

叶许春, 许崇育, 张丹, 等. 长江中下游夏季降水变化与亚洲季风系统的关系[J]. 地理科学, 2018, 38(7): 1174-1182. [Ye Xuchun, Xu Chongyu, Zhang Dan et al. Variation of Summer Precipitation and Its Connection with Asian Monsoon System in the Middle-lower Yangtze River Basin. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(7): 1174-1182.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.07.019

长江中下游夏季降水变化与亚洲季风系统的关系

叶许春^{1,2}, 许崇育³, 张丹², 李相虎²

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 3. Department of Geosciences, University of Oslo N-0316, Norway)

摘要:以长江中下游流域实测降水数据和亚洲季风指数为基础, 采用Mann-Kendall检验、线性相关和偏相关分析、小波分析等方法, 揭示长江中下游夏季降水的时空变化特征及其与亚洲季风系统之间的相互关系和影响差异。结果表明, 近50 a来长江中下游夏季降水量呈显著的增加趋势, 其与亚洲主要季风指数之间均呈负的线性相关关系, 且显著性影响范围东亚季风大于南海季风大于南亚季风。不同亚洲季风子系统间存在复杂的相互作用关系, 尤其是东亚季风和南海季风之间的相互作用对长江中下游夏季降水产生了重要影响。长江中下游夏季降水量与亚洲主要季风指数存在2~4 a时间尺度上的显著相关性, 且以反位相关关系为主。此外, 长江中下游夏季降水量与东亚季风的相干性最为突出, 在小于8 a的时间尺度上, 两者之间的相关性在近50 a来呈现减弱的趋势, 特别是自20世纪80年代中后期以来。

关键词: 亚洲季风系统; 夏季降水; 小波分析; 长江中下游

中图分类号: P339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2018)07-1174-09

随着全球变暖的进程, 气候变化对大气环流状况的影响以及随之而来的区域气候、水文变化在全球范围内引起越来越多的关注^[1-4]。中国东部季风区位于欧亚大陆和太平洋交界处, 区内水资源的时空分布以及旱涝灾害等气候水文事件的发生与亚洲季风活动关系密切。近年来, 受大气环流变化的影响, 中国南方地区夏季暴雨洪涝灾害十分频繁, 对区域社会经济发展和人民生命财产安全造成了重大危害^[5]。因此, 积极研究区域降水及其与亚洲季风变化之间的关系对客观认识全球变化背景下区域水循环变异机制和未来水资源管理具有重要的科学意义。

亚洲季风系统是地球上最为典型和复杂的季风系统, 其对中国中东部夏季降水时空分布具有决定性的作用。亚洲季风系统主要由东亚季风和南亚季风2个子系统组成, 其中东亚季风子系统

又由东亚热带季风(南海季风)和东亚副热带季风构成, 而南亚季风主要是热带性质的季风^[6]。受海陆位置、大气环流以及地形和下垫面条件的影响, 不同亚洲季风子系统对中国气候水文的影响也存在显著差异。近几十年来东亚季风呈现明显的年代际减弱趋势, 与同时期华北地区降水减少和长江流域降水量增多有很好的对应关系, 使得中国东部地区降水呈现出“南涝北旱”的分布特征^[7,8]。在黄河流域, 东亚季风强度与大多数地区的径流变化呈显著的正相关关系, 特别是中游地区^[9]。Xu^[10]指出自20世纪60年代以来, 黄河龙门区间径流呈明显的下降趋势, 东亚季风强度的持续减弱可以解释该区间径流变化的72%。南亚季风对中国的夏季降水也有重要影响。李夫星等^[11]研究指出东亚季风与中国东部季风区径流深的显著相关性范围要大于南亚季风, 主要位

收稿日期: 2017-09-01; **修订日期:** 2018-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(41571023)、中国科学院流域地理学重点实验室开放基金(WSGS2015003)及国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07104-006-05)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China(41571023), Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences (WSGS2015003), Major Project of National Science and Technology of Water Pollution Control (2014ZX07104-006-05).]

作者简介: 叶许春(1982-), 男, 安徽潜山人, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源变化及流域水文过程的模拟研究。E-mail: yxch2500@163.com

于长江流域以北、松花江流域以南的广大地区以及长江流域以南的部分地区,而南亚季风的影响范围主要位于长江流域上游部分地区及华南地区。在物理机制上,南亚季风对中国夏季降水的影响主要通过影响南亚高压来起作用的,当南亚高压位置的西移,长江-淮河流域夏季降水相对减少,而华北华南地区江水相对增多,反之则亦然^[12]。

当前,有关亚洲季风对中国气象、水文要素的影响研究已有广泛开展。然而以往研究中,大多关注单一的亚洲季风成分的影响,缺少对不同亚洲季风综合影响的定量分析,不利于对亚洲季风各子系统之间相互作用及其对区域降水时空影响差异的认识。长江中下游流域地势低平,河湖纵横,城镇密布,经济发达,是中国重要的工农业生产基地,也是当前长江经济带发展的核心区域。该区域属亚热带季风气候,受季风影响区内降水时空变化很大,成为中国旱涝灾害最严重的区域之一^[13]。本文以长江中下游流域实测降水数据为基础,研究分析夏季降水的时空变化特征及其与亚洲季风系统主要成分之间的相关关系,探讨不同时间尺度下长江中下游夏季降水量与不同亚洲季风成分之间存在的交互性和潜在联系,揭示亚洲主要季风组成对流域夏季降水变化的作用及其影响差异。

1 研究区概况

长江中下游流域是指长江宜昌站以下流域,集水区间面积约 $80 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。区内地貌类型以平原和丘陵山地为主,其中平原总面积约 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要由长江干流及其支流冲积形成的沿岸带状平原,包括江汉平原、洞庭湖平原、鄱阳湖平原、苏皖江沿岸平原以及长江三角洲平原。

长江中下游地区属典型的亚热带季风气候,冬季温和少雨,夏季高温多雨。春夏季节降水较多。每年6、7月受夏季风和北方冷空气的影响,形成“梅雨”,出现长时间的连阴雨天气。梅雨季节时间的长短受“江淮准静止锋”的影响大^[13]。梅雨季节过后受西太平洋副热带高压影响,且少台风活动,会形成“伏旱”。区内多年平均(1960~2013年)降水量约为1 310 mm,由南向北递减,山地多于平原。多年平均夏季(6、7、8月)降水量约500 mm,占全年降水量的38%。

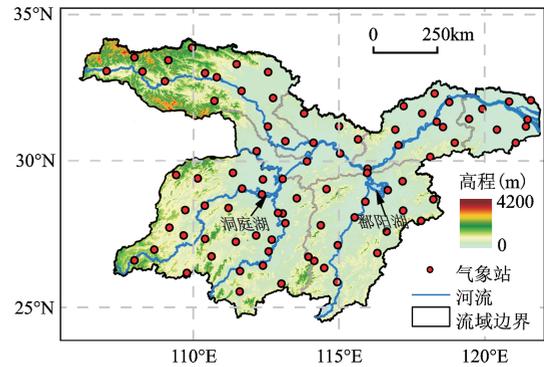


图1 长江中下游流域位置及气象站空间分布
Fig.1 Location of the middle-lower Yangtze River Basin and meteorological stations

2 数据及方法

2.1 数据来源

本研究所用降水数据来自于国家气候中心长江中下游地区88个气象站实测月降水数据(<http://data.cma.cn/>),各站点分布见图1。所有站点资料完整,数据时间序列为1960~2013年。文中夏季降水量为6、7、8月降水量之和。

1960~2013年6~8月份亚洲夏季风指数数据来自于北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院李建平教授课题组(<http://ljp.gcess.cn/dct/page/1>)。李建平 and 曾庆存^[14-16]详细说明了该数据集的驱动数据以及模拟结果的可靠性。其中,东亚夏季风(EASMI)指数定义为东亚季风区域($110^{\circ} \sim 140^{\circ} \text{ E}$, $10^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{ N}$)850 hPa 6、7、8月份风场动态标准化季节性指数;南亚夏季风指数(SASMI)定义为南亚季风区($35^{\circ} \sim 97.5^{\circ} \text{ E}$, $5^{\circ} \sim 22.5^{\circ} \text{ N}$)850 hPa 6~9月份风场动态标准化季节性指数;南海夏季风指数(SCSSMI)定义为南海季风区($100^{\circ} \sim 125^{\circ} \text{ E}$, $0^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{ N}$)925 hPa 6~9月份风场动态标准化季节性指数。为保持研究时段的一致性,本文提取SASMI和SCSSMI 6、7、8月份指数并进行标准化计算,最终获得各系统夏季风指数时间序列。

2.2 研究方法

2.2.1 Mann-kendall(MK)趋势分析及突变检验

采用MK检验法对长江中下游流域夏季降水的趋势和突变特征进行分析。MK检验法是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法,已被广泛应用于气候和水文序列的趋势分析和突变检验。该方法通过计算统计量Z值来检测时间

序列的变化趋势, Z 值大于0反映增加趋势, Z 值小于0反映减小趋势,具体算法参见文献[17]。需要指出的是MK法检测到的趋势序列上的各点值为从起始年至该年的平均趋势。另外,该方法检测到的突变为“均值突变”,它反映的是序列特征平均值的变化。基于计算的各站点夏季降水趋势检验统计量,采用线性插值方法分析其空间分布特征。

2.2.2 线性相关和偏相关分析

皮尔森相关系数(Pearson correlation coefficient)是一种线性相关系数,反映2个变量间的线性相关程度。然而,在多元相关分析中,简单的线性相关系数不能真实的反映出两变量之间的本质联系,因为变量之间的关系很复杂,它们可能受到不止一个变量的影响。偏相关分析也称净相关分析,它是在控制其他变量的线性影响的条件下分析两变量间的线性相关性,所采用的工具是偏相关系数(净相关系数)。同样,基于计算的各站点相关系数和偏相关系数,采用线性插值方法分析其空间分布特征。

2.2.3 小波分析

本文采用交叉小波和小波相干等信号分析技术对流域夏季降水和主要季风指数的时间序列数据开展统计分析,揭示各变量之间的内在联系。交叉小波变换(XWT)^[18,19]是将小波变换与交叉谱分析相结合的一种信号分析技术,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。交叉小波功率谱密度值越大,表明两者具有共同的高能量区,彼此相关显著。将交叉小波功率谱与红噪声标准谱作比较可得到其显著相关程度。

基于2个时间序列的交叉小波变换可以揭示它们共同的高能量区以及位相关系,但不能度量2

个时间序列在时频域中局部相关的密切程度。对于2个时间序列而言,共同高能量区中的相关性可能不显著,而在交叉小波功率谱的低能量值区却可能有显著的相关性^[20]。小波相干谱(WTC)^[20,21]用来度量时-频空间中2个时间序列局部相关的密切程度,并采用Monte Carlo方法对小波相干谱的显著性进行检验。

3 结果

3.1 长江中下游夏季降水时空变化特征

长江中下游地区夏季降水呈现较大的年际、年代际波动特征。如图2a所示,在研究时段内,多年平均夏季降水量为503.43 mm,其中年最大夏季降水量751.92 mm(1999年),最小值为306.97 mm(1978年)。夏季降水量的年际变化过程总体上呈线性增加趋势,趋势率约为18.4 mm/10a。MK检验表明,长江中下游地区夏季降水量于20世纪70年代中期(1975年)发生突变,之后一直呈稳定的增加趋势(图2b)。降水量在20世纪90年代增加趋势十分突出,并于1995年附近达到显著性水平。图2还显示,自2002年以后长江中下游夏季降水量出现明显的减小过程。

在空间上,长江中下游88%的站点夏季降水量都呈增加趋势,其中显著增加的区域主要集中在长江三角洲地区、江西九江-景德镇一带、井冈山地区、武汉以及汉江上游的安康地区等。下降区域主要分布在湘西和鄂西的局部地区,其中显著下降区域仅见于鄂西与三峡库区交界处的绿葱坡站。

3.2 夏季降水与季风指数的线性相关和偏相关关系

分析表明,在研究时段内亚洲季风系统主要夏季风指数均呈显著的下降趋势。因此,长江中

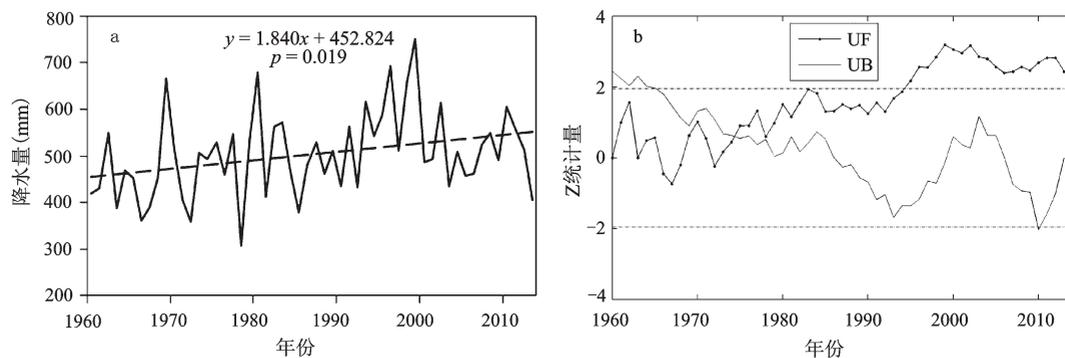


图2 长江中下游夏季降水量的年际变化过程(a)及MK检验(b)

Fig.2 Annual variation of summer precipitation(a) and the MK test(b) in the middle-lower Yangtze River Basin

下游夏季降水量与主要季风指数之间均呈负相关关系(表1)。其中,夏季降水量与EASMI和SCSSMI的负相关系数超过0.01显著性水平,而与SASMI的相关性不强。空间上,长江中下游夏季降水量与EASMI之间呈显著负相关的区域约占流域总面积的46%,普遍分布在沿长江两侧的中部区域,南部边缘约5%的区域存在局部显著的正相关关系(图3a)。长江中下游夏季降水量与SCSSMI之间负相关关系的空间分布与EASMI相似,显著性区域范围占流域总面积的38%,但不存在显著的正相关区域(图3b)。长江中下游夏季降水量与SASMI之间呈显著负相关的区域零星分布在长江安徽段下游和汉江上游的局部地区(约占流域总面积的5%),但于江西、湖南等地的南部边缘地区存在显著正相关区域(图3c)。

当控制其它2个季风指数的影响后,长江中下游夏季降水量与亚洲主要季风指数之间的偏相关系数明显减小,且均未达到显著性水平(表1)。相对于线性相关的显著性区域,长江中下游夏季降水量与EASMI和SCSSMI之间显著偏相关的分布区域明显减少,其中夏季降水量与EASMI之间显

表1 长江中下游夏季降水量与主要亚洲季风指数之间的关系

Table 1 Correlation between summer precipitation and the three Asian summer monsoon indices in the middle-lower Yangtze River Basin

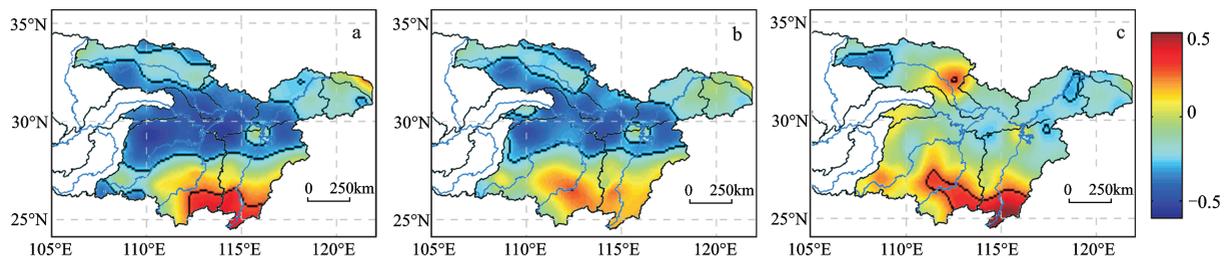
系数	EASMI	SCSSMI	SASMI
相关系数	-0.442**	-0.386**	-0.155
偏相关系数	-0.235	-0.043	-0.012

注:**表示超过0.01显著性水平。

著偏相关的区域约占流域总面积的12%,夏季降水量与SCSSMI之间存在显著性偏相关关系的区域几乎消失(图4a, b)。与此同时,夏季降水量与SASMI之间呈正偏相关关系的区域明显增多,特别是在洞庭湖流域和汉江中游地区,但显著偏相关的区域变化不大。

3.3 夏季降水与季风指数的遥相关关系

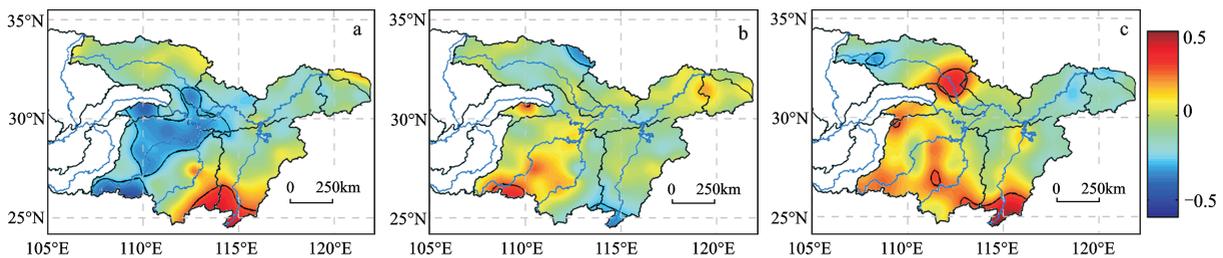
长江中下游夏季降水量与EASMI的交叉小波和小波相干的分析结果如图5所示,可以看出在细线范围之内(剔除边界影响),序列之间的共同高能量区主要集中分布于2~4 a时间尺度上,反映长



图中黑曲线表示相关系数达到0.05显著性水平

图3 长江中下游夏季降水量与主要夏季季风指数EASMI(a)、SCSSMI(b)和SASMI(c)的相关系数空间分布

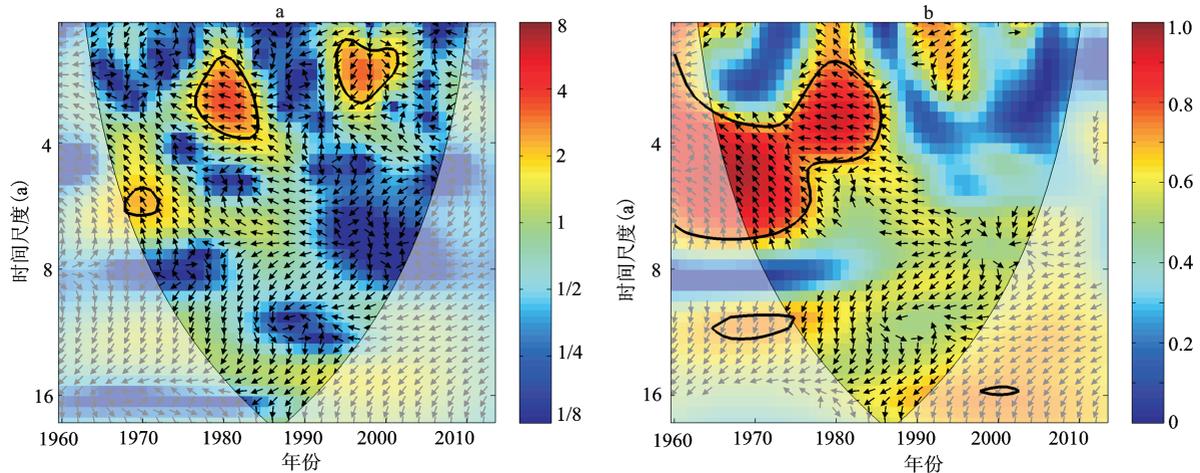
Fig.3 Spatial distribution of linear correlation coefficients between summer precipitation and EASMI (a), SCSSMI(b) and SASMI(c) in the middle-lower Yangtze River Basin



图中黑曲线表示偏相关系数达到0.05显著性水平

图4 长江中下游夏季降水量与主要夏季季风指数EASMI(a)、SCSSMI(b)和SASMI(c)的偏相关系数空间分布

Fig.4 Spatial distribution of linear correlation coefficients between summer precipitation and EASMI(a), SCSSMI(b) and SASMI(c) in the middle-lower Yangtze River Basin



图中箭头表示相对位相差,向右箭头表示两者变化位相一致,向左箭头表示变化位相相反;粗黑线包围的范围表示通过了0.05显著性检验;U型细黑线为影响锥曲线(COI),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

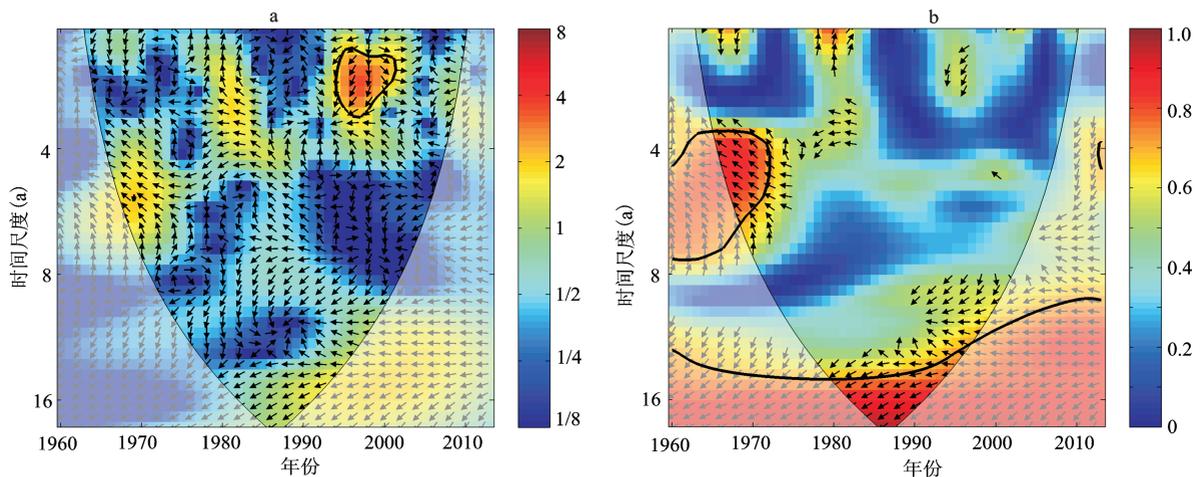
图5 长江中下游夏季降水量与东亚夏季风指数的交叉小波谱(a)和小波相干谱(b)

Fig.5 The time-frequency spectrum of XWT (a) and WTC (b) between summer precipitation and EASMI in the middle-lower Yangtze River Basin

江中下游夏季降水量与EASMI之间这一时间尺度下较强的共振周期。其中,1976~1984年与1994~2002年交叉小波功率达到显著性水平(图5a)。此外,1968~1972年间交叉小波功率也较显著。图5b的小波相干谱显示两者在时频空间的低能量区中显著相关强度远大于高能量区。显著的小波相干谱主要出现在1965~1975年间的3~8 a时间尺度上,以及1976~1984年间的2~5 a的时间尺度上。尽管在之后的1990s年代初2~3 a时间尺度上也曾出现较强的小波相干谱,但并未达到显著性水平。在整个研究时段内,长江中下游夏季降水量与

EASMI之间以反位相关系为主,但呈现不断变化的过程。总体上,EASMI先于夏季降水,其位相差由1965~1975年间3~8 a时间尺度上的 $>180^\circ$,减小到1976~1984年间2~5 a的时间尺度上的 $\sim 180^\circ$,以及1990s年代初期2~3 a时间尺度上的 $<180^\circ$ (图5)。

长江中下游夏季降水量与SCSSMI之间的交叉小波谱在高能量区存在2~4 a(1994~2002年)时间尺度的共同震荡周期(图6a)。小波相干谱表明两者在低能量区的显著性相关性主要出现在1972年之前的3~8 a时间尺度上,以及 >10 a的时间尺度上(均受边界影响),而在其他时频空间上两者的



图中标识与图5相同

图6 长江中下游夏季降水量与南海夏季风指数的交叉小波谱(a)和小波相干谱(b)

Fig.6 The time-frequency spectrum of XWT (a) and WTC (b) between summer precipitation and SCSSMI in the middle-lower Yangtze River Basin

相关性极弱(图 6b)。在这些一致性显著的时频空间上,长江中下游夏季降水量与 SCSSMI 之间以反位相关关系为主。

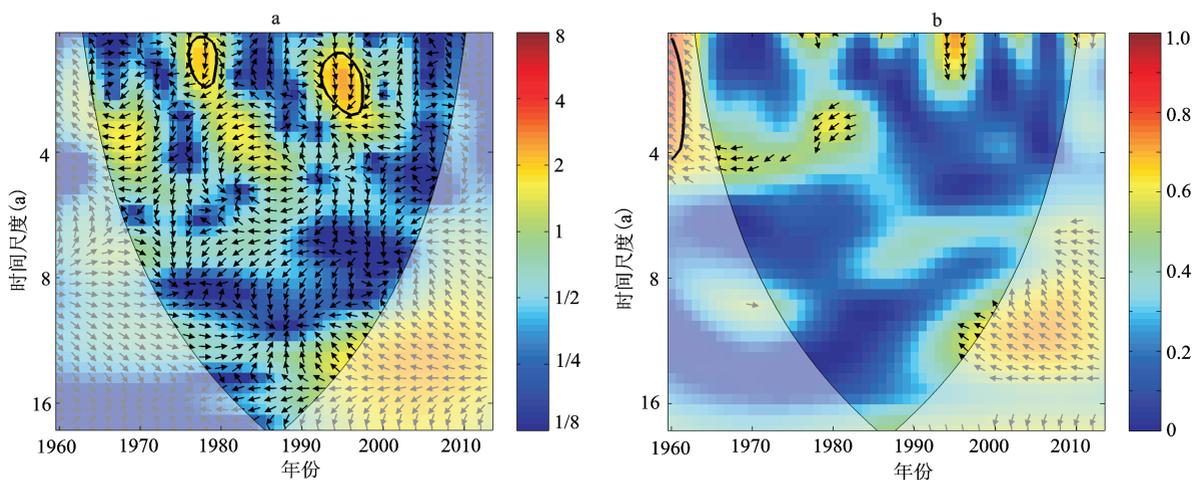
长江中下游夏季降水量与 SASMI 之间共同显著的小波能量谱主要位于 1976~1980 年和 1992~1998 年间的 2~4 a 时间尺度上(图 7a)。小波相干谱表明,在整个时频空间低能量区内(剔除边界影响)两者仅出现零星但不显著的共振周期,反映出长江中下游夏季降水量与 SASMI 之间的一致性关系极弱(图 7b)。

4 讨论

长江中下游地区夏季降水量在 20 世纪 70 年代中期发生突变,之后一直呈稳定的增加趋势,这与整个东部季风区自 20 世纪 70 年代末末发生显著变化的结果相一致^[1]。皮尔森相关分析表明,长江中下游夏季降水量与 EASMI 和 SCSSMI 之间均呈显著的负相关关系,反映出长江中下游夏季降水偏少的年份一般对应较强东亚夏季风和南海夏季风,而夏季降水偏多的年份对应较弱的东亚夏季风和南海夏季风。已有研究表明,自 20 世纪 70 年代末以来东亚夏季风发生了由强转弱的突变^[22]。东亚夏季风强度减弱将导致向北的经向水汽输送减少,从而长江以北的淮河流域、黄河流域以及东北以南地区降水减少,而长江流域及其以南区域降水增多^[8,23]。长江中下游夏季降水量与 SASMI 之间也呈负的线性相关关系,但相关性不显著。其他学者也得到了类似的结果,如李夫星等^[11]研究

表明中国东部季风区径流深度与南亚夏季风显著性相关范围主要位于长江上游及华南地区,在长江中下游地区相关性较弱。由于南亚季风的水汽输送以纬向为主,其所带来的水汽输送主要影响中国华南中部和西南边境地区的降水^[24,25]。强的南亚夏季风可将水汽沿纬线方向输送到华南地区,并由此带来丰沛降水;而弱的南亚季风所携带的水汽纬向输送能力减弱,大多沿青藏高原东侧向北移动从而影响长江上游降水^[11]。

相比于皮尔森相关系数及其显著性区域,长江中下游夏季降水量与主要亚洲季风系数之间的偏相关系数及其显著性区域明显变小,特别是与 SCSSMI 之间的偏相关关系及其显著性区域减小十分突出,其次是 EASMI,而与 SASMI 之间的变化最小。这一结果表明东亚夏季风与南海夏季风以及南亚夏季风之间存在复杂的相互影响和相互作用关系。这种关系主要体现在水汽来源和输送途径上的相互影响和作用,如东亚季风区水汽来源和输送明显受到南海季风区水汽经向输送的影响;南海季风区水汽来源和输送既受到以经向水汽输送为主的东亚季风的影响,同时又受到以纬向水汽输送为主的南亚季风的影响;而南亚季风子系统相对独立,且水汽以向东的纬向输送为主,其受南海季风和东亚季风的影响较弱。另一方面,基于大气环流的整体性,亚洲季风子系统间的相互影响和作用还可能体现在更大尺度上的遥相关联系。吴进等^[26]研究表明亚洲夏季风子系统之间存在显著相关,当东亚季风偏强时,大尺度亚洲



图中标识与图 5 同

图 7 长江中下游夏季降水量与南亚夏季风指数的交叉小波谱(a)和小波相干谱(b)

Fig. 7 The time-frequency spectrum of XWT (a) and WTC (b) between summer precipitation and SASMI in the middle-lower Yangtze River Basin

季风、东南亚季风、南亚季风均偏弱,相关区域降水偏少;当东南亚季风偏强时,南亚季风偏弱,南亚地区降水偏少。

小波分析表明长江中下游夏季降水量与主要亚洲季风指数之间呈反位相关关系,并且夏季降水量与东亚季风之间遥相关的密切程度要强于南海季风和南亚季风,这也在很大程度上印证了线性相关和偏相关分析的结果。关于季风及降水异常的年代际变化成因机制是比较复杂的,一般与全球海面温度的内部和外部强制波动有关^[27]。作为全球海洋和大气相互作用最强的信号,ENSO通过影响大气环流进而影响中国气候。大量研究表明,ENSO对东亚季风及区域降水和旱涝灾害的影响十分突出,其他大尺度气候因子如北大西洋涛动以及太平洋涛动等在年代际尺度上的影响也可能至关重要^[28,29]。小波分析揭示在小于8 a的时间尺度下,长江中下游夏季降水量与EASMI的一致性关系在近50 a来呈减弱的趋势,特别是自20世纪80年代中后期以来,一些研究也有相似的结论^[30,31]。在成因上,这种变化可能与20世纪70年代末热带太平洋突发的年代际变暖和大气环流变化有关^[32]。而长江中下游夏季降水量与EASMI之间反位相关关系的不断变化过程则可能受到ENSO和东亚季风之间相互关系不稳定的影响^[33]。

5 结论

1) 近50 a来,长江中下游地区夏季降水量呈显著的增加趋势,并于20世纪70年代中期发生突变。长江中下游夏季降水量与亚洲主要季风指数之间均呈负的线性相关关系,且其显著性区域范围东亚夏季风大于南海夏季风大于南亚夏季风。当不考虑其他季风子系统的影响,长江中下游夏季降水量与主要夏季风指数之间的偏相关系数及其显著性区域明显变小,反映亚洲夏季风系统中东亚季风、南海季风以及南亚季风之间存在复杂的相互影响和相互作用关系,尤其是东亚夏季风和南海夏季风之间的相互作用对长江中下游夏季降水产生了重要影响。

2) 交叉小波分析表明,长江中下游夏季降水量与亚洲主要季风指数之间在2~4 a时间尺度上具有共同的震荡周期,且显著性区域主要位于1976~1984年与1994~2002年,表明它们之间的相关性在这些时频空间下最为显著。小波相干谱分

析进一步揭示长江中下游夏季降水量与亚洲主要季风指数之间以反位相关关系为主,并且夏季降水量与东亚夏季风之间相互关系的密切程度要强于南海夏季风和南亚夏季风。此外,在小于8 a的时间尺度上,长江中下游夏季降水量与EASMI的一致性关系在近50 a来呈现减弱的趋势,特别是自20世纪80年代中后期以来。

参考文献(References):

- [1] Grimm A M, Tedeschi R G. ENSO and extreme rainfall events in South America[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(7): 1589-1609.
- [2] Li H, Dai A, Zhou T et al. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950 - 2000 [J]. *Climate Dynamics*, 2010, 34(4): 501-514.
- [3] Ping F, Tang X, Gao S et al. A comparative study of the atmospheric circulations associated with rainy-season floods between the Yangtze and Huaihe River Basins[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(7): 1464-1479.
- [4] Zhang Q, Wang Y, Singh V P et al. Impacts of ENSO and ENSO Modoki + A regimes on seasonal precipitation variations and possible underlying causes in the Huai River basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 308 - 319.
- [5] 陈栋, 陈际龙, 黄荣辉, 等. 中国东部夏季暴雨的年代际跃变及其大尺度环流背景[J]. *大气科学*, 2016, 40(3): 581-590. [Chen Ddong, Chen Jilong, Huang Ronghui et al. Interdecadal changes of summertime heavy rainfall in eastern China and their large-scale circulation backgrounds. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2016, 40 (3): 581-590.]
- [6] Zhu Q, He J, Wang P. A study of circulation differences between East-Asian and Indian summer monsoons with their interaction [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1986, 3(4): 466-477.
- [7] Ding Y, Wang Z, Sun Y. Interdecadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences[J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 28(9): 1139-1161.
- [8] Gao H, Jiang W, Li W. Changed relationships between the East Asian summer monsoon circulations and the summer rainfall in eastern China[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 28 (6): 1075-1084.
- [9] 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. [Li Fuxing, Chen Dong, Tang Qiuhong. Variations of hydro-meteorological variables in the Yellow River basin and their relationships with the East Asian summer monsoon. *Advances in Water Science*, 26(4), 481-490.]
- [10] Xu J. Temporal variation in summer monsoon intensity since 1873 and its influence on runoff in the drainage area between Hekouzhen and Longmen, Yellow River basin, China[J]. *Cli-*

- matic Change, 2012, 112(2): 283-298.
- [11] 李夫星, 陈东, 汤秋鸿, 等. 东亚和南亚夏季风对中国季风区径流深影响[J]. 水科学进展, 2016, 27(3): 349-356. [Li Fuxing, Chen Dong, Tang QiuHong et al. Influence of East and South Asian summer monsoons on runoff in the monsoon region of East China. *Advances in Water Science*, 2016, 27(3): 349-356.]
- [12] Wei W, Zhang R, Wen M et al. Impact of Indian summer monsoon on the South Asian High and its influence on summer rainfall over China[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 43(5-6): 1257-1269.
- [13] 闪丽洁, 张利平, 陈心池, 等. 长江中下游流域旱涝急转时空演变特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(12): 2100-2107. [Shan Lijie, Zhang Liping, Chen Xinchu et al. Spatio-temporal evolution characteristics of drought-flood abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(12): 2100-2107.]
- [14] 李建平, 曾庆存. 一个新的季风指数及其年际变化和与雨量的关系[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 351-365. [Li Jianping, Zeng Qingcun. A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(3): 351-365.]
- [15] Li J, Zeng Q. A new monsoon index and the geographical distribution of the global monsoons[J]. *Advances in Atmospheric sciences*, 2003, 20(2): 299-302.
- [16] Li J, Zeng Q. A unified monsoon index[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(8), 1274.
- [17] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei Fengying. *Modern climate statistical diagnosis and prediction technology*. Beijing: Meteorological Press, 2007.]
- [18] Foufoula-Georgiou E, Kumar P. Wavelets in geophysics. San Diego: Academic Press, 1994.
- [19] 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.
- [20] 余丹丹, 张韧, 洪梅, 等. 基于交叉小波与小波相干的西太平洋副高与东亚夏季风系统的关联性分析[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(6): 755-769. [Yu Dandan, Zhang Ren, Hong Mei et al. Correlation analysis between the west Pacific subtropical high and the East Asian summer monsoon system based on cross wavelet and wavelet coherence. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2007, 30(6): 755-769.]
- [21] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79 (1): 61-78.
- [22] 张国宏, 李智才, 宋燕, 等. 中国降水量变化的空间分布特征与东亚夏季风[J]. 干旱区地理, 2011, 34(1), 34-42. [Zhang Guohong, Li Zhicai, Song Yan et al. Spatial patterns of change trend in rainfall of China and the role of East Asia summer monsoon. *Arid Land Geography*, 2011, 34(1), 34-42.]
- [23] 吕俊梅, 任菊章, 琚建华. 东亚夏季风的年代际变化对中国降水的影响[J]. 热带气象学报, 2004, 20(1): 73-80. [Lv Junmei, Ren Juzhang, Ju Jianhua. The interdecadal variability of East Asia monsoon and its effect on the rainfall over China. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004, 20(1): 73-80.]
- [24] 陈际龙, 黄荣辉. 亚澳季风各子系统气候学特征的异同研究 II. 夏季风水汽输送[J]. 大气科学, 2007, 31(5): 766-778. [Chen Jilong, Huang Ronghui. The comparison of climatological characteristics among Asian and Australian monsoon subsystems. Part II: Water vapor transport by summer monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(5): 766-778.]
- [25] 田红, 郭品文, 陆维松. 中国夏季降水的水汽通道特征及其影响因子分析[J]. 热带气象学报, 2004, 20(4): 401-408. [Tian Hong, Guo Pinwen, Lu Weisong. Characteristics of vapor inflow corridors related to summer rainfall in China and impact factors. *Journal of tropical meteorology*, 2004, 20(4), 401-408.]
- [26] 吴进, 何金海, 张祖强, 等. 亚洲夏季风各子系统主要变率相互关系初析[J]. 热带气象学报, 2011, 27(5): 619-625. [Wu Jin, He Jinhai, Zhang Zuqiang et al. The analysis of the relationship between the subsystems of the Asian summer monsoon. *Journal of Tropical Meteorology*, 2011, 27(5): 619-625.]
- [27] Pui A, Sharma A, Santoso A et al. Impact of the El Nino-Southern Oscillation, Indian Ocean Dipole, and Southern Annular Mode on daily to subdaily rainfall characteristics in East Australia[J]. *Monthly Weather Review*. 2012, 140(5): 1665-1682.
- [28] Xiao M, Zhang Q, Singh V P. Influences of ENSO, NAO, IOD and PDO on seasonal precipitation regimes in the Yangtze River basin, China[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(12): 3556-3567.
- [29] Ouyang R, Liu W, Fu G et al. Linkages between ENSO/PDO signals and precipitation, streamflow in China during the last 100 years [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18 (9): 3651-3661.
- [30] Yin Y, Xu C Y, Chen Y. Relationship between flood/drought disasters and ENSO from 1857 to 2003 in the Taihu Lake basin, China [J]. *Quaternary International*, 2009, 208(1): 93-101.
- [31] Wu R, Wang B. A contrast of the East Asian summer monsoon-ENSO relationship between 1962-77 and 1978-93[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15: 3266-3279.
- [32] Gao H. Decadal variation of the relationship between summer precipitation along the Huaihe River valley and SST over the equatorial eastern Pacific[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(1): 1-9.
- [33] Wang H. The instability of the East Asian summer monsoon-ENSO relations[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, 19 (1): 1-11.

Variation of Summer Precipitation and Its Connection with Asian Monsoon System in the Middle-lower Yangtze River Basin

Ye Xuchun^{1,2}, Xu Chongyu³, Zhang Dan², Li Xianghu²

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Nanjing 210008, Jiangsu, China; 3. Department of Geosciences, University of Oslo N-0316, Norway)

Abstract: The Asian monsoon system is the most typical and complex monsoon system on the earth, which plays a decisive role in the spatio-temporal distribution of summer precipitation in the central and eastern China. Based on the measured precipitation data across the middle-lower Yangtze River Basin, the current study investigated the spatio-temporal variation of summer precipitation in middle-lower Yangtze River Basin and its connection with main components of Asian summer monsoon system by using the methods of Mann-Kendall test, correlation and partial correlation analysis and wavelet analysis. Result demonstrates that the summer precipitation in the middle-lower Yangtze River Basin has increased significantly during the past 50 years, and shows a negative linear correlation with the main components of Asian summer monsoon indices. Specific significant influencing area shows the largest for East Asian summer monsoon, followed by South China Sea summer monsoon and South Asian summer monsoon. With reference to the linear correlation, the partial correlation coefficient between the summer precipitation of the middle-lower Yangtze River Basin and the main Asian monsoon indices decreased remarkably, and all the correlations were not significant. The three Asian monsoon subsystems show strong interactions which exert important influence on the local precipitation. Cross wavelet transform and wavelet coherence analysis revealed that summer precipitation in the middle-lower Yangtze River Basin and the main Asian summer monsoon indices shows multi-time scale oscillation period, which is dominant by anti-phase relationship. Wavelet analysis also indicates that significant coherence between summer precipitation and the Asian summer monsoon indices seems to be weakened in recent years since the middle 1980s.

Key words: Asian monsoon system; summer precipitation; wavelet analysis; the middle-lower Yangtze River Basin