

青藏高原大通河流域气候要素时空演变特性分析

刘赛艳, 黄强, 刘登峰, 解阳阳, 高弘扬

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘要:以青藏高原大通河流域为研究区域,将流域内及周边5个气象站1960–2012年的年降水、年均气温及年潜在蒸散发作为研究对象,利用气候倾向率法、Mann–Kendall法、滑动平均和小波分析法对各气候要素的演变特性进行了分析,以期为大通河流域水电站梯级调度运行、减轻旱涝灾害及其影响提供科学依据。结果表明:①53a以来,大通河流域年降水以 0.60 mm/a 线性趋势不显著增加,年均气温以 0.03°C/a 的线性趋势显著增加,而多年潜在蒸散发却以 0.94 mm/a 线性趋势不显著减小;②流域年降水受祁连山及季风的影响,在东西方向自西南向东北逐渐增加,在流域的中游达到最大;受海拔的影响,年均温度的空间分布东高西低,南低北高,最高温度出现在流域中下游;而流域年潜在蒸散自西南向东北呈现带状相间的分布规律;③该流域年降水、年均气温均未出现突变,流域年潜在蒸散发在1970及2008年出现突变;④周期分析显示,流域年降水序列周期为17、28a左右,年均气温周期为8、15a左右,年潜在蒸散发序列周期为18、30a左右。

关键词:降水; 年均气温; 潜在蒸散量; 演变特性; 大通河

中图分类号:P461

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2015)03-0024-06

Analysis of characteristics of spatio-temporal evolution of climate factors in Datong river basin of Tibet plateau

LIU Saiyan, HUANG Qiang, LIU Dengfeng, XIE Yangyang, GAO Hongyang

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Taking Datong river basin of Tibet plateau as research area, and annual precipitation, potential evaporation and average temperature in 5 meteorological stations from 1960 to 2012 as research objects, The paper analyzed the evolution characteristics of climate factor by use of climatic trend rate, Mann–Kendall, moving average and wavelet analysis method so as to provide scientific reference for the regulation and operation of cascade hydropower station and the reduction of dry and flood disaster. The results showed that: ① during 1960–2012, the annual precipitation rised by 0.60 mm per year with unremarkable trend. The annual average temperature increased significantly at the rate of 0.03°C per year. The annual potential evapotranspiration decreased slightly by 0.94 mm per year; ② the distribution of annual precipitation increased from southwest to northeast and reached the maximum in the middle region owing to Mountain Qilian and monsoon. The spatial distribution of annual average temperature is high in east and north and low in west and south because the effect of altitude. The highest temperature appears in middle and downstream. The annual potential evaporation shows a southwest–northeast zonal distribution; ③ there was no abrupt change in precipitation as well as annual average temperature, but that of annual potential evaporation occurred in 1970 and 2008; ④ the periods of precipitation is around 17, 28 years; the cycle of average annual temperature is 8 years, 15 years and that of potential evaporation was 18 and 30 years.

Key words: precipitation; average temperature; potential evaporation; evolution characteristics; Datong River

收稿日期:2015-01-12; 修回日期:2015-03-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51190093、51309188、51179149);陕西省重点科技创新团队(2012KCT-10);高等学校博士学科点专项科研基金(20116118110009);陕西省教育厅重点实验室项目(13JS069)

作者简介:刘赛艳(1990-),女,江西抚州人,硕士研究生,主要从事水文学及水资源研究。

通讯作者:黄强(1958-),男,四川梓潼人,教授,博士生导师,主要从事水文学及水资源研究。

1 研究背景

气候变化一直都是全球关注和研究的热点问题。一方面,气候的变化带来了降水、温度、蒸发的变化,进而影响着区域水文循环、生物界和生态系统,另一方面它还与人们的经济、生活息息相关^[1-2]。因此,开展气候变化的研究对区域、国家乃至全球的经济、社会可持续发展具有重要意义。

我国西北地区,由于地处大陆腹地,地形较为复杂,高山与平原、盆地相间,沙漠与绿洲共存,气象要素的分布很不均匀,是生态环境严重脆弱地区,也是全球气候变化下的最敏感地区^[3]。施雅风等^[4]从温度、降水等方面指出西北地区气候出现了由暖干向暖湿转型的趋势。任朝霞等^[5]利用趋势系数法对西北干旱区近50年来的气温和降水变化进行分析发现,西北地区气温、降水均呈上升趋势。姚俊强等^[6]研究发现,我国西北干旱区气候出现暖湿化趋势,导致冰川强烈的消融退缩,这对干旱区水资源和生态环境将产生重大影响。但这些都没有涉及到小尺度的区域气候变化或突变分析。

大通河流域地处青藏高原东北边缘,东接黄土高原,西南为柴达木盆地,南靠湟水谷地,北临河西走廊,是我国西北地区径流较丰的一条河流。目前大通河流域水电开发已呈梯级态势,由上而下规划建成了17座水电站。其中,上游年调节水电站纳子峡为龙头水电站,中、下游建有16座径流式水电站。近半个世纪以来,大通河流域气候发生了一定的变化,这种气候变化规律与西北地区的变化规律有相同之处,但同时又有自己的特点。因此,为了认识大通河流域的气候时空演变规律,需要找到合适的气候要素展开研究和分析。雷江群等^[7]认为针对气候时空演变研究分析,降水、温度是十分重要的因子。而潜在蒸散量,由于综合考虑了湿度、风速、水汽压、土壤热通量、太阳辐射等各种气候因子,被认为是揭示气候变化的理想要素^[8]。

本文对大通河流域年降水、年均温度和年潜在蒸散在时间、空间上的变化趋势、周期等方面展开研究及分析,旨在揭示该地区的气候变化规律,这对大通河流域水电站梯级调度运行、减轻旱涝灾害及其影响具有重要意义。

2 研究区域概况及数据

大通河流域位于北纬 $36^{\circ}30' \sim 38^{\circ}25'$,东经 $98^{\circ}30' \sim 103^{\circ}15'$ 之间,水系属黄河流域,是黄河的一级

支流湟水最大的一级支流。整个流域形状呈一狭长带状,干流全长560.7 km,其中青海省境内河流长464.42 km,主河道平均坡降4.65%。全流域面积 $15\,130\text{ km}^2$ 。流域多年平均降水量467.6 mm,年内降水主要集中在6-9月,占年降水量的70%左右,10月至翌年5月为旱季。日照时间长,太阳辐射强,昼夜温差大,一般都在 15°C 左右,最大风速达 $18 \sim 23\text{ m/s}$ 。受气候、森林、地形及地质等下垫面条件的影响,大通河径流年际变化较为稳定;因上游植被良好,水土流失较轻,河流含沙量较小。

利用中国气象科学数据共享服务网提供的气象资料,选取流域内及周边的门源、祁连、乌鞘岭、野牛沟、民和共5个气象站点的1960-2012年的气象资料,采用世界粮农组织(FAO)1998年修正的Penman-Monteith模型计算大通河流域各气象站的潜在蒸散量。把降水、潜在蒸散发、气温等3个气候要素年值作为研究对象。使用泰森多边形法,将其加权平均到整个流域以此作为分析该流域各气候要素演变特性的基础数据。大通河流域各气象站点分布见图1。

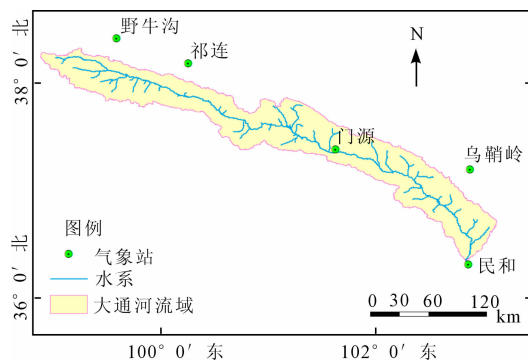


图1 大通河流域位置及气象站点分布图

3 研究方法

为了研究大通河流域气象要素年际变化特征,本文首先统计各气象要素的年际变化特征值,并采用Mann-Kendall检验法进行趋势检验。利用5年滑动平均、Mann-Kendall方法对大通河流域气象要素进行突变性分析。同时,借助小波方差来揭示年降水、年均气温及年潜在蒸散发的周期变化特征。

3.1 趋势性分析

利用由Mann和Kendall提出的Mann-Kendall检验法^[9]进行大通河气象要素的趋势性分析。对于时间序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$,先确定所有对偶值 $(x_i, x_j, j > i)$ 中的 $x_i < x_j$ 出现的次数 d_i 。检验统计量为:

$$U = \tau / [\text{Var}(\tau)]^{1/2} \quad (1)$$

其中:

$$\tau = \frac{4 \sum d_i}{n(n-1)} - 1 \quad (2)$$

$$\text{Var}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \quad (3)$$

原假设为时间序列数据 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 无趋势, 检验时, 按(1)式计算检验统计量 U , 然后取显著水平 $\alpha = 5\%$ 在正态分布表中查出临界值 $U_{\alpha/2} = 1.96$ 。当 $|U| > U_{\alpha/2}$ 时, 拒绝原假设, 即序列趋势显著; 反之, 接受原假设, 趋势不显著。若 $U > 0$, 说明序列存在递增趋势; 反之, 则为递减趋势。

3.2 突变性分析

采用非参数检验法 Mann-Kendall 方法来检验大通河流域气象要素的突变性^[10]。其特点是不需要样本遵从一定的分布, 受少数异常值的干扰较小, 因此对于气象等非正态分布的数据十分适用。

对于具有 n 个样本的时间序列 x , 构造其秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i < x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \quad (5)$$

假定时间序列随机独立, 定义如下统计量:

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}}, \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$E(s_k) = k(k-1)/4 \quad (7)$$

$$\text{Var}(s_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (8)$$

式中: UF_k 为标准正态分布。给定置信度 α , 若 $|UF_k| > U_{\alpha/2}$, 则表示时间序列有明显的变化趋势存在。

将时间序列 x 按逆序排列, 再按照上式计算, 同时:

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ k = n+1-k \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

通过分析 UF_k 和 UB_k 能进一步分析时间序列 x 的变化趋势, 而且可以判断突变点。若 $UF_k > 0$, 则表明序列有上升的趋势, $UF_k < 0$, 则表明有下降的趋势, 当 UF_k 曲线超过临界线时, 表明上升或下降的趋势显著。若 UF_k 和 UB_k 两曲线在临界之间出现交点, 那么该点即为突变点。

3.3 周期分析

水文时间序列含有周期成分、非周期成分和随机部分, 为了识别大通河流域气象要素的主要周期, 即对年降水、年均气温及年潜在蒸散的变化起主要作用的周期, 采用小波函数对气象要素序列进行连

续小波变换, 并用小波方差^[11]进行检验, 计算公式如下:

$$\varphi(t) = (1-t^2)e^{-t^2/2} \quad (10)$$

$$W_f(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (11)$$

$$W_f(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, \tau)|^2 d\tau \quad (12)$$

式中: $\varphi(t)$ 为墨西哥草帽函数; t 为时间; a 为尺度因子, $a > 0$; τ 为时间平移因子; $W_f(a, \tau)$ 为小波系数; $f(t)$ 为径流时间序列; $W_f(a)$ 为小波方差。

小波方差反映了信号波动能量随尺度 a 的变化过程, 通过绘制小波方差图, 可以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。

4 气候要素演变特性分析

4.1 气候要素时间变化分析

表 1 给出了大通河流域降水、年均温度及潜在蒸散发年际变化特征值的统计结果, 从变差系数 C_v 值来看, 年均气温的年际变化最大 ($C_v = 0.83$), 降水年际变化幅度最小 ($C_v = 0.11$)。从偏态系数 C_s 来看, 降水、年均温度及潜在蒸散发均为正偏, 且蒸散发序列分配极不对称 ($C_s = 2.94$)。从极值比来看, 降水的极值比最小为 1.71, 年均温度极值比最大, 达到 8.47。年均温度序列的波动程度要远远大于降水和潜在蒸散发序列。分别绘制出大通河流域 1960-2012 年的年降水、年均气温、年潜在蒸散发变化图如图 2~4 所示。回归分析结果显示, 该流域的年降水 53 a 来以 0.60 mm/a 线性趋势增加, 年均气温也以 0.03 °C/a 的线性趋势增加, 增加幅度不大; 而多年潜在蒸散发却呈现相反的趋势, 以 0.94 mm/a 线性趋势减小, 这与黄小燕等人对西北地区潜在蒸散量变化趋势研究成果基本一致^[12]。

同时分别计算它们的 Hurst 指数^[9], 以判断大通河流域各气象要素变化的持续性。结果表明, 大通河流域年降水及年潜在蒸散发的 Hurst 指数分别为 0.42、0.45, 均小于 0.5, 说明年降水及年潜在蒸散发未来的变化状况具有反持续性, 即与过去相反。而年均气温的 Hurst 指数 $H = 0.52 > 0.5$, 表明年均温度序列具有正持续性, 即将来一段时期内温度上升趋势仍会持续下去。

利用 Mann-Kendall 检验法分别对大通河流域各气象要素进行趋势性检验。经计算, 得到大通河

表 1 大通河流域降水、年均温度及潜在蒸散发年际变化特征值				
气象要素		年降水量/ mm	年均气温/ ℃	潜在蒸 散发/mm
特征值	均值	442.76	0.80	946.69
	C_v	0.11	0.83	0.16
	C_s	0.24	0.44	2.94
极大值	年份	1989	1998	1961
	极值	554.56	2.09	1505.01
	与多年均值比值	1.25	2.61	1.59
极小值	年份	1962	1977	1960
	极值	324.25	-0.25	669.92
	与多年均值比值	0.73	0.31	0.71
极值比		1.71	8.47	2.25

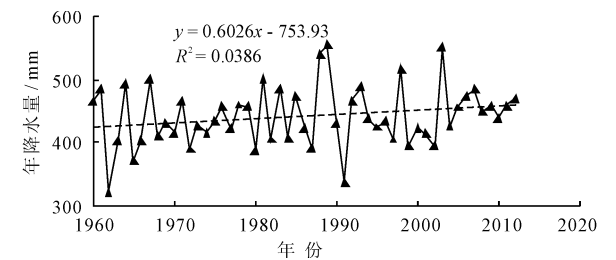


图 2 大通河流域年降水变化曲线图

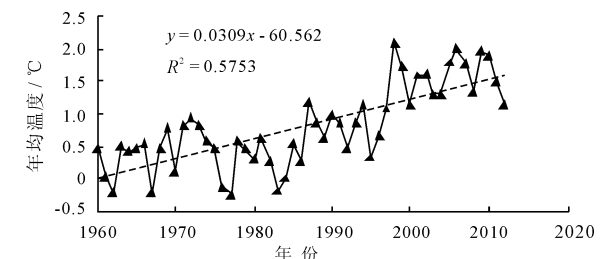


图 3 大通河流域年均气温变化曲线图

流域降水的检验统计值 $U = 1.48 < U_{\alpha/2} = 1.96$,说明大通河流域年降水呈现不显著增加趋势;年均温度检验统计值 $U = 5.73 > U_{\alpha/2} = 1.96$,说明流域年均温度具有显著性增加趋势;相反,年潜在蒸散发的检验统计值 $U = -0.35, |U| < U_{\alpha/2}$,说明流域年潜在蒸散发值存在不显著减小趋势。

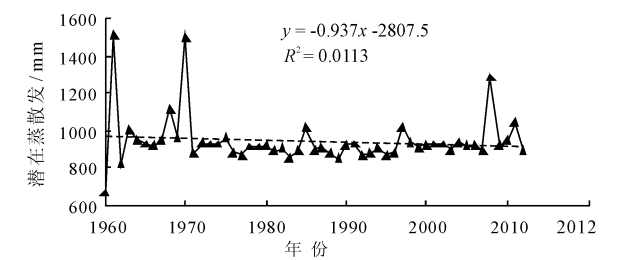


图 4 大通河流域年潜在蒸散发变化曲线图

4.2 气候要素空间变化分析

同时为了进一步从空间尺度分析大通河流域年降水、年均气温及年潜在蒸散的变化,借助 Arcgis 10.1 桌面版绘制其空间变化图,结果如图 5、6 所示。

由图 5(a)可以看出:大通河流域年降水呈现比较明显的带状分布,降水多集中在流域的中游。具体说来,从河源开始,降水在东西方向自西南向东北逐渐增加,在流域的中游达到最大,之后从中游至下游降雨量逐渐减小,河口年降水量达到最小。降水的这种空间分布在于大通河流域水汽主要来源于印度洋孟加拉湾上空的西南暖湿,而祁连山巨大的高度,具有拦截水汽的优越条件。受夏季东南季风和西南季风的强烈影响,导致流域年降水量南坡大于北坡^[13],且自西南向东北逐渐增加。从图 5(b)来看,年均温度的空间分布东高西低,南低北高,最高温度出现在流域下游,最低温度出现在流域河源处。这主要是由于气温随海拔的增加而递减。

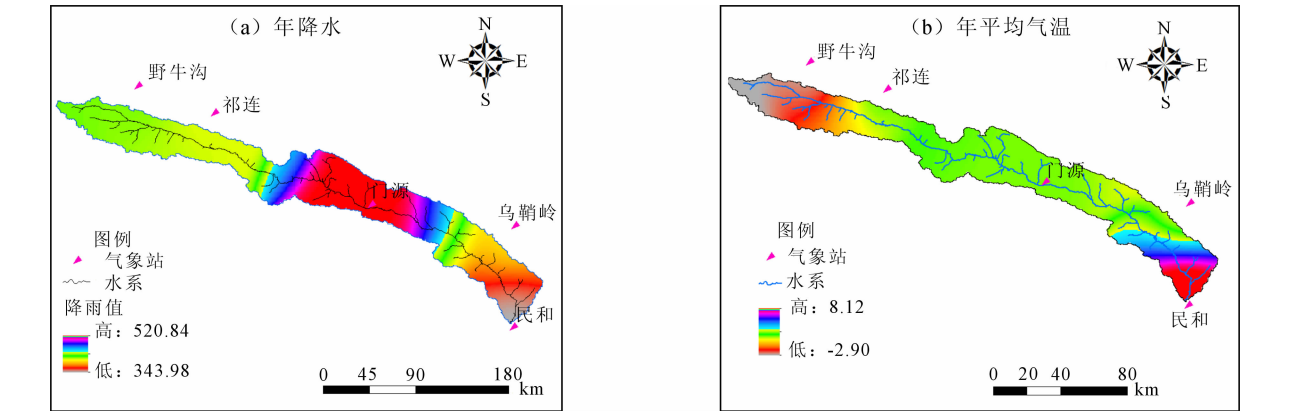


图 5 大通河流域年降水和年均温度空间变化图

图 6 表明,大通河流域年潜在蒸散同降水一样,自西南向东北呈现带状相间分布的规律,最大值出现在流域的中游河段。年潜在蒸散发的这种空间分布既要考虑地形因素,又要考虑气候因子,比如风速、相对湿度等各方面的影响^[14]。由此可见,由于各种因素的影响,大通河流域的年降水、年均温度及潜在蒸散发均存在明显的地域分布不均匀性。

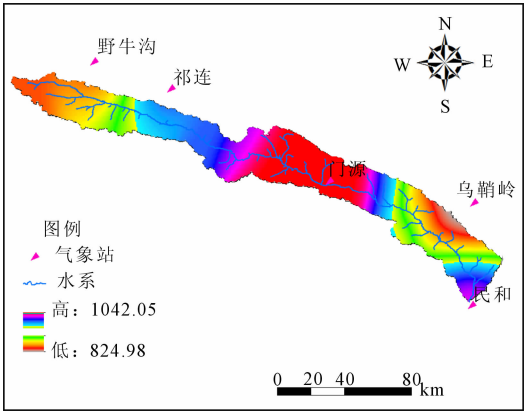


图 6 大通河流域年潜在蒸散发空间变化图

4.3 气候要素突变分析

进行气候要素突变分析时,首先利用滑动平均法对大通河流域各气象要素的变异进行初步诊断^[10],然后利用 Mann – Kendall 方法来详细地检验大通河流域各气象要素的突变性。最终结果见图 7 ~ 10。

由图 7 可知,大通河流域降水滑动平均值过程线中 1989、1991 及 2003 年左右出现比较明显的跳跃情况。但结合 Mann – Kendall 检验分析来看,尽管 UF 与 UB 有交点,但是 UF 与 UB 均未通过显著性检验,因此大通河流域降水并未出现突变,这与刘超等^[15]对黄河上游降水统计特性的研究结果一致。而在图 8 中,流域年均气温滑动平均值过程线呈现出明显的上升趋势,与趋势检验的结果一致,但并未出现比较明显的跳跃。从图 8 中 Mann – Kendall 曲线图看,年均气温的 UF 和 UB 两条曲线相交于 1962 年,且通过显著性检验。但是,由于突变结果出现在最开始年份,有必要进行更细致的分析^[10]。因此,借助累积距平法^[9]进行再次分析,结果见图 9 所示。

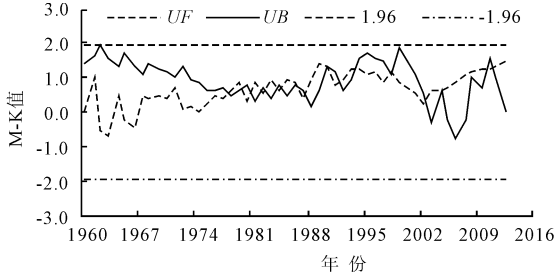
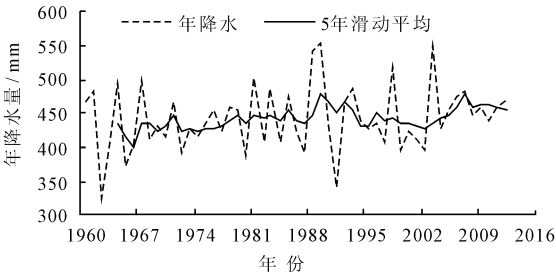


图 7 大通河流域年降水 5 年滑动平均曲线、M – K 曲线图

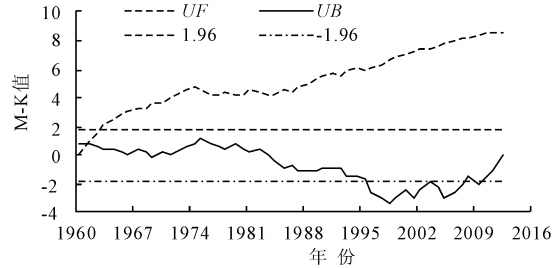
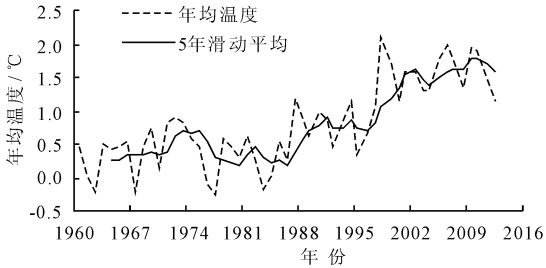


图 8 大通河流域年均温度 5 年滑动平均曲线、M – K 曲线图

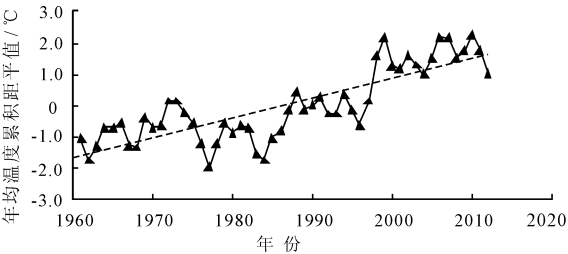


图 9 大通河流域年均温度累积距平图

由图 9 可以看出,大通河流域年均气温累积距平图与 5 a 滑动平均曲线呈现相同的趋势,而没有出现明显的突变或者跳跃点。所以,可以确定大通河流域年均气温并未发生突变。

同理,由图 10 可知,流域年潜在蒸散发滑动平均曲线显示在 1970、2008 年跳跃明显。结合 Mann – Kendall 法,最终确定年潜在蒸散发的突变点为: 1970 及 2008 年。

4.4 气候要素周期分析

采用小波分析法绘制大通河流域年降水、年潜在蒸散及年均气温序列小波变换方差图。借助小波方差图可以确定大通河流域气象要素变化存在的主要时间尺度,即主要周期,结果如图 11 所示。图 11 中横坐标为相应的周期,纵坐标为小波方差。由图 11 看出,大通河流域年降水序列小波方差有 2 个峰

值,分别对应 17 a 和 28 a 的时间尺度。第一峰值是 28 a,说明降水在 28 a 左右的周期震荡最强,为降水序列的第 1 主周期,第 2 主周期为 17 a。同理,年均气温小波方差图出现两个峰值,分别对应 8 a、15 a 的时间尺度,年潜在蒸散发序列小波方差变换图的峰值对应 18 a、30 a 的周期。

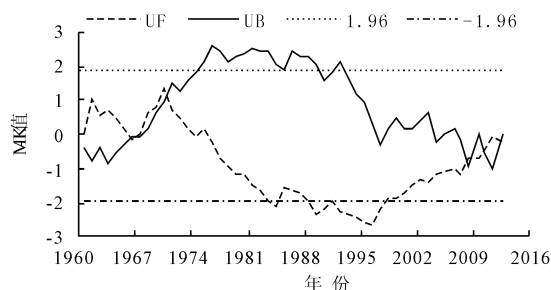
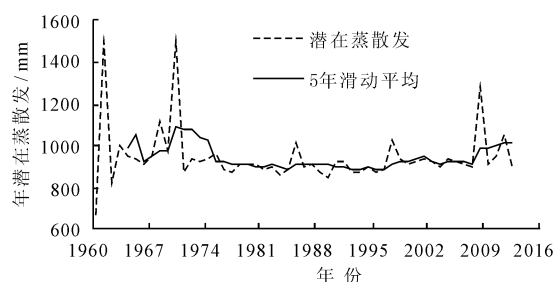


图 10 大通河流域潜在蒸散发 5 年滑动平均曲线、M-K 曲线图

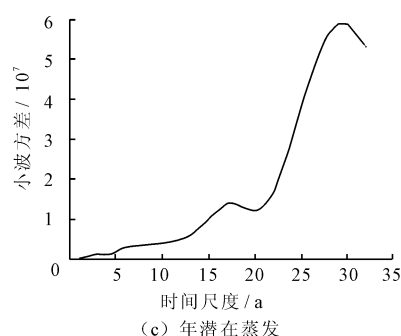
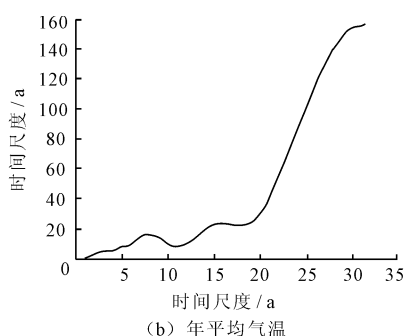
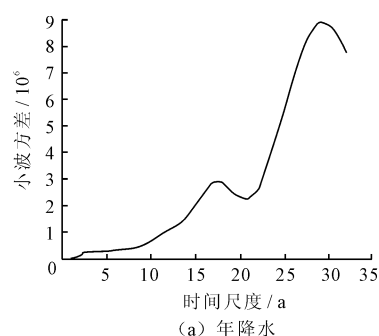


图 11 大通河流域年降水序列、年均气温序列和年潜在蒸散发序列小波方差图

5 结 语

本文利用大通河流域及其周边区域 5 个气象站 1960–2012 年的气温、降水、相对湿度、日照时数、风速等资料,采用 FAO Penman – Monteith 公式计算出该流域各气象站的潜在蒸散量。通过气候倾向率、滑动平均、Mann – Kendall 法、小波分析等方法对该区域降水、年均温度、潜在蒸散的变化特征进行了研究分析。结果表明:

(1)在时间变化上,大通河流域 53a 以来,年降水以 0.60 mm/a 线性趋势增加,增加趋势不显著且具有反持续性;年均气温以 0.03°C/a 的线性趋势增加,增加趋势显著并具有正持续性;而多年潜在蒸散发却呈现相反的趋势,以 0.94 mm/a 线性趋势不显著减小,且表现出反持续性。

(2)在空间变化上,受祁连山及夏季东南季风和西南季风的影响,大通河流域年降水自西南向东

北逐渐增加。而年均温度的空间分布东高西低,南低北高主要是由于气温随海拔的增加而递减。而流域年潜在蒸散自西南向东北呈现带状相间的分布规律既受地形的影响,又与其他气候因子密切相关。

(3)根据滑动平均和 Mann – Kendall 检验分析,该流域年降水及年均气温均未出现突变,这与国内其他学者的研究结果相同^[15–16]。而流域年潜在蒸散发在 1970 及 2008 年出现突变,对于此未来还需进一步研究。

(4)周期分析显示,大通河流域年降水序列第 1 主周期为 28 年左右,第 2 主周期为 17 年左右。年均气温小波方差有 2 个峰值,分别对应 8、15 年左右;而年潜在蒸散发序列周期为 18、30 年左右。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2001: the scientific basis: contribution of working group I to the third assessment report of the

(2)通过一次调水试验表明,模型的计算结果比较合理,在目前河道水力设施的基础上,调水实现了短期的活水目标,是改善河道水质的重要措施;调水对蓝藻生长的抑制机制主要在于冲刷和稀释作用,水体紊动对浮游植物生长抑制的作用效果未完全体现。

(3)建议相关部门对现有的河道进行疏浚,通过实施引排结合和充分利用水位差实现自流的调水模式,不仅能够保障河道水体相对长期的流动,而且能够发挥调水的最大效益,改善水体水质和有效地抑制蓝藻的增殖。

参考文献:

- [1] 黄远东,代静,陈林兴,等. 上海青浦城区西北片河网引清调水的研究[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(2): 14-17.
- [2] Arthington A H, Pusey B J. Flow restoration and protection in Australian rivers [J]. River Research and Applications, 2003, 19(5-6): 377-395.
- [3] Mitrovc S M, Chessman B C, Bowling L C, et al. Modeling suppression of cyanobacterial blooms by flow management in a lowland river [J]. River Research and Applications, 2006, 22(1): 109-114.

- [4] 展永兴,季轶华,沈利. 调水引流在太湖水环境综合治理中的作用分析[J]. 中国水利,2010(4): 53-55.
- [5] 马超,练继建. 人控调度方案对库区支流水动力和水质的影响机制初探[J]. 天津大学学报,2011, 44(3): 202-209.
- [6] Paerl H W, Huisman J. Climate. Blooms like it hot[J]. Science, 2008, 320(5872): 57-58.
- [7] 陈瑞弘,李飞鹏,张海平,等. 面向流量管理的水动力对淡水藻类影响的概念机制[J]. 湖泊科学,2015, 27(1): 24-30.
- [8] 李飞鹏,陈玲,张海平,等. 巢湖市河流表层沉积物重金属污染和风险评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 1852-1856.
- [9] 钱海平,张海平,于敏,等. 平原感潮河网水环境模型研究[J]. 中国给水排水,2013, 29(3): 61-65.
- [10] Li Feipeng, Zhang Haiping, Zhu Yiping, et al. Effect of flow velocity on phytoplankton biomass and composition in a freshwater lake [J]. Science of the Total Environment, 2013, 447: 64-71.
- [11] 哈希公司. 水质分析实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社,2009.
- [12] 傅建文,张庆强,王立亚,等. 引滦输水污染物特征及对于桥水库水质影响分析[J]. 水资源与水工程学报,2014, 25(5): 151-154.

(上接第29页)

- intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] 夏军,刘春蓁,任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展,2011,26(1): 1-12.
- [3] 陈梦熊. 西北干旱区水资源与第四纪盆地系统[J]. 第四纪研究,1997,17(2): 97-104.
- [4] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究,2003, 23(2): 152-164.
- [5] 任朝霞,杨达源. 西北干旱区近50年气候变化特征与趋势[J]. 地球科学与环境学报,2007,29(1): 99-102.
- [6] 姚俊强,杨青,陈亚宁,等. 西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J]. 生态学杂志,2013,32(5): 1283-1291.
- [7] 雷江群,黄强,畅建霞,等. 渭河流域气候要素演变特性分析[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(5): 1-5.
- [8] Adina - Eliza Croitoru, Adrian Piticar, Carmen Sofia Dragotă, et al. Recent changes in reference evapotranspiration in Romania [J]. Global and Planetary Change, 2013, 111: 127-132.
- [9] 王文圣,丁晶,金菊良. 随机水文学[M]. 北京: 中国水

- 利水电出版社,2008.
- [10] 周园园,师长兴,范小黎,等. 国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2011,30(1): 1361-1369.
- [11] 邵晓梅,许月卿,严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报(自然科学版),2006,42(4): 503-509.
- [12] 黄小燕,张明军,贾文雄,等. 中国西北地区地表干湿变化及影响因素[J]. 水科学进展,2011,22(2): 151-159.
- [13] 李万寿,陈爱萍,李晓东,等. 大通河流域水资源外调及其对生态环境的影响[J]. 干旱区研究,1997,14(1): 8-16.
- [14] 马宁,王乃昂,王鹏龙,等. 黑河流域参考蒸散量的时空变化特征及影响因素的定量分析[J]. 自然资源学报,2012,27(6): 975-989.
- [15] 刘超,秦毅,邓娜. 黄河上游主要干支流近期降水、径流统计特征变化分析[J]. 水土保持学报,2004, 18(1): 96-99.
- [16] 刘勤,严昌荣,张燕卿,等. 近50年黄河流域气温和降水量变化特征分析[J]. 中国农业气象,2012,33(4): 475-480.