

济南城市型水灾害特征分析

史丽华, 韩美, 张翠

(山东师范大学 人口·资源与环境学院, 济南 250014)

摘要: 随着我国城市化进程的加快, 财富与信息等在城市集聚的同时, 城市型水灾害的发生频数在增加, 灾害的损失也日益增加, 可以说城市型水灾害的发生在于人类社会系统与自然生态系统的相互作用, 是城市各个因素综合作用的结果。通过采用百分位法和 R/S 分析法等分析了济南市城市型水灾害降水、地形、水文特征, 得到济南市区降水极端事件及暴雨次数与城市化率趋势一致, 而且水灾害出现的时间与暴雨出现次数最多的时间段相吻合, 同时济南市未来降水变化趋势延续过去降水量整体变化趋势的可能性较大; 加之南部山区和城市水系在人类土地利用方式和自然生态相互影响下脆弱的城市孕灾环境和承灾体共同作用导致济南市城市型水灾害产生。并针对此结合国外治水防水经验提出五项对策建议。通过本文的研究可以更加深入地的认识城市型水灾害的形成机制, 并在此基础上为更好地避免或防御城市型水灾害的发生提供理论支撑。

关键词: 济南市; 城市型水灾害; 降水; 城市化; 人类社会; 自然; 相互作用

中图分类号: X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0674-07

Analysis of characteristics of urban water disasters in Jinan

SHI Lihua, HAN Mei, ZHANG Cui

(College of Population Resource and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: With the rapid urbanization in China, wealth and information are gathering in the cities, which also leads to the increasing of urban water disasters and loss of disasters. The occurrence of urban water disasters is caused by the interaction between human social system and natural ecosystems, and is the result of the combined effects of various factors. In this paper, the characteristics of precipitation, topography, and hydrology in urban water disasters of Jinan City were analyzed using the percentile method and R/S analysis method. The results showed that the number of extreme precipitation events and the frequency of rainstorm are consistent with the urbanization trend, the time when urban water disasters occur is consistent with the period of time when rainstorm appears mostly, and the future trend of precipitation has the possibility of a continuation of the overall trend of precipitation in the past years. The fragile environment of developing hazards caused by the interactions between human land use patterns and natural ecosystems in the southern mountains and urban water systems combined with fragile hazard-bearing bodies lead to urban water disasters. Meanwhile, five suggestions were proposed according to the flood control and prevention experience in other countries. The research can provide a better understanding of the formation mechanism of urban water disasters, which can then offer theoretical support for the prevention of the occurrence of urban water disasters.

Key words: Jinan; urban water disasters; precipitation; urbanization; human society; nature; interaction

在全球气候变化和极端天气增加的大背景下, 城市型水灾害是快速城市化过程中国内外许多国家都面临的新问题^[1]。建国以来, 我国城市化速度加快, 尤其是 20 世纪 90 年代以来, 我国城市建成区面积和城市建设用地面积增加了近 4 倍, 城市人

口密度也由 279 人/km² (1990 年) 增加到 2 307 人/km² (2012 年), 但随之而来的是各城市水灾害的发生, 据资料显示^[2] 至 2010 年 8 月底, 我国遭受洪涝灾害的县级以上城市已经超过了 200 座, 其中大多数为暴雨内涝, 这些城市有北京、上海、

收稿日期: 2014-12-18 修回日期: 2015-02-04 网络出版时间: 2015-07-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150724.1123.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41371537); 山东省科技计划项目(2013GSF11706)

作者简介: 史丽华(1990-), 女, 山东德州人, 主要从事环境演变与区域可持续发展研究。E-mail: shilihua30@163.com

通讯作者: 韩美(1963-), 女, 山东寿光人, 博士生导师, 主要从事环境演变与可持续发展和流域水资源与湿地生态评价。E-mail: hamei568568@126.com

南京、广州、重庆、武汉、济南、郑州、西安、杭州、福州、长沙等。1982年7月23日日本长崎水灾害的发生使人们注意到快速城市化带来这次水灾害不同于以往的传统水灾害,这就是“城市型水灾害”概念的提出。城市型水灾害侧重于以人类活动主导的发生在城市中的水灾害,就致灾因子与孕灾环境而言,城市型水灾害更多涉及到人类活动作用,可以说城市型水灾害的发生在于人类社会系统与自然生态系统的相互作用,城市型水灾害的形成是城市各个因素综合作用的结果,是时间与空间的结合,也可以说是城市系统的反馈。我国对于城市型水灾害的研究主要集中在两方面,在定性方面,主要包括城市型水灾害特征、发生原因分析和防灾减灾措施等方面^[13],在定量方面,真正提到城市型水灾害的几乎没有,但在以某城市为例进行定量分析的涉及到城市型水灾害的研究不少,主要集中在城市暴雨洪水分析,如采用经验相关、双累积曲线和统计检验等方法估算城市洪水^[4];城市暴雨灾害评估,如采取数学分析与图面分析相结合的研究方法进行暴雨灾害风险评估^[5]、采用成因分析法提出危险性评价指标体系,编制了中国城市水灾危险性评价图^[6];城市雨洪模拟,国外的模型主要有SWMM^[7]和Wallingford Model^[8],国内主要有城市雨水径流计算模型(SSCM)^[9]、城市雨水径流模型(CSYJM)^[10]和城市暴雨内涝数学模型^[11]等。

而对于济南市城市型水灾害的研究较少,主要集中在对于济南市暴雨洪水灾害的成因及措施的定性分析^[12-15],定量分析主要集中在城市雨洪模型的模拟方面。如利用SWMM模型模拟不同雨洪利用措施下降雨径流过程,得出最佳雨洪利用模式^[16],或用MIKE21软件构建水动力模型对暴雨洪水进行数值模拟,研究区域内的水流情况及洪水淹没范围^[17]等。总之,上述研究对于济南市水灾害成因等的分析缺乏较为定量的分析,因此本文通过分析济南市城市型水灾害降水、地形、水文特征,尤其侧重降水序列特征的分析,运用百分位法和R/S分析法等方法从降水量和降水强度两方面进行定量分析,并在此基础上提出相关建议。此研究有利于正确认识城市型水灾害的影响因素,也可以为本市及其他城市(如海口、重庆等)提供理论与实践支撑。

1 研究区概况

济南市位于 $36^{\circ}01' - 37^{\circ}32' N$, $116^{\circ}11' - 117^{\circ}44' E$,面积 $8\,177\text{ km}^2$,南部为泰山山地,北部为黄河平原,正处于鲁中南低山丘陵区与鲁西北冲积平原带的过渡地区,地势南高北低,南北相差约 $1\,100\text{ m}$ 。济南市属于暖温带半湿润季风气候,年平均气温 $13.5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,降水量 $600 \sim 900\text{ mm}$ 。同时,济南市区地表水系有黄河、小清河两大水系和湖泊,属黄河水系的有南、北沙河和玉符河,有卧虎山水库、锦绣川水库、玉清湖水库、鹊山水库等;属小清河水系的有腊山河、兴济河、全福河、大辛河、巨野河等,主要湖泊为大明湖和城市规划中的北湖。地下水主要指深层岩溶水,岩溶水因特殊地质构造影响,在市区出露成泉,主要有趵突泉、黑虎泉、珍珠泉、五龙潭4大泉群^[18]。

济南市现辖6区(市中区、历下区、天桥区、槐荫区、历城区、长清区)、3县(平阴县、济阳县、商河县)和1个县级市

(章丘市),但2001年之前,市区不包括长清县,在2001年6月撤县设区后,市区包括长清区。2012年,济南市人口达到609.21万人,生产总值为4812.68亿元。同时,济南市战略地位重要,它东通渤海,沟通韩国、日本等国家,西连中西部地区,南北连接华北、华东地区,而且又是环渤海经济圈和黄河流域的中心城市,交通便利,航空、铁路、公路一应俱全。尤其是公路建设,包括东西、南北纵贯的主干道、高架桥、立交桥、轨道交通线网以及快速公交系统,研究区概况见图1。

济南市相对较早的雨涝灾害出现于唐代,元代、明代、清代也都有雨涝灾害的记录。自解放至1990年,济南市共发生较大水灾16次^[19],随后1962年、1987年、2007年发生了不同程度的水灾害,其损失呈明显上升趋势^[12]。

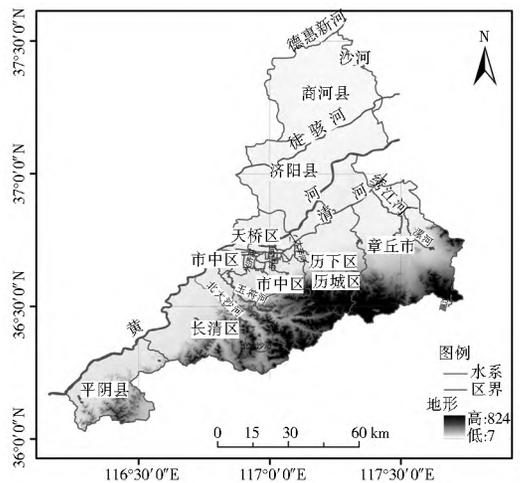


图1 济南市区域概况图

Fig. 1 Regional overview of Jinan City

2 数据来源和研究方法

本文1961年-2010年日降水数据来源于济南市气象站,其数据准确性经核实,可信度高;1992年-2012年全市降水量数据、年降水日数($\geq 0.1\text{ mm}$)、年平均气温数据来源于1993年-2013年济南统计年鉴;城市化率数据来源于1984年-2013年济南统计年鉴和2008年-2013年山东省统计年鉴,暴雨灾害资料、济南市自然社会资料来源于中国知网、万方、读秀等数据库中与济南市水灾害相关的文献等。济南市土地利用的相关数据来源于济南市土地利用总体规划(1997年-2010年)和济南市土地利用总体规划(2006年-2020年)。

本文主要研究方法百分位法和R/S分析法。百分位法是从概率统计的角度来定义极端事件^[20],即把日降水量序列按升序排列,定义日降水量 $\geq 0.1\text{ mm}$ 的子样本的第95个百分位值为极端降水阈值^[21-22]。R/S分析法是1965年英国学者Hurst提出的一种处理时间序列的分形结构分析方法^[23],本文主要用于研究降水序列变化过去与未来是否存在相同或相反的变化特征,着重揭示未来降水序列的变化特征^[24]。其原理如下:设时间序列 $\{x(t)\}$, $t=1, 2, \dots$,对于任意正整数 $\tau \geq 1$,定义均值序列:

$$\bar{x}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t) \quad (1)$$

累积离差 $X(t, \tau)$ 序列:

$$X(t, \tau) = \sum_{i=1}^t (x(i) - x_\tau) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (2)$$

极差 R 序列: $R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau)$, 标准差 S 序列:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (x(i) - x_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

引入无量纲比值 R/S , 对 R 进行重新标度, 经证实, 其结果满足下式:

$$R/S = (\alpha\tau)^H \quad (\alpha \text{ 为常数}) \quad (4)$$

H 即为 Hurst 指数。 H 取值区间为 $[0, 1]$, 当 $H = 0.5$ 时, 表示该降水序列是随机的, 各事件是随机的和不相关的; 当 $H > 0.5$ 时, 表示该降水序列未来的趋势与过去一致, H 越接近 1, 持续性越强, 未来的降水量整体变化趋势与过去的越接近; 当 $H < 0.5$ 时, 表示未来的总体趋势与过去相反, H 越接近 0, 反持续性越强^[25]。

3 城市型水灾害特征分析

纯粹自然条件下, 即不受人类影响的条件下, 就无所谓灾害了, 我们所说的灾害是相对于人类而言的, 即自然灾害是由自然事件或力量为主因造成的生命伤亡和人类社会财产损失的事件^[26]。灾害 (D) 是地球表层孕灾环境 (E)、致灾因子 (H)、承灾体 (S) 综合作用的产物^[27], 随着济南市城市化进程的加快, 人类活动对自然的干预大大加强, 因此, 在人类社会与自然生态系统相互作用下, 降水因素、地形因素和水文因素是导致济南市城市型水灾害的主要因素。

3.1 降水特征分析

3.1.1 济南市市区与济南全市降水量对比分析

由于 2001 年之前, 市区不包括长清县, 故本文首先计算 2001 年前、后 9 年市区年平均降水量的极差, 得到 2001 年后 9 年的年平均降水量极差约为前 9 年的 2 倍, 因此可以忽略区划因素对市区降水量数据的较大影响, 市区降水量数据是可以使用的。根据 1992 年-2012 年济南市区和全市年平均降水量, 得出济南市区年降水量为 732.7 mm, 济南全市年平均降水量为 675.9 mm, 济南市区年降水量较全市年降水量多出 56.8 mm。通过计算济南市区与济南全市降水量的增加比率, 并与济南市城市化率相比较, 见图 2。

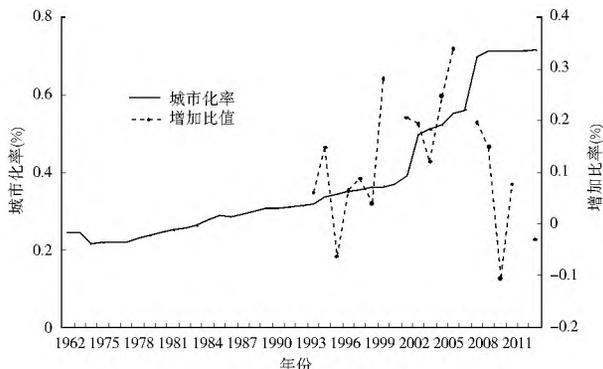


图 2 1992 年至 2012 年济南市区年降水量增加比率与济南市城市化率

Fig. 2 Comparison of increasing rate of annual precipitation and urbanization rate in Jinan from 1992 to 2012

由上图可知, 济南市城市化率总体呈上升趋势, 尤其是

2000 年后, 济南市城市化速度加快, 出现了两个高峰阶段, 分别为 2000 年-2003 年和 2004 年-2008 年, 2009 年后济南市城市化速度呈现缓慢增长时期。再来看济南市区相对于济南全市降水量的增加比率, 可以分为三个阶段, 第一阶段为 20 世纪 90 年代, 济南市区相对于济南全市降水量的增加比率处介于正负值之间, 其波动区间为 $[-0.06, 0.28]$; 第二阶段为 21 世纪初(约为 1999 年-2008 年), 这时期济南市区相对于济南全市降水量的增加比率都在正值区, 其波动区间为 $[0.12, 0.34]$; 第三阶段为 2009 年至今, 这时期其增加比率主要在负值区, 其波动期间为 $[-0.10, 0.08]$ 。由以上分析来看, 济南市城市化率与济南市区年降水量的增加比率变化趋势相近, 尤其是济南市城市化的高峰期(2000 年-2008 年)与 21 世纪初(约为 1999 年-2008 年), 同时, 2009 年后, 当济南市城市化率处于低速增长阶段时, 济南市区相对于济南全市降水量的增加比率也呈下降趋势, 甚至出现负值, 因此可以说, 济南市城市化率与济南市区降水量的增加比率在时间段上具有一致性。

同时, 也可以看出市区降水量(排除数据不全的 1992 年、2000 年、2006 年和 2011 年)除了 1995 年和 2009 年外, 在 20 年间基本大于全市降水量, 济南市降水量主要集中在市区, 而且在 1992 年至 2012 年间, 济南市降水量(包括市区降水量和全市降水量)呈现明显的波动状态, 相比之下, 济南市区降水量波动更明显。根据多年降水资料统计, 20 世纪 90 年代济南市市区降水量比全市多 53.9 mm, 21 世纪以来又在此基础上增加了 38.7 mm, 呈明显增多趋势。

在城市化背景下, 在气温方面, 本文选择济南市近 10 年来济南市区与济南全市的年平均气温及年降水日数 (≥ 0.1 mm) 进行比较, 见图 3。由图可知, 济南市区比济南全市的年平均气温高约 0.67 °C, 而相对于年降水日数来说, 济南全市的年降水日数波动较大, 究其原因, 这与济南市南部山区降水量较多不无关系。由此, 可以推断出济南市区降水偏多、气温偏高, 这两个主要气候因素的变化, 在很大程度上是由于济南市区城市化造成的。因此, 后面将侧重济南市区降水状况的分析。

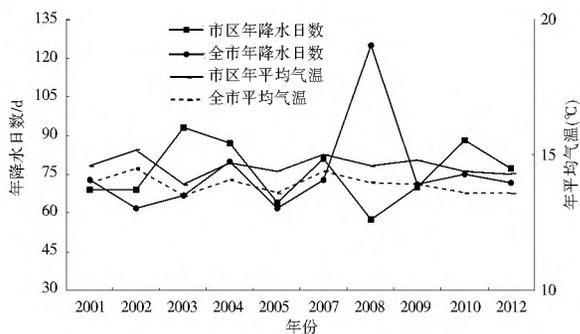


图 3 2001 年-2012 年济南市区与济南全市年平均气温及年降水日数 (≥ 0.1 mm) 比较

Fig. 3 Comparison of average annual temperature and annual precipitation days (≥ 0.1 mm) in Jinan from 2001 to 2012

3.1.2 济南市区降水量分析

在全球变化的大背景下, 全球气候变化所带来的极端事件同样也适用于区域, 而城市是区域变化最明显的地方, 城

城市化使城市下垫面的能量和水循环特征发生了很大变化,对降水、气温、蒸发等造成直接影响,特别是对极端气候的发生有严重影响,主要表现在城市极端降水事件的发生。本文根据1961年-2010年的50年间逐年日降水量进行分析,运用近年来较为常用的百分位法得到济南市极端降水事件的阈值为14 mm/d,当某日降水量超过极端降水事件的阈值时,就称之为极端降水事件^[22]由此本文得到:济南市自改革开放10年(1978年-1988年)以来,极端降水事件为141件;1989年-1999年极端降水事件为146件,2000年-2010年极端降水事件为182件,通过比较可以看出济南市极端降水事件是逐渐增多的,而且在近十年其极端降水事件是最多的,这与济南市城市化率的增长是一致的。

为了研究济南市区较长时间内降水的变化趋势,找出较长时间的变化规律,滤去资料中一些短期的不规则的变化,采用5 a、11 a滑动平均曲线,并对其11 a滑动平均曲线通过4种回归方程模型(线性、二次曲线、三次曲线、复合曲线模型)拟合,三次曲线模型拟合效果较好,其 R^2 为0.751,由图4可知,1961年-2012年济南市区降水变化呈现波动变化趋势,在20世纪60-70年代和20世纪90年到2010年济南市区降水量较多,在20世纪80年代-90年代济南市区降水量较少。根据R/S分析原理,得到赫斯特指数 H 值为0.794,说明济南市区年降水量存在比较明显的赫斯特现象,其降水序列有长期正相关性,即未来济南市区年降水量变化延续过去降水量的整体变化趋势的可能性很大,年际变化较明显。

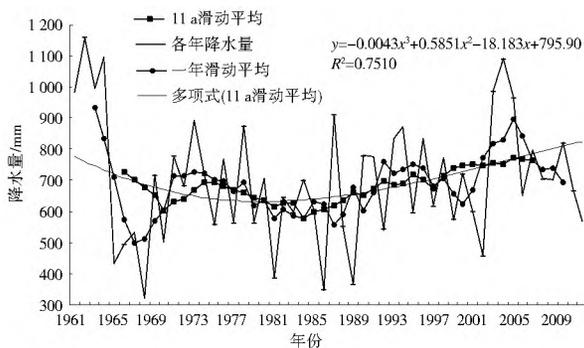


图4 1961年-2012年济南市区降水变化趋势

Fig. 4 Variation trends of precipitation in Jinan from 1961 to 2012

3.1.3 降水强度分析

由于济南市处于中国东部地区,因海陆热力差异影响,季风特征明显,季节降水不均匀,且主要集中在夏季。本文根据统计到的1961年-2012年济南市区汛期(6月-9月)降水量占全年降水总量的60%~80%,其中仅1968年和2002年的汛期降水量不足60%,分别为34%和55%。

同时,根据国家气象局规定:24 h内的降雨量大于50 mm为暴雨,本文根据济南市市区1961年-2010年50 a的日降水数据统计,得到济南市市区1961年-2010年的暴雨统计表。

由表1可知,济南市区暴雨总次数是逐渐增加的,其中也有波动,济南市区暴雨各年次数的平均值波动与暴雨总次数一致;因为暴雨出现的随机性、不确定性,中位数作为表示数据集集中趋势的指标之一,能反映济南市市区暴雨出现次数的多少,由表可知,中位数所反映的暴雨出现次数的多少与

暴雨总数、暴雨各年次数的平均值一致,其高峰均出现在1991年-2000年;众数是一个表示一个地理系列中出现次数最多的数值,因此可以看出济南市暴雨各年次数的众数(由大到小)出现的时间段分别为1961年-1970年、1991年-2000年、2001年-2010年和1971年-1990年,而这与济南市历史水灾记录1962年、1987年、2007年是一致的;再来看暴雨与济南市城市化的关系,济南市城市化自改革开放(1978年)以来,1978年-1988年10年间城市化率增长了7.0%,1989-1999年10年间增长了5.6%,2000年-2009年10年间增长了34.5%,而在1978年-1988年济南市区暴雨各年次数的最大值为6,1989年到1999年略有下降为5,2000年-2009年出现了最大值8,其趋势与济南市城市化变化趋势是一致的,因此,可以说济南市区暴雨的出现的时间上与济南市水灾害的发生、济南市城市化具有一致性。

总之,济南市降水具有如下特征:济南市区降水量较济南全市明显偏多,且济南市城市化率与济南市区降水量的增加比率在时间段上具有一致性;济南市区极端降水事件逐渐增多,其年降水量也存在明显的赫斯特现象,即未来济南市区年降水量变化延续过去降水量的整体变化趋势的可能性很大;济南市区降水量主要集中在汛期(6月-9月),且其暴雨的出现的时间上与济南市水灾害的发生、济南市城市化具有一致性。

表1 济南市市区1961年-2010年的暴雨统计

Tab. 1 Statistics of rainstorms in Jinan from 1961 to 2010

时间	暴雨 总次数	暴雨各年次数			
		平均值	中位数	众数	最大值 最小值
1961年-1970年	20	2	1.5	4	4 0
1971年-1980年	29	2.9	2.5	1	6 1
1981年-1990年	19	1.9	1.5	1	6 0
1991年-2000年	32	3.2	4	4	5 1
2001年-2010年	31	3.1	2	2	8 1

3.2 地形特征分析

济南市的地貌格局及地势特点一方面导致了济南市气候的极端性,另一方面也是导致济南市区易遭洪水侵袭的另一重要因素。济南市处于鲁中南低山丘陵区与鲁西北冲积平原带的过渡地区,如果把城市型水灾害按照地理位置进行划分,可分为5类:分别为傍山型、沿江型、滨湖型、滨海型、洼地型。而济南市区则属于傍山型与洼地型兼具的地区。

3.2.1 济南市地形分析

济南市南部为中低山脉,北部为黄河,地势南高北低,呈现出中低山脉、低山丘陵、山前平原和冲积平原的阶梯状分布特点。同时因其北面的黄河为地上悬河,黄河防洪大堤高出市区20 m^[12],故形成了东西狭长、南北较窄的狭长地带。济南市南部山区海拔介于30~990 m间,冲沟发育深6~8 m,山前倾斜平原海拔介于30~100 m间,坡度为23%~9%,北部的黄河、小清河冲积平原海拔介于50~200 m间,小清河以南标高一般为23~30 m^[12,17],向北倾斜,同时,由于小清河北面火成岩的侵入、黄河冲积平原的淤高,又形成了北园与大明湖一带的低洼地区。

3.2.2 济南南部山区地形分析

济南市南部山区地处泰山余脉北部与济南市市区交界处,地貌类型以低山丘陵为主,地势南高北低,低山、丘陵和山前平原呈阶梯状分布,涉及济南市5个区(历城区、长清区、市中区、槐荫区和历下区)。海拔高度30~990 m,南部边界的摩天岭和梯子山海拔最高,山体一般中、下部陡峭难行,山顶多浑圆开阔,山岭坡度在 1° ~ 15° 之间的占济南南部山区总面积的60.3%,坡度在 16° ~ 25° 之间的占22.3%,坡度在 26° 以上的占17.4%。济南南部山区处于中纬度暖温带半湿润大陆性季风气候区,既具有上述气候特征,同时由于相对于周围地区地势较高,降水季节变化明显、年度变化悬殊(1191.4 mm(1964年)和364.4 mm(1989年)),暴雨频率大、和局部性降雨特点,尤其表现为局部性暴雨,在丰水年和枯水年都占有相当比例。降水空间分布表现为南多北少、中部多于两侧。据统计,区内多年平均降水量比市区多10%,暴雨平均出现频率为每年2.7次,一日最大暴雨量249.9 mm^[28]。区内土壤主要为棕壤和褐土两个土类。

根据侯艳晶^[29]、邓振华^[30]对济南市南部山区1987年-2009年、1995年-2003年土地利用/覆被变化的分析,可以得出:20世纪90年代以来,随着济南市城市化进程的加快,济南南部山区土地利用方式发生较大变化。最明显的是耕地面积的逐渐减少,代之以城乡工矿居民用地、道路及附属建筑物等建设用地的增加。其次是林地的波动增加,主要原因是在一部分坡度大、耕作条件较差的耕地转为林地等。降水、地形、土壤、植被的破坏等因素的叠加必然导致该区水土流失,据统计^[28]区内中度、强度、极强度、剧烈流失分别为31.3%、16.3%、7.0%、1.9%,合计56.5%。可见在中雨、大雨时植被破坏、建筑物密度过高、植被稀疏等,必然使径流来不及入渗形成山洪。通过山水沟短距离排向市区。同时,济南市主要交通干道呈东西、南北走向的网格状分布,加上南高北低的地势,这些南北走向的交通干道引导南部山区洪水到达市区,增加了市区的洪水流量及积水面积,对雨涝起了放大作用。而济南市部分跨河铁路及道路桥涵过洪标准较低,影响河道行洪。若遇到特大暴雨,行洪不畅,便易导致洪水漫溢^[17,31],形成城市型水灾害,主要表现为马路行洪。

总之,济南市地形具有如下特征:地势南高北低、市区北部北园-小清河一带地势最低;南部山区地形呈阶梯状分布,土地利用方式变化易造成水土流失;在地形影响下,济南市呈现东西狭长、南北较窄的形状,主要交通干道呈东西、南北走向的网格状分布,形成的城市型水灾害主要表现为马路行洪。

3.3 水文特征分析

就防洪而言,济南市避免城市型水灾害的关键是市区北部低洼处北园-小清河一带,即小清河的排洪和市区南部各山洪沟道(如羊头峪、八里洼、十六里河等)与主市区排水网的结合^[32]。

3.3.1 小清河南侧支流

小清河南侧支流自西向东主要有腊山河、兴济河、大柳行河、全福河、大辛河和韩仓河等。它们大多发源于南部山地丘陵区,最后汇入小清河。但这些支流几乎可以明显分为

上游山地段与过城区段,前者多为季节性山洪沟道,比降较大,而后者则更多受人类活动影响,变为半人工河道甚至直接由人工开挖的排水河道。小清河位于市区北部较低洼的地区,与黄河的流向大致平行,且属于典型的平原河道,比降介于 $1/3\ 000$ ~ $1/10\ 000$ 之间,河道只有30~50 m,而上述支流中穿过济南市区的河道、排洪沟有30余条,全部汇入小清河^[33],干支流对比明显。如果暴雨时小清河无法排泄这些多余的干支流洪水,就会导致雨洪向小清河以南的低洼地区汇集,造成市区内积水并加剧低洼地带的洪涝灾害^[12],因此小清河排洪压力大^[34]。

3.3.2 市区人工开挖的支流

市区内的支流是在城市形成和发展过程中人工开挖形成,它们大多承担着排水防洪功能,主要有护城河系统、工商河系统和圩子壕系统等。

护城河系统是1371年开挖的环绕济南老城区的人工河,全长6.9 km,现已成为由泉水汇集而成的泉水游览景观。工商河系统是1925至1926年开挖的既有航运功能,又是津浦铁路以西、胶济铁路以北至泇口地区的主要排水通道,位于老城区西北部,全长6.6 km。1986年、2004年、2008年对其进行整治后,现已成为集放生养殖、观景、休闲、防洪等为一体的多功能景观河。

圩子壕系统开挖于1861年,它环绕济南老城东、西、南三面,北面为大明湖,全长约20 km,是市区南部重要的排水沟系。按其方位,分为东圩子壕、西圩子壕和南圩子壕,东圩子壕位于解放桥附近,南部连接羊头峪东沟、羊头峪西沟和马家庄沟等,向北汇入大柳行河,现在改成了暗河^[32];西圩子壕从杆石桥至大明湖西北角,是汛期南部山水沟洪水汇入小清河的通道;南圩子壕位于文化西路一带,连接南部山区的四里山沟、广场西沟、广场东沟等山洪沟道,后沿顺河街(东圩子壕)向北汇入西泇河,但因棚盖在千佛山路与文化西路交叉口处成为暗沟。

与此同时,城市化带来的最重要的变化就是土地利用方式的变化。纵观济南市1996年到2011年土地利用方式,一方面体现在济南市面积的不断扩大。1996年济南市土地总面积为799 850 hm²,至2011年,济南市土地总面积增加了22 835 hm²;另一方面体现在土地利用方式的变化,尤其是建设用地的增加。2005年-2011年6年间增加了7 050 hm²,而这些建设用地在很大程度上带来的是城市下垫面不透水率的增加,这必然会使济南市地表径流量增加,增加城市型水灾害的发生机率,同时济南市土地开发利用达到了88.38%,高于全国和全省平均水平^[35]。这也增加了受灾体的脆弱性,例如城市地下建筑等。可以说是城市化所带来的不透水率的增加、小清河排水能力低、市区排水系统被不合理侵占、改造以及防洪标准低等是造成济南市城市型水灾害的另一重要因素。

总之,济南市水文特征主要表现在:小清河是济南市唯一的排洪通道,但其南侧支流较多,呈梳状分布,但分为明显的上游山地段与过城区段;市区人工开挖支流或自然形成的河(沟)道在城市化过程中部分或被人棚盖为暗沟、或被污染、被人为污染物严重堵塞^[31]等导致排洪不畅,易引发济南市城市型水灾害。

4 结论与展望

通过采用百分位法和 R/S 分析法等分析了济南市城市型水灾害降水、地形、水文特征,得出结论:济南市区降水极端事件及暴雨次数与城市化率趋势一致,而且水灾害出现的时间与暴雨出现次数最多的时间段相吻合,同时济南市区未来降水变化趋势延续过去降水量整体变化趋势的可能性较大;加之南部山区和城市水系在人类土地利用方式和自然生态相互影响下脆弱的城市孕灾环境和承灾体共同作用导致济南市城市型水灾害的产生。因此,在不影响城市发展的同时,需要在城市型水灾害预报预警、应急救援与灾民自救、改进和完善城市排水系统等方面采取必要的措施。

同时由于人类社会系统与自然生态系统相互作用的复杂性,很难对济南市城市型水灾害的特征做极为详尽的定量分析;再者,本文只从降水、地形、水文三个主要因素入手进行特征分析,因此,导致城市型水灾害发生的城市各要素之间的相互作用机制仍是需要研究的重要方面。

参考文献(References):

- [1] 梁旭辉. 关于城市水灾害及其综合减灾的学习体会[J]. 中国防汛抗旱, 2010, 20(6): 63-67. (LIANG Xu hui. Studying on urban water and comprehensive mitigation[J]. China Flood & Drought Management, 2010, 20(6): 63-67. (in Chinese))
- [2] 程晓陶. 城市型水灾害及其综合治水方略[J]. 灾害学, 2010, 25(增刊): 10-15. (CHENG Xiaotao. Urban water disasters and strategy of comprehensive control of water disaster[J]. Journal of Catastrophology, 2010, 25 (supplement): 10-15. (in Chinese))
- [3] 程晓陶, 李帅杰, 王珊. 城市型水灾害及其应对方略[J]. 中国水利, 2010(13): 5-6. (CHENG Xiaotao, LI Shuaijie, WANG Shan. Urban water disasters and coping strategies[J]. China Water Resources, 2010(13): 5-6. (in Chinese))
- [4] 周乃晟. 城市洪水及防治[J]. 自然杂志, 1990, 13(9): 575-623. (ZHOU Naisheng. Urban flooding and prevention[J]. Chinese Journal of Nature, 1990, 13(9): 575-623. (in Chinese))
- [5] 朱政, 郑伯红, 贺清云. 城市暴雨灾害的影响程度及对策研究—以长沙市为例[J]. 自然灾害学报, 2011, 3(20): 105-112. (ZHU Zheng, ZHENG Bohong, HE Qingyun. Study on effect degree and countermeasures against urban rainstorm disasters: a case of Changsha City[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 3(20): 105-112. (in Chinese))
- [6] 王静爱, 王珏, 叶涛. 中国城市水灾危险性与可持续发展[J]. 北京师范大学学报: 社会科学版, 2004(3): 138-143. (WANG Jingai, WANG Jue, YE Tao. Hazard assessment of urban flood disaster and sustainable development in China[J]. Journal of Beijing Normal University: Social Science Edition, 2004, (3): 138-143. (in Chinese))
- [7] Rossman L A. Storm Water Management Model: User's Manual Version 5. 0 [EB/OL]. http://www.epa.gov/ednrmr/models/swmm/epaswmm5_user_manual.pdf.
- [8] Price R K, Kidd C H R. A Design and Simulation Method for Storm Sewers[A]. International Conference on Urban Storm Drainage[C]. London: Pentech Press, 1978:327-337.
- [9] 岑国平. 城市雨水径流计算模型[J]. 水利学报, 1990(10): 68-75. (CENG Guoping. A model to simulate stormwater runoff in urban area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990(10): 68-75. (in Chinese))
- [10] 周玉文, 赵洪宾. 城市雨水径流模型研究[J]. 中国给水排水, 1997, 13(4): 4-6. (ZHOU Yurwen, ZHAO Hongbin. Study of a model to simulate stormwater runoff in urban area[J]. China Water & Wastewater, 1997, 13(4): 4-6. (in Chinese))
- [11] 解以扬, 李大鸣, 李培彦, 等. 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 384-390. (XIE Yiyang, LI Daming, LI Peiyan, et al. Research and application of the mathematical model for urban rainstorm water logging[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 384-390. (in Chinese))
- [12] 曹升平, 姜平平. 济南城区洪涝灾害成因分析[J]. 水文, 2009, 29(2): 87-89. (CAO Shengping, JIANG Pingping. Cause of Urban Floods in Jinan City[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(2): 87-89. (in Chinese))
- [13] 张升堂, 郭建斌, 高宗军, 等. 济南“7·18”城市暴雨洪水分析[J]. 人民黄河, 2010, 32(2): 30-32. (ZHANG Shengtang, GUO Jianbin, GAO Zongjun, et al. Analysis of Jinan “7. 18” urban storm floods[J]. Yellow River, 2010, 32(2): 30-32. (in Chinese))
- [14] 赵传集, 赵泉. 济南城市暴雨灾害及防御对策探析[J]. 灾害学, 1989: 60-63. (ZHAO Chuanji, ZHAO Quan. Urban storm disaster and countermeasures in Jinan[J]. Journal of Catastrophology, 1989: 60-63. (in Chinese))
- [15] 刘秋锋, 赵建, 康慕谊. 济南市城市扩展与城市暴雨洪灾[J]. 灾害学, 2005, 20(4): 39-42. (LIU Qiufeng, ZHAO Jian, KANG Muryi. Urban Expanding and its effects on urban flood disasters in Jinan [J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(4): 39-42. (in Chinese))
- [16] 郝玉伟. 济南市城区雨洪模拟及雨洪资源利用研究[D]. 济南: 山东大学, 2011. (HAO Yurwei. Study of rainwater simulation and resource utilization in Jinan City[D]. Jinan: Shandong University, 2011. (in Chinese))
- [17] 何文华. 城市化对济南市暴雨洪水的影响及其洪水模拟研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010. (HE Wenhua. Study on effect of urbanization on storm flood simulation at Jinan City [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [18] 赵德岭, 王强. 济南城市生态水系重建研究[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(4): 67-69. (ZHAO Deling, WANG Qiang. Research on Jinan City ecological water system rebuilding[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(4): 67-69. (in Chinese))
- [19] 济南市史志编纂委员会. 济南市志[M]. 北京: 中华书局出版社, 1997. (Compilation Committee of Chronicles in Jinan. Jinan Chronicles[M]. Beijing: Zhonghua Press, 1997. (in Chinese))
- [20] 杨萍, 刘伟东, 王启光, 等. 近 40 年我国极端温度变化趋势和季节特征[J]. 应用气象学报, 2010, 21(1): 29-36. (YANG Ping, LIU Weidong, WANG Qiguang, et al. The climatic change trend and seasonal characteristics of daily temperature extremes in China for the latest 40 years[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(1): 29-36. (in Chinese))
- [21] 张利平, 杜鸿, 夏军, 等. 气候变化下极端水文事件的研究进展[J]. 地理科学进展. 2011, 30(11): 1370-1379. (ZHANG Liping, DU Hong, XIA Jun, et al. Progress in the study of extreme hydrologic events under climate change[J]. Progress in Geography. 2011, 30(11): 1370-1379. (in Chinese))
- [22] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, 2003, 58(增刊): 1-10. (ZHAI Panmao, PAN Xiaohua. Change in extreme temperature and precipitation over Northern China during the second half of the 20 century

- [J]. Journal of Geographical Sciences, 2003, 58 (Supplement): 1-10. (in Chinese)
- [23] 黄勇, 周志芳, 王锦国, 等. R/S 分析法在地下水动态分析中的应用[J]. 河海大学学报, 2002, 30(1): 83-87. (HUANG Yong, ZHOU Zhi fang, WANG Jin guo, et al. Application of R/S method to dynamic groundwater analysis[J]. Journal of Hohai University, 2002, 30(1): 83-87. (in Chinese)
- [24] 徐宗学, 李占玲, 史晓崑. 石羊河流域主要气象要素及径流变化趋势分析[J]. 资源科学, 2007, 29(5): 121-128. (XU Zong xue, LI Zhan ling, SHI Xiao kun. Long-term trends of major climatic variables and runoff in the Shiyang River Basin[J]. Resource Science, 2007, 29(5): 121-128. (in Chinese)
- [25] 潘雅婧, 王仰麟, 彭建, 等. 基于小波与 R/S 方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析[J]. 地理研究, 2012, 31(5): 811-830. (PAN Ya qian, WANG Yang lin, PENG Jian , et al. Precipitation change in middle and lower reaches of Hanjiang River: based on wavelet analysis and R/S analysis[J]. Geography Research, 2012, 31(5): 811-830. (in Chinese)
- [26] 黄崇福. 自然灾害基本定义的探讨[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 41-50. (HU ANH Chong fu. A discussion on basic definition of natural disasters[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(5): 41-50. (in Chinese)
- [27] 史培军. 灾害研究的理论与实践[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1991(自然灾害研究专辑): 37-42. (SHI Pei jun. Theory and practice of disaster study[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 1991 (Album of Natural Disasters Research): 37-42. (in Chinese)
- [28] 郑昭佩. 恢复生态学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (ZHENG Zhao pei. Restoration Ecology Introduction[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [29] 侯艳晶. 快速城市化进程中济南南部山区土地利用/覆被变化研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2013. (HOU Yan jing. Rapid urbanization induced lucc in the southern mountainous region of Jinan City [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2013. (in Chinese)
- [30] 邓振华, 张晶, 于明洋, 等. 济南南部山区土地利用的时空变化分析[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2010, 31(1): 69-79. (DENG Zheng-hua, ZHANG Jing, YU Ming yang, et al. Spatio-temporal change of land use in south mountain of jinan [J]. Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition, 2010, 31(1): 69-79. (in Chinese)
- [31] 孟庆斌, 曹升乐, 赵承忠. 济南防洪实践与探索[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (MENG Qing bin, CAO Sheng le, ZHAO Cheng zhong. Practice and exploration of flood control in Jinan [M]. Beijing: China Water Power Press, 2008. (in Chinese)
- [32] 赵建, 张咏梅. 济南市城市水系及其变化研究[J]. 山东师范大学学报: 自然科学版, 2007, 22(1): 86-90. (ZHAO Jian, ZHANG Yong mei. Study on the changes structure and functions of the urban drainage system in Jinan City[J]. Journal of Shandong Normal University: Natural Science, 2007, 22(1): 86-90. (in Chinese)
- [33] 陈翠英, 娄山崇, 王军. 对济南市城市防洪的认识和思考[J]. 山东水利, 2006(1): 17-19. (CHENG Cui ying, LOU Shan chong, Wang Jun. Thought of flood control in Jinan [J]. Shandong Water Conservancy, 2006(1): 17-19. (in Chinese)
- [34] 李瑞青. 小清河流域防洪减灾对策研究[D]. 济南: 山东大学, 2009, 10. 20. (LI Rui qing. Study on flood control measures and mitigation of Xiaoqing River Basin [D]. Jinan: Shandong University, 2009, 10. 20. (in Chinese)
- [35] 安科, 郑聪. 济南市土地利用现状探析[J]. 山东国土资源, 2012, 28(5): 60-62. (AN Ke, ZHENG Cong. Study on present condition of land use in Jinan City [J]. Shandong Provincial Land & Resource, 2012, 28(5): 60-62. (in Chinese)

(上接第 666 页)

- [5] WANG Ce, FENG Yu jie, ZHAO Shan shan. A dynamic contaminant fate model of organic compound: A case study of Nitrobenzene pollution in Songhua River, China [J]. Chemosphere, 2012, 88(1): 69-76.
- [6] 孙少晨, 魏怀斌, 肖伟华, 等. 冰封期水动力水质模型在松花江水质污染事件中的应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(5): 1548-1553. (SUN Sha o chen, WEI Hua bin, XIAO Wei hua, et al. Application of the freezing period hydrodynamics and water quality model to water pollution accident in Songhua River [J]. Journal of Jilin University: Earth Science, 2011, 41(5): 1548-1553. (in Chinese)
- [7] SUN Sha o chen, XIAO Wei hua, ZHOU Zu hao WANG Hao. The Study and Application of Hydrodynamic Numerical Simulation Method in Cold Region [C]. 2010 Conference on Modern Hydraulic Engineering, 2010: 182-186.
- [8] LI Hu i min, ZHOU Xue zhi, CHEN Hai ping. Numerical simulation and field experiment validation of atmospheric pollution chemical accidents based on canopy model [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 12: 30-37.
- [9] S N Lane, S C Reid, V Tayefi, et al. Reconceptualising coarse sediment delivery problems in rivers as catchment-scale and diffuse [J]. Geomorphology, 2008, 98(3/4): 227-249.
- [10] Weir jing, LIN Xue yu, SU Xiao si. Transport and fate modeling of nitrobenzene in groundwater after the Songhua River pollution accident [J]. Journal of Environmental Management, 2010, 90(11): 2378-2384.
- [11] LI Zong-lai, YANG Min, LI Dong. Nitrobenzene biodegradation ability of microbial communities in water and sediments along the Songhua River after a nitrobenzene pollution event [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(7): 778-786.
- [12] YING Lan lan, HOU Xiyong, LU Xiao. Long-term impacts of land use change on non-point source pollution in the Dagujia River watershed of Shandong peninsula [J]. Knowledge Acquisition and Modeling, 2011, 2(131): 482-486.
- [13] L J Alvarez V zquez, A Mart nez, M E V zquez M ndez. Flow regulation for water quality restoration in a river section: Modeling and control [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2010, 234: 1267-1276.
- [14] Atul Kumar, Dilip Kumar Jaiswal, Naveen Kumar. Analytical solutions to one-dimensional advection-diffusion equation with variable coefficients in semi-infinite media [J]. Journal of Hydrology, 2010, 380(3/4): 330-337.
- [15] Z HANG Bo, QIN Yu, HUANG Ming xiang. SD-GIS based temporal-spatial simulation of water quality in sudden water pollution accidents [J]. Computers & Geosciences, 2011, 37(7): 874-882.