

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210473

长三角小流域水文观测试验与产汇流机制

赵艳¹, 王强², 高斌², 林芷欣², 于志慧², 许有鹏², 傅维军²

(1. 浙江省宁波市鄞州区水利局, 浙江 宁波 315012;
2. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要:变化环境下洪涝灾害呈加剧趋势,探讨暴雨洪水响应机理成为了地理、水文等学科关注的重难点问题之一。本研究基于野外综合对比观测试验,探讨了不同土地利用/覆被下的土壤水响应特征及产汇流机制。结果表明:长三角地区长时间序列土壤含水率季节性变化较小,其变化幅度总体表现为表层和汛期较大,而深层和非汛期较小。杨梅林纵剖面土壤含水率从上到下呈现逐渐增加的趋势,而耕地和竹林趋势相反。从表层到深层,山坡地、城镇用地和荒地土壤含水率呈现反S型、W型和V型波动变化特征。试验流域洪水特征与总降雨量相关性较强,蓄满产流是该地区主要产流方式。城市化区域不透水面扩张,导致降雨下渗减少,径流系数增加,从而使得洪峰水位上升。

关键词:变化环境;野外对比观测试验;水文响应;产汇流特征;长三角

中图分类号:P332

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2023)02-0072-06

0 引言

变化环境下极端降雨事件的频率和强度有增加趋势,同时,城市下垫面也改变了区域水文循环过程及局地气候特征,洪水灾害威胁增大。针对日益突出的暴雨洪水问题,探讨城市化地区洪水响应机制成为了地理、水文等学科关注的热点与难点问题之一^[1-2]。

关于城市化地区的洪水响应问题,国内外学者主要从野外观测和模型模拟两方面着手。野外试验通过直接观测获取第一手资料,揭示不同条件下的水循环机理^[3-7]。模型模拟主要通过情景设计,探讨不同情况下的水文响应规律。但随着降雨径流关系研究的深入,更高精度和更系统完整的观测资料成为迫切需要^[5, 8-10]。随着水灾害和水环境问题日益突出,许多学者通过典型城市小区的观测揭示城市化对产汇流规律的影响^[9, 11-13]。同时,低影响开发、海绵城市等措施的实施也有效改善了城市地区洪涝和

生态环境问题^[14-17]。

城市化地区经济和人口较为集中,不透水面大规模扩张,河网水系锐减,洪水灾害威胁加剧。但由于观测资料限制,目前对于城市化对暴雨洪水的具

1 研究区概况及水文试验方案

在开展大量野外调研的基础上,选取了长三角东南奉化江下游两个观测条件较好的闭合流域,即画龙溪(HLC)和鄞江镇(YJR)流域(图1),开展了不同土地利用/覆被下的水循环要素同步观测^[18]。该地区呈蝶形,东西两侧为丘陵地区,中部为平原河网地区。两个试验流域空间规模较小,距离相近,地形差异较小。画龙溪试验流域(9.4 km²)城市化水平较

收稿日期:2021-11-13

网络首发日期:2023-04-06

网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1814.P.20230404.1704.002.html>

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(42101020);江苏省水利科技项目(2021010);中国博士后科学基金(2021M691529)

作者简介:赵艳(1990—),女,浙江宁波人,工程师,主要研究方向为水文与水资源工程。E-mail: zhaoy18@163.com

通信作者:王强(1992—),男,安徽岳西人,助理研究员,主要研究方向为水文水资源。E-mail: wqianghy@nju.edu.cn

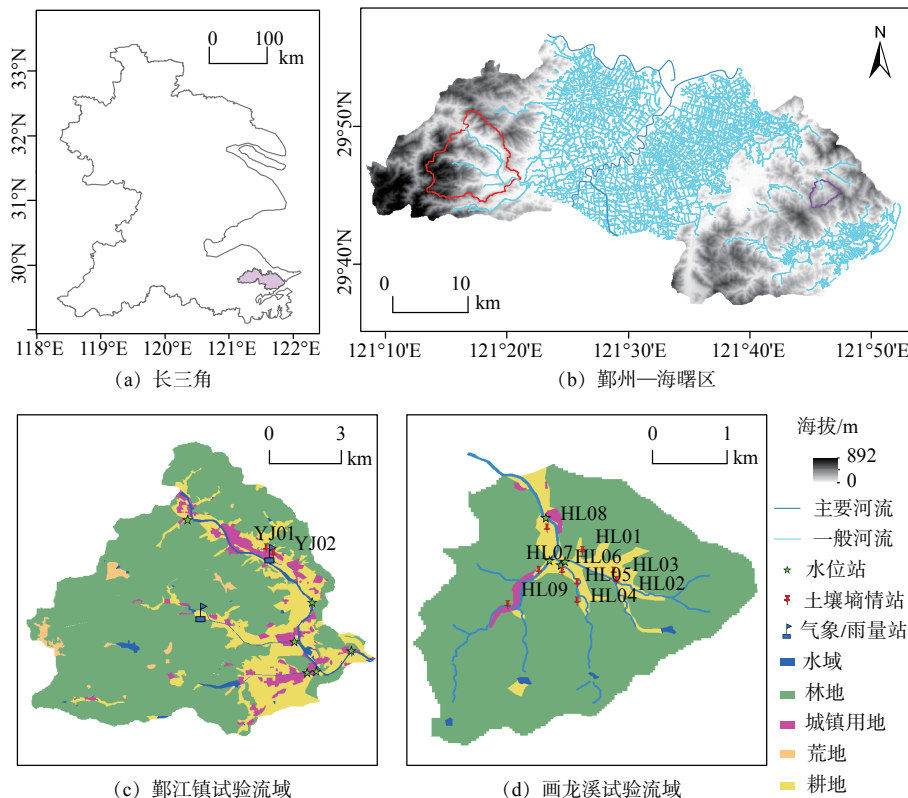


图1 试验流域观测站点布设及区位图
Fig.1 Locations maps of experimental basins and its observation station network

低,人类活动影响有限,开展不同土地利用/覆被类型下的产流特性分析,反映人类活动影响较低情况下的产汇流规律。鄞江镇试验流域(88 km²)人类活动较为剧烈,村镇沿河谷分布,主要开展城市化影响下的综合观测试验,反映人类活动影响下的产汇流响应规律。

2 试验区站点布设及数据获取

画龙溪流域布设站点包括2个气象站,4个水位站,9个雨量站和9个土壤墒情站,土壤墒情站主要布设于自然下垫面类型,如人工果林(杨梅林)、耕地、坡耕地、竹林等。鄞江镇流域墒情站点主要布设于代表城市下垫面的类型下,如城镇用地和荒地;其他站点包括2个气象站点,2个雨量站点,5个水位站点和1个流量站(雷达波测流仪)。所有墒情站点与雨量站同步安装,采用时域反射测量仪监测土壤(体积)含水率,每个站点布设5个探头,分别监测10 cm、20 cm、40 cm、60 cm和80 cm埋深的土壤水分。所有监测站点均为遥测站点(5 min间隔)。论文选取特征指标,分析不同条件下土壤墒情和洪水响应特征。通过平均

含水率和离差系数分析各站点土壤水响应特征,其中平均含水率反映了土壤持水能力,离差系数则反映了土壤水的波动程度。洪水特征包括洪峰流量(m³/s)、水位涨幅(m)、单位面积洪峰流量(m³·s⁻¹·km⁻²)、单位雨量水位涨幅(mm)和径流系数等。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用/覆被长时间序列土壤水动态响应

土壤水影响着降雨下渗、产流以及土壤侵蚀等过程^[9]。图2显示了不同土地利用/植被下典型站点长时间序列土壤墒情的动态变化规律,结果显示不同土地利用/覆被下土壤水动态响应规律存在较大差异。对于杨梅林(HL01),土壤含水率主要在30%~40%之间波动,但在7—8月份,存在含水率低于30%的情况;从表层到深层土壤含水率呈现逐渐增加的趋势(图2(a))。对于耕地(HL02),土壤含水率波动范围与HL01站点相似,但不同土层差异较小(图2(b))。对于山坡地(HL04),其不同深度土壤含水率差异较大,总体在20%~40%范围内波动,且随着土层深度增加,土壤含水率逐渐增加(图2(c))。对于竹林

(HL07),其不同土层土壤含水率差异较小,总体在30%水平上下波动(图2(d))。城镇用地(YJ01)不同土层土壤含水率差异较大,各土层土壤含水率总体在10%~30%范围内波动,深层土壤含水率较低(图2(e))。荒地(YJ02)土壤含水率总体在15%~35%范围内波动,其土壤含水率从表层到深层先减小后增加(图2(f))。

该区域的土壤含水率季节差异较小,主要由于长三角区域属于湿润气候区,土壤含水率季节性变化较小。但同时,对于具有季节性植被的土地利用类型,在夏季高温期(7—8月),土壤含水率存在较低的状态。土壤水垂向运动主要包括向下入渗和向上蒸散发,同时受到土壤结构和植被蒸腾作用的影响。夏季高温期,植被蒸腾作用强,若得不到降雨补充,土壤含水率将相对较低(如杨梅林、耕地、山坡地和竹林),可能出现骤发性干旱现象^[20];而对于植被较少的城镇用地和荒地,土壤含水率则不存在明显

的夏季低谷期。

3.2 不同土地利用/覆被下土壤水纵剖面响应特征

图3反映了典型墒情站点年平均和汛期(4—10月)土壤含水率特征,各站点年平均和汛期土壤水纵剖面响应模式基本一致(图3(a)~(b))。杨梅林纵剖面土壤含水率从上到下呈现逐渐增加的趋势。HL02(耕地)和HL07(竹林)站点土壤含水率从表层到深层变化较小,呈现一定的下降趋势。而对于山坡地(HL04),其土壤含水率从表层到深层呈现反S型波动变化趋势,先上升后下降,之后又有所上升。对于YJ01(城镇用地)站,土壤含水率从表层到深层呈现W型波动下降趋势,而YJ02(荒地)站呈现V型波动变化趋势。

试验区土壤含水率均相对较高,且植被覆盖较多的下垫面类型(如杨梅林、耕地、山坡地和竹林)相对城镇用地和荒地土壤含水率相对较高。从年平均和汛期对比来看,汛期土壤含水率相比年平均值略有降

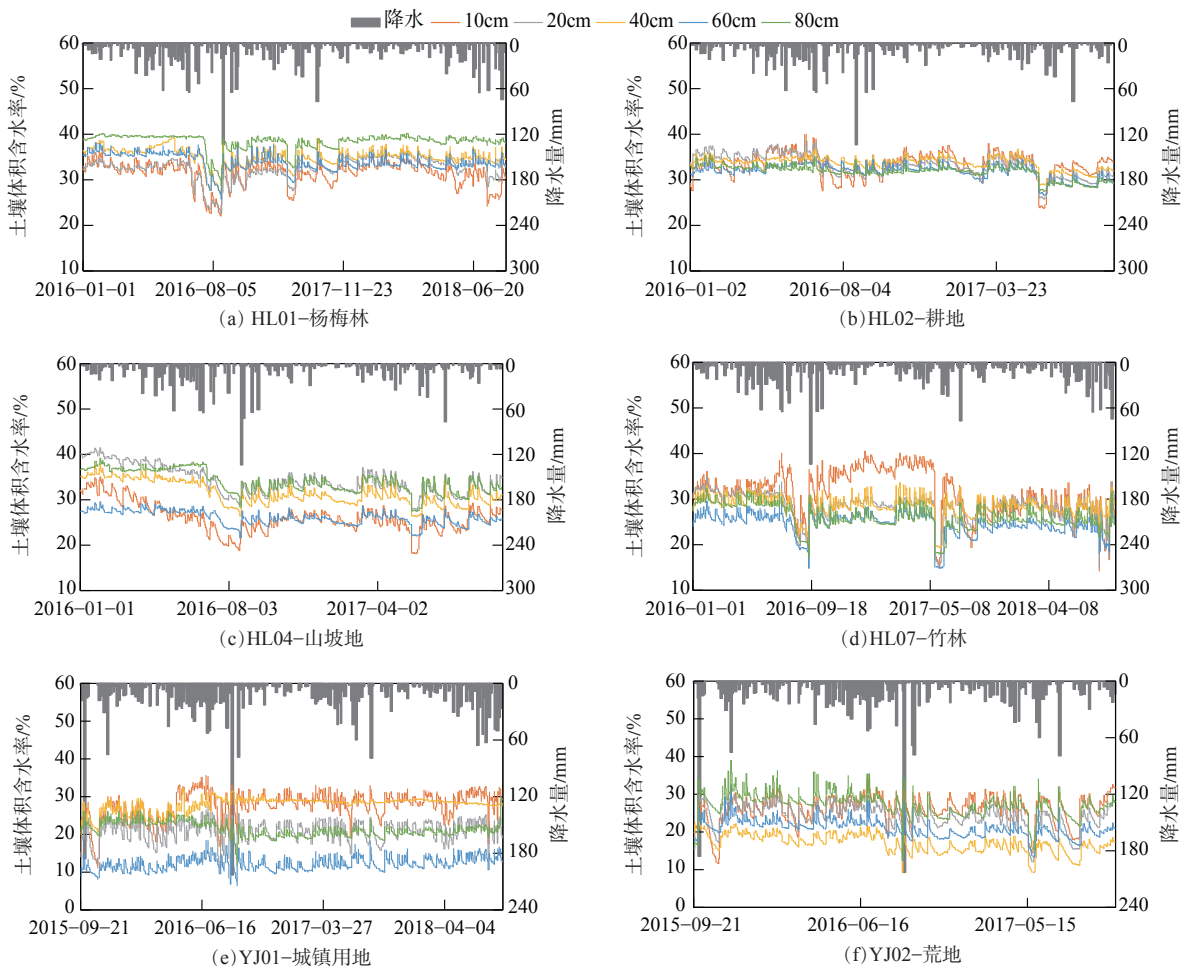


图2 长三角东南沿海试验流域典型墒情站点土壤水时间序列动态变化
Fig.2 Time series dynamical changes of soil moisture in southeast coastal experimental basins

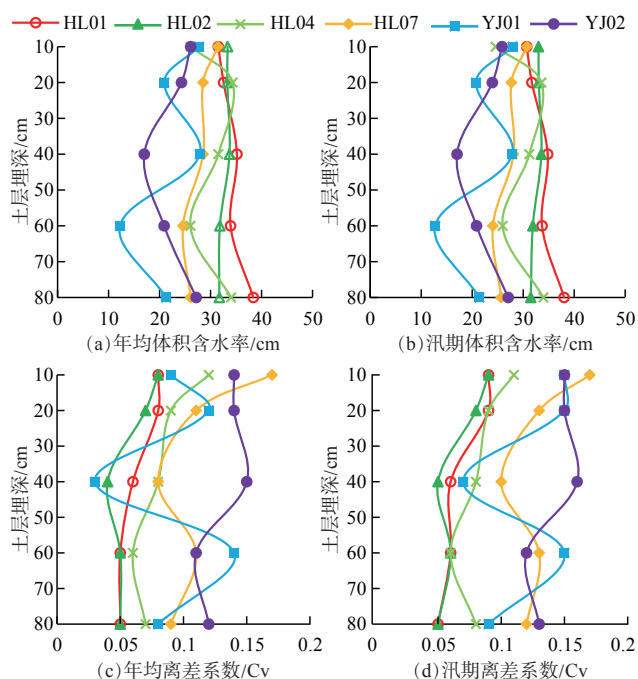


图3 不同土地利用/覆被下墒情站点土壤含水量年均(a)(c)和汛期(b)(d)特征

Fig.3 The soil moisture characteristics of soil moisture stations under different land use and cover types for annual mean (a)(c) and flood season (b)(d)特征

低,可能主要由于长三角整体气候比较湿润,尽管夏季降雨较多,而气温较高,蒸散发作用较强,所以土壤含水率相对有所降低。从离差系数来看,总体表现为表层土壤含水量变动幅度较大,深层土壤含水量变动幅度较小;汛期变动幅度较大,非汛期变动幅度较低。离差系数反映了土壤含水率的波动情况,汛期和表层土壤受到降雨影响较大,故土壤含水率离差系数

相对较大。

3.3 城市化地区产汇流机制分析

对于超渗产流机制为主的地区,雨强越大,径流深及洪峰越大;而对蓄满产流机制为主的地区,径流深和洪峰的大小主要又降雨量大小决定^[21]。根据试验流域观测数据(42场次数据),除径流系数外,洪水特征与总降雨量均呈现显著性相关关系,且相关系数基本大于0.5,这说明蓄满产流是该地区主要产流方式(表1)。同时,洪水特征主要受到流域自然地理特征和降雨的影响,而流域前期条件对气候湿润的洪水特征影响相对较小。

画龙溪流域集水面积小,植被多为天然林地和耕地,而鄞江镇流域集水面积相对较大,不透水面积比例相对较高,水位涨幅和单位雨量水位涨幅相对较大(图4)。城市化程度高的鄞江镇流域的水位涨幅和单位雨量水位涨幅均高于画龙溪流域,说明城市化率对单位面积洪峰作用相对较大。主要由于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^[12-13]。同时,变化环境下气候变化也是导致区域暴雨洪水变化的重要因素之一,在城市化和气候变化影响下,洪水灾害威胁将更为严重^[22]。城镇用地土壤存在严重压实退化现象,土壤容重和比重较大,孔隙度较低,土壤最大有效含水量明显减少;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。

表1 长三角各流域洪水特征与降雨特征的相关性

Table1 The Pearson correlation coefficient (*R*) of floods with respect to rainstorm characteristics

流域	洪水特征	总降雨量	平均降雨强度	最大降雨强度	起始流量	前期降雨
HLC	洪峰	0.73**	0.60**	0.68**	0.40**	--
YJR		0.49**	0.39*	--	--	--
HLC	单位面积洪峰流量	0.80**	0.62**	0.76**	0.34*	--
YJR		0.50**	0.37*	--	--	--
HLC	径流深	0.80**	0.28	0.49**	--	--
YJR		0.81**	0.46**	0.36*	--	--
HLC	径流系数	--	--	--	--	--
YJR		--	--	--	0.35*	--

注: **代表 $p < 0.01$, *代表 $p < 0.05$, --表示结果未达到显著性水平。

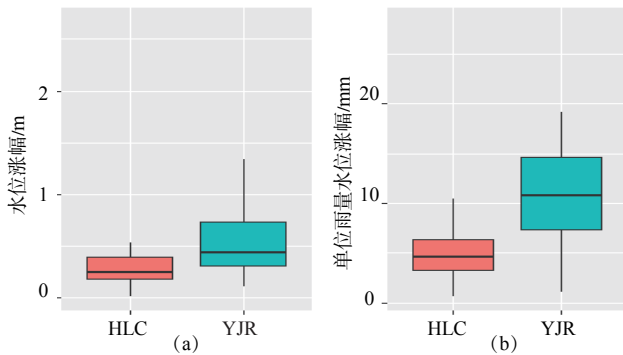


图4 画龙溪和鄞江镇流域水位涨幅和单位雨量水位涨幅

Fig. 4 The distribution of water level rise (a) and water level rise for unit rainfall (b) for HLC and YJR experimental basins, respectively

4 结论与展望

本研究基于长三角地区野外水文综合观测试验,开展了不同土地利用/覆被下的土壤水响应和产汇流规律分析,主要结果表明:

(1)长三角地区气候湿润,土壤含水率季节性变化较小,但夏季由于植被较强的蒸腾作用和降雨影响,具有季节性植被的土地利用/覆被类型土壤含水率变幅较大。离差系数反映了表层土壤水变动幅度较大,深层较小;汛期较大,非汛期较小。

(2)杨梅林纵剖面土壤含水率从上到下呈现逐渐增加的趋势,而耕地和竹林站土壤含水率变化趋势相反。山坡地土壤含水率从表层到深层呈现反S型波动变化趋势,城镇用地呈现W型波动下降趋势,而荒地站呈现V型波动变化趋势。

(3)试验流域洪水特征与总降雨量相关性较强,蓄满产流是该地区主要产流方式,其洪水特征主要受到流域自然地理特征和降雨的影响。不透水面比率较高的鄞江镇试验流域水位涨幅和单位雨量水位涨幅均高于自然画龙溪试验流域。城市化区域不透水面扩张,可能导致降雨下渗减少,径流系数增加,从而导致洪峰水位上升。

水文观测试验能为城市化水文效应问题研究提供最直接的一手观测资料,但由于试验研究周期较长,经济成本较高,不确定性较大,目前我国在观测设备和试验流域的丰富性等方面还有较大提升空间。后续将继续进一步丰富试验成果,开展土壤水动态运移过程及暴雨洪水过程模拟,进一步探讨城市化以及气候变化双重作用下的洪涝灾害演变规律。

参考文献:

- [1] 田晶, 郭生练, 刘德地, 等. 气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(11):2307-2318.
- [2] 许有鹏. 长江三角洲地区城市化对流域水系与水文过程的影响[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [3] Hopmans J W, Pasternack G. Experimental hydrology: A bright future. *Advances in Water Resources* [J]. 2006, 29(2): 117-120.
- [4] 顾慰祖, 尚慢廷, 翟劲蕊, 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(4): 471-478.
- [5] 刘昌明. 关于比较水文学的研究[J]. 地理学报, 1987, 42(2):182-188.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 冯杰. 土壤大孔隙流机理及产汇流模型[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 林俊俸, 李朝忠. 小流域都市化对暴雨洪水影响的试验研究[J]. 水文, 1990(6), 9-14.
- [12] 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.
- [13] ZHOU 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.
- [14] ECKART K, MCPHEE Z, BOLSETTI T. Performance and implementation of low impact development - A review [J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 607-608:413-432.
- [15] 俞孔坚, 李迪华, 袁弘, 等. “海绵城市”理论与实践[J]. 城市规划, 2015, 39(6): 26-36.
- [16] 王建龙, 车伍, 易红星. 基于低影响开发的雨水管理模型研究及进展[J]. 中国给水排水, 2010, 26(18):50-54.
- [17] 王文亮, 李俊奇, 宫永伟, 等. 基于SWMM模型的低影响开发雨洪控制效果模拟[J]. 中国给水排水, 2012, 28(21):42-44.
- [18] 王强, 许有鹏, 王跃峰, 等. 中国东部不同特征小流域水文对比观测试验分析[J]. 水科学进展, 2019, 30(4):467-476.
- [19] 秦道清, 赵岩, 王红瑞, 等. 基于站点观测和模式模拟的北京市土壤湿度[J]. 自然资源学报, 2019(1):191-204.
- [20] MO K C, LETTENMAIER D P. Heat wave flash droughts in decline [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(8):2823-2829.
- [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.
- [22] YIN J, GENTINE P, ZHOU S, et al. Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1):4389.

Hydrological Experiment and Rainfall-Runoff Characteristics of Small Watersheds in the Yangtze River Delta Region

ZHAO Yan¹, WANG Qiang², GAO Bin², LIN Zhixin², YU Zhihui², XU Youpeng², FU Weijun¹

(1. *Yinzhou Water Conservancy Bureau, Zhejiang Province, Ningbo 315012, China;*

2. *School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)*

Abstract: Under the nowadays changing environment, the disasters of rainstorm flood show increasing trend, however, due to the scarcity of observational data and the complexity of hydrological processes, revealing hydrologic response mechanisms have become one of the key and difficult issues in geography, hydrology, and so on. Based on two closed drainage basins in the Yangtze River Delta, comparative field observation experiments were carried out to explore the hydrological response and the mechanism of runoff generation under different land use/cover conditions. The results show that the seasonal variation of soil moisture content in the long time series due to the humid climate in the Yangtze River Delta region. The deviation coefficient of soil moisture content is larger in surface layer and flood season, but lower in deep layer and non-flood season. The soil moisture content in the longitudinal profile of bayberry forest increased gradually from surface to bottom layer, while the trend was opposite for cultivated land and bamboo forest. From surface to deep layer, soil moisture content of hillslope, urban land and wasteland showed reverse S-, W- and V-shaped fluctuation trend in the longitudinal profile. There is a strong correlation between flood characteristics and total rainfall, indicating the dominant role of runoff generation under saturated condition. Moreover, the flood characteristics are mainly influenced by the physical geographical characteristics and rainfall, while the antecedent conditions have relatively little influence in humid region. The increase of water level and unit rainfall water level in Yinjiang experimental basin with a higher impervious water level ratio were higher than that in Hualongxi experimental basin, which indicates that the expansion of impervious water surface in urbanization area may lead to the decrease of rainfall infiltration and the increase of runoff coefficient, and thus leading to the rise of flood peak.

Keywords: changing environment; hydrologic comparative observational experiment; hydrological response; rainfall-runoff characteristics; the Yangtze River Delta

=====

(上接第71页)

Responses of Blue and Green Water to Climate Change and Landuse Change in the Source Region of the Yellow River

CUI Zhouyu¹, YANG Xiaoli^{1,2}, LI Wenting¹, REN Liliang^{1,2}

(1. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;*

2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)*

Abstract: Based on the monthly meteorological data from 1961—2017 and two land use data sets (1980 and 2015) in the source region of the Yellow River, the soil and water assessment tool (SWAT) hydrological model was coupled with various scenarios. The temporal and spatial responses of climate and land use change to blue-green water were investigated. The results show that, under the climate change scenario, the blue water in the basin decreased by 16.74mm/a, and the green water increased by 19.52 mm/a; under the scenario of land use change, the blue water in the basin decreased by 1.9mm/a, and the green water increased by 3.46 mm/a; under the combined effects of climate change and land use change, the blue water in the basin decreased by 10.09 mm/a, and the green water increased by 13.39mm/a; at the same time, the contribution rate of climate change to blue/green water both exceed 140%, which could be the dominant reason for the changes in the blue and green water of the basin; spatially, under various scenarios, the blue/green water gradually increases from the northwest to the southeast in the basin. The research results could provide a reference for the formulation of water resources dispatching plans in the source region of the Yellow River.

Keywords: SWAT model; climate change; landuse change; blue-green water; source region of the Yellow River