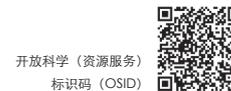


武静, 李梦婷. 基于景观地形的小流域单元减灾调控评价研究 [J]. 风景园林, 2020, 27 (1) : 110-114.

基于景观地形的小流域单元减灾调控评价研究

Evaluation of Risk Regulation and Reduction of Small Watershed Units Based on Landscape Topography

武静 李梦婷
WU Jing, LI Mengting



中图分类号: TU986
文献标识码: A
文章编号: 1673-1530(2020)01-0110-05
DOI: 10.14085/j.fjyl.2020.01.0110.05
收稿日期: 2019-06-08
修回日期: 2019-10-31

武静 / 女 / 蒙古族 / 博士 / 武汉大学城市设计学院副教授、硕士生导师 / 意大利博洛尼亚大学博士后、荷兰屯特大学博士后 / 研究方向为风景园林规划与设计
WU Jing (Mongolian), Ph.D., is an associate professor and master supervisor in the School of Urban Design, Wuhan University, postdoctoral in Bologna University(Italy) and Twente University(Netherlands). Her research focuses on landscape architecture planning and design.

李梦婷 / 女 / 武汉大学城市设计学院在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计
LI Mengting is a master student of the School of Urban Design, Wuhan University, Her research focuses on landscape architecture planning and design.

摘要: 近年来, 中国诸多大中城市内涝灾害频发。武汉市作为城市内涝频发的典型城市, 其建成区地表高度(20.0~24.0 m)大多低于外江常年所处的洪水水位高度(23.9 m), 在区域性暴雨条件下, 极易引发内涝灾害。武汉由于其内涝典型性, 2013年被列为全国31个重点防洪城市之一, 2015年被列入首批海绵城市试点城市之一。从城市内涝发生机理出发, 以水文角度的小流域单元作为内涝风险区划的基本单元, 利用小流域单元分析武汉市景观地形要素(地表高程、地表起伏度、地表粗糙度)与城市内涝积水密度的相关性及其影响程度, 量算统计出小流域单元的内涝风险等级。基于此, 提出武汉市小流域单元减灾地形调控评价。以武汉市作为城市内涝问题的研究案例, 以期为武汉市内涝缓解提供新的思考路径, 具有典型性和必要性。

关键词: 风景园林; 城市内涝; 小流域单元; 景观地形; 武汉市; 调控评价

基金项目: 国家自然科学基金(编号51808409); 湖北省自然科学基金(编号2019CFB477); 中央高校基本科研业务费专项基金(编号2042019kf0211)

Abstract: In recent years, waterlogging disasters have frequently occurred in many large and medium-sized cities in China. The surface height of built-up areas of Wuhan City (20.0~24.0 m), a typical city with frequent waterlogging, is largely below the height of flood level of the external river (23.9 m) all year round. Under regional rainstorm, the city is highly prone to urban flooding disasters. Given Wuhan's vulnerability to urban flooding, the National Flood-Control General Office of China listed it as one of the 31 key flood control cities in China in 2013. Wuhan was included in the first batch of pilot cities in China's sponge city program in 2015. This paper starts with the urban waterlogging occurrence mechanism, takes small watershed units (SWUs) as basic units of waterlogging risk zoning and, with SWUs, analyzes the correlation between landscape terrain elements of Wuhan (surface elevation, relief and roughness) and urban waterlogging and water accumulation density and its levels of impact, to calculate and count the waterlogging risk levels of SWUs. Based on this, it puts forward a disaster mitigation control evaluation in Wuhan. Citing Wuhan as a case in the study of urban waterlogging, it expects to provide a new way of thinking for the mitigation of waterlogging in Wuhan, which is typical and necessary.

Keywords: landscape architecture; urban waterlogging; watershed unit; landscape topography; Wuhan City; control evaluation

Fund Items: National Nature Science Foundation of China (No. 51808409); The Hubei Provincial Nature Science Foundation. (No. 2019CFB477); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2042019kf0211)

21世纪以来, 随着中国城镇化率不断提高, 各大城市内涝灾害日益频发^[1]。2008—2017年间, 中国已有320个城市面临不同程度的城市内涝问题^[2]。如何研究与缓解城市内涝问题已

成为当下实现中国新型城镇化和城市可持续发展的重大议题。2013年, 国务院和住建部等部门相继出台《关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知》(国办发〔2013〕23号)、《住房

和城乡建设部关于引发城市排水防涝综合规划编制大纲》(建成〔2013〕98号)、《国务院关于加强城市基础设施建设的意见》(国发〔2013〕36)等,要求将城市防涝中排水防涝能力、内涝风险评估、雨水径流控制融入城市建设与开发中综合规划,以更好地解决经济发展与环境保护之间的矛盾。2014年10月,住建部正式出台《海绵城市建设技术指南》首次提出城市建设应防治城市内涝风险,实施集约开发模式,保障城市生态空间有序发展^[3-5]。可见,国家层面的防涝策略已经从传统的城市给排水工程视角逐渐转向城市生态调控综合规划视角尺度下的生态雨洪调控。生态雨洪调控在城市防涝中发挥着越来越重要的作用。相较国内,国外相关研究理论与实践开展较早,自20世纪末开始,美国、英国、澳大利亚等国相继从社会、经济、环境等角度提出一系列雨洪管理理论,且效果显著。具体包括美国最佳管理措施(best management practices,简称BMPs)、美国低影响开发体系(low impact development,简称LID)、英国可持续排水系统(sustainable drainage system,简称SUDS)、美国绿色雨水基础设施(green rainwater infrastructure,简称GSI)等。但以上理论大多聚焦在工程视角对小尺度的雨水治理方法上。针对区域开发尺度整合城市开发和水资源管理手段实现雨水综合利用的研究较少^[6]。

地形作为风景园林的四大要素之一,在城市景观规划中起到至关重要的作用。近年来,在城市尺度下的景观空间形态与结构组织上得到广泛应用。城市中低洼地形是城市内涝积水的重要原因之一,合理利用地形构建地表排水系统,合理引导区域水流与汇水方向,将有效缓解城市内涝的发生^[7-9]。小流域单元作为一个具有相对完整自然生态过程的区域单元。近年来,在水土保持、水环境规划、流域综合治理等生态环境领域开展了丰富的研究^[10]。随着城市内涝的频繁发生,国内外学者逐渐开始关注小流域单元在城市内涝中的应用研究,特别是应用水利模型计算小流域单元的降雨与径流过程,界定临界降雨量,能够有效确定洪涝风险指标^[11-12]。

但基于小流域单元对城市内涝风险进行评价的研究基本未见文献报道。综上,笔者以小流域单元为基本研究单位,通过调控其内部景观地形要素(地表高程、地表起伏度、地表粗糙度)以期缓解城市开发尺度下的城市内涝问题。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

武汉市地处东经 $113^{\circ}41' \sim 115^{\circ}05'$,北纬 $29^{\circ}58' \sim 31^{\circ}22'$,总面积 $8\,569.15\text{ km}^2$;属亚热带湿润季风性气候,暴雨主要发生在5—9月,该时间段降雨占全年总降雨量的35%~45%。

武汉市江湖格局丰富,水网密布,素有“百湖之市”之称。其地形以丘陵和平原相间的起伏地形为主,建成区地面高程大部分在 $20.0 \sim 24.0\text{ m}$ (黄海高程)之间,地表高度大多低于外江常年处在的洪水位高度(23.9 m),在区域性暴雨条件下,武汉市极易引发内涝灾害^[13](表1)。

1.2 研究方法

选取2016年7月6日武汉市特大暴雨事件积水数据,分别提取2016年6月5日02:56与2016年7月23日02:56的遥感影像数据,量算出武汉市内涝积水分布情况。从城市内涝发生机理出发,选用小流域单元作为内涝风险区划的基本单元,利用DEM(Digital Elevation Model)完成单元的划分。分析景观地形要素(地表高程、地表起伏度、地表粗糙度)对内涝的影响程度,最后,基于小流域单元提出减灾地形调控评价。

1.2.1 数据采集与处理

本研究基于2016年7月6日武汉市特大暴雨事件,采用Landsat 8 OLI_TIRS卫星资料,运用ArcGIS 10.5分别提取2016年6月5日02:56(暴雨前)与2016年7月23日02:56(暴雨后)的2组积水边界遥感影像数据,对积水边界进行几何校正与边缘增强图像处理,并将两组数据进行叠加,生成武汉市暴雨积水区域分布图(图1)。在ArcGIS中加载30 m精度的DEM高程数据,通过属性设置调整需要显示的颜色色带,提取出武汉市高程、坡度以及地表粗糙度分布图。

表1 武汉市暴雨及渍水情况(2010—2016年)^[14]
Tab. 1 Rainstorms and waterlogging in Wuhan City (2010—2016)^[14]

降雨时间	降雨量/mm	暴雨重现期 / 年	建成区渍水点数量 / 个
2011-06-18	196.8	> 10	82
2012-07-13	155.2	5	25
2013-07-07	258.5	> 20	50
2015-07-23	197.0	> 10	61
2016-06-30— 2016-07-06	581.5	周降雨量 历史最大	162

1.2.2 提取与划定小流域单元

1) 河网提取与分级。在ArcMaps中加载30 m精度的DEM高程数据,使用Spatial Analyst Tools—Hydrology—Fill对原始DEM数据进行洼地填充,得到无洼地的DEM。利用D8算法量算ArcGIS中的水流方向,即通过计算中心栅格与邻域栅格的最大距离权落差(中心栅格与邻域栅格的高程差除以两栅格间的距离)来确定。针对每一个栅格,将高程与周围8个栅格进行比较,流域单元上的水流总是流向最低的地方,以此得到水流方向,最终生成河网网络(所得到的河网线实质上也是汇水线)。河网是基于原始地形数据的现状城市水系以及连续地表低洼区域。

2) 小流域单元划定。基于ArcGIS水文分析功能自动划分流域。通过模拟水流方向、流域汇流能力、水网的自动生成、流域出水口的确定、子集水区边界,提取小流域单元。在提取武汉市小流域单元时,将武汉市周边面积小于 10 km^2 的小流域合并到周边最大面积的图斑内处理,最终划定武汉市84个小流域单元,并进行划定生成小流域单元分区编码和特征值计算。

3) 研究对象界定。将武汉市积水分布图与小流域分区图进行叠加,生成小流域单元与积水信息的相关性分析图。以小流域单元为计算单元,量算每个单元内涝面积,测度内涝密度。在已划定的84个小流域单元中,提取出60个占总积水面积 $\geq 1\%$ 的小流域单元,本研究将这60个具有内涝特征的小流域单元作为研究对象(图2)。

1.2.3 相关性分析

运用ArcGIS对DEM地形数据进行量

表2 内涝密度与平均地表高程相关性分析

Tab. 2 Analysis of correlation between waterlogging density and average surface elevation

平均地表高程 /m	小流域单元数 / 个	平均内涝密度
20~30	35	0.088
30~40	20	0.044
> 40	5	0.041

算, 得出每个小流域单元内的景观地形要素(地表高程、地表起伏度、地表粗糙度)平均值。运用统计学方法将武汉市内涝密度与3个景观地形要素(地表高程、地表起伏度、地表粗糙度)平均数值分别进行相关性统计分析, 得出与武汉市内涝相关性最显著的小流域单元, 从而进行相应的调控评价。

2 景观地形要素与内涝程度的相关性分析

将平均地表高程分为20~30 m、30~40 m和>40 m共3类; 平均地表起伏度分为0~1°、1~2°和>2°, 共3类; 平均地表粗糙度分为1.000~1.001、1.001~1.002和>1.002, 共3类。分别统计每类高程、起伏度、地表粗糙度区间内不同积水密度下的小流域单元的个数(表2~4)。

2.1 平均地表高程与内涝积水密度相关性分析

共有35个小流域单元在20~40 m的地表高程区间, 且平均内涝密度在0.088, 占总小流域单元个数的58%。另外, 内涝密度为0.041, 且地表高程在40 m以上的小流域单元仅有5个, 占总小流域单元数量的8%。由此发现, 平均地表高程越高, 小流域单元内发生内涝积水的风险越低。城市中存在很多低洼小区、低洼道路、下凹式地块等, 由于相对高程较低, 周边地势高的区域水流量汇入, 汛期极易发生内涝。因此, 在传统的城市规划中应注重竖向城市规划, 避免和减少低洼区和积水点, 降低内涝风险^[15]。甚至将城市低洼区转为公园和绿地, 在必要时可以储蓄雨水。

2.2 平均地表起伏度与内涝积水密度相关性分析

共有34个小流域单元在0°~1°的地表

表3 内涝密度与平均地表起伏度相关性分析

Tab. 3 Analysis of correlation between waterlogging density and average surface relief

平均地表起伏度/°	小流域单元数 / 个	平均内涝密度
0~1	34	0.089
1~2	23	0.044
> 2	3	0.042

起伏度区间, 且内涝密度在0.089, 占总小流域单元个数的58%。内涝密度在0.042, 且地表起伏度在2°以上的小流域单元仅为3个, 占总小流域单元数量的5%。由此发现, 平均地表起伏度越大, 小流域单元内发生内涝积水的风险越低。地表起伏度, 也称地势起伏度、相对地势或相对高度, 是单位面积内最大相对高程差, 可反映地面相对高差, 是描述地貌形态的定量指标。地表起伏度在土地利用评价、土壤侵蚀敏感性评价、生态环境评价、人居环境适宜性评价、地貌制图、地质环境评价等领域被广泛应用。使用不同尺度的地表起伏度会影响雨水径流方式^[16]。

2.3 平均地表粗糙度与内涝积水密度相关性分析

统计结果表明, 武汉市内涝密度较高, 且地表粗糙度较低的小流域单元发生城市内涝风险较高。主要发生在地表粗糙度在1.000~1.001的区间内。这一区间内共计49个小流域单元, 平均内涝密度0.076, 占小流域单元总数的81%。可见地表粗糙度越高, 小流域单元内发生内涝积水的风险越低。地表粗糙度是指在一个特定的区域内, 表面积与其投影面积之比, 可作为反映地表形态的一个指标。已有研究表明小流域单元内的地表粗糙度对降雨径流过程存在重要影响^[17]。

通过对3组景观地形要素与内涝密度的相关性分析, 发现武汉市内涝与景观地形有着密切相关性。同时, 景观地形高程越低, 起伏度越小, 粗糙度越低, 越容易发生内涝灾害。

3 基于小流域单元的武汉市内涝风险评价

3.1 景观地形要素对城市内涝的风险影响

根据3组相关性分析结果, 选择相关性显著的因子进一步分类测算, 选取平均地表高程、

表4 内涝密度与平均地表粗糙度相关性分析

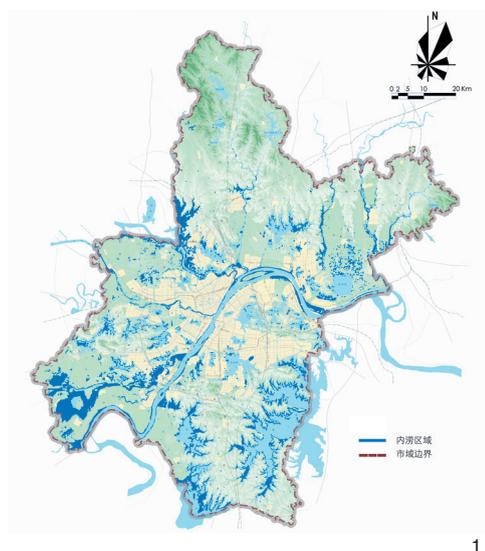
Tab. 4 Analysis of correlation between waterlogging density and average surface roughness

平均地表粗糙度/°	小流域单元数 / 个	平均内涝密度
1.000~1.001	49	0.076
1.001~1.002	7	0.042
> 1.002	4	0.034

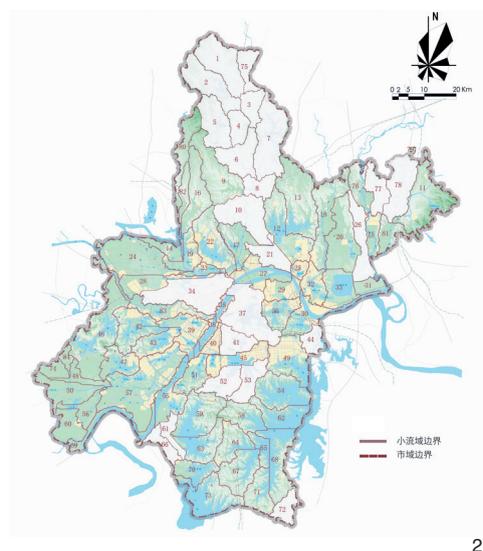
平均地表起伏度和平均地表粗糙度3类景观地形要素与武汉市内涝积水密度显著性较高的小流域单元进行研究^[18]。具体分类为: 1) A, 平均地表高程20~30 m的35个小流域单元设定为风险小流域单元A; 2) B, 平均地表起伏度0~1的34个小流域单元设定为风险小流域单元B; 3) C, 平均地表粗糙度1.000~1.001的49个小流域单元设定为风险小流域单元C。

将以上小流域单元分别进行3类叠加、2类叠加、1类分析, 测度高风险小流域单元与高程、起伏度和粗糙度之间的关联度(表5)。在3类叠加数据中, 发生内涝风险且满足ABC的小流域单元数量共29个, 占研究小流域单元总数的48%, 接近50%。在2类叠加数据中, BC与AC组合各有5个小流域单元, 各占小流域单元总数的8%, 显著性不强, 但2组数据具有地表粗糙度C的小流域单元, 占2类叠加小流域单元总数的100%, 具有较强显著性。在单类数据中, A类高程风险小流域单元仅有1个, B类起伏度小流域单元为0, C类风险小流域单元为10个, 占总小流域单元数的16%, 占1类风险小流域单元数的90%, 显著性强。通过以上分析可以发现, 在单类景观地形要素中, C类地表粗糙度对小流域单元内涝影响程度最高, 且风险度最高; 而起伏度对武汉市内涝产生的影响程度最低, 其风险度不高。

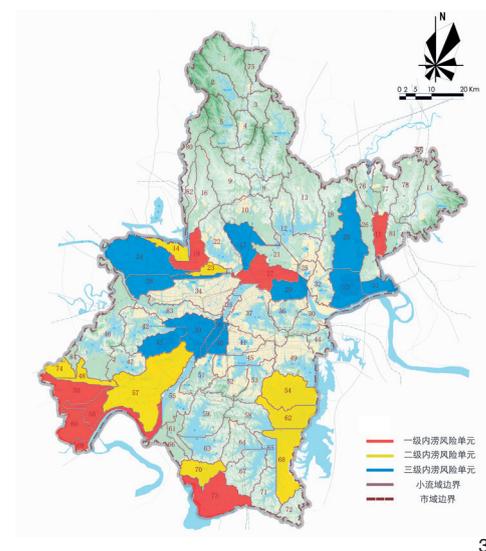
在此基础上, 按照内涝程度将内涝密度分为>0.1, 0.05~0.10和<0.05, 共3类。并将已知叠加数据进行统计量算(表6)。结果表明, 内涝密度>0.1的小流域单元共计11个, 满足ABC三类叠加类型小流域单元占比73%, 具有高风险。而满足一类景观地形要素, 且内涝密度>0.1的小流域单元为0, 表明1类景观地形要素对城市内涝的产生不具有典型性影响。内涝密度在0.05~0.10之间的小流域单



1 武汉市内涝积水分布情况 (2016-07-23 02:56)
Distribution of waterlogging and water accumulation in Wuhan City (2016-07-23 02:56)



2 武汉市小流域单元划分
Partition of small watershed units in Wuhan City



3 武汉市内涝风险等级分布
Distribution of waterlogging risk grades in Wuhan City

元共计 17 个, 占小流域单元总数的 28%, 占 ABC 三类叠加类型小流域单元的 53%, 具有较高风险。而共有 53% 的小流域单元在 < 0.05 的内涝密度区间, 表明半数以上的小流域单元处在较低内涝风险等级。

3.2 武汉市内涝风险等级评价

以满足 ABC 三类景观地形要素指标覆盖的 29 个小流域单元作为风险最高子单元, 根据内涝密度的高低对小流域单元的内涝风险程度进行评估, 并划定不同风险等级的小流域单元, 生成武汉市内涝风险等级分布图 (图 3, 表 5~6)。

4 不同内涝风险等级下的调控评价

根据已生成的武汉市小流域单元内涝风险等级分布图, 综合考虑对应场地的图底关系, 将景观地形条件作为城市内涝产生的重要基底条件, 提出基于小流域单元的武汉市内涝减灾评价。满足 3 类景观地形影响要素, 且内涝密度 > 0.1 的小流域单元共 8 个, 定为一级内涝风险单元; 满足 3 类景观地形影响要素, 且内涝密度 > 0.05 的小流域单元共 9 个, 定为二级内涝风险单元; 满足 3 类景观地形影响要素, 且内涝密度 < 0.05 的小流域单元共 12 个, 定为三级风险单元 (图 3)。基于小流域单元分析, 从修复、优化和控制的角

对其分别提出相关调控建议。

4.1 一级内涝风险单元调控评价

一级风险小流域单元主要分布于武汉市内长江与各主要湖泊周边, 所处行政区域位于城市近郊三环线以外, 尚处于待开发阶段。由于传统的防洪防涝思想, 武汉市进行大量堤防建设, 缺乏对整体水生态系统的关注, 以至于出现江湖分隔、湖湖分隔、湖内分隔。湖泊水生态逐步孤立和退化, 系统稳定性严重下降, 暴雨之后湖泊周边出现严重内涝情况。

根据以上分析, 对该级小流域单元提出的调控策略包括: 1) 连通小流域单元之间水系。提高与周边长江与湖泊的连通性, 在保护自然景观地形的基础上, 打开自然网络, 建立湖湖连通、江湖连通的水网。水系连通有利于实现不同水系的水资源调度, 从而达到均衡降雨空间分布的目的。2) 连通小流域单元内水系。在小流域单元内, 将水系与其他开敞空间 (绿廊、交通通廊、公共绿地等) 相协调, 增加单元的内部蓄洪能力以及提高内部生态交换的效率。

4.2 二级内涝风险单元调控评价

与一级风险单元相比, 二级内涝风险单元与水系的关联度降低。同时 9 个中风险小流域单元全部集中在主城区以外, 但较一级

风险单元与城市中心更近。用地类型上依然与一级风险单元类似, 以农田、鱼塘和道路为主, 但建筑用地比例较一级风险单元有显著增加。

根据以上分析, 对该级小流域单元提出的调控策略包括: 1) 增加建成区内建筑用地边缘区的绿量, 并以增加地表粗糙度为前提, 提出基于小流域单元的建筑用地风险控制线; 2) 优化农田、鱼塘和道路的配比关系, 根据汇流条件, 提高小流域单元与周边长江、湖泊的连通性, 提出基于小流域单元的农田、鱼塘和道路的优化调蓄控制线。

4.3 三级内涝风险单元调控评价

该等级小流域单元占小流域单元总数的 41%, 是三级风险单元中占比最多的类型。该风险单元中有 3 个与主城区接壤, 3 个在主城区内, 6 个在主城区外。较之上 2 类流域单元, 该风险单元呈现与城市中心区的密切耦合关系。同时, 其用地类型也出现以道路交通、居住区等建设用地为主, 农田、鱼塘、工业为辅的格局。

根据以上分析, 对该级小流域单元提出的调控策略包括: 1) 基于汇流条件与汇流方向, 密切关注与城市中心区的融合度, 提出内涝风险高程控制线与起伏度控制区, 其中长江是排涝的最终汇集地, 是流域性水网的核心。

表5 高风险小流域单元与景观地形要素关联度分析

Tab. 5 Analysis of correlation between high risk small watershed units and landscape topography elements

叠加种类	小流域单元叠加类别	小流域单元数 / 个	小流域单元编号
三类	ABC	29	14、15、17、19、20、23、24、27、28、29、31、33、38、39、40、43、48、50、54、56、57、60、62、65、68、69、70、73、74
	AB	0	—
二类	BC	5	12、16、22、45、82
	AC	5	35、36、55、83、84
单类	A	1	30
	B	0	—
	C	10	13、18、25、32、63、64、67、71、76、81

表6 高风险小流域单元内涝密度与景观地形要素关联度分析

Tab. 6 Analysis of correlation between waterlogging density and landscape topographic elements in high risk small watershed units

内涝密度	小流域单元数 / 个	小流域单元编号	百分比 / %		
			三类	二类	单类
> 0.1	11	15、16、19、27、50、55、56、60、69、73、82	73	27	0
0.10~0.05	17	14、23、30、48、54、57、58、59、62、63、67、68、70、74、80、81、83	53	06	24
< 0.05	32	9、11、12、13、17、18、20、22、24、25、28、29、31、32、33、35、36、38、39、40、42、43、45、46、47、49、51、64、65、71、76、84	38	19	22

因此，在长江及与长江相连的小流域单元中设置风险控制区与控制线。2) 基于流速流向以及汇流单元，针对道路与居住区等硬质建成区，提出内涝禁建区与控制区。

5 结论与展望

城市突发性特大暴雨事件与随后的城市内涝渍水问题不仅严重影响城市居民的生产生活，也严重阻碍了城市交通、环境、卫生、经济和社会的可持续发展。事实上，城市内涝问题已经成为制约城市开发建设的一个重要问题。因此，针对城市景观地形与城市内涝的相关性与影响程度进行研究。研究结果表明场地高程越低，起伏度变化越小，粗糙度越低，越容易发生城市内涝灾害。结合武汉市内涝密度与高风险小流域单元对武汉市进行内涝风险分级、定级。发现一级风险小流域单元主要分布于武汉市长江与各主要湖泊周边，所处行政区域位于城市近郊三环线以外，属于城市发展区；二级风险小流域单元较一级风险单元与水系关联度较低，与城市中心更近，建筑用地比例显著增加，属于城市中心区；三级风险小流域单元较之前2类与城市中心

呈现密切的耦合关系，属于城市核心区与城市发展区的交叉区。

由于城市内涝的发生是由多种因素共同影响产生的，景观破碎化高、景观连通性差都可能会增加城市内涝风险，很多研究学者已经提出通过建立绿色基础设施系统以连接不同的城市区域，或将绿地与其他土地用途连接以改善景观连通性和多样性^[19]。本研究将内涝密度结合城市的本底关系，提出具有针对性与可操作性的武汉市内涝减灾调控策略。本研究结果对未来武汉市开发建设具有现实意义，为武汉市内涝问题的缓解提供具体解决路径。未来的研究将继续关注如何通过生态措施减缓城市负面影响，为创造更加适宜的人居环境提供依据。

参考文献 (References):

[1] 王伟武, 汪琴, 林晖, 等. 中国城市内涝研究综述及展望[J]. 城市问题, 2015 (10): 24-28.
 [2] 谢映霞. 从城市内涝灾害频发看排水规划的发展趋势[J]. 城市规划, 2013, 37 (2): 45-50.
 [3] 张伟, 车伍. 海绵城市建设内涵与多视角解析[J]. 水资源保护, 2016, 32 (6): 19-26.
 [4] 徐振强. 我国海绵城市试点示范申报策略研究与能力建设

建议[J]. 建设科技, 2015 (3): 58-63.

[5] 李俊奇, 王文亮, 车伍, 等. 海绵城市建设指南解读之降雨径流总量控制目标区域划分[J]. 中国给水排水, 2015, 31 (8): 6-12.
 [6] KULLER M, BACH PM, RAMIREZ-LOVERING D, et al. Framing Water Sensitive Urban Design as Part of the Urban Form: A Critical Review of Tools for Best Planning Practice [J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 96: 265-282.
 [7] XIE Y, LI J Y, GUO J L, et al. Study on Countermeasures of Urban Waterlogging in Baoji City Based on Terrain Traps and River Network Systems [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26: 384-388.
 [8] WANG X, YANG X L, XU C W, et al. Landuse-based Analysis of Waterlogging Traffic Risk [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27: 197-204.
 [9] ZHAO W M, ZHU M, SHU F Y. Mountainous Sponge City Planning Methods in the View of Eco-hydrology A Case Study of Chongqing Metropolitan Area[J]. Mountain Research, 2017, 35: 68-77.
 [10] 徐建刚, 张翔, 林蔚, 等. 流域视角下的智慧型海绵城市规划减灾效应评估方法研究[J]. 城市建筑, 2018, (15): 17-21.
 [11] YUAN W L, LIU M Q, WAN F. Calculation of Critical Rainfall for Small-Watershed Flash Floods Based on the HEC-HMS Hydrological Model[J]. Water Resources Management, 2019, 33(7): 2555-2575.
 [12] MEIERDIERCKS K L, KOLOZSVARY M B, RHOADS K P, et al. The Role of Land Surface Versus Drainage Network Characteristics in Controlling Water Quality and Quantity in a Small Urban Watershed[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(24): 4384-4397.
 [13] 武静. 武汉滨湖景观与用地演化定量分析[J]. 中国园林, 2013, 29 (11): 124-127.
 [14] 康丹, 康宽. 武汉临湖建成区渍水成因及对策: 以南湖地区为例[J]. 中国给水排水, 2018, 34 (3): 135-138.
 [15] 王强, 刘子龙, 曾玉蛟. 基于内涝防治的城市竖向规划技术方法研究[J]. 给水排水, 2018, 54 (4): 36-40.
 [16] 冯玉祥, 邓青春, 向卫, 等. 基于地形起伏度的元谋干热河谷区地貌划分研究[J]. 四川林勘设计, 2016 (3): 27-32.
 [17] VODA M, SARPE C A, VODA A I. Romanian River Basins Lag Time Analysis. The SCS-CN Versus RNS Comparative Approach Developed for Small Watersheds[J]. Water Resources Management, 2019, 33(1): 245-259.
 [18] 宫清华, 黄光庆, 张冬良, 等. 基于斜坡单元的浅层滑坡风险区划: 以华南松岗河小流域为例[J]. 安全与环境学报, 2017, 17 (2): 615-620.
 [19] 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: 133-140.

图表来源 (Sources of Figures and Tables):

图1~3 由作者自绘, 底图来自武汉市规划局, 审图号: 武汉市s (2019) 007号。表1为作者根据参考文献[14]绘制; 表2~6为作者自绘。

(编辑 / 遼羽静)