

太湖流域降水、气温与径流变化趋势及周期分析

刘兆飞¹, 王翊晨^{1,2}, 姚治君^{1*}, 康慧敏^{1,2}

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 基于太湖流域及周边气象站 1957—2009 年气象数据, 采用 Mann-Kendall 和小波分析方法, 分析其平均气温、极端最高和最低气温、降水量、最大日降水量及径流量的变化趋势和周期特征, 并对流域径流量的变化及与降水量的耦合关系等进行分析。结果表明: 太湖流域在过去 50 多年整体呈增温增湿的趋势; 靠近大城市的站点气温升温趋势明显高于其他站点; 流域夏季的极端高温事件有增强的趋势; 流域年降水量呈不显著的增加趋势, 而最大日降水量却呈显著的增加趋势, 从一定程度上反映出流域内极端降水有增强的趋势; 降水量和径流量的变化趋势较为一致, 都呈不显著的增加趋势, 且两者增加幅度基本相当; 流域各要素存在约 4 a 的显著振荡周期和 8 a 的不显著振荡周期。

关键词: 水文; 小波分析; Mann-Kendall; 太湖流域

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2011)09-1575-10

太湖流域行政区划分属江苏省、浙江省、上海市和安徽省等 4 省(市), 包括上海、苏州、无锡、常州、杭州、嘉兴和湖州等城市, 是我国经济最发达、产业最密集的地区之一。流域以占全国 3% 的人口(全流域 $3\ 625 \times 10^4$ 人)、0.4% 的国土面积(流域面积 $36\ 895\ \text{km}^2$) 创造出 10.8% 的国内生产总值, 在我国经济建设中具有举足轻重的作用。随着流域社会经济的发展, 太湖流域的水问题日益突出, 流域对水资源质和量的要求越来越高, 洪涝灾害对社会经济发展造成的影响越来越大。另一方面, 在全球气候变化背景下, 区域气候变暖将使水文循环加快, 造成陆地降水分布不均匀, 旱涝等自然灾害的发生频率和危害程度均有增加的可能。

自 20 世纪 90 年代以来, 太湖流域大洪水事件发生频繁, 这与全球气候变化引起的流域气候变化有一定的关系^[1]。已有学者专门针对流域气候要素的变化趋势进行了研究^[2], 也有学者对气候变化对太湖最高水位^[3]、蓝藻^[4-5] 等的影响, 以及夏季风与洪旱灾害间的相互关系^[6] 进行了研究。结果表明流域气温升高、降水减少、日照时数增多, 其对最高水位和蓝藻暴发都起着重要的影响作用。此外, 针对环境变化的另一主要问题土地利用变化对流域水文过程的影响, 也有许多学者开展了一系列的研究^[7-8]。

太湖流域河网密集、水文过程复杂, 气候变化与径流变化之间关系的研究亟待进一步深入与加强。此外, 流域当前的另一个突出问题是极端天气事件频发, 而目前针对极端天气变化的研究亦较少。本文基于太湖流域气象、水文数据, 分别采用非参数统计检验和小波分析的方法, 分析流域降水、气温和径流的时空变化趋势及周期特征, 其中包括极端气温和降水量, 并对气候变化和径流变化之间的关系进行探讨, 对阐明气候变化对太湖流域水资源及洪

收稿日期: 2010-10-13; 修订日期: 2011-05-16。

基金项目: 国家科技重大专项子课题(2008ZX07526-001-03); 国家科技支撑计划课题(2009BAK56B05)。

第一作者简介: 刘兆飞(1982-), 男, 河南郑州人, 助理研究员, 博士, 主要研究水文水资源及气候变化影响。

* 通信作者简介: 姚治君, 男, 研究员。E-mail: yaozj@igsnnr.ac.cn

涝灾害的影响等问题具有一定的科学价值和实用意义。

1 研究区概况

太湖流域位于亚热带季风气候区,是世界上最严重的气候脆弱区之一,季风雨带的位置变化直接影响着该流域的干旱与洪涝^[9]。流域具有四季分明、雨量丰富、热量充裕的气候特点,年平均气温在 14.9~16.2℃之间,南高北低,呈纬向分布^[10]。流域地处长江三角洲的南部,三面临江滨海,一面环山;北抵长江,东临东海,南滨钱塘江,西以天目山、茅山等山区为界,流域面积约 36 895 km²。流域地势西部高、东部低。西部为山区,属天目山山区及茅山山区的一部分,中间为平原河网和以太湖为中心的洼地及湖泊,北、东、南周边受长江和杭州湾泥沙堆积影响。流域地貌类型包括山地丘陵和平原,其中山地丘陵面积约占 25%,主要分布于流域西部;平原是流域的主体,占 75%,分布于流域北部、东部和南部。

2 数据及方法

本文选取太湖流域及其周边 10 个国家基本气象站的气温和降水数据,包括平均气温、极端最高气温、极端最低气温、降水量和最大日降水量等 5 个气象要素。数据由中国气象局国家气象中心气象资料室提供,站点位置分布见图 1。数据包括 1957—2009 年共 53 a 的月、季节和年序列。利用泰森多边形法来计算各个要素的流域平均值。流域径流数据从太湖流域管理局获得,包括三、四级分区(水资源分区)的 1956—2008 年的年径流量序列。

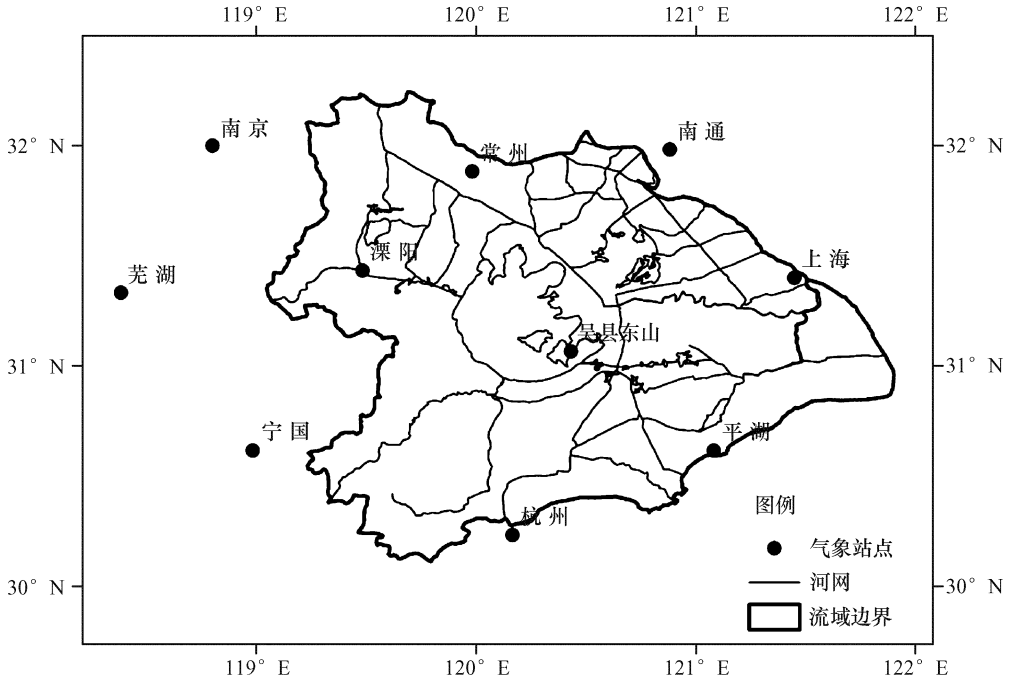


图 1 太湖流域位置及气象站点分布

Fig. 1 Location of the Taihu Lake Basin and the meteorological stations

研究主要采用非参数统计检验方法(Mann-Kendall 方法,以下简称 MK),检验各个水文气象要素的长期变化趋势,并计算了相应的 MK 倾斜度^[11](β)以分析数据序列单调变化趋

势的幅度。作为一种非参数统计检验方法, MK 方法不需要样本服从特定的分布, 可以直接检验时间序列的单调变化趋势, 因此被广泛地应用于水文气象时间序列的趋势分析方面^[12-19]。MK 的统计量 Z 和倾斜度 β 由式(1)~(5)计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} & S < 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_t [t(t-1)(2t+5)]}{18} \quad (2)$$

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中: x 为变量, n 为样本长度, t 为存在变量值相等的情况。

$$\beta = \text{median} \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad \forall j > i \quad (5)$$

小波分析被广泛应用于气候系统的多时间尺度分析研究中, 它是在傅里叶变换基础上引入窗口函数, 从而把时间序列分解为时间和频率的贡献, 对于获取一个复杂时间序列的调整规律, 诊断气候变化内在层次结构, 分辨时间序列在不同时间尺度上的演变特征等非常有效^[20]。本文用到的小波分析主要基于 Torrence 和 Compo 的研究^[20], 小波函数用 Morlet 小波, 包括模和实部两个主要变量。模的大小表示特征时间尺度信号的强弱, 即不同特征时间尺度信号在不同时间上的分布和位相。各水文气象变量的数据序列 $f(n\Delta t)$ ($n=1, 2, \dots, 53$; $\Delta t=1$) 和 Morlet 小波函数代入离散点小波变换的方程式:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{k=1}^n f(k\Delta t) \bar{\varphi}\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \quad (6)$$

取不同的 a 和 b , 计算小波变换的模平方和实部, 绘制成图进行分析。

3 结果分析

3.1 单调变化趋势的 MK 检验结果

各个气候要素流域平均值年和月序列的 MK 检验结果(图2)表明, 太湖流域在过去 50 多年整体呈增温增湿的趋势, 这一结论与以往对该地区平均气温和降水量变化趋势的研究结果一致^[2]。但这些研究并没有分析极端气候要素的变化趋势, 也未给出气候要素月序列变化的结果。

年平均气温、极端最高和最低气温都表现出在 0.05 显著性水平下(下同)的显著上升趋势(图2)。各个月份的平均气温及极端最低气温也都表现出了上升趋势, 其在 1—6 月及 9 月和 10 月表现得更为显著, 升幅都超过了 0.2 °C/10 a, 而极端最低气温的升幅要明显高于平均气温。极端最高气温在大多数月份也呈上升趋势, 但在冬季的 1 月和 12 月则呈下降

趋势。另外一点值得注意的是,夏季7月和8月的极端最高气温升幅明显高于平均气温和极端最低气温,这说明流域夏季的极端高温有增强的趋势。流域年降水量虽然呈不显著的增加趋势,但最大日降水量却呈显著的增加趋势(图2),从一定程度上反映出流域内极端降水有增强的趋势,这与20世纪90年代以来流域暴雨及大洪水事件频繁发生相吻合。从各月变化趋势上看,降水量和最大日降水量在大多数月份的变化趋势都不显著,比较特殊的是1月,两个要素都呈显著的增加趋势;另一个需要注意的是夏季(6—8月)降水量和最大日降水量都呈增加趋势,其降水量增幅约为 $10\text{ mm}/10\text{ a}$ 。

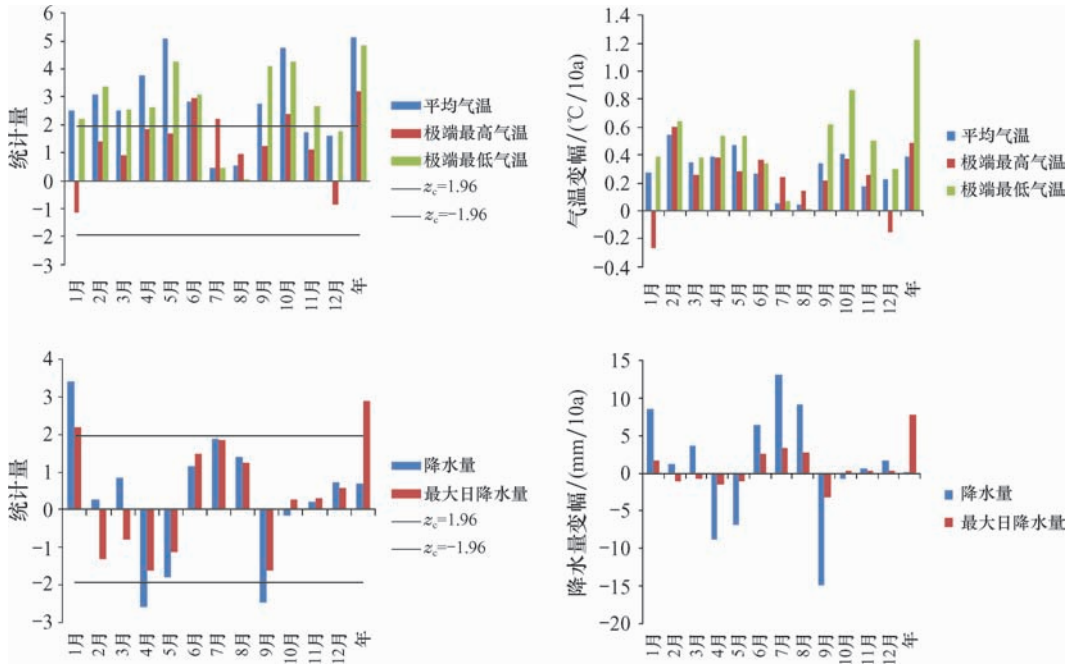
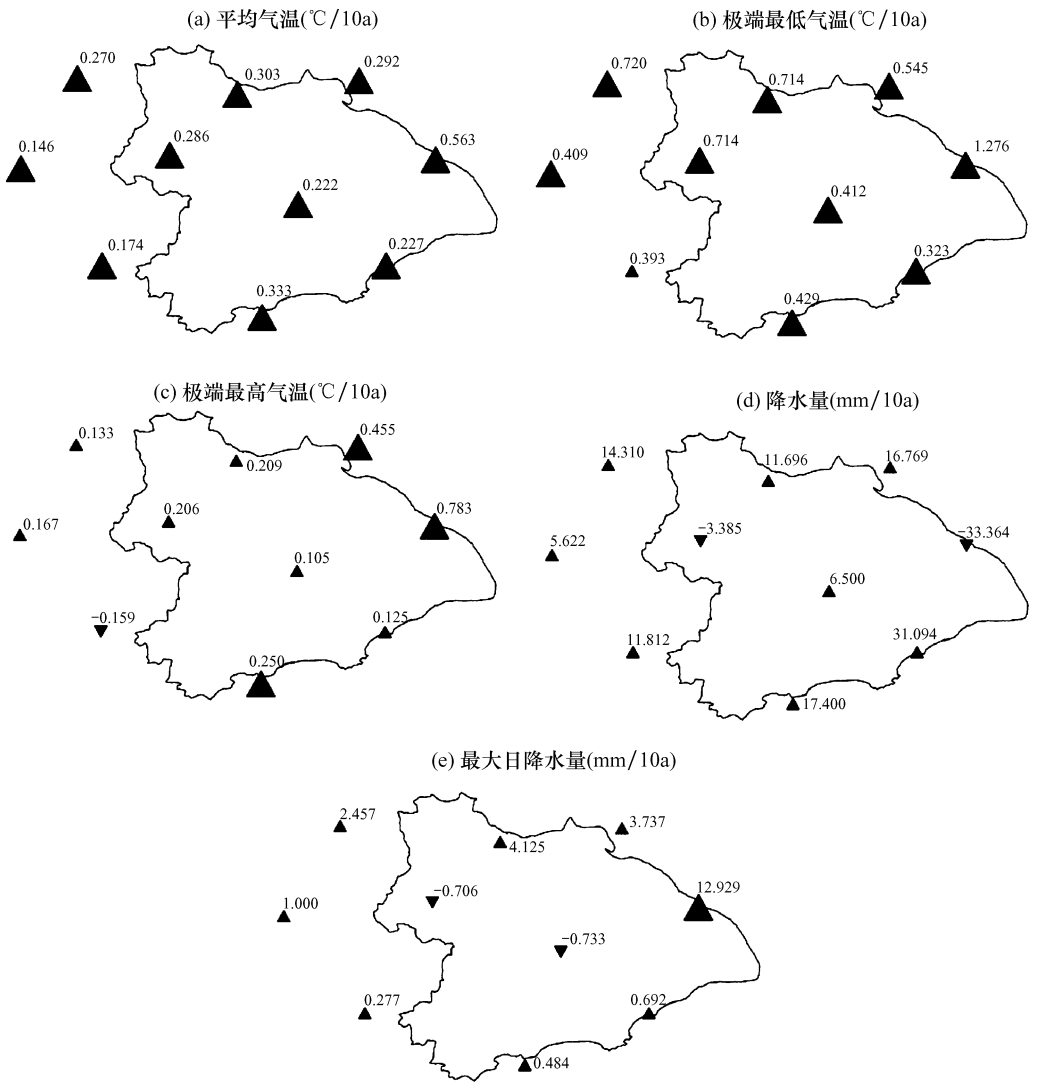


图2 流域各气象要素 MK 统计检验结果(左、右图分别对应 MK 统计量 Z_c 和倾斜度)

Fig. 2 Trends of monthly and annual air temperature for the Z statistics of MK test and magnitudes of trend

从各个站点气象要素年序列 MK 统计检验的空间分布(图3)来看,所有10个站点的平均气温和极端最低气温都表现出上升趋势。其中,所有站点平均气温的上升趋势都显著,增幅大多在 $0.2 \sim 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,有9个站点极端最低气温的上升趋势亦很显著,增幅大多在 $0.3 \sim 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。各站点极端最高气温的变化趋势并不如平均气温和极端最低气温那么显著,但值得注意的是,靠近上海、苏州、无锡和杭州等城市的站点极端最高气温升温趋势则很显著。除上海和溧阳站年降水量呈略微的下降趋势外,其它站点都表现出不显著的增加趋势,各站点年降水量变幅在 $-33.364 \sim 31.094\text{ mm}/10\text{ a}$ 。年内日最大降水量变化趋势最为特殊的是上海站,在其他站点变化趋势都不显著的情况下,上海站日最大降水量呈显著的增加趋势,增幅达 $12.929\text{ mm}/10\text{ a}$ 。

在冬季的1月和夏季的7月两个代表性月份各要素的 MK 检验的空间分布中(表1),1月各个站点的平均气温和极端最低气温尽管都呈上升趋势,但其变化趋势并不如年序列显著,平均气温增幅在 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 左右。而极端最低气温增幅在 $0.08 \sim 0.46\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 之间,只有少数几个站点的上升趋势显著,平均气温和极端最低气温上升幅度分别超过了 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。与流域气温整体呈上升趋势不同,有9个站点的1月极端最高气温表



注:正、反三角分别代表上升和下降趋势,三角形的大小分别表示趋势显著与不显著,各符号标注的数值为 MK 倾斜度。

图3 各站点气象要素年序列变化趋势的显著性及其 MK 倾斜度

Fig. 3 Trends of meteorological variables for annual series with its manitude value at each station

现出不显著的下陷趋势,降幅在 0.2 °C/10 a 左右。尽管与年降水量整体呈增加趋势一致,但 1 月降水量的增加趋势更为显著,10 个站点都呈显著增加趋势,且增幅接近 10.0 mm/10 a。1 月日最大降水量也都表现出增加的趋势,且有 9 个站点的趋势显著;7 月各气象要素的变化趋势则不同于 1 月和年序列。最大的特点是绝大多数站点气温和降水的趋势都不显著(表 1)。7 月,流域西部的平均气温及西南部的极端最低气温呈不显著的下陷趋势,其余地区呈不显著的上升趋势,大多数站点的变化幅度小于 0.1 °C/10 a,部分站点甚至接近 0.0。流域大多数站点 7 月极端最高气温的上升趋势亦不显著。但临近上海、苏州、无锡的 2 个站点却呈显著的上升趋势,其增幅都超过了 0.4 °C/10 a。所有站点 7 月的降水量都呈增加趋势,但只有杭州站与宁国站趋势显著。对于 7 月日最大降水量来说,10 个站中,除了芜湖站呈下降趋势外,其余各站都表现出增加趋势。

表 1 各站点气象要素 1 月和 7 月序列变化趋势的显著性及其 MK 倾斜度

Table 1 Trends of meteorological variables in January and July with its magnitude value at each station

站点	平均气温/ ($^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)		极端最高气温/ ($^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)		极端最低气温/ ($^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)		降水量/ ($\text{mm}/10\text{ a}$)		最大日降水量/ ($\text{mm}/10\text{ a}$)	
	1 月	7 月	1 月	7 月	1 月	7 月	1 月	7 月	1 月	7 月
宁国	0.1 Δ	-0.05 ∇	-0.2 ∇	-0.10 ∇	0.3 Δ	0.00 -	9.8 \blacktriangle	17.8 \blacktriangle	2.4 \blacktriangle	3.2 Δ
南京	0.3 \blacktriangle	0.00 -	-0.1 ∇	0.18 Δ	0.5 \blacktriangle	0.22 Δ	4.1 \blacktriangle	6.5 Δ	1.5 \blacktriangle	1.2 Δ
常州	0.3 \blacktriangle	0.00 -	-0.2 ∇	0.13 Δ	0.4 \blacktriangle	0.09 Δ	6.3 \blacktriangle	10.7 Δ	2.1 \blacktriangle	3.4 Δ
溧阳	0.3 \blacktriangle	0.02 Δ	-0.2 ∇	0.25 \blacktriangle	0.4 \blacktriangle	0.05 Δ	8.8 \blacktriangle	10.9 Δ	2.1 \blacktriangle	2.7 Δ
吴县东山	0.2 Δ	0.00 -	-0.4 ∇	0.13 Δ	0.2 Δ	-0.04 ∇	9.6 \blacktriangle	9.3 Δ	2.4 \blacktriangle	2.5 Δ
上海	0.4 \blacktriangle	0.24 Δ	-0.2 ∇	0.44 \blacktriangle	0.6 \blacktriangle	0.25 Δ	9.0 \blacktriangle	13.9 Δ	2.7 \blacktriangle	4.7 \blacktriangle
杭州	0.3 \blacktriangle	0.09 Δ	-0.3 ∇	0.24 \blacktriangle	0.4 \blacktriangle	-0.04 ∇	9.5 \blacktriangle	19.2 \blacktriangle	1.6 Δ	7.9 Δ
平湖	0.2 Δ	0.00 -	-0.2 ∇	0.21 Δ	0.1 Δ	0.00 -	9.9 \blacktriangle	10.1 Δ	2.3 \blacktriangle	2.0 Δ
南通	0.3 \blacktriangle	0.07 Δ	-0.1 ∇	0.47 \blacktriangle	0.5 \blacktriangle	0.10 Δ	6.5 \blacktriangle	10.0 Δ	1.9 \blacktriangle	3.1 Δ
芜湖	0.1 Δ	-0.07 ∇	0.1 Δ	0.16 Δ	0.2 Δ	0.00 -	9.6 \blacktriangle	2.6 Δ	2.6 \blacktriangle	-0.7 ∇

注:正、反三角分别代表上升和下降趋势,实心、空心三角形分别表示趋势显著与不显著。

除气温和降水等气象要素外,本文亦分析了过去 50 多年流域径流量的变化趋势(表 2)。总体上看,太湖流域降水量和径流量的变化趋势较为一致。整个太湖流域降水量和径流量在过去 50 多年都呈不显著的增加趋势,且两者增加幅度基本相当。湖西及湖区降水和径流在过去都呈减少趋势,但趋势都不显著,两者减少幅度亦基本接近,径流量减幅略大。径流量的非参数统计检验结果显示只有黄浦江区的径流量变化趋势显著,且呈增加趋势。

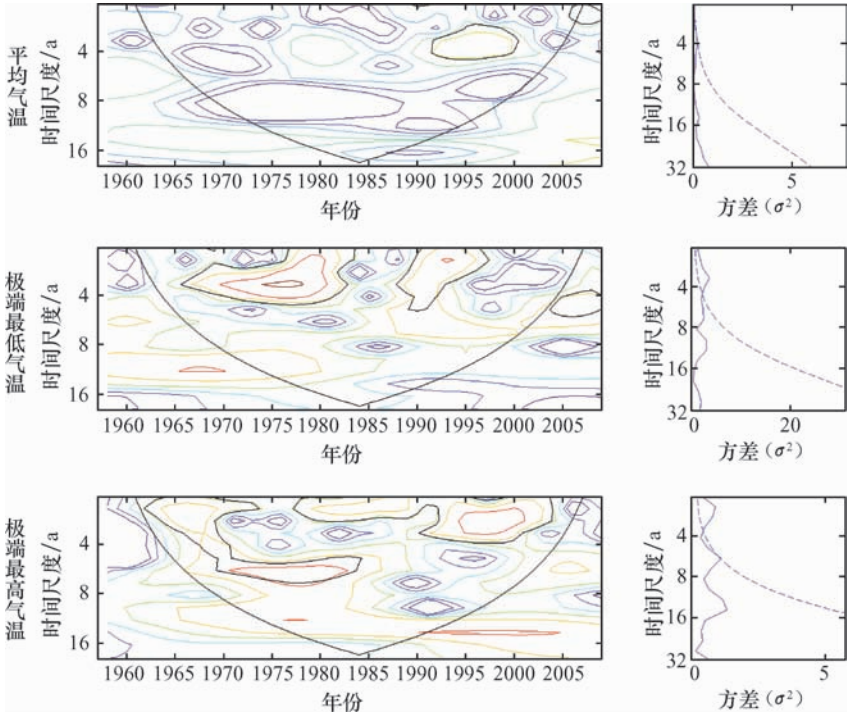
表 2 太湖流域三级分区降水量和径流量的 MK 统计检验结果

Table 2 Results of the MK test for precipitation and runoff at the third level division of the basin

三级分区及流域	降水量		径流量	
	统计量	$\beta/(\text{mm}/10\text{a})$	统计量	$\beta/(\text{mm}/10\text{a})$
湖西及湖区	-1.05	-2.05	-1.53	-2.18
武阳区	1.23	2.27	1.79	2.41
杭嘉湖区	0.70	1.14	0.88	0.96
黄浦江區	1.08	1.68	2.20	2.41
太湖流域	0.70	0.11	0.01	0.11

3.2 周期变化的小波分析结果

气温、降水和径流要素流域平均值年序列的小波分析结果包括小波变换及方差(图 4 和图 5)。小波变换图中蓝色等值线表示负值,代表要素值偏低;绿至红色等值线表示正值,代表要素值偏高;等值线的中心对应突变点。小波方差图给出了各个振荡周期在 0.05 显著



注:小波方差图中的虚线代表0.05的显著性水平。下同。

图4 太湖流域气温的小波分析

Fig.4 Results of the Morlet wavelet for air temperature at the Taihu Lake Basin

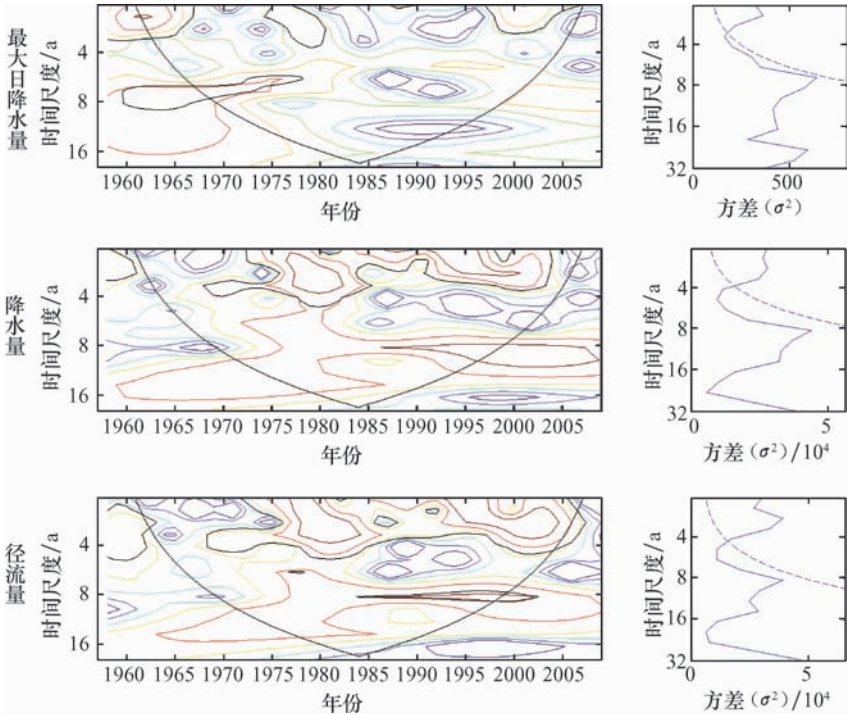


图5 太湖流域降水和径流的小波分析

Fig.5 Results of the Morlet wavelet for precipitation and runoff at the Taihu Lake Basin

性水平下的显著性。小波变换结果显示,流域气温、降水和径流要素存在多重时间周期尺度上的嵌套复杂结构。

气温各要素(平均气温、极端最低和最高气温)的小波分析结果显示(图4):流域平均气温分别存在约4 a的显著振荡周期和8 a的不显著振荡周期,无论4 a或是8 a的振荡周期,结果都表明流域在2009年后处于偏暖期;极端最低气温大致也存在3~4 a的显著振荡周期和9~11 a的不显著振荡周期,其中,3~4 a的振荡周期显示流域极端最低气温在2009年后正处于高值期,而9~11 a的振荡周期表明其在2009年后即将进入高值期;极端最高气温的小波分析结果显示其明显存在三个振荡周期,分别为1~2 a、6~7 a和15~16 a,其中,1~2 a和6~7 a的振荡周期显著,而15~16 a的振荡周期不显著;6~7 a的振荡周期表明流域极端最高气温在2009年后正处于高值期,而15~16 a的振荡周期显示其处于低值段的末期,即将向高值期转变。

流域年最大日降水量、年降水量和年径流量的小波分析结果表明(图5),流域年最大日降水量存在3个振荡周期,分别为2~3 a、7~8 a及29~30 a。其中,2~3 a的振荡周期显著,7~8 a的振荡周期也基本接近0.05的显著性水平,而29~30 a的振荡周期不显著。2~3 a的振荡周期显示1991—1994年间和1998—2001年间流域最大日降水量处于高值期,即暴雨强度较高;2~3 a和7~8 a的振荡周期都表明流域年最大日降水量在2009年正处于低值段的末期,即暴雨强度在2009年后有增强的趋势。流域年降水量分别存在3~4 a的显著振荡周期和8 a的不显著振荡周期,而后者也接近0.05的显著性水平;3~4 a的振荡周期表明流域在2004—2009年间处于降水偏少期,之后有向多雨期转变的趋势;而8 a的振荡周期显示流域在20世纪80年代末期至2009年间处于降水偏少期,其趋势仍会持续若干年,但2009年已经处于少雨期的末段,即将向多雨期转变。流域年径流量的小波分析结果与年降水量较为一致,存在3 a的显著振荡周期和接近显著性水平的8 a振荡周期;而8 a的振荡周期也表明流域年径流量在2000—2009年间处于枯水期,而2009年后已经进入枯水期的末段,之后有向丰水期转变的趋势。

4 结论与讨论

本文基于非参数统计检验的MK法和小波分析方法,对太湖流域平均气温、极端最高和最低气温、最大日降水量、降水量及径流量的单调变化趋势和周期特征进行了分析,初步得到如下结论:

(1) 太湖流域在过去50多年整体呈增温增湿的趋势,这与已有研究结论一致。此外,所有月份的平均气温和极端最低气温也都表现出上升趋势,最大升幅超过了 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;大多数月份的极端最高气温也呈上升趋势。

(2) 从时间特征上看,夏季极端最高气温升幅明显高于平均气温和极端最低气温,这说明流域夏季的极端高温有增强的趋势;空间特征表明,靠近上海、苏州、无锡和杭州等大城市的站点气温升温趋势明显高于其他站点。

(3) 流域年降水量虽然呈不显著的增加趋势,但最大日降水量却呈显著的增加趋势,从一定程度上反映出流域内极端降水有增强的趋势,这与20世纪90年代以来流域暴雨及大洪水事件频繁发生相吻合。

(4) 太湖流域降水量和径流量的变化趋势较为一致,都呈不显著的增加趋势,且两者增加幅度基本相当。从不同分区特征看,只有黄浦江区的径流量变化趋势显著,且呈增加趋

势;湖西及湖区降水和径流在过去都呈减少趋势,径流量减幅略大。

(5) 流域平均气温存在约 4 a 的显著振荡周期和 8 a 的不显著振荡周期,极端最低气温有 3~4 a 的显著振荡周期和 9~11 a 的不显著振荡周期,极端最高气温存在 1~2 a 和 6~7 a 的显著振荡周期和 15~16 a 的不显著振荡周期。平均气温和极端气温的振荡周期显示,2009 年以后,流域平均气温和极端气温都处于高值期,或即将进入高值期。

(6) 流域降水量和径流量小波分析结果也较为一致,都存在 3~4 a 的显著振荡周期和接近显著性水平的 8 a 振荡周期,流域最大日降水量也有 2~3 a 的显著振荡周期和接近显著性水平的 7~8 a 振荡周期。

参考文献 (References):

- [1] 施雅风,朱季文,谢志仁,等. 长江三角洲及毗连地区海平面上升影响预测与防治对策[J]. 中国科学 D 辑,2000,30(3):225-232. [SHI Ya-feng, ZHU Ji-wen, XIE Zhi-ren, et al. Prediction for impacts of sea level rise over the Changjiang River Delta and its adjacent area. *Since in China Series D*,2000,30(3):225-232.]
- [2] 黄俊雄,徐宗学. 太湖流域 1954—2006 年气候变化及其演变趋势[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(1):33-40. [HUANG Jun-xiong, XU Zong-xue. Spatial-temporal characteristics of long-term trend for climate change in the Taihu Basin during 1954—2006. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2009,18(1):33-40.]
- [3] 尹义星,许有鹏,陈莹. 太湖最高水位及其与气候变化、人类活动的关系[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(7):609-614. [YIN Yi-xing, XU You-peng, CHEN Ying. Maximum waterlevel of Taihu Lake and its relation to the climate change and human activities. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2009,18(7):609-614.]
- [4] 商兆堂,任健,秦铭荣,等. 气候变化与太湖蓝藻暴发的关系[J]. 生态学杂志,2010,29(1):55-61. [SHANG Zhaotang, REN Jian, QIN Ming-rong, et al. Relationships between climatic change and cyanobacterial bloom in Taihu Lake. *Chinese Journal of Ecology*, 2010,29(1):55-61.]
- [5] 王成林,潘维玉,韩月琪,等. 全球气候变化对太湖蓝藻水华发展演变的影响[J]. 中国环境科学,2010,30(6):822-828. [WANG Cheng-lin, PAN Wei-yu, HAN Yue-qi, et al. Effect of global climate change on cyanobacteria bloom in Taihu Lake. *China Environmental Science*,2010,30(6):822-828.]
- [6] 尹义星,许有鹏,陈莹. 1950—2003 年太湖流域洪旱灾害变化与东亚夏季风的关系[J]. 冰川冻土,2010,32(2):381-388. [YIN Yi-xing, XU You-peng, CHEN Ying. Relationship between flood/drought disasters and east asian summer monsoon in the Taihu Lake Basin during 1950—2003. *Journal of Glaciology and Geocryology*,2010,32(2):381-388.]
- [7] 高俊峰. 太湖流域土地利用变化及洪涝灾害响应[J]. 自然资源学报,2002,17(2):150-156. [GAO Jun-feng. Flood response to land use change in Taihu Lake Basin. *Journal of Natural Resources*,2002,17(2):150-156.]
- [8] 万荣荣,杨桂山. 流域土地利用/覆被对洪峰的影响研究——以太湖上游西苕溪流域为例[J]. 自然资源学报,2009,24(2):318-327. [WAN Rong-rong, YANG Gui-shan. The Influence of land-use and land-cover on flood peak—A case study of Xitiao River Basin in the headwater region of Taihu Lake. *Journal of Natural Resources*,2009,24(2):318-327.]
- [9] 李恒鹏,杨桂山,金洋. 太湖流域土地利用变化的水文响应模拟[J]. 湖泊科学,2007,19(5):537-543. [LI Heng-peng, YANG Gui-shan, JIN Yang. Simulation of hydrological response of land use change in Taihu Basin. *Journal of Lake Science*,2007,19(5):537-543.]
- [10] 张兴榆,黄贤金,赵小凤,等. 环太湖地区土地利用变化对植被碳储量的影响[J]. 自然资源学报,2009,24(8):1343-1353. [ZHANG Xing-yu, HUANG Xian-jin, ZHAO Xiao-feng, et al. Impacts of land use change on the vegetation carbon storage in the region around Taihu Lake. *Journal of Natural Resources*,2009,24(8):1343-1353.]
- [11] Hirsch R M, Slack J R. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence [J]. *Water Resources Research*,1984,20(6):727-732.
- [12] Lettenmaier D P, Wood E F, Wallis J R. Hydro-climatological trends in the continental United States: 1948—88 [J]. *Journal of Climate*, 1994,7:586-607.
- [13] Burn D H. Hydrologic effects of climatic change in West Central Canada [J]. *Journal of Hydrology*,1994,160:53-70.
- [14] Gan T Y. Hydroclimatic trends and possible climatic warming in the Canadian Prairies [J]. *Water Resources Research*, 1998,34(11):3009-3015.

- [15] Yue S, Pilon P, Phinney B. Canadian streamflow trend detection: Impacts of serial and cross-correlation [J]. *Hydrological sciences journal*, 2003, 48(1): 51-63.
- [16] Fu G B, Chen S L, Liu C M, *et al.* Hydro-climatic trends of the Yellow River Basin for the last several decades [J]. *Climatic Change*, 2004, 65: 149-178.
- [17] Xu Z X, Li J Y, Liu C M. Long-term trend analysis for major climate variables in the Yellow River Basin [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21: 1935-1948.
- [18] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis [J]. *Journal of hydrology*, 2008, 349: 350-363.
- [19] Xu Z X, Liu Z F, Fu G B, *et al.* Trends of major hydroclimatic variables in the Tarim River Basin during the past 50 years [J]. *Journal of Arid Environment*, 2010, 74: 256-267.
- [20] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79: 61-78.

Trend and Periodicity of Precipitation, Air Temperature and Runoff in the Taihu Lake Basin

LIU Zhao-fei¹, WANG Yi-chen^{1,2}, YAO Zhi-jun¹, KANG Hui-min^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Trend and periodicity of mean air temperature, maximum air temperature, minimum air temperature, maximum daily precipitation, precipitation, and runoff over the Taihu Lake Basin, which is one of the most developed regions in China, were analyzed in this study. The non-parametric Mann-Kendall test and Morlet wavelet were used to detect trends and periodicity of major hydro-climatic variables respectively. Results showed that air temperature experienced an increasing trend, while precipitation and runoff exhibited a decreasing trend during the past 50 years. Air temperature of stations located near big cities showed much greater increasing trends than that in other stations, which might be due to urban heat island effect. Maximum air temperature in summer, a season with the highest air temperature in a year, showed much greater increasing trends than mean and minimum air temperature. It was included that extreme higher air temperature events in summer exhibited an increasing trend during the past 50 years. Although annual precipitation in the basin exhibited an insignificant increasing trend, maximum daily precipitation did show an increasing trend which is significant at 95% confidence level. It indicated that extreme higher precipitation events (storms) also experienced an increasing trend in the past. Trends of runoff were similar with that of precipitation. Both of runoff and precipitation showed insignificant increasing trends, and magnitude of these trends was with little difference. There existed significant periods of about 4 years and insignificant periods of about 8 years for all six hydro-climatic variables at 95% confidence level, included mean air temperature, maximum air temperature, minimum air temperature, maximum daily precipitation, precipitation, and runoff over the Taihu Lake Basin.

Key words: hydrology; Morlet wavelet analysis; Mann-Kendall test; Taihu Lake Basin