

引用格式:LI Qiuping, LI Xuemei, GONG Zhiyuan, *et al.* Spatial and temporal pattern and cause of waterlogging in the central urban area of Lanzhou[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(4): 935-944. [李秋萍, 李雪梅, 龚志远, 等. 兰州市中心城区内涝时空格局和成因分析[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(4): 935-944.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.4.0935

兰州市中心城区内涝时空格局和成因分析

李秋萍¹, 李雪梅^{1,2,3}, 龚志远¹, 秦启勇¹, 张 博¹

(1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州 730070;

3. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为探究城市地区内涝灾害成因和分布特征,以兰州市中心城区为例,基于2010~2020年月平均降水数据和历史积水点资料,选取人口密度、路网密度、给排水设施距离、高程、地形起伏度、坡度、归一化植被指数和不透水面百分比数据作为探究内涝驱动因子的指标,采用水文分析、空间相关性分析和地理探测器等方法,研究内涝灾害的时空分布格局、驱动因子及交互作用关系。结果表明:①11 a间兰州市内涝灾害与降水集中期高度吻合,均在6~9月份,7~8月份主汛期内涝灾害最严重。表明内涝灾害频次分布与降水格局密切相关;②空间上兰州市积水点主要分布在城关区,其次为安宁和七里河区,西固区最少;③归一化植被指数和不透水面百分比是兰州市内涝灾害的主要驱动因子,其次是人口密度,但任意两个驱动因子的交互作用均远大于单个因子。因此,兰州市内涝灾害需要在多因素综合考虑的前提下,采取多举措进行综合治理。

关键词:兰州市中心城区;内涝成因;时空分布;交互作用;地理探测器

中图分类号: TU998.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2023)04-0935-10

1 引言

城市内涝是极端降雨频发造成的地表径流过多短时间内汇集至低洼处无法及时排出而发生积水的自然灾害现象。近年来,中国多个城市内涝频发,对国民经济和社会发展造成了极大的负面影响。2021年河南7.20特大暴雨事件是因极端暴雨导致严重城市内涝、河流洪水、山洪滑坡等多灾并发,造成重大人员伤亡和财产损失的特别重大自然灾害,因灾死亡失踪398人,造成直接经济损失885亿元。而兰州市近10 a来也遭受了14次内涝灾害,总损失近亿元,特别是2018年8.2强降雨事件造成当地371人受灾,直接经济损失1 991万元。城市内涝现已成为威胁人民生命财产安全的“城市病”^[1],降低城市内涝风险的提议得到社会广泛认可^[2]。因此,加

强内涝灾害预防能力已成为城市可持续发展的目标。

在全球化和城市化的时代大背景下,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次气候变化评估报告中指出,与极端降水紧密相关的城市雨洪和山洪等骤发性洪涝灾害将变得更加严重和频繁^[3]。近年来,我国水文环境也发生了巨大变化^[4]。2021年度《中国气候公报》中指出,我国气温增速快,降水增加趋势显著,暖湿化特征明显。同时,极端天气事件呈多发、强发、广发、并发趋势,高强度局部降雨事件发生频繁^[5]。其中,极端暴雨事件是影响城市内涝的最关键因素^[6-7]。城市内涝成因包括环境因素与人为因素^[8-9],环境因素主要包括气候条件、城市地形、地势等,人为因素则包括土地利用

收稿日期:2022-06-11;修订日期:2023-07-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41761014),兰州交通大学“百名青年优秀人才培养计划”,兰州交通大学优秀平台支持(201806)。

作者简介:李秋萍(1995—),女,四川南充人,硕士研究生,主要从事地质灾害研究。E-mail: 1658015086@qq.com

通讯作者:李雪梅(1983—),女,山东菏泽人,副教授,主要从事气候变化和积雪遥感研究。E-mail: lixuemei@lztu.edu.cn

变化、城市管理规划以及社会经济发展等。宋晓猛等^[10]指出,持续性降雨和短时高强度降雨是城市暴雨内涝的主要驱动因子。李彬烨等^[11]通过收集广州市严重内涝资料,发现暴雨引发的内涝点在时空上呈明显动态变化。Zhang 等^[12]利用地理加权回归模型反映不同位置的参数,指出城市微地形的存在使低洼区域更容易汇集地表径流产生积水。Wu 等^[13]发现发展中国家排水设施普遍设计标准低,管理不足,在暴雨天气下难以发挥积极作用。除管理问题外,快速的城市化进程也使得城市用地结构发生变更,导致下垫面性质发生显著变化^[14]。土地覆盖方面,土地利用对城市内涝的影响最为显著^[15-16]。建筑用地占比不断增加,不透水面也相应增加,导致洪峰流量增加并呈线性增长关系,内涝灾害的影响日益显著^[17-18]。Gori 等^[19]结合土地利用预测模型和分布式水文模型发现土地利用增量变化会显著改变城市滨水区域的洪涝风险。史培军等^[20]利用 SCS 模型模拟深圳市流域径流过程,发现土地利用变化是径流量增大的主要原因。

综上所述,城市内涝是多种因素共同作用的结果,内涝物理过程的复杂性、驱动因子的综合性以及城市建成环境的高空间异质性都给城市水文研究与内涝模拟带来了巨大挑战^[21]。“城市看海”成为国内众多城市面临的新难题^[22],探索内涝成因机制和应对策略逐渐成为研究热点。然而,现有城市内涝研究主要聚焦于雨水充沛、城市化发展程度高的南方城市,如广东、深圳、武汉等,对于干旱少雨城市

内涝相关研究则相对较少。本文以兰州市中心城区为例,旨在基于历史内涝事件数据研究兰州市内涝时空分布格局和动态变化。从人文因素与自然因素出发,选取合适的驱动因子分析兰州内涝的具体成因,并定量分析各驱动因子之间相互作用关系。该研究对缓解城市内涝和改善人居环境具有重要意义。

2 研究区与方法

2.1 研究区与数据获取

兰州市作为甘肃省省会,位于中国版图的几何中心,西部地区重要的城市之一。兰州市中心城区现辖城关、七里河、安宁和西固 4 个区。兰州市地势西部和南部高,北部低,黄河自西南流向东北,横穿全境,切穿山岭,形成峡谷与盆地相间的串珠形河谷,地形地貌特殊,带状盆地城市特征显著。兰州市属于典型的半干旱地区,气候干旱少雨,蒸发量大,年均降水量为 327 mm,大部分区域较为干燥。贯穿市区的黄河流量多年平均在 305 亿 m^3 左右。兰州市暴雨过后,洪水沿南北两山下泄,极易引发城市内涝,造成部分道路堵塞甚至中断。

研究所用数据包括归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、不透水面、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、兰州市常住人口密度、路网密度、给排水设施和历史积水点数据。其中 NDVI 数据通过欧空局官网(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)下载空间分辨率 10 m 的 Sentinel-2 影像(成像时间为

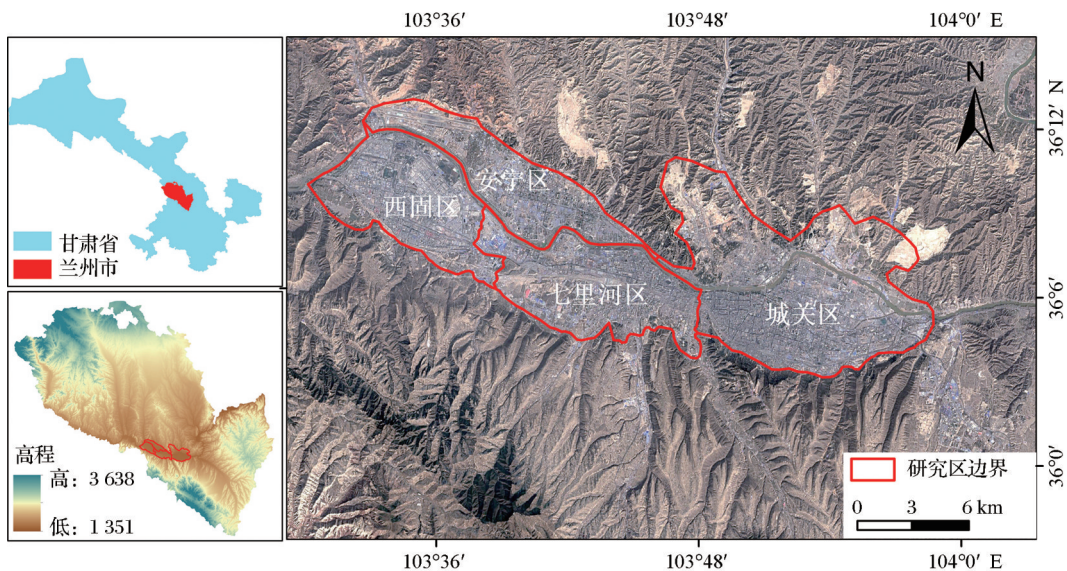


图 1 研究区

审图号:GS(2020)4619

Fig. 1 Map of the study area

2020年8月2日)计算获取,并基于欧空局 WorldCover 全球土地覆盖数据(<https://esa-worldcover.org/en>)提取不透水面。DEM数据在 EARTHDATA 网站下载(<https://search.asf.alaska.edu/#/>),空间分辨率为 12.5 m。由于近 10 a 来兰州市虽然内涝灾害频发,但内涝事件信息的采集并不完善,研究所采用的内涝数据主要来源于相关新闻、社交媒体网络、政府文件记录和实地考察等,视每一内涝事件为一个点,在 ArcGIS 软件和 Google Earth 软件中进行数字化,称之为内涝点数据。兰州市人口密度来自全国第七次人口普查数据,路网数据通过 Open Street Map 网站(<http://download.geofabrik.de/asia.html>)获取,给排水设施数据通过《兰州市城市总体规划(2011-2020年)》配准后矢量化得到。

2.2 研究方法

2.2.1 积水点分布及汇水区划分

当积水点所在集水区雨水分布不均衡时,就会发生城市暴雨内涝,这种“城市病”仅从积水点分布的角度难以深入展开研究。因此,城市暴雨内涝的研究应从集水区的角度讨论,并从根本上分析积水点与集水区的关系。通过获取精度为 12.5 m 的 ALOS DEM 高程数据,经过影像预处理,包括拼接和剪裁等,基于 ArcGIS 的水文分析模块进行集水

区划分、边界提取等操作,获取兰州市中心城区 65 个流域单元分布图。同时,以历史积水点资料为基础,对兰州市中心城区积水点的分布进行矢量化,建立了兰州市共计 86 个积水点空间分布数据集(图 2)。该数据集可以反映兰州市主城区内涝状况。

2.2.2 内涝密度估计

由于内涝事件作为点进行处理,很难直接表达周边内涝情况。核密度估计(Kernel Density Estimation, KDE)可以有效表征这些邻近地区的暴雨内涝程度。核密度估计是一种非参数估计算法,通过构建一个光滑表面表征点群密度,常用于计算随机分布地理对象的密度。采用核密度估计方法可获取各径流子区的暴雨内涝情况,其数学表达式为:

$$f_n(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{\Delta d}{h}\right) (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

$$K(x) = \begin{cases} \frac{3}{4}(1-x^2), & x \in [0,1] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中: n 是窗口中的事件点数量; h 表示带宽; K 是内核函数; Δd 显示从窗口中的中心栅格到事件点栅格的距离。在核密度估计中,带宽是一个重要参数。因此,需要重复设置带宽,并比较点密度曲面的平滑度以确定最佳带宽。

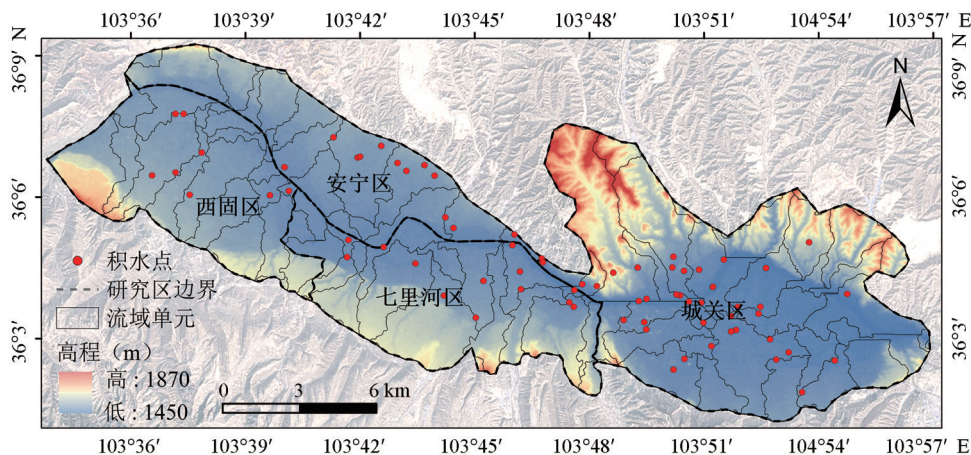


图2 流域单元与积水点位置分布

Fig. 2 Distribution of watershed units and stagnant points

2.2.3 地理探测器

地理探测器是基于分层空间异质性的空间统计工具,已被广泛用于研究空间异质性和地理现象驱动力等方面。地理探测器根据具体分析功能可以分为4部分:分异及因子探测器、风险探测器、生态探测器和交互式探测器^[23]。研究主要采用因子探测器和交互探测器,以揭示驱动因子对城市内涝

灾害解释力以及因子间的相互作用关系。

因子探测器,不同因子对因变量的解释力可以用因子检测器计算的 q 值度量。它将不同分区因子的总方差与整个研究区域因子的总方差进行比较,以评估部分驱动因子对内涝的影响。因子检测器可以检测出自变量 X (驱动因子)对变量 Y (内涝密度)的影响力,在一定程度上解释变量 Y 的空间分

异机制。因此,本文选择因子探测器来分析内涝变化驱动机制,通过 q 值测算,估计公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_h^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (3)$$

其中: $h=1,2,\dots,N_h$ 和 N 为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 表示层 h 和全区的方差;SSW和SST表示层内方差之和全区总方差。 q 的取值范围是 $[0,1]$,若分区由自变量 X 生成,则 q 值越大说明自变量 X 对因变量 Y 的解释力越强,反之则越弱。 $q=1$ 时,所选驱动因子能充分解释城市内涝灾害的密度分布; $q=0$ 时,驱动因子与内涝密度分布无关。

交互探测器用于检测两个不同个体因素对单个因变量的综合效应是否显著大于或小于单个因素的个体效应^[24]。它是通过比较两个因素的 q 值之和与两因素交互作用的 q 值进行确定的,即分析驱动因子 X_1 和 X_2 共同影响作用时是否会增强或削弱对因变量 Y 的影响作用力。交互探测器首先分别计算两个驱动因子 X_1 和 X_2 对因变量 Y 的 q 值: $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$,再计算两个驱动因子相交下的 q 值,即 $q(X_1 \cap X_2)$,最后通过比较 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 和 $q(X_1 \cap X_2)$ 以得到不同驱动因子最终的决定力值。

3 内涝时空分布与成因分析

3.1 内涝事件时间分布特征

3.1.1 极端降水阈值确定

兰州市内涝多集中在夏、秋两季,暴雨是内涝灾害的主要诱因^[25]。主汛期在7~8月份,极端降雨也多集中在汛期,致灾性严重。因此,内涝事件的时间分布特征需要与降雨结合分析。

基于兰州市区内距离研究区最近的一个国家降水站点收集的1990~2020逐年日降水量,采用百分位法确定极端降水阈值^[26]。将兰州市31年间降水量序列由小到大排列,设定第95个百分位的31年平均值为极端降水事件的阈值。当某日降水量超过阈值时,定义为极端降水^[27]。经过计算,该实测站点共有2 264个降水日,极端降水阈值为21.04 mm,发生极端降水天数为58 d,占比2.56%。

3.1.2 内涝事件时间分布

2010~2020年内涝事件及降水量如表1所示,将内涝发生当日的日降水量与极端降水量阈值进行对比,超过极端降水阈值的事件占比57.14%。在记载的14次事件中,内涝灾害事件集中在6~9月份,发生在7~8月份主汛期的事件占比高达

71.4%。因此,内涝事件的时间分布与降水量的枯丰时期高度吻合,多发生在7~8月份的主汛期。

表1 2010~2020年内涝事件及降水量

Table 1 Waterlogging events and precipitation from 2010 to 2020

内涝事件发生 时间	降水量/mm	内涝事件发生 时间	降水量/mm
2010.09.06	45.1	2018.07.01	22.6
2012.08.21	37	2018.07.20	54
2014.07.30	25	2018.08.20	25
2015.08.08	13	2019.06.04	15
2015.09.21	28.8	2019.06.14	15.1
2016.07.18	15.4	2019.08.26	16.9
2017.08.12	18.9	2020.08.23	28.2

3.2 内涝事件空间分布特征

利用2010~2020年历史积水点数据,对兰州市中心城区的空间分布进行分析,结果如图3所示。兰州主城区的积水点出现明显的扩张,2010~2013年,积水事件点共计27个,主要集中在城关区;2014~2017年,积水点增加到58个,在安宁、西固和七里河区的积水点个数明显增加,但绝大部分积水点仍集中在城关区;2018~2020年,积水事件点达到64个,城关区积水点仍然最多,其它3个主城区图上并无明显变化。

对3个时期的积水点进行核密度估计并进行空间自相关分析,莫兰指数(Moran'I)分别为0.725、0.733和0.604,均呈显著的空间自相关性。3个时期的莫兰指数均大于0.6,表明主城区积水点的分布呈“先增加后减小”的聚集性特征,且3个时期的核密度峰值不断增加,进一步说明了积水点在研究区域分布密集程度不断升高。

3.3 影响因素分析

3.3.1 相关分析

城市内涝的分布主要受人类活动^[28]、地形条件^[29]和城市下垫面^[30]影响,为探究不同驱动因子对内涝密度的影响,分别选取人类活动(人口密度、路网密度、给排水设施的距离)、地形条件(高程、地形起伏度、坡度)和城市下垫面(归一化植被指数、不透水面百分比)等8个因子与内涝密度进行相关性分析。其中,给排水设施数据包括供水厂、高位水池、泵站和雨水污水处理设施。

表2为内涝密度与不同驱动因子的相关分析结果。从表中可以看出,本文选取的8个驱动因子均是影响内涝灾害的主要驱动因子,人口密度

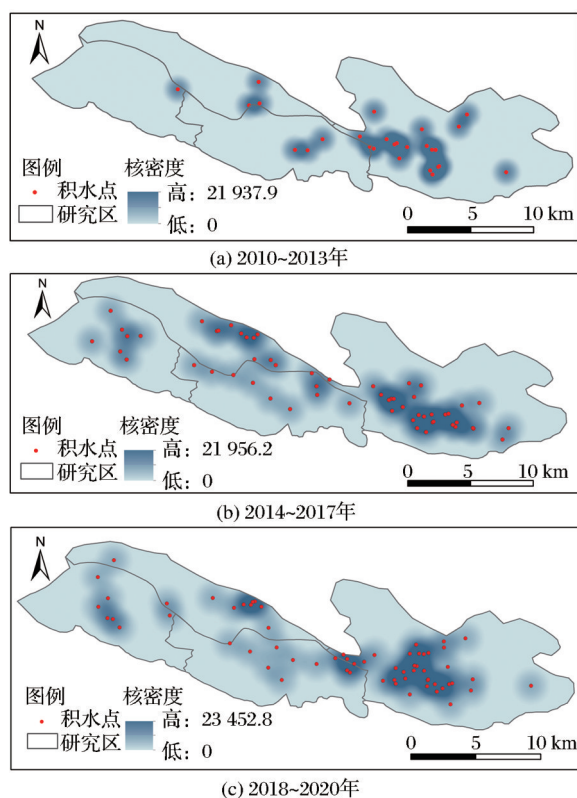


图3 2010~2020年兰州市主城区积水点空间分布及核密度

Fig 3 Spatial distribution and core density of water accumulation points in the main urban area of Lanzhou City from 2010 to 2020

(0.291)、路网密度(0.274)和给排水设施距离(0.193)偏高,均呈现极显著的正相关关系,说明人类活动对内涝影响较大,人类活动越频繁,内涝灾害会更加严重。其次是高程的相关系数(-0.259),呈显著负相关关系,随着高程降低,内涝风险有升高的趋势,比如地下通道,地下轨道交通和车库等地下空间均处于高程较低的区域,更加容易发生内涝灾害。地形起伏度(0.118)和坡度(-0.093)的显著水平均为0.05,相关系数较低,其主要原因是城区内地形变化较小,地势平坦,所以地形起伏度和坡度对内涝灾害的影响并不明显。不透水面百分比(0.314)和归一化植被指数(-0.297)也呈极显著相关关系,表明城市的地面因素是影响内涝灾害的主要因素,不透水面面积占比的增加会提高内涝灾害发生的风险。这是因为研究区覆盖有大面积的不透水面,不利于雨水的下渗,极易产生积水,形成内涝灾害。但在植被覆盖度不断增加的情况下,会形成一个天然的下渗面,抑制内涝灾害的发生。

3.3.2 因子探测器分析

研究发现,西北地区的部分县市的洪涝强度甚

表2 内涝密度与不同驱动因子的相关分析结果

Table 2 Correlation analysis results between waterlogging density and various waterlogging-causing factors

驱动因子	Pearson 相关系数	Sig. (2-tailed)
人口密度/(人/km ²)	0.291**	0.004
路网密度/(km/km ²)	0.274**	0.000
给排水设施	0.193*	0.050
高程/m	-0.259**	0.010
地形起伏度	-0.118*	0.050
坡度/°	-0.093*	0.050
归一化植被指数	-0.297**	0.002
不透水面百分比/%	0.314**	0.000

注:**表示显著性水平为0.01(双尾);*表示显著性水平为0.05(双尾)。

至高于东中部的一些地区,表明下垫面和人类活动因素影响灾情分布^[31]。因此,选取人口密度(X_1)、路网密度(X_2)、给排水设施距离(X_3)、高程(X_4)、地形起伏度(X_5)、坡度(X_6)和归一化植被指数(X_7)和不透水面百分比(X_8)等8项指标作为驱动因子,采用地理探测器的因子探测器分析兰州市主城区内涝灾害成因。使用自然间断法对8项指标进行分级,选择自然间断法因为它是根据数据内在属性确定聚类,以减少组内方差,增加组间方差,该方法已广泛应用于地理探测器的数据分类。将 X_1 - X_8 指标因子划分为6个等级,基于65个流域单元对因子数据进行统计,分别计算出不同驱动因子对兰州市区内涝密度的影响值 q 值,从而对关键驱动因素进行定量评价(图4)。

因子检测器可以揭示各种因子对内涝密度的影响,通过 q 值,可以获取各因子对内涝密度的影响存在显著差异。表3为计算得到的驱动因子分级和地理探测器结果。从表中可得知,城市化因素(人口密度、路网密度和给排水设施距离)对内涝密度的影响较大, X_1 、 X_2 和 X_3 分别为0.263、0.254和0.212,三者对内涝密度分布的解释力均超过20%,说明人口密度和路网密度越大,对内涝灾害的影响越大。同时,给排水设施距离越远,城市内涝的发生概率越高。地形因素(高程、地形起伏度和坡度)对内涝密度的影响不同,高程(X_4)对应的 q 值远大于地形起伏度(X_5)和坡度(X_6)的 q 值。研究表明,积水区多集中在低洼地区^[32],说明高程较低的区域更容易产生积水,引发内涝灾害,因此高程的 q 值较高。地形起伏度越高,坡度差值越大,越容易产生积水。但兰州市中心城区坡度变化较小,地势起伏变化不大,坡度差值小, q 值也相对较低,所以这两

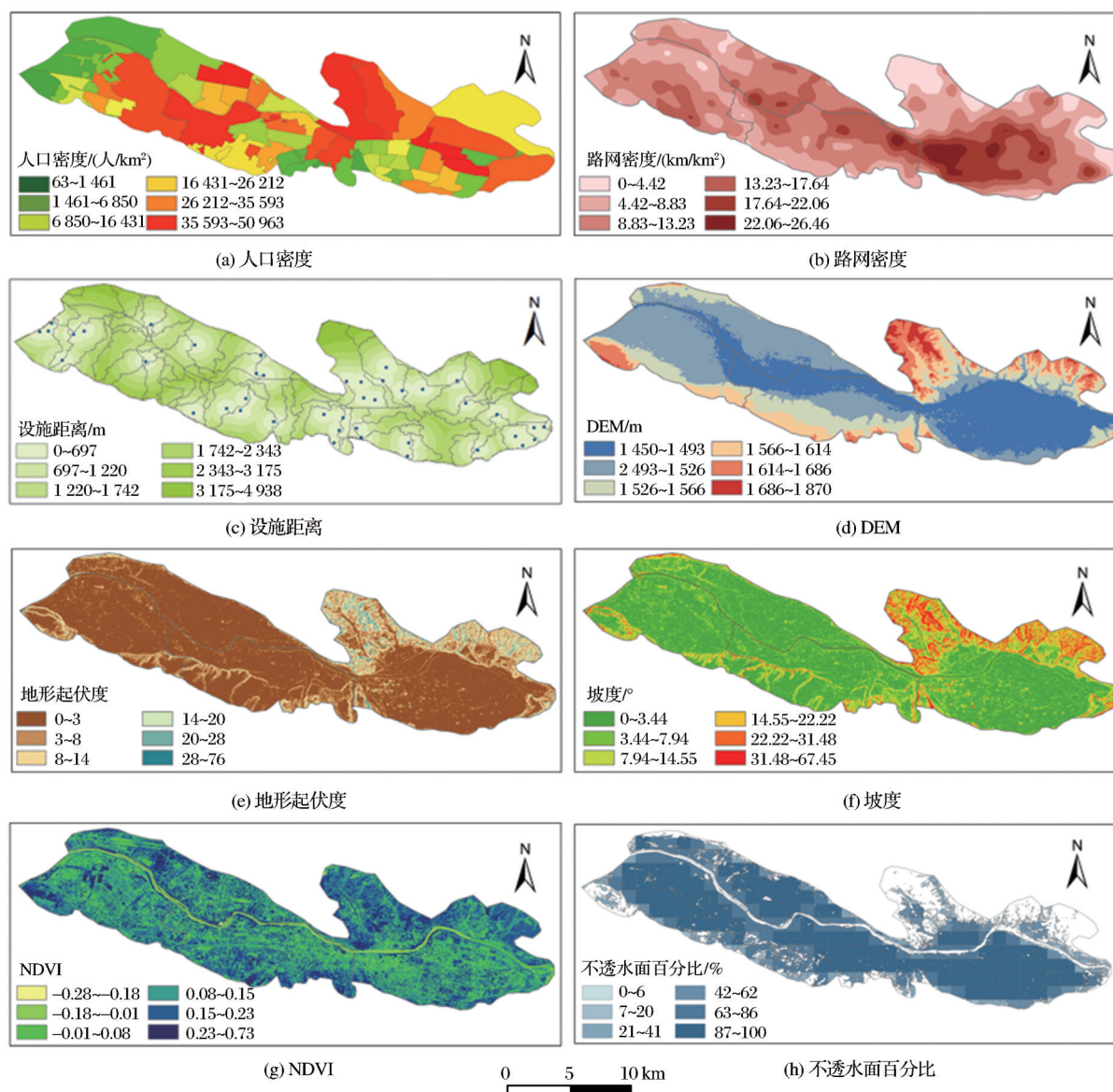


图4 影响因子分级结果

Fig.4 Impact factor grading results

个因子对内涝灾害的解释力最低。为探究城市下垫面对内涝灾害的影响,选取 NDVI(X_7)和不透水面百分比(X_8)两种地表因素。结果表明两个因子 q 值最高,分别为 0.311 和 0.354,对内涝灾害的解释力均超过 30%。其主要原因是兰州市中心城区不透水面占比较高时,降水停留在地表无法及时排出,从而产生积水引发内涝,另一方面,城区植被覆盖度低,天然的下渗面减少,会提高内涝灾害发生的风险。

将因子探测器的结果与相关性分析结果作对比,相关性结果为不透水面百分比>NDVI>人口密度>路网密度>给排水设施距离>高程>地形起伏度>坡度,两组结果基本一致,城市下垫面因

素对城市内涝影响最大。两组结果表明,常住人口的密度和城市路网的发展均会增加城市排水系统的压力,引发内涝灾害,城市发展过程中,给排水设施距离的远近也影响着内涝灾害的防治。其次是城市地形地面因素,地面因素是引发城市内涝的主要因素,防治内涝灾害从高程较低区域减少不透水面覆盖面积着手,加大城市绿化力度,构建绿水青山、人与自然的和谐相处的理念,有利于减轻内涝灾害的影响。地形起伏度和坡度影响较小,无论是相关系数还是 q 值都很小,表明兰州市中心城区地形地势起伏较小,对内涝灾害影响不大,可以忽略以上单因子的影响。

通过单个因子很难进一步揭示不同指标对城

表 3 驱动因子分级和地理探测器结果
Table 3 Impact factor grading and geodetector results

指标	驱动因子分级						q 值
	一级区	二级区	三级区	四级区	五级区	六级区	Y
人口密度/(人/km ²)	63~1 461	1 461~6 850	6 850~1 6431	16 431~26 212	26 212~35 593	35 593~50 963	0.263
路网密度/(km/km ²)	≤4.42	4.42~8.83	8.83~13.23	13.23~17.64	17.64~22.06	22.06~22.64	0.254
给排水设施距离/m	≤697	697~1 220	1 220~1 742	1 742~2 343	2 343~3 175	3 175~4 938	0.212
高程/m	1 450~1 494	1 494~1 532	1 532~1 580	1 580~1 631	1 631~1 702	1 702~1 870	0.186
地形起伏度	≤3	3~8	8~14	14~20	20~28	28~76	0.097
坡度/°	≤3.44	3.44~7.94	7.94~14.55	14.55~22.22	22.22~31.48	31.48~67.45	0.010
NDVI	-0.28~-0.18	-0.18~-0.01	-0.01~0.08	0.08~0.15	0.15~0.23	0.23~0.73	0.311
不透水面百分比/%	0~6	7~20	21~41	42~62	63~86	87~100	0.354

市内涝的作用机制。因此,利用地理探测器的交互探测器模块,分析并量化不同驱动因子间的相互作用关系。对不同因子进行两两组合计算,得到各驱动因子的交互结果,如表 4 所示。两个交互因子的解释力均大于单个因子,对城市内涝灾害呈现出明显的促进作用。这主要是因为内涝形成的原因是复杂的、动态的,单个因子很难造成内涝的实际形成。表 3 可以看出,单子因子的 q 值虽然低,但两两交互因子的 q 值远大于单个因子的 q 值。最小值是 $q(X_5 \cap X_6)$,为 0.125,表示地形起伏度和坡度的交互因子对内涝密度的解释力为 12.5%,比单因素效应增强 129%。最大值是 $q(X_7 \cap X_8)$,为 0.698,比单因素效应增强 197%,不透水面占比越高,植被覆盖度越少,越容易发生内涝灾害。值得注意的是,人类活动因素(X_1 、 X_2 和 X_3)和城市下垫面因素(X_7 和 X_8)交互探测器结果的值均大于 0.4,表明这两类因素对城市内涝的解释力超过 40%。这些结果强调了驱动因子的交互作用对城市内涝的影响,相互作用会进一步促进城市内涝的发生。

表 4 驱动因子和交互探测器结果
Table 4 Impact factor and results of interactive detector

q 值	因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
0.263	X_1	0.263							
0.254	X_2	0.287	0.254						
0.212	X_3	0.584	0.497	0.212					
0.186	X_4	0.545	0.422	0.348	0.186				
0.097	X_5	0.402	0.358	0.396	0.244	0.097			
0.010	X_6	0.390	0.322	0.300	0.276	0.125	0.010		
0.311	X_7	0.485	0.449	0.426	0.317	0.131	0.212	0.311	
0.354	X_8	0.613	0.571	0.562	0.544	0.397	0.332	0.698	0.354

4 讨 论

本文以汇水区为统计单元对内涝密度进行统

计,汇水区的划分为兰州市中心城区提供更精准的数据基础。从城市地形的角度出发,实现了集水区和内涝点的衔接,反映了积水汇集时的流量、流向特征,利用兰州市中心城区历史内涝事件分析积水点的分布特征,积水点数据在网络开放数据的基础上进行分析整理,提高了数据的准确性与时效性。地理探测器模型与普通的回归分析不同,不仅可以度量线性和非线性关系的变量,还可以探测因子间的交互作用,从而更系统地反映出内涝的驱动因子。

由于研究区域城市积水数据和管网数据的版权限制,需要在未来的研究中引入更加官方权威的资料对城市内涝与驱动因子之间的关系展开进一步分析。除本文已考虑的宏观因素外,未来的研究中还需综合考虑城市规划方面的因素,例如城市管网密度和分布等。

5 结 论

本文以兰州市中心城区为实证案例,通过 2010~2020 年月平均降水数据和历史积水点数据对研究区域的暴雨内涝进行时空格局分析,结合兰州市统计年鉴数据和地形地势等,并采用地理探测器模型量化城市内涝的驱动因子,为城市内涝的预测防治提供决策依据。主要结论如下:

(1)从时间分布上看,2010~2020 年间,内涝灾害的发生与极端降水时期基本吻合,说明内涝灾害受降雨格局影响。6~9 月份是内涝灾害的高发时段,7~8 月份的主汛期是内涝发生最严重的时期,发生内涝灾害的概率高达 71.4%。值得注意的是,记录的 14 次内涝灾害符合极端降水的占比 57.14%,其余事件的日降水量与极端降水量相比,最高仅相差 7 mm,持续性降雨和短时强降雨是引

起内涝事件的关键因素,除了极端降水因素,需从小时尺度进一步研究引发内涝的原因。

(2)从空间分布上看,内涝密度最大区域集中在城关区,其次是安宁区和七里河区。对比3个时间段的积水点核密度变化,兰州市主城区积水点数量明显增加,且呈区域聚集的特征。

(3)从影响因素上看,内涝形成的直接原因是降水量的累积。地理探测器中,因子探测器分析结果表明,社会发展水平对内涝灾害具有重大影响。兰州市人口主要分布在本文研究的城关、七里河、西固和安宁4个主城区,这些区域地势较低,依黄河而建,城区内路网密集,进而影响内涝灾害的发生,给排水设施距离越近,对城市内涝积水的排放也越有利,有助于缓解城市内涝。高程、地形起伏度、坡度、不透水面和植被等地形地面因素对内涝灾害的影响也不容忽视。本文中考虑的8种指标对内涝灾害影响最大的是地面因素,归一化植被指数和不透水面等城市下垫面因素极易引发内涝,其次是人口密度、路网密度和给排水设施,最后是高程这一地形因素,地形起伏度和坡度作用效果并不明显。交互因子探测器结果表明,每两两因子的交互影响力均大于各单一因子对内涝密度分布的影响,且城市下垫面因素和人类活动因素的交互影响力远大于地形因素。这对发展快速的城市有一定的警示作用,常住人口、路网和排水设施的分布,均与人类活动密切相关,而城市下垫面也随着人类活动发生改变。人口密度和路网密度的增加,排水设施的规划,都会压缩绿地空间,间接导致不透水面的增加,从而增加内涝发生的风险。考虑到兰州市的发展进程,适当调节人口分布,加强城区绿化,对缓解城市内涝有一定的促进作用。

参考文献(References)(references):

- [1] LEI Shengxiang, SHEN Yanjun, XIAO Qinghua, *et al.* Present situations of development and utilization for underground space in cities and new viewpoints for future development[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(4):965-979.[雷升祥, 申艳军, 肖清华, 等. 城市地下空间开发利用现状及未来发展理念[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 965-979.]
- [2] ZHANG Q, WU Z, TAROLLI P. Investigating the role of green infrastructure on urban waterlogging: Evidence from metropolitan coastal cities[J]. Remote Sensing, 2021, 13(12): 2341. DOI: 10.3390/rs13122341
- [3] FAN Xing, QIN Yuanyuan, GAO Xiang. Interpretation of the Main Conclusions and Suggestions of IPCC AR6 Working Group I Report[J]. Environmental Protection, 2021, 49(Z2): 44-48.[樊星, 秦圆圆, 高翔. IPCC第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议[J]. 环境保护, 2021, 49(Z2): 44-48.]
- [4] HUANG Yilong, WANG Yanglin, LIU Zhenhuan, *et al.* Stream construction characteristics in rapid urbanization area: Shenzhen city as a case[J]. Geographical Research, 2008(5): 1212-1220.[黄奕龙, 王仰麟, 刘珍环, 等. 快速城市化地区水系结构变化特征——以深圳市为例[J]. 地理研究, 2008(5): 1212-1220.]
- [5] CHENG Yufei, CHENG Wenju, HU Xiangquan, *et al.* Response of extreme hydrological events to extreme climate in the shule river basin[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(3): 583-592.[程玉菲, 程文举, 胡想全, 等. 疏勒河流域极端水文事件对极端气候的响应[J]. 高原气象, 2019, 38(3): 583-592.]
- [6] WANG C, DU S, WEN J, *et al.* Analyzing explanatory factors of urban pluvial floods in Shanghai using geographically weighted regression[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2017, 31(7): 1777-1790. DOI: 10.1007/s00477-016-1242-6
- [7] ZHANG H, WU C, CHEN W, *et al.* Assessing the impact of climate change on the waterlogging risk in coastal cities: A case study of Guangzhou, South China[J]. Journal of Hydro-meteorology, 2017, 18(6): 1549-1562. DOI: 10.1175/JHM-D-16-0157.1
- [8] WANG P, DENG X, ZHOU H, *et al.* Responses of urban ecosystem health to precipitation extreme: A case study in Beijing and Tianjin[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 177: 124-133. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.125
- [9] TEHRANY M S, JONES S, SHABANI F. Identifying the essential flood conditioning factors for flood prone area mapping using machine learning techniques[J]. Catena, 2019, 175: 174-192. DOI: 10.1016/j.catena.2018.12.011
- [10] SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, *et al.* Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II: Urban stormwater modeling and management[J]. Advances In Water Science, 2014, 25(5): 752-764.[宋晓猛, 张建云, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——II. 城市雨洪模拟与管理[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 752-764.]
- [11] LI Binye, ZHAO Yaolong, FU Yingchun. Spatio-temporal characteristics of urban storm waterlogging in guangzhou and the impact of urban growth[J]. Journal of Geo-information Science, 2015, 17(4): 445-450.[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.]
- [12] ZHANG Q, WU Z, ZHANG H, *et al.* Identifying dominant factors of waterlogging events in metropolitan coastal cities: The case study of Guangzhou, China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 271: 110951. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110951

- [13] WU J, SHA W, ZHANG P, *et al.* The spatial non-stationary effect of urban landscape pattern on urban waterlogging: A case study of Shenzhen City[J]. Scientific reports, 2020, 10(1):1-15. DOI: 10.1038/s41598-020-64113-1
- [14] LEE C S, HO H Y, LEE K T, *et al.* Assessment of sewer flooding model based on ensemble quantitative precipitation forecast[J]. Journal of hydrology, 2013, 506:101-113. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.09.053
- [15] ZHAO G, PANG B, XU Z, *et al.* Mapping flood susceptibility in mountainous areas on a national scale in China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 615:1133-1142. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.037.
- [16] WU Jiansheng, ZHANG Puhua. The effect of urban landscape pattern on urban waterlogging[J]. Acta Geographical Sinica, 2017, 72(3):444-456.[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.]
- [17] WU Yongping, LIN Yujun, WU Shuting, *et al.* The influence of urban landscape pattern on urban waterlogging of Fuzhou City[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2020, 18(2):57-61.[吴涌平, 林钰珺, 吴妹婷, 等. 福州市景观格局对城市内涝的影响[J]. 中国城市林业, 2020, 18(2):57-61.]
- [18] SUN Yanwei, XU Youpeng, GAO Bin, *et al.* Influence of impervious surface expansion on flood peak under urbanization: A case study of Qinhuai River in Nanjing[J]. Journal of Lake Science, 2021, 33(5):1574-1583.[孙延伟, 许有鹏, 高斌, 等. 城镇化下流域不透水面扩张对洪峰的影响——以南京秦淮河为例[J]. 湖泊科学, 2021, 33(5):1574-1583.]
- [19] GORI A, BLESSING R, JUAN A, *et al.* Characterizing urbanization impacts on floodplain through integrated land use, hydrologic, and hydraulic modeling[J]. Journal of Hydrology, 2019, 568:82-95. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.10.053
- [20] SHI Peijun, YUAN Yi, CHEN Jin. The effect of land use on runoff in Shenzhen City of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(7):1041-1049.[史培军, 袁艺, 陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(7):1041-1049.]
- [21] HUANG Huabing, WANG Xianlin, LIU Lin. A review on urban pluvial floods: Characteristics, mechanisms, data, and research methods[J]. Progress in Geography, 2021, 40(6): 1048-1059.[黄华兵, 王先伟, 柳林. 城市暴雨内涝综述: 特征、机理、数据与方法[J]. 地理科学进展, 2021, 40(6): 1048-1059.]
- [22] XU Xiaoming. Where is the problem of urban flooding[N]. China Youth Daily, 2016-06-15(2).[许晓明. 城市内涝到底哪里出了问题[N]. 中国青年报, 2016-06-15(2).]
- [23] WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographical Sinica, 2017, 72(1):116-134.[王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(01):116-134.]
- [24] WANG J F, LI X H, 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. DOI: 10.1080/13658810802443457
- [25] HU Hongliang, TAN Jue. Causes and countermeasures of water-logging in Changsha Urban Area under extreme meteorological and hydrological conditions[J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2022, 51(10):27-29.[胡红亮, 谭觉. 极端气象水文条件下长沙城区内涝成因及防治对策[J]. 河南水利与南水北调, 2022, 51(10):27-29.]
- [26] XUE Lianqing, LIU Xiaoqun, SONG Jiajia, *et al.* Determine threshold of basin extreme events based on percentile method analysis[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(5):26-29.[薛联青, 刘晓群, 宋佳佳, 张振全, 黎昔春. 基于百分位法确定流域极端事件阈值[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5):26-29.]
- [27] DU H, WU Z, LI M, *et al.* Characteristics of extreme daily minimum and maximum temperature over Northeast China, 1961 - 2009[J]. Theoretical and applied climatology, 2013, 111: 161-171.
- [28] MU Yachao, XIE Yaowen, ZHANG Lingling, *et al.* An enhanced normalized difference impervious surface index[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(2): 83-87.[穆亚超, 颜耀文, 张玲玲, 等. 一种新的增强型不透水面指数[J]. 测绘科学, 2018, 43(2):83-87.]
- [29] YU H, ZHAO Y, FU Y, *et al.* Spatiotemporal variance assessment of urban rainstorm waterlogging affected by impervious surface expansion: A case study of Guangzhou, China[J]. Sustainability, 2018, 10(10):3761. DOI:10.3390/su10103761
- [30] LIU Sheng, HUANG Duo, CHEN Tao, *et al.* Studies on the influence of underlying surface factors on urban waterlogging: A case of Huangpu district, Guangzhou city[J]. WATER & WASTEWATER ENGINEERING, 2022, 58(S1): 665-673.[刘胜, 黄铎, 陈涛等. 下垫面因素对城市内涝的影响探究——以广州市黄埔区为例[J]. 给水排水, 2022, 58(S1): 665-673.]
- [31] HOSSAIN M K, MENG Q. A fine-scale spatial analytics of the assessment and mapping of buildings and population at different risk levels of urban flood[J]. Land Use Policy, 2020, 99:104829. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104829
- [32] XU S, ZHAO Q, DING S, *et al.* Improving soil and water conservation of riparian vegetation based on landscape leakiness and optimal vegetation pattern[J]. Sustainability, 2018, 10(5):1571. DOI: 10.3390/su10051571
- [33] HU Pan, CHEN Bo, SHI Peijun. Spatiotemporal patterns and influencing factors of rainstorm-induced flood disasters in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(5):1148-1162.[胡畔, 陈波, 史培军. 中国暴雨洪涝灾情时空格局及影响因素[J]. 地理学报, 2021, 76(5):1148-1162.]
- [34] LIU Jianfen, WANG Huimin, ZHANG Xingnan. Causes of flood-stricken urban areas in the context of urbanization and its countermeasures[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2012, 14(1):73-75.[刘建芬, 王

慧敏,张行南.城市化背景下城区洪涝灾害频发的原因及对策

[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2012,14(1):73-75.]

Spatial and Temporal Pattern and Cause of Waterlogging in the Central Urban Area of Lanzhou

LI Qiuping¹, LI Xuemei^{1,2,3}, GONG Zhiyuan¹, QIN Qiyong¹, ZHANG Bo¹

(1.Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2.National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;

3.Gansu Provincial Engineering laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to explore the causes and distribution characteristics of waterlogging disasters in urban areas, taking the central city of Lanzhou as an example, based on the monthly average precipitation data and historical water accumulation data from 2010 to 2020, population density, road network density, water supply and drainage facilities distance, elevation, topographic relief, slope, normalized difference vegetation index, and percentage of impervious surface were selected as indicators to explore the driving factors of waterlogging, and the time-space distribution pattern, spatial correlation analysis and geographic detector of waterlogging disasters were studied. Drivers and interactions. The results show that: (1) the flood disasters in Lanzhou City during 11 years highly coincide with the precipitation concentration period, both in June-September, and the waterlogging disaster is the most serious in the main flood season in July-August, indicating that the frequency distribution of the flood disasters is closely related to the precipitation pattern; (2) In space, Lanzhou water accumulation points are mainly distributed in Chengguan District, followed by Anning and Qilihe District, and Xigu District is the least. (3) NDVI and the percentage of impervious surface are the main drivers of flooding disasters in Lanzhou, followed by population density, but the interaction of any two drivers is much greater than a single factor. Therefore, under the premise of comprehensive consideration of multi-factors, Lanzhou waterlogging disaster needs to be comprehensively managed by multi-measures.

Key words: The central urban area of Lanzhou; Causes of waterlogging; Temporal and spatial distribution; Interaction; Geodetector