

淤地坝对流域水沙影响模拟研究

郭晖^{1,3}, 钟凌², 郭利霞², 张洪江¹, 陈向东³

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046; 3. 中国水权交易所, 北京 100053)

摘要: 使用SWAT模型,结合淤地坝特点对模型自带的水库模型进行修正来设置淤地坝模块,研究淤地坝对流域径流和输沙的影响,并在内蒙古十大孔兑之一的西柳沟流域进行模拟和验证。以1980-1990年为率定期,2006-2015年为验证期,龙头拐水文站模拟径流量和输沙量与实测值拟合较好,线性拟合系数 R^2 和纳什效率系数 E_{NS} 均超过0.6,说明SWAT模型中的水库模型可用于淤地坝模拟。结果表明:其他参数不变的情况下,淤地坝对流域的径流量有一定影响,能够拦截一部分径流量,对流域输沙量的影响巨大,减沙效果明显;淤地坝在一定程度上能影响流域的汇流过程,使得汛期后的月份中出现模拟径流量大于实测径流量的现象;相较于经验公式法,SWAT模型能够提高淤地坝对流域水沙影响的模拟精度;为更好地利用SWAT模型模拟淤地坝对流域径流和输沙的影响,淤地坝模块仍有待改进。

关键词: 径流量; 输沙量; 淤地坝; SWAT模型; 西柳沟流域

中图分类号:TV141⁺.3

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)02-0124-011

Simulation on impacts of check dams on runoff and sediment load in a watershed

GUO Hui^{1,3}, ZHONG Ling², GUO Lixia², ZHANG Hongjiang¹, CHEN Xiangdong³

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 3. China Water Exchange Co., Ltd., Beijing 100053, China)

Abstract: In SWAT model, the built-in reservoir model was modified based on the characteristics of check dams to set up the check dam module, with which the impacts of check dams on runoff and sediment load in a watershed was studied, and then the model was verified in the simulation of Xiliugou Basin which is one of the ten tributaries in Inner Mongolia. Taking 1980-1990 as the calibration period and 2006-2015 as the verification period, the simulated runoff and sediment load of Longtougouai station fit well with the observed value, and the linear fitting coefficient (R^2) and the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (E_{NS}) were both greater than 0.6, which indicates that the built-in reservoir mode can be used for the simulation of check dams. The simulation results show that when the other parameters remain unchanged, the check dam has a certain impact on the runoff and can intercept part of it, moreover the check dam can greatly reduce the sediment load. Check dams can affect the confluence process of a basin to some extent, making the simulated runoff larger than the observed value in the months after the flood season. Compared with the empirical formula method, SWAT model can improve the accuracy of the simulation on impacts of check dams on runoff and sediment load in a watershed. In order to make better use of SWAT model for these simulations, the check dam module needs to be further improved.

Key words: runoff; sediment load; check dam; SWAT model; Xiliugou Basin

收稿日期:2020-05-13; 修回日期:2020-09-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0408603)

作者简介:郭晖(1973-),男,湖南涟源人,博士,高级工程师,研究方向为流域综合治理。

通讯作者:张洪江(1955-),男,河北易县人,博士,教授,博士生导师,研究方向为土壤侵蚀。

1 研究背景

淤地坝是在小流域沟道中修建的以滞洪、拦蓄泥沙和淤地造田为目的的水土保持工程设施,可使沟底比降变缓、洪水挟沙能力降低,在黄河上、中游水土流失严重的多沙粗沙区,特别是粗泥沙集中来源区已得到广泛采用。近几十年来,淤地坝在黄河上、中游水土流失治理中发挥了重要作用,通过滞洪拦沙,淤地坝可有效调节汛期高含沙洪水,从而减少入黄泥沙,同时还改善了当地的种植条件^[1-2]。相关研究显示,1970-2006年,黄河中游河龙区间(河口镇至龙门区间)通过修建淤地坝年均减洪、减沙量分别为 $2.217 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.958 \times 10^8 \text{ t}$,占同期水土保持措施年均总减洪、减沙量的35.09%和48.76%,年均可减少黄河下游淤积泥沙 $0.24 \times 10^8 \text{ t}$ ^[3-4]。淤地坝每淤成 1 hm^2 坝地,根据水土流失严重程度,可拦泥沙 $1.668 \times 10^4 \sim 7.284 \times 10^4 \text{ t}$ ^[5]。黄河流域水土流失区淤地坝建设在取得显著生态效益、社会效益和经济效益的同时也存在一些问题:一是受经济技术条件限制,现有的部分淤地坝设计标准较低、建设质量控制不严、运行管理粗放、险情抢护困难,遇到特大暴雨常出现坝体水毁甚至决口情况,给下游人民生命财产造成损失^[6];二是淤地坝具有一定的设计使用年限,一般不超过30年,当淤地坝淤满或老化失修严重时,其滞洪拦沙作用将丧失或明显下降,需要在流域内重新进行坝系规划和建设,方可继续发挥水土保持的功能^[7]。

淤地坝建设可使流域的下垫面发生变化,对流域径流量和输沙量产生显著影响,是对小流域进行水沙调控的重要措施之一。国内外常用的关于流域水沙调控的模拟方法主要有基于水文学和水动力学的泥沙侵蚀经验公式法和分布式水沙耦合模型法。国外开发可用于流域水沙模拟的分布式模型包括SWAT、AGNPS、ANSWERS、CREAMS、SHE、WEPP、GUEST、LISEM、EUROSEM、KINEROS等,国内开发的模型主要包括借鉴USLE方程建立的经验统计模型和依据不同流域实际建立的土壤侵蚀理论模型^[8-10]。以往对淤地坝减水减沙量计算一般采用“水保方法”或“水文方法”^[7],虽然能够满足实用的需要,但计算精度不高。此外,也有学者基于RUSLE模型对流域输沙开展模拟研究^[11],还有学者采用SHE模型模拟淤地坝系对流域水沙动力过程的调控作用^[4]。SWAT模型是美国农业部从20世纪90年代末开始开发的一种分布式水文模型,随着在众

多领域的成功应用以及开发者对其功能的不断开发与完善,SWAT模型现已发展成为一种重要的分布式流域水沙耦合模型,在流域水沙分析中得到广泛应用^[12-26]。淤地坝可以认为是一种小型的水库,基于SWAT模型自带的水库模型对淤地坝作用进行模拟,可以较为精确地模拟淤地坝对流域径流和输沙的影响,提高模拟精度^[26]。

本文以西柳沟流域为研究区域研究淤地坝对流域径流和输沙的影响,通过构建SWAT模型,选取1980-1990年和2006-2015年两个典型时间段,设置无淤地坝、现状淤地坝、现状淤地坝+规划新建拦沙坝等3种情景,对流域水沙进行模拟计算,为SWAT模型对淤地坝的模拟应用提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

西柳沟位于黄河上游下段内蒙古自治区鄂尔多斯市境内,发源于鄂尔多斯高原,向北穿越库布其沙漠,在包头市区对岸的昭君坟附近汇入黄河干流,是内蒙古境内直接注入黄河的十大孔兑之一。流域地理坐标为东经 $109^{\circ}24' \sim 110^{\circ}00'$ 、北纬 $39^{\circ}47' \sim 40^{\circ}30'$,面积为 $1\,356.3 \text{ km}^2$,形状南北狭长,海拔高程在 $1\,044 \sim 1\,547 \text{ m}$ 之间,整体地势南高北低,干流河道长度为 106.5 km ,平均比降为 0.36% ,水系分布呈羽毛状。从上游到下游依次为丘陵沟壑区(面积 876.3 km^2)、风沙区(面积 269.0 km^2)和冲积平原区(面积 211.0 km^2),各区域面积分别占流域总面积的 64.6% 、 19.8% 和 15.6% 。流域内有8条一级支沟,沟谷为宽浅式,沟道宽 $350 \sim 430 \text{ m}$,沟底比降 $0.5\% \sim 1.6\%$,面积大于 1 km^2 的支毛沟有308条,沟道平均比降为 $1.0\% \sim 3.6\%$,沟壑密度为 $3 \sim 4 \text{ km/km}^2$ 。流域内植被主要为草地和灌木,丘陵沟壑区植被覆盖程度很低,风沙区无植被覆盖,流域植被覆盖度为 $20\% \sim 40\%$ ^[27]。丘陵沟壑区土壤类型主要为栗钙土和粗骨性栗钙土,土层厚度 $10 \sim 30 \text{ cm}$,风沙区主要为风沙土。流域内土地利用方式主要为林地、草地、未利用土地及少量耕地^[28-29]。流域属于大陆性季风气候,全年干旱少雨,年降水量为 $240 \sim 360 \text{ mm}$,潜在蒸发量为 $2\,200 \text{ mm}$ 左右,降水主要以暴雨形式集中于汛期7-9月。流域地处黄河内蒙古河段水风复合侵蚀区,水土保持分区属于黄土丘陵区第一副区,生态环境脆弱,土壤侵蚀程度高,水土流失面积达 $1\,272.50 \text{ km}^2$,占流域总面积的 93.8% ,风蚀、水蚀交替发生,并伴有重力侵

蚀^[30-33]。丘陵沟壑区是以水力侵蚀和重力侵蚀为主的重度土壤侵蚀区,年均侵蚀模数为 8 500 t/(km²·a),风沙区属于中度风力侵蚀区,年均侵蚀模数为 2 500 t/(km²·a),冲积平原区土壤侵蚀轻微^[34]。在泥沙组成上,丘陵沟壑区粒径 $d > 0.05$ mm 和 $d > 0.1$ mm 的粗沙比例分别为 46.5% 和 36.1%,风沙区分别为 99.5% 和 91.9%^[28]。截至 2017 年底,西柳沟流域累计治理水土流失面积 357.69 km²,治理程度达到 28.11%。表 1 为西柳沟流域水土流失现状统计表。

表 1 西柳沟流域水土流失现状统计表

土壤侵蚀强度	面积/km ²	占比/%
轻度	210.30	16.53
中度	359.35	28.24
强烈	401.64	31.56
极强烈	280.89	22.07
剧烈	20.32	1.60
合计	1272.50	100

西柳沟流域内现有 1 个水文站龙头拐站和 3 个雨量站,表 2 为水文站和雨量站一览表。龙头拐水文站位于西柳沟干流中游接近下游处,该站以上流域集水面积为 1 157 km²,占整个流域集水面积的 85.3%,本研究区域为龙头拐水文站以上的流域范围。图 1 为研究区位置及水系、水文站、雨量站分布。

表 2 西柳沟水文站和雨量站一览表

站名	坐标		设立年份	备注
	东经	北纬		
龙头拐	109°47'	40°18'	1960	水文站、雨量站
高头窑	109°37'	40°03'	1964	雨量站
柴登壕	109°33'	39°53'	1965	雨量站

表 3 西柳沟现状淤地坝统计表

坝型	建成时间	数量	控制面积/km ²	坝高/m	总库容/10 ⁴ m ³	淤积库容/10 ⁴ m ³	可淤地面积/hm ²
骨干坝	1993-2013	41	196.13	10.00~17.64	4292.59	2162.34	539.30
中型坝	2006-2012	32	46.17	6.30~13.70	632.56	317.78	108.74
小型坝	2006-2010	40	24.87	5.20~9.80	208.26	79.57	43.74
合计		113	267.17		5133.41	2559.69	691.78

注:113 座现状坝仅有 1 座骨干坝修建于 1993 年,其余 112 座均修建于 2000 年以后。

(2)规划新建拦沙坝。根据水利部黄河水利委员会批复的《鄂尔多斯拦沙换水试点工程实施方案》,规划在西柳沟流域新建 79 座拦沙坝,拦沙量 $2\ 950.86 \times 10^4$ m³,拦沙坝工程由坝体、放水工程、溢洪道“三大

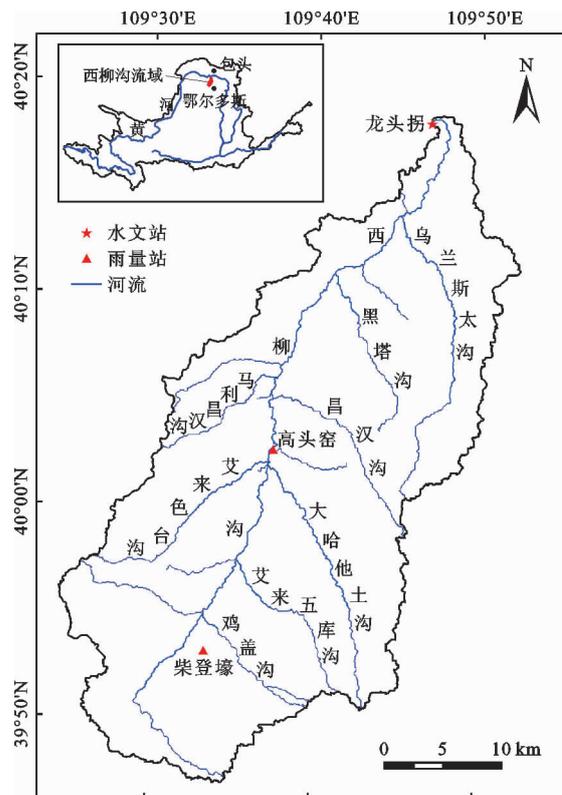


图 1 研究区位置及水系、水文站、雨量站分布

2.2 研究区淤地坝数据

(1)现状淤地坝。西柳沟大规模淤地坝建设始于 2000 年,至 2015 年底,西柳沟流域累计建成各类淤地坝 113 座。表 3 为现状淤地坝统计情况,其中骨干坝 41 座,中型坝 32 座,小型坝 40 座,总控制面积 267.17 km²,总库容 $5\ 133.41 \times 10^4$ m³,拦泥库容 $2\ 559.69 \times 10^4$ m³。现状淤地坝主要集中在乌兰斯太沟、大哈他土沟、黑塔沟和艾来五库 4 条小流域。现状淤地坝中,骨干坝和中型坝按“两大件”结构、小型坝按“一大件”结构设计建设。

件”组成。拦沙坝与淤地坝技术要求相一致,其主要功能为拦沙,以减少入黄泥沙量,兼具拦泥造田作用。本文将拦沙坝视同于淤地坝开展相关研究。表 4 和 5 为规划新建拦沙坝统计和分布情况。

2.3 基础数据及来源

本文构建 SWAT 模型所需数据包括研究区的 DEM 数字高程图、土壤类型数据、土地利用数据、气象数据(温度、风速、日照时数等)、实测水文数据和研究区淤地坝条件,表 6 为相关数据及来源。

表 4 西柳沟规划新建拦沙坝统计表

坝型	数量	控制面积/km ²	坝高/m	拦泥量/10 ⁴ t	可淤地面积/hm ²
中型坝	19	71.04	11.90 ~ 24.80	2445.56	340.42
小型坝	60	67.02	7.60 ~ 17.60	1538.14	332.22
合计	79	138.06		3983.70	672.64

图 2、3 和 4 分别为研究区地形地貌、土壤类型

表 6 SWAT 模型基础数据及来源

数据类型	比例与尺度	年份	数据来源
DEM 高程	30m × 30m	2009	地理空间数据云
水系			DEM 处理结果
土壤	1:1000000	2000	国家地球系统科学数据平台
土地利用	1:100000	2010	中国资源与环境数据库
气象	d	1980 - 2015	东胜气象站
水文	d	1980 - 1990 2006 - 2015	黄河水文资料
现状淤地坝		1993 - 2015	鄂尔多斯市水土保持局统计资料
规划新建拦沙坝		2018	水利部黄河水利委员会批复的《鄂尔多斯拦沙换水试点工程实施方案》

和土地利用分布。图 5 为研究区子流域划分。

表 5 西柳沟规划新建拦沙坝分布情况

位置	一级支沟名称	二/三级支沟数量	规划建坝数量
右岸	乌兰斯太沟	17/22	7
	黑塔沟	16/15	8
	昌汉沟	8/0	2
	大哈他土沟	32/89	5
	艾来五库沟	15/6	9
左岸	鸡盖沟	2/6	5
	马利昌汉沟	9/27	7
	艾来色台沟	10/25	15
	其他小支毛沟	29/53	21
	合计		381

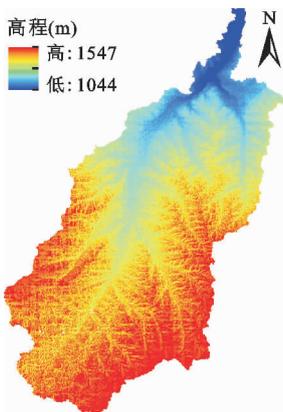


图 2 研究区地形地貌

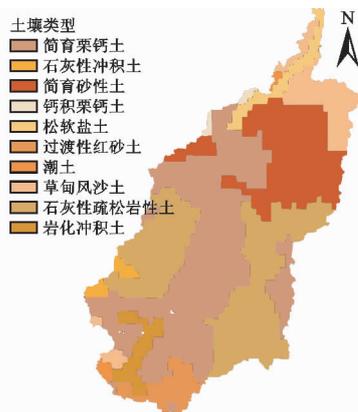


图 3 研究区土壤类型分布

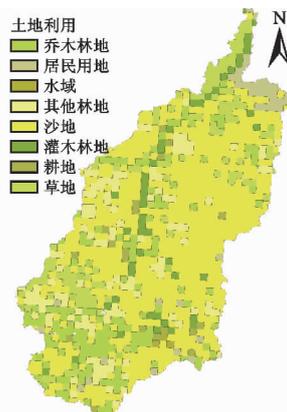


图 4 研究区土地利用分布

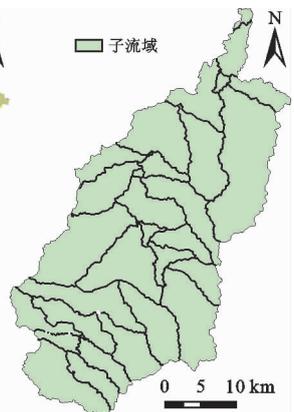


图 5 研究区子流域划分

2.4 研究方法

2.4.1 SWAT 模型 本文使用 ArcSWAT2009, 基于 DEM 将研究区划分为 30 个子流域(图 5), 每个子流域再细分为若干个水文响应单元(HRU)。采用 SCS 径流曲线方法计算地表径流, Penman - Monteith 方法计算潜在蒸发, Muskingum 方法计算河道汇流演算, 改进的 MUSLE 方程计算坡面侵蚀产沙, 模拟不同设定情景下

西柳沟流域 1980 - 1990 年和 2006 - 2015 年两个典型时间段逐月和年均径流量和输沙量。

2.4.2 淤地坝模块设置 SWAT 模型提供了一个基于储层模块的水库模型, 以评估储层运行对流域径流和输沙的影响。本文以 SWAT 模型自带的水库模型为基础, 结合淤地坝特点进行修正设置了淤地坝模块^[26]。

水库模型的水量平衡方程为:

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad (1)$$

式中: V 为一天结束时水库的蓄水量, m^3 ; V_{stored} 为一天开始时水库的蓄水量, m^3 ; V_{flowin} 和 $V_{flowout}$ 分别为每日流入水量和流出水量, m^3 ; V_{pcp} 为降落在水库水面上的日降水量, m^3 ; V_{evap} 为水库中水面每日的蒸发量, m^3 ; V_{seep} 为水库每日的渗水量, m^3 。

SWAT 模型有 3 种计算水库出流方法可供选择: 第 1 种方法是日实测出流、月实测出流法; 第 2 种方法是水库无人控制, 出流以设计库容控制, 将超过设计库容的水全部出流; 第 3 种方法是水库有人控制, 根据运行调度方案有目标地释放、控制流量^[35]。由于无研究区淤地坝来水和出水量资料, 本文以第 2 种方法计算水库出流量, 分析淤地坝对产流产沙的影响。在这种情况下, 所有的淤地坝都被视为“不受控制的水库”, 水库放水量的计算取决于水库的容积。如果水库水位介于紧急溢洪道容积和主溢洪道容积之间, 水库的泄流量计算如下:

$$V_{flowout} = V - V_{pr} \quad (V - V_{pr} < qrel \cdot 86400) \quad (2)$$

$$V_{flowout} = qrel \cdot 86400 \quad (V - V_{pr} > qrel \cdot 86400) \quad (3)$$

如果水库的水量超过紧急溢洪道容积, 水库的泄流量计算如下:

$$V_{flowout} = (V - V_{em}) + (V_{em} - V_{pr}) \quad (4)$$

$$(V_{em} - V_{pr} < qrel \cdot 86400)$$

$$V_{flowout} = (V - V_{em}) + qrel \cdot 86400 \quad (5)$$

$$(V_{em} - V_{pr} > qrel \cdot 86400)$$

式中: V 为水库库容, m^3 ; V_{pr} 为主溢洪道蓄水时的水库库容, m^3 ; V_{em} 为紧急溢洪道蓄水时的水库库容, m^3 ; $qrel$ 为主溢洪道平均每天的泄洪率, m^3/s 。

水库模块的输入参数为 RES_ESA (水库注满紧急溢洪道时的水库表面积)、RES_EVOL (将水库注满到紧急溢洪道所需的水量)、RES_PSA (水库注满时的水库表面积)、RES_PVOL (将水库注满主溢洪道所需的水量)。与普通水库不同, 淤地坝主要是为了拦截泥沙而不是长期蓄水, 通常没有流量和表面积数据。TIAN 等^[36]建立的淤地坝水面面积与蓄水量的关系, 与传统的野外调查方法相比, 取得了较好的精度, 其经验公式为:

$$V = 39.306 \times A^{0.712} \quad (6)$$

式中: V 为淤地坝蓄水量, $10^4 m^3$; A 为淤地坝水面面积, hm^2 。

根据公式(6)可以由淤地坝总蓄水量和估算水面面积确定 RES_EVOL 和 RES_ESA 的参数。考虑

到淤地坝的作用, RES_PVOL 和 RES_PSA 的参数设置为正常值的 70%。

2.4.3 淤地坝对流域径流和泥沙影响的计算方法

(1) 对流域径流量影响的计算方法。研究区内现有的 113 座现状淤地坝和规划新建的 79 座拦沙坝全部位于丘陵区, 为计算拦沙坝的减水作用, 本文将丘陵区分为新建拦沙坝区、现状淤地坝控制区和未控区, 通过计算不同类型拦沙坝调蓄后的径流量, 与现状淤地坝控制区和未控区的产流量叠加后, 作为丘陵区的产流量。最后, 将风沙区、平原区产流与丘陵区产流共同组成流域出口径流过程。图 6 为研究区淤地坝减水量计算方法。

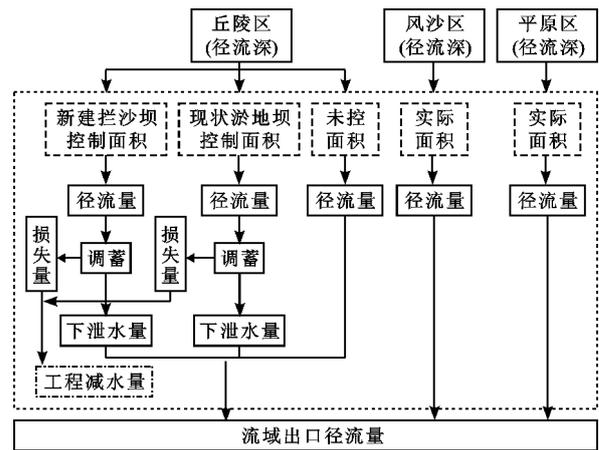


图6 研究区淤地坝减水量计算方法

(2) 对流域输沙量影响的计算方法。基于与流域径流计算相同的淤地坝条件, 本文将丘陵区也分为新建拦沙坝区、现状淤地坝控制区和未控区, 假设现状淤地坝全部为空坝且均按设计标准发挥作用, 以规划新建拦沙坝发挥效益为起始年份, 当流域累积来沙量小于淤地坝/拦沙坝设计拦沙量时, 淤地坝/拦沙坝发挥最大拦沙效益, 即坝控范围内的来沙全部被拦蓄; 当流域累积来沙量大于淤地坝/拦沙坝的设计拦沙量时, 淤地坝/拦沙坝按设计拦沙量拦截来沙, 未能拦截的来沙输送到下游, 并与未控区的产沙量和风沙区、平原区的产沙量共同构成流域的总产沙量。图 7 为研究区淤地坝减沙量计算方法。

由于淤地坝/拦沙坝位于丘陵区, 流域侵蚀产生的泥沙全部被拦蓄, 未能拦蓄的泥沙在向流域出口输移过程中会产生淤积, 因而流域出口输沙量并不等于侵蚀量。为此, 在计算过程中需要针对不同区域分别利用平均泥沙输移比进行修正。以往的研究显示, 黄土丘陵沟壑区平均泥沙输移比接近于 1^[37]。本文取丘陵区平均泥沙输移比为 0.96, 风沙

区和平原区则根据流域分区平均侵蚀模数和水土流失面积,计算各分区平均侵蚀产沙量,再依据分区侵蚀产沙量和流域平均输沙量,通过试算得到风沙区和平原区的平均泥沙输移比分别为 0.175 和 0.1。图 8 为研究区各分区泥沙输移比计算方法。

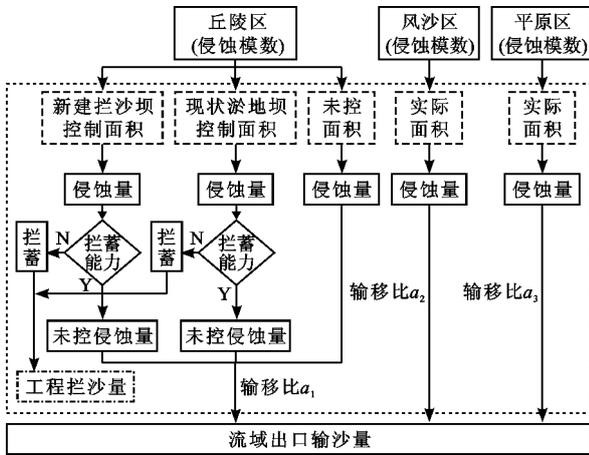


图 7 研究区淤地坝减沙量计算方法

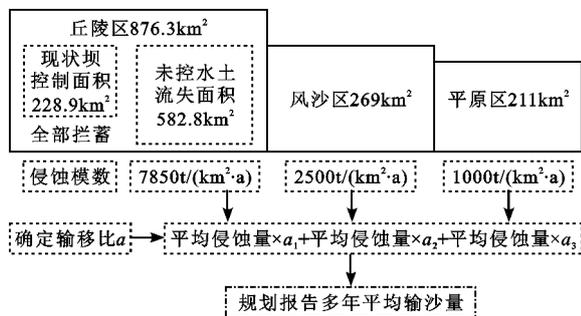


图 8 研究区各分区泥沙输移比计算方法

3 结果分析与讨论

3.1 模型率定与验证

本文模型率定和验证选用 SWAT 官网上提供的 SWAT-CUP 模块,算法选用其中的 PSO 粒子群优化算法^[38]。

利用龙头拐水文站实测的 1980 - 1990 年水文数据进行参数率定,用相对误差 (RE)、线性拟合系数 (R^2)、纳什效率系数 (E_{NS}) 控制参数率定精度,参数率定包含径流、泥沙水文要素等参数的率定。图 9 为模型率定期月尺度和年尺度径流量及输沙量模拟结果与实测值对比(图中以平均流量表示径流量大小,下同)。

在参数率定中,植被蒸发补偿系数 $EPCO.hru$ ($0 \sim 1$)、SCS 径流曲线数 $CN2.mgt$ ($35 \sim 98$) 以及地下水蒸发系数 $GW_REVAP.gw$ ($0.02 \sim 0.2$) 均为比较敏感的参数。

利用龙头拐水文站实测的 2006 - 2015 年水文数据对模型进行验证,图 10 为模型验证期月尺度和年尺度径流量及输沙量模拟结果与实测值对比。

根据图 9、10 的率定及验证结果,可得到月尺度和年尺度的率定期和验证期各模拟量的 RE 、 R^2 、 E_{NS} 值,如表 7 所示。

由表 7 可知,月尺度和年尺度的率定期和验证期各模拟量的 RE 均在 $\pm 15\%$ 之内, $R^2 \geq 0.6$, $E_{NS} \geq 0.6$, 满足模型使用要求,表明模型在研究区可以应用。

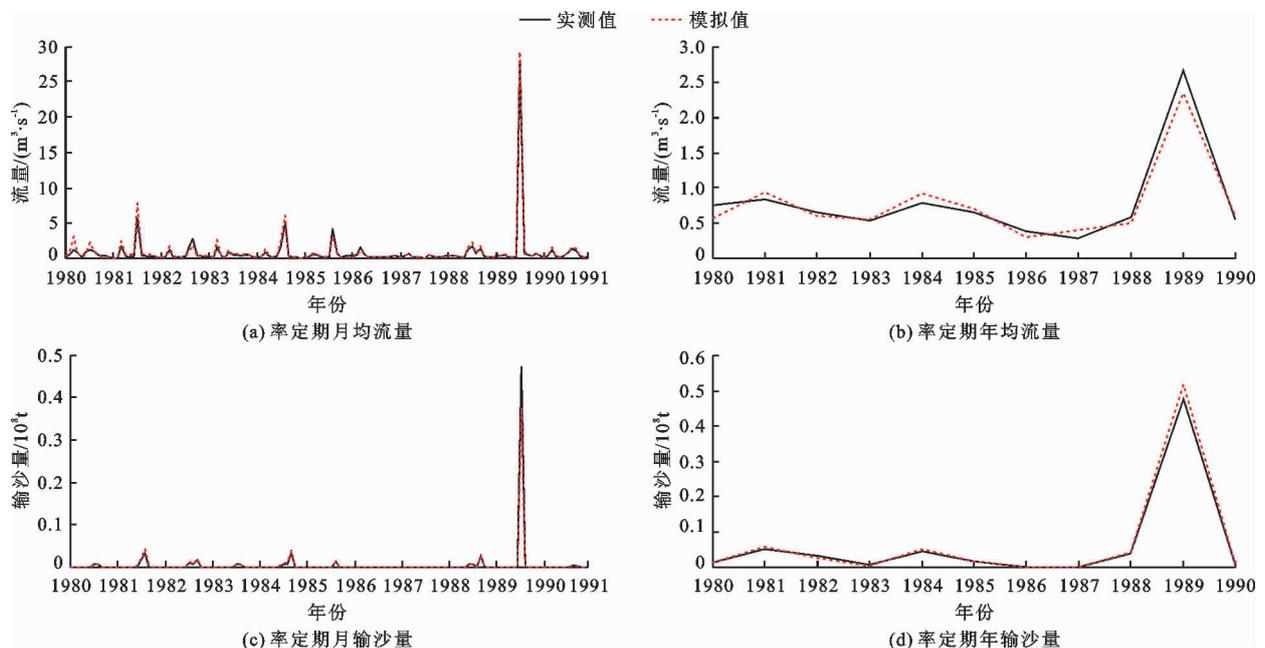


图 9 模型率定期 (1980 - 1990 年) 月尺度和年尺度平均径流量及输沙量模拟结果与实测值对比

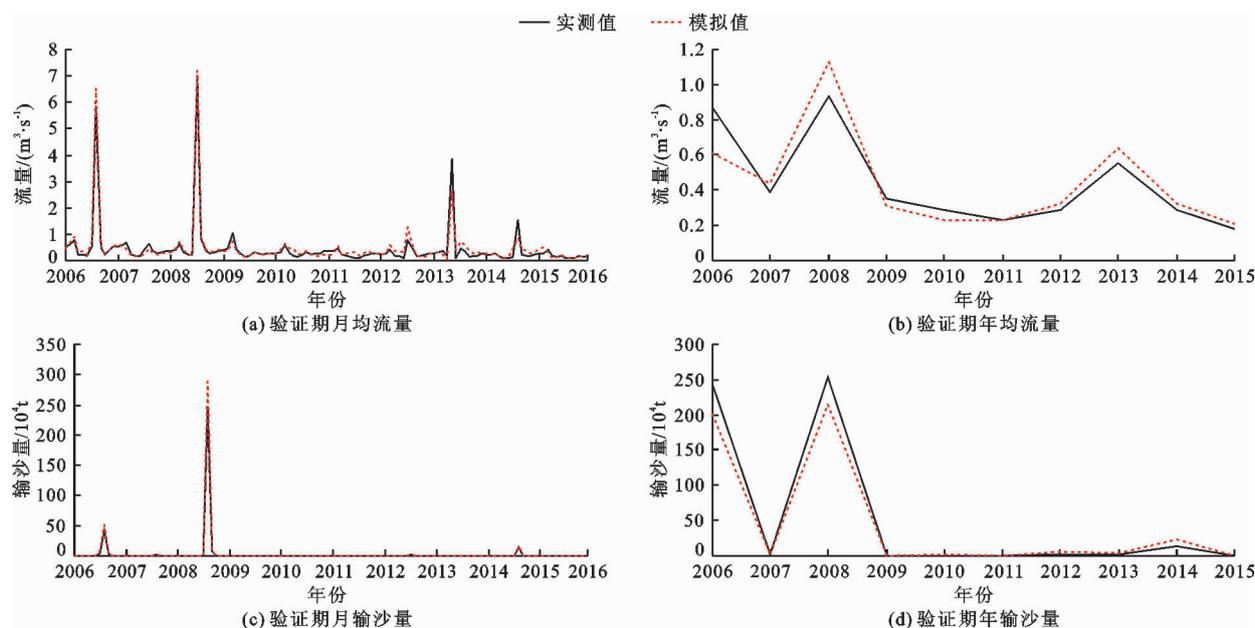


图10 模型验证期(2006-2015年)月尺度和年尺度平均径流量及输沙量模拟结果与实测值对比

表7 率定期和验证期各模拟量的 RE 、 R^2 、 E_{NS} 值

模拟量	模拟时期	$RE/\%$	R^2	E_{NS}
月径流量	率定期	9.88	0.75	0.70
	验证期	-9.09	0.67	0.68
年径流量	率定期	13.92	0.71	0.65
	验证期	-14.63	0.64	0.60
月输沙量	率定期	1.65	0.60	0.60
	验证期	-2.97	0.61	0.60
年输沙量	率定期	-9.17	0.66	0.63
	验证期	11.09	0.60	0.60

3.2 情景设置

本文以研究区淤地坝/拦沙坝作为输入条件,通过改变研究区内淤地坝/拦沙坝数量设置不同的情景,利用 SWAT 模型模拟不同情景下,1980-1990年和2006-2015年两个典型时间段龙头拐水文站处的月尺度和年尺度径流量和输沙量。设定的3种情景如下:

情景1:研究区未建设任何淤地坝。

情景2:研究区有表3所示的113座现状淤地坝。

情景3:研究区有表3所示的113座现状淤地坝和表4所示的79座规划新建拦沙坝。

3.3 结果分析

图11和12分别为1980-1990年、2006-2015年3种情景下月尺度和年尺度径流量模拟结果与实测值对比。

由图11可以看出:

在情景1下,研究区1980-1990年和2006-2015年两个时间段内均存在径流量年内出现双峰的现象,其原因是该地区冬季气温极低,直至3月份冰雪融化形成融雪径流峰值,6月份进入汛期,径流量逐渐增大,至8月份出现高强度降雨形成径流峰值;2006-2015年模拟的径流系列比实测系列起涨剧烈,其原因为,实测径流系列是受到已建淤地坝调蓄削峰滞洪作用影响后的径流过程。

在情景2下,研究区1980-1990年和2006-2015年两个时间段内均存在径流量年内出现双峰的现象,其原因同情景1;1980-1990年时间段模拟的径流量峰值小于实测径流量峰值,峰值过后的非汛期出现部分月份模拟径流量大于实测径流量的现象,其原因是淤地坝对降雨形成的径流有减水、调蓄及削减洪峰的作用,模型输入条件增加淤地坝在一定程度上改变了研究区的汇流过程。

在情景3下,研究区1980-1990年和2006-2015年两个时间段内均存在径流量年内出现双峰的现象,原因同情景1;两个时间段模拟的径流量峰值小于实测径流峰值,峰值过后的非汛期与前两个情景相似,同样出现部分月份模拟径流量大于实测径流量的现象,其原因与情景2的分析相同。

由图12可以看出:

在情景1下,1980-1990年时间段实测年径流量与模拟值相差不大,相对误差为3.06%;2006-2015年时间段径流量模拟值与实测值相比明显增大,该时

间段实测年均径流量为 $1\,387.60 \times 10^4 \text{ m}^3$,模拟值为 $1\,716.73 \times 10^4 \text{ m}^3$,两者相差 23.72%,其原因是研究

区淤地坝绝大部分是在 2000 年以后建成的,模拟过程中不设置淤地坝导致模拟径流量增大。

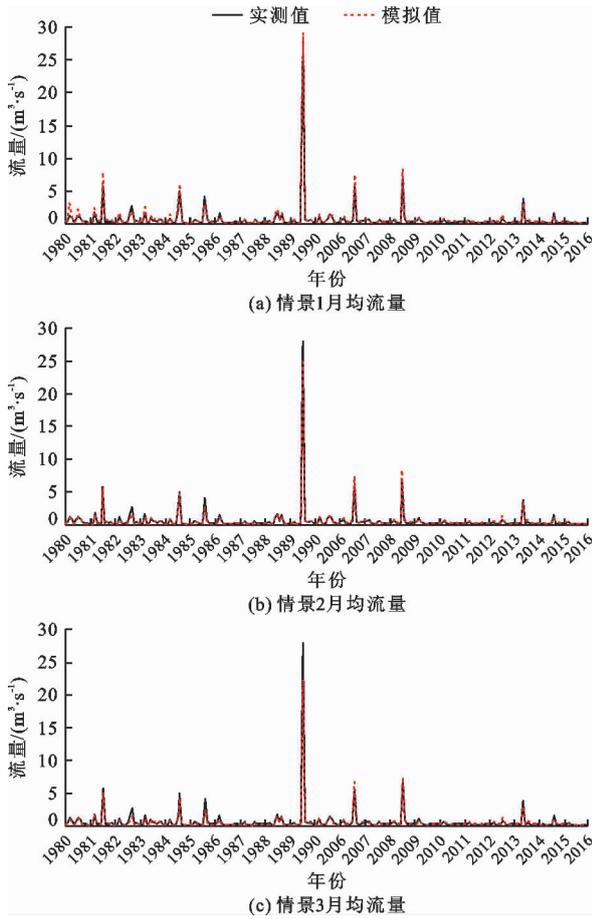


图 11 1980 - 1990 年、2006 - 2015 年 3 种情景下月尺度径流量模拟结果与实测值对比

在情景 2 下,1980 - 1990 年时间段模拟年均径流量与实测年均径流量相差较大,该时间段实测年均径流量为 $2\,521.45 \times 10^4 \text{ m}^3$,模拟值为 $2\,071.33 \times 10^4 \text{ m}^3$,相对误差为 17.85%,其原因是研究区淤地坝绝大部分是 2000 年以后建成的,设置淤地坝导致模拟径流量减小;1980 - 1990 年、2006 - 2015 年时间段径流量模拟值与该时间段实测值相差不大,相对误差为 0.98%。

在情景 3 下,1980 - 1990 年和 2006 - 2015 年两个时间段模拟年均径流量与实测年均径流量均相差较大,1980 - 1990 年时间段实测年均径流量为 $2\,521.45 \times 10^4 \text{ m}^3$,模拟值为 $1\,728.96 \times 10^4 \text{ m}^3$,相对误差为 31.43%;2006 - 2015 年时间段实测年均径流量为 $1\,387.60 \times 10^4 \text{ m}^3$,模拟值为 $959.35 \times 10^4 \text{ m}^3$,相对误差为 30.86%,其原因是该情景下在研究区设置了比实际情况多的淤地坝/拦沙坝作为输入条件,由于淤地坝的减水作用,导致模拟的两个时间

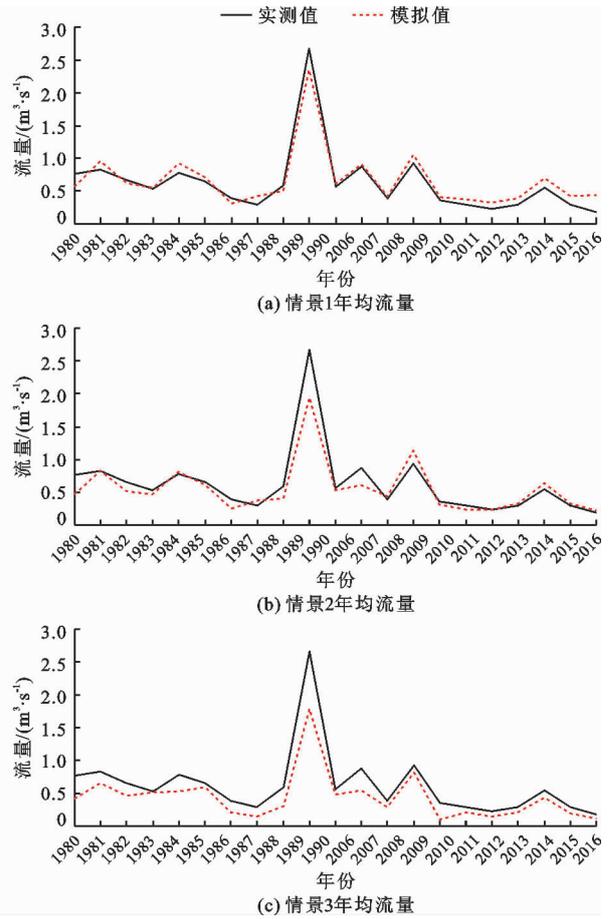


图 12 1980 - 1990 年、2006 - 2015 年 3 种情景下年尺度径流量模拟结果与实测值对比

段年径流量减小。

图 13 和 14 分别为 1980 - 1990 年、2006 - 2015 年 3 种情景下月尺度和年尺度输沙量模拟结果与实测值对比。

由图 13 可以看出:

在情景 1 下,除了 1989 年 7 月份输沙量模拟值与实测值相差较大(实测值为 $4\,740.76 \times 10^4 \text{ t}$,模拟值为 $3\,910.26 \times 10^4 \text{ t}$),1980 - 1990 年龙头拐水文站月输沙量模拟值与实测值基本一致。这表明当西柳沟超大产沙降雨发生时,模型模拟的输沙量值是偏低的。1980 - 1990 年、2006 - 2015 年龙头拐水文站月输沙量模拟值大于实测值,其原因是情景 1 未设置淤地坝作为输入条件,而实测产沙量受到已建成淤地坝拦沙的影响。

在情景 2 下,1980 - 1990 年月输沙量模拟值比实测值明显减少,其原因是情景 2 设置了 113 座淤地坝作为输入条件,而该时段实际产沙量几乎未受

到於地坝的影响;1980-1990年、2006-2015年龙头拐水文站月输沙量模拟值与实测值基本一致,其

原因是情景2设置的113座於地坝主要是在该时段建成的,情景2与该时段的实际情况基本一致。

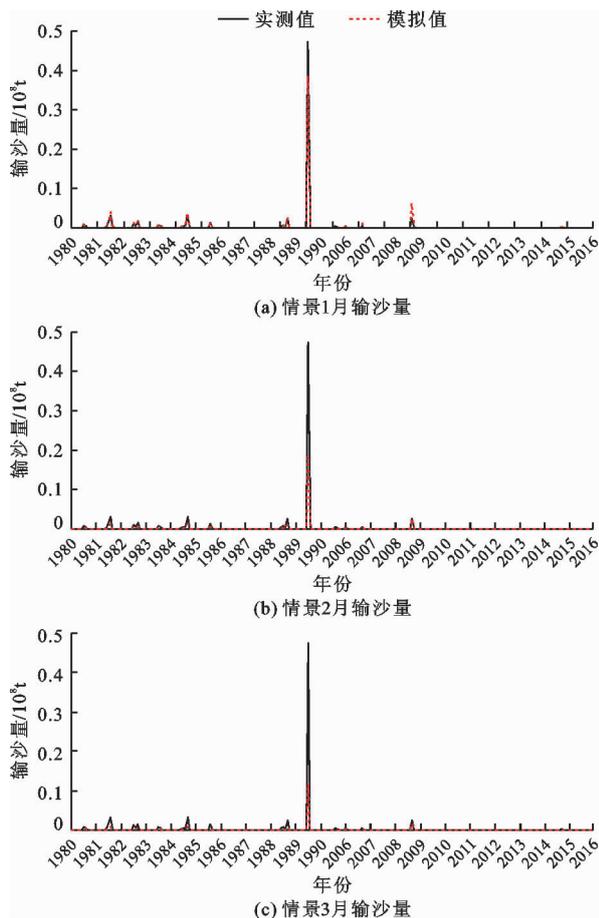


图13 1980-1990年、2006-2015年3种情景下月尺度输沙量模拟结果与实测值对比

在情景3下,1980-1990年和2006-2015年两个时间段龙头拐水文站逐月输沙量模拟值较实测值明显减少,其原因是情景3设置了113座现状淤地坝+79座规划新建拦沙坝作为输入条件;1980-1990年时间段模拟值较实测值的减少比例大于2006-2015年时间段,其原因是1980-1990年时间段西柳沟几乎没有修建於地坝,2006-2015年时间段113座现状坝逐步建成。

由图14可以看出:

在情景1下,1980-1990年和2006-2015年两个时间段年均输沙量模拟值变化趋势与实测值变化趋势基本一致。1980-1990年时间段年均输沙量模拟值与实测值相差8.45%,差异不大,而2006-2015年时间段年均输沙量模拟值与实测值相差89.26%,差异巨大,究其原因在于,2006-2015年时间段年均输沙量模拟没有考虑淤地坝减沙作用的影响,因而模拟值较实测值偏大。

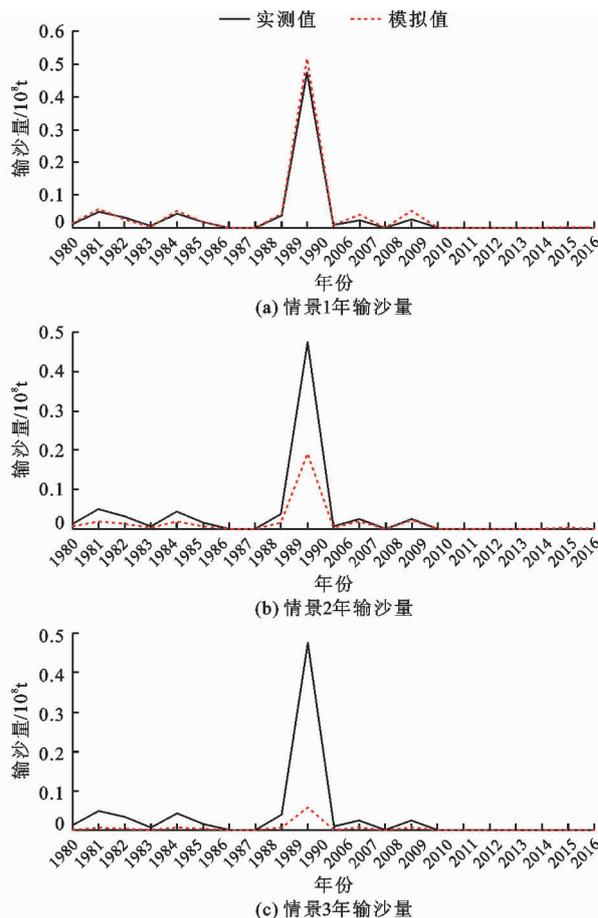


图14 1980-1990年、2006-2015年3种情景下年尺度输沙量模拟结果与实测值对比

在情景2下,1980-1990年和2006-2015年两个时间段年均输沙量模拟值变化趋势与实测值变化趋势基本一致。1980-1990年时间段年均输沙量模拟值与实测值相差59.51%,差异较大,而2006-2015年时间段年均输沙量模拟值与实测值相差12.61%,差异不大,究其原因是1980-1990年时间段年均输沙量的模拟受到淤地坝减沙作用的影响,因而模拟值较实测值偏小。

在情景3下,1980-1990年和2006-2015年两个时间段年均输沙量模拟值变化趋势与实测值变化趋势基本一致,但两个时间段年均输沙量模拟值与实测值均相差较大,分别为87.85%和73.78%,其原因是两个时间段年均输沙量模拟受到淤地坝/拦沙坝减沙作用的影响较大,因而模拟值较实测值偏小。

3.4 讨论

本文采用SWAT模型对西柳沟流域开展产水、产沙模拟,效果较好,但当流域实测产沙量很大时,

模型模拟结果明显偏小,1989年7月份实测值为 $4\,740.76 \times 10^4 \text{ t}$,模拟值为 $3\,910.26 \times 10^4 \text{ t}$,相差17.52%。

无论是率定期还是验证期,SWAT模型模拟的径流过程线趋势与实测径流过程线基本一致, RE 均在 $\pm 15\%$ 之内, $R^2 \geq 0.6$, $E_{NS} \geq 0.6$,可见SWAT模型在研究区域具有一定的适用性,这与国内研究人员对西柳沟的相关研究结论是一致的。为提高模拟精度,模型仍有待进一步改进。

在本研究中,除1980-1990年对应的情景1、2006-2015年对应的情景2是基于真实工况设定以外,其他工况是基于假设条件设定的。在两个典型时间段的3种情景下,仅改变淤地坝数量,其他参数不变,淤地坝设置越多,减水减沙特别是减沙的效果越明显,说明淤地坝在流域水沙调控中能够发挥重要作用。

Li等^[26]2016年利用SWAT模型中的水库模型对位于黄河中游典型多沙粗沙区的皇甫川流域开展了淤地坝减水减沙作用模拟研究。此项研究结果显示,其建立的模型精度较高, $R^2 > 0.9$ 、 $R_{NS} > 0.8$ 。经过比较分析,有越多数据作支撑则模型参数率定越精确、模型精度越高。两项研究中,皇甫川流域内现有1座水文站、1座气象站和10座雨量站,水文气象数据较为丰富,而西柳沟属于水文气象数据较为匮乏的流域,仅有3座雨量站、1座水文站,附近有1座气象站。

4 结论

本文主要根据SWAT模型的结构与功能,借助其自带的基于储层模块的水库模型,通过适当的修正和参数设置,开展了淤地坝影响下的流域径流量和输沙量的模拟,通过输入数据准备、参数率定及验证,建立了研究区适用的SWAT模型。根据研究区现状淤地坝和规划新建拦沙坝的情况,设定了3种情景进行模拟,并对模拟结果进行了研究分析,结果表明:

(1)在其他参数不变的情况下,淤地坝对流域径流量有一定的影响。1980-1990年时间段西柳沟未修建淤地坝,在情景2中,模拟年均径流量与实测值相比减少了 $450.13 \times 10^4 \text{ m}^3$,减少比例为17.85%;在情景3中,模拟年均径流量与实测值相比减少了 $792.49 \times 10^4 \text{ m}^3$,减少比例为31.43%。2006-2015年时间段,在情景3中,模拟年均径流量与实测值相比减少了 $428.25 \times 10^4 \text{ m}^3$;在情景3

中,模拟年均径流量与情景2的模拟值相比减少了 $342.36 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(2)在其他参数不变的情况下,有无淤地坝及淤地坝的数量多少对流域输沙量的模拟结果影响很大,淤地坝减沙效果明显。1980-1990年时间段,在情景2中,模拟年均输沙量与实测值相比减少了 $367.97 \times 10^4 \text{ t}$,减少比例为59.51%;在情景3中,模拟年均输沙量与实测值相比减少了 $543.23 \times 10^4 \text{ t}$,减少比例为87.85%。2006-2015年时间段,情景3中模拟年均输沙量与实测值相比减少了 $38.31 \times 10^4 \text{ t}$,情景3模拟的年均输沙量与情景2的模拟值相比减少了 $31.76 \times 10^4 \text{ t}$ 。

(3)淤地坝在一定程度上能影响流域的汇流过程,在情景2和情景3中,淤地坝的设置使得汛期后的月份中出现模拟径流量大于实测径流量的现象。

参考文献:

- [1] 王丽云,马振刚,高云飞,等. 近10a来十大孔兑现状淤地坝拦沙作用分析[J]. 人民黄河,2018,40(9):89-92.
- [2] 刘晓燕,高云飞,王富贵. 黄土高原仍有拦沙能力的淤地坝数量及分布[J]. 人民黄河,2017,39(4):1-5+10.
- [3] 冉大川. 黄河中游水土保持措施的减水减沙作用研究[J]. 资源科学,2006,28(1):93-100.
- [4] 袁水龙. 淤地坝系对流域水沙动力过程调控作用与模拟研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.
- [5] 吴岚. 水土保持生态服务功能及其价值研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.
- [6] 汪自力,张宝森,刘红珍,等. 2016年达拉特旗淤地坝水毁原因及拦沙效果[J]. 水利水电科技进展,2019,39(4):1-6.
- [7] 冉大川,罗全华,刘斌,等. 黄河中游地区淤地坝减洪减沙及减蚀作用研究[J]. 水利学报,2004,35(5):7-13.
- [8] 李景玉,张楠,王荣彬. 黄河流域土壤侵蚀产沙模型研究进展[J]. 地理科学进展,2006,25(2):103-111.
- [9] 陈月红,谢崇宝,干平,等. 流域侵蚀产沙模型研究动态评述[J]. 泥沙研究,2007,32(3):75-82.
- [10] 刘家宏. 黄河数字流域模型[D]. 北京:清华大学,2005.
- [11] 田鹏,赵广举,穆兴民,等. 基于改进RUSLE模型的皇甫川流域土壤侵蚀产沙模拟研究[J]. 资源科学,2015,37(4):832-840.
- [12] ARNOLD J G, FOHRER N. SWAT 2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling[J]. Hydrological Process, 2005, 19:563-572.
- [13] SAKAGUCHI A, EGUCHI S, KATO T, et al. Development and evaluation of a paddy module for improving

- hydrological simulation in SWAT[J]. *Agriculture Water Management*, 2014, 137:116-122.
- [14] WANG Gangsheng, BARBER M E, CHEN Shulin, et al. SWAT modeling with uncertainty and cluster analyses of tillage impacts on hydrological processes[J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2014, 28(2):225-238.
- [15] 董艳萍,袁晶瑄. 流域水文模型的回顾与展望[J]. *水力发电*, 2008, 34(3):20-23.
- [16] 姚海芳,师长兴,邵文伟,等. 基于 SWAT 的内蒙古西柳沟孔兑径流模拟研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(6):139-144.
- [17] 白淑英,王莉,史建桥,等. 基于 SWAT 模型的开都河流域径流模拟[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(9):79-84.
- [18] 姚苏红,朱仲元,张圣微,等. 基于 SWAT 模型的内蒙古闪电河流域径流模拟研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(1):175-180.
- [19] 王林,陈兴伟. 基于 SWAT 模型的晋江西溪流域产沙模拟[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 24(3):93-97.
- [20] 张雪松,郝芳华,杨志峰,等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(4):38-42.
- [21] 张荣飞,王建力,李昌晓. SWAT 模型在黄河流域宁夏段的适用性评价及展望[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(9):154-160.
- [22] 宋艳华,马金辉. SWAT 模型在陇西黄土高原地区的适用性研究[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(6):933-938.
- [23] 左德鹏,徐宗学. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的渭河流域月径流分布式模拟[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(5):490-496.
- [24] 杜丽娟. 水土保持补偿机制研究——以滦河流域为例[D]. 北京:北京林业大学, 2008.
- [25] 杨启红. 黄土高原典型流域土地利用与沟道工程的径流泥沙调控作用研究[D]. 北京:北京林业大学, 2011.
- [26] LI Erhui, MU Xingmin, ZHAO Guangju, et al. Effects of check dams on runoff and sediment load in a semi-arid river basin of the Yellow River[J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2017, 31(7):1791-1803.
- [27] 李璇. 西柳沟流域水沙流失特点及治理措施探讨[J]. *内蒙古水利*, 2013(1):89-90.
- [28] 周丽艳,崔振华,廖晓芳. 黄河上游西柳沟流域水土保持治理及水沙置换初步探讨[J]. *泥沙研究*, 2012, 37(1):63-67.
- [29] 陈怀伟,任青山,曹颖梅. 内蒙古西柳沟流域黄土丘陵沟壑区坝系工程规划及减沙效益分析[J]. *内蒙古水利*, 2008(4):69-70.
- [30] 雷成茂,李焯,郭邵萌. 2016 年黄河西柳沟“8·17”暴雨洪水分析[J]. *人民黄河*, 2017, 39(11):63-65.
- [31] 刘韬,张士锋,刘苏峡. 十大孔兑暴雨洪水产输沙关系初探——以西柳沟为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2007, 18(3):18-21.
- [32] 刘通,黄河清,邵明安,等. 气候变化与人类活动对鄂尔多斯地区西柳沟流域入黄水沙过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2):17-22.
- [33] 王金花,王普,斯琴. 西柳沟流域径流量时序变化特征分析[J]. *内蒙古水利*, 2014(3):71-72.
- [34] 冉大川,张栋,董飞飞,等. 西柳沟流域近期水沙关系变化特征分析[J]. *人民黄河*, 2015, 37(12):1-5.
- [35] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool (SWAT): Technical documentation, version 2005[M]. Texas: Grassland, Soil, and Water Research Laboratory, 2009.
- [36] TIAN Peng, ZHAO Guangju, MU Xingmin, et al. Check dam identification using multisource data and their effects on streamflow and sediment load in a Chinese Loess Plateau catchment[J]. *Journal Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1):073697.
- [37] 陈浩. 黄土丘陵沟壑区流域系统侵蚀与产沙关系[J]. *地理学报*, 2000, 55(3):354-363.
- [38] ROUHOLAHEJAD E, ABBASPOUR K C, VEJDANI M, et al. A parallelization framework for calibration of hydrological models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 31(31):28-36.