引文格式：周繁,付明花. 运用地理探测器和地理加权回归模型分析城市渍水成因[J]. 地理空间信息, 2025, 23(1): 66-69. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.01.014

运用地理探测器和地理加权回归模型分析城市渍水成因

周　繁[1]，付明花[1*]
（1. 武汉市不动产登记中心，湖北 武汉 430014）

摘　要：以武汉市青山海绵城市示范区为例，选取地表覆盖、水系统、雨水排水管网、地形4类共10个因子，采用地理探测器和地理加权回归（GWR）模型分析渍水成因。结果表明：①渍水的主要驱动因子是坡度标准差、高程标准差、硬化地表面积占比和坡度，且因子间两两交互均对引起渍水有增强作用，特别是硬化地表面积占比与其他主要驱动因子交互后增强作用明显；②除硬化地表面积占比对渍水以正向作用为主外，其他各主要驱动因子均表现出明显的空间异质性。研究结果有望为渍水成因分析提供一种全新的视角。

关键词：渍水；地理探测器；GWR模型；主要驱动因子；空间异质性
中图分类号：TU984　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）01-0066-04

Driving Factor Analysis of Urban Waterlogging Using Geodetector and Geographical Weighted Regression Model

ZHOU Fan[1], FU Minghua[1]
(1. Wuhan Real Estate Registration Center, Wuhan 430014, China)

Abstract: Taking Qingshan pilot area, a sponge city construction pilot area in Wuhan for example, we selected ten factors from four categories of surface coverage, water system, drainage infrastructure and topography to analyze the causes of urban waterlogging, using Geodetector and geographical weighted regression (GWR) model. The results show that ①the main driving factors are standard deviation of slope, standard deviation of elevation, percentage of impervious surface area and slope, and the interaction between the main driving factors always exhibit enhanced effect on urban waterlogging, especially when the percentage of impervious surface area interacts with the other main driving factors, it has a significant enhancement effect. ②With the exception of percentage of impervious surface area, which is predominantly positive for urban waterlogging as a whole, each of the other main driving factors exhibits significant spatial heterogeneity. The study results are expected to provide a new perspective to study the driving forces of urban waterlogging.

Key words: waterlogging, Geodetector, GWR model, main driving factor, spatial heterogeneity

随着极端暴雨天气的增多[1]和城市化的快速发展，城市渍水问题日益突出[2-3]。挖掘城市渍水驱动要素和作用机理，有助于完善城市防洪除渍减灾体系、提升城市防洪除渍能力、减轻城市渍水灾害损失[2]。目前国内外除采用数理统计分析法[3-4]分析致灾机理外，多采用构建精细化城市雨洪模型[5-7]模拟分析城市降水过程。模型模拟分析通常在较理想的设定下进行实验，对于模拟数据的精度要求很高，预测精度普遍不理想。近年来一些研究利用空间分析和数据挖掘等方法对造成渍水的因子进行分析挖掘，为城市解决渍水问题提供了参考。孙喆[8]利用相关分析方法从汇水区层级分析了北京中心城区的渍水因子，指出地表覆盖类型、水系统和排水基础设施是影响城市渍水的3类主要因素；吴嘉欣等[9]利用K-means聚类和Apriori算法研究发现，沿海地区洪涝灾害多发生于不透水率高的居民区，地势平缓低洼地区容易引发更严重的洪涝灾害。目前对于引发渍涝灾害因子的定量分析，往往侧重于考量单因子对整体环境的影响，忽视了不同地区渍水成因的差异性、多重性和错综复杂性。基于此，本文结合地理探测器和地理加权回归（GWR）模型，以武汉市青山海绵城市示范区为例，选取武汉市地表覆盖、水系统、雨水排水管网、地形等数据，利用地理探测器识别引起渍水的主要驱动因子及其交互作用；利用GWR模型探析主要驱动因子与渍水程度之间的地理空间关系，以甄别不同区域的渍水原因，为改善渍水问题提出建议，同时为渍水成因分析提供一种新视角。

第一作者简介：周繁（1977—），高级工程师，主要从事不动产登记相关政策及信息化工作，E-mail：1120167513@qq.com。
通信作者：付明花（1990—），硕士研究生，工程师，主要从事不动产登记政策研究和信息化工作，E-mail：1003917805@qq.com。

1　数据来源与研究方法

青山海绵城市示范区地处城市建成区，北临长江、南接东湖、东边为武钢老工业区，面积约为23 km^2（图1），整体以半平原、半丘陵为主，地势东高西低，区域雨量充沛，4—8月雨水较多，部分地区渍水问题较严重。利用2012—2017年武汉市水务局收集的渍水点数据，以渍水深度为权重，通过核密度分析得到青山海绵城市示范区的渍水情况（图2）。

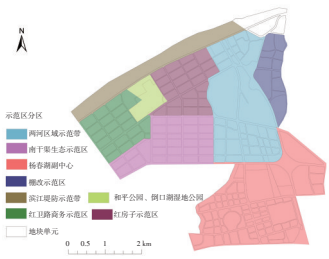


图1　青山海绵城市示范区分区示意图

审图号：武汉市S(2018)014号

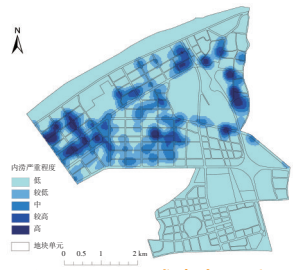


图2　研究区域渍水严重程度分布图

审图号：武汉市S(2018)014号

1.1　数据来源

影响渍水的潜在因素主要包括地表覆盖类型、地形、水系统和排水基础设施4类，具体数据来源见表1。

表1　数据来源与描述

因子类型	因子	来源	描述
地表覆盖类型	硬化地表面积占比	武汉市2017年地理国情监测数据	反映地表雨水渗透能力
	透水地表面积占比		
	硬化地表破碎度	武汉市硬化地表数据（根据地理国情监测数据提取）	表示硬化地表被分割程度
	硬化地表分离度		表示硬化地表被空间隔离的程度
地形	高程	测绘部门提供的青山区5 m分辨率DEM数据	影响雨水在地表流淌、汇集
	高程标准差		
	坡度		
	坡度标准差		
水系统	水域面积占比	武汉市2017年地理国情监测数据	反映天然水系统对局部地区雨水的调蓄作用
排水基础设施	地下雨水排水管网密度	测绘部门提供的青山区地下雨水排水管网数据	反映地区的排水设施服务能力

1.2　主要方法

1）地理探测器是用于探究地理空间要素空间异质性分布及其背后影响因素的一种分析方法[10-11]，主要采用因子解释力指标定量分析主要风险因子和因子间的交互作用。假定 q 为因子解释力，计算公式[12]为：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\times\sigma^2} \tag{1}$$

式中，L 为自变量或因变量的分层；N_h、σ_h^2 分别为 h 层的样本数和方差；N、σ^2 分别为研究区域整体的样本数和方差。

2）GWR模型是计算地理要素空间异质性分布的一种经典空间回归模型，既能有效估计具有空间自相关性的数据，又能反映参数在不同区域的空间异质性[13-14]。利用GWR模型进行空间局部回归，可以分析各驱动因子在不同区域对渍水的影响程度。其计算公式为：

$$y_i=\beta_0(\mu_i,\upsilon_i)+\sum_{k=1}^{P}\beta_k(\mu_i,\upsilon_i)x_{i,k}+\varepsilon_i \tag{2}$$

式中，i 为样本点的空间索引；y_i 为样本点 i 的因变量；(μ_i,υ_i) 为样本点 i 的坐标；$\beta_0(\mu_i,\upsilon_i)$ 为模型在样本点 i 的常数项；$\beta_k(\mu_i,\upsilon_i)$ 为样本点 i 第 k 个自变量的回归系数；$x_{i,k}$ 为样本点 i 的第 k 个自变量；ε_i 为样本点 i 的随机误差项。

2　实验结果与分析

2.1　渍水驱动因子探测

本文选取地表覆盖、地形、水系统和雨水排水管网4类共10个驱动因子，利用地理探测器分析因子对渍水程度的解释力。由于区域渍水往往是由渍水点所处汇水区雨洪平衡破坏造成的[8]，因此分析样本单元选取青山海绵城市示范区各汇水区内封闭的地块单元，以 q 值表示因子对渍水程度的解释力，各驱动因子解释力探测结果见表2，可以看出，各因子解释力的 P 值均小于0.01，均通过了0.01水平下的显著性检验，说明所选因子对渍水程度的空间分异都具有显著影响，可作为影响因子分析渍水成因。不同因子对渍水程度的解释力具有差异性，各因子 q 值在0.1~0.4之间，其中 q >0.3的因子有4个，从高到低依次为坡度标准差、高程标准差、硬化地表面积占比和坡度，这些因子是引起渍水的主要驱动因子。3个地形因子、1个地表覆盖因子，说明示范区内地形和地表覆盖的透水特性对于渍水形成的解释力很强；4个主要驱动因子的 q 值差异不大，说明形成渍水的机制是多个因

子共同作用形成的，而不是由单个因子主导。

表2 各驱动因子解释力地理探测结果

驱动因子类型	驱动因子	P值	显著性水平	q值
地表覆盖透水特性	硬化地表面积占比	<0.01	0.01	0.353
	透水地表面积占比	<0.01	0.01	0.163
	硬化地表破碎度	<0.01	0.01	0.164
	硬化地表分离度	<0.01	0.01	0.142
地形	高程	<0.01	0.01	0.279
	高程标准差	<0.01	0.01	0.391
	坡度	<0.01	0.01	0.316
	坡度标准差	<0.01	0.01	0.395
水系统	水域面积占比	<0.01	0.01	0.134
排水基础设施	地下雨水排水管网密度	<0.01	0.01	0.210

利用地理探测器的交互探测模块对4个主要驱动因子进行分析，交互作用值表示两个因子对产生渍水的共同影响，结果见表3，可以看出，各主要驱动因子间都存在相互增强的作用，但没有强烈的非线性增强的交互作用对，说明各主要驱动因子对渍水产生具有共同影响、相互增强的效应；从因子交互作用来看，硬化地表面积占比与其他3个因子的交互作用值明显高于各单因子解释力，而坡度标准差、高程标准差和坡度3个因子两两交互作用值并没有显著高于各单因子解释力值，说明在渍水形成机制上，地表覆盖与地形的交互作用更明显，当地形不利于雨水排出时，地表覆盖的透水特性是形成渍水的一个关键因子。

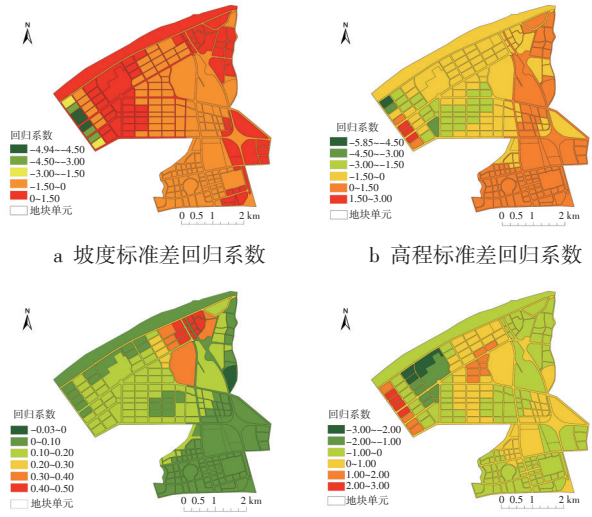
表3 主要驱动因子交互作用探测结果

因子交互作用值	单因子解释力之和	交互作用效应
坡度标准差∩高程标准差=0.507	0.786	双因子增强
坡度标准差∩硬化地表面积占比=0.641	0.748	双因子增强
坡度标准差∩坡度=0.428	0.710	双因子增强
高程标准差∩硬化地表面积占比=0.730	0.744	双因子增强
高程标准差∩坡度=0.468	0.707	双因子增强
硬化地表面积占比∩坡度=0.666	0.669	双因子增强

2.2 渍水驱动因子的空间异质性研究

在地理探测器分析结果的基础上，进一步利用GWR模型进行局部空间回归分析，以探究4个主要驱动因子作用方向和强度在不同空间的差异。结果表明，模型的校正R^2为0.622，高于0.6，具有较高的拟合度；条件数为9.4，小于30，表明模型通过了多重共线性诊断。4个主要驱动因子的局部空间回归结果见图3，从总体上看，各自变量的效应都具有空间非平稳性，且变异程度和呈现的特征不同。

1）坡度标准差的回归系数在-4.94~1.50之间，其中在0~1.50之间的地块有72块，在-1.50~0之间的地块有135块，-4.94~-1.50之间的地块仅有8块，说明坡度标准差回归系数在大多数地块上的波动不大，未表现出强烈的正向或负向作用，仅在示范区最西边的8块地块表现出较强的负向作用。研究区北部和东部地势较高，雨水更容易汇流至地势较低的西部、中部和南部，而西部这8块地块坡度标准差小、坡度小，且地表硬化程度高，自身入渗雨水能力弱，更容易形成渍水点。



a 坡度标准差回归系数　b 高程标准差回归系数

c 硬化地表面积占比回归系数　d 坡度回归系数

图3 主要驱动因子回归系数分布图

审图号：武汉市S(2018)014号

2）高程标准差的回归系数在-5.85~3.00之间，其中在-1.50~1.50之间的地块有181块，占地块总数的84%，说明高程标准差对大多数地块没有表现出强烈的正向或负向作用；在1.50~3.00之间的地块仅有3块，分布在研究区西部边缘的南端，地势低、地表硬化程度高，高程标准差大的地方可能是洼地，容易形成渍水点；在-5.85~-1.50之间的地块主要分布在红房子示范区东南角，南干渠生态示范区中部、北部和西部，以及红卫路商务示范区的中部、西部和南部，这些地块的高程标准差对形成渍水呈现强烈的负向作用说明高低起伏的地势有利于雨水的排出。

3）硬化地表面积占比的回归系数在-0.03~0.50之间，仅有1块地块的回归系数为负值，说明硬化地表面积占比对渍水形成整体上呈正向作用，虽然回归系数及其波动比其他3个因子小很多，但其对渍水形成显著的正向作用说明硬化地表面积占比是形成渍水非常关键的因子。对于绝大部分地区而言，增加透水铺装、绿化或蓄水设施，将会对缓解渍水有明显的改善作用。

4）坡度的回归系数在-3.00~3.00之间，其中

在−1.00~1.00之间的地块有189块，占地块总数的88%，说明坡度对大多数地块的渍水形成没有强烈的正向或负向作用；在−3.00~−1.00之间的地块有10块，主要分布在和平公园、倒口湖湿地公园一带，这些区域绿化程度高，有天然的坑塘水系调节雨水排蓄，而公园里坡度大的地方往往是长期以来形成的天然排水区，坡度对于渍水强烈的负向作用恰恰体现了坑塘水系对雨水良好的调节能力；在1.00~3.00之间的地块有16块，主要分布在红房子示范区东南部和研究区西部边缘地带，这些地块硬化比例高、坡度大的地方往往是局部低洼区域，雨水容易滞留。因此，对于这些局部低洼区域，可通过增加透水铺装或加强排水设施建设来改善渍水问题。

3　结　语

本文以青山海绵城市示范区为例，综合运用地理探测器和GWR模型，对地表覆盖透水特性、地形、水系统和雨水排水管网4类共10个因子进行了分析，研究了示范区影响渍水的主要因子及其在不同空间对渍水的影响，对于城市渍水防治和规划建设具有一定的参考价值。

1）4个主要驱动因子对引起渍水的解释力差异不大，而在交互作用下，因子对于渍水形成的解释力均相互增强，特别是硬化地表面积占比与其他3个因子的交互作用值明显高于各单因子解释力值，说明渍水是由多个因子共同作用、相互影响形成的，且硬化地表面积占比是导致渍水的关键。

2）GWR模型的分析结果表明，硬化地表面积占比回归系数及其波动比其他3个因子小很多，与渍水形成的关系最稳定，且主要呈正相关关系；坡度标准差、坡度、高程标准差均表现出明显的空间异质性，这也印证了硬化地表面积占比是导致渍水的关键因素。在研究区西部边缘地带，坡度标准差强烈的负向作用、高程标准差强烈的正向作用揭示了该区域地势低洼，存在雨水容易聚集的洼地，叠加地表硬化程度高的不利因素，容易形成渍水。坡度回归系数在红房子示范区东南部和研究区西部边缘地带呈现强烈的正向作用，说明这些区域地势低平、排水能力差，容易积水。对于上述区域，建议通过增加透水铺装、屋顶绿化等措施，削弱与硬化地表面积占比的交互，同时升级改造地下排水设施，增加蓄水装置，改善渍水问题。

3）渍水形成的复杂性及其影响因子的相互作用导致渍水形成的机理是城市规划防涝、海绵城市建设治理渍水点的重要依据，尤其是对不同地区因地施策，才能更有效地改善渍水问题。本文融合了地理探测器和GWR模型，为渍水成因分析和防治提供了参考，城市在规划建设时应充分考虑地形地貌，对于先天地势低洼的区域优先规划天然绿地或在建设时合理排布透水地表，在硬化地表上进行透水铺装、升级改造地下排水设施等，预防渍水问题的产生。

参考文献

[1] 黄国如,陈易偲.高度城镇化背景下珠三角地区城市洪涝风险变化特征[J].中国防汛抗旱,2021,31(11):7-13

[2] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等.中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J].水科学进展,2020,31(5):713-724

[3] 李超超,程晓陶,申若竹,等.城市化背景下洪涝灾害新特点及其形成机理[J].灾害学,2019,34(2):57-62

[4] 杨伟明,刘江涛,任翔宇,等.深圳内涝防治对策与相似特征城市对比分析[J].中国市政工程,2023(1):83-87

[5] Chen P,Zhang J,Jiang X,et al. Scenario Simulation-based Assessment of Trip Difficulty for Urban Residents Under Rainstorm Waterlogging[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2012,9(6):2057-2074

[6] 吴思,王芳,齐同湘,等.DHI MIKE软件在武汉市典型雨水系统评估中的应用[J].中国给水排水,2014,30(19):113-115

[7] 付潇然,王东,栾清华,等.大尺度无管流数据城区SWMM构建及模拟:II.模型参数校验及暴雨径流模拟分析[J].水科学进展,2020,31(1):51-60

[8] 孙喆.北京中心城区内涝成因[J].地理研究,2014,33(9):1 668-1 679

[9] 吴嘉欣,林凯荣,刘梅先,等.基于Apriori算法的沿海地区洪涝灾害成因分析[J].中国农村水利水电,2023(5):111-118

[10] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134

[11] Wang J，Li X，Christakos G，et al. Geographical Detectors-based Health Risk Assessment and Its Application in the Neural Tube Defects Study of the Heshun Region，China[J]. International Journal of Geographical Information Science,2010,24(1):107-127

[12] 杨忍,罗秀丽,陈燕纯.中国县域乡村地域多功能格局及影响因素识别[J].地理科学进展,2019,38(9):1 316-1 328

[13] Brunsdon C,Fotheringham S,Charlton M. Geographically Weighted Regression[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series D (the Statistician),2017,47(3):431-443

[14] 王珂靖,蔡红艳,杨小唤.多元统计回归及地理加权回归方法在多尺度人口空间化研究中的应用[J].地理科学进展,2016,35(12):1 494-1 505