

基于DSR模型的秦淮河流域防洪能力变化及成因分析

高玉琴,郑航,王子睿,刘云苹,季孔阳

(河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要:为深入探讨流域防洪能力变化及其原因,基于驱动力-状态-响应(DSR)模型构建流域防洪能力变化分析模型,从驱动力、状态和响应3个方面对秦淮河流域社会经济发展、防洪能力变化和水利工程建设投资进行评价和分析。结果表明:秦淮河流域城市化建设在2010年之前发展迅速,2010年后发展速度放缓;人类经济建设的不断发展对流域防洪能力造成了一定破坏,但水利工程建设的不投入使流域防洪能力得以提升并得到基本保障;河网调蓄能力仍持续下降,中小河道建设和管理维护工作仍需着重加强。

关键词:驱动力-状态-响应模型;过流能力;调蓄能力;城市化建设;水利工程投资;秦淮河流域

中图分类号:TV212.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)03-0001-08

Analysis of flood control capacity changes and causes of Qinhuai River Basin based on DSR model//GAO Yuqin, ZHENG Hang, WANG Zirui, LIU Yunping, JI Kongyang (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To explore the flood control capacity changes and causes of watersheds, an analysis model of watershed flood control capacity was constructed based on the driving force-state-response (DSR) model. The social and economic development, flood control capacity change and water conservancy construction investment in the Qinhuai River Basin were evaluated and analyzed from the three aspects of driving force, state and response. The results show that the rapid development of urbanization construction in the Qinhuai River Basin was mainly concentrated before 2010, and the development slowed down after 2010. The continuous development of human economic construction caused some damages to the flood control capacity of the basin. However, due to the continuous investment in water conservancy engineering construction, the flood control capacity of the basin was basically improved and guaranteed. The storage capacity of the river network still continues to decline, and the construction and management of small and medium-sized rivers remains to be further reinforced.

Key words: driving force-state-response model; discharge capacity; storage capacity; urbanization construction; investment of water conservancy project; Qinhuai River Basin

流域是自然界最重要的生态系统之一,是水资
源形成与演化的重要载体,是人类社会发展的重要
支撑。流域防洪能力是影响人民生命财产安全及社
会可持续发展的重要因素^[1]。近年来,随着人口数
量不断增长、社会经济迅速发展,人类活动改造自然
的力度和规模不断加大^[2-3],引发了水系统面积萎缩、
水生态系统衰退、水环境质量恶化等问题^[4-5],对天然
水文过程造成深远影响,流域防洪能力遭到破坏。

目前,对流域防洪能力的研究多从工程措施和
非工程措施两方面开展,前者主要关注堤防、大坝、
水库等水利工程防洪能力,通常利用各类水文模
型、水动力模型进行数值模拟^[6-10];后者强调水土保

持、河网湖泊调蓄等措施的重要性,但在研究中多作
为流域综合防洪能力的一部分展开,对其防洪内在
作用机制的针对性研究较少。陈彧等^[11]从流域的
土地利用、水土保持和蓄滞洪区3方面评估了生态
服务价值的变化情况,分析研究了流域的整体防洪
调蓄能力变化。王霞等^[12]分析了流域防洪系统中
排涝泵站和水利枢纽闸门的优化调度对流域防洪能
力的影响,结果表明在不增加投入的情况下,通过合
理调度各水利工程的蓄泄过程削减洪峰,能有效提升
流域防洪兴利效益。以上研究忽略了流域防洪能力
形成的过程及特点,无法从更深层次了解人类社会影
响防洪能力的内在机制,辨别防洪能力形成过程中的

薄弱环节,对后续防洪能力优化也会产生偏差。

本文以驱动力-状态-响应 (DSR) 模型为基础,构建了流域防洪能力变化分析模型,对秦淮河流域 1990—2015 年社会经济发展、防洪能力变化和水利工程建设投资进行评价,并深入研究流域防洪能力变化及其成因,以期为流域管理及可持续发展提供理论依据和参考。

1 研究区概况及研究数据

1.1 研究区概况

秦淮河流域位于长江中下游,地处我国东部平原区,涉及南京市长江以南的 8 个行政区和镇江市的句容市,总面积约2 631 km²,其中流域处于南京市的面积达 1 751 km²,另有 880 km²的流域面积处于句容市境内^[13]。该流域四面环山,为典型的构造盆地,有南北两个水源,分别为句容市宝华山的句容河和南京市东庐山的溧水河,没有其他流域径流汇入,多年平均径流量 6.96 亿 m³。南京市 2021 年常住人口为 931 万人,城镇人口占比 86.8%,地区生产总值为 16 355.32 亿元。句容市常住人口为 64 万人,城镇人口占比 65.28%,2021 年地区生产总值为 736.75 亿元。秦淮河流域具有典型的城市化特征,且经济建设活动频繁,因此本文选取秦淮河流域作为研究区,探究人类活动影响下流域防洪能力变化特征及成因。根据流域内各支流的汇水范围及河流地貌状况,将研究区划分为 6 个子流域,研究区及子流域分布如图 1 所示。

1.2 数据来源及处理

计算所需主要数据包括秦淮河流域地区生产总值、人口数量、土地利用数据、水文气象数据、地形数据、水系和湖泊数据、水库蓄滞洪区资料、水利工程投资数据以及水文水动力模型模拟数据。其中地区生产总值、人口数量、水库蓄滞洪区资料以及水利工程投资数据均通过查询年鉴资料获取,其他数据来

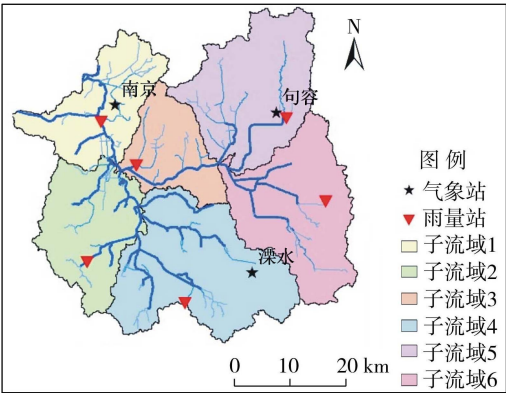


图 1 研究区及子流域分布示意图

源及处理方法如表 1 所示。

2 模型构建

2.1 DSR 模型理论

压力-状态-响应 (PSR) 模型最先被经济合作与发展组织 (OECD) 应用在环境指标研究领域并被普遍认可^[15]。随后,联合国政策协调和可持续发展部 (DPCSD) 于 1995 年提出了驱动力-状态-响应 (DSR) 模型框架。该模型框架改良于 PSR 模型,最初被运用于环境评价体系,用来探究人类社会经济行为和环境变化之间的因果关系。模型中“D”代表驱动力 (driving force),主要来自于人类社会经济系统,包括积极驱动力和消极驱动力;“S”代表状态 (state),是指由驱动力导致的状态变化;“R”代表响应 (response),是人类社会根据状态变化采取的以维持人与自然可持续发展的行动^[16]。

DSR 模型不仅能表明社会经济发展和人类活动对水资源的影响,也能体现水资源状态对社会的反馈、人类在改善水资源状态过程中对社会产生的反馈以及人类在改善水资源方面所实施政策的有效性^[17-18]。同时,该模型在构建指标体系的过程中可以从动态的角度反映评价指标间的相互作用,体现人类社会和自然环境之间相互影响作用的复杂联

表 1 数据来源及处理方法

数据名称	数据来源及处理方法
土地利用数据	采用中国科学院资源环境科学数据中心根据 Landsat TM/ETM 遥感影像解译制作而成的空间分辨率为 30 m 的栅格数据,并运用 ArcGIS 进行统计计算
水文气象数据	逐日降水量、蒸发量、流量及水位等数据来源于《长江流域水文资料》
地形数据	包括空间分辨率为 90 m 的 SRTM 高程数字模型、30 m 的 ASTER GDEM 高程数字模型,均来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台
水系数据	1990 年水系数据通过扫描纸质地图并修正获取,2000 年、2010 年和 2015 年水系数据运用 ArcGIS 基于 DEM 数据提取并修正获得 ^[14]
湖泊数据	运用 ArcGIS 基于土地利用数据对研究区的湖面面积进行统计计算获得
典型河道断面数据	干流典型断面来源于《长江流域水文资料》中各年份的实测资料,支流典型断面依据河道规划及河道整治资料合理概化
水文水动力模型模拟数据	根据水文气象数据、水系数据、河道典型断面数据运用 MIKE11 模型中的 NAM 模块和 HD 模块构建秦淮河流域水文水动力模型 (以 1988—2016 年实测洪水过程流量及洪水位率定,模拟径流平均精度 $R^2=0.80$,模拟水位平均精度 $R^2=0.94$),模拟获得典型断面设计洪水位下的流量数据、特定洪水过程中的洪峰水位数据

系,反映自然生态与经济社会协调发展问题中所牵涉的指标间的联系。流域防洪能力演变与人类活动密切相关,引入 DSR 模型有助于进一步分析影响流域防洪能力的关键指标因素,并根据所探究出的各因素间的因果关系及影响机理提出具有针对性的建议。

2.2 指标选取及计算

DSR 模型从驱动力、状态和响应 3 个维度分析流域防洪能力演变成因,其基本框架逻辑为:人类经济建设活动对流域防洪能力产生影响,流域防洪能力状态发生改变,为缓解经济建设行为对流域防洪能力的影响,通过管理政策、法律法规或改善措施等发出响应并作用于自然环境,保障社会经济建设可持续发展。

2.2.1 驱动力指标

流域防洪能力驱动力指标主要指人类经济建设活动,分别从经济、人口和社会建设 3 个方面进行指标选取,主要包括地区生产总值、人口密度、人口城镇化率、土地城镇化率和用地规模弹性系数。地区生产总值是衡量一个国家或地区经济状况和发展水平的重要指标,反映了经济发展对流域防洪的压力;人口密度指单位土地面积上所承载的人口数量,代表单位区域的人口集中程度,反映了人口对流域防洪的压力;人口城镇化率指城镇人口占总人口的比例,农村人口向城镇聚集,带来资源利用率的提高,同时加剧了生态资源的竞争关系,人口城镇化率反映了城镇人类活动对流域防洪的压力;土地城镇化率指城镇用地面积占土地总面积的比例,反映城镇化进程中城镇用地建设对流域防洪能力的影响;用地规模弹性系数是建设用地面积增长速度与同期城镇人口增长速度的比值,代表区域内人口与用地的紧张程度,城市建设、基础设施和资源开发项目布局及措施不当,不仅增加城市自身的洪涝风险,也会削弱流域防洪能力。

2.2.2 状态指标

流域防洪能力状态指标主要指流域防洪能力,根据洪水特征及流域内防洪系统构成,分别从河流、湖泊、水库、蓄滞洪区 4 个方面进行指标选取,包括河道过流能力、河网调蓄能力、湖泊调蓄能力、水库防洪能力和蓄滞洪区分洪能力。河道过流能力以设计洪水位下通过的流量表示,反映流域内河道宣泄洪水的能力,本文运用 MIKE11 模型构建流域水文水动力模型,模拟得到不同河道断面设计洪水位下的流量大小。河网调蓄能力选用单位面积洪峰调蓄容量 R_{AS} 表示,反映河网削减洪峰流量、调节流域暴雨洪水的能力,其计算公式为

$$R_{AS} = (C_f - C_q)/A_b \tag{1}$$

式中: C_f 为某场洪水中峰值水位时河网的蓄水容量, m^3 ; C_q 为某场洪水中汛前水位时河网的蓄水容量, m^3 ; A_b 为流域面积, km^2 。

湖泊调蓄能力选用湖泊可调蓄水量 r_c 表示,反映湖泊削减河道洪峰流量、减小洪水总量、延迟洪水峰现时间的能力,在东部平原区其计算公式^[19]为

$$\ln r_c = 1.128 \ln A_L + 4.924 \tag{2}$$

式中 A_L 为湖面面积, km^2 。

水库防洪能力选取水库防洪库容表示,反映水库拦蓄滞洪和削峰调度能力,通过查询资料获取。蓄滞洪区分洪能力选取蓄滞洪区有效蓄洪容量表示,反映蓄滞洪区削减洪峰或暂时阻滞洪水的能力,通过查询资料获取。

2.2.3 响应指标

流域防洪能力响应指标主要指水利工程投资状况,人类通过建设各类水利工程以降低洪水风险,提高流域防洪能力。水利投资反映了社会通过管理措施对流域防洪能力变化的响应程度,其中防洪、除涝工程建设及水保生态建设投资对流域防洪能力影响较大。故选取防洪工程建设投资、除涝工程建设投资及水保生态建设投资作为流域防洪能力的响应指标,通过查询中国或地方水利年鉴获取防洪、除涝及水保生态建设年度投资额。

3 结果与分析

3.1 秦淮河流域防洪能力驱动力指标变化

根据防洪能力驱动力指标计算方法分别计算秦淮河全流域驱动力指标及各子流域不同时期的地区生产总值,如表 2 和图 2 所示。流域内人类经济建设活动日益剧烈,各指标总体上呈现持续增长态势,其中全流域第一、二、三产业增加值分别增长了近 12 倍、50 倍、115 倍,第二、三产业增加值占比分别为 88.74%、94.83%、97.61% 和 97.82%,占比不断上升,表明其对经济增长的贡献不断加大;各子流域的产业增加值也均呈现持续增长的趋势,但产业类型分布具有空间异质性。

表 2 不同时期秦淮河全流域驱动力指标

年份	第一产业 增加值/ 亿元	第二产业 增加值/ 亿元	第三产业 增加值/ 亿元	人口 密度/ (人·km ⁻²)	人口 城镇化 率/%	土地 城镇化 率/%	用地规模 弹性系数 变化
1990	5.80	29.29	16.42	616	14.71	11.43	2.17
2000	17.50	157.41	163.77	673	24.45	14.93	0.29
2010	43.63	902.44	878.65	790	34.41	25.56	1.57
2015	75.77	1484.74	1915.39	809	39.88	26.06	0.06

第一产业子流域 4、子流域 5 及子流域 6 较发达,其主要分布于秦淮河流域东南部平原地区,该区域城镇化水平相对较低,建设用地对耕地、林草地、

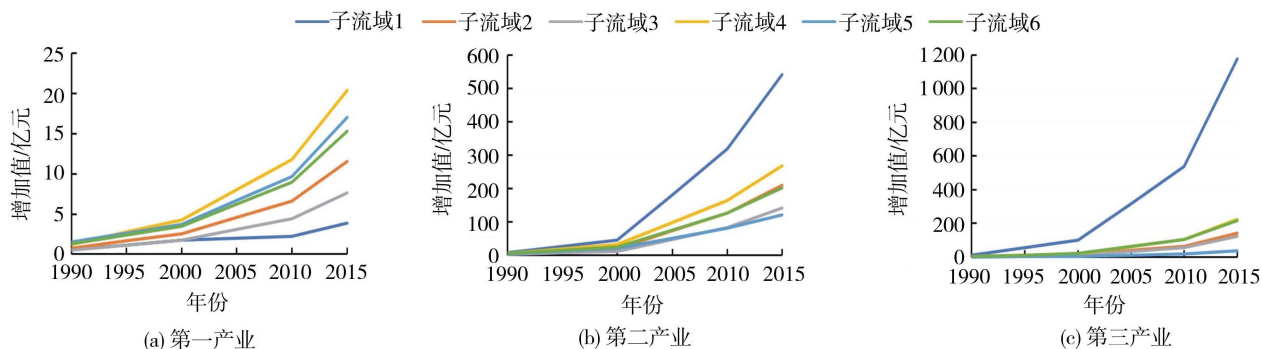


图2 不同时期子流域第一、二、三产业增加值变化

水域等侵占较少,保障了第一产业的稳步发展;第二产业子流域1最为发达,其主要位于南京主城区,该区域第二产业增加值占比由1990年的24.6%增长至2015年的36.54%;第三产业仍为子流域1最发达,由1990年的10.13亿元增长至2015年的1175.8亿元,占该年全流域第三产业增加值的61%。

秦淮河各子流域人口密度、人口城镇化率、土地城镇化率及用地规模弹性系数变化如图3所示。全流域人口密度及人口城镇化率总体呈稳定增长态势,1990—2015年人口密度增加31.3%,人口城镇化率增加25.17%,土地城镇化率增加14.63%,用地规模弹性系数总体呈下降态势,1990—2015年用地规模弹性系数下降2.11;在经济快速发展和户籍制度改革的带动下,1990年以来南京市、句容市人口及城市人口进入快速增长时期,各子流域人口密度、人口城镇化率总体变化趋势相似,均在2000—2010年间增长速度较快,于2010—2015年间增长趋于平缓。

人口密度、人口城镇化率和土地城镇化率分布具有空间差异性。其中位于南京市主城区的子流域1人口密度及人口城镇化率最大且增幅最高,其次为邻近的子流域2及子流域3。20世纪90年代南京城市建设速度加快,1990年位于子流域1的南京老城区土地城镇化率已达到较高水平,1990—2010年子流域土地城镇化率快速增长,说明该阶段人类活动对土地开发利用强度较大,其中江宁区建设用地面积增长最为显著,带动子流域1、子流域2及子

流域3土地城镇化率的快速增长;2010年后,城市土地几近饱和,建设用地扩张速度放缓,因此2010—2015年各子流域土地城镇化率增速均较前3个时期有所下降,全流域土地城镇化率仅提升0.50%,与人口密度及人口城镇化率发展趋势类似,随着人口增长减缓,人类对土地覆盖的影响逐步减慢。其中子流域1为城镇化进程最快、地表人类活动最活跃的区域,土地城镇化率为47.18%,远超其他子流域;同时随着子流域1经济社会的发展、人口的大量聚集,农村人口向城市人口转化,人类活动对土地利用的影响逐步向邻近的子流域2、子流域3推进,人类活动对土地覆盖高强度的开发与利用主要分布于秦淮河流域中下游的子流域1、子流域2和子流域3。

子流域用地规模弹性系数呈波动下降趋势,主要是由于建设用地与城镇人口的快速增长时期不同。20世纪90年代以前由于城市人口户籍制度管制较严,城市人口的增长相对建设用地增加较慢,因此用地规模弹性系数处于较高水平;1990年后随着城市人口户籍制度的改革,城镇人口的增长出现高峰,用地规模弹性系数快速下降;建设用地的增长高峰期出现在2010—2010年,这一时期城镇人口增速仍继续提高,但相对建设用地的扩展速度较缓,所以这一段时期的用地规模弹性系数有所提高;2010年后两者增速都在下降,但建设用地的增速下降更快,导致该系数下降。

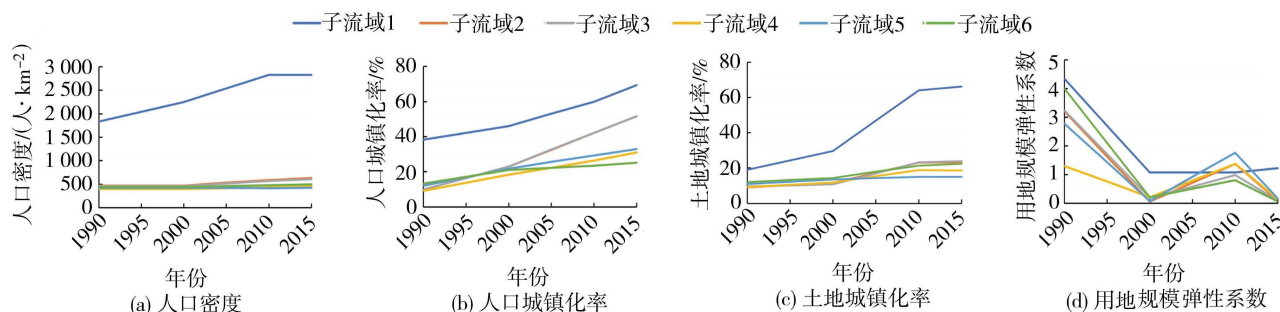


图3 不同时期子流域人口密度、人口及土地城镇化率、用地规模弹性系数变化

3.2 秦淮河流域防洪能力状态指标变化

秦淮河流域自 20 世纪 90 年代开始人类活动不断增强^[20],故本文选取 1990 年、2000 年、2010 年和 2015 年进行秦淮河流域不同时期防洪能力变化分析。由于秦淮河流域内大中型水库均于 1990 年之前完工,流域内防洪库容几乎未改变;同时,研究时段流域内蓄滞洪工程仅有赤山湖一座滞洪湖泊,且部分滞洪区尚未建成,故秦淮河流域防洪能力状态指标变化暂不考虑水库防洪能力及蓄滞洪区分洪能力。

3.2.1 河道过流能力变化

根据已构建的秦淮河流域水文水动力模型,分别选取秦淮河前埭村、赤山新闸引河和句容河前埭村河道断面作为典型河道断面,模拟各典型断面相应设计洪水水位下的过流能力如表 3 所示。秦淮河流域河道过流能力总体呈提升趋势,2010 年后变化趋于稳定,略有提升或降低,其中 1990—2010 年,秦淮河流域河道过流能力均有不同程度的提高,秦淮河前埭村断面处的过流能力提高了 4.20%,句容河前埭村断面处的过流能力提高了 9.02%,经河道整治,赤山新闸引河断面处的过流能力提高了 80.87%;2010—2015 年,除秦淮河过流能力提高了 1.48% 外,句容河前埭村及赤山新闸引河过流能力分别下降了 0.31% 和 1.74%。秦淮河干流段历经多次治理,过流能力总体上均有所提高,但支流保护措施较少,过流能力略有下降,需加强支流河道的整治工作。

表 3 不同时期研究区典型河道断面过流能力

年份	过流能力/(m ³ ·s ⁻¹)		
	秦淮河前埭村	句容河前埭村	赤山新闸引河
1990	1 430	827.9	215.9
2010	1 490	902.6	390.5
2015	1 512	899.8	383.7

3.2.2 河网调蓄能力变化

根据秦淮河流域 1986—2016 年实测洪水资料的统计,选取具有代表性的流域型洪水(20150625 场次),并利用水文水动力模型对不同时期水系条件下的洪水过程进行模拟,计算得到不同时期水系条件下的河网调蓄能力。不同时期水系条件下东山站模拟水位过程如图 4 所示,同等级暴雨洪水条件下,秦淮河东山站的洪峰水位逐渐升高。

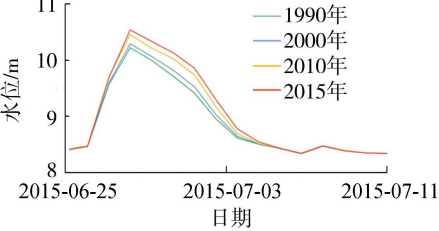


图 4 不同时期水系条件下东山站洪水水位过程

根据模型模拟的洪峰水位计算得到不同时期河网调蓄能力如表 4 所示,1990—2015 年秦淮河流域的河网调蓄能力呈下降趋势,并且年均降幅逐渐扩大。其中,1990—2000 年河网洪峰调蓄容量降低 6.64%,2000—2010 年降低幅度约为 1990—2000 年的两倍,2010—2015 年的年均河网洪峰调蓄容量变化最为剧烈,年均减少 1.53%。流域内子流域 1 河网密度较大,河网调蓄能力最大,1990 年每平方公里河网洪峰调蓄容量达 54 492 m³。1990—2000 年子流域 6 的河网洪峰调蓄容量变化最剧烈,降低了 20.08%,2000—2010 年子流域 5 的河网洪峰调蓄容量变化最剧烈,降低了 24.76%,2010—2015 年子流域 4 的河网洪峰调蓄容量变化最剧烈,降低了 14.18%。河网调蓄能力降低主要表现在大中型河道束窄降级、部分小型河道变短或消失,流域内总体水域面积及蓄水量减少。

表 4 不同时期研究区河网调蓄能力

年份	河网洪峰调蓄容量/(m ³ ·km ⁻²)						
	子流域 1	子流域 2	子流域 3	子流域 4	子流域 5	子流域 6	全流域
1990	54 492	44 238	37 638	35 249	21 094	21 850	33 921
2000	52 239	39 719	34 782	35 047	20 472	17 463	31 670
2010	51 216	35 223	31 351	28 538	15 402	17 061	27 943
2015	49 564	33 934	29 248	24 492	13 907	15 611	25 804

3.2.3 湖泊调蓄能力变化

秦淮河流域内主要有赤山湖、葛仙湖、泗庄湖、百家湖、九龙湖、莫愁湖、紫霞湖、前湖、月牙湖、南湖 10 座湖泊。根据研究区 1990 年、2000 年、2010 年及 2015 年的土地利用数据,运用 ArcGIS 统计得到研究区不同时期的湖面面积,并根据平原区湖泊可调蓄水量计算方法得到秦淮河流域不同时期湖泊调蓄能力如表 5 所示。

表 5 不同时期研究区湖泊可调蓄水量

年份	湖泊可调蓄水量/万 m ³						
	子流域 1	子流域 2	子流域 3	子流域 4	子流域 5	子流域 6	全流域
1990	0	0	3.33	0	253.17	818.80	1 159.08
2000	0	0	3.33	0	251.53	818.80	1 157.12
2010	0	0	3.14	0	252.42	842.09	1 182.05
2015	0	0	3.24	0	252.57	841.58	1 181.87

1990—2015 年秦淮河流域湖泊可调蓄水量整体呈上升趋势。其中,子流域 1、子流域 2 及子流域 4 分别位于南京市主城区、江宁区及溧水区,该区域城镇化程度高且湖泊面积小,湖泊可调蓄水量近乎为零;子流域 3、子流域 5 及子流域 6 集中了全流域 90% 以上的湖泊可调蓄水量,在 1990—2000 年间湖泊调蓄能力略有降低,在 2000 年后有所增加并基本保持稳定。研究区湖泊调蓄能力的变化主要是由于 20 世纪 80 年代以来,人类逐渐意识到湖泊在防御

洪水的角色中所承担的重要作用,特别是 1998 年长江特大洪水后退田还湖等政策的实施,湖泊面积有所增加^[21]。但近年来由于围垦养殖、农业开发等人类活动影响,有部分湖泊转化为耕地及建设用地,导致湖泊可调蓄水量略有降低^[22]。

3.3 秦淮河流域防洪能力响应指标变化

秦淮河流域不同时期水利工程投资情况如图 5 所示,流域内各水利工程投资逐年增长。其中 2010—2015 年期间,防洪和除涝工程建设投资分别增加了 182.29% 和 151.47%,尤其是防洪工程建设投资年均增长近千万元。1990 年、2000 年、2010 年、2015 年防洪除涝工程建设投资占比分别为 100%、99.5%、75.35% 和 85.8%。流域内防洪工程建设所占投资比重最高,常年达总投资的 70% 以上;水保生态建设投资自 2000 年后得到重视,投资逐年增加,投资比重由 2000 年的 0.5% 增长至 2015 年的 14.2%,但 2010 年后水保生态建设投资上涨幅度较往年明显下降。

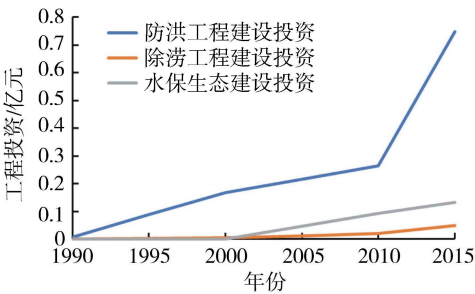


图 5 秦淮河流域防洪能力响应指标变化

3.4 秦淮河流域防洪能力变化成因分析

结合上述计算的 6 个子流域不同参数,为分析驱动力指标、响应指标分别与流域防洪能力状态指标间的相关性,采用偏相关系数控制其他因素的影响,得到单个因素与目标值之间的净相关关系。相关系数结果见表 6 和表 7。

表 6 流域防洪能力状态指标与响应指标偏相关系数

响应指标	防洪工程 建设投资	除涝工程 建设投资	水保生态 建设投资
河道过流能力	0.615 *	0.982 **	0.692
河网调蓄能力	0.175	0.449	0.223
湖泊调蓄能力	0.711 **	0.109	0.207 *

注:** 为在 0.01 水平(双侧)上显著相关,* 为在 0.05 水平(双侧)上显著相关。下同。

河道过流能力、河网调蓄能力均与第一产业增加值、第二产业增加值、第三产业增加值、人口密度

表 7 流域防洪能力状态指标与驱动力指标偏相关系数

驱动力指标	第一产业增加值	第二产业增加值	第三产业增加值	人口密度	人口城镇化率	土地城镇化率	用地规模弹性系数
河道过流能力	-0.813 *	-0.356 *	-0.817 *	-0.725 *	-0.280	-0.902 **	-0.811 **
河网调蓄能力	-0.631 **	-0.288 *	-0.461 **	-0.785 *	0.104	-0.580 **	-0.010
湖泊调蓄能力	-0.593 *	-0.081	0.030	-0.152	-0.527	-0.538	-0.874 **

及土地城镇化率的相关性较为显著。流域内社会经济高速发展,为顺应城市发展的需要,获取更多的建设面积,牺牲了其他土地利用方式,高强度的人类活动严重改变了下垫面土地利用格局,不透水面积扩张、水域被侵占、河道淤积,对河道过流能力及河网调蓄能力影响显著^[23-24],从而加快了地表径流速度,缩短了汇流时间,增加了流域防洪压力。

湖泊调蓄能力与第一产业增加值、用地规模弹性系数的相关性最为显著,说明随着城镇人口与建设用地关系的紧张加剧,以及围垦养殖等农业生产活动的影响,人类生产活动倾向于侵占水域湿地,将湖泊转化为建设用地及耕地,导致湖泊可调蓄水量的下降,造成湖泊调蓄能力的降低。

河道过流能力、湖泊调蓄能力与响应指标偏相关系数较为显著,但河网调蓄能力与各响应指标均未通过显著性检验,随着水利工程投资的加大,河网调蓄能力仍不断下降,可能是因为河流的行洪能力主要由主干河道承担,而能力相对较弱的支流更容易被忽视、被侵占。同时,随着流域城镇化水平的提高,生产要素的聚集大大增加了灾害的风险程度及致灾的可能,流域防洪压力愈大,主干河道的重要性愈被凸显,进而导致河网区域主干化^[25]。

1990—2000 年,防洪工程建设投资由 76.61 万元上涨至 1680.05 万元,防洪除涝工程建设投资总占比达 99% 以上,保障流域经济建设稳定发展;在此期间,流域内第二、三产业迅速发展,地区生产总值增长约 6.58 倍,第二、三产业增加值占比由 88.74% 增长至 94.83%,流域由农业为主快速转变为以工业、服务业等非农业为主的城市化流域,流域内人口密度、城镇化率也随之提升,分别增加 9.25% 和 30.62%,流域内人类经济建设活动增加,对自然生态环境造成破坏;随着人口密度增长和土地利用变化,部分河道和湖泊遭到破坏和填埋,流域河网调蓄能力和湖泊调蓄能力分别下降 6.64% 和 0.17%,流域防洪能力降低。

为提高流域防洪能力,保障流域健康可持续发展,2000—2010 年间持续加大水利工程投资,其中防洪除涝工程建设投资持续增长的同时,逐步重视水保生态建设投资,由原来的占比 0.5% 提升至 24.65% (图 5),水利工程建设投资进一步保障流域经济建设发展;在此阶段,流域社会经济活动进入迅

猛发展阶段,地区生产总值由 2000 年的 338.68 亿元增长至 2010 年的 1824.72 万元,流域人口密度和城镇化率分别增加 17.38% 和 71.2%,人类生产建设活动加剧,流域防洪压力进一步加大;由于城镇化率迅速增长,城镇建设用地增加,流域水系继续遭到破坏,河网调蓄能力持续下降,2010 年较 2000 年下降 11.77%,但与此同时,由于政府加大水保生态建设投资以及防洪除涝工程建设投资,河道典型断面过流能力较 1990 年显著提升,湖泊调蓄能力也增长 2.15%,水利工程建设初见成效,流域防洪能力得到维持和保障。

随着流域城市化建设不断推进,2010—2015 年继续加大水利工程投资以维持和保障流域防洪能力(图 5);流域地区生产总值持续增长,第二、三产业占比达 97.82%,其中第三产业增长最为迅速,人口密度和城镇化率也稳步增加,但增长速度放缓,分别增加 2.41% 和 1.96%,城市化建设基本趋于稳定;河道过流能力和湖泊调蓄能力也基本保持稳定、略有提升或降低,但河网调蓄能力仍不断下降,主要原因是此期间水利工程建设主要注重于主干河道和大江大河的治理^[25],对于中小型河道以及农村河道整治较少。而中小型河道在河网调蓄中起着不可忽视的作用。因此为提高流域的整体防洪能力,不仅应关注大江大河还应着重保护中小型河流,保障流域可持续健康发展。

4 结 论

a. 自 1990 年以来,秦淮河流域在社会经济发展及人类活动的影响下,流域防洪能力整体上有提高,其中河道过流能力和湖泊调蓄能力整体呈现上升趋势,2010 年后两者变化趋于稳定,略有增长或下降,而河网调蓄能力能力多年来持续降低。

b. 在 1990—2010 年间,秦淮河流域社会经济及城市化发展迅速推进,导致流域防洪压力加大。尽管 2010 年后发展速度有所减缓,城市化建设仍在继续,进一步加剧了流域防洪压力。

c. 水利工程投资对维护和保障流域防洪能力具有积极意义,但在提升河网调蓄能力方面效果相对有限,主要原因是水利工程建设注重于大江大河和主干河道治理,而中小型河道管理与维护相对缺乏,建议加强中小型河道的管理与维护。

d. 社会经济发展和人类活动对流域防洪能力造成一定程度的影响,尤其是中小型河道,多年来水利工程的不断发展也保障了主干河道和主要湖泊的行洪和调蓄能力,流域防洪能力得以提升,但河网调蓄能力的降低仍需多加关注,中小型河道的保

护建设工作任重而道远。

参考文献:

[1] 马建华. 2020 年长江流域防洪减灾工作实践及思考[J]. 人民长江, 2020, 51(12): 1-7. (MA Jianhua. Practice and reflection on flood control and disaster mitigation in Changjiang River Basin in 2020[J]. Yangtze River, 2020, 51(12): 1-7. (in Chinese))

[2] STEFFEN W, BROADGATE W, DEUTSCH L, et al. The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration[J]. The Anthropocene Review, 2015, 2(1): 81-98.

[3] 刘世梁, 刘芦萌, 武雪, 等. 区域生态效应研究中人类活动强度定量评价[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6797-6809. (LIU Shiliang, LIU Lumeng, WU Xue, et al. Quantitative evaluation of human activity intensity on the regional ecological impact studies [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): 6797-6809. (in Chinese))

[4] 宋明明, 都金康, 郑文龙, 等. 秦淮河流域近 30 年不透水面景观格局时空演变研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(2): 238-247. (SONG Mingming, DU Jinkang, ZHENG Wenlong, et al. Quantifying the spatial-temporal changes of impervious surface landscape pattern from 1988 to 2015 in Qinhuai River Basin [J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(2): 238-247. (in Chinese))

[5] 安静, 刘红玉, 郝敬锋, 等. 快速城市化对南京东郊景观结构与格局的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 421-425. (AN Jing, LIU Hongyu, HAO Jingfeng, et al. Impact of rapid urbanization on landscape structure and pattern in Nanjing east suburb [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(2): 421-425. (in Chinese))

[6] 林家丽. 南宁市防洪工程体系的防洪能力及防洪风险研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.

[7] 张文婷, 刘永志, 张行南, 等. 联安围防洪保护区洪水演进模拟分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 1-6. (ZHANG Wenting, LIU Yongzhi, ZHANG Xingnan, et al. Flood routing simulation and analysis of Lian'anwei flood protection zone [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 1-6. (in Chinese))

[8] 杨柏青, 胡剑, 陈龙赞. 横山水库防洪能力提升研究[J]. 水利技术监督, 2020(2): 282-286. (YANG Yiqing, HU Jian, CHEN Longzan. Study on the improvement of flood control capacity of Hengshan Reservoir [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2020(2): 282-286. (in Chinese))

[9] 马勇, 顾正华, 王庭辉, 等. 基于 SWMM 的山丘城区防洪排涝能力分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 499-505. (MA Yong, GU Zhenghua, WANG Tinghui, et al. Analysis of flood control and drainage capacity of hilly city based on SWMM [J]. Journal of

- Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (6): 499-505. (in Chinese))
- [10] 李宗礼,张宜清,许明祥,等. 武汉市防洪排涝体系建设方略[J]. 水资源保护, 2022, 38 (5): 39-45. (LI Zongli, ZHANG Yiqing, XU Mingxiang, et al. Construction strategy of flood control and drainage system in Wuhan City[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (5): 39-45. (in Chinese))
- [11] 陈域,李江风,徐佳. 生态服务价值视角下湖北省长江流域防洪能力研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24 (1): 169-176. (CHEN Yu, LI Jiangfeng, XU Jia. Study on flood control capacity of Yangtze River Basin of Hubei Province from the perspective of ecological service value [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(1): 169-176. (in Chinese))
- [12] 王霞,郑雄伟,张晓文. 并联供水水库库容补偿提高洪水资源化利用程度研究[J]. 水利规划与设计, 2019 (7): 20-22. (WANG Xia, ZHENG Xiongwei, ZHANG Xiaowen. Study on the improvement of flood resources utilization by compensating storage capacity of parallel water supply reservoirs[J]. Water Resources Planning and Design, 2019(7): 20-22. (in Chinese))
- [13] 孙文宇,姚成,刘志雨,等. 秦淮河水文水动力模型及实时校正[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50 (4): 26-33. (SUN Wenyu, YAO Cheng, LIU Zhiyu, et al. Hydrological and hydrodynamic model of Qinhuai River and real-time correction[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4): 26-33. (in Chinese))
- [14] 陈红,魏风虎. 公路生态系统评价指标体系构建方法研究[J]. 中国公路学报, 2004(4): 89-92. (CHEN Hong, WEI Fenghu. Study of the way on indicator set of ecological assessment of highway [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004(4): 89-92. (in Chinese))
- [15] 张敏惠. 基于 DSR 模型的新和县城建设用地演变及驱动力分析[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2017.
- [16] KAO J J, PAN T C, LIN C M. An environmental sustainability based budget allocation system for regional water quality management[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(2): 699-709.
- [17] YU C H, CHEN C H, LIN Chengfang, et al. Development of a system dynamics model for sustainable land use management[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2003, 26(5): 607-618.
- [18] 饶恩明,肖焱,欧阳志云,等. 中国湖泊水量调节能力及其动态变化[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6225-6231. (RAO Enming, XIAO Yi, OUYANG Zhiyun, et al. Status and dynamics of China's lake water regulation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (21): 6225-6231. (in Chinese))
- [19] 高玉琴,刘云苹,闫光辉,等. 秦淮河流域水系结构及连通度变化分析[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(5): 32-39. (GAO Yuqin, LIU Yunping, YAN Guanghui, et al. Analysis on variation of water system structure and connectivity of Qinhuai River basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (5): 32-39. (in Chinese))
- [20] DU Jinkang, QIAN Li, RUI Hanyi, et al. Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhuai River basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2012, 464-465: 127-139.
- [21] 贾艳艳,唐晓岚,唐芳林,等. 长江中下游流域人类活动强度及其对湿地景观格局影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29 (4): 950-963. (JIA Yanyan, TANG Xiaolan, TANG Fanglin, et al. Research on human activity intensity and its impact on wetland landscape pattern in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(4): 950-963. (in Chinese))
- [22] 李昌文,黄艳,严凌志. 变化环境下长江流域超标准洪水灾害特点研究[J]. 人民长江, 2022, 53 (3): 29-43. (LI Changwen, HUANG Yan, YAN Lingzhi. Study on characteristics of over-standard flood disaster in Changjiang River basin under changing environment[J]. Yangtze River, 2022, 53(3): 29-43. (in Chinese))
- [23] 袁雯,杨凯,唐敏,等. 平原河网地区河流结构特征及其对调蓄能力的影响[J]. 地理研究, 2005, 24 (5): 717-724. (YUAN Min, YANG Kai, TANG Min, et al. Stream structure characteristics and their impact on storage and flood control capacity in the urbanized plain river network [J]. Geographical Research, 2015, 24 (5): 717-724. (in Chinese))
- [24] 李景保,于丹丹,杨波,等. 长江荆南三口水系调蓄能力演变及其与水系结构的关联性[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 19-26. (LI Jingbao, YU Dandan, YANG Bo, et al. Regulation capacity changing trend and its relation with river network structure in Jingnan Three Port of Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (5): 19-26. (in Chinese))
- [25] 付东王,陈友国. 南京地区中小河道“一河一策”行动计划路径分析[J]. 江苏水利, 2018 (12): 51-55. (FU Dongwang, CHEN Youguo. Path analysis of “one river, one strategy” action plan for small and medium-sized rivers in Nanjing area [J]. Jiangsu Water Resources, 2018 (12): 51-55. (in Chinese))

(收稿日期:2022-09-14 编辑:俞云利)