

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.018

南水北调东线调水区及受水区降水径流变化特征

陶佳辉^{1,2}, 卞锦宇¹, 敖天其², 吕良华¹, 耿雷华¹, 王欢¹

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要:为给南水北调工程规划与运行提供科学依据,基于比《南水北调工程总体规划》制定水平年更加完整的水文观测数据识别 2001 年以来工程区降水、径流变化特征,采用 Mann-Kendall 趋势检验、小波分析等方法分析了比较期(2001—2016 年)相对于基准期(1956—2000 年)的降水、径流统计特性差异和变化特征。结果表明:相对于基准期,比较期调水区降水量变化不明显,长江大通水文站天然径流量下降 3.5%,调水区水资源条件较为稳定;比较期受水区降水量较基准期基本无变化,天然径流量较基准期上升 3.9%,但山东省、河北省和天津市受水区天然径流量下降 6.6%,3 省市天然径流量呈明显衰减态势。

关键词:调水区;受水区;降水量;径流量;南水北调东线工程

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)-0133-09

Variation characteristics of precipitation and runoff in water diversion area and water receiving area of East Route of the South-to-North Water Transfer Project // TAO Jiahui^{1,2}, BIAN Jinyu¹, AO Tianqi², LYU Lianghua¹, GENG Leihua¹, WANG Huan¹ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to provide a scientific basis for the planning and operation of the South-to-North Water Transfer Project, the characteristics of precipitation and runoff changes in the project area since 2001 are identified based on more complete hydrological observation data than those in the level years formulated in “General Plan of the South to North Water Transfer Project”. Mann-Kendall trend test, wavelet analysis and other methods are used to analyze the statistical difference and variation characteristics of precipitation and runoff between the comparison period (2001—2016) and the reference period (1956—2000). The results show that compared with the reference period, the precipitation in the water diversion area has no obvious change in the comparison period. The natural runoff of Datong Hydrologic Station on the Yangtze River decreases by 3.5%, and the water resource conditions in the water diversion area are relatively stable. The precipitation in the water receiving area in the comparison period is basically unchanged compared with the reference period, and the natural runoff is 3.9% higher. However, the natural runoff in the water receiving area of Shandong Province, Hebei Province and Tianjin City decrease by 6.6%, and the natural runoff in the three provinces and city show a significant decline trend.

Key words: water diversion area; water receiving area; precipitation; runoff; Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project

2002 年 8 月,国务院审议通过了《南水北调工程总体规划》(以下简称《总体规划》),自此南水北调工程由规划阶段进入实施阶段。南水北调工程是实现水资源南北调配、东西互济,提高水资源与人

口、经济时空匹配性的国家战略性工程。全球气候变化改变区域水循环条件^[1],使南水北调工程所涉长江和黄淮海流域来水条件发生了动态调整,改变了调水区可调水量和受水区水资源需求,从而影响

基金项目:江苏省水利科技项目(2019034);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y520008, Y519002);国家重点研发计划(2018YFC0407206)

作者简介:陶佳辉(1993—),男,博士研究生,主要从事水资源规划与配置研究。E-mail:jhtao@smail.nju.edu.cn

通信作者:吕良华(1989—),男,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:lvlianghua2013@163.com

调水规模和工程运行方式^[2-4]。目前,学者们对南水北调工程调水区及受水区水文情势变化特征开展了一系列研究工作^[5-7]。夏军等^[8]基于 Mann-Kendall(M-K)检验、弹性系数法和水文模拟法等方法,发现1961—2013年汉江上游流域径流呈明显下降趋势,降水及潜在蒸发变化趋势不明显;左其亭等^[9]从地理学的角度,对南水北调中线调水区主要特征参数进行系统梳理,分析了水资源特征、水资源开发利用演变过程以及存在的问题;张晓松等^[10]根据东线受水区1951—2012年降水资料,分析得出江苏省沂南水利分区降水呈不显著减少趋势,变化周期为27a;方思达等^[11]基于中线工程水源区与受水区历史旱涝变化特征,分析了近500a来的旱涝遭遇特征及调水保障概率;杨鹏鹏等^[12]通过 Spearman、小波分析等方法,分析得出西线调水区年径流量变化趋势总体不明显,认为气候变化是流域径流量变化的主要影响因素。相关研究对南水北调工程的规划与运行提供了一定的科学依据^[13-15],但《总体规划》以2000年作为规划的现状水平年,论证可调水量和工程规模所采用的水文资料系列均截至2000年甚至更短。而长江和黄淮海四大流域降水、径流系列已延长近20年,并且2000年以来长江和黄淮海流域降水、径流等气象水文要素已检测到一定的变异信号^[16-17]。鉴于此,本文以1956—2016年为研究期,以南水北调东线工程调水区、受水区为研究范围,以1956—2000年为基准期,以2001—2016年为比较期,基于东线工程调水区、受水区长系列降水和径流资料,采用M-K趋势检验、小波分析等定量分析方法,通过比较期与基准期降水、径流序列统计特征值,分析数据延长后统计特性上的差异,阐明数据系列变化对南水北调工程水资源条件的影响,为确保南水北调东线工程科学建设和安全经济运行提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

南水北调东线工程从长江下游江都枢纽和宝应抽水站取水,基本沿京杭大运河向北输水。主要供水目标是解决调水线路沿线和山东半岛城市及工业用水,并在北方需要时,提供农业和生态环境用水。根据《南水北调东线工程规划》(2001年修订),东线工程一期调江水量89.37亿 m^3 ,二期规模148.17亿 m^3 (含一期规模)。东线一期工程已建成并于2013年11月正式通水。

图1为南水北调东线工程调水区与受水区范围,受水区包括淮河、海河和黄河流域的4个省25

个地级城市及天津市,其中江苏省5个(扬州、淮安、宿迁、徐州、连云港)、安徽省3个(蚌埠、淮北、宿州)、山东省14个(枣庄、济宁、菏泽、泰安、济南、淄博、潍坊、青岛、聊城、德州、滨州、东营、威海、烟台)、河北省2个(衡水、沧州);调水区为长江流域,以长江干流大通水文站(集水面积170.5万 km^2 ,占长江流域总面积的95.6%)作为分析节点,结合长江全流域研究其降水量与天然径流量;受水区针对沿线25市研究其降水量与径流量。

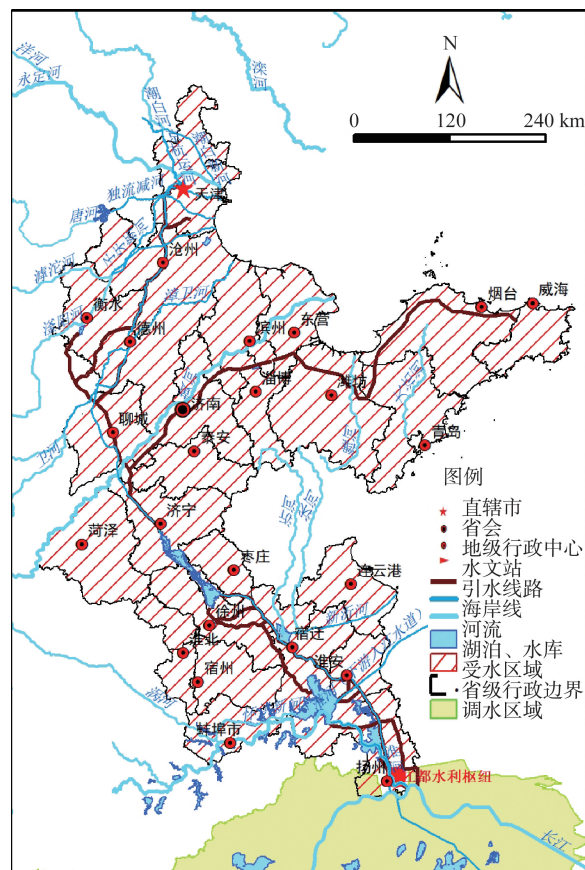


图1 南水北调东线工程调水区和受水区范围
Fig.1 Scope of water transfer area and water receiving area of the East Route of South to North Water Transfer Project

1.2 数据资料

收集了研究区4个省25个地级城市及天津市1956—2016年逐年降水量和逐年地表径流量、长江大通水文站1956—2016年逐月天然径流量,结合全国水资源公报、长江水资源公报、黄河水资源公报、相关地市水资源公报等资料,作为本文的数据基础。

1.3 研究方法

水文气象序列趋势分析主要判断水文序列是否存在显著趋势特征以及该序列趋势是上升还是下降^[18]。本文采用非参数M-K检验法^[19-20]进行趋势分析,采用Morlet小波作为基函数进行小波变换分

析^[21]开展水文周期性研究,从而揭示南水北调东线工程调水区及受水区水文序列变化特征。

2 调水区变化特征

2.1 调水区降水

a. 总体变化特征。调水区基准期多年平均年降水量为 1 084.7 mm,比较期多年平均年降水量为 1 069.2 mm,较基准期下降约 1.4%,总体变化不明显(图 2)。年降水量最大(1998 年)为 1 239.1 mm,最小(1978 年)为 922.5 mm,降水年际间有明显差异。对基准期与比较期调水区年降水量采用皮尔逊Ⅲ型曲线进行水文频率分析,结果见表 1,表中 C_v 为变差系数, C_s 为偏态系数,对水文序列进行频率分析时,一般要求序列长度大于 30a,比较期时段较短,因此仅计算了 C_v 值。

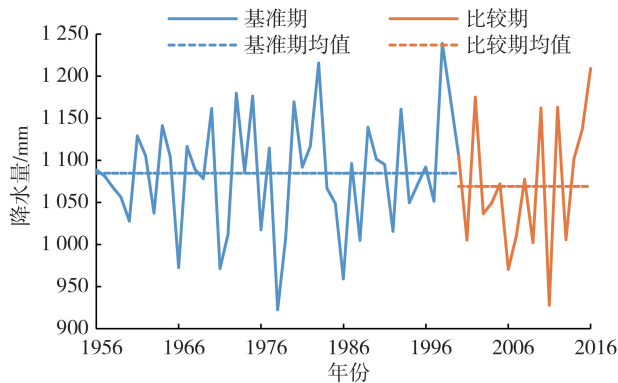


图 2 1956—2016 年调水区年降水变化

Fig. 2 Annual precipitation change in water transfer area from 1956 to 2016

b. M-K 趋势分析。对调水区降水进行 M-K 趋势检验结果表明,经 95% 置信水平的统计检验,基准期降水序列统计值 Z 为 0.73,比较期降水序列 Z 值为 1.22,1956—2016 年调水区降水序列 Z 值为 -0.02,可见基准期、比较期、研究期 3 个时段调水区年降水量变化趋势均不显著。

c. 小波周期分析。图 3 为 1956—2016 年调水区降水量小波变换系数实部等值线,图 3 中绿色部分实线为正值等值线,代表丰水期,黄色部分虚线为负值等值线,代表枯水期。由图 3 可见,在 4 a、13 a 左右的时间尺度丰枯交替变化比较明显;在 13 a 的

周期尺度上,降水量经历了“枯-丰-枯-丰”的循环交替过程,可推测未来一个周期调水区降水量将呈上升趋势。图 4 为 1956—2016 年调水区降水量小波变换方差过程线,同样显示出在 4 a、13 a 左右时间尺度的极值周期较明显。综合分析可知,在 30 a 左右的时间尺度上调水区降水存在一定的周期变化规律,但具体时间尺度不明显,这可能是由于降水序列长度不够,限于数据原因,无法分析出具体的主周期。

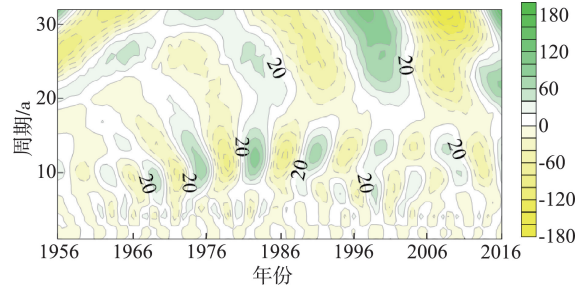


图 3 1956—2016 年调水区降水量小波变换系数实部等值线
Fig. 3 Real part isoline of wavelet transform coefficient of precipitation in water transfer area from 1956 to 2016

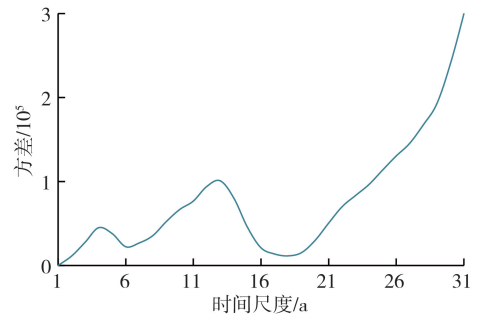


图 4 1956—2016 年调水区降水量小波变换方差过程线
Fig. 4 Wavelet transform variance hydrograph of precipitation in water transfer area from 1956 to 2016

2.2 调水区径流

a. 总体变化特征。长江大通水文站 1956—2016 年平均天然径流量为 9 454.2 亿 m^3 。基准期年均径流量为 9 501.1 亿 m^3 ,比较期平均径流量为 9 322.6 亿 m^3 ,较基准期下降 1.9% (图 5)。大通站最丰年(1998 年)径流量达到 13 132.6 亿 m^3 ,最枯年(1978 年)径流量仅为 7 333.5 亿 m^3 。表 2 为大通站水文频率分析结果,基准期平水年径流量为 9 432.8 m^3 ,研究期平水年径流量为 9 368.7 m^3 。

表 1 调水区水文频率分析结果

Table 1 Hydrological frequency analysis results of water transfer area

时段	统计参数			不同来水频率的年降水量/mm			
	均值/mm	C_v	C_s/C_v	25%	50%	75%	95%
研究期	1 080.7	0.07	2.0	1 130.7	1 078.9	1 028.7	959.3
基准期	1 084.7	0.06	2.0	1 127.9	1 083.4	1 040.1	979.9
比较期	1 069.2	0.08					

表 2 大通站水文频率分析结果

Table 2 Hydrological frequency analysis results of Datong Station

时段	统计参数			不同来水频率的年径流量/亿 m ³			
	均值/亿 m ³	C_v	C_s/C_v	25%	50%	75%	95%
研究期	9454.2	0.12	3.0	10228.3	9368.7	8635.6	7711.2
基准期	9501.1	0.12	3.0	10178.0	9432.8	8699.4	7749.4
比较期	9322.6	0.13					

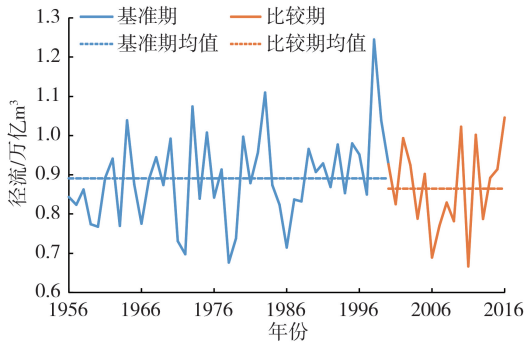


图 5 1956—2016 年大通站天然年径流量变化

Fig. 5 Variation of natural annual runoff at Datong Station from 1956 to 2016

b. M-K 趋势分析。对调水区径流进行 M-K 趋势分析结果表明,经 95% 置信水平的统计检验,基准期大通站年径流序列 Z 值为 2.07,比较期径流序列 Z 值为 0.69,研究期径流序列 Z 值为 1.18,可见大通站基准期年径流量呈显著上升趋势,比较期年径流量呈不显著上升趋势,研究期年径流量呈一定上升趋势但不显著。

c. 小波周期分析。图 6 为 1956—2016 年大通站径流量小波变换系数实部等值线,从图 6 可见,大通站年径流量序列主周期为 28 a,次周期为 12 a;28 a 的周期尺度较为明显,主次周期内径流量经历了“枯-丰-枯-丰”的循环交替过程,反映了大通站径流具有明显的周期性和波动性。同时,在 28 a 的时间尺度上,2000—2016 年长江流域经历了一段径流偏少期,降水变化周期类似,推测未来一个周期大通站将处于径流偏多期,这为东线工程一期调水提供

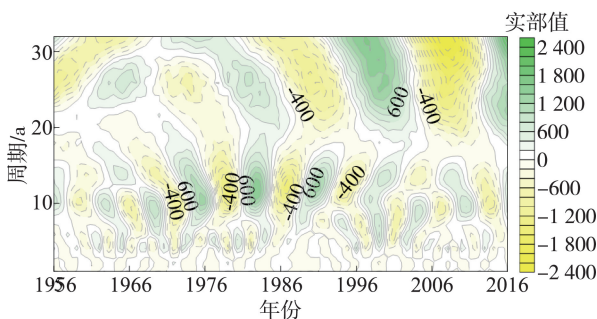


图 6 1956—2016 年大通站径流量小波变换系数实部等值线
Fig. 6 Real part contour of wavelet transform coefficient of runoff at Datong Station from 1956 to 2016

了稳定的水源条件。图 7 为 1956—2016 年大通站径流量小波变换方差过程线,可见,在 5 a、12 a、28 a 左右时间尺度的极值周期较明显。最大峰值对应着 28 a 左右的时间尺度,说明 28 a 左右的周期震荡最强,为大通站年径流量的第一主周期;12 a 左右时间尺度对应着第二峰值,为第二主周期;5 a 左右的时间尺度为第三主周期。

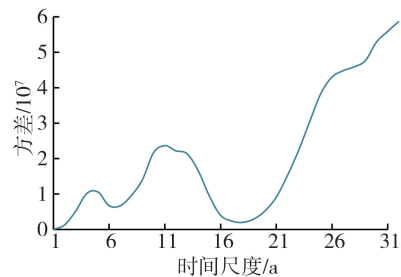


图 7 1956—2016 年大通站径流量小波变换方差过程线

Fig. 7 Wavelet transform variance hydrograph of runoff at Datong Station from 1956 to 2016

3 受水区变化特征

3.1 受水区降水

a. 总体变化特征。按南水北调东线工程受水区涉及的 25 个地级行政区计算,受水区基准期平均降水量为 699.0 mm,比较期平均降水量为 703.7 mm,与基准期基本持平,总体变化不明显(图 8)。表 3 为不同时段受水区降水量水文频率分析结果,东线受水区基准期平水年降水量为 691.6 mm,研究期平水年降水量为 693.7 mm。根据 1956—2016 年受水区 5 个省相关地市的降水量资料,安徽省和江苏省多年平均降水量均超过 800 mm,山东省、河北省和天津市多年平均降水量为 500~600 mm。与基准期相比,比较期江苏省、安徽省、山东省受水区降水有一定增加,增长率分别达到 3.7%、2.1% 及 3.7%;但比较期河北省和天津市受水区降水较基准期有所下降,两市受水区合计减少 60.1 mm,相对减少率分别为 5.6% 和 5.2%。

b. M-K 趋势分析。表 4 为受水区降水量 M-K 趋势分析结果,经 95% 置信水平的统计检验,基准期受水区降水量整体呈现下降趋势,其中山东省呈现显著下降趋势,其他省级行政区呈现不显著下降

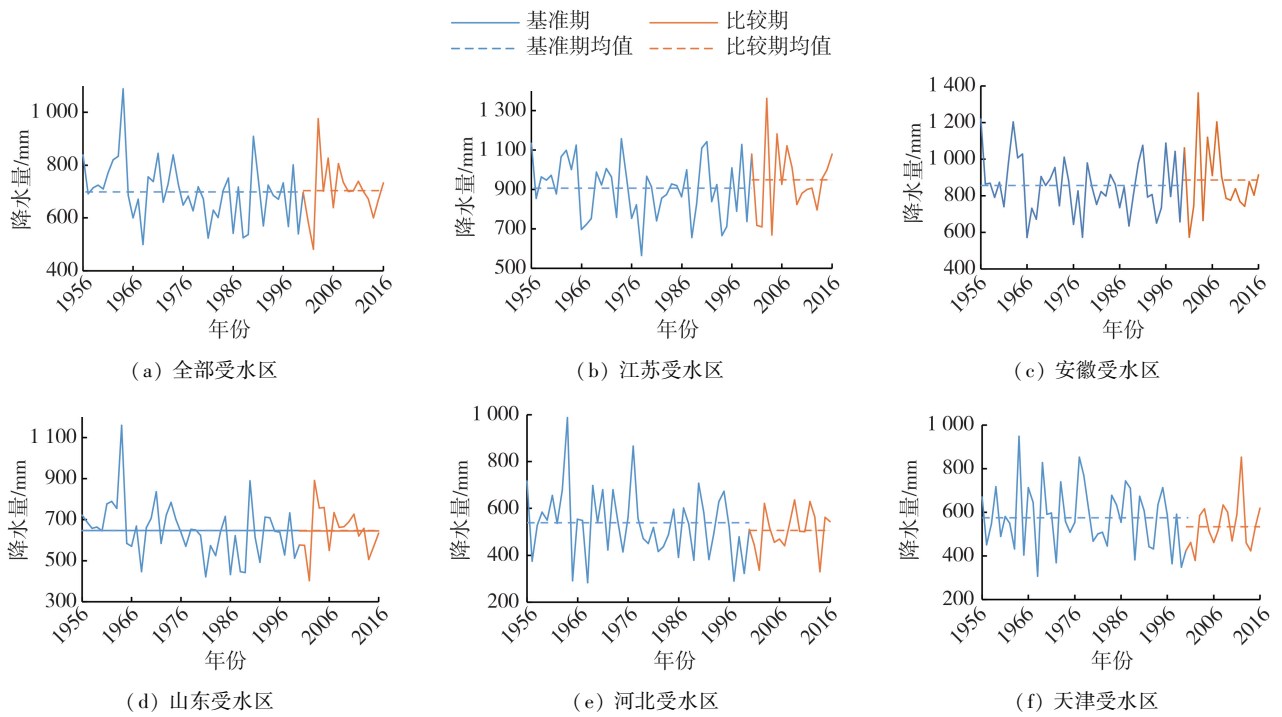


图8 1956—2016年东线受水区年降水量变化

Fig.8 Variation of annual precipitation in the water-receiving area of Eastern Route from 1956 to 2016

表3 不同时段受水区降水量水文频率分析结果

Table 3 Hydrological frequency analysis results of precipitation in water receiving areas at different periods

区域	时段	统计参数			不同来水频率的年降水量/mm				最大降水量/mm	最小降水量/mm
		均值/mm	C_v	C_s/C_v	25%	50%	75%	95%		
总受水区	研究期	700.3	0.15	2.5	767.1	693.7	626.3	539.4	1088.9	499.6
	基准期	699.0	0.16	2.5	769.9	691.6	620.1	528.6	1088.9	481.3
	比较期	703.7	0.15						976.2	481.3
江苏省	研究期	915.2	0.18	2.0	1020.3	905.4	799.4	662.1	1156.9	565.5
	基准期	906.4	0.17	2.0	1005.0	897.7	798.3	668.7	1362.5	565.5
	比较期	940.0	0.20						1362.5	669.0
安徽省	研究期	860.8	0.19	2.0	964.8	850.5	745.6	610.6	1218.3	571.4
	基准期	856.1	0.18	2.0	954.4	846.8	747.7	619.3	1361.7	571.4
	比较期	874.2	0.24						1361.7	574.2
山东省	研究期	647.8	0.19	2.0	726.1	640.1	561.1	459.5	1159.9	422.3
	基准期	647.2	0.20	2.0	729.2	638.6	555.9	450.0	1159.9	402.4
	比较期	649.6	0.18						889.9	402.4
河北省	研究期	528.7	0.24	2.0	607.9	518.6	438.5	338.7	988.7	283.3
	基准期	536.7	0.27	2.0	626.0	523.7	433.2	322.5	988.7	283.3
	比较期	506.4	0.19						636.3	329.7
天津市	研究期	567.0	0.24	2.5	650.0	553.5	469.4	368.7	948.3	306.6
	基准期	574.9	0.26	2.0	667.4	562.0	468.3	353.0	948.3	306.6
	比较期	545.1	0.21						852.0	378.6

表4 受水区降水量 M-K 趋势分析结果

Table 4 M-K trend analysis results of precipitation in the catchment area

区域	Z			变化趋势		
	基准期	比较期	研究期	基准期	比较期	研究期
总受水区	-2	-0.41	-1.29	显著下降	不显著下降	不显著下降
江苏省	-1.01	0.68	-0.26	不显著下降	不显著上升	不显著下降
安徽省	-0.89	-0.05	-0.55	不显著下降	不显著下降	不显著下降
山东省	-2.47	-1.22	-1.52	显著下降	不显著下降	不显著下降
河北省	-1.63	1.12	-1.34	不显著下降	不显著上升	不显著下降
天津市	-0.93	0.77	-1	不显著下降	不显著上升	不显著下降

趋势。比较受水区各省级行政区基准期 Z 值大小, 得到降水量下降趋势显著性由大到小排序为: 山东省、河北省、江苏省、天津市和安徽省; 比较期受水区年降水量整体呈现下降趋势, 江苏省、河北省和天津市呈不显著上升趋势, 安徽省和山东省呈不显著下降趋势; 研究期受水区年降水量整体呈现下降趋势, 各省市均呈现不显著下降趋势。

c. 小波周期分析。图 9 为受水区降水量小波转换系数实部等值线, 可见, 天然年降水量表现为 25 a、12 a 左右时间尺度的周期, 在该时间尺度上, 年降水量的丰枯交替变化十分明显。25 a 的大周期与 12 a 的小周期呈现一定的嵌套关系, 从 25 a 的大周期上看, 降水量在该时间尺度上经历了 3 次“丰-枯”交替变化, 目前东线受水区正处于年降水量偏少期。图 10 为 1956—2016 年受水区降水量小波变换方差过程线, 在 4 a、12 a、17 a 及 25 a 左右时间尺度的极值周期较明显。最大峰值对应着 25 a 左右的时间尺度, 说明 25 a 左右的周期震荡最强, 为东线受水区天然年降水的第一主周期; 17 a 左右时间尺度对应着第二峰值, 为第二主周期; 12 a、4 a 左右的时间尺度分别为第三、第四主周期。

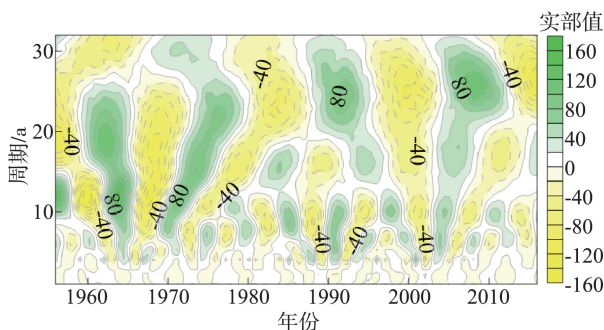


图 9 1956—2016 年受水区降水量小波变换系数实部等值线
Fig. 9 Real part isoline of wavelet transform coefficient of precipitation in catchment area from 1956 to 2016

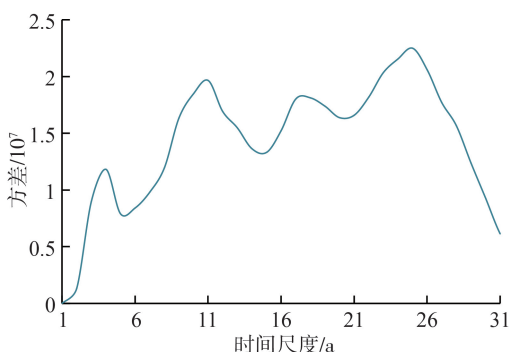


图 10 1956—2016 年受水区降水量小波变换方差过程线
Fig. 10 Wavelet transform variance hydrograph of precipitation in watershed area from 1956 to 2016

3.2 受水区径流

a. 总体变化特征。1956—2016 年受水区平均径流量为 284.4 亿 m^3 。基准期年均径流量为 281.5 亿 m^3 , 比较期平均径流量为 292.5 亿 m^3 , 较基准期略有上升, 上升率为 3.9%, 总体变化不明显(图 11)。最丰年(1964 年)径流量为 731 亿 m^3 , 最枯年(2002 年)径流量为 83.0 亿 m^3 , 极值比为 8.8。表 5 为受水区径流水文频率分析结果, 从表 5 可见, 受水区研究期平水年径流量为 261.9 m^3 , 基准期平水年径流量为 259.2 m^3 。河北省 1956—2016 年多年平均径流量最小, 仅为 2.6 亿 m^3 , 山东省和江苏省多年平均径流量均大于 100 亿 m^3 , 安徽省和天津市多年平均径流量均大于 10 亿 m^3 。与基准期对比, 比较期江苏省、安徽省受水区径流量有较大增加, 增长率分别达到 18.5%、10.0%, 但山东省、河北省和天津市受水区天然径流量较基准期有所下降, 3 省市受水区合计减少 10.1 亿 m^3 , 相对减少率分别为 5.8%、4.0% 和 9.6%。综合分析受水区降水与径流的均值变化情况, 以山东省和天津市为例, 比较期山东省降水较基准期增加 3.5%, 但天然径流下降 5.8%; 天津市降水较基准期下降 5.2%, 但天然径流量下降 9.6%, 要高于降水的下降率。分析原因可能是人类活动对下垫面产生了一定的影响, 导致了以上两种情况的出现, 说明人类活动在一定程度上影响了区域水资源量^[22-23]。

b. M-K 趋势分析。表 6 为受水区年径流量 M-K 趋势分析结果, 经 95% 置信水平统计检验, 总受水区以及江苏省、安徽省和天津市受水区年径流量表现出一定下降态势但不显著, 而山东省、河北省受水区年径流量下降态势较其他受水区明显, 这在一定程度上说明两省受水区的水资源量呈下降趋势, 反映了南水北调工程东线调水的必要性。

c. 小波周期分析。图 12 为 1956—2016 年受水区径流量小波变换系数实部等值线, 可见径流变化主周期为 20 a, 次周期为 12 a, 主次周期内径流量经历了“枯-丰-枯-丰”的循环交替过程。总体来说, 在 4 a、12 a、20 a 左右时间尺度的丰枯交替变化特征比较明显。在 20 a 的周期尺度上, 共经历了 4 次较为完整的丰枯交替过程, 推测目前受水区正处于径流偏少期。图 13 为 1956—2016 年受水区径流量小波变换方差过程线, 可见, 在 4 a、12 a、20 a 左右时间尺度的极值周期较明显。最大峰值对应着 20 a 左右的时间尺度, 说明 20 a 左右的周期震荡最强, 为东线受水区天然年径流量的第一主周期; 12 a 左右时间尺度对应着第二峰值, 为第二主周期; 4 a 左右的时间尺度为第三主周期。

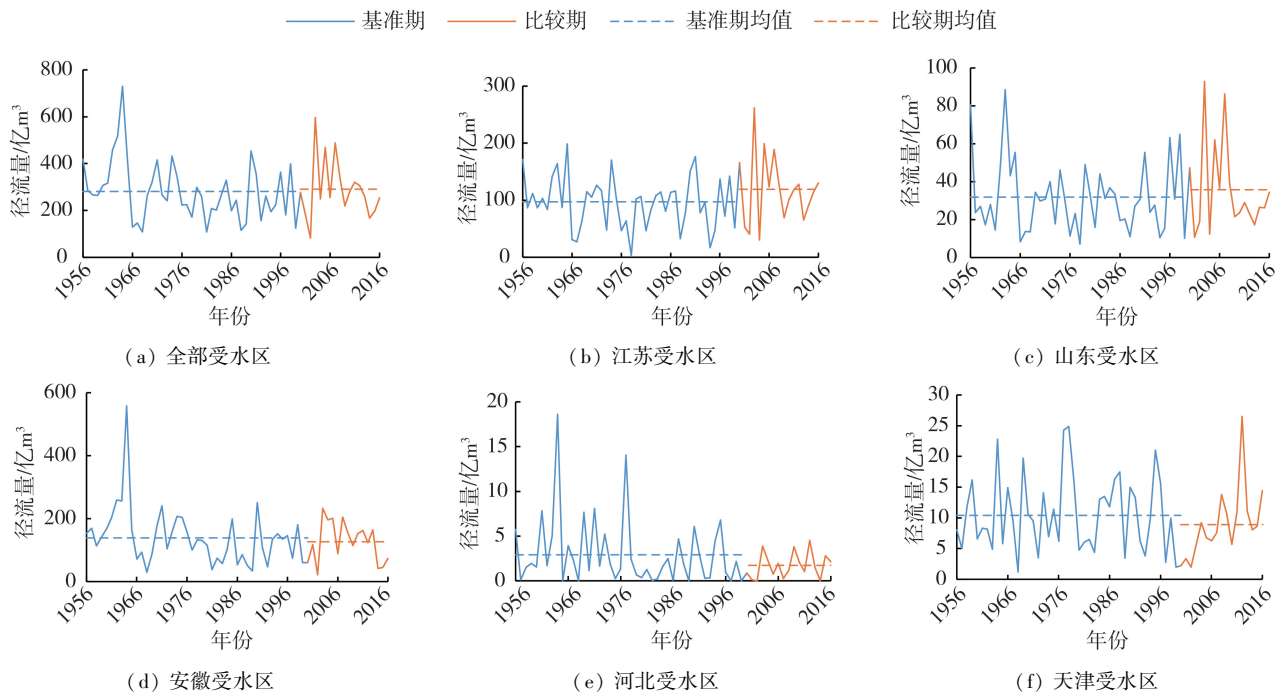


图 11 东线受水区 1956—2016 年天然径流量变化

Fig. 11 Variation of natural runoff in the water-receiving area of Eastern Route from 1956 to 2016

表 5 受水区径流量水文频率分析结果

Table 5 Hydrological frequency analysis results of runoff in the catchment area

区域	时段	统计参数			不同来水频率的年径流量/亿 m ³				最大径流量/亿 m ³	最小径流量/亿 m ³
		均值/亿 m ³	C_v	C_s/C_v	25%	50%	75%	95%		
总受水区	研究期	284.4	0.44	2.5	351.9	261.9	192.5	124.2	731.0	108.3
	基准期	281.5	0.44	2.5	348.3	259.2	190.6	122.9	731.0	83.0
	比较期	292.5	0.46						597.1	83.0
江苏省	研究期	102	0.5	2.0	130.3	93.7	64.7	34.8	198.4	3.6
	基准期	97.3	0.48	2.0	123.5	90	63.2	35.1	261.7	3.6
	比较期	115.3	0.54						261.7	30.8
安徽省	研究期	32.7	0.63	2.5	42.3	27.6	17.7	10	88.4	7.2
	基准期	31.9	0.6	2.5	41.0	27.3	17.9	10.3	92.9	7.2
	比较期	35.1	0.76						92.9	10.7
山东省	研究期	136.8	0.56	2.5	174.5	119.6	80.5	47.3	558.8	29.8
	基准期	138.9	0.6	3.0	174.1	115.4	78.6	53.9	558.8	21.0
	比较期	130.9	0.51						233.0	21.0
河北省	研究期	2.6	1.26	2.5	3.2	1.3	0.7	0.5	18.6	0
	基准期	2.9	1.32	2.0	4.0	1.5	0.4	0	18.6	0
	比较期	1.8	0.86						4.5	0
天津市	研究期	10.2	0.61	2.0	13.4	8.9	5.6	2.5	24.9	1.2
	基准期	10.4	0.61	2.0	13.8	9.2	5.8	2.6	26.5	1.2
	比较期	9.4	0.60						26.5	2

表 6 受水区年径流量 M-K 趋势分析结果

Table 6 M-K trend analysis results of annual runoff in the catchment area

区域	Z			变化趋势		
	基准期	比较期	研究期	基准期	比较期	研究期
总受水区	-1.96	-0.59	-1.21	明显下降	不明显下降	不明显下降
江苏省	-0.50	0.14	0.48	不明显下降	不明显上升	不明显上升
安徽省	-0.21	-0.05	-0.09	不明显下降	不明显下降	不明显下降
山东省	-2.47	-1.22	-1.72	明显下降	不明显下降	不明显下降
河北省	-1.43	0.95	-1.20	不明显下降	不明显上升	不明显下降
天津市	-0.40	2.84	-0.28	不明显下降	明显上升	不明显下降

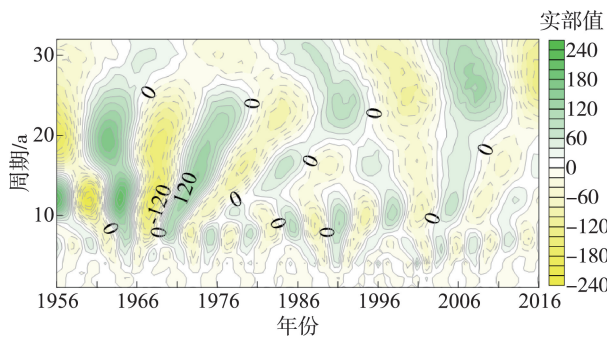


图 12 1956—2016 年受水区径流量小波变换系数实部等值线
Fig. 12 Real part contour of wavelet transform coefficient of runoff in catchment area from 1956 to 2016

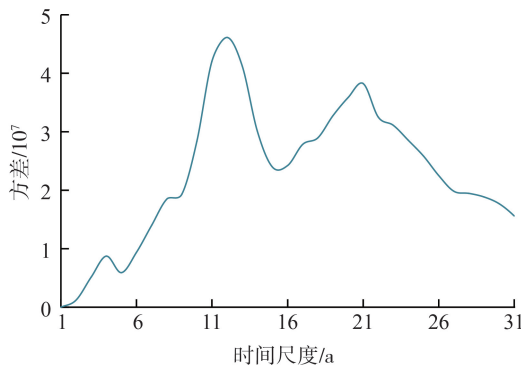


图 13 1956—2016 年受水区径流量小波变换方差过程线
Fig. 13 Wavelet transform variance hydrograph of runoff in catchment area from 1956 to 2016

4 结论

a. 东线调水区水资源条件较为平稳,其统计特征无显著变化。相对于基准期,比较期东线调水区降水量变化不明显,长江大通站天然径流量较基准期略有下降。以长江大通控制断面径流计算,根据《总体规划》,东线工程一、二期共调水 195.23 亿 m^3 ,调水量仅占大通站多年平均年径流量的 2% 左右。因此,可以认为长江流域天然水资源条件可稳定支撑东线工程建设运行。

b. 东线受水区部分地区本地水资源严重不足的局面在 2000 年之后无明显变化。相对于基准期,比较期东线受水区年降水量较基准期基本无变化,天然径流量总体较基准期上升 3.9%,但山东省、河北省和天津市受水区天然径流量较基准期有所下降,3 省市受水区合计减少 10.1 亿 m^3 ,相对减少率为 6.6%。

参考文献:

[1] 王国庆,张建云,管晓祥,等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. 水科学进展, 2020, 31 (3): 3-13. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, GUAN Xiaoxiang, et

al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31 (3): 3-13. (in Chinese))

[2] 刘寒青,刘静,赵建世,等. 基于水资源系统可持续性的南水北调进京规模分析[J]. 水资源保护, 2020, 36 (6): 99-105. (LIU Hanqing, LIU Jing, ZHAO Jianshi, et al. Analysis of water transfer scale of South-to-North Water Diversion Project based on sustainability of water resources system[J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (6): 99-105. (in Chinese))

[3] 韦晓伟,张洪波,辛琛,等. 变化环境下流域气象水文要素的相关性演化[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18 (6): 21-30. (WEI Xiaowei, ZHANG Hongbo, XIN Chen, et al. Evolution of correlation analysis of hydro-meteorological variables in the basin under changing environment[J]. South-to North Water Transfer and Water Science & Technology, 2020, 18 (6): 21-30. (in Chinese))

[4] 荣艳淑,胡玉恒,冯瑞瑞,等. 广义相加模型在乌江夏季径流预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49 (2): 121-126. (RONG Yanshu, HU Yuheng, FENG Ruirui, et al. Application of generalized additive model in summer runoff forecasting of Wujiang Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (2): 121-126. (in Chinese))

[5] 孙正兰. 南水北调工程东线源区近 60 年降水径流特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30 (4): 86-91. (SUN Zhenglan. Analysis of precipitation and runoff characteristics in recent 60 years in the Eastern Source Area of the South-to-North Water Transfer Project[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30 (4): 86-91. (in Chinese))

[6] 黄晓荣,柴雪蕊,杨鹏鹏,等. 南水北调西线工程引水区气候变化趋势[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 12 (3): 5-9. (HUANG Xiaorong, CHAI Xuerui, YANG Pengpeng, et al. Climate change trend analysis in western route of South-to-North Water Diversion Project [J]. South-to North Water Transfer and Water Science & Technology, 2017, 12 (3): 5-9. (in Chinese))

[7] 黄显峰,贾永乐,方国华,等. 基于 PP-RVA 法的水电站下游河流水文情势评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46 (6): 479-485. (HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua, et al. Hydrological regime evaluation of hydropower station downstream based on the PP-RVA method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46 (6): 479-485. (in Chinese))

[8] 夏军,马协一,邹磊,等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. 南水北调与水利科

- 技,2017,15(1):1-6. (XIA Jun, MA Xieyi, ZOU Lei, et al. Quantitative analysis of the effects of climate change and human activities on runoff in the Upper Hanjiang River basin [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2017, 15(1):1-6. (in Chinese))
- [9] 左其亭,王妍,陶洁,等.南水北调中线水源区水文特征分析及其水资源适应性利用的思考[J].南水北调与水利科技,2018,16(4):42-49. (ZUO Qiting, WANG Yan, TAO Jie, et al. Hydrological characteristics and adaptive utilization of water resources in water source area of the middle route of South-to-North Water Diversion Project [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2018, 16(4):42-49. (in Chinese))
- [10] 张晓松,曹命凯,丁艳霞,等.南水北调东线典型受水区降雨特征分析[J].南水北调与水利科技,2018,16(3):59-64. (ZHANG Xiaosong, CAO Mingkai, DING Yanxia, et al. Rainfall characteristics in typical water-receiving area of East Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2018, 16(3):59-64. (in Chinese))
- [11] 方思达,刘敏,任永建.南水北调中线工程水源区和受水区旱涝特征及风险预估[J].水土保持通报,2018,38(6):263-267. (FANG Sida, LIU Min, REN Yongjian. Drought and waterlogging characteristics and risk prediction in different river basin areas of middle route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6):263-267. (in Chinese))
- [12] 杨鹏鹏,黄晓荣,柴雪蕊,等.南水北调西线引水区近50年径流变化趋势对气候变化的响应[J].长江流域资源与环境,2015,24(2):271-277. (YANG Pengpeng, HUANG Xiaorong, CHAI Xuerui, et al. Runoff change in response to climate change in west route of South-to North Water Diversion Project over the past 50 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(2):271-277. (in Chinese))
- [13] 肖祖香,朱双,罗显刚,等.三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6):515-520. (in Chinese))
- [14] 邹磊,夏军,张印,等.海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J].水资源保护,2021,37(1):53-60. (ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):53-60. (in Chinese))
- [15] 班璇,师崇文,郭辉,等.气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响[J].水利水电科技进展,2020,40(4):1-7. (BAN Xuan, SHI Chongwen, GUO Hui, et al. Effects of climate change and water conservancy projects on hydrological regime downstream of Danjiangkou Dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4):1-7. (in Chinese))
- [16] 梁钟元,王海潮,雷晓辉.气候变化对南水北调中线受水区径流量影响[J].南水北调与水利科技,2014,12(2):137-141. (LIANG Zhongyuan, WANG Haichao, LEI Xiaohui. Impact of climate change on the intake area runoff in the Middle-Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2014, 12(2):137-141. (in Chinese))
- [17] 张利平,杨艳蓉,秦琳琳,等.未来情景下南水北调中线工程水源区极端降水分布特征[J].气候变化研究进展,2013,9(1):29-34. (ZHANG Liping, YANG Yanrong, QIN Linlin, et al. Distribution of extreme precipitation events in water source area for the Middle Route Project of South-to-North Water Transfer [J]. Climate Change Research, 2013, 9(1):29-34. (in Chinese))
- [18] 王妍.南水北调中线水源区水资源特征及适应性利用研究[D].郑州:郑州大学;2018.
- [19] MANN HB. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945, 13(3):245-259.
- [20] KENDALL MG. Rank correlation measures [M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [21] 桑燕芳,王中根,刘昌明.水文时间序列分析方法研究进展[J].地理科学进展,2013,32(1):20-30. (SANG Yanfang, WANG Zhonggen, LIU Changming. Research progress on the time series analysis methods in hydrology [J]. Progress in Geography, 2013, 32(1):20-30. (in Chinese))
- [22] 孟猛.气候变化对南水北调中线可调水量及供水风险影响研究[D].郑州:郑州大学;2019.
- [23] 邓鹏,孙善磊,黄鹏年.气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):39-45. (DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1):39-45. (in Chinese))

(收稿日期:2021-10-28 编辑:王芳)