

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0051

张炜,薛丽芳,杜杰.南四湖流域水循环要素的时空变化特征[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):65-72. ZHANG W, XUE L F, DU J. Spatiotemporal variation characteristics of water cycle elements in the Nansihu basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(3): 65-72. (in Chinese)

## 南四湖流域水循环要素的时空变化特征

张炜,薛丽芳,杜杰

(中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221116)

**摘要:**选取南四湖流域鱼城、孙庄等 8 个监测站点,利用其 1952—2015 年的实测水文数据,采用 Mann-Kendall 非参数检验和 Morlet 小波变换等分析方法,分析了流域降水、径流、蒸发等水循环要素变化时空特征,研究表明:流域降水量呈现增加趋势,径流量和蒸发量呈减少趋势;各水循环要素的年际变化周期都有多种时间尺度相互嵌套,降水量和蒸发量的主周期为 25 a,径流量的主周期为 31 a;水循环要素的年内分配不均匀,降水量集中在 6—8 月,径流量的峰值较降水量滞后 1 个月,蒸发量的最大值出现在 6 月;空间分布不均匀,表现为降水由东南向西北方向递减趋势,径流深的空间分布格局吻合于降水;湖东区域水循环要素的变化大于湖西区域;流域水循环要素的时空变化特征受到气候变化和人类活动的共同影响。

**关键词:**南四湖流域;水循环要素;时空变化特征;小波分析;驱动力分析

中图分类号:P426.6 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



### Spatiotemporal variation characteristics of water cycle elements in the Nansihu basin

ZHANG Wei, XUE Lifang, DU Jie

(School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In this study, eight monitoring stations were selected to analyze the spatial and temporal characteristics of water cycle elements, such as precipitation, runoff, and evaporation in the basin. For this purpose, measured hydrological data from 1952 to 2015, the Mann-Kendall nonparametric test and Morlet wavelet transform were used. The results indicated that precipitation showed an increasing trend, and the runoff and evaporation showed a decreasing trend in the basin. The interannual variation cycle of each water cycle element had multiple time scales nested with each other. The main cycle of precipitation and evaporation was 25 a, and runoff was 31 a, respectively. The distribution of water cycle elements was uneven during the year, while the precipitation was concentrated in June–August. The peak value of runoff was one month behind the precipitation, and the maximum value of evaporation appeared in June. The spatial distribution was uneven, which characterized by the decreasing trend of precipitation from southeast to northwest. The spatial distribution pattern of runoff depth was consistent with precipitation. The change of water cycle elements in Hudong area was greater than that in Huxi area. The temporal and spatial variation characteristics of the water cycle elements of the basin may be affected by climate change and human activities.

**Key words:** Nansihu basin; water cycle elements; temporal and spatial changes; wavelet analysis; driving force analysis

收稿日期:2019-03-01 修回日期:2019-11-12 网络出版时间:2019-11-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191122.1132.010.html>

基金项目:国家自然科学基金(41201166);江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX19\_2173);中国矿业大学研究生科研与实践创新计划(KYCX19\_2173)

作者简介:张炜(1994—),女,山西大同人,主要从事数字城乡规划方面研究。E-mail: zhangwei\_7435@163.com

通信作者:薛丽芳(1975—),女,山西柳林人,副教授,博士,主要从事 3S 技术在流域规划中的应用研究。E-mail: xuel76@163.com

受全球气候变化和人类活动的影响,近年来我国极端水灾害事件频繁发生,水循环过程正在发生深刻变化,变化环境下的水循环要素变化的检测与归因是当前水循环问题研究的热点之一<sup>[1-2]</sup>。水循环过程加快,降水事件和强度增加,许多地区洪涝和干旱风险上升。气候变化过程中大气环流的变化影响了水循环过程,对降水强度、总量和时空分布产生相对长期的影响<sup>[3-4]</sup>。有研究表明,全球变暖通过增加大气中的水汽含量从而诱发降水的发生,导致小雨减少,大雨增加;此外 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等温室气体大量排放以及产生的气溶胶粒子等污染物也会直接或间接影响降水<sup>[5]</sup>。人类活动通过土地利用类型改变、水利工程建设、取排水过程等改变下垫面条件和水循环结构,从而影响流域的产汇流机制<sup>[6-9]</sup>。其中,土地利用变化对水文循环过程以及水量水质的影响,直接导致水资源供需关系发生变化,从而对流域生态和社会经济发展产生显著影响。目前国内对流域水循环要素变化的研究大多集中在黄河流域、长江流域、珠三角地区等大流域或者城市化高度发展流域<sup>[10-12]</sup>,而对于城市化程度低的小流域研究较少。

南四湖流域现已进入城市化加速发展的阶段,水资源开发利用的强度日益增加,水系受自然和人为干扰发生较大改变,出现了严重的水资源短缺、水质污染、水生态环境破坏等问题。但其城市化率仍低于全国平均水平(2016 年人口城市化率为 45%,全国为 57.35%),与已经高度城市化地区人类活动对水循环造成较强的不可逆性特征相比,南四湖流域人水关系的可塑性较大<sup>[13]</sup>。现有对南四湖流域水循环要素变化特征的研究相对薄弱,且只针对单个水循环要素的变化趋势、集中度等方面<sup>[14-16]</sup>,而对于多个要素特征变化之间的联系尚处于空白。本文选取流域内具有代表性的 8 个站点,选择降水、蒸发、径流等主要水循环要素,分析流域近 60 年水循环要素变化特征的原因,为流域水资源、水环境保护以及流域土地利用管理提供决策支持。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

南四湖流域位于 34°24′~35°59′N 和 114°52′~117°42′E,地理范围北起大汶河南岸,南抵废黄河南堤,东至鲁中南低山陵区西侧边缘,西以黄河堤坝为界,行政范围主要包括山东省的济宁、枣庄、菏泽、泰安四个地级市,以及江苏省徐州市,流域总面积为 3.17 万 km<sup>2</sup>,其中水域面积约 1 266 km<sup>2</sup>。流域属于暖温带大陆性季风气候,四季分明,夏季湿热多

雨,冬季干燥少雨,年平均降水量约 690 mm。流域内水系纵横交错,入湖河流有 53 条,流域以南四湖和京杭大运河为界,分为湖东、湖西两部分,湖西地处黄河与古黄河之间的黄泛平原处,地势平缓;湖东为低山丘陵和山前冲洪积平原,地势起伏较大。

### 1.2 数据来源与处理

降水、径流数据来源于水利部淮委沂沭泗水利管理局,选择流域内有代表性和控制面积较大的 8 个监测站点,获取了包括湖西的鱼城站、孙庄站、梁山闸站、后营站,湖东的黄庄站、书院站、滕县站、薛城站等各站点 1952—2015 年的日降水和日径流数据。蒸发数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),获取了流域内徐州、定陶、兖州 3 个站点 1963—2011 年的日蒸发数据。DEM 数据来源于国际科学数据服务平台网站,分辨率为 30 m。水系数据(2015 年)来源于国家基础地理信息数据中心。

运用 ArcGIS 软件中的水文分析工具,划分 8 个监测站点控制的子流域,将流域点数据转化为小流域的平均值;运用 SWAT 模型,在子流域的基础上划分水文响应单元,输入三期土地利用和对应年代的气象数据,分别是 1985 年 LUCC、1980—1990 年气象条件,2000 年 LUCC、1991—2000 年气象条件、2014 年 LUCC、2001—2015 年气象条件,获得在气象和下垫面条件同步变化下流域径流深。

### 1.3 研究方法

水循环要素的时间变化特征主要从多年变化趋势及变化周期、年内分配特征等方面进行。年际趋势特征采用五年滑动平均值、Mann-Kendall 非参数检验(以下简称 M-K 检验)等方法研究,M-K 非参数检验不受数据分布特征的影响和异常值的干扰,广泛应用于水文和气象时间序列的变化趋势分析;年际周期性采用 Morlet 小波分析方法进行分析,小波分析法<sup>[17]</sup>作为一种高效的信号分析处理方法,已广泛运用于降水时间序列分析;年内分配特征选用集中度 Cd(concentration degree)进行分析,Cd 值表示集中期降水量或径流量占全年降水量或径流量的比例,比值越大表示年内分配越集中。径流深的空间变化特征采用 SWAT 模型模拟,SWAT 模型可以模拟流域的水文过程。

## 2 水文循环要素的时空变化特征分析

### 2.1 南四湖流域降水的时空变化特征

#### 2.1.1 降水量的年际变化

对各站点逐年降水量做多年变化的五年滑动平

均曲线和 M-K 非参数检验分析,结果见图 1、表 1。降水的年际变化特征为:(1)各站点降水量的五年滑动平均曲线呈现较为一致的波动变化,20 世纪 60—80 年代处于下降趋势;20 世纪 80—21 世纪初期间

处于增加趋势,2005 年之后处于下降趋势。(2)流域降水量整体上呈现增加趋势,各站点的多年变化趋势表现出一定差异,湖西各站点以及湖东梁山闸、后营站的 Z 值为负,表明多年降水呈下降趋势,

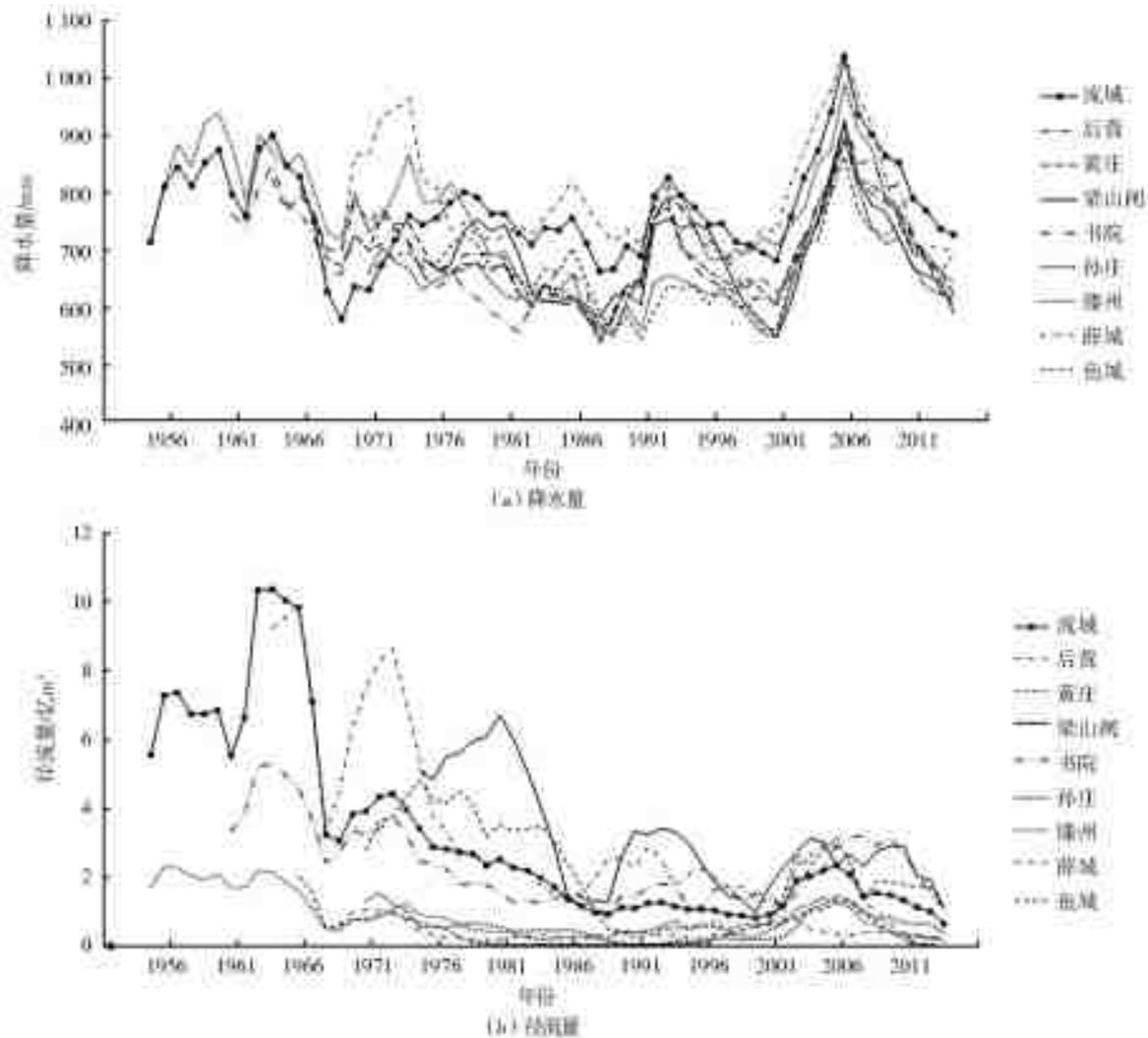


图 1 南四湖流域年降水量、径流量变化趋势

Fig. 1 Annual precipitation and runoff trend in the Nansihu basin

表 1 各站点年降水量、年径流量 M-K 趋势检验

Tab. 1 Annual precipitation and runoff trend using M-K trend test for each site

空间位置	站点	年份	降水量		径流量	
			Z	变化趋势	Z	变化趋势
湖东	黄庄	1963—2015	-0.27	减少	-1.61	减少
	书院	1958—2015	-0.54	减少	-2.66	减少
	滕州	1952—2015	-0.29	减少	-4.23	减少
	薛城	1966—2015	0	减少	-1.54	减少
湖西	鱼台	1968—2015	0.10	增加	-2.58	减少
	孙庄	1968—2015	0.05	增加	-1.33	减少
	梁山闸	1972—2015	-0.22	减少	-3.53	减少
	后营	1961—2015	-0.91	减少	-5.14	减少
全流域	1952—2015	0.47	增加	-6.80	减少	

其他站点的值为正,降水呈增加趋势,各站点都没有通过 M-K 检验信度为 0.05 的显著性检验,降水量增加或下降的特征不明显。

用 8 个站点的降水数据加权得到全流域的平均降水量,基于 Morlet 小波算法分析流域降水量的变化周期,结果见图 2,小波系数实部图中实线表示小波系数为正,降水量偏多,虚线表示小波系数为负,降水量偏少。25 a 尺度周期震荡最为明显,是流域降水量变化的第一主周期,这一结果与各站点降水量五年滑动平均曲线的结论互相验证,第二主周期为 10 a。在 25 a 尺度下有偏少—偏多—偏少 8 次交替变化,突变点为 1955、1965、1973、1981、1989、1996、2004、2010 年。这两种时间尺度的变化周期相互嵌套,贯穿全时间序列,流域降水量丰、枯相间

分布,表现出明显的突变振荡关系。

### 2.1.2 降水量的年内变化

各站点降雨量的 Cd 值在 0.57~0.61,降水较为集中,各站点月平均降水量见图 3(a),夏季降水量大而集中,6—8 月降水量可达 407.62~480.74 mm,集中了全年约 60%~70%的降水量。冬季降水较少,降水量只占全年的 5%左右;春秋两季也少雨,各占约 15%。

### 2.1.3 降水量的空间分布及变化

将南四湖流域 8 个站点的雨量数据转化为各站

点控制小流域的雨量值,得到流域 3 个时期(1980—1990、1991—2000 和 2001—2015 年)降水量空间分布(图 4),流域降水量的空间分布及其变化特征如下。(1)流域降水量呈由东南向西北递减趋势,且随时间呈增加趋势。(2)薛城站是降水高值中心,次中心为滕州站;湖西降水低于湖东地区,孙庄站地势低洼、气流下沉,为降水低值中心,两个极值中心多年平均降水量相差 13.32%。(3)湖东降水量增加较湖西明显,其中滕州、书院和薛城站点的增加量分别是 21%、17%和 16%。

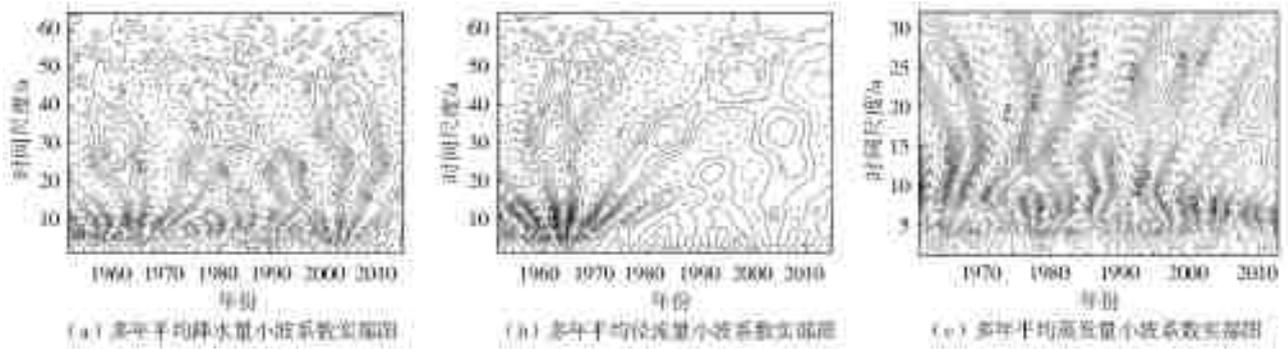


图 2 南四湖流域水循环要素多年平均值小波分析

Fig. 2 Wavelet analysis of Multi-year average of water cycle elements in the Nansihu basin

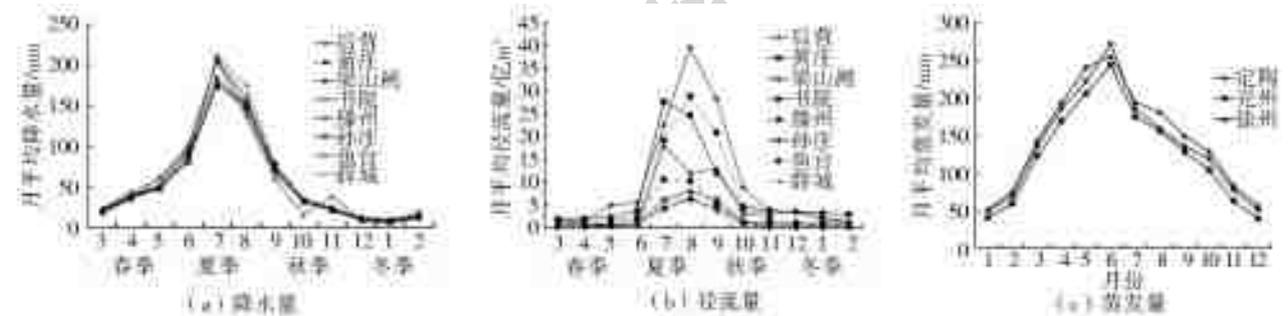


图 3 南四湖流域水循环要素月平均量分布

Fig. 3 Monthly average distribution of Water cycle element in the Nansihu basin

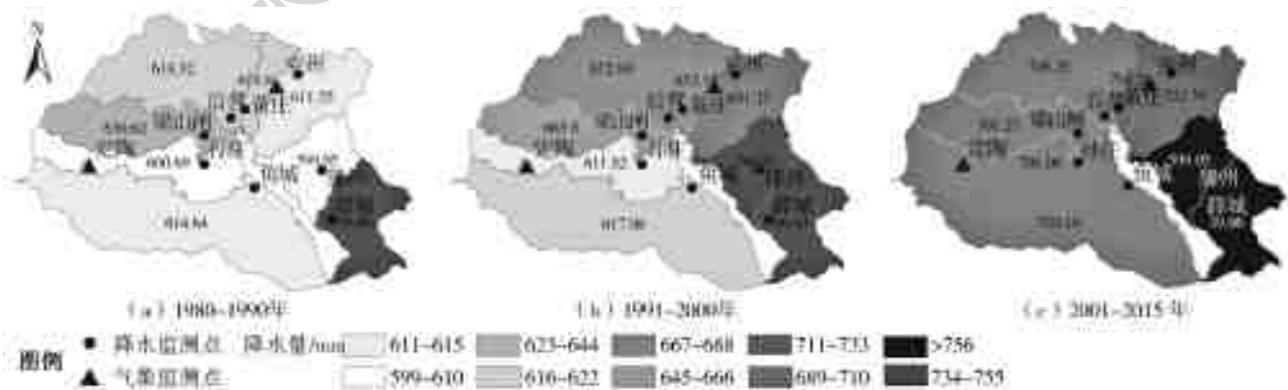


图 4 南四湖流域降水量的空间变化

Fig. 4 Spatial variation of precipitation in the Nansihu basin

## 2.2 南四湖流域径流的时空变化特征分析

### 2.2.1 径流量的年际变化

径流量的年际变化特征为:(1)五年滑动平均曲

线和 M-K 检验(图 1、表 1)均显示,20 世纪 60 年代以来南四湖流域的径流量整体呈现减少趋势,且通过 M-K 检验信度为 0.05 的检验,减少趋势显著,但

从2000年之后有微幅度上升趋势。(2)除黄庄、滕州、孙庄三个站点减少趋势不显著,其他站点都为显著减少。(3)径流量主要受降水量影响,但降水量整体上呈增加趋势,径流量呈减少趋势,因此径流量的变化趋势与降水量的变化趋势没有同步。

用8个站点的径流量数据加权得到流域平均径流量,基于Morlet小波分析的结果见图2(b),31 a尺度贯穿全研究时间尺度,是影响径流变化的主周期,这一尺度下,径流量偏多或者偏少相间分布共有6次交替,1958—1969、1979—1990、2000—2010年是正值,径流量偏多,为丰水期;其他年份为负值,径流量偏少,为枯水期。其次还有10 a等几个局部的小周期,径流量的年际变化尺度也呈多时间尺度的相互嵌套。

### 2.2.2 径流量的年内变化特征

各站点月平均径流量见图3(b),与降水的年内分配一样,径流的年内分配也极不均匀,主要集中在7—9月,占全年径流的80%左右,8月径流

最大,后营站8月径流量达40亿 $m^3$ ,1月径流最小,孙庄等站冬季基本断流。径流的最大、最小月与降水相比均滞后一个月。各站点径流量的Cd值在0.54~0.86,孙庄、鱼台和薛城站径流量的集中性较大,Cd值分别为0.86、0.81和0.78;黄庄径流量的不均匀性最小,Cd值为0.54。与降水的年内分配相对一致的特征不同,各站点径流量年内分配不均匀性的差异大于降水量不均匀性的差异。

### 2.2.3 径流深的空间变化特征

运用SWAT模型模拟流域径流深对降水的响应,结果见图5。径流深的空间变化特征包括:(1)流域径流深的空间格局为北部偏多,南部偏少,湖西多于湖东。(2)径流深呈明显增加趋势,从LUCC(1985)到LUCC(2014)径流深增加81 mm。(3)东南部的蟠龙河流域建设用地比例增加且呈面状扩展态势,径流深的变化量大于其他小流域,径流深增加74 mm。



图5 南四湖流域径流深的空间变化

Fig. 5 Spatial variation of runoff depth in the Nansihu basin

## 2.3 南四湖流域蒸发量的时间变化

五年滑动平均曲线显示,除定陶站在20世纪60—80年代中期有小幅度增加外,流域蒸发量从20世纪60年代开始整体上呈现减少趋势(图6)。3个站点年蒸发量的M-K检验统计量Z的值分别是定陶(-3.09)、徐州(-4.26)和兖州(-7.14)都通过了信度为0.01的检验,减少趋势非常显著,兖州的减少量最大。基于Morlet小波分析的结果如图2(c),在25 a尺度、14 a尺度上正负相位交替变化明显,是流域蒸发量变化的两个主周期。在25 a周期上有6次交替,突变点分别是1968、1976、1984、1992、2001、2009年。

南四湖流域蒸发量的年内分配差异也较大,见图3(c),其中6月的蒸发量最大,占全年蒸发量的16%左右,定陶达到272.03 mm,1月最少,兖州只

有40.42 mm,春、夏、秋、冬的占比大约为32%、37%、20%、10%。蒸发量空间上均匀分布,东南部蒸发量略大。

## 2.4 水循环要素变化成因分析

水循环要素变化受气候变化和人类活动的双重影响,在短时间尺度上,人类活动的影响是主导因素,但是在长时间尺度上,气候变化的影响更甚。在长时间序列上,径流的变化特征吻合于降水的变化特征,表明长周期上降水是影响径流的主要因素。

### 2.4.1 降水的影响因素分析

降水变化主要受气候变化影响,已证实全球变暖会改变降水机制,增加水汽含量,使降雨量增加。在全球气候变暖背景下,20世纪80年代,伴

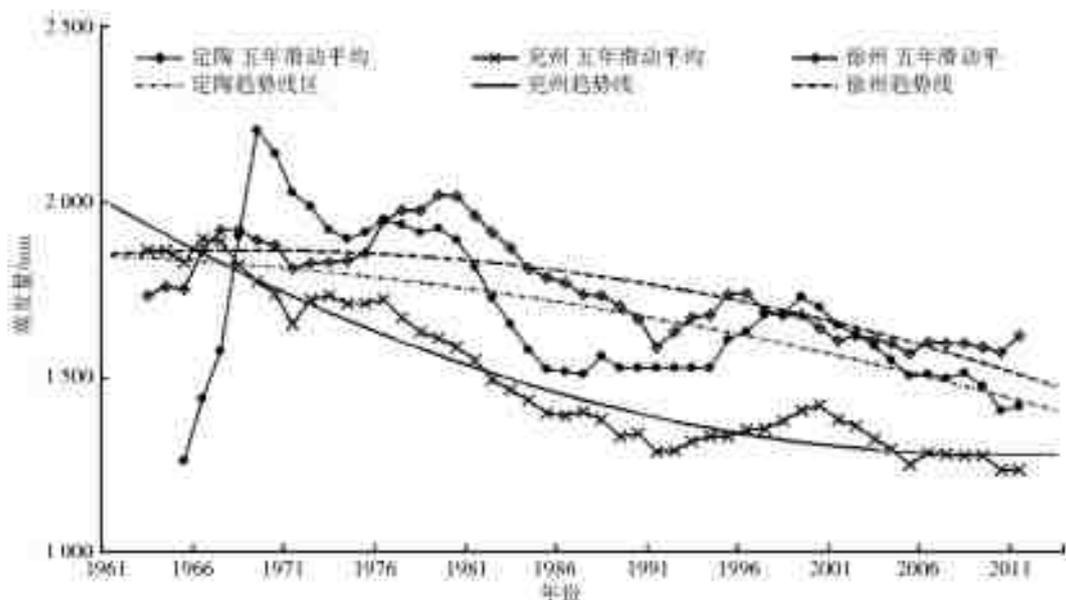


图 6 南四湖流域各站点蒸发量趋势

Fig. 6 Evaporation trend map for each site in the Nansihu basin

随改革开放热潮,南四湖流域进入工业快速发展阶段,温室气体排放增加,气温上升,降水量增加;2003 年山东省实施《中华人民共和国大气污染防治法》,严格控制工业废气污染,控制 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等的排放,气温上升变缓,降水量减少,但下降趋势平缓。气温变化周期与降水周期吻合。季风气候的频繁波动影响降水的年内分配,夏季受海洋季风影响,降水集中在 6—9 月,冬季受大陆性季风影响,气候干冷,降水量少。

空间上,降水量呈从东南向西北递减趋势且湖东降水量增加较湖西明显,这是由于东南部靠近湖区,蒸发量大,且湖东地区纬度较低,多为低山丘陵和山前冲洪积平原,地势起伏较大,海拔最高达 592 m,且气温较高,气旋活动频繁,易形成地形雨;而湖西地势低洼,大陆性强。

### 2.4.2 径流的影响因素分析

夏季径流依赖降水补给,冬季主要靠基流补给。径流深的空间分布格局基本符合于降水的空间分异规律,但在多年变化趋势上与降水不同,说明径流除了受降水影响以外,还受到土地利用类型改变、水利

工程建设、用水量变化等人类活动的影响。

不透水面的增加改变产汇流模式,雨水下渗量减少,汇流时间缩短,在很大程度上增加了地表径流量,减弱了水源涵养能力。南四湖流域 1985 年到 2014 年径流深增加 81 mm,而建设用地面积增加 5 427 km<sup>2</sup>(图 7),林地、草地面积减少,森林植被退化。城镇建设用地分布零散,对径流深总的分布格局影响不大。城镇建设用地变化比例大的流域,径流深变化相对较大。但在降水量变化不是十分显著的情况下,径流量整体呈现下降趋势,与流域水利工程的兴建和用水量增加有很大关系。近 40 年流域内共建立水库 300 余座,拦河闸 20 余座,白马河上游山区先后完成土方 3 087 万 km<sup>3</sup>。从 1991 年至 2010 年的 20 年间,流域内各城市防洪堤修筑进程迅速,济宁市已修筑的防洪堤长度从 1991 年到 2010 年增加了约 120 km。伴随经济和人口快速增长,生产用水和生活用水量增加,以枣庄市为例,1991 年生活用水量为 1 970 万 m<sup>3</sup>,2010 年增加至 3 555 万 m<sup>3</sup>,其他县市的用水量均增加,水资源过度开发利用,也是径流量减少的重要原因。



图 7 南四湖流域土地利用变化

Fig. 7 Land use change map of the Nansihu basin

### 2.4.3 蒸发的影响因素分析

气候条件是蒸发量变化的基础,近 50 年来南四湖流域的月平均气温呈现上升趋势,但蒸发量呈现下降趋势,说明蒸发受气温影响小;20 世纪 80 年代后,蒸发量减少明显,很大程度上受人类活动的影响。有研究表明<sup>[18]</sup>,黄淮海地区蒸发量减少可能与全球变暖背景下人类活动引起的气溶胶等污染物的增加有关,污染物增加使得太阳辐射量减少,从而蒸发量减少。兖州的减少量最大,兖州是典型的煤炭城市,蒸发量的减少与采煤以及煤炭相关产业的大力发展对大气环境质量产生较大的影响有关。空间分布上,东南部靠近湖区,蒸发量略大。

## 3 结 论

本文利用南四湖流域 8 个监测站点 1952—2015 年的水文资料和气象资料,对流域水循环要素的时空变化特征及其影响因素进行了分析,并得到以下结论。(1)南四湖流域降水整体呈现不显著增加趋势,径流和蒸发呈现显著减少趋势,水循环要素的变化没有固定的周期,是多种时间尺度的相互嵌套,降水、径流和蒸发的第一主周期分别是 25 a、31 a 和 25 a;年内分配极不均匀,降水集中在 6—8 月,径流集中在 7—9 月,径流的高值滞后降水一个月,蒸发量在 6 月最大。(2)降水的时空分布差异显著,表现为东南多、西北少、东部山区多、西部平原少。径流深的空间分布格局符合于降水空间分异特征,北部偏多、南部偏少,湖东多于湖西。(3)南四湖流域水循环要素的时空变化受到气候变化和人类活动的双重影响,在短时间尺度上高强度的人类活动对水循环要素的变化影响更甚,在较长时间尺度上,气候变化是影响水循环要素变化的主导因素。降水是水循环的前提,径流、蒸发的空间格局总体上受降水空间差异的影响,人类活动在局部上改变水循环的空间分布。

#### 参考文献(References):

[1] 夏军,刘春葵,任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展,2011,26(1): 1-12. (XIA J, LIU C Z, REN G Y. Opportunities and challenges faced by climate change impacts on China's water resources[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(1): 1-12. (in Chinese)) DOI: 10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2011. 01. 0001.

[2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basic

[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

- [3] 夏军,刘春葵,刘志雨,等. 气候变化对中国东部季风区水循环及水资源影响与适应对策[J]. 自然杂志,2016, 38(3):167-176. (XIA J, LIU C Z, LIU Z Y, et al. Impacts of climate change on water cycle and water resources in the monsoon region of eastern China and adaptation countermeasures[J]. Chinese Journal of Nature, 2016, 38(3): 167-176. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0253-9608. 2016. 03. 002.
- [4] 袁宇志,张正栋,蒙金华. 基于 SWAT 模型的流溪河流域土地利用与气候变化对径流的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(4):989-998. (YUAN Y Z, ZHANG Z D, MENG J H. Impact of changes in land use and climate on the runoff in Liuxihe basin based on SWAT[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, Apr. 2015, 26(4):989-998(in Chinese)) DOI:10. 13287/j. 1001-9332. 20141224. 006.
- [5] 吴福婷,符淙斌. 全球变暖背景下不同空间尺度降水谱的变化[J]. 科学通报,2013, 58(8): 664-673. (WU F T, FU C B. Change of precipitation intensity spectra at different spatial scales under warming conditions[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(8): 664-673. (in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:KXTB. 0. 2013-08-008.
- [6] 汤秋鸿,黄忠伟,刘星才,等. 人类用水活动对大尺度陆地水循环的影响[J]. 地球科学进展,2015, 30(10): 1091-1099. (TANG Q H, HUANG Z W, LIU X C, et al. Impacts of human water use on the large-scale terrestrial water cycle[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(10): 1091-1099. (in Chinese)) DOI: 10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2015. 10. 1091.
- [7] 宫兴龙,付强,王斌,等. 土地利用方式变化对水循环过程响应机制研究[J]. 农业机械学报,2018, 49(2): 252-259. (GONG X L, FU Q, WANG B, et al. Mechanism of response of land use change to water cycle process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 252-259. (in Chinese)) DOI:10. 6041 / j. issn. 1000-1298. 2018. 02. 032.
- [8] 蓝永超,林舒,李州英,等. 近 50a 来黄河上游水循环要素变化分析[J]. 中国沙漠,2006, 26(5): 849-854. (LAN Y C, LIN S, LI Z Y, et al. Analysis on the changes of water cycle elements in the upper of the Yellow River in the past 50 years[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(5): 849-854. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn:1000-694X. 2006. 05. 032.
- [9] 王浩,贾仰文,杨贵羽,等. 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟[J]. 科学通报,2013, 58(12): 1064-1077. (WANG H, JIA Y W, YANG G Y, et al. Inte-

- grated simulation of the dualistic water cycle and its associated processes in the Haihe River basin[J]. Chin Sci Bull, 2013, 58(12): 1064-1077. (in Chinese) DOI: CNKI;SUN;KXTB. 0. 2013-12-002.
- [10] 李道峰, 田英, 刘昌明. 黄河河源区变化环境下分布式水文模拟[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 565-573. (LI D F, TIAN Y, LIU C M. Hydrological simulation under changing environment in the source region of the Yellow River[J]. ACTA Geographica Sinica, 2004, 59(4): 565-573. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0375-5444. 2004. 04. 010.
- [11] 李佳, 张小咏, 杨艳昭. 基于 SWAT 模型的长江源土地利用/土地覆被情景变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 119-124, 128, 301. (LI J, ZHANG X Y, YANG Y Z. SWAT model of runoff study under different land use cover scenarios in source region of the Yangtze River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(3): 119-124, 128, 301. (in Chinese))
- [12] 韩龙飞, 许有鹏, 杨柳, 等. 近 50 年长三角地区水系时空变化及其驱动机制[J]. 地理学报, 2015, 70(5): 819-827. (HANG L F, XU Y P, YANG L, et al. Temporal and spatial changes of water system and its driving mechanism of the Yangtze River Delta in the past 50 years[J]. ACTA Geographica Sinica, 2015, 70(5): 819-827. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlxb201505012.
- [13] 薛丽芳. 南四湖流域城市化水文效应研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2017. (Study on the hydrological effects of urbanization in Nansihu Lake basin[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2017. (in Chinese))
- [14] 董宁, 李莉, 郭红艳, 等. 南四湖流域降水集中度和集中期研究[J/OL]. 河北农业科学(2019-08-23). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1197.S.20190606.1744.006.html>(DONG N, LI L, GUO H Y, et al. Research on the precipitation concentration degree and concentration period in Nansihu Lake basin[J/OL]. Journal of Hebei Agricultural Science(2019-08-23)(in Chinese))DOI:10.12148/hbnykx.20190068.
- [15] 王琪森, 武竹青, 王刚, 等. 山东省南四湖流域年径流变化特征及趋势分析[J]. 人民珠江, 2017, 38(7): 49-54. (WANG Q S, WU Z Q, WANG G, et al. Analysis of the annual runoff variation characteristics and tendency of the Nansi Lake basin in Shandong Province [J]. Pearl River, 2017, 38(7): 49-54. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.2017.7.011.
- [16] 田莉娟, 薛丽芳, 杨慧, 等. 近 60 年来南四湖流域降水变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 201-206. (TIAN L J, XUE L F, YANG H, et al. Variability of precipitation in Nansi lake basin in recent 60 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 201-206. (in Chinese)) DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2018.02.029
- [17] 王文圣, 金菊良, 丁晶. 随机水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (WANG W S, JIN J L, DING J. Random hydrology[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008. (in Chinese))
- [18] 刘敏, 沈彦俊, 曾燕, 等. 近 50 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因[J]. 地理学报, 2009, 64(3): 259-269. (LIU M, SHENG Y J, ZENG Y, et al. Trends and causes of evaporation of evaporating dishes in China in the past 50 years[J]. ACTA Geographica Sinica, 2009, 64(3): 259-269. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;DLXB. 0. 2009-03-002.