

Analysis of Water Temperature Variation in Tuotuohe Area in Source Regions of the Yangtze River

Ming Xiong¹, Qijiang Li², Shan Zou¹

¹Bureau of Hydrology of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

²Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Qinghai Province, Xining Qinghai

Email: xiongm@cjh.com.cn

Received: Feb. 26th, 2018; accepted: Mar. 11th, 2018; published: Mar. 19th, 2018

Abstract

Based on the monthly measured water temperature data from 1977 to 2015 at Tuotuohe hydrological station in source region of the Yangtze River, the inter-annual variability of water temperature from May to October above 0°C was analyzed. The results show that the cumulative water temperature above 0°C increased obviously at Tuotuohe hydrological station. The average cumulative value increased from 189.6°C over the period of 1977 to 1980, with an average daily temperature increase of 1.2°C from 2011 to 2015. However, the number of days each year when the water temperature above 0°C shows no significant change trend, with an average of 161 days per year. Water temperature increases significantly from May to September, increasing by 0.6°C, 1.6°C, 1.7°C, 1.1°C and 1.0°C respectively from 2011 to 2015. The mutation of temperature change in each month occurred between 2005 and 2007, most of them in 2005 and 2006. There is a clear 28-year time-scale change cycle from June to September. While in May and October, the periodic characteristics are not obvious due to the low water temperature near 0°C.

Keywords

Temperature, Source Region, Change Trend, Periodic Analysis, The Yangtze River

长江沱沱河源区水温变化规律分析

熊明¹, 李其江², 邹珊¹

¹长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

²青海省水文水资源勘测局, 青海 西宁

Email: xiongm@cjh.com.cn

收稿日期: 2018年2月26日; 录用日期: 2018年3月11日; 发布日期: 2018年3月19日

作者简介: 熊明, 男, 教授级高级工程师, 主要从事水文水资源研究。

文章引用: 熊明, 李其江, 邹珊. 长江沱沱河源区水温变化规律分析[J]. 水资源研究, 2018, 7(2): 117-125.

DOI: 10.12677/jwrr.2018.72013

摘要

本文基于长江源沱沱河水文站1977~2015年月实测水温资料,对高于0℃的5~10月水温年际变化特征进行了分析。结果表明:沱沱河水文站高于0℃以上累积水温增高趋势明显,2011~2015年较1977~1980年年平均累积值升高189.6℃,日平均升高1.2℃,但每年水温高于0℃的天数却无明显变化趋势,平均每年161天;5~9月水温均有明显的升温,2011~2015年较1977~1980年分别升高0.6℃、1.6℃、1.7℃、1.1℃、1.0℃;各月水温趋势突变点发生在2005~2007年之间,多数月份发生在2005年和2006年。6~9月存在明显的28年时间尺度的主周期,5月和10月因水温较低且接近0℃,周期特性不明显。

关键词

水温, 河源区, 变化趋势, 周期分析, 长江

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

长江源头一般指唐古拉山脉主峰格拉丹东大冰峰,主源沱沱河全长 346 km,流域面积 17,600 km²,位于东经 89°48'~92°54',北纬 33°22'~35°12'之间,整个长江源区位于青藏高原腹地昆仑山脉和唐古拉山脉之间。流域地势高,最低海拔 4489 m,最高海拔 6468 m,南北均有高山、地形封闭,属于高空西风带控制区。

长江源沱沱河地区自然生态环境十分脆弱。受全球气候变暖大背景的影响,河流水温必将产生相应的响应。水温作为水生态系统的主要影响因素之一,决定了水生生态系统稳定性,水温波动影响着水生生态系统的新陈代谢和生产能力,也影响水体的物化特征和水生生物的分布、生长和繁殖。

目前,有关长江源地区气候变化规律以及对降水、蒸发、径流、洪水、泥沙等水文要素的影响均有大量的研究[1]-[8],气候变化对长江源区冰川、区域生态系统甚至自然和社会系统的影响研究也不少见[9] [10] [11]。然而,却少见对淡水生态系统、鱼类等水生动物的产卵繁殖和农作物的生长构成威胁的长江源水温变化特征研究文献[12]。

2. 资料与方法

2.1. 资料情况

长江源沱沱河流域内有唯一的国家级水文站——沱沱河水文站,控制集水面积 15,924 km²,据统计多年平均流量为 29.1 m³/s,多年平均年径流量为 9.18 亿立方米。

沱沱河水文站由长江流域规划办公室设立于 1958 年 6 月,开展降水、水位、流量观测;1964 年改由青海省水文总站领导,1987 年 1 月由常年站改为汛期站,观测项目有降水、水位、流量、含沙量。1960 年开始观测水温,至 1977 年以前水温观测因资料不全或观测方法不统一,水温系列不一致。1977 年统一改为每天早 8:00 观测并一直沿用至今。本文研究采用 1977~2015 年的水温观测系列,系列长度 39 年。

沱沱河流域封冻期较长,每年 4 月气温回升,冰雪融水补给开始;每年 10 月,气温下降,河流封冻。河流封冻、解冻过程为气候条件所控制,年际间略有差异,且封冻期间不观测水温。故本次分析主要仅针对 5~10 月

各月水温系列,同时,为分析年水温变化规律,本文采用5~10月每日水温叠加值的累积水温代替年水温。

2.2. 分析方法

2.2.1. 趋势分析

趋势分析采用 Mann-Kendall 检验[5][6]和 Spearman 秩次相关检验。

1) Mann-Kendall 检验

当 Mann-Kendall 检验用于分析时间序列变化趋势时,原假设 H_0 :时间序列数据 x_1, x_2, \dots, x_n 是 n 个随机独立同分布的样本;备择假设 H_1 是双边检验:对于所有的 $k, j \leq n$ 且 $k \neq j, x_k$ 和 x_j 的分布是不相同的,检验的统计变量 S 计算如下式:

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

式中:sgn 是符号函数; S 为统计量,在给定的 α 置信水平上,如果 $|Z| \geq Z_{\alpha/2}$,则原假设是不可接受的,即在 α 置信水平上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。对于统计变量 Z 大于 0 时,是上升趋势,小于 0 时,则是下降趋势。

2) Spearman 秩次相关检验

分析序列 x_t 与时序 t 的相关关系,在运算时, x_t 用其秩次 R_t (即把 x_t 从大到小排列时, x_t 所对应的序号)代表, t 仍为时序($t=1,2,\dots,n$),秩次相关系数:

$$r = 1 - \frac{6 \sum_{t=1}^n (R_t - t)^2}{n^3 - n} \quad (2)$$

式中: n 为序列长度;相关系数 r 是否异于零,可采用 t 检验法。统计量为:

$$T = r \left(\frac{n-4}{1-r^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

T 服从自由度为 $(r-2)$ 的 t 分布。原假设无趋势,检验时,先计算出 T ,再选择显著水平,在 t 分布表中查出临界 $t_{\alpha/2}$,当 $|T| > t_{\alpha/2}$ 时,拒绝原假设,说明序列随时间有相依关系,即序列趋势显著;相反,接受原假设,趋势不显著。

2.2.2. 周期分析

周期分析采用小波分析方法。对于某一个给定的小波函数 $\psi(t)$,可通过尺度的伸缩和时间轴上的平移构成一簇函数系:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \text{ 其中, } a, b \in R \text{ 且 } a \neq 0 \quad (4)$$

式中: $\psi_{a,b}(t)$ 为子小波; a 为尺度因子; b 为时间因子。

通过连续小波变换,得出小波系数 $W_f(a,b)$ 与水文时间序列 $f(t)$ 的关系为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5)$$

$\bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的复共轭函数。小波分析的基本原理,即通过增加或减小伸缩尺度 a 来得到信号的低频或高频信息,然后分析信号的概貌或细节,实现对信号不同时间尺度和空间局部特征的分析。

实际研究中,最主要的就是要由小波变换方程得到小波系数,然后通过这些系数来分析时间序列的时频变

化特征,小波变化系数正值对应序列偏多期,负值则对应偏少期,小波变化系数为0则对应序列突变点,小波变化系数绝对值越大,则说明序列随时间变化愈显著。

将小波系数的平方值在 b 域上积分,就可得到小波方差,即

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a,b)|^2 db \quad (6)$$

小波方差随尺度 a 的变化过程,称为小波方差图。由式(6)可知,它能反映信号波动的能量随尺度 a 的分布。因此,小波方差图可用来确定信号中不同种尺度扰动的相对强度和存在的主要时间尺度,即主周期。

2.2.3. 突变分析

突变是指素从一种稳定的状态或趋势跳跃式地转变到另一种状态或趋势的现象,采用 *Mann-Kendall* 法用于时间序列突变检测时,需构造一秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

在时间序列随机独立的假定下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

将时间序列 x 按逆序排列,再重复上述过程,同时使

$$UB_k = -UF_{k'} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

$$k' = n + 1 - k \quad (10)$$

若 UF_k 值大于 0,则表明序列呈上升趋势,小于 0 则表明呈下降趋势,当它们超过临界直线时,表明上升或下降趋势显著。如果 UB_k 和 $-UF_k$ 两条曲线出现交点,且交点在临界直线之间,交点对应的时刻就是突变开始的时刻。

3. 结果分析

3.1. 趋势分析

3.1.1. 累积水温和累积天数

沱沱河水文站高于 0°C 以上累积水温及高于 0°C 以上累积天数多年际变化见图 1,其 5 年平均值见表 1。由图 1 可知,累积水温呈升高趋势,且 1990 年代以后水温上升趋势最显著。由 1977~1980 年的 687.1°C ,升高至

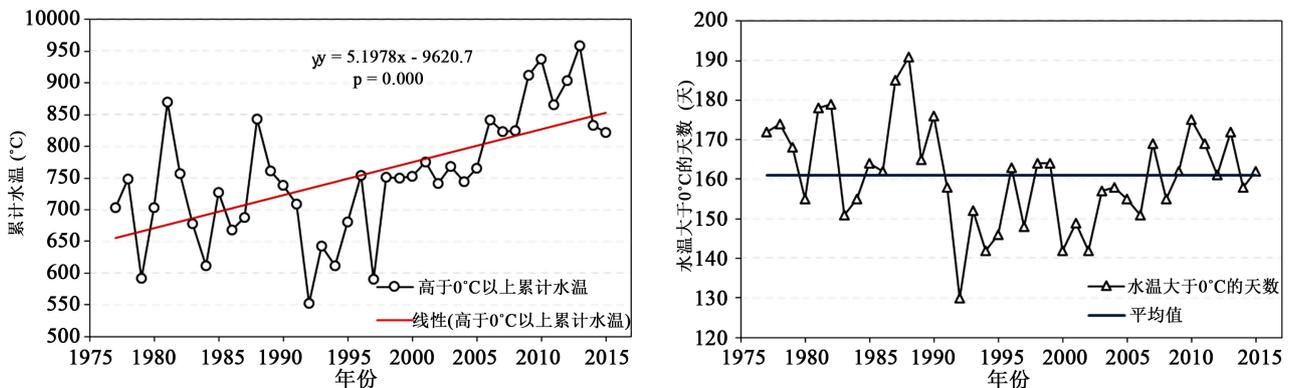


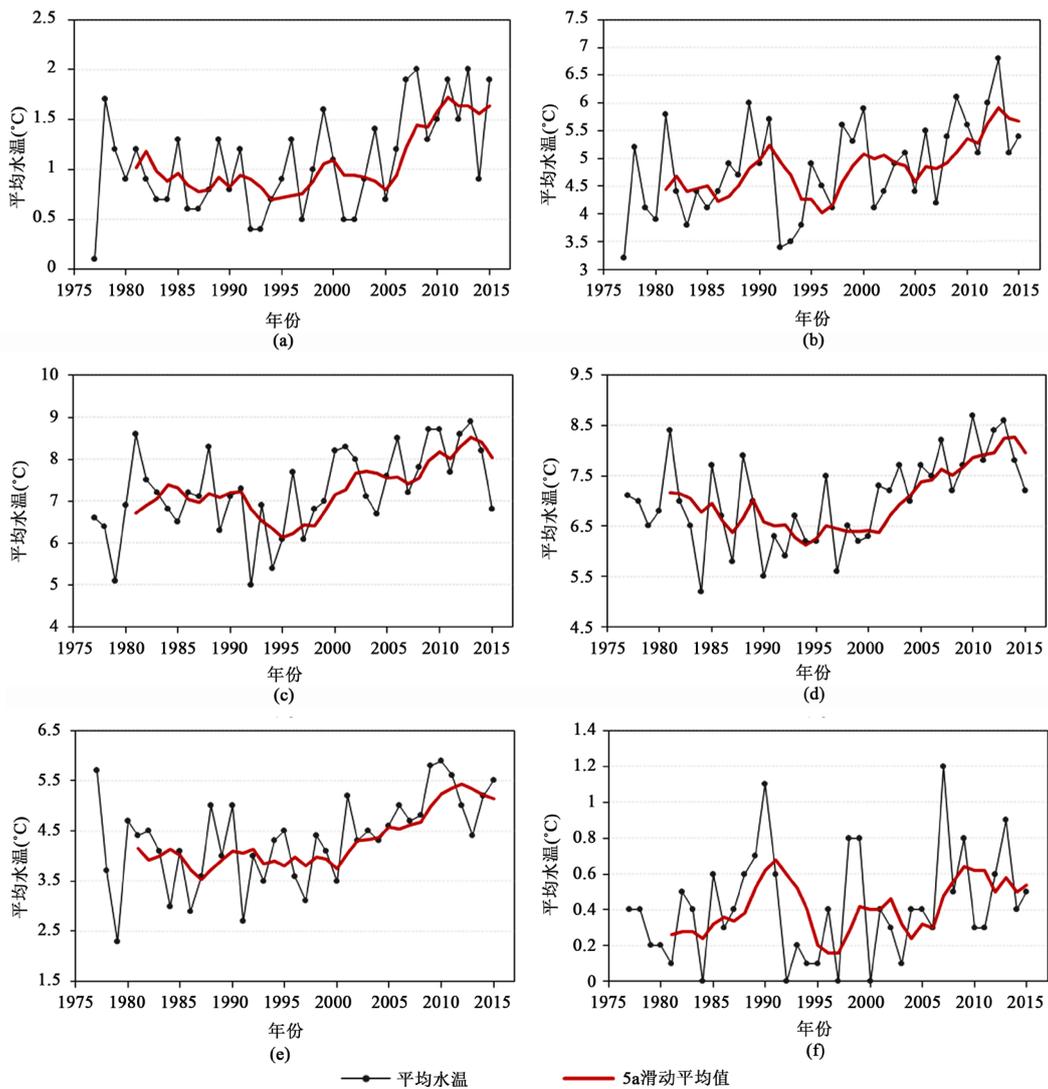
Figure 1. The cumulative water temperature and the number of days series when the water temperature is above 0°C

图 1. 沱沱河水文站高于 0°C 以上累积水温及天数序列图

Table 1. The statistics of above 0°C cumulative water temperature and days and May to October 5-year average water temperature at Tuotuohe hydrological station

表 1. 沱沱河水文站高于 0°C 累积水温和天数以及 5~10 月水温 5 年平均值统计表

序列	平均值						累积水温(°C)	累积天数(天)
	5月(°C)	6月(°C)	7月(°C)	8月(°C)	9月(°C)	10月(°C)		
1977~1980	1.0	4.1	6.3	6.9	4.1	0.3	687.1	167
1981~1985	1.0	4.5	7.3	7.0	4.0	0.3	728.8	165
1986~1990	0.8	5.0	7.2	6.6	4.1	0.6	740.1	176
1991~1995	0.7	4.3	6.1	6.3	3.8	0.2	639.6	146
1996~2000	1.1	5.1	7.2	6.4	3.7	0.4	720.1	156
2001~2005	0.8	4.6	7.5	7.4	4.6	0.3	759.2	152
2006~2010	1.6	5.4	8.2	7.9	5.2	0.6	868.1	162
2011~2015	1.6	5.7	8.0	8.0	5.1	0.5	876.7	164



(a: 五月; b: 六月; c: 七月; d: 八月; e: 九月; f: 十月)

Figure 2. The trend of water temperature from May to October of Tuotuohe hydrological station

图 2. 沱沱河水文站 5~10 月水温趋势图

2011~2015 年的 876.7℃, 年平均累积水温升高幅度为 189.6℃, 日平均升温 1.2℃。高于 0℃ 以上累积天数多年来变化不大, 无明显的增加或减少趋势, 其多年平均天数为 161 天。

3.1.2. 5~10 月水温

沱沱河水文站 5~10 月水温趋势变化图及 5 年平均值分别见图 2 和表 1。图 2 表明, 沱沱河水文站 5~10 月水温多年来呈升高趋势, 1990 年以后上升趋势更加显著, 但 10 月水温升高趋势不明显。5~10 月平均水温由 1977~1980 年的 1.0、4.1、6.3、6.9、4.1、0.3℃, 升高至 2011~2015 年的 1.6、5.7、8.0、8.0、5.1、0.5℃, 升高幅度分别为 0.6、1.6、1.7、1.1、1.0、0.2℃。5 月和 10 月因水温较低, 较多时间水温为 0℃, 影响到月平均值计算, 增幅较小。

设定 M-K 检验的显著性水平为 0.05, 沱沱河水文站高于 0℃ 以上年累积水温、累积天数和 5~10 月平均水温的 M-K 趋势检验结果见表 2。表 2 可见累积水温序列的 $|Z_{MK}|$ 和 $|Z_S|$ 分别为 4.09 和 4.74, 均大于各自的临界值 $N_{0.05/2}(0,1) = 1.96$ 和 $t_{0.05/2}(39-2) = 2.03$, 且 $Z_{MK} > 0$, 故其存在显著上升趋势; 水温大于 0℃ 的累积天数序列的 $|Z_{MK}|$ 和 $|Z_S|$ 分别为 0.91 和 1.23, 均小于各自的临界值 $N_{0.05/2}(0,1) = 1.96$ 和 $t_{0.05/2}(39-2) = 2.03$, 故其不存在明显的上升或下降趋势; 同理, 5~9 月的平均水温在 1977~2015 年间均呈现显著上升趋势, 但 10 月因水温较低, 较多时间水温为 0℃, 故其变化趋势不明显。

3.2. 突变分析

沱沱河水文站年累积水温、5~10 月平均水温的突变点 M-K 检验图见图 3。设定 M-K 检验的显著性水平为 0.05, 由图 3 可知, UF 和 UB 曲线交点位置在 2005~2007 年之间, 其中 2005、2006 年居多, 除 10 月外 5~9 月均突破 $\alpha = 0.05$ 的上临界值。故可认为沱沱河水文站年累积水温、5~9 月平均水温均存在明显的上升趋势, 有水温上升突变现象, 突变点为 2005、2006 年。10 月上升突变趋势不明显。

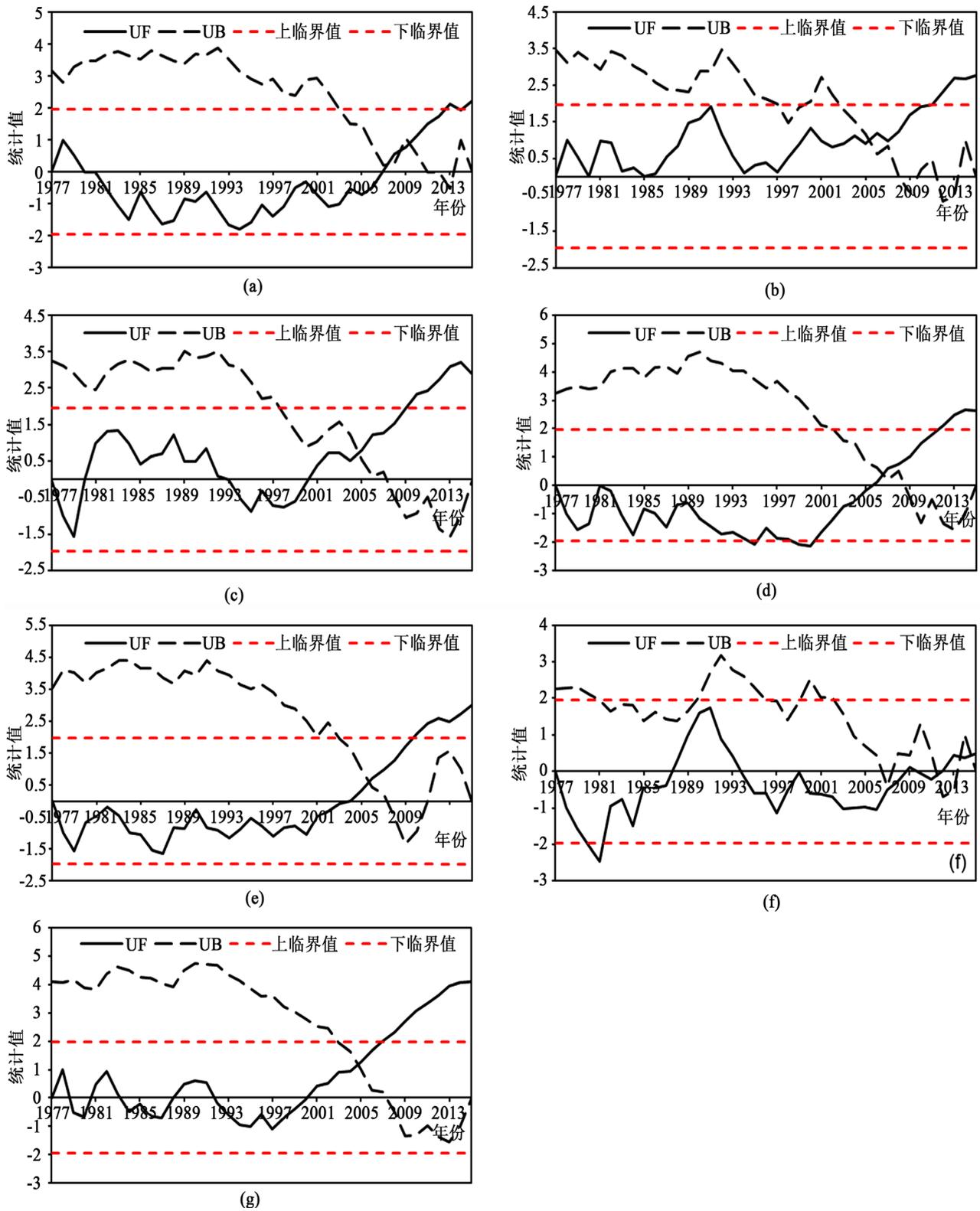
3.3. 周期分析

沱沱河流域 1977~2015 年的水温序列小波分析等值线图和小波系数方差曲线见图 4, 图中, 红色实线为小波变换系数的非负值, 对应于水温偏高时期; 蓝色虚线为小波变换系数的负值, 对应于水温偏低时期。

6~9 月水温小波系数方差曲线最大的峰值均对应着 28 年的时间尺度, 其它方差峰值较小甚至无峰值, 表明 6~9 月水温序列的主周期分别为 28 年, 其它周期不明显。5 月水温小波系数方差曲线最大、次大的峰值对应为 6 和 14, 表明 5 月第一主周期为 6, 第二主周期为 14。10 月小波系数方差曲线最大的峰值、次大峰值分别对应

Table 2. Summary of trend analysis for water temperature variables from 1977 to 2015 at Tuotuohe hydrological station
表 2. 1977~2015 年沱沱河水文站水温特征值变化趋势检验结果

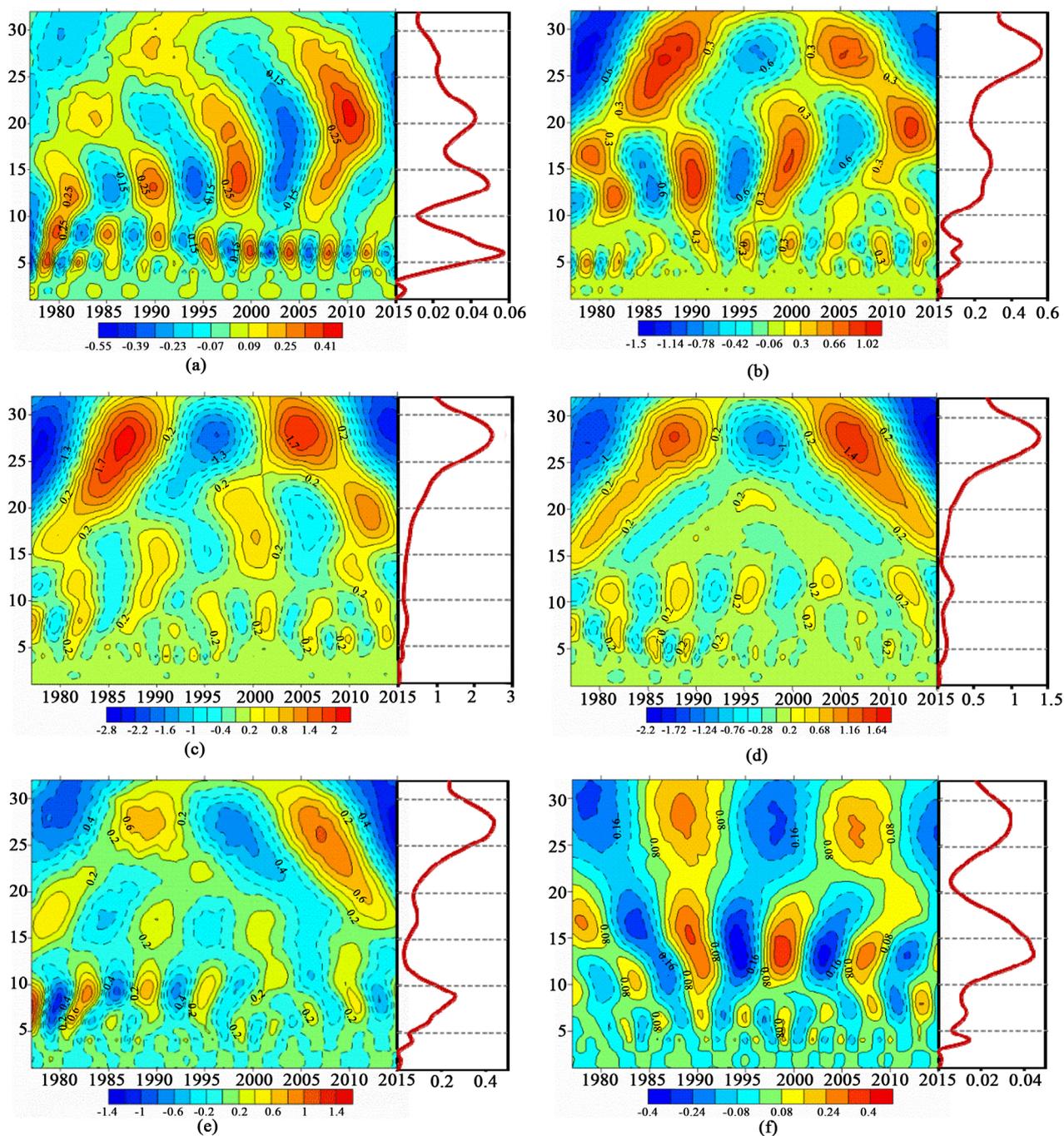
项目	Mann-Kendll 检验		Spearman 检验		变化趋势
	Z_{MK}	$N_{0.05/2}(0,1)$	Z_S	$t_{0.05/2}(37)$	
累积水温	4.09	1.96	4.74	2.03	显著上升
累积天数	-0.91	1.96	-1.23	2.03	不显著
5 月	2.67	1.96	2.90	2.03	显著上升
6 月	3.11	1.96	3.22	2.03	显著上升
7 月	3.05	1.96	3.30	2.03	显著上升
8 月	2.93	1.96	3.21	2.03	显著上升
9 月	3.25	1.96	3.37	2.03	显著上升
10 月	1.37	1.96	1.38	2.03	不显著



(a: 五月; b: 六月; c: 七月; d: 八月; e: 九月; f: 十月; g: 累积水温)

Figure 3. The Mann-Kendall test of the cumulative and May to October water temperature

图 3. 沱沱河水文站高于 0℃ 以上累积水温及 5~10 月水温 M-K 检验图



(a: 五月; b: 六月; c: 七月; d: 八月; e: 九月; f: 十月)

Figure 4. The wavelet coefficient real part contour map and variance curve diagram for water temperature from May to October at Tuotuohe hydrological station

图 4. 沱沱河水文站 5~10 月水温小波系数实部等值线及方差曲线图

13、28，其第一主周期为 13，第二主周期为 28。

4. 结论

1) 1977~2015 年长江源沱沱河水文站高于 0℃ 以上累积水温以及 5~9 月水温序列均有明显的升高趋势，10

月水温无明显的升高降低趋势。

2) 沱沱河水文站高于 0℃ 以上累积天数未发生显著变化, 年平均高于 0℃ 以上累积天数为 161 天。

3) 沱沱河水文站累积水温、5~9 月平均水温有水温上升突变现象, 突变点为 2005、2006 年。10 月上升突变趋势不明显。

4) 沱沱河水文站高于 0℃ 以上累积水温及 6~9 月水温均存在 28 年的主周期, 5 月存在 6 年主周期, 10 月的主周期为 13 年。

基金项目

国家重点研发计划项目(2016YFC0402201)。

参考文献 (References)

- [1] 张国胜, 时兴合, 李栋梁, 等. 长江源沱沱河区 45 a 来的气候变化特征[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 678-685.
ZHANG Gousheng, SHI Xinghe, LI Dongliang, et al. Climate change in Tuotuohe area at the headwaters of Yangtze River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 678-685. (in Chinese)
- [2] 唐雄朋, 吕海深. 沱沱河流域水文气象要素变化特征分析[J]. 水电能源科学, 2016(12): 37-40.
TANG Xiongpeng, LV Haishen. Temporal variation of main hydrologic meteorological elements in Tuotuohe River Basin. *Water Resources and Power*, 2016(12): 37-40. (in Chinese)
- [3] 俞烜, 申宿慧, 杨舒媛, 等. 长江源区径流演变特征及其预测[J]. 水电能源科学, 2008, 26(3): 14-16.
YU Xuan, SHEN Suhui, YANG Shuyuan, et al. Characteristic and forecast of runoff change in source region of Yangtze River. *Water Resources and Power*, 2008, 26(3): 14-16. (in Chinese)
- [4] 裴超重, 钱开铸, 吕京京, 等. 长江源区蒸散量变化规律及其影响因素[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 362-368.
PEI Chaozhong, QIAN Kaizhu, LV Jingjing, et al. The variation of evapotranspiration and the impacts on it in the source region of the Yangtze River. *Geoscience*, 2010, 24(2): 362-368. (in Chinese)
- [5] 王勤宜. 长江源区降水特征及变化趋势分析[J]. 水文, 2004, 24(1): 57-60.
WANG Qinyi. Analysis on the characteristics and change trend of rainfall in the source area of Yangtze River. *Hydrology*, 2004, 24(1): 57-60. (in Chinese)
- [6] 梁川, 侯小波, 潘妮. 长江源高寒区域降水和径流时空变化规律分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(1): 53-59.
LIANG Chuan, HOU Xiaobo and PAN Ni. Spatial and temporal variations of precipitation and runoff in the source region of the Yangtze River. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2011, 9(1): 53-59. (in Chinese)
- [7] 李玥, 杨柯. 全球变化背景下长江源区 50 年来气温变化分析[J]. 中国矿业, 2011(s1): 211-214.
LI Yue, YANG Ke. Analysis on air temperature change of 50 years in source region of the Yangtze River under global changing. *China Mining Magazine*, 2011(s1): 211-214. (in Chinese)
- [8] 吴豪, 虞孝感. 近四十年来长江源区河流水沙量的变化[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(2): 175-178.
WU Hao, YU Xiaogan. Changes of runoff and sediment in the source region of Yangtze River during the last four decades. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(2): 175-178. (in Chinese)
- [9] 刘俊峰, 杨建平, 陈仁升. 长江源区典型流域积雪年变化及其与气温、降水的关系[J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 862-868.
LIU Junfeng, YANG Jianping and CHEN Rensheng. Annual variations of snow cover and its relation to air temperature and precipitation in Dongkemadi River Basin in the source regions of the Yangtze River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(6): 862-868. (in Chinese)
- [10] 杨建平, 丁永建, 刘时银, 等. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响[J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 595-602.
YANG Jianping, DING Yongjian, LIU Shiyin, et al. Glacier change and its effect on surface runoff in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(5): 595-602. (in Chinese)
- [11] 姚玉璧, 杨金虎, 王润元, 等. 1959-2008 长江源被净初级生产力对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1286-1293.
YAO Yubi, YANG Jinhui, WANG Ruiyuan, et al. Responses of net primary productivity of natural vegetation to climatic change over source regions of Yangtze River in 1959-2008. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(6): 1286-1293. (in Chinese)
- [12] 袁博, 周孝德, 宋策, 等. 黄河上游高寒区河流水温变化特征及影响因素研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(12): 59-65.
YUAN Bo, ZHOU Xiaode, SONG Ce, et al. Analysis of water temperature changes and influencing factors in the alpine zone of Yellow River Upstream. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(12): 59-65. (in Chinese)