



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Watershed Ecology—Article

黄土高原典型流域淤地坝系泥沙拦截动态模拟

孙彭成^{a,b,c}, 吴一平^{a,c,*}

^a Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Natural Resources, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co. Ltd., Xi'an 710075, China

^b Key Laboratory of Soil and Water Conservation on the Loess Plateau of Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China

^c Technology Innovation Center for Land Engineering and Human Settlement, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co. Ltd. & Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710115, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 February 2021

Revised 24 April 2021

Accepted 17 December 2021

Available online 25 February 2022

关键词

淤地坝

淤地坝动态库容

黄土高原

淤地坝拦沙动态

SWAT 模型

摘要

淤地坝建设是黄土高原地区最具成效的水土保持措施之一,在全球水土流失严重地区也得到广泛应用。淤地坝拦沙的定量模拟是其效益评估的关键所在,也是区域淤地坝规划建设的重要基础。为此,本研究基于流域分布式水沙过程模拟,提出了流域淤地坝系拦沙量动态模拟框架:SWAT-DCDam (soil and water assessment tool-dynamic check dam)。在SWAT-DCDam框架中,新开发的DCDam模块以SWAT模型的模拟步长生成全流域淤地坝的动态级联结构,SWAT模型模拟的径流和输沙用来驱动DCDam模块,对流域内各淤地坝开展拦沙动态模拟。本研究以黄土高原中部延河流域为典型研究区,在分析流域淤地坝建设演变特征的基础上,模拟近60年(1957—2016年)流域淤地坝拦沙动态演变过程,采用累积淤积量野外调查数据评估了模型表现,并定量分析了坝系拦沙对流域减沙的贡献。结果表明,流域淤地坝结构特征发生趋势性变化,大型和中型淤地坝的坝体高度分别增加37.14%和9.22%,同时,大型和中型淤地坝的控制面积分别减少46.03%和10.56%。模型评估结果表明,SWAT-DCDam表现良好,对淤地坝累积淤积量高估11.5%。1970—2016年间,淤地坝拦沙贡献延河流域总减沙量的15%。本研究成果可为区域水土流失综合治理和淤地坝规划建设提供方法与技术支持。

©2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

水土流失是全球最为严重的环境问题之一,与土壤肥力流失,耕地退化、生物多样性丧失、水库淤积和洪涝灾害等生态环境问题密切相关[1–2],水土流失控制是实现土地退化零增长(land degradation neutrality, SDG15.3)与水关联生态系统保护恢复(water-related ecosystem protection, SDG6.6)等全球可持续发展目标(SDGs)的重要保

障[3–5]。水土保持措施类型包括以退耕还林草,保护性耕作、梯田等为主的坡面水土保持措施和以淤地坝建设,沟床固定和护岸工程等为主的沟道水土保持措施。

淤地坝建设具有用料简单、效益突出等特点,在我国和西班牙、美国、意大利、埃塞俄比亚等沟道发育强烈的地区都得到了广泛应用[6–10]。例如,在西班牙东南部2.39 km²的小流域修建269座淤地坝[11];在我国黄土高原地区,截至2011年年底已修建58 000余座淤地坝,其

* Corresponding author.

E-mail address: rocky.ypwu@gmail.com (Y. Wu).

中, 5655座大型淤地坝的总库容超过 $5.70 \times 10^9 \text{ m}^3$ [12]。流域沟道大量修建的淤地坝形成复杂的坝系结构, 在减轻土壤侵蚀、减少流域来沙、削减洪峰、补给地下水、稳固边坡和促进农业生产等方面都起到重要作用[13–19], 坝内沉积泥沙还是区域气象水文和生态环境历史过程反演的优良载体[20–21]。

泥沙拦截过程反演是研究淤地坝泥沙拦截及其水沙效应的基础, 也关系流域淤地坝库容的科学预测及坝系的科学管理[22–25]。长期的研究在淤地坝拦沙历史反演方面发展了多种方法, 主要包括基于野外测量的实测法(剖面法和地形法)和基于数学模型的模拟法。实测法主要通过野外测量估算坝内泥沙沉积量[26], 例如, 剖面法通过钻孔、探坑和剖面开挖等, 获取坝内沉积泥沙总体积, 估算沉积泥沙量[27–28]; 地形法通过建坝前后沟道地形变化估算淤地坝修建造成的泥沙沉积。剖面法可反演坝内泥沙沉积历史过程, 但耗时耗力, 适用范围有限, 难以应用于流域或区域尺度; 地形法与无人机观测系统等相结合可拓展应用于流域或区域尺度, 然而, 该方法只能反映当前的泥沙沉积量, 无法获取淤地坝拦沙过程。数学模拟法可在流域尺度反演不同淤地坝的动态拦沙过程, 例如, Li等[29]采用SWAT模型的水库模块模拟了皇甫川流域20余座淤地坝的拦沙过程, Pal等[30]基于SDM模型(Sediment Delivery Model)提出了流域内数个淤地坝拦沙模拟与布局优化方法。

然而, 当前研究仍未准确刻画流域或区域尺度淤地坝库容的动态变化和坝系级联结构的演变特征。为此, 本研究在开发淤地坝系拦沙动态模拟模块(DCDam)的基础上, 以空间分布式水沙过程模拟驱动DCDam模块, 实现流域尺度淤地坝拦沙过程的动态模拟。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

研究选择黄土高原中部的延河流域为典型研究区, 流域总面积 7725 km^2 , 高程在 $480 \sim 1790 \text{ m}$ 之间(图1)。延河是黄河的一级支流, 属温带大陆性季风气候, 多年平均降水量在 500 mm 左右, 多年平均温度为 $9.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。1957—2016年间, 延河流域年均降雨 516 mm , 降雨年内分布不均匀, 6~9月降雨占全年总降水量的70%以上。延河流域主要由黄土覆盖, 土层深厚但侵蚀严重, 地形破碎, 沟道

发育强烈。流域内土地利用以草地、农田和林地为主, 分别占到流域面积的62.36%、33.53%和4.02%, 其他土地利用类型面积小于1%。自20世纪60年代和70年代以来, 为减轻水土流失, 减少泥沙入黄, 延河流域开展大规模水土保持建设[31–32], 近年来, 延河流域林地面积从1975年的4.02%增加达2010年的26.20%, 而耕地面积则从33.53%下降到17.60%。此外, 截至2008年年底, 延河流域已建超过800座淤地坝(图2), 流域淤地坝建设在2003年被水利部评为“亮点工程”[33]。综合而言, 延河流域是黄土高原淤地坝拦沙过程研究的理想区域。

2.2. SWAT模型

SWAT是美国农业部开发的具有物理机制的空间分布式水文模型[34–35], 常用于土地管理和气候变化对流域水文、泥沙和养分输出影响的研究[36–38]。由于SWAT模型具有源代码公开和模块化开发等优点, 被广泛应用于生态环境过程的集成开发, 因此, 本研究提出的淤地坝系动态模拟框架是在SWAT流域水沙模拟基础上进行。SWAT模型以地形为基础将流域划分为不同的子流域, 各子流域内划分出土地利用和土壤类型一致、坡度相近的水文响应单元。SWAT模型能模拟各水文响应单元的地表产流、壤中流、蒸散发、土壤水含量、输沙量和养分输出量等环境要素, 关于模型机理[35]和输入输出文件[39]的详细介绍可见其参考手册。

2.3. 数据收集

延河流域及其周边五个气象站日尺度的降雨、最高温、最低温、相对湿度、风速和日照时长观测来自气象数据网^①, 雨量站数据来自黄河流域水文年鉴。流域数字高程来自国家基础信息数据中心^②, 空间分辨率为 30 m 。土壤分布图来自家地球系统科学数据中心, 分辨率为 $1:100\,000$ ^③。基准期土地利用(1975年)来自国家地球系统科学数据中心, 用于反映1957—1985年的土地利用情况。1990年、2000年和2010年的土地利用来自中国科学院遥感与数字地球研究所, 分别用于反映1986—1995年、1996—2005年和2006—2016年时段的土地利用。土地利用被重分类为草地、林地、农田、水体、建设用地和荒地六类。研究采用1957—1970年甘谷驿水文站的径流和泥沙观测进行模型参数校验, 水沙数据来自黄河流域水文年鉴。淤地坝位置、设计库容、坝高、控制面积和已淤积库容等参数来自2008年年底水利部组织的淤地坝检查数据。

① <http://data.cma.cn>.

② <http://www.ngcc.cn/ngcc/>.

③ <http://loess.geodata.cn/data/>.

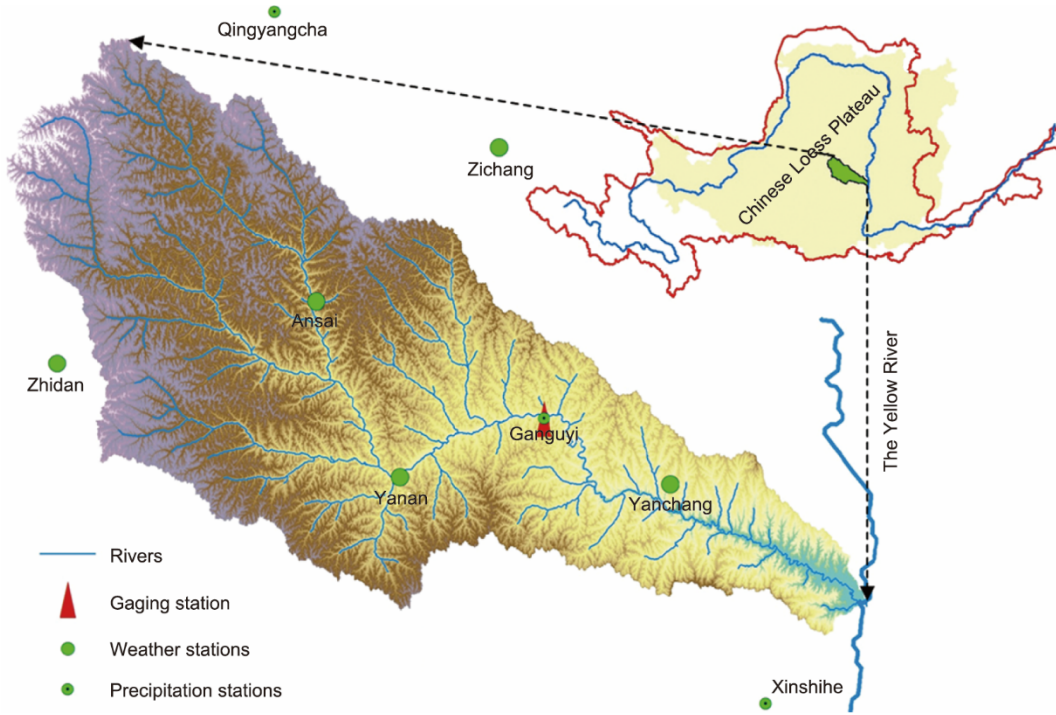


图1. 延河流域地理位置与气象水文站点分布。

其中，库容大于 $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 为大型淤地坝，库容在 $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ 和 $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 之间为中型淤地坝，库容在 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ 之间为小型淤地坝[40]。由于流域内各小型淤地坝多由农民自发修建，缺少相应的设计资料，本论文未进行研究。

2.4. 淤地坝系动态拦沙模块

2.4.1. 坝系淤地坝编码方法

延河流域分布有数百座淤地坝，各淤地坝之间级联关系复杂（图2）。本研究首先对各淤地坝进行编码，赋予每座淤地坝唯一的ID值。本编码方案以SWAT模型生成的子流域为基础，每个子流域内淤地坝构成一个完整坝系。如图3（a）选取的典型子流域（编号143）所示，子流域内淤地坝相互连接，形成淤地坝系，并概化为图3（b）。143号子流域面积为 43.1 km^2 ，共有9座淤地坝，其中1、2、6号淤地坝分布于主沟道，其余在支沟。如图3（b）所示，与子流域出口直接相连的淤地坝的级别为1，级别1淤地坝直接相连的上游淤地坝级别为2，依次累加，直至完成所有淤地坝的级别划分，最高级别为 n （末端淤地坝），本案例中的淤地坝最高为3级。以流域出口为基准，向上游逐次编码，在基准编码的基础上增加同类淤地坝的顺序号。如图3（b）所示，以流域出口编号为基准，向级别为1的淤地坝进行编号，分别对6、7、9号淤地坝编码为14301、14302和14303。随着编码级别上移，对与

14301号淤地坝直接相连的3个2级淤地坝（2、3、5号淤地坝）进行编码，分别为1430101、1430102和1430103，以此类推，直至完成全流域各淤地坝的编码，如图3（b）所示。

2.4.2. 淤地坝系拦沙动态模拟

图4展示了流域淤地坝系泥沙拦截的汇演方案。首先，根据每个淤地坝在特定时间点 t 的存在状态（建设时间是否晚于 t ）和淤地坝淤满状态（淤满时间是否早于 t ），判定 t 时间点可用于拦沙的淤地坝数量。以每个淤地坝的ID编码为基础，判断各子流域内所有淤地坝的连接关系，生成 t 时间点层级为 $1 \sim n$ 的淤地坝坝系连接结构。

任一淤地坝的可用库容根据泥沙拦截量判断，具体如下：

$$V_{D,t} = V_{D,t-1} - V_{St,t} \quad (1)$$

$$V_{St,t} = V_{Si,t} - V_{So,t} \quad (2)$$

式中， $V_{D,t}$ 为在 t 时刻末淤地坝的可用库容； $V_{St,t}$ 为 t 时刻单位步长新拦截泥沙体积； $V_{Si,t}$ 为 t 时刻单位步长进入淤地坝的泥沙体积； $V_{So,t}$ 为 t 时刻单位步长随径流排出的泥沙体积。

考虑到淤地坝的泥沙拦截特征，研究设定当淤地坝可用库容大于上游总来水量时，能拦截上游全部来沙，即

$$V_{Rs,t} = V_{Ri,t} \quad (3)$$

$$V_{Si,t} = V_{Rs,t} \times C_{con,t} \quad (4)$$

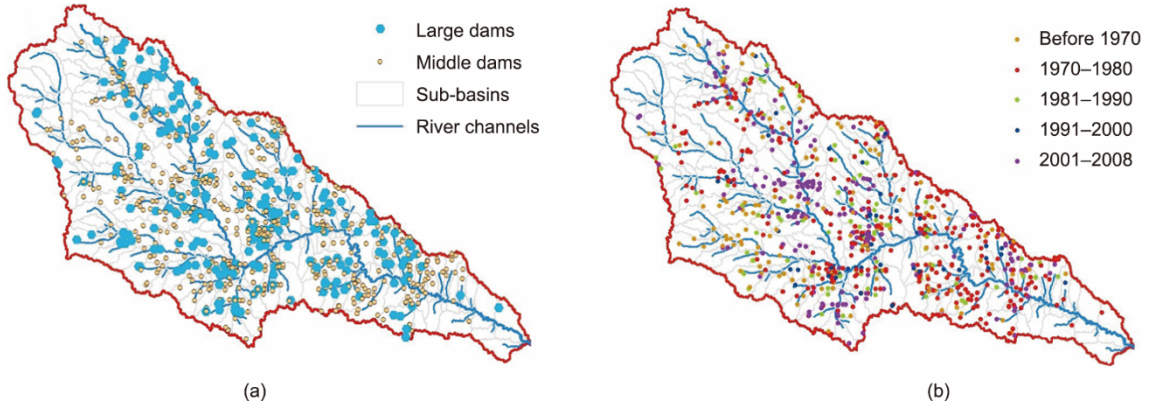


图2. 延河流域淤地坝特征。(a) 淤地坝空间分布；(b) 淤地坝建造历史。

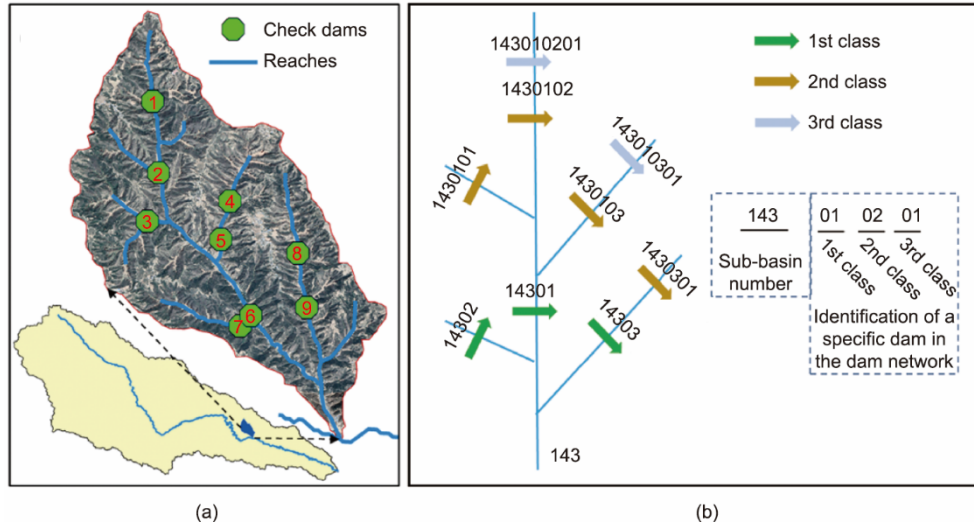


图3. 典型子流域淤地坝编码与坝系结构定义。(a) 子流域内淤地坝空间分布；(b) 子流域坝系结构定义。

$$V_{Ro,t} = 0 \quad (5)$$

式中, $V_{Rs,t}$ 为 t 时刻单位步长淤地坝拦截的径流量; $V_{Ri,t}$ 为 t 时刻单位步长进入淤地坝的径流量; $C_{con,t}$ 为 t 时刻进入淤地坝径流的泥沙含量; $V_{Ro,t}$ 为 t 时刻单位步长排出径流量。

当坝库上游来水量大于可用库容时, 超出可用库容部分径流及其所挟带泥沙将被排出, 即

$$V_{Rs,t} = V_{D,t-1} \quad (6)$$

$$V_{Ro,t} = V_{Ri,t} - V_{D,t-1} \quad (7)$$

$$V_{So,t} = V_{Ro,t} \times C_{con,t} \quad (8)$$

坝库上游来水量计算如下:

$$V_{Ri,t} = A_{a,t} \times H_t \quad (9)$$

式中, $A_{a,t}$ 为 t 时刻淤地坝实际控制面积; H_t 为 t 时刻单位步长淤地坝控制区的平均径流深。

如图3所示, 坝系内的淤地坝之间连接结构复杂, 流域径流和泥沙经上游淤地坝拦截后到达下游, 因此, 下游淤地坝实际控制面积相应减少, 即

$$A_{a,t} = A_d - \sum_{j=1}^m A_{d,j} \quad (10)$$

式中, A_d 为淤地坝设计的控制面积; $A_{d,j}$ 为上游直接相连的第 j 个淤地坝; m 为上游直接相连的淤地坝总个数。

在流域坝系中, 下游淤地坝将接收上游直接相连各坝排出的径流与泥沙, 即

$$V_{Ri,a,t} = V_{Ri,t} + \sum_{j=1}^m V_{Ro,j,t} \quad (11)$$

式中, $V_{Ri,a,t}$ 为 t 时刻单位步长从实际控制面积进入淤地坝的径流量; $V_{Ro,j,t}$ 为 t 时刻从直接相连的淤地坝 j 释放的径流量。

在DCDam计算模块中, 从末端淤地坝逐次向下游淤地坝进行水沙汇演, 直至完成所有淤地坝的计算, 更新淤地坝数据库的淤满状态。

2.4.3. SWAT模型与DCDam模块的数据交互

在参考SWAT模型集成开发已有研究的基础上, 综合考虑子流域坝系独立、相同子流域下垫面状况较接近、

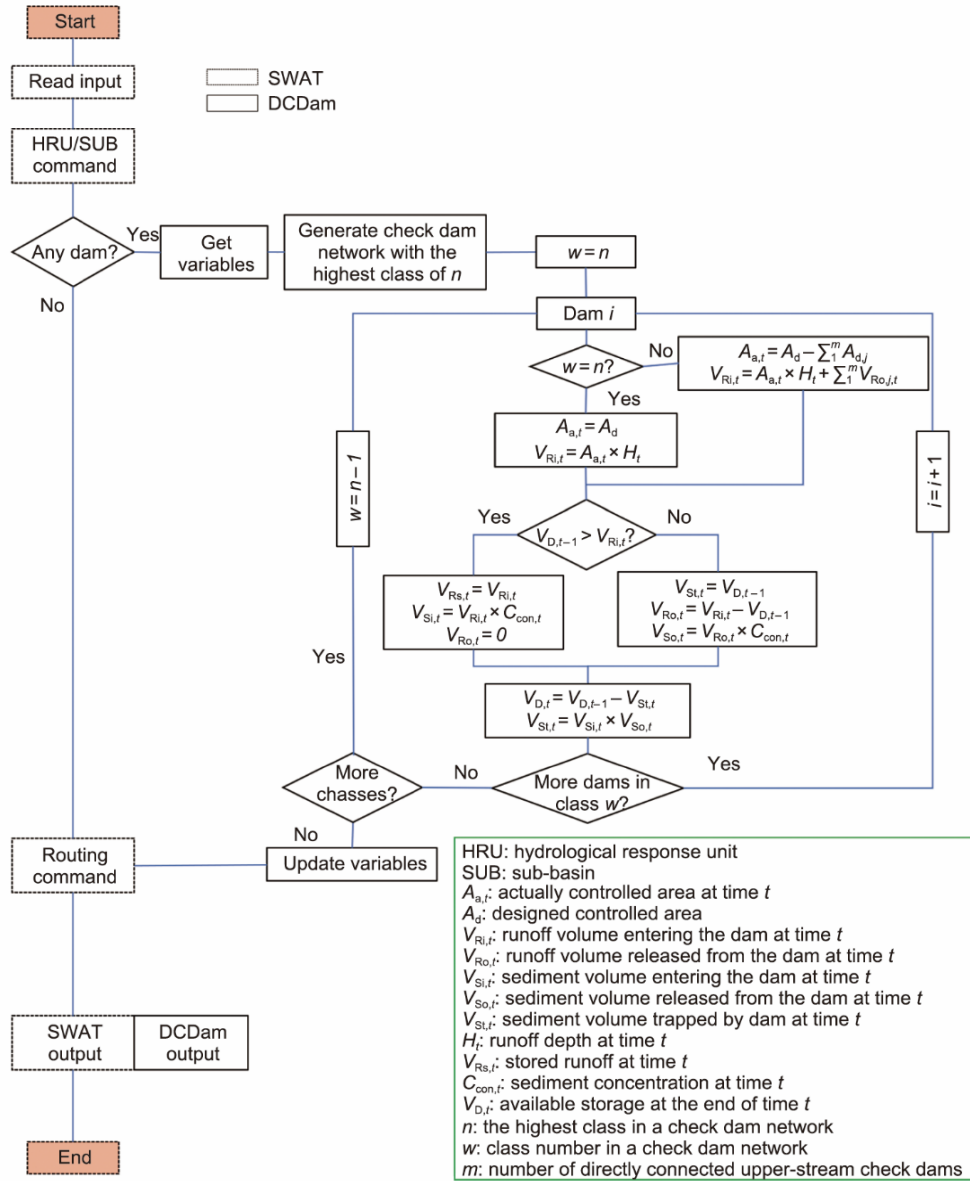


图4. SWAT-DCDam框架与坝系内水沙汇演过程。

动态坝系网络结构中单一淤地坝实际控制区域难以动态划分等特征，设计了SWAT模型与DCDam模块的半分布式模拟框架。在该框架中，DCDam模块以子流域为基本运算单元，在各子流域水沙输移模拟结果的基础上，叠加相应子流域淤地坝动态坝系网络，进行坝系水沙过程模拟。本研究以SWAT模型输出径流泥沙数据驱动DCDam模块，以淤地坝特征参数为边界条件，通过动态坝系网络、单坝特征边界（可用库容和淤积状态）和单坝水-沙平衡过程，采用SWAT的模拟步长对各淤地坝的淤积与可用状态进行连续模拟，给出各淤地坝可用库容、泥沙拦截量、泥沙排出量和径流排出量的动态变化（图5）。模拟结果最终以表格形式输出保存，便于后续处理。SWAT-DCDam的获

取途径与操作方法见附录A。

2.5. 模型建立与模型校验

模型将延河流域划分为202个相互独立的子流域和6053个水文响应单元，子流域的平均面积为38.25 km²，水文响应单元的平均面积为1.28 km²。本研究选择水土保持措施大规模实施前的时段（1970年前），进行模型率定和验证，模型率定期为1957—1963年，验证期为1964—1970年。根据黄土高原地区前期研究经验[36,41–43]，径流和泥沙率定共选取13个参数（表1）。模型表现评价选用三个常用参数，分别为决定系数（ R^2 ）、纳什效率系数（NSE）和相对偏差（Pbias），各参数的具体计算方法见附录A中的S2节。

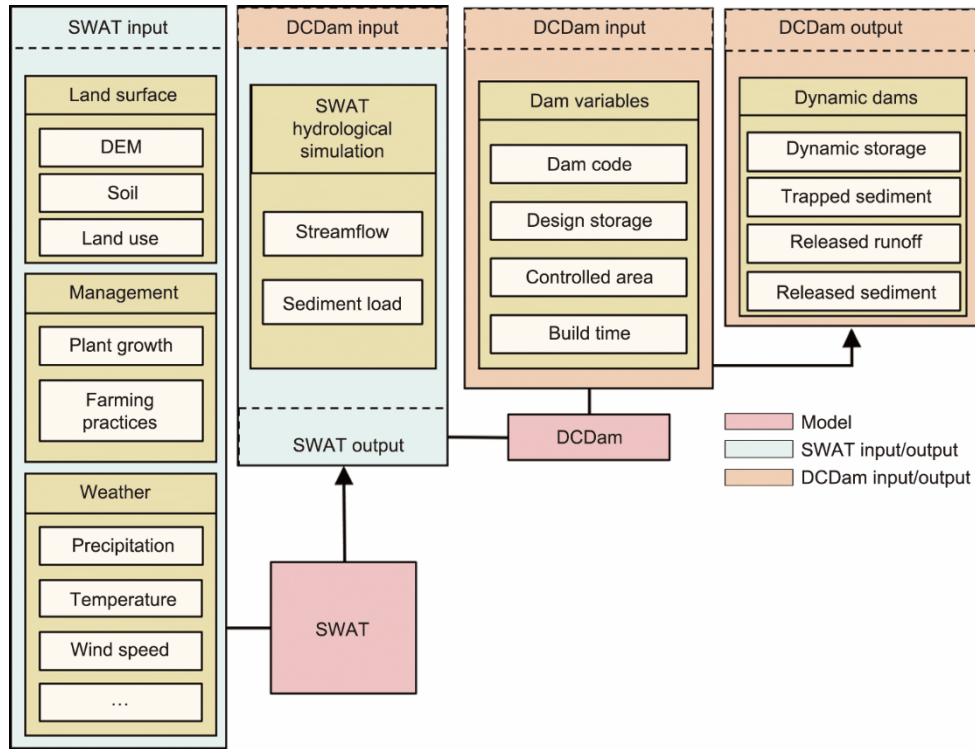


图5. SWAT模型与DCDam模块的数据交互。DEM: 数字高程模型。

表1 延河流域模型参数率定结果

Parameter	Definition	Range	Fitted value
CN2	Soil conservation service (SCS) curve number for moisture condition	-10%-10%r	5.3%
SOL_K	Soil saturated hydraulic conductivity ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	-10%-10%r	5.2%
SOL_AWC	Soil available water capacity	-10%-10%r	2.9%
SLSUBBSN	Average slope length (m)	35-50v	33.97
HRU_SLP	Average slope steepness ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)	-10%-10%r	-1.6%
SOL_BD	Bulk density ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)	-10%-10%r	-2.7%
ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0.2-0.8v	0.366
SFTMP	Mean air temperature at which precipitation is equally likely to be snow/freezing rain ($^{\circ}\text{C}$)	0-20v	19.619
SMTMP	Threshold temperature for snowmelt ($^{\circ}\text{C}$)	0-20v	13.528
SMFMX	Melt factor on December 21 ($\text{mm H}_2\text{O} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0-5v	1.233
USLE_C	Minimum value of the universal soil loss equation (USLE) land cover factor applicable to the land cover/plants	0-0.5v	0.48/0.03/0.001 for cropland/grassland/forestland
USLE_K	Soil erodibility factor ($0.013 \text{ t} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)	-10%-10%r	-4.9%
USLE_P	USLE equation support parameter	0-1v	1
CH_K2	Effective hydraulic conductivity of channel ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	0-5v	2.3
CANMX	Maximum canopy storage (mm)	0-5v	0.65/2/5 for cropland/grassland/forestland
ALPHA_BF	Baseflow recession constant	0-0.1v	0.015

v means that the existing parameter value is to be replaced by the given value, and r means that the existing parameter value is multiplied by (1+ a given value).

3. 研究结果

3.1. 延河流域淤地坝修建特征

延河流域的淤地坝修建历史如图6所示。20世纪50

和60年代全流域新建淤地坝63座，占淤地坝总量的10%以下；20世纪70年代淤地坝修建最为迅速，年新建数量可达50座以上；80和90年代的新建淤地坝数量有限，2003年后，流域新修淤地坝数量又有所增加。黄土高原

淤地坝的修建与流域水土保持建设项目密切相关，如，20世纪70年代的淤地坝修建主要是充分利用坝地水肥条件优异、粮食产量高的优势，发展农业生产[44]，该阶段内新建淤地坝超过300座。在2003年，延河流域淤地坝建设被评为水利部亮点工程，引发21世纪初期淤地坝建设新高潮[33]。坝控总面积和总库容的时间变化与新修淤地坝相一致，截至2008年年底，坝控面积达流域总面积的40%以上，总库容达3.5亿 m^3 。流域淤地坝在新建当年即有效拦截上游来水来沙并在一段时间内持续发挥效益，例如，20世纪70年代大规模修建的淤地坝对80年代泥沙输移减少发挥了重要贡献[45]。

图2 (a) 展示了延河流域大型和中型淤地坝的空间分布特征。从流域尺度来看，淤地坝空间分布相对均匀，两种淤地坝的空间分布无明显差异。图7展示了两种类型

淤地坝关键结构参数及其近60年的演变特征。延河流域大型坝和中型坝的设计库容中位数分别为 $7.01 \times 10^5 \text{ m}^3$ 和 $2.55 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，坝控面积中位数分别为 3.6 km^2 和 1.2 km^2 ，坝高中位数分别为20 m和15 m。不同时代建设的淤地坝结构参数具有显著差异，近60年来发生趋势性变化。淤地坝控制面积逐渐减少，大型坝控制面积中位数从 6.30 km^2 减少到 3.40 km^2 ，减幅为46.03%，中型坝控制面积中位数从 1.80 km^2 减少到 1.61 km^2 ，减幅为10.56%。淤地坝坝高逐渐增加，大型淤地坝坝高中位数从17.50 m增加到24.00 m，增幅为37.14%，中型淤地坝坝高从14.65 m增加到16.00 m，增幅为9.22%。淤地坝的设计库容未发生趋势性的变化，大型坝中位库容先减小后逐渐增加，中型坝的设计库容则呈现微弱波动的特征。整体而言，延河流域淤地坝有坝高增加而控制面积减小的趋势。

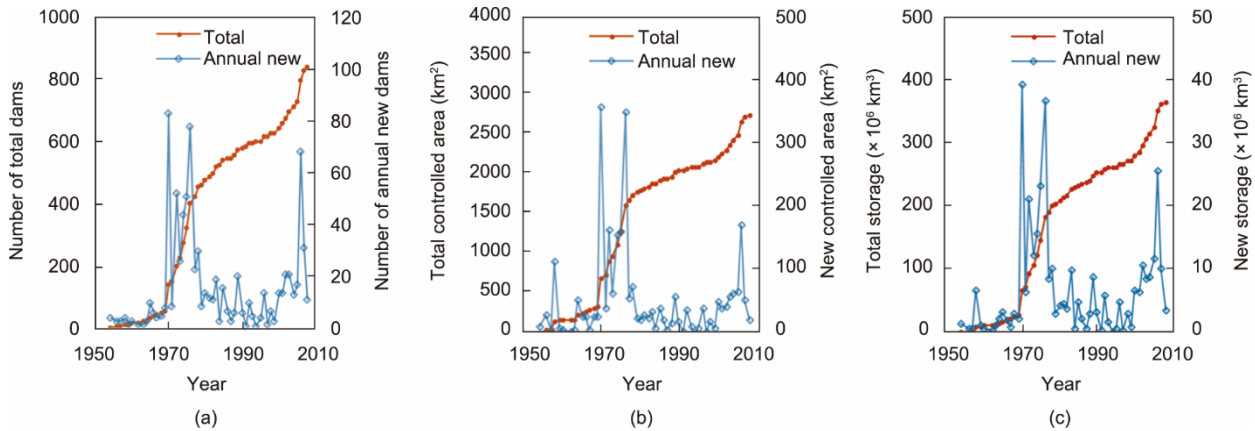


图6. 近60年延河流域淤地坝数量 (a)、控制面积 (b) 和总库容 (c) 变化特征。

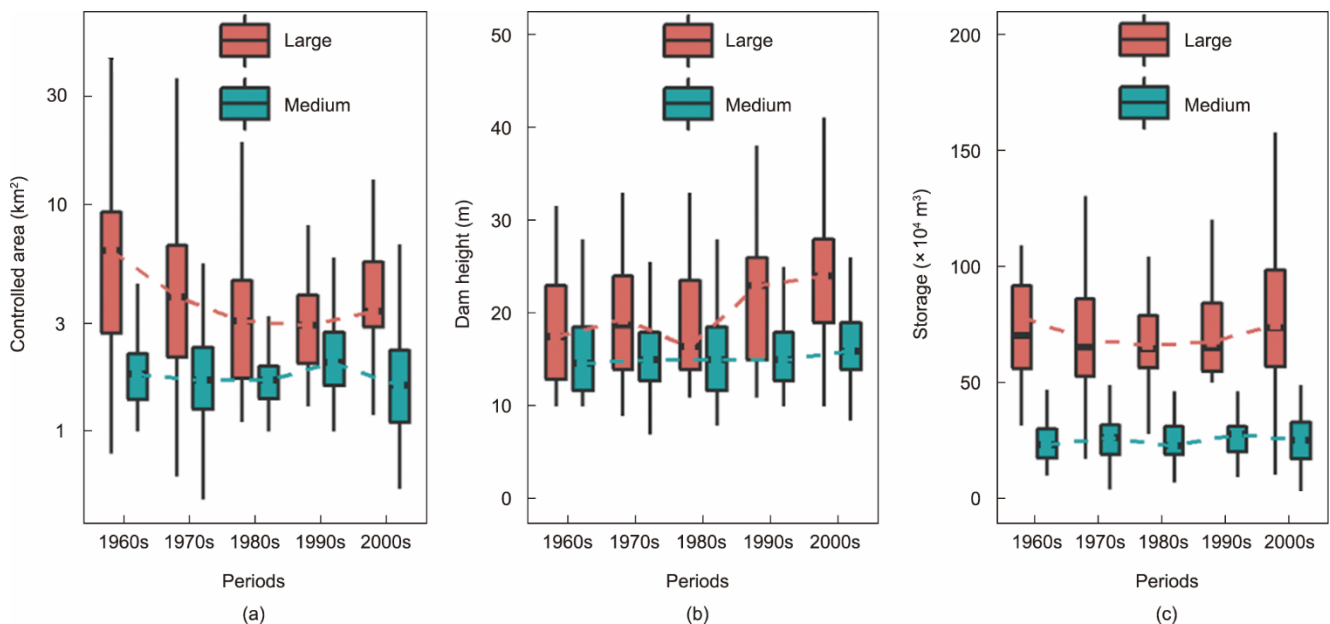


图7. 不同年代淤地坝设计参数演变特征。(a) 控制面积；(b) 坝高；(c) 设计库容。

3.2. SWAT模型和SWAT-DCDam的验证评估

本研究选用延河流域甘谷驿控制水文站进行模型校验, 校验期选取淤地坝数量相对有限的1957—1970年, 以1957—1963年作为模型参数率定期, 1964—1970年作为模拟结果验证期。由图8可见, 月径流的模拟与实测值之间具有较好的吻合度, 模型能够反映径流年际和年内的波动特征, 从模型率定和验证期整体来看, 径流模拟的相对误差 $|Pbias| \leq 11.00\%$, $R^2 \geq 0.83$, $NSE \geq 0.79$ 。根据Moriasi的模型判定标准[46], 延河流域的径流模拟可判定为“Good”。SWAT模型在延河流域径流模拟表现良好, 可用于产汇流过程的长期模拟。黄土高原地区泥沙输移主要集中在6~9月, 月输沙模拟与实测值有较好的对应关系。率定期和验证期相对误差分别为15.40%和14.50%。从模型率定和验证期整体来看, 泥沙模拟的相对误差 $|Pbias| \leq 15.40\%$, $R^2 \geq 0.80$, $NSE \geq 0.79$ (表2)。根据Moriasi的判定标准[46], SWAT模型在延河流域的输沙模拟也可判定为“Good”。综合而言, SWAT模型在延河流域输沙模拟表现良好, 可用于流域侵蚀输沙的长期模拟。附录A中的图S1展示了近60年间(1957—2016年)径流输沙模拟结果, 径流和输沙模拟值与水文站观测较为一致, 然而, 在20世纪之后部分年份模拟的径流和输沙出现偏离, 径流和输沙模拟高于实测。

表2 径流和输沙模拟评估结果

Index	Calibration (1957–1963)		Validation (1964–1970)	
	Runoff	Sediment load	Runoff	Sediment load
R^2	0.83	0.80	0.92	0.93
NSE	0.81	0.79	0.71	0.92
Pbias (%)	7.70	15.40	11.00	-14.50

由于流域和区域尺度无法开展淤地坝淤积量的动态监测, 本研究采用2008年年底水利部淤地坝安全检查统计的累积淤积量作为观测值, 评估SWAT-DCDam框架的模

拟结果。如图9所示, 整体而言, SWAT-DCDam模拟的累积泥沙拦截量与实际观测值较为相近, 模拟累积淤积量的均值为 $2.67 \times 10^5 \text{ m}^3$, 观测累积淤积量的均值则为 $2.40 \times 10^5 \text{ m}^3$, 模拟值比观测值偏高11.5%。模拟值与观测值集中在1:1线附近, 但中型淤地坝的模拟结果存在一定偏离。整体而言, 泥沙拦截模拟的相对误差 $|Pbias| \leq 11.50\%$, $R^2 \geq 0.71$, $NSE \geq 0.53$, 根据模型判定标准[46], SWAT-DCDam框架对延河流域淤地坝系泥沙拦截模拟结果可判定为“Satisfactory”, 能用于淤地坝泥沙拦截模拟。

3.3. 淤地坝系拦沙过程与可用库容的动态演变

侵蚀产沙是淤地坝拦截泥沙的来源, 图10反映了延河流域产沙强度和淤地坝泥沙拦截的年际动态。结果表明, 延河流域多年平均产沙强度可达 $101.39 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 近60年来延河流域的产沙强度无明显的趋势性变化 ($p > 0.05$), 非参数M-K检验的判定Z值为-0.35 [47–48]。延河流域淤地坝年拦沙量整体呈非单调增加趋势 ($p < 0.05$), 非参数Mann—Kendall检验判定Z值为2.26。从淤地坝开始修建, 泥沙拦截量缓慢增加。在1970年后, 淤地坝年拦沙量迅速增加, 于1977年达到峰值, 该年度淤地坝拦沙量达1560万 m^3 , 随后淤地坝年泥沙拦截量呈波动性减少的趋势。延河流域在2013年发生了强降雨侵蚀, 淤地坝工程措施在剧烈侵蚀输沙条件下拦截沟道输沙, 引起该年度的坝系泥沙拦截的异常增加。

可用库容的动态变化是泥沙拦截和淤地坝新建共同作用的结果, 逐年拦沙造成可用库容减少, 淤地坝新建则增加可用库容。图10(b)展示了延河流域淤地坝可用库容的动态变化特征。1957—1970年间, 淤地坝可用库容快速增加, 并在1977年达到1.36亿 m^3 , 可用库容增加与该时段淤地坝新建数量相一致; 随后的20年间, 淤地坝可用库容持续减少, 在1999年达到0.8亿 m^3 , 2000年后的淤地坝建设引起可用库容的再次增加。然而, 2008年后

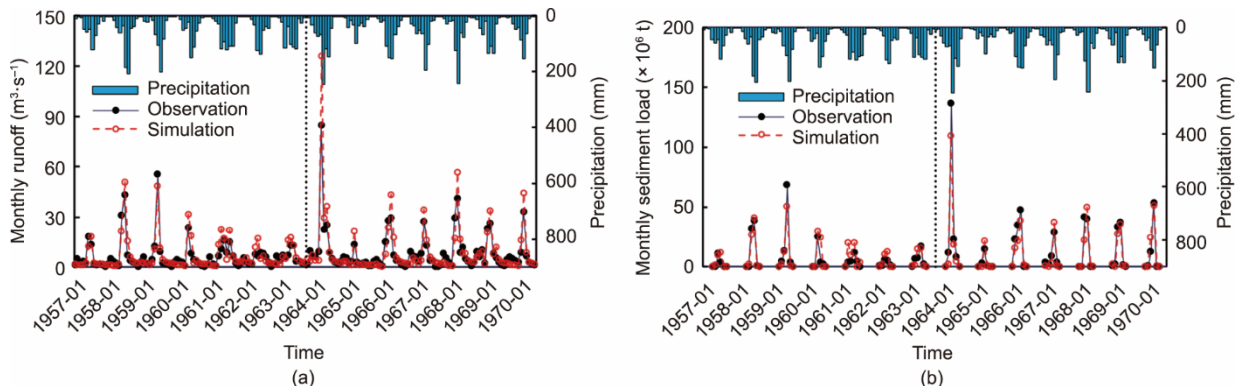


图8. 率定期(1957—1963)和校验期(1964—1970)的月径流(a)和月输沙(b)模拟结果比较。

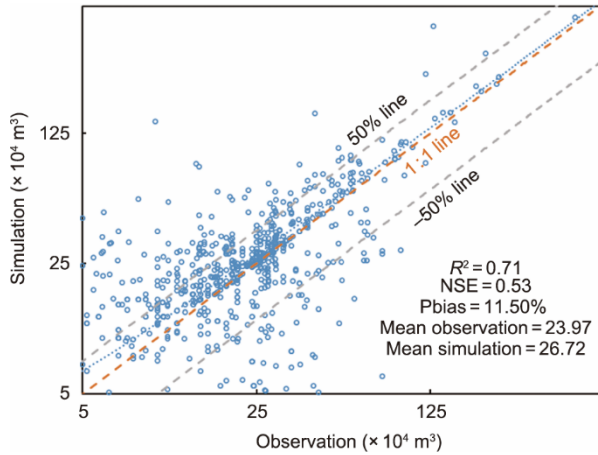


图9. 模拟和实测淤地坝累积淤积量比较。

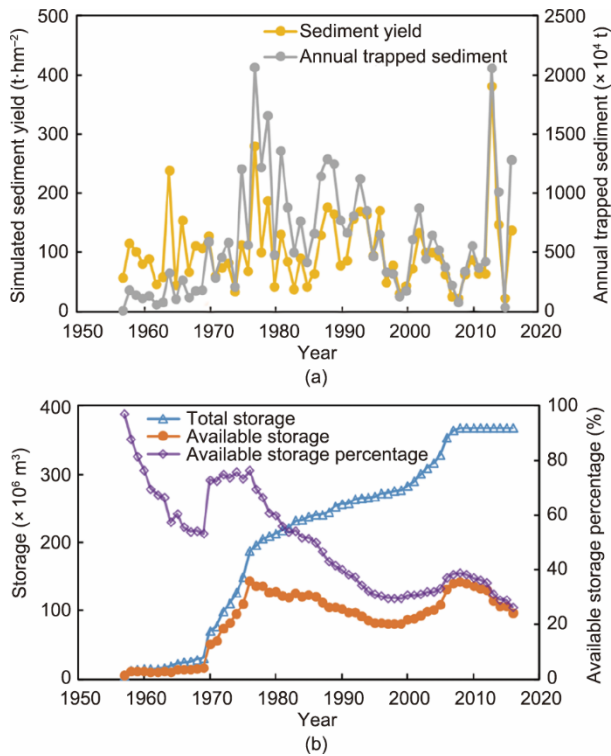


图10. (a) 拦水坝的产沙量和拦沙量；(b) 淤地坝的动态库容。

延河流域淤地坝新建设数量有限，逐年淤积造成可用库容快速减少，在2016年年底可用库容仅余0.96亿 m^3 。

3.4. 坝系拦沙对延河输沙减少的贡献

延河输沙量在近60年间持续减少，大规模的淤地坝建设是流域输沙减少的重要成因，为此，本研究以淤地坝数量相对有限的1957—1969为基准，分析淤地坝拦沙对不同时段输沙减少的贡献。延河流域输沙减少幅度持续增加，与基准期相比，流域年均输沙减少量从1970—1985的 2.66×10^7 t增加到2006—2016的 5.94×10^7 t。如表3所示，整体而言，1970—2016年间的年均输沙减少 3.38×10^7 t，其中，淤地坝年均拦沙 5.07×10^6 t，约占总输沙减少量的15.00%。在过去60年间，延河流域输沙变化受到气候变化、植被恢复、梯田修建和淤地坝新建等多因素作用，不同时段淤地坝拦截泥沙对输沙减少的贡献不同。与1957—1969年相比，1970—1985年延河流域年均输沙减少量为 1.66×10^7 t，到2006—2016年，年均输沙减少量为 5.94×10^7 t，淤地坝拦沙对河流输沙减少的贡献在1986—1995时段最大，贡献输沙减少量的43.69%。近年来，随着淤地坝拦沙作用减弱和植被措施减沙效应的增强，淤地坝拦沙对河流减沙贡献持续降低，在2006—2016时段，淤地坝拦沙对流域总输沙量减少贡献的占比低于10%。

4. 讨论

4.1. 淤地坝泥沙拦截与侵蚀环境变化的关系

淤地坝拦沙对流域输沙减少的贡献随侵蚀环境变化而改变。退耕还林背景下，植被盖度增加有效减少上游来水来沙，淤地坝泥沙拦截量随之减少[49—52]。在生态建设作用下，流域土地利用格局持续演变，尤其是退耕还林草项目实施以来，土地利用发生剧烈变化。1975年，延河流域农田面积占比约为33.53%，到1990年则略微增加到40.20%；随后，在生态建设的作用下，农田面积在2000年减少到29.26%，并于2010年减少到17.59%。农田的减少造成流域土壤侵蚀的剧烈变化，四种土地利用情景下流域多年平均侵蚀产沙量分别为 5.45×10^7 t、 5.63×10^7 t、 5.05×10^7 t和 3.41×10^7 t，与基准期相比，2010年土地利用情景下，流域侵蚀产沙减少37.43%。当进一步考虑土地利用与气候波动的综合作用发现，2006—2016时段的

表3 淤地坝拦沙对延河输沙减少的贡献(仅统计甘谷驿水文站控制区域)

Period	Mean annual sediment load reduction ($\times 10^7$ t)	Mean annual sediment retained by check dams ($\times 10^6$ t)	Contributions
1970—1985	2.66	5.84	21.97%
1986—1995	1.66	7.27	43.69%
1996—2005	3.35	3.68	10.98%
2006—2016	5.94	5.02	8.46%
1970—2016	3.38	5.07	15.00%

流域侵蚀产沙强度为 $70.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，相比 1957—1985 时段降低了 28.29%（图 11）。

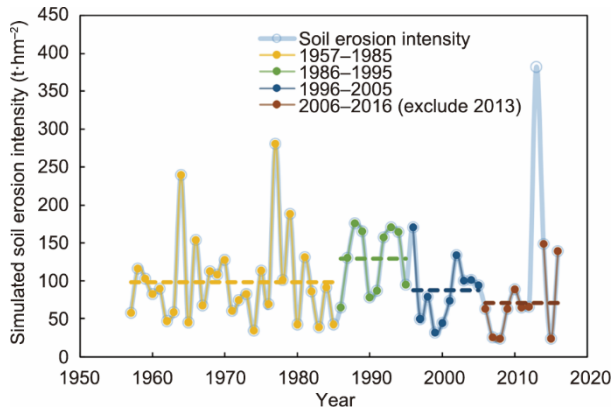


图 11. 1957—2016 年延河流域来的侵蚀产沙强度变化，虚线表示不同时间段的多年平均侵蚀产沙强度。

淤地坝拦沙量是流域淤地坝可用库容和侵蚀产沙强度共同作用的结果，侵蚀产沙强度决定了坝控流域来沙量，可用库容则决定淤地坝对侵蚀泥沙的拦截效率。表 4 展示了不同时段淤地坝拦沙量、侵蚀产沙强度和可用库容情况。1957—1969 时段的侵蚀产沙强度与 1970—1985 时段相近，然而，由于可用库容有限，该时段淤地坝系拦沙量有限。强侵蚀产沙与较宽裕可用库容的组合下，1970—1985 和 1986—1995 时段流域淤地坝系拦沙量处于较高水平（超过 $8.00 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ）。在 1996—2005 时段，流域侵蚀产沙强度较弱，可用库容也相对有限，由此造成坝系拦沙量的减少。在 2006—2016 时段，淤地坝可用库容高于其余各时段，然而，由于土壤侵蚀强度江都，该时段坝系拦沙量相对较低。因此，通过不同时段可用库容、侵蚀产沙强度和淤地坝系拦沙量的综合比较可看出，生态恢复作用下流域侵蚀产沙锐减是近期淤地坝系拦沙量减少的主导成因。然而，在极端降水情况下，流域淤地坝系仍将发挥较强的拦沙效果。例如，在 2013 年延河极端降水条件下，流域淤地坝系拦截泥沙占到流域总侵蚀产沙量的 7.36%。近年来的一些监测结果也证明了极端降雨条件下淤地坝的拦沙效果，如大理河流域场次极端降雨条件下淤地坝系拦截泥沙量就达到了 $4.89 \times 10^7 \text{ t}$ [53]。

表 4 延河流域不同时段流域土壤侵蚀强度、坝系可用库容和坝系拦沙量比较

Periods	Available storage ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Soil erosion intensity ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	Trapped sediment ($\times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)
1957—1969	11.96	98.17	1.48
1970—1985	109.41	97.47	8.30
1986—1995	100.14	128.73	9.04
1996—2005	90.31	87.65	4.72
2006—2016 (exclude 2013)	126.33	70.16	3.57

4.2. 淤地坝系规划与流域综合治理

淤地坝能发挥改善局部供水条件、促进农业生产和控制侵蚀产沙等多方面效益[54]，在剧烈环境变化背景下，流域淤地坝系综合功效的发挥是流域综合治理的重要基础。淤地坝具有调节流域水资源分配的作用，汛期降雨条件下，淤地坝拦截上游洪水，削减洪峰，减轻洪水灾害[55]；淤地坝拦截储蓄的水资源将是旱季水资源调节的重要部分[56]。在黄土高原地区，坝地水肥条件更加优异，单位面积产量达坡耕地的 6~10 倍，淤地坝是区域农业生产保障的重要方面，在延河流域，截至 2006 年年底，已形成超过 3192 hm^2 优良坝地[57]。截至 2016 年年底，全流域 75% 以上的淤地坝已淤满或接近淤满（可用库容小于 20%）；此外，超过 5% 的淤地坝（40 余座）运行 15 年后淤积量仍在设计库容的 30% 以下。因此，需要从全流域尺度进行淤地坝的科学规划，流域新修淤地坝应充分融入现有淤地坝坝系，保障流域坝系多效益的协调发挥。本研究提出的 SWAT-DCDam 模拟框架能动态预测淤地坝可用库容状态，用于支撑流域淤地坝的科学规划和管理。此外，SWAT-DCDam 模拟框架还可以拓展用于淤地坝多种生态服务功能模拟，为淤地坝综合效益评估提供方法与工具支持。

4.3. 研究不足与改进方向

模型集成开发是研究复杂环境问题的重要方法[58]。本研究将新开发的 DCDam 模块与 SWAT 模型有效集成，用于流域尺度淤地坝系拦沙量的动态模拟。然而，模型集成开发的数据来源与数学过程更加复杂，增加了模拟结果的不确定性来源[59]。

模型是对真实水文过程的数学镜像，现实中的水文过程通过模型公式与参数进行数学刻画[60]，难以完全反应真实的水文过程，模型结构不完善是模拟结果不确定性的重要成因。SWAT 模型和 DCDam 模块的模拟结构仍不完善，尤其难以准确反映剧烈环境变化条件下的水文过程变异。例如，SWAT 模型中通过土地利用输入的变化，改变模型中不同土地利用类型的水文参数而改变水文过程，但并未改变模型中的产流机制。现有研究发现[61—62]，大

规模退耕还林草作用下黄土高原的产流机制可能发生变化, 通过土地利用方式输入的改变难以准确反应水文过程的变化。此外, 淤地坝运行模式复杂, 不同运行模式的径流和输沙的拦截模式具有差异。

就径流而言, 超出调蓄库容的径流可能通过溢洪道排泄, 部分淤地坝因不具有溢洪道从坝顶漫出; 放水洞与卧管也具有排泄蓄积径流的功能。本研究假设排泄径流的含沙量与入库径流相同, 然而, 经淤地坝沉积后, 排泄径流泥沙含量相对更低[63], 该假设可能低估淤地坝拦沙效率。Brune [64]针对大型水库提出通过库容与入库径流之比来判断泥沙拦截效率的方法, 并广泛应用于水库拦沙模拟, 然而, 用该方法计算的泥沙拦截系数远超实际情况而难以适用于淤地坝拦沙计算, 例如, 当可用库容与入库水量之比小于0.01时, Brune方案计算的拦沙比例仍达到60%, 远超淤地坝拦沙的实际比例。由于缺少实测数据支持, 本研究假设出库径流含沙量等于入库径流含沙量, 造成计算拦沙比例低于实际。因此, 未来的研究中需要增加坝前泥沙沉积过程和泥沙出库特征监测, 进一步提出适用于淤地坝水沙蓄排过程参数化方案。

从模型整合而言, DCDam模块是在子流域的尺度上集成到SWAT模型, 还不能完全反应子流域内产水产沙条件的空间异质性。数据输入也是造成模拟结果不确定性的重要来源。延河流域小型淤地坝大量分布, 这些淤地坝多在1950—1980年间由农民自发修建, 且在淤地坝调查时多已淤满, 缺少相应的设计参数而难以统计, 因此, 本研究中未包含小型淤地坝[65]。在淤地坝实地调查中, 淤地坝累积淤积量等关键信息获取相对困难, 调查结果包含一定误差。此外, 流域内淤地坝数量众多, 现有数据未能针对各淤地坝统计放水洞和溢洪道等关键结构参数, 难以准确给出坝系调节作用下水沙输移的物理边界。新勘测调查方法的应用将有助于提取坝体结构详细信息, 完善坝体刻画。例如, 无人机等设备应用能更准确获取各淤地坝的实际控制面积, 机载设备地形扫描结果还可以与不同年代数字高程相结合, 计算淤地坝的累计淤积量变化过程[66], 为提升模拟精度提供新的数据支持。

5. 结论

本研究在描述流域淤地坝系动态级联结构的基础上, 开发淤地坝系动态拦沙模块(DCDam), 以流域分布式水沙过程模拟驱动该模块, 构建了SWAT-DCDam模拟框架; 以黄土高原中部地区的延河流域为典型, 在分析流域淤地坝建设时空分布与结构特征演变的基础上, 采用淤地坝调

查数据评估该框架的模拟效果, 并进一步反演了过去60年间(1957—2016)流域淤地坝系泥沙拦截动态过程, 定量分析了流域淤地坝系拦沙对流域输沙减少的贡献及其时间演变特征。近60年来, 淤地坝的结构参数发生趋势性变化, 新建淤地坝偏向更小的控制面积, 更高的坝体, 但设计库容未有显著的趋势性变化。模型评估结果表明, 本研究新开发SWAT-DCDam的模拟结果与实测值之间对应关系良好, SWAT-DCDam可用于动态模拟流域淤地坝系的泥沙拦截过程。淤地坝拦沙是延河流域输沙减少的重要成因, 淤地坝拦沙约占输沙总减少量的15%, 然而, 淤地坝拦沙对输沙减少的贡献持续降低, 近年来, 淤地坝拦沙对输沙减少的贡献小于10%。此外, 本研究还发现延河流域75%以上的淤地坝已淤满或接近淤满, 表明流域需要新的规划, 以保证淤地坝可持续拦沙。SWAT-DCDam模拟方法可从流域尺度上动态模拟淤地坝泥沙拦截和可用库容的变化过程, 为黄土高原地区流域淤地坝的科学管理与规划提供有效的技术与方法支持。

致谢

本研究得到中国科学院先导科技专项(XDB40020205)、国家自然科学基金(U2243210、42041006、42207401、42271025、31961143011)、自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室基金(SX-DJ2019-5)、陕西省重点研发计划(2022ZDLSF06-04)、陕西省科技创新团队(2021TD-52)、陕西地建-西安交大土地工程与人居环境技术创新中心基金(201912131-B2)、黄河水利科学研究院基金(HKF202205、HKY-JBYW-2022-09)、中科院“西部之光”项目(S2020-YF-GHZD-0061)、国家青年人才项目和陕西省百人计划项目等联合支持。感谢西安交通大学高性能计算中心对本研究模拟计算过程的提供的平台支持。最后, 对论文评审过程中编辑老师和五位评审专家的建设性意见表示特别感谢。

Compliance with ethics guidelines

Pengcheng Sun and Yiping Wu declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online

at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.12.015>.

References

- [1] Borrelli P, Robinson DA, Fleischer LR, Lugato E, Ballabio C, Alewell C, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat Commun* 2017;8:2013.
- [2] Lal R. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Crit Rev Plant Sci* 1998;17(4):319–464.
- [3] Panagos P, Katsoyiannis A. Soil erosion modelling: the new challenges as the result of policy developments in Europe. *Environ Res* 2019;172:470–4.
- [4] Keesstra SD, Bouma J, Wallinga J, Tiftonell P, Smith P, Cerdà A, et al. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *Soil* 2016;2(2):11–28.
- [5] Visser S, Keesstra S, Maas G, De Cleen M, Molenaar C. Soil as a basis to create enabling conditions for transitions towards sustainable land management as a key to achieve the SDGs by 2030. *Sustainability* 2019;11(23):6792.
- [6] Abbasi NA, Xu X, Lucas-Borja ME, Dang W, Liu B. The use of check dams in watershed management projects: examples from around the world. *Sci Total Environ* 2019;676:683–91.
- [7] Lucas-Borja ME, Piton G, Nichols M, Castillo C, Yang Y, Zema DA. The use of check dams for soil restoration at watershed level: a century of history and perspectives. *Sci Total Environ* 2019;692:37–8.
- [8] Piton G, Carladou S, Recking A, Tacnet JM, Liébault F, Kuss D, et al. Why do we build check dams in Alpine streams? An historical perspective from the French experience. *Earth Surf Process Landf* 2017;42(1):91–108.
- [9] Robichaud PR, Storrar KA, Wagenbrenner JW. Effectiveness of straw bale check dams at reducing post-fire sediment yields from steep ephemeral channels. *Sci Total Environ* 2019;676:721–31.
- [10] Galicia S, Navarro-Hevia J, Martínez-Rodríguez A, Mongil-Manso J, Santibáñez J. ‘Green’, rammed earth check dams: a proposal to restore gullies under low rainfall erosivity and runoff conditions. *Sci Total Environ* 2019;676:584–94.
- [11] Alfonso-Torreño A, Gómez-Gutiérrez Á, Schnabel S, Lavado Contador JF, de Sanjosé Blasco JJ, Sánchez Fernández M. sUAS, SfM-MVS photogrammetry and a topographic algorithm method to quantify the volume of sediments retained in check-dams. *Sci Total Environ* 2019;678:369–82.
- [12] Ministry of Water Resources of China. Bulletin of first national water census for soil and water conservation. Beijing: China Water Power Press; 2013. Chinese.
- [13] Zhao G, Kondolf GM, Mu X, Han M, He Z, Rubin Z, et al. Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the Loess Plateau, China. *Catena* 2017;148:126–37.
- [14] Bai L, Wang N, Jiao J, Chen Y, Tang B, Wang H, et al. Soil erosion and sediment interception by check dams in a watershed for an extreme rainstorm on the Loess Plateau. *China Int J Sediment Res* 2020;35(4):408–16.
- [15] Liu Y, Liu Y, Shi Z, López-Vicente M, Wu G. Effectiveness of re-vegetated forest and grassland on soil erosion control in the semi-arid Loess Plateau. *Catena* 2020;195:104787.
- [16] Yuan S, Li Z, Li P, Xu G, Gao H, Xiao L, et al. Influence of check dams on flood and erosion dynamic processes of a small watershed in the Loess Plateau. *Water* 2019;11(4):834.
- [17] Conesa-García C, López-Bermúdez F, García-Lorenzo R. Bed stability variations after check dam construction in torrential channels (south-east Spain). *Earth Surf Process Landf* 2007;32(14):2165–84.
- [18] Wang Y, Fu B, Chen L, Lü Y, Gao Y. Check dam in the Loess Plateau of China: engineering for environmental services and food security. *Environ Sci Technol* 2011;45(24):10298–9.
- [19] Mongil-Manso J, Díaz-Gutiérrez V, Navarro-Hevia J, Espina M, San Segundo L. The role of check dams in retaining organic carbon and nutrients. A study case in the Sierra de Ávila mountain range (central Spain). *Sci Total Environ* 2019;657:1030–40.
- [20] Keesstra S, Nunes JP, Saco P, Parsons T, Poepl R, Masselink R, et al. The way forward: can connectivity be useful to design better measuring and modelling schemes for water and sediment dynamics? *Sci Total Environ* 2018;644:1557–72.
- [21] Vaezi AR, Abbasi M, Keesstra S, Cerdà A. Assessment of soil particle erodibility and sediment trapping using check dams in small semi-arid catchments. *Catena* 2017;157:227–40.
- [22] Zhao G, Mu X, Han M, An Z, Gao P, Sun W, et al. Sediment yield and sources in dam-controlled watersheds on the northern Loess Plateau. *Catena* 2017;149:110–9.
- [23] Chen F, Fang N, Wang Y, Tong L, Shi Z. Biomarkers in sedimentary sequences: indicators to track sediment sources over decadal timescales. *Geomorphology* 2017;278:1–11.
- [24] Abedini M, Md Said MA, Ahmad F. Effectiveness of check dam to control soil erosion in a tropical catchment (The Ulu Kinta Basin). *Catena* 2012;97:63–70.
- [25] Wei Y, He Z, Li Y, Jiao J, Zhao G, Mu X. Sediment yield deduction from checkdams deposition in the weathered sandstone watershed on the North Loess Plateau, China. *Land Degrad Dev* 2017;28(1):217–31.
- [26] Ramos-Diez I, Navarro-Hevia J, San Martín Fernández R, Mongil-Manso J. Final analysis of the accuracy and precision of methods to calculate the sediment retained by check dams. *Land Degrad Dev* 2017;28(8):2446–56.
- [27] Wang X, Jin Z, Zhang X, Xiao J, Zhang F, Pan Y. High-resolution geochemical records of deposition couplets in a palaeo-landslide-dammed reservoir on the Chinese Loess Plateau and its implication for rainstorm erosion. *J Soils Sed* 2018;18:1147–58.
- [28] Wei Y, He Z, Jiao J, Li Y, Chen Y, Zhao H. Variation in the sediment deposition behind check-dams under different soil erosion conditions on the Loess Plateau. *China Earth Surf Process Landf* 2018;43(9):1899–912.
- [29] Li E, Mu X, Zhao G, Gao P, Sun W. Effects of check dams on runoff and sediment load in a semi-arid river basin of the Yellow River. *Stochastic Environ Res Risk Assess* 2017;31(7):1791–803.
- [30] Pal D, Galelli S, Tang H, Ran Q. Toward improved design of check dam systems: a case study in the Loess Plateau, China. *J Hydrol* 2018;559:762–73.
- [31] Fu B, Wang S, Liu Y, Liu J, Liang W, Miao C. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. *Annu Rev Earth Planet Sci* 2017;45(1):223–43.
- [32] Zhao G, Mu X, Wen Z, Wang F, Gao P. Soil erosion, conservation, and ecoenvironment changes in the Loess Plateau of China. *Land Degrad Dev* 2013;24(5):499–510.
- [33] Wei Y. Characteristics of sediment deposition of typical check-dams and its effect on the sediment discharge variation of Yanhe and Huangfuchuan River Basin [dissertation]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences; 2017. Chinese.
- [34] Arnold JG, Srinivasan R, Mutiah RS, Williams JR. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *J Am Water Resour* 1998;34(1):73–89.
- [35] Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR. Soil and water assessment tool: theoretical documentation. Report. College Station: Texas A&M University System; 2011.
- [36] Sun P, Wu Y, Wei X, Sivakumar B, Qiu L, Mu X, et al. Quantifying the contributions of climate variation, land use change, and engineering measures for dramatic reduction in streamflow and sediment in a typical loess watershed, China. *Ecol Eng* 2020;142:105611.
- [37] Zhang X. Simulating eroded soil organic carbon with the SWAT-C model. *Environ Model Softw* 2018;102:39–48.
- [38] Hu J, Wu Y, Wang L, Sun P, Zhao F, Jin Z, et al. Impacts of land-use conversions on the water cycle in a typical watershed in the southern Chinese Loess Plateau. *J Hydrol* 2021;593:125741.
- [39] Arnold J, Kiniry J, Srinivasan R, Williams J, Haney E, Neitsch S. SWAT 2012 input/output documentation. Report. College Station: Water Resources Institute; 2013.
- [40] Standardization Administration of China (SAC). GB/T 16453.3–2008: Comprehensive control of soil and water conservation—technical specification—technique for erosion control of gullies. Chinese standard. Beijing: Standardization Administration of China (SAC); 2008. Chinese.
- [41] Wang Y, Fang N, Zhang F, Wang L, Wu G, Yang M. Effects of erosion on the microaggregate organic carbon dynamics in a small catchment of the Loess Plateau, China. *Soil Tillage Res* 2017;174:205–13.
- [42] Zhao F, Wu Y, Qiu L, Sun Y, Sun L, Li Q, et al. Parameter uncertainty analysis of the SWAT model in a mountain-loess transitional watershed on the Chinese Loess Plateau. *Water* 2018;10(6):690.
- [43] Xu Y, Fu B, He C. Assessing the hydrological effect of the check dams in the Loess Plateau, China, by model simulations. *Hydrol Earth Syst Sci* 2013;17(6):2185–93.
- [44] Xu X, Zhang H, Zhang O. Development of check-dam systems in gullies on the Loess Plateau. *China Environ Sci Policy* 2004;7(2):79–86.
- [45] Sun P, Wu Y, Yang Z, Sivakumar B, Qiu L, Liu S, et al. Can the Grain-for-Green program really ensure a low sediment load on the Chinese Loess Plateau? *Engineering* 2019;5(5):855–64.
- [46] Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL.

- Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *T ASABE* 2007;50(3):885–900.
- [47] Mann H. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 1945;13 (3):245–59.
- [48] Kendall MG. Rank correlation measures. 4th ed. London: Charles Griffin; 1975.
- [49] Lucas-Borja ME, Zema DA, Hinojosa Guzman MD, Yang Y, Hernández AC, Xu X, et al. Exploring the influence of vegetation cover, sediment storage capacity and channel dimensions on stone check dam conditions and effectiveness in a large regulated river in México. *Ecol Eng* 2018;122:39–47.
- [50] Rodrigo-Comino J, Terol E, Mora G, Giménez-Morera A, Cerdà A. *Vicia sativa* Roth. can reduce soil and water losses in recently planted vineyards (*Vitis vinifera* L.). *Earth Syst Environ* 2020;4(4):827–42.
- [51] Wang W, Fang N, Shi Z, Lu X. Prevalent sediment source shift after revegetation in the Loess Plateau of China: implications from sediment fingerprinting in a small catchment. *Land Degrad Dev* 2018;29 (11):3963–73.
- [52] Liang Y, Jiao J. Characteristics of sediment retention by check-dams before and after the “Grain for Green” project in the He–Long Reach of the Yellow River. *Acta Ecol Sin* 2019;39(12):4579–86.
- [53] Yu X, Hou S, Li Y, Shi X. Identifying sediment sources in Wuding River during “7.26” flood in 2017. *Hydro-Sci Eng* 2019;(06):31–7. Chinese.
- [54] Lucas-Borja ME, Piton G, Yu Y, Castillo C, Antonio Zema D. Check dams worldwide: objectives, functions, effectiveness and undesired effects. *Catena* 2021;204:105390.
- [55] Wang T, Hou J, Li P, Zhao J, Li Z, Matta E, et al. Quantitative assessment of check dam system impacts on catchment flood characteristics—a case in hilly and gully area of the Loess Plateau. *China Nat Hazards* 2021;105 (3):3059–77.
- [56] Yang J, Shi X, Zuo Z, Kong X, Xiao P. Survey and analysis on the construction and operation of warping dams in Henan Province. *Soil Water Conserv* 2020;10: 10–2. Chinese.
- [57] Ran D, Zuo Z, Wu Y, Li XM, Li ZH, et al. Recent changes of streamflow and sediment load in the middle Yellow River Basin and their responses to human activities. Beijing: Science Press; 2012. Chinese.
- [58] Wu Y, Liu S, Qiu L, Sun Y. SWAT-DayCent coupler: an integration tool for simultaneous hydro-biogeochemical modeling using SWAT and DayCent. *Environ Model Softw* 2016;86:81–90.
- [59] Sun P, Wu Y, Xiao J, Hui J, Hu J, Zhao F, et al. Remote sensing and modeling fusion for investigating the ecosystem water–carbon coupling processes. *Sci Total Environ* 2019;697:134064.
- [60] Borrelli P, Van Oost K, Meusburger K, Alewell C, Lugato E, Panagos P. A step towards a holistic assessment of soil degradation in Europe: coupling on-site erosion with sediment transfer and carbon fluxes. *Environ Res* 2018;161:291–8.
- [61] Mu X, Gu C, Sun W, Zhao G, Gao P, Wang S. Preliminary assessment effect of vegetation restoration on runoff generation pattern of the Loess Plateau. *Yellow River* 2019;41(10):33–41. Chinese.
- [62] Zhang L, Hu C, Jian S, Wu Q, Ran G, Xu Y. Identifying dominant component of runoff yield processes: a case study in a sub-basin of the middle Yellow River. *Hydrol Res* 2021;52(5):1033–47.
- [63] Ran Q, Tang H, Wang F, Gao J. Numerical modelling shows an old check-dam still attenuates flooding and sediment transport. *Earth Surf Proc Land* 2021; 46(8):1549–67.
- [64] Brune GM. Trap efficiency of reservoirs. *Eos* 1953;34(3):407–18.
- [65] Liu X, Gao Y, Ma S, Dong GT. Sediment reduction of warping dams and its timeliness in the Loess Plateau. *J Hydraul Eng* 2018;49 (02):145–55.
- [66] Rodrigues BT, Zema DA, González-Romero J, Rodrigues MT, Campos S, Galletero P, et al. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for estimating soil volumes retained by check dams after wildfires in mediterranean forests. *Soil Syst* 2021;5(1):9.