

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.02.013

极端条件下联圩区外河网洪水安全研究

朱永澍¹, 向 龙^{1,2}, 曹飞凤³, 查治荣⁴

(1. 河海大学水文与水资源学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文学与水资源及水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 浙江工业大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310014; 4. 青岛水文局黄岛分局, 山东 青岛 266400)

摘要:通过杭嘉湖地区长序列水文数据频率分析,选择典型设计暴雨,建立联圩区概化的河网非恒定流水动力学模型,计算外围洪水、潮水位胁迫下的极端设计洪水过程。考虑现有排涝安全格局条件,以及极端水文过程对河网防洪安全高度的潜在影响,以极端设计暴雨过程为例,对洛塘河小流域河网现状及校核条件下河堤约束进行计算,分析联圩区河网的防洪安全标准修正方法,建议进一步提升洛塘河星火、长春和斜西各圩区段的河道堤防防洪标准,以保证极端条件下洛塘河的防洪安全。

关键词:联圩区;极端条件;河网防洪安全;河网模型

中图分类号:TV87 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)02-0062-05

Research on flood safety in river network outside polder under extreme conditions

ZHU Yongshu¹, XIANG long^{1,2}, CAO Feifeng³, ZHA Zhirong⁴

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;
4. Huangdao Branch of Qingdao Hydrology Bureau, Qingdao 266400, China)

Abstract: A typical design storm was chosen through frequency analysis of long series of hydrological data in the Hangjiahu area. A polder generalized unsteady flow dynamics model was established, and the flood process under the stress of peripheral flooding and tide level under extreme conditions were calculated. With consideration of the existing safety pattern of drainage conditions and the potential impact of extreme hydrological processes on the flood control safety elevation of the river network, an extreme design storm was taken as an example, the embankment height in the Luotang River watershed under the status quo and verification conditions of a river network was calculated, and the correction method of flood control safety standards in the polder area was analyzed. It is suggested that the flood control standards for the polder sections including Xinghuo, Changchun, and Xiexi be further improved, in order to ensure the safety of flood control in the Luotang River under extreme conditions.

Key words: polder; extreme conditions; safety of flood control in river network; river network model

洛塘河小流域联圩区位于浙江省北部,地处长江三角洲杭嘉湖冲积平原。这里河网密布、潮汐顶托作用显著^[1]。由于该地区特殊的地理位置,主要

排水河道两侧多为与外界相对封闭的圩区,圩区内排涝主要依靠圩内排涝泵站向排涝河道抽水。在极端条件如台风情况下,短时间内大量圩区涝水依靠

基金项目: 国家自然科学基金(51309078, 51209071);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAK10B04);中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介:朱永澍(1991—),男,硕士研究生,研究方向为水文学及水资源。E-mail: zys_hhu@163.com

泵站抽入防洪河道,造成河道水流的相互顶托,按照以往正常设计洪水位设置的圩堤往往难以满足防洪需求^[2-3]。因此,极端水文过程对平原圩区河网防洪安全潜在影响的相关研究就显得尤为重要^[4]。

1 研究区概况

海宁市地处浙江省北部、嘉兴市域南部,位于北纬 30°15′~30°36′、东经 120°18′~120°53′之间,内陆面积 700.5 km²,地势南高北低,自西南向东北倾斜,地形狭长,东宽西窄。境内水系纵横,上下交叉,错综复杂,洛塘河由西向东横穿下河地区,与主干河道相互调节,构成境内引排水系统。外围骨干河道以崇长港、斜塘为纵向河道,盐官下河、洛塘河为横向河道所构成的排水格局;流域排水以盐官下河为主,洛塘河主要东排;内部水系以洛塘河北侧支河南排入洛塘河,南侧支河南北双向排水,呈现“一横多纵”的水系格局,最后经洛塘河向东排出,一定程度上增加了下游中心城区的防洪压力。

圩区内河道水洛塘河南北两侧水系多为条状,呈现典型圩区水系特征。洛塘河主要承担区域内部排水功能,但现状岸坡大多为自然护坡,缺乏整治,威胁防洪安全。圩区地势低洼,圩内河道水系连通性较差,由于基础设施建设等原因,出现局部阻水瓶颈,严重制约圩内排水能力的发挥(图 1)。

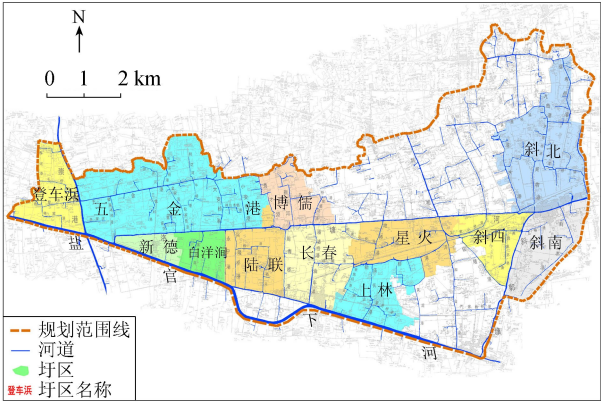


图 1 研究区位示意图

2 极端降雨事件选择

2.1 设计暴雨

海宁市境内的硖石站位于海宁市硖石镇,站点设立于 1955 年,拥有 1955 年至今的实测雨量资料系列,因此本次设计采用硖石站作为雨量代表站,分析研究流域设计暴雨,并采用算术平均法统计流域面雨量。流域面暴雨统计采用同场雨法,样本取用年最大 1 d、3 d、7 d、15 d、30 d、45 d、90 d,资料系列为 1955—2013 年。统计分析并经 P-Ⅲ 适线,洛塘河流域最大各频率设计暴雨成果见表 1。

表 1 杭嘉湖平原设计年最大暴雨信息

历时/d	各频率设计暴雨/mm				
	1%	2%	5%	10%	20%
1	262	221	169	131	95
3	316	275	222	182	143
7	393	347	287	241	194
15	506	451	378	322	265
30	648	586	501	435	366
45	762	693	600	527	449
90	1067	987	876	786	687

2.2 设计净雨

鉴于流域内不同下垫面条件对降雨径流关系影响较大的客观规律^[5],将流域内分成水稻田、旱杂地及河网、建成区等几大地类,采用常规的计算方法,分别求得平原地区的分块产水过程^[6]。

设计净雨日程分配将最大 24h 暴雨置于第 2 日,第 1 日雨量占 3 d 中 24 h 累计最大雨量的 50%,第 3 日雨量占 3 d 中 24 h 累计最大雨量的 50%,时程分配采用经验频率 N_p 分配。按照临近原则,取与海宁城区 N_p 相同值分配。根据以上分配及不同地类暴雨扣损方法求得海宁市不同地类设计净雨,见表 2。

表 2 海宁市不同地类设计净雨

土地利用类型	各频率设计净雨/mm				
	1%	2%	5%	10%	20%
水田	436	364	269	200	136
旱地	429	356	261	193	128
水面	457	384	289	220	155
建成区	442	367	273	211	152

根据有关监测部门调查分析成果,对实测水位进行修正得出各站实测年最高、年最低及多年平均水位系列。洛塘河西段小流域附近的几个临近站相应频率最高水位分析结果见表 3。

表 3 主要水位站对应频率最高水位 m

代表站	100 年最高水位	50 年最高水位	20 年最高水位	10 年最高水位
嘉兴	2.74	2.60	2.41	2.24
硖石(洛)	3.23	3.07	2.84	2.66
桐乡	3.46	3.27	2.99	2.76

由于杭嘉湖治理思路为高水高排,并考虑太湖水位抬高等因素的影响,因此研究区内主要排水河道,如洛塘河、盐官下河,都是以 50 年一遇防洪设计水位进行校核计算流域内的各特征河道防洪水位。根据分析,2013 年 10 月 6—8 日“菲特”台风强降水暴雨与 1963 年最大 1 d(323.8 mm)接近,最大 3 d 超过 1963 年(361.7 mm)暴雨,重现期大约在 60~70 年一遇左右,可作为本次研究中极端条件的选取对象。硖石站降雨过程见图 2。

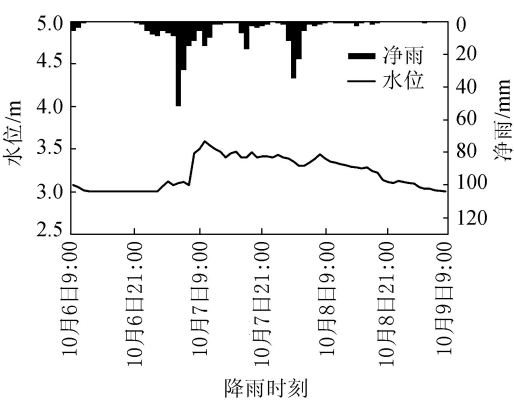


图2 硖石站日实测降雨过程

3 极端水文过程设计与模拟

3.1 模型构建

根据洛塘河流域水系布局和引排调度现状和圩区内部的水系特征,建立 MIKE 11 HD 河网水动力模型,水动力模块中描述一维非恒定水流运动规律的控制方程组为圣维南方程组,由质量守恒的连续性方程和能量守恒的动量方程组成^[7-8]:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{C^2AR} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为距离坐标; t 为时间坐标; A 为过水断面面积; Q 、 h 分别为流量及水位; q 为旁侧入流量; C 为谢才系数; R 为水力半径; g 为重力加速度。

3.1.1 河网文件的生成

在对模拟河段进行数值概化时,河道纵向空间计算步长根据该段河道的长度做相应的调整。为体现模型模拟结果的准确性,充分考虑了引排水过程中研究区域内骨干河道对引水效果的影响,概化河道连通情况与实际现状、模拟方案条件保持一致。总体模型共概化河道 72 条,具体概化情况见图 3。

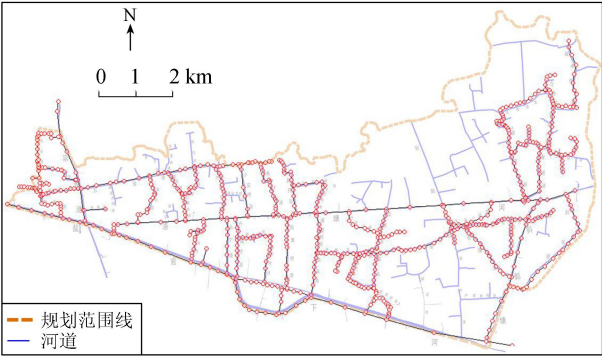


图3 研究区域河网概化

3.1.2 断面文件生成

MIKE11 HD 模型在运算时是根据断面数据文件中的断面数据确定水位计算点,同时根据模型在

水位计算点之间自动内插的桩号确定流量计算点。为保证精确模拟计算的要求,断面间距不大于 100 m,并在特定地点(如河流交汇处)加密断面数据^[9]。现状断面均根据海宁市河道普查结果而得,反映了河道现状情况。

3.1.3 边界文件生成

结合海宁市圩区现状,该模型中共有 3 个上边界,分别设崇长港、盐官下河和福寿桥港,均采用水位数据作为边界。模型同时还在洛塘河沿岸选取 10 个节点,设置稳定入流边界,作为在暴雨期间沿岸圩区向排水河道抽水排洪的条件模拟,在设计节点入流边界流量时,求得“菲特”台风强降水暴雨期间最大 24 h 累计净雨为 240 mm,以 24 h 排出圩区内所有涝水作为圩区排涝极端条件的排涝流量选取标准^[10],由计算得出各圩区平均排洪流量,见表 4。模型中的内部边界包括进入各河段的旁侧入流、水面蒸发及降雨。其中,由于该研究区域为平原河网区,所以旁侧入流是以降雨径流形成的均匀旁侧入流的形式形成内部边界进入河道,水面蒸发及降雨均采用实际资料,以保证模拟结果的可靠性^[11]。

表4 各圩区降雨期间平均排洪流量计算结果

位置	圩区名称	24 h 最大净雨/mm	面积/km ²	雨量/m ³	排洪流量/(m ³ ·s ⁻¹)
长安镇	登车浜	230	2.403	552 690	6.4
	白洋涧	230	1.441	331 430	3.8
	新德	230	0.933	214 590	2.5
	五金港	230	9.093	2 091 390	24.2
周王庙镇	博儒	230	2.201	506 230	5.9
	陆联	230	2.613	600 990	7.0
	长春	230	3.333	766 590	8.9
	星火	230	3.132	720 360	8.3
	上林	230	2.4	552 000	6.4
斜桥镇	斜北	230	10.98	2 525 400	29.2
	斜南	230	8.039	1 848 970	21.4
	斜西	230	1.814	417 220	4.8

3.1.4 参数文件生成

为保证模型平稳启动,初始水位和初始流量的设定尽可能与模拟开始时刻的实际河网水动力条件一致。该模型中初始条件给定水位为 3.0 m,河道糙率根据实测流量资料和比重资料由曼宁公式计算求得,确定整个模拟河网中河道糙率 $n=0.03$,方便计算的同时保证了模型的可靠性^[12]。

3.2 结果分析

分别将“菲特”台风强降水暴雨期间研究区自由排水和利用泵站强排水两种情况运用模型进行模拟,得出在整个降雨事件期间研究区主要排洪河道的实时水位变化过程,在研究区主要行洪河道洛塘河自东向西的 6 个排水泵站处设置节点,对排洪期间洛塘河节点水位变化过程进行分析。

3.2.1 整个降雨过程中不同行洪条件下水位极值分析

对降雨过程中洛塘河沿岸节点的最高水位、最低水位以及水位变化幅度进行统计分析,探讨河道周边圩区强排对河道防洪安全标准的影响程度,结果见表 5。

表 5 排涝期间洛塘河节点水位分析

节点 编号	自由排水			泵站强排		
	最低 水位/m	最高 水位/m	ΔZ	最低 水位/m	最高 水位/m	ΔZ
1	2.90	3.32	0.41	2.97	3.40	0.43
2	2.89	3.32	0.43	2.96	3.39	0.43
3	2.88	3.35	0.47	2.94	3.45	0.51
4	2.83	3.34	0.51	2.91	3.59	0.68
5	2.82	3.36	0.54	2.92	3.57	0.65
6	2.80	3.34	0.54	2.90	3.46	0.56

从表 5 可以看出,在极端降雨事件过程中,由于圩区向洛塘河通过泵站排水,使得强排期间洛塘河水位相对于自由排水情况下产生了拥高,最低水位和最高水位都有了不同程度的升高,说明在短时间内大量圩区涝水依靠泵站进入防洪河道时,会造成河道水流的相互顶托,从而对按照以往正常设计洪水水位设置的圩堤产生更大的防洪压力。在洛塘河沿岸的 6 个分析节点中,节点 4 和节点 5 的水位在泵站强排期间分别达到了 3.59 m 和 3.57 m,已经超过了洛塘河按照 50 年一遇防洪标准设计的 3.5 m 的防洪水位。而对于河道水位变化幅度而言,强排期间的水位变化幅度也大于自由排水的河道水位,4 号节点的变化幅度最大为 0.68 m,比自由排水期间的变幅高出 0.17 m。

3.2.2 同一时刻河道延程水位变化分析

经过上述水位极值分析,可以看出,随着不断有河道周边圩区利用泵站对河道进行强排,河道的水位变幅也在逐步增加,因此,在同一时刻不同排水情况对河道不同节点水位造成的影响也是不同的。分别选取“菲特”台风一场集中降雨期间降雨前、降雨中和降雨结束 3 个时刻(分别为 10 月 6 日 21:00、10 月 7 日 5:00 和 10 月 7 日 23:00),对不同排水情况下河道延程水位变化进行分析研究,分析结果见图 4。

从上述河道延程水位变化图可以看出,在“菲特”台风强降雨行洪期间,在降雨事件发生之前(10 月 6 日 21:00)和降雨期间(10 月 7 日 5:00),河道水位都是延程逐步降低的,而在降雨事件发生之后的一段时间(10 月 7 日 23:00),河道下游的水位较上游有了 0.06 m 的抬升,这也符合河道在行洪过程中洪峰随时间迁移逐步从上游移至下游的规律,也

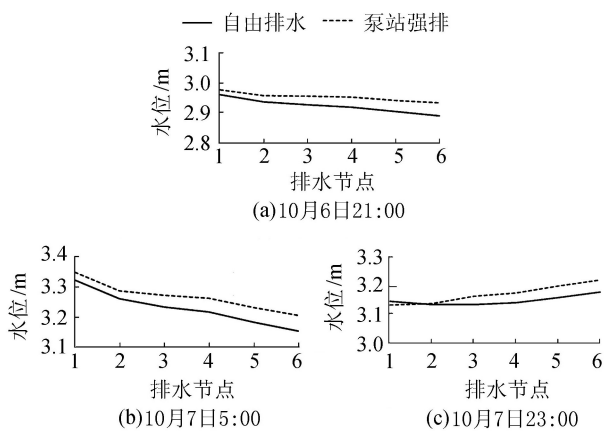


图 4 同一时刻不同排水情况下河道沿程水位变化情况

验证了模型运算的可靠性。

在泵站强排和自由排水两种不同情况下,可以明显看出泵站强排会产生河道水流的相互顶托,使河道水位相较于自由排水有了明显的升高,并且随着延程不断有泵站进行入流排水,河道的水位抬升幅度从上游至下游也呈现出逐渐增大的趋势,下游水位比正常排水最多高出了 0.1 m。

3.2.3 不同时刻河道同一位置水位变化分析

在洛塘河上游和下游分别选择一个代表节点,对不同时刻河道水位变化情况进行分析研究,结果见图 5。

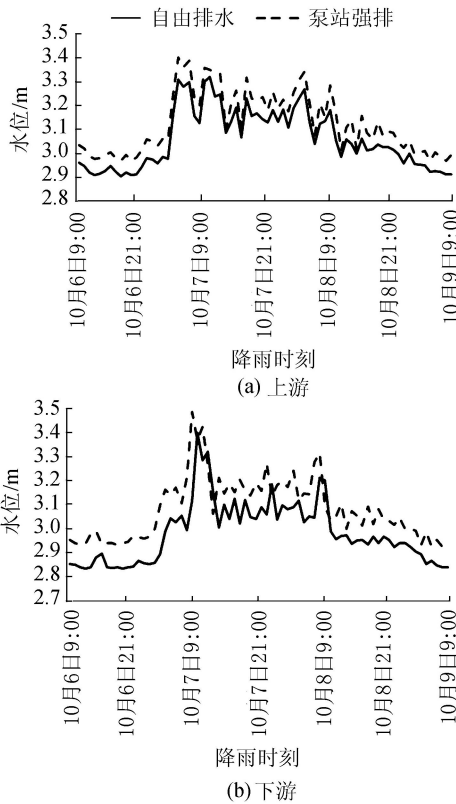


图 5 上下游不同时刻水位变化情况

将河道上游和下游进行对比,发现上游洪峰到来发生在 10 月 7 日 7:00,而下游洪峰到来时间推

迟到了 10 月 7 日 9:00,与上文河道在行洪过程中洪峰随时间迁移逐步从上游移至下游的规律相对应;并且在上游段,泵站强排和自由排水过程中洪峰到来时间基本一致,而在下游段,采取泵站强排河道的洪峰到来时间要明显提前于自由排水情况下的河道洪峰到来时间。

4 结 论

将河网一维非恒定流模型应用于平原联圩区排水河道在受外围洪水、潮水位胁迫下的极端设计洪水过程条件下的实时模拟,探讨极端水文过程对河网防洪高度的潜在影响。利用一维非恒定流模型、MIKE 11 水动力模型等模拟了相同防洪除涝标准下不同的排涝方式对圩区外部行洪河道水位变化的影响,并进行多向分析对比,发现泵站强排会对行洪河道造成额外防洪压力,可能威胁到按现有防洪标准设计的堤防安全。

a. 由于河道水流的相互顶托,最大通过泵站强排方式行洪的河道水位高于自由排水的河道,并且水位变化幅度明显增大,并且水位抬升幅度从上游至下游也呈现出逐渐增大的趋势,对下游的防洪压力也逐步增大。

b. 通过泵站强排方式行洪的河道的洪峰到来时间也会相对自由排水河道有所提前,这给下游河道行洪排涝造成了压力。

c. 对于洛塘河而言,在极端水文条件下,部分河道段水位会超过按现在防洪标准设计的防洪水位,建议进一步提升洛塘河星火、长春和斜西各圩区段的河道堤防防洪标准,以保证极端条件下洛塘河的防洪安全。

参考文献:

[1] SUN Y, LI Q, LIU L, et al. Hydrological simulation approaches for BMPs and LID practices in highly urbanized area and development of hydrological performance indicator system [J]. Water Science and Engineering, 2014, 7 (2) : 143-154.

[2] 王沛芳,王超,侯俊. 城市河流生态系统建设模式研究及应用 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2005, 33 (1) : 68-71. (WANG Peifang, WANG Chao, HOU Jun. Study on integrated environment construction mode of urban river ecosystem [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33 (1) : 68-71 (in Chinese))

[3] XIANG L, YU Z, CHEN L, et al. Evaluating the characteristics of hydraulic driven non-point source pollution yield in agricultural watershed [C] // Proceedings of 2012 International Conference on Civil, Architectural

and Hydraulic Engineering. Zhangjiajie: Trans Tech Publications, 2012.

[4] 李原园, 酆建强, 李宗礼, 等. 河湖水系连通研究的若干问题与挑战 [J]. 资源科学, 2011, 33 (3) : 386-391. (LI Yuanyuan, LI Jianqiang, LI Zongli, et al. Issues and challenges for the study of the interconnected river system network [J]. Resources Science, 2011, 33 (3) : 386-391. (in Chinese))

[5] 周易冰, 李万彬, 徐靖文. 城市水系规划控制对建设生态城市的作用 [C] // 中国城市规划学会. 生态文明视角下的城乡规划——2008 中国城市规划年会论文集. 北京: 中国城市规划学会, 2008.

[6] 王超, 卫臻, 张磊, 等. 平原河网区调水改善水环境实验研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2005, 33 (2) : 136-138. (WANG Chao, WEI Zhen, ZHANG Lei, et al. Experimental study on improvement of water environment by water diversion in plain river networks [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33 (2) : 136-138. (in Chinese))

[7] 曾明, 张雨凤, 李琼芳, 等. 上海市不同历时暴雨组合概率研究 [J]. 水资源保护, 2015, 31 (4) : 22-25. (ZENG Ming, ZHANG Yufeng, LI Qiongfang, et al. Study on probability for rainstorm combinations during different durations in Shanghai City [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (4) : 22-25. (in Chinese))

[8] 张雪刚, 毛媛媛, 董家瑞, 等. SWAT 模型与 MODFLOW 模型的耦合计算及应用 [J]. 水资源保护, 2010, 26 (3) : 49-52. (ZHANG Xue-gang, MAO Yuan-yuan, DONG Jia-rui, et al. A coupled model simulation and application of SWAT-MODFLOW [J]. Water Resources Protection, 2010, 26 (3) : 49-52. (in Chinese))

[9] 程伟平. 流域洪水演进建模方法与河网糙率反分析研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.

[10] 朱茂森. 基于 MIKE11 的辽河流域一维水质模型 [J]. 水资源保护, 2013, 29 (3) : 6-9. (ZHU Maosen. One-dimensional water quality model based on MIKE11 for Liaohe Basin [J]. Water Resources Protection, 2013, 29 (3) : 6-9. (in Chinese))

[11] 李怀恩. 流域非点源污染模型研究进展与发展趋势 [J]. 水资源保护, 1996, 22 (2) : 14-18. (LI Huaien. Research progress and development trend of watershed non-point source pollution model [J]. Water Resources Protection, 1996, 22 (2) : 14-18. (in Chinese))

[12] 张刚, 逢勇, 崔广柏. 改善太仓城区水环境原型调水实验研究及模型建立 [J]. 安全与环境学报, 2006, 6 (4) : 34-37. (ZHANG Gang, PANG Yong, CUI Guangbo. A study on incentive mechanism of construction project based on the theory of principal-agent [J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6 (4) : 34-37. (in Chinese))

(收稿日期: 2015 - 12 - 30 编辑: 彭桃英)