

# 基于 SWAT 模型的清水河流域年径流 侵蚀功率空间分布

杨光<sup>1</sup>, 鲁克新<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1,2</sup>, 柳海亮<sup>1</sup>, 刘桂华<sup>1</sup>,  
曹峰华<sup>1</sup>, 马天文<sup>1</sup>, 王得军<sup>2</sup>, 文妙霞<sup>2</sup>, 孙景梅<sup>2</sup>

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;  
2.西安理工大学 旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048)

**摘要:**为了从能量学的角度解释流域水力侵蚀的空间分布情况,选取可以更好表示流域下垫面条件、降雨及其产生的径流对水力侵蚀综合作用的径流侵蚀功率,以宁夏回族自治区水土流失严重的清水河流域为研究对象,基于 SWAT 模型模拟研究了清水河流域年径流侵蚀功率的空间分布特征及其空间尺度效应。结果表明:(1)清水河流域多年平均径流侵蚀功率在流域内呈现“支流大,干流小;东部大,西部小”的空间分布规律;(2)当子流域出口断面控制面积小于 4 000 km<sup>2</sup>时,子流域多年平均径流侵蚀功率与子流域出口断面集水面积间呈显著的幂函数关系;当子流域出口断面集水面积大于 4 000 km<sup>2</sup>时,子流域多年平均径流侵蚀功率稳定在  $1.56 \times 10^{-5} \text{ m}^4/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$  左右;(3)优先选择处于清水河上中游区域且出口断面集水面积小于 84.85 km<sup>2</sup>的小流域进行生态治理,可取得良好的水土流失治理效果。因此径流侵蚀功率具有一定空间分布规律且与流域集水面积间具有显著相关关系,掌握这一规律和相关关系可为流域生态治理提供理论支持。

**关键词:**清水河流域; SWAT 模型; 年径流侵蚀功率; 空间分布; 阈值

**中图分类号:** P333; S157

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2022)06-0090-07

## Spatial Distribution of Annual Runoff Erosion Power in Qingshuihe River Basin Based on SWAT Model

YANG Guang<sup>1</sup>, LU Kexin<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1,2</sup>, LIU Hailiang<sup>1</sup>, LIU Guihua<sup>1</sup>, CAO Fenghua<sup>1</sup>,  
MA Tianwen<sup>1</sup>, WANG Dejun<sup>2</sup>, WEN Miaoxia<sup>2</sup>, SUN Jingmei<sup>2</sup>

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Areas Region of China, Xi'an  
University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.Key Laboratory of National Forestry Administration on  
Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to explain the spatial distribution of water erosion in Qingshuihe River Basin from the perspective of energetics, this study chose to focus on the runoff erosion power which can better represent the comprehensive effect of underlying surface conditions, also rainfall and its runoff generated on water erosion is selected. The Qingshuihe River Basin suffering from serious soil and water loss located in the Ningxia Hui Autonomous Region was selected as the object of research in this paper. The SWAT model was constructed to study the spatial distribution characteristics and spatial distribution scale effect of annual runoff erosion power in Qingshuihe River Basin. The results show that: (1) The annual average runoff erosion power in the Qingshuihe River Basin presents a spatial distribution law of ‘larger in tributaries than of that in the main stream, and larger in the east region than of that in the west region’; (2) When the control area at the outlet section of the sub-basin is less than 4 000 km<sup>2</sup>, there is a significant power function relationship between the mean-annual runoff erosion power of the sub-basin and the control area at the outlet section of the sub-basin.

收稿日期: 2021-08-23

修回日期: 2021-10-09

资助项目: 国家林业和草原局自主研发项目计划“黄河流域生态用水与林草植被格局优化配置”(LC-6-06)

第一作者: 杨光(1997—), 男, 河南三门峡人, 硕士研究生, 研究方向为流域水沙模拟。E-mail: a554976470@qq.com

通信作者: 鲁克新(1974—), 男, 山东泰安人, 博士, 副教授, 主要从事水土资源过程与调控研究。E-mail: lkx2942@163.com

When the control area at the outlet section of the sub-basin is greater than 4 000 km<sup>2</sup>, the mean-annual runoff erosion power of the sub-basin is stable at about  $1.56 \times 10^{-5}$  m<sup>4</sup>/(s · km<sup>2</sup>); (3) The small watershed with the control area at the outlet section has an area of less than 84.85 km<sup>2</sup>, which located in the upper and middle reaches of the Qingshuihe River, has been selected as the comprehensive ecological harness small watershed, which can achieve a good soil erosion control effect. Therefore, the runoff erosion power has a certain spatial distribution law and has a significant correlation with the catchment area of the watershed. Mastering this law and correlation can provide theoretical support for the ecological governance of the watershed.

**Keywords:** Qingshuihe River Basin; SWAT model; annual runoff erosion power; spatial distribution; threshold value

为更好地表示流域下垫面条件、降雨及其产生的径流对水力侵蚀的综合作用,李占斌等<sup>[1]</sup>提出的径流侵蚀功率概念通过引入洪峰流量模数  $Q'_m$  参数,不仅将流域下垫面因素与洪水过程有机结合起来,还可以表示水力侵蚀的动力过程。鲁克新等<sup>[2-3]</sup>的研究结果表明,与降雨侵蚀力相比,径流侵蚀功率更适宜用作流域尺度次暴雨产沙模型的侵蚀动力因子;并通过基于径流侵蚀功率的次暴雨输沙模型的建立,得出次暴雨径流侵蚀功率与流域输沙模数间呈现极显著的幂函数关系,径流侵蚀功率越大则流域输沙模数越大。程圣东<sup>[4]</sup>在无定河流域将径流侵蚀功率由场次尺度推广到月、年尺度,并且证明其与流域输沙模数间呈现显著的相关关系。龚珺夫等<sup>[5-6]</sup>运用 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型模拟分析了无定河和延河流域的水沙过程及年径流侵蚀功率的空间分布特征,研究表明:年径流侵蚀功率在流域内空间分布呈现一定特点。袁水龙等<sup>[7]</sup>运用 MIKE 模型模拟得出王茂沟流域径流侵蚀功率随着淤地坝的建设而发生变化,上游变化最为剧烈,且下游径流侵蚀功率明显小于上游。

SWAT 模型是美国农业部农业研究中心于 20 世纪 90 年代研发的以 SWRRB 为框架,同时融入了 CREAMS、GLEAMS、EPIC 和 ROTO 等模型优点的流域尺度长时段分布式水文模型<sup>[8]</sup>。国内外学者多使用 SWAT 模型进行流域水沙研究。Zhang 等<sup>[9]</sup>有关土地利用变化对于浑河流域产水产沙的影响的模拟结果表明,林地全年产沙量减少,水分入渗增加;草地和林地产流产沙对土地利用变化的响应相似,但前者的水土保持效果弱于后者。邢立文等<sup>[10]</sup>研究结果表明,气候变化对产沙的影响比产流大,产流、产沙与降雨呈正相关关系而与气温呈负相关关系,降雨量的变化对产流和产沙的影响比气温大。刘世梁等<sup>[11]</sup>有关澜沧江中游小流域水土流失变化与 NDVI 时空变化的研究结果表明,澜沧江中游小流域的径流产沙量

在空间尺度上随着流域植被 NDVI 的增大而减小,在时间尺度上与流域植被 NDVI 间的关系不显著。朱楠等<sup>[12]</sup>研究了罗玉沟土地利用结构对流域水沙的影响,结果表明林地的减水、减沙效果最好,坡耕地的产流、产沙量最大;当林地分布在流域上游时,到达流域中游出口的水沙量最小。然而,以往研究学者主要利用 SWAT 模型研究气候变化和土地利用变化对流域水沙的影响等,而对于黄河流域上游径流侵蚀功率的空间分布规律的研究还不够深入。

本研究以宁夏回族自治区水土流失严重的清水河流域为研究对象,基于 SWAT 模型开展清水河流域径流模拟,并使用程圣东<sup>[4]</sup>提出的能更好表示流域年径流过程的年径流侵蚀功率公式计算各子流域出口断面的年径流侵蚀功率,进而进行年径流侵蚀功率的空间分布特征和尺度效应研究,以期从径流侵蚀功率角度解释流域水力侵蚀的空间分布情况,为后续在清水河流域不同区域开展针对性的水土保持措施布设以及生态治理工作提供理论支撑。

## 1 研究区概况

清水河是黄河宁夏段最大的支流,地理位置为东经 105°09'—116°43',北纬 35°49'—37°30',发源于六盘山东麓固原市,向北流经原州区、海原县、同心县、中宁县等县(区),在中宁县的泉眼山西侧注入黄河,全长 320 km,流域面积 14 481 km<sup>2</sup>,河道平均纵比降 1.49‰。流域地貌以黄土丘陵沟壑区为主,地势南高北低,河源海拔 2 489 m,入黄口海拔 1 190 m,相对高差 1 299 m。

清水河流域多年平均降水量 349 mm,年降水量空间分布不均,由南到北递减,流域上、下游的年降水量分别为 600, 200 mm。流域内年平均气温由南向北递减,北部中卫市年平均气温 8℃ 以上,中部同心县年平均气温 7~8℃,南部固原市年平均气温 5~6℃。清水河流域日照多、湿度小、风大,水面蒸发强烈,多年平均水面蒸发量 1 272 mm,年水面蒸发量介

于 900~1 300 mm<sup>[13]</sup>。清水河流域多年平均入黄泥沙量约占宁夏黄河流域入黄泥沙总量的 49%<sup>[14]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

SWAT 模型的输入数据包括流域数字高程模型 (DEM) 数据、土地利用数据、土壤类型数据及逐日降水量等气象数据。根据土壤类型数据使用 SWAT 模型的 SPAW 工具计算得到土壤下渗率、电导度、可持水量等土壤参数数据,进而制备 SWAT 模型运行所需的土壤参数数据库。根据逐日降水量气象数据,使用 SWAT Weather 工具计算各气象站点的各月月降水量的均值标准差、最高和最低气温均值和标准差、月均湿度、月均太阳辐射以及月均风速数值,制备天

气发生器,为后续流域径流模拟提供参考。

本研究使用的清水河流域空间数据包括中科院地理空间数据云 30 m 分辨率的 DEM 数据、中国科学院遥感所解译的 1980 年流域土地利用数据以及世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSD) 中的 1:100 万比例尺流域土壤类型数据。

本研究使用的水文气象数据包括:1976—1986 年《黄河流域水文年鉴》摘录历年的清水河流域 22 个雨量站的逐日降水量以及清水河干流韩府湾水文站的逐日平均流量;来自国家气象科学数据中心的中卫、中宁、同心、海原、固原和西吉 6 个气象站点的逐日降水量、气温、风速、太阳辐射以及相对湿度等气象数据。清水河流域水文站、气象站和雨量站空间分布见图 1。

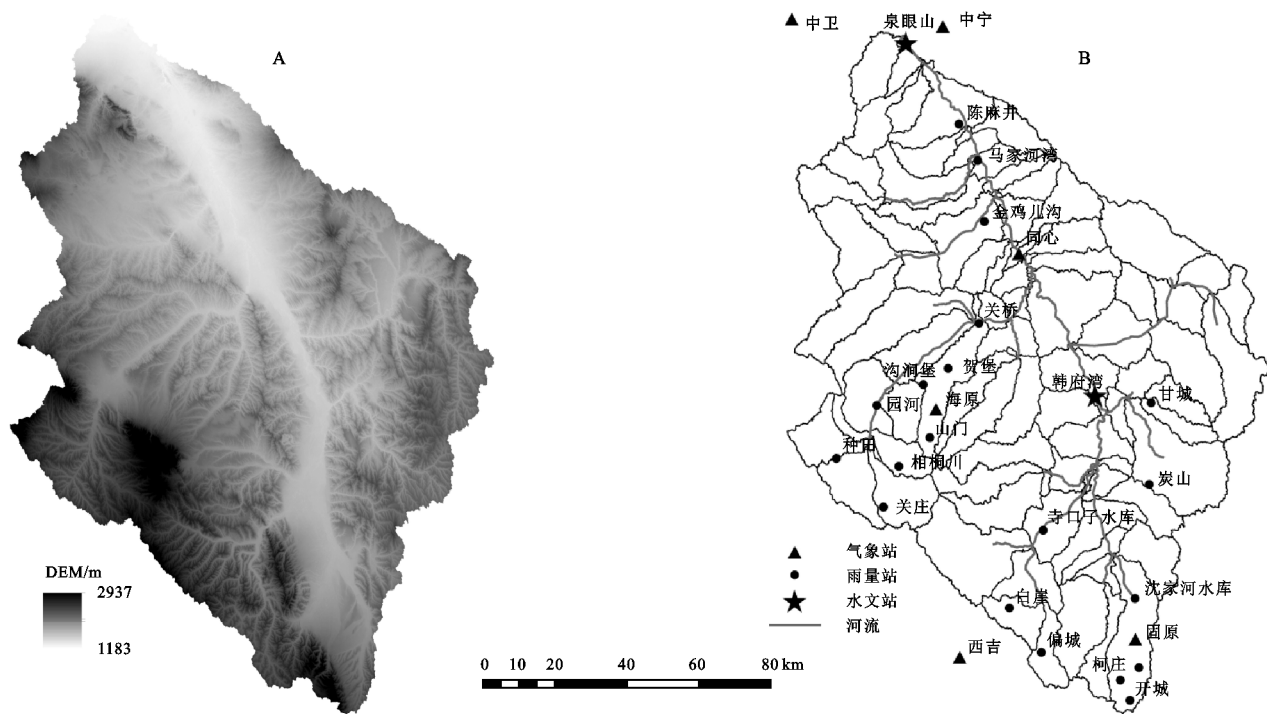


图1 清水河流域 DEM 数据、站点分布

### 2.2 模型建立

本研究使用 ARCSWAT 2012 版本对清水河流域进行径流模拟。在进行流域划分时,本研究把集水区面积阈值设置为 10 000 hm<sup>2</sup>并以清水河入黄口作为流域出口,将整个清水河流域划分为 93 个子流域,详见图 1B。在建立水文响应单元 (HRU) 时,需要输入土地利用数据、土壤类型数据和坡度数据。

土地利用类型对流域产汇流具有重要影响,将预先准备好的 1980 年清水河流域的土地利用数据重分类为耕地、林地、草地、水域、城镇居民用地以及未利用地 6 类土地利用类型。统计结果表明,清水河流域最主要的土地利用类型为草地,面积占流域面积的

56%;其次为耕地,面积占流域面积的 37%,而其他 4 种土地利用类型面积合计占流域面积的比例不足 10%。清水河流域的耕地主要沿河道两岸分布,而流域北部分布有大范围的草地以及未利用地。清水河流域 1980 年土地利用类型空间分布图见图 2。

输入土壤数据,从 HWSD 的土壤数据库中提取清水河流域的土壤数据,重新分类为 23 种不同的土壤类型;将流域内的坡度划分为 5 级 (0~15%, 15%~25%, 25%~35%, 35%~45%, 45%~99.99%)。

在 HRU 定义时,将土地利用数据、土壤类型数据以及流域坡度的阈值都设置为 5%,共划分出 2 058 个 HRU。通过阈值的设定,可以减少面积过小的土地



利用、土壤类型以及坡度对于模型模拟结果精度的影响<sup>[15]</sup>。将整理好的气象数据如逐日的降水、气温、风速、太阳辐射以及相对湿度数据输入 SWAT 模型,随后将其写入数据库后即可运行 SWAT 模型。

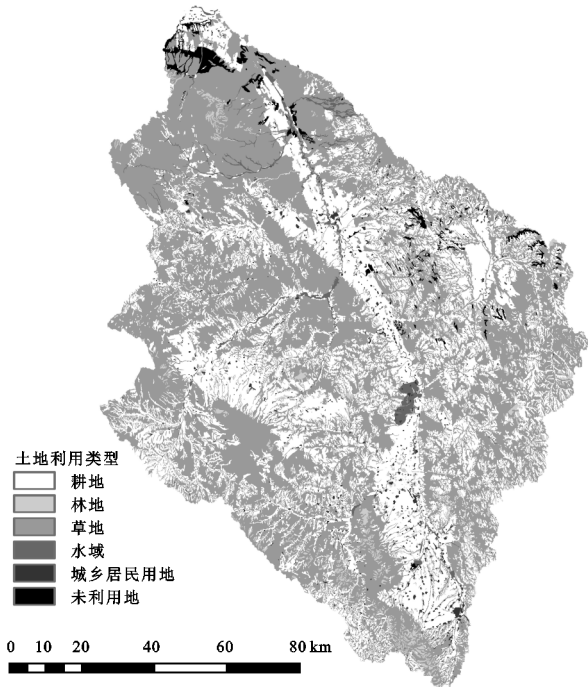


图 2 清水河流域 1980 年土地利用类型空间分布

为了确保 SWAT 模型模拟结果的准确性,本研究以清水河干流韩府湾水文站 1976 年、1977 年作为预热期,以 1978—1982 年历年各月实测月平均流量数据进行模型参数率定,以 1983—1986 年历年各月实测月平均流量数据进行模型验证。

### 2.3 模型参数敏感性分析

影响 SWAT 模型模拟结果的参数众多,为了减少模型运行的不确定性和提高模型的运行效率,需要对模型的相关参数进行敏感性分析。

本研究使用 LH-OAT 算法对 SWAT 模型的参数进行敏感性分析,以  $p$  和  $t$  检验值作为参数敏感程度的评判标准, $p$  值越接近于 0 且  $t$  值越大,则说明参数越敏感<sup>[16]</sup>。本研究选择对模型模拟结果敏感性较高的参数参与后续的模型参数率定和验证。

### 2.4 模型率定与验证

SWAT 模型运行成功后,需要验证模型模拟结果的可靠性。本研究选取清水河干流的韩府湾水文站的实测径流资料对模型模拟结果进行验证。选取参数敏感性分析中的敏感性较高的参数参与模型率定和验证。使用 SUFI-2 算法对率定期参数进行率定,得到最优参数值,进而将最优参数值带入验证期进行参数验证。

本研究使用决定系数  $R^2$  以及纳什效率系数 NS 对清水河 SWAT 模型的适用性进行评估。 $R^2$  表示两个变量间的相关程度,值越接近于 1 说明两个变量间的相关关系越好;NS 一般用于评价观测值与模拟值的拟合程度,值越接近于 1 说明拟合情况越好,当  $NS=1$  时,观测值和模拟值完全相等。一般研究<sup>[17-21]</sup>认为,当  $R^2$  和 NS 均大于 0.5 时,模型模拟结果可信。如果模型率定期和验证期的模拟结果均可信,则认为最优参数值适用于研究流域,模型模拟结果能较好地表示研究流域的实际径流情况。

### 2.5 径流侵蚀功率

程圣东<sup>[4]</sup>将径流侵蚀功率由场次尺度推广到年尺度的,考虑年径流深为  $H_y$ ,年内最大月平均流量为  $Q_m$ ,得到年尺度径流侵蚀功率计算公式如下:

$$E_y = Q'_m H_y \quad (1)$$

$$Q'_m = \frac{Q_m}{A} \quad (2)$$

$$H_y = \frac{Q_y \Delta t}{A} \quad (3)$$

式中: $E_y$  为年径流侵蚀功率 [ $m^4/(s \cdot km^2)$ ]; $A$  为研究流域的面积 ( $km^2$ ); $Q'_m$  为年内最大月平均流量模数 [ $m^3/(s \cdot km^2)$ ],其大小等于年内最大月平均流量  $Q_m$  与流域面积  $A$  比值; $H_y$  为年径流深 ( $m$ ); $Q_y$  为年平均流量 ( $m^3/s$ ); $\Delta t$  为时段长 ( $s$ ),此处按 365 d 计算年总秒数, $\Delta t = 3.1536 \times 10^7 s$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 模型率定与验证

使用清水河干流韩府湾水文站 1978—1986 年的实测月平均流量数据对清水河流域 SWAT 模型进行参数率定和验证。以 1979—1982 年的月平均流量为率定期数据,采用 LH-OAT 方法进行模型参数敏感性分析,选择 18 个敏感性强的参数进行率定,结果见表 1。

从表 1 中可以看出,对清水河流域径流模拟结果影响最大的参数为决定流域径流量大小的 SCS 径流曲线数 CN2,CN2 越大则地表径流量就越大;其次是主要影响下渗情况的表层土壤容重 SOL\_BD 以及主要表示河岸地下径流对于河道流量的补给快慢的主河道调蓄系数 ALPHA\_BNK。另外,其余参数如降雪气温 SFTMP、浅层地下水径流系数 GWQMN、基流消退系数 ALPHA\_BF、主河道曼宁系数 CH\_N2 都对流域径流模拟结果的影响较为敏感。

将收集到的韩府湾水文站实测月平均流量数据划分为预热期(1976 年和 1977 年)、率定期(1978—

1982 年)和验证期(1983—1986 年)3 个阶段。在 SWAT-CUP 软件中,使用率定期数据对上文选取的 18 个参数对进行参数率定,将参数进行优化迭代,直至决定系数  $R^2>0.6$  且纳什效率系数  $NS>0.5$ ,则可认为模型的模拟结果可信。将率定期得到的最优参数值回代到验证期后再次运行 SWAT 模型,并根据验证期的月流量模拟值与实测值再次计算决定系数  $R^2$ 和纳什效率系数  $NS$ 。若验证期的决定系数  $R^2>0.6$  且纳什效率系数  $NS>0.5$ ,则认为 SWAT 模型的模拟结果可信,确定的模型最优参数值可用于后续的月流量模拟计算。

表 1 清水河流域 SWAT 模型参数敏感性排名

敏感性排名	参数名称	参数定义
1	CN2	SCS 径流曲线数
2	SOL_BD	表层土壤容重
3	ALPHA_BNK	主河道调蓄系数
4	SFTMP	降雪气温
5	GWQMN	浅层地下水径流系数
6	ALPHA_BF	基流消退系数
7	CH_N2	主河道曼宁系数
8	REVAPMN	地下水再蒸发深度
9	GW_REVAP	地下水再蒸发系数
10	SOL_AWC	表层土壤有效含水率
11	SOL_K	土壤饱和导水率
12	EPCO	植物蒸腾补偿系数
13	GW_DELAY	地下水滞后系数
14	SLSUBBSN	平均坡长参数
15	CH_K2	主河道水利传导系数
16	CANMX	最大冠层蓄水量
17	SMTMP	雪融最低气温
18	ESCO	土壤蒸发补偿系数

韩府湾水文站率定期(1978—1982 年)和验证期(1983—1986 年)月平均流量实测值与模拟值对比结果见图 3。

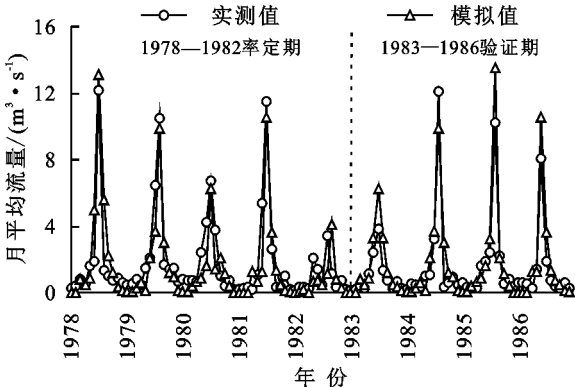


图 3 1978—1986 年韩府湾站月平均流量过程模拟值与实测值对比

经计算,模型率定期的决定系数  $R^2$  为 0.76、纳什效率系数  $NS$  为 0.74;验证期的决定系数  $R^2$  为 0.88,纳什效率系数  $NS$  为 0.85。因此认为清水河流域月流量过程的模拟结果可信,SWAT 模型在清水河流域具有良好的适用性。

利用 SWAT 模型可以得到 1978—1986 年清水河流域入黄口断面以及流域 93 个子流域出口断面的月流量过程数据以及历年年径流深等数据。

3.2 径流侵蚀功率空间分布

清水河流域 SWAT 模型输出文件中的 Sub 表中的子流域产水量(WYLD)字段包含 1978—1986 年 93 个子流域的逐月月产水量数据,以此可以推求出各子流域的多年平均径流深  $H$ ;经统计分析,从 Sub 表中查得各子流域历年的最大月径流深  $h_m$ 。将径流侵蚀功率公式进一步变换得到公式(4)—(5)。

$$h_m A' = Q_m \Delta t \tag{4}$$

$$Q'_m = \frac{Q_m}{A'} = \frac{h_m A'}{A' \Delta t} = \frac{h_m}{\Delta t} \tag{5}$$

式中: $h_m$ 为年内最大月径流深(m); $A'$ 为子流域面积( $\text{km}^2$ ); $\Delta t$ 为时段长(s),此处平均按每月 30.4 d 计算各月总秒数, $\Delta t=2.627\times10^6\text{ s}$ 。

由公式(5)得到 1978—1986 年清水河各子流域历年年内最大月平均流量模数  $Q'_m$ ,最后由公式(1)计算得到相应年份各子流域的年径流侵蚀功率。利用 1978—1986 年清水河各子流域历年的年径流侵蚀功率结果求得多年平均径流侵蚀功率,并基于 ArcGIS 平台制作清水河流域多年平均径流侵蚀功率空间分布图(图 4)。

从图 4 可以看出,清水河流域多年平均径流侵蚀功率呈现“支流大,干流小;东部大,西部小”的空间分布规律,即各支流区域的多年平均径流侵蚀功率大于清水河干流,且流域西部地区的多年平均径流侵蚀功率明显小于东部地区。

3.3 年径流侵蚀功率的空间尺度效应

为了探究流域径流汇聚效应与流域径流侵蚀功率的关系,本节进一步研究了子流域年径流侵蚀功率与子流域出口断面集水面积间的相关关系。

SWAT 模型输出的 Rch 表包含各子流域出口断面的集水面积和月流量(FLOW-OUT)。子流域出口断面的集水面积指子流域出口断面以上的集水区总面积。子流域出口断面流量(FLOW-OUT)指子流域出口断面以上汇聚到子流域出口处的流量。以各子流域出口断面的集水面积  $A'$ 和多年平均月平均流量(FLOW-OUT),依据公式(1)—(3)计算各子流

域出口断面多年平均径流侵蚀功率。

由图 5 可知,在各级支流的径流汇聚过程中,子流域出口断面的多年平均径流侵蚀功率都有减少的趋势,尤其以流域上游地区较为明显,但此趋势在清水河下游集水面积较大的子流域间不太明显。因此,本研究将出口断面集水面积小于 4 000 km<sup>2</sup> 的子流域的集水面积与子流域出口断面多年平均径流侵蚀功率进行拟合分析,试图找到子流域出口断面集水面积与子流域出口断面多年平均径流侵蚀功率间的相关关系,二者关系散点图见图 6。由图 6

可知,子流域出口断面多年平均径流侵蚀功率随着子流域出口断面集水面积的增大而迅速减小,直到出口断面集水面积达到某一数值时子流域出口断面多年平均径流侵蚀功率对其敏感性降低以至于趋于稳定。

经回归分析,当子流域出口断面集水面积小于 4 000 km<sup>2</sup> 时,清水河子流域出口断面多年平均径流侵蚀功率  $E$  与子流域出口断面集水面积  $A_c$  间呈如下显著的幂函数关系

$$E=4.746A_c^{-0.758}, \quad R^2=0.6336 \tag{6}$$

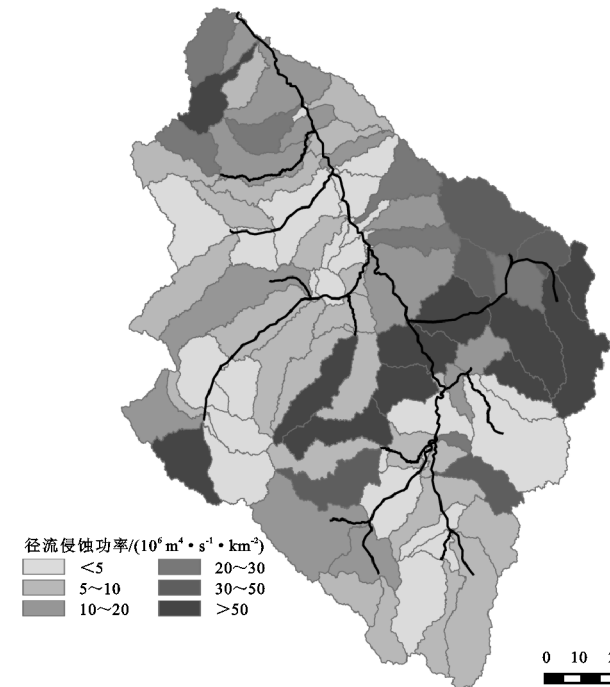


图 4 1976—1986 年清水河流域多年平均径流侵蚀功率空间分布

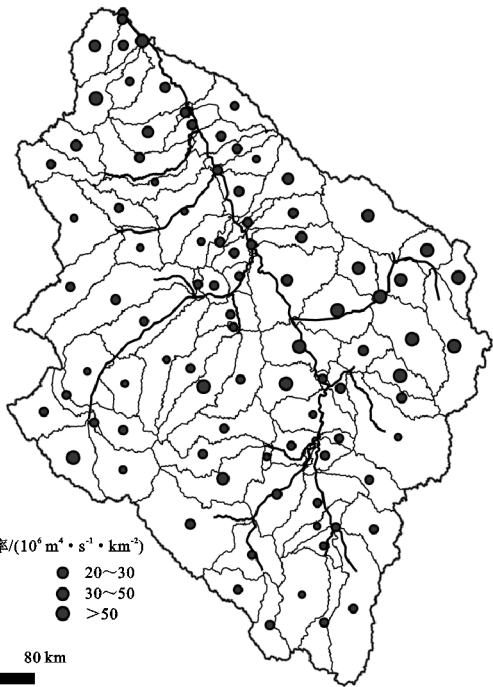


图 5 1976—1986 年清水河流域各子流域出口断面多年平均径流侵蚀功率空间分布

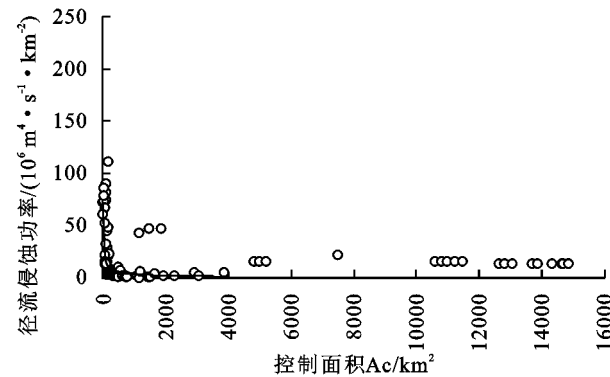


图 6 子流域出口断面集水面积与多年平均径流侵蚀功率拟合分析

经统计分析,当子流域出口断面集水面积大于 4 000 km<sup>2</sup> 时,出口断面多年平均径流侵蚀功率数值稳定在  $1.56 \times 10^{-5} \text{ m}^4 / (\text{s} \cdot \text{km}^2)$  左右。分析其主要原因可能是清水河流域右岸支流的汇水量过大,导致在下游地区干流与其他支流间的多年平均径流侵蚀

功率空间分布规律不明显。

为确定子流域出口断面集水面积的临界值,将公式(6)进行求导得到如下导数方程:

$$E'=2.458A_c^{-1.758} \tag{7}$$

$|E'| < 0.001$  说明子流域出口断面多年平均径流侵蚀功率变化速率减小,其值趋于稳定<sup>[6]</sup>。当出口断面集水面积  $A_c$  大于 84.85 km<sup>2</sup> 时,  $|E'| < 0.001$ ,子流域出口断面多年平均径流侵蚀功率不再随着子流域集水面积的增大而明显减少,因此影响清水河流域多年平均径流侵蚀功率大小的子流域出口断面集水面积空间阈值为 84.85 km<sup>2</sup>。

依据鲁克新等<sup>[3]</sup>提出的流域次暴雨输沙模型研究结果,流域次暴雨径流侵蚀功率与流域输沙模数呈幂函数关系,径流侵蚀功率越大则流域输沙模数越大。因此,在进行清水河流域生态治理时,优先选择



处于流域上中游区且出口断面集水面积小于 84.85 km<sup>2</sup> 的小流域,可取得良好的水土流失治理效果。

## 4 讨论

### 4.1 年径流侵蚀功率空间分布规律

通过本研究以及龚珺夫等<sup>[5-6]</sup>在永定河及延河的径流侵蚀功率空间分布的研究发现,不同流域的年径流侵蚀功率存在区域性差异的同时,也有共同的特点。从空间角度来看,流域年径流侵蚀功率的空间分布情况与流域下垫面条件、气候情况相关,不同流域会具有不同的年径流侵蚀功率空间分布特点。从流域水系的角度来看,不同流域的多年平均径流侵蚀功率都存在“支流大,干流小”的空间分布规律。

### 4.2 年径流侵蚀功率的空间尺度效应

为了更好地研究子流域出口断面径流侵蚀功率与子流域出口断面集水面积间的相关关系,本研究相较于龚珺夫<sup>[5-6]</sup>的研究选取了程圣东<sup>[4]</sup>提出的年径流侵蚀功率,使用年径流深作为径流侵蚀能量的参数,以期更好地表达流域的径流侵蚀功率情况。研究结果表明,清水河子流域多年平均径流侵蚀功率与子流域出口断面集水面积间呈显著的幂函数关系,与龚珺夫等<sup>[5-6]</sup>的研究结果相似。不同流域的径流侵蚀功率的子流域集水面积阈值并不相同。对于清水河流域而言,小于流域集水面积阈值的子流域均位为各支流的河源处,即图 5 中径流侵蚀功率较大的区域,这对于清水河流域生态治理具有一定的实际指导意义。

### 4.3 不足与展望

本研究基于 SWAT 模型模拟研究了清水河流域的年径流侵蚀功率的空间分布规律及其空间尺度效应,但并未阐明清水河流域的多年平均径流侵蚀功率存在“支流大,干流小”空间分布规律的机理。另外,本研究没有进行清水河流域产沙输沙量模拟,因此无法将模拟得到的清水河流域径流侵蚀功率用于流域输沙模数计算。以上两个方面的不足还有待今后深入开展相关研究,以期能为流域侵蚀产沙预报与流域生态治理提供理论指导。

## 5 结论

(1) 本文构建的清水河流域 SWAT 模型的率定期(1978—1982 年)决定系数  $R^2$  为 0.76,纳什效率系数 NS 为 0.74;验证期(1983—1986 年)决定系数  $R^2$  为 0.88,纳什效率系数 NS 为 0.85,因此 SWAT 模型在清水河流域径流模拟中具有良好的适用性,模拟的

径流结果可以较好地表示流域的实际径流情况。

(2) 清水河流域的多年平均年径流侵蚀功率具有“支流大,干流小;东部大,西部小”的空间分布规律。

(3) 清水河子流域多年平均径流侵蚀功率随着出口断面集水面积的增大而迅速减小,而当子流域出口断面集水面积达到临界阈值时出口断面径流侵蚀功率对其敏感性降低并趋于稳定。当子流域的出口断面集水面积小于 4 000 km<sup>2</sup> 时,子流域多年平均径流侵蚀功率与出口断面集水面积间呈显著的幂函数关系。清水河上中游流域多年平均径流侵蚀功率的流域出口断面集水面积临界阈值约为 84.85 km<sup>2</sup>。优先选择处于清水河上中游区且出口断面集水面积小于 84.85 km<sup>2</sup> 的小流域进行水土保持措施布设及生态治理,可取得良好的水土流失治理效果。

### 参考文献:

- [1] 李占斌,鲁克新,李鹏.基于径流侵蚀功率的流域次暴雨产沙模型研究[C]//第六届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集.郑州:黄河水利出版社,2005.
- [2] 鲁克新,李占斌,鞠花.不同空间尺度次暴雨径流侵蚀功率与降雨侵蚀力的对比研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(10):204-208.
- [3] 鲁克新,李占斌,李鹏,等.基于径流侵蚀功率的流域次暴雨输沙模型研究:以岔巴沟流域为例[J].长江科学院院报,2008,25(3):31-34.
- [4] 程圣东.黄土区植被格局对坡沟-流域侵蚀产沙的影响研究[D].西安:西安理工大学,2016.
- [5] 龚珺夫.永定河流域水沙变化及侵蚀能量空间分布研究[D].西安:西安理工大学,2018.
- [6] 龚珺夫,李占斌,李鹏,等.基于 SWAT 模型的延河流域径流侵蚀能量空间分布[J].农业工程学报,2017,33(13):120-126.
- [7] 袁水龙,李占斌,李鹏,等.基于 MIKE 模型的不同淤地坝型组合情景对小流域侵蚀动力和输沙量的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):30-36.
- [8] 程磊,徐宗学,罗睿,等. SWAT 在干旱半干旱地区的应用:以窟野河流域为例[J].地理研究,2009,28(1):65-73.
- [9] Zhang L M, Meng X Y, Wang H, et al. Simulated runoff and sediment yield responses to land-use change using the SWAT model in Northeast China[J]. Water, 2019, 11(5):915-937.
- [10] 邢立文,魏新平,董娟.基于 ArcSWAT 模型的李子溪流域水沙运移模拟[J].人民珠江,2019,40(11):10-15.
- [11] 刘世梁,安南南,尹艺洁,等.基于 SWAT 模型的澜沧江中游小流域水土流失与 NDVI 时空动态相关性[J].水土保持学报,2016,30(1):62-67.

业研究,2017,35(4):80-87.

[21] 陈洪松,邵明安.黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J].水科学进展,2003,14(4):513-520.

[22] 丛振涛.冬小麦生长与土壤—植物—大气连续体水热迁移的耦合研究[M].北京:清华大学出版社,2003.

[23] 王润元,杨兴国,张九林.陇东黄土高原土壤贮水量与蒸发和气候研究[J].地球科学进展,2007,22(6):625-635.

[24] 侯青青,裴婷婷,陈英,等.1986—2019 年黄土高原干旱变化特征及趋势[J].应用生态学报,2021,32(2):649-660.

[25] Schwinning S, Sala O E, Loik M E, et al. Thresholds, memory, and seasonality: Understanding pulse dynamics in arid/semi-arid ecosystems [J]. Oecologia, 2004,141(2):191-193.

[26] 李廷亮,谢英荷,洪坚平,等.晋南旱地麦田夏闲期土壤水分和养分变化特征[J].应用生态学报,2013,24(6):1601-1608.

[27] 廖允成,韩思明,温晓霞.黄土台源旱地小麦土壤水分特征及水分利用效率研究[J].中国生态农业学报,2002,10(3):55-58.

[28] 王全九,柴晶,王翔翔.夏闲期降水对黄土旱塬冬小麦水氮利用效率的影响[J].农业工程学报,2015,31(24):82-88.

[29] 邓妍,高志强,孙敏,等.夏闲期深翻覆盖对旱地麦田土壤水分及产量的影响[J].应用生态学报,2014,25(1):132-138.

[30] 侯贤清,李荣,韩清芳,等.夏闲期不同耕作模式对土壤贮水保墒效果及作物水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2012,28(3):94-100.

[31] 孙敏,温斐斐,高志强,等.苗果园.不同降水年型旱地小麦休闲期耕作的蓄水增产效应[J].作物学报,2014,40(8):1459-1469.

[32] 薛澄,王朝辉,李富翠,等.渭北旱塬不同施肥与覆盖栽培对冬小麦产量形成及土壤水分利用的影响[J].中国农业科学,2011,44(21):4395-4405.

(上接第 96 页)

[12] 朱楠,马超,王云琦,等.基于 SWAT 模型的不同土地利用结构对流域水沙的影响[J].中国水土保持科学,2016,14(4):105-112.

[13] 李颖曼,焦鹏,张晓华.宁夏清水河流域近 60 年降水量及入黄沙量变化[J].水土保持研究,2021,28(2):184-189.

[14] 李帅,魏虹,刘媛,等.气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟[J].生态学报,2017,37(4):1252-1260.

[15] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W. SWAT: model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the ASABE, 2012,55(4):1491-1508.

[16] 武海喆,刘登峰,黄强,等.不同潜在蒸发估算方法对黄土高原渭河径流模拟的影响研究[J].人民珠江,2020,41(10):36-43,65.

[17] 李颖,王康,周祖昊.基于 SWAT 模型的东北水稻灌区水文及面源污染过程模拟[J].农业工程学报,2014,30(7):42-53.

[18] 孟现勇,吉晓楠,刘志辉.SWAT 模型融雪模块的改进与应用研究[J].自然资源学报,2014,29(3):528-539.

[19] 王磊,刘亭亭,谢建治.基于 SWAT 模型的张家口清水河流域土地利用情景变化对径流影响研究[J].水土保持研究,2019,26(4):245-251.

[20] 毕直磊,张妍,张鑫,等.土地利用和农业管理对丹江流域非点源氮污染的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):135-141.

[21] 邵辉,高建恩,Claire Baffaut.基于 SWAT 模型新开发梯田模块的中国南方红壤区梯田水沙及养分流失模拟[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(5):147-156.