

1960—2017 年黄河流域极端气温的季节变化特征及其与 ENSO 的相关性分析

张克新^{1,4}, 董小刚², 廖空太³, 蒋志成³, 曹立国⁵

(1. 贵州财经大学 管理科学与工程学院, 贵阳 550025; 2. 西北师范大学 地理与环境科学学院,

兰州 730070; 3. 甘肃祁连山国家级自然保护区管理局, 甘肃 张掖 734000;

4. 扬州红硕环境与生物工程研究有限公司, 江苏 扬州 225127; 5. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119)

摘 要:为了研究黄河流域多变的气候变化特征, 基于黄河流域 66 个气象站点 1960—2017 年逐日平均气温资料, 应用线性趋势、Mann-Kendall 法对该区域极端气温的季节变化特征进行了分析。结果表明: 黄河流域极端高温天气的日数在各个季节均呈现出显著增多的趋势, 而极端低温天气的日数在四季却呈现出显著减少的趋势。在整个研究时段内, 黄河流域极端气温的季节变化(极端高温天气日数增多和极端低温天气日数减少)较为显著, 且升温趋势主要发生在 1991—2017 年。从空间尺度来看, 春、夏和秋季黄河流域极端高温天气日数在大多数地区呈现出增加趋势, 仅有个别站点呈现出减少趋势; 而冬季极端高温天气日数在整个研究区均呈现出增加趋势, 最显著的区域集中在黄河中游大部分地区。而各季节极端低温天气在大多数站点呈现出减少趋势, 仅有少数站点呈现增加趋势。总之, 在整个研究时段内, 黄河流域平均气温的升温趋势(极端高温天气增多和极端低温天气减少)较为显著, 且升温趋势主要发生在 1991—2017 年。黄河流域极端高温天气日数在春、夏、秋和冬季发生突变的时间点分别为 2000 年、2001 年、1994 年、1995 年, 极端低温天气在春、夏、秋、冬季发生突变的时间点分别为 2006 年、2015 年、1988 年、1990 年; 除夏季外, 其他季节极端高温天气与极端低温天气的突变的时间点较为接近, 秋、冬季极端气温天气对全球气候变暖的响应均比春、夏季要早。此外, 交叉小波分析表明黄河流域极端高温与低温和厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)指数存在多尺度的显著相关性。

关键词:极端气候; 季节变化; 突变; ENSO; 黄河流域

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)02-0185-08

Characteristics of Seasonal Changes in Extreme Temperature and Their Relativity with ENSO in the Yellow River Basin from 1960 to 2017

ZHANG Kexin^{1,4}, DONG Xiaogang², LIAO Kongtai³, JIANG Zhicheng³, CAO Ligu⁵

(1. School of Management Science and Engineering, Guizhou University of Finance and Economics,

Guiyang 550025, China; 2. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University,

Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Qilian Mountains National Nature Reserve Authority, Zhangye,

Gansu 734000, China; 4. Yangzhou Hongshuo Environmental and Biological Engineering Research Co., Ltd., Yangzhou,

Jiangsu 225157, China; 5. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: To have a better view of climate changes and trends, the primary objectives are to investigate the characteristics of seasonal changes in extreme temperature in Yellow River basin. Based on the daily mean temperature data of 66 meteorological stations in the Yellow River Basin during the period 1960—2017 and using the methods of climate tendency rate, Mann-Kendall and cross-wavelet and wavelet coherence techniques, the characteristics of seasonal changes in extreme temperatures and the relationship between the extreme temperature and the ENSO were analyzed. The results indicate that extreme high temperature days in each season presented the significantly rising trend, especially increased with larger scales after the middle

收稿日期: 2019-07-15

修回日期: 2019-09-20

资助项目: 江苏省自然科学基金(BK20171292); 中国博士后科学基金(2017M611922, 2018T110559); 江苏省博士后基金(1701186B)

第一作者: 张克新(1980—), 男, 甘肃民勤人, 博士, 研究方向为区域气候变化研究与人工放射性核素示踪应用。E-mail: xbsdzxx2008@163.com

通信作者: 董小刚(1982—), 男, 甘肃庆阳人, 实验师, 主要从事环境生态学研究。E-mail: dongxg121@163.com

of the 1990s, but those was contrary to extreme low temperature days, which decreased with larger scales after the middle of 1990s in spring and summer; the mutation of extreme high temperature days in spring, summer, autumn, and winter increased in 2000, 2001, 1994 and 1995, respectively, but those of extreme low temperature days decreased in 2006, 2015, 1988 and 1990, respectively; The response of extreme temperature days to global warming was earlier in autumn and winter than that in spring and summer, which indicated that the significant change of extreme temperature days took place in winter firstly; The response of extreme temperature days to global warming was earlier in autumn and winter than those in spring and summer; the change of extreme temperature days will exert some effect on the Yellow River Basin. Furthermore, the continuous wavelets transform analysis presented significant periodic variations with periods of 2~4 years, 4~6 years in the extreme temperature. The increase of extreme high temperature days will add the pressure of preventing fire of forest and grasslands in the upper reaches of the Yellow River Basin. The decrease of extreme low temperature days will reduce the occurrence frequency of freeze damage, but it will be a potential threat to protection of ecology environment and agriculture production.

Keywords: extreme temperature; seasonal characteristics; mutation; ENSO; Yellow River Basin

近年来,由于全球气候变暖,对极端气候事件(如热浪、干旱、龙卷风和洪水)的研究一直是众多学者关注的热点。研究发现:在 1880—2015 年发生的 16 个最热年份中,有 15 个最热年份发生在 2001 年之后^[1]。这意味着,自 2001 年以来的 15 a 里,每一年都比 1910—2000 年的长期平均气温升高了至少 0.54℃。也有研究表明:中国近 100 多年来平均地表温度升高了约 0.5~0.8℃^[2];根据 IPCC^[3]的调查结果,在世界大部分地区,温度的升高不仅直接影响温度极端值的变化,而且可能会导致高温干旱和暴雨洪涝等极端气候事件的发生强度、频率、持续时间和范围等都有增加的趋势。对极端气温的已有研究均表明^[4-6]:最高气温和最低气温都呈现出上升趋势,但最高气温的上升趋势要明显小于最低气温的上升趋势;极端高温指数呈增加趋势,极端低温指数呈减小趋势。Cohen 等^[7]对北半球热带外大陆的季节温度变化进行分析,发现春、夏、秋季的温度一直呈增暖趋势,而冬季温度在近十几年内呈变冷趋势。中国极端高温和极端低温变化的区域差异性显著,且呈现出明显的不对称,极端低温的增温幅度明显要高于极端高温的增温幅度;且极端最低温度在冬、秋季增温趋势显著,极端最高温度在秋季降温趋势明显^[8-11]。Li 等^[12]研究表明:我国大部分地区在 1998—2012 年夏季平均最高气温指数增暖幅度最大,而冬季平均最低气温指数略有变冷的趋势。虽然研究的区域范围有所不同,但对全球气候变暖的响应几乎是一致的。

黄河是我国第二大河,全长 5 464 km,流域面积约 7.5×10^6 km²,区域跨度大,气候类型复杂多样,区域差异较为明显,西部干旱,东部湿润,大致可分为干旱、半干旱和半湿润气候。随着全球气候变暖,黄河

流域极端气候事件频发,气象灾害带来的损失也愈加严重,对该区域农、林、牧业和整个生态系统等敏感领域都存在直接或间接的影响。目前,对黄河流域气温方面的研究主要侧重于平均状态及年时间序列,分析资料截止年份也相对较早^[13-18],而针对极端气温季节变化的研究尚不多见。极端气温天气在任何季节都会发生,且冬季气温是影响黄河流域凌汛和开、封河的一个重要因子^[17],所以研究极端气温的季节变化将有助于了解黄河流域复杂、多变的气候特征,并对黄河流域民众的生产生活提供科学指导。因此,本文用最新的气象资料和统一的极端气温指数,对黄河流域极端气温事件变化特征及其与大尺度环流因子的相互关系进行全面深入分析,力求为当地民众应对极端气候事件变化和防灾减灾提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文选取黄河流域 1960—2017 年内有完整记录的 66 个气象站点(图 1)的逐日平均气温资料,所有数据序列经过质量控制与均一化处理;资料来源于国家气象信息中心(<http://www.nmic.gov.cn/>)。厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)指数采用多元 ENSO 指数^[19](即 MEI),数据来自 <http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/>。

1.2 研究方法

本文极端气温的统计方法是,将某一站点 1960—2017 年日平均气温数据按升序排列,将第 90 个和第 10 个百分位值作为极端气温的阈值;当某日的气温高于第 90 个百分位值时,则认为该日出现了极端高温事件;当某日的气温低于第 10 个百分位值时,则认为该日出

现了极端低温事件。采用 Sen 斜率计算极端气温指数的变化趋势,并使用 Mann-Kendall(M-K)方法进行变化趋势的显著性检验(本文显著性检验均通过 $\alpha=0.01$ 的显著性)和突变检测;并根据 Sen 计算极端气温指数的变化趋势,利用软件 ArcGIS 10.2 生成黄河流域各极端气温指数倾向率空间分布图,来分析要素的空间分布规律;最后,采用交叉小波对极端气候天气与 ENSO 指数做相关分析。交叉小波是将小波变换和交叉谱分析两种方法结合产生的一种新型信号分析技术^[20-21],可以从多时间尺度来研究两个时间序列在时频域中的相互关系;且该方法可以揭示两序列在不同时段尺度上的相关性和一致性,并能再现时频空间中的相位关系。其中本文黄河流域极端气温指数用 66 个站点的算术平均值表示,季节划分为:春季为 3—5 月、夏季为 6—8 月、秋季为 9—11 月和冬季 12 月—次年 2 月。

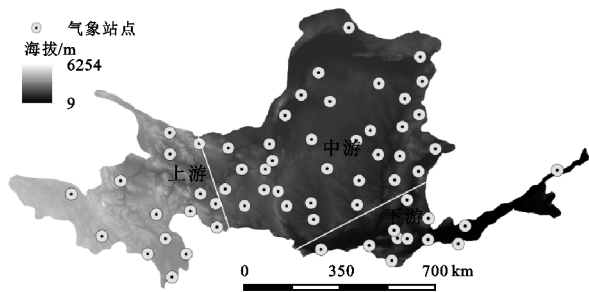


图1 黄河流域气象站点分布

2 结果与分析

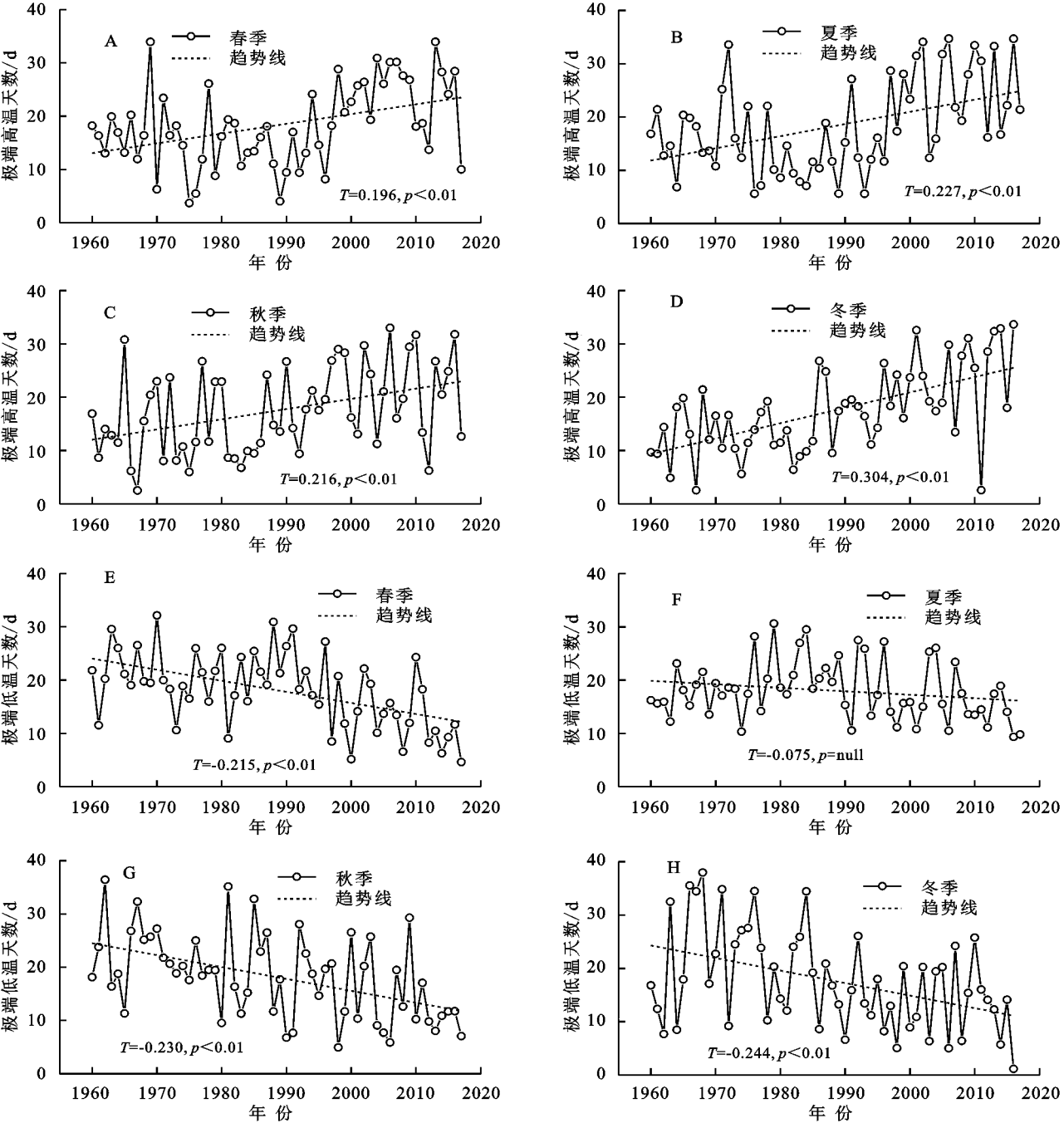
2.1 极端气温的季节年际变化

在 1960—2017 年,黄河流域春、夏、秋、冬季的极端高温天气日数均呈增加趋势(图 2A—D),其年际变化率分别为 0.196, 0.227, 0.216, 0.304 d/a,均通过 0.01 的置信度检验,这表明在整个研究时段内黄河流域各季节极端高温天气日数的增加趋势非常显著;这其中冬季增幅最大,春季最小。相对于极端高温,黄河流域在 1960—2017 年间春、夏、秋、冬季的极端低温天气日数均呈减少趋势(图 2E—H),其年际变化率分别为 -0.215 , -0.075 , -0.230 , -0.244 d/a;除夏季极端低温天气日数减少趋势不显著外,春、秋和冬季的极端低温天气日数减少趋势显著(均通过 0.01 的置信度检验);其中冬季极端低温天气日数减幅最大,夏季最小。为了更加深入地分析黄河流域极端气温季节变化的年际变化趋势,我们将 1960—2017 年时间段划分成 1960—1990 年、1991—2017 年时段(图 3),对各时段极端高温和低温的季节年际变化趋势进行分析。从图 3 可以看出,在 1960—1990

年时段内,黄河流域春、夏季极端低温天气日数呈现微弱的增加趋势,而秋、冬季的极端低温天气日数却呈现减少趋势;而极端高温天气日数的变化呈现出与极端低温相反的趋势,即春、夏季极端高温天气日数呈现微弱的减少趋势,而秋、冬季却呈现增加的趋势。与 1960—1990 年时段不同的是,在 1991—2017 年时段内黄河流域春、夏、秋、冬季的极端低温天气日数均呈减少趋势,且减少趋势较为显著;而极端高温天气日数在四季内均呈现出显著增加趋势。经过上述分析可以得出:在整个研究时段内,黄河流域平均气温的升温趋势(极端高温天气增多和极端低温天气减少)较为显著,且升温趋势主要发生在 1991—2017 年。

2.2 极端气温的季节空间变化

从空间尺度来看,春季极端高温天气日数有 97% 的站点处于增加趋势(图 4A),其中有 56% 的站点通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,黄河中下游地区增加趋势较为明显,有两个站点的变化趋势呈现出减少趋势,但未通过显著性检验;夏季极端高温天气日数有 86% 的站点处于增加趋势(图 4B),其中 39% 的通过了显著性检验,增加显著的区域主要集中在黄河上、中游,下游部分地区却呈现出减少趋势;秋季极端高温天气日数有 98% 的站点处于增加趋势(图 4C),其中 44% 的站点通过显著性检验,主要集中在黄河上、中游部分地区,而仅有一个站点(黄河上游的河南蒙古自治县)呈现出减少趋势。这主要是因为黄河流域上游的河南蒙古自治县为高原大陆性气候,海拔较高,地势复杂,使得该区域的近 57 a 来的春、秋季极端高温天气日数的变化趋势呈现出减少趋势。而冬季极端高温天气日数在整个区域均呈现出增加趋势(图 4D),且有 85% 的站点通过了显著性检验,最显著的区域集中在黄河流域中游大部分地区。对于极端低温天气而言,春季极端低温天气日数有 98% 的站点处于减少趋势(图 4E),但仅有约 58% 的站点呈现出显著减少趋势;夏季极端低温天气日数虽然有 80% 的站点呈现出减少趋势(图 4F),但仅有 12% 的站点呈现出显著减少的趋势,这些站点主要零星分布在黄河中上游地区;而 20% 站点的夏季极端低温却呈现出增加趋势,但均未通过显著性检验。秋、冬季极端低温天气日数的变化趋势基本相似(图 4G—H),除了仅有一个站点(河南蒙古自治县)呈现出增加趋势外,其余站点均呈现出减少趋势;不过秋季有 61% 的站点通过了显著性检验,而冬季只有 38% 左右。总之,整个黄河流域春、夏、秋、冬季极端高温天气发生的频率在增加,极端低温天气发生的频率在减小。



注: T 为趋势系数, p 为显著性。

图 2 黄河流域 1960—2017 年春、夏、秋、冬季极端高温天气和极端低温天气的天数年际变化趋势

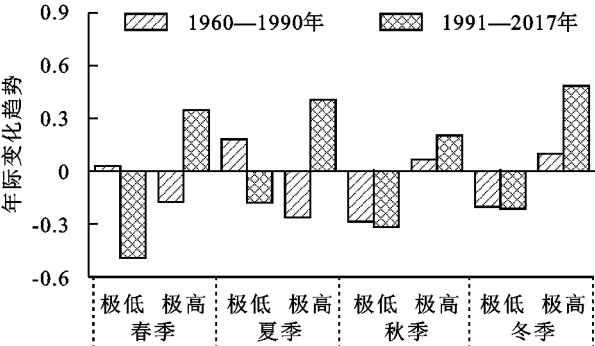


图 3 黄河流域 1960—1990 年、1991—2017 年春、夏、秋、冬季极端高温天气和极端低温天气的年际变化趋势

2.3 极端气温的突变分析

在 $0.05(U_{0.05} = \pm 1.96)$ 的置信度水平下,黄河流域极端气温在各个季节都发生了突变(图 5),但各个季节发生突变的时间点各不相同。极端高温天气在春、夏、秋和冬季发生突变的时间点分别为 2000 年、2001 年、1994 年和 1995 年(图 5A—D);突变前分别为 15.7,15.7,14.6,13.8 d,突变后分别为 24.6,25.4,21.9,23.6 d;突变后比突变前分别增加了 8.9,9.7,7.3,9.8 d。极端低温天气在春、夏、秋和冬季发生突变的时间点分别为 2006 年、2015 年、1988 年、1990 年(图

5E—H);春、秋和冬季突变前分别为 19.7,21.5,21.0 d,突变后分别为 11.4,14.7,13.8 d;突变后比突变前分别减少了 8.3,6.8,7.2 d。夏季极端低温天气因发生突变的时间点较晚,为 2015 年(图 5F),在本研究时间序列尾端,故不予讨论。由于各季节极端天气发生突变的时间点不一致,春、夏季极端天气发生突变的时间较晚,均在 21 世纪初增加或减少;而秋、冬季均在 20

世纪 80,90 年代中后期增加或减少。此外,秋、冬季极端高温天气在 1994 年和 1995 年突变增多,极端低温天气在 1988 年和 1990 年突变减少,秋、冬季极端低温天气突变的时间比极端高温天气突变早 6 a,5 a 左右。由此可见,秋、冬季极端气温天气的变化是从极端低温天气的变化开始的,且秋、冬季极端气温天气对全球气候变暖的响应比春、夏季早。

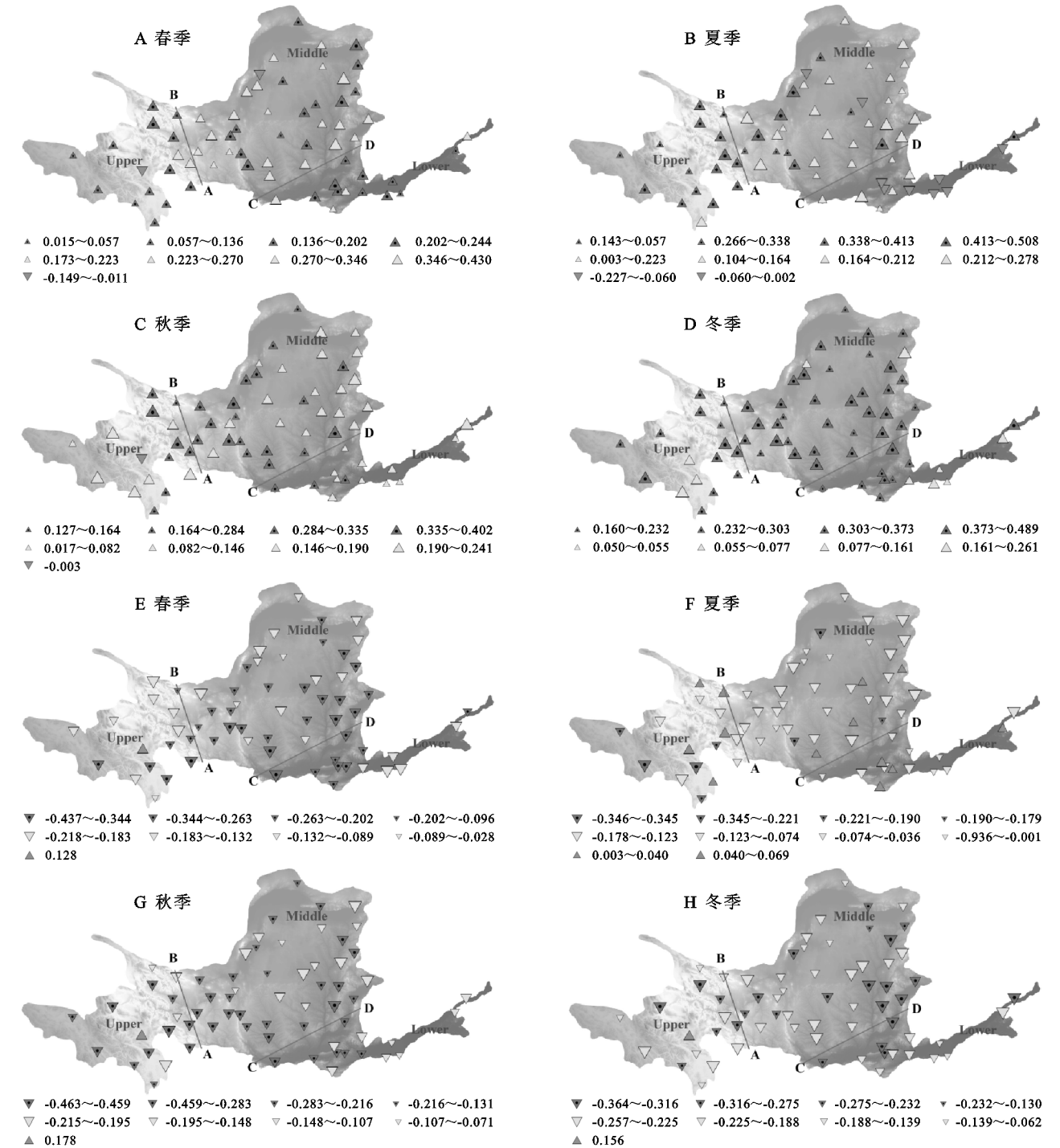


图 4 黄河流域春、夏、秋、冬季极端高温天气和极端低温天气的空间变化趋势(d/a)

2.4 极端气温与 ENSO 的关系

本文采用交叉小波探讨极端气候天气与 ENSO

之间的多时间尺度相关关系。由图 6A 可以看出,黄河流域春季极端高温天气与 ENSO 指数在 1964—

1973 年表现出 1~3 a 共振周期,在此频率上有共振关系;而夏季极端高温天气与 ENSO 指数在 1975—1980 年、1988—1992 年、2005—2010 年存在 2~4, 4~6 a 的共振周期(图 6B),它们在此频率上有共振关系;秋季极端高温天气与 ENSO 指数的共振关系和夏季相似,都存在多时间跨度的共振周期,它们分别在 1965—1972 年、1976—1990 年、2006—2012 年存在 2~6, 7~9 a 的共振周期(图 6C);冬季极端高温天气与 ENSO 在 1962—1968 年、2008—2014 年存在 2~4 a 的共振周期(图 6D)。黄河流域春季极端

低温天气与 ENSO 指数在 1962—1968 年、1988—1994 年、2004—2010 年表现出 2~4, 4~6 a 的共振周期(图 6E),在此频率上有共振关系;而夏季极端低温天气与 ENSO 指数在 1968—1970 年、1996—2000 年、2005—2010 年存在 2~4, 4~6 a 的共振周期(图 6F),它们在此频率上有共振关系;秋季极端低温天气与 ENSO 指数在 1984—1992 年、2008—2012 年存在 6~8, 1~3 a 的共振周期(图 6G);冬季极端高温天气与 ENSO 在 1978—1986 年、1988—1992 年、2008—2012 年存在 6~8, 2~3 a 的共振周期(图 6H)。

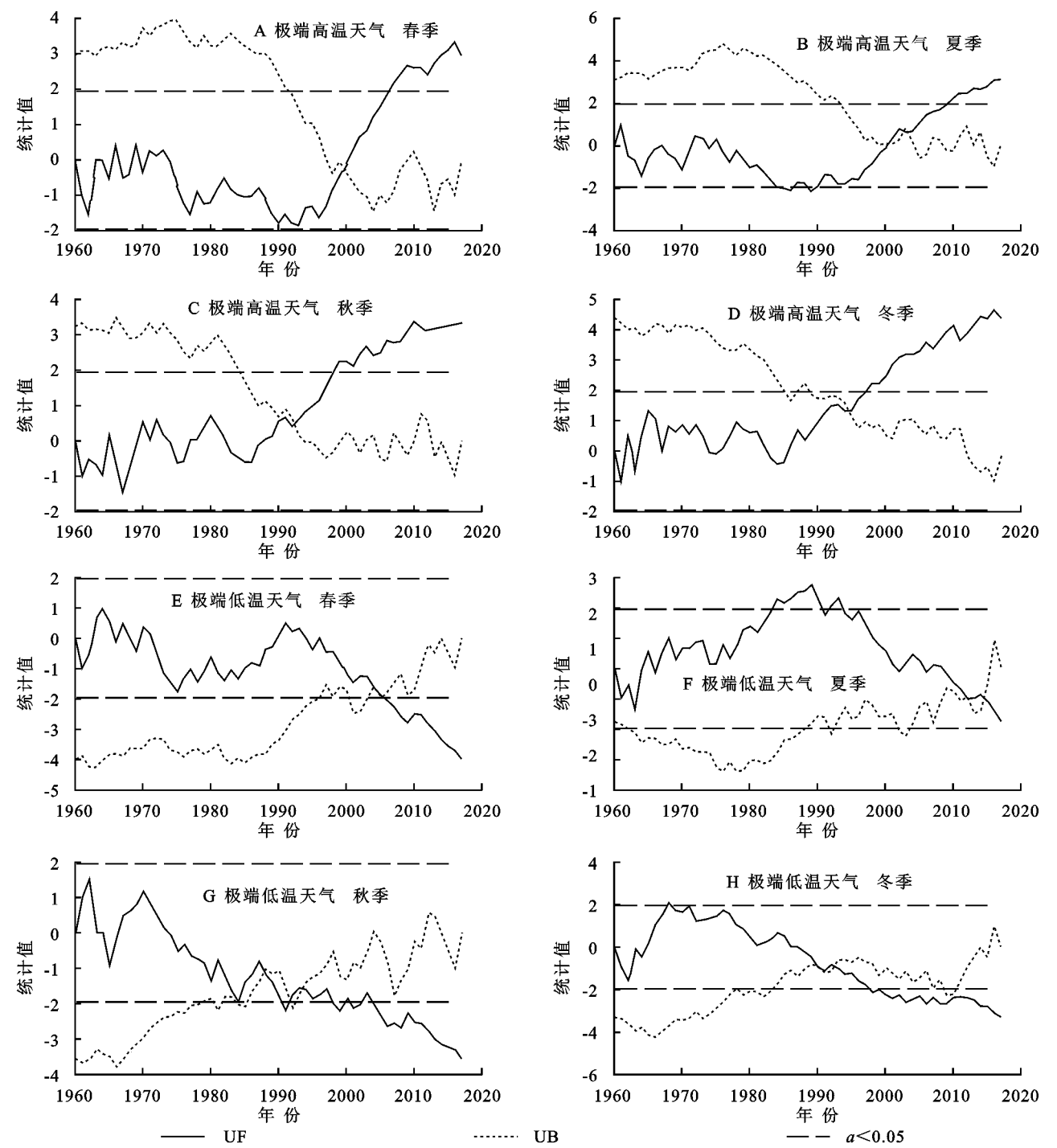
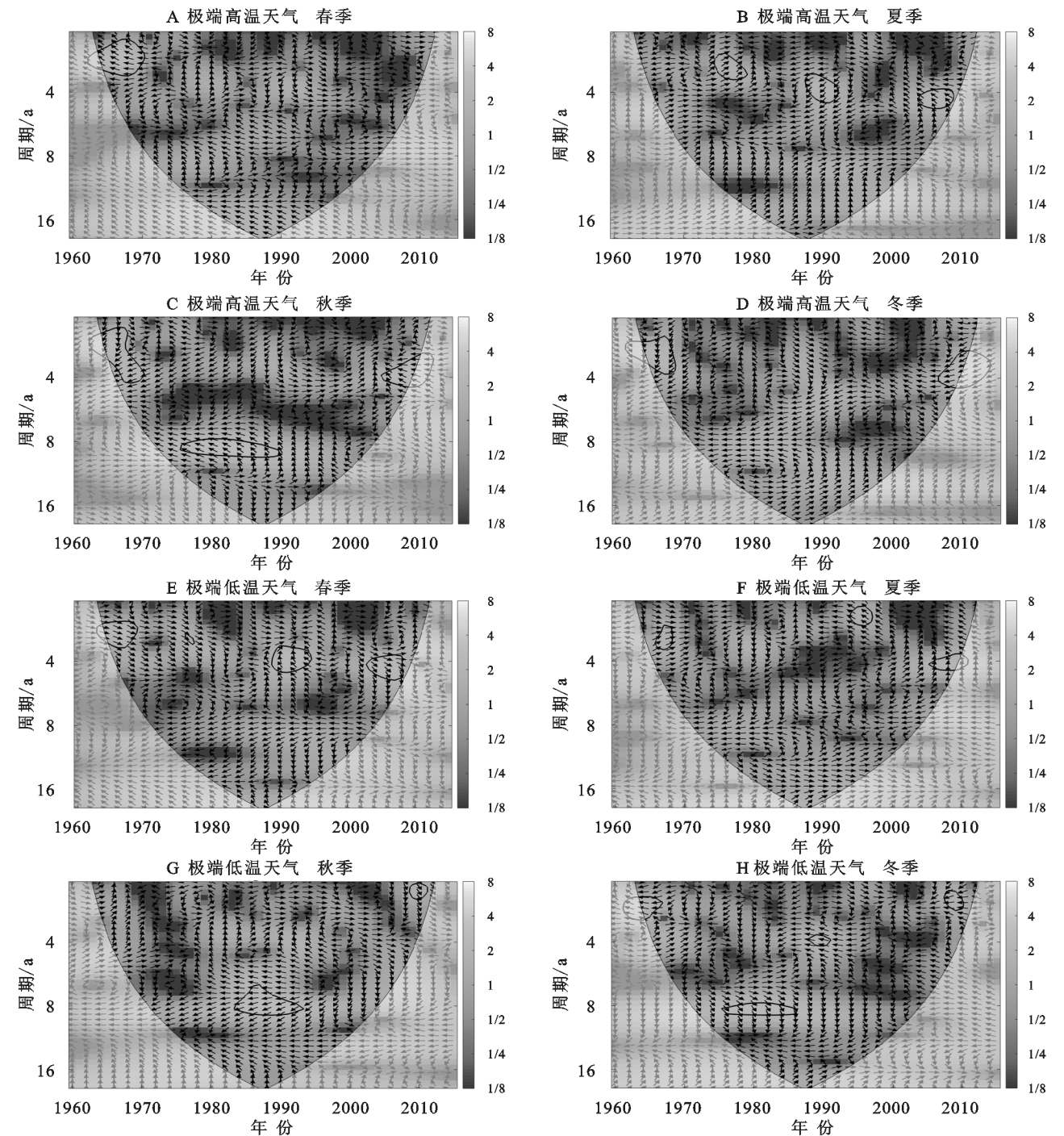


图 5 黄河流域春、夏、秋、冬季极端高温天气和极端低温天气的突变检验



注:粗黑线包围的范围通过了 $\alpha=0.05$ 显著性水平下的红噪声标准谱的检验;细黑线为影响锥曲线,在该曲线以外的功率谱由于受到边界效应的影响而不予考虑。箭头表示相对位相差, \rightarrow 表示两者同位相变化; \leftarrow 表示两者反位相变化; \uparrow 表示春、夏、秋、冬季极端高/低温天气变化位相比 ENSO 变化位相提前 90° , \downarrow 表示春、夏、秋、冬季极端高/低温天气变化位相比 ENSO 变化位相落后 90° 。

图 6 黄河流域春、夏、秋、冬季极端高温天气和极端低温天气与 ENSO 的交叉小波变换

3 结论

(1) 黄河流域 1960—2017 年各季节的极端高温天气日数均呈显著增加趋势,而极端低温天气日数均呈显著减少趋势;且在整个研究时段内,黄河流域平均气温的升温趋势(极端高温天气增多和极端低温天气减少)较为显著,且升温趋势主要发生在 1991 —

2017 年。总之,整个黄河流域春、夏、秋、冬季极端高温天气发生的频率在增加,而极端低温天气发生的频率在减小。

(2) 从空间尺度来看,春、夏和秋季黄河流域极端高温天气日数在大多数地区呈现出增加趋势,仅有个别站点呈现出减少趋势;而冬季极端高温天气日数在整个研究区域内均呈现出增加趋势,最显著的区域

集中在黄河中游大部分地区。而各季节极端低温天气日数变化在大多数站点呈现出减少趋势,而仅有少数站点呈现增加趋势。

(3) 黄河流域极端高温天气日数在春、夏、秋和冬季发生突变的时间点分别为 2000 年、2001 年、1994 年和 1995 年,极端低温天气日数在春、夏、秋、冬季发生突变的时间点分别为 2006 年、2015 年、1988 年和 1990 年;除夏季外,其他季节极端高温天气与极端低温天气的突变时间点较为接近,秋、冬季极端气温天气对全球气候变暖的响应均比春、夏季要早。

(4) 交叉小波分析表明,黄河各季节流域极端气温均与 ENSO 存在不同时段不同频率的共振周期。

参考文献:

- [1] Zbigniew W. Kundzewicz. Extreme weather events and their consequences[J]. Papers on Global Change IGBP, 2016, 23: 59-69.
- [2] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 秦大河, Stocker T, 259 名作者和 TSU(驻伯尔尼和北京). IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.
- [4] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, 2003, 58(S1): 1-10.
- [5] Zhou Y Q, Ren G Y. Change in extreme temperature event frequency over mainland China, during 1961—2008[J]. Climate Research, 2011, 50: 125-139.
- [6] Guan Y, Zhang X, Zheng F, et al. Trends and variability of daily temperature extremes during 1960—2012 in the Yangtze River Basin, China[J]. International Journal of Climatology, 2015, 124(3): 79-94.
- [7] Cohen J, Barlow M, Saito K. Decadal fluctuations in planetary wave forcing modulate global warming[J]. Journal of Climate, 2008, 22(16): 4418-4426.
- [8] 孙风华, 袁健, 关颖. 东北地区最高、最低温度非对称变化的季节演变特征[J]. 地理科学, 2008, 28(4): 532-536.
- [9] 周雅清, 任国玉. 中国大陆 1956—2008 年极端气温事件变化特征分析[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 405-417.
- [10] 贾文雄. 近 50 年来祁连山及河西走廊极端气温的季节变化特征[J]. 地理科学, 2012, 32(11): 1377-1383.
- [11] 王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 1962—2011 年长江流域极端气温事件分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 611-625.
- [12] Li Q, Yang S, Xu W, et al. China experiences the recent warming hiatus[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(3): 889-898.
- [13] 柳春. 黄河流域近 50 年气候变化及未来预估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [14] 陈效述, 刘立, 尉杨平. 1961—2005 年黄河流域极端气候事件变化趋势[J]. 人民黄河, 2011, 33(5): 3-5.
- [15] 刘勤, 严昌荣, 张燕卿, 等. 近 50 年黄河流域气温和降水变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 415-480.
- [16] 赵建华, 刘翠善, 王国庆, 等. 近 60 年来黄河流域气候变化及河川径流演变与响应[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2018, 39(3): 1-5.
- [17] 潘攀, 祝亚丽, 王纪军. 近 50 年黄河流域气温变化特征及背景分析[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(4): 477-485.
- [18] 吴灿, 赵景波, 王格慧. 黄河流域极端气温指数的气候演变特征分析[J]. 中国农业气象, 2015, 36(5): 525-535.
- [19] Wolter K, Timlin M S. Monitoring ENSO in COADS with A Seasonally Adjusted Principal Component Index[C] // Proceedings of the 17th Climate Diagnostics Workshop. Oklahoma, USA: Norman, OK, NOAA/NMC/CAC, NS-SL, Oklahoma Climate Survey, CIMMS and the School of Meteorology, University of Oklahoma, 1993.
- [20] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, 11(5/6): 561-566.
- [21] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.
- [32] Gong D, Kang S, Yao L, et al. Estimation of evapotranspiration and its components from an apple orchard in north-west China using sap flow and water balance methods[J]. Hydrological Processes, 2010, 21(7): 931-938.
- [33] Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G B, et al. Technical description of version 4.0 of the Community Land Model(CLM)[Z]. Boulder, USA: National Center for Atmospheric Research, 2010.
- [34] 张强, 肖风劲, 牛海山, 等. 我国北方植被指数对土壤湿度的敏感性分析[J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 715-718.
- [35] Guan X, Huang J, Guo N, et al. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal parameters over the Loess Plateau[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(4): 692-700.
- [36] Huang J, Zhang W, Zuo J, et al. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2008, 25(6): 906-921.
- [37] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for long term energy flux data sets[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2001, 107(1): 71-77.
- [38] Lawrence D M, Slater A G. Incorporating organic soil into a global climate model[J]. Climate Dynamics, 2008, 30(2/3): 145-160.

(上接第 184 页)