

# 马海盆地近40年以来气温、降水演变规律

项洋旭<sup>1</sup>, 娄华君<sup>2</sup>, 张 征<sup>1</sup>, 刘 圣<sup>3</sup>, 贾绍凤<sup>2</sup>, 代 莉<sup>4</sup>, 娄懿珈<sup>4</sup>

(1. 北京林业大学 环境科学与工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101;  
3. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083; 4. 北京国环清华环境工程设计研究院有限公司, 北京 100084)

**摘要:** 为研究在全球气温变暖条件下以马海盆地为代表的青藏高原北缘地区的气候变化特征, 运用累积距平法、Mann-Kendall 检验法、小波分析法对马海盆地的年降水量和年平均气温时间序列变化进行了多周期分析。研究表明, 1970年-2010年马海盆地年降水量基本处于稳定状态, 而年均气温有升高的趋势; 在2001年之前, 马海盆地降水呈减少的趋势, 之后降水有增多的趋势, 而年均气温在1995年之前呈现下降的趋势, 之后开始回升; 这一地区降水量变化震荡周期主要为15 a、30 a, 气温变化则以26 a为主周期; 研究区降水和气温在不同的时间尺度上经历了不同的多少及冷暖的循环变化过程。对于不同的尺度周期, 同一时段的降水量、气温变化会有所不同, 时间尺度越小, 气温、降水变化位相差越小。

**关键词:** 小波分析; 年均气温; 年降水; 马海盆地

**中图分类号:** P333.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1040-05

## Variations of annual average temperature and precipitation in the Mahai Basin in recent 40 years

XIANG Yang-xu<sup>1</sup>, LOU Hua-jun<sup>2</sup>, ZHANG Zheng<sup>1</sup>, LIU Sheng<sup>3</sup>, JIA Shao-feng<sup>2</sup>, DAI Li<sup>4</sup>, LOU Yi-jia<sup>4</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

4. Beijing Guohuan Tinghua Environment Engineering Design & Research Institute Co., Ltd, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to investigate the climate change in the Mahai Basin of the Qinghai-Tibet Plateau under the conditions of global warming, the variations of annual precipitation and temperature data in the Mahai Basin were analyzed using the accumulative anomaly method, Mann-Kendall test, and wavelet analysis. The results suggested that (1) annual precipitation is stable from 1970 to 2010 while annual temperature has an increasing trend; (2) annual precipitation has a decreasing trend before 2001 and increases after that, while annual temperature has a decreasing trend before 1995 and increases after that; (3) the primary oscillation periods of annual precipitation are 15 and 30 years while the primary oscillation period of annual temperature is 26 years; and (4) annual precipitation has different dry-wet cycles while annual temperature has different hot-cold cycles under different time scales. The variations of precipitation and temperature are different under different time scales, and the variations are lower when the time scale is smaller.

**Key words:** wavelet analysis; annual average temperature; annual precipitation; Mahai Basin

近年来, 国内外学者对青藏高原气候变化特征做了大量的研究, 认为近30年以来青藏高原地区气温上升显著, 大约以0.4~0.5℃/a的速率升高, 其降水量也在增加, 青藏高原边缘地区气候变化比青藏高原腹地显著<sup>[1-2]</sup>。柴达木盆地位于青藏高原的北缘<sup>[3]</sup>, 气候变化趋势要明显强于腹地, 是青藏高原气候变化的敏感区<sup>[4-5]</sup>。马海盆地位于青海省海西蒙

古族藏族自治州, 柴达木盆地西北部(图1), 其气候特征体现出柴达木盆地所特有的内陆干旱型气候特征。马海盆地西部为狭窄的谷地, 与阿尔金山山前平原相通, 北部及东部分别为赛什腾山、马海大坂山、土尔根大坂山和达肯大坂山。

20世纪50年代, 已有相关学者对降水与干旱问题以及干旱条件下降水与温度的关系等问题开展了大量研究<sup>[6-7]</sup>;

收稿日期: 2015-01-21    修回日期: 2015-04-23    网络出版时间: 2015-11-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.1957.002.html>

基金项目: 国家科技支撑计划项目“柴达木循环经济区水资源保障与生态保护研究”(2012BAC09B00)

作者简介: 项洋旭(1990), 男, 安徽黄山人, 主要从事生态环境及水资源评价方面研究。E-mail: xyxbjfu@163.com

通讯作者: 娄华君(1956), 男, 山东洛南人, 研究员, 主要从事水文水资源环境方面研究。E-mail: louhj@jgsnrrac.cn

21世纪以来,在降水时空演变规律以及与干旱的关系、降水对大气环流的影响等方面也取得了一系列的研究成果<sup>[8-11]</sup>。但之前学者对整个柴达木盆地大地区的气候变化特征研究较多,而缺少对马海盆地这种典型的内陆小盆地的具体研究。本文旨在检验青藏高原气候变化特征在小的典型范围是否得到验证,同时为马海盆地的生产生活、环境保护、生态治理提供决策依据。为此,本文运用累积距平法、小波分析等方法对马海盆地40年(1970年-2010年)来的年平均气温和年降水量进行时间序列分析,探讨其气候变化规律及其影响因素。



1.研究区边界 2.河流、湖泊 3.公路、居民区 4.铁路

图1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

## 1 资料与方法

### 1.1 数据来源

本文使用的大柴旦、冷湖1970年-2010年降水量、年平均气温资料均来自青海省气象科学所。研究区域马海盆地为荒漠无人区,无降水气温等气象资料记录,故将大柴旦(距其78 km)与冷湖(距其80 km)气象站的气象资料用线性内插法计算得出马海盆地的降水量和气温值。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 小波分析计算方法

小波分析(Wavelet Analysis, WA)是在Fourier基础上发展起来的一种信号分析方法,因其方法中窗口大小固定不变而时域和频域不断变化,从而具有良好的局部化特性,被人称之为“数学放大镜”或“数学显微镜”<sup>[12-17]</sup>。

在水文序列中,包含了低频和高频两个部分,其中低频部分代表了序列中的趋势,高频部分隐含了序列中周期性信息。小波分析中的多分辨分析方法(Multi resolution Analysis, MRA)把水文序列中的高频和低频部分分开从而得到水文序列中周期性和趋势性信息<sup>[18]</sup>。

小波函数定义: $\phi(t) \in L^2(R)$ 且满足:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) dt = 0 \quad (1)$$

式中: $\phi(t)$ 为基小波函数,它可通过尺度的伸缩和时间轴上的平移构成一簇函数系:

$$\phi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad \text{其中, } a, b \in R, a \neq 0 \quad (2)$$

式中: $\phi_{a,b}(t)$ 为子小波; $a$ 为尺度因子,反映小波的周期长度; $b$ 为平移因子,反映时间上的平移。

$\phi_{a,b}(t)$ 是由(2)式给出的子小波,对于给定的能量有限信号 $f(t) \in L^2(R)$ ,其连续变换(Continue Wavelet Trans-

form, CWT)为

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中: $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; $f(t)$ 为一个信号或平方可积函数; $a$ 为伸缩尺度; $b$ 为平移参数; $\phi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ 为 $\phi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的复共轭函数。式(3)的离散小波变换形式如下:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \phi\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \quad (4)$$

将小波系数的平方值在 $b$ 域上积分,就可得到小波方差:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (5)$$

小波方差随尺度 $a$ 的变化过程,即为小波方差图<sup>[19]</sup>。

小波函数的选取非常重要,目前常用的小波有Morlet小波、Daubechies正交小波、样条小波、双正交小波等,不同的小波用于水文时间序列分析,结果相差很大。通过选用不同小波分析计算,认为Morlet小波比较适合降雨、气温序列<sup>[20]</sup>。Morlet函数定义为 $\phi(x) = Ce^{-x^2/2} \cos(5x)$ ,是高斯包络下的单频率复正弦函数<sup>[21]</sup>。复Morlet小波变换下的模和实数部存在实际的意义,模的大小表示了特征时间尺度信号的强弱,实数部的正负表示了降水的多少以及气温的高低,故可以在Morlet小波图中可以看出降水、气温变化的不同时间尺度结构<sup>[22-23]</sup>。

#### 1.2.2 累积距平法

累积距平是一种常用的判断趋势变化的方法。通过对累积距平的观察可以得出降水量增加或减少的判断。对于时间序列为 $x$ 的累积距平可表示为

$$S_i = \sum_{t=1}^i (x_t - \bar{x}), \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

#### 1.2.3 Mann Kendall 检验法

Mann Kendall 检验法是国际气象组织推荐的一种非参数统计方法,是检验数据趋势的诊断法<sup>[24-25]</sup>。Mann Kendall 法具有检测范围宽、人为性少的特点,检测结果的可信度高。

Mann Kendall 检验法的主要参数Kendall统计量 $t$ 、方差 $\sigma^2$ 、秩次相关系数 $M$ ,计算方法分别如下:

$$t = \frac{4P}{N(N-1)} - 1; \sigma^2 = \frac{2(2N+5)}{9N(N-1)}; M = \frac{t}{\sigma^2} \quad (7)$$

式中: $P$ 为数据序列中所有对偶观测值( $R_j, R_{i,j} < i$ )中 $R_j < R_i$ 出现的次数; $N$ 为序列长度。

Mann Kendall 检验中,在 $\alpha = 0.05$ 显著性水平下,标准化变量 $M$ 的检查临界值为 $M_\alpha = 1.96$ ,如果当 $|M| > M_\alpha$ ,且 $M > 0$ 时,则表明序列有明显的上升趋势;当 $M < 0$ 时,则表明序列有明显的下降趋势。

## 2 年降雨量演变规律分析

### 2.1 年降水量变化趋势分析

如图2所示,马海盆地1970年-2010年间降水变化趋势不明显( $R^2 = 0.16$ )。经Mann Kendall秩次相关检验(见表1),在 $\alpha = 0.05$ 显著性水平上,降水变化无明显趋势。

图3为马海盆地在1970年-2010年降水量的累积距平,在此41年间,年降水量经历了一次较大时间尺度的变化和三次较小的时间尺度变化。总体而言,在2001年之前,此地区降水量一直处于减少状态,在2001年之后,降水量显著增加。

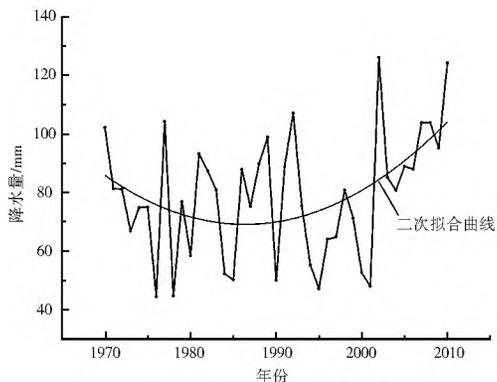


图 2 马海盆地 1970 年- 2010 年降水量年际变化及二次拟合曲线

Fig. 2 Annual variation and quadratic fitting curve of precipitation in the Mahai Basin from 1970 to 2010

表 1 年降水量变化趋势检验

Tab. 1 Trend test of annual precipitation

项目	$R^2$	Kendall 秩次相关检验
降水变化	0.16	1.55
95% 检验统计量		1.96
结论	拟合程度一般	无显著性趋势

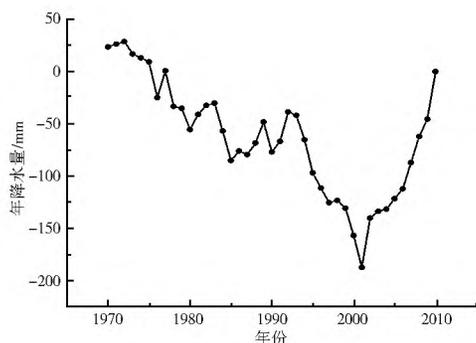


图 3 马海盆地 1970 年- 2010 年降水量累积距平

Fig. 3 Accumulative anomaly of annual precipitation in the Mahai Basin from 1970 to 2010

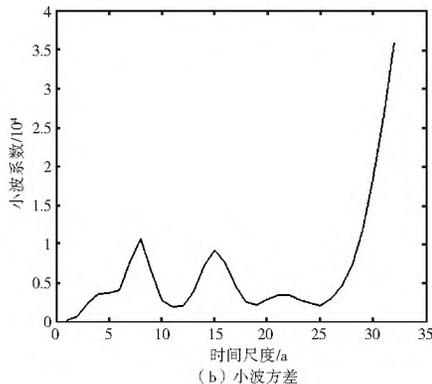
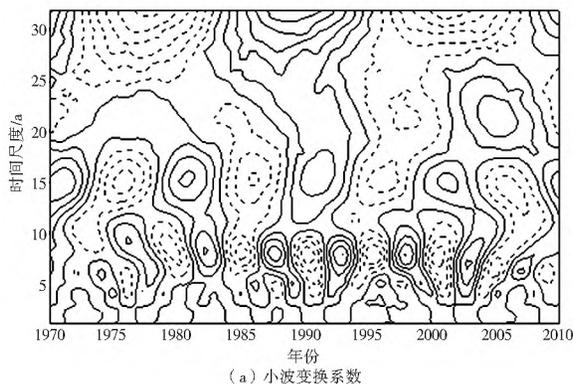


图 4 马海盆地年降水量小波变换系数、小波方差

Fig. 4 Real distribution of Morlet wavelet coefficient and wavelet variance of annual precipitation in the Mahai Basin

### 3 年均气温演变规律

如图 5 所示,马海盆地从 1970 年- 2010 年间年均气温上升显著 ( $R^2 = 0.419$ ), 平均气温增速为  $0.32\text{ }^\circ\text{C/a}$ 。经 Mann Kendall 秩次相关检验 (见表 2), 在  $\alpha = 0.05$  显著性水

### 2.2 年降水量周期分析

图 4(a) 为马海盆地年降水量小波变换系数分布图, 其中正数和零值用实线表示, 负数用虚线表示。随着时间尺度的增大 (从 1 到 32), 可以清晰地分辨出不同时间尺度震荡的小波变换部分。从上往下分析可得, 年降水量存在 30 a 以上、10~ 20 a 以及 5~ 10 a 以下的时间尺度。在 30 a 以上的时间尺度的周期中心为 32 a, 10~ 20 a 时间尺度的周期中心为 15 a, 5~ 10 a 时间尺度的周期中心为 8 a。

在 30 a 以上的时间尺度上, 等值线未闭合, 无法看到周期中心。但从图中可以看出在 1970 年- 2010 年这 41 年中, 年均降水量经历了多- 少- 多- 少- 多的周期性变化。

在 10~ 20 a 时间尺度上, 以 15 a 为周期中心, 降水量经历了多次丰枯变化, 具体分析为: 1970 年- 1973 年降水偏多; 1974 年- 1978 年降水偏少; 1979 年- 1983 年降水偏多; 1984 年- 1988 年降水偏少; 1989 年- 1993 年降水偏多; 1994 年- 1997 年降水偏少; 1998 年- 2003 年降水偏多; 2004 年- 2007 年降水偏少; 2008 年后等值线未闭合。

在 5~ 10 a 时间尺度上, 20 世纪 80 年代之前周期中心为 9 a, 1970 年- 1973 年降水偏多; 1974 年- 1975 年降水偏少; 1976 年- 1980 年降水偏多。20 世纪 80 年代之后周期中心为 8 a, 1981 年- 1985 年降水偏少; 1986 年- 1988 年降水偏多; 1989 年- 1992 年降水偏少; 1993 年降水偏多; 1994 年- 1996 年降水偏少; 1997 年- 1999 年降水偏多; 2000 年- 2002 年降水偏少; 2003 年降水偏多; 2004 年- 2005 年降水偏少; 2005 年- 2007 年降水偏多; 2008 年等值线未闭合。

在小波方差图 (图 4(b)) 中, 存在有三个波峰, 分别对应着 8 a、15 a、32 a 的时间尺度。其中 32 a 时间尺度震荡变化强烈, 为第一主周期, 8 a、15 a 时间尺度分别为第二、三周期。

平上, 1970 年- 2010 年间气温变化有明显上升趋势。

图 6 表示了马海盆地在 1970 年- 2010 年年均气温的累积距平。整体可分为两个阶段, 在 1995 年之前, 此地区气温一直处于下降的状态, 而在 2001 年之后气温开始回升且趋势明显。

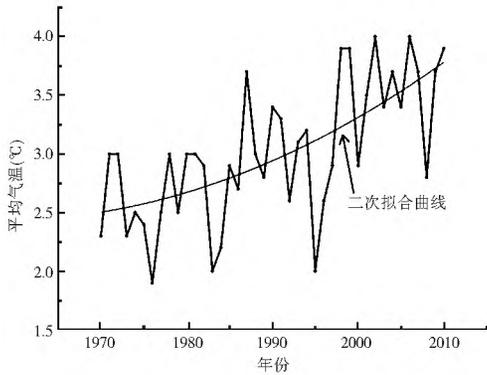


图5 马海盆地1970年-2010年气温年际变化及二次拟合曲线

Fig. 5 Annual variation and quadratic fitting curve of temperature in the Mahai Basin from 1970 to 2010

表2 年均气温变化趋势检验

Tab. 2 Trend test of annual average temperature

项目	$R^2$	Kendall 秩次相关检验
降水变化	0.419	4.172
95% 检验统计量		1.96
结论	拟合程度一般	显著上升

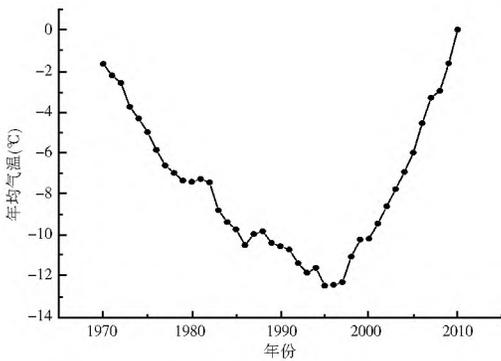


图6 马海盆地1970年-2010年年均气温累积距平  
Fig. 6 Accumulative anomaly of annual average temperature in the Mahai Basin from 1970 to 2010

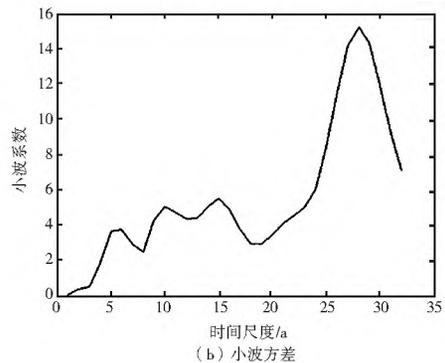
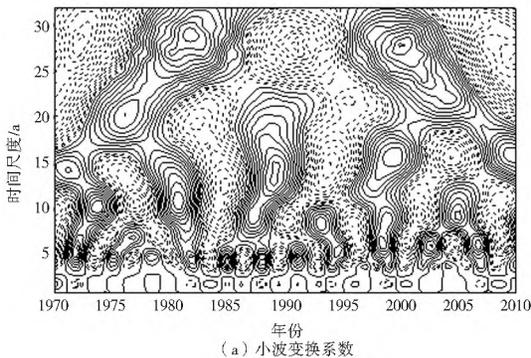


图7 马海盆地年降水量小波变换系数(a)、小波方差图(b)

Fig. 7 Real distribution of Morlet wavelet coefficient and wavelet variance of annual average temperature in the Mahai Basin

(2) 近40年以来,马海盆地年降水量变化以15 a、30 a 震荡周期比较强,气温变化以15 a 震荡周期比较强。

(3) 时间尺度越小,气温、降水变化位相差越小,在3 a 尺度左右两者具有大致相同的位相结构,位相差不超过 $\pi/2$ ,而在更大尺度上,位相差增大,位相结构相对复杂。对于不同的尺度周期,同一时段的降水量、气温变化会有所不同,因

图7(a)中正值用实线表示,说明其温度偏高,负值和零值用虚线表示,说明其温度偏低。随着时间尺度的增大(从1到32),可以清晰地分辨出不同时间尺度震荡的小波变换部分。从上往下分析可得,年均降水量存在25~30 a、10~20 a以及5 a左右的时间尺度。在25~30 a的时间尺度的周期中心为28 a,10~20 a时间尺度的周期中心为15 a,5 a左右的时间尺度的周期中心为5 a。

在以25~30 a的时间尺度上以28 a为周期中心分析,此地区气温经历了低-高-低-高-低的周期性变化,其中1970年-1976年为偏冷期;1977年-1984年为偏暖期;1985年-1995年为偏冷期;1996年-2003年为偏暖期,2004年-2010年为偏冷期。

在10~20 a的时间尺度上,1985年之前是以10 a为周期中心,经历了多次的冷暖周期变化。具体分析为:1970年-1973年为偏暖期;1974年-1976年为偏冷期;1977年-1982年为偏暖期;1983年-1985年为偏冷期。在1985年之后周期中心上移,以15年为周期中心;1986年-1990年为偏暖期;1991年-1995年为偏冷期;1996年-2001年为偏暖期;2002年-2006年为偏冷期,2007年之后属于偏暖期。

在较小时间尺度上分析,以5 a为周期中心分析可以看到,1970年-2010年中气温经历了几乎一年一个周期的变化过程。

由小波方差图(图7(b))可以看出,4个波峰分别对应5 a、10 a、15 a和28 a的时间尺度,其中28 a时间尺度的震荡变化最强,为第一主周期;10 a和15 a的震荡变化大小差别不大,为第二周期;第三主周期为5 a。

#### 4 结论

(1) 经 Mann-Kendall 检验,在  $\alpha = 0.05$  显著性水平上,降水变化无明显趋势,气温呈上升趋势。基于累计距平法的检验判断,马海盆地年降水量在2001年之前呈减少的趋势,而在2001年之后呈现上升的趋势。年均气温变化与降水变化类似,1995年之前气温呈下降趋势,在1995年之后气温回升。

此只有在一定周期、一定时段内这样的分析才有意义。

#### 参考文献(References):

[1] 王朋岭,唐国利,曹丽娟,等. 1981-2010年青藏高原地区气温变化与高程及纬度的关系[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(5): 313-319. (WANG Peng ling, TANG Guo li, CAO Li juan, et al.

- Surface air temperature variability and its relationship with altitude & latitude over the Tibetan Plateau in 1981-2010[J]. Progress in Geograph, 2012, 8(5): 313-319. (in Chinese)
- [2] 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 1981-2010 年气候变化对青藏高原实际蒸散的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1471-1481. (YIN Yunhe, WU Shaohong, ZHAO Dongsheng, et al. Impact of climate change on actual evapotranspiration on the Tibetan Plateau during 1981-2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(11): 1471-1481. (in Chinese))
- [3] 宋辞, 裴韬, 周成虎. 1960 年以来青藏高原气温变化研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1503-1509. (SONG Ci, PEI Tao, ZHOU Chenghu. Research progresses of surface temperature characteristic change over Tibetan Plateau since 1960[J]. Progress in Geography, 2012, 31(11): 1503-1509. (in Chinese))
- [4] 韩国军, 王玉兰, 房世波. 近 50 年青藏高原气候变化及其对农牧业的影响[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1969-1975. (HAN Guojun, WANG Yulan, FANG Shibao. Climate change over the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts on local agriculture and animal in the Last 50 Years[J]. Resources Science, 2011, 33(10): 1969-1975. (in Chinese))
- [5] 李林, 陈晓光, 王振宇, 等. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(3): 181-186. (LI Lin, CHEN Xiaoguang, WANG Zhengyu, et al. Climate change and its regional differences over the Tibetan Plateau[J]. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(3): 181-189. (in Chinese))
- [6] 朱炳海. 中国夏季降水强度分析[J]. 气象学报, 1955, 26(4): 249-268. (ZHU Binghai. The summer precipitation intensity analysis in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1955, 26(4): 249-268. (in Chinese))
- [7] 牛振义. 中国几个水旱年份降水与温度分布的初步分析[J]. 山东大学学报: 自然科学版, 1956, 2(4): 257-294. (NIU Zhenyi. In China a few year of severe precipitation and temperature distribution in the preliminary analysis[J]. Journal of Shandong University: Natural Science Edition, 1956, 2(4): 257-294. (in Chinese))
- [8] 全文哲. 长白山地区降水时空演变规律及机理研究[D]. 吉林: 延边大学, 2012. (QUAN Wenzhe. The Evolution and mechanisms of precipitation of the Changbai Mountain area[D]. Jilin: Yanbian University, 2012. (in Chinese))
- [9] 王刚, 严登华, 张冬冬, 等. 海河流域 1961 年-2010 年极端气温与降水变化趋势分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 1-6, 11. (WANG Gang, YAN Denghua, ZHANG Dongdong, et al. Trend analysis of variations in extreme precipitation and temperature in the Hai River Basin from 1961 to 2010[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 1-6, 11. (in Chinese))
- [10] 夏露, 宋孝玉, 马细霞. 新乡市近 60 年降水序列变化规律及干旱预测[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(5): 14-18, 27. (XIA Lu, SONG Xiaoyu, MA Xixia. Precipitation change in recent 60 years and drought prediction in Xinxiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(5): 14-18, 27. (in Chinese))
- [11] 王楠. 黄河中上游流域降水的时空演变规律及其对大气环流异常的响应[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012. (WANG Nan. Analyses on variation characteristics in temporal and spatial scale of precipitation events and circulation characteristics in the Middle and Upper Yellow River[D]. Nanjing: Nanjing Information Engineering University, 2013. (in Chinese))
- [12] 黄强, 赵雪花. 河川径流时间序列分析预测理论与方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008, 127-142. (HUANG Qiang, ZHAO Xuehua. Analysis and prediction of runoff time series theory and method[M]. Zhengzhou: Huanghe Waterpower Press, 2008, 172-142. (in Chinese))
- [13] 薛小杰, 蒋晓辉, 黄强, 等. 小波分析在水文序列趋势分析中的应用[J]. 应用科学学报, 2002, 20(4): 426-428. (XUE Xiaojie, JIANG Xiaohui, HUANG Qiang, et al. The application of wavelet analysis in hydrological sequence trend analysis[J]. Journal of Applied Sciences, 2002, 20(4): 426-428 (in Chinese))
- [14] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. (WANG Wensheng, DING Jin, LI Yueqing. Wavelet Analysis in Hydrology[M] Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [15] 吕爱锋, 贾绍凤, 燕华云, 等. 三江源地区融雪径流时间变化特征与趋势分析[J]. 资源科学, 2009, 31(10): 1704-1709. (LV Aifeng, JIA Shaofeng, YAN Huayun, et al. Temporal variations and trend analysis of the snowmelt runoff timing across the source regions of the Yangtze River, Yellow River and Lancang River[J]. Resources Science, 2009, 31(10): 1704-1709. (in Chinese))
- [16] 王菊英. 青海省三江源区水资源特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(1): 91-94. (WANG Juying. Analysis of the characteristics of water resources in the Sanjiangyuan of Qinghai Province[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2007, 18(1): 91-94. (in Chinese))
- [17] 雷廷, 张兆吉, 费宇红, 等. 海河平原 1956 年-2011 年降水特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 32-36, 41. (LEI Ting, ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong, et al. Analysis of precipitation characteristics in the Haihe River Plain from 1956 to 2011[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 32-36, 41. (in Chinese))
- [18] 李林, 李凤霞, 郭安红, 等. 近 43 年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 79-85. (LI Lin, LI Fengxia, GUO Anhong, et al. Study on the climate change trend and its catastrophe over “Sanjiangyuan” region in recent 43 years[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 79-85. (in Chinese))
- [19] 周陈超, 贾绍凤, 燕华云, 等. 近 50 a 以来青海省水资源变化趋势分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 432-437. (ZHOU Chenchao, JIA Shaofeng, YAN Huayun, et al. Changing trend of water resources in Qinghai Province from 1956 to 2000[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 432-437. (in Chinese))
- [20] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. (XUE Jianhua. Mathematical methods in modern geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 419-426. (in Chinese))
- [21] 成礼智, 郭汉伟. 小波与离散变换理论及工程实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. (CHENG Lizhi, GUO Hanwei. With discrete wavelet transformation theory and engineering practice[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese))
- [22] 衡彤. 小波分析及其应用研究[D]. 成都: 四川大学, 2003. (HENG Dong. Wavelet Analysis in Its Application[D]. Chengdu: Sichuan University, 2003. (in Chinese))
- [23] Bradshaw G A, Spies T A. Characterizing Canopy Gap Structure in Forests Using Wavelet Analysis[J]. Journal of Ecology, 1992, 80(2): 205-215.
- [24] Mann H B. Non parametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13: 245-259.
- [25] Kendall M G. Rank Correlation Methods[M]. London: Griffin, 1975.