

# 南水北调工程东线源区近60年降水径流特征分析

孙正兰

(江苏省江都水利工程管理处, 江苏扬州 225200)

**摘要:** 根据南水北调东线源区1961-2017年降水和径流资料,运用累积距平法、Mann-Kendall检验法和Morlet小波分析等方法对源区降水变化特性和径流演变规律进行分析。结果表明:源区径流量变化规律与降水量一致,但丰枯变化程度要剧烈得多;年降水量主要集中在夏季,呈不显著增大趋势,年径流量主要集中在7-9月份,呈不显著减小趋势;自20世纪80年代以来,源区年际径流量的不均匀系数增大,多是降水量的4倍以上。未来即将进入9a左右的丰水期,降水量、径流量均处于偏多态势,尤其是7月,源区将面临较严峻的防汛形势。

**关键词:** 南水北调工程;东线源区;降水量;径流量;特征分析

中图分类号:TV121;P333 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2019)04-0086-06

## Analysis of precipitation and runoff characteristics in recent 60 years in the Eastern Source Area of the South-to-North Water Transfer Project

SUN Zhenglan

(Jiangdu Water Conservancy Project Management Office of Jiangsu Province, Yangzhou 225200, China)

**Abstract:** Based on the precipitation and runoff data from 1961 to 2017 in the eastern source area of the South-to-North Water Transfer Project, the rainfall variation character and runoff evolution law in the source area were analyzed using the cumulative anomaly method, Mann-Kendall testing method and Morlet wavelet analysis method. The results showed that the variation of rainfall in the source area was consistent with that in the Huaihe River Basin. The variation of runoff in the source area was consistent with that of rainfall, but the degree of variation was much more dramatic, reflecting the significant influence of natural factors and human activities, especially the large number of water conservancy projects in the basin. The annual rainfall was mainly concentrated in summer, and the annual rainfall and summer rainfall increased non-significantly. Annual runoff mainly concentrates in the period from July to September, and showed a non-significant decreasing trend. Since the 1980s, the uneven coefficient of interannual runoff in the source area increased, which was more than four times that of the interannual rainfall. In the future, the source area will enter a flood period of about nine years. Under extreme weather conditions, it will face a severe situation of flood control.

**Key words:** South-to-North Water Transfer Project; Eastern Source Area; precipitation; runoff; characteristic analysis

### 1 研究背景

南水北调东线工程由位于江苏扬州的江都水利枢纽抽引长江水,跨越淮河、黄河、海河三大流域,向华北地区输送工农业生产及生活用水,对我国尤其是北方地区宏观经济和社会发展起着十分关键的作用<sup>[1]</sup>。随着东线一期主体工程于2013年11月正式

通水运行,众多学者就东线江苏段源区的水质变化和水量调配开展了大量研究,如王一舒等<sup>[2]</sup>、颜志俊等<sup>[3]</sup>分析了东线工程江苏段源区水质变化趋势和深化治污措施;王文杰等<sup>[4]</sup>、郭玉雪等<sup>[5]</sup>进行了源区水资源优化调度和多目标优化调度研究。

江都水利枢纽工程实现了江水北调、江淮互济。在北方发生干旱时,抽引长江水通过京杭大运河逐

收稿日期:2019-01-15; 修回日期:2019-03-17

基金项目:江苏省水利科技项目(2018002)

作者简介:孙正兰(1968-),女,江苏扬州人,高级工程师,从事水文测验与水资源管理工作。

级翻水北送;当淮河发生洪水时,上中游河南、安徽等  $15.8 \times 10^4 \text{ km}^2$  的区域来水经洪泽湖调蓄后,70%以上的洪水由淮河流域最大的泄洪通道,即入江水道经源区归江控制主要口门万福闸、太平闸、金湾闸排泄入江。工程自建成以来,抽引江水北送  $1\,430 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,排泄淮河洪水  $9\,800 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,在区域的防汛抗旱中发挥了巨大的社会效益。近年来,极端天气频发,干旱、暴雨和洪涝等自然灾害发生的频率呈现上升趋势,洪涝旱灾频发的主要原因是由于降水量的时空分布不均匀<sup>[6]</sup>。分析源区降水和径流的水情情势演变趋势,掌握源区水情的变化规律,有助于东线源区水资源的优化配置和充分利用,对区域防汛抗旱和水利工程安全运行与科学管理都具有重要的现实意义。

## 2 资料与方法

源区属亚热带湿润季风气候,四季分明,寒暑变化显著,土地肥沃,植被良好,是全国著名的鱼米之乡;雨量充沛,降水集中于汛期,6-7月份常因南北冷暖气团遭遇,产生锋面低压和静止锋,导致连续降雨的梅雨天气;7-9月份多遭遇台风暴雨袭击。

### 2.1 数据来源

根据东线源区河流水系特征和水利工程作用,降水选取淮河下游区京杭大运河和入江水道沿线的淮阴、运东闸、高良涧闸、宝应、三河闸、界首、金湖、高邮、六闸、三江营等10个雨量站资料(见图1),径流量为淮河入江水道归江控制口门万福闸、太平闸、金湾闸等3个闸口的入江泄洪总量。选用1961-2017年逐月实测资料进行统计分析,文中水文资料均来自淮河下游区5卷4册《水文年鉴》。

### 2.2 研究方法

本文采用线性趋势法<sup>[7]</sup>判断源区近60年降水量和径流量的变化大致趋势,进而采用5a滑动平均法<sup>[8]</sup>揭示降水量和径流量的年际变化趋势;通过Mann-Kendall检验法<sup>[9]</sup>结合累积距平序列变化情况<sup>[10]</sup>,判断降水量和径流量的长期演变趋势,诊断发生突变的大致时间,分析径流量相对降水量的剧烈变化程度;基于变差系数<sup>[11]</sup>进一步分析径流量相对降水量的年内、年际丰枯不均匀程度;最后采用Morlet小波作为基函数进行小波变换<sup>[12]</sup>,得到降水量和径流量序列的多时间尺度相互交错的复杂变化规律。通过径流量相对降水量的丰枯剧烈程度预测源区未来径流量的变化情势。

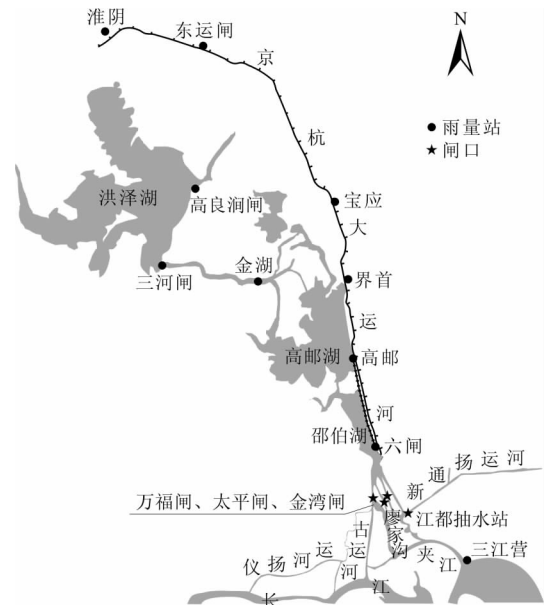


图1 源区及水文站点分布图

## 3 结果与分析

### 3.1 降水量和径流量年内、年际分配特征分析

以变差系数  $C_v$  反映降水量、径流量的年内、年际分配特征。 $C_v$  值越大,降水量和径流量的丰枯变化幅度越大,容易发生洪涝旱灾,不利于防汛抗旱工作; $C_v$  值越小,则降水量和径流量的年内、年际分配较均匀,有益于降雨径流资源的高效利用。

**3.1.1 年内分配特征** 1961-2017年源区数据表明,降水量汛期(5-9月)占多年平均降水量的69.2%;夏季(6-8月)占多年平均降水量的52.0%,冬季(12-2月)仅占多年平均降水量的9.2%,春季和秋季降水量相近;一年中7月降水量最大,占多年平均降水量的22.3%,12月降水量最小,仅占多年平均降水量的2.4%。可见源区一年四季的降水主要集中在夏季。

年径流量主要集中在7-9月份,占多年平均径流量的70.5%;一年中7-8月最大,占多年平均径流量的52.5%,12-次年1月最小,仅占多年平均径流量的1.9%。可见,降水对径流的作用有一定的滞后性,源区径流量年内分配趋势与降水量一致,但不均匀程度比降水量更大。

1961-2017年各年代降水量与径流量年内特征分析结果见表1。由表1可看出,1961-2017年月降水量  $C_v$  值为0.69,月径流量  $C_v$  值为1.10。1961-1969年月降水量  $C_v$  值高于多年平均值且为各年代最大,而月径流量的  $C_v$  值低于多年平均值且为各

年代最小,分析20世纪60年代正是河道整治与水利工程建设时期,太平闸、金湾闸等大型水闸均未建,河道行洪不畅,导致各月泄洪量差别较小。其余各年

代月径流量  $C_V$  值基本随月降水量  $C_V$  值的增大或减小而变化。1970年后,各年代月径流量相对月降水量的变化程度相对稳定,两者之比为1.6~1.8。

表1 1961-2017年各年代降水量与径流量年内特征分析

时段 (年份)	降水量/mm				$C_V$	径流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )				$C_V$	径流 $C_V$ / 降水 $C_V$
	均值	最大值	最小值	极差		均值	最大值	最小值	极差		
1961-1969	82.8	252	21.2	231	0.79	617.0	2119	35.5	2084	0.98	1.2
1970-1979	76.0	194	19.7	174	0.69	395.4	1343	0.0	1343	1.14	1.7
1980-1989	81.4	228	14.0	214	0.74	631.8	2194	0.4	2194	1.20	1.6
1990-1999	82.1	194	23.0	171	0.66	456.2	1879	17.4	1862	1.21	1.8
2000-2009	84.0	240	33.1	207	0.78	683.4	2526	27.9	2498	1.37	1.8
2010-2017	86.8	204	20.4	184	0.67	340.1	1030	19.6	1010	1.06	1.6
1961-2017	82.2	219	23.7	195	0.69	520.7	1672	33.5	1639	1.10	1.6

3.1.2 年际丰枯变化程度 1961-2017年源区多年平均降水量为984 mm,最大与最小年降水量分别发生在1991和1978年,分别为1597和480 mm,极差为1117 mm,最大年降水量为最小年降水量的3.3倍。多年平均径流量为 $167.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,最大与最小年径流量发生在2003和1978年(1991年仅次于2003年),分别为 $620.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和0,极差为 $620.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ (见表2)。

1961-2017年年降水量  $C_V$  为0.22,年径流量  $C_V$  为0.90,可见年际变化幅度均比年内变化小,尤其是降水量的年际分配比年内要均匀得多。1980-1989年、2010-2017年降水量和径流量的  $C_V$  值均

低于多年平均值,1990-1999年降水量和径流量的  $C_V$  值均高于多年平均值,其余各年代降水量和径流量的  $C_V$  值均接近于多年平均值,且年径流量的  $C_V$  值随年降水量  $C_V$  值的增大或减小而变化,反映了年径流量遵循年降水量的周期变化规律。1980年前径流量与降水量的  $C_V$  值之比为3.4~3.5,1980-1989年、1990-1999年、2010-2017年径流量与降水量的  $C_V$  值之比均为4.4,2000-2009年  $C_V$  值之比为3.8。表明在20世纪80年代前,径流量的变差系数相对降水量变化较小;在20世纪80年代后,径流量的变差系数相对降水量变化较大,径流量相对降水量的变化程度相对稳定。

表2 1961-2017年各年代降水量与径流量年际特征分析

时段 (年份)	降水量/mm				$C_V$	径流量/ $10^8 \text{ m}^3$				$C_V$	径流 $C_V$ / 降水 $C_V$
	均值	最大值	最小值	极差		均值	最大值	最小值	极差		
1961-1969	994	1383	684	699	0.23	196	438	12.5	426	0.80	3.5
1970-1979	913	1176	480	696	0.21	126	352	0.0	352	0.71	3.4
1980-1989	976	1240	781	459	0.14	201	358	11.0	347	0.61	4.4
1990-1999	986	1597	612	985	0.29	145	572	0.28	572	1.28	4.4
2000-2009	1007	1423	627	796	0.23	218	620	27.6	592	0.87	3.8
2010-2017	1041	1280	760	520	0.16	108	171	2.12	169	0.70	4.4
1961-2017	984	1597	480	1117	0.22	167	620	0.0	620	0.90	4.1

### 3.2 趋势分析

Mann-Kendall(M-K)趋势检验为广泛使用的一种非参数统计检验方法,该方法不针对特定的参数,不对总体分布做严格假定,能够定量反映变化趋势的显著性。检验置信度为90%时,统计量  $|Z| \geq$

1.28。

3.2.1 降水量 根据5a滑动平均和线性回归分析,年降水量和夏季降水量变化一致且均呈增多趋势,速率分别为1.02和1.08 mm/a(见图2)。由M-K趋势分析计算,年降水量和夏季降水量的统计

量分别为  $Z = 0.53$  和  $Z = 0.38$ ,表明年降水量和夏季降水量均呈不显著增大趋势。

3.2.2 径流量 根据 M-K 趋势分析、5 a 滑动平均和线性回归分析,年径流量和 7-9 月径流量均呈不显著减小趋势,速率分别为  $0.76 \times 10^8$  和  $0.14 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (见图 3);7 月径流量呈不显著增大趋势,速率为  $13.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。由此可见,7-9 月径流量

减小趋势较小,因 6 月及前期降水量相对较小,降水主要为满足上中游人类活动和水利工程调蓄,对径流影响作用较小;7 月为历年降水的集中期,对径流影响作用最大,故在径流量总趋势不显著减小的情形下,7 月径流量呈不显著增加趋势,与年降水量的总体变化趋势一致。

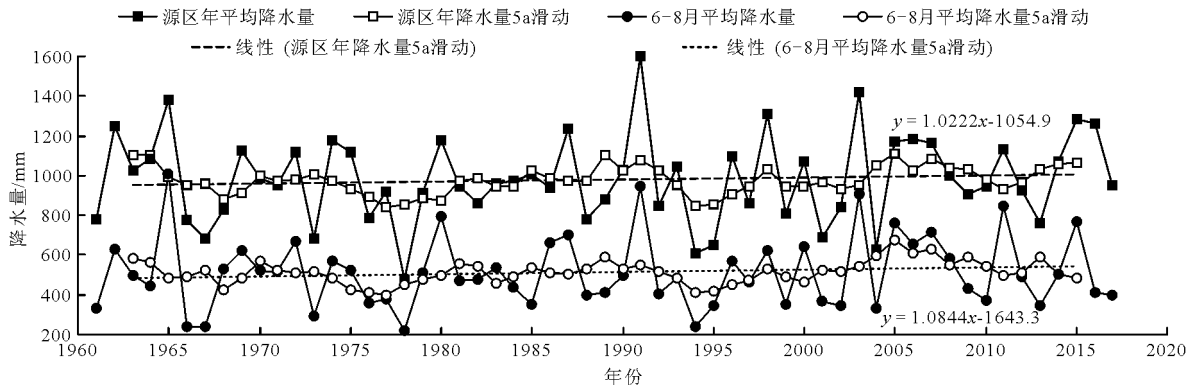


图 2 1961-2017 年年降水量和夏季(6-8 月)降水量变化

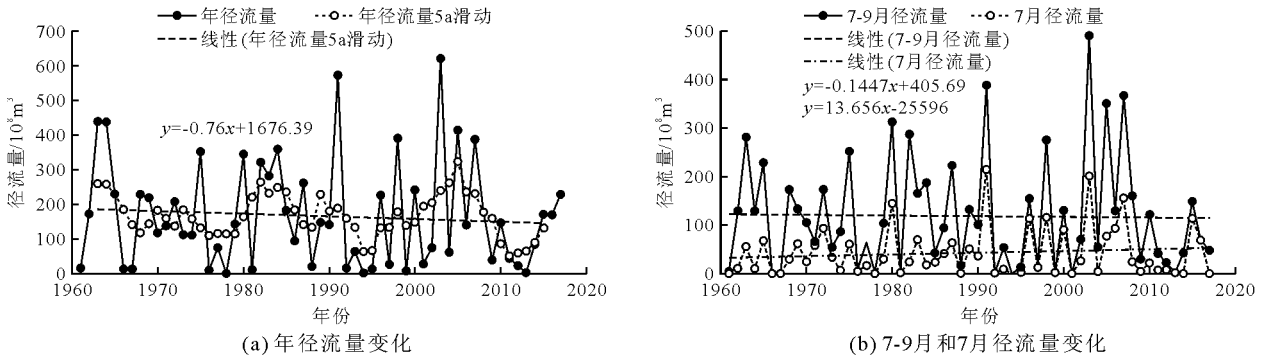


图 3 年径流量、7-9 月径流量和 7 月径流量的变化

### 3.3 突变分析

长时间序列突变检验常用的方法有 M-K 检验和累积距平等。M-K 突变检验假设样本序列随机独立,由正反序列  $UF_k$  和  $UB_k$  曲线通过信度检验是否有明显的变化趋势;检验显著水平  $\alpha = 0.05$  时,统计量  $U_{0.05} = \pm 1.96$ 。累积距平法是通过差积曲线判断数据点离散程度和变化趋势的一种非线性统计方法,即根据曲线明显的上下起伏,可直观而准确地确定发生突变的大致时间。

3.3.1 降水量 由源区年降水序列 M-K 分析图(图 4)可见,1961-1965 年、2003-2007 年,正反序列的  $UF_k$  和  $UB_k$  曲线有多个交点,表明年降水量呈波动上升趋势,1966-2002 年呈不显著波动下降,1966 年为下降的突变点,2003 年为上升的突变点;2008-2013 年呈不显著下降,2008 年为下降的又一

突变点;2014 年后,年降水量呈不显著上升趋势,2014 年为上升的又一突变点。以上源区降水量变化规律与淮河流域降水量变化规律基本一致<sup>[13]</sup>。

3.3.2 径流量 采用累积距平法即通过径流量和降水量的差积曲线,揭示径流量与降水量发生突变阶段的一致性,并对两者各阶段的剧烈程度进行定量比较。万福闸、太平闸、金湾闸的泄洪量短期内受工程控制和人为调节的影响很大,但长序列可减弱人为因素的影响,多年的径流量资料可客观反映淮河上中游多年来水量的变化规律。从年降水量、年径流量距平累积曲线可见,源区年径流量的累积距平曲线变化趋势与年降水量一致(见图 5),均经历了 7 次显著变化:1961-1965 年为急剧上升期,1966-1979 年、1992-2002 年为急剧下降期,1980-1991 年、2003-2007 年、2014-2017 年为平缓上

升期,2008 - 2013 年为平缓下降期。1966、2008 年为下降的突变点,2003、2014 年为回升的突变点。

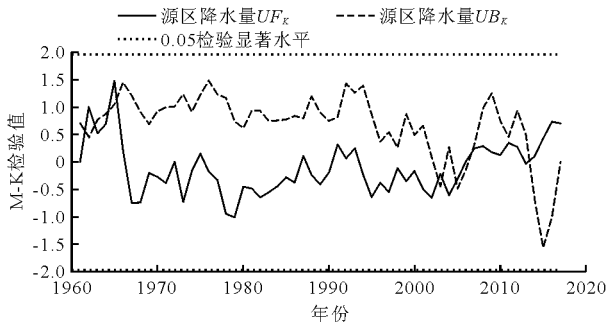


图4 1961 - 2017 年年降水量 M - K 突变检验

表3为1961 - 2017年各阶段降水量和径流量相对多年平均值的变化量,各阶段丰枯水期相互交替,径流量的增减变化幅度比降水量大得多。降水量的丰枯程度变化越大,径流量的增减变化幅度则更大。在1980年前,径流量丰枯期增减变化幅度相对较小,在1980年后相对较大。2014 - 2017年降水量略大于多年平均值,年内、年际分配较均匀,径流量的增减变化幅度最小。

表3 各阶段平均降水量和平均径流量多年平均值的变化

趋势阶段 (年份)	平均降水量/mm	变化率/%	平均径流量/ (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	变化率/%
1961 - 1965	1150.9	17	258.4	54
1966 - 1979	895.9	-9	123.8	-26
1980 - 1991	1032.8	5	227.8	36
1992 - 2002	893.4	-9	98.4	-41
2003 - 2007	1113.3	13	324	94
2008 - 2013	944.6	-4	71.3	-57
2014 - 2017	1142.6	16	162.5	-3

### 3.4 周期分析

小波分析具有非常强大的多尺度分辨功能,根据不同时间尺度上小波方差的变化,分析时间序列的时频变化特征;通过小波方差图,确定序列的主、

年径流量的变化规律与年降水量 M - K 突变检验的分析结果吻合。

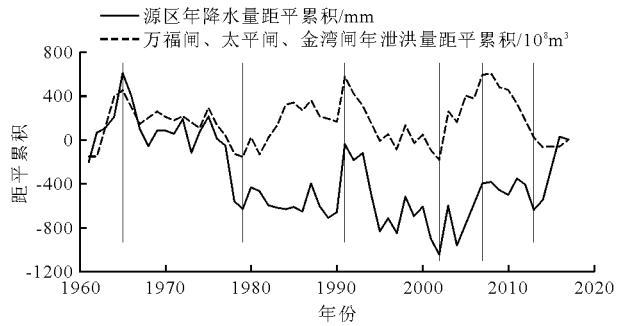


图5 1961 - 2017 年年降水量、年径流量距平累积曲线

次周期。

图6为年降水量和年径流量序列的小波方差图。由图6可见,年降水量和年径流量均存在多个不同时间尺度的周期,且两者主、次周期基本一致,即主周期为28 a左右,次周期为4 a和9 a左右。以年降水量为例,分析不同时间尺度下存在的平均周期与丰枯变化特征。

图7为主周期28 a和第一次周期9 a的年降水序列的小波系数变化,其中小波系数正值表示降水量偏丰,负值表示降水量偏枯。在28 a左右的特征时间尺度下,年降水量经历了大约3次较为显著的丰枯交替变化,平均周期为18 a左右。在9 a左右的特征时间尺度下,年降水量经历了大约9个周期的丰枯循环交替。对于同一个时间序列,大周期与小周期的丰枯点并不完全一致,小周期是时间序列随机性与规律性的综合体现,不确定性和波动性较大;由大环境影响因素决定的大周期,总体变化趋势具有较为稳定持续的规律性和确定性。

根据28 a左右特征时间尺度,枯水期约从2012年开始,2016年到达最低点,至2020年左右结束,之后将进入约9 a左右的丰水期,源区降水量、径流量均将处于偏多态势,尤其是7月,将面临较严峻的防汛形势。

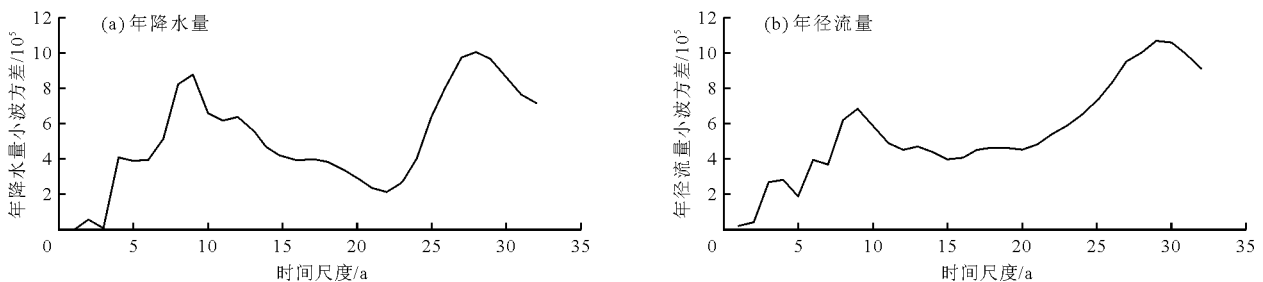


图6 源区降水量、径流量小波方差图

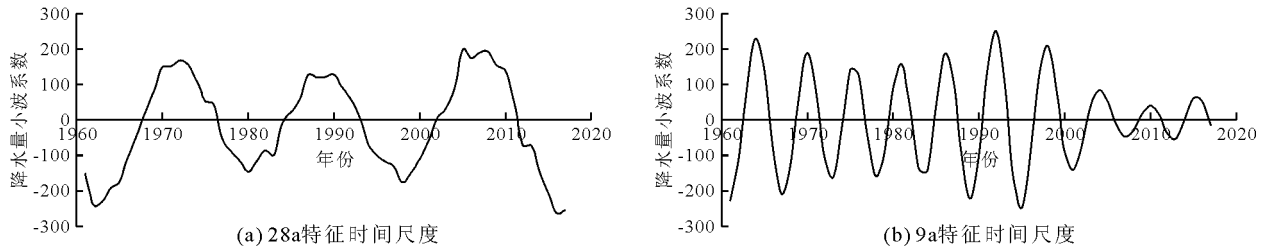


图7 降水量 28 a 和 9 a 特征时间尺度小波实部过程线

## 4 结论

(1) 源区降水量变化趋势与淮河流域一致, 呈不显著增大趋势; 年径流量呈不显著减小趋势, 但 7 月径流量呈不显著增大趋势。年降水量枯水期自 2012 年开始, 于 2020 年左右结束, 随后将进入 9 a 左右的丰水期。在未来丰水期, 尤其是 7 月, 源区将面临较为严峻的防汛形势, 应采取必要的对策和措施, 应对可能出现的暴雨洪涝灾害。

(2) 径流量和降水量的周期变化规律一致。两者的年际变化幅度均比年内变化小, 尤其是降水量的年际分配比年内要均匀得多。径流量的丰枯变化程度比降水量显著, 尤其是径流量年际变化远比降水量年际变化更为剧烈。20 世纪 80 年代后, 径流量的年际丰枯变化程度相对降水量变化趋于稳定, 变差系数多为降水量的 4 倍以上。源区径流量年际丰枯剧烈的变化将加剧源头枢纽工程防洪抗旱的压力, 有必要采取相应的措施应对区域水资源调配和水生态调水面临的挑战。

### 参考文献:

- [1] 中水淮河工程有限责任公司. 南水北调东线一期工程可行性研究总报告[R]. 2005.
- [2] 王一舒, 逢勇, 罗缙, 等. 南水北调东线(江苏段)水质变化趋势分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 104 - 107.
- [3] 颜志俊, 张明月, 逢勇, 等. 南水北调东线江苏段深化治污重点方向及措施[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 42 - 46.
- [4] 王文杰, 吴学文, 方国华, 等. 南水北调东线工程江苏段水量优化调度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 422 - 426.
- [5] 郭玉雪, 张劲松, 郑在洲, 等. 南水北调东线工程江苏段多目标优化调度研究[J]. 水利学报, 2018, 49(11): 1313 - 1327.
- [6] 董秀颖, 王振龙. 淮河流域水资源问题与建议[J]. 水文, 2012, 32(4): 74 - 78.
- [7] 王元超, 王旭, 雷晓辉, 等. 丹江口水库入库径流特征及其演变规律[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 15 - 19.
- [8] 代俊峰, 张学洪, 王敦球, 等. 北部湾经济区入海河流径流变化分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(2): 4 - 6.
- [9] 王景华, 杜伟. 南水北调东线水质污染和湖泊水生经济的系统分析[J]. 地理研究, 1985, 4(4): 84 - 91.
- [10] 冯旭松, 钱志平. 南水北调东线江苏里下河地区水源调整方案研究及有关问题的思考[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(4): 46 - 49.
- [11] 张水锋, 张金池, 闵俊杰, 等. 基于径流分析的淮河流域汛期旱涝急转研究[J]. 湖泊科学, 2012, 24(5): 679 - 686.
- [12] 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.
- [13] 刘丽红, 颜冰, 肖柏青, 等. 1960 年 - 2010 年淮河流域降水量时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 43 - 47 + 66.