
快速城市化下的武汉城市暴雨渍水 空间特征及发生机制

陈昆仑¹ 许红梅² 李志刚² 黄耿志³ 姚华松⁴¹

(1. 中国地质大学 (武汉)体育学院, 中国湖北 武汉 430074;

2. 武汉大学 城市设计学院, 中国湖北 武汉 430072;

3. 中山大学 地理科学与规划学院, 中国广东 广州 510275;

4. 广州大学 公共管理学院, 中国广东 广州 510006)

【摘要】:随着城市化进程的加快和社会经济的发展,城市内涝已成为继人口拥挤、交通拥堵、环境污染等问题之后的又一大城市病。武汉是我国内涝频发的城市之一,尤其是2016年夏季发生的城市内涝造成了巨大的社会经济损失。文章以武汉中心城区汤逊湖水系为研究范围,利用最邻近指数法、核密度强度分析法、湖泊变化强度指数等方法,探讨2016年6月30日-7月6日期间城市内涝灾害发生最严重时段的渍水特征,并揭示其形成原因和发生机制。研究发现:①城市暴雨渍水类型多样,主要包括居住区渍水、道路渍水和产业园区渍水三类。②渍水点呈现明显的空间集聚特征:渍水点以湖泊为中心集中分布,围湖造地区域是渍水发生的重灾区,城市新开发区和在建施工区也是渍水发生的集中区域,水系中下游比上游渍水严重。③湖泊容量萎缩、水系结构简化、水利建设滞后、汇水强度增大、异常气候突发等共同导致暴雨渍水灾害的发生。

【关键词】:快速城市化 人类活动 城市暴雨渍水 内涝灾害 发生机制 异常气候

【中图分类号】:TU984.11+6 **【文献标志码】**:A **【文章编号】**:1000-8462(2020)05-0129-07

城市内涝多由城市积水演变而来,一直以来是困扰城市发展的严重问题^[1]。近年来,随着城市化进程的加快和社会经济的发展,城市内涝已成为继人口拥挤、交通拥堵、环境污染等问题之后的又一大城市病^[2]。我国大部分城市存在内涝问题,北京^[3]、上海^[4]、广州^[5]、武汉^[6]等大城市在夏季降雨密集时段,时常发生内涝灾害,内涝造成较长时间城市机能瘫痪,带来巨大的社会经济损失,如何科学、有效地解决城市内涝问题已成为政府与学界共同关注的热点话题,海绵城市、生态城市等新理念和新策略是近年来提出的一些应对方案^[7]。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CUG2018123);国家自然科学基金项目(41401181)。

作者简介:陈昆仑(1982-),男,湖北荆门人,博士,教授,博士生导师。主要研究方向为城市地理与城市规划、体育地理。

E-mail:ckl_2001@163.com。

国外的城市内涝研究始于 1960 年代,从城市水文学角度利用实验观测方法开展了大量研究,其中内涝成因、防涝对策、风险评估、模型构建以及雨水管理等方面受到较多关注^[8-9]。从原因来看,一部分研究认为城市化过程中地表透水和储水能力下降,引起径流量和系数增加,从而导致了城市内涝发生;一部分研究则认为江河水位上涨倒灌和城市内部强降雨是城市洪涝发生的两大诱因。从研究方法来看,Weighted Naïve Bayes (WNB) 分类法^[10]、互联网开放数据^[11]等被用来评估风险程度,Huff 曲线^[12]、HEC-HMS 模型^[13]等工具被用来模拟城市洪水效应,景观格局变化被用来解释城市雨洪致灾原因^[14]。在内涝风险防范管理过程中雨水的资源化利用被作为应对和缓解城市雨洪的有效手段^[15]。国内的城市内涝研究从 1980 年代陆续开始,由于内涝在这一时期被视为流域洪水在滨水城市引发的次生灾害,其成因探讨成为研究热点,部分学者将其产生原因总结为气象水文、地质地貌等自然因素^[16]。随着我国城市化进程的加速,城市建设等人文因素对城市内涝的影响日益突出并得到关注^[17]。21 世纪初,一大批学者致力于模型构建,以帮助内涝地区实现灾害模拟和预测^[18],其中基于元胞自动机、SCS 产流模型等技术手段的地理学研究无论从自然还是人文因素角度都进行了深度参与并取得了丰硕成果^[19-21]。

近年来受气候变化和快速城市化的双重影响,我国城市内涝呈现出突发、频发和高危害等特征。气候变化与城市降水、城市化与城市内涝的关系引起了学者的重点关注,两方面的融合讨论已成为新的研究焦点^[22-23]。已有研究大多讨论城市内涝渍水的自然物理特征,也有论及人类活动与它的关系,但微观层面的深度探讨尚待进一步加强,尤其是近年来快速城市化背景下城市内涝突发、频发和高危害问题的研究。

受自然条件和城市建设影响,武汉一直是洪涝灾害频发的城市,江汛、山洪、湖涝、渍水常常叠加出现^[24]。快速城市化背景下武汉暴雨渍水出现了新动向和新特征,较之往年“看海”现象中心城区易发不同的是,汤逊湖、南北太子湖等新城区的内涝灾情日益凸显^[25]。有鉴于此,本文以武汉汤逊湖水系为案例范围,以 2016 年 6 月 30 日-7 月 6 日发生的暴雨渍水为对象,利用水利数据、遥感数据以及社会调查数据,对快速城市化下的暴雨渍水空间特征和发生机制进行解析,以期更加全面深刻地了解城市暴雨渍水发生发展的新特征和新机制,为城市内涝防治提供科学依据。

1 研究说明

1.1 研究区

武汉位于江汉平原地区,市域湖泊众多,有“百湖之市”和“江城”之称。截至 2012 年,市域内大小湖泊 166 个,水域面积 2117.6km²。改革开放以来的城市化过程对武汉湖泊水系影响不断加剧,至 2010 年城区湖泊由 127 个锐减至 40 个^[26]。

武汉暴雨频发,1951-1980 年共有暴雨 114 场,平均每年 3.8 场,1981-2007 暴雨 144 场,平均每年约 5.5 场,1998 年的特大洪水更是一度危及武汉的城市安全^[27]。2016 年夏季武汉遭遇四轮暴雨袭击,第四轮暴雨(6 月 30 日至 7 月 6 日,以下称“本轮暴雨”)最为严重,全城积水蔓延,200 多处路段严重渍水,大片居住社区受淹,75.7 万人受灾,造成直接经济损失 22.65 亿元^①。汤逊湖水系北起武珞路、珞喻路,南至江夏八分山、大花山,西临长江,东至城市三环东线(图 1),是 2016 年武汉夏季渍水灾害集中发生的区域之一^②。

1.2 数据及处理

1.2.1 渍水空间数据

利用 2016 年武汉市土地利用现状图为底图建立暴雨渍水点空间数据库。渍水空间数据包括渍水发生的空间位置、影响范围、

^①①楚天都市报. 武汉暴雨致 15 人死亡失踪官方:排水系统标准低
[EB/OL]. <http://news.qq.com/a/20160706/052175.htm>, 2016-07-06.

^②②楚天都市报. 汤逊湖水位达 20 年来最高,危及江夏中心城区安全
[EB/OL]. <http://hb.qq.com/a/20160705/005885.htm>, 2016-07-05.

渍水面积、渍水点数量、滞留时间、受灾程度以及灾害影响范围等。以上数据获取自武汉市水务局官方网站, 新华网、湖北日报、武汉晚报、楚天都市报等媒体报道, 以及城市渍水灾害互动地理信息系统上网友实时上报的信息。居住区和产业园区渍水记录为面状数据, 道路渍水记录为点状数据。

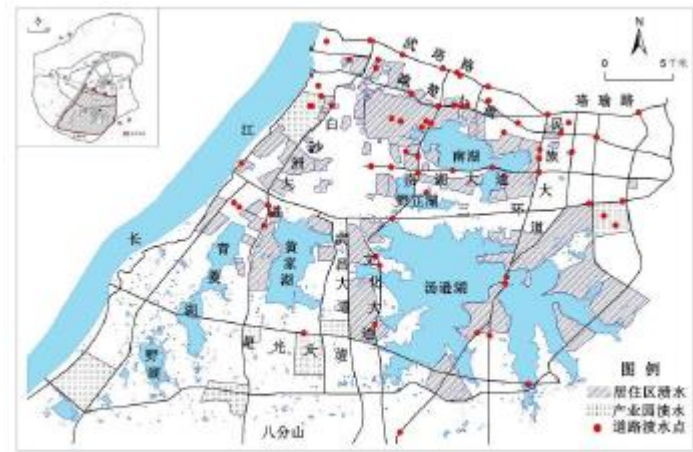


图1 研究区范围及渍水空间分布

1.2.2 水系空间数据

利用地理空间数据云网站影像数据库 (<http://www.gscloud.cn/search>) 下载 2000 年 2 月 26 日、2008 年 5 月 6 日、2016 年 6 月 5 日三期 Landsat 遥感影像, 采用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 进行不同时期的水体提取^[28], 参考高分辨率卫星影像图和地形图, 获取研究区 2000—2016 年的水域变化数据。

$$MNDWI = (Green - MIR)/(Green + MIR) \quad (1)$$

式中:Green 为绿波段;MIR 为中红外波段。数据处理和信息提取在 ENVI5.1 软件平台下进行, 提取的信息主要包括宽度大于等于 30m 的河流和面积大于等于 30m×30m 的面状水体。

1.2.3 社会经济数据

数据主要包括本轮以及其他年份武汉暴雨的经济损失、受灾人数、伤亡人数、渍水程度、工业和交通受灾情况等, 来源于武汉市政府、水利局、民政局等官方统计, 新华网、湖北日报、武汉晚报、楚天都市报等媒体报道。

1.3 研究方法

1.3.1 最邻近指数法

最邻近指数指实际最邻近距离与理论最邻近距离之比, 利用最邻近指数测度道路渍水点的空间分布格局^[29], 计算公式为:

$$\bar{r}_E = \frac{1}{2\sqrt{n/A}} = \frac{1}{2\sqrt{D}} \quad (2)$$

$$R = \frac{\bar{r}_1}{\bar{r}_E} = 2\sqrt{Dr_1} \quad (3)$$

式中: $\bar{r}_E$ 为理论最邻近距离; A 代表区域面积; n 代表道路渍水点数量; D 代表点密度; R 为最邻近指数, $\bar{r}_1$ 代表最邻近点之间的距离 r_1 的平均值。当 $R < 1$ 时, 道路渍水点趋于集聚; 当 $R = 1$ 时, 道路渍水点随机分布; 当 $R > 1$ 时, 道路渍水点趋于均匀分布。

1.3.2 核密度强度分析法

利用核密度强度反映道路渍水点在空间上的分散和集聚特征及其形态变化^[30], 公式为:

$$\lambda \hat{h}(S) = \sum_{i=1}^N \frac{3}{\pi h^4} \left[1 - \frac{(S - S_i)^2}{h^2} \lambda \right]^2 \quad (4)$$

式中: S 为待估计区域道路渍水点的位置; S_i 为所在以 S 为圆心的区域中的道路渍水点 i ; h 为半径空间范围内第 i 个道路渍水点的位置。

1.3.3 湖泊变化强度指数

为了更好地描述研究区湖泊在不同时期的相对变化程度, 本文利用湖泊演变强度来定量分析湖泊面积变化强弱的相对程度^[31], 公式为:

$$C = \frac{\Delta A_i}{A \times \Delta t} \times 100 \quad (5)$$

式中: C 表示湖泊演变强度; ΔA_i 表示研究时段内第 i 个湖泊的变化面积; A 为第 i 个湖泊的总面积, 本文以 2000 年研究区湖泊面积为基准; Δt 为变化时期。当 $C < 0$ 时, 表示湖泊萎缩, 当 $C > 0$ 时, 表示湖泊面积扩大。

2 渍水类型与空间特征分析

2.1 主要类型

2.1.1 居住区渍水

居住区渍水面积达 62.08km², 分布广泛。主要集中在临近三环线的南湖周边、汤逊湖周边、黄家湖周边和青菱湖周边四大区域, 四大区域渍水面积分别为 27.89km²、26.96km²、4.22km²、3.01km² (图 1)。尤其是南湖周边区域和汤逊湖湖心长岛别墅区渍水情况最为严重, 渍水范围大、持续时间长, 南湖区域 100 余个小区不同程度渍水, 其中南湖新城的小区浸泡超过 10 天甚至更久, 渍水涉及居民 3700 余户、15000 余人, 居民被迫进行转移安置。

2.1.2 道路渍水

研究区内共出现 65 处道路渍水点,利用 ArcGIS10.2 计算道路渍水点的最邻近指数(表 1),道路渍水点的实际距离为 9.5km,小于理论最邻近距离 11.1km,最邻近指数为 0.853470,表明道路渍水点在研究区趋于集聚。

表 1 道路渍水点最邻近指数及空间结构类型

	个数	实际最邻近 距离(km)	理论最邻近 距离(km)	最邻近 指数	空间结 构类型
道路渍水点	65	9.5	11.1	0.853470	集聚

利用 ArcGIS10.2 的 Spatial Analyst Tools 的 Density 模块对道路渍水点进行空间核密度分析发现,道路渍水点以三环线为界呈现北多南少的特征,越靠近北侧中心城区越密集(图 1)。道路渍水点的空间核密度在三环线以北形成高值集中区,在三环线北侧出现 48 处、南侧出现 17 处,北侧渍水点数量明显高于南侧。此外,道路渍水点空间核密度的高值区呈现沿主要干道带状分布特征,渍水点主要集中在城市主干道,支路相对较少,武珞路、雄楚大道等武汉东西向重要交通通道沿线分别出现了 9、14 处,白沙洲大道、珞狮路等南北向主要交通通道沿线分别出现了 10、8 处,主干道上的渍水点约占道路总渍水点的 2/3。

2.1.3 产业园区渍水

产业园渍水总面积 17.87km²,主要分布在三环线以南,整体上随产业园区设置而表现出离散化特征,这种空间特征与城市功能分区密切相关(图 1)。白沙洲都市工业园和光谷金融港是渍水最为严重的两大产业园区。白沙洲都市工业园位于长江、巡司河和青菱河三条河流的包围之中,暴雨导致江河水位猛涨、排水不畅,园区平均水深达 0.8m,浸泡时间长达半个月。光谷金融港位于汤逊湖东北角,因汤逊湖水位上涨而出现严重浸渍现象,渍水最严重时大小车辆均无法在园区通行,附近居民和职工只能靠冲锋舟、铲车等工程设备救助。

2.2 空间特征

2.2.1 以湖泊为中心集中分布

渍水点集中发生在临湖区域,总体上呈现出以南湖、汤逊湖、黄家湖、青菱湖为中心,向四周扩散的环状分布特征(图 1)。四大临湖区域的居住区和产业园区渍水总面积分别为 32.71km²、30.08km²、8.30km²、8.86km²,道路渍水点分别有 48、11、4、2 处(表 2)。同时,四大集中区渍水程度差异较大,表现出南湖区域>汤逊湖区域>黄家湖区域>青菱湖区域的特征。此外,单一区域内部的渍水点也存在显著的空间差异,湖泊不同方位渍水程度明显不同,南湖区域渍水点主要分布在西北角,汤逊湖区域渍水点主要集中在东北侧和西侧文化大道一线,黄家湖区域渍水点主要位于东侧的大学城和南侧的工业区,青菱湖区域渍水点在三环线附近。

表 2 四大渍水集中区域

区域	居住区渍水面 积(km ²)	产业园渍水面 积(km ²)	道路渍水点 (处)
南湖区域	27.89	4.82	48
汤逊湖区域	26.96	3.12	11
黄家湖区域	4.22	4.08	4
青菱湖区域	3.01	5.85	2

2.2.2 新开发和在建工程施工区渍水显著

新开发区和在建施工区是渍水发生的热点区域,如南湖西北侧、黄家湖东侧、汤逊湖东北侧,这些新开发区和施工区渍水面积约占总渍水面积的2/3(图1)。南湖新城是新开发区域的典型代表,本轮暴雨中南湖新城渍水时间长,影响范围广,其大规模开发始于2004年,至2015年已建成规模约160万m²的大型居住社区。在建工程施工区是渍水发生的又一代表类型,尤其是道路施工区,如雄楚大道沿线BRT走廊建设工程和光谷大道高架桥二期工程等施工区域,都出现了严重渍水,造成长时间的交通瘫痪(表3)。

表3 新开发区和在建施工区分布

易渍水区域	空间位置	建设项目
新开发区域	南湖西北部	南湖新城
	黄家湖东部	黄家湖大学城
	汤逊湖东北部	汤逊湖别墅居住区
在建施工区域	雄楚大道	BRT走廊
	白沙洲大道	地面道路改造
	光谷大道	城市高架桥

2.2.3 围湖造地成为渍水重灾区

渍水重灾区与围湖造地新增的建设用地范围基本重合。1960、1970年代,武汉人口迅速增长,大片湖区变为耕地和鱼塘,1990年代住房制度改革,居民住房需求被释放,房地产发展向湖要地,大量居住区在填湖区域拔地而起。2000—2008年武汉湖泊面积急剧减少,南湖周边填湖造地活动最为剧烈,南湖新城建设即为填湖开发的典型工程(图2a、2b),本轮暴雨中南湖雅园、风华天城等居住社区多次出现严重渍水,南湖雅园受灾最为严重,被浸泡逾一周,断水断电,道路、车辆及设施被淹,近千居民被困靠抢修搭建的栈桥疏散(图2c)。



图2 南湖围湖造地

2.2.4 水系中下游比上游渍水严重

渍水程度呈现自西向东递减的空间梯度特征,三大渍水类型均表现出水系中下游(民族大道以西至长江区域)比上游渍水严重的特征,这与汇水方向和城市扩展趋势一致。79.95km²的居住区和产业园区渍水总面积中,55.72km²位于中下游区域,占比达70%。65处道路渍水点中,55处位于中下游,占比达85%。同时,中下游区域的渍水在三环线北侧比南侧严重,尤其是道路渍水点主要

集中在水系中下游的三环线北侧, 占区域总数的 73%, 三环线北侧居住区和产业园渍水面积也大于南侧, 占区域总渍水面积的 54%(表 4)。

表 4 水系中下游与上游渍水分布

渍水类型	区域	中下游		上游	
		面积 km ²	比例	面积 km ²	比例
		/数量 (处)	/%	/数量 (处)	/%
	合计	55.72	70	24.23	30
居住区	三环线北侧	30.26	54	2.45	11
产业园	三环线南侧	25.46	46	21.78	89
	合计	55	85	10	15
道路	三环线北侧	40	73	5	50
	三环线南侧	15	27	5	50

3 渍水原因及发生机制

3.1 渍水原因

3.1.1 湖泊容量萎缩

湖泊容量萎缩是城市渍水的根本原因。城市建设过程中人为破坏湖泊、湿地等天然蓄水容器, 导致湖泊容量减少, 调蓄雨水作用被削弱, 从而增加暴雨期渍水强度。2000-2016 年研究区湖泊变化强度指数均为负值, 表明湖泊面积在不断萎缩(表 5)。2000-2008 年湖泊面积萎缩速度较快, 湖泊变化强度指数达到-4.09, 减少区域基本位于城市三环线内侧。2008-2016 年湖泊萎缩速度有所放缓, 湖泊变化强度指数为-1.21, 湖泊侵占基本位于三环线外侧至远城区。本轮暴雨渍水灾害主要发生在南湖区域、汤逊湖区域、黄家湖区域和青菱湖区域, 受灾程度上南湖区域>汤逊湖区域>黄家湖区域>青菱湖区域, 这一格局正好与研究区湖泊水体被侵占的趋势相一致, 也与城市扩张的趋势一致。

表 5 湖泊变化强度指数 (C 值)

水系	湖泊面积/km ²			变化量/km ²		C 值	
	2000	2008	2016	2000-2008	2008-2016	2000-2008	2008-2016
汤逊湖水系	107.59	72.36	65.34	-35.23	-7.02	-4.09	-1.21

3.1.2 水系结构简化

水系结构趋于简化是渍水发生的重要原因。水系结构简化导致径流量增大, 加大了洪灾和渍水风险, 研究区岸线萎缩与渍水严重区域高度重合。研究区湖泊水体岸线大幅度缩减, 2000 年岸线长度为 1330.28km, 2008 年减少至 719.15km, 到 2016 年仅剩 406.83km, 减少幅度高达 69%(图 3a)。利用 Fragstats3.3 计算得到 2000、2008、2016 年汤逊湖水系湖泊景观分形维数依次为 1.4657、1.3395、1.2464, 湖泊分形维数整体呈下降趋势, 表明人类活动对湖泊形状影响不断增强, 使得湖泊岸线大幅萎缩, 湖泊形状趋于简单化。2000—2008 年岸线萎缩主要发生在南湖、汤逊湖靠近三环线部分, 2008—2016 年主要发生在青菱湖西岸、黄家湖和

汤逊湖南岸,岸线萎缩逐年从中心城区向城市三环线外侧扩展。

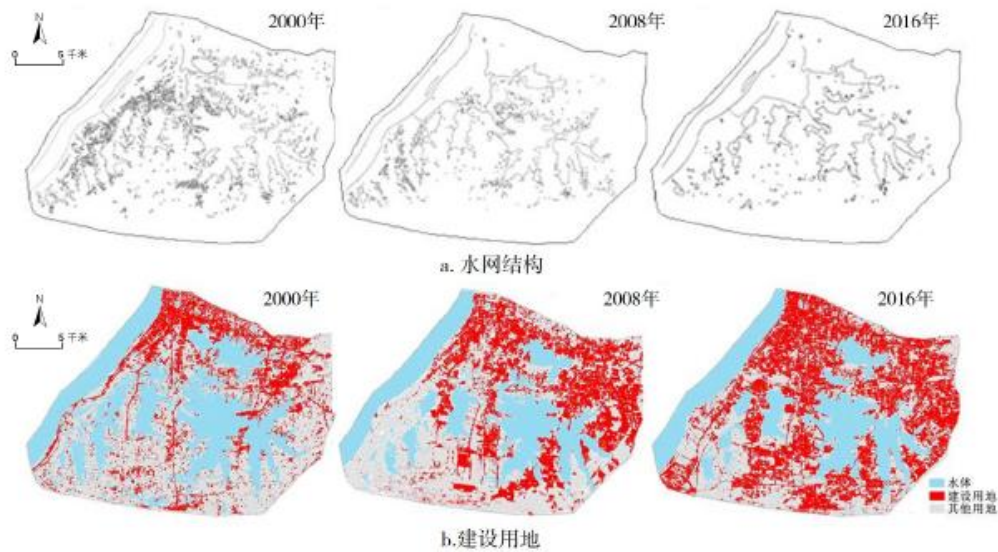


图3 2000—2016年汤逊湖水系水网结构和建设用地演变

3.1.3 水利建设滞后

水利建设滞后是城市渍水的关键原因。一方面,城市建设“重地上、轻地下”,地下管网建设标准低、投入少、维护不足。武汉排水系统建设标准为24小时降雨100mm,小时降雨31.5mm,远远低于“十年一遇”暴雨(日降雨200mm以内、小时降雨50毫米以内)预防标准,本轮暴雨最高日降水量为241.5mm,远超排水标准。另一方面,排涝设施建设滞后,目前研究区只有两个闸口和一个泵站——武泰闸(1949年前建)、陈家山排水闸(1956年建)和汤逊湖电排站(1978年建)(图4),由于地势原因为防止江水倒灌,汛期关闭武泰闸和陈家山闸,仅靠汤逊湖泵站抽排渍水,有限的排水能力远不能满足渍水抽排需求。

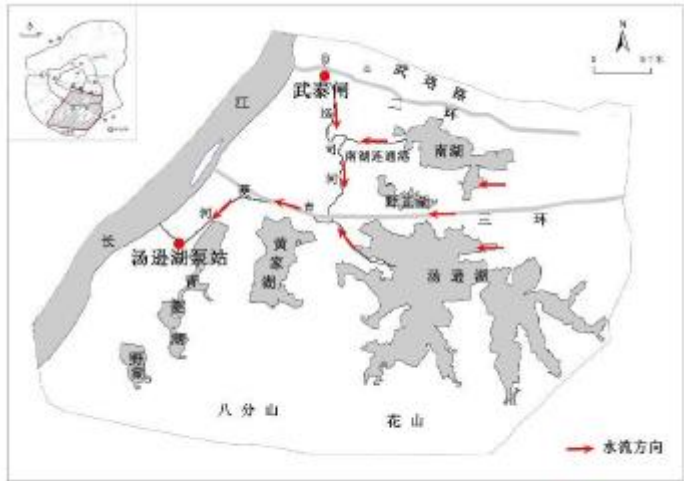


图4 汤逊湖水系调蓄工程示意

3.1.4 汇水强度增大

短时间内汇水强度增大是渍水发生的主要原因。建成区不断扩张,城市“硬底化”越来越严重,不透水面面积不断增加,导致强降雨条件下雨水汇集速度加快,从而增加渍水发生的可能。2000-2016 年研究区城市边界大幅向外围延展,大量耕地、林地、水域等非建设用地转化为建设用地,在这一过程中湖泊水体也被严重侵占。2000 年研究区的建设用地总面积为 95.63km²,2008 年增加至 130.25km²,增加区域主要分布在南湖周边、汤逊湖东侧以及黄家湖周边,至 2016 年建设用地总面积更是达到 191.05km²,占总体面积的半数(图 3b)。

3.1.5 异常气候影响

异常气候是渍水发生的直接原因。2016 年是厄尔尼诺年,全球气候出现异常,降雨量明显增加,武汉降雨量受到气候变化的显著影响^[32]。一是自 6 月以来,武汉连续遭遇暴雨袭击,多轮暴雨的叠加使城市内部南湖、巡司河等湖泊河流水位持续上涨,大大超过城市排水系统的雨洪排泄能力,城市排水系统趋于瘫痪,雨水不能及时输送、排放或存储,只能在城市内部形成渍水。二是武汉临江而建,异常气候条件下长江的流域水文环境变化加大城市排水难度。夏季长江流域普遍出现强降雨,上游和中游来水施压,长江水位超过警戒水位成为悬河,为防止江水倒灌,沿江排水闸口被关闭,导致城市雨洪不能及时排出形成渍水。

3.2 发生机制

城市渍水是多方面因素共同作用的结果,快速城市化进程中,人类活动主要通过城市建设、围湖造地、水利工程三个行为导致城市渍水发生(图 5)。

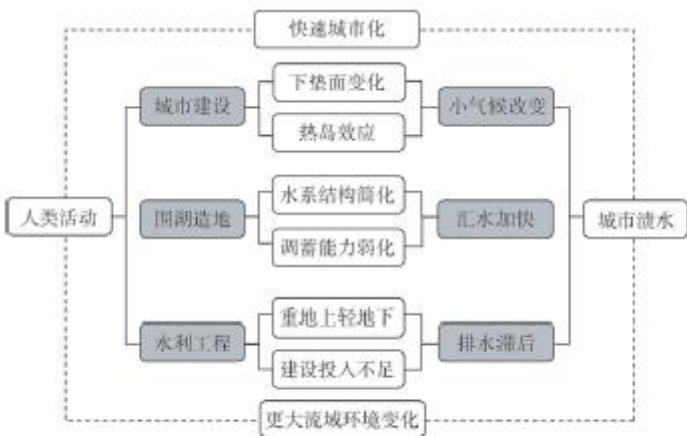


图5 城市暴雨渍水的发生机制

城市建设大背景下,下垫面变化和热岛效应改变了局部小气候,从而加大城市渍水发生的可能;围湖造地活动使水系结构趋于简化、湖泊调蓄能力弱化,直接导致汇水加快;而水利工程建设较为滞后,存在“重地上、轻地下”和建设投入不足的问题,造成暴雨期排水不畅。人类活动打破了城市降水、汇水、排水三个环节原有的平衡,从而导致了城市渍水的发生。

参考文献:

[1] 易嘉伟,王楠,千家乐,等. 基于大数据的极端暴雨事件下城市道路交通及人群活动时空响应[J]. 地理学报, 2020, 75(3): 497-508.

[2] 吴志峰, 象伟宁. 从城市生态系统整体性、复杂性和多样性的视角透视城市内涝[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 4955-4957.

-
- [3]宋晓猛,张建云,贺瑞敏,等.北京城市洪涝问题与成因分析[J].水科学进展,2019,30(2):153-165.
- [4]李海宏,吴吉东.2007-2016年上海市暴雨特征及其与内涝灾情关系分析[J].自然资源学报,2018,33(12):2136-2148.
- [5]李彬烨,赵耀龙,付迎春.广州城市暴雨内涝时空演变及建设用地扩张的影响[J].地球信息科学学报,2015,17(4):445-450.
- [6]陈晓玲,陈莉琼,陆建忠.从武汉内涝看城市水生态管理及新型人地关系构建[J].生态学报,2016,36(16):4952-4954.
- [7]陈娜,马伯,向辉,等.基于径流目标分解的南方低山丘陵区海绵城市建设——以湖南凤凰县为例[J].经济地理,2018,38(8):67-75.
- [8]Olsson J,Amaguchi H,Alsterhag E,et al. Adaptation to climate change impacts on urban storm water:A case study in Arvika,Sweden[J].Climatic change,2013,116(2):231-247.
- [9]Schmitt T G,Thomas M,Etrich N. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems[J].Journal of Hydrology,2004,299(3):300-311.
- [10]Tang X,Shu Y,Lian Y,et al. A spatial assessment of urban waterlogging risk based on a Weighted Naïve Bayes classifier[J].Science of the Total Environment,2018,630:264-274.
- [11]Lin T,Liu X,Song J,et al. Urban waterlogging risk assessment based on internet open data:a case study in China[J].Habitat International,2018(71):88-96.
- [12]Pan C,Wang X,Liu L,et al. Improvement to the Huff Curve for Design Storms and Urban Flooding Simulations in Guangzhou,China[J]. Water,2017,9(6),411,https://doi. org /10. 3390/w9060411.
- [13]Akter A,Mohit S A,Chowdhury M A H. Predicting urban storm water-logging for Chittagong city in Bangladesh[J]. International Journal of Sustainable Built Environment,2017(6):238-249.
- [14]Su M,Zheng Y,Hao Y,et al. The influence of landscape pattern on the risk of urban water-logging and flood disaster[J].Ecological indicators,2018,92(9):133-140.
- [15]Zhang X,Hu M,Chen G,et al. Urban Rainwater Utilization and its Role in Mitigating Urban Waterlogging Problems-A Case Study in Nanjing,China[J]. Water Resources Management,2012,26(13):3757-3766.
- [16]焦胜,韩静艳,周敏,等.基于雨洪安全格局的城市低影响开发模式研究[J].地理研究,2018,37(9):1704-1713.
- [17]吴健生,张朴华.城市景观格局对城市内涝的影响研究——以深圳市为例[J].地理学报,2017,72(3):444-456.
- [18]夏军,张印,梁昌梅,等.城市雨洪模型研究综述[J].武汉大学学报:工学版,2018,51(2):95-105.
- [19]杨帆,徐建刚,林蔚.基于元胞自动机的低影响开发对城市内涝削减效果模拟[J].自然资源学报,2017,32(7):1158-

- [20] 黄清雨, 董军刚, 李梦雅, 等. 暴雨内涝危险性情景模拟方法研究——以上海中心城区为例[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(4): 506-513.
- [21] 田富强, 程涛, 芦由, 等. 社会水文学和城市水文学研究进展[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 46-56.
- [22] 周广胜, 何奇瑾. 城市内涝防治需充分预估气候变化的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 4961-4964.
- [23] 张会, 李铖, 程炯, 等. 基于“H-E-V”框架的城市洪涝风险评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2019, 38(2): 175-190.
- [24] 曾忠平, 彭浩轩. 城市湿地损失和内涝灾害响应的遥感分析——以武汉市南湖为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(4): 929-938.
- [25] 陈雄志. 武汉市汤逊湖、南湖地区系统性内涝的成因分析[J]. 中国给水排水, 2017, 33(4): 7-10, 13.
- [26] 武汉市水务局. 武汉湖泊志[M]. 武汉: 湖北省美术出版社, 2014.
- [27] 张意林, 覃军, 陈正洪. 近 56a 武汉市降水气候变化特征分析[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(3): 253-257.
- [28] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [29] 王洪桥, 袁家冬, 孟祥君. 东北地区 A 级旅游景区空间分布特征及影响因素[J]. 地理科学, 2017, 37(6): 895-903.
- [30] 杨利, 石彩霞, 谢炳庚. 长江流域国家湿地公园时空演变特征及其驱动因素[J]. 经济地理, 2019, 39(11): 194-202.
- [31] 黄浦江, 刘艳芳, 刘畅, 等. 基于 RS 与 GIS 的武汉城市湖泊演化研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1588-1593.
- [32] 翟盘茂, 余荣, 郭艳君, 等. 2015/2016 年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响[J]. 气象学报, 2016, 74(3): 309-321.