

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.06.06

CHHMS 耦合模型在河流生态修复中的应用

黄显峰¹, 吴俊¹, 方国华¹, 连炎清², 郑延科¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 伊利诺伊大学香槟分校水科学研究中心, 美国 Illinois 61802)

摘要: 针对伊利诺伊河流域的 Emiquon 区域以及肖托夸湖泥沙淤积问题。运用 CHHMS 耦合模型 (Coupled Hydrology and Hydraulics Model System) 对研究区域在不同泄洪开口组合的泥沙分布进行模拟, 并根据不同流速状态下的颗粒流线图进行模拟得到沉淀物分布状况, 结合湿地植物及鱼类生长需求对结果进行分析。研究发现 CHHMS 耦合模型在河流生态修复的模拟运用中具有很高的可开发性和实用性, 经过模型模拟得到研究区域的合理规划方式, 并且在成功利用河流到蓄滞洪区开口的情况下, 水量以及泥沙沉淀物得到有效的控制, 植被得到恢复, 湿地的生态状况得到有效的改善。

关键词: 水文水力学模型; CHHMS 模型; 河流生态修复; 伊利诺伊河流域

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)06-0033-05

Application of CHHMS coupling model in river ecological restoration

HUANG Xianfeng¹, WU Jun¹, FANG Guohua¹, LIAN Yanqing², ZHENG Yanke¹

(1. College of Water Resources and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Research Centre of Water Science, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois 61802, U. S. A)

Abstract: According to sediment deposition problem of the Illinois River Basin Emiquon region and the Chautauqua lake, the CHHMS coupled model (Coupled Hydrology and Hydraulics Model System) was used to simulate the sediment distribution in the study area under different combinations of flood discharge openings, and according to the particle flow chart under different flow rates, the distribution of sediment was obtained. The results were analyzed according to the growth requirements of wetland plants and fishes. The study found that the application of CHHMS coupled model in river ecological restoration has high exploitability and practicability. Through model simulation, the reasonable planning way of the study area was obtained, and with the successful utilization of the opening of the flood storage and detention area, the water and sediment were effectively controlled, the vegetation was restored, and the ecological status of wetlands was improved effectively.

Key words: hydrology and hydraulics model; CHHMS model; river ecological restoration; Illionis river basin

随着水利工程建设需求的加大以及计算机技术的逐步推广, 国内外学者根据流域实际情况, 开发或改进了很多具有针对性的水文模型^[1-13]或水文水力学耦合模型^[14-20]。对比其他水文水力学耦合模型^[21-25], CHHMS 耦合模型 (Coupled Hydrology and Hydraulics Model System) 的特点在于其考虑了地表径流与地下水的相互补充关系, 利用 MODFLOW 对地下水的水力情况进行描述模拟, 对径流产生的水文过程进行处理, 同时由水文过程结合其他生物生态模型, 建立针对河流生态修复的耦合模型。该模型具有很高的实用性, 但是在国内的应用较少。

本文首先对 CHHMS 模型进行简单介绍; 随后, 结合美国伊利诺伊河流域实例研究, 介绍运用 CHHMS 模型进行生态系统的模拟修复, 主要包括水流、泥沙和生物量的模拟。

1 CHHMS 耦合模型介绍

1.1 CHHMS 耦合模型发展概况

CHHMS 模型耦合了美国环保署开发的 SWMM 模型 (版本 5.0.022) 和美国地质调查局 MODFLOW - CFP 模型。该技术基于 Rowan 的研究 (Rowan, 2001), 其耦合 SWMM 4.4H 版和 MODFLOW - 96 使

收稿日期: 2017-04-11; 修回日期: 2017-08-11

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2016YFC0400909); 湖南省水利科技重点项目 (湘水科计 [2016] 194-21); 湖南省水利科技项目 ([2015] 245-13); 江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD)

作者简介: 黄显峰 (1980-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 副教授, 主要从事水资源规划与管理方面研究。

用渗透数据输入 MODFLOW 软件,2006 年开始在中国喀斯特流系统试验使用。2007 年将 SWMM 5 与 MODFLOW 96 进行耦合,之后,MODFLOW 96 更新至 MODFLOW - CFP,并发展完善一系列如喀斯特水系统集成建模系统(KWMS)等子模型。

1.2 CHHMS 耦合模型特点

CHHMS 模型充分利用了 SWMM 水文模型与 MODFLOW 地下水动力模型的优点。在确定时间耦合节点过程中,SWMM 通常比 MODFLOW 有更小的时间步长,因此,时间尺度耦合被用来传递平均阶段水头或累计流量给 MODFLOW。流量和阶段交换可以是每个应力周期或每一时间步长。单位转换在 SWMM 端或 MODFLOW 结束,耦合方法如图 1 所示。

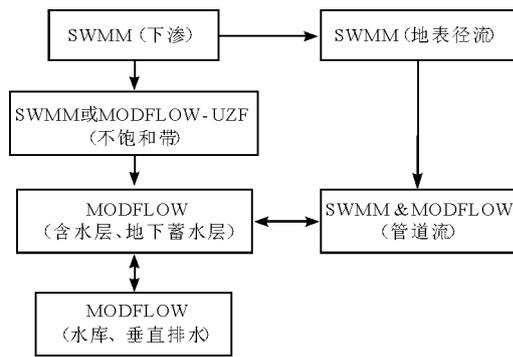


图 1 CHHMS 耦合模型原理示意图

针对城镇区域,CHHMS 中的 SWMM 水文模型部分可用于模拟径流产生的水文过程,其中包含降水量、地表蒸发量、降水下渗量、洼地的截留水量、积雪与融雪过程、降雨下渗的地下水补给过程等。除此以外,CHHMS 还包括一套能用来模拟径流并处理外来水流在排水管道中问题的水力学模块。随着地理信息技术发展,CHHMS 利用 GIS 数据构建了包含出流 DEM、地表河流、地下岩溶管道以及落水洞/竖井等岩溶系统元件组成的地表水 - 地下水耦合模型。模型界面可以直接导入 GIS 数据建立岩溶管道与地表河流的相对关系,形成地表河流 - 岩溶管道模型,同时,可以通过定义流域边界和有限差分网格来形成地下 MODFLOW - 岩溶管道模型。模型界面还可以在建立模型的同时对模型结构(例:地面高程数据、岩溶管道网络、地下有限差分网格)提供三维画图功能。

1.3 CHHMS 耦合模型子系统

CHHMS 系统模型隶属于分布参数、连续模拟模型。包含 UWMS、KWMS、TWMS 和 KWMS - Cave 4 个子系统,分别用于模拟大小城市暴雨管理、岩溶水系统、农田涵管排水系统和岩溶空洞管道溶蚀演

化的时空规律。其中 KWMS 是目前世界上首个能比较真实刻画岩溶水的系统,能较准确地模拟岩溶水系统的多种水动力特征,包括地表水、地下水交替,岩溶管道、地下河与岩溶裂隙介质水流交换等。TWMS 是国际上首个能够描述实际农田涵管排水网的水文水动力过程的模型。UWMS 是国际上首个集地表水、地下水以及管网排水系统为一体的综合城市暴雨管理系统,更适合用于海绵城市的设计、评价与管理。KWMS 和 TWMS 把地下管道与地表河流构建一套完整的排水系统,用完整的 Saint Venant 方程模拟径流过程,避免使用地下水节点网格代表地表河的缺陷,克服了由于河流边界带来的地下水模拟不稳定,同时提高了模拟精度。该系统目前包含常规的地表水 - 地下水系统耦合模拟模型、岩溶水系统 - 地表水 - 地下水耦合模拟模型、农田涵管排水 - 地表地下水系统耦合模拟模型和岩溶空洞管道溶蚀模拟模型。地表集水部分可根据地面高程与水文系统划分成子集水区。子集水区根据土地利用和土壤类型的组合划分成多个水文代表单元。CHHMS 以模块式的理念构建,有利于根据研究与工程需要改进和增加系统的功能。

2 实例研究

2.1 研究区域

伊利诺伊河是美国密西西比河左岸的支流,长 437 km,流域面积 $8.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。两岸地势较低,洪水经常漫溢,形成湖沼;上游有通航运河与密歇根湖相通,是五大湖与墨西哥湾间的重要连接水路。伊利诺斯河干流从伊州的乔利埃特起到伊州的格拉夫顿止,所面临的一个最重要问题是泥沙淤积。河流年输沙量平均约为 $1360 \times 10^4 \text{ t}$,其中 $560 \times 10^4 \text{ t}$ 输入密西西比河,而其余的 $800 \times 10^4 \text{ t}$ 则淤积在伊利诺斯河谷内,致使沿河几乎全部的湖泊都受到了淤积,丧失了大量的蓄水湖容。自 1909 年迄今,这些湖泊已失去的蓄水能力达 72% 左右。例如沿河最大的低洼湖泊皮奥里亚湖就失去达 70% 蓄水湖容,它的淤沙率全伊州第一。本文的模拟区域主要包括 Emiquon 区域以及肖托夸湖(图 2)。Emiquon 区域主要包括汤普森湖大堤和排水区,总面积为 2333 hm^2 ,位于伊利诺伊州富尔顿县的沃特福德镇。肖托夸湖地处美国纽约肖托夸县,形状呈长条状,长度约 27 km,最大宽度约 3.2 km,表面积约 53 km^2 ,最大深度约 24 m,岸线约 66 km。其生态恢复的主要目标是控制湿润土壤植物生长的水位和水位波动,避免河流沉积物,并为鱼类、

禽类等物种和动物提供适宜生存的生态环境。

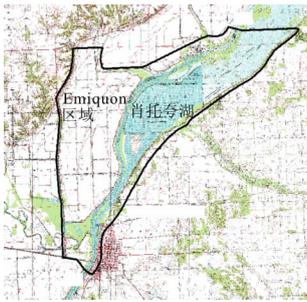


图2 模拟区域图

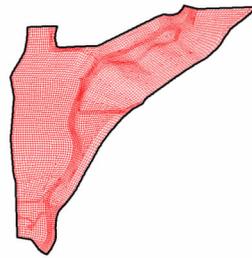


图3 区域有限元网格图

2.2 研究方法

本文利用 CHHMS 耦合模型对研究区域水文状况以及河流泥沙演进变化进行模拟,主要步骤如下:

第1步:为该模拟区建立有限元网格(图3)。

第2步:对模拟区潜在泄洪开口位置进行研究,其主要的开口位置分布如图4所示。在此研究区域,存在多种开口组合的可能性,主要的开口组合形式有如下5种:(1)只打开L1;(2)只打开L3;(3)打开L1和L2;(4)打开L1和L3;(5)将所有开口全部打开。

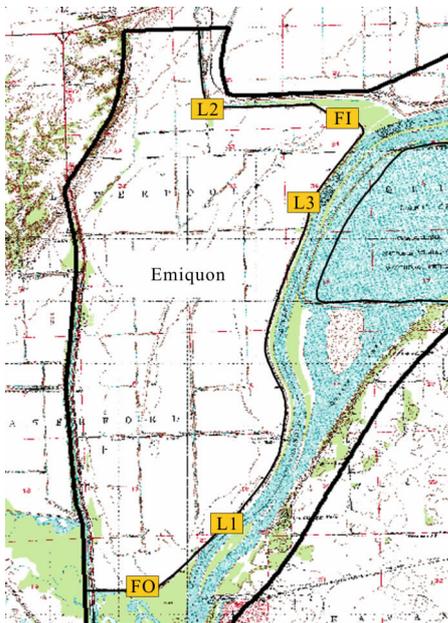


图4 泄洪开口位置分布图

第3步:利用 CHHMS 模型 SWMM 水文模块对研究区域进行模拟,得到不同开口组合情况下的颗粒流线,对其不同的流速状态进行分析。

第4步:根据水文模型颗粒流线图,利用 CHHMS 模型二维水力模型模块(RMA 2)对模拟区域沉积物的分布情况进行分析,得到不同开口组合情况下的沉淀物分布状况,并对开口全连通的情况下不同流速状态进行模拟。

第5步:将水文情况与模拟得到的沉淀物分布状况与生物生长需求相对比,对 Emiquon 区域以及肖托夸湖的生态修复进行模拟。根据历史数据,将合理规划后的湿地植被生长情况与历史实际情况进行对比,提出具有可靠性的生态修复措施与意见。

2.3 结果分析

由 CHHMS 模型中的水文模块模拟得到流量在 $300 \sim 2\,050 \text{ m}^3/\text{s}$ 的水文模型颗粒流线图(图5(a)~5(d))。将水文模拟数据耦合水力学模块模拟得到研究区域全开口情况下沉淀物分布图(图6(a)~6(d)),图中以不同颜色表示泥沙含量的高低。可以发现,在全开口的情况下,随着流量由 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $2\,050 \text{ m}^3/\text{s}$,开口逐渐被突破,洪水向行洪区演进并带有泥沙等沉淀物。

根据已模拟出水文状况以及泥沙沉淀物的分布情况,建立湿润土壤植物结构模型,即模拟水文情况变化对种子、植物、鱼类等不同生物的影响因素。依据此模拟地区长系列水文情况对植被覆盖面积及规模形状的发展和鱼类生长发展影响的经验,分析不同开口状态下,此模拟区域土壤、植被以及鱼类受到的影响。本文主要针对开口全连通和合理规划开口开启两种情形进行模拟,并将两种状态进行对比。模拟结果(图7和8)显示,在 Emiquon 区域开口全开的情况下,流经肖托夸湖的大量洪水涌入行洪区,土壤和植被遭到大面积淹没,鸟类的生存区域遭到洪水破坏,不利于本地区生态的恢复;在合理规划开口开启的情况下,水量以及泥沙沉淀物得到有效控制,植被得到恢复,湿地的生态状况得到有效的改善。

CHHMS 模型模拟得到的水文演变情况与植物以及鱼类生长的特点进行对比发现:对于鱼类生长来说,一年内最主要的生长周期集中在年内的前 200 d(图9所示)。在 1887 年河流生态较为原始的理想状态下,前 200 d 河道流量基本与汛期正相关,保证了鱼类产卵繁殖的河道基本流量需求。在开口断面合理规划后,基本能够保持河道内鱼类繁殖的基础用水。对于湿地植物生长来说,其生长季主要集中在一年内的第 150~300 d(图10所示)。在开口断面合理规划后,这段时间的河道流量能够基本保持平稳,从而保证了植被生长不被继续破坏的基础条件。

根据历史数据进行模拟,将全开放与合理规划开口两种情况下植被的生长情况(图11)进行对比,如可以明显看出,从 1971 年至 1999 年,若对研究区域的泄洪开口进行合理规划,植被的面积将得到大幅度提升,植物的生长情况可以得到非常明显的改善。

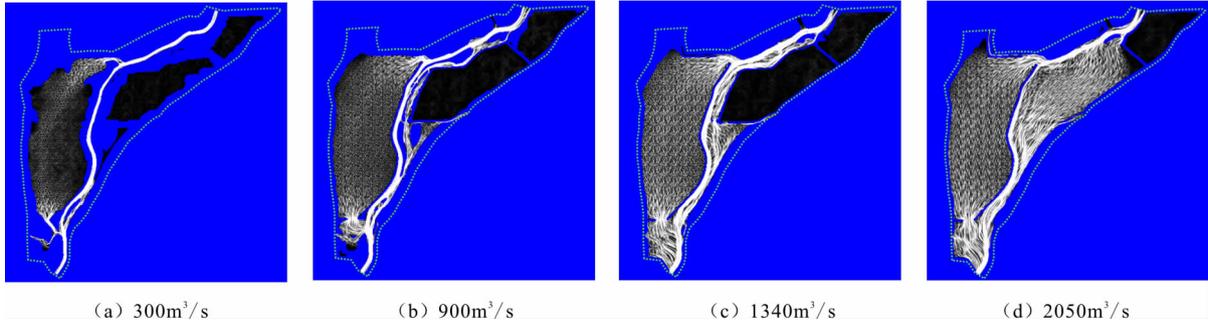


图5 不同流量下全开口颗粒流线图

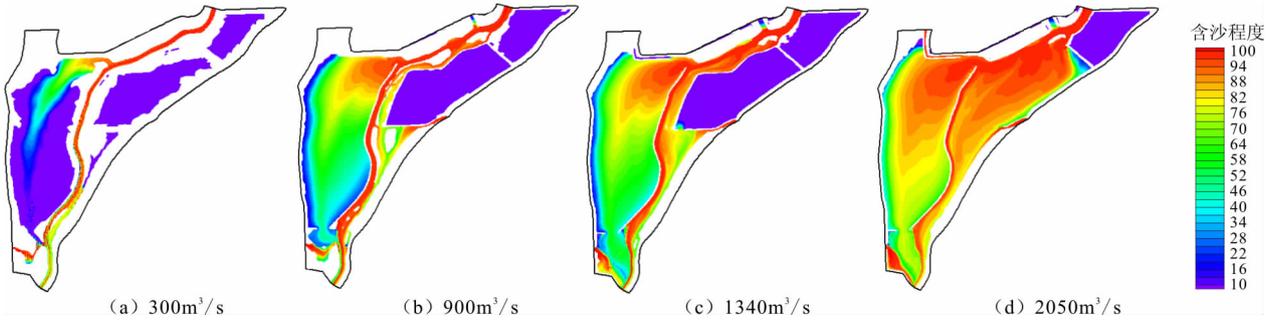


图6 不同流量下全开口时沉淀物分布模拟结果

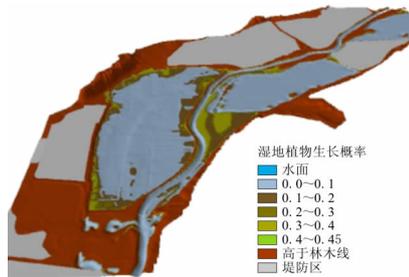


图7 全开口湿地植物覆盖情况

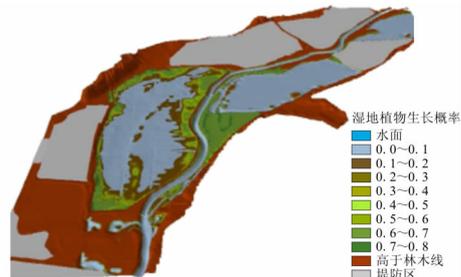


图8 开口合理规划后湿地植物覆盖情况

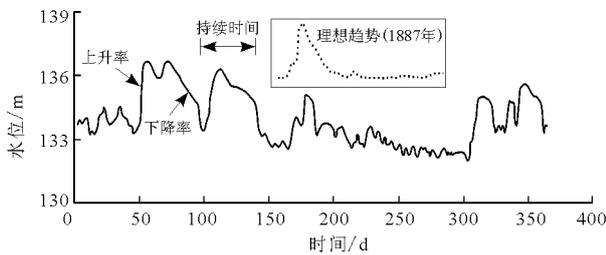


图9 河流生态规划后对鱼类生活的影响情况

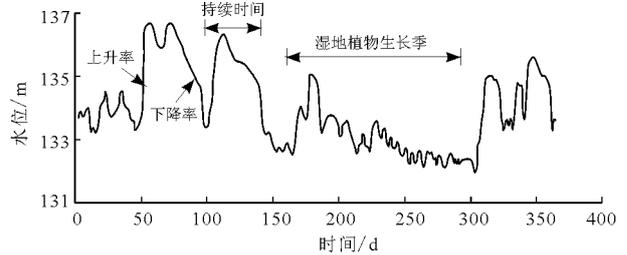


图10 河流生态规划后对湿地植物生长的影响情况

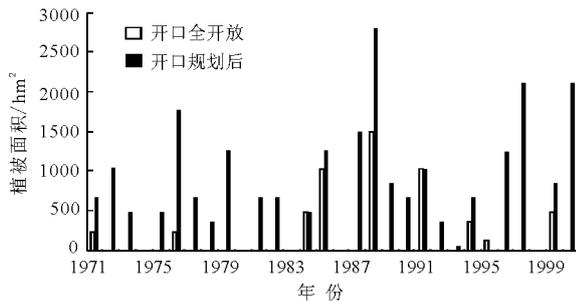


图11 湿地植物模拟结果对比情况

3 结论

本文首先介绍了 CHHMS 耦合模型的发展概况、原理特点以及现有的4个子系统,之后针对伊利诺伊河流域 Emiquon 区域以及肖托夸湖的河流泥沙淤积问题进行分析,对当地河流生态修复状况进行模拟,根据不同的实地情况采用不同的措施手段,输出模拟结果后与非生态规划前进行对比,可以发现:

(1) 针对研究区域泥沙淤积问题,在经过 CHHMS 耦

合模型模拟之后得到显著生态修复成果,湿地生态环境得到有效改善;(2)CHHMS模型对于河流生态修复的作用主要是对采取实际措施后的河流进行水文环境上的模拟,并通过模型界面生成可视化图像,从而可以更直观地看到设计的水利工程对于河流生态修复的作用;(3)CHHMS模型对比其他水文水力学模型,特点在于其考虑了地表径流与地下水的相互补充关系,具有更高的兼容性和可开发性。

但是目前来看,水文水力学耦合模型应用于河流生态修复理论研究尚处于开发阶段,需要进一步加强理论研究工作及具体的工程示范实践,两者的结合对未来的生态修复工作具有一定的参考价值以及指导意义。并且CHHMS耦合模型适用范围广,开发的开放性高,未来在水环境治理、海绵城市建设、城市排涝等方面都具有很高的研究意义。

参考文献:

- [1] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京:水利电力出版社, 1984.
- [2] 陈俊. 大伙房水库水质预测中水文水质模型联合应用分析[J]. 黑龙江水利科技, 2017, 45(1): 146-148.
- [3] Kenji T, Yuzo O, Xiong Jun, et al. Tank model and its application to predicting groundwater table in slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2501-2508.
- [4] Jaber F H, Shukla S. MIKE SHE: Model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineering, 2012, 55(4): 1479-1489.
- [5] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, et al. SWAT: Model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineering, 2012, 55(4): 1491-1508.
- [6] Wang Changhong. Application of HEC-RAS model in simulation of water surface profile of river[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 641-642: 232-235.
- [7] Meng Changqing, Zhou Jianzhou, Tayyab M, et al. Integrating artificial neural networks into the vic model for rainfall-runoff modeling[J]. Water, 2016, 8(407): 1-16.
- [8] 王斌, 王贵作, 黄金柏, 等. 栅格分布式水文模型在高寒区日流量模拟中的应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 36-42.
- [9] Patel H, Rahman A. Probabilistic nature of storage delay parameter of the hydrologic model RORB: a case study for the Cooper's Creek catchment in Australia[J]. Hydrology Research, 2015, 46(3): 400-410.
- [10] Isaacson K, Coonrod J. USGS streamflow data and modeling sand-bed rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(8): 847-851.
- [11] Lei Jiang, Chen Yangbo, Wang Huanyu. Urban flood simulation based on the SWMM model[J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2015, 368: 186-191.
- [12] Laouacheria F, Mansouri R. Comparison of WBNM and HEC-HMS for runoff hydrograph prediction in a small urban catchment[J]. Water Resources Management, 2015, 29(8): 1-17.
- [13] Betrie G D, Mohamed Y A, van Griensven A, et al. Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 115(3): 807-818.
- [14] 阚光远, 刘志雨, 李致家, 等. 新安江产流模型与改进的BP汇流模型耦合应用[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 21-28.
- [15] 李思宇, 张新华. 动态跟踪的实时校正TANK模型在河系预报中的应用[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2017, 43(1): 95-104.
- [16] 万增友. MIKESHE模型国内应用现状及其关键问题研究[J]. 科协论坛(下半月), 2011(5): 99-101.
- [17] 郑捷, 李光永, 韩振中, 等. 改进的SWAT模型在平原灌区的应用[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 88-97.
- [18] 范辉, 吴志勇, 张健. VIC模型汇流方案的改进[J]. 水文, 2012, 32(5): 7-11+86.
- [19] Krysanova V, Meiner A, Roosaare J, et al. Simulation modelling of the coastal waters pollution from agricultural watershed[J]. Ecological Modelling, 1989, 49(1-2): 7-29.
- [20] Sophocleous M A, Koelliker J K, Govindaraju R S, et al. Integrated numerical modeling for basin-wide water management: The case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas[J]. Journal of Hydrology, 1999, 214(1-4): 179-196.
- [21] Anderson M L, Chen Z Q, Kavvas M L, et al. Coupling HEC-HMS with Atmospheric Models for the Prediction of Watershed Runoff[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2002, 7(4): 312-318.
- [22] Tang Chunling, Dennis R L. How reliable is the offline linkage of Weather Research & Forecasting Model (WRF) and Variable Infiltration Capacity (VIC) model[J]. Global and Planetary Change, 2014, 116: 1-9.
- [23] 宋晓猛, 孔凡哲. 新安江模型和人工神经网络的耦合应用[J]. 水土保持通报, 2010, 30(6): 135-138+144.
- [24] 杨甜甜. 大沽夹河流域水文水动力耦合模型研究及应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [25] 杨亚芳. 地下水与地表水交互作用的耦合模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.