

AnnAGNPS 模型在潦水河流域产水、产沙的模拟评价

李硕^{1,2}, 刘磊¹

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046; 2. 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022)

摘要: 日益严重的土壤侵蚀造成了土地退化、水体污染等一系列的环境和生态问题, 利用基于过程的数学模型已成为流域土壤侵蚀状况定量评价和控制的有效方法。利用美国农业部开发的流域尺度 AnnAGNPS 模型, 设计了基于地形特征的 cell 离散方案, 在多种地理数据采集和参数化的基础上, 对江西兴国潦水河流域 1991 ~ 2005 年的径流、产沙过程进行了分布式计算机模拟。在对产水量进行径流滤波分析的基础上, 分别对模型模拟的地表径流和产沙量进行了校正和验证。地表径流模拟结果多年平均相对误差为 11.8%, 确定性系数 R^2 为 0.94, 产沙量模拟结果的多年平均相对误差为 19.71%, 确定性系数 R^2 为 0.77。表明 AnnAGNPS 能较好地模拟潦水流域年、月尺度的地表径流和产沙过程。地下径流模拟结果误差较大, 其原因和地下径流模拟模块在潦水流域的适用性有待进一步研究检验。对潦水流域土壤侵蚀定量分析表明, 潦水流域的年平均侵蚀模数为 $1\,150.29\text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 属于轻度侵蚀等级, 流域内侵蚀较严重的区域集中分布于居民地附近和公路沿线, 其水土流失与人类活动有很大关系。

关键词: AnnAGNPS 模型; 潦水河流域; 土壤侵蚀; 计算机模拟

中图分类号: X143 **文献标识码:** A **文章编号:** 1250-3301(2010)01-0049-09

Evaluation of AnnAGNPS Model for Simulation Water and Sediment Yield in the Lianshui River Watershed

LI Shuo^{1,2}, LIU Lei¹

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: Soil erosion has caused a series of environmental and ecological issues, such as land resource degradation and water pollution. It is an effective approach for quantitative evaluation and control of soil erosion by using processes based mathematic models. In this study, the Cell discretization units was extracted and a large number of basic geographical data including Digital Elevation Model (DEM), land use, soil as well as crop management practices, were collected and parameterized. The distributed computer modeling for water yield, sediment yield for the years 1991 to 2005 were carried out in the study area of Lianshui Basin, Xingguo County, Jiangxi province by using the basin scale AnnAGNPS model developed by USDA. The average simulation error and deterministic coefficient (R^2) were 11.8% and 0.94 for annual surface flow and 19.71% and 0.77 for annual sediment yield, respectively. The simulation result indicates that the model has an acceptable performance in prediction of surface flow and sediment loading in Lianshui basin. However, the predicted subsurface flow is much less than observed value, and the reason and the applicability for subsurface flow module in Lianshui basin will be further checked up in the future study. The spatial distribution of the sediment yield in the study area was analyzed using the simulation results. The average soil erosion amount is $1\,150.29\text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, which imply that Lianshui basin belongs to slight erosion. The areas nearby residential area and along the roads were the main sources of soil erosion and the soil loss is closely related to human activities.

Key words: AnnAGNPS; Lianshui River watershed; soil erosion; computer simulation

土壤侵蚀是地球表层物质迁移过程之一,也是地形地貌景观形成的主要动力之一,在全球变化和人为活动日益增强的背景下,严重的土壤侵蚀使耕地面积减少,土壤质量退化,导致水体污染,引起一系列的生态和环境问题。土壤侵蚀状况的评价一般采用下面几种方法:目视解译法,即按照地块土地利用类型、土壤类型以及地形条件等因素进行定性或半定量的判断,然后对结果进行分等定级,这种方法的不足是得到的土壤侵蚀等级和实际的水土流失量之间没有必然的联系。随着 3S 技术的发展,土壤

侵蚀评价出现了新方法,借助土壤侵蚀模型逐渐开始从半定量向全定量化发展,即模型法。但是不同的模型运行的机制以及适用的范围不同,目前比较常用的土壤侵蚀预测模型 USLE 方程主要进行侵蚀量的计算,但对流域内部河道传输过程缺乏描述。而基于物理过程的模型,例如 EROSION 3D^[1]、

收稿日期 2009-06-05 修订日期 2009-08-20

基金项目 国家自然科学基金重点项目(40730527) 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室开放基金项目(PK2008001); 十一五'国家科技支撑计划项目(2008BAC34B05)

作者简介 李硕(1967~),男,博士,副教授,主要方向为遥感、GIS 及分布式流域模拟, E-mail: lishuo@njnu.edu.cn

EUROSEM^[2]等仅适用于小流域或地块尺度的短时间模拟或事件模拟,无法适用于湫水河这样的较大流域.

AnnAGNPS (Annualized AGricultural Non-Point Source)模型是美国农业部农业研究局开发的适用于流域尺度的连续时段非点源污染模型,可以用来模拟流域的产流、产沙和化学养分迁移等过程.该模型在国际上得到广泛的应用,如 Yong 等^[3-5]在美国密西西比三角洲流域进行了养分迁移模拟和最佳管理措施效果评价等研究;Baginska 等^[6]以 Currency Creek 流域为研究区进行养分迁移模拟,并取得了较好的结果.此外,在国内的九龙江流域^[7]和千岛湖流域^[8]也有相关研究. AnnAGNPS 模型采用根据地形特征划分的“cell 离散”进行空间分布式模拟,相对于地块尺度模型,如 :APEX、AGNPS 等,其应用的范围进一步扩大,相对流域尺度的模型,如 SWAT 等,模拟结果具有较高的空间分辨率,可在坡面的基础上,进行水土流失定量评价.本研究使用 AnnAGNPS 模型对江西兴国湫水河流域的产水、产沙过程进行分布式计算机模拟,对 AnnAGNPS 在东南丘陵区适用性进行评价,在此基础上对湫水流域的土壤侵蚀状况进行定量分析,以期水土流失的治理规划和水土保持效益评价提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湫水河流域位于江西省兴国县的东北部,东经 115°30′50″~115°52′12″,北纬 26°18′04″~26°36′48″之间,流域面积 579.3 km² (图 1). 它是一个闭合的流域,东北高,西南底,高程变化 1 200~200 m,地形起伏较大,以低山丘陵为主.流域内部水系发达,流域出口位于西南端的东村水文站.气候类型为亚热带季风气候,多年平均温度和降水量分别为 18.9℃和 1 600 mm.流域内部土壤主要是水稻土、棕红壤,局部有红壤、黄红壤、石灰岩土等.植被主要为常绿阔叶林和针叶林.针叶林以马尾松林为主,但天然林破坏严重,多为残存的次生林和灌丛.农田以水稻田为主.

在 20 世纪 80 年代以前,该流域水土流失严重,是中国土壤侵蚀最剧烈的地区之一,曾一度被称为“南方的沙漠”.1983 年兴国县被国家确定为水土流失的重点治理地区,开展了大规模的小流域治理活动.经过近 25 年的治理,目前湫水流域水土流失状况已经得到明显的改善.

1.2 AnnAGNPS 模型概述

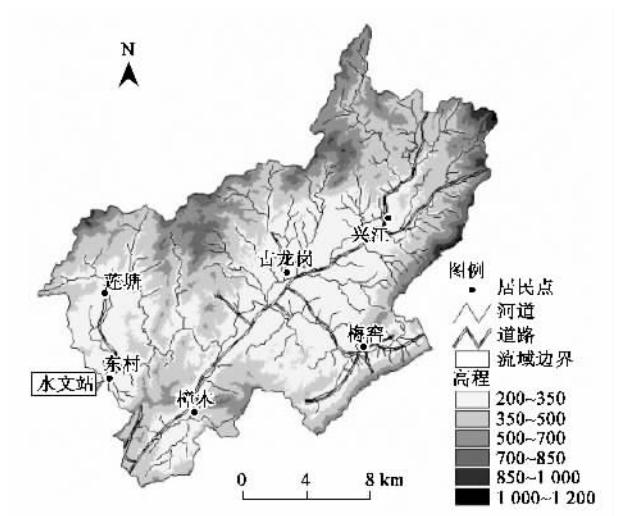


图 1 江西兴国湫水河流域 DEM、河网、雨量站、水文站示意
Fig.1 Digital Elevation Model (DEM), stream network and the monitoring stations in the Lianshui River watershed in Xingguo County, Jiangxi Province

AnnAGNPS 是流域尺度、连续时段、非点源污染过程模型^[9],由 AGNPS(AGricultural Non-Point Source)降雨事件(event-based)模型的基础上发展而来. AGNPS 模型采用格网进行空间离散,该模型适用的模拟范围从几 hm²至 20 000 hm²^[10],AnnAGNPS 相对于单事件版本有了很大改进:①陆面过程增加了地下水模拟模块;②在事件基础上,添加了组件,可以进行连续时段的模拟;③空间离散方式由原来的均等划分正方形格网改进为按照流域地形特征等条件划分为不规则的集水单元(cell),集水单元通过流域河网进行连接,模型对每个单元进行模拟计算,模拟结果通过河道演算得到流域出口的产水、产沙和氮磷等养分的迁移过程.模型的适用范围进一步扩大,最大可应用于面积达 3 000 km²的流域.

该模型可以模拟产流、蒸散发、土壤侵蚀、泥沙和养分的输移过程.地表径流采用修正的 SCS 径流曲线数法^[11]计算,峰值流量计算则采用 TR55 法^[11].对于集水单元内部的土壤侵蚀,使用修正的通用土壤流失方程(RUSLE)来计算^[12],而各集水单元的侵蚀物向沟道的输移率的计算由 HUSLE (Hydrogeomorphic USLE)^[13]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^[14]计算.

AnnAGNPS 模型最新的版本与 GIS 软件 ArcView 进行了有效集成,通过 GIS 强大的空间分析能力能够方便提取各种地形参数和因子.此外,模型自带的输入数据编辑器可以方便地对各种数据进行格式化,输出为模型的运行文件.模型模拟结果也可以通过

ArcView 直观地显示出来,便于分析.输出文件处理模块则可以将结果以日、月和年为单位分别进行统计.

2 AnnAGNPS 模型的模拟应用

2.1 空间离散单元的划分与地形参数提取

AnnAGNPS 采用在河道两边划分“ cell ”的方式进行空间离散,cell 实质为河道两侧一定面积的坡面汇水单元.本研究以栅格 DEM 数据为基础,利用模型提供的 ArcView-AnnAGNPS 集成界面,调用流网生成程序(Flownet Gernerator)的 TopAGNPS 和 AgFlow 模块自动生成集水单元 cell 和勾划地表排水沟道 reach,同时提取集水单元的面积、平均高程、坡向、坡

度等地形参数,以及排水沟道的高程、坡度和集水区面积等.集水单元的划分与沟道网络的提取通过临界源面积(critical source area, CSA)和最小源沟道长度(minimum source chanel length, MSCL)来确定. 2 个参数的取值主要以研究区域的地形特征为基础.一般来说,地形越平坦,2 个参数越大,生成的集水单元和沟道就越少.本研究利用河道“嵌入”(burned-in)方法对 DEM 进行了预处理^[15],即利用地形图数字化得到的河网叠加到 DEM 上,对河道所在的 DEM 格网进行高程修正,使得提取的河道和流域实际河网基本一致.经反复对比实验后将流域划分为1 330 个集水单元和 535 个沟道(图 2).

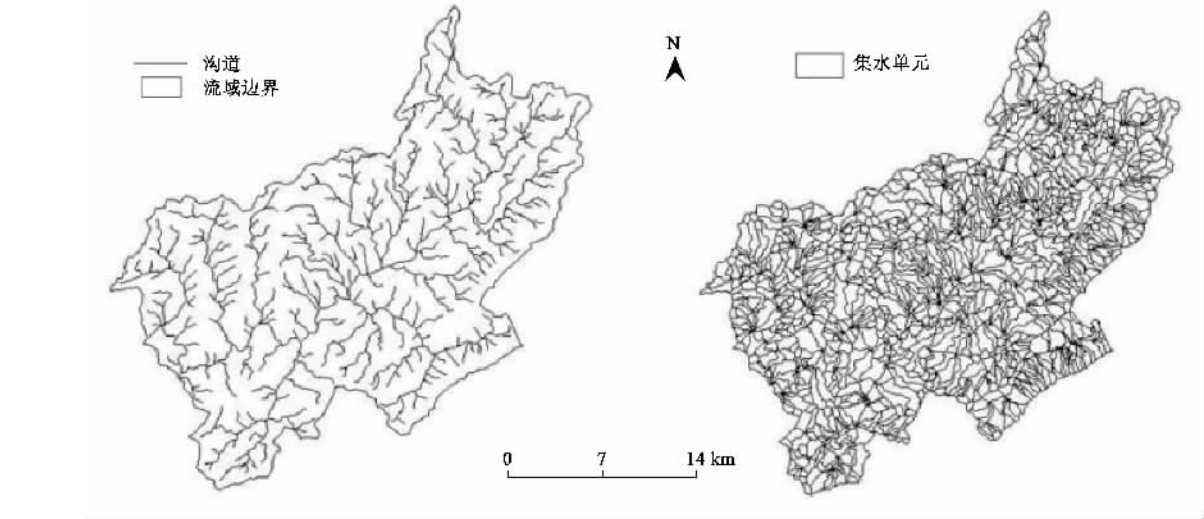


图 2 湫水河流域划分的沟道与集水单元

Fig.2 Extracted reaches and discrete drainage cells of Lianshui River watershed

2.2 模型运行的参数获取

AnnAGNPS 模型需要的输入参数共分为 9 类,多达 500 余个,分别用来描述流域的地形特征、气候状况、土壤特性、土地利用状况和农业管理措施等(表 1).参数化方法涉及野外实测、遥感、GIS 及数理统计等多方法的综合应用.

表 1 模型主要参数及获取方法

Table 1 Source of parameters for AnnAGNPS model

输入参数类别	获取方法
集水单元与河道参数	数字高程模型(DEM)提取
土地利用参数	GIS 与遥感分类,实地调查
土壤图与属性参数	资料收集与实地测量
气象数据	资料收集
作物参数与管理措施	实地调查与资料查找
CN 值	资料收集以及参考模型手册

2.2.1 气象资料

模型所需要的气象输入数据包括逐日的降雨量、最高和最低气温、露点温度、日均云量以及风速数据等.降雨量数据采用了流域内部东村、莲塘、古龙岗和兴江 4 个雨量站的逐日降水量观测值.日最高、最低气温数据、风速数据以及相对湿度数据采用了距湫水约 20 km 的兴国县气象局实测数据.气温和雨量数据通过添加观测站的方法进行了高度带校正.露点温度根据日均气温和相对湿度来计算得到^[16],公式如下:

$$T_d = \frac{239 \ln f_a + 4\,158.6K - 1\,100.6}{22 - \ln f_a - 17.4K} \tag{1}$$

$$K = T_a / (239 + T_a) \tag{2}$$

式中, T_d 为露点温度, f_a 为相对湿度, T_a 为日平均温度.

除了上述基本气象资料之外,模型还需要降雨

侵蚀力数据,包括多年平均降雨侵蚀力(R),10 年一遇的雨强因子(10 year EI),以及降雨侵蚀力年内分布(EI Number)和综合降水类型.对于 R 因子的计算有多种方法,在这里根据 1989 ~ 2005 年每日降水观测资料,使用章文波等^[17]提出的公式进行计算;对于 10 年一遇的降水侵蚀力则采用 Renard 等^[12]提出的方法,分别计算得到 R 值为 9 417.31 MJ·mm·(hm²·h)⁻¹, 10 year EI 值为 3 557.1 MJ·mm·(hm²·h)⁻¹.模型提供了 4 种综合降雨类型供选择,根据研究区的降水特点使用模型默认的类型 II.

2.2.2 土壤属性数据

所使用的数字土壤图来源于国家第二次土壤普查编绘的 1:20 万土壤分布图,经过扫描和手工数字化得到,模型运行需要的土壤参数采用了分析和实地测量相结合的方法.本研究在湫水流域设计了不同间距的采样网格(0.4 ~ 4.0 km),实地采集了 112 个样点的表层土壤和 13 个样点的剖面分层土样,实地测量了剖面样点土壤层的容重(环刀法)、饱和导水率(圆盘渗漏仪法)、田间持水量等属性,采集的剖面土样带回中科院南京土壤所后进行了土壤化学属性和机械组成的分析,根据相关的数据建立了湫水流域模型运行的土壤数据库.

2.2.3 土地利用数据

土地利用制图采用了遥感目视解译的方法,基础数据采用了 Landsat 7 ETM 图像,时相为 2000 年 1 月 27 日的 121-42 景,原始图像共有 9 个波段(TM1-7,高增益的 6 波段,以及分辨率为 15 m 的全色 pan 波段).解译之前对原始图像进行了几何校正、辐射粗校正以及子区(研究区)提取等预处理,2002 年 9 月在流域内部选择了梅窖、陈也、兴江、古龙岗、桐林水库山区、樟木、东村、兴莲等典型地区,进行了地面覆盖/土地利用的实地调查,通过 GPS 定位及 TM 影像特征的对比,确定了农地、林地(疏、密、中等密度)、居民地、水体、河道、山地灌丛、草地、道路等多种地物的目视解译标志.2003 年 3 月赴湫水流域进行了解译结果的野外验证及修改,在当地相关部门的配合下,对重点变化地区进行了调查和更新,通过对比,解译精度达到 80% 以上,编绘的湫水流域土地利用图基本反映了当地 2002 年的土地利用实际状况.湫水流域土地利用类型和面积如表 2 所示.最后将得到的土地利用图和提取的集水单元 cell 图进行空间叠加,按照优势类的原则确定了每个集水单元的土地利用类型.

表 2 湫水河流域土地利用类型及其面积
Table 2 Statistical information of land-use types in Lianshui River watershed

土地利用类型	面积/hm ²	面积百分比/%
水田	9 634.08	16.62
居民地	1 183.49	2.04
旱地	1 767.13	3.05
有林地	32 020.01	55.23
裸地	563.66	0.97
稀疏林地	9 113.44	15.72
水面	642.27	1.11
灌木林	2 815.45	4.86
果园	1 767.13	3.05
荒草地	93.84	0.16
望天田	113.42	0.20

2.2.4 其他主要参数

该区域的农作物主要以水稻田为主,通过走访调查获得了农作物的种植、灌溉、施肥、收割等相关措施的操作时间和操作方式,以及肥料的养分含量等属性信息.而水稻的养分吸收,残茬率等信息则参考了模型自带的作物参数数据库.CN 值是 SCS 径流曲线法的重要参数,主要由土壤水文组、土地利用类型和前期土壤水分状况(antecedent moisture condition, AMC)共同决定,结合土壤类型与土地覆盖组合以及模型的参考文献^[11]确定.

3 讨论

利用 AnnAGNPS 模型对湫水流域 1991 ~ 2005 年共 15 a 的产水、产沙过程进行了分布式计算机模拟,并利用流域出口径流和泥沙观测值进行了模型校正和精度分析.模拟过程中首先进行径流模拟的分析和校正,其次进行泥沙的分析和校正,前面分析和校正环节一旦完成,将不再进行前面环节的参数调整来拟和后面步骤的校正和分析,例如,一旦水平衡过程校正完成,将不再调整水文参数来进行产沙模拟的拟和,当进行产沙过程的分析和校正,则只调整影响侵蚀过程的相关参数.最终过程完成后,对水文模拟重新进行检查,保证后面的产沙校正过程对流域水文平衡没有影响.

模拟结果按照美国土木工程协会推荐的流域模型评价指标来分析,分别是相对误差(D_v)和统计计算的确定性系数 R^2 .其中相对误差的计算公式如下:

$$D_v = \frac{V - V'}{V} \times 100\%$$

(3)

式中, D_v 为相对误差, V 为观测值, V' 为对应的模拟值. D_v 越趋近于 0,说明相对误差越小,模拟精度

越高.

确定性系数 R^2 的计算公式如下：

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(O_i - P_i)}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2$$

(4)

式中, O_i 为每年的观测值, P_i 为每年的模拟值, $\bar{O}$ 为多年观测值的平均值, $\bar{P}$ 为多年模拟值的平均值. R^2 越趋近于 1 说明模拟值与实测值拟合的越好, R^2 越小则拟合趋势越差.

3.1 径流模拟结果

模型初始的径流模拟值远远低于观测值,进一步试验发现是因为模型不能较好地模拟地下径流所致,经过计算,15 a 的年均地表径流模拟值为 482.38 mm,而地下径流仅为 4.74 mm,经过反复调节地下径流的相关参数如土壤不透水层深度等,模拟结果也没有明显增加,Kliment 等^[18]的研究中也发现了同样的问题,其在 Blasanka 河流域的模拟结果中地表径流远远高于地下径流,这与该流域地下径流比例较大的事实不符,反复调整也没有明显的变化,并得出模型存在无法正确模拟地下径流的结论.而且这个问题在于模型本身的缺陷,无法通过现有的校正方法解决.

总径流量模拟偏低,但地表径流模拟结果是否合理?土壤侵蚀和地表径流量密切相关,但现有的观测值为流域出口的总产水量,为了对地表径流进行校正和验证,本研究对流域出口的产水量观测值

进行了径流滤波分析^[19].径流滤波是按照数字信号处理的原理,利用多年径流观测值采用数字滤波方法确定径流观测值中地表径流和地下径流的比例,利用径流滤波的结果可以用来对模拟的地表径流进行校正.数字滤波程序由美国农业部农业研究所的 Arnold 博士等开发,此方法经过了美国国内和世界其他一些流域的实测检验,具有较高的可信度.程序运行时以流域出口的逐日径流观测值作为输入数据,输入参数包括计算地下水回落公式中 alpha factor 的最大和最小天数,输出结果分为 3 个滤波通道,分别为按照一定的比率计算的地表径流和地下径流量,对于降水补给的流域,计算结果通常在 1 ~ 2 通道之间.对湫水流域 1991 ~ 2005 年的径流观测值滤波分析表明,湫水流域基流特征相对稳定,3 个通道滤波结果差异较小,本研究采用 1、2 通道的平均值作为最后的滤波结果进行了地表径流的计算.

利用径流滤波的结果,对湫水流域 1991 ~ 2005 年的地表径流模拟进行了校正和验证.校正采用了 AnnAGNPS 模型开发者提供的方法,输入模拟期间的平均径流量,模型可以调节 CN 值使模拟值的年平均径流量与该值尽量一致.表 3 和图 3 分别为校正期(1991 ~ 1995 年)和验证期(1996 ~ 2005 年)年地表径流模拟值与观测值的对照表和对比图.校正期间平均相对误差为 5.31%,确定性系数 R^2 为 0.99,验证期间年地表径流的多年平均相对误差为 11.8%,确定性系数 R^2 为 0.94,地表径流模拟精度较高.这说明 AnnAGNPS 模型可以很好地模拟湫水河流域的年地表径流过程.

表 3 年地表径流的模拟值与观测值对比

Table 3 Comparison of annual Surface flow between measured and simulated

项目	年份	平均降雨量/mm	观测值/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	模拟值/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	相对误差/%	R^2
校正	1991	1 308.1	6.27	5.72	8.77	0.99
	1992	1 104.7	13.24	13.21	0.26	
	1993	1 860.2	5.33	5.0	6.14	
	1994	2 102.2	12.15	11.05	9.01	
	1995	1 940.5	10.35	10.11	2.36	
验证	1996	1 432.4	7.85	8.48	- 7.94	0.94
	1997	2 474.2	13.57	14.96	- 10.23	
	1998	1 928.8	12.28	12.10	1.45	
	1999	1 499.4	9.07	9.88	- 8.89	
	2000	1 356.7	5.98	5.64	5.67	
	2001	1 718.3	10.81	9.66	10.58	
	2002	2 253.6	16.47	17.67	- 7.31	
	2003	938.3	4.49	3.23	28.01	
	2004	1 517.3	5.02	6.47	- 28.9	
	2005	1 561.7	12.33	11.23	8.87	

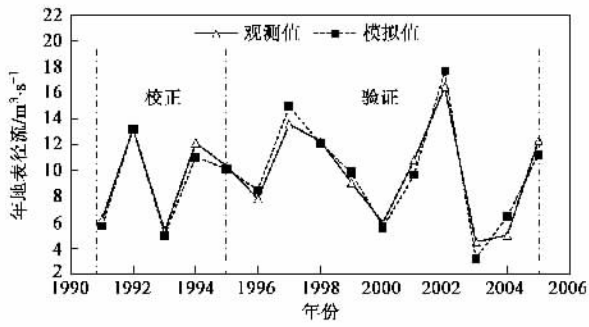


图 3 年地表径流的观测值与模拟值对比图

Fig.3 Comparison of annual surface flow between measured and simulated

月、日时间尺度地表径流的模拟值和观测值对比分别如图 4、5 所示,由于数据较多,采用了 1:1 图示.月和日时间尺度的地表径流模拟的确定性系数 R^2 分别为 0.91 和 0.29,月模拟精度总体较高,日地表径流模拟精度相对较低,AnnAGNPS 模型是以日为最小时间步长的连续时段模拟模型,降水量输入采用日观测值,造成了日模拟峰值的提前或滞后,要提高日模拟精度,需要采用基于降水事件的模拟方法,采用 1/2 h 或 1 h 降水观测输入数据.

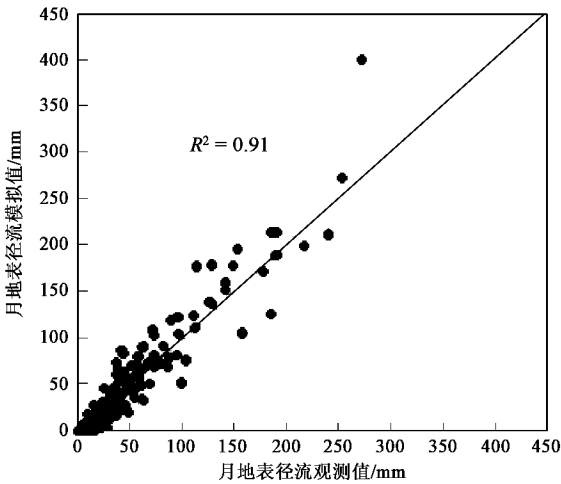


图 4 月地表径流观测值与模拟值对比

Fig.4 Comparison of monthly surface flow between measured and simulated

3.2 湫水流域产沙模拟结果分析

在地表径流校正的基础上,进行了产沙量的模拟结果分析.产沙量的初始的模拟值和观测值从数量和趋势而言较为合理,模型开发者提供的产沙量校正方法包括植被盖度、植被截流高度、地表植被残茬率和 100 mm 的植被根种量调整等参数的调整,校

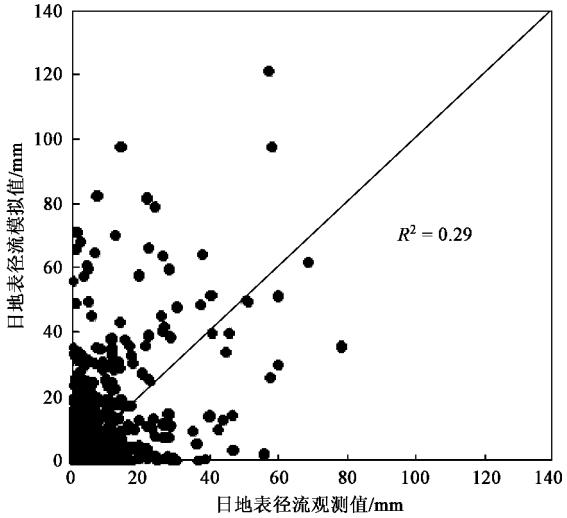


图 5 日地表径流观测值与模拟值对比

Fig.5 Comparison of daily surface flow between measured and simulated

正期间,产沙量较低,但如果调高校正期间的产沙量,验证期间的模拟值会总体偏高,模拟过程中,本研究使用了 2002 年的土地利用图,流域植被状况相对 20 世纪 90 年代有较大的好转,因此,模拟值应相对偏低.基于以上原因,对相关参数在合理范围内进行了微调,以 15a 总体模拟精度最高对结果进行了校正.

表 4 和图 6 分别为校正年(1991 ~ 1995 年)和验证年(1996 ~ 2005 年)湫水河流域出口产沙量的模拟值与观测值的对照表 and 对比图.校正期间的多年平均相对误差为 23.46%,确定系数 R^2 为 0.76.验证结果表明多年平均相对误差为 19.71%,确定系数 R^2 为 0.77. 1998 年和 2002 年出现了较高的峰值,1998 年属于气候异常年份,中国南方发生了严重的洪水灾害,笔者查阅计算了观测值记录,15 a 平均输沙率为 8.26 kg/s,在 1998 年 8 月 5 ~ 6 日降水分别为 150.83 mm 状况下,出现了极端输沙率观测值 1 523 kg/s,造成了整体观测值偏高.2002 年 6 月 13 ~ 17 日和 9 月 14 ~ 15 日,在湫水流域分别发生了 300 mm(持续 5 d)和 185 mm(持续 2 d)强降水,造成了模拟值的偏大.这说明 AnnAGNPS 模型能够较好地模拟流域产水、产沙等地理过程的长期变化,对于特殊降水事件的过程模拟还有一定的局限.

月、日时间尺度产沙量的模拟值和观测值对比分别如图 7、8 所示,月、日模拟结果的确定性系数 R^2 分别为 0.77 和 0.12,和地表径流模拟结果相似,月模拟精度较高,日产沙模拟精度相对较低,除了模

表 4 年 产沙量的观测值与模拟值对比

Table 4 Comparison of annual sediment yield between measured and simulated

项目	年份	平均降雨量/mm	观测值/万 t	模拟值/万 t	相对误差/%	R^2
校正	1991	1 308.1	15.68	11.76	24.99	0.76
	1992	2 102.2	41.16	27.31	33.64	
	1993	1 104.7	11.7	8.52	27.18	
	1994	1 860.2	28.32	21.61	23.69	
	1995	1 940.5	25.96	27.98	- 7.78	
验证	1996	1 432.4	17.54	22.92	- 30.67	0.77
	1997	2 474.2	28.27	28.37	0.35	
	1998	1 928.8	47.31	35.81	24.31	
	1999	1 499.4	24.39	25.16	- 3.16	
	2000	1 356.7	8.32	10.28	- 23.61	
	2001	1 718.3	20.67	22.56	- 9.13	
	2002	2 253.6	41.34	57.29	- 38.58	
	2003	938.3	7.63	7.04	7.75	
	2004	1 517.3	11.68	16.81	- 43.93	
	2005	1 561.7	25.22	29.16	- 15.63	

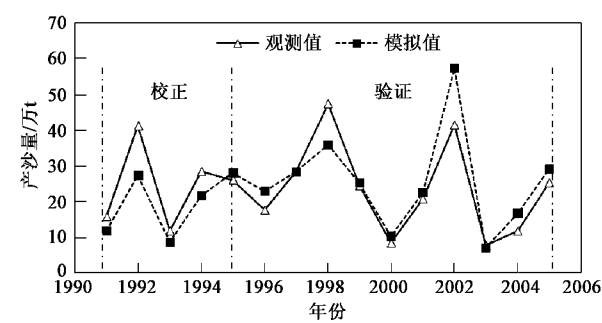


图 6 年 产沙量观测值与模拟值对比

Fig.6 Comparison of annual sediment yield between measured and simulated

型本身的适用性,地表径流的模拟误差对产沙量的模拟也产生一定程度的影响.

总体的模拟结果表明,AnnAGNPS 模型可有效地模拟湫水流域产水、产沙等多种地理过程.尤其是年、月时间尺度模拟精度较高,说明径流和泥沙过程的年际或月际监测的高度量化是可以实现的.这样的精度可以应用到相似区域中、长期的年际模拟、预测,也可以应用于径流观测不全的流域的资料插补,或应用到无观测资料的流域的多年径流估测,在实践中具有一定的应用价值.

4 湫水流域土壤侵蚀特征定量分析

使用水文模型对流域进行计算机模拟可以获得流域内部的多种地理过程的量化结果,利用这些量化模拟结果对流域内部的地理因素和地理过程

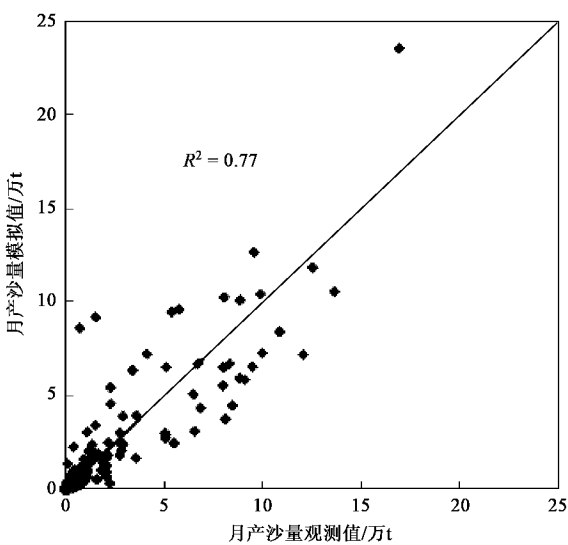


图 7 月 产沙量的模拟值与观测值对比

Fig.7 Comparison of monthly sediment loading between measured and simulated

的时空分布、动态变化进行研究、监测,从而实现流域的科学管理和自然资源的合理开发利用是模型应用的重要方面.本研究利用 15 a 连续模拟的结果来分析湫水河流域的土壤侵蚀空间分布特征,为流域内的土地合理利用以及管理规划提供依据.

AnnAGNPS 模型对土壤侵蚀产沙过程的模拟包括以下几个方面:集水单元中的片蚀和细沟侵蚀过程,集水单元中的侵蚀颗粒在汇入河道前的输移和沉积过程以及悬浮颗粒进入河道后在河道中的传输和沉积过程,分别对应模拟结果中的侵蚀量、流失量

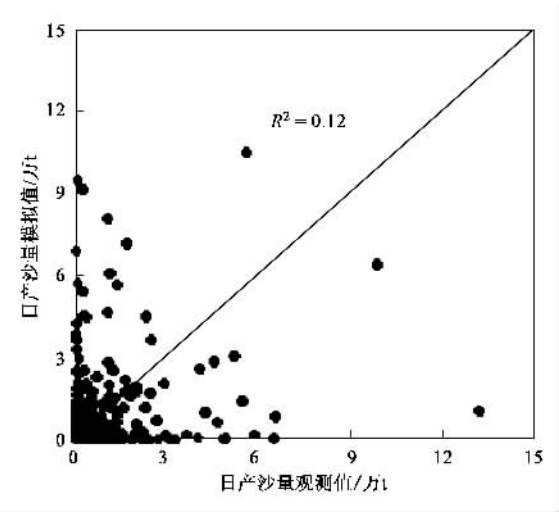


图 8 日产沙量的模拟值与观测值对比

Fig.8 Comparison of daily sediment loading between measured and simulated

和流域出口的产沙量,它们反映了流域内整个侵蚀产沙的过程和特征.1991~2005 年模拟结果的统计分析表明,湫水流域平均片蚀和细沟蚀的侵蚀量为 66.6 万 t/a;汇入沟道的流失量为 47.6 万 t/a,占侵蚀总量的 71.5%;泥沙经过河道传输过程到达流域出口的产沙量为 23.5 万 t/a,流失的泥沙中有 24.1 万 t/a 在河道中沉积,河道的泥沙输移率为 0.495.

根据国家水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190-96)^[20],水力侵蚀可划分为微度(tiny)、轻度(slight)、中度(middle)、强度(intense)、极强度(extreme)和剧烈侵蚀(violent)6 个等级(表 5).将模拟结果中集水单元内部的片蚀和细沟蚀作为侵蚀量来分析侵蚀状况,图 9 为根据每个集水单元 cell 模拟的侵蚀量,按照国家标准生成的湫水河流域土壤侵蚀强度空间分布.从中可以看到,湫水流域土壤侵蚀从微度到剧烈侵蚀均有一定面积的集水单元存在,说明湫水河流域内部的不同地域的产沙特征存在着较大的空间差异性.同时也可以看出,不同产沙量等级的集水单元分布有着明显的空间聚集性和其它一些空间分布特征.从图 9 中可以看出流域内部侵蚀强度比较大的区域集中分布于人口密度较大的居民点(古龙岗镇、兴江乡、樟木乡)附近或公路沿线,说明流域内部的水土流失与人类活动有很大关系.而实际考察中,这些地区的林木遭到砍伐与破坏,导致水土流失严重,与模拟结果的分布情况是基本一致的.此外轻度侵蚀的区域则主要是分布在地形起伏度较大的山岭区.总体而言,整个流域的平均侵蚀模数为 1 150.29 t·(km²·a)⁻¹,属于轻度侵蚀级

别.经过统计流域中微度侵蚀(<500)和轻度侵蚀(500~2500)区域分别占流域总面积的 46.88%和 47.96%,而中度以上侵蚀约占 5.15%.以上数据表明,经当地政府和老百姓 20 余年的治理,水土流失状况已经得到有效控制并逐渐向好的方向发展.

表 5 水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》
Table 5 Standard of soil erosion classification authorized
by the Department of water resource, China

侵蚀等级	平均侵蚀模数/t·(km ² ·a) ⁻¹
微度侵蚀	< 500
轻度侵蚀	500 ~ 2 500
中度侵蚀	2 500 ~ 5 000
强度侵蚀	5 000 ~ 8 000
极强度侵蚀	8 000 ~ 15 000
剧烈侵蚀	> 15 000

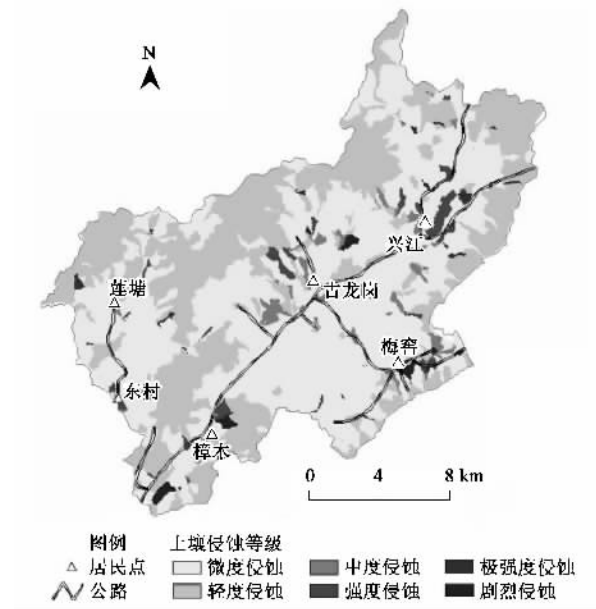


图 9 湫水河流域土壤侵蚀空间分布

Fig.9 Spatial distributed intensity map for soil erosion of Lianshui River watershed

5 结论

(1)利用美国农业部开发的 AnnAGNPS 模型对江西兴国县湫水流域产水、产沙过程进行了分布式计算机模拟,利用滤波分析的方法,对湫水流域地表径流和地下径流进行了数字分割,验证期间的模拟结果表明,地表径流的模拟结果多年平均相对误差为 11.8%,确定性系数 R^2 为 0.94,月径流模拟结果的确定系数 R^2 为 0.91;产沙量的多年模拟结果平均相对误差为 19.71%,确定系数 R^2 为 0.77,月产沙模拟结果确定系数 R^2 为 0.77,表明 AnnAGNPS 能

较好地模拟湫水流域年、月尺度的地表径流和产沙过程。地下径流模拟结果误差较大,其原因和地下径流模拟模块在湫水流域的适用性有待进一步研究检验。

(2)利用产沙模拟结果,进行了湫水流域内部土壤侵蚀的定量评价和特征分析,经过对模拟结果的统计分析,流域内平均片蚀和细沟蚀的侵蚀量为 66.6 万 t/a;汇入沟道的流失量为 47.6 万 t/a,占侵蚀总量的 71.5%。泥沙经过河道传输过程到达流域出口的产沙量为 23.5 万 t/a,河道的输移率为 0.495。

(3)根据模拟结果可以看出湫水河流域的片蚀与细沟侵蚀模数为 $1\,150.29\text{ t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$,属于轻度侵蚀。表明经过多年的小流域治理方案,湫水流域水土流失的控制取得了较大的成效,昔日的“南方沙漠”植被持续恢复,水土流失状况向好的方向转化。使用模型对流域的产水和产沙过程进行计算机模拟可以用于流域的土壤侵蚀定量评价和特征分析,寻求流域最佳管理措施,对水土流失的治理和控制具有现实意义。

参考文献:

- [1] Schmidt J, Werner M, Michael A. Application of the EROSION 3D model to the CATSOP watershed, The Netherlands [J]. Catena, 1999, 37: 449-456.
- [2] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, *et al.* The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23: 527-544.
- [3] Yong P Y, Bingner R L. Evaluation of AnnAGNPS on Mississippi Delta Msea Watersheds [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(5): 1183-1190.
- [4] Yong P Y, Dabney S M, Binger R L. Cost effectiveness of agricultural BMPs for sediment reduction in the Mississippi Delta [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 57(5): 259-267.
- [5] Yong P Y, Ronald L B, Rebich R A. Evaluation of AnnAGNPS nitrogen loading in an agricultural watershed [J]. Journal of the

American Water Resource Association, 2003, 39(2): 457-466.

- [6] Baginska B, Milne-Home W, Cornish P S. Modelling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST [J]. Environmental Modelling and Software, 2003, 18(8-9): 801-808.
- [7] 黄金良,洪华生,杜鹏飞,等. AnnAGNPS 模型在九龙江典型小流域的适用性检验 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(8): 1135-1142.
- [8] 王飞儿,吕唤春,陈英旭,等. 基于 AnnAGNPS 模型的千岛湖流域氮、磷输出总量预测 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 281-284.
- [9] Bosch D D, Theurer F D, Bingner R L, *et al.* Evaluation of the AnnAGNPS Water Quality Model [R]. ASAE Paper No. 98-2195, 1998.
- [10] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, *et al.* AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds [J]. Soil And Water Conservation, 1989, 44(2): 168-173.
- [11] Soil Conservation Service. Urban Hydrology for small watershed [R]. USDA Technical Release No. 55, 1986.
- [12] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, *et al.* RUSLE-A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation [R]. USDA Agricultural Handbook No. 703, 1997.
- [13] Theurer F D, Clarke C D. Wash load component for sediment yield modeling [A]. In: Proceedings of the fifth federal interagency sedimentation conference [C]. 1991. 1-8.
- [14] Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem from general physics [R]. New York: U. S. Geological Survey, Prof., 1966. 1-37.
- [15] 李硕,孙波,曾志远,等. 遥感、GIS 辅助下流域空间离散化方法研究 [J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 183-190.
- [16] 郭新波. 红壤小流域土壤侵蚀规律与模型研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [17] 章文波,付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力 [J]. 资源科学, 2003, 25(1): 35-41.
- [18] Kliment Z, Kadlec J. Evaluation of suspended load changes using AnnAGNPS and SWAT semi-empirical erosion models [J]. Catena, 2008, 73: 286-299.
- [19] Arnold J G, Allen P M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records [J]. Journal of the American Water Resources Association 1999, 35(2): 411-424.
- [20] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分级分类标准 SL 190-96 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.