

城市景观格局对城市内涝的影响研究 ——以深圳市为例

吴健生^{1,2}, 张朴华¹

(1. 北京大学城市规划与设计学院 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055;

2. 北京大学城市与环境学院 地表过程与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 近年来,城市内涝问题频发,引发了强烈关注。现有有关城市内涝问题的研究多关注土地利用与城市内涝的关系,而对于城市景观格局对城市内涝影响的研究则不多。本文以内涝问题严重的深圳市为研究区,利用深圳市2014年5月11日暴雨期间内涝点数据(共278个),选取类型水平上的最大斑块面积比例(Largest Patch Index, LPI)、斑块聚集度(Patch Cohesion Index, PCI)、景观破碎度(Landscape Division Index, DIVISION)、景观水平的蔓延度(Contagion Index, CONTAG)、香农多样性指数(Shannon's Diversity Index, SHDI)共5个景观指数,并结合土地利用类型、不透水率、植被覆盖度、降雨量、地形地势及雨水管网密度等内涝影响因素,运用相关分析和多元逐步回归分析,探究深圳市景观格局对内涝的影响。结果表明:①土地利用类型中,住宅用地等建设用对内涝灾害影响最大,其面积比例的增加会加剧区域内涝程度;②城市各类型景观格局特征中,建设用地斑块的优势度、聚集度越高,景观破碎化程度越低,区域的内涝程度越高,绿地的景观格局对城市内涝的影响与建设用地相反;③城市整体景观特征中,景观整体越复杂越不易引发内涝灾害;④不透水率等人为因素比降雨量等自然因素对城市内涝的影响程度大。本研究的结果可以使人关注到地表景观格局对内涝的重要作用,为内涝治理和景观格局的规划管理提供参考和借鉴。

关键词: 景观格局;土地利用;城市内涝;深圳市

DOI: 10.11821/dlxb201703007

1 引言

城市内涝是指强降雨或连续性降雨超过城镇排水能力,导致城镇地面产生积水灾害的现象^[1]。全球气候变化以及快速城市化背景下,暴雨内涝已经成为中国城市频繁发生、损失严重且影响较大的头等灾害^[2]。2012年北京发生“7·21”特大暴雨内涝事件,2013年上海“9·13”暴雨内涝,2014年深圳“5·11”暴雨内涝等,近年来,“到城市看海”事件屡见不鲜。城市内涝造成了较长时间的城市基本机能瘫痪和巨大的经济损失,影响人们正常的生产生活的同时甚至对人们的生命财产安全产生了严重威胁。城市内涝问题对城市的健康、可持续发展是一个巨大的挑战,是中国城市化过程中面临的重大问题^[3]。

城市内涝问题的成因研究^[4-5]一直是内涝问题研究的焦点,是人们预防、控制及降低灾害损失的重要基础性研究。城市内涝是一种复杂的自然社会现象,是暴雨灾害与人为作用双重影响的结果^[6]。从自然因素来看,城市内涝主要受气象条件和地形地势因素的影响。全球气候变暖背景下,极端暴雨事件发生的频次和强度均有所增加^[7-8]。社会因素

收稿日期: 2016-09-12; 修订日期: 2016-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41330747) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41330747]

作者简介: 吴健生(1965-),男,湖南新化人,教授,博士生导师,主要研究方向为景观生态与土地利用。

E-mail: wujs@pkusz.edu.cn

中,排水设施和土地利用对城市内涝的影响较为显著。排水设施因素受到的关注较多,研究指出:中国城市的雨水管网普遍存在设计标准偏低、建设不合理、管护力度不够等问题^[9],在面对极端降水事件时已无法发挥很好的效用,甚至成为积水内涝的重要诱因之一^[10-11]。土地利用方面,大量研究表明:城市大面积的不透水面会阻隔地表水下渗,切断地表水与地下水之间的水文联系,导致水文循环过程中雨水蒸散发、下渗以及地表径流的比例失调,提高城市内涝灾害的发生频次和强度^[12-13];而耕地、林地、草地等绿地在截留降雨、消减径流和延缓汇流等方面效果显著,能有效降低城市内涝发生风险^[14-15]。

在城市内涝的众多成因中,土地利用影响尤为显著,并逐渐成为城市内涝灾害日趋严重的主要原因^[16-17]。尽管土地利用对城市内涝灾害的影响在很多研究中都已得到了证实,但是有关城市内涝与土地利用结构和景观格局的研究却较少。景观格局是指构成景观的生态系统或土地利用/覆被类型的形状、比例和空间配置^[18]。城市内涝是城市景观格局影响下产生的一种负水文效应^[19],景观格局通过改变暴雨径流的产汇流过程来影响城市内涝的发生和强度^[20],两者之间是典型和复杂的格局—过程关系。景观格局对地表径流的重要影响已在较多的研究中得到了证实。郭雪莲等^[21]通过人工模拟降雨装置实验发现:降水蓄渗率随不透水斑块重要值、形状、均匀度和分离度的改变而相应变化;戚晓明等^[22]在蚌埠市城市化水文效应的研究中指出:耕地破碎化程度越低、连通性越好越利于涵养水分;建筑用地越集中,地表径流量越大;Bautisa等^[23]的研究证实绿地景观格局与径流量之间存在显著的相关关系;Zhang等^[24]对北京绿地的研究中也验证了绿地的集聚格局对减少径流有着积极作用。上述研究多是基于景观格局指数的计算和观测试验、经验公式及建模等水文分析方法,通过分析景观格局对降雨径流的影响来间接反映景观格局对产生积水内涝风险的影响。尽管现有的水文分析方法能够快速有效且较为合理地反映降雨径流特征和地表积水状况,但资料不足等也会导致其在应用和参数确定方面存在较大问题,使得模拟结果与现实降雨情景下的内涝积水状况有所偏差^[20]。暴雨事件下实地记录的内涝点数据是城市内涝状况的真实反映。基于此,本文选取内涝灾害频发的深圳市为研究区,以2014年“5·11”暴雨期间记录的内涝点数据为基础,探究城市景观格局(包括类型水平和景观水平)对城市内涝的影响,以期为城市内涝防治和城市景观格局优化管理提供理论和实践参考。

2 研究区概况

本文以广东省深圳市为研究区。深圳市位于中国东南沿海的珠三角地区,广东省南部,毗邻香港,是中国经济最发达的城市之一。陆域位置是113°46'E~114°37'E、22°27'N~22°52'N,全市总面积为2020 km²。深圳市地处亚热带海洋性季风气候区,气候温暖、湿润、多雨、无霜,夏季长,冬季不明显。全年平均气温高、湿度大、降水充沛,多年平均降水量1837 mm,但降水时空分布不均。时间上,降水主要集中在每年的4-9月份,约占全年降水量的85%;空间上,降水量总体呈现东南多、西北少,自东向西递减的趋势。降水分布的时空差异导致深圳的城市内涝问题十分严重。2014年5月11日,深圳遭遇强降水,全市150处道路积水,20处片区发生内涝,5000多辆公交车无法正常运营,2000多辆汽车被淹,严重影响了市民的生产生活。深圳市防汛防旱防风指挥部所提供的官方统计资料显示,此次暴雨期间,全市范围内共有278个内涝点(图1),鉴于此次暴雨内涝事件影响范围广且具有典型性,本文以此为案例对深圳市的内涝成因问题进行了探究。

城市内涝问题是系统性问题,该问题的产生与其所处流域的水循环过程破坏有关,因此不能仅从特定的内涝点来进行分析,而需要从流域的视角进行研究。本文以DEM为基础数据,通过“八向法”(D8算法)提取水文要素而得到深圳市的流域划分图,以小流域作为研究单元(图1)。

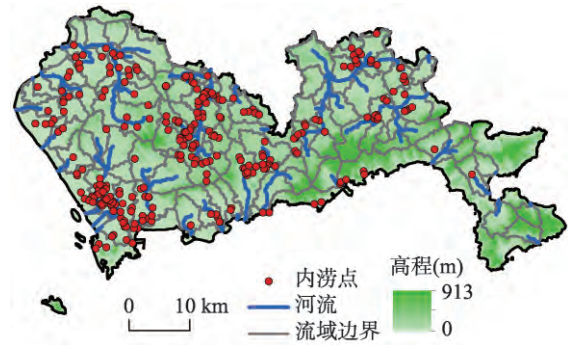


图1 深圳市内涝点分布及子流域划分示意图

Fig. 1 Distribution of waterlogging points and sub-watersheds of Shenzhen

3 数据与方法

本文研究所用的暴雨内涝点数据来源于暴雨内涝记载相关资料选取了深圳市2014年“5·11”暴雨期间的内涝点数据,内涝点共278个。利用ArcGIS软件将其进行矢量化,建立了暴雨内涝点空间数据集;然后将内涝点空间数据集与流域划分图进行叠加,提取含有内涝点的小流域作为研究样本(共56个),计算每个流域的内涝点密度(内涝点密度=流域内内涝点个数/流域面积,单位:个/km²),以此来表征各个小流域的内涝程度。已有研究表明城市内涝主要受到气象条件、地形地势等自然因素和土地利用、排水设施等社会因素的影响^[4-6]。基于此,本文首先将土地利用进行分类,得到土地利用变量,然后通过Fragstats计算景观格局指数(包括类型水平和景观水平),同时结合其他内涝影响变量,包括植被覆盖度、不透水率、日降雨量、地形地势变量以及雨水管网线密度和雨水口点密度等,利用统计分析方法(包括相关分析和多元逐步回归)来探究城市景观格局对城市内涝的影响。研究所需的全部数据信息如表1所示。

表1 研究数据信息表

Tab. 1 Overview of data used in this study

数据名称	数据说明	数据来源
深圳市2014年“5·11”暴雨期间内涝点数据	共278个	深圳市防汛防旱防风指挥部
深圳市2013年土地利用数据	矢量数据	深圳市政府
深圳市2013年遥感影像数据(LANDSAT8)	时间: 2013/10/5,2013/10/28 轨道号: 121/044,122/044	美国地质勘探局(USGS)网站
深圳市2014年5月11日日降雨量数据	50个气象监测站点记录数据	深圳市气象局网站
深圳市DEM数据	分辨率30 m×30 m	地理空间数据云
深圳市雨水管网数据	雨水管线和雨水口分布数据	深圳市政府

3.1 土地利用数据

原始土地利用数据依据《土地利用现状分类(GB/T21010-2007)》共分为12个一级类、56个二级类。本文按照研究的需要将其进行重新分类,最终得到粗、细两种分类精度上的土地利用分类(图2)。然后,提取不同土地利用类型占其所在流域的面积比例作为研究变量。

3.2 景观格局指数

景观格局指数能够高度浓缩景观格局信息,反映景观空间组成和结构特征,且易于计算,被广泛用于衡量景观格局^[18]。因此,本文利用景观格局指数来表征流域的景观格局特征。考虑到各景观格局指数的实际内涵,基于统计上相互独立的原则^[25-26],并参考已

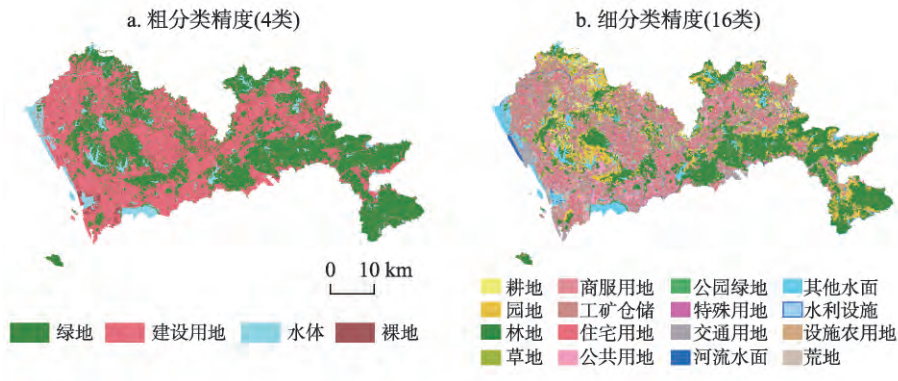


图2 深圳市土地利用分类图

Fig. 2 Land use classification map of Shenzhen

有研究^[24, 27]，本文共选取了5个指数，包括3个类型水平指数：最大斑块面积比例 (Largest Patch Index, LPI)、斑块聚集度指数 (Patch Cohesion Index, COHESION) 和景观破碎度指数 (Landscape Division Index, DIVISION)；2个景观水平指数：蔓延度 (Contagion, CONTAG) 和香农多样性指数 (Shannon's Diversity Index, SHDI)。各指数的具体说明如表2所示，其计算过程在Fragstats 4.2中完成。

表2 研究中选取的景观格局指数简介

Tab. 2 Overview of landscape indices used in this study

尺度水平	指数名称	单位	范围	表征含义
类型水平	最大斑块面积比例(LPI)	%	0<LPI≤100	表征景观类型的优势度。
	斑块聚集度指数 (COHESION)	无	0<COHESION<100	反映同一景观类型的斑块聚集程度，其值越高，斑块内聚度越高。
	景观破碎度指数 (DIVISION)	无	0≤DIVISION<1	反映同一景观类型的斑块分散程度，其值等于0时，该景观类型是由单一的斑块组成的；趋近于1时，该景观类型是由多个小斑块组成的。
景观水平	蔓延度(CONTAG)	%	0<CONTAG≤100	描述不同景观类型的团聚程度或延展趋势。一般来说，高蔓延度值说明景观中的某种优势景观类型形成了良好的连接性；反之则表明景观是具有多种要素的密集格局，景观的破碎化程度较高。
	香农多样性指(SHDI)	无	0≤SHDI	表征景观整体的复杂程度，其值越大，景观整体的复杂程度越高。

注：表中内容来源于Fragstats 4.2用户手册。

3.3 其他变量

根据现有研究可知，城市内涝灾害除受土地利用及景观格局的影响外，还受到下垫面的渗透性、降雨量、地形地势因素及排水设施的影响。因此，本文还增加了包括植被覆盖度、不透水率、降雨量、海拔、地表起伏度、地表粗糙度以及雨水管网线密度和雨水口点密度等其他变量。

植被覆盖度 (Fractional Vegetation Cover, FVC) 是指单位面积内植被的垂直投影面积，它是衡量地表植被状况的一个重要指标^[28]。城市中的道路、广场、屋顶、停车场等建筑物统称为不透水表面 (Impervious Surface, IS)，单位面积地表中不透水面积所占的百分比称为不透水率 (Impervious Surface Percentage, ISP)^[29]。不透水面积比例越大，雨水的蒸发下渗量越小，地表径流量越大，越易产生内涝灾害。相反，绿地则具有

很好的下渗性，可以起到调蓄雨洪的积极作用。因此，本文增加了植被覆盖度和不透水率两个变量来反映下垫面的雨水渗透能力。植被覆盖度和不透水面数据是基于深圳市遥感影像数据，借鉴李苗苗等^[30]和李玮娜^[31]所提出的方法分别获取（图3），然后提取每个小流域的平均植被覆盖度和平均不透水率作为研究变量。

基于50个气象站点记录的日降雨量数据，采用普通克里金空间差值法获取深圳市域范围的日降雨量分布，再提取每个小流域的平均降水量作为研究变量。基于原始DEM数据获取深圳市的海拔分布、地表起伏度分布和地表粗糙度分布，然后提取每个小流域的平均值作为研究变量。基于雨水管网和雨水口分布数据，提取每个小流域的雨水管网线密度和雨水口点密度作为研究变量。上述变量（表3）的获取均在ArcGIS 10.0中完成，以作进一步研究。

3.4 统计分析

研究中的因变量为深圳市2014年“5·11”暴雨期间各小流域的内涝点密度，自变量如表3所示，共包括土地利用类型、景观格局指数和其他变量两大类。本文采用皮尔森相关分析和多元逐步回归的方法来分析城市景观格局对城市内涝的影响，该部分的运

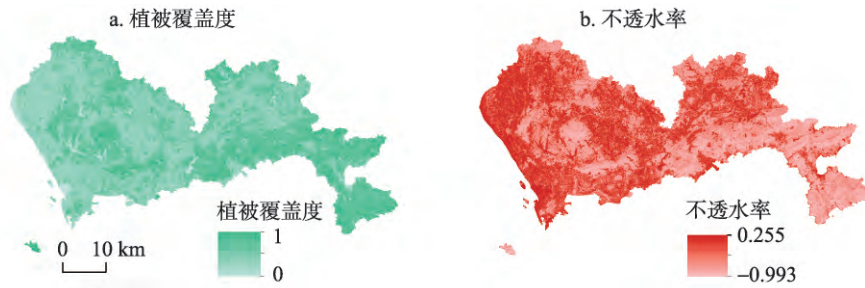


图3 深圳市植被覆盖度和不透水率分布图

Fig.3 Distribution of fractional vegetation cover and impervious surface percentage in Shenzhen

表3 自变量的分类和描述

Tab.3 The classification and description of the independent variables

变量类别	变量子类别	变量名称	变量描述
土地利用类型	4大类	绿地，建设用地，水体，裸地	每种土地利用类型在所在小流域的面积比例
	16小类	耕地，园地，林地，草地，商服用地，工矿仓储用地，住宅用地，公共用地，公园绿地，特殊用地，交通运输用地，河流水域，其他水域，水利设施用地，设施农用地，荒地	每种土地利用类型在所在小流域的面积比例
景观格局指数	4大类	土地利用类型_景观格局指数 (LPI, COHESION, DIVISION) 4大类_景观格局指数(CONTAG, SHDI)	各小流域类型水平及景观水平上的景观格局指数
	16小类	土地利用类型_景观格局指数 (LPI, COHESION, DIVISION) 16小类_景观格局指数 (CONTAG, SHDI)	各小流域类型水平及景观水平上的景观格局指数
其他变量		平均植被覆盖度，平均不透水率，平均日降雨量，平均高程，平均起伏度，平均粗糙度，雨水管网线密度，雨水口点密度	以小流域为单位进行统计

算在SPSS 20.0中完成。

首先,本文采用皮尔森相关分析初步探究城市景观格局对城市内涝的影响。皮尔森相关系数是一种线性相关系数,用来反映两个变量线性相关程度,相关系数绝对值越大表明相关性越强。本文针对各小流域的内涝点密度和影响城市内涝的各变量进行相关分析,找出与内涝点密度相关(置信区间=99%)的土地利用类型与景观格局指数,为进一步研究打下基础。最后,本文采用多元逐步回归的方法探究多种影响因素共同作用下,景观格局对城市内涝的影响程度。在进行多元逐步回归之前,采用Henderson等^[32]的方法对进入回归的变量进行共线性诊断,剔除掉自变量中共线性较大的变量,同时剔除在 $\alpha=0.01$ 显著性水平下不满足T检验或不满足先验假定的变量,然后将剩余自变量和因变量进行多元逐步回归。本文最终得到2个回归模型,进入2个回归模型的自变量分别包括粗、细两种分类精度下土地利用类型、景观格局指数以及平均植被覆盖度、不透水率等其他变量。

4 结果分析

4.1 皮尔森相关分析结果

针对各自变量(表3)和各小流域的内涝点密度进行相关分析,相关性的强弱用皮尔森相关系数表示,获得各自变量与内涝点密度的相关关系。表4列举了 $\alpha=0.01$ 显著性水平下与内涝点密度具有相关关系的变量($Sig. < 0.01$)。

4.1.1 土地利用类型对城市内涝程度的影响

土地利用方面,在 $\alpha=0.01$ 显著性水平下,绿地和水体面积比例与流域内涝点密度存在显著的负相关关系;建设用地面积比例与流域内涝点密度呈显著的正相关关系;裸地面积比例则与内涝程度无明显相关关系。从相关系数的绝对值来看,对内涝灾害影响的重要性程度为:建设用地>绿地>水体。将土地利用类型细分为16类后与内涝点密度进

表4 与内涝点密度相关的变量($\alpha=0.01$)

Tab. 4 Variables closely related with waterlogging point density ($\alpha=0.01$)

变量类别	变量子类别	变量名称(r)
土地利用类型	4大类	绿地(-0.516), 建设用地(0.555), 水体(-0.347)
	16小类	园地(-0.346), 林地(-0.435), 住宅用地(0.599)
景观格局指数	绿地	绿地_LPI(-0.443), 绿地_COHESION(-0.434), 绿地_DIVISION(0.383)
	建设用地	建设用地_LPI(0.554), 建设用地_COHESION(0.375), 建设用地_DIVISION(-0.587)
	水体	水体_COHESION(-0.543)
	景观水平	4大类_CONTAG(0.438), 4大类_SHDI(-0.490)
	园地	园地_COHESION(-0.503)
	林地	林地_LPI(-0.356), 林地_COHESION(-0.591)
	草地	草地_COHESION(-0.359)
	16小类	工矿用地 工矿用地_LPI(0.380)
		住宅用地 住宅用地_LPI(0.390), 住宅用地_DIVISION(-0.397)
		公园绿地 公园绿地_COHESION(-0.377)
	特殊用地 特殊用地_LPI(0.378), 特殊用地_DIVISION(-0.446)	
其他变量		平均植被覆盖度(-0.495), 平均不透水率(0.501), 平均日降雨量(0.542), 平均起伏度(-0.407), 平均粗糙度(-0.419), 雨水管网线密度(0.422), 雨水口点密度(0.356)

行相关分析发现,绿地中园地、林地的面积比例与流域内涝程度呈显著负相关;建设用地中住宅用地的影响显著。从相关系数的绝对值来看,对内涝灾害影响的重要性程度为:住宅用地>林地>园地。并且,住宅用地与内涝点密度相关系数的绝对值在所有与内涝点相关的变量中排名第1。该结果表明,住宅用地等建设用地作为不透水面的主要载体,对水文环境具有极大的负面影响,会加剧区域内涝灾害的发生风险,而园地、林地等绿地作为透水性地表,则具有调蓄雨洪的积极作用,可降低区域内涝灾害的发生风险,并且,从相关系数的绝对值来看,与绿地相比,建设用地对区域内涝程度的影响更为显著。在城市化快速发展,建设用地不断扩张的背景下,适当调控建设用地规模可以缓解城市内涝灾害的发生风险。

4.1.2 景观格局对城市内涝程度的影响

从景观类型水平上看,绿地与建设用地的LPI、COHESION、DIVISION值均与流域内涝程度有着显著的相关关系。园地、林地、草地及公园绿地等绿地的LPI、COHESION值与内涝点密度呈显著负相关关系,DIVISION值与内涝点密度呈显著正相关关系,表明园地、林地、草地及公园绿地等绿地的优势度、聚集度越高,破碎度越低,则该区域越不易产生内涝灾害;而工矿用地、住宅用地及特殊用地等建设用地的LPI、COHESION值则与内涝点密度呈显著正相关关系,DIVISION值与内涝点密度呈显著负相关关系,表明工矿用地、住宅用地及特殊用地等建设用地的优势度、聚集度越高、破碎度越低,则该区域更易产生内涝灾害。绿地与建设用地在调蓄雨洪方面所起到的作用力不同,而二者各自的景观格局特征对城市内涝灾害的发生也具有明显相反的影响。从景观整体水平上看,CONTAG值与流域内涝点密度显著正相关,SHDI值与流域内涝点密度显著负相关,该结果表明区域整体景观类型越丰富、景观整体越复杂、优势类型越破碎,该区域产生内涝灾害的风险性越小。但将土地利用类型进行细分后,景观整体格局特征对内涝程度的影响则不明显。

为了更为清晰地展示关键景观格局对区域内涝程度的影响,本文选取了粗、细两种土地利用分类尺度下相关系数绝对值排名前2的共4个景观格局指数,将其与内涝点密度进行了一元线性回归分析,结果如图4所示。粗分类精度下,与内涝点密度相关系数绝对值排名前2的两个景观格局指数为建设用地_DIVISION和建设用地_LPI。土地利用类型与内涝点密度的相关分析结果表明,建设用地相比绿地、水体、裸地而言,对城市内涝程度的影响更为显著,而对于景观格局指数与内涝点密度的相关分析则显示,在粗分类精度下,建设用地的景观格局同样比绿地、水体、裸地的景观格局具有更为突出的影响。图4显示,区域内涝点密度随着随着建设用地破碎度(建设用地_DIVISION)的增加而减小、随着建设用地最大斑块面积比例(建设用地_LPI)的增加而增加。一元线性回归方程中 x 的系数表征了自变量对因变量(内涝点密度)影响程度的大小。以图4中所示的以0.2为间隔划分内涝点密度等级,由得到的一元线性回归方程可得:区域建设用地破碎度指数每增加约0.3,内涝程度可以降低一个等级;区域建设用地最大斑块面积比例每增加约30%,内涝程度则会提高一个等级。建设用地内多为不透水地表,连片集中的建设用地会在短时间内汇集大量无法下渗的地表雨水径流,从而增加区域内涝风险。将建设用地进行合理分割,提高建设用地的破碎化程度有助于缓解区域内涝程度。

将土地利用类型进行细分后发现,工矿、住宅及特殊用地的景观格局指数与内涝点密度的相关系数绝对值为0.38~0.45之间,与建设用地总体的景观格局指数的相关系数相比数值较低且差别不大。园地、林地、草地及公园绿地的景观格局指数与内涝点密度的相关系数绝对值为0.36~0.59之间,不同绿地因透水性不同,其景观格局对内涝灾害的影

响程度差异较大。细土地利用分类精度下,与内涝点密度相关系数绝对值排名前2的两个景观格局指数为林地_COHESION和园地_COHESION。景观格局指数COHESION值表征景观斑块的聚集度,图4显示,区域内涝点密度随着林地和园地斑块聚集度的增加而降低。从一元线性回归方程的系数来看:林地斑块的聚集度指数每增加约10,区域内涝程度相应降低一个等级;园地斑块的聚集度指数每增加约20,区域内涝程度相应降低一个等级。林地、园地作为透水地表,吸纳雨水径流的能力较强,其分布越集中越有利于延长与地表雨水径流的作用时间,从而减少地表径流量,因此,提高对林地及园地的整合和保护有利于降低区域内涝风险。

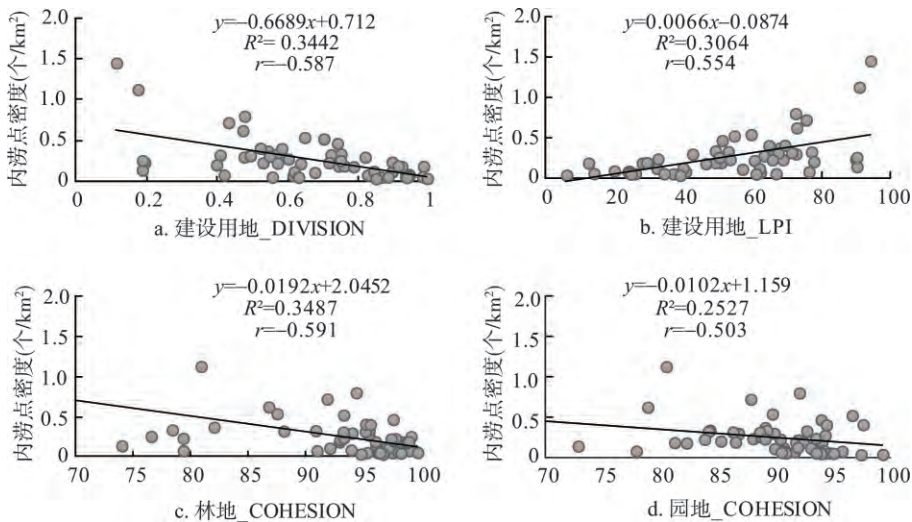


图4 一元线性回归分析结果示意图

Fig. 4 The results of one-dimensional linear regression analysis

4.1.3 其他变量对城市内涝程度的影响

本文引言部分已指出,现有的城市内涝成因研究中就降雨、地形地势、地表覆被、雨水管网等因素对城市内涝的影响已进行了较多的定性阐述,本文将这些影响因素转变为量化指标,通过统计分析的方法将其对内涝的影响进行了定量研究。从皮尔森相关分析的结果(表4)来看,自然因素中,降雨量与地形地势因素对城市内涝的发生影响显著,就相关系数的绝对值而言,对内涝灾害影响的重要程度为:平均日降雨量($r = 0.542$) > 平均地表粗糙度($r = -0.419$) > 平均地表起伏度($r = -0.407$)。平均日降雨量与小流域内涝程度正线性相关,即降雨量越大越易引发内涝灾害。在全球气候变暖背景下,极端暴雨事件的发生频次和强度都存在增加的趋势,这无疑会加重对城市内涝灾害的影响。地形地势因素与降雨量相比对内涝灾害的影响程度较小,但较为起伏、粗糙的地表可以对内涝程度起到缓解作用。相关分析结果显示,平均地表起伏度及粗糙度与内涝点密度负线性相关,即地表起伏度、粗糙度越高,越有利于雨水径流的分散,越能降低内涝产生风险。社会因素中,地表渗透能力与排水设施因素对城市内涝程度影响显著,从相关系数的绝对值来看,对内涝灾害影响的重要程度为:平均不透水率($r = 0.501$) > 平均植被覆盖度($r = -0.495$) > 雨水管网线密度($r = 0.422$) > 雨水口点密度($r = 0.356$)。平均不透水率与平均植被覆盖度反映了地表覆被情况,二者为社会因素中导致城市内涝灾害日趋严重的主要原因。平均植被覆盖度与内涝点密度呈线性负相关,平均不透水率与内涝点密度呈线性正相关,表明城市中植被地表的渗透性较好,植被覆

盖度越高,产生内涝灾害的风险性越小,而不透水地表由于阻隔了地表雨水的入渗过程,则会导致地表径流量的增大,从而更易引发内涝灾害。雨水管网一直是内涝问题研究中关注的重点,但本文的相关分析结果显示其对内涝问题的影响程度比地表覆被因素低。雨水管网密度以及雨水口点密度与小流域内涝程度呈显著正相关,这意味着雨水管网越密集的地方受到内涝的威胁越大,表明城市现有的雨水管网设施在面对强降雨事件时已不能发挥其效用,甚至成为了城市内涝的诱因之一。

4.2 多元逐步回归结果

为进一步研究多种影响因素共同作用下景观格局对城市内涝的影响程度,本文利用多元逐步回归对变量进行处理,最终得到粗、细两种分类精度下的2个回归模型。由模型参数来看(表5),a、b两个回归模型中各回归系数 t 值和模型 F 值的显著性水平均小于0.01,说明回归模型中每个回归系数具有显著性,并且各个回归模型均是有效的。 R^2 表征模型的拟合优度,2个模型的修正 R^2 分别为0.695和0.559,模型的拟合效果较好。

首先,对粗分类精度下的土地利用类型(4大类)、景观格局指数和其他变量这3类变量与内涝点密度进行逐步回归分析,最终进入方程的变量为平均日降雨量、水体_COHESION和平均不透水率,这3个变量是城市内涝众多影响因素中影响力相对独立且较为突出的3个。从自变量系数的绝对值来看,对内涝灾害影响的重要性程度为:平均不透水率($B = 1.157$) > 水体_COHESION ($B = -0.008$) > 平均日降雨量 ($B = 0.002$)。由此可见,当把众多因素放在一起使其共同作用于城市内涝问题时,人为因素中不透水率和水体的景观格局对于内涝程度的影响力要大于自然因素中的降雨量。并且平均不透水率系数的绝对值远大于水体_COHESION和平均日降雨量2者系数的绝对值,该结果表明了地表覆盖是城市内涝问题日趋严重的主要原因。

其次,对细分类精度下的土地利用类型(16小类)、景观格局指数和其他变量与内涝点密度进行逐步回归分析,最终进入方程的变量为平均日降雨量、平均地表粗糙度和园地面积比例。从自变量系数的绝对值来看,对内涝灾害影响的重要性程度为:地表粗糙度($B = -11.209$) > 园地面积比例 ($B = -0.009$) > 平均日降雨量 ($B = 0.002$)。该结果表明,在细分类精度下,景观格局的影响弱化,地形地势因素和土地利用类型的影响凸显出来。两个模型中均有平均日降雨量这一变量,显示出降雨对内涝灾害的影响不容忽视。

从上述两个模型结果来看,城市内涝问题是一个复杂的自然社会问题,两个模型中

表5 多元逐步回归模型参数表

Tab. 5 The parameters of multiple stepwise regression model

回归模型	变量	模型参数				
		B	Beta	t	Sig.	
a	常数项	0.916	-	5.292	0.000	$R^2=0.712$
	平均日降雨量	0.002	0.486	6.334	0.000	修正 $R^2=0.695$
	水体_COHESION	-0.008	-0.375	-4.860	0.000	$F=42.810$
	平均不透水率	1.157	0.487	6.474	0.000	(Sig.=0.000)
b	常数项	11.249	-	4.843	0.000	$R^2=0.585$
	平均日降雨量	0.002	0.570	6.075	0.000	修正 $R^2=0.559$
	平均粗糙度	-11.209	-0.457	-4.858	0.000	$F=22.563$
	园地面积比例	-0.009	-0.331	-3.539	0.001	(Sig.=0.000)

注: a: 表示回归分析自变量有土地利用类型(4大类)及其景观格局指数和平均植被覆盖度、不透水率、降雨量、地形地势变量、雨水管网变量等; b: 表示回归分析自变量有土地利用类型(16大类)及其景观格局指数和平均植被覆盖度、不透水率、降雨量、地形地势变量、雨水管网变量等。

进入回归方程的变量既包括自然因素中的降雨量和地表粗糙度,也包括人为因素中不透水率、园地面积比例和水体斑块聚集度。降雨及地形地势等自然因素人为难以改变,但地表覆被、土地利用及景观格局是人为可以调控的,并且模型结果显示出人为因素对内涝程度的影响比自然因素更大,因此未来可以通过景观格局的优化及土地资源的合理配置来达到缓解内涝灾害的目的。

5 结论与讨论

5.1 结论

中国城市内涝发生频度高、影响范围广、损失大,严重影响城市的健康、可持续发展。本文以内涝频发的深圳市为研究区,运用相关分析和多元逐步回归,重点探究了城市景观格局对城市内涝程度的影响,主要得到以下结论:

(1) 土地利用类型中,粗分类精度下,建设用地对内涝程度的影响最为显著,建设用地作为不透水面的主要载体,对自然的水文循环具有极大的破坏作用,其面积比例的增加会极大地增加区域的内涝发生风险;其次,绿地、水体也会影响区域的内涝程度,与建设用地相反,绿地和水体具有调蓄雨洪的积极作用。将土地利用类型进行细分后发现,住宅用地的影响最为突出,作为建设用地中主要子类别,住宅用地占比的增加会加剧区域内涝程度;其次,林地和园地作为绿地中主要子类别,对区域内涝程度起到了重要的消减作用。

(2) 城市景观各类别的格局特征中,绿地和建设用地的景观格局特征对城市内涝灾害的发生具有明显相反的影响:园地、林地、草地及公园绿地等绿地的优势度、聚集度越高,破碎度越低,则该区域越不易产生内涝灾害;工矿用地、住宅用地及特殊用地等建设用地的优势度、聚集度越高,破碎度越低,则该区域更易产生内涝灾害。粗分类精度下,建设用地的优势度和聚集度对区域内涝程度影响最大,绿地、水体的景观格局影响较小;细分类精度下,林地和园地的聚集度对区域内涝程度的影响最大,林地、园地、草地等绿地子类别的景观格局影响程度差异较大,而工矿、住宅用地等建设用地区子类别的景观格局影响程度差异较小。因此,在进行城市景观格局规划时,对建设用地的空间布局可以从整体进行把控,而对绿地的空间布局则需要细分成不同子类别进行分别处理。

(3) 城市整体景观中,景观的蔓延度(CONTAG)与区域内涝程度呈正相关关系,而景观的多样性(SHDI)与区域内涝程度呈负相关关系,城市整体景观越复杂,组成类型越丰富,越不易引发区域内涝灾害。

(4) 城市内涝是复杂的自然社会问题,受到自然因素和人为因素的共同影响。当多种因素共同作用于内涝灾害发生时,地表整体渗透性、土地利用类型及景观格局等人为因素对城市内涝灾害的发生具有显著影响。强降雨虽然是内涝的主要诱因,但其影响程度却低于地表渗透性、土地利用及景观格局等人为因素。

5.2 讨论

目前,已有研究多关注于土地利用和景观格局对流域水文过程的影响,对城市内涝灾害的影响研究较少。本文以深圳市2014年“5·11”暴雨事件为例,以实际记录的内涝点分布数据,运用相关分析和多元逐步回归等统计方法进行研究,发现城市景观格局(包括类型水平和景观水平)会对城市内涝灾害的发生产生显著影响,不同景观类型的优势度、聚集度、破碎度和整体景观的蔓延度、多样性对内涝程度影响较大,而这在其他

有关城市内涝的研究中不多见。

本文结果显示出地表渗透性、土地利用类型及景观格局等人为因素对城市内涝问题的显著影响,该结果可以为城市景观格局规划及优化和海绵城市的建设提供启示和参考:①尽可能减少建设用地的无序蔓延,采用绿地分割等方式降低建设用地的聚集程度,使其空间分布更加离散化;②对现有城市绿地进行保护和整合的同时尽量提高城市绿化面积,对园地、林地、草地等不同绿地子类别可以差别化对待,重点提高林地和园地的空间聚集程度;③尽量均匀分布各类用地,提高整体景观的多样性;④在进行排水管网等灰色基础设施的改扩建工程的同时配合透水铺装、下沉式绿地、雨水湿地等绿色基础设施的建设,全面提升城市排水防涝能力。

因为数据获取的原因,本文仅以深圳市2014年“5·11”暴雨内涝事件作为案例进行分析,未来如果可以获取不同暴雨事件对应的内涝点记录数据,则可以分析不同暴雨强度下内涝灾害影响因素的异同,同时可以与本文研究结果进行对照,从而判断本文结果的时效性和稳定性。另外,随着人们对暴雨内涝灾害的重视,城市的防灾减灾措施更加完善,城市管理等因素逐渐成为影响城市内涝的重要因素,如何将其进行量化分析也将是城市内涝问题进一步研究的重点。

参考文献(References)

- [1] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of The People's Republic of China. Code for Design of Outdoor Wastewater Engineering, 2011. [中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计规范, 2011.]
- [2] Xu Youpeng, et al. Flood Risk under Watershed Urbanization. Nanjing: Southeast University Press, 2012. [许有鹏, 等. 流域城市化与洪涝风险. 南京: 东南大学出版社, 2012.]
- [3] Du S, Van Rompaey A, Shi P, et al. A dual effect of urban expansion on flood risk in the Pearl River Delta (China) revealed by land-use scenarios and direct runoff simulation. *Natural Hazards*, 2015, 77(1): 111-128.
- [4] Guo Xuemei, Ren Guoyu, Guo Yuxi, et al. Influential factors of city water logging and the meteorological service. *Journal of Catastrophology*, 2008, 23(2): 46-49. [郭雪梅, 任国玉, 郭玉喜, 等. 我国城市内涝灾害的影响因子及气象服务对策. *灾害学*, 2008, 23(2): 46-49.]
- [5] Zhang Yue. Some problems and solutions on urban storm waterlogging disaster. *China Water and Wastewater*, 2010, 26(16): 41-42. [张悦. 关于城市暴雨内涝灾害的若干问题和对策. *中国给水排水*, 2010, 26(16): 41-42.]
- [6] Wang Weiwu, Wang Qin, Lin Hui, et al. Review and prospect of China urban waterlogging disaster. *Urban Problems*, 2015(10): 24-28. [王伟武, 汪琴, 林晖, 等. 中国城市内涝研究综述及展望. *城市问题*, 2015(10): 24-28.]
- [7] Zhang Zhengtao, Gao Chao, Liu Qing, et al. Risk assessment on storm flood disasters of different return periods in Huaihe River Basin. *Geographical Research*, 2014, 33(7): 1361-1372. [张正涛, 高超, 刘青, 等. 不同重现期下淮河流域暴雨洪涝灾害风险评价. *地理研究*, 2014, 33(7): 1361-1372.]
- [8] IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [9] Xie Yingxia. Development of drainage planning in view of frequent urban waterlogging disasters. *City Planning Review*, 2013(2): 45-50. [谢映霞. 从城市内涝灾害频发看排水规划的发展趋势. *城市规划*, 2013(2): 45-50.]
- [10] Zhang Dongdong, Yan Denghua, Wang Yicheng, et al. Research progress on risk assessment and integrated strategies for urban pluvial flooding. *Journal of Catastrophology*, 2014, 29(1): 144-149. [张冬冬, 严登华, 王义成, 等. 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展. *灾害学*, 2014, 29(1): 144-149.]
- [11] Liang Qian, Liu Yingming, Zhang Xiaojie. Impact assessment of flow capacity of stormwater inlets on local inundation based on model. *China Water and Wastewater*, 2015, 31(19): 137-140. [梁骞, 刘应明, 张晓菊. 基于模型评估雨水口过流能力对区域内涝的影响. *中国给水排水*, 2015, 31(19): 137-140.]
- [12] Liu Zhenhuan, Li You, Peng Jian. Progress and perspective of the research on hydrological effects of urban impervious surface on water environment. *Progress in Geography*, 2011, 30(3): 275-281. [刘珍环, 李猷, 彭建. 城市不透水表面的水环境效应研究进展. *地理科学进展*, 2011, 30(3): 275-281.]
- [13] Shuster W. D, Bonta J, Thurston H, et al. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. *Urban Water Journal*, 2005, 2(4): 263-275.

- [14] Armson D, Stringer P, Ennos A R. The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12(3): 282-286.
- [15] Li Zhenghui, Tan Yunzhi, Ding Pinliang, et al. A new method for reduction of waterlogging hazard: Soaking with green area. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2013, 38(4): 1014-1020. [李正辉, 谈云志, 丁品良, 等. 一种消减内涝的新方法: 城市绿地吸纳. *广西大学学报(自然科学版)*, 2013, 38(4): 1014-1020.]
- [16] Yuan Yi, Shi Peijun, Liu Yinghui, et al. Impact of land use change on urban flood disaster. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 6-13. [袁艺, 史培军, 刘颖慧, 等. 土地利用变化对城市洪涝灾害的影响. *自然灾害学报*, 2003, 12(3): 6-13.]
- [17] Solin L, Feranec J, Nováček J. Land cover changes in small catchments in Slovakia during 1990-2006 and their effects on frequency of flood events. *Natural Hazards*, 2011, 56(1): 195-214.
- [18] Fu Bojie, Chen Liding, Ma Keming, et al. *Principle and Application of Landscape Ecology*. Beijing: Science Press, 2011. [傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. *景观生态学原理及应用*. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [19] Huang Shuo, Guo Qinghai. Research review on effects of urban landscape pattern changes on water environment. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3142-3150. [黄硕, 郭青海. 城市景观格局演变的水环境效应研究综述. *生态学报*, 2014, 34(12): 3142-3150.]
- [20] Zhang Jianyun, Song Xiaomeng, Wang Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. Hydrological response to urbanization. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 594-605. [张建新, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: I. 城市水文效应. *水科学进展*, 2014, 25(4): 594-605.]
- [21] Guo Xuelian, Xu Jiawei, Lu Xianguo. Effect of spatial structure of typical urban underlying surface on rainfall infiltration rate. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 60-62, 66. [郭雪莲, 许嘉巍, 吕宪国. 城市典型下垫面空间构型对降水蓄渗率的影响. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 60-62, 66.]
- [22] Qi Xiaoming, Du Peijun, Wu Zhiyong, et al. Research on relationship between urban landscape pattern and hydrological effect. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2010, 41(4): 1-3. [戚晓明, 杜培军, 吴志勇, 等. 城市景观格局与水文效应关系研究. *水利水电技术*, 2010, 41(4): 1-3.]
- [23] Bautista S, Mayor Á G, Bourakhouadar J, et al. Plant spatial pattern predicts hillslope runoff and erosion in a semi-arid Mediterranean landscape. *Ecosystems*, 2007, 10(6): 987-998.
- [24] Zhang B, Xie G D, Li N, et al. Effect of urban green space changes on the role of rainwater runoff reduction in Beijing, China. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 140: 8-16.
- [25] Zhang Linyan, Xia Jisheng, Ye Wanhui. Overview on choosing landscape indices in landscape pattern analysis. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2008, 20(5): 38-43. [张林艳, 夏既胜, 叶万辉. 景观格局分析指数选取刍论. *云南地理环境研究*, 2008, 20(5): 38-43.]
- [26] Chen Wenbo, Xiao Duning, Li Xiuzhen. Classification, application, and creation of landscape indices. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1): 121-125. [陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 121-125.]
- [27] Yin Xuewen, Yu Kongjian, Li Dihua. Effect of urban green space landscape on rainwater storage function. *Annual National Planning Conference Proceedings*. Hainan, 2014. [殷学文, 俞孔坚, 李迪华. 城市绿地景观格局对雨洪调蓄功能的影响. 2014中国城市规划年会论文集. 海南, 2014.]
- [28] Meng Xianlei. Multi-scale relationships between impervious surface, vegetation, water and urban heat island [D]. Shanghai: East China Normal University, 2010. [孟宪磊. 不透水面、植被、水体与城市热岛关系的多尺度研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.]
- [29] Arnold C, Gibbons C. Impervious surface coverage-The emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American Planning Association*, 1996, 62(2): 243-258.
- [30] Li Miaomiao, Wu Bingfang, Yan Changzhen, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun Reservoir by remote sensing. *Resources Science*, 2004, 26(4): 153-159. [李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算. *资源科学*, 2004, 26(4): 153-159.]
- [31] Li Weina. Study on extraction methods of impervious surface information extraction from urban area using remote sensing [D]. Taiyuan: North University of China, 2013. [李玮娜. 基于遥感技术的城市不透水面信息的提取应用[D]. 太原: 中北大学, 2013.]
- [32] Henderson S B, Beckerman B, Jerrett M, et al. Application of land use regression to estimate long-term concentrations of traffic-related nitrogen oxides and fine particulate matter. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(7): 2422-2428.

The effect of urban landscape pattern on urban waterlogging

WU Jiansheng^{1,2}, ZHANG Puhua¹

(1. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Urban Planning and Design, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 2. Laboratory of Earth Surface Processes of Ministry of Education, College of Urban and Environment Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In recent years, frequent urban waterlogging disasters have aroused great concern. Previous studies have mainly focused on the relationship between land use and waterlogging, but there is not enough information offered in these studies to explore the effects of urban landscape patterns on waterlogging. Taking Shenzhen as an example, this paper used correlation analysis and multiple stepwise regression analysis to explore the effects of landscape pattern on urban waterlogging. As urban waterlogging disaster is a systemic problem, which is related to the water circulation within the watershed, we divided Shenzhen into 56 sub-watersheds as the study units. Then we selected data of 278 waterlogging points during the rainstorm on May 11, 2014 and calculated the waterlogging point density of each sub-watershed to characterize the waterlogging degree. This paper considered 5 landscape pattern indexes to reflect the characteristics of landscape pattern, including LPI (Largest Patch Index), COHESION (Patch Cohesion Index), DIVISION (Landscape Division Index) at class-level, and CONTAG (Contagion Index), SHDI (Shannon's Diversity Index) at landscape-level. Furthermore, other data, including land use, impervious surface percentage, fractional vegetation coverage, precipitation, topography and storm drainage considered as factors influencing urban waterlogging, were also obtained. The results showed that: (1) Among land use types, the construction land, especially residential land, has the greatest impact on the urban waterlogging disaster, whose growth can significantly increase the disaster degree; (2) At class-level metrics, the higher level of construction patches' dominance and aggregation and the lower level of landscape division, would lead to more severe waterlogging disasters in a certain area, while the impacts of landscape pattern of greenspace are in reverse; (3) At landscape-level, the regions with more complex landscape are not prone to waterlogging disaster; (4) Impervious surface percentage and other human factors have greater impact on urban waterlogging than rainfall and other natural factors. This study demonstrated that landscape pattern had significant effect on waterlogging and could provide reference for control of waterlogging and planning management of landscape pattern.

Keywords: landscape pattern; land use; urban waterlogging; Shenzhen