

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.06.006

动态流域模拟模型在黄河宁夏段流域水沙规律研究中的应用

马晓阳¹,杜正礼¹,岳志春¹,张岳峰^{2,3}

(1. 宁夏回族自治区防汛抗旱指挥部办公室,宁夏 银川 750001;

2. 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 10084; 3. 清华大学水利水电工程系,北京 100084)

摘要:在介绍动态流域模拟模型(DWSM)的原理、结构、河网汇流顺序等的基础上,并对其算法和存储规则进行改进,以提高模型的计算效率,将该模型应用于黄河宁夏段流域的水沙规律研究中。结果表明 DWSM 模型在黄河宁夏段流域水沙模拟中具有较好的适用性。

关键词:动态流域模拟模型;水沙规律;黄河宁夏段

中图分类号:TV213

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2014)06-0031-04

Application of dynamic watershed simulation model (DWSM) to study of regularities of water and sediment in Ningxia reach of Yellow River

MA Xiaoyang¹, DU Zhengli¹, YUE Zhichun¹, ZHANG Yuefeng^{2,3}

(1. Flood Control and Drought Relief Headquarters Office of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China;

2. State Key Laboratory of Hydro-Science and Engineering, Beijing 100084, China;

3. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper introduces the principle, structure, and river network confluence sequence of the dynamic watershed simulation model (DWSM). The algorithms and storage rules of the model were improved, in order to improve the calculation efficiency. The model was used to study the regularities of water and sediment in the Ningxia reach of the Yellow River. Results show that the DWSM is highly applicable to water and sediment simulation in the study area.

Key words: dynamic watershed simulation model; regularities of water and sediment; Ningxia reach of Yellow River

宁夏黄河两岸是我国西部经济发达地区,属于国家规划的两大煤化工基地之一,防灾减灾对当地经济发展和人民生命财产安全具有重要影响。2012年6月下旬至9月中旬黄河上游干支流先后受上游水库下泄水及区间洪水影响,出现多次洪峰过程,宁夏段洪水期出现了自1989年以来的最大洪水,造成宁夏沿黄河一带多个市县区约12万人不同程度受灾,滩区180多hm²鱼池进水,5035万hm²农作物、经济作物被洪水淹没,当地防灾减灾呼声很高^[1-3]。

通过建设水库大坝等水利工程,可以对黄河宁夏河段进行有效调水调沙,从而提高河道排洪能力与输沙效率,扭转河情恶化趋势,保障防洪防凌安

全,为当地发展提供安全保障。为此,应加强对黄河宁夏段流域水沙规律的研究,构建适用的数学模型对当地河道不同水沙条件下冲淤变化规律进行分析研究,以预测工程建设后的河道变化过程,为工程方案的比选及工程效益的计算提供科学依据。

动态流域模拟模型(dynamic watershed simulation model, DWSM)是美国伊利诺伊州水资源调查局开发的分布式水文模型,由3部分组成:产汇流模拟,土壤侵蚀模拟,泥沙、污染物输移模拟,可用于模拟单次降雨或短期连续降雨引起的地表径流,渗流(土壤浅层侧向流),洪水波演进,土壤侵蚀,泥沙和源于农业、城市地区的农药污染物等化学物质

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51139003);国家自然科学基金面上项目(11372161);国家自然科学基金青年科学基金(51109113)

作者简介:马晓阳(1971—),男,高级工程师,主要从事水利工程管理工。E-mail:81848340@qq.com

的迁移扩散情况。该模型在美国多个流域已进行了验证,结果证明它非常适合模拟不同水文情况下(单次暴雨或短期降雨等)的水沙过程^[4-6]。

笔者以 DWSM 模型为基础,并对其进行计算改进,进而利用黄河宁夏段降雨来沙资料对 DWSM 模型在该流域水沙计算中的应用研究进行了验证,结果表明 DWSM 模型可科学解析黄河宁夏段水沙变化规律,可为相应工程方案的设定、今后洪水预报及灾害的预防提供参考。

1 DWSM 模型运行原理和结构

DWSM 模型模拟某个流域时,先要把流域划分成若干个子流域,进一步概化成一维矩形坡面、河道单元,水库和蓄滞洪区作为独立的计算节点,置于相应的河道出口位置。计算单元划分充分考虑了地形、土壤、植被特征的不均匀性,假定每个坡面各处的产汇流特性是相同的,用代表性的参数值来统一表示。因此按计算单元类型划分,该模型属于基于坡面的分布式水文模型^[4-6]。

坡面部分表示成矩形,采用矩形的长度、宽度、坡度、土壤类型、植被种类及糙率来表示坡面产汇流特征;河道特征用断面形状、长度、坡度和糙率表示。坡面的面积、长度、坡度和土壤类型在模拟期间是不变的,植被种类和糙率会在农作物轮种或森林砍伐等特殊情况下才发生相应改变;河道的断面形状、坡度和糙率在模拟期间假定不变。

每个坡面的降雨由各自雨量站控制,经下渗、截留后的净雨,由坡面顶部向坡底的河道演进,因此每条河道除了上游来水外,还有河道两边坡面贡献的地表和地下径流,坡面汇流示意图见图 1。图 1 中 i_1 、 i_2 分别为坡面 1 和坡面 2 上的降雨量; q_1 、 q_2 分别为坡面 1 和坡面 2 上产生的地表径流量; q_{s1} 、 q_{s2} 分别为坡面 1 和 2 的地下径流量。

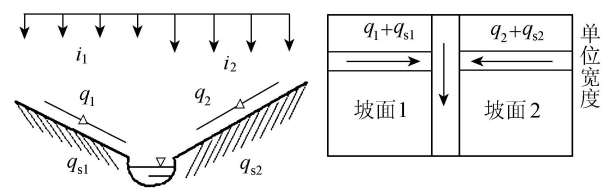


图 1 坡面汇流示意图

2 DWSM 在黄河宁夏段的应用

2.1 计算范围

黄河宁夏段位于黄河上游的下段,径流主要来自上游兰州以上的吉迈—唐乃亥和循化—兰州区间,沙量主要来自于各支流,水沙异源。黄河宁夏段全长 397 km,位于黄河中上游,由中卫南长滩入境,流经卫宁灌区、青铜峡水库以及青铜峡灌区,在麻黄沟

出境。境内主要支流有清水河、红柳沟、苦水河等。沿程有下河沿、青铜峡、石嘴山 3 个水文站,下河沿站为该河段进口水文站,石嘴山站为出口水文站。

本次模拟选取黄河宁夏下河沿至石嘴山段流域作为主要研究区域(图 2)。以宁夏区域的 30 m×30 m DEM 为基础,利用 ARCGIS 对河网进行提取,如图 3 所示。



图 2 研究区域示意图

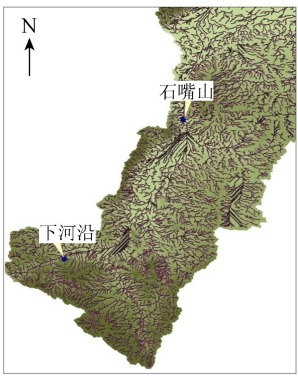


图 3 黄河宁夏段河网提取

2.2 边界条件

雨量站数据来源于流域内及周边解家沟等 153 个雨量站(图 4),雨量站主要集中在苦水河和清水河子流域附近,雨量数据来源于宁夏回族自治区水文局。

植被覆盖方面,宁夏地处西北区,植物种类贫乏,多单属科、单属种和寡种植物,主要有碱蓬、盐节木、小叶白蜡、天山忍冬、泡泡刺等。因宁夏绝大部分地区的气候属温带干旱、半干旱气候,降水稀少,草场类型多为干草原、荒漠草原,其面积占全区草场总面积的 79%。这类草场植被覆盖度低,植物种类少,产草量较低。结合 google earth 宁夏卫星遥感影像(图 5)设置模型植被覆盖等相关系统。

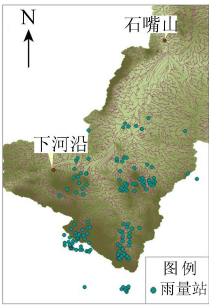


图 4 雨量站分布

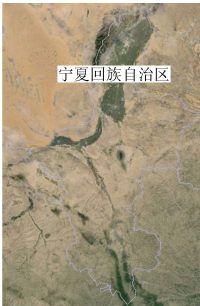


图 5 google earth 宁夏区卫星遥感影像

本次模拟以下河沿为模型计算的上边界,采用 2008 年、2009 年以及 2010 年 6 月 3 日至 10 月 1 日的水沙资料,其流量和输沙率过程数据如图 6 所示。该段时间的水沙特点为来水来沙大部分时间相对稳定,水沙规律较为明显,具有一定的代表性。

根据黄河泥沙颗粒组成特征(数据来源宁夏回族自治区水文局),将泥沙分成粗沙(0.05 ~ 1 mm)、中沙(0.025 ~ 0.05 mm)和细沙(≤0.025 mm)3 种,

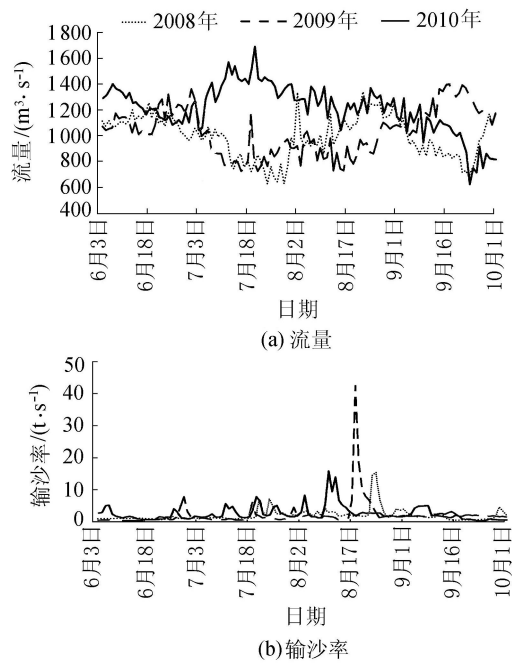


图6 上边界数据

分析下河沿、青铜峡和石嘴山3测站悬移质来沙组成可以看出,汛期下河沿站悬移质组成中,细沙占56.06%,中沙占20.37%,粗沙占23.57%;青铜峡站细沙占59.42%,中沙占18.91%,粗沙占21.67%;石嘴山站细沙占58.86%,中沙占17.69%,粗沙占23.45%。3站汛期悬移质组成,细沙占一半以上,中沙和粗沙的比重相近。非汛期下河沿站悬移质组成中,细沙占50.13%,中沙占22.22%,粗沙占27.65%;青铜峡站细沙占55.19%,中沙占19.31%,粗沙占25.50%;石嘴山站细沙占40.84%,中沙占19.78%,粗沙占39.38%。其中下河沿、青铜峡测站非汛期与汛期悬移质组成相近,石嘴山站非汛期粗沙比重较汛期增加,细沙比重减小,中沙比重不变。但总体来看,黄河宁夏段全年悬移质组成沿程比较稳定。

2.3 流域计算与结果分析

图7为流域出口断面流量、输沙率模型计算

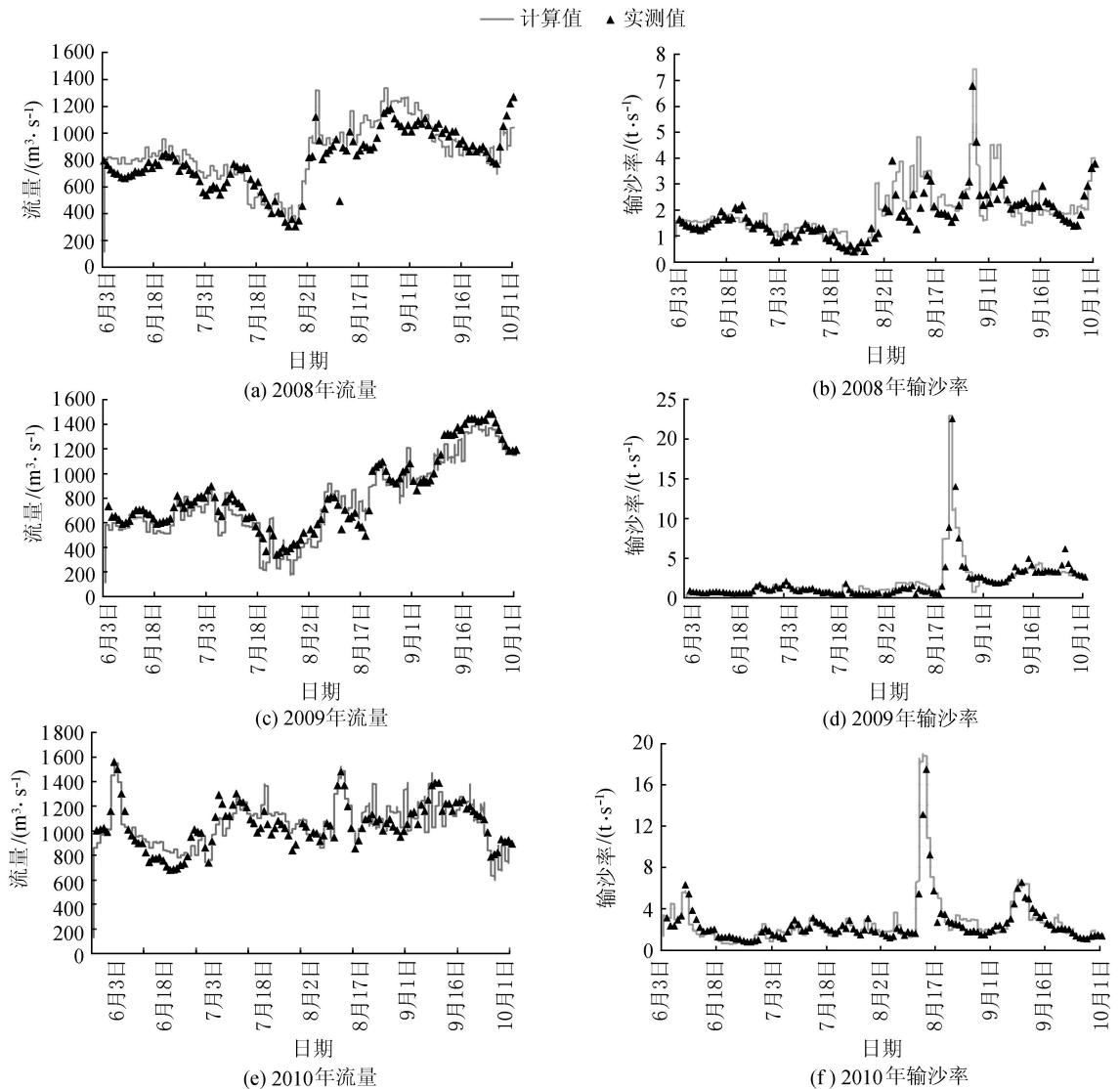


图7 流域出口断面流量、输沙率模型计算结果与实测值的对比

结果与实测值的对比分析情况。由图 7 可知,模拟结果与实际情况基本吻合,计算值与实测值的相对误差不超过 6%,能较好地满足模拟精度的要求。模拟结果较好地重现了黄河宁夏段流域的降雨-径流-输沙过程,说明 DWSM 对该区域水沙规律的模拟是适用的,表明黄河宁夏段的来水来沙过程是可以预报估计的。

图 8 为流域出入口断面流量、输沙率模型计算结果与实测值的对比分析情况。对比 2008—2010 年的石嘴山和下河沿的数据可以发现:石嘴山的流量过程和输沙率过程与下河沿的图形基本类似。由此可以推断,黄河宁夏段的水沙受到其上游的来水来沙影响很大。

根据已有资料,结合模型计算结果和上下游流量、输沙率的对比分析,可以发现:受汛期/非汛期影响,黄河宁蒙河段流域水沙年内分配不均,汛期(7—10 月)流量相对比较集中,输沙率较大,其他月

份水量较少,部分月份的输沙率甚至接近于零。由此可见,水沙年内分配比也不协调,输沙量主要集中在汛期。此外,水沙年际变化也很明显,输沙率年际波动较大。黄河水沙具有多变性和不重复性,在年与年、季与季以及地区之间来水都不同,且变化很大。而大多数用水部门(例如灌溉、供水、航运、发电等)都要求比较固定的用水数量和时间,它们的要求经常不能与天然来水情况完全相适应;并且黄河水沙在年内分配的不协调性,可能会导致河道的冲刷和淤积,输沙问题更不容忽视。为了解决水沙在时间上和空间上的重新分配问题,充分开发利用水资源,使之适应用水部门的要求,以及更好的协调黄河泥沙输移问题,可在黄河上游宁蒙河段适当位置兴建一些能调蓄洪水的综合利用水库,蓄洪补枯,蓄在水库的一部分洪水可在枯水期有计划地用于兴利需要,使天然来水能在时间上和空间上较好地满足用水部门以及河道输沙的要求。

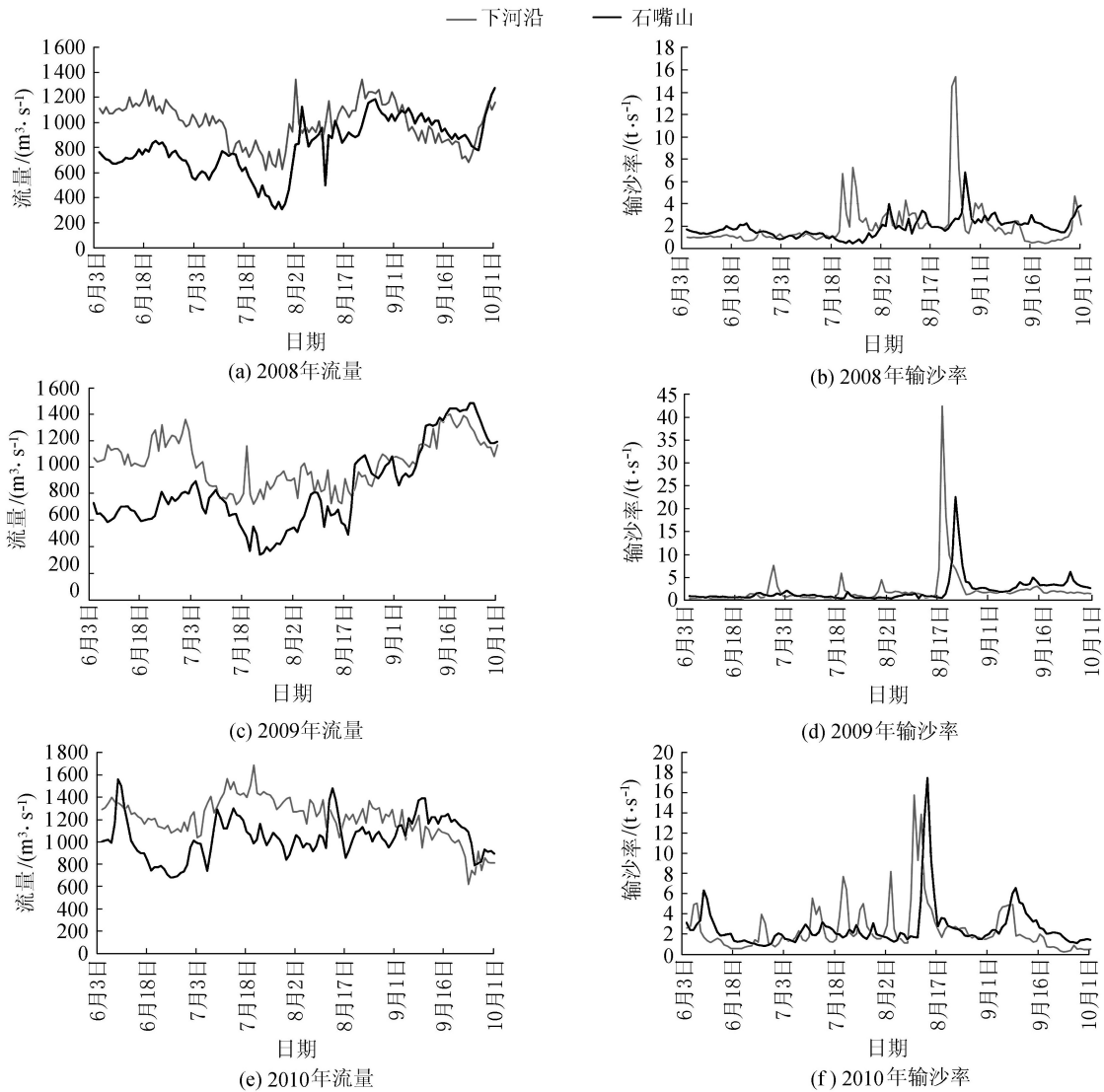


图 8 流域出入口断面流量、输沙率模型计算结果与实测值的对比分析

(下转第 74 页)

environment capacity of urban rivers status under sustainable development strategy in China[J]. Journal of Anhui Agri Sci,2012,40(9):5478-5480. (in Chinese))

[4] 孙俊峰. 浅谈中国排污许可证制度[J]. 环境科学导刊, 2011,30(5):18-19. (SUN Junfeng. Brief talk on system of emission permits in China [J]. Environmental Science Survey,2011,30(5):18-19. (in Chinese))

[5] 韩秋萍,许振成,张修玉,等. 浅析我国水环境管理体制问题以及对策建议[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集. 北京:中国环境科学出版社, 2011:2057-2060.

[6] 孟伟,张楠,张远,等. 流域水质目标管理技术研究(I):控制单元的总量控制技术[J]. 环境科学研究, 2007,20(4):1-8. (MENG Wei, ZHANG Nan, ZHANG Yuan, et al. The study on technique of basin water quality target management I: pollutant total amount control technique in control unit[J]. Research of Environmental Sciences, 2007,20(4):1-8. (in Chinese))

[7] 雷坤,孟伟,乔飞,等. 控制单元水质目标管理技术及应用案例研究[J]. 中国工程科学,2013,15(3):62-69. (LEI Kun, MENG Wei, QIAO Fei, et al. Study and application of the technology on water quality target management for control unit [J]. Engineering Science, 2013,15(3):62-69. (in Chinese))

[8] 袁艳聪. 强化排污许可证管理,优化环保许可机制[J]. 科技资讯, 2012(13):148-148. (YUAN Yancong. Strengthening discharge permit management and optimization mechanism of environmental permits [J]. Science & Technology Information,2012(13):148-148. (in Chinese))

[9] 罗吉,黄文娟,朱芳,等. 完善排污许可证制度,加强污染物排放控制[C]//中国法学会环境资源法学研究会. 资源节约型、环境友好型社会建设与环境资源法的热点问题研究:2006年全国环境资源法学研讨会论文集(四). 武汉:中国法学会环境资源法学研究会,2006:1263-1267. (收稿日期:2014-06-06 编辑:徐娟)

(上接第34页)

3 结 语

DWSM模型在结构上属于分布式松散耦合型水文模型,按对基本单元的划分可以认为是基于子流域的分布式模型,这类模型在近期有较好的发展前景^[7-9]。同时,由于模型计算单元顺序表的存在使得其计算效率和适用范围具有一定的局限性。随着存储技术的发展和大数据时代的到来,需要改进DWSM模型的算法和存储规则以提高计算效率,扩大其对诸如黄河宁夏段等大范围、复杂河网结构流域水沙规律研究的适用性。上述不足也是有待进一步改进的问题。

参考文献:

[1] 师长兴. 近五百多年来黄河宁蒙河段泥沙沉积量的变化分析[J]. 泥沙研究, 2010(5):19-25. (SHI Changxing. Changes in sediment accumulation in Ning-Meng reach of Yellow River over 500 years[J]. Journal of Sediment Research, 2010(5):19-25. (in Chinese))

[2] 王涛,杨开林,郭永鑫,等. 神经网络理论在黄河宁蒙河段冰情预报中的应用[J]. 水利学报, 2005,36(10):1204-1208. (WANG Tao, YANG Kailin, GUO Yongxin, et al. Application of artificial neural networks to forecasting of river ice condition [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005,36(10):1204-1208. (in Chinese))

[3] 张永平,李德贵,胡跃斌,等. 2012年汛期黄河上游洪水对宁蒙河道的影响[J]. 人民黄河, 2013,35(6):13-14. (ZHANG Yongping, LI Degui, HU Yuebin, et al. Impact on the river channel of Ningxia and Inner Mongolia Reach of the upper Yellow River in flood season of 2012

[J]. Yellow River, 2013,35(6):13-14. (in Chinese))

[4] BORAH D K, BERA M, XIA R J. Storm event flow and sediment simulations in agricultural watersheds using DWSM[J]. Transactions of the ASAE, 2004,47(5):1539-1559.

[5] BORAH D K, BERA M. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases[J]. Tran of the ASAE, 2003,46(6):1553-1566.

[6] 郑毅,方红卫,韩冬. DWSM模型产汇流模块的原理及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2008,6(3):28-31. (ZHENG Yi, FANG Hongwei, HAN Dong. Principle and application of runoff yield module of dynamic water simulation model (DWSM) [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008,6(3):28-31. (in Chinese))

[7] 芮孝芳,黄国如. 分布式水文模型的现状与未来[J]. 水利水电科技进展, 2004,24(2):55-58. (RUI Xiaofang, HUANG Guoru. The current situation and future of the distributed hydrologic models [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources 2004,24(2):55-58. (in Chinese))

[8] 张金存,芮孝芳. 分布式水文模型构建理论与方法述评[J]. 水科学进展, 2007,18(2):286-272. (ZHANG Jincun, RUI Xiaofang. Discussion of theory and methods for building a distributed hydrologic model[J]. Advances in Water Science, 2007,18(2):286-272. (in Chinese))

[9] 向霄,钟玲盈,王鲁梅. 非点源污染模型研究进展[J]. 上海交通大学学报:农业科学版, 2013,31(2):53-60. (XIANG Xiao, ZHONG Lingying, WANG Lumei. Review of non-point source pollution model [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2013,31(2):53-60. (in Chinese))

(收稿日期:2014-08-06 编辑:徐娟)