

青藏高原大通河流域气候干湿状况时空分布研究

刘赛艳, 王义民, 刘登峰, 解阳阳

(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: 利用气候倾向率法、反距离加权插值、Mann-Kendall法、小波分析等对大通河干燥指数演变特性进行了分析, 以期为流域农业发展布局、生态环境保护以及梯级水电站调度运行提供科学依据。结果表明: 大通河流域地表有不显著变湿趋势, 干燥指数减小率 $0.05/10a$, 但这种湿化表现为反持续性; 流域气候空间上为南干北湿, 东干西湿, 干湿状况在流域上呈现出比较明显的带状交替格局; 流域四季与全年一样表现出变湿趋势, 其中以春季和冬季湿化较为明显, 干燥指数减小率分别 $0.049/10a$ 、 $3.79/10a$, 但只有冬季通过显著性检验, 且冬季湿化趋势具有反持续性; 季干燥指数空间分布不均, 表明流域季节气候干湿变化存在着明显的地域差异性; 干湿周期分析显示, 流域存在7、17及29a的周期, 春季存在4、13及28a的周期, 夏季存在8、17及30a的周期, 秋季周期对应5、17及26a; 冬季气候对应5、9及29a的周期。

关键词: 干燥指数; 气候干湿; 时空分布; 气候变化; 大通河

中图分类号: P426.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)04-0108-07

Research on temporal and spatial distribution of climate dry - wet status in Datong river basin

LIU Saiyan, WANG Yimin, LIU Dengfeng, XIE Yangyang

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

Abstract: The paper used climatic trend rate, inverse distance weighted, and Mann-Kendall and wavelet analysis method to analyze the evolution of dry index so as to provide scientific basis for the agricultural development, protection of ecological environment and dispatch operation of cascade hydropower in Datong River basin. The results showed that: there is unremarkable trend of becoming humid in surface of the basin, the annual aridity index is decreased by 0.05 per ten years with, but there is anti-persistence. The climate of the basin is dry in south and wet in north, and dry in east and wet in west on spatial distribution. The status of dry and wet presents more clear pattern of banded alternation; the climate of four seasons also shows the tendency of wet. The humidified trend is more obvious in spring and winter. The aridity indexes in spring and winter are decreased by 0.049 and 3.79 per ten years respectively. However, only the trend in winter passed significant test, and the wet trend has anti-durative. The temporal distribution of season dry index is uneven. There is obvious regional differences in the dry and wet change of season climate; the periods of annual aridity index are 7, 17 and 29 years; the cycles of aridity index in spring are 4, 13 and 28 years, and that in summer are 8, 17 and 30 years, that in autumn are 5, 17 and 26 years while that in winter are 5, 9 and 29 years.

Key words: aridity index; dry-wet of climate; temporal and spatial distribution; climate change; Datong River

收稿日期: 2015-03-30; 修回日期: 2015-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(51190093、51309188、51179149); 陕西省重点科技创新团队(2012KCT-10); 国家重大基础研究发展计划(973计划)(2011CB403302-2); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201501058); 教育部博士学科点基金(20136118120021)

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: 王义民(1972-), 男, 山西新绛人, 博士, 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

气候变化国家评估报告(I)指出,在全球变暖背景下,近100a来中国年平均地表气温明显增加,升温幅度约为 $0.5 \sim 0.8^{\circ}\text{C}$,比同期全球平均值略高 $0.6^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ^[1]。西北地区地处内陆,气候干旱,是我国重要的畜牧业基地,同时也是生态环境脆弱区和气候变化的敏感地带。近年来,对西北地区气候干湿状况的研究表明:西北干旱区气温普遍升高^[2],伴随着温度升高,降水量也呈增加趋势,导致西北地区气候暖干化向暖湿化转型^[3]。黄小燕等研究发现西北地区近50年来有变湿趋势,湿润指数平均每10年增加0.006;季节上以春、冬两个季节的增加趋势最明显^[4]。马柱国等利用月降水总量与月最大潜在蒸发计算了我国西北地区地表湿润指数,研究发现西北西部的年际及年代际变化趋势基本相反,前者地表为变湿趋势,后者为变干趋势^[5]。对于西北干旱区气候的暖湿化趋势^[6],张永等的研究结果发现西北地区的干湿状况存在很大的区域差异性^[7]。

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。由于地表水资源丰富,大通河流域不仅是青海省重点水源涵养区和天然林保护区,也是祁连山重要的牧业区以及国家重点野生动物保护区;同时大通河流域河口地区是青海、甘肃两省农业和蔬菜、果类重要的生产基地,工农业发达。目前,大通河流域水资源开发利用工程主要是以外调水工程及梯级水电站建设为主。在气候变化背景下,深入了解大通河流域气候干湿状况时空分布规律,对于当地农业发展的布局、生态环境的保护以及梯级水电站调度运行等都具有重大的现实意义。干燥指数^[8]是指某地一定时段内的潜在蒸发量与同期降水量的比值,它的定义不仅考虑了干旱状况需要的能量条件,如气温、太阳辐射、温度等,还考虑了水分条件的影响,能够客观的反映气候干湿演变特征^[9],目前在渭河流域、西北及东北地区都得到了应用^[8-10]。因此,为了认识大通河流域的近半个世纪以来气候干湿状况,本文针对大通河流域干燥指数进行分析,借助气候倾向率法、Mann-Kendall法和小波分析等各种方法研究其变化特征及演变规律,以期为区域气候变化适应性对策的制定和选择提供科学依据。

2 研究区概况及数据来源

大通河位于东经 $98^{\circ}30' \sim 103^{\circ}15'$ 、北纬 $36^{\circ}30' \sim 38^{\circ}25'$ 之间,是黄河最大的二级支流,湟水的一级支流,发源于青海省天陵县木里山,流经青海省的天峻、祁连、刚察、海晏、门源、互助、乐都、民和以及甘肃省的天祝、永登、红古等11个县(区),在民和县享堂镇汇入湟水,全流域面积 $15\,130\text{ km}^2$ 。大通河流域干流全长 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% 。流域地形西北高、东南低,两侧依山傍岭,干流峡谷与盆地相间。流域内山峦起伏、地势高耸,主要山脉有托勒山、冷龙岭、大通山、大坂山,其峰脊海拔大都在 $4\,500\text{ m}$ 左右,其中冷龙岭雄居群山之首,海拔达 $5\,254\text{ m}$ 。流域80%以上的集水面积分布在海拔 $3\,000\text{ m}$ 以上。近年来,受气候变化和人类活动的影响,该区域水资源紧缺^[11],洪涝和干旱等灾害时有发生。

本文所采用的气象数据来源于中国气象数据共享服务网,包括:降水、气温、湿度、气压、风速、日照时数、相对湿度等21个气象因子。选取大通河流域及其周边区域5个气象站1960-2012年的气象资料,包括:门源、祁连、乌鞘岭、野牛沟、民和。利用泰森多边形法,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,根据世界粮农组织(FAO)1998年修正的Penman-Monteith模型计算各气象站潜在蒸散量,形成了该流域年潜在蒸散量序列以及能反映该区域干湿状况的干燥指数时间变化序列,同时按照12月至翌年2月为冬季,3-5月为春季,6-8月为夏季和9-11月为秋季生成逐季序列。大通河流域各气象站点分布如图1所示。

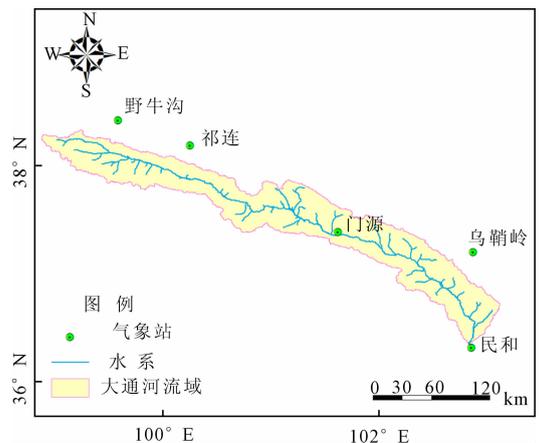


图1 大通河流域气象站点分布图

3 研究方法

为了研究大通河流域气候干湿状况时空分布,首先计算出流域的潜在蒸散发,然后再计算流域的年以及春夏秋冬四季的干燥指数,最后对所得到的干燥指数展开趋势性、周期性等的研究及分析。

3.1 潜在蒸散量

采用世界粮农组织 (FAO) 1998 年修正的 Penman - Monteith 模型计算潜在蒸散量^[12]: $ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$ (1)

式中: ET_0 为可能蒸散量, mm/d; R_n 为太阳净辐射, MJ/m², 计算过程参考文献[13]; G 为土壤热通量, MJ/m², 相对于净福射来说, 土壤热通量 G 是很小的量, 特别是当地表被植被覆盖、计算时间尺度是 10 d 或更短时, 假定 $G \approx 0$ ^[14]; T 为 2 m 高处日平均气温, °C; u_2 为 2 m 高处风速, m/s; e_s 为饱和水气压, kPa; e_a 为实际水气压, kPa; Δ 为饱和水气压曲线斜率, kPa/°C; γ 为干湿表常数, kPa/°C。

本研究忽略 1.5 m 和 2 m 高处的气温、湿度差别, 以常规 1.5 m 处的气温、湿度记录近似代替 2 m 处的气温、湿度值, 利用公式(2)修正得到 2 m 高处的风速。

$$u_2 = u_z = \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (2)$$

式中: u_2 为 2 m 高处的风速, m/s; u_z 为 z m 高处测量的风速, m/s; z 为风速计仪器安放的离地面高度, m。

3.2 干燥指数

干燥指数是表征一个地区气候干燥程度的指数。本文采用潜在蒸散量与降水量之比作为干燥指数:

$$H = \frac{ET_0}{P} \quad (3)$$

式中: H 为干燥指数; ET_0 为潜在蒸散量, mm; P 为降水量, mm。干燥指数越大表明气候越干旱, 反之则越湿润。

4 结果与分析

4.1 干燥指数变化特征

4.1.1 干燥指数统计特征 表 1 给出了大通河流域年际及春夏秋冬四个季节干燥指数的统计特征值的统计结果, 从变差系数 C_V 值来看, 冬季干燥指数的变化幅度最大 ($C_V = 0.62$), 年干燥指数的变化幅

度最小 ($C_V = 0.17$)。从偏态系数 C_S 来看, 大通河流域年际与四季的干燥指数系列均为正偏, 且秋季干燥指数序列分配极不对称 ($C_S = 2.54$)。从极值比来看, 夏季干燥指数极值比最小为 2.20, 冬季干燥指数极值比最大, 达到 10.04, 由此可见冬季气候干湿状况的波动程度要远远大于其它三个季节及全年气候干湿波动。同时还可以发现, 春夏秋冬四个季节的干燥指数的均值、极大值与极小值的最小值均出现在夏季, 最大值均出现在冬季。可见, 流域气候夏季相对较湿润, 冬季相对较干燥, 这与实际也是相符的。

表 1 大通河流域年际与四季干燥指数变化特征值

统计特性	年干燥指数	春季干燥指数	夏季干燥指数	秋季干燥指数	冬季干燥指数
特征值					
均值	2.17	4.05	1.51	2.35	23.16
C_V	0.17	0.33	0.19	0.52	0.62
C_S	0.89	0.79	0.55	2.54	2.09
年份	1970	1995	1991	1991	1962
极大值					
极值	3.6	7.4	2.2	7.2	72.3
与多年均值比值					
极值	1.66	1.83	1.46	3.06	3.12
年份	1960	1964	1993	1975	2005
极小值					
极值	1.4	1.9	1	1.2	7.2
与多年均值比值					
极值比	0.65	0.47	0.66	0.51	0.31
极值比	2.57	3.89	2.20	6.00	10.04

4.1.2 干燥指数空间变化特征 绘制出大通河流域年与四季干燥指数的空间变化图, 见图 2 所示。根据干燥指数的空间分布可以对流域气候干湿状况进行空间分析。由图 2 可以看出, 大通河流域全年及四季干燥指数空间变化分布不均, 即流域气候干湿变化存在着明显的地域差异性。一方面, 从整体上看, 除了夏季干燥指数的最小值出现在河源地区之外, 剩下三个季节及年干燥指数的最小值均出现在流域的上中游 (门源气象站周围), 但是另一方面, 它们各自的分布规律却不尽相同。

具体来说, 春季干燥指数先由西南向东北减小, 最小值出现在流域中游, 而后干燥指数又逐渐增大, 在河口处干燥指数达到最大。因此, 可以判断春季气候在空间上由西南向东北逐渐变湿, 最湿润的地点出现在流域中游, 而后又开始不断变干, 河口处为气候最干燥处。而夏季干燥指数最小值出现在河源处, 且干燥指数南低北高, 由西南向东北逐渐变大,

在河口处达到最大。因此,可以判断流域夏季气候存在着南湿北干,且由西南向东北方向逐渐变干的格局。秋季干燥指数的空间分布呈现出明显的分区状态,河源河口干燥指数大小相近,中游干燥指数最小。因此,可以判断流域秋季气候的干湿分布空间分布呈现明显的分区状态,河源河口气候干湿分布一致,最湿润的位置出现在中游。冬季与春季干燥指数空间分布规律相似。因此,冬季与春季气候干湿的分布规律也类似,先变湿后变干,但是与春季不

同的是冬季流域最干燥的地方出现在上游。年干燥指数的空间分布呈现出南高北低、东高西低,且干燥指数大小呈现带状交替。因此,可以判断流域全年气候干湿的空间分布是南干北湿,东干西湿,干湿状况在流域上呈现出比较明显的带状交替格局。大通河流域气候干湿状况的时间、空间分布不均,既与影响既与影响潜在蒸散发的各种气候因子,比如光照、湿度、风速等有关^[15],还有流域降水时空分布不均紧密相关^[16]。

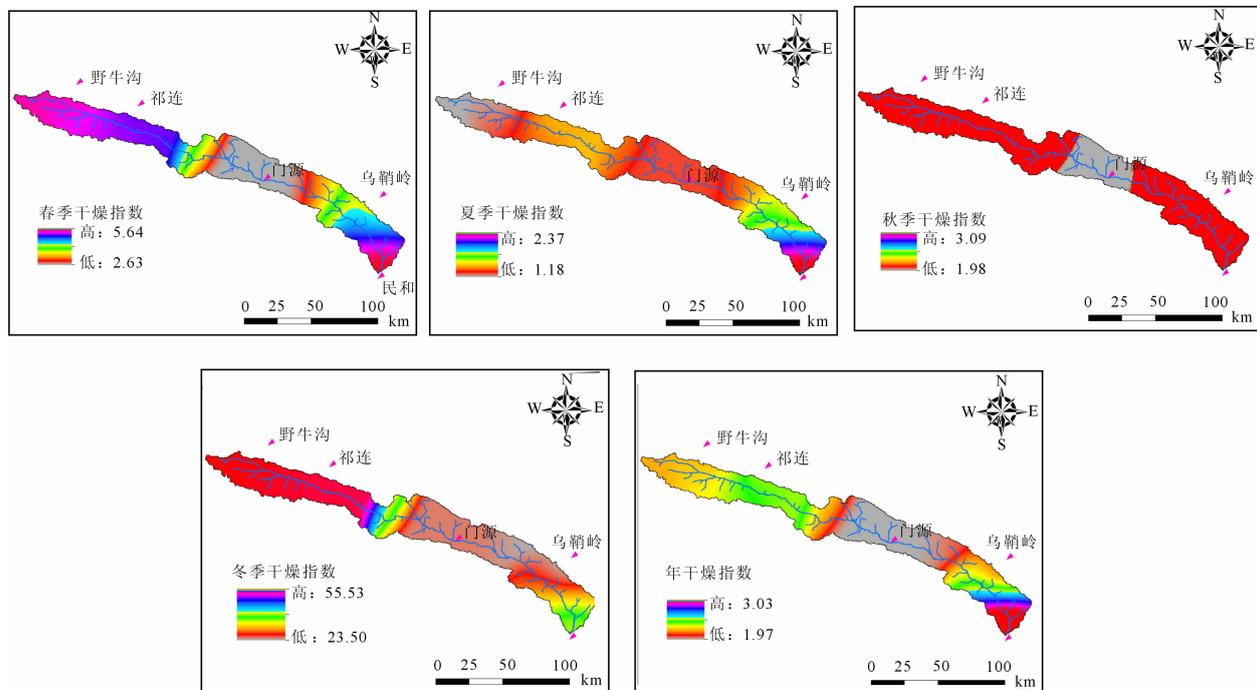


图2 大通河流域干燥指数空间分布图

4.1.3 干燥指数变化趋势 将大通河流域1960-2012年的年干燥指数变化趋势绘制成图,如图3(左)所示。图中,折线表示历年值,斜线表示线性趋势线。由图3(左)可以看出,近半世纪以来大通河流域干燥指数以0.05/10a线性趋势减小。但检验统计量 $U = -1.40$,不能通过 $\alpha = 5\%$ 的Mann-Kendall检验^[17],因此干燥指数线性变化趋势并不明显。大通河流域年干燥指数的减小趋势,从侧面反映出流域气候有变湿趋势,这与施雅风等人^[4,6]认为西北地区气候出现暖湿转变的信号基本一致。为了研究气候这种湿化的持续性^[17],计算其Hurst指数,发现Hurst指数 $H = 0.43$,表明干燥指数序列具有负的持续性,即过去的变湿趋势意味着将来的变干趋势,但这种反持续性不强。

图3(右)是1960-2012大通河流域年干燥指数变化倾向率分布图。由图中可以看出,大通河流

域干燥指数的年际变化也表现出了不同的空间差异。根据干燥指数变化的空间差异,可以将研究区域划分成2个区域:①气候干燥持续减小区,即湿化区,包括大通河流域河源、下游与河口地区;②气候干燥轻度增加区,即干化区,主要是流域上中游地区。

图4~7为大通河流域春夏秋冬四个季节干燥指数年际变化及倾向率空间分布图。从图中可以看出流域各季节干燥指数时间变化也表现出线性减小趋势,其中以春季和冬季的减小趋势较为明显,减小率分别为0.049/10a、3.79/10a。分别计算各个季节的检验统计值 U ,除了冬季 $U = -2.76$, $|U| > U_{\alpha/2}$,其余三个季节的统计值分别为:春季-0.61、夏季-0.02、秋季-0.51, $|U| < U_{\alpha/2}$ 。因此,可以判断大通河流域冬季出现明显的变湿趋势,这与黄小燕^[4]等的研究成果一致。为了进一步研究大通河流域四季气候干湿变化的持续性,分别计算其Hurst指数,结果除了春季干燥指

数序列的 Hurst 指数大于 0.5 ($H = 0.51$) 以外,其余季节的 Hurst 指数均小于 0.5,分别为夏季 0.44、秋季

0.44、冬季 0.47。这说明春季气候变湿具正持续性,而其他季节气候变湿具有反持续性。

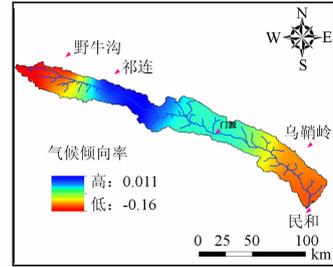
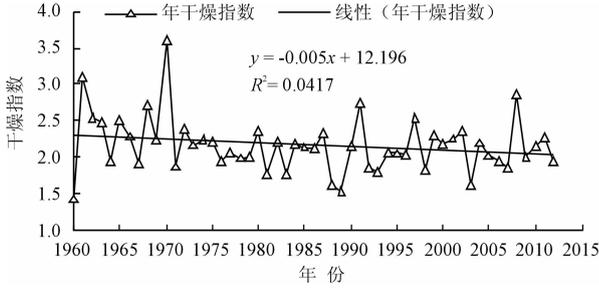


图3 大通河流域干燥指数时间变化(左)、气候倾向率空间分布(右)

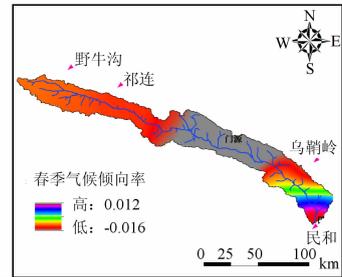
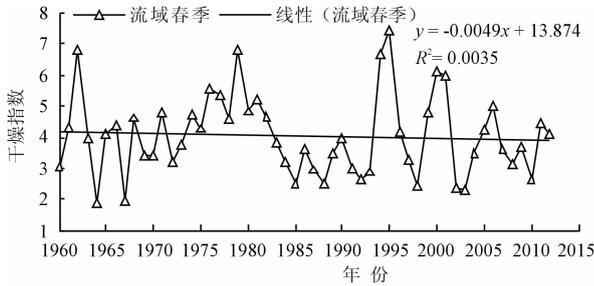


图4 大通河流域春季干燥指数时间变化(左)、气候倾向率空间分布(右)

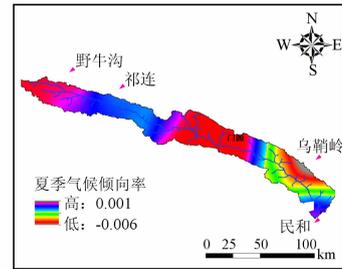
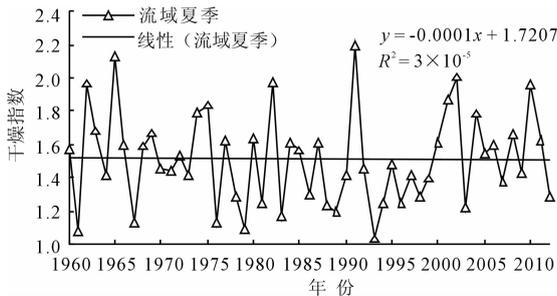


图5 大通河流域夏季干燥指数时间变化(左)、气候倾向率空间分布(右)

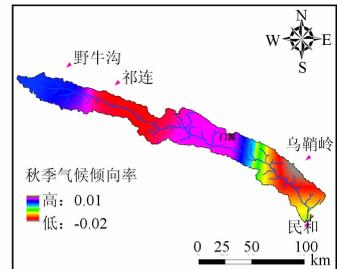
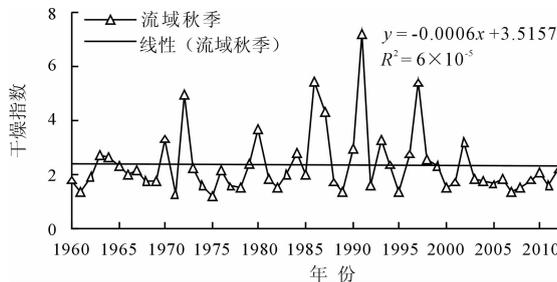


图6 大通河流域秋季干燥指数时间变化(左)、气候倾向率空间分布(右)

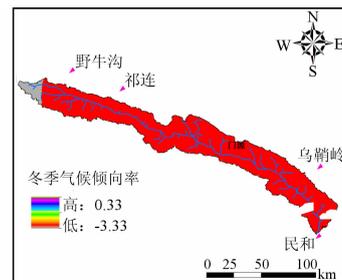
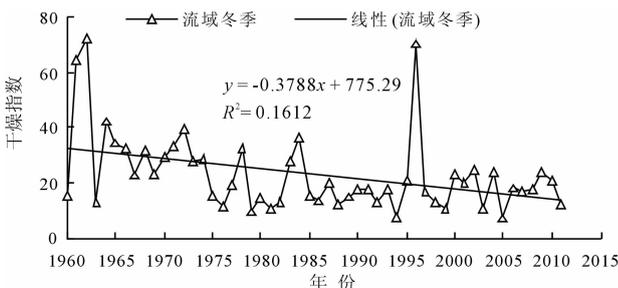


图7 大通河流域冬季干燥指数时间变化(左)、气候倾向率空间分布(右)

从四季气候倾向率空间分布图可以看出,流域季节地表干湿状况变化也呈现出空间差异。但是除了秋季,气候倾向率最大值出现在流域中上游(门源气象站周围)外,其余季节流域中游气候倾向率一般都表现为最小值,即出现气候变湿现象。具体来说,春季流域中游显示出比较明显的变湿现象,其余河段呈现出微小的变干趋势。夏季,流域变干变湿现象交替出现,虽然变干变湿率分别为 $0.01/10a$, $0.06/10a$ 相对较小,但是变湿率仍大于变干率。秋季,流域干燥指数与夏季类似,但是气候倾向率却较

夏季的大,变干变湿率分别为 $0.1/10a$, $0.2/10a$ 。冬季流域气候倾向率空间分布整体都表现出明显的变湿格局。

4.2 干燥指数周期性分析

采用小波分析法^[18]绘制大通河流域年干燥指数及四季干燥指数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干燥指数变化存在的主要时间尺度,即主要周期,结果如图8所示。图8中横坐标为相应的周期,纵坐标为小波方差。

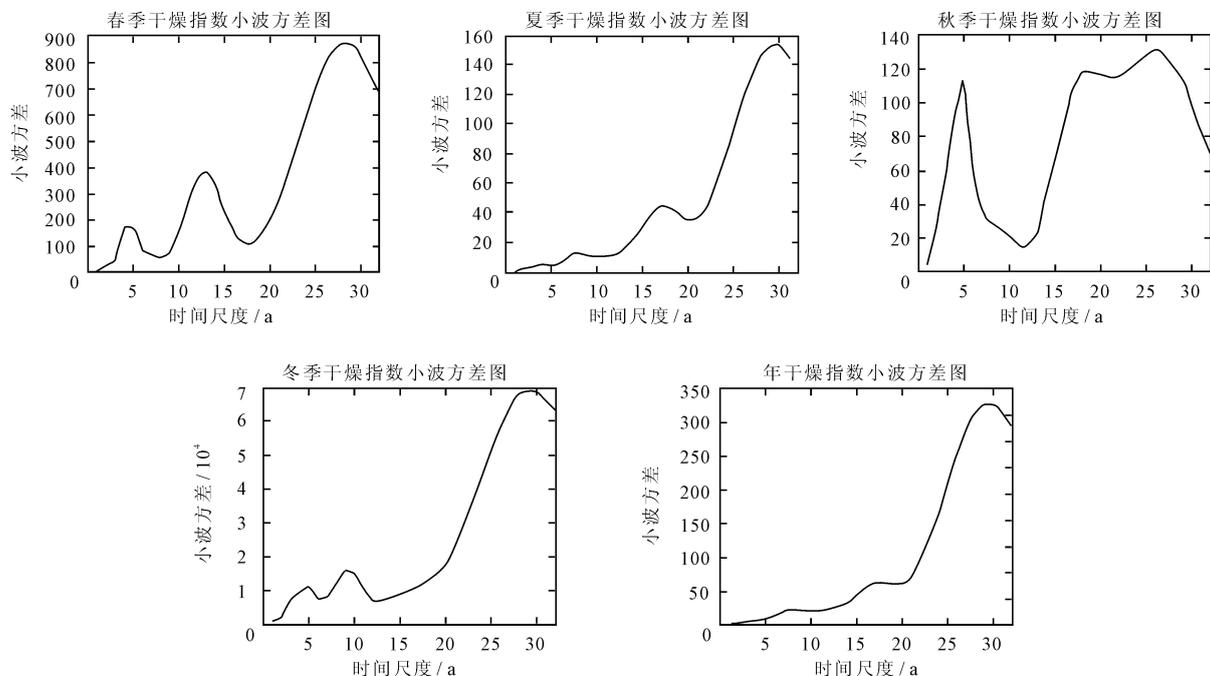


图8 大通河流域春夏秋冬四季干燥指数小波方差图

由图8看出,大通河流域春季干燥指数序列小波方差有3个比较明显的峰值,分别对应4、13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13 a,第3主周期为4 a。同理,夏季干燥指数小波方差图也出现3个峰值,分别对应8、17及30 a的时间尺度;秋季干燥指数序列小波方差变换图的峰值对应5、17及26 a的周期;冬季干燥指数序列小波方差变换图的峰值对应5、9及29 a的周期;年干燥指数序列小波方差变换图的峰值对应为7、17及29 a。

5 结语

本文首先采用修正的Penman - Monteith模型分别对大通河流域内及周边的5个气象站进行潜在蒸散量计算,然后计算出流域的年、季干燥指数,最

后借助各种方法,对其进行分析。结果表明:

(1)近半世纪以来,大通河流域地表有不显著变湿趋势,干燥指数减小率 $0.05/10a$,但这种湿化表现为反持续性。就空间分布而言,流域全年气候干湿的空间分布是南干北湿,东干西湿,干湿状况在流域上呈现出比较明显的带状交替格局。

(2)流域四季气候干湿状况与全年基本一致,季干燥指数序列均呈现出线性减小趋势,其中以春季和冬季干燥指数减小趋势较为明显,减小率分别为 $0.049/10a$, $3.79/10a$ 。显著性检验表明,流域冬季出现明显的变湿趋势,同样这种湿化表现为反持续性。空间上,季干燥指数分布不均,表明流域季节气候干湿变化存在着明显的地域差异性。

(3)周期分析显示,大通河流域存在7、17及29 a的干湿周期,春季存在4、13和28 a的干湿周期,夏季存在8、17及30 a的干湿周期,秋季周期对应

5、17 及 26 a; 冬季气候对应 5、9 及 29 a 的周期。

[参考文献]:

- [1] 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告(1):中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展,2006,2(1):3-8.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 马柱国,符淙斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J]. 气象学报,2000,59(6):737-746.
- [6] 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.
- [7] 张永,陈发虎,勾晓华,等. 中国西北地区季节性干湿变化的时空分布:基于 PDSI 数据[J]. 地理学报,2007,62(11):1142-1152.
- [8] 郑红星,刘静. 东北地区近 40 年干燥指数变化趋势及其气候敏感性[J]. 地理研究,2011,30(10):1765-1774.
- [9] 王鹏祥. 西北地区干湿气候转型研究[D]. 南京:南京信

息工程大学,2006.

- [10] 雷江群,刘登峰,黄强. 渭河流域气候变化及干湿状况时空分布分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(3):175-181.
- [11] 张晓晓,张钰,徐浩杰. 1950~2005 年大通河流域径流变化特征及影响因素[J]. 水文,2013,33(6):90-96.
- [12] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements [R]. Rome: FAO, 1998.
- [13] 童成立,张文菊,汤阳,等. 逐日太阳辐射的模拟计算[J]. 中国农业气象,2005,26(3):165-169.
- [14] 李修仓. 中国典型流域实际蒸散发的时空变异研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2013.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.

(上接第 107 页)

4 结 语

(1) 最大熵法是以最大信息熵原理为基础,在已知概率密度函数前提下,反求约束条件,通过 Lagrange 乘子分别构建与参数和约束条件之间的关系,消去 Lagrange 乘子后,建立参数与统计特征之间的关系。

(2) 梅林变换可以作为推导最大熵法的一种新方法,阐述了推导步骤和注意问题。

(3) 对 5 大类 13 种水文频率分布线型进行了参数估计最大熵法的推导,结果证明,该推导过程既简单又易懂。

参考文献:

- [1] Singh V P. Entropy-based parameter estimation in hydrology [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [2] 张明,柏绍光,张阳,等. 用 Mellin 变换推导几种分布参数估计的最大熵法[J]. 水电能源科学,2014,32(6):16-18.
- [3] Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics [J]. Physical Review, 1957,106(4):620-630.
- [4] 时公涛,高贵,周晓光,等. 基于 Mellin 变换的 G0 分布参数估计方法[J]. 自然科学进展,2009,19(6):677-690.
- [5] 肖可以,宋松柏. 最大熵原理在水文频率参数估计中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(2):197-205.