

# AnnAGNPS 模型在黄土丘陵沟壑区 小流域的适用性评价

闫胜军<sup>1,2</sup>, 郭青霞<sup>2</sup>, 闫瑞<sup>3</sup>, 赵富才<sup>2</sup>, 李洋<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学 环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875; 2. 山西农业大学 资源与环境学院, 山西 太谷 030801; 3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

**摘要:** 在水土流失较严重、生态环境较脆弱的黄土丘陵沟壑区定量化研究土壤侵蚀对于合理利用土地及保护环境显得尤为重要。本文运用基于过程的 AnnAGNPS 模型对典型黄土丘陵沟壑区 - 岔口小流域的水土流失进行模拟, 以 5 场次暴雨径流量及泥沙量评价模型适用性。模拟结果表明: 模型能较好的模拟地表径流, 模拟相对误差为  $-21.46\% \sim 2.26\%$ , 确定性系数  $R^2$  为 0.99, Nash - Sutcliffe 系数为 0.99。模型对泥沙模拟精度较低。对岔口小流域土壤侵蚀定量分析表明, 单位面积泥沙流失量最严重的区域集中在坡耕地上, 尤以核桃树与玉米间种的坡耕地流失最大。

**关键词:** 径流模拟; 泥沙模拟; AnnAGNPS 模型; 土壤侵蚀; 适用性评价; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: P338.9 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2016)01-0013-07

## Suitability evaluation of AnnAGNPS model in Chakou watershed of typical loess hilly region

YAN Shengjun<sup>1,2</sup>, GUO Qingxia<sup>2</sup>, YAN Rui<sup>3</sup>, ZHAO Fucal<sup>2</sup>, LI Yangyang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Resources and Environment, Shanxi Agriculture University, Taigu 030801, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The quantitative evaluation of soil erosion is of great importance for the rational land utilization and environment protection in the typical loess hilly region with a serious soil erosion and vulnerable ecological environment. This paper applied AnnAGNPS model which based on process to simulate the soil erosion in Chakou watershed. The applicability of model was validated by using the measured data of runoff and sediment load of five storms. The results indicated that AnnAGNPS model can better simulate surface runoff, the relative error of runoff is from  $-21.46\%$  to  $2.26\%$  ( $R^2 = 0.99$ ,  $E = 0.99$ ). While the simulation accuracy of the model to sediment is low. The results indicated that the most serious soil erosion of sediment volume per unit area occurred in slope cropland, especially the slope cropland with the walnut trees and corn.

**Key words:** simulation of runoff; simulation of sediment; AnnAGNPS model; soil erosion; applicability evaluation; typical loess hilly region

## 1 研究背景

黄土丘陵沟壑区夏季降水集中且雨量大, 流水冲蚀作用强, 是我国乃至世界上水土流失较严重、生态环境较脆弱的地区。如何定量化研究泥沙及营养

物质流失对于合理利用土地及保护环境显得尤为重要。分布式模型方法逐渐成为研究水土流失的重要手段<sup>[1]</sup>。通常来说, 不同的模型会有不同的模拟表现力及适用性。模型的选用与模拟的目标、流域特点以及可利用的数据紧密相关。以流域为尺度的模

收稿日期: 2015-09-09; 修回日期: 2015-11-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41071345)

作者简介: 闫胜军(1987-), 男, 河南中牟县人, 在读博士, 研究方向: 流域水环境过程。

通讯作者: 郭青霞(1969-), 女, 山西阳城人, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 土地利用规划、土地信息技术研究。

型大都包含各种各样的输入参数,且能模拟地表径流、泥沙,如 ANSWERS, AGNPS, DWSM, MIKE SHE, SWAT 和 AnnAGNPS 模型<sup>[2]</sup>。ANSWERS 模型可模拟土地利用方式对水文和侵蚀的影响,但输入数据复杂<sup>[3]</sup>;AGNPS 和 DWSM 是单事件模型,不能进行时间尺度的模拟<sup>[4]</sup>;MIKE SHE 对资料的完备性和详细程度要求较高,对于进行长时期不同土地利用变化模拟显得繁琐<sup>[4]</sup>;AnnAGNPS 和 SWAT 能较好的长时间预测土地利用对地表径流、泥沙的影响<sup>[4]</sup>,但 SWAT 模型不能模拟详细的基于事件的洪水和泥沙,日模拟存在系统误差,水库出流计算过于简化<sup>[3]</sup>。AnnAGNPS 模型在最佳管理方式的模拟中表现得更好<sup>[5]</sup>。

AnnAGNPS 模型通过对整个流域及其内部复杂过程的定量描述,有助于分析水沙流失产生的时间和空间分布特征,识别其迁移途径,预报水沙流失对环境的影响,为流域规划和管理提供决策支持<sup>[6]</sup>。AnnAGNPS 模型在南方水土流失较严重的流域有较强的适用性。李硕等<sup>[7]</sup>在湫水河流域以年观测数据评价模型的模拟精度,地表径流多年平均相对误差为 11.8%,产沙量多年平均相对误差为 19.71%,表明 AnnAGNPS 模型在年、月尺度上能较好地模拟地表径流和产沙过程;此外程炯等<sup>[8]</sup>在珠江三角洲新田小流域、高菲等<sup>[9]</sup>在长江三角洲太湖流域丘陵区应用 AnnAGNPS 模型在日尺度上预测径流、泥沙均有较好的表现。

岔口小流域位于黄土高原丘陵沟壑区,以农业土地利用为主,近年来流域内修建淤地坝、进行坡改梯、实行退耕还林,水土流失得到一定程度防治,但仍有一定量的泥沙及营养物质流失。目前 AnnAGNPS 模型在黄土丘陵沟壑区地表径流、泥沙模拟研究报导不多,其适用性有待验证。将 AnnAGNPS 模型引用到建有淤地坝等水土保持工程的岔口小流域,一方面拓展模型在我国的应用范围,另一方面为淤地坝等水土保持工程的优化管理提供依据。本文通过大量实地调查建立 AnnAGNPS 模型数据库,根据流域出口监测的 5 场降雨数据评价模型对场次降水的径流和泥沙的预报能力,并分析流域水土流失的空间分布特征,为流域水土保持管理决策提供科学依据。

## 2 研究区概况

岔口小流域地处山西省西南部的永和县、隰县与石楼县 3 县接壤地带,属黄河一级支流范围和典

型的黄土丘陵沟壑区第二副区。地理坐标为东经 110°38′01″~110°50′02″,北纬 36°47′26″~36°57′14″。海拔在 1 023~1 415.6 m 之间,梁峁起伏,沟壑纵横。研究区选择以把口站为流域出口,岔口把口站以上面积 126.59 km<sup>2</sup>。岔口小流域是入黄支流第一批坝系示范工程区域,目前,能拦沙蓄水的工程包括骨干坝 23 座、中型坝 19 座、小型坝 32 座,部分淤地坝剩余死水位库容较小,蓄水作用减少,但仍有一定的调洪淤沙能力,大中型坝位置如图 1 所示。流域降水年内变化悬殊,汛期集中在 6~9 月,流域多年平均降水量 510.9 mm。汛期常形成历时较短的洪水径流,洪水量占到全年径流量的 90%,且洪水泥沙含量高。流域土壤主要为地带性褐土,以山地褐土、黄土质褐土性土、草甸土为主。

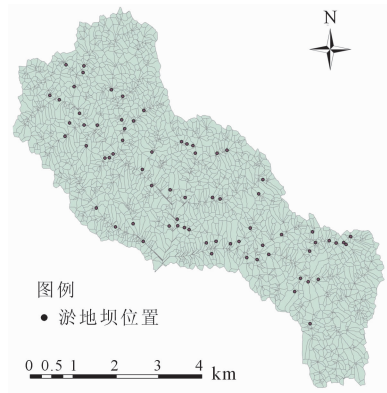


图 1 岔口小流域大中型坝系图

## 3 模型简介与参数率定

### 3.1 模型简介

AnnAGNPS 模型是一种分布式的流域尺度模型,能以日为基础连续模拟一个时段内每天累计的径流、泥沙等的负荷量,并可用于评价流域内非点源污染的长期作用效果<sup>[10]</sup>。模型应用 TOPOAZ (Topographic Parameterization) 对 DEM 进行处理,综合土壤数据、土地利用数据划分均质水文响应单元,确定河网及相应水文单元的参数<sup>[11]</sup>。模型包括水文子模型、土壤侵蚀子模型和化学物质输移子模型。水文子模型中包含两个计算法则:土壤水分平衡方程(耕作层和底土层)和地表径流模型<sup>[12]</sup>。地表径流采用修正的 SCS-CN 径流曲线数法计算,并根据农作物耕作措施、前期水分条件和作物情况,自动调整相应的 CN 值<sup>[13]</sup>。各水文响应单元的潜在蒸散量用 Penman 方程来表示,峰值流量计算则采用 TR55<sup>[14]</sup>。

某时间步长内的水分平衡方程如下所示:

$$SM_{t+1} = SM_t + \frac{WI_t + Q_t + PERC_t + ET_t + Q_{lat} + Q_{tile}}{Z} \quad (1)$$

式中:  $SM_t$  为土层某时间起始水分含量,%;  $SM_{t+1}$  为土层某时间终止时水分含量,%;  $WI_t$  为水分输入,mm;  $Q_t$  为表面径流,mm;  $PERC_t$  为水分渗出量,mm;  $ET_t$  为蒸发量,mm;  $Q_{lat}$  为测流量,mm;  $Q_{tile}$  为管道流,mm;  $Z$  为土层厚度,mm;  $t$  为时间,d。

各水文响应单元产生的地表径流量方程:

$$Q = \frac{WI - 0.2S^2}{WI + 0.8S} \quad (2)$$

$$S = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3)$$

式中:  $Q$  为地表径流量,mm;  $WI$  为土壤中输入水量,mm;  $S$  为水土保持无量纲滞留系数;  $CN$  为径流曲线数。

土壤侵蚀模块中地表泥沙侵蚀量采用修订通用水土流失方程 RUSLE, 每个水文响应单元可以使用不同的 RUSLE 方程参数值和农业管理参数值; 各集水单元的侵蚀量向沟道的输移率计算由 HUSLE (Hydro-geomorphic USLE)<sup>[7]</sup> 来完成, 泥沙汇入河道后的传输与沉积过程采用 Bagnold 指数方程<sup>[7]</sup> 计算。

通用水土流失方程为:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (4)$$

式中:  $A$  为土壤年侵蚀量,  $t/hm^2$ ;  $R$  为降雨侵蚀力因子;  $K$  为土壤可蚀性因子,  $t/hm^2$ ;  $L$  为坡长因子;  $S$  为坡度因子;  $C$  为覆盖管理因子;  $P$  为水土保持工程措施因子。

HUSLE 方程形式为:

$$S_y = 0.22Q^{0.68} \cdot q_p^{0.95} \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

$$D_r = \frac{S_{y2}}{S_{y1}} = \frac{q_{p2}^{0.95}}{q_{p1}} \quad (5)$$

式中:  $S_y$  为沉淀量,  $10^3 t/hm^2$ ;  $Q$  为径流量,mm;  $q_p$  为表面径流最大流量,mm/s;  $K$ 、 $L$ 、 $S$ 、 $C$ 、 $P$  为通用水土流失方程参数;  $S_{y1}$ 、 $S_{y2}$  为子单元 1、2 沉淀量  $10^3 t/hm^2$ ;  $q_{p1}$ 、 $q_{p2}$  为子单元 1、2 最大流量,mm/s;  $D_r$  为子单元 1 到子单元 2 的输移率。

### 3.2 模型参数率定

AnnAGNPS 模型的模拟运算需要大量的流域数据为支撑, 参数包括地形、气象、土地利用与管理及土壤数据 4 大类, 约 500 多个参数。模型模拟精度与获取的参数紧密相关, 为使参数能更好地反映流域特征且保证模拟的精度, 本研究做了大量的实际调查。

3.2.1 气象数据 模型所必须的气象数据以日为单位, 包括最低气温、最高气温、降水量、露点温度、天空覆盖度和风速。气象数据中最低温、最高温、风速从位于流域东南方向 1 km 处的岔口气象站获取, 降水量根据流域内呈三角形分布的自记雨量计简单加权求平均得到, 其他参数则根据相关研究获取<sup>[15]</sup>。

3.2.2 地形数据 数字地面高程模型 (DEM) 是用来确定流域边界、产生河网、划分水文相应单元及计算单元内坡度、坡长等参数的依据, 较高精度的 DEM 能最大限度反映流域的真实地表状况, 本文以研究区 1:10000 比例尺 5 m 等高间距的地形图为底图, 经等高线矢量化, 最后生成空间分辨率为 10 m × 10 m 的 DEM。AnnAGNPS 模型通过将 DEM 数据导入 TOPAZ 模块产生所需的 cell 和 reach 数据, 过程中最小汇水源面积 (CSA) 和最小初始沟道长度 (MSCL) 两个参数决定产生的 cell 和 reach 个数和大小。综合权衡模型精度和计算效率, 根据地形特征及植被覆盖条件确定 CSA 和 MSCL 分别为 5 ha 和 100 m, 最终确定 2722 个 cell 和 1097 个 reach 数据。

3.2.3 土地利用及管理操作数据 土地利用方式反映人们土地利用活动对地表的影响, 因此详细的土地利用方式将有助于人们更清楚的认识土地利用变化带来的影响。基于此本文考虑种植作物、后期管理措施如是否人工除草、施肥量及方式的不同而加以详细划分, 如坡耕地根据种植作物分为玉米、大豆、谷子、土豆 4 种作物类型, 又根据主要作物玉米的除草方式、施肥不同在玉米作物区的基础上再细分归纳为 3 类, 共 6 种坡耕地利用类型。每一种土地利用类型都有相对应的作物数据及后期管理数据, 具体参数见<sup>[16]</sup>。土地利用现状如图 2 所示。

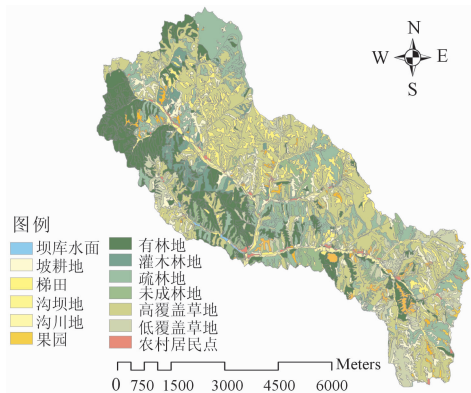


图 2 岔口小流域土地利用现状图 (2013 年)

3.2.4 土壤数据 土壤类型、面积和分布, 以 1:50000 土壤图为基础数据, 参照 1:10000 地形图

DRG 分别进行校正配准,矢量化,制图综合处理。根据流域内土壤图确定各土种位置,设置剖面点取样,获得土壤相应理化性质。采用比重计法确定美国制下各个粒径含量,利用 SPAW 软件获得土壤质地和凋萎点数据。具体参数值见文献[16]。

**3.2.5 淤地坝数据** AnnAGNPS 模型包含淤地坝模块可分析淤地坝、水库等的影响<sup>[12]</sup>,但模型只考虑了淤地坝对泥沙沉积的影响,并未考虑淤地坝由于死水位而扣留地表径流的情况,也未考虑超过死水位时由卧管排出对径流流速及泥沙的影响。根据模型开发人员 Ron Bingner 的建议,将 impound 模块和 wetland 模块一起使用来模拟淤地坝对地表径流、泥沙及营养物质的作用。将流域内淤地坝按照对地表径流、泥沙拦蓄作用不同分为两部分,一部分为既能蓄水又能淤沙,模型中只设置 wetland 模块参数,另一部分为对径流流速有影响同时又能淤沙,只设置 impound 模块,此类反映流域内部分淤地坝死库容已淤积用完,径流能通过淤地坝,但流速受影响。Impound 模块数据是根据淤地坝坝地治理工程设计报告中提供的坝高-库容数据,通过 excel 的规划求解功能求解各个坝系的蓄水量-水深幂指函数的系数和指数,淤地坝排泄量-水深幂指函数则根据淤地坝的卧管排水量确定,由于卧管建设一致,故排泄系数和排泄指数采用同一组值(见表1)。剩余死库容则是当年实际剩余的死库容,由实际测量剩余死库容深度计算获取。根据剩余死库容及死水位以下深度确定 wetland 数据中的坝高、最高水位及湿地面积参数(见表2)。

表1 岔口小流域 impound 数据

沟道 ID	下渗速率/ (mm·h <sup>-1</sup> )	蓄水量 系数	蓄水量 指数	排泄 系数	排泄 指数
570	0.5	0.030	2.27	0.054	0.5
1022	0.5	0.139	2.05	0.054	0.5
811	0.5	0.003	3.35	0.054	0.5
874	0.5	0.002	3.03	0.054	0.5
870	0.5	0.025	2.64	0.054	0.5
910	0.5	0.008	2.94	0.054	0.5
735	0.5	0.001	3.70	0.054	0.5
28	0.5	0.019	2.77	0.054	0.5
631	0.5	0.030	2.63	0.054	0.5

**3.2.6 切沟数据** 模型中的潜在切沟数据主要体现耕地中由于耕作措施引起。模型还考虑那些由于耕作措施导致切沟消失但仍可能形成切沟的部分。

本文根据流域 DEM 数据使用 TOPAGNPS 模型提取流域的潜在切沟数据。由于沟坝地、沟川地及梯田地面平整,形成切沟的可能性不大,因此考虑实际情况从提取的流域切沟数据去除沟坝地、沟川地及梯田中的切沟数据,共提取潜在切沟数据 39 045 个。

表2 岔口小流域 wetland 数据

湿地 ID	沟道 ID	湿地面积/ hm <sup>2</sup>	最大水 深/mm	入渗速率/ mm/d	坝宽/ m	坝高/ m
1	11	5.89	800	12	100.00	0.80
2	28	1.18	600	12	68.39	0.60
3	43	1.65	950	12	96.20	0.95
4	776	0.33	590	12	73.00	0.59
5	536	0.73	450	12	73.50	0.45
6	380	1.11	800	12	86.30	0.80
7	385	1.10	350	12	66.50	0.35
8	396	0.44	3390	12	88.50	3.39
9	316	0.44	880	12	72.50	0.88
...	...	...	...	...	...	...
60	1089	0.11	2000	12	32.00	2.00

**3.2.7 雨量观测数据** 2013 年降雨比较充沛,截止到7月底降雨已达到 590 mm,超过历年平均降雨量。次降雨事件的降雨量、降雨历时和降雨集中程度有较大差异。其中,7月4日降雨量最大,达到 73 mm,历时 9 h;7月11日,降雨量为 52.4 mm,但降雨集中,其中 1 h 最大降雨达到 23.4 mm;7月25日降雨强度较大,降雨量为 51.3 mm,其最大 10 min 雨强为 42 mm/h。各场降雨的 24 h 降雨量累积分布曲线如图3所示。从图3中可以看出暴雨类型与模型中流域暴雨 II 型曲线比较相似,因此选用流域暴雨 II 型曲线进行洪峰流量计算。

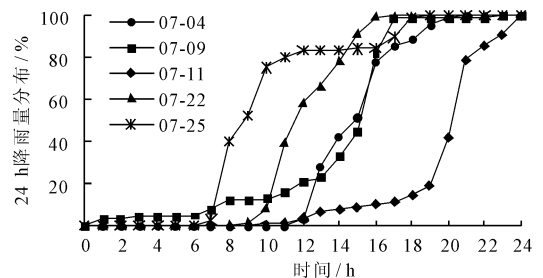


图3 2013年7月岔口小流域24h降雨量分布曲线

洪水及泥沙观测取样参照《小流域水土流失综合防治》<sup>[17]</sup>,在流域出口,径流变化快的阶段采取径流变化随即定点采集含沙流 500 mL,对于径流水深比较稳定阶段采用等时间间隔采样即每隔 10 min

(稳定前期) ~ 20 min(稳定后期) 采集泥沙水样, 在实际观测过程中会根据降雨的特点适当加密采集次数。从观测的洪水过程来看, 各场降雨的洪水过程曲线差别较大, 7 月 25 日降雨洪水过程为单峰曲线, 其他 4 场降雨洪水则呈现多峰现象, 主要与流域内两大主沟的汇流时间的不同而出现相应的峰值变化, 同时也与降雨特征有关。泥沙的峰值随着洪水的峰值变化, 但滞后于洪水洪峰, 且延后的程度随着降雨的不同而不同。其中两场降雨的洪水、泥沙过程曲线(水深 5 cm 以上部分) 如图 4 和图 5 所示:

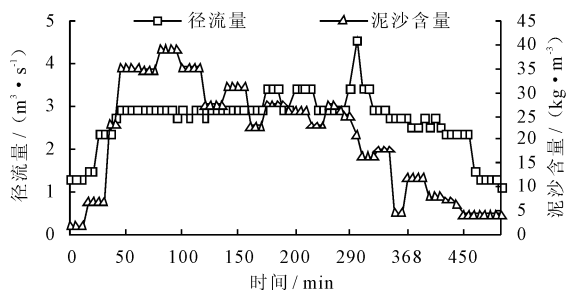


图 4 2013 年 7 月 22 日洪水、泥沙过程曲线

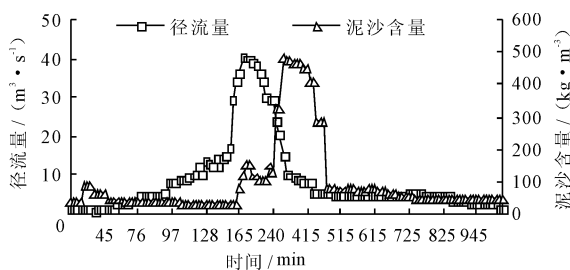


图 5 2013 年 7 月 25 日洪水、泥沙过程曲线

## 4 验证与分析

### 4.1 模型检验

模型适用性评价采用实测值与模拟值的相对误差和绘制 1:1 连线图及回归曲线两种方法表示。相对误差越小, 则拟合度越好, 模型的适用性越高。在 1:1 连线图上, 数据点越接近 1:1 连线, 则拟合度越高。确定性系数  $R^2$  则表示实测值与模拟值的相关关系, 值越大表示相关关系越好。相对误差公式如下:

$$D_v = \frac{V - V'}{V'} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $D_v$  为相对误差;  $V$  为模型模拟值,  $m^3$ ;  $V'$  为实测值,  $m^3$ 。  $D_v$  值越小代表拟合度越高。Nash - Sutcliffe 系数常用来评价模型效率, 特别是对一些极端值比较敏感, 取值范围  $-\infty \sim 1$ 。系数值越接近 1, 预测精度越高, 其计算公式为<sup>[18]</sup>:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

式中:  $E$  为 Nash - Sutcliffe 系数;  $O_i$  为第  $i$  场次降雨的观测值,  $m^3$ ;  $P_i$  为第  $i$  场次降雨的模型模拟值,  $m^3$ ;  $n$  为场次降雨观测次数;  $\bar{O}$  为场次降雨观测平均值,  $m^3$ 。

### 4.2 地表径流、泥沙验证及误差分析

4.2.1 地表径流参数调整 径流和泥沙是营养物质流失的载体<sup>[14]</sup>。因此按照地表径流、泥沙、营养物质的顺序进行参数调整和验证。影响地表径流的主要参数有 SCS 的径流曲线数  $CN$  值、土壤供水能力参数以及日蒸散数据。在确保土壤数据准确的基础上, 调整径流曲线数  $CN$ , 其初始值参考 TR55 确定, 再根据流域内 3 个径流场数据反推径流场内的相应  $CN$  值, 对初始  $CN$  值进行微调, 使模拟结果最大程度的接近。

4.2.2 地表径流模拟结果及误差分析 从 5 次暴雨模拟结果来看(表 3 和图 6), 地表径流模拟的相对误差在  $-21.46\% \sim 2.26\%$ , 确定性系数  $R^2$  为 0.99, Nash - Sutcliffe 系数为 0.99, 模拟结果可以接受。分析误差来源, 主要有以下几方面, 模型概化一种降雨分布曲线模拟降雨, 会增加场次降雨模拟上的误差。第 3 次降雨径流模拟值偏低, 与前期土壤比较湿润, 且其降雨分布曲线中斜率大于 II 型降雨曲线, 意味着降雨更集中且强度大。淤地坝对径流作用明显, 且淤地坝容易发生溃坝, 对流域出口径流、泥沙观测值影响非常大。

表 3 2013 年 7 月 5 场暴雨日径流量实测值与模拟值对比

日期	降雨量/ mm	实测值/ $m^3$	模拟值/ $m^3$	相对 误差/%	$R^2$	$E$
2013-07-04	73.0	91859.50	97285.31	5.91		
2013-07-09	35.3	12568.29	11083.66	-11.81		
2013-07-11	52.4	133131.69	104558.31	-21.46	0.99	0.99
2013-07-22	38.7	118166.05	142362.95	20.48		
2013-07-25	51.7	547459.88	559822.69	2.26		

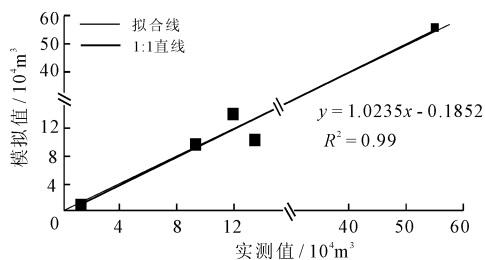


图 6 2013 年 7 月 5 场暴雨日径流量实测值与模拟值拟合图

另外,根据实测数据可知,流域内同期降雨存在明显的空间分布不均匀现象,单天降雨量最大差值达18.4 mm,此为导致较大误差产生的另一个原因。

4.2.3 泥沙参数调整 在地表径流验证的基础上进行泥沙验证,模型通过模拟泥沙的分离、输移和沉积来表现泥沙流失过程。影响水侵蚀泥沙的主要因素有气候、土壤特性(团聚体比率和土壤质地)、土地管理、土壤覆盖及地形因子。作物经营管理因子 $C$ 最敏感,土壤可侵蚀因子 $K$ 次之。管理因子 $C$ 主要体现作物种植、轮作以及作物操作管理,与之相关的参数主要包括林冠覆盖度、冠层高度、地表覆盖度、地下生物量(根系生物量和残留)、地表随机粗糙度及土壤水分等。本文结合流域实际情况,部分参数参考相关文献,通过调整相关 $C$ 因子值,使模拟结果与实际值最大程度的接近。

4.2.4 泥沙模拟结果及分析 表4是产沙负荷量模拟值与观测值,表明模型对泥沙的模拟表现出很大不确定性。7月4日预测偏差较大是由于淤地坝大量扣留径流及泥沙,使得流域出口观测值明显小于泥沙模拟值。7月11日及25日的预测偏低是由于黄土高原土质疏松,前期土壤湿润,高强度降水引起滑坡造成实际观测值较大。在25日之后的实际调查发现此次降雨后大小滑坡随处可见、道路塌陷、窑洞冲毁,泥沙冲入河道使得观测的泥沙量极高。

表4 2013年7月5场暴雨日泥沙量实测值与模拟值对比

日期	降雨量/ mm	实测值/ t	模拟值/ t	相对 误差/%	$R^2$	$E$
2013-07-04	73.0	513.65	3400.45	562.02		
2013-07-09	35.3	73.17	91.18	24.62		
2013-07-11	52.4	14300.64	2199.24	-84.62	0.01	-0.31
2013-07-22	38.7	1781.36	631.29	-64.56		
2013-07-25	51.7	103840.53	1777.50	-98.29		

表5为流域内3个径流场监测数据。从表5中可以看出,在表现降雨对地表的冲刷能力上,7月11日各类型径流场的泥沙流失最大,但流域出口的观测值相对不高,而7月4日各类型径流场的泥沙流失比较大,但出口观测值却相对较小。这说明淤地坝对泥沙的拦截作用显著,而坝系下游的滑坡更增大把口站出口处泥沙观测值的变化。从模型模拟的结果来看,在大量建设有淤地坝的黄土丘陵沟壑区,对于降水较多年份其场次泥沙流失量模拟值偏差较大。而正常降水年份场次泥沙流失量预测精度还需要长期观测确定。

表5 岔口小流域径流场观测泥沙含量

日期	坡地径 流场/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	草地径 流场/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	林地径 流场/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	把口站出 口监测泥 沙量/t
2013-07-04	48.64	8.85	2.46	513.65
2013-07-09	15.74	2.68	0.88	73.17
2013-07-11	74.55	4.63	1.28	14300.64
2013-07-22	11.30	4.24	1.69	1781.36
2013-07-25	11.82	10.67	3.03	103840.53

模型对泥沙模拟结果的偏差较大,这在其他研究中也有类似的结果。Sarangi等<sup>[19]</sup>在St Lucia流域评价AnnAGNPS模型对地表径流和泥沙的预报能力,指出模型对输沙量的预测能力不足,对场次降水输沙量预测精度变化较大,最差输沙量被低估55%,文章认为误差来源是由于该次降水的前期降水较少,模型默认为前期土壤条件干旱。Kliment<sup>[5]</sup>等在一个干旱区的河流流域评价AnnAGNPS模型和SWAT模型对泥沙变化的模拟,两者都对场次降水的泥沙量预测表现出不确定性,出现部分过低预测和过高预测泥沙量的场次降雨,有些场次被低估近百倍,有些场次被高估近4倍。Shamshad<sup>[18]</sup>、Sutles等<sup>[20]</sup>指出AnnAGNPS模型在较小降雨预测中易低估泥沙流失量而在较大降雨中则容易高估。Yuan等<sup>[21]</sup>指出模型对场次泥沙预测精度较低的原因是由于确定泥沙流失的参数体现的长期年平均侵蚀量。Zema<sup>[22]</sup>等指出场次泥沙流失量预测偏低是由于模型对径流量和洪峰流量的低估。

### 4.3 讨论

水文模型是对水文过程概念化和抽象化,并运用数学公式、方程和流程来描述,因水沙过程极其复杂,难免存在着不确定性。这主要包括模型对某些过程的概化以及参数确定过程中的不确定性。AnnAGNPS模型对岔口小流域的场次泥沙模拟偏差较大,本文认为泥沙预测误差来源主要有以下几个方面:

(1)模型内在局限性,即对淤地坝拦水、拦沙模拟的局限性,以及单日地表侵蚀量计算采用的是改进的通用土壤流失方程RUSLE,而RUSLE常用来确定泥沙年度平均侵蚀量。

(2)流域土壤结构不稳定,滑坡的产生、淤地坝的冲毁导致出口泥沙的监测量变化较大,而模型则缺少相应的滑坡模块。

(3)流域内河道状况变化较大,暴雨前期河道内充满杂草,对地表径流、泥沙阻碍作用较大,后期暴雨

冲刷,河道通畅,而模型体现河道阻碍作用的参数曼宁系数为固定值,对大中型流域来说影响较大。

(4)流域出口实测泥沙流失量的计算误差,采用等时间间隔的采样方式可能是产生预测偏差较大的另一个原因。

## 5 水土流失的空间分布特征

### 5.1 水流失分析

土壤质地对水文响应单元产水量影响较大。土壤水文组为 D 的地块产生径流量高于其他类型水文组。对于不同土种而言,单位面积上年降雨流失最多的为居民点用地,最小的为林地。按照土地利用类型来看,水流失较重的地区集中在坡耕地、沟坝地、沟川地、梯田,其中坡耕地由于坡度较大,覆盖度低,成为水流失最多的地类。而像有林地,疏林地、荒草地这些人为干扰较少、植被覆盖度高蓄水保水作用明显。

### 5.2 泥沙流失分析

从泥沙来源来看,大部分泥沙流失来源于土壤表层和细沟侵蚀,其余来自切沟侵蚀。5 次暴雨中切沟侵蚀对泥沙流失的贡献率各不相同,最高单场暴雨中切沟侵蚀流失的泥沙量占整个泥沙流失的 81.41%,最小的为 7.33%。从单位面积上泥沙流失量上看,受人为干扰的坡耕地,沟坝地,沟川地及果园的泥沙流失大于人为干扰较少的荒草地和林地,其中坡耕地泥沙流失最为严重,且以核桃树与玉米间种的坡耕地流失最大,其单位面积年平均流失量为  $633.67 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。林地及草地由于其较高的覆盖度,没有人为扰动地表,泥沙流失都较小。这与流域内草地、林地径流场的实际泥沙流失量相符合。从泥沙流失的组成成分来看前几场降水导致的泥沙流失中粘粒含量占绝对比例,后期泥沙流失中粉粒含量比例逐渐增大。

## 6 结 论

(1)应用 AnnAGNPS 模型对岔口小流域出口的径流量和泥沙量进行模拟,通过模拟结果与场次降雨的实测结果拟合分析,结果表明模型对径流模拟效果较好,相对误差在  $-21.46\% \sim 2.26\%$ ,确定性系数  $R^2$  为 0.99, Nash - Sutcliffe 系数为 0.99,但对泥沙量的模拟精度较低,其模拟偏差的原因主要与模型自身局限性、流域的特征如易滑坡、溃坝等要素相关。

(2)从单位面积上年水流失量上看,对不同土

种而言,居民点用地的水流失率最高,林地最低;水流失较重的地区主要集中在受人为干扰影响较大的坡耕地、沟坝地、沟川地、梯田中,其中尤以坡耕地的单位面积流失量最大。

(3)流域泥沙流失主要来源于土壤表层和细沟侵蚀,其余来自切沟侵蚀。分析单位面积泥沙流失量,受人为干扰的坡耕地,沟坝地,沟川地及果园的泥沙流失大于人为干扰较少的荒草地和林地,其中坡耕地泥沙流失最为严重,且以核桃树与玉米间种的坡耕地流失最大,其单位面积年平均流失量为  $633.67 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

### 参考文献:

- [1] 洪华生,黄金良,张珞平,等. AnnAGNPS 模型在九龙江流域农业非点源污染模拟应用[J]. 环境科学,2005,26(4):63-69.
- [2] 边金云,王飞儿,杨佳,等. 基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究[J]. 环境科学,2012,33(4):2659-2666.
- [3] 夏军,翟晓燕,张永勇. 水环境非点源污染模型研究进展[J]. 地理科学进展,2012,31(7):941-952.
- [4] Polyakov V, Fares A, Kubo D, et al. Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(11):1617-1627.
- [5] Kliment Z, Kadlec J, Langhammer J. Evaluation of suspended load changes using AnnAGNPS and SWAT semi-empirical erosion models[J]. Catena, 2008, 73(3):286-299.
- [6] 邹桂红,崔建勇. 基于 AnnAGNPS 模型的农业非点源污染模拟[J]. 农业工程学报,2007,23(12):11-17.
- [7] 李硕,刘磊. AnnAGNPS 模型在激水河流域产水、产沙的模拟评价[J]. 环境科学,2010,31(1):49-57.
- [8] 程炯,吴志峰,刘平,等. 珠江三角洲典型流域 AnnAGNPS 模型模拟研究[J]. 农业环境科学学报,2007,26(3):842-846.
- [9] 高菲,张文胜,刘庄,等. AnnAGNPS 模型在太湖流域丘陵区适用性研究[J]. 人民长江,2009,40(21):79-82.
- [10] Shrestha S, Babel M S, Gupta A D, et al. Evaluation of annualized agricultural nonpoint source model for a watershed in the Siwalik Hills of Nepal [J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(7):961-975.
- [11] Baginska B, Milne - Home W, Cornish P S. Modelling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST[J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18(8-9):801-808.

- [5] 赵军凯,李九发,戴志军,等. 长江宜昌站径流变化过程分析[J]. 资源科学, 2012,34(12): 2306-2315.
- [6] 李二辉,穆兴民,赵广举,等. 1919-2010年黄河上中游区径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2014,25(2): 155-163.
- [7] 刘二佳,张晓萍,张建军,等. 1956-2005年窟野河径流变化及人类活动对径流的影响分析[J]. 自然资源学报, 2013,28(7): 1159-1168.
- [8] 周园园,师长兴,杜俊,等. 无定河流域 1956-2009年径流量变化及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2012,27(5): 856-865.
- [9] 魏红义,李靖,王江,等. 渭河流域径流变化趋势及其影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2008,28(1): 76-80.
- [10] 肖洁,罗军刚,解建仓,等. 渭河干流径流年际及年内变化趋势分析[J]. 人民黄河, 2012,34(11): 32-36.
- [11] 毕彩霞,穆兴民,赵广举,等. 渭河流域气候变化与人类活动对径流的影响[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(2): 33-38.
- [12] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2000.
- [13] 丁小玲,周建中,陈璐,等. 基于模糊集合理论和集对原理的径流丰枯分类方法[J]. 水力发电学报,2015, 34(5): 4-9.
- [14] 王红芳,王素芳,王文圣,等. 基于集对原理的年径流状态时序变化特性分析[J]. 海河水利,2007(5): 31-33+40.
- [15] 郭旭宁,胡铁松,张涛,等. 基于集对分析的供水水库群联合调度规则[J]. 系统工程理论与实践, 2014,34(6): 1510-1516.
- [16] 金菊良,魏一鸣,王文圣. 基于集对分析的水资源相似预测模型[J]. 水力发电学报,2009,28(1): 72-77.
- [17] 蒋建军,刘建林. 陕西省渭河流域重点治理项目建设管理体制研究[M]. 西安:西北大学出版社,2008.

(上接第 19 页)

- [12] 黄志霖,田耀武,肖文发. AGNPS 模型机理与预测偏差影响因素[J]. 生态学杂志,2008,27(10): 1806-1813.
- [13] 李家科,李怀恩,李亚娇,等. 基于 AnnAGNPS 模型的陕西黑河流域非点源污染模拟[J]. 水土保持学报,2008, 22(6): 81-88.
- [14] Bingner R L, Theurer F D. AnnAGNPS Technical Processes Documentation[K]. Version USDA-ARS, 2005.
- [15] 闫胜军,闫瑞,芦三矿生,等. 黄土丘陵沟壑区岔口小流域 AnnAGNPS 模型数据库建立[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2013,33(2): 114-121.
- [16] 闫胜军. 岔口小流域 AnnAGNPS 模型验证和坡改梯生态效益分析[D]. 太谷:山西农业大学,2014.
- [17] 于怀良,杜天彪. 小流域水土流失综合防治[M]. 太原:山西科学技术出版社,1989.
- [18] Shamshad A, Leow C S, Ramlah A, et al. Applications of AnnAGNPS model for soil loss estimation and nutrient loading for Malaysian conditions[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10(3): 239-252.
- [19] Satangi A, Cox C A, Madramootoo C A. Evaluation of the AnnAGNPS model for prediction of runoff and sediment yields in St Lucia watersheds[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(2): 241-256.
- [20] Suttles J B, Vellidis G, Bosch D D, et al. Watershed-scale simulation of sediment and nutrient loads in Georgia coastal plain streams using the Annualized AGNPS model[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(5): 1325-1335.
- [21] Yuan Y, Bingner R L. Evaluation of AnnAGNPS on Mississippi delta MSEA watersheds[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(5): 1183-1190.
- [22] Zema D A, Bingner R L, Denisi P, et al. Evaluation of runoff, peak flow and sediment yield for events simulated by the AnnAGNPS model in a Belgian agricultural watershed[J]. Land Degradation & Development, 2012, 23(3): 205-215.