

# 基于地形圈闭与河网水系的宝鸡市城市内涝对策研究

谢 娅<sup>1,2</sup>, 李景宜<sup>1,2</sup>, 郭俊理<sup>1,2</sup>, 康金龙<sup>3</sup>

(1. 宝鸡文理学院 地理与环境学院, 陕西 宝鸡 721013;

2. 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721013; 3. 陕西国土测绘工程院, 西安 710054)

**摘 要:**选取宝鸡市高新区排水管网齐全的区域为研究区,采用 ArcGIS 平台的水文分析模块及文献调查的方法,分析了区域发生城市内涝的原因。结果表明:河谷型空间形态、汛期强阵型降水以及自然地表向硬化地表的变化是宝鸡市城市内涝的主要影响因素。建设用地由 2003 年的 11.52 km<sup>2</sup> 增加至 2013 年的 17.54 km<sup>2</sup>,是研究区内城市内涝频发的主要原因;分析研究区内道路的空间分布特征及河流的分布情况,设计方案,构建地表排水网络系统,将城市的雨水借地势、分圈闭、逐级分流排入支流,最终汇入渭河,合理引导区域内的水流,有效缓解城市内涝。

**关键词:**城市内涝;圈闭;水系

**中图分类号:**TP79; TU992; P332

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2019)02-0384-05

## Study on Countermeasures of Urban Waterlogging in Baoji City Based on Terrain Traps and River Network Systems

XIE Ya<sup>1,2</sup>, LI Jingyi<sup>1,2</sup>, GUO Junli<sup>1,2</sup>, KANG Jinlong<sup>3</sup>

(1. College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji,

Shaanxi 721013, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating,

Baoji, Shaanxi 721013, China; 3. Shaanxi Institute of Surveying and Mapping of Land, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The area of drainage pipe network in high tech zone of Baoji City was selected as the research area. The hydrological analysis module of the ArcGIS platform and the literature survey method were adopted to analyze the causes of the urban waterlogging in the region. The results showed that the spatial form of the valley type, the strong formation precipitation in the flood season and the change of the surface properties of the ground cover matter were the main factors affecting the waterlogging in Baoji City. The construction land increased from 11.52 km<sup>2</sup> in 2003 to 17.54 km<sup>2</sup> in 2013, which was the main reason for the frequent waterlogging in the urban area. The analysis on spatial distribution characteristics of roads in the study area and the distribution of rivers were, the designing the drainage scheme, constructing the surface drainage network system to drain the urban rain water into the sub trap, the networks step by step, and the Weihe River can rationally adjust the water flow in the area and effectively alleviate urban waterlogging.

**Keywords:** urban water logging; trap; river system

21 世纪以来,我国诸多城市频发城市内涝灾害,每年发生 200 多起不同程度的内涝灾害,全国 351 个城市 2008—2010 年排涝能力调查结果显示,62% 的城市均受到不同程度的内涝影响<sup>[1]</sup>。近年来,国内外诸多学者针对城市内涝问题展开了广泛研究。Bates 等<sup>[2]</sup>开发了洪水淹没模拟模型,通过高分辨率栅格数字高程模型,对低洼平原地带河流的洪水泛滥区进行信息提取和动态分析;Bates 等<sup>[3]</sup>使用机载合成孔径

雷达在英格兰西部中部 Severn 河流域分析河流洪水淹没范围;Escuder-Bueno 等<sup>[4]</sup>从非工程因素考虑,对灾害风险进行整合,提取出社会视角以及居民风险两个方面的内容,定量化城市内涝的分析方法;苏伯尼等<sup>[5]</sup>通过实地调查和定量分析,模拟积水分布状况,获取脆弱性曲线并估算内涝产生的经济损失;吴志峰等<sup>[6]</sup>针对城市内涝现状与成因,提出城市内涝治理方案;周广胜等<sup>[7]</sup>提出城市内涝的防治应考虑气候

变化引起的极端天气因素,从内涝产生的源头控制内涝问题的产生;胡蓓蓓等<sup>[8]</sup>在对天津市滨海新区的政治经济计划及人口规划等内容上进行分析,运用情景模拟预测 2020 年该地区的内涝灾害情况。2016 年 10 月在联合国“人居三”大会在厄瓜多尔首都基多召开,对丹麦“哥本哈根应对暴雨准则”方案进行了评比,该准则最终获得分析与规划类别(Analysis and Planning Category)中的卓越奖,到目前为止,“哥本哈根应对暴雨准则”仍是一个有效而可资借鉴的实践方案<sup>[9]</sup>。近两年,我国推广“海绵城市”建设,在全国范围进行了不同程度的实践<sup>[10]</sup>,特别是对于新老城区的建设方案均有不同的思路<sup>[11]</sup>,但大多仍处于理论研究或小范围试点阶段,经过实践检验的结论尚未形成。

城市空间扩张是城市化进程中区域人口增长与社会经济发展的综合过程<sup>[12]</sup>。自 2002 年宝鸡县撤县设区和宝鸡国家级高新产业园区建设以来,宝鸡市城市空间快速扩张,城市化进程加快,建设用地不断扩张,由此带来的城市问题也日益突出。2003 年以来,每当汛期到来,交通瘫痪,道路积水就会出现在城区的多条道路上,给城镇居民的出行及公共财产造成一定的损失。本文以 2003 年、2013 年高分辨率 QuickBird 影像为数据源,划分汇水区域,利用城市内部现有的干支流水系网络,有效分流积水,为政府相关部门制定内涝问题的解决方案提供参考依据。

1 研究区概况

宝鸡市是典型的河谷型城市,地质构造复杂,四周的地貌差异较大,南、西、北三面环山,城市建设以渭河为中轴线向东扩张。对于渭滨区,其东北方向是渭河的冲积平原,跨过渭河即为金台区,地表是基岩向黄土过渡的区域,在其南部至西部区域则是秦岭的基岩山地,地跨东经 107°11′04″—107°15′07″,北纬 34°20′05″—34°21′21″。东西长 6.12 km,南北宽 2.28 km,面积为 11.52 km<sup>2</sup>。宝鸡市四季分明,属暖温带大陆性季风气候,春季少雨,昼夜温差大,降雨主要集中在夏季,多高强度的阵雨,易引发洪涝灾害。研究区位于渭河的左岸,从西到东有茵香河、西沙河、东沙河及清水河等南北向的渭河支流。

2 数据与方法

2.1 数据处理

利用 ENVI 软件,对 2003 年和 2013 年两个时间段 QuickBird 遥感图像进行了正射纠正、几何校正、辐射校正、大气校正和融合裁剪等预处理。对解放军总参谋部 1984 年版的成图比例尺为 1:10 000 的地

形图进行扫描和数字化。利用 ArcGIS 软件的空间分析模块,将等高线和高程点的矢量数据数据转换成数字高程模型的栅格数据,选取 DEM 的水平分辨率 5 m 提取较为精细的河网,更好地反映研究区的水文情况<sup>[13]</sup>。根据数字高程模型提取出研究区内的汇水区域,分析降雨影响城市内涝形成的因素。通过人机交互解译,提取出两个时期的建设用地范围分布图,利用 ArcGIS 提取土地利用转移矩阵的方法,获取 2003—2013 年新增建设用地的面积。在影像的基础上,划定分级汇流区,充分利用现有干流水系的空间分布特征,提出城市内涝的解决方案并进行综合分析。

2.2 研究方法

2.2.1 DEM 河网提取 本文采用美国 ESRI 公司提供的 ArcGIS 空间分析扩展模块提取流域特征。首先,通过 EDM 数据填充表面栅格中的汇来移除数据中的小缺陷,使得河流数据不至于出现坑洼不平现象影响后续分析;其次,使用 1984 年由 Mark 等提出的 D8 单流向算法,对于每个像元流向规则,则是通过分析其最陡的方向和最大的下降方向来确定,之后,对每个像元进行累计流量的计算并赋值与栅格,最后,根据对河流特性,对需要提取河网密度情况,设置一定的阈值,然后提取河网。

2.2.2 暴雨强度及雨水流量的确定 根据 GB50014—2006《室外排水设计规范》<sup>[14]</sup>中对暴雨强度  $q$  及雨水流量  $Q$  的设计,其中  $q$  通过对研究区多年的气象资料进行统计分析,运用一定的数学方法进行推求,计算出对应区域的暴雨强度;宝鸡市暴雨强度公式是西安建筑科技大学研究生根据宝鸡市近 30 a 的降雨资料,采用最大值法推出<sup>[15]</sup>。对  $Q$  的计算,可以计算出一定暴雨重现期的雨水流量需要多大直径的排水管网。

$$q=\frac{5.9023(1+2.4990\lg P)}{(t+13.3863)^{0.8278}}$$
 (1)

$$Q=q\Psi F$$
 (2)

式中: $q$  为设计暴雨强度; $t$  是降雨历时; $P$  是雨水管渠的设计重现期; $Q$  为雨水流量; $\Psi$  是径流系数; $F$  是汇水面积。其中,不同地面种类径流系数见表 1。

表 1 不同地面种类径流系数

地面种类	$\Psi$
各种屋面、混凝土或沥青路面	0.85~0.95
大块石砌路面或沥青表面各种的碎石路面	0.55~0.65
级配碎石路面	0.40~0.50
干砌砖石或碎石路面	0.35~0.40
非铺砌土路面	0.25~0.35
公园或绿地	0.10~0.20

### 3 城市内涝影响因素

#### 3.1 河谷型城市的空间形态特征

宝鸡市是一个典型的河谷型城市,城市在发展的早期就受到地形的约束<sup>[16]</sup>。渭河干流穿城而过,是泄洪的主要通道。汛期内,市区汇水范围大,不仅有市区自身汇水,同时还有外围边坡汇水,并随地形比降逐级汇聚于干流河道,本文中研究区内的汇水范围为 11.52 km<sup>2</sup>,根据公式(2)可知,汇水面积影响雨水

设计流量,当暴雨来临时,研究区外部南部残塬边坡到研究区边界的大于 5.27 km<sup>2</sup> 区域的汇水均会往研究区内进行汇流,大量的雨水流向研究区,汇水面积变大,超过了区域对雨水的承受能力,出现内涝。

以暴雨重现期为 2 a,降雨历时 1 h 为例,径流系数为 0.72(宝鸡市中心城市综合径流系数  $\psi \approx 0.69 \sim 0.74$ )的情况下,根据宝鸡市暴雨强度公式(1)得出,汇水面积增大,雨水流量也随之增大,见表 2 中的汇水面积变化一项。

表 2 不同城市内涝因素下的雨水流量

城市内涝因素	暴雨重现期/ a	降雨历时/ min	暴雨强度/ (L · s <sup>-1</sup> · hm <sup>-2</sup> )	径流系数	汇水面积/ hm <sup>2</sup>	雨水流量/ (L · s <sup>-1</sup> )
汇水面积	2	60	0.30	0.72	11.52	2.43
	2	60	0.30	0.72	16.79	3.55
短时强降水	2	60	0.30	0.72	11.52	2.43
	2	30	0.46	0.72	11.52	3.76
径流系数	2	60	0.30	0.15	11.52	0.51
	2	60	0.30	0.90	11.52	3.06

筑堤防洪是河谷型城市发展过程中的传统性选择,其结果是干、支流河堤逐步成为城市圈闭,把城市分隔成一个个盆状的封闭单元,且越靠近干流河道封闭性越强、盆状形态越典型,内涝问题越突出。近年来,区域性水土流失导致渭河干流河床内淤积泥沙,河床抬升,防洪与排涝矛盾进一步加剧,城市内涝问题日益严重。

#### 3.2 汛期强阵型降水特征

根据气象资料显示,在 1960—2011 年,在分析 1983—2013 年宝鸡市的降雨量年际变化时发现,降雨量偏少大约为 390 mm 的时间段出现在 1994—1997 年及 2001—2002 年两个时间段里,而约 750 mm 的降雨偏多的时期出现在 2009—2012 年,在 2011 年的时候达到 929.1 mm<sup>[17]</sup>。宝鸡市年际暴雨呈现阶段性明显变化的特征,暴雨日数呈现整体上升的趋势,其中 1990 年、2011 年和 2012 年的暴雨日数最多,达到 3 d。据资料记载,1988—1991 年,宝鸡市的暴雨日数分别为 2,1,3,2 d,均分布于 7—9 月,2011 年和 2012 年暴雨日数明显增多。

由暴雨强公式(1)可知,内涝防治系统设计重现期为 2 a,降雨时间缩短为 30 min,暴雨强度相应的增大,最终导致雨水流量的增大,详见表 2 中短时强降雨一项。研究区内只有东沙河口雨水泵站在暴雨来临的时候进行提升抽排,将雨水排入渭河,服务面积较大,不能及时将城市中的雨水及时排到河流,导致城市积水在短时间内快速形成。近年来,宝鸡市发生了多起不同程度的内涝灾害,特别是近几年,汛期内逢雨必涝,给人们的正常出行造成了极大的困扰<sup>[17]</sup>。

#### 3.3 地表性状变化特征

自然地表环境下,大部分降水经过植被、土壤等下渗,超过饱和含水量后,形成地面汇流,顺地势往低洼处汇集<sup>[15]</sup>。根据雨水流量的计算公式(2),在暴雨强度与汇水面积相同的条件下,地面径流系数的增大使得雨水流量也跟着增大,分析表 1 中地面径流系数,研究区 2003—2013 年,城市因自身的发展,不断扩张,原有的自然地表径流系数(径流系数 0.10~0.20)被硬化的水泥或者沥青路面(径流系数 0.85~0.95)所代替,透水性大大降低,基本丧失了地面的下渗能力,在暴雨,特大暴雨等天气发生时,地面径流系数增加,地表降水只能通过下水管道进行汇流泄洪,而排水管网系统的口径流量不能满足暴雨时期降雨的雨量,超出泄洪量的部分只能成为地表径流,且地表径流系数会随着雨量的增加而增加,短时间汇集大量的产流,导致城市内涝。详见表 2 中的径流系数一项。

2003 年,研究区只有马营镇、永清村、东新村、东庄、西庄、郭家崖等村镇和建设中的宝鸡文理学院新校区、宝鸡工业园、宝钛集团及宝鸡中学等建设用地。随着宝鸡市市政府东迁,其周边区域的城市化速度加快,研究区城市建设用地面积从 2013 年的 3.16 km<sup>2</sup> 增加到 2013 年的 8.88 km<sup>2</sup>。建设用地面积的迅速增长,使得地表性状变化引发的城市内涝问题日益突出。

### 4 城市内涝对策和方案

#### 4.1 地形社区圈闭

近年来,研究区内城市建设用地扩张速度较快,且空间布局较为规则。党政机关、学校、社区等都是形状

规则且封闭的空间区域,均有独立的、各自封闭的排水系统,没有特大暴雨的情况下可以各自独立完成地表降水的汇流和排放,不会影响封闭区间外的其他区域,因此,本次研究将此类区域划分为一级汇流区,通过判别高分辨率遥感影像,确定封闭区域的范围。

一级汇流区之外的研究区,通过分析发现,茵香河、西沙河、东沙河及清水河等自西向东贯穿整个研究区域,并由南向北注入渭河,这使得研究区被水系分割成了3块独立区域,为二级汇流区。汇流区的地表降水均是基于地形因素进行汇流的,即地势高处的水流顺地势流向地势低洼处,在东西向的道路汇集,并顺势进入4条支流。

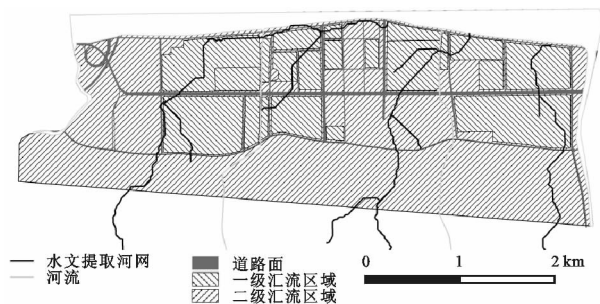


图1 汇水区域示意图

#### 4.2 解决城市内涝对策

西沙河和东沙河的河道岸坡和河床被全部用水泥板硬化,其水文效应被人为改变了,同时也严重影响了城市的自然气候。根据王若楠<sup>[18]</sup>利用不同的水力模型模拟计算研究区内的洪水淹没情况发现,城市内涝问题往往发生在二级汇流区内,即滨河南路靠近渭河大桥一段、力兴路靠近渭水路一段以及宝鸡市渭河生态公园中渭水苑到质监局这段范围之内,分析原因有二,一是城市硬化地表的下渗能力较小,二是研究区域现状的雨水管道不能满足暴雨来临时雨水的及时排出,造成内涝。解决这一矛盾的焦点是合理利用好支流河道,构建以支流河道为骨架、以支流间不同的汇水区域为主导的城市地表排涝系统。解决内涝问题的关键在于两个“打破”,首先是打破城市地表降水排放完全依赖于地下管网的思维习惯,其次是打破多年来河谷型城市建设逐步形成的干、支流河堤圈闭现状。

近现代城市建设过程中,排水系统设计的主流一直是地下管网,在较大的污水处理排放压力下,依然仅仅停留在雨、污分流式的地下管网系统建设阶段。近年来,城市内涝已成为普遍性城市灾害问题,即使提出了海绵城市建设思想和小范围试点,究其根本,仍然沿袭的是由地下蓄滞水和地下管网为主的城市排水系统,将雨水截流在上游及城区内,从而延缓径流的发生,并大幅度降低下游区域的峰值流量。目前

的海绵城市建设方案,也许能够短期解决一定特征环境城市区域的内涝问题,但不打破以地下系统为主体的滞蓄排方案,长期累积的结果很可能会导致更严重的次生灾害,这一问题,在河谷型城市的内涝问题上尤为显著。因此,打破依赖地下管网系统的传统模式,采用地下、地表相结合的排水模式,是彻底解决河谷型城市内涝问题的良好对策。“哥本哈根暴雨应对行为准则”这一方案的核心思想就是地表与地下相结合,其实施结果是既有效,又节约了相当于达到同等效果地下管网系统60%以上的费用,哥本哈根暴雨应对行为准则能给世界上的众多城市提供前沿且可行的城市现状空间的对应方案,其普适性也在欧、美、亚各地的设计方案中已经得到了验证<sup>[9]</sup>。对于宝鸡市这样的河谷型城市,迫于地形的限制,只能夹河而建,但是河道却是一个天然的泄洪通道,充分利用河流水系的优势,结合现有的地下排水网络及地表地势,合理引导城市的雨水,同时,宝鸡市的空间形态与哥本哈根极为相识,通过结合宝鸡市的实际情况,设计方案对宝鸡市城区进行改造,能有效减轻城市内涝的影响。

#### 4.3 解决城市内涝方案设计

构建地表、地下相结合的城市内涝防治系统的关键在于地表排水系统。以宝鸡市为例,地表排水系统的设计和建设的核心思想是分级排放,主体工程是构建地表排水网络系统,关键技术是以与渭河干流河道相平行的东西向道路为排水网渠,需注意的重要节点是城市外缘边坡坡脚和渭河干流河堤外的滨河南路。

通过对研究区的地表状况的分析,可以将研究区内的道路作为潜在的洪水廊道,在城市遭遇暴雨时,研究区内的雨水顺地势汇流到道路里面,道路进行截留并顺着道路流向两端的河道。下面详细叙述研究区地表排水网络设计方案:(1)地表排水主干是支流河网,即茵香河、西沙河、东沙河和清水河。(2)地表排水支渠网是东西方向的排水沟和城市道路,即南部残塬边坡坡脚排水沟、西宝南线、高新大道和滨河南路。(3)如图2所示,划分出12个地表汇水圈闭,南北向顺地势可分4级,分别为残塬边坡及渭河高阶地区、西宝南线以南的渭河二级阶地区、西宝南线与高新大道之间原渭河一级阶地区、高新大道与滨河南路间原渭河滩地区,东西向自西而东可划分为茵香河与西沙河区间、西沙河与东沙河区间、东沙河与清水河区间,南北向、东西向分割后,可以逐级划分为12个城市圈闭;(4)设计网络式的汇水区建设方案:①在边坡坡脚修建与支流相通的人工排水渠;②东西方

向的道路要与东、西两侧支流有一定坡比落差,确保路、桥联结处的路面地表汇流能注入支流,特别是道路交汇处东西方向的地表汇流应尽量避免进入南北向道路而汇入下一级汇水区;③滨河南路与各支流只能在支流堤岸下设置地下排水口,排水口可设计为压力开闭型闸门。

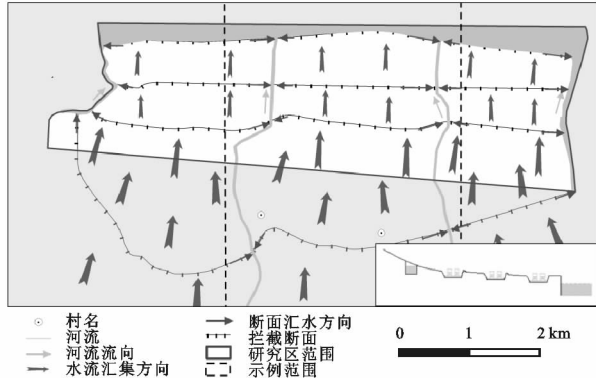


图2 苗香河至清水河区间城区地表排水网络示意图

凭借地势、分圈闭、逐级分流排入两侧支流的地表排水系统,必然可以大幅度减轻城市内涝的发生及危害,具体细节以西沙河至东沙河区间为例说明(图2中虚线示例范围):(1)在朴西村至朴东村间南部边坡脚修建退水渠,退水渠在朴西村南西流入西沙河,在朴东村南东流入东沙河,主要功能是拦截塬面及边坡坡面汇流,防止其汇入下一级城市区;(2)朴西村、朴东村至西宝南线间的圈闭内汇水,由西宝南线西流注入西沙河,东流注入东沙河,尽可能不使此圈闭内汇水经南北向道路进入下一级汇水区;(3)西宝南线至高新大道城区汇水经高新大道向西流入西沙河,向东流入东沙河;(4)高新大道至渭河南大堤区间的地表汇流,由滨河南路及其区间两端暗入口向西进入西沙河,向东进入东沙河。水流最终由西沙河和东沙河汇流入渭河,完成城市雨水的排放。

## 5 结论

(1)宝鸡市是一个典型的河谷型城市,汛期来临时,市区承受着来自边坡及自身的汇水,使得地势地貌成为内涝产生的客观条件;

(2)短时强降雨天气能导致暴雨强度增大,最终导致雨水流量的增大;

(3)城市地表性状改变,面积仅有  $11.52 \text{ km}^2$  的研究区在从 2003—2013 年,建设用地面积增加了  $6.02 \text{ km}^2$ ,导致区域地面径流系数变大,透水性降低;

充分利用城市道路作为潜在的泄洪廊道,因地制宜地设计排水方案,实现地表与地下结合的排水网络,缓解城市内涝问题。

## 参考文献:

- [1] 王江波,张茜,吴丽萍,等.我国城市内涝问题研究综述[J].安徽农业科学,2013(30):12072-12078.
- [2] Bates P D, Roo A P J D. A simple raster-based model for flood inundation simulation[J]. Journal of Hydrology, 2000, 236(1):54-77.
- [3] Bates P D, Wilson M, Horritt M S, et al. Reach scale floodplain inundation dynamics observed using airborne SAR imagery[J]. Journal of Hydrology, 2006, 328(1): 306-318.
- [4] Escuder-Bueno I, Castillo-Rodríguez J T, Zechner S, et al. A quantitative flood risk analysis methodology for urban areas with integration of social research data [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012, 12 (9): 2843-2863.
- [5] 苏伯尼,黄弘,张楠.基于情景模拟的城市内涝动态风险评估方法[J].清华大学学报:自然科学版,2015(6): 684-690.
- [6] 吴志峰,象伟宁.从城市生态系统整体性、复杂性和多样性的视角透视城市内涝[J].生态学报,2016,36(16): 4955-4957.
- [7] 周广胜,何奇瑾.城市内涝防治需充分预估气候变化的影响[J].生态学报,2016,36(16):4961-4964.
- [8] 胡蓓蓓,周俊,王军,等.基于情景模拟的天津市滨海新区 2020 年暴雨内涝风险评估[J].地理科学,2012,32 (7):846-852.
- [9] 章译.让城市安全宜居的蓝绿策略:记丹麦哥本哈根暴雨应对行为准则[N].中国花卉报,2017-4-6(4).
- [10] 方世南,戴仁璋.海绵城市建设的问题与对策[J].中国特色社会主义研究,2017(1):88-92.
- [11] 张毅,李俊奇,王文亮.海绵城市建设的几大困惑与对策分析[J].中国给水排水,2016(12):7-11.
- [12] 任鹏飞,甘淑,宗慧琳,等.基于遥感数据的城市空间扩张研究[J].水土保持通报,2014,34(3):116-120.
- [13] 鲍伟佳,程先富,陈旭东. DEM 水平分辨率对流域特征提取的影响分析[J].水土保持研究,2011,18(2): 129-132.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.室外排水设计规范(2014 年版)GB50014-2006[M].北京:中国计划出版社,2014.
- [15] 乔宁.城市内涝成因分析及解决方案研究[D].西安:西安建筑科技大学,2015.
- [16] 杨永春.中国河谷型城市研究[J].地域研究与开发, 1999,18(3):61-65.
- [17] 李龙.宝鸡市暴雨强度公式推求与设计暴雨雨型分析 [D].西安:西安建筑科技大学,2015.
- [18] 王若楠.城市内涝风险等级评估方法及案例研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.