

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.05.005

快速城市化地区多尺度水文观测试验与 暴雨洪水响应机理分析

王强, 许有鹏, 于志慧, 林芷欣, 高斌

(南京大学地理与海洋科学学院, 江苏南京 210023)

摘要: 城市下垫面改变引起水文循环过程发生变异, 导致目前已掌握的天然情况下的产汇流规律和机制难以解释城市化等新形势下的水文现象与过程, 而面临需重新再认识的挑战。本文以长三角地区为典型, 建立了不同城市化水平及空间规模的水文试验流域, 探讨了快速城市化地区暴雨洪水响应规律和机制。结果表明: ① 不同量级降水事件下城镇用地土壤水响应程度(表层土壤水涨幅基本超过4%)总体高于其他土地利用类型, 城市化地区下垫面的改变通过影响土壤水动态响应模式直接影响了地表产流过程, 植被覆盖率较低的城镇用地和荒地土壤含水率呈现出陡涨陡落现象, 而植被作用下的土地利用类型则表现出缓慢上升和缓慢消退的土壤水响应过程。② 流域洪峰滞时和洪峰流量整体表现为随流域面积增加而呈幂律函数关系形式的增加。③ 总降水量与主要洪水特征(如洪峰流量、单位面积洪峰流量和径流深)基本呈显著相关(相关系数分别达0.49、0.41和0.78以上)。城市下垫面通过改变土壤水动态响应等产汇流特征而直接影响了洪水过程, 未来长三角地区暴雨洪水在城市化和气候因素双重作用下呈现持续加剧的趋势。

关键词: 城市化; 暴雨洪水; 响应规律; 多尺度观测试验; 长三角地区

中图分类号: P332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2022)05-0743-11

城市化引起水文循环过程发生改变, 导致目前已掌握的天然情况下的产汇流规律和机制难以解释城市化等新形势下的水文现象与过程, 而面临需重新再认识的挑战^[1]。近年来, 暴雨洪水问题日益突出, “城市看海”、“逢雨必淹”、“小雨高水位”和“小雨大灾”等现象常态化, 严重制约了社会经济发展^[2]。探讨水文循环演变机理是地理、水文等学科关注的前沿科学问题之一^[1-2]。

国内外学者开展了许多有益尝试来揭示城市化下暴雨洪水响应机理, 相关研究主要是通过野外试验^[3-4]和水文模拟(物理和数理统计模型)^[5-6]等手段开展。随着洪水灾害等问题的加剧, 中国陆续恢复或者发展了一批水文试验基地, 为水文循环演变机理研究(如径流分层研究、平原区产流机制、大孔隙流和山坡水文连通性等)提供了重要支撑^[3,7-11]。但总体来说, 相较国外更为完善的水文观测体系, 国内水文试验站在密度、监测技术和试验设备等方面还存在一定不足^[12], 其中城市化地区水文试验站点相对更为缺乏。从全球来看, 水文观测与试验研究不仅在数量上正在逐步减少, 其功能也从探索水文机理向为水文模型的参数化提供数据而逐步单一化^[13-14]。同时, 在应用水文模型开展研究中, 也存在诸如较多关注直接结果而缺乏对水文物理过程机理的解释、较多使用最优化算法率定参数而缺乏对参数物理意义的考量等问题^[15], 使得模型参数有时会脱离其物理意义。此外, 由于水文过程的复杂性, 水文模拟依然存在一定不确定性^[16]。对于城市化地区复杂下垫面影响下的暴雨洪水过程响应机理, 难以基于已知水文规律构建的模型揭示未知水文现象的机理, 而开展不同类型的野外对比观测试验, 可为发现变化环境下水文过程新规律和新机理提供直接

收稿日期: 2022-02-28; 网络出版日期: 2022-09-08

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20220907.1438.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42101020; U2240203)

作者简介: 王强(1992—), 男, 安徽安庆人, 博士, 主要从事水文观测与模拟研究。E-mail: wqianghy@nju.edu.cn

通信作者: 许有鹏, E-mail: xuyp305@163.com

支撑^[2,12]。

因此，本研究以中国长三角地区为典型，针对不同地形和下垫面特征，开展不同城市化水平及空间尺度下的水文对比观测试验研究，从不同尺度和不同下垫面的产汇流特征考虑，探讨快速城市化地区暴雨洪水的响应规律及演变机制。研究成果将在一定程度上弥补中国城市化地区水文观测与试验研究的不足，为类似快速城市化地区水文循环研究及防洪减灾提供科学参考和理论支撑。

1 研究区与研究方法

1.1 快速城市化地区多尺度水文对比观测试验流域

长三角地区是中国城市化发展最快及水平最高的地区之一，但城市化程度在空间上也存在一定差异。针对长三角地区城市化及下垫面特征，本研究选取了一批代表不同城市化水平及空间规模的闭合流域，开展了野外水文观测试验(图 1)，从空间上对比分析不同城市化水平地区的暴雨洪水响应规律。各流域均为该地区代表性的典型流域，空间分布相对分散，既涵盖了平原水网高度城市化集水区，也包括人类活动影响较低的自然流域等，各流域地理区位如图 1 所示。空间规模反映了集水面积(S)的大小，是影响洪水特征的关键因素，可以划分为小尺度($S < 350 \text{ km}^2$)、中尺度($350 \text{ km}^2 \leq S < 2\,000 \text{ km}^2$)和较大尺度($S \geq 2\,000 \text{ km}^2$)流域^[17]。

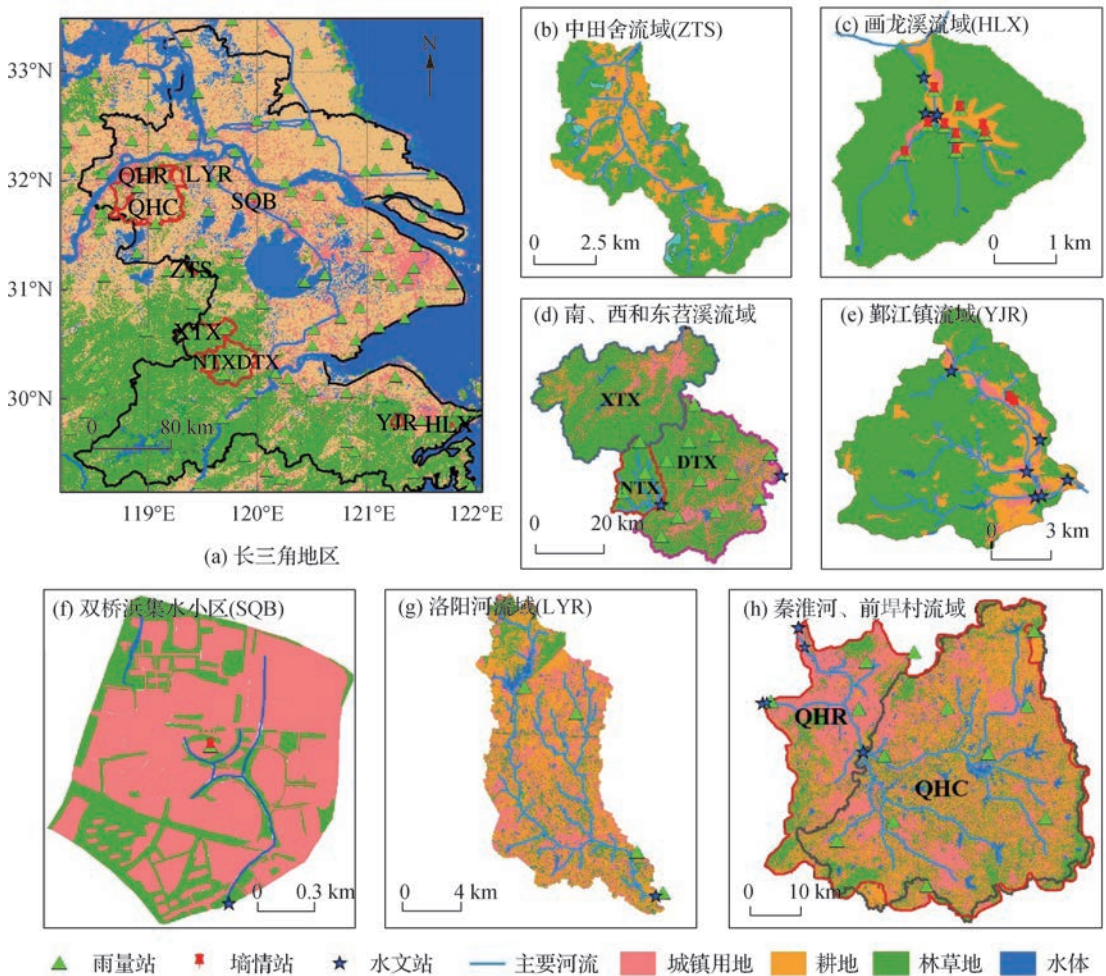


图 1 长三角地区城市化下多尺度水文对比观测试验流域

Fig. 1 Multi-scale hydrologic observation watersheds under urbanization in the Yangtze River Delta region

1.2 数据与方法

本研究系统获取了各试验流域气象、降水、墒情、径流和地下水等水文要素, 主要观测时段为2015年9月至2020年12月, 观测数据时间步长为5 min。土壤墒情站点主要针对长三角地区典型下垫面土地利用/覆被类型, 如乔木林地、人工林地(果林)、竹林、耕地、坡耕地、草地、城镇用地、荒地等, 每个站点设置4~5个时域反射测量仪(Time Domain Reflectometry, TDR)监测土壤体积含水率, 分别监测10 cm、20 cm、40 cm、60 cm和80 cm埋深的土壤水分。各流域土壤墒情站布设和典型站点情况如图1和表1所示, 每站点均配置雨量站, 同步观测降水数据。

研究期间内累计观测到257场次独立暴雨洪水过程(表1), 其中对于西苕溪、前埠村和秦淮河流域, 历史观测资料较为丰富, 故部分历史场次洪水也用于分析之中。由于洪水主要由较大降雨诱发, 本文统一选取了其中降水量级为大雨及以上事件(24 h降水量 ≥ 25 mm或12 h降水量 ≥ 15 mm)来开展洪水响应特征分析, 共251场次。基于观测数据, 选取特征指标, 分析不同试验流域的洪水响应特征。流域自然地理特征指标包括面积、不透水面比率(k)和平均坡度; 降水指标包括场次总降水量(P)、平均降水强度(I_{ave})和最大降水强度(I_{max})等。但由于墒情观测主要集中在画龙溪流域, 为保证数据分析的统一, 前期流域湿度条件主要用前期降水(P_a , 流域前期3 d降水量)及初始流量(Q_0 , 降水发生前的河道流量)表征。洪水特征包括洪峰滞时(T)、洪峰流量(Q)、单位面积洪峰流量(Q_{unit})、径流深(R)和径流系数(a)。洪峰滞时为降水中心(场次降水的几何重心)至洪峰出现的时间差, 单位面积洪峰流量通过洪峰流量除以流域面积可得, 径流深为直接径流除以面积, 径流系数为径流深除以总降水量。通过递归数字滤波技术将河道径流分为了直接径流和基流^[18]。

表1 各试验流域站点布设及观测数据信息

Table 1 Information about hydrological monitoring stations and observed events for each experimental basin

流域名称	简写	S/km ²	k/%	雨量站 点个数	水文站 点个数	土壤墒情 站点个数	时间	洪水 场次	大雨及以上事件数	空间尺度
双桥滨集水小区	SQB	1.6	94.12	1	1	1	2015—2020年	25	24	小
画龙溪流域	HLX	9.4	0.15	9	1	13	2015—2020年	41	41	小
中田舍流域	ZTS	40.0	0.95	2	1	1	2015—2020年	20	20	小
鄞江流域	YJR	88.0	4.27	6	1	2	2015—2020年	41	37	小
洛阳河流域	LYR	149.4	10.64	5	1	2	2015—2020年	13	12	小
南苕溪流域	NTX	240.7	0.87	6	1	-	2013—2020年	24	24	小
西苕溪流域	XTX	1 191.5	9.19	12	1	-	1990—2020年	34	34	中
东苕溪流域	DTX	1 489.1	9.92	14	1	-	2013—2020年	20	20	中
前埠村流域	QHC	2 106.7	17.15	10	1	-	1990—2020年	28	28	大
秦淮河流域	QHR	2 798.9	24.14	12	2	-	1990—2020年	11	11	大

2 结果与讨论

2.1 快速城市化地区不同土地利用/覆被下土壤水动态响应模式

土壤水动态变化反映了降水下渗和产流等水文过程, 对探讨水文循环规律有重要意义^[19]。基于观测数据较为完整的典型站点, 选取代表不同降水等级的事件开展分析。其中, 小雨事件编号为20170504, 24 h平均降水量为6.4 mm; 中雨事件编号为20160728, 24 h平均降水量为16.9 mm; 大雨事件编号为20160615, 24 h平均降水量为37 mm; 暴雨事件编号为20160626, 24 h平均降水量为63.9 mm。土壤体积含水率的动态

变化及其响应特征通过土壤含水率涨幅(R_s)和离差系数(Cv)反映, 离差系数反映土壤水的波动程度, 结果如图2和表2所示。

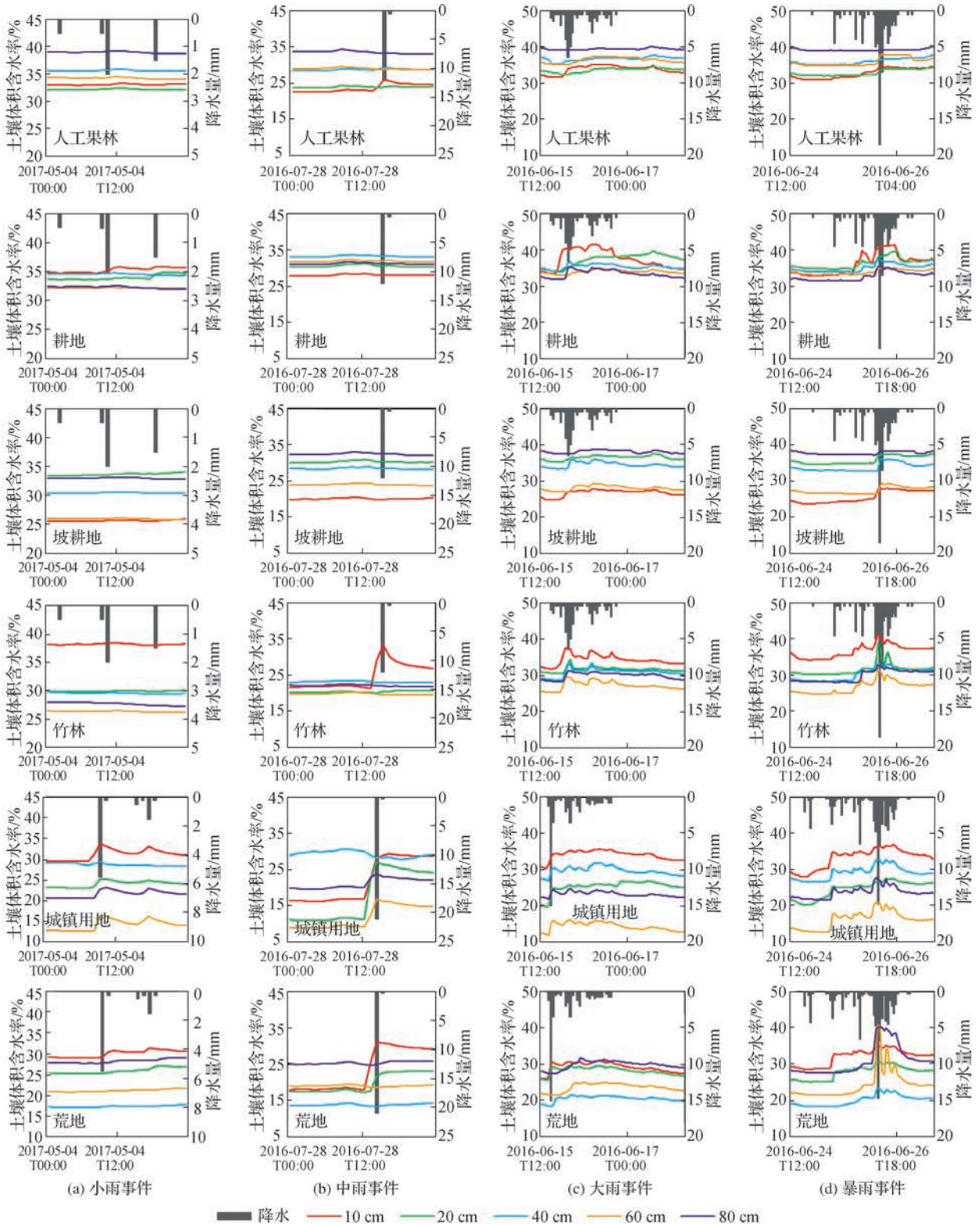


图2 不同降水事件各土地利用/覆被下土壤水动态变化

Fig. 2 Dynamic change of soil moisture for different land use/cover types under different rain events

表 2 不同降水事件下不同土地利用/覆被下土壤含水率响应特征

Table 2 Characteristics of soil moisture for different land use/cover types under different rain events

降雨事件	站点	$R_s/\%$					C_v				
		10 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm
小雨事件	人工果林	0.350	0.300	0.333	0.467	0.517	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004
	耕地	1.022	1.278	0.450	0.233	0.617	0.012	0.014	0.004	0.002	0.006
	坡耕地	0.425	0.708	0.233	0.258	0.292	0.005	0.006	0.002	0.003	0.003
	竹林	0.458	0.275	0.392	0.267	0.750	0.003	0.003	0.004	0.003	0.009
	城镇用地	4.200	2.133	1.083	3.842	2.617	0.041	0.031	0.011	0.091	0.040
	荒地	2.342	1.900	0.558	0.958	1.408	0.028	0.027	0.009	0.015	0.018
中雨事件	人工果林	3.458	0.575	0.708	0.883	1.292	0.046	0.007	0.008	0.008	0.012
	耕地	0.683	0.767	0.792	0.750	0.650	0.007	0.008	0.007	0.007	0.007
	坡耕地	0.776	0.825	0.783	0.667	0.908	0.010	0.008	0.007	0.009	0.008
	竹林	11.899	0.593	0.600	0.717	0.758	0.144	0.009	0.008	0.011	0.010
	城镇用地	13.125	16.008	2.808	8.100	4.158	0.272	0.394	0.030	0.263	0.067
	荒地	13.200	5.975	1.058	0.842	1.242	0.247	0.133	0.020	0.012	0.015
大雨事件	人工果林	3.464	2.242	2.361	2.419	1.012	0.033	0.018	0.015	0.022	0.006
	耕地	8.123	5.731	2.546	1.741	3.611	0.068	0.043	0.019	0.014	0.031
	坡耕地	2.964	2.408	2.636	2.327	1.228	0.034	0.017	0.022	0.023	0.011
	竹林	5.699	3.759	4.601	4.319	3.022	0.041	0.021	0.034	0.043	0.030
	城镇用地	5.267	7.108	4.933	4.383	2.942	0.037	0.062	0.039	0.077	0.029
	荒地	4.917	4.125	3.258	3.400	4.250	0.045	0.036	0.037	0.047	0.038
暴雨事件	人工果林	3.708	2.425	2.725	3.133	1.350	0.043	0.027	0.022	0.033	0.007
	耕地	8.518	5.060	3.673	1.917	4.088	0.080	0.040	0.031	0.020	0.038
	坡耕地	4.627	2.875	3.406	2.894	1.154	0.065	0.031	0.033	0.035	0.011
	竹林	7.074	8.433	4.731	7.072	4.800	0.049	0.053	0.053	0.066	0.055
	城镇用地	8.792	7.275	6.142	8.158	6.167	0.081	0.092	0.062	0.142	0.065
	荒地	6.633	5.575	5.067	19.283	12.697	0.068	0.066	0.075	0.165	0.131

对于小雨事件, 林地和耕地土壤含水率响应较小; 而城镇用地土壤含水率波动起伏较大, 且土壤含水率峰值与降水峰值较为一致, 表层响应程度最大, 各层 R_s 均超过 1%, C_v 均超过 0.01, 说明城镇用地下土壤含水率对于小雨事件响应也较为敏感; 荒地表层土壤含水率响应与城镇用地较为相似。对于中雨事件, 各土壤墒情站点对降水的响应程度相对小雨事件较大, 有植被覆盖的墒情站点(人工果林、耕地、坡耕地和竹林)仅林地(人工果林和竹林)表层(10 cm)土壤含水率响应程度较大($R_s > 3\%$, $C_v > 0.04$), 而其余各站点各土层响应幅度均相对较低; 城镇用地各土层土壤含水率对降雨响应均相对较大, R_s 均超过 2% (表层 10 cm 和 20 cm $R_s > 10\%$), 10 cm、20 cm 和 60 cm 土层 $C_v > 0.2$; 对于荒地, 表层土壤含水率响应较大($R_s > 5\%$) 且 $C_v > 0.1$ 。

大雨事件下各站点土壤墒情均有明显的响应特征, R_s 均超过 1%, C_v 基本超过 0.01, 说明大雨事件下土壤含水率均受到较大影响。从响应幅度来看, 耕地、竹林、城镇用地和荒地 R_s 相对较大, 且表层土壤响应程度相对较大。暴雨事件降水强度大、持续时间长, 各站点土壤含水率随降水均呈现较大的波动。杨梅林和坡耕地各层土壤含水率随降水过程持续上升, 土壤含水率峰值与降水峰值出现时间较为吻合; 而后随着降

水量的进一步增大，土壤含水率呈现波动上升的趋势。各站点 R_s 基本超过 2%， C_v 基本超过 0.02。其中，城镇用地和荒地 R_s 最大(基本超过 6%)，且波动程度较大(C_v 基本大于 0.06)。对于降水结束后土壤含水率的消退过程，城镇用地和荒地较快，而林地消退过程较慢，土壤维持田间持水量时间较长，主要由于植被具有较好的蓄水保墒作用，土壤含水率能保持相对较高水平，而城镇用地和荒地缺少植被的蓄水能力，在降水结束后，由于夏季温度较高，土壤含水率消退较快。

同时，前期湿度也是影响土壤水动态响应的重要因素，在前期土壤湿度相对较高的情况下土壤水涨幅相对较低(图 2)。综合来看，随着降水强度的增加，土壤含水率涨幅与变动程度均呈增加趋势。但不同土地利用/覆被下土壤水响应模式也有较大差异。植被覆盖率较低的城镇用地和荒地土壤含水率对低量级降水事件较为敏感，而植被覆盖率较高的土地利用类型则对高量级降水事件才有所响应。同时，植被对土壤水消退过程影响也较大，城镇用地与荒地随降水过程呈现明显的增加和消退过程，而有植被作用的土地利用类型(如林地)则表现出缓慢上升和缓慢消退的过程。土壤含水率的涨落反映了地表产流过程，城镇用地产流较快，可能导致区域洪水峰值提前，洪水量级增加。

2.2 快速城市化地区中小流域暴雨洪水响应规律

洪水特征是反映流域水文情势的重要指标，可为洪水预报、水文模拟和流域规划与洪水资源管理等提供重要参考。本文通过分析洪水特征与流域自然地理特征之间的响应关系，探讨长三角地区洪水的主要影响因素，结果如图 3 所示。

洪峰滞时分布总体受流域尺度控制，表现为随流域面积的增加而增加。但也存在一定异常情况，对于双桥浜集水小区和画龙溪流域，流域面积均不足 10 km^2 ，但面积更小的双桥浜集水小区的洪峰滞时却与画龙溪流域的洪峰滞时分布类似。同时，对于洛阳河流域和南苕溪流域，面积较小的洛阳河流域的洪峰滞时却总体较大。从欧洲洪水(图 3(a)红色虚线为欧洲流域洪峰滞时的下限)^[17]分布特征来看，在不同气候区洪峰滞时总体分布较为类似。对于小尺度流域，其洪峰滞时随流域面积增加增长较缓；而对于较大尺度流域，其洪峰滞时随面积增加更明显。

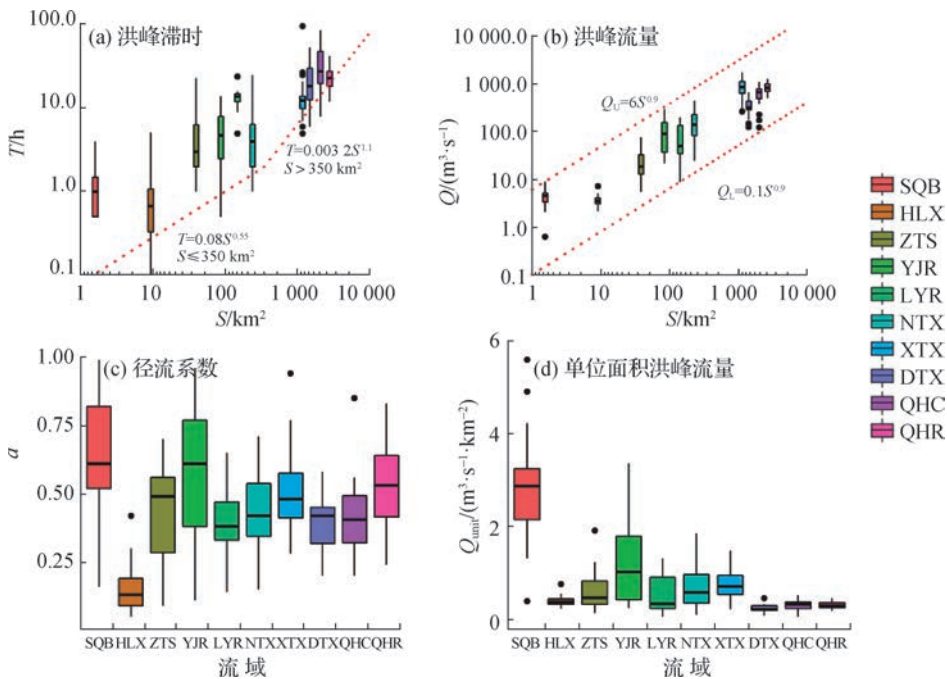


图 3 长三角地区不同特征流域洪水响应特征

Fig.3 Characteristics of flood responses for different basins in the Yangtze River Delta region

图 3(b) (Q_U 和 Q_L 分别为洪峰流量的上、下外包线) 反映了各流域洪峰流量的分布特征, 结果表明洪峰流量与流域尺度存在幂律函数关系。洪峰流量总体呈现随流域面积增加而增加的趋势, 整体分布在拟合函数区间内, 这与中国历史极端洪水洪峰流量分布特征较为相似^[20]。图 3(c) 显示了各试验流域径流系数分布特征, 结果表明, 在最小的 2 个流域(双桥浜集水小区与画龙溪流域) 径流系数分别有最高和最低分布特征, 双桥浜集水小区为城市流域, 不透水面比率最高, 而画龙溪流域为山区小流域, 不透水面比率最低; 而对于其他流域, 径流系数分布较为集中, 主要在 0.25 ~ 0.65 范围内。图 3(d) 反映了各流域的单位面积洪峰流量的分布特征, 双桥浜集水小区单位面积洪峰流量相对较高, 可能与流域不透水面比率有关。

2.3 快速城市化地区产汇流机制分析

从产流机制来看, 在以超渗产流机制为主的地区, 径流深主要与降水强度有关, 雨强越大, 径流深及洪峰越大; 而在以蓄满产流机制为主的地区, 径流深和洪峰的大小主要由降水量大小决定^[21]。本研究基于观测获取的 250 余场次的暴雨洪水资料, 通过皮尔逊相关分析, 分析了洪水特征与各降水指标(总降水量、平均降水强度及最大降水强度) 和前期条件(起始流量和前期降水) 的相关性(表 3), 从而探讨长三角地区中小流域洪水特征的主要影响因素与产汇流特征。

表 3 长三角各流域洪水特征与降水及前期湿度特征的相关性

Table 3 Pearson correlation coefficient of floods with respect to rainstorm and antecedent wetness characteristics

洪水特征	影响因素	SQB	HLX	ZTS	YJR	LYR	NTX	XTX	DTX	QHC	QHR
Q	P	0.63**	0.73**	0.63**	0.49**	0.89**	0.51*	0.60**	0.86**	0.59**	0.67*
	I _{ave}	0.67**	0.60**		0.39*	0.87**	0.40	0.50**	0.69**	0.44*	—
	I _{max}	0.71**	0.68**	0.54*	—	0.80**	0.46*	0.52**	—	0.51**	0.71*
	Q ₀	—	0.40**	—	—	—	—	—	—	0.40*	—
	P _a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Q _{unit}	P	0.74**	0.80**	0.78**	0.50**	0.90**	0.41*	0.63**	0.90**	0.67**	0.68*
	I _{ave}	0.78**	0.62**	—	0.37*	0.85**	0.44*	0.45**	0.76**	0.41*	—
	I _{max}	0.82**	0.76**	—	—	0.72**	0.47*	0.46**	0.50*	0.55**	0.77**
	Q ₀	—	0.34*	—	—	—	—	—	—	0.52**	—
	P _a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R	P	0.98**	0.80**	0.94**	0.81**	0.94**	0.78**	0.93**	0.94**	0.95**	0.95**
	I _{ave}	0.44*	—	—	0.46**	0.77**	—	—	0.61**	—	—
	I _{max}	0.41*	0.49**	—	0.36*	0.58*	—	—	0.29	0.54**	0.80**
	Q ₀	—	—	—	—	—	—	—	—	0.46*	—
	P _a	—	—	—	—	—	—	—	—	-0.38*	—
a	P	—	—	—	—	0.65*	—	—	0.57**	—	—
	I _{ave}	—	—	—	-0.42**	0.72**	—	—	—	—	—
	I _{max}	—	—	—	-0.35*	—	—	—	—	—	—
	Q ₀	—	-0.34*	—	0.35*	—	—	—	—	—	—
	P _a	0.40*	—	—	—	—	—	—	—	—	-0.60*

注: ** 代表 $p < 0.01$; * 代表 $p < 0.05$; — 代表不显著相关性。

对于洪峰流量与单位面积洪峰流量, 降水特征与洪水要素在大部分流域均呈现显著的正相关性, 表明降水量越大、降水强度越高, 产生的洪峰流量和单位面积洪峰流量越大。同时, 对于双桥浜集水小区, 相较于其与总降水量的相关性, 洪峰流量和单位面积洪峰流量与雨强的相关性较大; 而对于其他较大流域, 洪峰流

量与总降水量的相关性更大。径流深与总降水量在各流域均呈现较强的相关性, 相关系数大于 0.7, 而与雨强的相关性较低, 说明径流深主要受总降水量影响。径流系数与各降水特征在各流域的相关性均较低, 说明径流系数的影响因素更为复杂。从结果来看, 长三角地区各流域洪水特征与总降水量相关性较强, 说明蓄满产流是该地区的主要产流方式。但对于面积较小的流域(如 SQB 和 HLX, 表 3), 降水强度与洪水特征的相关性大于总降水量, 说明 2 种产流机制(蓄满和超渗产流)差别较小。

流域前期条件也是影响洪水过程的重要因素。长三角地区各观测流域洪水特征与前期条件仅在较小(如双桥浜集水小区和画龙溪流域)和较大(前埠村和秦淮河流域)的流域存在一定的显著性相关, 但在其他流域相关性较低且不显著。这可能主要由于该区域属于季风性湿润地区, 洪水主要发生在汛期, 气候湿润, 各流域前期条件相似, 故较难体现出流域前期条件对洪水的相对影响。

2.4 城市化对暴雨洪水过程的影响

快速城市化地区不透水面大幅扩张, 取代了原来的自然下垫面(如植被、水面等), 不透水面通常具有弱透水率、低反射率以及大热容量等物理属性, 城市下垫面物理属性的改变将可能直接影响水文循环的大气降水和产汇流过程^[1,22-23]。前述结果表明, 城镇用地土壤水消退过程较快, 而林地由于植被作用土壤含水率在降雨后还能维持较高水平; 主要由于城镇用地土壤存在严重压实退化现象, 土壤重度和体积质量较大, 孔隙度较低, 土壤最大有效含水率明显减少^[24]; 同时, 植被减少也使得土壤蓄水能力减弱。城市化发展带来的土地利用变化会改变土壤水运移过程, 从而影响水循环过程。

从流域暴雨洪水响应来看, 城市集水小区(双桥浜)径流系数和单位面积洪峰流量相对较高(图 3), 说明不透水面率对洪水过程作用相对较大。城市化区域不透水面扩张, 改变土壤水动态响应规律, 导致降雨下渗减少, 径流系数增加, 从而导致洪峰水位(流量)上升^[25-26]。从秦淮河流域 1981—2018 年年最大径流和不透水面变化趋势来看, 随着城市化快速推进, 洪水峰值也呈现整体上升的趋势(图 4)。值得注意的是, 从美国东部城市化地区来看, 城市化对洪水过程的影响也表现出较大的不确定性和复杂性^[27]。同时, 变化环境下气候变化引起的极端降雨变化也是导致区域洪水变化的重要因素之一, 在城市化和气候变化影响下, 洪水灾害威胁可能将更为严重^[28]。

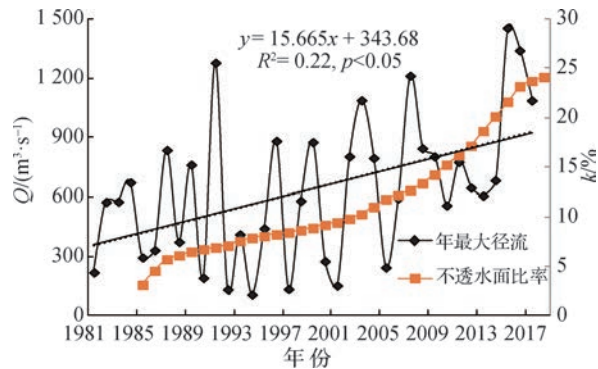


图4 秦淮河流域 1981—2018 年期间年最大径流和不透水面比率变化趋势

Fig. 4 Temporal variation of annual maximum discharge and impervious area rate of QHR during 1981—2018

3 结 论

本研究以长三角地区为典型, 构建了考虑不同城市化程度和不同空间规模的野外观测试验区, 主要观测时段为 2015 年 9 月至 2020 年 12 月, 累计获取了 250 余场次暴雨洪水观测资料, 探讨了不同特征流域暴雨洪水响应规律和机制, 主要结论如下:

(1) 快速城市化地区下垫面的改变通过影响土壤水动态响应模式直接影响了地表产流过程。城镇用地土壤含水率波动对于小雨事件亦起伏较大,均高于其他下垫面类型,且随着降水量级的增加呈现增加态势。植被覆盖率较高的土地利用类型对高量级降水事件才有所响应,而植被覆盖率较低的城镇用地和荒地土壤含水率对低量级降水事件也较为敏感。

(2) 流域空间尺度对洪水特征起到主要作用,洪峰滞时和洪峰流量与流域面积存在幂律关系。其中,洪峰滞时随流域面积增加而增大,且较大尺度流域洪峰滞时随面积增加更明显;洪峰流量总体呈现随流域面积增加而增加的态势,整体分布存在一定规律性。

(3) 降水特征与洪水特征存在较强的相关性,蓄满产流是该地区主要的产流方式。总降水量与洪峰流量、单位面积洪峰流量和径流深呈显著相关关系(相关系数分别达0.49、0.41和0.78以上)。此外,城市下垫面对洪水特征影响不可忽视,城市化快速发展下不透水面比率增加,导致降雨下渗减少、径流系数增加,从而导致洪峰水位上升,未来区域洪涝风险还有加剧的趋势。

尽管近年来中国水文试验研究陆续有所恢复与增加,但由于研究周期较长,经济成本较高,不确定性较大,目前在设备和流域丰富性等方面还有较大提升空间。本研究构建了考虑不同城市化程度和不同空间规模的野外观测试验区,研究成果将为中国类似城市化地区水文观测试验与暴雨洪水演变机理研究提供一定参考。但由于野外原位观测难以严格控制试验条件,本研究在径流和土壤墒情站点数量及站点布设等方面还有待提高,后续将继续开展水文观测试验,进一步延长与丰富数据,从而更为深入地揭示城市化下暴雨洪水演变规律和机制。

参考文献:

- [1] 刘国伟. 水文科学的基本问题及当代前沿[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 685-689. (LIU G W. Basic problems and frontier of hydrology[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 685-689. (in Chinese))
- [2] 徐宗学, 程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础: 城市水文学研究进展[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 53-61. (XU Z X, CHENG T. Basic theory for urban water management and sponge city: review on urban hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 53-61. (in Chinese))
- [3] 顾慰祖, 尚曼廷, 翟劭焱, 等. 天然实验流域降雨径流现象发生的悖论[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 471-478. (GU W Z, SHANG M T, ZHAI S Y, et al. Rainfall-runoff paradox from a natural experimental catchment[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 471-478. (in Chinese))
- [4] HOPMANS J W, PASTERNAK G. Experimental hydrology: a bright future[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(2): 117-120.
- [5] 胡和平, 田富强. 物理性流域水文模型研究新进展[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 511-517. (HU H P, TIAN F Q. Advancement in research of physically based watershed hydrological model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(5): 511-517. (in Chinese))
- [6] CHEN Y, LI J, XU H. Improving flood forecasting capability of physically based distributed hydrological models by parameter optimization[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 20: 375-392.
- [7] FU C S, CHEN J Y, DONG L Y, et al. Field investigation and modeling of runoff generation in a granitic catchment in Zhuhai, China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 458/459: 87-102.
- [8] 李新, 刘绍民, 马明国, 等. 黑河流域生态-水文过程综合遥感观测联合试验总体设计[J]. 地球科学进展, 2012, 27(5): 481-498. (LI X, LIU S M, MA M G, et al. HiWATER: an integrated remote sensing experiment on hydrological and ecological processes in the Heihe River basin[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(5): 481-498. (in Chinese))
- [9] 刘金涛, 韩小乐, 刘建立, 等. 山坡表层关键带结构与水文连通性研究进展[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 112-122. (LIU J T, HAN X L, LIU J L, et al. Understanding of critical zone structures and hydrological connectivity: a review[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(1): 112-122. (in Chinese))
- [10] 王船海, 华文娟, 杨海, 等. 平原水文实验区(流域)的发展及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 7-15. (WANG C H, HUA W J, YANG H, et al. The development and application of hydrological experimental areas (catchment))

- ments) in plains[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(1): 7-15. (in Chinese))
- [11] 张小娜, 冯杰, 刘方贵, 等. 土壤大孔隙对坡地产汇流和溶质运移影响研究[J]. *水电能源科学*, 2009, 27(1): 32-36. (ZHANG X N, FENG J, LIU F G, et al. Analysis of effect of soil macropore on slope runoff yield and concentration and solute transport[J]. *Water Resources and Power*, 2009, 27(1): 32-36. (in Chinese))
- [12] 董秀颖, 蒋蓉, 李舒宝. 水文实验研究的现状与发展探讨[J]. *水文*, 2013, 33(6): 21-24. (DONG X Y, JIANG R, LI S B. Discuss on development of hydrological experimental stations[J]. *Journal of China Hydrology*, 2013, 33(6): 21-24. (in Chinese))
- [13] BURT T P, MCDONNELL J J. Whither field hydrology? The need for discovery science and outrageous hydrological hypotheses [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 5919-5928.
- [14] WAGENER T, SIVAPALAN M, TROCH P A, et al. The future of hydrology: an evolving science for a changing world[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(5): 1-10.
- [15] 芮孝芳, 梁霄. 水文学的现状与未来[J]. *水利水电科技进展*, 2011, 31(2): 1-4. (RUI X F, LIANG X. Present situation and future of hydrology[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2011, 31(2): 1-4. (in Chinese))
- [16] CHEN Y, XU C Y, CHEN X W, et al. Uncertainty in simulation of land-use change impacts on catchment runoff with multi-timescales based on the comparison of the HSPF and SWAT models[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 486-500.
- [17] CREUTIN J D, BORGA M, GRUNTFEST E, et al. A space and time framework for analyzing human anticipation of flash floods [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 482: 14-24.
- [18] NATHAN R J, McMAHON T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses [J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [19] ZUCCO G, BROCCA L, MORAMARCO T, et al. Influence of land use on soil moisture spatial-temporal variability and monitoring[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 516: 193-199.
- [20] YANG L, YANG Y, SMITH J. The upper tail of flood peaks over China: hydrology, hydrometeorology, and hydroclimatology [J]. *Water Resources Research*. 2021, 57(11): 1-25.
- [21] 王国庆, 翟然, 万思成, 等. 清流河流域场次暴雨洪水特征及其对降水的响应关系[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(4): 7-11. (WANG G Q, ZHAI R, WAN S C, et al. Characteristics of storm floods and its responses to precipitation indices for the Qingliu River catchment[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(4): 7-11. (in Chinese))
- [22] YANG L, SMITH J, BAECK M L, et al. Structure and evolution of flash flood producing storms in a small urban watershed[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(7): 3139-3152.
- [23] YANG L, NI G H, TIAN F Q, et al. Urbanization exacerbated rainfall over European suburbs under a warming climate[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(21): 1-11.
- [24] 杨金玲, 张甘霖, 赵玉国, 等. 城市土壤压实对土壤水分特征的影响: 以南京市为例[J]. *土壤学报*, 2006, 43(1): 33-38. (YANG J L, ZHANG G L, ZHAO Y G, et al. Effect of compaction on soil water characteristics: a case study of Nanjing [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 33-38. (in Chinese))
- [25] MILLER J D, KIM H, KJELDSEN T R, et al. Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 515: 59-70.
- [26] ZHOU F, XU Y P, CHEN Y, et al. Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 485: 113-125.
- [27] ZHOU Z Z, SMITH J A, YANG L, et al. The complexities of urban flood response: flood frequency analyses for the Charlotte metropolitan region[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(8): 7401-7425.
- [28] YIN J B, GENTINE P, ZHOU S, et al. Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4389.

Multi-scale hydrological experimental observations and responding mechanisms of storm floods in rapid urbanization areas*

WANG Qiang, XU Youpeng, YU Zhihui, LIN Zhixin, GAO Bin

(*School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China*)

Abstract: Rapid urbanization processes alter the regional underlying surface, leading to changes in the hydrological cycle. Such changes have made it difficult to explain the traditional water yielding and runoff routing mechanism, which necessitates our new exploration. In this paper, taking the Yangtze River Delta region as an example, we have conducted the experimental observations in basins with the different urbanization levels and different space scales. Via the collected first-hand hydrologic data, namely, rainfall, soil moisture, and streamflow with high resolutions (5 min time intervals), we adopted data-driven flood feature analysis to reveal the responses of the flood characteristics, such as flood lag time and peak discharge. Then, we discussed the response mechanism of rainstorm and flood in rapid urbanization areas. The main conclusions are as follows: ① Compared with other land use/cover types, the response of soil moisture for urban land are more intense under different rainstorm events (usually increasing more than 4% for the surface layer). The change of underlying surface in urbanized area affects the processes of surface runoff by influencing the dynamics of soil moisture. The soil moisture content of urban land and wasteland with low vegetation coverage showed steep rise and fall with the beginning and end of rainfall, while that of land use with higher coverage showed slow rise and decline trends. ② Flood peak lag time and peak discharge are mainly controlled by watershed scale. There have power law relationships between flood lag time and peak flow with watershed scale, and factors such as impervious surface and topography also have some influences on flood characteristics. ③ Rainstorm is a direct driving factor of flood in the Yangtze River Delta region. Rainfall characteristics are strongly correlated with the peak discharge, peak discharge per unit area, and runoff depth, with correlation coefficients above 0.49, 0.41 and 0.78, respectively. In general, the natural geographical characteristics and rainfall are the main factors affecting the flood characteristics, but the impact of the urban underlying surface on the flood characteristics cannot be ignored. The processes of rainstorm floods have been directed affected by the modification of soil moisture dynamics due to urbanization. Under the dual role of urbanization and climate change, the regional flood risk would be intensified in the future.

Key words: urbanization; rainstorm flood; response characteristics; multi-scale experimental observations; the Yangtze River Delta region

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No.42101020; No.U2240203).