

太湖流域城镇化小区产汇流模型研究

胡尊乐¹, 华 晨¹, 王聪聪², 胡斯玮¹, 夏玉林¹, 穆海宁³

(1. 江苏省水文水资源勘测局常州分局, 江苏 常州 213022; 2. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029;
3. 常州市河道湖泊管理处, 江苏 常州 213000)

摘要:城镇化带来的结果是流域产汇流过程发生较大变化。基于常州市双桥浜小区持续3年的降水排涝监测资料,推算了该区域2015~2017年期间17场典型的降水产汇流过程,构建了太湖流域城镇化小区的产汇流模型,可为开展城镇化背景下的江苏省太湖流域产汇流新机制及洪涝风险防控的研究及《江苏省水文手册》的修编提供技术支持。

关键词:城镇化小区; 水文计算; 产汇流模型

中图分类号:TV131.6 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2019)05-0037-06

Study on the runoff generation and concentration model of urbanized district in Taihu Lake Basin

HU Zunle¹, HUA Chen¹, WANG Congcong², HU Siwei¹, XIA Yulin¹, MU Haining³

(1. Changzhou Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Changzhou 213022, Jiangsu;
2. Jiangsu Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 210029, Jiangsu;
3. Changzhou City River and Lake Management Department, Changzhou 213000, Jiangsu)

Abstract: As a result of urbanization, the process of runoff generation and concentration model in river basins has changed greatly. Based on the monitoring data of precipitation and drainage in Shuangqiaobang residential district of Changzhou City for 3 years, 17 typical rainfall-runoff generation and concentration processes were calculated from 2015 to 2017, and the runoff generation and concentration model of urbanized district in Taihu Lake Basin was constructed, which could provide technical support for the study of the new mechanism of the rainfall-runoff processes of the Taihu Lake Basin in Jiangsu Province, the prevention and control of flood risk, and the revision of the Jiangsu Hydrological Handbook.

Key words: urbanized district; hydrological calculation; runoff generation and concentration model

1 概述

改革开放以来,江苏省太湖流域经济社会发展迅速,城镇化水平不断提高,土地利用剧烈变化,主要特征是地表不透水率明显上升,进而导致流域入渗、蒸散发、径流等水文要素发生一定的变化,从而引起流域产汇流过程的变化^[1,2]。而城镇化带来的水文效应研究已成为目前乃至未来几十年全球研

究的热点和前沿问题^[3]。与此同时,区域内修了以城市中心城区为核心的防洪排涝包围工程,破坏了天然河道的连通性,加速了洪灾风险从城市向区域及流域的转移^[4,5]。再者,由于该地区极端气候事件的频繁发生^[6,7],使得该地区洪水灾害不断加剧,严重威胁到人类的生存环境,在很大程度上制约了现代化建设进程与区域可持续发展。产汇流过程是水循环研究及保障经济社会发展的重要内容,产

收稿日期:2018-12-21

基金项目:江苏水利基金重大项目(2015003)

作者简介:胡尊乐(1970-),男,高级工程师,主要从事水文水资源工作。

汇流模型是水循环研究的主要方向。因此,对江苏省太湖流域这样经济社会高度发达的地区而言,进行城镇化下的产汇流模型构建研究是十分必要的^[8]。

为了充分揭示江苏省太湖流域城镇化小区的产汇流机制,本文依托江苏水利基金重大项目(2015003)和《江苏省水文手册》的修编,开展了常州市双桥浜小区持续3年(2015~2017年)的降水排涝监测,推算了该区域2015~2017年17场典型的降水产汇流过程,构建了太湖流域城镇化小区的产汇流模型,可为开展城镇化背景下的江苏省太湖流域产汇流新机制及洪涝风险防控的研究及《江苏省水文手册》的修编提供技术支撑。

2 研究区介绍

2.1 双桥浜小区

双桥浜小区位于常州市主城区防洪大包围圈(运北片)中北部,属太湖流域武澄锡虞城镇区较为典型的一部分。区域内地势平坦,略呈西北高、东南低之势,地面高程在5~6 m之间;双桥浜由北向南贯穿整个小区,北至锦绣路,向南在润德半岛附近分成两支,一支向西至锦绣南苑,一支向南至北塘河,河道总长1.91 km(其中西支0.27 km),河道宽约20.0 m,水面面积约38200 m²。

根据水文调查资料,其汇水区域为:北至龙城大道,东至晋陵中路,南至沪宁城际高铁和北塘河,西至通江南路,总面积为1.63 km²(约占常州市主城区的1%)。其中,交通用地0.20 km²,城市绿地0.45 km²,建设用地0.76 km²,河道0.02 km²,闲置地0.18 km²。区间主要分布有奥韵花园、锦绣东苑等多个小区。双桥浜出口处(汇入北塘河)建有泵站,泵站设计流量为4.0 m³/s。双桥浜小区土地利用情况及地形图分别见表1和图1。

表1 双桥浜小区土地利用情况统计表

(单位:km ²)					
交通用地	城市绿地	建设用地	河道	闲置地	小计
0.20	0.45	0.76	0.02	0.18	1.63

2.2 产汇流特性

双桥浜小区内铺设了雨水管网,属于典型的人工排水流域,暴雨径流集中且迅猛,无法用常规的水文学经验方法估算和推求其径流过程。研究表

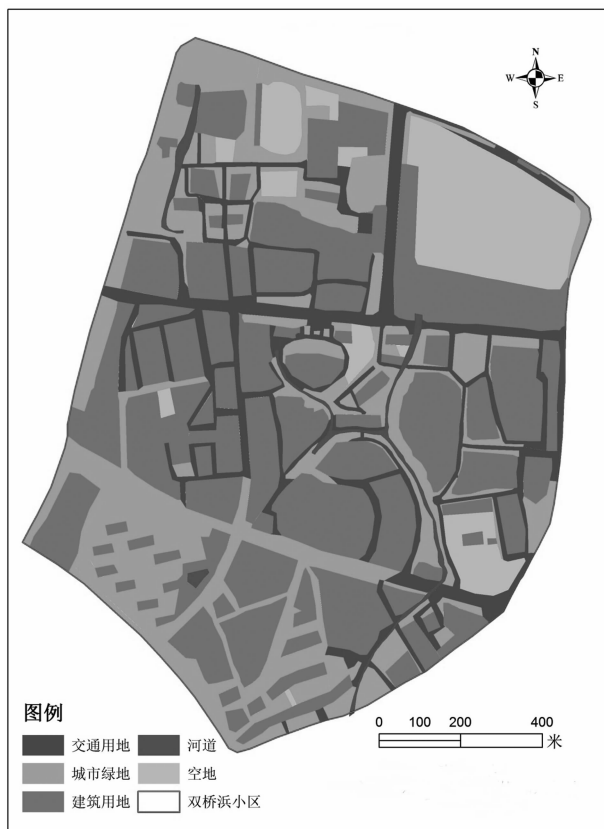


图1 双桥浜小区现状图

明^[9-11]:对于双桥浜这样高度城镇化的居民小区,由于不透水面积占比较大(58.9%),从而减少了地面下渗能力,造成地下水位降低,壤中流和基流减少,且由于不透水地表坡度增大、糙率减少致使地面汇流速度加快,造成地表径流系数、径流总量、洪峰流量均显著增加。由于城市排水系统管网化,且多数采用混凝土管道,管道坡度大(一般为1%),糙率小,相对来说水力半径增大,使径流的汇流时间缩短,故对于一场相同时空分布的净雨,其所形成的洪水过程线将越来越尖瘦,峰现时间将越来越提前。另外,同样对于双桥浜这样相对封闭、排涝设施相对完善的居民小区,其暴雨径流很容易通过泵站排出区域外,导致其产流更快,洪水“陡涨陡落”。

2.3 水文监测

(1) 站点规划和断面布设

2015年,江苏省水文水资源勘测局常州分局在双桥浜上游(锦绣路)新建遥测水位站1处,在双桥浜泵站上游新建流量监测断面1处(名人桥)。

(2) 监测内容与监测方式

从2015年起,双桥浜小区监测内容为降水量、蒸发量、水位、流量。其中,降水量、蒸发量、水位主要采用遥测方式,流量主要采用人工观测和走航式

ADCP方式。其中,降水量采用常州水位站监测数据,蒸发量采用小河新闻站监测数据,双桥浜泵站水位采用城市防洪管理处监测数据。

3 模型构建及参数率定

3.1 江苏省水文手册

1959~1965年,江苏省水文部门陆续编制《江苏省水文手册》和《江苏省水文计算参考资料》。1976年江苏省水文总站重新编制了《江苏省水文手册》^[12,13]。其中,罗列了太湖流域平原水网区(含双桥浜小区)的降水径流关系,详见表2。

表2 《江苏省水文手册》太湖流域平原水网区降水径流关系

$P + P_a$ (mm)	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200	220	240
R (mm)	1.0	3.5	6.5	9.5	13.0	17.0	27.0	38.5	51.5	66.5	82.5	101	120

3.2 前期影响雨量 P_a 计算

(1) 最大初损值 I_m

最大初损值 I_m ,也称为流域最大蓄水容量,是前期影响雨量 P_a 的上限值,它等于流域在十分干旱情况下,大暴雨产流过程中的最大损失量,包括植物截留、填洼及渗入包气带被土壤留下的雨量。根据1984年江苏省暴雨洪水图集研究成果, I_m 取值范围为75~95 mm。根据省水利厅1990年提供的旱地产流计算参数,苏南平原区最大初损值 I_m 取值90 mm。

(2) 前期影响雨量 P_a

前期影响雨量 P_a 也就是降雨开始时的初始土壤含水量,它的大小取决于前期降雨对土壤的补给量以及蒸发量对土壤含水量的消耗量,通常以1d为计算时段,逐日递推,一直计算到本次降雨开始前的 P_a 值为止,计算公式为:

$$P_{a,t+1} = \begin{cases} k(P_{a,t} + P_t), & k(P_{a,t} + P_t) < I_m \\ I_m, & k(P_{a,t} + P_t) \geq I_m \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{a,t+1}$ 、 $P_{a,t}$ 分别表示第 $t+1$ 日、 t 日的前期影响雨量,mm; P_t 表示第 t 日的降水量,mm; k 为土壤含水量的日消退系数或折减系数,根据1984年江苏省暴雨洪水图集研究成果, k 取值0.90~0.93。根据省水利厅1990年提供的旱地产流计算参数,苏南平原区土壤含水量的日消退系数 k 取值0.90。本文经过试算,拟采用0.93,详见表3。

本文计算假定2015年1月1日 P_a 值为0.5 I_m ,然后逐日计算,一直计算到2017年12月31日(计

算过程略)。

表3 江苏省旱地产流计算参数表

下垫面类型	k	I_m	C_p	C_i
山丘区	0.93	95	11	100
平原区	0.90~0.93	75~90	13	60

3.3 径流深 R

本文根据双桥浜小区2015~2017年实测降水量、水位、排涝量及双桥浜断面数据(计算库容),反推出双桥浜小区入库水位流量过程,并采用面积包围法计算1场雨洪过程的径流深。其中,雨洪场次

选择方法为过程雨量接近或超过50 mm,且双桥浜泵站进行排涝调度。

径流深采用面积包围法计算,计算公式为:

$$R = \frac{10 \times (Q \cdot T + \Delta V)}{S} \quad (2)$$

式中: R 表示1场洪水过程的径流深,mm; Q 表示一场洪水过程的实测平均排涝流量, m^3/s ; T 表示1场洪水历时,万s; ΔV 表示1场洪水过程的河道库容变量(根据双桥浜水位库容曲线推算),万 m^3 ; S 表示双桥浜小区集水面积, km^2 。

双桥浜1场洪水径流深计算过程示例见表4。

3.4 产流参数计算

与江苏省1984暴雨洪水图集一致,本文设定降雨产流模型为双曲线函数,产流公式为:

$$R = \sqrt[3]{(P + P_a - C_p)^3 + C_i^3} - C_i \quad (3)$$

式中: R 为径流深, P 为面平均次雨量, P_a 为前期雨量,mm; C_p 、 C_i 为待定产流参数。

根据实测降雨量 P 和计算得到的前期影响雨量 P_a 及径流深 R ,采用最小二乘法原理和Excel规划求解功能可方便地进行率定,本文率定成果为: $C_p = 10$, $C_i = 90$ 。

径流深计算公式为:

$$R = \begin{cases} \sqrt[3]{(P + P_a - 10)^3 + 90^3} - 90, & P + P_a < 90 \\ 0.80 \times (P + P_a) + 20, & P + P_a \geq 90 \end{cases} \quad (4)$$

双桥浜小区降雨产汇流关系计算结果见图2和表5。

表 4 双桥浜洪水过程计算表

时间	降水量(mm)	水位(m)	库容(万 m ³)	排涝流量(m ³ /s)	产流量(m ³ /s)
2015/8/31 16:00		3.82	414.90		0
2015/8/31 16:30	0.5	3.82	415.86		0.053
2015/8/31 17:00	35.5	3.80	408.60	3.78	3.38
2015/8/31 17:30	13.0	3.88	433.80	3.78	5.18
2015/8/31 18:00		3.96	459.00	3.78	5.18
2015/8/31 18:30		3.99	468.50	3.78	4.31
2015/8/31 19:00		3.93	449.60	3.78	2.73
2015/8/31 19:30		3.99	468.50		1.05
2015/8/31 20:00		4.01	474.80		0.350
2015/8/31 20:30		4.02	478.54		0.208
2015/8/31 21:00		4.03	481.10		0.142
2015/8/31 21:30		4.04	484.20		0
总降水	49.0			平均流量	1.88

表 5 双桥浜小区产汇流参数计算表

开始时间	结束时间	汇流时间 (d)	平均流量 (m ³ /s)	径流深 (mm)	P	径流 系数	P_a	实测旱地径 流深 R (mm)	$P + P_a$	计算径流 深 R (mm)	误差 (%)
2015/06/02 0:00	2015/06/03 4:00	1.17	1.20	74.07	129.5	0.572	46.3	70.824	175.8	78.640	-5.8
2015/06/15 21:00	2015/06/17 19:00	1.92	1.28	130.34	187.0	0.697	50.0	124.449	237.0	127.600	2.1
2015/06/25 16:00	2015/06/29 17:00	4.04	1.45	310.17	367.5	0.844	88.1	295.827	455.6	302.480	2.5
2015/07/17 5:00	2015/07/18 16:00	1.46	0.526	40.69	77.5	0.525	59.1	39.013	136.6	42.273	-3.7
2015/08/09 11:00	2015/08/11 8:00	1.88	0.653	64.86	121.0	0.536	33.5	62.047	154.5	61.600	5.3
2015/8/15 20:00	2015/08/16 10:00	0.58	1.46	45.12	77.0	0.586	67.3	43.234	144.3	48.374	-6.7
2015/08/24 0:00	2015/08/24 14:00	0.58	1.04	32.20	58.0	0.556	62.2	30.922	120.2	30.162	6.8
2015/08/31 16:00	2015/08/31 21:30	0.23	1.87	22.74	49.0	0.464	58.7	21.906	107.7	21.963	3.5
2016/06/21 19:00	2016/06/22 14:00	0.79	1.07	44.89	94.5	0.475	41.3	43.015	135.8	41.652	7.8

(续表 5)

开始时间	结束时间	汇流时间 (d)	平均流量 (m ³ /s)	径流深 (mm)	P	径流 系数	P_a	实测旱地径 流深 R (mm)	$P + P_a$	计算径流 深 R (mm)	误差 (%)
2016/06/28 2:30	2016/06/28 20:00	0.73	1.26	48.73	59.5	0.899	90.0	46.675	149.5	52.617	-7.4
2016/07/01 4:00	2016/07/04 10:00	3.25	1.03	176.79	230.5	0.767	90.0	168.716	320.5	194.400	-9.1
2016/09/14 10:00	2016/09/16 23:00	2.54	0.772	103.95	189.0	0.550	10.4	99.299	199.4	97.520	6.6
2016/09/29 0:00	2016/09/30 4:00	1.17	0.940	58.14	92.0	0.632	66.5	55.642	158.5	64.800	-10.3
2016/10/07 7:00	2016/10/08 2:00	0.79	1.16	48.66	73.5	0.662	72.7	46.608	146.2	49.913	-2.5
2016/10/26 2:00	2016/10/27 2:00	1.00	1.42	75.26	91.0	0.827	86.6	71.958	177.6	80.080	-6.0
2017/06/10 1:00	2017/06/10 23:00	0.92	3.62	175.82	222.0	0.792	59.9	167.791	281.9	163.520	7.5
2017/09/24 0:00	2017/09/25 21:00	1.88	1.58	157.18	218.0	0.721	53.1	150.028	271.1	154.880	1.5

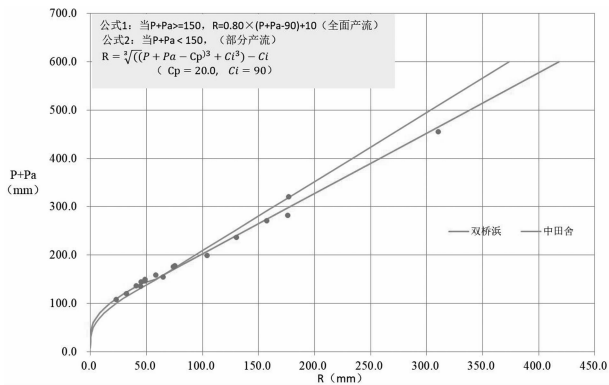


图 2 双桥浜小区降水径流关系图

4 结论与分析

(1)与封闭的天然流域(中田舍河小流域)一样^[14,15],双桥浜小区产汇流关系比较稳定,相对单一,较好地反映了江苏省太湖流域城镇化下小区的产汇流关系,可为开展城镇化背景下的江苏省太湖流域产汇流新机制及洪涝风险防控的研究及《江苏省水文手册》的修编提供技术支撑。同时,这也间接地证明了城镇化小区的产汇流关系亦服从《江苏省水文手册》1976 年所确定的数学模型。

(2)与气象气候、地形地貌、土壤植被等产汇流条件没有发生较大改变的中田舍河小流域相比^[14],同等降水径流(或 $P + P_a$)下,产汇流条件发生较大改变的城镇化小区产流量相对偏大(详见图 2 和

表 5),且降水量越大,产流量越大。同时,这也间接证明了人工干预下的以不透水层为主的城镇化小区比人为因素影响较小的以植被为主的天然流域,对暴雨(日降水量 100 mm 以上的)的响应更为显著。

(3)与《江苏省水文手册》^[12]所确定太湖流域平原水网区的降水径流关系相比,同等降水径流(或 $P + P_a$)下,城镇化后的小区产流量明显偏大(详见表 6)。这也间接证明了随着江苏省太湖流域经济社会的快速发展,城镇化水平的不断提高,流域产汇流的机制发生了较大变化,暴雨带来的洪涝灾害将更为显著。地处太湖流域湖西区和武澄锡虞区的常州市连续 3 年(2015 ~ 2017 年)的暴雨洪水也间接证明了这一点^[6,7]。

表 6 双桥浜小区与中田舍河小流域降水径流关系对比表

$P + P_a$	100	200	300	400	500	600
双桥浜小区	17.5	90.0	178.0	258.0	338.0	418.0
中田舍河小流域	22.8	93.5	163.5	233.5	303.5	373.5
增幅(%)	-	-	8.9	10.5	11.4	11.9
太湖流域平原水网区	17.0	82.5	-	-	-	-
增幅(%)	2.9	9.1	-	-	-	-

本文是基于快速城镇化对江苏省太湖流域产

汇流机制影响所做的一次尝试性研究。需要补充说明的是,文中结论主要依据双桥浜小区的水文监测成果分析而出,是否适用于其他城镇化小区或较大尺度的城镇区域(如常州市运北片)也是今后还需进一步加强水文监测与研究的课题。

参考文献:

- [1] 尹义星, 许有鹏, 陈莹. 太湖流域典型区 50 年代以来极值水位时空变化[J]. 地理研究, 2011, 30(6): 1077-1088.
- [2] 胡昌伟. 太湖流域洪水风险模拟研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [3] Defries R, Eshleman K N. Land - use change and hydrologic processes: a major focus for the future[J]. Hydrological Processes, 2010, 18(11): 2183-2186.
- [4] 赵刚, 史蓉, 庞博, 等. 快速城市化对产汇流影响的研究: 以凉水河流域为例[J]. 水力发电学报, 2016, 35(5): 55-64.
- [5] 高斌. 太湖流域不同洪涝风险区内建设用地扩张特征及其预测[D]. 2015.
- [6] 陈静, 等. 2015 年苏南地区暴雨洪水[M]. 南京: 河海大学出版社, 2017.
- [7] 唐运忆, 等. 2016 年江苏省暴雨洪水[M]. 南京: 河海大学出版社, 2018.
- [8] 黄子谦. 基于 SWMM 模型的城市降雨径流规律及城市雨洪利用控制研究[D]. 2016.
- [9] 张小娜. 城市雨水管网暴雨洪水计算模型研制及应用[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [10] 邹霞, 刘佳明. 城市降雨径流模型研究及模拟比较[J]. 中国农村水利水电, 2016(12): 101-105.
- [11] 林杰, 黄金良, 杜鹏飞, 等. 城市降雨径流水文模拟的参数局部灵敏度及其稳定性分析[J]. 环境科学, 2010, 31(9): 2023-2028.
- [12] 江苏省水文手册[M]. 南京: 江苏省革命委员会水利局水文总站, 1976.
- [13] 江苏省暴雨洪水图集[M]. 南京: 江苏省水文总站, 1985.
- [14] 胡尊乐, 纪小敏, 闫浩, 等. 基于 Cftool 拟合工具箱的中田舍河水位流量关系暨产汇流模型的构建[J]. 江苏水利, 2018(1): 1-7.
- [15] 纪小敏, 周毅, 胡尊乐, 等. 中田舍流域的产汇流模型研究[J]. 江苏水利, 2017(10): 37-43.