

# 泾河流域气候变化及其与 ENSO 的关系

李 志<sup>1</sup>, 王 健<sup>1</sup>, 刘文兆<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘 要:** ENSO(厄尔尼诺-南方涛动)常引起大气环流的改变并导致气候异常, 探讨区域气候变化与 ENSO 的关系有助于理解区域水文等各方面的变化。通过 Mann-Kendall、相关性检验和小波分析等方法, 研究了 1960-2005 年泾河流域气候变化及其与 ENSO 的关系。结果表明, 1960-2005 年, 泾河流域气候趋向暖干, 且这种趋势在 90 年代以来愈加显著。气候变化与 ENSO 有显著的关系。降水对 ENSO 的响应程度强于温度; 降水可能受南方涛动的影响比较大, 而温度可能受海表温度的影响较多; ENSO 暖事件对泾河流域气候变化的影响可能大于冷事件。

**关 键 词:** 泾河流域; 气候变化; ENSO; Mann-Kendall; 小波分析

## 1 引言

区域气候变化多由海洋和大气环流的异常现象导致<sup>[1-2]</sup>, 如厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)<sup>[3]</sup>、太平洋年代际振荡(PDO)<sup>[4]</sup>、大西洋年代际振荡(AMO)<sup>[5]</sup>、北极涛动(AO)<sup>[6]</sup>、北大西洋涛动(NAO)<sup>[7]</sup>等。其中, ENSO 是全球海气相互作用的强烈信号, 常引起大气环流的改变并导致气候异常<sup>[8]</sup>, 许多地区的气候变化都与 ENSO 事件的关联性较强<sup>[9-13]</sup>, 并进而引起区域水文、生态等各方面的变化, 因此, 探讨区域气候变化与 ENSO 关系, 有助于理解区域的环境变化。

ENSO 对不同地区气候变化的影响方式和强度不同, 表现出显著的区域性特征。如龚道溢等发现近百年来全球陆地平均年降水量在 El Nino 年显著减少而在 La Nina 年显著增加, 我国东部冬、秋季降水量与 ENSO 有显著的关系<sup>[13]</sup>; 陈亚宁等的研究表明 ENSO 与塔里木河流域近 50 年的温度、降水和径流间不存在明显的联系, 其水文气象变化主要是人类活动造成的<sup>[3]</sup>; 信忠保等发现淮河流域 El Nino 年份的春季和冬季降水明显增多, 而 La Nina 年份降水普遍减少<sup>[14]</sup>; Kim 等发现科罗拉多河流域冬夏季降水受到 ENSO 的显著影响, 暖事件减少下游的冬季降水, 冷事件增加上游的夏季降水<sup>[15]</sup>。高辉等讨论了 1951-2003 年中国夏季降水和前冬 Nino3 区海温关系的年代际变化, 发现近 20 年来二者相关性已大大衰减<sup>[11]</sup>。可见, 对于不同区域或同一区域的不同时段, ENSO 对气候变化的影响都有差异。

这些海气异常现象导致的气候变化进而影响了区域水文等方面, 如 Timilsena 等发现科罗拉多河流域的径流将在 El Nino 事件期间增多, 而在 La Nina 事件期间减少<sup>[2]</sup>; 张知彬发现欧洲的旅鼠和田鼠种群暴发与 ENSO 有密切的关联性, 可能是因为 ENSO 影响了欧洲气候或鼠类食物变化导致的<sup>[8]</sup>。因此, 评估区域气候变化与全球气候变化的关系, 具有重要的意义。

泾河流域位于黄土高原中部, 由于黄土的特殊构造、植被覆盖率低、农业开发利用强度大以及暴雨强度大和频率高等, 该区土壤侵蚀严重。近年来, 泾河流域的水沙状况以及农业等发生了显著的变化<sup>[16-17]</sup>, 部分研究评估了其降水变化趋势<sup>[18-19]</sup>, 结果表明气候变化对环境变化具有重要的影响。本文将在全面分析 1960-2005 年降水和温度变化趋势的基础上, 探寻其与 ENSO 的关系, 揭示大尺度上的全球气候变化对该区气候变化的影响, 从而为区域可持续发展提供决策依据。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究区域概况

泾河流域位于黄土高原中部, 横跨宁甘陕 3 省区, 流域面积 45421 km<sup>2</sup>。流域属温带大陆性气候, 多年(1960-2005)平均降水量 544.2 mm, 大部分降水发生在夏季且多暴雨; 年均温度 9.1℃。流域内地貌复杂, 包括北部黄土丘陵区、中部黄土残塬区、西

收稿日期: 2010-01; 修订日期: 2010-05。

基金项目: 十一五科技支撑计划项目(2006BAD09B09); 中央高校基本科研业务费专项资金(Z109021002)。

作者简介: 李志(1978-), 男, 山东临沂人, 博士, 副教授, 主要从事全球变化与水文生态方面的研究。E-mail: lizhibox@126.com。

南部山地林区和东南部山地河川区；地势西北高，东南低，总体地势是东北西 3 面向东南倾斜。1961–2000 年的土壤侵蚀模数为 5015 t/(km<sup>2</sup>.a)，水蚀区面积为 33220 km<sup>2</sup>，占流域面积的 73%，是入黄泥沙的重要来源。但近年来河流的水沙发生了显著的变化，如 80 年代河流泥沙大量减少，降雨量减少和综合治理的影响程度分别为 63%和 37%<sup>[16]</sup>，表明气候变化的影响程度非常显著。

2.2 数据来源与处理方法

本文所使用数据涉及 2 部分，即泾河流域的气象数据和可以表征 ENSO 的数据。泾河流域的气象数据来自中国气象局，包括流域内 18 个气象站 1960–2005 年的降水和温度数据(图 1)，使用算术平均法求取泾河流域降水和温度的月序列数据，并进而求取月序列数据的距平值。

表征 ENSO 的指标选用热带太平洋海表温度距平(SSTA)和南方涛动指数(SOI)，数据来自美国海洋大气局(NOAA)气候预测中心(CPC)，时段与泾河流域气象数据相同(1960–2005 年)。对于 SST 的监测，赤道中东太平洋被划分为 4 个区：Nino1 区(5~10°S, 90~80°W)、Nino2 区 (0~5°S, 90~80°W)、Nino3 区(5°S~5°N, 150~90°W)和 Nino4 区(5°S~5°N, 160°E~150°W)。其中，Nino3 区涵盖了赤道中东太平洋的大部海域，其 El Nino 信号最为突出，通常用这一海区的 SSTA 来判定 El Nino 和 La Nina 的发生与结束<sup>[20]</sup>。因此，本研究中 SSTA 选择 Nino3 海区的数据。判别冷暖事件的方法：当 Nino3 区 SSTA 持续 6 个月高于 0.5℃ (允许中断 1 个月)时，定义为 1 次 El Nino 事件(暖事件)；反之，持续 6 个月低于 0.5℃ (允许中断 1 个月)时，定义为 1 次 La Nina 事件(冷

事件)。

2.3 研究方法

基于 Mann–Kendall(M–K)方法和倾向率，分析和量化泾河流域 1960–2005 年年降水和温度的变化趋势；使用相关性分析，判别泾河流域降水和温度与 SSTA 和 SOI 的关系；基于 Morlet 复小波分析，检查泾河流域降水和温度与 SSTA 和 SOI 变化周期的关系。分析泾河流域气候变化与 SSTA 和 SOI 的相关性时，使用月序列原始数据；进行周期分析时，为消除掉序列的年和季节周期影响，使用泾河流域气温和降水月序列数据的距平值与 SSTA 和 SOI 数据。

3 结果与讨论

3.1 泾河流域气候变化

3.1.1 单调趋势 1960–2005 年泾河流域年降水量有一个不显著的下降趋势，年均减少 1.56 mm (表 1)；年均温度显著上升，年均增幅为 0.027℃。可见，泾河流域 46a 来气候趋向暖干。此趋势可以进一步从年内变化来分析(表 2)。降水在 4、6、9 和 11 月的变化趋势显著，其中，6 月降水增加，4、9 和 11 月降

表 1 泾河流域 1960–2005 年年降水量和温度的变化趋势和幅度

Tab.1 Changing trend and magnitude of precipitation and temperature in the Jinghe watershed during 1960–2005

	Mann-Kendall			倾向率
	$\beta$	Z	p	
降水量/mm	-1.52	-1.10		-1.56
温度/℃	0.03	4.05	* *	0.03

\* 表示显著水平  $p<0.05$ ; \* \* 表示显著水平  $p<0.01$ . 下同。

表 2 泾河流域月降水及月均温度的变化趋势和幅度

Tab.2 Changing trend and magnitude of monthly precipitation and temperature in the Jinghe watershed

月	月均值 mm	降水			月均值 ℃	温度		
		Mann-Kendall				Mann-Kendall		
		$\beta$	Z	p		$\beta$	Z	p
1	4.1	0.037	0.99		-4.9	0.033	2.35	* *
2	6.3	0.034	0.86		-1.9	0.061	2.52	* *
3	17.8	-0.113	-1.27		4.0	0.020	1.38	*
4	36.3	-0.426	-1.91	*	10.6	0.040	2.75	* *
5	50.3	-0.233	-0.45		15.7	0.026	1.84	*
6	58.3	0.617	2.25	*	19.9	0.015	1.10	
7	107.6	-0.151	-0.19		21.8	0.018	1.72	*
8	106.8	-0.145	-0.23		20.5	0.000	0.00	
9	90.2	-1.043	-1.67	*	15.3	0.042	4.00	* *
10	46.5	0.042	0.06		9.2	0.012	1.04	
11	16.2	-0.236	-2.03	*	2.3	0.019	1.31	
12	3.6	0.013	0.75		-3.5	0.035	1.97	*

水减少。9 月变幅最大( $\beta=-1.043$ ),该区降水集中于 7-9 月,此时段各月的降水量都较高,即使  $\beta$  衡量的变幅较小也会对年降水量造成很大的影响,因此,9 月降水的大量减少必然将导致年降水减少。除 6、8 和 10-11 月,温度在其他月份均显著增长,冬春季增幅高于夏秋季,2 月增幅最大,9 月次之。综上,泾河流域 1960-2005 年 4、9 和 11 月均有显著的暖干趋势,且该趋势在 9 月非常明显。

**3.1.2 年代际变化与突变** 图 1 表示了 1960-2005 年泾河流域年降水量和温度 M-K 突变检验结果,可用于分析气候的年代际变化及突变。可以看出,自 60 年代中期以来年降水量(图 1a)整体呈下降趋势,特别是 90 年代以来这种趋势更加显著。年均温度一直呈上升趋势(图 1b),特别是 90 年代以来这种趋势更加显著,上升突变发生在 1994 年。综上可见,泾河流域 1960-2005 年的气候一直趋向暖干,且这种趋势在 90 年代以来更加显著。

3.2 降水和温度与 ENSO 的相关性

**3.2.1 整个时间序列内** 表 3 表明了 1960-2005 年泾河流域降水和温度与 SST 和 SOI 的相关性。可以看出,泾河流域降水与 SST 和 SOI 均有显著的相关性,分别通过了 95%和 90%的显著性检验,说明泾河流域的降水受全球气候变化的影响较显著;降水变化与海温变化呈反相关,而与南方涛动呈正相关。泾河流域温度与 SST 和 SOI 的相关性不显著。可见,泾河流域的降水变化对 ENSO 非常敏感,而温度变化受 ENSO 的直接影响相对较小。

**3.2.2 ENSO 发生时段内** 按照上面 ENSO 事件判别方法,1960-2005 年发生 El Nino 事件 10 次,112 个

月,分别为:1963.7-1963.12、1965.5-1966.2、1968.12-1970.1、1972.4-1973.2、1976.6-1977.1、1982.5-1983.8、1986.10 -1988.1、1991.5 -1992.5、1997.6 -1998.5 和 2002.8-2003.1。发生 La Nina 事件 11 次 140 个月,分别为:1962.9-1963.2、1964.4-1965.1、1967.8 -1968.5、1970.5 -1971.12、1973.4 -1974.5、1975.2 -1976.4、1978.4 -1978.9、1984.10 -1986.2、1988.4-1989.5、1995.8-1996.5 和 1998.9-2000.2。根据事件判别结果,将泾河流域的降水和温度按照冷暖事件的时段分成 2 个类型,分别对其与 SSTA 和 SOI 的相关性进行分析(表 4)。

表 3 1960-2005 年泾河流域全部时间序列降水(PREC)和温度(TEMP)与 SSTA 和 SOI 的相关性

Tab.3 The correlation between the precipitation and temperature in the Jinghe watershed and SSTA and SOI during 1960-2005		
	相关系数	显著水平
PREC - SSTA	-0.078	0.068
PREC - SOI	0.086	0.042
TEMP - SSTA	0.002	0.965
TEMP - SOI	0.0005	0.990

表 4 1960-2005 年泾河流域 ENSO 发生时段内降水(PREC)和温度(TEMP)与 SSTA 和 SOI 的相关性

Tab.4 The correlation between the precipitation and temperature in the Jinghe watershed and SSTA and SOI during ENSO events of 1960-2005				
	El Nino		La Nina	
	相关系数	显著水平	相关系数	显著水平
PREC-SSTA	-0.167	0.078	0.026	0.763
PREC-SOI	0.122	0.199	0.019	0.823
TEMP-SSTA	-0.203	0.032	0.196	0.02
TEMP-SOI	0.178	0.06	0.093	0.276

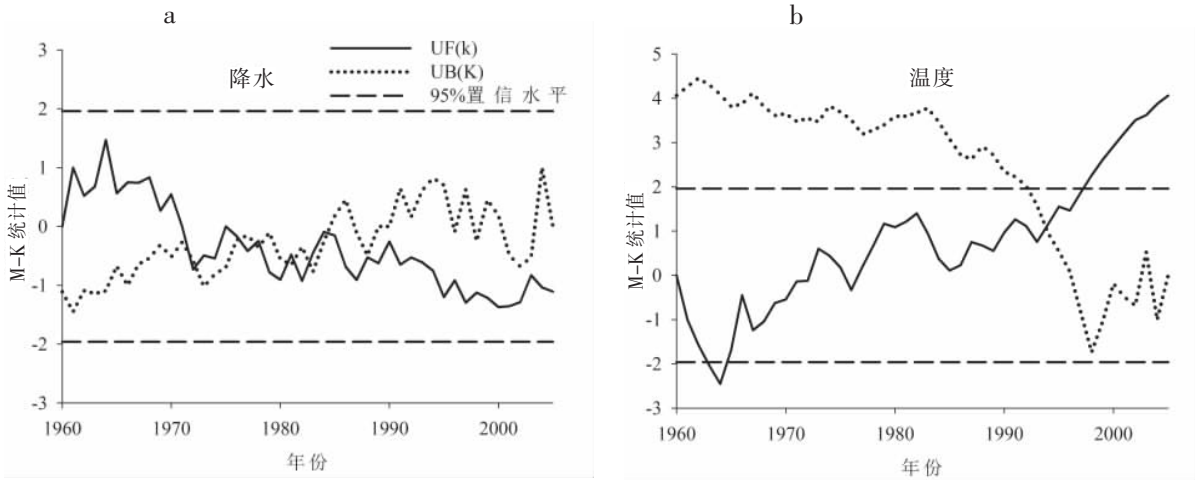


图 1 泾河流域年降水量和温度的突变检验

Fig.1 Abrupt changes of annual mean precipitation and temperature in the Jinghe watershed



可以看出,暖事件发生时,泾河流域的降水变化与海表温度呈显著负相关,通过了 90% 的显著性检验;而温度与海表温度和南方涛动分别呈显著的负相关和正相关,相关性分别通过了 95% 和 90% 的显著性检验。冷事件发生时,仅温度对海表温度有响应,相关性检验通过了 95% 的显著性检验。综上,暖事件对泾河流域的降水和温度变化均有较大影响,而冷事件仅对泾河流域的温度有影响;泾河流域的温度变化对海温变化更加敏感。相关研究表明,在典型的 ENSO 暖状态下,中国大部分地区特别是华北地区偏干<sup>[12]</sup>,而泾河流域的气候受暖事件的影响更大,在一定程度上解释了其气候趋向暖干的原因。

3.3 周期性分析

3.3.1 泾河流域降水和温度周期。图 2 为近 50 年来年降水变化的小波变换系数和方差图。小波方差(图 2a)存在 3 个峰值,表明降水变化有 3 个主周期,

2-3 年的周期震荡最强,为第 1 主周期;7-8 年和 22-23 年分别为第 2 和 3 主周期。小波变换系数图(图 2b)表明各主周期都存在一定的年代际变化。短周期呈小幅波动,1967-1972 年和 1982-1987 年约为 2 年左右,1998-2005 年呈缩短趋势。中长周期一直趋于缩短,从 60 年代的 13 年到 80 年代中期的 8 年,再到 2000 年的 6-7 年。长周期在 90 年代以前相对稳定,但之后明显缩短。综上,年降水的周期呈逐渐缩短的趋势,且这种趋势在 80 年代中期后更加明显,表明降水变化的剧烈程度可能加强。

泾河流域年均温度变化也具有 3 个主周期(图 3a),25 年的周期震荡最强,为第 1 主周期;3-4 年次之,为第 2 主周期;10 年为第 3 主周期。温度周期也存在年代际变化(图 3b)。3-4 年的短周期在 90 年代中期以前变化较小,之后周期明显缩短。10 年的中长周期和 25 年的长周期一直呈延长趋势,特别是 90 年代中期以来,中长周期与长周期合并。综上,温

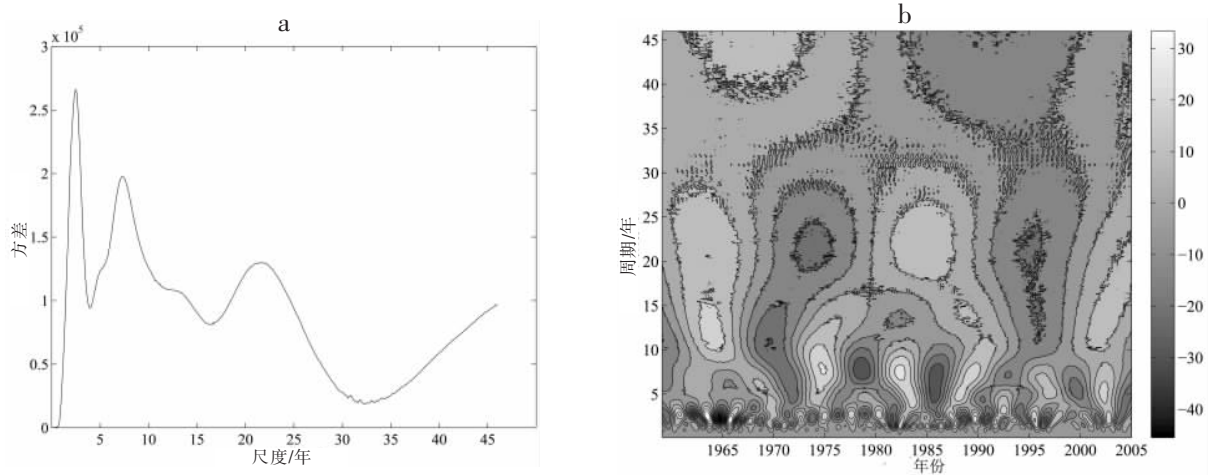


图 2 泾河流域年降水变化的小波方差和变换系数图

Fig.2 Wavelet variances and transform coefficients of the annual precipitation in the Jinghe watershed

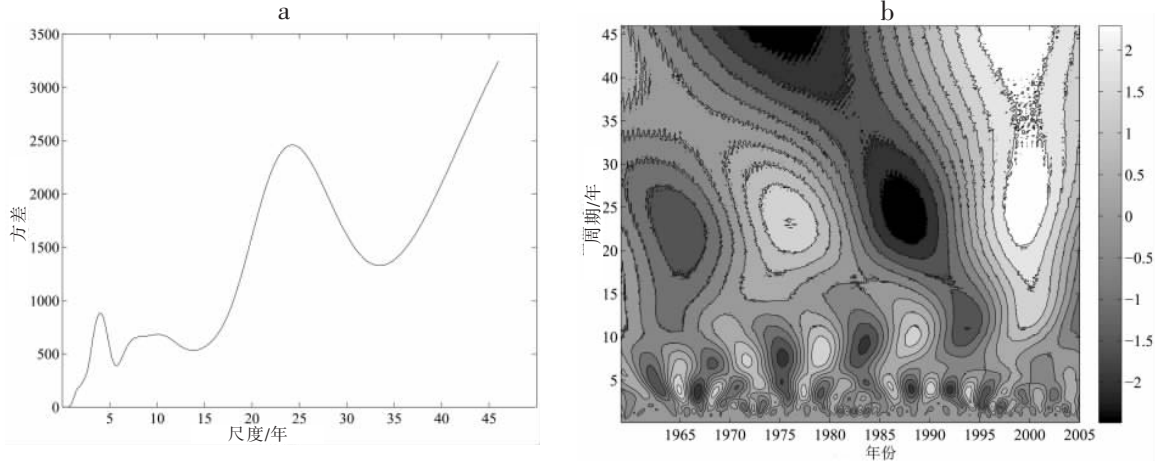


图 3 泾河流域温变化的小波方差和变换系数图

Fig.3 Wavelet variances and transform coefficients of the temprarture in the Jinghe watershed

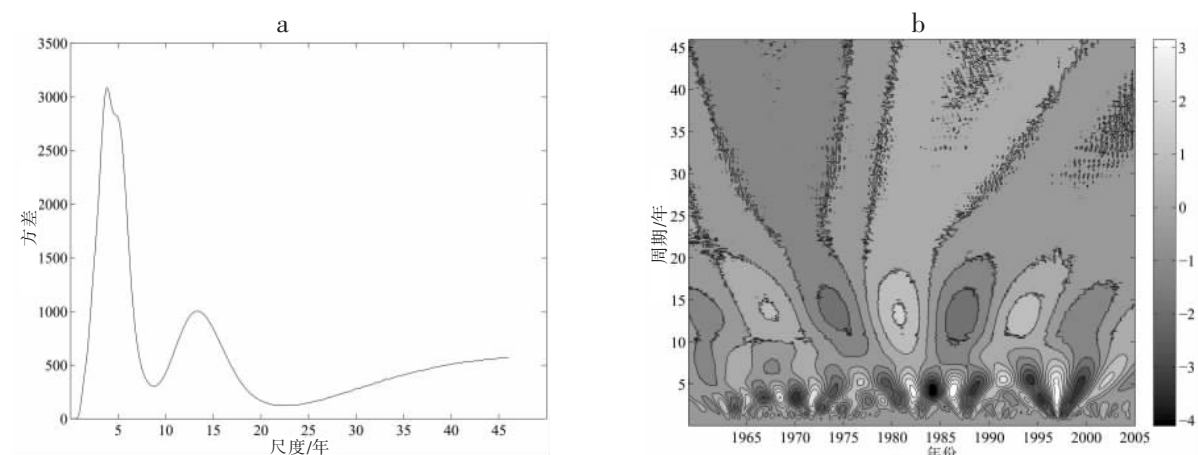


图4 海表温度 SST 指数变化的小波方差和变换系数图  
Fig.4 Wavelet variances and transform coefficients of SST

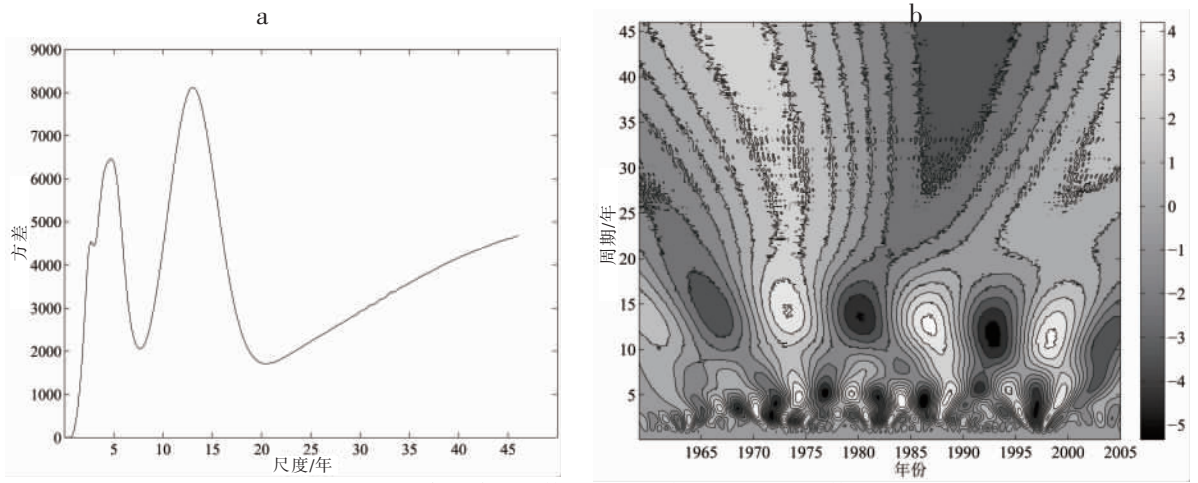


图5 南方涛动指数 SOI 的小波方差和变换系数图  
Fig.5 Wavelet variances and transform coefficients of SOI

度变化短周期趋于缩短,中长周期趋于增长。

**3.3.2 海表温度和南方涛动指数的周期** 海表温度 SST 变化的小波方差有 2 个峰值(图 4a),表明海表温度变化具 2 个周期,其中 4 年的周期震荡最强为第 1 主周期,14 年为第 2 主周期。图 4b 表明了海表温度周期的年代际变化,可以看出,短周期从整体上逐渐增长,60 年代初为 2-3 年,70 年代后期至 80 年代后期为 4-5 年,90 年代以来则为 5-6 年。长周期的起伏变化不大,基本上都在 14 年上下浮动,但在 90 年代中期以来趋于缩短甚至消失,该周期的震荡强度较弱。综上,海表温度的短周期趋于增长,而长周期趋于缩短。

南方涛动指数 SOI 存在 3 个波动周期 (图 5a), 13-14 年的周期震荡最强,为第 1 主周期;4-5 年次之,为第 2 主周期;2-3 年为第 3 主周期,该周期不明显。SOI 周期存在年代际变化(图 5b)。4-5 年的周期整体呈增长趋势,发生于 70 年代中期,并在 2000

年以来与 13-14 年的长周期合并。13-14 年的长周期在整体一直呈缩短趋势,60 年代中期至 70 年代中后期表现为 14-15 年;80 年代以来周期一直缩短,2000 以来表现为 10 年左右。SOI 的短周期趋于增长,而长周期趋于缩短。

**3.3.3 降水和温度与 SST 和 SOI 的周期性联系** 基于上述对泾河流域年均降水和温度与 SST 和 SOI 的周期分析,可以发现,双方在长周期方面没有明显的相关性;但双方短周期的相关性较大。如年降水第 1 主周期与 SOI 的第 3 主周期(2-3 a)相似;年均温度的第 2 主周期与 SST 的第 1 主周期 (4 a)相似。因此,泾河流域的降水变化可能受 SOI 的影响较大,而温度变化可能受到 SST 的影响更大。另外,泾河流域降水、温度与 SST 和 SOI 周期的年代际变化基本上都在 90 年代以来表现地更加明显,这可能对泾河流域 90 年代以来更加显著的暖干化趋势有直接影响。

4 结 论

在分析泾河流域气候变化趋势的基础上,通过研究降水和温度与海表温度和南方涛动的相关性、周期相似性等,探讨了气候变化与 ENSO 的关系。1960–2005 年,泾河流域气候趋向暖干,且这种趋势在 90 年代以来愈加显著。此种气候变化趋势与 ENSO 有显著的关系。从相关性而言,降水对 ENSO 的响应程度强于温度;暖事件对泾河流域气候变化的影响可能大于冷事件。从周期相似性而言,降水可能受南方涛动的影响比较大,而温度可能受海表温度的影响较多。

泾河流域的气候更易受暖事件影响,特别是 90 年代以来气候与 ENSO 的周期变化非常相似,这可能是泾河流域 90 年代以来暖干化趋势更加显著的原因。泾河流域气候变化与 ENSO 的相关性,可能是由于大气遥相关<sup>[1]</sup>原理导致的,由于太平洋—亚洲型遥相关可将 ENSO 的信息传播到亚洲,亚洲季风特别是夏季风将受到太平洋温度和气压的影响,进而影响亚洲夏季风水汽输送和导致降水异常。

参考文献

[1] 孙建奇,袁薇,高玉中. 阿拉伯半岛—北太平洋型遥相关及其与亚洲夏季风的关系. 中国科学: D 辑, 2008, 38 (6): 750–762.

[2] Timilsena J, Piechota T, Tootle G, et al. Associations of interdecadal/interannual climate variability and long-term Colorado River Basin streamflow. *Journal of Hydrology*, 2009, 365(3/4): 289–301.

[3] 陈亚宁,徐宗学. 全球气候变化对新疆塔里木河流域水资源的可能性影响. 中国科学: D 辑, 2004, 34(11):1047–1053.

[4] 朱益民,杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系. 气象学报, 2003, 61(6): 641–654.

[5] Li S, Bates G. Influence of the Atlantic multidecadal os-

cillation on the winter climate of East China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(1): 126–135.

[6] 龚道溢,王绍武,朱锦红. 北极涛动对我国冬季日气温方差的显著影响. 科学通报, 2004, 49(5): 487–492.

[7] 符淙斌,曾昭美. 最近 530 年冬季北大西洋涛动指数与中国东部夏季旱涝指数之联系. 科学通报, 2005, 50(14): 1512–1522.

[8] 张知彬. 欧洲的旅鼠和田鼠种群暴发与厄尔尼诺—南方涛动的关系研究. 科学通报, 2001, 46(3): 197–204.

[9] 薛峰,刘长征. 中等强度 ENSO 对中国东部夏季降水的影响及其与强 ENSO 的对比分析. 科学通报, 2007, 52 (23): 2798–2805.

[10] 李威. 中国北方春季沙尘暴的变化与 ENSO 的关系. 气候变化研究进展, 2006, 2(6): 296–300.

[11] 高辉,王永光. ENSO 对中国夏季降水可预测性变化的研究. 气象学报, 2007, 65(1): 131–137.

[12] 苏明峰,王会军. 中国气候干湿变率与 ENSO 的关系及其稳定性. 中国科学: D 辑, 2006, 36(10): 951–958.

[13] 龚道溢,王绍武. 近百年 ENSO 对全球陆地及中国降水的影响. 科学通报, 1999, 44(3): 315–320.

[14] 信忠保,谢志仁. ENSO 事件对淮河流域降水的影响. 海洋预报, 2005, 22(2): 38–46.

[15] Kim T W, Valdes J B, Nijssen B, et al. Quantification of linkages between large-scale climatic patterns and precipitation in the Colorado River Basin. *Journal of Hydrology*, 2006, 321(1–4): 173–186.

[16] 冉大川. 泾河流域水沙特性及减水减沙效益分析. 水土保持通报, 1992, 12(5): 20–28.

[17] 邱国玉,尹婧,熊育久,等. 北方干旱化和土地利用变化对泾河流域径流的影响. 自然资源学报, 2008, 23(2): 211–218.

[18] 董彦雄,马鹏里,白虎志,等. 泾河流域近 60 年降水演变规律. 干旱地区农业研究, 2004, 22(3): 154–159.

[19] 陈操操,谢高地,甄霖. 泾河流域降雨量变化特征分析. 资源科学, 2007, 29(2): 172–177.

[20] 许武成,马劲松,王文. 关于 ENSO 事件及其对中国气候影响研究的综述. 气象科学, 2005, 25(2): 212–220.

# Climate Changes in Jinghe Watershed and Its Relationship with ENSO

LI Zhi<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, LIU Wenzhao<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;  
2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** As ENSO (El Nino–Southern Oscillation) often leads to alteration in atmospheric circulation and further causes climatic variation, exploring the relationship between regional climate changes and ENSO is helpful for understanding the variation in regional hydrology. This study analyzed the relationship between the climate changes in the Jinghe watershed and ENSO through Mann–Kendall, correlation test and wavelet analysis. Results showed that climate tended to be warmer and drier during 1960–2005, and this trend has been more significant since the 1990s. Climate changes in the Jinghe watershed were closely correlated with ENSO. Precipitation was more sensitive to ENSO than temperature. Precipitation was more sensitive to SOI and temperature was more sensitive to SST. The impacts of ENSO warm events on climate changes in the Jinghe watershed were more significant than cold events.

**Key words:** Jinghe watershed; climate change; ENSO; Mann–Kendall; wavelet analysis

本文引用格式：  
李志, 王健, 刘文兆. 泾河流域气候变化及其与 ENSO 的关系. 地理科学进展, 2010, 29(7): 833–839.