

王尧, 蔡运龙, 潘懋, 等. 贵州省乌江流域土壤侵蚀模拟——基于 GIS、RUSLE 和 ANN 技术的研究 [J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1735–1747.

Wang Yao, Cai Yunlong, Pan Mao, et al. Soil erosion simulation of the Wujiang River Basin in Guizhou Province Based on GIS, RUSLE and ANN[J]. Geology in China, 2014, 41(5): 1735–1747(in Chinese with English abstract).

## 贵州省乌江流域土壤侵蚀模拟 ——基于 GIS、RUSLE 和 ANN 技术的研究

王 尧<sup>1</sup> 蔡运龙<sup>2</sup> 潘 懋<sup>3</sup>

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 2. 北京大学城市与环境学院土地科学中心, 北京 100871;  
3. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

**摘要:** 本研究在 GIS 技术支撑下选择 RUSLE 模型作为基础模型, 估算乌江流域 20 世纪 80 年代和 90 年代年均土壤侵蚀量, 结合 ANN 技术, 预测 2001—2010 年乌江流域的土壤侵蚀量, 分析了该流域近 30 年来土壤侵蚀动态变化规律, 以期为研究区土壤侵蚀防治工作提供理论依据。研究表明: 应用 RUSLE 模型计算乌江流域年均土壤侵蚀模数, 计算结果和以往土壤侵蚀调查估计的结果比较吻合, 但由于 RUSLE 模型不计算重力侵蚀, 因此计算结果仍与实测输沙模数有所出入。90 年代潜在土壤侵蚀模数比 80 年代高, 流域潜在土壤侵蚀呈增加趋势, 其中三岔河流域和马蹄河/印江河流域年均潜在土壤侵蚀模数最高。3 种主要土地覆被类型中, 林地的土壤保持量最大, 耕地次之, 草地最少, 这与非喀斯特地区在水土保持效果上通常林地>草地>旱地的结论有所不同。通过构建 BP 神经网络, 预测得到乌江流域 2001—2010 年土壤侵蚀模数, 结果显示, 21 世纪前 10 年, 流域土壤侵蚀模数大幅降低, 流域年均土壤侵蚀模数由 90 年代的 23.13 t/(hm<sup>2</sup>·a) 降低为 1.01 t/(hm<sup>2</sup>·a)。三岔河流域的水土流失得到了控制, 黔西、金沙、息烽、修文、贵阳、平坝、思南、石阡、沿河和松桃等县市应是“十二五”期间的水土流失重点治理对象。

**关键词:** RUSLE; ANN; 土壤侵蚀; 乌江流域

**中图分类号:** P934; P931 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2014)05-1735-13

现有土壤侵蚀计算模型多以坡面及小流域为研究对象, 而现代的流域治理规划, 不仅要考虑一次降水过程的土壤侵蚀响应, 还要揭示较长系列的侵蚀周期及水沙情势的变化趋势。对于地处西南喀斯特高原核心地带的乌江流域来说, 全面了解整个流域的土壤侵蚀状况, 对该区水土保持工作的顺利开展尤为重要。但相比坡面和小流域尺度, 区域尺度上的土壤侵蚀研究尚不成熟, 各地区建立的区

域土壤侵蚀模型本地化特征非常明显, 由于所选研究区下垫面构造的特殊性, 模型区域适应能力差, 移植难度高<sup>[1-3]</sup>, 至今在喀斯特地区仍没有可供参考和使用的大家公认的土壤侵蚀产沙模型。而研究成熟的径流小区的观测资料和实验资料在向大尺度土壤侵蚀预测推广中出现很多问题, 也就是所谓的“尺度效应”<sup>[4]</sup>。因此乌江流域已开展的坡面和小流域侵蚀产沙规律<sup>[5-9]</sup>不能直接外推应用到区域尺

**收稿日期:** 2014-03-17; **改回日期:** 2014-06-03

**基金项目:** 国家科技支撑计划子课题(2011BAC09B08-04)和国家地质矿产调查评价专项项目(1212011121129)联合资助。

**作者简介:** 王尧, 女, 1979 年生, 博士, 副研究员, 主要从事土地科学、水工环地质调查部署研究; E-mail: wangyaopku@pku.edu.cn。

**通讯作者:** 蔡运龙, 男, 1948 年生, 博士, 教授, 主要从事自然地理学、土地变化、地理学理论与方法等方面的研究;

E-mail: caiyl@urban.pku.edu.cn。

度乌江流域。

现阶段国际上应用广泛的分布式水文模型 SWAT(Soil and Water Assessment tool)、WEPP(Water Erosion Prediction Project)、AnnAGNPS(Annualized Agricultural Non-Point Source Pollution Model)等模型的泥沙计算模块均采用美国通用土壤流失方程 USLE(The Universal Soil Loss Equation)<sup>[10-11]</sup>及其修正模型 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)<sup>[12-13]</sup>、MUSLE(Modified Universal Soil Loss Equation)<sup>[14]</sup>等。USLE 及其修正版 RUSLE 在试验区具有较高的准确性,能反映出研究地区的特点。已有相关学者<sup>[15-17]</sup>在岩溶地区应用 RUSLE 模型进行土壤侵蚀量的计算,结果满意。随着 GIS 技术的发展,采用 RUSLE 模型研究大区域土壤侵蚀是一种可行的方法与技术途径<sup>[18]</sup>。

同时近年来发展起来的人工神经网络(Artificial Neural Networks, 简称为 ANN)具有自学习、自组织、自适应和容错性等一系列优点,是一种能模拟具有非线性输入输出关系的数学工具。而土壤侵蚀产沙过程是土壤本身特性与外界影响因素(自然因素和人为因素)相互作用的结果,它们之间具有明显的非线性输入输出关系。因此随着计算机技术的发展,神经网络技术在土壤侵蚀预报中得到推广应用<sup>[19-21]</sup>。虽然 ANN 在土壤侵蚀领域的

应用起步相对较晚,但应用水平的提升迅速。早在 1993 年,蔡焯东等<sup>[22]</sup>就在《土壤侵蚀预报的自组织人工神经网络方法》中,运用 T.kohonam 自组织模型进行土壤侵蚀强度的预报,认为该模型容错能力强,预报速度快。2000 年,王协康<sup>[23]</sup>等经过分析得出,土壤侵蚀产沙过程和神经网络模型特点具有一定的相似性,并在此基础上,选用四川某径流小区的实测资料,采用 BP 算法对土壤侵蚀产沙量进行模拟和预测。2008 年段军彪等<sup>[24]</sup>利用设计的基于遗传算法(GA)的优化 BP 神经网络,建立小流域侵蚀量预测模型,应用于甘肃西峰市杨家沟小流域侵蚀量预测,预测平均相对误差为 4.63%,达到预测精度要求。

基于上述分析,本研究基于 RUSLE 模型估算乌江流域 20 世纪 80 年代和 90 年代年均土壤侵蚀模数,构建人工神经网络模型预测 2001—2010 年年均土壤侵蚀模数。系统分析了乌江流域 30 年来土壤侵蚀变化的总体特征及空间变化格局,定量、定位地分析了影响土壤侵蚀变化的相关因素,论述人类活动对脆弱的喀斯特土地系统的影响。

### 1 研究区概况

本研究的研究区域是贯穿贵州省中部的乌江流域。乌江属长江水系,发源于贵州西部乌蒙山东

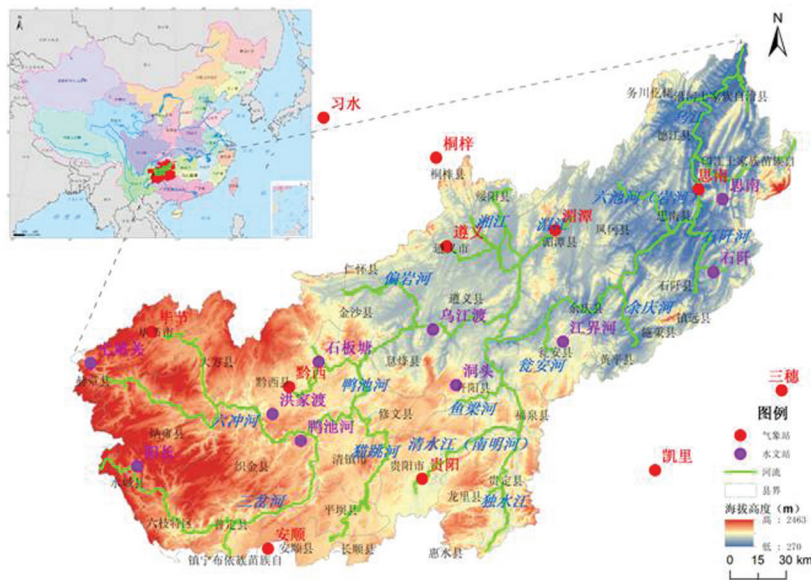


图1 贵州省乌江流域水系分布图  
Fig.1 River system of the Wujiang River Basin in Guizhou Province

麓威宁县境的香炉山,干流在省境内流经威宁、水城、纳雍等23个县市,在东北部出境进入四川,主要支流有六冲河、三岔河、猫跳河、鸭池河、湘江、偏岩河、清水江、石阡河和余庆河等(图1)。乌江流域在贵州省境内面积51 817 km<sup>2</sup>,其地势西高东低。流域内75.6%的地区为碳酸质岩发育的喀斯特地貌。上游威宁、赫章一带溯源侵蚀尚未波及,高原地面保存较好;中下游地区大多河谷深切,山高谷深,地表起伏度最高可达300 m。

## 2 研究数据和方法

### 2.1 研究数据

所用的数据包括:乌江流域高程数据、1:100万土壤类型数据、1980—2000年乌江流域及周边18个气象台站日降雨数据和乌江流域1982—2000年的GIMMS/AVHRR NDVI数据等。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 RUSLE模型

RUSLE模型已被广泛的应用于年平均土壤侵蚀量的计算,RUSLE模型保持了USLE的基本结构,模型表达式<sup>[25]</sup>为:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中: $A$ ——年平均土壤流失量( $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ); $R$ ——降雨侵蚀力因子( $MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$ ); $K$ ——土壤可蚀性因子( $t \cdot hm^2 \cdot h \cdot hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ ); $L$ ——坡长,为无量纲因子; $S$ ——坡度因子,为无量纲因子; $C$ ——植被覆盖与经营管理因子,为无量纲因子; $P$ ——水土保持措施因子,为无量纲因子。这些因子都是反映研究区土壤侵蚀强度变化的主要因素。

本研究基于ArcGIS计算土壤侵蚀各影响因子,各栅格图层栅格大小统一设置为30 m×30 m。各侵蚀因子的计算方法如下。

#### (1) 降雨侵蚀力因子 $R$

计算降雨侵蚀力使用了Yu等在澳大利亚建立的基于日降雨资料估算月降雨侵蚀力的简易模型<sup>[26-27]</sup>:

$$E_j = \alpha [1 + \eta \cos(2\pi f_j + \omega)] \sum_{d=1}^N R_d^\beta \quad R_d > R_0 \quad (2)$$

$E_j$ —— $j$ 月降雨侵蚀力  $MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$ ;  $R_d$ ——日降雨量  $mm$ ;  $R_0$ ——产生侵蚀的日降雨强度阈

值。喀斯特坡地土壤流失的实验结果表明在前期持续降雨情况下降雨量达到10.4 mm会产生地表径流,在前期没有降雨的情况下,降雨量达到15 mm以上才会产生明显径流。因此本研究取临界侵蚀性降雨量为12 mm。 $f$ ——频率,取1/12; $\omega$ —— $5\pi/6$ ;  $N$ —— $j$ 月中日降雨量超过 $R_0$ 的天数; $S$ ——夏半年5—8月份降雨量; $P$ ——年均降雨量 $mm$ ; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\eta$ 为模型参数; $\beta$ 取值范围在1.2~1.8,根据以往研究结果并结合乌江流域实际情况,本研究取1.5;在年降雨量大于1050 mm的地方, $\alpha$ 和 $\beta$ 关系满足式3,在年降雨量大于500 mm小于1050 mm的地方, $\alpha$ 和 $\beta$ 满足式4; $\eta$ 通过年均降雨量计算(式5)。

$$\log \alpha = 2.11 - 1.57\beta \quad (3)$$

$$\alpha = 0.395 \left( 1 + 0.098^{[3.26(S/P)]} \right) \quad (4)$$

$$\eta = 0.58 + 0.25P/1000 \quad (5)$$

#### (2) 土壤可蚀性因子 $K$

本研究采用在我国广泛使用的Williams等在EPIC模型中使用的公式<sup>[28]</sup>计算土壤可蚀性因子 $K$ 。

#### (3) 植被覆盖和经营管理因子 $C$

影像的植被覆盖度值通过下式计算得到,然后采用蔡崇法等建立的 $C$ 因子值与植被覆盖度之间的回归方程计算 $C$ 值<sup>[29]</sup>。

$$V_n = (NDVI - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min}) \quad (6)$$

式中, $V_n$ 为像元植被覆盖度; $NDVI_{\min}$ 为裸土或无植被覆盖区域的 $NDVI$ 值,即无植被像元的 $NDVI$ 值; $NDVI_{\max}$ 则代表完全被植被所覆盖的像元的 $NDVI$ 值,即纯植被像元的 $NDVI$ 值。

#### (4) 水土保持措施因子 $P$

由于流域内没有水土保持措施因子的小区实验数据,土壤保持措施因子采用经验值估计。本研究在对流域实地考察的基础上,结合许月卿等在猫跳河流域的相关研究成果<sup>[30]</sup>,赋予流域内土地利用类型相应的水土保持措施因子值。水域、未利用地和城建用地的水土保持措施因子 $P$ 赋值为0,水田为0.15,旱地为0.5,林地和草地均赋值为1。

#### (5) 坡度坡长因子 $LS$

坡长 $L$ 和坡度 $S$ 都采用McCool等在1997年设定的公式<sup>[31]</sup>计算。坡长因子 $L$ 计算复杂,相关文献很少。从网站下载华盛顿大学的Robert J. Hickey提供的基于ArcInfo的AML计算脚本。坡度单位采

用度,分段取值范围0~1,值越小坡长计算越准确,但计算量相应增大,推荐在坡度小于5°时分段取值0.7°,在坡度大于5°时分段值设为0.5°。

### 2.2.2 BP神经网络

反向传播网络(Back-Propagation Network,简称BP)是将W-H学习规则泛化,对非线性可微分函数进行权值训练的多层前向网络。本研究主要用BP神经网络进行预测,输入土壤侵蚀模数,推测未来的土壤侵蚀变化态势。

选取trainlm作为学习函数,purelin作为传递函数,以流域20世纪80年代土壤侵蚀模数和6个影响因素作为输入数据,训练网络模拟流域90年代的土壤侵蚀模数,验证达标后,输入90年代的土壤侵蚀模数和6个影响因素,预测2001—2010年的土壤侵蚀模数。由于各输入层量纲不同,采用线性函数转换方法对数据进行[0, 1]归一化处理。考虑流域面

积大小,在流域边界范围内随机生成4万个点,用生成的4万个点提取每个输入图层属性值。最后的模拟和预测结果,通过IDW插值方法内插成30 m分辨率的年土壤侵蚀模数图层。

## 3 结果与分析

### 3.1 基于RUSLE模型计算乌江流域土壤侵蚀量

#### 3.1.1 现实土壤侵蚀量

采用上述方法计算乌江流域土壤侵蚀模数,20世纪80年代和90年代乌江流域仍有较大的土被覆盖率和较厚的土层,土壤侵蚀模数较大,还没有到因缺土和无土导致侵蚀量极低的程度,故仍按照国家水利部发布的《土壤侵蚀分类分级标准》<sup>[32]</sup>进行乌江流域土壤侵蚀类型划分。乌江流域20世纪80年代和90年代土壤侵蚀强度等级分类图层如图2。

流域20世纪80年代年均土壤侵蚀量为133.36×

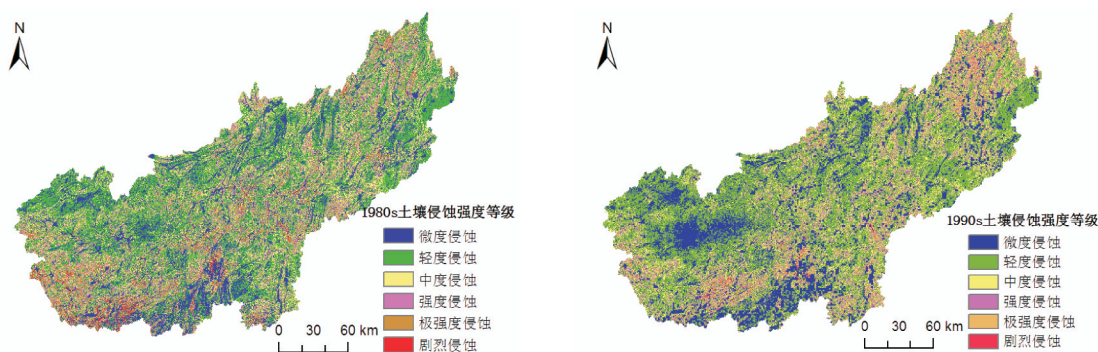


图2 乌江流域1980和1990年代土壤侵蚀等级分布图

Fig.2 Classification of soil erosions in the 1980s and 1990s, WRB



图3 乌江流域子流域和水文站点分布图

Fig.3 Spatial distribution of Wujiang sub-basins and hydrological stations in WRB

10<sup>6</sup> t/a, 年均土壤侵蚀模数为 26.78 t/(hm<sup>2</sup>·a); 90 年代年均土壤侵蚀量为 115.18×10<sup>6</sup> t/a, 年均土壤侵蚀模数为 23.13 t/(hm<sup>2</sup>·a)。计算结果和贵州省水土流失公告比较吻合<sup>[33]</sup>, 这说明运用 GIS 技术, 采用 RUSLE 模型研究大区域土壤侵蚀是一种可行的方法与技术途径。对比分析由 RUSLE 模型计算的乌江各子流域土壤侵蚀变化图和乌江流域各水文站点(图 3)实测输沙模数变化图(图 4)可知, 除石阡水文站外, 其他站点变化趋势相同。石阡水文站 90 年代年均输沙模数明显高于 80 年代, 而 RUSLE 计算

的年均土壤侵蚀量下降了 2.76×10<sup>4</sup> t/a, 究其原因是 90 年代石阡县发生了多次地质灾害, 包括滑坡、泥石流、崩塌和地裂隙等, 而 RUSLE 模型主要计算的是水力侵蚀, 不包括滑坡、泥石流等重力侵蚀, 所以 RUSLE 计算的年均土壤侵蚀量与输沙模数有出入。

由表 1 可知, 80 年代土壤侵蚀严重的地区为上游的三岔河流域; 轻度和微度侵蚀主要分布在偏沿河、渭河和湘江流域上游、清水江流域的南明河子流域、六冲河上游的白布河流域及石阡河流域; 乌江主河道两侧土壤侵蚀强度在中度以上。90 年代

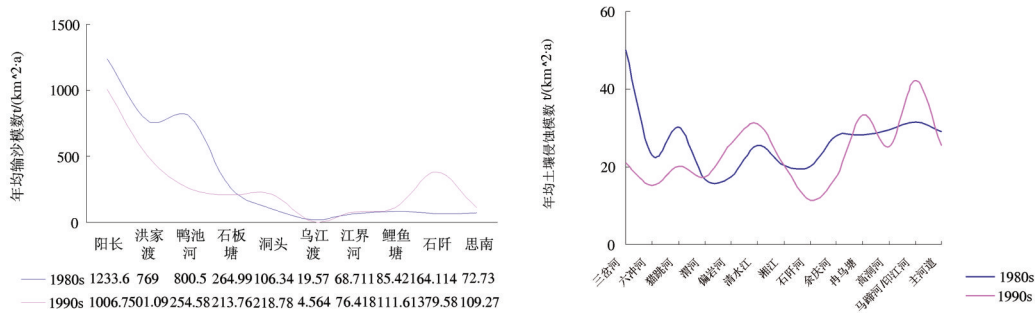


图4 乌江流域各水文站点输沙模数变化

Fig.4 Variation of sediment transport modulus in the control areas of hydrological stations and Wujiang sub-basins in the Wujiang River Basin between the 1980s and 1990s

表 1 乌江流域各子流域 1980 和 1990 年代年均土壤侵蚀统计  
Table 1 Soil erosion amount of varied land use types in the 1980s and 1990s

子流域	面积 /km <sup>2</sup>	1980 年代		1990 年代		年均土壤侵蚀量变化/(10 <sup>4</sup> t/a)	年均土壤侵蚀模数变化/(t/(hm <sup>2</sup> ·a))	变化比例 /%
		年均土壤侵蚀总量/(10 <sup>4</sup> t/a)	年均土壤侵蚀模数/(t/(hm <sup>2</sup> ·a))	年均土壤侵蚀总量/(10 <sup>4</sup> t/a)	年均土壤侵蚀模数/(t/(hm <sup>2</sup> ·a))			
高洞河	2671	7.88	29.49	6.74	25.23	-1.14	-4.26	-14.5
六冲河	8893	20.42	22.96	13.55	15.24	-6.87	-7.72	-33.6
马蹄河/印江河	3242	10.24	31.59	13.71	42.28	3.47	10.69	33.9
猫跳河	2814	1.52	30.29	5.67	20.15	-2.85	-10.14	-33.5
偏岩河	2201	3.86	17.52	5.73	26.05	1.87	1.53	41.4
清水江	6542	16.66	25.47	20.37	31.13	3.71	5.66	22.3
冉乌塘	2097	5.91	21.16	7.01	33.43	1.1	5.27	11.6
三岔河	4060	20.32	50.06	1.56	21.09	-11.76	-21.97	-57.9
石阡河	3145	6.32	20.09	3.56	11.31	-2.76	-1.78	-43.7
渭河	2246	3.75	16.69	3.91	17.41	0.16	0.72	4.3
湘江	4840	9.89	20.44	9.91	20.48	0.02	0.04	0.2
余庆河	1561	4.37	27.99	2.73	17.46	-1.64	-10.53	-37.5

随着各项水土保持措施的实行,流域年均土壤侵蚀总量减少了14%。其中三岔河流域减少幅度最大,降低了57.9%。清水江流域土壤侵蚀量增加最多。随着90年代清水江流域水能资源开发的跟进、河流两岸公路的兴修和其他工程项目的陆续实施,带来经济效益不断增长的同时,大量沙石填埋河床,植被严重破坏,山体滑坡、水土流失日益严重。下游马蹄河/印江河流域年均土壤侵蚀模数增加最多,增加了33.9%。乌江下游地区是少数民族聚居区,人口密度高,增长速度快,人地矛盾突出,毁林开荒、陡坡耕种等人为因素叠加在地质成因之上直接诱导了土壤侵蚀的发展。猫跳河流域年均土壤侵蚀模数减少量仅次于三岔河流域。与80年代相比,进入90年代后猫跳河流域的景观破碎度降低,流域拼块的复杂程度持续降低,生态服务指数上升,整个流域的生态环境质量开始向好的方向发展<sup>[34]</sup>。由图2可知,六冲河流域的大方地区土壤侵蚀模数显著降低。毕节地区从1988年,作为国家“开发扶贫,生态建设”试验区开始实施“长治”工程,水土流失得到有效遏制,生态环境明显改善。

### 3.1.2 潜在土壤侵蚀量

潜在土壤侵蚀量指在没有任何植被覆盖和水土保持措施条件下的年均土壤流失量,即  $C=1, P=1$ , 则RUSLE形式变为  $A=R \cdot K \cdot L \cdot S$ 。

流域20世纪80年代年均潜在土壤侵蚀模数为  $441.7 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 90年代年均潜在土壤侵蚀模数为  $526.3 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。由降雨侵蚀力的年际变化分析可知1980—2000年乌江流域的年均降雨侵蚀力呈增

加趋势,降雨侵蚀力是潜在土壤侵蚀能力的重要影响因子,因此90年代潜在土壤侵蚀模数相比80年代明显增高。从图5和表2可知三岔河流域和下游马蹄河/印江河流域的潜在土壤侵蚀模数最高。三岔河流域降雨量高,  $R$ 值最高。马蹄河/印江河流域地表切割较深,地面破碎。渭河流域是降雨侵蚀力的低值中心,而猫跳河流域地势较平缓坡度小,因此这2个流域潜在土壤侵蚀量最低。清水江、湘江流域的潜在土壤侵蚀模数高主要原因是这2个流域的  $K$ 值高,广泛分布的黄壤土和岩溶石灰土,土层浅薄,成土速率低,抗蚀性差。由坡度、坡长、土壤可蚀性和降雨侵蚀力决定的潜在土壤侵蚀模数增加最多的是石阡河流域,其次是马蹄河/印江流域。清水江流域潜在土壤侵蚀模数变化幅度最高,增加了27.44%,主要因为清水江流域的降雨侵蚀力倾向率最高,高达  $931 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10\text{a})$ 。通过潜在土壤侵蚀量和现实土壤侵蚀量的对比,反映了在当前土地利用条件下,所应用的侵蚀控制措施是否有效。潜在土壤侵蚀量对于侵蚀高风险区的认识和制定侵蚀防治措施有重要意义。

### 3.1.3 土壤保持量

潜在土壤侵蚀量和现实土壤侵蚀量的差值就是因植被覆盖和实施土地管理措施而减少的土壤侵蚀量,即土壤保持量。90年代流域3种主要覆被类型耕地、林地和草地的年均土壤侵蚀量、潜在土壤侵蚀量和土壤保持量分别见表3、4和5。

90年代流域年均土壤保持量  $2457 \times 10^6 \text{ t/a}$ 。林地年均土壤保持模数最大,耕地次之。若用平均潜

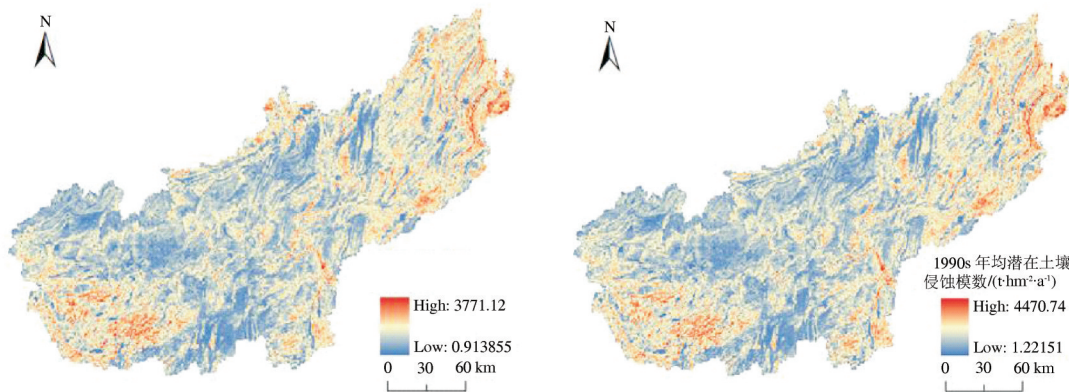


图5 乌江流域1980和1990年代年均潜在土壤侵蚀模数分布图  
Fig.5 Distribution of annual average latent soil erosion modulus in the 1980s and 1990s, WRB

表2 乌江流域各子流域1980和1990年代年均潜在土壤侵蚀统计  
Table 2 Latent soil erosion amount in the Wujiang sub-basins in the 1980s and 1990s

子流域	面积 /km <sup>2</sup>	1980年代		1990年代		年均潜在 土壤侵蚀量 变化 /(10 <sup>4</sup> t/a)	年均潜在 土壤侵蚀 模数变化 /(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	变化 比例 /%
		年均潜在	年均潜在	年均潜在	年均潜在			
		土壤侵蚀总量 /(10 <sup>6</sup> t/a)	土壤侵蚀模数 /(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	土壤侵蚀总量 /(10 <sup>6</sup> t/a)	土壤侵蚀模数 /(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )			
高洞河	2671	114	426	136	508	22	82	19.3
六冲河	8893	346	389	413	465	67	76	19.36
马蹄河/印江河	3242	191	589	229	707	38	118	19.9
猫跳河	2814	88	312	109	387	21	75	23.86
偏岩河	2201	81	370	90	409	9	39	11.11
清水江	6542	266	407	339	519	73	112	27.44
冉乌塘	2097	102	487	122	583	20	96	19.61
三岔河	4060	241	593	281	693	40	100	16.6
石阡河	3145	174	552	211	671	37	119	21.26
渭河	2246	72	319	81	360	9	41	12.5
湘江	4840	198	408	221	456	23	48	11.62
余庆河	1561	81	519	99	633	18	114	22.22
主河道	4067	166	409	194	477	28	68	16.87
合计	48379	2120	438	2525	521	405	83	19.1

在土壤侵蚀量与平均现实土壤侵蚀量比值表示土地利用类型防止土壤侵蚀的能力,则耕地保持土壤能力最强,比值达41.5;其次为林地,其比值是19.7;草地保持土壤能力最小,比值仅为11.5。

由表3可看出,林地的年均土壤侵蚀量最高,疏林地土壤侵蚀强度指数仅次于旱地和中覆盖度草地。90年代贵州相继实施了多项水土保持项目,开展了陡坡地退耕还林还草工程,但新种植的大面积幼林地尚未成熟,林下植被稀疏,郁闭度低,林草地

涵养水源、保持水土等生态功能不强,因此仍有很高的产沙量。

由表4可知,林地的潜在侵蚀量最大,耕地次之,草地最小。林地分布的地区海拔高度高,降雨量大,坡度较陡,因此潜在土壤侵蚀量大。耕地分布区地形破碎,且由于连年种植农作物,土壤抗蚀性差,表土易于流失。而草地分布地区地势平缓较平坦,潜在土壤侵蚀量低。

由表5可看出,林地的水土保持能力最高,耕地

表3 1990年代乌江流域不同坡度耕地、林地和草地年均土壤侵蚀量统计  
Table 3 Soil erosion amount of farmland, forestland and grassland on different slopes in the 1990s

地类	土壤侵蚀统计参数	坡度					合计
		0~5°	5~10°	10~15°	15~25°	>25°	
耕地	面积/10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup>	33	40	36	35	9	152
	土壤侵蚀总量/(10 <sup>4</sup> t/a)	44	232	430	706	293	1705
	土壤侵蚀模数/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	1	6	12	20	33	11
林地	面积/(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	34	55	64	72	22	246
	土壤侵蚀总量/(10 <sup>4</sup> t/a)	129	790	1685	3015	1359	6978
	土壤侵蚀模数/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	4	14	26	42	62	28
草地	面积/(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	15	20	22	24	7	88
	土壤侵蚀总量/(10 <sup>4</sup> t/a)	59	313	618	1141	496	2626
	土壤侵蚀模数/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	4	16	28	48	71	30
流域合计	面积/(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )						486
	土壤侵蚀总量/(10 <sup>4</sup> t/a)						11309
	土壤侵蚀模数/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )						23

表4 乌江流域耕地、林地和草地1990年代年均潜在土壤侵蚀量统计  
Table 4 Latent soil erosion amount of farmland, forestland and grassland on different slopes in the 1990s

地类	土壤侵蚀统计参数	坡度					合计
		0~5°	5~10°	10~15°	15~25°	>25°	
耕地	面积(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	33	40	36	35	9	152
	潜在土壤侵蚀量(10 <sup>6</sup> t/a)	23	104	179	284	117	707
	潜在土壤侵蚀模数(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	69	262	495	819	1318	464
林地	面积(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	34	55	64	73	22	247
	潜在土壤侵蚀量(10 <sup>6</sup> t/a)	24	147	319	600	288	1378
	潜在土壤侵蚀模数(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	72	268	499	827	1323	559
草地	面积(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	15	20	22	24	7	88
	潜在土壤侵蚀量(10 <sup>6</sup> t/a)	10	56	114	208	98	486
	潜在土壤侵蚀模数(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	67	277	520	871	1401	554
流域合计	面积(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )						487
	潜在土壤侵蚀量(10 <sup>6</sup> t/a)						2571
	潜在土壤侵蚀模数(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )						528

表5 乌江流域不同坡度林地、耕地和草地1990年代年均土壤保持量统计  
Table 5 Average annual soil conservation amounts of farmland, forestland and grassland on different slopes in the 1990s

地类	土壤侵蚀统计参数	坡度					合计
		0~5°	5~10°	10~15°	15~25°	>25°	
耕地	面积(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	33	40	36	35	9	152
	土壤保持量(10 <sup>4</sup> t/a)	2256	10168	17470	27694	11407	68995
	土壤保持模数(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	68	254	485	791	1267	454
林地	面积(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	34	55	64	73	22	247
	土壤保持量(10 <sup>4</sup> t/a)	2271	13910	30215	56985	27441	130822
	土壤保持模数(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	67	253	472	781	1247	530
草地	面积(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	15	20	22	24	7	88
	土壤保持量(10 <sup>4</sup> t/a)	941	5287	10782	19659	9304	45974
	土壤保持模数(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	63	264	490	819	1329	522
流域合计	面积(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )						487
	土壤保持量(10 <sup>4</sup> t/a)						245791
	土壤保持模数(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )						505

次之,草地相比最低。林地因为有浓密的冠层消减暴雨势能,缓冲暴雨对土壤的击打,且森林枯枝落叶层是减少土壤侵蚀的天然屏障,所以林地的土壤保持能力最强。草地水土保持能力相比最低,主要是因为草地中覆盖度草地侵蚀产沙量大。喀斯特地区土壤侵蚀发生及强弱受土层厚度限制,具有土壤侵蚀量小但石漠化危害程度严重的的特点。研究区内土地覆被类型与土壤侵蚀的关系,与非喀斯特地区在水土保持效果上通常林地>草地>耕地的结论有所不同。

### 3.2 基于BP神经网络模拟预测乌江流域土壤侵蚀

#### 3.2.1 BP神经网络训练模拟

BP神经网络训练误差图和模拟结果图如图6所示。

选用Nash-Sutcliffe相关系数( $R^2$ )作为统计量。 $R^2$ 定义如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_i')^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (7)$$

式中  $Q_i$  为第  $i$  个实际土壤侵蚀模数( $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $Q_i'$  为第  $i$  个模拟土壤侵蚀模数( $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $\bar{Q}$  为实际平均土壤侵蚀模数( $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $n$  为样本数量;  $i$  为样本索引。经计算90年代模拟结果与90年代实际土壤侵蚀模数相关系数达到0.85,满足要求。

#### 3.2.2 预测2001—2010年乌江流域土壤侵蚀模数

由2001—2010年乌江流域和子流域年均土壤侵蚀模数预测结果(图7~8)可看出:流域土壤侵蚀



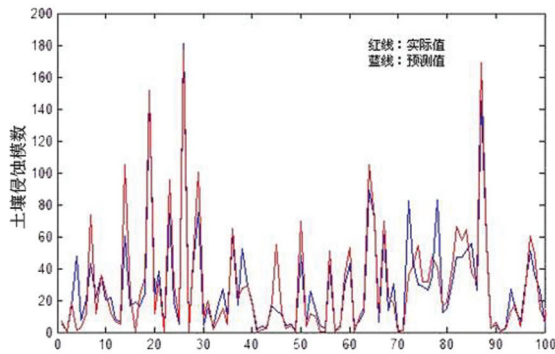


图6 乌江流域1990s年均土壤侵蚀模数模拟与实测对比图  
( $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )

Fig.6 Comparison of BP network training outputs and the actual values

模数大幅降低,流域年均土壤侵蚀模数由90年代的23.13  $t/(hm^2 \cdot a)$ 降低为1.01  $t/(hm^2 \cdot a)$ 。贵州省在“十五”期间,全省全面推进天然林资源保护、退耕还林和防护林建设体系等重点林业工程,加快以用材林为主的林业产业基地建设,实施林业六大工程,努力构筑长江、珠江上游重要生态屏障,水土流失和石漠化扩展趋势得到初步遏制,局部地区生态环境状况得到改善。“十一五”期间,在水利部的安排部署下,组织编制了多项水土保持规划方案。2001—2010年间水土保持防治工程规模不断扩大,工程建设稳步推进。对比1980年代、1990年代和2000年代各子流域年均土壤侵蚀模数,可看出三岔河流域

的水土流失得到了控制。

进入21世纪,随着多年强烈的土壤侵蚀的发展,乌江流域很多地方土层已经很薄,生态环境脆弱,石漠化程度加剧。中度和强度石漠化地区,岩石裸露,缺土或无土可流,土壤流失量虽小,但危害却很严重。乌江流域年均土壤侵蚀模数相比90年代显著减小,如果按照水利部发布的《土壤侵蚀分级分类标准》划分流域土壤侵蚀类型,乌江流域大部分地区土壤侵蚀都在微度侵蚀范围内,这与喀斯特地区土壤侵蚀的严重态势不符。因此本研究采用喀斯特地区水土流失强度分级标准修正方案<sup>[31]</sup>对流域2001—2010年土壤侵蚀进行等级分类(图9)。修正方案体现了喀斯特地区的土壤侵蚀的特殊性,能比较合适的评估石漠化严重地区的土壤侵蚀现状和程度。

由图9可看出随着乌江上游地区已不再是侵蚀产沙中心。乌江下游土壤侵蚀面积有所减少,但马蹄河/印江河流域和石阡河流域水土流失仍然严峻。整个流域轻度以上土壤侵蚀集中分布在鸭池河至乌江渡区间,渭河流域、偏岩河流域和猫跳河流域土壤侵蚀严重。黔西、金沙、息烽、修文、贵阳、平坝、思南、石阡、沿河和松桃等县市应是“十二五”期间的水土流失重点治理对象。

#### 4 讨论

(1) 本研究应用RUSLE模型计算的乌江流域土壤侵蚀模数和以往土壤侵蚀调查估计的结果比较吻合,进一步说明采用RUSLE模型研究喀斯特大流

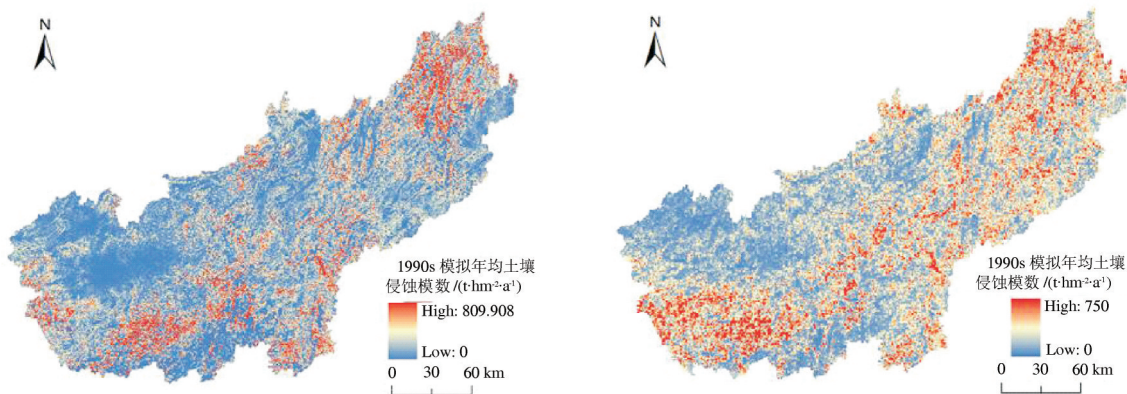


图7 乌江流域1990年代实际和模拟年均土壤侵蚀模数图

Fig.7 Actual and simulated average annual soil erosion modulus in the 1990s, WRB

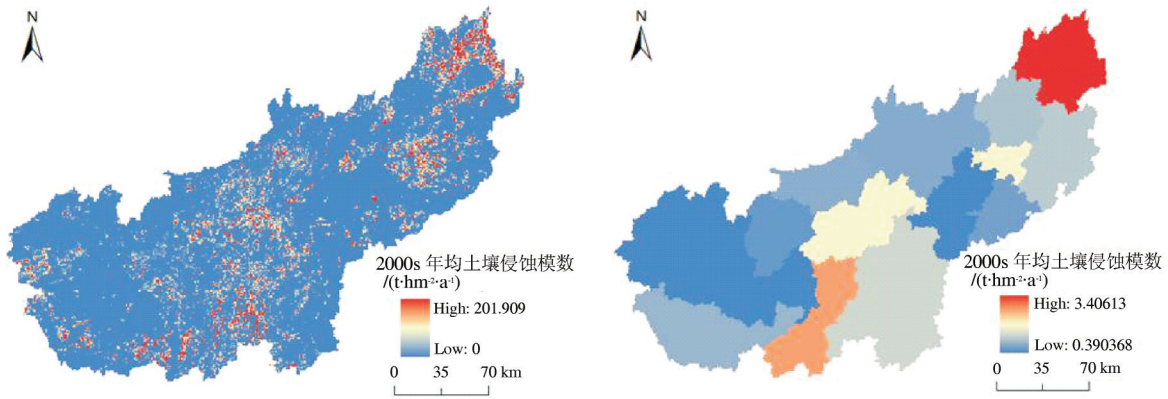


图8 乌江流域和子流域2000年代年均土壤侵蚀模数预测结果  
Fig.8 Predictive average annual soil erosion modulus in the 2000s in WRB and sub-basins

表6 乌江流域各子流域2001—2010年年均土壤侵蚀统计  
Table 6 Soil erosion amount in the Wujiang sub-basins in the 2000s

子流域	面积/km <sup>2</sup>	年均土壤侵蚀量/(10 <sup>4</sup> t/a)	年均土壤侵蚀模数/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
高洞河	2671	11	0.40
六冲河	8893	35	0.39
马蹄河/印江河	3242	110	3.41
猫跳河	2814	57	2.01
偏岩河	2201	15	0.70
清水江	6542	71	1.08
冉乌塘	2097	18	0.87
三岔河	4060	31	0.77
石阡河	3145	30	0.95
渭河	2246	12	0.51
湘江	4840	33	0.67
余庆河	1561	9	0.58
主河道	4067	57	1.40
合计	48379	487	1.01

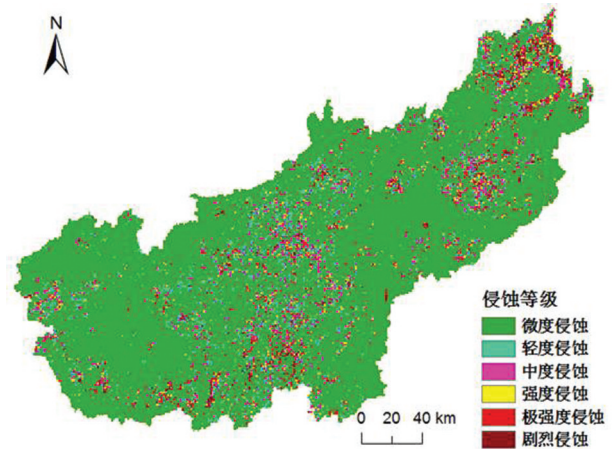


图9 乌江流域2000年代预测土壤侵蚀等级分布图  
Fig.9 Classification of soil erosions in the 2000s, WRB

域土壤侵蚀是一种可行的方法与技术途径。但RUSLE模型集合的公式均来自其他地区的研究结果,这会影响模型计算精度。借鉴非喀斯特地区研究经验,构建喀斯特地区区域尺度分布式水沙预报模型是今后的工作重点。

(2) 通过构建BP神经网络,用流域20世纪80年代土壤侵蚀模数模拟90年代土壤侵蚀模数, Nash-Sutcliffe相关系数达到0.85,说明BP神经网络适用于喀斯特地区大流域土壤侵蚀模数的模拟预测。预测的乌江流域2001—2010年间土壤侵蚀模数本应对照同期实际水土流失数据加以检验,但目前贵州省尚未

颁布此时段的水土流失公告,有待今后检验。

(3) 本研究探讨了乌江流域不同土地覆被类型林地、草地、耕地的水土保持量规律,得出与非喀斯特地区不同的结论,并且分析了流域1980—2010年间的土壤侵蚀变化规律,这些研究结果对喀斯特地区流域土壤侵蚀规律研究和治理具有指导意义。

## 5 结 论

本研究基于GIS技术,应用RUSLE模型估算了乌江流域20世纪80年代和90年代的年均土壤侵蚀量、潜在土壤侵蚀量和各土地利用类型土壤保持量。并应用BP神经网络模拟了乌江流域1980—2000年土壤侵蚀动态变化,预测了2001—2010年间

乌江流域的年均土壤侵蚀模数。主要结论如下:

(1) 基于GIS平台,应用RUSLE模型计算乌江流域的土壤侵蚀模数,经计算流域1980—1989年年均土壤侵蚀模数为 $26.78 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;1990—2000年流域年均土壤侵蚀模数为 $23.13 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。80年代土壤侵蚀最严重的地区为上游的三岔河流域。90年代鸭池河流域的年均土壤侵蚀模数比80年代降低了50%,而清水江流域年均土壤侵蚀量增加最多。流域90年代的年均潜在土壤侵蚀模数比80年代有所增加,主要由于乌江流域的年降雨侵蚀力呈增加趋势。90年代三岔河流域和马蹄河/印江河流域的年均潜在土壤侵蚀模数最高,清水江流域的变化幅度最高,石阡河流域的年均潜在土壤侵蚀模数增加最多。

(3) 乌江流域土地利用/覆被与土壤侵蚀之间的关系与其他地区有所不同。林地的水土保持能力最高,耕地次之,草地相比最低,这与非喀斯特地区在水土保持效果上通常林地>草地>旱地的结论有所不同。这种差异是喀斯特地区土壤侵蚀的特殊性决定的,喀斯特地区土壤的存在与否及土层厚度是决定土壤侵蚀发生及强弱的关键。

(4) 构建BP神经网络,预测2001—2010年间乌江流域土壤侵蚀模数大幅降低。三岔河流域的水土流失得到了控制。乌江上游地区已不再是侵蚀产沙中心。黔西、金沙、息烽、修文、贵阳、平坝、思南、石阡、沿河和松桃等县市应是“十二五”期间的水土流失重点治理对象。

**致谢:**审稿专家及责任编辑杨艳对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

#### 参考文献(References):

- [1] 穆振侠. 天山西部山区分布式水文模型的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学硕士学位论文, 2007.  
Mu Zhenxia. Research on Distributed Hydrological Model in Western Tianshan Mountains[D]. Urumqi: Master Dissertation Xinjiang Agricultural University, 2007(in Chinese with English abstract).
- [2] 陈洋波, 任启伟, 徐会军, 等. 流溪河模型I原理与方法[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2010, 49(1): 108–112.  
Chen Yangbo, Ren Qiwei, Xu Huijun, et al. Liuxihe model I: Theory and methods[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2010, 49(1): 108–112(in Chinese with English abstract).

- [3] 贾仰文, 王浩, 王建华, 等. 黄河流域分布式水文模型开发和验证[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 300–308.  
Jia yangwen, Wang hao, Wang jianhua, et al. Development and verification of a distributed hydrologic model for the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(2): 300–308(in Chinese with English abstract).
- [4] 蔡强国, 刘纪根, 郑明国. 黄土丘陵沟壑区中大流域侵蚀产沙模型与尺度转换研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(4): 131–135.  
Cai Qiangguo, Liu Jigen, Zheng Mingguo. Sediment yield model and upscaling for medium and large watersheds in Hilly and Gully Region of the loess plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(4): 131–135(in Chinese with English abstract).
- [5] 贺祥. 喀斯特生态治理区的土壤侵蚀特征空间规律研究[D]. 贵州: 贵州师范大学硕士学位论文, 2007.  
He Xiang. Spatial Rule of the Soil Erosion for the Ecological Management of the Karst Regions[D]. Guizhou: Master Dissertation Guizhou Normal University, 2007(in Chinese with English abstract).
- [6] 孙旭波, 王红亚. 贵州鹅项水库沉积物特征及其土壤侵蚀的意义[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 769–778.  
Sun Xubo, Wang Hongya. Characteristics of sediments from E-xiang reservoir, Guizhou, and their implications for soil erosion[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(4): 769–778(in Chinese with English abstract).
- [7] 龙明忠. 喀斯特峡谷区生态治理的水土保持效应与土壤侵蚀模型[D]. 贵州: 贵州师范大学硕士学位论文, 2006.  
Long Mingzhong. Water, soil conservation effect and soil erosion models during the ecosystem rehabilitation of karst valleys[D]. Guizhou: Master Dissertation Guizhou Normal University, 2006(in Chinese with English abstract).
- [8] 杨广斌. 基于网格数据的喀斯特山区土壤侵蚀研究[D]. 贵州: 贵州师范大学硕士学位论文, 2004.  
Yang Guangbin. Study on Soil Erosion Based on Grid Data in Karst Mountainous Region[D]. Guizhou: Master Dissertation Guizhou Normal University, 2004(in Chinese with English abstract).
- [9] 彭建, 杨明德. 贵州花江喀斯特峡谷水土流失状态分析[J]. 山地学报, 2001, 19(6): 511–515.  
Peng Jian, Yang Mingde. On the present soil erosion situation of Huajiang karst gorge in Guizhou Province[J]. Journal of Mountain Science, 2001, 19(6): 511–515(in Chinese with English abstract).
- [10] Sarah S, Patrick S, Thorsten B, et al. Assessing the USLE crop and management factor c for soil erosion modeling in a large mountainous watershed in central China [J]. Journal of Earth Science, 2010, 21(6): 835–845.
- [11] Li Hui, Chen Xiaoling, Kyoung Jae Lim, et al. Assessment of soil erosion and sediment yield in Liao Watershed, Jiangxi Province, China, using USLE, GIS, and RS [J]. Journal of Earth Science,

- 2010, 21(6): 941–953.
- [12] Meng Lei, Feng Qiyang, Wu Kan, et al. Quantitative evaluation of soil erosion of land subsided by coal mining using RUSLE for the upper Malewa Catchment, Kenya[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22: 7–11.
- [13] Prasannakumar V, Vijith H, Abinod S, et al. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE) and geo-information technology[J]. Geoscience Frontiers, 2012, 3(2): 209–215.
- [14] Odongo V O, Onyando J O, Mutua B M, et al. Sensitivity analysis and calibration of the modified universal soil loss equation (MUSLE)[J]. International Journal of Sediment Research, 2013, 28(3): 368–383.
- [15] 曾凌云. 基于RUSLE模型的喀斯特地区土壤侵蚀研究——以贵州红枫湖流域为例[D]. 北京: 北京大学硕士论文, 2010.  
Zeng Lingyun. Study on Soil Erosion in Karst Area Based on RUSLE Model[D]. Beijing: Master Dissertation Peking University, 2010(in Chinese with English abstract).
- [16] 许月卿, 彭建. 贵州猫跳河流域土地利用变化及其对土壤侵蚀的影响[J]. 资源科学, 2008, 30(8): 1218–1225.  
Xue Yueqing, Peng Jian. Effects of simulated land use change on soil erosion in the Maotiao River watershed of Guizhou Province[J]. Resources Science, 2008, 30(8): 1218–1225(in Chinese with English abstract).
- [17] 周斌, 杨柏林, 洪业汤, 等. 基于GIS的岩溶地区水土流失遥感定量监测研究——以贵州省(原)安顺市为例[J]. 矿物学报, 2000, 20(1): 14–20.  
Zhou Bin, Yang Bolin, Yang Yetang. Study on quantitative remote sensing monitoring of soil erosion in karst areas based on GIS—As exemplified by Anshun City, Guizhou[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2000, 20(1): 14–20(in Chinese with English abstract).
- [18] 江民. 基于BP神经网络模型的渣场复垦坡面土壤侵蚀模拟研究[D]. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2012.  
Wang Min. Simulation Study of Soil Erosion Based on Back Propagation Neural Network on Dumping Pile on Reclamation Slope[D]. Chongqing: Master Dissertation Southwest University, 2012(in Chinese with English abstract).
- [19] 董婷婷, 左丽君, 张增祥. 基于ANN-CA模型的土壤侵蚀时空演化分析[J]. 地球信息科学, 2009, 11(1): 132–135.  
Dong Tingting, Zuo Lijun, Zhang Zengxiang. A Study on Spacetime Evolution of Soil Erosion Based on ANN-CA Model[J]. Journal of Geo-Information Science, 2009, 11(1): 132–135(in Chinese with English abstract).
- [20] 李传华, 潘竞虎. 基于神经网络和GeoCA的土壤侵蚀预测模拟——以庆城县水土保持世行二期贷款项目区为例[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 902–906.  
Li Chuanhua, Pan Jinghu. Soil erosion simulation and forecast based on ANN-GeoCA Model——A case study of loess plateau Qingcheng Project area[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(4): 902–906(in Chinese with English abstract).
- [21] 李玉环, 王静, 张继贤. 基于RUSLE水蚀模数演算与人工神经网络评价[J]. 应用生态学报, 2006, 17(6): 1019–1026.  
Li Yuhuan, Wang Jing, Zhang Jixian. Calculation of soil water erosion modulus based on RUSLE and its assessment under support of artificial neural network[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(6): 1019–1026(in Chinese with English abstract).
- [22] 蔡煜东, 许伟杰. 土壤侵蚀预报的自组织人工神经网络方法[J]. 农业网络信息, 1993, (4): 14–16.  
Cai Yudong, Xu Weijie. Self-organization artificial neural network modeling of soil erosion prediction[J]. Agricultural Network Information, 1993, (4): 14–16(in Chinese).
- [23] 王协康, 方铎. 土壤侵蚀产沙量的人工神经网络模拟[J]. 成都理工大学学报, 2000, 27(2): 197–201.  
Wang Xiekang, Fang Duo. Artificial neural network modeling of the soil erosion and sediment yield[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2000, 27(2): 197–201(in Chinese with English abstract).
- [24] 段军彪, 景旭, 上官周平. 基于遗传算法的BP网络在小流域侵蚀量预测中的应用[J]. 西北农业学报, 2008, 17(2): 317–320.  
Duan Junbiao, Jing Xu, Shanguan Zhouping. Application of predicting soil erosion in the small watershed based on BP network model by genetic algorithm[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2008, 17(2): 317–320(in Chinese with English abstract).
- [25] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Loess——A Guide to Conservation Planning, USDA, ARS[M]. Agricultural Handbook, Washington D C, 1987, 537.
- [26] Yu B, Rosewell C J A. Robust estimator of the R-factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transaction Society of Agriculture Engineers, 1996, 39: 559–561.
- [27] Yu B. Rainfall erosivity and its estimation for Australia's tropics[J]. Australian Journal of Soil Research, 1998, 36: 143–165.
- [28] Williams J R, Renard. EPIC—A new method for assessing erosion's effect on soil productivity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38: 381–383.
- [29] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19–24.  
Cai Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(2): 19–24(in Chinese with English abstract).
- [30] 许月卿, 邵晓梅. 基于GIS和RUSLE的土壤侵蚀量计算——以贵州省猫跳河流域为例[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(4): 67–71.

- Xue Yueqing, Shao Xiaomei. Estimation of soil erosion supported by GIS and RUSLE: A case study of Maotiaohe Watershed, Guizhou Province[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(4): 67–71(in Chinese with English abstract).
- [31] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. US Department of Agriculture, Agriculture Handbook NO.703, 1997, 404.
- [32] 万军, 蔡运龙, 路云阁, 等. 喀斯特地区土壤侵蚀风险评价——以贵州省关岭布依族苗族自治县为例[J]. 水土保持研究, 2003, 10(3): 149–153.
- Wan Jun, Cai Yunlong, Lu Yunge, et al. Soil erosion risk assessment in karst area—Case study in Guanling County of Guizhou Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(3): 149–153(in Chinese with English abstract).
- [33] 贵州省水利厅. 贵州省水土流失公告(一)[R]. 贵州, 2005. Department of Water Resources of Guizhou Province. The Proclamation of Soil and Water Loss in Guizhou Province(1)[R]. Guizhou, 2005(in Chinese).
- [34] 彭建. 喀斯特生态脆弱区土地利用/覆被变化研究——以贵州猫跳河流域为例[D]. 北京: 北京大学博士学位论文, 2006. Peng Jian. Land Use/Cover Change in Ecologically Fragile Karst Areas—A Case Study in Maotiaohe River Basin[D]. Beijing: PhD Dissertation Peking University, 2006(in Chinese with English abstract).

## Soil erosion simulation of the Wujiang River Basin in Guizhou Province Based on GIS, RUSLE and ANN

WANG Yao<sup>1</sup>, CAI Yun-long<sup>2</sup>, PAN Mao<sup>3</sup>

(1. Development Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China; 2. Center for Land Study, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The average annual soil erosion modulus in the 1980s and 1990s were calculated on a Geographical Information System (GIS) platform. The results coincide with previous soil erosion investigation conducted by Department of Water Resources of Guizhou Province. However, difference still exists because Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model does not include gravitational erosion. Potential soil erosion modulus in the 1990s was higher than that in the 1980s, which suggests an increase in potential soil erosion in the Wujiang River Basin. The Sancha River basin and the Mati River/Yinjiang River basin have the highest value of potential soil erosion modulus. Among the three main land cover types, forest land has the most soil retention, followed by farmland, with grassland having the least soil retention. This is different from things of the non-karst area where soil retention on grassland is better than that in farmland. The Back Propagation (BP) Neural Network model was used to calculate soil erosion modulus in the 2000s based on the data obtained in the 1980s and 1990s. The results suggest that the rate of soil erosion decreased from 23.13 t/(hm<sup>2</sup>·a) in the 1990s to 1.01 t/(hm<sup>2</sup>·a) in the 2000s, and the amount of soil erosion decreased from 115.18×10<sup>6</sup> t/a to 5.03×10<sup>6</sup> t/a. Soil erosion in the Sancha River basin is under control. However, counties or cities of Qianxi, Jinsha, Xifeng, Xiuwen, Guiyang, Pingban, Sinan, Shiqian, Yanhe and Songtao need strict soil management during the 12<sup>th</sup> Five-Year Plan period.

**Key words:** RUSLE; ANN; soil erosion; Wujiang River basin

**About the first author:** WANG Yao, female, born in 1979, doctor, associate professor, engages in the research on land science, hydrogeology, engineering geology and environmental geology; E-mail: wangyaopku@pku.edu.cn.

**About the corresponding author:** CAI Yun-long, male, born in 1948, doctor, professor, engages in the research on physical geography, land change science and geographical methodology; E-mail: caiyl@urban.pku.edu.cn.