

河道边界水位对管道排水能力的影响分析

罗鸣¹, 叶兴成², 王以超², 朱程亮², 周宏¹, 周亚玲¹, 刘俊¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 宿迁市水务局, 江苏宿迁 223800)

摘要: 为保证城市排水安全, 缓解城市内涝, 针对河道排涝水位对管道排水的动态影响问题, 选用宿迁市马陵河排水片区为研究区, 基于 SWMM 模型, 模拟 2、3 和 5 a 重现期暴雨条件下出水口管道分别为自由出流、半淹没出流和完全淹没出流 3 种情形的管道相对排水能力变化, 并在此基础上探求马陵河各分段控制水位。结果表明: 管道水流主要受河道高水位作用, 即管道完全淹没出流时, 排水能力随水位的升高而不断减小, 减小程度与末端管道高差和水位动态顶托管道水流有关。此结论可为城市排水管网改造及河道调控水位除涝提供科学参考。

关键词: 河道边界水位; 排水管网; 管道排水能力; 淹没度; 水力坡降; 顶托; SWMM 模型

中图分类号: TU992

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)03-0169-06

Impact analysis of river boundary water level on drainage capacity of pipeline

LUO Ming¹, YE Xingcheng², WANG Yichao², ZHU Chengliang²,
ZHOU Hong¹, ZHOU Yaling¹, LIU Jun¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Suqian Water Authority, Suqian 223800, China)

Abstract: In order to ensure the safety of urban drainage and alleviate the urban waterlogging, aiming at the dynamic influence of river drainage level on the drainage of pipelines, the draining area of Maling River in Suqian City is chosen as the study area. Based on storm water management model (SWMM), the changes of relative drainage capacity of free-flow pipe, semi-submerged outflow and completely submerged outflow were simulated in the case of design storm return period being 2, 3, 5 years. And on this basis the Maling River sub-controlled water level was explored. The results showed that the water flow in the pipeline is mainly affected by the high water level. When the pipeline is fully submerged, the drainage capacity decreases with the rise of the water level. The decreasing degree is related to the height difference of the terminal pipe and the water flow by the dynamic backwater effect. This conclusion can provide a scientific reference for pipe network reconstruction and river regulation for waterlogging.

Key words: river water boundary level; drainage network; drainage capacity of pipeline; submergence ratio; hydraulic gradient; backwater effect; SWMM model

1 研究背景

近年来, 城市内涝灾害一直困扰着各大城市, 影响经济社会的安定和发展。根据国家防汛抗旱总指挥部统计, 2008-2010年, 我国 62% 的城市发生过不同程度的内涝; 2012-2014年, 平均每年有 100 多个城市受到外洪内涝的威胁^[1]。城市化导致突发性强降雨天气的频发, 增加了排水管网汇流的水力效率, 排水管道系统发生改变, 城市排水防涝问题

愈加突出^[2]。城市排涝河道作为排水管网承泄区, 两者在规划设计上往往存在标准不衔接问题^[3]。鉴此, 研究管道排水与河道排涝的衔接是保证城市排水安全的关键。

目前, 国内主要从设计暴雨重现期及设计排涝流量方面研究管道排水与河道排涝间的衔接关系, 或基于管网与河网耦合模型进行管道排水与河道排涝间的水文衔接分析^[4-8]。陈斌^[9]运用二项式机理实现了“年超大值法”的次频率与“年最大值法”的

收稿日期: 2017-12-18; 修回日期: 2018-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41471015)

作者简介: 罗鸣 (1994-), 女, 湖北随州人, 硕士研究生, 研究方向为城市防洪与排水。

通讯作者: 刘俊 (1968-), 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 主要从事城市水文方面研究。

年频率之间的转换,进而建立重现期的衔接关系。范立柱等^[10]通过计算设计流量得到广州市不同地区的水利排涝标准与市政排水标准的对应关系。以上衔接关系未考虑河道排涝对管道排水的动态影响,而在实际暴雨发生时,内河水位居高不下往往会影响到管道正常排水,造成管道水流顶托甚至倒灌,继而引发城市内涝^[11]。因此,本文选取宿迁市马陵河排水片区为研究区,基于 SWMM 模型,模拟分析变化水位边界对管道排水能力的影响。

2 研究思路

在城市排水防涝规划或城市防洪排涝规划中,很多城市河道规模和排涝水文条件无法满足管道排水的要求,城市内河作为排水管道的承泄区,其水位的高低往往会对管道排水造成动态影响^[12]。为控制这种不利影响,研究分析河道水位对管道排水的可能作用,以满足管道正常排水为原则,提出对策措施,从而降低内涝影响程度。

选用 SWMM 模拟分析河道边界水位对管道排水的可能影响^[13]。城市排水管道一般按照满管重力流设计计算,而实际上管道压力流排水是普遍存在的。采用 SWMM 动力波法,基于圣维南方程组,可计算封闭导管满负荷时的有压流在导管中的运动问题^[14-15]。此法适合复杂水流计算,为本次研究所选用。

为探索变化河道水位对管道排水能力的影响,同时为使结果具有对比意义,本次研究采用无量纲变量。河道边界水位变化引入淹没度这一概念,淹没度指出水口淹没高度与出水口管段管径之比^[16],具体形式如下。

$$s = \frac{h}{D} \quad (1)$$

式中: s 为淹没度; h 为出水口淹没深度,m, h 为正表示管道淹没,为负表示水位在管底高程以下,此时管道未淹没; D 为管径,m。

针对不同重现期降雨条件,对地表产汇流及排水系统水动力过程进行演算,模拟不同淹没度边界水位情况下排水管网的水动力过程。

评估管道的排水能力,主要分析管道相对排水能力。管道相对排水能力指实际排水流量与设计排水流量之比,对应于 SWMM 模型为模拟的管道最大流量与完全正常流量比。假设不同水位条件,分析得出管道排水能力随水位变化情况,找出实际排水流量等于设计排水流量处临界水位,即相对排水能力为 1 时

的水位,以涝水能尽快排出为原则,使管道在暴雨发生时能达到其设计排水能力。在不同重现期降雨条件下,通过调控河道水位来保证管道正常排水。

3 应用实例

3.1 研究区域概化

宿迁市马陵河片区,位于宿迁市老城区,东面和北面皆环绕京杭运河,南至环城南路,西至古黄河,全长 4.8 km,集水面积 5.7 km²,流域相对较封闭,且内部有独立的排水系统。

根据马陵河区域内管网资料及下垫面情况,利用 SWMM 模型将马陵河流域划分为 109 个汇水区,概化节点 126 个,概化管道 126 条,总长度 14.35 km,总概化面积 3.02 km²。研究区域仅马陵河一条排涝河道,且由于马陵河水位分段控制,共将马陵河划分为 11 个河段,每一河段均承受来自不同汇水区域雨水。因此,本次概化出水口 11 个,各出水口位于马陵河不同河段。概化结果如图 1。

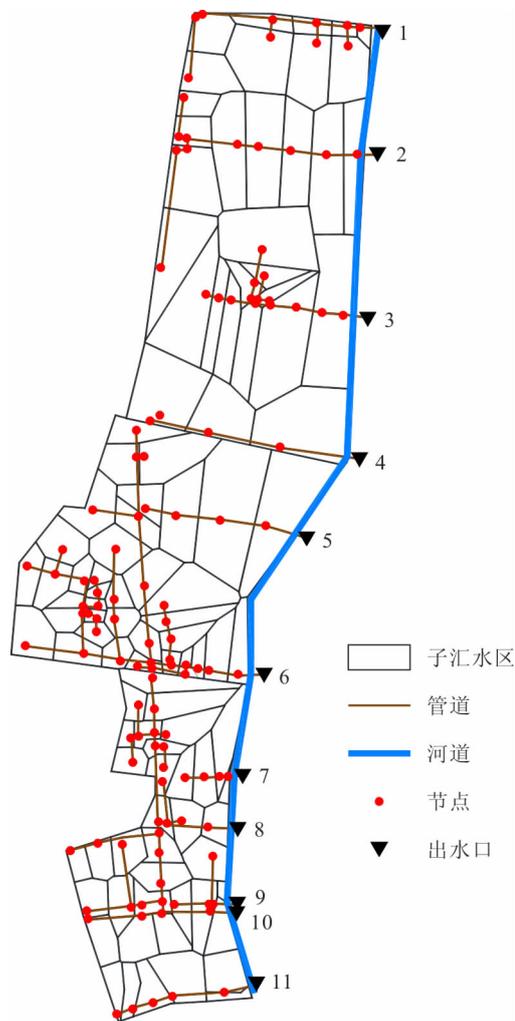


图 1 研究区域概化图

3.2 主要参数设置

模型参数由实测雨洪资料及地面积水统计资料率定所得。

水文模块包括地表产流计算和地表汇流计算。地表产流计算采用 Horton 入渗模型计算下渗过程,根据马陵河片区的土壤特性设置最大、最小入渗速率分别为 45.9 和 1.27 mm/h,衰减系数为 3 h^{-1} 。区域概化管道为混凝土管,设置管道糙率为 0.013。不透水地表和透水性地表的糙率系数分别设置为 0.015 和 0.2,不透水和透水区的注蓄量分别为 2 和 4 mm,坡度依照实际地面标高计算可得。水力模块采用动力波法进行模拟。

3.3 河道边界设置

本次研究采用马陵河河道水位作为 SWMM 模型模拟计算时的边界条件。选取马陵河 11 个河段不同控制水位作为本次模型的边界。根据出水口淹没度的不同,可将变化边界条件划分为以下 3 种情形:

- (1) 自由出流: $s \leq 0$;
- (2) 半淹没出流: $0 < s < 1$;
- (3) 完全淹没出流: $s \geq 1$ 。

3.4 设计暴雨计算

宿迁市 2012 年已完成暴雨强度公式编制,宿迁市暴雨强度公式如下:

$$i = \frac{61.2(1 + 1.05 \lg T)}{(t + 39.4)^{0.996}} \quad (2)$$

马陵河区域汇水面积小,汇流时间短,本次设计暴雨历时选取 180min,选取暴雨重现期为 2、3 和 5 a。根据暴雨强度公式,采用芝加哥方法确定 2、3 和 5 a 重现期暴雨历时 180 min 降雨过程,不同重现期降雨过程如图 2。

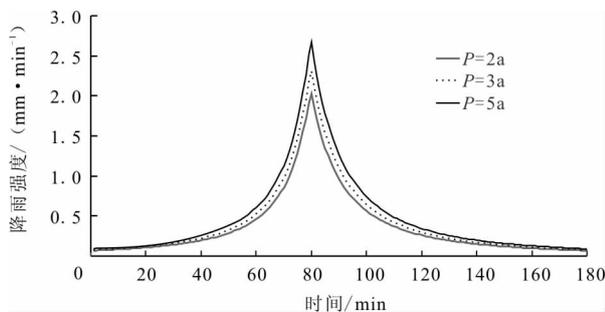


图2 不同重现期 180 min 降雨过程

4 模拟结果与分析

由于出水口 8 对应的汇水区面积较小,出水口 10 和 11 处管道坡度小于室外排水规范要求,管道

设置不甚合理,因此本次研究均不做考虑。仅以出水口 1~7 和出水口 9 的模拟结果为依据,分析得出结论。

4.1 管道自由出流与半淹没出流排水能力分析

对 8 个出水口设置不同水位边界,初始状态设为出水口管道自由出流,即淹没度为 0 的情形。依次提高水位,设置淹没度为 0.1、0.2、0.3、...、1。得到不同设计降雨条件下不同出口处管道相对排水能力,如图 3。

由图 3 可知,当淹没度从 0 变化到 1,各管道相对排水能力基本保持不变,说明半淹没出流时管道的排水能力基本不受河道水位的影响。出水口 1~7 及出水口 9 对应的末端管道在不受内河高水位顶托的影响时,其相对排水能力均大于 1,此结果进一步论证了管道水流流态在实际情况下大部分为压力流的论述^[17]。

4.2 管道完全淹没出流排水能力分析

分析管道完全淹没出流情形,依次设置淹没度为 1.0、1.2、1.4、...、5,得到不同降雨条件下不同出口处管道相对排水能力,如图 4。

由图 4 分析可知,在各重现期设计暴雨条件下,8 个出水口处的末端管道相对排水能力均随出水口河道水位的升高而不断减小,但减小程度有所不同。出水口 6 的相对排水能力减小最快,出水口 9 和出水口 5 次之,出水口 4 的相对排水能力减小最为缓慢。不同重现期降雨模拟所得出水口管道排水能力减小规律相似。以 2 a 设计暴雨模拟结果为例,具体分析各出水口管减小程度的差异。

《室外排水设计规范》GB 50014-2006(2016 年版)中介绍了排水管渠的流量计算方法,其公式如下:

$$Q = Av \quad (3)$$

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (4)$$

式中: Q 为设计流量, m^3/s ; A 为水流有效断面面积, m^2 ; v 为流速, m/s ; R 为水力半径, m ; I 为水力坡降; n 为粗糙系数。

对于某一特定管道,其管径、糙率一定,在计算管道设计与实际排水流量时,只有水力坡降发生变化,故管道设计与实际水力坡降比是影响管道相对排水能力变化的关键。在计算排水流量时,设计值按满管重力流设计,采用管道实际坡度作为水力坡降计算。实际排水流量考虑管道实际水头差,而边界水位则是决定水头差的主要因素。当边界水位发生单位淹没度变化时,通过计算各出水口管道的变

化水力坡降比,探究影响管道相对排水能力减小程度的可能原因。计算结果如表 1。

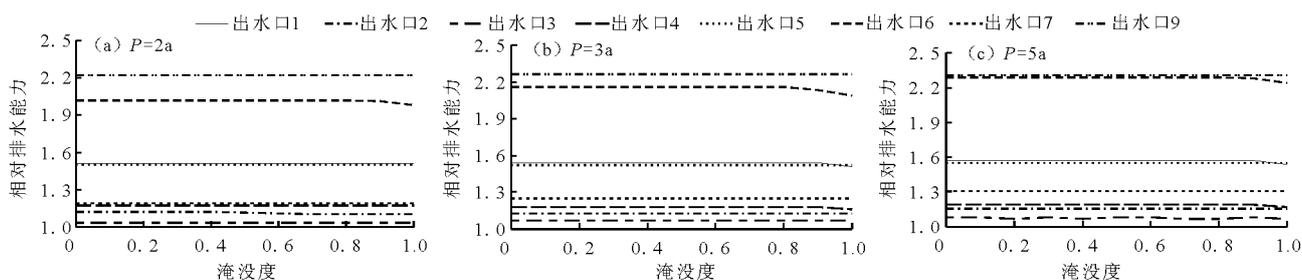


图 3 不同重现期降雨条件下各出水口半淹没管道相对排水能力图

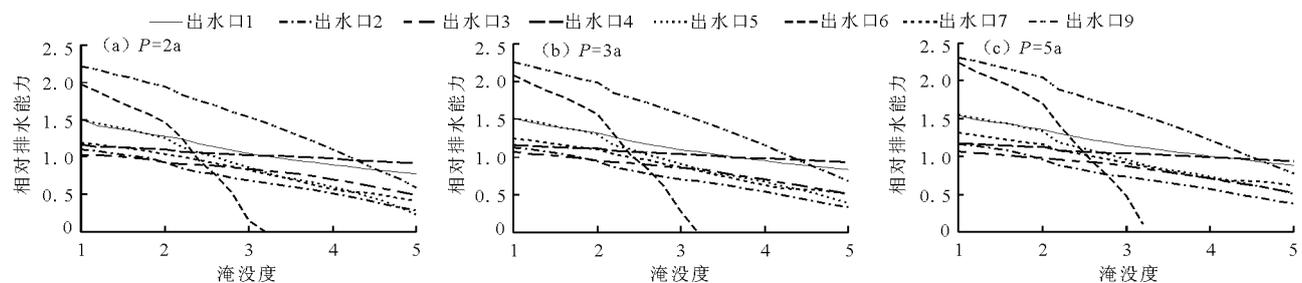


图 4 不同重现期降雨条件下各出水口完全淹没管道相对排水能力图

表 1 边界水位单位变化下的各出水口变化水力坡降比

出水口	各出水口末管道参数					Δ 单位淹没度/m	ΔI	$\Delta I/I$
	L/m	EI_0/m	EI_1/m	ΔEI	I			
1	68.05	20.53	19.73	0.80	0.0118	0.6	0.0088	0.7458
2	51.08	20.56	19.48	1.08	0.0211	1.0	0.0196	0.9289
3	78.88	20.77	17.15	3.62	0.0459	1.0	0.0127	0.2767
4	306.91	22.96	18.42	4.54	0.0148	0.5	0.0016	0.1081
5	153.03	19.33	18.35	0.98	0.0064	0.8	0.0052	0.8125
6	81.47	17.12	17.05	0.07	0.0009	1.2	0.0147	16.3333
7	48.51	16.99	16.33	0.66	0.0136	0.6	0.0124	0.9118
9	61.91	17.94	17.68	0.26	0.0042	0.4	0.0065	1.5476

注: L 为管道长度; EI_0 、 EI_1 分别为首、末节点的底高程; ΔEI 为管道高差; I 为设计坡度。

由表 1 可知,当水位发生单位淹没度变化时,出水口 6 的水力坡降变化与设计坡度之比明显大于其它出水口,出水口 9 的变化水力坡降比也相对偏大,而出水口 4 的比值最小。此规律与上述模型模拟的结果(图 4)基本一致。

由于水力坡降为单位长度的沿程水头损失,在等直径管路中等于测压管水头差,管道长度一定,可得出 $\Delta I/I = \Delta s/\Delta EI$ 。因此,当水位发生单位淹没度变化时,其相对排水能力减小快慢与管道的高差有关,管道高差越小,其相对排水能力减小越快,反之越缓慢。

模型模拟出水口 5 相对排水能力减小偏快,与表 1 所得结论不符。进一步考虑河道水位对末端管

道水流的动态顶托作用,此时水头差可能还受到高水位影响,通过 SWMM 模型模拟末端管节点水深并计算分析,结果见表 2。

对比表 2 和图 4 的结果可知,当考虑了水位对管道流量的动态顶托影响时,此结果正好能反映管道相对排水能力的减小程度,合理解释出水口 5 的减小偏快情况。因此,出水口管道相对排水能力减小程度不仅与管道高差有关,还与水位对管道水流的顶托有关,应综合考虑二者对其的作用影响。

4.3 河道控制水位优化

现状情况下马陵河排水片区遇雨易受淹。根据变化边界水位与管道相对排水能力关系(见图 4),找出各出水口管道相对排水能力为 1 时的淹没度,

即可得不同重现期降雨条件下河道各分段最高水位,结果见表 3。在不同重现期降雨条件下,通过调

控马陵河水位来保证管道正常排水。

表 2 边界水位变化下的各出水口变化水力坡降比(考虑动态顶托)

出水口	不同水位边界下的末管道节点水深/m			$\Delta I/I$		
	$s = 1$	$s = 3$	$s = 5$	s 从 1 变化至 3	s 从 3 变化至 5	s 从 1 变化至 5
1	1.032	1.745	2.768	0.6957	0.2529	0.9486
2	1.236	2.517	4.160	0.6657	0.3306	0.9963
3	0.848	2.020	2.867	0.2287	0.3185	0.5472
4	1.961	2.003	2.052	0.2110	0.2095	0.4205
5	2.026	2.417	3.555	1.2337	0.4714	1.7051
6	1.520	3.544	5.822	5.3714		
7	0.883	1.632	2.574	0.6833	0.3909	1.0742
9	1.426	1.623	1.968	2.3192	1.7500	4.0692

表 3 各出水口管道最大淹没度与河道最高水位

出水口	2 年一遇		3 年一遇		5 年一遇	
	淹没度	水位/m	淹没度	水位/m	淹没度	水位/m
1	3.30	21.71	3.65	21.92	4.05	22.16
2	1.70	21.18	1.80	21.28	1.82	21.30
3	1.49	18.64	1.63	18.78	1.70	18.85
4	3.60	20.22	3.60	20.22	3.80	20.32
5	2.60	20.43	2.70	20.51	2.85	20.63
6	2.35	19.87	2.43	19.97	2.53	20.09
7	2.20	17.65	2.40	17.77	2.60	17.89
9	4.20	19.36	4.32	19.41	4.47	19.47

当不同出水口处边界水位低于各分段最高水位时,管道实际排水流量均能达到其设计排水流量。但是,考虑到工程调度规划以及马陵河河道景观水位,需对河道控制水位进行相应调整,综合考虑得出马陵河分段控制水位结果见表 4。

表 4 马陵河分段控制水位

出水口	最高水位	景观水位/m	河道控制水位/m
1	21.71	20.20	20.20
2	21.18	19.60	19.60
3	18.64	19.00	18.64
4	20.22	18.50	18.50
5	20.43	18.50	18.50
6	19.87	17.90	17.90
7	17.65	17.90	17.65
9	19.36	17.00	17.00

由表 4 可知,现状条件下,1、2、4、5、6、9 出水口

处景观水位均满足管道设计排水能力要求,无需调整。3、7 出水口处需调整河道水位分别为 18.64、17.65 m,以满足管道正常排水要求。

5 结论与建议

论文以宿迁市马陵河排水片区为例,基于 SWMM 模型,模拟评估不同设计暴雨重现期不同河道水位时系统的排水能力,得出以下结论和建议:

(1)管道半淹没出流时,其排水能力基本不变,此时管道排水并不受边界水位变化影响。大部分管道相对排水能力大于 1,说明了管道水流在实际情形中通常为压力流。

(2)不同设计暴雨条件下,管道完全淹没出流的排水能力均随水位的升高而不断减小,减小程度与末管道高差和水位动态顶托有关。

(3)研究变化边界水位对管道排水能力的影响,以涝水尽快排出为原则对河道水位进行控制,或调整管道坡度,缓解已建成区的内涝积水。待开发区域,推荐采用城市雨洪模型模拟河道高水位对管网的顶托影响,优化排水防涝规划方案,实现管道排水与河道排涝水文衔接目标。

参考文献:

[1] 高峰. 城市内涝灾害面面观[J]. 防灾博览,2015(4): 58-59.
 [2] 李亚琳. 城市化进程对排水系统的影响及改造措施分析[D]. 大连:大连理工大学,2015.
 [3] 刘俊,俞芳琴,张建涛,等. 城市管道排水与河道排涝设计标准的关 系[J]. 中国给水排水,2007,23(2):43-45.

- [4] 张惠锋. 城镇排水标准与区域除涝标准衔接的研究进展[J]. 净水技术, 2016, 35(3): 123 - 125.
- [5] 陈婕, 叶兴成, 王飞, 等. 城市不同排水除涝标准衔接方法的探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4): 40 - 44.
- [6] 黄国如, 王欣. 基于城市雨洪模型的市政排水与水利排涝标准衔接研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 1 - 5.
- [7] 严婉玲. 市政排水与水利排涝关系探索[J]. 人民珠江, 2017, 38(6): 43 - 48.
- [8] 李卫东, 徐向阳. 不同破坏率下管道排水与河道排涝标准衔接探讨[J]. 中国农村水利水电, 2015(11): 182 - 184.
- [9] 陈斌. 城市排涝与排水研究[J]. 给水排水, 1996(9): 17 - 20 + 2 - 3.
- [10] 范立柱, 刘晓鹏. 广州地区水利排涝标准与市政排水重现期的关系分析[J]. 广东水利水电, 2012(12): 17 - 18 + 25.
- [11] 王峰, 颜正惠, 黄伟乐, 等. 城市雨水内涝成因及对策[J]. 中国给水排水, 2012, 28(12): 15 - 17 + 20.
- [12] 姜容, 邵银霞, 李光焱. 外河对城市排水管网影响的数值模拟研究[J]. 水力发电, 2017, 43(10): 94 - 98.
- [13] 王慧亮, 吴泽宁, 胡彩虹. 基于GIS与SWMM耦合的城市暴雨洪水淹没分析[J]. 人民黄河, 2017, 39(8): 31 - 35 + 43.
- [14] 张晓波, 盛海峰. 城市市政排水与区域排涝水动力耦合模型研究[J]. 人民长江, 2015, 46(18): 15 - 19 + 47.
- [15] 芮孝芳, 蒋成煜, 陈清锦, 等. SWMM模型模拟雨洪原理剖析及应用建议[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 1 - 5.
- [16] 穆祥鹏. 复杂输水系统的水力仿真与控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [17] 梁小光, 王盼, 吕永鹏, 等. 内河水位对管网系统排水能力的影响模拟[J]. 城市道桥与防洪, 2014(11): 11 - 14 + 19.

(上接第168页)

- [11] 王世奎, 余波, 黄跃辉, 等. 峰源水电站增效扩容技术改造可行性分析[J]. 中国农村水利水电, 2012(10): 126 - 128.
- [12] 刘怡, 刘林涛. 小型水电站更新改造中的冲击式机组选择[J]. 中国农村水利水电, 2013(1): 144 - 145 + 148.
- [13] 李修树, 高瑜, 董笑波. 浅析水电站调节保证设计[J]. 水力发电, 2014, 40(4): 58 - 60.
- [14] 原文林, 万芳, 马跃先. 农村小型水电站增效扩容改造关键应用技术研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(10): 190 - 193.
- [15] 曲鹏飞, 朱未. 三道沟河干流梯级开发形成的脱水段对生态环境的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 160 - 164 + 169.
- [16] 王勤香, 朱政德. SUE水电站工程设计方案评价及优化[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(5): 132 - 135.
- [17] 杨树正. 石门水电站增效扩容工程效果分析[J]. 中国水利, 2012(08): 53 - 55.
- [18] 赵波. 陕西省引红济石调水工程1#支洞塌方原因分析及对策[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(5): 58 - 60.
- [19] 马跃先, 王梁, 原文林, 等. 基于模糊层次分析的水轮机选型研究及应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(02): 261 - 264 + 276.