

The Variable Characteristics and Response to Climatic Factors of the Runoff in the Downstream Areas of the Yellow River under the Background of Global Change

Mei Hong^{1,*}, Dong Wang², Wenhua Zeng¹, Chenchen Ma³, Liang Zhao¹

¹Research Center of Ocean Environment Numerical Simulation, Institute of Meteorology and oceanography, PLA University of Science and Technology, China

²Department of Hydrosiences, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, China

³Lianyungang Meteorological Bureau, Lianyungang 222006, China

Received 25 June 2015

Accepted 15 November 2015

Abstract

In this paper, the runoff of Huayuankou and Lijin Hydrologic Stations of the downstream areas of the Yellow River from 1951 to 2012 were calculated and analyzed in order to explore the runoff variable characteristics and their response to climatic factors. The following conclusions can be drawn:(1)Annual runoff of the river shows a clear downward trend as a whole, especially in the 1990s, but shifted to increase in the early 21st century.(2)Runoff can be affected by climate change; climatic factors and runoff change in the same time or precedes the latter.(3)The response of runoff to climatic factors is not stable, in other words, changing with time; (4)the response of runoff to precipitation is more sensitive than that of temperature.(5)Precipitation and temperature both contribute to the change of runoff, but the former is a positive contribution and the latter is opposite.

Keywords: Downstream areas of the Yellow River, runoff change, climate change, response, quantitative analysis

全球变化背景下黄河下游径流的变化特征及对气候因子的响应

洪梅¹, 王栋², 曾文华¹, 马晨晨³, 赵亮¹

1. 解放军理工大学气象海洋学院军事海洋教研中心, 江苏 南京 211101
2. 南京大学地球科学与工程学院水科学系, 江苏 南京 210046
3. 连云港气象局, 江苏 连云港 222006

摘要: 选取 1951–2012 年黄河流域下游两个水文站实测径流时间序列资料进行了统计分析和特征诊断。研究表明: 1) 近 60 年, 黄河流域下游的径流量总体呈明显下降趋势, 21 世纪之后转呈增长的趋势; 2) 径流年内变化峰型不同, 径流量主要集中在汛期, 且 90 年代之后峰型较之前平缓; 3) 径流地域分布极不均匀, 越靠近黄河下游越不均匀; 4) 流域内气候增暖效应明显, 降水总体呈减少趋势, 气候对径流影响显著且呈现时变特征; 5) 降水对径流以正贡献为主, 温度对径流以负贡献为主, 且降水量正贡献绝对值高于温度负贡献绝对值。研究工作旨在为应对气候变化和我国水资源利用提供决策参考。

关键词: 黄河下游; 径流变化; 气候变化; 响应; 定量分析

* Corresponding author: flowerrainhm@126.com

资助项目: 国家自然科学基金 (No.41276088; No.41375002; No.41306010) 资助

1. 引言

径流是一定时期内,流域中气候因素和下垫面各种自然地理因素以及人类活动等综合作用的产物。径流的形成过程是多种因素相互作用、相互联系的复杂的自然现象,径流的变化不仅影响着人类社会系统的安全,同时也影响着自然生态系统的健康(郝振纯等,2006;徐东霞,2008)。21世纪,全球经历着以变暖为主要特征的变化过程。1880-2012年全球平均温度升高了 0.85°C ,且这种增暖趋势仍将持续。在全球气候变暖背景下,全球河川径流基本上呈现出下降的趋势。IPCC第四次评估报告(2007)预测,到21世纪中期,某些中纬度和热带干旱地区的河川年平均径流将会减10%-30%。

对黄河流域径流变化及其与气候、人类活动等关系的研究(蓝永超等,2010)表明:气温升高和降水减少导致黄河流域径流量总体呈减少趋势,径流量变化既有波动性特征,又表现出一定的年际趋势,且与气候因子变化关系密切。在全球变化背景下,黄河流域是气候变暖的显著区域,空间上呈北高南低特点,气温的地区分布特点是由南向北、由东向西逐渐降低,尤以20世纪80年代以来,黄河流域气温增暖最为显著。20世纪90年代,黄河流域降水减少最为明显,进入21世纪,黄河流域降水略有增加趋势(刘吉峰和范旻昊,2010)。气候变化对黄河流域径流变化规律及其气候响应形式也将发生变化,但相关研究不多,且偏重于定性分析,对黄河中下游地区的研究更为欠缺。

针对上述问题,本文拟基于黄河流域近60a的实测径流资料和气象资料,运用统计学等方法分析径流在不同时间尺度上的变化特征、探讨径流与气候影响因子的内在关联、诊断气候影响因子对径流变化的贡献和机理,为适应和应对气候变化,合理规划水资源利用提供科学依据。

2. 径流的时间序列变化规律

河川径流是一种非平稳信号,并不存在真正意义上的周期性,而时而以这种周期变化,时而以另一周期变化,并且同一时期又包含各种时间尺度的周期变化,在时域中存在多层次时间尺度结构和局部化特征。采用Morlet小波变换对两站的年平均径流进行了周期性分析。Morlet小波变换的原理可以详见相关参考文献(Grinsted and Moore, 2004)。

黄河利津水文站是万里黄河上的最后一个水文站,黄河水务的封笔之作。黄河利津水文站建于1934年6月,1937年11月因抗站停测。解放后,1950年1月重新设站,现归黄委会山东水文水资源局管理。黄河花园口水文站设立于1938年7月,上距

河源约4700公里,下距河口770公里,集水面积73万平方公里,占黄河流域总面积的97%,是黄河最重要的水沙控制站。这两个水文站的主要任务是:控制黄河入海水、沙量,为黄河下游防洪、防凌、水资源统一调度提供水情;研究和探索水文要素变化规律,为黄河下游河道治理、水沙资源利用以及黄河三角洲开发等搜集水文资料;对外承担各类水文测验项目,地形、河道测量等。所以本文选用这两个站点来对其径流和气候因子进行分析。

小波分析发现,近60年,花园口站存在2-4年、9-12年、27-30年的周期,强信号分别存在于:20世纪50年代中期到70年代、60年代初期到70年代中期、80年代。利津站存在2-4年、9-12年的周期,强信号分别存在于:20世纪50年代末期到60年代末期、50年代初期到80年代中期。两站均是2-4年为第一主周期。这表明黄河下游径流存在较显著的年际和年代际变化特征。

2.1. 年代际变化

通过计算,两站近60年(1951-2012年)的径流平均值分别为: $374.5 \times 108 \text{ m}^3$ 、 $302.9 \times 108 \text{ m}^3$ 。表1给出了1951-2012年花园口站和利津站各年代径流的平均值以及距平百分比,20世纪50年代和60年代,两站平均径流均大大高于各自多年平均值,属于丰水年份,特别是60年代,两水文站年平均径流均达最高值,分别为 $505.9 \times 108 \text{ m}^3$ 、 $501.4 \times 108 \text{ m}^3$ 。70年代,两站平均径流均下降到多年平均值附近,80年代,花园口站平均径流量增加到高于多年平均值,而利津站则有所减少,略低于多年平均值,到90年代,利津站年平均径流达最低值,仅为 $143.6 \times 108 \text{ m}^3$,与60年代相比减少了71.4%。花园口站21世纪的平均径流相比60年代减少了50.3%,利津站21世纪与20世纪90年代相比则略有上升。根据表1各年代距平百分比并对应前文的丰枯划分标准以及黄河流域气温统计分析(具体见下文)可知,黄河下游在气候相对冷的50年代、60年代处于丰水期,70年代、80年代处于平水期,而90年代以后则进入枯水期,与气温增暖的时期相同,现在正处于枯水期。

Mann-Kendall的秩次相关检验法可以检验序列的突变特点,通过此方法进行的检验结果表明:上述水文站的径流序列表现出突变特征,其中花园口站的径流突变发生在1985年,利津站的径流突变发生在1978年,这表明上述水文站出现的径流减少可能是其年代际尺度上的一种转折性或突变现象。

表 1 黄河下游各年代径流量 (R/10⁸m³) 及距平百分比(%)

Table 1 The decadal runoff and its anomaly in the downstream areas of the Yellow River

测站	1951-1959年		1960-1969年		1970-1979年		1980-1989年		1990-1999年		2000-2012年	
	径流量	距平百分比	径流量	距平百分比	径流量	距平百分比	径流量	距平百分比	径流量	距平百分比	径流量	距平百分比
花园口	487.6	29.2	505.9	34.5	381.6	1.5	411.7	9.50	256.9	-31.7	251.3	-38.4
利津	476.8	56.9	501.4	63.7	311.2	1.6	285.9	-6.7	143.6	-53.1	158.9	-54.0

2.2. 年际变化特征

近 60 年黄河下游的径流量总体呈现下降趋势。这与上中游年降水量减少、用水量增加有关。但在 2002 年以后又呈现出有一定的转折上升趋势。花园口站年径流最大值 (861.4 亿立方米) 出现在 1964 年, 最小值 (142.6 亿立方米) 出现在 1997 年, 最大、最小值之比为 6.04。利津站的最大、最小值出现年份与花园口站一致, 其极值比达 42.5。表明黄河流域下游径流的年际振荡现象十分显著, 且越靠近下游越剧烈。

近 60 年的径流气候变化倾向率 (表 2) 表明: 夏季和秋季径流的递减率大, 而冬季则是最小。且利津站每一季节的减少量都比位于其上游的花园口站更多。两站四季径流变化 (图 1) 分析表明: 2002 年之前, 各季节的径流都呈现一致的下降趋势; 从 2002 年左右开始, 春季、夏季、冬季两站的径流均呈现上升趋势, 且夏季增加更为明显, 秋季则呈减少趋势。由此推知, 21 世纪黄河下游径流的上升趋势主要是由于夏季径流的增加导致, 该现象与 20 世纪末期以来全球气候变暖的趋势有所缓和是一致的 (沈永平和王国亚, 2013)。

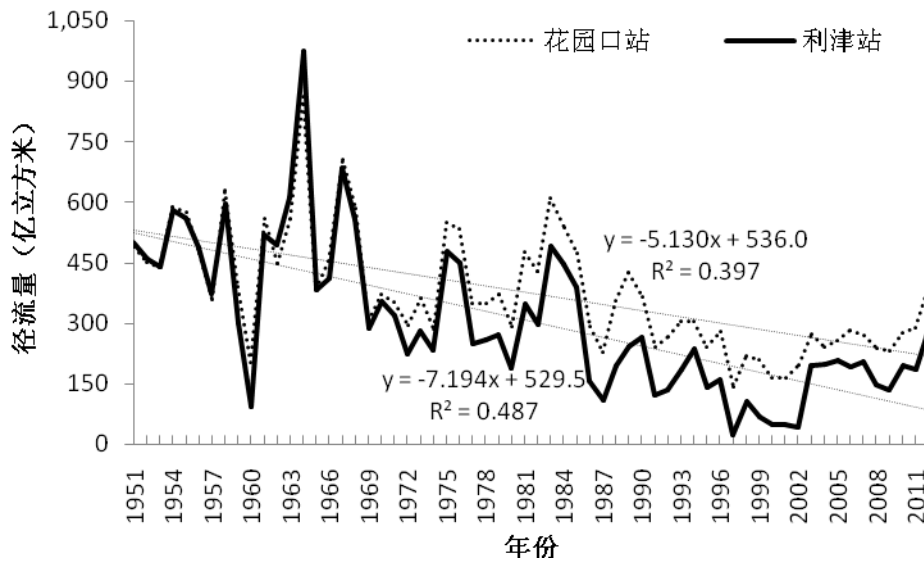


图 1 黄河花园口站、利津站 1951-2012 年平均径流量(亿立方米)

Fig.1 The annual runoff in Huayankou and Lijin Hydrologic Stations in the Yellow River basin during 1951 - 2012(10⁸/m³)

表 2 黄河下游径流(10⁸m³/10a)变化趋势

Table 2 Annual and seasonal changes of runoff in the downstream areas of the Yellow River(10⁸m³/10a)

测站	全年	春季	夏季	秋季	冬季
花园口	-51.3	-4.48	-18.9	-22.6	-1.9
利津	-71.9	-13.6	-26	-30.2	-5.7

利用累积距平方法对每个站年径流分析表明：两站径流变化大致可分为三个阶段（图中灰色虚线划分的三个区域）：相对多水期、相对平稳期和显著下降期。两站第一阶段的时间段基本一致，均在 20 世纪 50 年代和 60 年代；第二阶段略有差别，花园口站是在 70 年代和 80 年代，利津站则是在 70 年代到 80 年代中期；第三阶段花园口站是在 90 年代之后，利津站是在 80 年代中期以后。由上可知，1951 年以来，黄河流域下游径流大体均经历了丰-正常-枯 3 个变化阶段，虽然两站丰枯变化的分界点有些差异，但自 20 世纪 80 年代末 90 年代初以来持续偏枯的事实是可以确定的，上面分析得到的结论与采用丰枯等级划分标准所得到的结果基本一致。

2.3. 年内变化年内分配规律

由于受降水、气温等气候要素季节性变化的影响，导致径流的补给也出现明显的季节性变化，决定了径流年内分配随季节的周期性变化和非均匀变化。研究径流年内分配特征的方法主要包括：月、季、汛期-非汛期径流量占年径流量的百分比等。本文采用变差系数来分析黄河下游径流的年内分配特征。

图 2 表明：花园口站和利津站多年平均的径流年内分配曲线（虚线）非常相似，均为“双峰型”，丰枯

季节变化尤为明显。两站均在 8 月有一个较大峰值，但是春汛水量都不是很大，略不同的是，花园口站在春汛期的峰值稍比利津站明显一点。冬季径流量明显低于其他季节，仅占全年总量的 11.7%，全年径流量基本上集中在 7-10 月份，占全年总量的 60.7%。

20 世纪 50 年代，两站径流年内分配呈现双峰结构，但春汛期的峰型坡度比较缓和，而 8 月份的峰型则很陡峭；60 年代两站均呈现多峰型，但春汛期的峰型依旧很平缓，利津站在 8 月和 10 月均有一个峰值；70 年代、80 年代花园口站峰型特征与 60 年代的类似，只是 80 年代其中一个峰值提前了一个月，落在 8 月；利津站 70 年代也呈双峰型，80 年代则是多峰型；90 年代花园口站是 3 月和 8 月的双峰型，利津站则是 8 月的单峰型；进入 21 世纪后，径流减少明显，花园口站峰值分布在 3 月、6 月、10 月，利津站峰值分布在 6 月、10 月，但 10 月的很平缓，相比于前面大多数年代，两站夏季径流均有增加，且出现峰值，这也进一步验证了上面近 10 年的径流增加是由于夏季径流上升造成的结论。

另外，通过比较两站各年代径流峰型曲线与多年平均值曲线可以看出：两站 90 年代 8 月份的峰值均夹在 21 世纪后峰值之间，且气候变暖后的 90 年代及以后峰型远不及以前陡高，明显低于多年平均值。

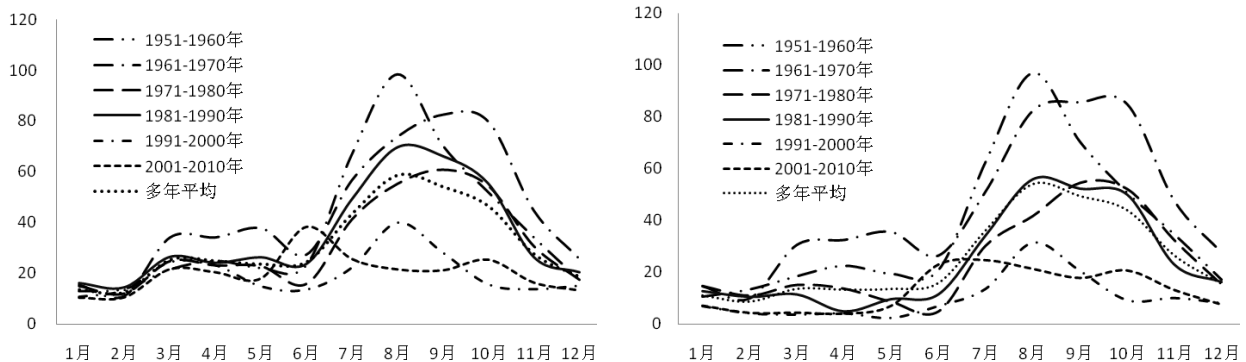


图 2 花园口站（左）、利津站（右）各年代径流年内分配曲线($10^8/m^3$)

Fig.2 Monthly variations of the runoff for various decades at Huayuankou(left) and Lijin(right) Hydrologic Stations($10^8/m^3$)

径流变差系数是反映径流变化的参数之一。计算得到近 60 年花园口站和利津站的月径流变差系数均很大，说明各月的年际丰枯变化均比较剧烈；花园口站的峰值在 6 月和 10 月，利津站的峰值则在 5 月和 10 月，这些月份的径流年际振荡尤为剧烈，花园口站夏季和秋季的径流变化多、最不稳定，而利津站径流则是春末和秋季（尤其是春季）最变化多端；花园口站春季的径流变差系数最小，径流变化比较平缓，而利津站径流变差系数则是冬季最小，且所有月份的值

都大于对应月份花园口站的值，说明利津站径流年际丰枯变化更为剧烈。

3. 径流对气候因子的响应

气候因子对水循环过程的影响是复杂和多层次的，气候系统通过降水、气温、日照、风、相对湿度等因子直接或间接地影响着水循环过程，其中降水是最为直接影响的因子，气温等则是间接影响。通过统计近 60 年的降水、温度资料发现：黄河流域多年平均降水

量为 507mm，其中夏季的平均降水量最大，达 293 mm，秋季次之，春季降水量比秋季略小，冬季则几乎没有降水，平均降水量仅为 15mm；多年平均温度呈明显上升趋势，其中冬季增温最为明显，即暖冬现象。

3.1. 径流对降水的响应

降水是径流的直接来源。黄河流域年降水线性趋势和 5 年滑动平均曲线表明，黄河流域年降水总体呈弱的下降趋势，进入 21 世纪之后有增加的趋势。通过计算各年代降水距平值，发现降水表现出阶段性特点：50、60、70 年代的降水均是正距平，降水偏多，其中 50 年代距平值为 27mm，降水量最多；80、90 年代均为负距平，降水偏少；进入 21 世纪之后，降

水有增多趋势，比多年平均值略低，这种降水年代际分型特点与径流的变化规律基本吻合。

对两站各时段径流序列与同期降水进行相关分析(表 3)发现：年平均降水量与两水文站年径流的相关系数分别为 0.56 和 0.6，均超过了 0.01 的置信水平。除冬季之外，降水量与径流量在各时段均存在正相关关系（通过显著性检验），秋季降水与径流相关性最好，夏季次之，且夏季相关系数与秋季的相差不大，但是冬季降水和径流的相关性没有通过显著性检验，这是因为，冬季的降水本来就很少，径流来源主要靠地下水和上游的冰雪融水。总之，降水与径流的关系在汛期是较好的，相反，在非汛期（特别是冬季）的关系则较差。

表 3 各时段径流量与降水、温度的相关系数

Table 3 Annual and seasonal correlation coefficients between precipitation temperature and runoff

测站	全年		春季		夏季		秋季		冬季	
	降水	温度	降水	温度	降水	温度	降水	温度	降水	温度
花园口站	0.56	-0.64	0.34	0.48	0.5	0.17	-0.35	-0.41	-0.48	-0.31
利津站	0.6	-0.67	0.3	0.5	0.52	0.05	-0.49	-0.34	-0.47	-0.56

注：r_{0.05}=0.25；r_{0.01}=0.32.

3.2. 径流对温度的响应

在气候变化背景下，近 60 年来，黄河流域气温总体呈上升趋势，增温速率约 0.29/10a(图 3a)，高于全国平均气温的增温趋势。

从图 3(b)看出：20 世纪 80 年代以后，增温趋势明显，90 年代以后这种增暖趋势大大超过了显著性水平 0.05 临界线，甚至超过了 0.001 显著性水平 (U_{0.05}=1.96,U_{0.001}=2.56)。根据 UF 与 UB 交线的位置，确定气温突变年份是 1988 年。

统计分析表明，黄河流域气温变化大致可分为两个阶段：20 世纪 50 年代到 80 年代中期，黄河流域气温比较平稳；80 年代中后期开始气温呈上升趋势，90 年代以后升温明显加快，达 0.36/10a。同样地，温度距平百分率曲线的振荡比径流的弱得多，甚至比降水的幅度还小。表 4 给出了黄河流域年平均气候倾向率变化情况，各季温度与全年温度变化趋势一致，其中冬季的升温幅度最大(0.45/10a)。冬季气温的大幅度升高势必对黄河流域凌情造成影响（杨特群等，2009）。分析各时段温度与两站径流的相关系数(表 4)发现：两站径流与温度在全年和各个季节均存在明显的负相关关系（通过了显著性检验），说明黄河流域温度升高对径流减少有着不可忽视的影响。

结合降水和温度两个因子和两站径流的变化可以发现：气温突变增暖之后的 20 世纪 90 年代，黄河流域的气候变得暖而干燥，与此同时，径流也显著减

少，甚至出现断流，但 21 世纪之后，降水有所增加，气候向着暖湿化方向发展，所以径流量也随着增加。

4. 降水、气温因子对径流变化的贡献分析

为进一步定量分析两气候因子在径流变化中所占的比重，本文运用 Lu 等（2010）所使用的方法，利用月径流资料和月气象资料，计算降水、气温两个主要气候因子对花园口站和利津站径流变化的贡献，以此来定量分析气候因子对径流变化的贡献。径流的自然变化(S)主要受降水(P)和温度(T)的影响，故径流的变化可以用下式来解释： $\Delta S = \frac{\partial S}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial S}{\partial T} \Delta T$ ，其

中 $\frac{\partial S}{\partial P}$, $\frac{\partial S}{\partial T}$ 分别是降水和温度对径流变化的贡献率，

近似取为对应因子的多元回归系数。先利用气候因子、径流的各月值计算出贡献率，并将此贡献率与各因子标准差相乘，即可得到每个气候因子对径流年内变化的贡献值，文中所指“正贡献”是指径流因气候因子的变化而增加，“负贡献”是指径流因气候因子的变化而减少。

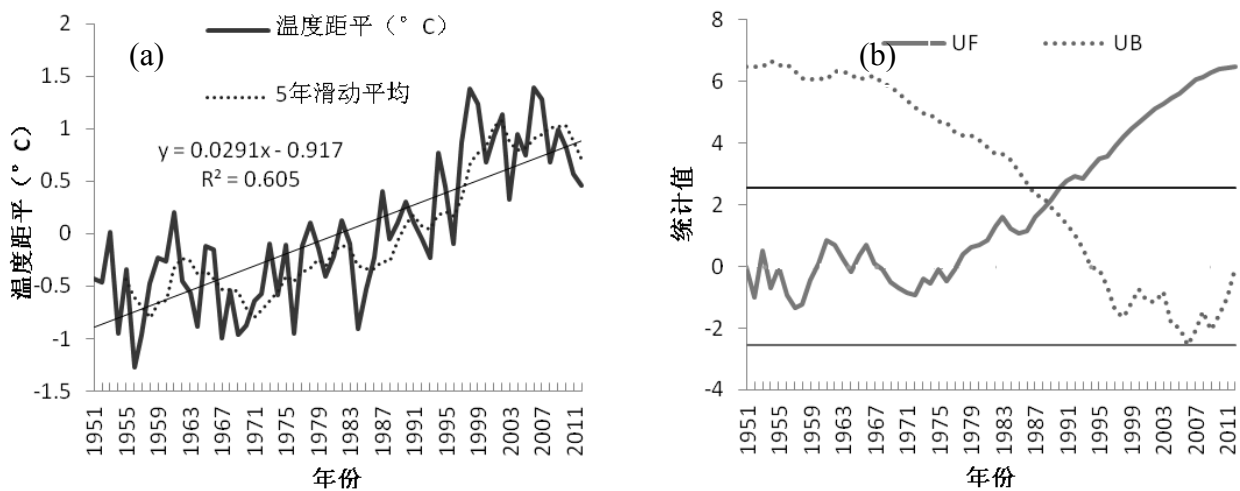


图3 黄河流域年平均气温变化(a)和 MK 检验(b)

Fig.3 Annual average variation of temperature in the reaches of the Yellow River and MK test

表4 黄河流域平均气温气候倾向率(/10a)

Table 4 Tendency rates of average temperature in the reaches of Yellow River(/10a)

因子	全年	春季	夏季	秋季	冬季
温度	0.29	0.32	0.14	0.45	0.24

分析计算结果发现（图4）：降水和气温因子对径流的变化有所不同，对这两个水文站而言，降水对

径流的贡献以正贡献为主，温度对径流的贡献以负贡献为主，且都是在夏季和秋季最为明显，冬季和春季

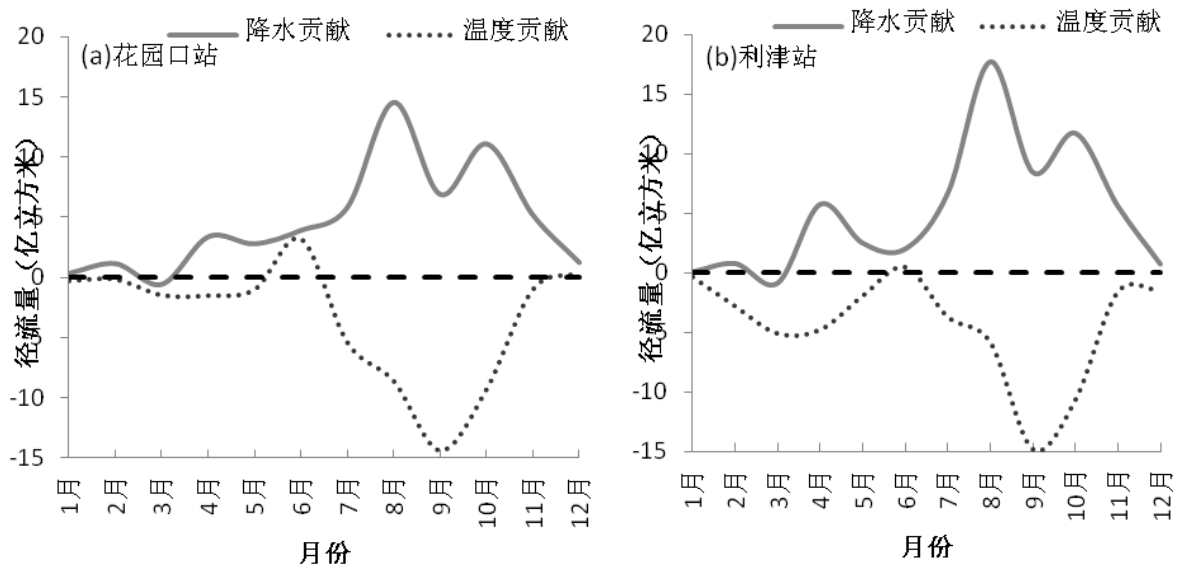


图4 黄河流域降水和温度对径流的贡献($10^8/m^3$)

Fig.4 Monthly variations of the contributions of precipitation and temperature to runoff in the downstream areas of the Yellow River ($10^8/m^3$)

的贡献相对较弱。在降水对径流的正贡献期间，两个站都表现出明显的双峰型特征：其中全年最高峰值点都出现在 8 月，7-11 月期间花园口、利津两站的正贡献分别达 14.6 亿立方米、17.7 亿立方米；次峰值点均出现在 10 月，两站的正贡献分别为 11.1 亿立方米、11.7 亿立方米；两站温度对径流的负贡献都呈现单峰型特征，在 9 月份的负贡献绝对值均达到最大，分别为-14.4 亿立方米和-14.8 亿立方米，刚好对应两站降水正贡献的谷值，即降水对径流影响最弱时温度对径流影响达最强。花园口、利津两站全年降水对径流的正贡献平均值分别是 4.6 亿立方米和 5.1 亿立方米，温度对径流的负贡献平均值分别是-3.3 亿立方米和-4.4 亿立方米。

5. 结论与讨论

本文根据 1951-2012 年的气象和水文观测资料，对黄河流域下游的径流变化规律、径流对降水、气温因子的响应以及这种响应随时间的变化特征和降水、气温因子对径流的贡献等问题进行了统计分析和特征诊断，揭示了一些有意义的现象特征，主要研究结果：

(1)近 60 年来，黄河流域下游径流量总体呈现下降趋势，表现出突变特征：20 世纪 60 年代以前处于丰水期，70 年代和 80 年代处于平水期，90 年代以后进入枯水期，但目前是有由枯转丰的趋势；径流年际变化振荡剧烈，且呈现偏态分布，枯水年份不仅发生概率高，且持续性好，最长连枯年份可达 21 年之久。

(2)黄河流域多雨期主要集中在 20 世纪 50~60 年代以及 70 年代，80 年代和 90 年代均为少雨期，进入 21 世纪之后降水量有增多的趋势；气温一直呈增加趋势，并在 1988 年呈现突变特征，冬季升温率最高，即暖冬现象明显；气候因子与径流量在有的时段呈同期变化或者先于径流量变化。

(3) 无论是年径流还是各季节径流与同期降水、气温因子的相关性都是不稳定的，且这种响应随时间呈非平稳变化；径流对降水量变化的响应比对温度变化的响应更敏感。

(4) 降水对径流以正贡献为主，温度对径流以负贡献为主，且都是在夏季和秋季最明显，冬季和春季的贡献相对较弱。

参考文献

Grinsted J C and Moore S. J, Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time

series. *Nonlinear Processes in Geophysics* **11**(2004), 561-566.

郝振纯, 王加虎, 李丽, 等. 气候变化对黄河源区水资源的影响. *冰川冻土* **28**(1) (2006), 1-7.

蓝永超, 文军, 赵国辉, 等. 黄河河源区径流对气候变化的敏感性分析. *冰川冻土* **32**(1) (2010), 175—182.

刘吉峰, 范旻昊. *黄河流域气候变化特点及趋势*. 中国水利学会 2010 学术年会论文集, 2010.

Lu Er, Take E S, Manoj. The relationships between climatic and hydrological changes in the upper Mississippi River basin: A SWAT and multi-GCM study. *Journal of Hydrometeorology*, **11** (2010), 437-451.

徐东霞. 近 50 年嫩江流域径流变化特征及其影响因素分析. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.

Parry M, Canziani O, Palutikof J, et al. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability – Contribution of Working Group II of the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (Cambridge, UK: Cambridge University, 2007) p.122.

沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点. *冰川冻土*, **35**(5) (2013), 1068-1070.

杨特群, 饶素秋, 陈冬伶. 1951 年以来黄河流域气温和降水的变化特点分析. *人民黄河*, **31**(10) (2009), 76-77.