

快速城镇化进程中太湖流域产水量变化的时空分布特征*

李伶杰¹, 胡庆芳^{1**}, 王银堂¹, 刘勇¹, 朱琰², 王磊之¹, 崔婷婷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, 南京 210029)

(2: 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 快速城镇化进程中太湖流域下垫面的剧烈变化对流域产水量时空分布产生了深刻影响. 在分析太湖流域城镇化进程及土地利用变化的基础上, 采用太湖流域模型对 3 种典型降雨过程 (1991、1999 和 2009 年) 与 5 种下垫面 (1985、1995、2000、2005 和 2010 年) 的组合情景进行模拟, 综合分析了城镇化进程中全流域和各水利分区在全年期、汛期、涨水期产水量变化的时空分布特征. 结果表明: 时程上, 太湖流域和所有水利分区的各统计时段产水量增幅伴随城镇化进程推进均呈现增加趋势, 2005 年后产水量增幅进一步加大, 且全年产水量增幅主要集中在汛期; 空间上, 东、中部城市集聚区的产水量增长率明显高于西部山丘区与太湖湖区, 这主要是由于西部山丘区、太湖湖区不透水率增幅较小所致. 产水量变化的时空非均匀分布特征为城镇化背景下太湖流域防洪除涝格局演变及流域—区域—城市防洪除涝协调性研究提供了重要的先验认识.

关键词: 城镇化; 太湖流域; 产水量变化; 时空分布

Spatiotemporal pattern of water yield changes over the Taihu Basin during the rapid urbanization process

LI Lingjie¹, HU Qingfang^{1**}, WANG Yintang¹, LIU Yong¹, ZHU Yan², WANG Leizhi¹ & CUI Tingting¹

(1: *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P.R.China*)

(2: *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China*)

Abstract: The dramatic changes of land-use and cover in the Taihu Basin (TB) during the rapid urbanization process has a profound effect on the spatiotemporal distribution characteristics of water yield. In this paper, we analyze the urbanization process and land-use changes in the TB firstly, and then the TB model is employed to simulate hydrological process for the coupled scenarios of typical rainfall (1991, 1999 and 2009) and land-use (1985, 1995, 2000, 2005 and 2010). Finally, spatiotemporal patterns of water yield changes are revealed synthetically at year, flood season and water-level-rising stage over the whole basin and sub-regions. Temporally, runoff generation growth at all time and space scales present an evident increasing trend with the progress of urbanization and increment further enlarges after 2005. In addition, the annual increase of water yield is mainly concentrated in the flood season. Spatially, the growth rate of all statistical periods in urban cluster over the eastern and central regions significantly exceed that in the western hills and the Taihu region, which is closely related to the less increase of impervious surface percentage over those regions. Spatiotemporal patterns of runoff generation variation obtained from this paper provides crucial prior knowledge for deeply understanding the evolution of basin-region-urban flood control pattern. Moreover, it contributes to scientifically enhance coordination between the three levels of flood control system in the TB with the continuous development of urbanization.

Keywords: Urbanization; Taihu Basin; water yield changes; spatiotemporal pattern

* 国家重点研发计划项目 (2018YFC1508201, 2018YFC1508204, 2017YFC1502705)、水利部公益性行业科研专项经费项目 (201501014)、国家自然科学基金项目 (51509157, 51609140) 和江苏省水利科技项目 (2017038, 2017022) 联合资助. 2018-12-25 收稿; 2019-03-27 收修改稿. 李伶杰 (1992 ~), 男, 硕士, 工程师; E-mail: lilingjie_water@163.com.

** 通信作者; E-mail: hqf_work@163.com.

改革开放以来,我国步入快速城镇化阶段,全国城镇化率从1979年的19.7%增加到2017年的58.52%^[1-2]。快速城镇化推动经济社会迅猛发展的同时,土地大规模开发利用和基础设施高速建设也剧烈地改变了地表环境,水文循环及其伴生过程受到强烈干扰,从而导致了内涝频发、水体黑臭等一系列城市病,因此开展城镇化水文效应研究对于认识水文循环规律变化、提升城市防洪治涝能力、合理制订城市规划等具有重要意义。

目前学界已经对城镇化及其水文效应开展了大量研究,主要集中在城镇化对流域土地利用及河湖水系的影响^[3-5]、城镇化背景下流域水文气象要素(气温、降水、蒸发等)统计特征变异诊断及归因分析^[6-9]、城镇化进程中流域产汇流规律变化识别^[10-15]等方面。其中辨识城镇化对流域产汇流规律影响为最高层次,复杂度也最大,主要研究方法是通过水文水动力模型模拟城镇化背景下流域的产汇流,以揭示城镇化对流域水文过程的影响。如郝振纯等^[11]基于SWAT模型评估了1980—2010年海河流域内阜平、匡门口和界河铺3个子流域的径流对土地利用变化的响应,识别出林地增加对汛期径流系数具有降低作用。闫艳^[12]、黄沛然^[13]采用类似的方法,研究发现江苏省徐州市、浙江省义乌市不透水面积增加致使地表径流量显著增加。Yao等^[14]采用SWMM模型,针对北京市12个小型建成区研究了不同下垫面格局对于洪峰流量的影响,结果表明不透水区远离流域出口比集中于出水口附近会产生更低的洪峰流量。Muñoz等^[15]通过建立休斯顿市西姆斯河口HEC-HMS模型,模拟得出城镇化导致百年一遇的洪峰流量增加、洪水风险区扩大、受灾人数增加。总体上看,目前已有城镇化水文效应研究主要在单个城市或片区层面开展,针对近年来快速城镇化进程中出现的城市群或城市连绵区的研究尚不多见;另外多数研究重点辨析了城镇化水文效应的时序特征,对其空间格局关注不够,而识别城镇化水文效应的时空分布有助于深刻认识流域产汇流演变规律。

改革开放以来,太湖流域逐步进入快速城镇化阶段,目前已发展形成以上海为核心,以苏州、无锡和常州等城市为次级中心的大规模都市绵延区。由于受梅雨、台风、局地性强降水等多种致灾性天气的袭扰,太湖流域洪涝灾害频繁发生。经过多轮防洪规划实施,已基本形成了流域—区域—城市3个层次相结合的防洪格局。但受城镇化进程中下垫面条件剧烈变化、城市群防洪大包围建设等因素的影响,流域产汇流与洪水运动规律随之动态演变,出现了局部地区排水不畅、三层防洪体系协调性减弱等问题。

为此,本文选取太湖流域作为包含大规模都市绵延区的典型平原河网流域,以产水量时空变化作为切入点,采用太湖流域模型,针对不同降雨(1991、1999和2009年)和下垫面(1985、1995、2000、2005和2010年)的组合情景进行模拟,统计分析全流域和水利分区在全年期、汛期、涨水期(太湖水位上涨期)等不同统计时段产水量变化的时空分布,剖析快速城镇化进程中太湖流域产水量变化的非均匀时空效应,以为太湖流域产汇流格局演变及流域—区域—城市防洪协调性研究提供技术支撑。

1 太湖流域城镇化进程

1.1 流域概况

太湖流域是长江三角洲的核心区域,地跨苏、浙、皖、沪三省一市,流域总面积约36895 km²。流域三面滨江临海,地形呈西高东低之势,地貌特征以平原为主,山地丘陵仅分布在流域西部。流域内水系交错纵横、湖泊星罗棋布,属于典型的平原河网地区。根据地形及水系特征,将全流域分为湖西、浙西、太湖湖区、杭嘉湖、武澄锡虞、阳澄淀泖、浦东和浦西8个水利分区(图1)。流域多年年均降水量为1189 mm,但年内分配不均,汛期降水量约占全年的60%。

1.2 社会经济指标及下垫面变化特征分析

改革开放以来,太湖流域社会经济迅猛发展,逐步形成了以上海为核心,以苏州、无锡和常州等城市为次级中心的都市绵延区,是长三角世界级城市群的重要组成部分,是我国城镇化率最高、人口密度最大的地区之一。分析流域城镇化进程及其土地利用变化特征是城镇化水文效应研究的基础工作。

1.2.1 社会经济指标变化特征 从各省市统计年鉴和统计公报中,收集了太湖流域内上海、苏州、无锡、常州、镇江、杭州、嘉兴、湖州8大主要城市1978—2017年城市面积、建成区土地面积、城镇人口数、常住人口数、GDP等社会经济统计数据,以此计算各城市的城镇化率、人均GDP、建成区面积和人口密度。对8大城市的社会经济统计指标取算术平均值(对建成区面积求和),分析流域社会经济指标的时程变化,如图2。以城镇

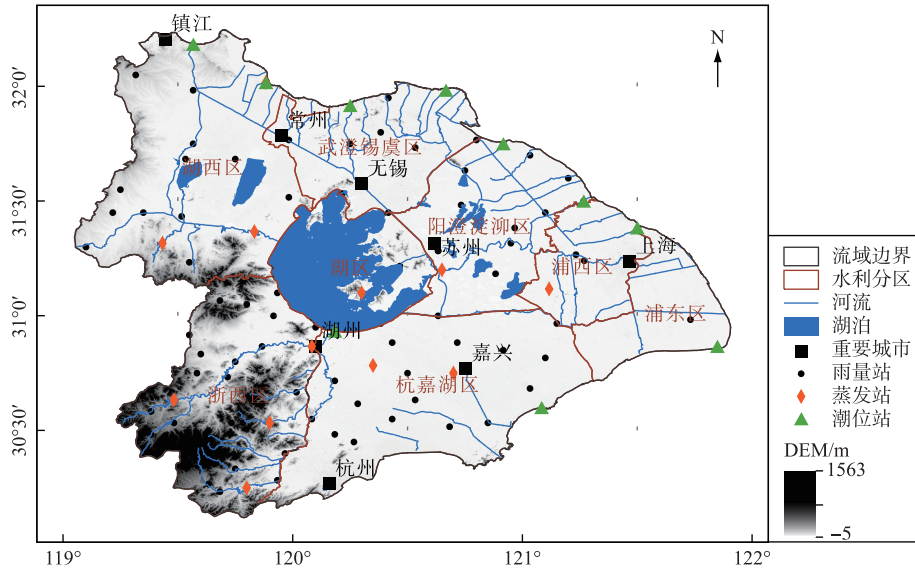


图 1 太湖流域 DEM 及水文气象站点分布

Fig.1 DEM of the Taihu Basin and hydrometeorological gauges distribution

化率为例,1978—1999 年平均增长速度为 0.64%/a,2000—2004 年为 1.21%/a,2005—2017 年达到 1.55%/a. 人均 GDP、人口密度和建成区面积平均增速也表现出明显的阶段特征. 总体上表现为 2000 年之前城镇化发展速度相对缓慢,2000 年之后,特别是 2005 年以来,流域城镇化进程加快.

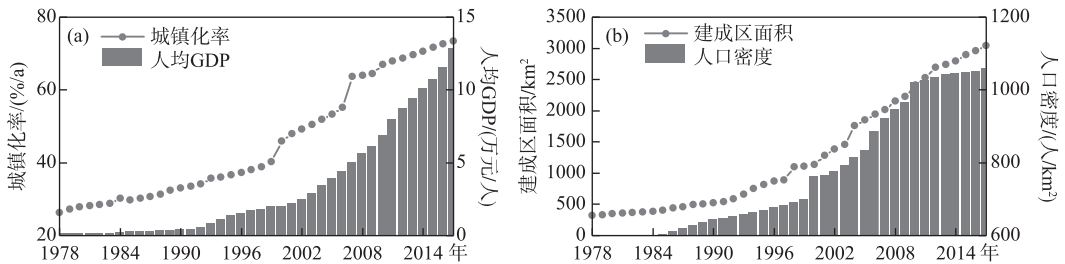


图 2 太湖流域社会经济指标时程变化

Fig.2 Changes of social and economic indicators in the Taihu Basin

关于城镇化进程的空间格局,Deng 等^[16]基于 DMSP-OLS 夜间灯光数据研究了建成区扩张的趋势,发现太湖流域城镇化呈现出围绕大城市径向扩张和沿主要交通干线线状延伸的空间演进特征.

1.2.2 下垫面变化特征 基于 1985、1995、2000、2005 和 2010 年 5 期 Landsat TM/ETM 遥感影像数据,经过几何校正、辐射标定、大气校正、影像镶嵌和灰度直方图匹配等前期处理,采用目视解译法,承接前一期影像分解结果的基础上解译斑块增量,获取各期土地利用情况(表 1). 将本研究结果与太湖流域管理局解译的 2005 年太湖流域土地利用数据进行对比,建设用地和水面的比例接近,分别相差流域总面积的 3.3% 和 0.7%;耕地和林地分别相差流域总面积的 8.6% 和 13.2%. 对于局部区域,进一步收集了第二次全国土地调查无锡市建设用地数据,对比得出各行政区建设用地面积与本文解译结果保持高度一致,总体误差约为 5.8%. 因此,本研究解译的太湖流域土地利用数据精度较好,可用于下垫面变化特征分析. 由表 1 可知,较 1985 年,2010 年建设用地扩张了约 1.5 倍,耕地面积中水田与旱地面积分别减少 23.1%、43.5%,并且建设用地和耕地在 2000 年后,特别是 2005 年后呈现加速变化趋势;林地各时期变化较小;水面面积在 1985—

2005 年呈现缓慢增加趋势,但 2005 年后又有所减少,总体变化较小. 本研究进一步采用线性光谱混合分析法提取了各年度下垫面不透水面积(表 1),发现不透水面积显著增加,1985—2010 年间增幅高达 230.4%,时程上同样表现为 2005 年后加速增长的趋势.

表 1 太湖流域 1985—2010 年土地利用格局
Tab.1 Land-use pattern in the Taihu Basin during 1985—2010

土地利用类型	面积/km ²					1985—2010 年变化率/%
	1985 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	
水田	21730	20736	20306	18299	16718	-23.1
旱地	1933	1657	1623	1480	1092	-43.5
林地	5177	5206	5196	5163	5317	2.7
建设用地	3598	4658	4986	6906	9013	150.5
水面	4741	4921	5068	5332	5039	6.3
不透水面积	2635	3387	4337	5417	8705	230.4

对各种土地利用类型面积变化按照水利分区进行统计,得到太湖流域 2010 年建设用地与耕地面积较 1985 年相对变化的空间分布. 由图 3a、b 可知,武澄锡虞区、阳澄淀泖区、浦西区和浦东区建设用地的扩张幅度较大;耕地面积缩减比例的空间分布与之类似. 图 3c 给出了各水利分区不透水率绝对增长比例的空间格局,东、中部的武澄锡虞区、阳澄淀泖区、浦西区和浦东区增幅明显大于西部山丘区与湖区;这主要是由于位于东部平原区的上海及苏锡常等城市群迅速发展、城市范围及建成区不断扩张,导致不透水率大幅增加,而太湖湖区与西部山丘区(浙西区、湖西区)分别以水面、山地丘陵为主,虽然不透水面积也有所增加,但其所占水利分区面积的比例很小,导致不透水率增幅明显小于其他分区. 总体上,城镇化进程中太湖流域建设用地、耕地面积及不透水率变幅较大的区域主要集中在流域东部与中部平原河网区.

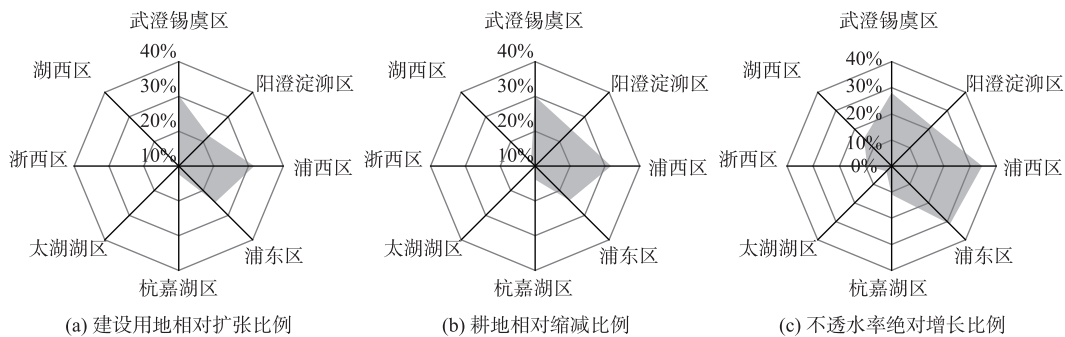


图 3 1985—2010 年太湖流域建设用地、耕地面积及不透水率变化的空间格局

Fig.3 Spatial changes of construction land, cultivated land area and impervious proportion over the Taihu Basin during 1985—2010

2 太湖流域产水量变化

2.1 产水量模拟计算

2.1.1 太湖流域模型 太湖流域模型是河海大学历经 20 余年开发的水量水质模型,经过验证能够较好地模拟流域产汇流过程,已成功应用于太湖流域综合规划、防洪规划,并成为流域日常调度运行的核心模型,也为全流域城镇化水文效应的时空解析提供了强有力的工具.

模型将流域划分为 20 个山丘片、16 个平原片和 3 个自排片作为计算单元. 产流部分按地形分为平原河网区降雨产流模型、湖西山丘区产水量模型和浙西山丘区产水量模型. 其中平原河网区和湖西区均按照水

面、水田、旱地及城镇道路4类下垫面模拟,再以各类面积为权重,计算各片区的逐日平均产水量;而浙西区属于典型的山溪型流域,水稻田面积较小、下垫面在年内变化不大,采用三水源新安江模型计算。需要说明的是模型输出产水量为降水(正产水)与蒸发、灌溉耗散量(负产水)之和,无雨日产水量为负值^[17]。本研究主要着眼于城镇化背景下太湖流域的产水量变化,因此对于模型汇流原理不展开叙述。

2.1.2 计算条件与模拟情景设置 1)气象水文资料。在本文研究的城镇化进程时段内,太湖流域发生了1991和1999年两次流域性大暴雨,导致了严重的洪涝灾害。从降水时程上看,1991年全流域汛期降水主要分布在6月中旬—7月上旬,1999年则高度集中于6月和8月;降水量级方面,1999年全流域平均最大7日~最大90日各统计时段降雨量均创历史记录,1991年则相对较低;空间分布上,1991年暴雨中心主要位于北部的湖西区和武澄锡虞区,1999年则集中在南部和中部。由于降水时空分布的特殊性及其造成洪涝灾害的严重性,1991和1999年被选为太湖流域设计暴雨计算的典型降雨时空过程,本文也将其选为2种典型降水情景;在此基础上,进一步增选了汛期降水量小于1991和1999年,且西部、北部和东部降水量偏大的2009年降水过程作为2000年之后的典型降水样本,该年太湖水位达到了2000年后的最高值。这3年汛期降水兼顾了不同的降水量级和空间分布也包含了降水中心位于北部、南部等多种情形,这为客观分析不同降水量及空间分布条件下城镇化进程中产水量变化的时空效应提供了优良的降水情景。因此,本文收集了1991、1999和2009年太湖流域内空间均匀分布的94个雨量站与12个蒸发站逐日实测资料,采用反距离权重法插值得到各计算片区逐日面平均降雨、蒸发过程,以此作为产水量模拟的水文背景。雨量站、蒸发站的空间分布如图1所示。

2)下垫面资料。考虑太湖流域城镇化进程,以1985、1995、2000、2005和2010年共5年下垫面作为模拟背景,每种背景按水面、水田、旱地和城镇4种下垫面进行概化。

3)初始、边界条件及工况、调度规则。河网初始水位统一采用3.0 m,初始流量设定为0,无控制闸门开启度为1。收集了典型年太湖流域沿长江至杭州湾重点潮位站(图1)实测特征潮位资料,利用单位潮位过程线推求整点潮位过程,再以拉格朗日三点插值法求得各河口潮位边界条件。工况采用流域治太湖骨干工程完成后的现状工况,调度规则采用当时实施的《太湖流域洪水调度方案》和《太湖流域引江济太调度方案》。

4)模拟情景设置。模拟计算保持工况、调度规则、初始条件与边界条件不变,以1991、1999及2009年流域实况降水、蒸发作为水文气象情景,将其与1985、1995、2000、2005和2010年下垫面情景进行组合,共设置15种组合情景,采用太湖流域模型进行产水量模拟计算,评估城镇化对太湖流域及各水利分区产水量的影响。

2.2 结果分析与讨论

为验证太湖流域模型的模拟效果,从《太湖流域防洪规划》^[18]中摘录了1991年和1999年流域最大30日、60日和90日的实况产水量,将1991年降水情景与1995年下垫面组合情景模拟的产水量作为1991年模拟产水量,将1999年降水情景与2000年下垫面组合情景模拟的产水量作为1999年模拟产水量,统计模拟计算的流域最大30日、60日和90日产水量,并与实况产水量进行对比。由表2可知,1991年模拟相对误差较小,介于3.3%~9.0%之间,而1999年各统计时段产水量均为历史最大值,模拟相对误差大于1991年,介于11.6%~14.1%之间。总体上,太湖流域模型模拟产水量的精度较好,15种情景的模拟结果可作为城镇化进程中产水量变化特征研究的基础数据。依据不同组合情景下各计算片区模拟的逐日产水量,统计得到8个水利分区全年期、汛期和涨水期产水量,进而求和计算出全流域3个统计时段的产水量。汛期为5—9月,涨水期通过对比分析实测太湖水位上涨过程与各情景下太湖水位模拟结果确定:1991年降雨情景为5月19日—7月16日,1999年降雨情景为6月6日—7月8日,2009年降雨情景为6月9日—8月16日,3个典型年的涨水期长度不等。

2.2.1 全流域产水量变化 太湖流域全年期、汛期、涨水期产水量随城镇化进程的推进均呈增加趋势(表3)。3种降雨情景下,下垫面从1985年演变到2010年,全年期产水量增加了14.8亿~20.3亿 m^3 ,增长率为5.1%~11.5%;汛期产水量增加了13.7亿~17.8亿 m^3 ,增长率为6.0%~33.5%;涨水期产水量增加了2.6亿~11.4亿 m^3 ,增长率为1.6%~18.5%。3种降雨情景全年期、汛期(统计时段长度相同)产水量增幅存在差异,其中2009年最大、1991年次之、1999年最小,而这与各时段降水量排序恰好相反,反映出在少雨条件下更能

凸显下垫面变化对产水量的影响.

表 2 1991 年和 1999 年太湖流域实况产水量与模拟产水量的对比

Tab.2 Comparison of actual and simulated water yield over the Taihu Basin in 1991 and 1999

产水量统计值	1991 年			1999 年		
	最大 30 日	最大 60 日	最大 90 日	最大 30 日	最大 60 日	最大 90 日
实况/亿 m ³	140.7	181.3	184.8	179.9	194.9	267.2
模拟值/亿 m ³	136.0	165.0	176.3	157.2	172.2	229.6
绝对误差/亿 m ³	4.7	16.3	8.5	22.7	22.7	37.6
相对误差/%	3.3	9.0	4.6	12.6	11.6	14.1

表 3 不同组合情景下全流域产水量统计结果

Tab.3 Statistical results of water yield at the whole basin scale for 15 coupled scenarios

时段	降雨情景	降雨量/mm	5 种下垫面情形下的产水量/亿 m ³					1985—2010 年 增长量/亿 m ³	1985—2010 年 增长率/%
			1985 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年		
全年期	1991	1487.1	229.1	231.7	234.1	240.3	249.4	20.3	8.9
	1999	1616.1	292.5	294.0	296.1	300.1	307.3	14.8	5.1
	2009	1333.1	152.5	154.4	156.8	161.9	170.0	17.6	11.5
汛期	1991	1009.3	150.1	152.6	154.7	160.4	167.9	17.8	11.8
	1999	1271.7	229.8	231.5	233.3	237.3	243.5	13.7	6.0
	2009	789.3	51.3	53.5	55.6	60.9	68.4	17.2	33.5
涨水期	1991	669.5	163.8	164.5	165.5	167.5	170.4	6.7	4.1
	1999	634.4	157.2	157.4	157.9	158.5	159.8	2.6	1.6
	2009	562.5	61.7	63.1	64.7	68.2	73.1	11.4	18.5

图 4 为不同降雨情景、下垫面变化各阶段产水增长量,以揭示全流域产水量的时程变化. 受下垫面条件改变的影响,在 3 种降雨情景下太湖流域全年期、汛期、涨水期产水量均表现为 2000 年之后的增幅明显高于 2000 年之前,其中 2005—2010 年间增幅进一步加大(图 4). 这与城镇化进程中太湖流域不透水面积的时程变化规律相吻合(表 1). 此外,全年期产水量增幅与汛期接近,表明全年产水量增加的时段主要集中在汛期,这在一定程度上增大了城市、区域和流域的防洪除涝压力.

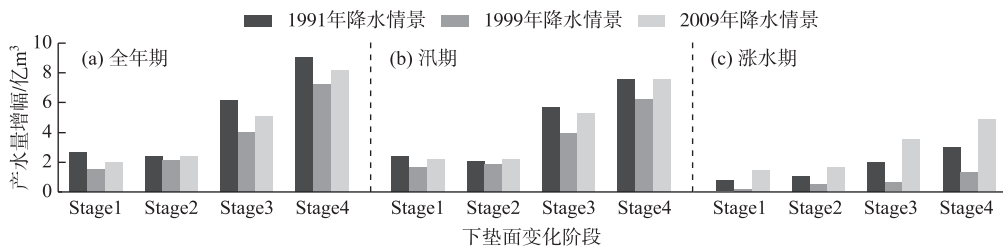


图 4 下垫面变化各阶段太湖流域产水量增幅

(stage 1: 1985—1995 年; stage 2: 1995—2000 年; stage 3: 2000—2005 年; stage 4: 2005—2010 年;下同)

Fig.4 Runoff generation increments in the Taihu Basin during 4 stages of land-use changes

2.2.2 水利分区产水量变化 统计 8 个水利分区全年期、汛期与涨水期的产水量,分析不同下垫面条件下产水量变化. 结果表明在各降雨情景下,8 个水利分区各统计时段产水量与全流域的变化规律类似,均随城镇化进程推进总体呈现增加趋势. 以浦西区(东部平原分区代表)与浙西区(西部山丘分区代表)为例. 在 3 种降雨情景下,与 1985 年下垫面条件相比,2010 年下垫面条件下浦西区全年期产水量增加了 1.8 亿~3.4 亿

m^3 、汛期产水量增加了 1.7 亿~3.0 亿 m^3 、涨水期产水量增加了 0.4 亿~2.1 亿 m^3 ;浙西区全年期产水量增加了 0.3 亿~0.5 亿 m^3 、汛期产水量增加了 0.3 亿~0.5 亿 m^3 、涨水期产水量增加了 0.1 亿~0.2 亿 m^3 。

为揭示各水利分区产水量变化的时程特征,图 5 给出了 8 个水利分区全年期、汛期、涨水期产水量在 4 个下垫面变化阶段的产水量增量。由图 5 可知,在 2000 年之前的 Stage1(下垫面由 1985 年变为 1995 年)和 Stage2(下垫面由 1995 年变为 2000 年),8 个水利分区各统计时段的产水量增幅总体较小,甚至在 1991 年降雨情景下,湖西区、武澄锡虞区和阳澄淀泖区全年期产水量增幅由 Stage1 到 Stage2 略有减小,这主要是由太湖流域在两个阶段下垫面的变化总体较小,降水、下垫面、土壤含水量时空分布不均等因素共同影响导致的。2000 年之后的 Stage3(下垫面由 2000 年变为 2005 年)和 Stage4(下垫面由 2005 年变为 2010 年),所有水利分区全年期产水量增幅均有所增大,其中 Stage4 达到最大。同全流域类似,下垫面变化各阶段所有分区全年期与汛期产水增幅接近,表明产水量增加在年内主要集中在汛期。涨水期统计时段最短,相应产水量增幅最小。

纵向比较图 5 中各水利分区产水量变幅,发现在同一阶段产水量增幅在空间上存在明显差异。图 6 清晰呈现了针对同一降水情景,太湖流域在 2010 年下垫面条件下产水量较 1985 年增长率的分布。由图 6a 可知,在 1991 年降雨情景,太湖流域东、中部平原区全年期产水量增长率明显高于西部山丘区,浦西区最高,浙西区最低、湖西区次之;1999 年降雨情景,太湖流域东北部分区全年期产水量增长率高于其他分区,武澄锡虞区最高,浙西区最低、太湖湖区次之;2009 年降雨情景同 1991 年类似。对于汛期产水量增长率,1991 和 1999 年降水情景下,各分区增长率排序同全年期产水量基本相同;在 2009 年降水情景下,浦西区和杭嘉湖区的增幅均超过了 1.6 倍,而浦东区在 1985 年下垫面组合情景下汛期逐日正、负(无雨日)产水量累积结果为 -0.3 亿 m^3 ,而当下垫面换为 2010 年时,汛期产水量高达 1.9 亿 m^3 ,实际增长幅度为各分区中最大。涨水期产水量增长率空间分布同全年期、汛期类似。总体上,城镇化进程中太湖流域东部和中部平原区产水量增长率明显大于浙西区、湖西区和太湖区。文献[19-20]基于 2000 年之前的长系列降水资料模拟 1985 与 2000 年下垫面条件下的多年平均产水量,发现苏锡常地区和浦东浦西区产水量增幅相对较大,这与本文得出的产水量变化的空间分布结果基本吻合。

全年期、汛期和涨水期产水量增长率的分布特征与 1985—2010 年间太湖流域不透水率的空间变化高度一致(图 3c)。虽然各分区的不透水面积均随城镇化进程不断增加,但西部浙西区不透水面积增长 550 km^2 ,仅占该分区面积的 0.09,即该区域仍然保持了以山地丘陵为主的地形格局,在一定程度上限制了浙西区产水量增幅。类似地,太湖湖区下垫面以水面为主,1985—2010 年间不透水面增加比例仅为 0.03,导致该区产水量增长率在各降雨情景下基本处于次末位。虽然浙西区不透水率增幅大于太湖湖区,但由于浙西区分布有大量的竹林和茶园,林地占分区面积的比例超过 60%,林地对降雨的显著截留效应在一定程度上影响了产水量的变化,导致浙西区的产水量增幅小于太湖湖区。东部平原区在 1985—2010 年间城镇化进程逐渐加快,建成区围绕中心城市和主要交通干线迅速扩张,相应区域的不透水率增幅明显高于西部山丘区和湖区。其中,浦西区、浦东区、武澄锡虞区和阳澄淀泖区的不透水率分别增加了 34.6%、31.6%、28.1% 和 21.6%,即伴随快速城镇化推进,区域土地利用格局发生了显著变化,这是导致 4 个分区产水量增长率较大的主要原因。

城镇化进程中太湖流域产水量变化的时空非均匀特征对流域防洪除涝格局产生了一定的影响。在东、中部大城市密布区,产水量大幅增加且主要集中在汛期,倒逼大城市进行河道综合整治,建立了城市包围圈以提升自身的防洪和除涝标准。然而流域主干河道现状行洪能力尚未能与城市防洪、除涝标准相匹配,汛期城市涝水强排入包围圈外主干河道,并与主干河道洪水进行叠加,导致河网代表站小雨高水、水位超标准甚至超历史极值等现象成为新常态。因此,在城镇化进程中太湖流域产水量非均匀变化背景下,进一步结合水利工程调度,开展太湖流域汇流规律及防洪格局演变分析,探讨如何提升流域—区域—城市防洪除涝协调性是当前太湖流域亟待解决的关键问题。

3 结论与展望

本文在分析太湖流域城镇化进程及土地利用变化特征的基础上,利用太湖流域模型研究了全流域、水利分区在全年期、汛期和涨水期 3 个时段产水量变化随下垫面演变的时空分布特征。主要结论如下:

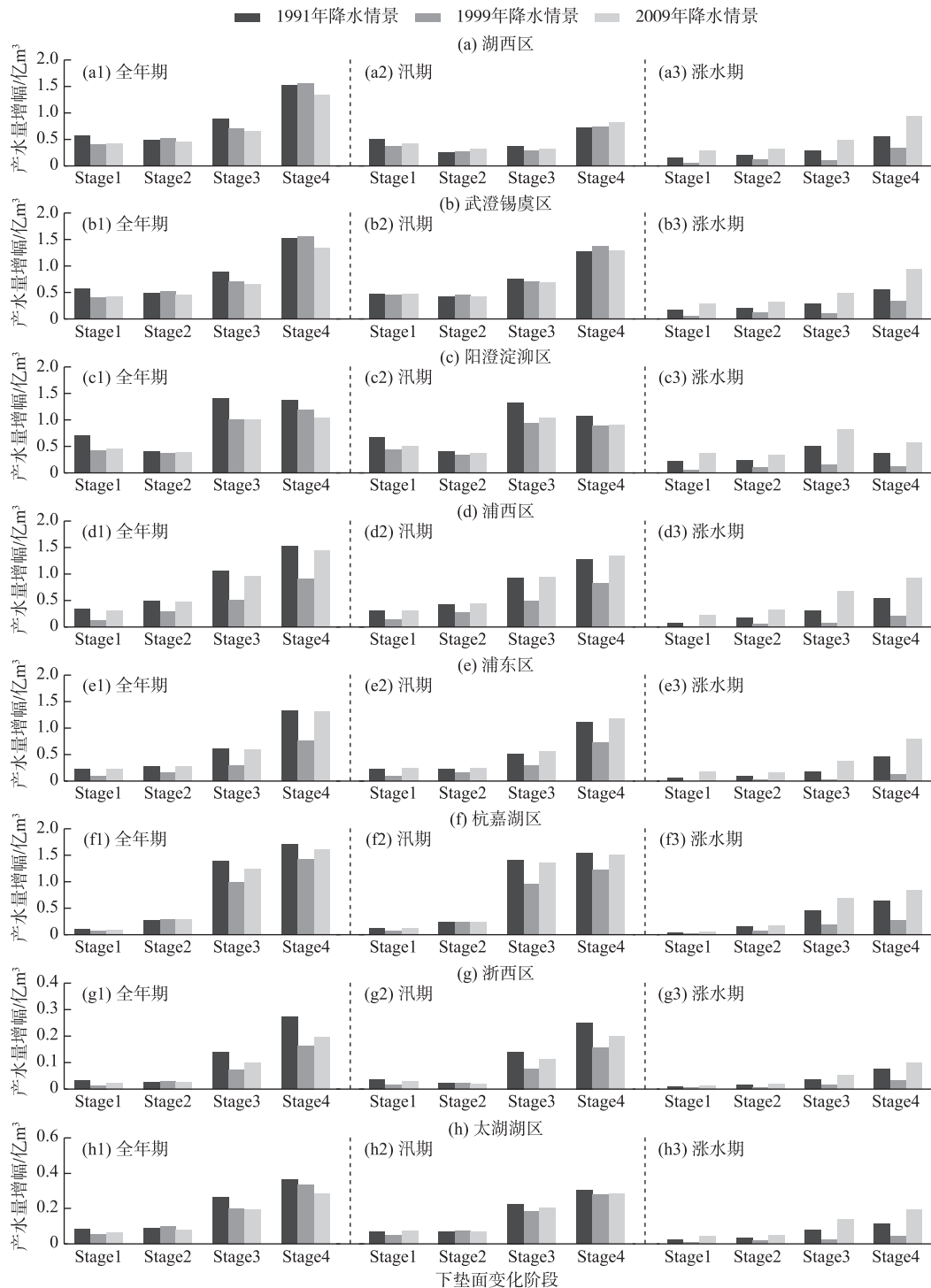


图 5 各水利分区在下垫面变化各阶段的产水量增量

Fig.5 Water yield increments in 8 sub-regions at 4 stages of land-use changes

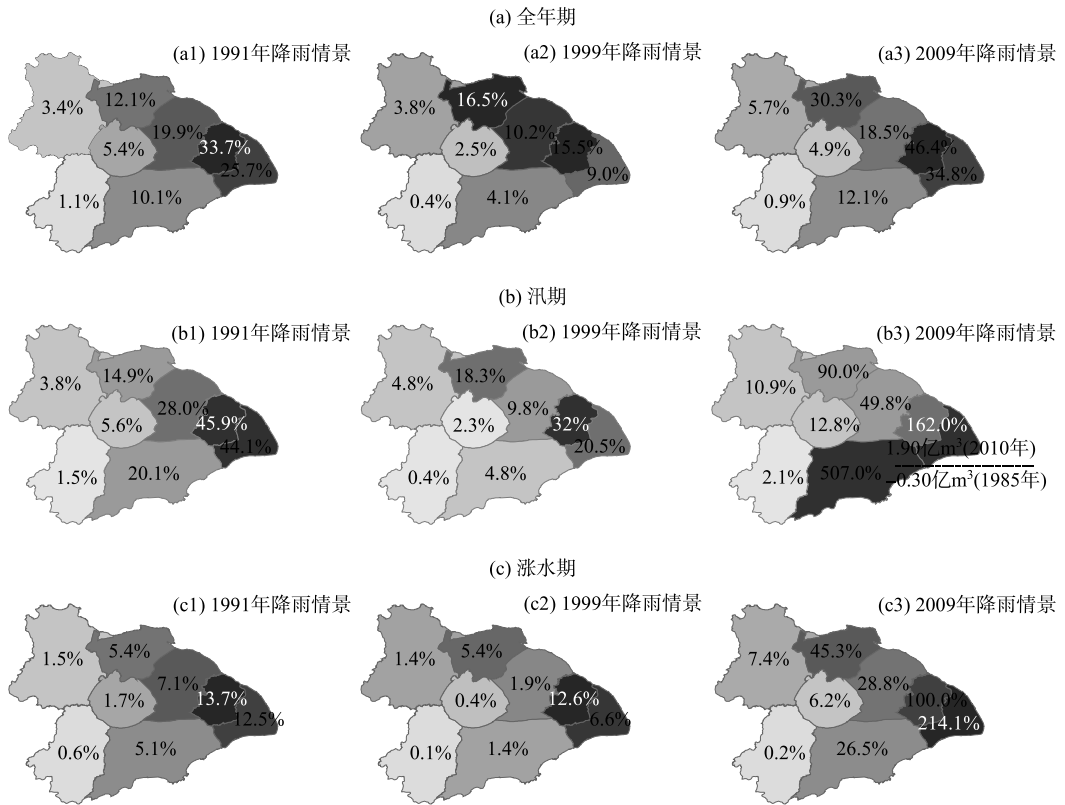


图6 太湖流域产水量增幅空间分布

Fig.6 Spatial distribution of water yield growth in the Taihu Basin

1) 太湖流域在 2000 年之前,城镇化发展速度相对缓慢;2000 年之后,特别是 2005 年以来,进入了快速城镇化进程。伴随城镇化推进,太湖流域土地利用呈现出建设用地扩张、耕地面积减少、不透水面积增加的特征,且在 2005 年之后变化速度加快;空间上表现为东、中部平原区土地利用变幅较大。

2) 太湖流域和 8 个水利分区的全年期、汛期、涨水期产水量随城镇化进程推进均呈现增加趋势,产水量增幅在 2005 年之后进一步加大,且汛期为年内产水量增加的主要时段。

3) 太湖流域大、中城市绵延分布的东部和中部水利分区的各统计时段产水量增长率明显高于西部山丘区与太湖湖区,这与以山地丘陵、水面为主的西部山丘区、太湖湖区不透水率增幅较小密切相关。

本文以下垫面变化作为驱动因子,重点研究了太湖流域产水量变化的时空特征。流域汇流与洪水运动规律变化也是城镇化水文效应研究的核心组成部分,但极端降水事件趋多增强、下垫面变化(土地利用状况与水系结构变化)、防洪除涝工程建设及调度管理方式调整等多重因素交织在一起对其产生了复杂影响。本文采用的控制变量—数学模拟方法为分离各因素贡献率提供了一种可行途径,后续研究将以流域汇流与洪水运动为切入点,重点剖析城镇化背景下太湖流域洪涝格局演变规律及其内在机理,研究改善流域—区域—城市防洪除涝协调性的技术方案。

4 参考文献

- [1] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Statistical bulletin of national economic and social development in 2016. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201802/t20180228_1585631.html. [中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2017 年国民经济和社会发展统计公报.]
- [2] Zhang JY, Wang YT, He RM *et al.* Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China. *Advances*

- in *Water Science*, 2016, **27**(4): 485-491. [张建云, 王银堂, 贺瑞敏等. 中国城市洪涝问题及成因分析. 水科学进展, 2016, **27**(4): 485-491.]
- [3] Deng X, Xu Y, Han L *et al.* Impacts of urbanization on river systems in the Taihu Region, China. *Water*, 2015, **7**(4): 1340-1358.
- [4] Jiang Y, Xue LF, Yu HX *et al.* Change of stream structure in the Nansi Lake Basin during the urbanization process since 1980s. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 135-142. DOI: 10.18307/2017.0115. [江燕, 薛丽芳, 于红学等. 近30年来南四湖流域城市化进程中的水系变化分析. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 135-142.]
- [5] Lin ZX, Xu YP, Dai XY *et al.* Effect of urbanization on the river network structure and functions—A case study in Suzhou City. *J Lake Sci*, 2018, **30**(6): 1722-1731. DOI: 10.18307/2018.0623. [林芷欣, 许有鹏, 代晓颖等. 城市化对平原河网水系结构及功能的影响——以苏州市为例. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1722-1731.]
- [6] Miao SG, Chen F, LeMone MA *et al.* An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, **48**(3): 484-501.
- [7] Hu QF, Zhang JY, Wang YT *et al.* A review of urbanization impact on precipitation. *Advances in Water Science*, 2018, **29**(1): 138-150. [胡庆芳, 张建云, 王银堂等. 城市化对降水影响的研究综述. 水科学进展, 2018, **29**(1): 138-150.]
- [8] Jin YR, Hu QF, Wang YT *et al.* Impacts of rapid urbanization on precipitation at two representative rain gauges in Shanghai City. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2017, **45**(3): 204-210. [金义蓉, 胡庆芳, 王银堂等. 快速城市化对上海代表站降水的影响. 河海大学学报: 自然科学版, 2017, **45**(3): 204-210.]
- [9] Deng PX. Change of meteorological and hydrological elements in Taihu Basin under the background of urbanization [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2015. [邓鹏鑫. 城镇化背景下太湖流域气象水文要素变化规律研究[学位论文]. 南京: 南京水利科学研究所, 2015.]
- [10] Xu YP, Ding JJ, Chen Y. Impacts of urbanization on hydrology in the Yangtze River Delta, China. *Water Science and Technology*, 2010, **62**(6): 1221-1229.
- [11] Hao ZC, Su ZK. Effects of land use change on runoff in the typical areas in Haihe River basin. *Advances in Water Science*, 2015, **26**(4): 491-499. [郝振纯, 苏振宽. 土地利用变化对海河流域典型区域的径流影响. 水科学进展, 2015, **26**(4): 491-499.]
- [12] Yan Y. Research on hydrological effects of urbanization in Xuzhou [Dissertation]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014. [阎艳. 徐州市城市化水文效应的研究[学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.]
- [13] Huang PR. Research on hydrologic responses to LUCC in rapid urbanization area [Dissertation]. Changsha: Hunan Normal University, 2017. [黄沛然. 快速城市化地区土地利用变化的水文效应研究——以浙江省义乌市为例[学位论文]. 长沙: 湖南师范大学, 2017.]
- [14] Yao L, Chen L, Wei W. Exploring the linkage between urban flood risk and spatial patterns in small urbanized catchments of Beijing, China. *Int J Environ Res Public Health*, 2017, **14**(3): 239.
- [15] Muñoz LA, Olivera F, Giglio M *et al.* The impact of urbanization on the streamflows and the 100-year floodplain extent of the Sims Bayou in Houston. *Texas International Journal of River Basin Management*, 2017, **16**(1): 1-40.
- [16] Deng P, Hu QF, Wang YT *et al.* Use of the DMSP-OLS nighttime light data to study urbanization and its influence on NDVI in Taihu Basin, China. *Journal of Urban Planning and Development*, 2016, **142**(4): 04016018.
- [17] Liang RJ, Cheng WH. Hydrological system model for Taihu Lake Drainage Basin. *J Lake Sci*, 1993, **5**(2): 99-107. DOI: 10.18307/1993.0201. [梁瑞驹, 程文辉. 太湖流域水文数学模型. 湖泊科学, 1993, **5**(2): 99-107.]
- [18] Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources ed. Flood control planning of Taihu Basin. Shanghai: Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources, 2008: 20. [水利部太湖流域管理局. 太湖流域防洪规划. 上海: 水利部太湖流域管理局, 2008: 20.]
- [19] Li HP, Yang GS, Jin Y. Simulation of hydrological response of land change in Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2007, **19**(5): 537-543. DOI: 10.18307/2007.0507. [李恒鹏, 杨桂山, 金洋. 太湖流域土地利用变化的水文响应模拟. 湖泊科学, 2007, **19**(5): 537-543.]
- [20] Li Y, Li HP. Hydrologic effect of land use change and its risk evaluation in Taihu Basin. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, **27**(5): 37-40. [李燕, 李恒鹏. 太湖流域土地利用变化的水文效应及其风险评价. 水土保持通报, 2007, **27**(5): 37-40.]