

Analysis of Response Relation between Seasonal Change in Meteorological Elements and Runoff in the Dongjiang River Basin*

Yanhu He¹, Xiaohong Chen¹, Kairong Lin^{1,2}, Yan Wang^{1,2}

¹Center for Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou

²Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong Higher Education Institutes, Guangzhou
Email: heyianhu456@163.com, eescxh@mail.sysu.edu.cn

Received: Jun. 18th, 2012; revised: Jun. 27th, 2012; accepted: Jul. 6th, 2012

Abstract: Based on the monthly runoff and meteorological data during 1959-2009 of the Dongjiang River Basin, the space-time change of meteorological elements and variation tendency of the runoff were analyzed by using the Mann-Kendall trend test, correlation analysis and relevancy analysis methods. The correlation and relevancy between them were also found out. The results showed that: 1) The precipitation and temperature decrease in summer and fall, while evaporation showed a significant reduction in each season; 2) The seasonal spatial distribution of precipitation and temperature is obvious, while that of evaporation distribution is relatively consistent; 3) The correlation coefficients of evaporation and precipitation between seasonal runoff are larger than that of temperature, and the relevance of evaporation with runoff in the four seasons are the smallest. The result can elaborate the response relationship between seasonal change of meteorological elements and runoff, which provides a basis for water resources planning and evaluation.

Keywords: Meteorological Elements; Seasonal Variation; Runoff Response; Dongjiang River Basin

东江流域气象要素季节性变化与径流响应关系分析*

何艳虎¹, 陈晓宏¹, 林凯荣^{1,2}, 王妍^{1,2}

¹中山大学水资源与环境研究中心, 广州

²华南地区水循环和水安全广东普通高校重点实验室, 广州
Email: heyianhu456@163.com, eescxh@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2012年6月18日; 修回日期: 2012年6月27日; 录用日期: 2012年7月6日

摘要: 基于东江流域 1959~2009 年逐月径流与气象资料, 采用 Mann-Kendall、相关分析及关联度分析等方法, 计算并分析了东江流域气象要素季节性时空变化和径流量变化趋势及二者的相关性和关联度, 以阐述气象要素季节性变化对径流的响应关系, 为流域水资源规划与评价提供依据。结果表明: 1) 流域降雨和气温夏季和秋季均呈减少趋势, 而蒸发则各季节均呈现出显著减少趋势; 2) 降雨和气温季节性空间分布差异较为明显, 而蒸发分布规律则相对一致; 3) 降雨和蒸发与径流季节性相关系数较气温大, 蒸发于四个季节与径流的关联度均最小。

关键词: 气象要素; 季节性变化; 径流响应; 东江流域

*基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50839005)、国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB428405)、广东省自然科学基金(S2011010001549)和广州市珠江科技新星专项(2011J2200051)。

作者简介: 何艳虎(1986-), 男, 河南息县人, 博士研究生, 主要从事水文与水资源方面的研究。

1. 引言

气候本身的变化如大气的增温而导致与水资源形成直接有关的要素如降水、蒸发等的变化, 对水资源量产生影响^[1], 气候变化对水文水循环和水资源的影响也成为当今科学研究的热点^[2]。通过对变化环境下各气象水文要素的变异分析, 能够更好地认识区域水资源变化的自然规律, 从而进一步揭示区域水资源供求关系, 保障区域水资源的可持续利用。东江流域中下游地区经济发达, 承担着向流域外的香港、穗平半岛供水的重任, 水资源需求量大^[3]。上世纪 80 年代以来, 该地区经济迅速发展, 人类活动及 ENSO 等对流域气候产生了较大影响^[4]。关于气候变化对流域水资源产生的影响已日益得到关注, 但相关研究主要是以年尺度为主^[5,6], 而对于各气象要素季节性的变化趋势和空间分布特征研究尚少。基于此, 本文依东江流域径流与气象资料, 采用 Mann-Kendall、相关分析及关联度分析方法, 拟分析东江流域主要气象要素季节性时空变化特征及其与径流量的相关性和关联度, 以更好地揭示气候变化对流域径流的影响机理, 为东江流域水资源规划与评价及减缓气候变化带来的影响提供依据。

2. 数据和方法

2.1. 数据来源及处理

分析资料为广东省气象局提供的东江流域 13 个气象站 1959~2009 年逐月平均降雨、蒸发和气温等气象要素序列; 流域水文控制站博罗站历年逐日径流序列。博罗站集雨面积 25,325 km², 占流域总面积的 93.7%^[7]。

已有研究表明^[8], 反距离加权插值法(Inverse Distance Weighted, 简称 IDW)较其他几种空间插值方法(Spline、Kriging)于东江流域较为适用。依东江流域范围大小, 据现有实测气象资料站点个数, 选择流域内及其周边共 13 个站点用来做空间插值的站点; 以各站点气象要素序列作为输入, 用 IDW 法进行流域面的空间插值, 经过插值, 得到流域 1959~2009 年各气象要素季度平均值序列。

流域主要气象及水文站点如图 1 所示。

2.2. 研究方法

1) 相关性分析

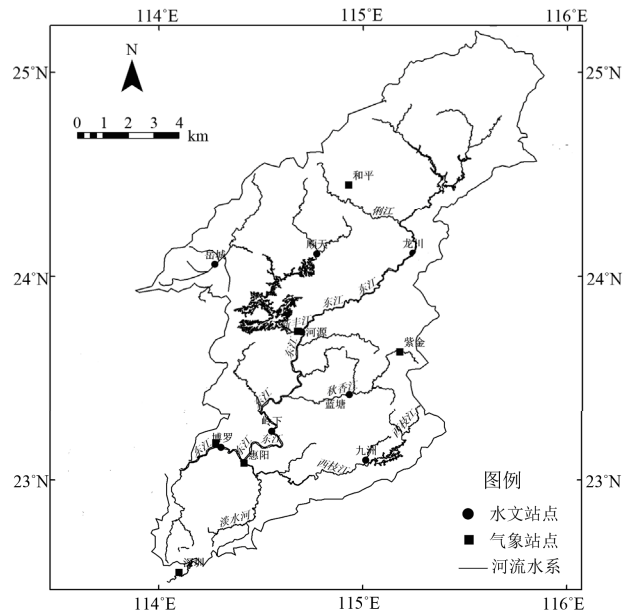


Figure 1. Distribution of the main gauge stations in the Dongjiang River Basin
图 1. 东江流域主要站点示意图

相关分析法是判定两个随机变量之间相关关系的密切程度较为常用的一种分析方法^[9]。其公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (K_{x_i} - 1)(K_{y_i} - 1)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (K_{x_i} - 1)^2 \sum_{i=1}^n (K_{y_i} - 1)^2}} \quad (1)$$

式中, $K_{x_i} = \frac{x_i}{\bar{x}}$, $K_{y_i} = \frac{y_i}{\bar{y}}$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$,

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i。$$

r 为两随机变量的相关系数, 其值介于(-1,1)之间, 若 $r > 0$ 表示正相关, 即两要素同向相关; 若 $r < 0$ 表示负相关, 即两要素异向相关; r 的绝对值越接近 1, 表示两随机变量相关性越大, 越接近 0 表示相关性越小。

2) 关联度分析

对两个系统或因素之间关联性大小的量度称为关联度, 用来描述系统运动变化过程中因素间相对变化情况。关联度分析与上述相关分析在理论基础、具体方法、数量要求及研究重点上各不相同, 具体可参考相关文献^[10]。

关联度分析一般包括如下几个步骤: a) 原始数据转化; b) 计算关联系数; c) 求关联度; d) 排关联序;

e) 列关联矩阵。可视具体情况决定是否进行所有步骤。

自然界水文水文循环过程中, 径流及与其密切相关的气候要素可构成一个复杂系统^[1]。选择相关分析法和关联度分析法, 通过分析各气象要素与径流的相关系数及关联度, 找出影响径流变化的主要气象因子, 对其对径流的关联度大小进行排序, 以此来揭示气候变化对流域水资源的影响。

3. 气象要素及径流变化特征

3.1. 季节性变化趋势

林凯荣和何艳虎^[6]对东江流域年各气象要素与径流关联度研究表明: 引起东江流域径流变化的主要气象因子为降雨、气温和蒸发。基于此, 本文选择东江流域近 50 年来气温、降水和蒸发等气象要素并结合径流, 采用常用的非参数 M-K 等趋势分析方法^[12], 分析其季节性变化趋势, M-K 趋势分析具体结果如表 1 所示; M-K 突变分析如图 2 和图 3 所示。

由表 1 可知: 在 99% 信度水平上, 过去的 51 年间(1959~2009), 东江流域各气象要素及径流于不同季节呈现出不同程度的变化。降雨在夏季和秋季均呈现出显著减少趋势, 而春季表现为显著增加趋势, 冬季则为不显著增加, 全年表现为不显著减少趋势, 这是局部大气环流、流域地形要素等综合作用的结果, 一方面表明流域降雨量在年内分布更加趋于均匀, 另一方面也表明了流域夏季降雨量仍在全年降雨量中占居主导地位, 夏季降雨量的显著减少导致全年降雨量的相应减少; 流域气温总体上呈现出不显著增加趋势, 冬季上升趋势显著, 春季表现为不显著上升, 而夏季表现为不显著下降, 秋季下降趋势明显, 冬季气温的显著上升和夏季气温的下降表明流域气温在年

内变化幅度的减小, 四季气温更趋于均匀, 流域有变暖趋势; 流域蒸发在四季均呈现出显著减少趋势, 这是由于虽然影响影响蒸发的的气温有所上升, 但湿度及日照因素都有不同程度的减弱^[6], 同时近 50 年间, 流域的土地覆盖也发生了一定变化, 这都使得影响流域蒸发的因素有所减弱, 进而使得蒸发呈减少趋势; 径流冬季增加趋势明显, 其余季节均呈现出不显著的增加趋势, 也反映了流域全年径流的变化趋势。从区域水量平衡角度看, 流域降雨量最终转化为径流和蒸发量, 由上文分析可知, 近 50 年来, 流域降雨不显著减少的同时, 蒸发量呈现出显著的减少趋势, 二者的相互抵消作用使得流域径流总体上呈现出不显著的增加趋势, 反映了径流是各种水文气象要素综合作用的结果, 揭示和了解径流的变化与规律, 必须深入探究各影响因子之间的相互作用关系。上述分析表明, 近 50 年来, 东江流域主要气象因素降雨和气温季节性变化趋势基本相同, 同一气象要素各季节变化趋势差异明显, 夏季和秋季均呈减少趋势, 春季和冬季变化趋势则与之相反, 不同于蒸发量的各季节均呈现出的显著减少趋势。主要气象要素年内各季节变化趋势的复杂性增加了径流预报的不确定性。

由图 2 和图 3 可知, 1959~2009 年间, 东江流域降雨、气温、蒸发和径流各季节突变情况较为复杂: 1) 总体上看, 在 $\alpha = 0.05$ 显著性水平上, 流域春季降雨在 20 世纪 70 年代末产生突变后, 于 80 年代中期至今呈显著增加趋势; 夏季和秋季降雨均不存在突变现象, 二者分别于 70 年代和 90 年代后呈现出显著减少趋势; 冬季降雨在 60 年代中期呈现出显著减少趋势; 2) 总体上看, 流域春季气温于 60 年代中前期呈现出显著下降趋势; 夏季气温于 80 年代后期~2000 年呈现出显著上升趋势, 并于 1974 年前后发生了明显的变暖突变, 1970 年代中期以前, 春季气温始终在较小的范围内上下波动, 此后气温就一直呈明显的上升趋势。秋季气温于 2002 年后呈显著下降趋势; 冬季气温在 60 年代中前期呈现出显著下降趋势, 并于 2000 年发生突变; 3) 总体上看, 流域春季、秋季和冬季蒸发于 90 年代后呈现出显著的减少趋势, 夏季蒸发分别于 70 年代中后期和 90 年代中前期呈现出显著增加趋势, 并于 2006 年产生突变, 2009 年以后减少趋势显著; 4) 总体上看, 流域春季径流在 1974 年发生突

Table 1. Results of seasonal M-K trend analysis for each meteorological element and runoff in the Dongjiang River Basin (1959-2009)

表 1. 东江流域 1959~2009 年各气象要素及径流季节性 M-K 趋势分析结果

	降雨	气温	蒸发	径流
春季	2.71	0.41	-8.2	0.99
夏季	-5.26	-1.32	-2.62	0.12
秋季	-7.1	-2.62	-3.04	0.049
冬季	0.097	2.98	-3.57	3.14
全年	-2.06	1.19	-5.67	0.65

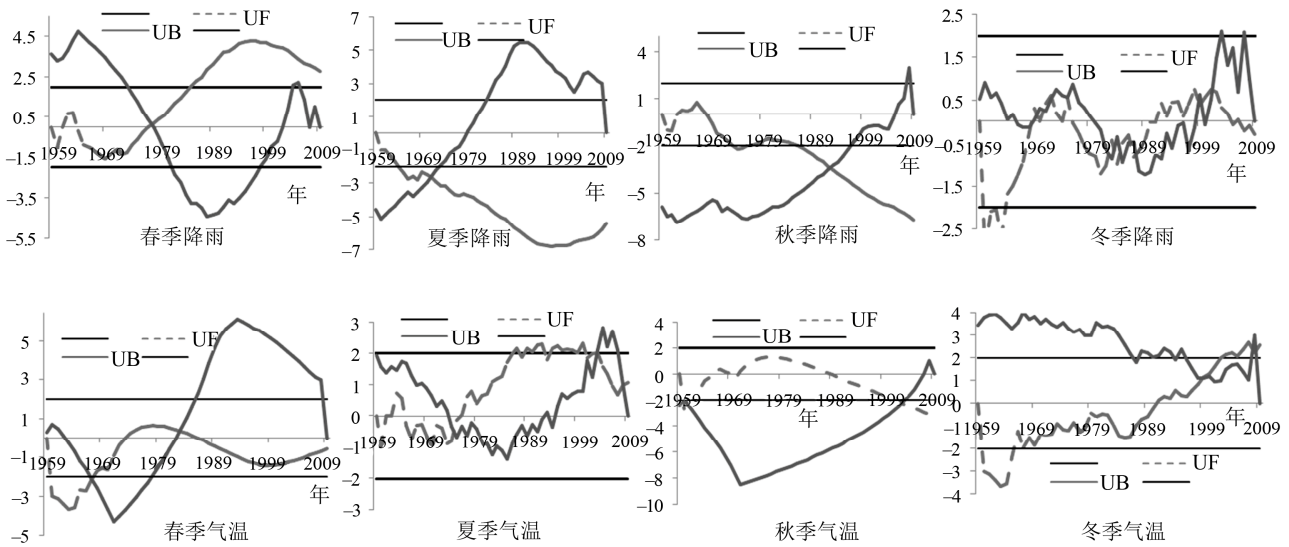


Figure 2. M-K mutation analysis of seasonal precipitation and temperature in the Dongjiang River Basin (1959-2009)
图 2. 东江流域 1959-2009 年各季节降雨和气温 M-K 突变分析

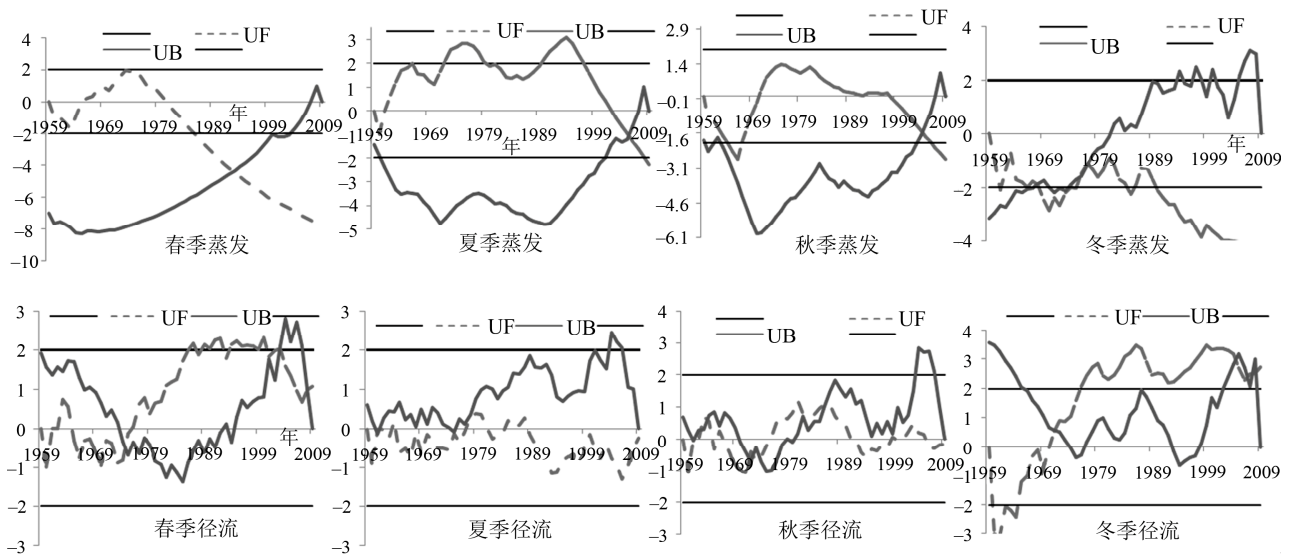


Figure 3. M-K mutation analysis of seasonal evaporation and runoff in the Dongjiang River Basin (1959-2009)
图 3. 东江流域 1959-2009 年各季节蒸发和径流 M-K 突变分析

变, 由 70 年代中期之前的减少趋势转变为增加趋势, 且于 80 年代后期~2000 年为显著增加趋势; 夏季径流在 90 年代以后呈现出持续的减少趋势, 并无发生明显的突变; 秋季径流分别于 1964 年、1974 年和 1986 年发生了突变; 冬季径流在经历了 60 年代前期的下降趋势后, 于 70 年代中后期表现为显著的增加趋势, 突变点在 1972 年前后。各气象要素及径流季节性变化的突变分析印证了上述相应 M-K 趋势分析结果, 但能更进一步说明被检验气象及水文要素变异发生的时间点以及代际间的变化趋势, 有助于更好地分析

各要素季节性变化规律。

3.2. 空间分布特征

各气象要素空间分布也是影响流域径流的产生与变化的重要因素之一。东江流域主要气象因素降雨、气温和蒸发季节性多年均值空间分布如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 近 50 年来, 流域主要气象要素在不同的季节呈现出较大的空间分布差异。主要表现为: 1) 气温在夏季和秋季空间分布格局基本一致, 均形成一个高值区和两个低值区。气温高值区位于中

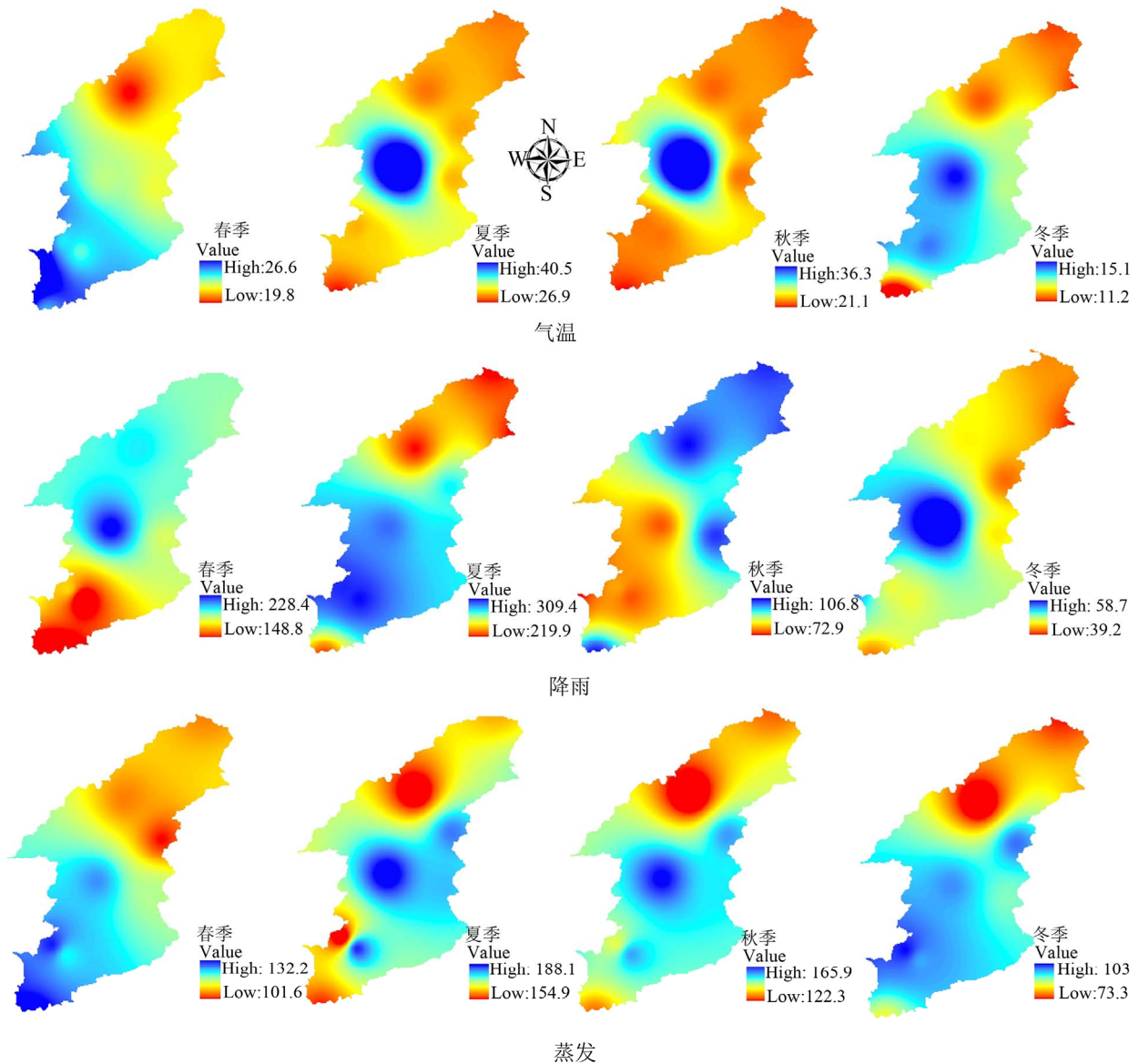


Figure 4. Seasonal spatial distribution of precipitation, temperature and evaporation in the Dongjiang River Basin
图 4. 东江流域降雨、气温和蒸发季节性空间分布图

游的新丰江一带, 低值区分别位于俐江以上流域和秋香江以下东江干流部分, 春季和冬季流域上游均为气温低值区, 但高值区则分别为淡水河和新丰江干流以下部分; 2) 流域降雨于四季空间分布差异显著, 夏季降雨集中在新丰江以下干流流域, 秋季则转移至俐江以上流域, 冬季主要集中于新丰江水库集雨区, 春季降雨高值区有所减少, 空间分布较其余四季均匀; 3) 流域蒸发四季空间分布格局差异较小, 夏、秋、冬季蒸发高值区和低值区分布相似度较高, 低值中心位于上游的俐江流域而高值中心则位于有较大水面面积

的新丰江库区, 春季蒸发并无明显的高值和低值区, 在空间分布上较为均匀。总体看来, 从季节角度来看, 各气象要素在春季和冬季空间分布较为均匀, 并无明显的高低值中心; 从各主要气象要素来看, 降雨和气温季节性空间分布差异较为明显, 而蒸发分布规律则相对一致, 且流域中游新丰江水库一带往往成为各气象要素的高值中心分布区。各气象要素各季节空间分布的这种差异性也在一定程度上导致了流域不同地区径流年内分布的不均匀性, 进而对区域水资源开发利用产生一定的影响。

4. 气象要素与径流相关性分析

林凯荣和何艳虎依据流域水系等自然地理实况, 从空间上将流域划分为大小不一的三个层次, 分别计算了各层次年气象要素与径流相关性及其关联度, 以分析流域径流的主要影响因子^[6]。本文在此基础上, 采用经过插值处理后的流域上述主要气象要素(降雨、气温和蒸发)各季度均值序列值和相应径流序列, 进行流域季节性各气象要素与流域水文控制站博罗站径流相关性及其关联度分析, 找出影响季节性径流变化的主要气象因子, 并与年相关性及其关联度分析结果相比较, 以探究和分析流域气象要素和径流相互作用规律。

流域各季节主要气象要素与博罗站径流相关系数及关联度计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 东江流域各主要气象要素在不同季节与径流的相关系数各不相同。从各气象要素与径流的季节性相关系数来看, 蒸发于四个季节均与径流呈现负相关, 且夏季相关系数绝对值最大, 表明夏季蒸发是减少径流的最主要因素; 气温除夏季与径流为负相关外, 其余各季节均为正相关, 相关系数介于降雨和蒸发之间, 夏季气温的升高减少了径流量; 降雨除冬季与径流为负相关外, 其余各季节均为正相关, 且春季与径流相关系数最大, 这也说明了流域春季降雨的显著增加, 使得径流量一定程度的增加。总体看来, 流域各主要气象要素中, 降雨和蒸发与径流季节性相关系数较气温大, 气温与径流季节性相关系数较年相关系数有所减少, 且更多表现为与径流正相关, 反映了气温与径流各季节与全年相关关系的不同^[6], 除个别季节外, 流域降雨与径流正相关, 蒸发与径流为负相关, 符合流域水量平衡原理。表 2 也反映了上述流

Table 2. The seasonal correlation coefficient and relevancy of each meteorological element and runoff in the Dongjiang River Basin
表 2. 东江流域各气象要素与径流季节性相关系数及关联度

	降雨		气温		蒸发	
	相关系数	关联度	相关系数	关联度	相关系数	关联度
春季	0.34	0.762	0.11	0.749	-0.13	0.705
夏季	0.16	0.789	-0.11	0.748	-0.2	0.755
秋季	0.2	0.768	0.05	0.787	-0.13	0.775
冬季	-0.01	0.780	0.01	0.61	-0.13	0.743

域各主要气象要素与径流相关系数总体上比较小, 主要是由于流域内大型水利工程如新丰江、枫树坝及白盆珠等水库对径流蓄丰补枯的调节控制所致。从各气象要素与径流的季节性关联度来看, 降雨除秋季外, 其余季节与径流关联度最大, 而气温在秋季与冬季与径流关联度最大。相较于降雨和气温, 蒸发在四个季节与径流关联度均是最小的, 这与流域各主要气象要素与径流年关联度分析结果基本一致^[6], 在一定程度上反映了影响径流形成各气象要素及其对径流作用机理的复杂性, 而流域地形、地质地貌特征及植被等下垫面状况的改变, 通过与各主要气象要素的耦合作用, 也增加了径流形成的不确定性。但一般情况下, 降雨作为水文循环的一个重要环节和因素, 对径流的形成起着决定性的重要作用, 特别是对于东江流域, 降雨为该流域径流主要补给形式, 流域降雨的增加会引起径流的相应增加。上文分析可知, 流域夏季降雨高值区主要位于新丰江以下东江干流区, 春季或夏季暴雨的增加使得流域径流增加的同时, 也加剧了流域洪涝灾害的风险, 反之亦然。总体来看, 流域各主要气象要素与径流季节性关联度相差不大, 降雨和气温对径流影响最大。

5. 结论及讨论

本文先对东江流域主要气象站近 50 年(1959~2009)降雨、气温、蒸发等主要气象要素季度序列值进行插值处理, 得到流域相应平均值序列, 并据此进行了趋势和突变分析; 同时也阐述了上述气象要素四季度的空间分布特征, 进一步分析计算各气象要素与其径流的季度相关性及其关联度, 试图揭示气象要素季节性时空变化对径流的影响规律。主要结论如下:

1) 近 50 年来, 东江流域主要气象因素降雨和气温季节性变化趋势基本相同, 同一气象要素各季节变化趋势差异明显, 夏季和秋季均呈减少趋势, 而蒸发量各季节均呈现出显著减少趋势;

2) 主要气象要素在不同的季节呈现出较大的空间分布差异, 各气象要素在春季和冬季空间分布较为均匀, 降雨和气温季节性空间分布差异较为明显, 而蒸发分布规律则相对一致;

3) 主要气象要素与径流季节性相关系数及其关联度分析表明, 降雨、气温和蒸发与径流在不同季节相关系数不尽相同, 降雨和蒸发与径流季节性相关系数

较气温大;降雨除秋季外,其余季节与径流关联度最大,而气温在秋季与冬季与径流关联度最大,蒸发在四个季节与径流关联度均是最小的。

流域径流的变化是气候变化及剧烈人类活动综合作用的结果^[7],东江流域近50年间径流的季节性变化为降水及气温等气象要素季节性变化和土地覆被等下垫面改变的综合作用结果,也是流域水文循环对全球局部气候变化的响应。本文只考虑了气象要素季节性变化特征及其对径流量的影响,事实上,流域内各部分下垫面情况各异,受到人类活动强度影响也不相同,因此影响径流量变化的因素就更为复杂;研究表明^[13],由气候变化引起的径流含盐量的变化越来越明显,气候变化对水质的影响愈加受到关注;气候变化加剧了流域旱涝灾害发生的可能性,对区域水资源管理提出了更高要求^[14],这些都是今后研究所要关注的方向。

参考文献 (References)

- [1] 陈家琦,王浩.水资源学[M].北京:科学出版社,2002:49-50.
CHEN Jiaqi, WANG Hao. Water resources. Beijing: Science Press, 2002: 49-50. (in Chinese)
- [2] 张建云,王国庆.气候变化对水文水资源影响研究[M].北京:科学出版社,2007:3-4.
ZHANG Jianyun, WANG Guoqing. Study on the effects of climate change in hydrology and water resources. Beijing: Science Press, 2007: 3-4. (in Chinese)
- [3] 王兆礼,陈晓宏,杨涛.东江流域径流系数变化特征及影响因素分析[J].水电能源科学,2010,8:10-13.
WANG Zhaoli, CHEN Xiaohong and YANG Tao. Runoff coefficient variation and its influencing factor in the Dongjiang River Basin. Water Resources and Power, 2010, 8: 10-13. (in Chinese)
- [4] 黄金平,程东升,邓家泉,等.东江流域气候分析[J].人民珠江,2006,5:48-50.
HUANG Jinping, CHENG Dongsheng, DENG Jiaquan, et al. Analysis of climate in the Dongjiang River Basin. Pearl River, 2006, 5: 48-50. (in Chinese)
- [5] 何艳虎,林凯荣.近期气候变化对东江流域水资源的影响研究[J].中国农村水利水电,2011,6:7-10.
HE Yanhu, LIN Kairong. Effects of recent climate change on water resources in East River Basin. China Rural Water and Hydropower, 2011, 6: 7-10. (in Chinese)
- [6] 林凯荣,何艳虎.东江流域1959~2009年气候变化及其对径流的影响[J].生态环境学报,2011,20(12):1783-1787.
LIN Kairong, HE Yanhu. Climate change and its impact on runoff during 1956-2009 in the Dongjiang Basin. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(12): 1783-1787. (in Chinese)
- [7] 石教智,陈晓宏,吴甜,等.东江流域降雨径流变化趋势及其原因分析[J].水电能源科学,2005,23(5):8-11.
SHI Jiaozhi, CHEN Xiaohong, WU Tian, et al. Study on rainfall and runoff change tendency and its causes in East River Valley. Water Resources and Power, 2005, 23(5): 8-11. (in Chinese)
- [8] 何艳虎,林凯荣.降雨空间插值方法在东江流域的比较运用[J].水力发电,2010,36(10):57-59.
HE Yanhu, LIN Kairong. Application and comparison of rainfall spatial interpolation methods on Dongjiang River Basin. Water Power, 2010, 36(10): 57-59. (in Chinese)
- [9] 郭霞,王正中,等.基于相关分析的流域汛期划分初探[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(3):207-210.
GUO Xia, WANG Zhengzhong, et al. Preliminary study of basins flood season division based on correlation analysis. Journal of Northwest A&F University (Nature Science Edition), 2010, 36(10): 57-59. (in Chinese)
- [10] 陈晓宏,陈俊合,江涛.水环境评价与规划[M].北京:中国水利水电出版社,2007:23-24.
CHEN Xiaohong, CHEN Junhe and JIANG Tao. Evaluation and planning of water environment. Journal of Northwest A&F University (Nature Science Edition), 2007: 23-24. (in Chinese)
- [11] 王建.现代自然地理学[M].北京:高等教育出版社,2001:230-233.
WANG Jian. Modern physical geography. Beijing: Higher Education Press, 2001: 230-233. (in Chinese)
- [12] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999:69-70.
WEI Fengying. Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 69-70. (in Chinese)
- [13] ZHANG, L., JONES, R. N., DURACK, P., DAWES, W. and HAIRSINE, P. Climate change impact on water and salt balances: An assessment of the impact of climate change on catchment salt and water balances in the Murray-Darling Basin, Australia. Climatic Change, 2010, 100: 607-631.
- [14] MUKHEIBIR, P. Water access, water scarcity, and climate change. Environmental Management, 2010, 45: 1027-1039.