

GIS 及 SWMM 模型在防洪保护区内涝模拟中的应用

王秀杰¹, 王丽娜¹, 田福昌², 胡冰¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学 前沿技术研究院有限公司, 天津 301700)

摘要: 为了研究防洪保护区暴雨内涝积水风险,减少淹没灾害损失,基于 GIS 技术与 SWMM 产汇流模型,计算暴雨内涝积水域面积及积水深度值,以此开展积涝风险分析。将该方法应用于茨南淝左片防洪保护区的暴雨内涝计算,利用永幸河闸上、架河闸上、青年闸上 2007 年实测降水水位验证产汇流模型。结果表明:3 个位置计算水位绝对误差分别为 0.02、0.10 和 0.14 m,计算结果较合理,将该模型应用于防洪保护区 20 年一遇设计暴雨内涝积水风险分析,研究成果对该地区风险管理及决策起着至关重要的作用。

关键词: 防洪保护区; 暴雨内涝; 地理信息系统; 暴雨水管理模型; 积水风险

中图分类号:P333.2

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2015)06-0146-05

Application of GIS and SWMM to rainstorm waterlogging simulation in flood protected zone

WANG Xiujie¹, WANG Lina¹, TIAN Fuchang², HU Bing¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Frontier Technology Research Institute, Tianjin University, Tianjin 301700, China)

Abstract: In order to study the water risk of rainstorm waterlogging in flood protected zone and reduce the loss of flood disaster, the paper calculated water area and water depth value of rainstorm waterlogging based on GIS and SWMM model so as to carry out flood risk analysis. The method was applied in the calculation of rainstorm waterlogging in Cinanfeizuopian flood protected zone. The observed precipitation water levels of Yongxing penstock, Jia river penstock and Youth penstock in 2007 were used to verify the runoff model. The results show that the absolute errors of calculated water level in three positions are respectively 0.02, 0.1 and 0.14 meters. The calculation result is more reasonable. The model was applied to the risk analysis design of rainstorm waterlogging once every 20 years in flood protected zone. The result can play a vital role in risk management and decision.

Key words: flood protected zone; rainstorm waterlogging; GIS; SWMM; waterlogging risk

自然灾害风险是现代社会和学术界人士普遍关注的热点问题,其中暴雨内涝积水风险直接影响经济建设和人民生活,暴雨内涝灾害日益突出,加重了防汛排涝任务,因此研究暴雨内涝积水风险的分布特征及演变规律显得尤为重要。

近些年,国内外学者对暴雨内涝积水风险作了大量研究,并取得丰硕成果。GIS 技术融合 SWMM 模型实现了空间数据分析与水文分析能力的结合,开拓了暴雨内涝积水风险研究的新方向。国外一些发达国家从 20 世纪 60 年代起开始研究城市内涝模

型。Barco 等^[1]结合 GIS 技术与 SWMM 模型研究大型城市汇水区的自动划分问题,为暴雨内涝风险精准分析提供技术支撑。Bates 等^[2]针对城市暴雨内涝灾害,基于栅格模型研究了二维洪泛区淹没程度。自 2009 年开始,国内逐步开始研究 GIS 技术与 SWMM 模型的集成应用,孟超等^[3]研究了 SWMM 模型与 GIS 平台的集成方式,并证明其具有较好的适用性和显示效果。李彦伟等^[4]通过 GIS 技术与 SWMM 模型研究了城市排水管网优化设计问题。张杰等^[5]运用 GIS 技术及 SWMM 模型,研究了郑

收稿日期:2015-06-10; 修回日期:2015-07-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51209158);高等学校学科创新引智计划资助(B14012)

作者简介:王秀杰(1973-),女,辽宁葫芦岛人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为水文水资源。

通讯作者:王丽娜(1989-),女,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为防洪减灾及水利信息化。

州市的暴雨内涝风险。石赟赟等^[6]针对暴雨内涝积水问题,结合GIS与SWMM模型,模拟分析了城市暴雨内涝淹没范围和淹没深度。黄国如等^[7]将SWMM模型引入到城镇流域尺度上,基于GIS技术构建了深圳市民治河流域城市雨洪模型,合理评估了地下排水管网的排水能力。

从以上研究中,可以看出,SWMM模型多用于城市暴雨内涝积水模拟,很少用于防洪保护区。基于此,本文融合GIS与SWMM,以茨南淝左片防洪保护区暴雨积涝风险研究为例,结合DEM和实测降雨数据,基于GIS技术和产汇流模型对保护区暴雨内涝积水风险进行分析,通过模拟2007年汛期实测降雨过程验证所建模型精度,并分析该地区遭遇20年一遇暴雨内涝的积水域面积和积水深度值,对其暴雨积水风险进行了研究,为减灾降险提供科学依据。

1 模型理论

1.1 GIS理论

GIS核心技术为对空间信息进行查询、分析与处理,应用信息化手段解决空间信息数据的分析问题。本文所用到的主要功能为基于DEM提取海量的地表特征信息,提取分析地形和河网,划分汇水区域,建立容积与水位对应关系,可视化地形模型,以此作为暴雨内涝积水风险分析的技术支撑。

1.1.1 地形提取与河网分析 利用GIS空间插值技术构建防洪保护区数字高程模型(DEM),用来反映区域地貌形态的整体变化特征。经洼地填充后,分析计算研究区域汇流累积矩阵,根据研究区域的气候、地形等因素的不同设定汇流能力阈值。汇流累积量超过该阈值的栅格点属于同一水系范围,连接各栅格点即形成了栅格型河网,该阈值大小决定了河网提取精度及详细程度。

1.1.2 汇水区划分 运用GIS技术进行汇水区域的划分,使得划分的汇水区域更精准,更科学。首先进行流向分析,基于精确的反映地表形态的DEM栅格,应用D8算法(最大距离权落差)确定水流方向;其次通过计算研究区域汇流累积矩阵,分析河网地形分布,生成栅格型河网;最后根据矢量化河网划分子汇水区域。

1.1.3 容积水位关系及结果可视化

(1)容积水位关系。根据不同汇水区DEM数据,各汇水区均由若干栅格组成,提取各栅格点高程(H)及面积(S)属性,设定不同水位值(h),求取对应的容积量 $V(V = (h - H)S, h > H)$,建立汇水区

容积水位对应关系。

(2)结果可视化。基于SWMM计算获得的各汇水区积水量值(V)和所建容积水位关系($V \sim h$),获取汇水区积水水位(h)与汇水区各栅格点积水深度 $\Delta h(\Delta h = h - H, \Delta h > 0)$,划分不同水深等级及色系分配,利用GIS空间插值技术构建水深栅格,实现计算结果的可视化展示。

1.2 SWMM理论

SWMM是一种分布式雨洪管理水文模型,可以动态模拟降雨及其径流过程。SWMM模型自提出以来,在全世界范围内广泛的应用于城市地区的暴雨洪水研究及城市排水系统的规划设计中来,但应用防洪保护区较少。SWMM模型所用理论主要为产汇流理论和圣维南方程,本文建模主要应用降雨径流,不涉及排水管道一维水流。此处仅介绍产汇流理论。

1.2.1 产流理论 基于SWMM模型,计算透水区域、蓄水不透水区域及不蓄水不透水区域地表径流量。其中,透水区域径流量=降雨量-入渗量;蓄水不透水区域径流量=降雨量-蓄水量;不蓄水不透水区域径流量=降雨量-蒸发量。对3种类型地表面积加权平均,从而推求各汇流子区域的径流出流过程线。采用霍顿公式计算防洪保护区地表入渗,即在长历时降雨过程中,土壤下渗衰减指数从最大下渗率通过指数形式衰减至稳定下渗率,入渗率随时间呈指数变化的基本方程^[8]为:

$$f_t = (f_0 - f_c)e^{-kt} + f_c \quad (1)$$

式中: f_t 为 t 时刻的下渗率,mm/h; f_0 为土壤初始下渗率,mm/h; f_c 为稳定下渗率; k 为下渗衰减系数,与土壤的物理性质有关, h^{-1} ; t 为时间,h。

1.2.2 汇流理论 地表汇流计算采用非线性水库模型方法^[9],即将汇水子区域概化为非线性蓄水池,降雨与上游子流域来流作为该汇水子区域的入流,入渗、蒸发与地面产流作为该汇水子区域的出流。该模型假定子区域出水口处地表径流(水深= $h - dh$)为均匀流,且出流量为蓄水池水深的非线性函数,连续性方程为:

$$A = \frac{dh}{dt} = A(I - f) - Q \quad (2)$$

式中: A 为汇水子区域的面积, m^2 ; I 为降雨强度,mm/s; f 为入渗率,mm/s; Q 为汇水子区域的出流量, m^3/s ; h 为地表径流的平均水深,m; t 为时间,s; dh 为汇水子区域的最大洼蓄水深,m。

汇水子区域出口流量由式(3)和式(4)计算获得:

$$i_e(t) - Q(t) = dS_w/dt \tag{3}$$

$$S_w = KQ(t)^{2/3} \tag{4}$$

式中： $i_e(t)$ 为 t 时刻的入流量, m^3/s ; $Q(t)$ 为 t 时刻的出流量, m^3/s ; S_w 为蓄滞水量, m^3 ; K 为库容系数, $m \cdot s^{2/3}$; t 为时间, s 。

该微分方程是非线性方程组, 无解析解。该方程的求解一般结合上两式, 化简为下式后, 采用有限差分方法求解。

$$\frac{dq}{dt} = \frac{3(R_s - q)q^{1/3}}{2K} \tag{5}$$

式中: R_s 为入流量, m^3/s ; q 为出流量, m^3/s ; K 为库容系数, $m \cdot s^{2/3}$; t 为时间, s 。

2 实例研究

2.1 研究区概况

本文研究区域为茨南淝左片防洪保护区, 属西淝河左堤、茨淮新河右堤与淮北大堤所保护的区域 (如图 1 所示), 涉及亳州市利辛县、淮南市凤台县和潘集区以及蚌埠市怀远县, 面积约 1 816 km^2 , 属淮河中下游平原地区, 洪涝灾害频繁, 降雨主要集中在 6-9 月份, 其中 1954、1991、2003 和 2007 年均曾发生典型的全流域大洪水。研究区域内主要支流有港河、架河、泥河和黑河, 详细记载降雨资料的雨量站主要有阚町站、丁集站、潘集站、上桥站和西淝河站。

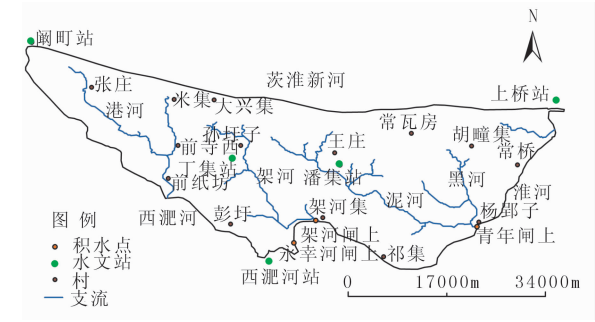


图 1 区域概况图

2.2 模型建立

2.2.1 流域信息提取

(1) 水流方向的确定: 首先进行洼地计算, 对比研究区域地形, 确定洼地产生是由于数据误差还是地表形态的真实反映, 从而设置合理的阈值或者不设阈值, 使得生成的无洼地 DEM 更精确的反映地表形态。本次研究据真实地形选择不设阈值, 即所有洼地都被填平。DEM 经填洼处理后, 用于流向分析。基于填充后的栅格, 应用 D8 算法 (最大距离权落差) 计算水流方向。

(2) 流域河网的生成: 计算研究区域汇流累积矩阵, 分析研究区域和研究对象并设定阈值 1500, 通过设定阈值整体分析研究区域河网地形分布, 生成栅格型河网。经对比分析, 生成河网与实际河网基本一致, 可以较准确地反映河道实际情况。

(3) 子流域划分及参数计算: 按照河网弧段将流域分为若干个子流域, 本文将研究区域划分为 52 个子流域, 基于 GIS 计算各子流域的面积、水流长度值和平均坡度值等参数。

2.2.2 模型输入及参数设置 根据实际地形走向、河网分布情况、道路分布等对径流的影响, 确定每个子汇水区域的流向关系。以各雨量站点空间相对位置关系为基础, 采用泰森多边形法确定每个雨量站的控制区域, 应用 SWMM 建立暴雨内涝计算模型, 如图 2 所示。

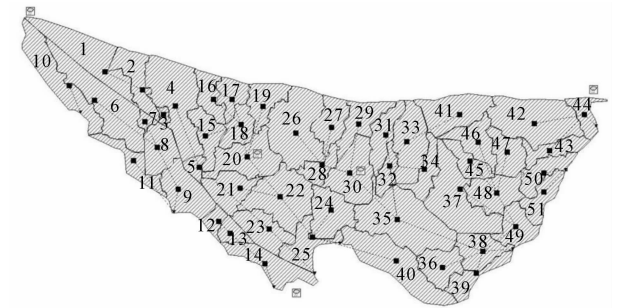


图 2 暴雨内涝计算模型

暴雨内涝计算参数包括面积、宽度、坡度值、粗糙系数 n 值等, 通过 ArcGIS 计算获得各子区域宽度、面积、坡度值, 如图 3 和 4 所示。

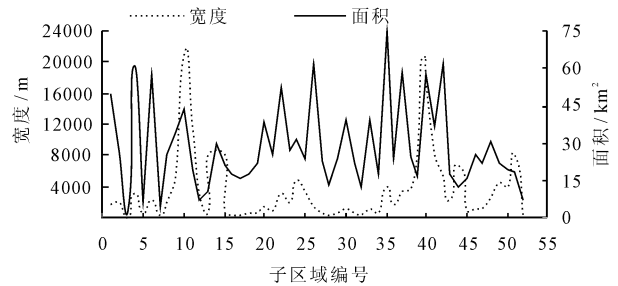


图 3 各子区域宽度与面积

由图 3 可看出, 各子区域宽度最大为 21 136.21 m, 最小为 169.14 m; 各子区域的面积最大为 74.78 km^2 , 最小为 3.1 km^2 。由图 4 可以看出, 各子区域的坡度值最大为 0.514, 最小为 0.039。除个别子区域 (33、34 等) 坡度值较大外, 其他子区域坡度值相对较小, 说明整个防洪保护区地势较平坦。研究区域土地利用类型主要有耕地、草地、林地、房屋等, 各子汇水区域根据不同土地利用类型按面积加权平均

法获得粗糙系数, n 取值范围确定为:0.03 ~ 0.07。

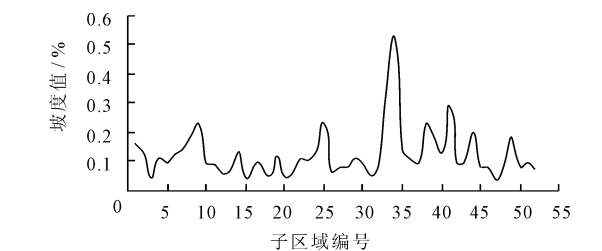


图4 各子区域坡度值

2.3 模型率定

本文利用 2007 年实测降雨过程及实际记载资料验证暴雨内涝模型,以研究区域内 5 个雨量站该年实测降雨过程作为模型降雨输入条件(如图 5 所示),计算 2007 年各子区域内涝积水量值(如图 6 所示)。基于 DEM 建立容积 - 水位关系,获得相应位置的水位值,并与 2007 年永幸河闸上、架河闸上、青年闸上的实测水位值进行对比分析,通过反复调节参数,最终确定模型参数。模拟结果如表 1 所示,从表中可以看出,最大误差绝对值为 0.14,最小误差绝对值为 0.02,满足精度要求。

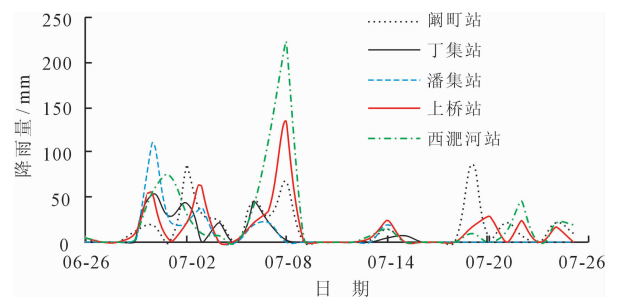


图5 各雨量站 2007 年实测降雨过程

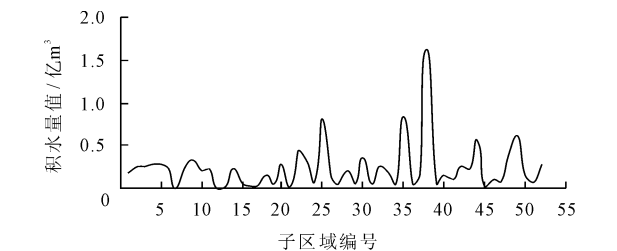


图6 2007 年各子区域内涝积水量值

基于 GIS 技术可视化功能获得 2007 年降雨积水深分布图,如图 7 所示。将 2007 年降雨量(30 d)与 5、10、20 年一遇设计降雨量(30 d)进行对比,其中 2007 年降雨量(30 d)为 402.7 mm,5 年一遇设计降雨量(30 d)为 325 mm,10 年一遇设计降雨量(30 d)为 384 mm,20 年一遇设计降雨量(30 d)为 440 mm。可分析出 2007 年降雨相当于 10 年一遇设计

降雨。同时,比较图 7 与 10 可以看出,2007 年积水深比 20 年一遇设计降雨积水深整体要小,符合分析结果。

表 1 2007 年降雨模拟值与实测值对照表

闸站	实测水位值/m	模拟水位值/m	误差绝对值/m
永幸河闸上	22.94	22.92	0.02
架河闸上	21.77	21.67	0.10
青年闸上	21.00	20.86	0.14

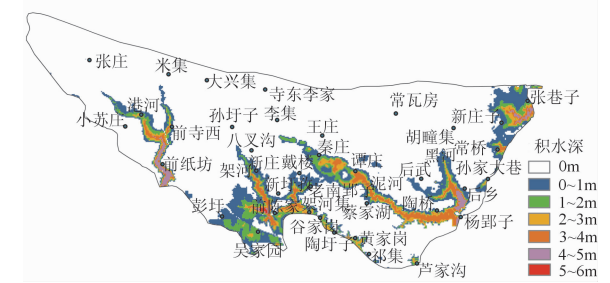


图7 2007 年降雨积水深分布图

2.4 计算结果

利用已验证模型计算茨南淝左片防洪保护区遭遇 20 年一遇设计降雨时的内涝风险,以研究区域内 5 个雨量站 2007 年实测降雨过程为基础,根据 20 年一遇设计降雨量(30 d),同频率放大获得各雨量站 20 年一遇设计降雨过程如图 8 所示,以此作为暴雨内涝计算模型输入条件,模拟该工况下暴雨内涝积水量与积水深值,各子区域内涝积水量值计算结果如图 9 所示,基于 GIS 技术可视化功能获得积水深分布图,如图 10 所示。

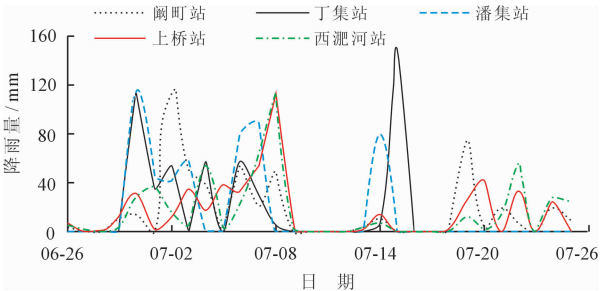


图8 2007 年各雨量站 20 年一遇设计降雨过程

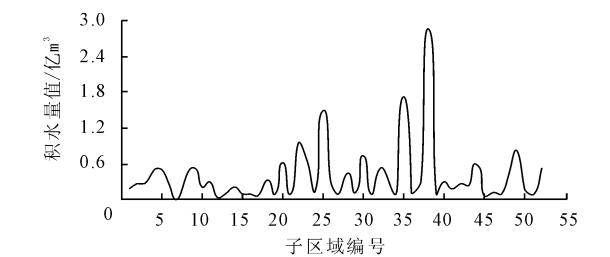


图9 20 年一遇设计降雨工况下各子区域内涝积水量值

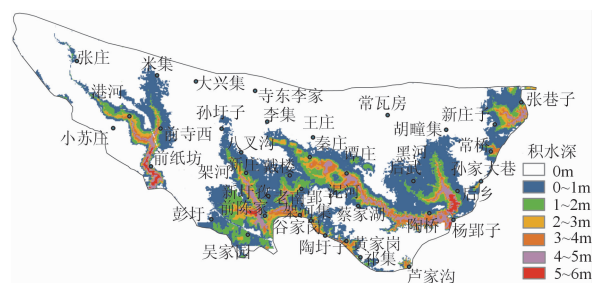


图 10 20 年一遇设计降雨积水深分布图

由图 10 分析可知暴雨内涝的积水面积为 516.23 km^2 。港河和黑河积水较深,最大积水深可达 $5 \sim 6 \text{ m}$;架河、泥河和鳊鲤池次之,最大积水深为 $4 \sim 5 \text{ m}$ 。积水深为 $1 \sim 2 \text{ m}$ 的村庄有古堆寺、前寺西、吴家园、前陈家、新庄、老南郢子、陶圩子、张巷子等村庄,积水深为 $2 \sim 3 \text{ m}$ 的村庄有架河集、谷家岗、谭庄、芦家沟、秦庄等村庄。

3 结 语

本文基于 GIS 技术和 SWMM 建立了茨南淝左片防洪保护区暴雨内涝风险分析模型,基于 DEM 建立了容积-水位关系,在模型参数率定的基础上,模拟了研究区遭遇 20 年一遇暴雨的内涝积水风险,计算结果较为合理。由此可见,GIS 技术的空间数据综合与空间分析能力融合 SWMM 模型专业的水文分析能力,可以解决防洪保护区雨情数据处理、水文建模、内涝结果分析等方面的问题。同时,也提高了

模型构建效率及模型精度,使得展示效果更加形象、逼真。因此,GIS 技术与 SWMM 模型的融合应用,为暴雨内涝积水风险研究提供了新的思路和解决方案。

参考文献:

- [1] Barco J, Wong K M, Stenstrom M K. Automatic Calibration of the U. S. EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(4):466-474.
- [2] Bates P D, De Roo A P J. A simple raster-based model for flood inundation simulation[J]. Journal of Hydrology, 2000, 236(1): 54-57.
- [3] 孟超,杨昆. SWMM 模型与 GIS 集成技术研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(10): 6286-6287, 6298.
- [4] 李彦伟,尤学一,季民,等. 基于 SWMM 模型的雨水管网优化[J]. 中国给水排水, 2010, 26(23): 40-43.
- [5] 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.
- [6] 石赞赞,万东辉,陈黎,等. 基于 GIS 和 SWMM 的城市暴雨内涝淹没模拟分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(6): 57-60+12.
- [7] 黄国如,张灵敏,雒翠,等. SWMM 模型在深圳市民治河流域的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(4): 10-14.
- [8] 黄晶. 基于 GIS 的广州市新河浦社区城市雨洪模型研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [9] 李晓燕. SWMM 模型在西北典型城镇雨洪系统规划中的应用[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.

(上接第 145 页)

而减小,随上下游水位差的增大而增大。在安装高度 $h_s = 2 \text{ m}$ 时,面积的减小是流量减小的主要原因,当安装高度 $h_s > 2 \text{ m}$ 时,流量的减小不仅与面积的减小有关,还与沿程阻力系数有关。

(3)在气泡流掺杂气团流或气团流中,气体的存在不仅减小了过流断面面积,也使沿程阻力系数增大;虹吸管中压降的大小随掺气浓度的增大而增大,压降值的增大导致阻力增大,从而使沿程阻力系数变大。

参考文献:

- [1] 朱红耕,袁寿其,施卫东,等. 大型泵站虹吸式出水渠道水力特性分析[J]. 中国农村水利水电, 2005(7): 71-73+76.

- [2] 朱红耕. 大型泵站虹吸式出水渠道水力特性分析[J]. 中国给水排水, 2006, 22(6): 54-57.
- [3] 时启燧. 高速水气两相流[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [4] 李琳,邱秀云,许史,等. 长距离虹吸管道输水水力学模型试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 106-109.
- [5] 许史,李琳,邱秀云,等. 长距离虹吸管道输水试验研究初探[J]. 中国农村水利水电, 2010(3): 70-72.
- [6] 许史. 长距离虹吸管道输水试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2010.
- [7] 邱秀云. 水力学[M]. 乌鲁木齐: 新疆电子出版社, 2008: 188-222.
- [8] 王梦婷,李琳,谭义海,等. 正虹吸管道水力特性实验研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(12): 87-90+98.