, et al. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans[J]. Journal of Climate,2002,15(16):2205-2231.
- [7] Thompson D, Wallace J M. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields[J]. Geophysical Research Letters,1998,25(9):1297-1300.
- [8] 马柱国,邵丽娟.中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系[J].大气科学,2006,30(3):464-474.
- [9] 李慧芳.太阳黑子活动与我国不同区域气候变化相关关系研究[D].西安:陕西师范大学,2016.
- [10] 马岚,黄生志,黄强,等.渭河流域降雨与降雨侵蚀力变化的原因分析[J].水土保持学报,2018,32(1):174-181,189.
- [11] 方国华,丁紫玉,闻昕,等.厄尔尼诺事件及其对我国夏季降水量时空分布的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(6):481-488.
- [12] Chen S F, Zha X. Effects of the ENSO on rainfall erosivity in the Fujian Province of Southeast China[J]. Science of the Total Environment,2018,621:1378-1388.
- [13] 陈世发,查轩.福建省1956—2013年降雨侵蚀力与厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)的关系[J].水土保持学报,2017,31(4):38-43.
- [14] 郭渠,孙卫国,程炳岩,等.我国西北地区气候变化与北极涛动的交叉小波分析[J].南京气象学院学报,2008,31(6):811-818.
- [15] 韩进军,王建萍,陈亮,等.影响柴达木盆地降水量变化的主要天气动力因素[J].干旱区研究,2020,37(2):314-324.
- [16] 徐泽华,韩美,路广,等.山东省降雨侵蚀力与气候指数关系研究[J].生态与农村环境学报,2018,34(10):880-889.
- [17] Liu S Y, Huang S Z, Xie Y Y, et al. Spatial-temporal changes of rainfall erosivity in the loess plateau, China: Changing patterns, causes and implications[J]. Catena,2018,166:279-289.
- [18] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
- [19] Hua Y, Hong S. The improvement of the Morlet wavelet for multi-period analysis of climate data[J]. Comptes Rendus Geoscience,2012,344(10):483-497.
- [20] Labat D. Cross wavelet analyses of annual continental freshwater discharge and selected climate indices[J]. Journal of Hydrology,2010,385(1/4):269-278.
- [21] 吴昌广,林德生,肖文发,等.三峡库区降雨侵蚀力时空分布特征[J].应用生态学报,2011,22(1):151-158.
- [22] Xu Y Y, Sun H, Ji X. Spatial-temporal evolution and driving forces of rainfall erosivity in a climatic transitional zone: A case in Huaihe River Basin, eastern China[J]. Catena,2021,198:e104993.
- [23] Li X H, Ye X C. Variability of rainfall erosivity and erosivity density in the Ganjiang River catchment, China: Characteristics and influences of climate change[J]. Atmosphere,2018,9(2):48-65.
- [24] 钟科元,郑粉莉.1960—2014年松花江流域降雨侵蚀力时空变化研究[J].自然资源学报,2017,32(2):278-291.
- [25] 郑哲,邹进,潘锋,等.1961—2010年怒江流域降雨侵蚀力的时空变化特征[J].中国水土保持科学,2018,16(5):16-22.
- [26] 陶望雄,马亚鑫,张杰,等.渭河流域降雨侵蚀力时空分布特征[J].水土保持通报,2016,36(6):110-114,120.
- [27] 孙从建,王佳瑞,郑振婧,等.黄土高原塬面保护区降雨侵蚀力时空分布特征及其影响因素研究[J].干旱区地理,2020,43(3):568-576.
- [28] 李维杰,王建力.太行山脉不同量级降雨侵蚀力时空变化特征[J].自然资源学报,2019,34(4):785-801.
- [29] 赵平伟,郭萍,李成武,等.云南不同量级降雨下的降雨侵蚀力特征分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(12):2135-2141.
- [30] 李沛,黄生志,黄强,等.大通河流域降水结构的演变特征及其驱动力探究[J].自然资源学报,2018,33(9):1588-1598.
- [31] 丁倩倩,刘友存,焦克勤,等.赣江上游典型流域水沙过程对全球气候变化的响应[J].长江流域资源与环境,2020,29(1):174-186.
- [32] 龚道溢,朱锦红,王绍武.长江流域夏季降水与前期北极涛动的显著相关[J].科学通报,2002,47(7):546-549.