

基于 SWAT 模型的黄土高原典型区 水土流失格局模拟评价

卢爱刚¹，索安宁²，张 镭³

(1. 渭南师范学院, 陕西 渭南 714000; 2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 3. 陕西省科学器材公司, 西安 710054)

摘 要:运用分布式生态水文模型 SWAT 对黄土高原典型区汭河流域的本底径流深度、本底侵蚀模数、现状径流深度、现状侵蚀模数分别进行了模拟研究,并以本底径流深度和本底侵蚀深度为标准分别对流域的现状径流和现状侵蚀进行定量空间评价。研究表明:(1)SWAT 模型能够准确地模拟汭河流域水土流失总量及其空间格局。(2)汭河流域上游的多数集水区本底径流深度为 70 mm,占流域面积的 68.68%,流域中下游集水区本底径流深度多数为 60 mm,占流域面积的 28.96%。流域土壤侵蚀模数普遍在 8 t/hm² 以下,只有极少数集水区的侵蚀模数在 8~20 t/hm² 之间。(3)随着土地覆被盖度的增高,流域径流量减小,输沙量也减小,蒸发量增加,径流深度和侵蚀模数的空间异质性变小,水土流失的风险降低。(4)土壤侵蚀模数的空间异质性比径流深度的空间异质性对土地覆被变化更为敏感,5 种土地覆被情景中,土壤侵蚀模数的空间异质性的顺序是:耕地、低覆盖度草地>裸地、沙化土地>当前土地覆被>疏林、草地>林地。

关键词:水土流失; 空间格局; SWAT 模型; 土地覆被; 汭河流域

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2011)02-0057-05

Simulation of Spatial Pattern of Soil Water Loss in a Watershed of the Loess Plateau Based SWAT Model

LU Ai-gang¹, SUO An-ning², ZHANG Lei³

(1. Department of Environment and Life Sciences, Weinan Teachers University, Weinan, Shaanxi 714000, China; 2. National Marine Environment Monitor Center, Dalian, Liaoning 116023, China; 3. Scientific Equipment Company of Shaanxi Province, Xi'an 710054, China)

Abstract: The spatial patterns of soil water loss were simulated in five different landscapes in Ruihe watershed on the Loess Plateau using distributed hydrological model SWAT. And results showed: (1) SWAT model can reasonably describe the soil water loss and its spatial pattern; (2) The background depth of the streams in most catchments of the upstream of Nahe River is 70 mm, accounting for 68.68% of the total catchments; and the depth of the streams of the downriver catchments is 60 mm, accounting for 68.68% of the total catchments, and most of the erosion modulus of the soil of the whole catchments is less than 8 t/hm², with only a few between 8~20 t/hm²; (3) Both the runoff and sediment transport decreased with increase of land cover, accompanying by decrease of spatial heterogeneity and security of soil water loss; (4) The spatial heterogeneity of erosion modulus is more sensitive to land cover change than that of depth of runoff, and the order of the spatial heterogeneity of erosion modulus in 5 landscape types is farm-low density and ranks as grass landscape>bare-desert landscape>current landscape>forest-grass landscape>forest landscape.

Key words: soil water loss; spatial pattern; SWAT model; land cover; Ruihe watershed

黄土高原是世界上土壤侵蚀最为严重的地区,土壤侵蚀及其引起的土地退化和其他环境问题是目前国内外学者关注的重要领域之一^[1-2]。目前,有关黄土高原土壤侵蚀的研究多集中于坡面尺度^[3-5],而影

响土壤侵蚀的土地利用、植被覆盖、土壤以及地形和降水都具有一定的空间格局,这些不同影响因素空间格局的复杂性决定了土壤侵蚀格局的空间复杂性。

基于 GIS 的空间模拟方法被许多研究证实为解决土壤侵蚀空间复杂性问题的有效手段^[6]。因此,越来越多的研究者将遥感和 GIS 技术嵌套于水文模型中,开发出了许多分布式水文模型,如 SHE 模型、TOPMODEL 模型、WATFLOOD 模型和 SWAT 模型等,其中 TOPMODEL 模型和 SWAT 模型应用最为广泛^[7-9]。SWAT (Soil and Water Assessment tool)模型是由美国农业部农业研究服务中心研制开发的分布式水文模型,其主要用来模拟预测土地利用、土地经营管理方式等对流域径流、侵蚀等方面的影响^[10-12]。SWAT 模型具有很强的物理机制,它能够利用遥感和地理信息系统提供的空间信息模拟多种不同的水文物理化学过程,如水量、水质及杀虫剂的迁移与转化过程,尤其在面源污染、水土流失、土地利用和农业管理方面得到广泛应用^[13-15]。SWAT 模型最新版本 SWAT2000 可以嵌入到 ArcView 之中,安装之后成为 ArcView 的一个扩展模块,界面的可视效果好,易于操作。

本研究主要应用 SWAT 模型的土壤侵蚀模块对黄土高原沟河流域不同土地利用格局情景下土壤侵蚀的空间格局进行模拟研究,目的是揭示流域内土壤侵蚀的空间格局及其这种空间格局对土地利用格局变化的响应程度,为流域水土保持工作提供参考依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

汭河流域处于六盘山区的林灌土地利用区向黄土高原农业土地利用区的过渡地带,流域面积 1 645 km²。流域中、上游为六盘山区,下游为黄土残塬沟壑区,海拔 1 100~2 430 m,属于温带大陆性季风气候,流域多年降水量 530~650 mm。汭河发源于六盘山南部,流经黄土残塬沟壑区,在泾川县城西汇入泾河,是泾河上游的最大支流之一,也是泾河的主要径流来源。在汭河下游汇入泾河之前的河面上有黄河水利委员建立的袁家庵水文站,具有 1958—2003 年的连续水文观测记录,可代表流域上游多年来的地表水文状况。

20 世纪 70 年代以前,流域中、上游土地利用一直以森林灌丛为主,植被覆盖度很高。70 年代以后随着农村土地改革和社会经济的发展,流域内人口急剧膨胀,人口膨胀导致的对生活和生产资料需求的增长,使流域土地利用/覆被发生了巨大的变化,土地利

用/覆被的改变打破了流域生态系统的稳定状态,河流水文过程也随之发生了巨大变化。

1.2 SWAT 模型结构

SWAT 模型采用先进的模块化设计思路,水循环的每一个环节对应一个模块,十分方便模型的扩展和应用。SWAT 模型提供 SCS 模型 Curve number (CN 值)的方法和 Green&Ampt 入渗方法计算地表径流。在计算蒸散发时,考虑了水面蒸发、裸地蒸发和植物蒸腾,并分开模拟土壤水蒸发和植物蒸腾。潜在土壤水蒸发由潜在蒸散发和植物叶面积指数的线性关系式计算,并提供了 3 种潜在蒸发计算方法 (Penman Montith 方法、Priestley—Taylor 方法和 Hargreaves 方法)以供模型使用者选用。壤中流的计算用动力贮水模型的方法,考虑水力传导度、坡度和土壤含水量的时空变化。SWAT 模型将地下水分为浅层地下水、深层地下水,浅层地下径流汇入流域内河流,深层地下径流汇入流域外河流^[16]。

在 SWAT 模型中,降水和径流导致产生的土壤侵蚀是用修正的泛土壤流失方程 (Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)计算的, MUSLE 是由 Wischmeier 和 Smith 在泛土壤流失方程 (Universal Soil Loss Equation, USLE)基础上开发的一个修正版^[17]。在 USLE 中,把降水动能当作预测年均土壤流失总量的一个函数,而在 MUSLE 中用径流因子代替了降水动能,用径流因子代替降水改进了泥沙产生的预测方法,因为径流不仅与降水动能密切相关,而且也与前期土壤湿润程度有关,而且使模型能够应用于每一次降水事件^[16-17]。

泛土壤流失方程如下:

$$sed = 1.292EI_{USLE} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot C_{FRG} \quad (1)$$

式中: sed——一个时期内的泥沙产生量 (t/hm²); EI_{USLE} ——降水侵蚀系数 [(0.017 m·t·cm)/(m²·hm²)]; K_{USLE} ——USLE 中的土壤侵蚀因子 [(0.013 t m³ h)/(m³·t·cm)]; C_{USLE} ——USLE 中的覆被和管理因子; P_{USLE} ——USLE 中的水利工程因子; LS_{USLE} ——USLE 中的地形因子; C_{FRG} ——粗糙度因子。

修正后的泛土壤流失方程如下^[6,13]:

$$sed = 1.292EI_{USLE} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot C_{FRG} \quad (2)$$

式中: sed——一个时期内的泥沙产生量 (t/hm²); Q_{surf} ——地表径流量 (mm/hm²); q_{peak} ——最大流速 (m³/s); $area_{hru}$ ——产流单元面积 (hm²); K_{USLE} ——USLE 中的土壤侵蚀因子 [(0.013 t·m³·hm²)/(m³·t·cm)]; C_{USLE} ——USLE 中的覆被和管理因子; P_{USLE} ——USLE 中的水利工程因子; LS_{USLE} ——

USLE 中的地形因子; C_{FRG} ——粗糙度因子。

1.3 数据采集及参数估计

数字高程模型(DEM)采用 1 : 25 万数字地形数据在 ArcMap 9.2 平台上通过 ArcTin 构建,空间分辨率为 30 m。土地利用数据由 1976 年覆盖流域的 Landsat MSS 数据和 2000 年覆盖流域的 Landsat

TM 数据解译得到,具体方法见参考文献[18],空间分辨率 80 m。土壤数据采用 1 : 400 万中国土壤图的数字化数据,空间分辨率 800 m。土壤参数来源于《中国土壤》。气象数据由中国气象局提供,包括 1970—2003 年研究区 3 个气象站点的每日降水量、最低温度、最高温度、相对湿度、风速、太阳辐射。

表 1 汾河流域 SWAT 模型中的 CN 值

编号	土地利用 类型	A(AMC)			B(AMC)			C(AMC)			D(AMC)		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1	耕地	75	77	79	84	86	88	89	91	93	92	94	96
2	有林地	43	45	47	64	66	68	75	77	79	81	83	85
3	疏林地	34	36	38	58	60	62	71	73	75	77	79	81
4	灌丛地	37	39	41	59	61	63	72	74	76	78	80	82
5	高覆盖度草地	47	49	51	67	69	71	77	79	81	82	84	86
6	中覆盖度草地	47	49	51	67	69	71	76	78	80	82	84	86
7	低覆盖度草地	29	31	33	57	59	61	70	72	74	77	79	81
8	水域	92	96	100	92	96	100	92	96	100	92	96	100
9	居住用地	29	31	33	57	59	61	70	72	74	77	79	81

注:AMC 表示不同的土壤结构层次。

SWAT 模型中的 CN 参数是用来描述降雨—径流关系的,它反映流域下垫面单元的产流能力。CN 值受土壤性质和降雨前流域内土壤湿润程度的影响,由于土壤性质比较稳定,故将土壤影响作为不变值。SWAT 模型将土壤湿润程度根据前 5 d 的总雨量划分为 3 类,分别代表干、平均和湿 3 种状态(AMC I、AMC II、AMC III),不同湿润状况的 CN 值有相互转换的关系。本文根据 SWAT 模型提供的 CN 值查算表,考虑汾河流域的自然条件,并参考有关研究^[18]确定了汾河流域 CN 值矩阵(表 1)。

为了使模拟结果更准确接近流域出口水文站的实测资料,需要对模型的输入参数进行率定,SWAT 模型的输入参数较多,而在研究区的实测资料相对较少,这就增加了模型的率定难度。模型中的河道参数,如流域坡度、坡长等参数,可以由 DEM 直接计算得到;其它反映下垫面条件的参数,如影响径流量的关键参数 CN、冠层最大截留量 C_{max} 等由处理过的土地利用/覆被类型数据和土壤类型数据估算生成。进行水文模拟时,1973—1974 年径流、输沙模拟采用 1970 年土地利用数据;1990—2003 年径流、输沙模拟采用 2000 年土地利用数据,土壤数据统一使用 1974 年 1 : 400 万的全国土壤分类数据。其它参数如基流衰退系数 α 、饱和电导率和融雪参数等需要根据黄土高原各地实测资料进行调整,对于那些对径流、输沙量变化不太敏感的参数采用模型的默认值。

1.4 水土流失格局模拟评价

为了准确地评价流域水土流失的空间格局,本研究首先利用卫星遥感数据解译获取研究区的现生植被覆被格局。根据研究区现生植被格局^[19],流域上游

为温带阔叶落叶林和温带灌丛;流域中游为温带灌丛、人工林、农业草本栽培植被;流域下游为农业草本栽培植被和温带草原。

根据索安宁等^[20]对汾河流域潜在植被格局的研究结果,在汾河流域范围内,除了流域下游很小一部分为温带落叶灌丛外,流域其它地方都适合温带阔叶落叶林生长发育。

水土流失格局的模拟评价过程为:以流域数字高程模型、流域气候数据、流域土壤数据和流域现生植被格局为输入,模拟研究流域现状年径流深度空间格局和流域现状年侵蚀模数空间格局。以流域数字高程模型、流域气候数据、流域土壤数据和流域潜在植被格局为输入,模拟研究流域本底年径流深度空间格局和流域本底年侵蚀模数空间格局。

以流域本底径流深度空间格局和流域本底土壤侵蚀模数空间格局为评价标准,用现状径流深度格局和现状侵蚀模数与他们相应的评价标准比较,建立流域径流深度冗亏指数和流域土壤侵蚀冗亏指数如下:

$$DRI=R_i-R_0 \tag{3}$$

$$ERI=E_i-E_0 \tag{4}$$

式中:DRI——径流深度冗亏指数;ERI——土壤侵蚀冗亏指数; R_i ——现状径流深度; R_0 ——本底径流深度; E_i ——现状侵蚀量; E_0 ——本底侵蚀量。

2 研究结果

2.1 模拟校准与评价

SWAT 模型校准的过程为:首先采用 1973—1974 年的实测水文数据对年平均径流量和输沙量进行校准,目的是调整研究区的水沙平衡;然后对逐月平均值进行精确校正,校准后得到模型的参数值在应

用于水文过程的模拟。最后通过线性回归法评价模型在黄土高原山地区应用的可行性。

用 1973—1974 年的 河流域降水、气温、土地利用/覆被、土壤等数据来模拟流域同期的径流量和输沙量,并和流域下游水文站点的同期实测数据进行对比,根据实测径流量和输沙量,通过调整模型参数,对模型进行校正,使模型能够比较准确地模拟 河流域的径流和输沙过程。模型经过校正后,1973—1974 年年均模拟径流量为 1.785 亿 m^3 ,比实际年均径流量高出 25.97%;同期年均模拟输沙量为 $1.5821 \times 10^7 \text{ t}$,比实际值高出 35.613%。图 1 为校正模型参数后的 河流域下游出水口袁家庵水文站 1990—2003 年模拟径流量、输沙量和实测径流量、输沙量的比较结果,多年输沙量的峰值与实测值的峰值基本一致,除了少数年份外,其它模拟结果都在可接受范围内。校正模型参数后的袁家庵水文站 1990—2003 年径流量与对应的实测流值的线性回归系数为 $R^2=0.734$,表示模型模拟结果在黄土高原 河流域具有较好的适用性。

2.2 水土流失格局现状分析

在当前土地覆被格局情景下,整个流域的径流深度普遍比较大,流域径流深度表现出较大的空间异质性。在流域上游多数集水区的径流深度在 75~80

mm 之间,总面积为 109.59 km^2 ,总集水区数目为 20;流域中游多数集水区径流深度降低为 65~70 mm 之间,总集水区个数为 76 个,其面积占流域总面积的 57.63%;到流域下游的出水口附近径流深度进一步减少到 55~60 mm 之间,有集水区 38 个,占流域面积的 24.20%。在空间上表现出流域上游径流深度最大,随着向下游推进,径流深度逐渐减少的总体空间格局。这可能与流域的总体地势走向有关,流域上游海拔高,降水量大,蒸发量小,土壤层薄,所以降水的很大一部分转化成为地表径流,而向流域中下游,海拔高度逐渐降低,降水量减少,蒸发量增大,加上流域中下游黄土层深厚,下渗量加大,故向流域中下游降水转换为地表径流的比例降低,地表径流深度减小,见表 2。

在流域现状土地覆被格局情景下,由于土地覆被、土壤和降水等空间格局的叠加,使土壤侵蚀模数空间格局也表现出极大的空间异质性,高、低侵蚀模数集水区空间交错,结构复杂,总体上有 24.16%的集水区的侵蚀模数在 8 t/hm^2 以下,其总面积为 581.21 km^2 ;而侵蚀模数大于 90 t/hm^2 的集水区也只有 13 个集水区,总面积占到流域总面积的 8.26%;多数集水区的侵蚀模数在 $8 \sim 90 \text{ t/hm}^2$ 之间,占到流域总集水区的 67.11%,面积占到流域总面积的 56.55%。

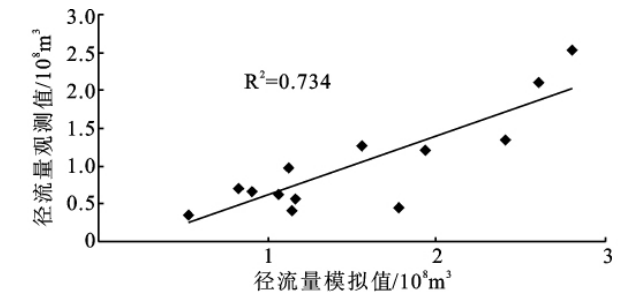


图 1 河流域年径流量和年输沙量的模拟值和实测值

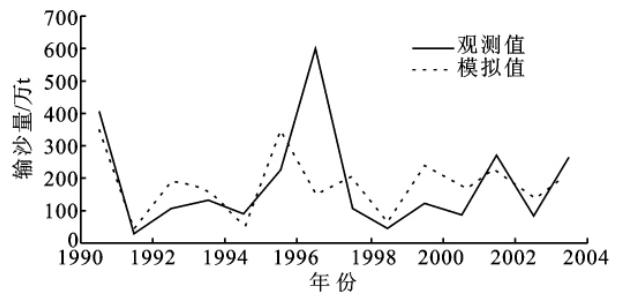


表 2 SWAT 模型模拟的 河流域水土流失现状特征

现状径流/mm	<55	55~60	60~65	65~70	70~75	>75
集水区面积/ km^2	148.14	251.52	181.45	361.97	589.89	109.59
集水区个数	11	27	15	32	44	20

现状侵蚀/t	<800	800~2000	2000~3750	3750~6500	6500~9000	9000~12500	12500~20000	>20000
集水区面积/ km^2	581.21	289.74	540.45	62.13	41.63	9.67	50.60	76.12
集水区个数	36	31	59	6	4	2	6	5

2.3 水土流失格局本底分析

在潜在植被覆被格局情景下,流域径流深度进一步减少,而且在空间上表现出较均匀的分布格局。流域上游各个集水区径流深度为 70~75 mm,总集水区个数为 97 个,占到流域总面积的 68.68%;向流域中下游减低为 60~65 mm,在这之间的集水区个数为 45 个,占流域总集水区个数的 30.20%,面积占到流域总面积的 28.96%。表现出从黄土山地到黄土丘

陵林地地表径流的显著减亏作用,这与黄土高原地表径流空间分布的其他研究结论相同^[19-20]。潜在植被覆被情景下的流域径流深度总体比现生植被覆被情景下的径流深度有所减小,说明植被覆被的降低有利于产流的发生(表 3)。在潜在植被覆被情景下,流域土壤侵蚀模数普遍降低到 8 t/hm^2 以下,只有极少数集水区的侵蚀模数在 $8 \sim 20 \text{ t/hm}^2$ 之间。在土壤侵蚀模数 8 t/hm^2 以下的集水区中,有 30 个集水区的

土壤侵蚀模数在 1.5 t/hm² 以下,占到流域总面积的 17.66%;有 36 个集水区的土壤侵蚀模数在 1.5~4.5 t/hm² 之间,占流域总面积的 23.08%;有 66 个集水

区的侵蚀模数在 4.5~6.5 t/hm² 之间,占流域总面积的 50.08%。土壤侵蚀模数的空间差异明显,表现出较大的土壤侵蚀空间异质性。

表 3 SWAT 模型模拟的 渭河流域水土流失本底特征

本底径流/mm	<40	40~50	50~55	55~60	60~65	65~70	>70
集水区面积/km ²	7.06	0.96	9.36	5.80	478.36	15.68	1134.31
集水区个数	1	1	2	1	45	2	97
本底侵蚀/t	<150	150~450	450~650	650~800	800~900	900~1750	>1750
集水区面积/km ²	291.59	381.25	827.16	34.26	40.75	7.71	68.83
集水区个数	30	36	66	4	5	1	7

2.4 水土流失 亏格局分析

根据式(3)算法,得到 渭河流域地表径流 亏空间

格局。可以看出,流域地表径流 亏格局呈现出较大的空间差异。流域多数集水区地表径流 亏指数为 0。

表 4 渭河流域水土流失空间模拟评估

径流 亏指数	<-10	-10~-5	-5~0	0~5	5~10	10~15	15~25	25~30
面积/km ²	60.07	466.29	994.07	21.51	68.00	34.01	1.14	8.05
侵蚀 亏指数	0~0.4	0.4~0.7	0.7~2.2	2.2~5.5	5.5~9.7	9.7~14.7	14.7~24.7	24.7~39.7
面积/km ²	481.27	390.49	135.79	459.22	56.68	7.43	100.65	21.63

由附图 3-5 的径流深度空间格局可以看出,在情景 2 的林地、高覆盖草地土地覆被情景下,流域总体的径流深度比情景 1 有所减少,流域上游的多数集水区的径流深度在 75~80 mm 之间,向流域中游减少为 70~75 mm,到流域下游进一步减少到 65~70 mm,表现出林草植被对流域水文循环过程的重要影响,但在总体空间格局上与情景 1 的模拟结果类似。

在土壤侵蚀模数的空间格局方面,在植被覆被格局情景模式下,流域大多数集水区的侵蚀模数都比较大,其中侵蚀模数大于 10 t/hm² 的有 28 个集水区。不同侵蚀级别的集水区的空间分布上表现出很大的异质性,在流域上游,降水量比较大,故有许多集水区的侵蚀模数达到了 10 t/hm² 以上,但由于流域上游土壤层薄,仍存在许多侵蚀模数较小的集水区,而多数集水区则表现出中等的侵蚀模数(2.2~8.0 t/hm²),在流域中下游,大多数集水区的侵蚀模数都在 2.2~8.0 t/hm² 之间。

5 结 论

本文应用分布式生态水文 SWAT 模型模拟了黄土高原 渭河流域本底植被覆盖格局与现状植被覆盖格局情景下水土流失的空间格局。通过对模型的各项输入、输出模块的分析和各主要敏感参数的率定,使 SWAT 模型能够较好的模拟 渭河流域水土流失的空间格局特征。在此基础上根据流域土地覆被的实际情况,分别建立了 渭河流域本底植被覆盖格局情景与现状植被覆盖格局情景,用 SWAT 模型分别模拟了这 2 种情景下的径流、输沙特征及其径流、输沙的空间格局演化过程。结果表明:在 5 种土地利用/覆被

情景中,年径流总量的产生大小顺序是:耕地、低覆盖度草地>裸地、沙化土地>当前土地覆被>疏林、草地>林地;年泥沙输出量大小顺序是:裸地、沙地>耕地、低覆盖度草地>当前土地覆被>疏林、草地>林地。随着土地覆被盖度的增高,流域径流量减小,输沙量也减小,蒸发量增加,径流深度和侵蚀模数的空间异质性变小,水土流失的风险降低。土壤侵蚀模数的空间异质性比径流深度的空间异质性地对土地覆被变化更为敏感,5 种土地覆被情景中,土壤侵蚀模数的空间异质性的顺序是:耕地、低覆盖度草地>裸地、沙化土地>当前土地覆被>疏林、草地>林地。

参考文献:

[1] Shi H, Shao M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China[J]. Journal of Arid Environments, 2000,45:9-20.

[2] 程积民,王惠娥. 中国黄土高原植被建设与水土保持的关系[M]. 北京:中国林业出版社,2002.

[3] 张晓明,余新晓,武思宏,等. 黄土区森林植被对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 应用生态学报,2005,25(9): 1613-1617.

[4] 张志强,王礼宪,余新晓,等. 渗透坡面林地地表径流运动的有效粗糙率研究[J]. 林业科学,2000(5):22-27.

[5] 张建军,毕兴华,张宝颖. 坡面水土保持林地地表径流挟沙能力研究[J]. 北京林业大学学报,2003(5):25-28.

[6] 胡良军,李锐,杨勤科. 基于 GIS 的区域水土流失评价研究[J]. 土壤学报,2001,38(2):167-174.

[7] Fobrer N, Haverkamp S, Eckhardt K, et al. Hydrologic response to land use changes on the catchment scale [J]. Phys. Chem. Earth(B), 2001,26:577-582.

性的主导因素为暴雨。滑坡破坏形式为解体式蠕滑,整体一次性失稳的可能性不大;即使局部失稳下滑,对电站的正常运营影响不大。鉴于滑坡区居民房屋严重开裂,雨季时危险性很大,建议采取以下措施:

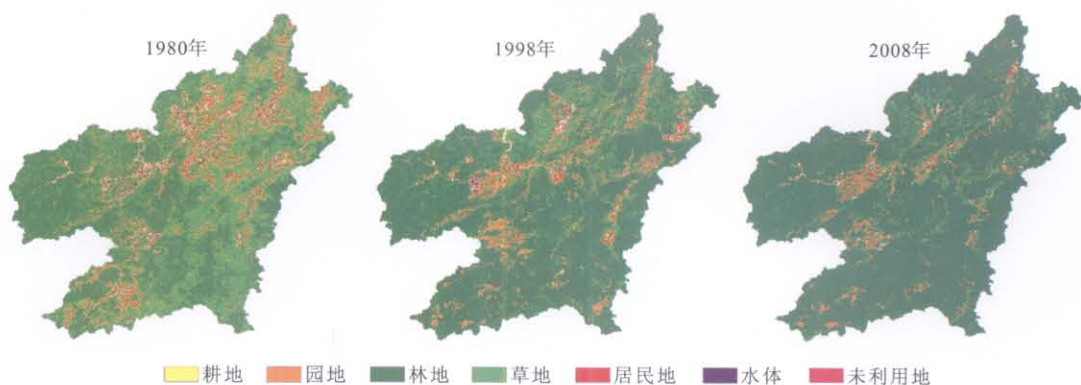
(1)加强松坪滑坡的监测,为进一步分析滑坡稳定性和预警预报以及防范决策提供科学依据。

(2)建立防灾减灾预案,防止滑坡失稳造成人员伤亡,降低滑坡造成的经济损失。

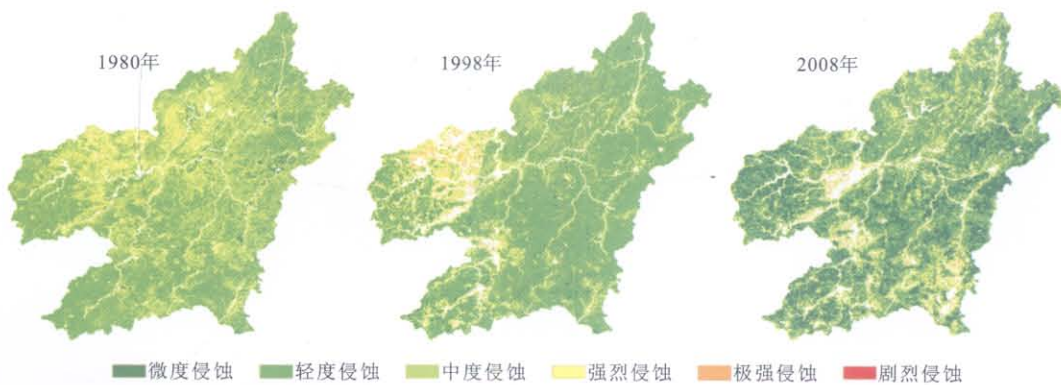
(3)在坡体后缘及坡面加强排水、防渗,控制诱滑因素,以及必要的抗滑支护措施。

参考文献:

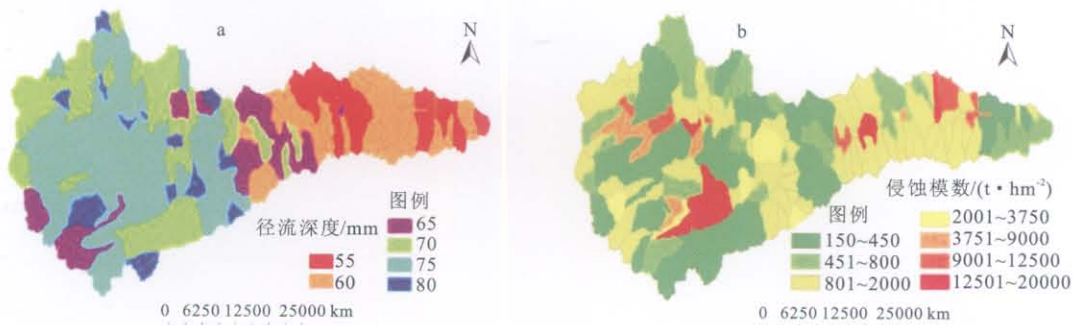
- [1] 张伟元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理 [M]. 2 版. 北京:地质出版社,1994.
- [2] 张永兴,文海家,欧敏. 滑坡灾变智能预测理论及其应用 [M]. 北京:科学出版社,2005.
- [3] 乔建平. 滑坡减灾理论与实践 [M]. 北京:科学出版社,1997.
- [4] 吕生弟,陆栋梁,李树武,等. 四川大渡河金川水电站工程松坪斜坡稳定性专题研究 [R]. 西安:中国水电顾问集团西北勘测设计研究院,2008.
- (上接第 56 页)
- [6] 刘纪远,张增祥. 20 世纪 90 年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析 [J]. 地理研究,2003,22(1):1-12.
- [7] 史培军,陈晋,潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析 [J]. 地理学报,2000,55(2):151-160.
- [8] 谭少华,倪绍祥. 区域土地利用变化驱动力的成因分析 [J]. 地理与地理信息科学,2005,21(3):47-50.
- [9] 宋开山,刘殿伟,王宗明,等. 1954 年以来三江平原土地利用变化及驱动力 [J]. 地理学报,2008,63(1):93-104.
- [10] 朱会义,李秀彬. 环渤海地区土地利用的时空变化分析 [J]. 地理学报,2001,56(3):253-260.
- [11] 任宗萍,杨勤科,胡志瑞,等. 基于项目驱动的藉河流域土地利用时空变化动态分析 [J]. 干旱地区农业研究,2009,27(3):239-244.
- [12] 赵东波,梁伟,杨勤科,等. 陕北黄土丘陵区近 30 年来土地利用动态变化分析 [J]. 水土保持通报,2008,28(2):22-26.
- [13] 王思远,王光谦,陈志祥. 黄河流域土地利用与土壤侵蚀的耦合关系 [J]. 自然灾害学报,2005,14(1):32-37.
- [14] 梁音,张斌,潘贤章,等. 南方红壤区水土流失动态演变趋势分析 [J]. 土壤,2009(4):534-539.
- [15] 史德明,史学正,梁音,等. 我国亚热带的水土流失与水土保持问题 [J]. 亚热带水土保持,2005,17(3):1-5.
- [16] 梁音,潘贤章,孙波. 42 年来兴国县土壤侵蚀时空变化规律研究 [J]. 水土保持通报,2006,26(6):24-27.
- [17] 唐玉英. 赣州年鉴(2008) [Z]. 2008.
- [18] 王思远,刘纪远. 中国土地利用时空特征分析 [J]. 地理学报,2001,56(6):631-639.
- [19] 王思远,张增祥,周全斌,等. 中国土地利用格局及其影响因子分析 [J]. 生态学报,2003,23(4):649-656.
- (上接第 61 页)
- [8] Rango A. A assessment of remote sensing input to hydrological models [J]. Water resources bulletin, 1985 (3):423-432.
- [9] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I, Model development [J]. Journal of American Water Resources Association, 1998,34:73-89.
- [10] Saleh A, Arnold J G, Gassman P W, et al. Application of SWAT for the Upper North Bosque watershed [J]. Transactions of the ASAE, 2000(5):1077-1087.
- [11] Fontaine T A, Cruickshank T S, Aronld J G, et al. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountains terrain for the soil water assessment tool (SWAT) [J]. Journal of Hydrology, 2002,262:208-223.
- [12] Eckhardt K, Haverkamp S, Fohrer N, et al. SWAT-G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchment [J]. Physics and Chemistry of Earth, 2002,27:641-644.
- [13] 王中根,刘昌明,黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究 [J]. 地理科学进展,2003,22(1):79-86.
- [14] 黄清华,张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进与应用 [J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2004,40(2):22-26.
- [15] 杨桂莲,郝芳华,刘昌明,等. 基于 SWAT 模型的基流估算及评价 [J]. 地理科学进展,2003,22(5):463-471.
- [16] 陈军峰,陈秀万. SWAT 模型的水量平衡及其在梭磨河流域的应用 [J]. 北京大学学报:自然科学版,2004,40(2):265-270.
- [17] 张东,张万昌,朱利,等. SWAT 分布式水文物理模型的改进及应用研究 [J]. 地理科学,2005,20(4):434-440.
- [18] 史培军,袁艺,陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响 [J]. 生态学报,2001,21(7):1042-1049.
- [19] 索安宁,李金朝,王天明,等. 黄土高原流域土地利用变化的水土流失效应 [J]. 水利学报,2008,39(7):767-772.
- [20] 索安宁,王兮之,林勇,等. 基于遥感的黄土高原典型区植被退化分析:以泾河流域为例 [J]. 遥感学报,2009,13(2):291-299.



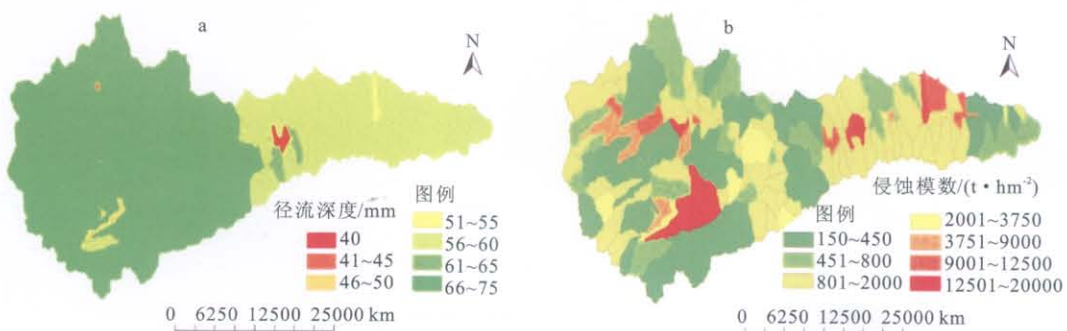
附图1 赣南地区土地利用图



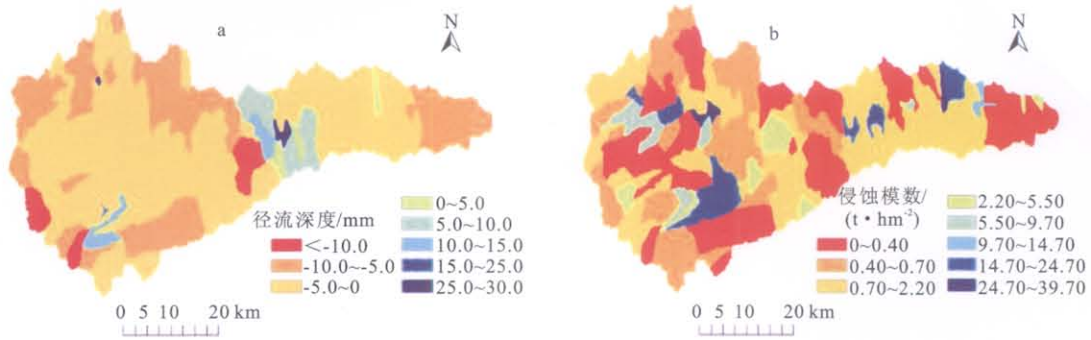
附图2 赣南地区土壤侵蚀图



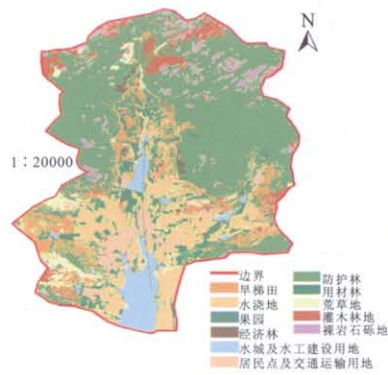
附图3 SWAT模型模拟的纳河流域水土流失现状格局



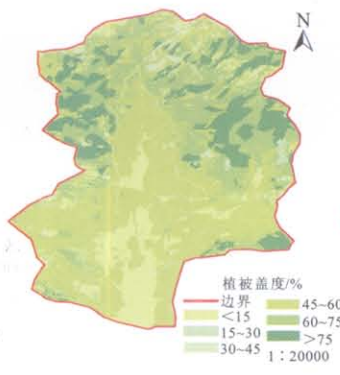
附图4 SWAT模型模拟的纳河流域水土流失本底格局



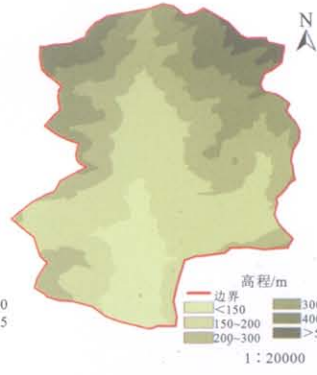
附图5 汭河流域水土流失空间差异评估



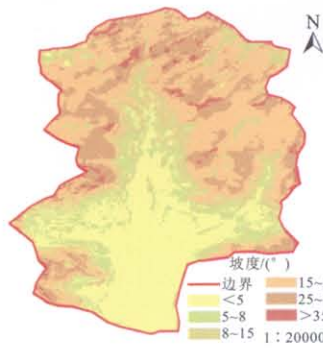
附图6 九仙山子流域土地利用图



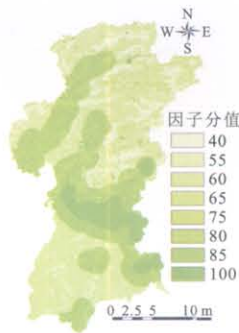
附图7 九仙山子流域植被盖度图



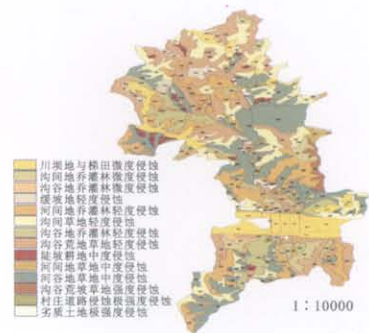
附图8 九仙山子流域DEM图



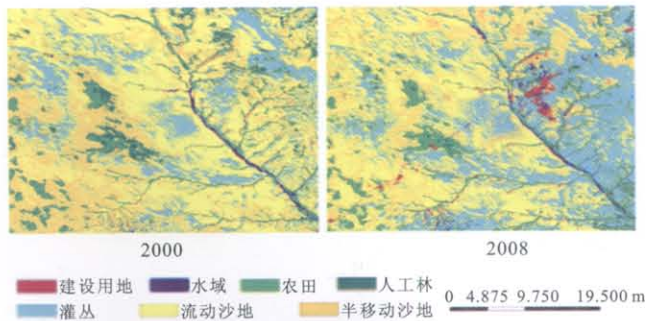
附图9 九仙山子流域坡度图



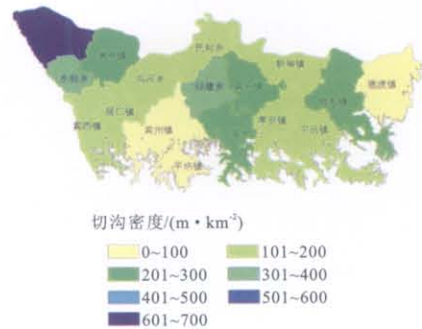
附图10 分宜县水源可及度因子分值图



附图11 安塞县侯门村土壤侵蚀类型图



附图12 2000年、2008年榆神矿区景观格局



附图13 宾县各乡镇切沟密度分布图