

基于数字流域的地表水资源模拟

彭顺风^{1,2}, 李凤生²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 ; 2. 水利部淮河水利委员会水文局, 安徽 蚌埠 233001)

摘要 简要讨论了数字流域的概念, 基于地理信息系统、遥感和数据库技术构建了数字淮河流域。根据其中的史灌河流域下垫面数据以及水文气象等时间序列数据, 利用美国农业部开发的 SWAT 模型软件包 AVSWAT, 构建了逐日的史灌河流域地表水资源评估模型。以 2003 年淮河水利委员会基于逐项还原法计算的史灌河流域地表水资源系列为“真值”, 对该模型进行率定和验证。结果表明, 模型成功地模拟了该流域的地表水资源系列, 可以应用于流域水资源系列的模拟计算。该模型的构建和应用表明了数字流域是现代化流域管理的有效手段, 展示了数字流域广阔的应用前景。

关键词 数字流域 ; SWAT 模型 ; 水资源模拟 ; 史灌河流域

中图分类号 :TV121⁺.7 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-6933(2009)02-0010-05

Modeling surface water resources based on digital basin

PENG Shun-feng^{1, 2}, LI Feng-sheng²

(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China* ; 2. *Hydrology Bureau of Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Bengbu 233001, China*)

Abstract The concept of the digital basin is briefly discussed. The digital Huaihe River Basin (HRB) was built based on the technologies of GIS, remote sensing, and database. According to its land surface, hydrological, and meteorological data, a daily surface water resources assessment model of the Shiguan River Basin (SRB), a sub-basin of HRB, was built based on the SWAT model software package AVSWAT, developed by the U. S. Department of Agriculture. The SRB model was calibrated and verified with SRB's surface water resources series, which were calculated by the Huaihe River Commission in 2003 with the method of investigating water withdrawal and return series for every water use sector. The results show that the SRB model simulated its surface water resources series successfully, and could be applied to the surface water resources series simulation for a basin. The construction and application of the digital water resources assessment model indicates that a digital basin is an effective measure for modern watershed management and has a wide range of application prospects.

Key words digital basin ; SWAT model ; water resources simulation ; Shiguan River Basin

随着地理信息系统和遥感技术的快速发展, 数字流域技术也得到了较快的发展。目前, 借助于卫星遥感技术, 人类已经实现了对地球全方位多要素的连续观测, 所获得的多种空间分辨率的遥感影像, 如 MODIS、LandSat-TM、SPOT、IKONOS 和 QuickBird 等, 为数字流域的研究提供了丰富的信息源^[1-2]。而在地形图数字化、空间数据的管理、空间分析、数字

地形模型构建等方面, GIS 则为数字流域研究提供了功能强大的开发和应用平台^[3]。近年来, 在 GIS 和遥感技术的推动下, 基于数字流域的陆地水文过程模拟成为水文领域的研究热点^[4-7]。目前, 较多的研究集中在数字高程模型构建、流水网的提取、子流域的划分、汇流过程计算等方面^[8-10], 而基于数字流域的产流方法研究还很不充分。目前, 产流过程计

基金项目 水利部“海河流域管理数字化及其应用研究”项目(水规划[2001]242 号)

作者简介 彭顺风(1969—), 男, 安徽五河人, 高级工程师, 博士研究生, 研究方向为水文学及水资源。E-mail : Pengsf@hrc.gov.cn

算大多采用经验性方法。有关参数,如植被截留能力、土壤张力水容量等,多依靠实测资料率定。虽然分布式水文模型在产流和汇流计算方面都具备了较为完备的理论基础,但是这类模型构建需要有空间分布和观测频次密集的水文观测资料,以及高精度的下垫面资料作为支撑。而这些资料要求往往超出了目前常规水文要素观测的内容与精度,也超出了下垫面信息采集的能力,这是当前分布式水文模型的一个难题^[1]。本文从流域信息资源收集整理和加工出发,构建多源数据互相补充的数字流域平台;然后以该平台为基础,基于 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型软件包 AVSWAT,建立了数字水资源评估模型 并以史灌河流域为研究对象,把该模型模拟结果和传统的逐项还原法计算结果进行比较,以分析模型的有效性。

1 数字流域构建

数字流域的内涵十分丰富,表现方式更是多种多样。对于不同的研究流域和不同的开发目标,其构建的技术路线和数据内容也不同。从流域管理的角度理解,数字流域是以数字化方式表达实体流域空间信息以及与之相关联的时间序列信息的软件平台,为流域防洪、水资源开发利用和水土保持等流域管理业务提供数据支持和二次开发服务。本文基于现代流域管理需求构建数字淮河流域平台。该平台基于 Oracle + ArcSDE 模式建立了空间数据存储和管理系统,基于 ArcGIS Engine 软件开发了应用界面,为用户提供数据导入和导出、数据增加删除和改动、数据格式转换、空间数据坐标体系和高程体系转换、数据查询、空间数据分析、元数据库管理、地图制版和打印等服务功能。平台中空间数据主要包括 1:25 万、1:5 万、1:5000、1:2000 等多种比例尺的多要素数字线化图 (DLG) 及其生成的数字高程模型 (DEM),以及地质构造、水文地质、植被分布、土壤分布、土地利用分布、水利工程分布、蓄滞洪区分布、水文气象观测站点分布等专题数字地图。其遥感信息包括全流域 ETM、重点防洪地区 SPOT5 和 QuickBird 等卫星影像图。其时间序列数据主要包括 1949 年以来淮河流域气象、水文、水资源、工程运行管理等方面观测和调查数据。所有的空间信息都在入数据库前进行了坐标体系和高程体系转换,统一到了 1980 西安坐标系和 1985 国家高程基准。遥感影像都经过了几何校正和正射校正。时间序列数据都与相应的空间位置建立了关联关系。该数字流域平台既可为流域管理提供一个集成的信息资源管理与开发环境,又可为数字流域水文模型、土壤侵蚀模型等

专业模型的研究和开发提供坚实的数据基础。

2 水资源评估模型构建

流域水资源管理和优化配置是现代流域管理中最重要的工作之一,而区域水资源系列计算又是该项工作的基础。基于产汇流物理过程的数字水资源评估模型可以计算水资源的时空分布状况,模拟各种水资源配置方案所产生的效果,因此,在水资源优化配置方面起到了决策支持的作用。本文利用 SWAT 模型构建水资源评估模型。SWAT 模型是美国农业部农业研究所历时 30 多年开发的分布式流域水文模型,已经被有效地应用于全世界各地的流域水资源评估和非点源污染物运动模拟中。应用 SWAT 构建流域水文模型时,整个流域根据设定的面积阈值划分成若干个子流域,每个子流域又划分为若干个水文响应单元 (HRU)。每个 HRU 具有相同的土壤类型、土地利用类型和农业管理方式,从而保证每个 HRU 内下垫面产流条件大致相同^[12]。模型输入的数据包括地形、土壤、土地利用等空间信息,以及气象、水文、水资源、水质、土壤侵蚀等方面的时间序列数据。模型的输出包括各子流域出口的径流、泥沙和污染物输移过程。关于模型的详细介绍参见文献 [13]。这里使用的 SWAT 模型为基于 ArcView3.x 开发的软件包 AVSWAT。

本文以史灌河蒋家集水文站以上流域为研究对象来构建水资源评估模型。史灌河流域位于淮河南部山丘区,流域面积 5 930 km²,河流主要有源于大别山北麓的史河和灌河两大支流,自南向北在蒋集汇合后流向淮河 (见图 1)。该流域地处亚热带湿润气候区,多年年均降雨量约为 1 100 mm。流域上游为山区,土壤主要有黄棕壤土和粗骨土,植被以森林为

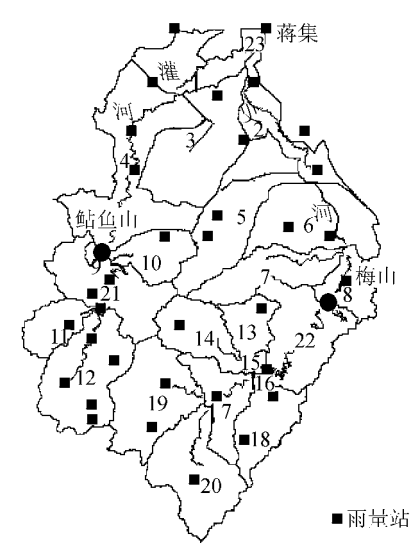


图 1 AVSWAT 生成的流水网和划分的子流域

主。出山口径流分别由梅山和鲇鱼山两座大型水库控制,其集水面积分别为 1 970 km² 和 924 km²。两水库以下为丘陵、垄岗和河谷平原,土壤主要有水稻土和潮土,植被以栽培农作物为主。该流域是淮河流域最重要的水源地之一。

a. 基于 DEM 生成流域边界和流水网,并进行子流域的划分。先基于数字淮河流域平台,输出史灌河流域 ArcGIS Grid 格式的 DEM 和 DLG。然后,利用 AVSWAT 的 DEM 处理功能,检查 DEM 每个网格高程值,消除所有的凹陷点,使得所有网格的高程值均大于或等于流域出口点,以保证从 DEM 数据中提取的流域自然水系是连续的^[14]。这里,AVSWAT 以 300 km² 为集水面积阈值,生成了史灌河流域流域边界和流水网。在添加了蒋家集、鲇鱼山、梅山 3 个节点后,AVSWAT 把史灌河流域划分成了 23 个子流域(见图 1)。

b. 基于数字淮河流域平台输出史灌河流域及其周边的土壤分布和土地利用专题图,并输入 AVSWAT 中。AVSWAT 根据其生成的流域边界,剪切出史灌河流域的土壤和土地利用专题图。该流域土壤被划分为 8 类,其中面积分布最广的主要有水稻土、黄棕壤、粗骨土、石质土和淡潮土,分别占流域总面积的 34.6%、26.9%、19.5%、7.6% 和 6.0%,其余为零星分布的棕壤土、紫色土和黄褐土(见图 2)。SWAT 模型根据土壤的稳定下渗能力、土层平均渗透度、岩床埋深等参数,把土壤划分为 A、B、C、D 水文组,分别表示渗透能力强、中等、弱和很弱,具体划分标准参见参考文献^[15]。这里把石质土和粗骨土划分为 A 组,紫色土为 B 组,水稻土和淡潮土为 C 组,黄棕壤、棕壤和其余土壤为 D 组。SWAT 模型中对于水资源量计算影响较大的土壤参数主要有根系层最大深度(SOL_ZMX)、最大可利用水量(SOL_AWC)(即田间持水量与凋萎含水量差值)、饱和渗透

系数(SOL_K)等^[15]。史灌河流域的土地利用类型划分为 7 类,面积较大的有水田、旱地和森林 3 种类型,分别占总面积的 34.5%、13.4% 和 51.2%,另外有零星分布的果园和草皮草坡(图 3)。SWAT 模型中对于水资源量计算影响较大的土地利用方面的参数主要有各种植被的最大可能叶面积指数(BLAI)、冠层最大高度(CHTMAX)、根系最大深度(RDMX)、叶气孔最大水汽传导度(GSI)等^[15]。土壤和土地利用相关的参数都从 SWAT 模型数据库中选。

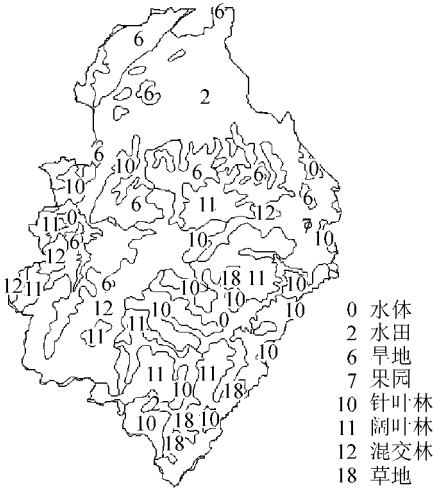


图 3 史灌河流域土地利用分布

c. 基于 AVSWAT 的图层叠加分析功能^[3],对子流域、土壤分布和土地利用 3 个图层进行叠加分析,把各子流域划分成若干土地利用单元,再把各土地利用单元划分为若干土壤类型单元。每种土壤类型单元在空间上不一定是连续的,但都具有相同的下垫面条件,即成为 HRU。为了避免出现大量的面积很小的 HRU,在划分 HRU 时设了两个阈值进行控制 ①一个子流域内一种土地利用类型占该子流域的面积比例,超过 10% 的土地利用单元保留,其余合并到相邻较大的单元中去;②一个土地利用单元内的一种土壤类型占该单元的面积比例,超过 10% 的土壤类型单元保留,其余合并到相邻较大的单元中去。这样,史灌河流域被分成了 115 个 HRU。至此,水资源评估模型的框架就建立起来了。

d. 水文气象等时间序列资料的输入。先利用数字淮河流域平台空间查询功能,选择史灌河流域及其周边有 1995 ~ 2003 年逐日资料的站点。这里共选择了 35 处雨量站点(图 1),平均每处雨量站点控制面积为 169 km²。然后基于 AVSWAT 的资料输入界面,把这些站点的空间信息及其相关联的逐日降水量资料、逐日最高和最低气温输入到 SWAT 模型中。这样,模型就可以计算各 HRU 的逐日地表水资源量了。模型中蒸发能力的计算选用 Priestley-Taylor 方法,径流量计算选用美国农业部水土保持



图 2 史灌河流域土壤分布

局(Soil Conservation Service,简称“SCS”)的SCS 编号曲线法(SCS Curve Number Method),河道洪水演进计算选用变化槽蓄法(Variable Storage Routing Method)^[13]。

3 模型率定和验证

传统的逐项还原法计算的水资源系列一直在实际业务中使用。因此,这里也以该方法计算的地表水资源系列为“真值”,来检验水资源评估模型的有效性。逐项还原法计算公式为:

$$W_{nat} = W_{mea} + W_{agr} + W_{ind} + W_{dom} + W_{div} + \Delta W_{res} \tag{1}$$

式中: W_{nat} 为天然地表水资源量; W_{mea} 为水文站实测径流量; W_{agr} 为农业灌溉耗损量; W_{ind} 为工业用水耗损量; W_{dom} 为城镇生活用水耗损量; W_{div} 为跨流域(或跨区间)引出水(引入为负); ΔW_{res} 为大中型水库蓄水增加量(减少为负)。

基于逐项还原法,淮河水利委员会在2003 年对梅山以上、鲇鱼山以上和这两水库以下至蒋集(简称“梅鲇蒋区间”)3 个子流域,分别计算了其1956 ~ 2000 年逐月的地表水资源系列(“真值”)。

这里选取史灌河流域逐日水文气象观测资料齐全的1995 ~ 2003 年为模拟期,其中1995 ~ 1998 年为率定期,1999 ~ 2000 年为验证期。先利用模型界面的资料输入功能,把上述观测资料以及模型自带的辐射、风速、湿度等模拟资料一起输入 AVSWAT,然后运行 AVSWAT,计算出各 HRU 逐日的地表水资源系列。为了把模型计算结果与逐项还原法计算系列进行比较,模型输出的系列在时间上以月为时段进行累加,在空间上分梅山子流域、鲇鱼山子流域和梅鲇蒋区间3 片进行合计。

确定性系数(R^2)和效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency,简称NSE)^[16]被用来衡量模拟系列与“真值”系列的接近程度。通过调整模型中土地利用的SCS 曲线编号(CN)、土壤可利用水容量(SOL_AWC)等参数,使得率定期内模型计算的地表水资源总量、过程与“真值”接近,使得 R^2 和NSE 接近于1。率定后, R^2 和NSE 在梅山子流域都为0.94,在鲇鱼山子流域分别为0.92、0.91,在梅鲇蒋区间都为0.70。3 片率定期的模拟系列与“真值”系列比较分别见图4、5、6 中1998 年及其以前部分。

把率定后的模型应用于1999 ~ 2003 年,以验证模型的有效性。把其中1998 ~ 2000 年的模拟逐月系列与同期“真值”系列进行比较(见图4、5、6 中1999 年及其以后部分),验证期内 R^2 和NSE 在梅山

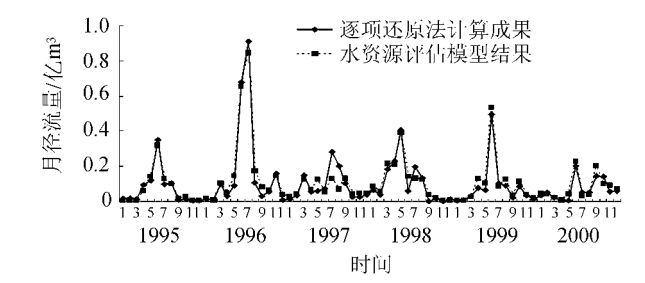


图4 梅山流域模拟的与“真值”的径流系列

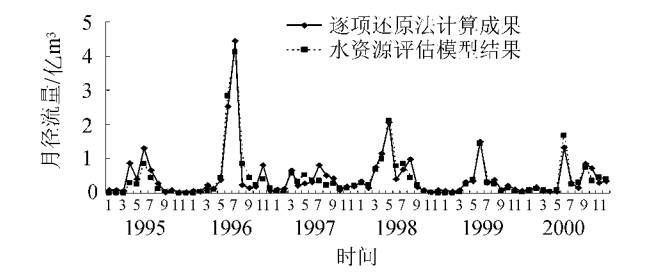


图5 鲇鱼山流域模拟的与“真值”的径流系列

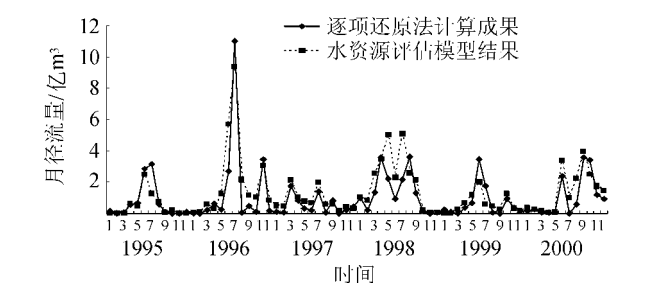


图6 梅鲇蒋区间模拟系列与逐项还原系列比较
流域分别为0.95、0.93,在鲇鱼山流域分别为0.91、0.89,在梅鲇蒋区间分别为0.63、0.65。

从模拟成果可以看出,在梅山和鲇鱼山两山区子流域,模拟精度很高。但在梅鲇蒋区间,模型模拟效果稍差。这主要是因为该片人类活动影响较大,土地利用复杂多变,跨流域调水频繁,灌溉系统对下垫面水循环过程影响频繁。因此,根据目前掌握的下垫面资料,模型还不能准确反映下垫面的真实情况。这使得模型在HRU 的划分、参数的设置等方面不够准确。但总体上看,模型反映了史灌河流域3 片的逐月水资源系列的趋势。同时,模型在率定期和验证期精度相当,比较稳定。因此,该模型能用来评估史灌河流域逐月的水资源系列。但在实际的应用中,需要对于流域土壤类型分布、土地利用分布及其变化过程、跨流域调水的地点及水量进出过程等做更加深入的调查,才能较为准确地设置模型参数,提高模拟精度。

4 结 论

数字淮河流域平台为流域水资源评估模型的构建、率定和验证提供了坚实的数据基础,大大地提高了模型构建的效率。从模型的率定和验证结果可以

看出, SWAT 模型在史灌河流域具有较好的适应性,较好地描述了流域的产汇流过程。因此,该模型可以应用于流域地表水资源系列的模拟。与逐项还原法计算结果相比,模型模拟的结果可以更加精细地描述水资源量的时空分布,这样更有利于水土资源的综合规划和利用。同时,和传统的逐项还原法相比,模型大大地提高了地表水资源系列计算效率。由于该模型产汇流过程依赖于明确的土壤类型、土地利用等下垫面条件,SCS 曲线编号(CN)和土壤可利用水容量(SOL_AWC)等模型参数也具有明确的物理意义,因此,模型可以移用到具有相似下垫面条件的流域上。这对于缺乏历史水文观测资料地区的水资源评估具有现实的意义。随着流域社会经济的发展,流域的城市化率、水利工程布局、农业种植结构等影响下垫面条件的因素都将发生很大变化。基于数字流域的水资源评估模型,可以很容易地适应这些变化,从而为预测各种社会经济发展条件下的流域水资源系列提供了有效的工具。

史灌河流域水资源评估模型的成功构建和应用,从一个侧面证明了数字流域平台是现代流域管理的有效手段。该平台以地理信息系统、遥感和数据库技术为基础,解决了多源海量数据的标准化处理、输入输出、管理维护和共享应用等问题,为流域管理提供了丰富的下垫面信息,以及气象、水文、水资源、流域社会经济发展状况等时间序列信息,为各种专业模型的开发应用提供了支撑平台。随着社会经济的发展,人们对防洪减灾、水资源保护、水土保持等现代流域管理工作的要求越来越高,在这些要求的推动下,对于数字流域的研究将会越来越深入,其在现代流域管理中的作用也将越来越大。

参考文献：

[1] 方宗义. 对地观测卫星在全球变化中的应用——全球变化热门话题[M]. 北京:气象出版社,2003:29-32.
[2] 梅新安,彭望琰,秦其明,等. 遥感导论[M]. 北京:高等教育出版社,2001:155-175.
[3] 乌伦,刘瑜,张晶. 地理信息系统——原理、方法和应用[M]. 北京:科学出版社,2001:115-216,173-175.
[4] 熊立华,郭生练. 分布式流域水文模型——水科学前沿学术丛书[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
[5] 张行南,井立阳,叶丽华,等. 基于数字高程模型的水文模拟对比分析[J]. 水利学报,2005,36(6):759-763.
[6] 刘家宏,王光谦,王开. 数字流域研究综述[J]. 水利学报,2006,37(2):240-246.
[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):35-58.
[8] 张行南,叶丽华,井立阳. 基于 DEM 的流域流水网对比分析[J]. 水利水电科技进展,2004,24(3):1-4.

[9] 叶爱中,夏军,王纲胜,等. 基于数字高程模型的河网提取及子流域生成[J]. 水利学报,2005,36(5):531-537.
[10] 杨传国,余钟波,林朝晖,等. 大尺度分布式水文模型数字流域提取方法研究[J]. 地理科学进展,2007,26(1):68-76.
[11] 刘昌明,夏军,郭生练,等. 黄河流域分布式水文模型初步研究与进展[J]. 水科学进展,2004,15(4):495-500.
[12] GASSMAN P W, REYES M R, GREEN C H, et al. The soil and water assessment tool: historical development, application, and future research directions [J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007, 50(4):1211-1250.
[13] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005 [R]. Temple, 2005:128-129, 95-102, 367-368.
[14] 李昌峰,冯学智,赵锐. 流域水系自动提取的方法和应用[J]. 湖泊科学,2003,15(3):205-212.
[15] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool input/output file documentation version 2005 [R]. Temple, 2005:287-289, 287-296, 177-199.
[16] KRAUSE P, BOYLE D P, BÄSE F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment [J]. Advances in Geosciences, 2005(5):89-97.

(收稿日期:2007-10-10 编辑:徐娟)

《淮北市中小河流治理规划》
获安徽省水利厅批准实施

淮北市境内有中小河流 8 条,均未进行过全面、系统治理,除部分河段防洪能力达到 20 年一遇外,其他中小河流排涝能力大多不足 3 年一遇,防洪能力不足 10 年一遇,防洪排涝能力低,洪涝灾害频繁,部分河段水污染严重,水生态环境恶化,已造成河流基本功能衰退,影响和制约了当地经济和社会的可持续发展。为此,淮北市水务部门组织技术人员编制完成了《淮北市中小河流治理规划》,规划范围为淮北市境内包浍河、濉河、南沱河、王引河、洪碱河、萧濉新河、龙岱河、闸河等 8 条中小河流,流域总面积 9 822 km²,其中淮北市境内流域面积 2 650 km²,河道总长 325 km。规划基准年为 2007 年,近期水平年 2011 年。河道治理标准为除涝 5 年一遇,防洪 20 年一遇,沟口涵闸 5 年一遇除涝、20 年一遇防洪设计,干流节制闸采用 20 年一遇流量设计。萧濉新河、闸河淮北市城区段防洪标准采用 50 年一遇,城市规划范围内龙岱河、城区大沟排涝标准采用 10 年一遇。

安徽省水利厅批准同意淮北市中小河流采用河道疏浚与堤防建设相结合的防洪总体方案和工程措施,分期实施中小河流治理,近期优先实施包浍河临涣闸以上河段、龙岱河、濉河、王引河河理工程。批复要求淮北市按照轻重缓急的原则,开展前期工作,积极筹措资金,加快中小河道治理建设,提高淮北市的中小河流防洪除涝能力,保障淮北经济社会可持续发展。

(淮北市水务局 李锋供稿)