

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2020.0075

郭禹含,王中根,姜爱华,等. 济南主城区不透水地表分布分析及其水文效应[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(4): 87-96. GUO Y H, WANG Z G, JIANG A H, et al. Analysis of the impervious land surface pattern distribution and its hydrological effects in the main urban area of Jinan[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 87-96. (in Chinese)

# 济南主城区不透水地表分布分析及其水文效应

郭禹含<sup>1,2</sup>, 王中根<sup>1</sup>, 姜爱华<sup>4</sup>, 程娅姗<sup>1,2</sup>, 刘丽芳<sup>3</sup>, 唐寅<sup>1</sup>, 叶翔宇<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京水润嘉禾灌溉技术有限公司, 北京 100096; 4. 济南市城乡水务局, 济南 250099)

**摘要:**以济南市主城区范围为研究区,通过现场调研、遥感解译和划分标记的手段获取并探究其不透水地表分布。研究发现,济南市主城区范围内绿化率达到33.9%,不透水面积占比为65.3%。采用HIMS-SWMM模型进行小时尺度径流模拟,据此探究济南市主城区范围内各行政区不透水地表格局下其径流系数的变化情况。以2016年7—8月降雨作为输入,整个研究区共降水125.23 mm,下渗量为36.33 mm,产生的径流量为88.9 mm,整个济南市主城区总体径流系数为0.71。各用地类型的不透水面积占比与径流系数有较强的线性关系,其变化分为阈值型和渐变型。对于阈值型用地类型,可进行较为集中的绿化措施或LID措施;对于渐变型用地类型,可采用放缓的逐步绿化或LID措施,在集中改善阈值型用地类型的不透水面积占比的同时,辅以较小范围的改善措施,以达到较为经济有效的防止内涝目的。

**关键词:**济南主城区;城市化;不透水面;径流系数;城市内涝;HIMS-SWMM模型

中图分类号:P426 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



## Analysis of the impervious land surface pattern distribution and its hydrological effects in the main urban area of Jinan

GUO Yuhan<sup>1,2</sup>, WANG Zhonggen<sup>1</sup>, JIANG Aihua<sup>4</sup>, CHENG Yashan<sup>1,2</sup>, LIU Lifang<sup>3</sup>, TANG Yin<sup>1</sup>, YE Xiangyu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Beijing Shuirun Jiahe Irrigation Technology Co., Ltd., Beijing 100096, China;

4. Jinan Urban and Rural Water Affairs Bureau, Jinan 250099, China)

**Abstract:** The impervious surface distribution is explored through field investigation, remote sensing interpretation and marking in the main urban area of Jinan. The study is revealed that the greening rate in the main urban area of Jinan reached 33.9%, and the proportion of the impervious area is 65.3%, respectively. The HIMS-SWMM model is used to simulate the hourly scale runoff, and the variation of the runoff coefficient under the impervious surface distribution of each administrative district in the main urban area of Jinan City. Taking the rainfall from July to August 2016 as input, the whole study area has total precipitation of 125.23 mm, the infiltration amount is 36.33 mm, and the generated runoff is 88.9 mm, respectively. The overall runoff coefficient of the main urban area of Jinan is 0.71. The proportion of the impervious surface of each land type has a strong linear

收稿日期:2019-07-05 修回日期:2019-11-20 网络出版时间:2019-12-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20191213.1108.002.html>

基金项目: 济南水生态文明城市建设地表硬化率与容积率指标的确定研究(Y55M210)

作者简介: 郭禹含(1994—),女,云南昆明人,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: guoyh.16b@igsrr.ac.cn

通信作者: 王中根(1973—),男,河南潢川人,研究员,博士,主要从事流域水文模拟及水资源管理工作。E-mail: wangzg@igsrr.ac.cn

relationship with the runoff coefficient, and the change is divided into threshold type and gradual type. For the threshold type of land use, more concentrated greening measures or LID measures can be carried out. For the gradual type of land use, slow gradual greening or LID measures can be adopted, which can improve the proportion of impervious water surface of the threshold type of land use in a centralized way, supplemented by a smaller range of improvement measures, aiming to achieve more economical and effective prevention of city floods.

**Key words:** Jinan city; urbanization; impervious surface; runoff coefficient; urban internal enthalpy; HIMS-SWMM model

城市化是当今世界最重要的社会经济现象之一,也是一个国家走向繁荣的必经之路<sup>[1-2]</sup>。其引起的生态环境效应是造成全球环境变化的重要原因<sup>[3-5]</sup>,日益受到国际社会的关注,现已成为全球变化新的热点问题。我国快速城镇化建设已经导致“城市病”问题越来越突出,直接影响城镇化进程的质量,尤其在资源环境方面。城市防洪排涝设施的建设远落后于城市化进程,内涝已成为我国许多城市遭遇强降雨后的普遍状态。中国住房和城乡建设部 2010 年对 351 个城市的专项调研结果显示,在 2008—2010 年 62% 的城市发生过内涝,灾害超过 3 次以上的城市有 137 个。城市内涝问题已成为城镇化建设中的核心问题。随着城市化的发展,越来越多的不透水表面替代了以植被为主的土地利用类型<sup>[6-10]</sup>。不透水面面积、盖度和空间格局不仅代表着城镇化的程度,也对流域的水热循环和水环境有着重要的影响<sup>[11-14]</sup>。不透水面面积的大量增加会改变地表径流,增加洪水灾害的频率,通过潜热与显热的改变显著增加热岛效应,进而影响城市水文过程。

为了探究不同土地利用不透水面积分布是否产生不同的水文效应,进一步地,应该如何通过 LID 措施分区有效改善城市内涝,以济南市主城区范围为研究区,通过现场调研、遥感解译和划分标记的手段获取并探究研究范围内不透水地表格局分布,并根据管网流向及其分布原理提取绘制济南市主城区管网水系分布底图,最终划分出 2 631 个汇水单元,将其信息输入至 HIMS-SWMM (hydro-informatic modeling system-storm water management model) 模型进行小时尺度径流模拟,得到各行政区不同用地类型的径流系数分布情况,据此探究济南市主城区范围内各行政区不透水地表格局下其径流系数的变化情况,从预防内涝的角度分类提出济南市主城区不同用地类型下不透水面格局的改进措施。

## 1 研究区概况

### 1.1 地理位置及自然概况

济南市位于山东省的中部,地理位置北纬 36°01'~

37°32',东经 116°11'~117°44',面积 7 998.41 km<sup>2</sup><sup>[15]</sup>。主城区南依山区,北傍黄河,小清河在中北部横穿城市,处于鲁中山区与华北平原的过渡地带,地形南高北低,自西南向东北倾斜,由南至北依次为山区丘陵、平原、洼地。

济南市地处中纬度地带,由于受太阳辐射、大气环流和地理环境的影响,属暖温带大陆性季风气候,其主要气候特征为:季风明显,四季分明,冬冷夏热,雨量集中。冬季降水量 20~25 mm,仅占全年总降水量的 3.0%~3.7%。夏季炎热,季平均温度在 26℃左右,极端最高温度超过 40℃,日最高气温≥40℃的酷热日数均出现在夏季。夏季不仅炎热,且多降水。夏季降水量全市各县区平均在 400 mm 以上,全年 60% 的降水量集中在夏季,7 月份降水日数平均在 15 天左右,日降水量≥50 mm 的暴雨日数集中在 7、8 月,占全年暴雨日数的 70%<sup>[16]</sup>(表 1)。

济南城区境内河流较多,主要有黄河、小清河两大水系,湖泊有大明湖、白云湖等。其中,研究区主要属于小清水系。小清河干流位于城区北部,是城区唯一的排洪干道,其支流大多位于河流右岸,这些河流均发源于南部低山丘陵区,为季节性山洪河流,其上游坡降较大,汛期泄洪迅速,进入市区后坡降变缓,成为城区工业、生活污水的排泄河道。在城区西部小清河上游左岸有支流南太平河、北太平河、虹吸干河、华山沟等平原性人工河流。这些河道多受引黄灌溉影响,汛期排洪,枯季排引黄尾水及部分地下水。

### 1.2 研究区范围

一般将济南市二环路环城线围成的区域,即济南的市中、历下、天桥和槐荫四区相连地区和历城区的洪家楼、山大路、全福和东风等 4 个街道办事处作为济南市传统主城区,但由于城市的不断扩张和济南市的区域地貌特征,本研究将 G2、G3、G15、G2001 绕城高速和北部黄河沿岸组成的区域看作近期最大可能的城市范围,作为本研究的主城区范围(图 1)。这个范围可以涵盖济南市主城区的全部水文集水区、建设用地和绿地,研究区范围共 492 km<sup>2</sup>。

表1 济南市1986—2015月平均气候要素

Tab.1 List of average monthly climate characteristics of Jinan from 1986 to 2015

月份	平均高温/ ℃	每日平均气温/ ℃	平均低温/ ℃	平均降水量/ mm	平均降水日数 (≥ 0.1 mm)/d	平均相对湿度/ %	每月平均日照 时数/h
1月	4.2	-0.2	-3.6	5.8	2.7	53.0	158.4
2月	7.9	3.0	-0.8	10.3	3.3	50.0	157.5
3月	14.0	8.8	4.5	12.7	3.8	45.0	200.1
4月	21.8	16.2	11.4	30.5	5.1	46.0	231.6
5月	27.4	22.0	17.1	65.5	6.7	52.0	254.6
6月	31.7	26.4	21.6	82.7	8.3	55.0	220.7
7月	32.1	27.6	23.6	194.7	12.6	71.0	183.6
8月	30.6	26.0	22.3	183.1	11.8	75.0	186.8
9月	27.0	22.0	17.8	59.8	6.9	66.0	183.0
10月	21.4	16.3	12.1	29.1	4.8	56.0	194.1
11月	12.9	8.3	4.6	21.8	4.2	56.0	160.4
12月	6.1	1.8	1.6	6.5	3.2	55.0	152.2
全年	19.8	14.9	10.8	702.5	73.4	56.7	2 283.0

注数据来源为中国气象局,国家气象信息中心。

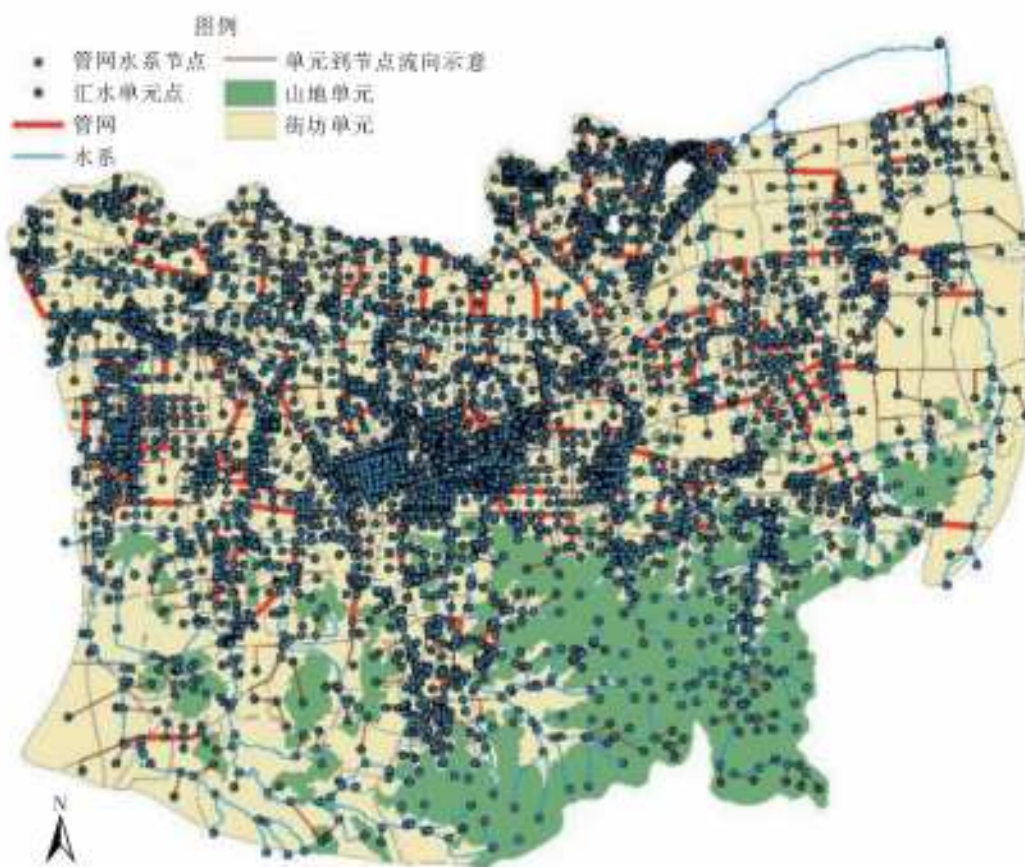


图1 研究区范围及基础地理数据集示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area and basic geographic data set

## 2 数据收集与研究方法

### 2.1 数据来源及收集

#### 2.1.1 数据来源

本研究所使用的土地利用数据,1:500、

1:2 000、1:10 000 基础地形,市、区、街道三级行政区划图和土壤类型图均来自济南市水利局。济南市主要城市用地类型规划数据来自济南市政府(<http://www.jinan.gov.cn>)公布的《济南市城市总体规划(2011—2020年)(社会公布版)》数据。DEM数

据分辨率为 90 m,来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),原始来源为美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘 SRTM(shuttle radar topography mission)数据。济南市 2016 年 SPOT5(彩色和全色波段合成 0.5 m)为订购影像。

除上述基础资料收集外,研究团队于 2016 年 7 月 19—26 日在济南市主城区进行了实地调查,主要调查济南市居民区和公共服务区的排水设施(包括排水管道和排水口)以及研究区范围内现状绿地、城市水体的分布情况。将教育用地、医院、公园和道路等 4 类作为服务区,将居民住宅小区划分为老区和新区两类,在每一类中挑选出具有代表性的地点,规划出由南至北和由西至东两条调查路线后实地调研获取了遥感影像无法解译的不透水分布实际情况,在建模时提供了一定帮助。

### 2.1.2 数据解译及收集

不透水面遥感解译及提取技术现已相对成熟<sup>[17-18]</sup>。本研究选取 2016 年度 SPOT5 0.5 m 分辨率高清卫星影像作为基准影像,并辅助 1:500 地形图和现场调查来实现基础数据的分析和解译。坐标系选择 WGS\_1984 经纬坐标和西安\_80\_117°中央经线\_水平偏移 500 000 平面坐标两种坐标系统,两种坐标系统的提取数据可以无误差投影转换。

本研究首先提取了研究区内全部的单体建筑,其空间粒度约为 30 m,共计约 73 万幢,屋顶投影不透水面积共 82 km<sup>2</sup>,并通过对 SPOT5 0.5 m 分辨率高清卫星影像的解译,解译出:7.6 万个绿地图斑,计算出绿地总面积 37.25 km<sup>2</sup>;43 万个山林地图斑,计算出山林地总面积 119.85 km<sup>2</sup>;0.44 万个农用地图斑,计算出农用地总面积 41.15 km<sup>2</sup>。基于 SRTM 90 m DEM 数据,提取了研究区的 5 m 间距等高线数据和街坊单元平均坡度数据。进一步地,研究团队解译出研究区范围内的全部路网面状数据,结合已解译河网数据、铁路数据和山林地数据,提取出了空间粒度为 200 m 左右以道路、自然界线(如河流水系、山脊线)、行政区划等划分的街坊单元。最终,492 km<sup>2</sup> 的研究区被划分为 2 631 个街坊单元,其中 198 个为山林地单元(总面积 120 km<sup>2</sup>)。将单体建筑信息、山林地信息、绿地农地信息、平均坡度信息叠加赋存至每一个街坊单元中,并将每一个单元所属区域及主要城市用地类型进行标记,得到每个街坊单元具体不透水面积及所属区域属性表。结合河网

数据、路面网状数据以及管网水流的特征,分析得到济南市基本管网及水网分布情况。综上,研究济南市主城区不透水面格局及其水文效应所需要的基础地理数据集,即街坊单元数据集、管网水网节点数据集、管网水网数据集收集显示见图 1。

## 2.2 HIMS-SWMM 城市雨洪模型

### 2.2.1 HIMS-SWMM 模型框架

SWMM 模型是美国环保局在 20 世纪 70 年代为设计与管理城市雨洪资源而研制开发的降雨径流模型,在城市暴雨洪水、排污管道及其他排水系统的规划、设计和评估中应用广泛。该模型由水文模块、水动力模块及水质模块等 3 部分组成,可以完整地模拟城市降雨径流和污染物运动过程<sup>[19-23]</sup>。模型中,产流部分将各子汇水区计算分 3 部分:无滞蓄库容不透水面积上的产流等于其上的降雨量减去蒸发损失;有滞蓄库容不透水面积上的产流等于其上的降雨量减去洼蓄量;透水面积上的产流不仅要扣除洼蓄量,还要扣除下渗引起的初损。3 种类型地表单独进行产流计算,子流域出流量等于 3 个部分出流量之和<sup>[24]</sup>。地表汇流计算采用非线性水库模型,即联立求解连续方程和曼宁方程。另外,SWMM 模型提供 3 种方法用于连接管道的汇流计算:恒定流法、运动波法和动力波法。运动波法可以模拟管渠中水流的空间和时间变化;动力波法则通过求解完整的圣维南方程组来进行汇流计算,是最准确也是最复杂的方法;只有动力波法可以考虑管渠的蓄变、回水、入口及出口损失、逆流和有压流动。

HIMS(hydro-informatic modeling system)模型<sup>[25-29]</sup>与 SWMM(storm water management model)模型耦合而成的 HIMS-SWMM 城市雨洪模型包括城市地表产流(HIMS)、管网汇流模型(SWMM)、地表汇流模型(三维水动力学模型)、河道汇流模型(马斯京根模型)等,本文主要应用 SWMM 模型的界面搭载耦合 HIMS 产流模型进行雨洪模拟计算。

### 2.2.2 模型输入及参数设置

构建 HIMS-SWMM 模型需输入降水数据和建立的济南市主城区基础数据集。本文采用的降水数据来自中国气象信息中心(<https://data.cma.cn/data/>)的中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水量网格数据集(1.0 版),选取 2016 年 7、8 月的逐时降水数据输入模型,覆盖整个研究区共计

约 8 个格点。选择 7、8 月作为模型输入是因为济南市全年约 60% 降水集中于夏季,这是可作为引起城市内涝的典型暴雨时段。输入的济南市主城区基础数据集为 SWMM 模型兼容的 INP 格式。

HIMS-SWMM 模型的建立需设置雨量站、子汇水区、管网节点(包括排水口)和管道等 4 种不同构件的对应参数,子汇水区中地表产流参数的确定需要现场人工实验率定模型数据,有的模型参数需根据 SWMM 模型用户手册(<https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>)来确定合适的取值。

### 2.2.3 模型模拟结果验证

按照传统水文模型的率定与验证思路应把雨洪时段为划分率定期与验证期,在率定期内修改调适参数,在验证期内对出水口过程线进行模拟评估。但由于本研究区的最终出水口附近没有布设水文观测站。因此,本文以公布的水资源总量按照面积比例折算为本区域水资源总量后对模型进行验证与核算,在一定程度上保证了 SWMM 模型模拟的可信度。如表 1 所示,济南市 7、8 月占全年降水的百分比为 53.78%,故认为 7、8 月水资源总量也占同样百分比,根据 2016 年济南市水资源公报济南市水资源总量为 167 458.75 万  $\text{m}^3$ ,总面积为 7 988.41  $\text{km}^2$ ,将水资源总量按照研究区面积占全市百分比折算,换算到 mm 后,7、8 月水资源量为 113 mm;根据 SWMM 模型模拟结果,换算后 7、8 月水资源量为 112 mm;两者基本吻合,故认为模型基本通过验证。

## 3 结果与分析

### 3.1 济南主城区代表用地排水情况

本文结合遥感地图规划调查方案并调查了济南市的 6 个城建类型中两个主导类型:居民区和公共服务区的排水设施现状,其中包括排水管道、水口、绿地和城市水体。将教育用地、医院、公园和道路等 4 类作为服务区,将居民住宅小区划分为老区和新区两类,在每一类中挑选出具有代表性的地点,规划出由南至北和由西至东两条调查路线。此次实地调查发现,城市的排水主要靠地下管网,利用地形使路面的积水沿地面边沟汇入地下,进而流入小清河(从南到北贯穿研究区)和黄河(小清河北面)。

商业区代表区域如建材市场,其不透水面积接近 100%,降雨时,雨水从屋顶流入集水管道,进而流到地面,再通过暗沟进入地下排水管网。靠近水体的区域如靠近小清河区域及大明湖附近有排水管

道直接向河沟排水,尽管有一些排水管道已经废弃。老城居民区排水主要靠从楼顶伸入地上的集排水管道和小区内的暗沟完成。有些小区楼房的给排水管道过于老旧,有些暗沟已经堵塞,影响排水。

绿化面积的增加能有效减轻城市内涝,这也是建设海绵城市的一种重要手段。通过调查,大学及公园有较大比重的绿化面积。另外,考虑到建设海绵城市的要求,新开发的小区一般都配备有比较高的绿化面积和景观水体。但是尽管如此,其绿化区域的“海绵”能力却相当有限。这是因为这些绿化区域下方一般都建有地下车库,导致其土层仅有 20~30 cm 厚,遇到较大暴雨时,地表薄层土壤很容易饱和,完全产流。若没有修建一定的雨水收集池,很难起到“吸水”作用。

综上,济南市给排水基础系统虽然比较完备、分布广泛,但是设施老化问题严重,需要进一步修理、更新和完善。一些新建居民区尽管有较高绿化面积,但由于建设土层较薄很容易饱和,因此较难抵御较大的城市内涝。

### 3.2 济南市主城区不透水地表分布分析

将研究区根据济南市现有行政区划叠加后划分为槐荫区、历下区、历城区、天桥区和市中区等 5 个区,并根据已公布的《济南市城市总体规划(2011—2020)》将济南市所有单元标记为居住用地、行政办公用地、商业金融用地、文化娱乐用地、体育用地、教育科研设计用地、工业用地、绿地和水域等共 9 个主要城市用地类型,各子汇水区所属行政区及所属用地类型见图 2。对所有子汇水单元数据进行分区统计,结果见表 2。通过统计发现,研究区范围内绿化率达到 33.9%,不透水面积占比为 65.3%。除去 198 个林地单元后,研究区内绿化率降低到 29.3%,不透水面积占比升至 70.7%。



图 2 济南市主城区各子汇水单元所属用地类型分区

Fig. 2 Schematic diagram of land use type of each sub-catchment in the main urban area of Jinan City

从分区来看,在统计范围内:历下区的绿化率最高,为 42.6%,对应较低的不透水面积占比(56.8%);天桥区的绿化率最低,为 10.1%,对应较高的不透水面积占比(89.9%);槐荫区、历城区和历下区等 3 个

区的不透水面积占比均分布在 60%~70%,属于中间范围。从图 2 的子汇水单元类型分布也可看出,天桥区的绿地占比非常少,主要由居住用地和商业金融用地组成,在天桥区地势较低的位置极容易发生内涝。

表 2 济南市主城区分区不透水面积比率统计信息

Tab. 2 Statistical information table of impermeable rate in the main urban area of Jinan City

行政区	总面积/m <sup>2</sup>	透水面积/m <sup>2</sup>	绿化面积/m <sup>2</sup>	硬化面积/m <sup>2</sup>	绿化率/%	不透水面积占比/%
槐荫区	64 810 123.21	19 420 808.43	19 420 808.43	45 389 314.78	30.0	70.0
历城区	110 093 833.37	36 315 441.61	32 667 864.55	73 778 391.76	29.7	67.0
历下区	114 923 712.57	49 603 241.93	48 990 398.63	65 320 470.64	42.6	56.8
市中区	155 661 991.48	60 975 084.44	60 975 084.44	94 686 907.04	39.2	60.8
天桥区	46 660 556.94	4 701 590.43	4 701 590.43	41 958 966.51	10.1	89.9
总计	492 150 217.57	171 016 166.84	166 755 746.48	321 134 050.73	33.9	65.3

为了进一步探究每个区域内各用地类型的不透水面积占比对行政区总的不透水占比贡献如何,

各行政区不同用地类型不透水面积占比分布图绘制见图 3。

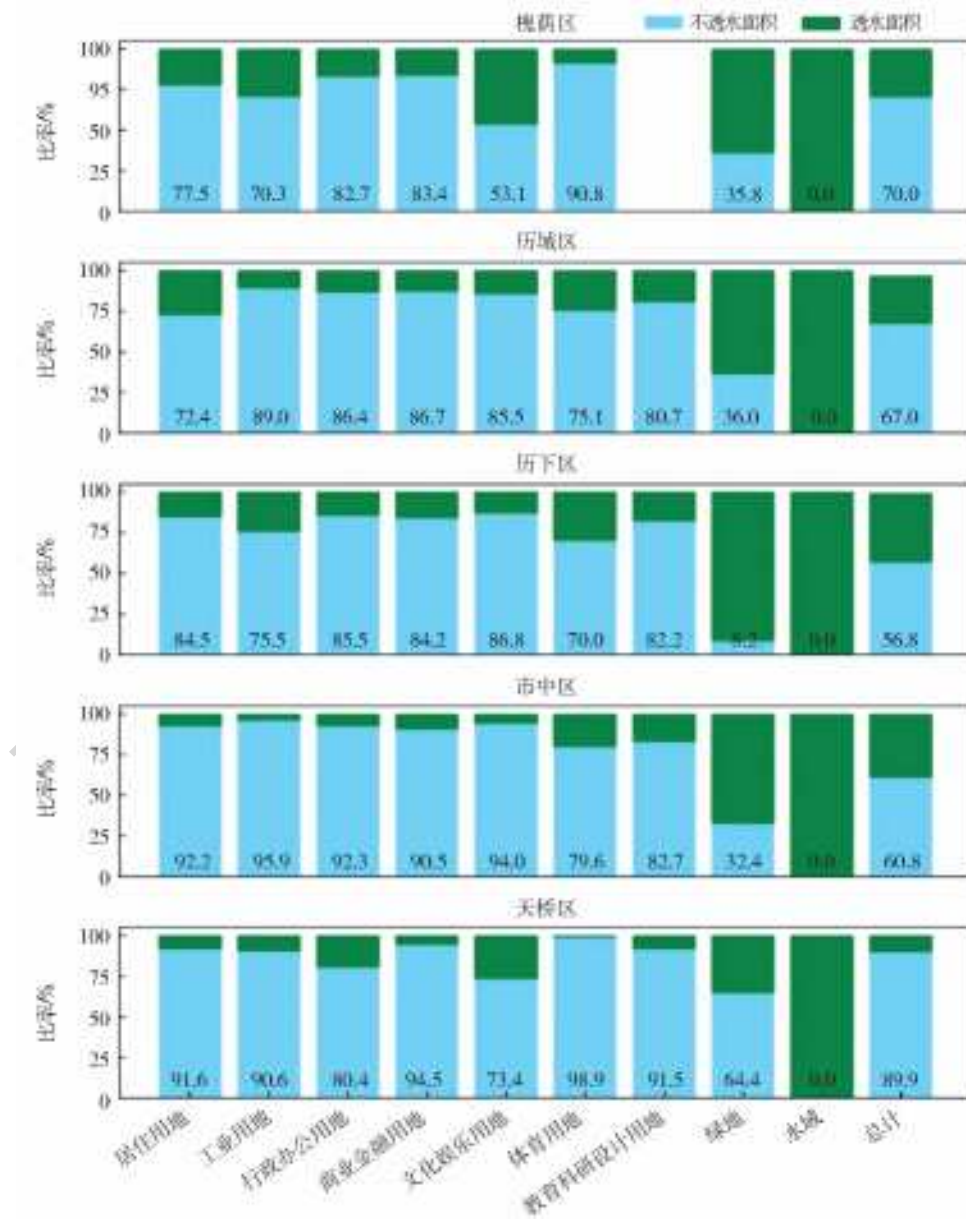


图 3 济南市主城区各行政区不同用地类型不透水面积占比分布

Fig. 3 Distribution of the proportion of impervious areas of different land types in the administrative districts of the main urban area of Jinan City

在槐荫区, 文化娱乐用地不透水面积占比为 53.1%, 除绿地外相较于其他主要城市用地类型为最低, 居住用地以及工业用地不透水面积占比均在 70%~80%, 而行政办公用地、商业金融用地以及体育用地不透水面积占比在 80%~90%。槐荫区居住用地以及商业金融用地面积占比较大, 是影响该区不透水面积占比的主要用地类型。

在历城区, 工业用地、行政办公用地、商业金融用地、文化娱乐用地和教育科研设计用地不透水面积占比均在 80%以上, 说明该区商业民用用地房屋较为密集, 绿化较少。居住用地和体育用地不透水面积占比分别为 72.4%和 75.1%。相较于槐荫区, 历城区的居住用地相对较新, 更多地考虑了绿化问题, 故不透水面积占比有所下降。历城区居住用地以及教育科研设计用地面积占比较大, 是影响该区不透水面积占比的主要用地类型。

在历下区, 居住用地、行政办公用地、商业金融用地、文化娱乐用地和教育科研设计用地不透水面积占比均在 80%以上, 最高者为文化娱乐用地, 不透水面积占比为 86.8%。该区的居住用地不透水面积占比相较于槐荫区与历城区高出许多, 这可能是因为历下区靠近中心城区, 住宅建筑密度较为集中, 其居民区多为老式居民区, 并未较多考虑绿化问题。工业用地和体育用地不透水面积占比分别为 75.5%和 70.0%, 这两种城市用地类型在该区的面积占比并不是很大, 两种用地的不透水面积占比为所有主要城市用地类型中最小。历下区居住用地以及绿地面积占比较大, 是影响该区不透水面积占比的主要用地类型, 所以该区总体不透水面积占比为 56.8%, 相较于槐荫区与历城区都较低。

在市中区各个主要城市用地类型的不透水面积占比结果完全不同于其他几个区。值得注意的是, 研究区内市中区面积占比为所有行政区中最高。市中区的居住用地、工业用地、行政办公用地、商业金融用地、文化娱乐用地不透水面积占比均在 90%以上, 其中工业用地不透水面积占比最高, 为 95.9%。工业用地不透水面积占比很大说明该区厂房间隙较小, 且并没有很多绿化措施, 居住用地建筑密度也较大。体育用地与教育科研设计用地不透水面积分别为 79.6%和 82.7%, 与其他行政区相比差别不大。然而, 市中区绿地面积占比很大, 是研究区范围内最靠近南部山区的一个区, 这导致了该区虽然有的单元不透水面积占比很大, 但总体的不透水面积占比却为最小。市中区居住用地以及绿地面积占比较大, 是影响该区不透水面积占比的主要用地类型。

该区居民单元内部透水面积占比过小, 若除去林地单元, 则整个区会有明显增高的不透水面积占比。

天桥区总体不透水面积占比为所有行政区划中最高, 天桥区是房屋最为密集的一个区域。其居住用地、工业用地、商业金融用地、体育用地和教育科研设计用地不透水面积占比均在 90%以上, 最大的不透水面积占比为体育用地, 达到 98.9%, 说明该区居住房屋与商用房屋较为密集, 绿化较少。另外, 体育用地不透水面积占比高是因为有塑胶场地等不透水体育设施。天桥区居住用地以及商业金融用地面积占比较大, 是影响该区不透水面积占比的主要用地类型, 这两个主要城市用地类型不透水面积占比相较于其他行政区的不透水面积占比均较大, 绿地面积占比也很小, 所以该区不透水面积占比为 89.9%。

综上, 天桥区为不透水面积占比最高的区域, 历下区为不透水面积占比最低的区域。从土地利用类型看, 各区域主要职能不同, 其不透水面积占比高的土地利用类型也不尽相同, 但总体来说, 居住用地、工业用地和商业金融用地属于本身面积占比较大且有较高不透水面积占比的土地利用类型。

### 3.3 济南市不透水地表格局下的水文效应

#### 3.3.1 HIMS-SWMM 模拟径流系数分布

对济南市主城区模拟径流系数结果进行分析, 按照行政区分布情况如图 4。

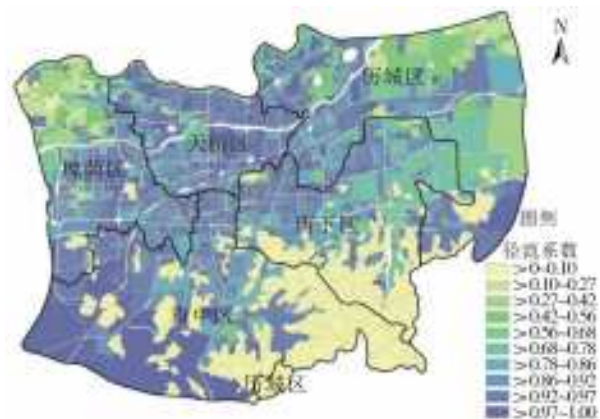


图 4 济南市主城区 HIMS-SWMM 模拟径流系数分布

Fig. 4 Distribution of simulated runoff coefficient using HIMS-SWMM in the main urban area of Jinan City

从图 4 可以基本看到, 林地单元基本径流系数范围都在 0~0.2, 与在南部山区野外人工降雨实验结果基本吻合<sup>[29]</sup>。除林地单元外, 其余汇水单元径流系数都较大, 在 0.68 以上。在 HIMS-SWMM 模型中, 每个子汇水单元的输入为降水和从其他汇水单元汇入的水量, 输出为下渗与产生的径流。对每一个单元的输入输出水量进行分区统计, 得到各行

政区下渗及产流值并将其转换为径流系数。从表 3 可以看到,槐荫区、历下区和市中区在这次降雨输入模拟中区域平均径流系数均在 0.7 以上;天桥区径流系数为 0.87,为所有行政区中最高;历城区径流系数为 0.65,为所有行政区最低。在经历 2016 年 7、8 月降雨后,整个济南市主城区总体径流系数为 0.71,整个研究区共降水 125.23 mm,下渗量为 36.33 mm,产生的径流量为 88.90 mm。

表 3 济南市主城区 HIMS-SWMM 模拟径流系数分区统计结果

Tab. 3 Regional statistical results based on HIMS-SWMM simulated runoff coefficient in the main urban area of Jinan City

主要城市用地类型	槐荫区	历城区	历下区	市中区	天桥区
居住用地	0.84	0.94	0.87	0.9	0.92
工业用地	0.75	0.85	0.73	0.95	0.90
行政办公用地	0.88	0.94	0.83	0.91	0.86
商业金融用地	0.86	0.96	0.88	0.94	0.96
文化娱乐用地	0.59	0.92	0.84	0.92	0.85
体育用地	0.91	0.73	0.77	0.82	0.99
教育科研设计用地	—	0.88	0.83	0.84	0.89
绿地	0.11	0.10	0.09	0.12	0.10
水域	—	0	0	—	—
总计	0.70	0.65	0.76	0.75	0.87

在槐荫区,绿地径流系数较小,居住用地、行政办公用地、商业金融用地以及体育用地径流系数均在 0.80 以上。其中,体育用地径流系数为最高,达到 0.91。另外,工业用地与文化娱乐用地径流系数分别为 0.75 和 0.59,在所有城市用地类型中属于径流系数较低的两种城市用地类型。

在历城区的研究范围内该区居住用地、行政办公用地、商业金融用地、文化娱乐用地径流系数达到了 0.90 以上,其中商业金融用地径流系数最高,达到 0.96。工业用地、体育用地和教育科研设计用地区域内的径流系数相对较小,分别为 0.85、0.73 和 0.88。区域内绿地径流系数较低,且存在一定水域。从规划角度来说,历城区整体区域功能划分较为明显与清晰,这在一定程度上能够改善整个区域储存水量的能力。历城区居住用地以及教育科研设计用地面积占比较大,是影响该区径流系数的主要用地类型,其中居住用地径流系数较大,说明不透水面较多,若能将道路铺装材质改为透水材质,能在很大程度上改善小区内部的产流情况。

在历下区,居住用地、行政办公用地、商业金融用地、文化娱乐用地和教育科研设计用地径流系数均在 0.80 以上,其中商业金融用地的径流系数为最高,达到 0.88。居住用地径流系数仅次于商业金融

用地,为 0.87。与历城区较为类似的是,历下区居住用地和商业用地建筑密度均较大,绿化较少,这可能是居民用地与商业金融用地有较大的径流系数的原因。另外,工业用地和体育用地径流系数在所有城市用地类型中属于较低者,其径流系数分别为 0.73 和 0.77。历下区居住用地以及绿地面积占比较大,是影响该区径流系数的主要用地类型,虽然该区域有较多的绿地单元,并且该区总体地面不透水面占比为 54%,但是其整体径流系数却并不低。

在市中区,居中用地、工业用地、行政办公用地、商业金融用地和文化娱乐用地的径流系数均在 0.90 以上,其中工业用地径流系数最大,达到 0.95。商业金融用地径流系数仅次于工业用地,为 0.94。根据之前的统计,其不透水面积占比均在 90% 以上。另外,该区域体育用地及教育科研设计用地相对于其他城市用地类型径流系数较小,分别为 0.82 和 0.84。绿地径流系数相对于其他几个行政区较大,为 0.12。研究区内市中区面积占比为所有行政区中最高,并且市中区居住用地以及绿地面积占比较大,是影响该区径流系数的主要用地类型。值得注意的是,作为研究区范围内最靠近南部山区的一个区,市中区绿地面积占比很大,但由于该区降水量主要集中在地面径流系数较大的居民区,因此其总体径流系数并不是整个行政区最小的,为 0.75。因此,若其居住用地等存在较多建筑的用地类型能采取一定的绿化措施,该区的产流情况会有所改善。

天桥区整体径流系数为所有行政区中最高。其居住用地、工业用地、商业金融用地、体育用地径流系数均在 0.90 以上,拥有最大的径流系数为体育用地,为 0.99,几乎全部产流不下渗。紧接着是商业金融用地的径流系数,为 0.96。拥有较高径流系数的城市用地同样有相当比例的降水量,这是天桥区径流系数较大的主要原因。另外,行政办公用地、文化娱乐用地和教育科研设计用地径流系数相比于其他主要城市用地类型较小,分别为 0.86、0.85 和 0.89。天桥区居住用地以及商业金融用地面积占比较大,是影响该区径流系数的主要用地类型。

### 3.3.2 不透水地表分布影响分析

为探究不透水面占比对径流系数变化的影响,作各行政区不同用地类型(除绿地与水域外)不透水面占比与径流系数的散点图(图 5)发现,教育科研设计用地、居住用地以及行政办公用地不透水面占比与径流系数的趋势线斜率很小,说明当这 3 类用地类型的不透水面达到 70% 或 80% 以上时,其径流系数基本会稳定在 0.80 以上。这 3 类用地类型



径流系数变化属于阈值型。商业金融用地、文化娱乐用地、体育用地和工业用地等 4 种用地类型不透水面积占比与径流系数趋势线斜率则较大且几乎平行。当 4 种用地类型处于同一不透水面积占比时,其径流系数由小到大排序依次为工业用地、体育用地、文化娱乐用地及商业金融用地。其中,商业金融用地径流系数几乎都在 0.85 以上,工业用地及体育用地径流系数则在 0.70 以上。这 4 种用地类型的不透水面占比与径流系数的相关变化并没有稳定的阈值,而是根据不透水面占比的逐渐增加,其径流系数也慢慢增大。综上,各用地类型的不透水面占比与径流系数有较强的线性关系,其变化分为阈值型和渐变型。

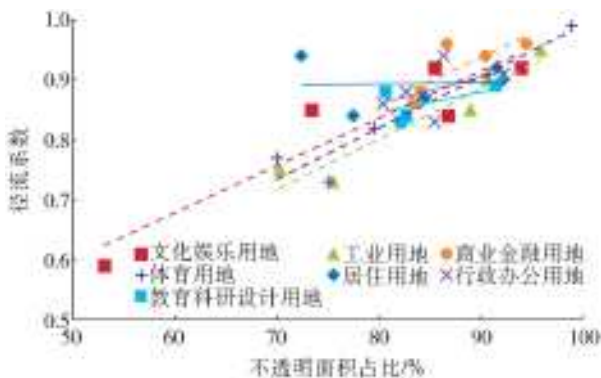


图 5 各用地类型不透水面占比与径流系数散点图

Fig. 5 Scatter plot of impervious surface ratio and runoff coefficient for each land type

对于阈值型用地类型,可进行较为集中的绿化措施或 LID 措施,当其不透水面积占比低于其阈值后,其径流系数就会较快减少,这有利于有效减缓该土地利用类型内涝问题。对于渐变型用地类型,可采用放缓的逐步绿化或 LID 措施,在集中改善阈值型用地类型的不透水面占比的同时,辅以较小范围的改善措施,这样整体能达到较为经济以有效的防止内涝目的。

#### 4 结论与讨论

以济南市主城区范围为研究区,通过现场调研、遥感解译和划分标记的手段获取并探究研究范围内不透水表格局分布,并根据管网流向及其分布原理提取绘制济南市主城区管网水系分布底图,将划分出的 2 631 个汇水单元信息输入至 HIMS-SWMM 模型进行小时尺度径流模拟,得到各行政区不同用地类型的径流系数分布情况。

研究区范围内绿化率达到 33.9%,不透水面积占比为 65.3%。除去 198 个林地单元后,研究区内绿化率降低到 29.3%,不透水面积占比升至

70.7%。天桥区为不透水面积占比最高的区域,历下区为不透水面积占比最低的区域。从土地利用类型看,各区域主要职能不同,其不透水面积占比比较高的土地利用类型也不尽相同,但总体来说,居住用地、工业用地和商业金融用地属于本身面积占比大且有较高不透水面积占比的土地利用类型。

HIMS-SWMM 的模拟结果表明,2016 年 7、8 月降雨后,整个济南市主城区总体径流系数为 0.71,整个研究区共降水 125.23 mm,下渗量为 36.33 mm,产生的径流量为 88.90 mm。其中:历城区总体径流系数为 0.65,为所有行政区中径流系数最小的区域;天桥区绿化率为 0.87,为所有行政区中径流系数最大的区域。从土地利用类型来看,商业金融用地、居住用地和行政办公用地是径流系数最大的 3 个类型,这 3 个区域不透水面积占比比较大,房屋密集,是最有可能发生内涝的类型。

从预防内涝的角度分类提出济南市主城区不同用地类型下不透水表格局的改进措施如下。

(1)根据调研发现,济南市给排水基础系统虽然比较完备、分布广泛,但是设施老化问题严重,需要进一步修理、更新和完善。一些新建居民区尽管有较高绿化面积,但由于建设土层较薄很容易饱和,因此较难抵御较大的城市内涝。新建居民区可采取绿色屋顶等 LID 措施以改善小区整体防洪排涝能力。(2)各用地类型的不透水面占比与径流系数有较强的线性关系,其变化分为阈值型和渐变型。对于阈值型用地类型,可进行较为集中的绿化措施或 LID 措施,当其不透水面积占比低于其阈值后,其径流系数就会较快减少,这有利于有效减缓该土地利用类型内涝问题。对于渐变型用地类型,可采用放缓的逐步绿化或 LID 措施,在集中改善阈值型用地类型的不透水面占比的同时,辅以较小范围的改善措施,这样整体能达到较为经济以有效的防止内涝目的。

#### 参考文献:

- [1] 陈明星,陆大道,张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. 地理学报,2009,64(4):387-398. DOI:10.11821/xb200904001.
- [2] 黄金川,方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J]. 地理研究,2003(2):211-220. DOI:10.11821/yj2003020010.
- [3] 陈利顶,孙然好,刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展[J]. 生态学报,2013,33(4):1042-1050. DOI:10.5846/stxb201205070659.
- [4] 宋建波,武春友. 城市化与生态环境协调发展评价研究:以长江三角洲城市群为例[J]. 中国软科学,2010

- (2):78-87. DOI:10.3969/j.issn.1002-9753.2010.02.010.
- [5] 刘耀彬,李仁东,宋学锋.中国城市化与生态环境耦合度分析[J].自然资源学报,2005(1):105-112. DOI:10.3321/j.issn:1000-3037.2005.01.015.
- [6] 李涵,李龙,张婷,等.徐州市中心城区不透水面时空异质性分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(3):668-680. DOI:10.11870/cjlyzyyhj201903018.
- [7] 王浩,卢善龙,吴炳方,等.不透水面遥感提取及应用研究进展[J].地球科学进展,2013,28(3):327-336. DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2013.03.0327.
- [8] 任金华,吴绍华,周生路,等.城市不透水面遥感研究进展[J].国土资源遥感,2012(4):8-15. DOI:10.6046/gtzyyg.2012.04.02.
- [9] 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.
- [10] 秦莉俐,陈云霞,许有鹏.城镇化对径流的长期影响研究[J].南京大学学报(自然科学版),2005(3):279-285. DOI:10.3321/j.issn:0469-5097.2005.03.007.
- [11] 徐光来,许有鹏,徐宏亮.城市化水文效应研究进展[J].自然资源学报,2010,25(12):2171-2178. DOI:10.11849/zrzyxb.2010.12.018.
- [12] 李倩.秦淮河流域城市化空间格局变化及其水文效应[D].南京:南京大学,2012.
- [13] 李彩丽.秦淮河流域不透水面提取及其水文效应研究[D].南京:南京大学,2011.
- [14] 马雪梅,雷秀丽,李希峰,等.基于数据挖掘技术的流域不透水面及变化信息提取[J].测绘通报,2007(12):34-37. DOI:10.3969/j.issn.0494-0911.2007.12.010.
- [15] 济南市统计局.济南市第二次土地调查主要数据成果公报[EB/OL]. www.jntj.jinan.gov.cn,2015.
- [16] 济南市史志办公室.济南市情资料库[EB/OL]. www.jnsq.jinan.gov.cn,2019.
- [17] 高玉斌,黄津辉,周飞祥.基于遥感的高精度城市不透水面信息提取方法研究[J].中国给水排水,2017,33(9):123-127. DOI:CNKI:SUN:GSPS.0.2017-09-029.
- [18] 侯爱中,倪广恒,雷志栋,等.基于 Landsat TM5 遥感影像的北京市平原区不透水面积变化分析[J].水力发电学报,2013,32(3):39-46.
- [19] 王文亮,李俊奇,宫永伟,等.基于 SWMM 模型的低影响开发雨洪控制效果模拟[J].中国给水排水,2012,28(21):42-44. DOI:10.3969/j.issn.1000-4602.2012.21.012.
- [20] 张杰.基于 GIS 及 SWMM 的郑州市暴雨内涝研究[D].郑州:郑州大学,2012.
- [21] 赵冬泉,佟庆远,王浩正,等. SWMM 模型在城市雨水排除系统分析中的应用[J].给水排水,2009,45(5):198-201. DOI:10.3969/j.issn.1002-8471.2009.05.057.
- [22] 董欣,杜鹏飞,李志一,等. SWMM 模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证[J].环境科学,2008(6):1495-1501. DOI:10.3321/j.issn:0250-3301.2008.06.007.
- [23] 任伯帜,邓仁健,李文健. SWMM 模型原理及其在霞凝港区的应用[J].水运工程,2006(4):41-44. DOI:10.3969/j.issn.1002-4972.2006.04.011.
- [24] GIRONÁ S J, ROESNER L A, ROSSMAN L A, et al. A new applications manual for the storm water management model (SWMM)[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(6):813-814. DOI:10.1016/j.envsoft.2009.11.009.
- [25] 刘丽芳,刘昌明,王中根,等. HIMS 模型参数的不确定性及其影响因素[J].地理科学进展,2013,32(4):532-537. DOI:10.11820/dlkxjz.2013.04.005.
- [26] 刘昌明,王中根,杨胜天,等.水循环多元综合模拟系统(HIMS)的研究进展[J].水利发展研究,2010,10(8):5-8,15. DOI:10.3969/j.issn.1671-1408.2010.08.002.
- [27] 刘昌明,郑红星,王中根,等.基于 HIMS 的水文过程多尺度综合模拟[J].北京师范大学学报(自然科学版),2010,46(3):268-273.
- [28] 刘昌明,王中根,郑红星,等. HIMS 系统及其定制模型的开发与应用[J].中国科学(E辑:技术科学),2008(3):350-360.
- [29] 王中根,郑红星,刘昌明.基于模块的分布式水文模拟系统及其应用[J].地理科学进展,2005(6):109-115. DOI:10.3969/j.issn.1007-6301.2005.06.013.
- [30] 刘丽芳,王中根,姜爱华,等.近 50 年济南三川流域降雨-径流关系变化分析[J].南水北调与水利科技,2018,16(1):22-27,56. DOI:10.13476/j.cnki.nsb-dqk.20180004.