

基于洪涝灾害控制目标的河网结构 – 调蓄能力 情景模拟研究*

李 娜, 卢培歌, 袁 雯

(华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062)

摘 要: 采用 SOBEK 软件平台构建平原河网模型, 模拟不同情景下河网结构变化对河网削减洪峰能力的影响, 尝试找到能够有效调控洪峰的河面率范围和河网结构参数。研究表明, 在不改变河面率的情境下, 支流的交汇角度小, 交汇点在干流上游时河网削减洪峰能力相对较大; 在提高河面率的情境下: 随河流弯曲度增大调蓄能力增大, 当弯曲度为 2.8 时河流单位面积削减洪峰的能力达到峰值; 随河面率增大河网削减洪峰能力增强, 但单位河面积削峰效率存在峰值, 模拟得出河面率为 3% ~ 5% 时, 单位河面积增量的削峰效率最强; 增加支流面积比增大干流面积能更有效地改善河网的调蓄功能。

关键词: 洪涝控制; 河网结构; 调蓄能力; 情景分析; SOBEK

中图分类号: P333.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2011)03-0046-06

水安全是城市生存和发展的前提, 洪涝灾害控制始终是城市建设和水资源管理的基本目标。一般而言, 城市通过河网自然调蓄和管网 – 泵站系统共同承担洪水调控, 与城市化的进程伴生的河流数量和面积的持续减少, 城市河网的自然调蓄能力不断受到削弱, 河网的保护和河网功能的恢复越来越受到重视。

研究表明河流结构与河网调蓄能力之间存在着显著的相关关系, 河流结构简单化显著地降低河网的调蓄能力, 而低等级河流的数量和长度发育状况与河网调蓄能力关联更为密切^[1]。程江等的研究认为上海中心城区河道槽蓄容量较 50 余年前减少超过 70%, 河网水系调蓄能力的削弱加大了区域防洪排涝压力^[2-3]。高成等通过计算得出圩区河网的调蓄库容和圩区排涝模数间的定量关系^[4]。

目前, 国内外平原河网形态的变化, 无不伴随着城市化的进程。人工河流是改变水系结构、改善河网调蓄能力的水系综合治理的主要工程措施。人工沟渠阻断了横向水文连通性, 导致了流域景观的破碎化, 同时能够加大纵向水文连通性, 能调节洪峰径流, 减少洪灾发生^[5]。合理设计人工河及人工河网的结构, 能将有限的水面土地利

用调蓄洪水的功能放大。

模型模拟是研究河流结构——功能关系的常用方法, 方国华等采用明渠非恒定流控制方程和节点方程, 建立了甬江流域平原感潮河网水利计算模型^[6]。现有的水环境模型软件中, SOBEK 因模块化设计适用性强而被较多用于流域水文水环境模拟。王洪梅、谷晓伟、Daniel 等借助 SOBEK 软件分别建立了松花江水动力模型、利津以下黄河水动力模型、珠江口 1D – 3D 水动力模型, SOBEK 模型在中国河流的适用性得到验证^[7-10]。

近年来, 我们开展了平原河网地区河流结构和功能的一系列研究工作, 对河流功能和结构之间的响应关系进行了初步的统计分析^[1,11-15]。检索的文献资料显示, 相关研究主要集中在现实河网水系调蓄水量的统计、估算及估算方法等方面, 基于情景分析的方法探讨河网结构 – 调蓄能力的研究较欠缺。目前, SOBEK 较多用于模拟主干型河流及河口, 很少用于模拟河网水动力。根据模型计算的多种河网结构水动力的结果, 进行河网结构 – 功能的情景分析, 是行之有效的研究方法。本文将在已有研究的基础上, 借助 SOBEK 模型集建立简化平原河网模型, 通过设置不同的河流形态和结构情景, 模拟河网结构变化对河网调蓄能

* 收稿日期: 2010-11-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40730526); 上海自然科学基金项目(09ZR1409100)

作者简介: 李娜(1985-), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事城市水文水资源和水动力模拟研究。E-mail: linayuan@ yahoo. com. cn

通讯作者: 袁雯(1965-), 女, 江苏常州人, 研究员, 博士生导师, 主要从事城市水文水资源领域的研究工作。

E-mail: wyuan@ admin. ecnu. edu. cn

力的影响,为基于调蓄目标的河网改造和水系综合整治提供定量化技术支持。

1 研究方法

1.1 水力模型

1.1.1 模拟区域

以平原河网发育典型的上海为参照区域构建河网结构-功能情景分析的模型。平原河网比降小,支流形态复杂,主干支流规模差距小,水系边界模糊,流域面积难以确定。因此,将设计河网的河流沿岸缓冲区作为研究区域,此设定区域不参与模型水力计算,因此不对其进行具体设定。设计研究区面积为 8.4 km^2 ,以此作为河面率计算的流域面积参数,由于研究结果用于不同情境的对比,此面积参数对研究结论没有影响。

1.1.2 模型构建

采用 SOBEK 模型集中的 Rural 模型构建平原河网水力模型,分在 8 个模块中逐步实现河流动态模拟(图 1)。

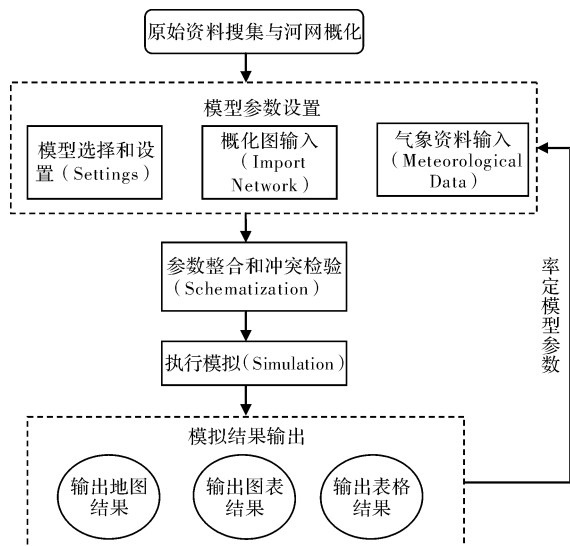


图 1 一维河网模型建立流程

1.1.3 参数选择

以上海市村级河流和乡镇级河流参数的平均值为河网输入参数。2000 年上海市水资源调查结果显示乡镇级河道和村级河道面积 304.96 km^2 ,占上海市河道总面积百分比为 64.5% ^[16],同时,前期研究也表明河网调蓄能力与河网中低等级河流的长度和密切相关,低等级河流调节能力大于高等级河流。因此,研究河网结构-功能关系,选择等级比较低的村级河流及乡镇河流较合适。

主干河流参数取自《苏州河底泥污染与治理》^[17]。支流设计中融合了生态护岸技术,主要参考上海农村河道水系整治工程中护岸标准断面结构参数。

模型在各个设计的计算节点均可输出洪峰水位过程线或流量过程线,以输入的上游洪峰水位在通过不同结构河网后的降低值作为判断河网调蓄能力大小的依据。

1.1.4 主要参数设置

(1) 河道参数

主干河道:包括河道参数和初始水流参数,参照 2003 年苏州河有关研究调查数据,主干河道最大水面宽度取 25 m ,直线距离为 7.7 km ,取上海市中级河道的平均曼宁系数 0.03 ,常水深为 2 m ,断面形状如图 2a 所示。

支流参数:参照上海市典型乡镇级河流和村级河流设置支流输入参数,最大河面宽取 17 m 。曼宁系数为 0.035 ,区别与干道的曼宁系数。常水深为 $1.5 \sim 2 \text{ m}$,每条支流河道形状由两个断面控制,使其河底高程为 $0 \sim 0.5 \text{ m}$ 。断面形状如图 2b 所示。

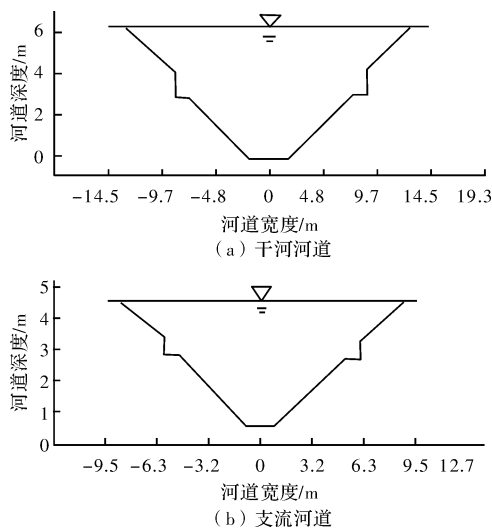


图 2 河道横切面*

支流入流点纵断面中,干支流水位均保持 2 m 。为防止模型运行中河道溃堤,干流渠道高 6 m ;支流堤高 4.5 m 。

(2) 边界参数

上边界条件:输入洪峰过程线($Q-t$),峰值水位为 5.00 m (苏州河历史最高潮位 5.22 m)。

下边界条件:出水断面为固定水位 2 m ,主要考虑上海市宽浅河道常水位一般为 2 m 。

* 注:参照上海市典型区域河道水系整治工程的《护岸标准断面结构图》。

(3)输出参数:在下游距出水口 500 m、1 000 m 处设置监测点 1 和监测点 2(图 3)。在监测点处分别输出洪峰过程线。两个监测点数据可相互对照,避免系统不稳定性带来的输出结果失真。

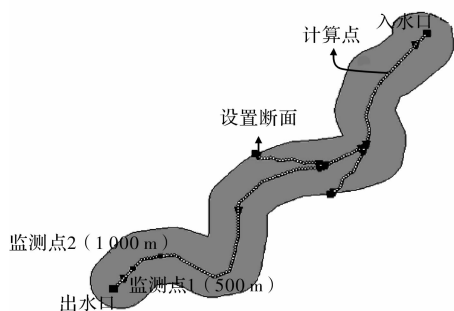


图3 概化模型

1.2 模拟情景设计

表征河网结构的主要指标取河面率 PR 、支流交汇角度 α (图 4)、支流交汇点位置、干支流配比、弯曲度。运用控制变量法,逐一调整河网结构指标,分析其相应调整对应的监测点洪峰水位模拟结果的变化。不同情景设置如下:

情景一:河面率不改变

(1)改变支流入汇角度。构建初始河流模型,即干流弯曲度为 1.75 (< 苏州河最大弯曲河段的弯曲度 1.99),在两岸沿上下游各设置一条一级支流。保证干流河面为总河面的 60% 以上,即保持水系为干流型水系。不改变支流入干流的位置、支流长宽及干流各项参数,调整两支流入干流的交汇角 α ,使 $\alpha = 15n$ ($n = 1, 2, \dots, 10$)。分别纪录监测点 1 和 2 的洪水位,得到不同 α 影响下监测点的峰值水位曲线。

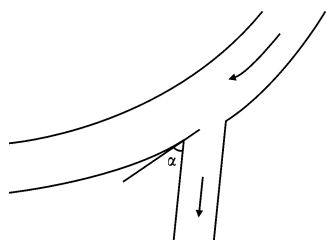


图4 交汇角 α

(2)改变支流在干流上的交汇点位置,其削峰效果存在一定的差异。在距入水口河流总长 1/4 处添加一条支流,计算监测点 1 和 2 的洪峰过程线。移动此支流交汇点至总长的 1/2、3/4 处,再分别记录下游两个监测点的洪峰过程。

情景二:河面率在一定范围内逐步增大

(1)不设支流,河流直线距离相同的前提下,改变河流弯曲度,研究使河流单位面积削减洪峰能

力最强的河流弯曲度。设置河流弯曲度以 1/8 为步长,从 1.25 增长至 3.75。计算弯曲度每增长 1/8,监测点 1 和 2 的洪峰削减增量。

(2)不改变干流形态,以支流形式增长研究区的河面率,探究最有效的河面率增长范围。不改变干流形状和长度,以添加支流的方式增加河面率,支流汇入点从干流中间向两端均匀添加。河面率每增加 1%,增加一级支流两条,长度为总增加长度的 1/2;增加二级支流两条,长度为总增加长度的 1/2,计算监测点 1 和 2 的洪峰过程线。

(3)以支流形式增加河面率和以增加干流河宽的形式增加相同河面率,探究削峰边际效益最好的河面率增加方式。初始值设为弯曲度 1.5 时的河面积,设置三种方案来增加相同的河面积:①不添加支流,改变河流本身弯曲度,使其弯曲度为 1.75。②不添加支流,拓宽河流,使总河面积达到弯曲度为 1.75 时的河面。③不改变干流,添加两条一级支流,使总河面达到弯曲度为 1.75 时的河面。记录三种情形下监测点 1 和 2 的洪峰过程。

2 结果和分析

2.1 河面率不变,河流结构变化对河网调蓄能力的影响

2.1.1 支流汇入角越小,河网削峰能力越大

洪峰水位-交汇角曲线变化趋势在两监测点处一致。监测点洪峰水位随交汇角 α 的增大呈曲线上上升趋势,即支流的削峰能力随 α 值增大呈下降趋势(图 5)。这与茅泽育采用水槽实验方法得出的结论一致^[18]。茅泽育通过实验得出 α 为 30°、45°、60°、90° 时,支流的分流作用随 α 值增大而增大,本文用模型计算方法验证了此规律。并将 α 取值序列延长到 150°,发现此规律依然成立。上海市中小河道目前多以直角交汇,是河网削减洪峰能力下降的一个原因。

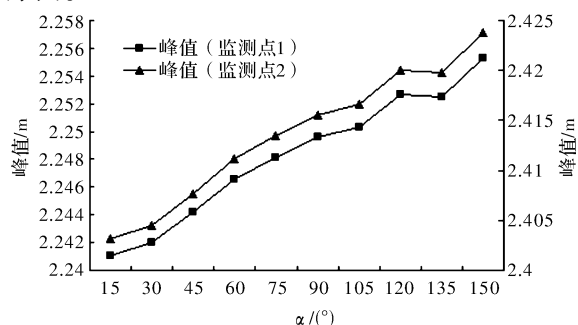


图5 不同 α 下监测点的洪峰值**

**注:相同 α 时,两监测点洪峰值差值相对较大。为对比说明两监测点上的洪峰随 α 变化趋势同,采用主次坐标分别绘制监测点 1 和监测点 2 的洪峰水位- α 曲线。

2.1.2 支流交汇口位置靠近干流上游时,洪峰削减能力较高

两监测点处记录的洪峰过程共同显示了干流上游的支流削减主干洪峰的能力比干流下游支流大。图6中显示,下游监测洪峰值随支流交汇口位置向下移动而递增,洪峰削减量递减。这与Cunge的动力波演算方法推出洪峰在河道中既传播又衰减的结论一致^[19-20]。河道中,洪峰的传播动能和势能同步衰减,使上游洪峰的传播速度大于下游,上游排入支流的水量大于下游,因此上游的支流分洪作用大于下游。这一结果也初步验证了本次模拟结果在理论上的正确性。

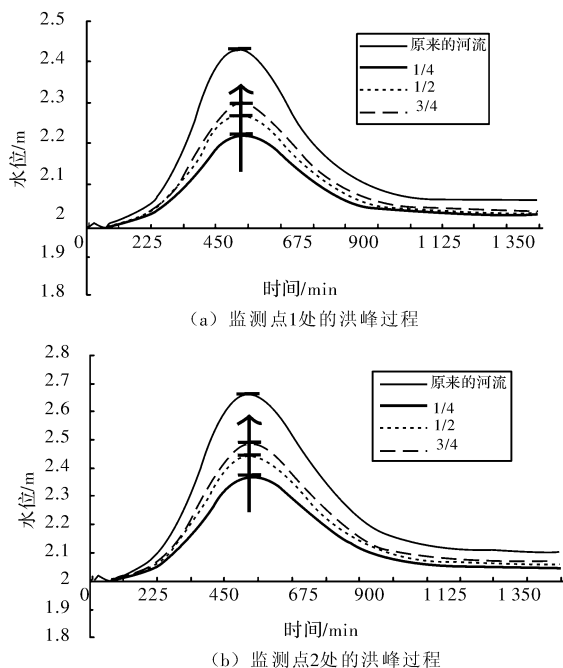


图6 洪峰过程

2.2 河面率以不同方式逐步增加,对河网有效调蓄能力的影响研究

2.2.1 干流弯曲度为1.2~2.8时,新增河面对洪峰的削峰能力增量呈上升趋势

随着弯曲度的增加,新增河面对洪峰的削峰贡献率呈先升后降趋势,拟合曲线显示其拐点在弯曲度2.8处,监测点1和2的记录结果一致(图7)。弯曲度为2.2~3.4时,增长单位弯曲度削峰增量为0.27~0.30 m,削峰效率相对最高。拟合曲线上,弯曲度增至2.8附近时,增长单位弯曲度削峰增量为0.30 m,削峰效率达到极点,如果河流调蓄洪水的效率设为削峰量与河面积的比值,那么,弯曲度为2.8时,河流调蓄洪水的效率最高。弯曲度偏小或偏大,增长单位弯曲度洪峰削减量均下降。

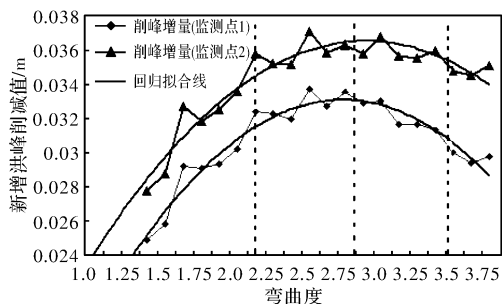


图7 洪峰削减量增加值曲线***

弯曲度增大,削峰增量始终为正值,表明河流削峰能力随自身弯曲度增大而加强。河道弯流以及摩擦阻力使洪峰能量下降,弯曲度增大弯流使洪峰能量损失越大;直线距离不变,弯曲度也与河道实际长度及河床摩擦阻力呈正向关系,即弯曲度越大洪峰的能量损失越大,也即河流的削峰能力越强。

随弯曲度增大,河道的新增储水量上升,储水量增加的速率变化趋势为先升后降(图8)。拐点在弯曲度2.93处,与图7中显示的拐点基本吻合,再一次验证了河流单位面积调蓄能力与河流弯曲度间存在紧密联系。

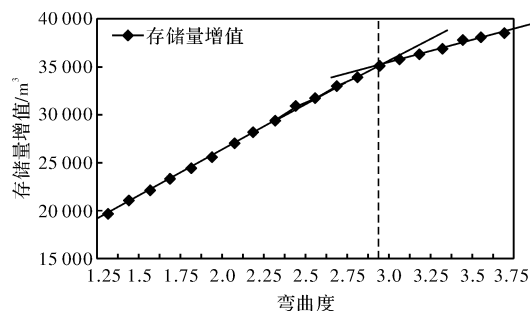


图8 河道储水量增加值曲线

2.2.2 河面率为3%~5%时,河网单位水面积削峰效率最大

图9显示了河面率为3%~7.5%时,两监测点的洪峰值。河面率从3%增长至5%,河流洪峰随河面率增大削减较快,单位河面积削峰效率较强。河面率在5%与6%之间为河网削峰效率由高到低的过渡段。河面率>6%时,新增河面率的削峰贡献不大。河面率为6%时,监测点2的洪峰值为2.02 m,接近常水位2 m,此时继续增加河面率,水位变化很小。因模拟计算中,河面率计算基于设定的流域面积参数,计算所得河面率节点数据因设定流域的性质和面积大小可能有偏离,但仍然可以认为河面率增加,河网调蓄洪峰的能力增强,单位河面积调蓄洪水的效率存在拐点,

***注:经检验,回归拟合曲线在0.01水平上显著。

拐点对应的河面率因所选的研究区面积不同有偏离。

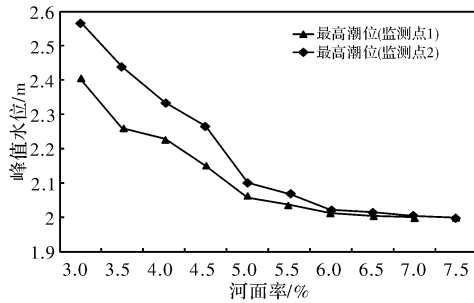
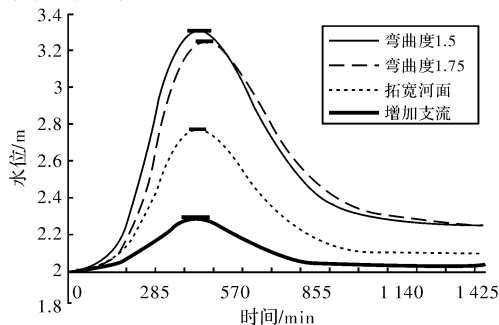


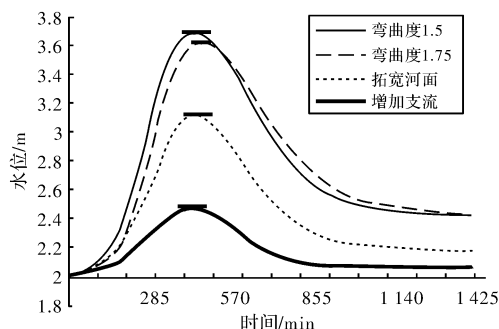
图9 不同河面率影响下的两监测点洪峰值

2.2.3 增加相同的河面积，以添加支流形式比增加干流弯曲度、拓宽干流更能有效提高河网削减洪峰的能力

根据情境二以三种方式增加相同的河面积进行河网结构设计，分别计算监测点1和2处的洪峰过程线如图10所示。两处监测点结果均显示，洪峰经过河网调蓄后，方案一下游监测点洪峰水位最高，方案二次之，方案三最低。即通过添加支流提高河网削减洪峰的能力效果最显著，拓宽干流面次之。从水动力学角度分析，支流不仅有分流作用减少主干的洪水流量，还使交汇口处产生紊流，使洪峰进一步消能。拓宽河面主要使河流的蓄水能力加强，从而削减洪峰水位。河流弯曲度增大，弯流作用加强，则洪峰削减量增加，但效果相对不明显。



(a) 监测点1处洪峰过程线



(b) 监测点2处洪峰过程线

图10 洪峰过程线

3 结论与问题

借助 sobek 模型的水力模拟，针对多种河网结构进行结构-功能的情景分析，结果表明增加支流尤其在干流上游增加支流可有效分洪，直角交汇角降低了河网调节洪峰能力。上海市人工河道目前多数是直角汇入，在河道整改过程中，若使 $\alpha < 90^\circ$ ，则在相同河面率条件下也可能增大河道调节洪水的能力。河流弯曲度 > 2.8 时，单位河面调节洪水能力有下降趋势，同时河道水力条件变化为以蓄水为主，易造成河道局部淤积和局部水质恶化。因此，将河流的弯曲度保持在 2.8 以下，有利于保持河流自身健康并最大限度发挥河网的防洪排涝功能。在河面率 5% ~ 6% 及以下的区域，若增加人工河湖，防洪边际效益显著。通过增加支流提高河面率是提高河网调蓄能力的相对最有效的途径。

由于情境设计的局限，本文研究结果相应存在局限性。文中仅对特定洪峰过程下的河网调蓄能力进行了模拟计算，未考虑不同形状洪水过程与河道的水力作用对调蓄能力的可能影响。采用上海河网平均参数构建模型，参数间的耦合程度及计算精度尚有待进一步验证。开展本模型的适用性验证，兼顾普遍性与区域典型性，是今后努力的方向。

参考文献：

- [1] 袁雯, 杨凯, 唐敏, 等. 平原河网地区河流结构特征及其对调蓄能力的影响[J]. 地理研究, 2005, 24(5): 717-724.
- [2] 程江, 杨凯, 赵军. 上海中心城区河流水系百年变化及影响因素分析[J]. 地理科学, 2007, 27(1): 85-91.
- [3] 程江. 上海中心城区土地利用-土地覆被变化的环境水文效应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [4] 高成, 刘俊, 崔韩, 等. 城镇圩区排涝模数计算方法及其与河道调蓄库容关系研究[J]. 灾害学, 2008, 23(3): 7-9.
- [5] 郗敏, 吕宪国, 姜明. 人工沟渠对流域水文格局的影响研究[J]. 湿地科学, 2005, 3(4): 310-314.
- [6] 方国华, 金德刚, 刘俊, 等. 甬江流域河网水利计算模型研究及应用[J]. 灾害学, 2009, 24(2): 41-45.
- [7] 王洪梅. 基于 SOBEK 的水量水质模型在松花江流域的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [8] 谷晓伟. 基于 SOBEK 模型的黄河三角洲自然保护区淡水湿地生态需水量研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [9] Daniel J Twigt, Erik D De Goede, Firmijn Zijl, et al. Coupled 1D-3D hydrodynamic modelling with application to the Pearl River Delta[J]. Ocean Dynamics, 2009, 59: 1077-1093.
- [10] 钟娜. 复式河道一维数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [11] 袁雯, 杨凯, 吴建平. 城市化进程中平原河网地区河流结

- 构特征及其分类方法探讨[J]. 地理科学进展, 2007, 27(3): 402-407.
- [12] 杨凯. 平原河网地区水系结构特征及城市化响应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.
- [13] 袁雯, 杨凯, 徐启新. 城市化对上海河网结构和功能的发育影响[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(2): 133-138.
- [14] 杨凯, 袁雯, 赵军, 等. 感潮河网地区水系结构特征及城市化响应[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 557-564.
- [15] 吴阿娜, 杨凯, 车越, 等. 河流健康状况的表征及其评价[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 602-608.
- [16] 汪松年, 阮仁良. 上海市水资源普查报告[M]. 上海: 上海科技出版社, 2000.
- [17] 许世远, 陈振楼, 俞立中, 等. 苏州河底泥污染与治理[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [18] 茅泽育, 赵升伟, 张磊. 等宽明渠交汇口水流一维数学模型[J]. 水利学报, 2004, (4): 26-32.
- [19] CARTER T R, PARRY M L, HARASAWA H, et al. IPCC technical guide lines for assessing climate change impacts and adaptations[M]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 1994.
- [20] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.

Scenario Simulation of River Network Structure and Storage Capacity Based on Flood Control Objectives

Li Na, Lu Peige and Yuan Wen

(East China Normal University, Key Laboratory of Geographic Information Science of the Ministry of Education, Shanghai 200062, China)

Abstract: Using SOBEK model, a hydraulic model for river network plain is established, which is used to simulate storage capacity under different scenario by designing different sorts of river network structures, and the reasonable range of river channel area and river network structure parameters that might decrease the flood peak effectively are tried to be found. Results show that, with scenario of keeping the same ratio of river channel area, for a selected monitoring point in mainstream, tributary in upstream is more effective in decreasing flood peak compared with that in downstream, the more smaller of intersection angle of tributaries, the more stronger capacity in controlling flood. With scenario of increasing the river channel area, river storage and control capacity enhanced with the increasing of river curvature, and the per-unit capacity of the river area reaches the peak value when river curvature is 2.8. River storage and control capacity enhanced with the increasing of river channel area but there is a peak value. When the ratio of river channel area is between 3% and 5%, the increasing of per river area unit has the best affection in decreasing peak flow. To increase tributary area might improve the river network storage and flood control capacity more effectively than to increase the mainstream area.

Key words: flood control; river network structure; storage and flood control capacity; scenario analysis; SOBEK

下期要目

- 《汶川地震建筑物震害遥感解译图集》的编制 王晓青
- 西安世园会开、闭幕式期间灾害性天气风险分析 雷向杰, 方建刚, 毛明策, 等
- 物联网技术在地震救灾中的应用 杨秋格, 高峰, 吴鹏
- 沙尘暴灾害风险评估指标体系初探 李锋
- 汶川地震中小鱼洞大桥的变形破坏特征与机理 苏生瑞, 李 松, 郝莉莉, 等
- 四川省北川县暴雨泥石流的发育与汶川地震的响应特征 铁永波, 唐 川
- 低空急流暴雨天气概念模型及其雷达回波特征分析 周文志, 唐熠, 王艳兰, 等
- NGO 与地方政府合作参与灾后重建的综合集成模式——以汶川大地震为例 徐玖平, 卓安妮
- 影响地震救灾效率的因素分析——以汶川 8 级地震和玉树 7.1 级地震为例 周阿颖, 张朝, 史培军, 等
- 引汉济渭工程地质灾害风险预测 陈新建, 赵宪民, 段钊
- 珠江流域极端降雨时空演变特征分析 彭俊台, 张强, 陈晓宏, 等
- 四川绵竹清平乡文家沟“8.13”特大泥石流灾害 游 勇, 陈兴长, 柳金峰
- 陕北黄土高原区滑坡发育类型与时空分布特征——以吴起县为例 段钊, 赵法锁, 陈新建
- 基于 GIS 的太湖流域暴雨洪涝灾害风险定量化研究 于文金, 闫永刚, 吕海燕, 等