

基于 GIS 的祖厉河流域土壤侵蚀治理模式模拟研究

焦金鱼¹, 贵立德²

(1. 定西师范高等专科学校地理系, 甘肃 定西 743000; 2. 甘肃兴德生态工程(集团)有限公司, 甘肃 定西 743000)

摘要: 借助 RS 图像信息提取技术, 对祖厉河流域遥感影像进行校正与信息提取。利用 GIS 栅格数据空间分析功能, 将研究区空间化为 30 m×30 m 的栅格单元。根据土壤流失方程 RUSLE 生成各因子栅格图, 借助 GIS 空间分析功能, 实现该区土壤侵蚀评估模拟。结果表明: 祖厉河流域 1995 年、2005 年、2015 年土壤侵蚀模数分别为 2 877, 3 372, 3 713 t/(km²·a); 从侵蚀量变化来看, 1995 年总土壤流失总量为 29 608 397 t/a, 2005 年总土壤流失总量为 34 694 588 t/a, 2015 年总土壤流失总量为 38 202 817 t/a, 年平均流失模数为 3 713 t/(km²·a)。从土壤侵蚀空间分布和侵蚀量变化来看, 研究区土壤侵蚀度呈现南北低、中部高; 河流深切区低, 高山林立区高的特点。针对研究区, 提出 4 种模拟治理并进行验证, 分析得出完全采取人工提升林区植被增长速度, 主要包括全力发展坡地退耕还林还草的高效治理模式是该区最佳治理模式, 可有效改善土壤流失状况, 使平均土壤流失模数降为 2 656 t/(km²·a)。

关键词: 土壤侵蚀; RS; GIS; RUSLE; 祖厉河流域

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2016)05-0095-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.016

Control Model of Soil Erosion in Zuli River Basin Using GIS Method

JIAO Jinyu¹, GUI Lide²

(1. Department of Geography, Dingxi Teachers' College, Dingxi, Gansu 743000;

2. Gansu Xingde Ecological Engineering Group Co., LTD., Dingxi, Gansu 743000)

Abstract: This study used quantitative remote sensing method, in combination with RUSLE model, and GIS software, utilizing a series of data such as digital elevation model (DEM), rainfall and soil properties, the characteristics of spatial-temporal differentiation of soil erosion of Zuli river basin from 1995 to 2015 was estimated. By analysis of the temporal variation of the erosion modulus, temporal variation of erosion intensity and spatial pattern of erosion intensity, the results of this research were summed as follows: The erosion modulus was 2 877.87 t/(km²·a) in 1995, 3 372.24 t/(km²·a) in 2005, and 3 713.23 t/(km²·a) in 2015, respectively, suggesting the increasing erosion rates. In the case of the spatial pattern of soil erosion, the erosion modulus was high value on the high side place in the middle of the study area and low value in the south and north. Besides, the soil erosion mounts was high on the side in the mountains and low near the river valley. Four types of simulation were proposed according to the characteristics of study area. The results showed that the efficient governance model (EGM) was the best governance model area, which could effectively control soil loss, the average modulus properties was 2 656 t/(km²·a).

Keywords: soil erosion; RS; GIS; RUSLE; Zuli river basin

土壤侵蚀是土地退化的主要因素。近年因不合理土地利用, 土壤侵蚀形势严峻, 祖厉河流域部分地区土地日益贫瘠, 生态环境呈恶化趋势^[1]。生态环境恶化又加剧了土壤侵蚀, 阻碍了祖厉河流域的经济可持续发展, 农民脱贫致富愈加困难^[2]。

全球学者自 19 世纪初就开始了土壤侵蚀研究^[3-5]。目前在国内外开发利用的经验统计模型主要有美国通用土壤流失方程 USLE、荷兰模型 LISEM、

修正通用土壤流失方程 RUSLE、水蚀预报模型 WEEP 等。国内研究以 USLE 为蓝本, 计算模型各参数值, 建立了许多具有地区性的土壤侵蚀预报模型。景可等^[3]建立了黄土高原地区多粗砂区侵蚀产沙模型; 王飞等^[4]以 GIS 和 RS 技术为基础, 改善了对区域土壤侵蚀定量评价的模型结构和参数的提取方法; 90 年代中后期, 周佩华等^[5]结合西部地区地理环境演变相关研究, 对黄土高原和长江上游未来 50

年的水土流失趋势进行了预测。另一方面,由于国际 GIS 与侵蚀模型的集成发展不断进步,一些国际流行的侵蚀过程模型开始初步逐渐应用于我国黄土高原地区^[6-9]。但多数模型均基于数学分析,无法对研究目标在空间上进行定量分析,且对分析结果少有定量模拟。本文运用 RS 技术和 GIS 的强大空间分析功能对祖厉河流域土壤侵蚀状况进行评估,对土壤流失进行研究定量分析和控制方案定量模拟,提出了未来防治策略,为祖厉河流域水土流失治理提供科学参考。

1 研究区域概况

祖厉河流域位于甘肃中部,地理位置处于 $104^{\circ}12' - 105^{\circ}33'E, 35^{\circ}18' - 36^{\circ}34'N$ 之间,流域面积约 $10\ 653\ km^2$,地跨甘肃省定西、白银、兰州三地(市)和宁夏固原地区,包括定西和会宁县的绝大部分地区及靖远、榆中、陇西、通渭、西吉和海原县的小部分地区^[1]。在地理上由于受贺兰山和祁连山加里东褶皱带的复合影响,地势倾斜趋向由南向北,海拔多位于 $1\ 500\sim2\ 000\ m$ 之间。最高峰在流域东北崛吴山的南沟大顶,海拔高度为 $2\ 858\ m$,最低点在祖厉河汇入黄河处,海拔高度为 $1\ 392\ m$ 。从地质发展历史上来看,祖厉河流域在第三纪末和第四纪初古地形的基

底上,经第四纪以来的多次侵蚀—堆积旋回和现代侵蚀作用,塑造了当今以塬、梁、峁为主要特点的黄土丘陵地貌形态,呈现出梁峁交错,沟壑纵横的景观^[2]。由于不合理的人类活动以及自然地貌发育的必然结果,祖厉河流域水土流失呈现不断加剧的趋势。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本次研究用到的数据主要包括 1995 年、2005 年、2015 年 3 期降水数据,分辨率为 $30\ m$ 的 DEM 数据、比例尺为 $1:100\ 万$ 的数字化空间数据与土壤剖面属性集成而建立起来的土壤数据库、3 个研究时段的 Landsat5/ETM 和 Landsat/OLI 影像、1995 年、2005 年、2015 年土地利用数据以及研究区的其它基础地理数据。其中 Landsat 系列的遥感影像数据和分辨率为 $30\ m$ 的 DEM 数据均来源于地理空间数据云平台(<http://www.giscloud.cn/>),比例尺为 $1:100\ 万$ 的土壤数据来源于中国科学院南京土壤研究所(<http://www.issas.ac.cn/>)1995 年、2005 年、2015 年的 3 期降雨量数据均来源于中国气象共享网(<http://www.escience.gov.cn/metdata/page/index.html>)。具体数据源如表 1 所示。

表 1 数据来源

年份(年)	数据名称	数据精度	数据来源
1995,2005,2015	降雨量数据	12 气象台站	中国气象共享网平台
1995,2005,2015	1:100 万土壤数据	1:100 万	中国科学院
1995,2005,2015	GDEM30 m 数据	空间分辨率 $30\ m$	地理空间数据云平台
1995,2005,2015	遥感影像数据	多光谱:空间分辨率 $30\ m$	地理空间数据云平台
1995,2005,2015	土地利用类型数据	$30\ m$	寒区旱区数据中心
2000 年以后	基础地理信息数据	乡级	寒区旱区数据中心

2.2 研究方法

2.2.1 土壤流失计算模型 Wischmeier 和 Smith^[10]于 1965 年通过大量小区观测资料和人工模拟降雨实验资料建立通用的土壤流失方程 USLE 模型,该模型广泛运用在美国和其他国家的侵蚀预测和水土保持规划等方面,但他们建立的 USLE 模型只考虑了降雨侵蚀力因子,并没有考虑与土壤侵蚀密切相关的因子^[11]。美国农业部农业研究局(USDA-ARS)为了解决这一弊端,在 USLE 模型的基础上做了改进,于 1992 年首次提出修正后的土壤侵蚀分析模型——RUSLE 模型,并于 1997 年正式决定采用,其基本原理如下:

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

式中: A 为年土壤侵蚀模数($t/(km^2 \cdot a)$); K 为土壤可蚀性因子($t \cdot km^2 \cdot h/(MJ \cdot mm \cdot km^2)$); R 为降雨侵蚀力因子($MJ \cdot mm/(km^2 \cdot h \cdot a)$); C 为植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子; L 、 S 分别为坡长、坡度因子。本文以 1995 年、2005 年、2015 年

3 期降雨量数据、土壤数据、GDEM 数据、遥感影像数据为基础。通过计算和分析,提取出影响土壤侵蚀强度的各因子,应用 RUSLE 模型测度研究区域土壤侵蚀强度及等级。

2.3 土壤流失方程各因子的提取

2.3.1 地形因子 LS 提取 根据研究特点来看,研究区地形地貌对土壤侵蚀的影响主要包括坡度(S)和坡长(L)两个因子(图 1)。本研究利用 DEM 数据,以 GIS 空间分析为技术手段(Surface Analysis)进行地形特征分析,提取坡度坡长数据。坡度坡长因子的计算公式如下:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{72.6} \right)^M (65.41 \sin^2 \beta + 4.65 \sin \beta + 0.065) \quad (2)$$

式中: λ 为坡长; M 为随坡度变化的量; β 为坡度^[11]。当 $\beta \geq 2.86^{\circ}$ 时, $M=0.5$; 当 $1.72^{\circ} \leq \beta < 2.86^{\circ}$ 时, $M=0.4$; 当 $0.57^{\circ} \leq \beta < 1.72^{\circ}$ 时, $M=0.3$; 当 $\beta < 0.57^{\circ}$ 时, $M=0.2$ 。

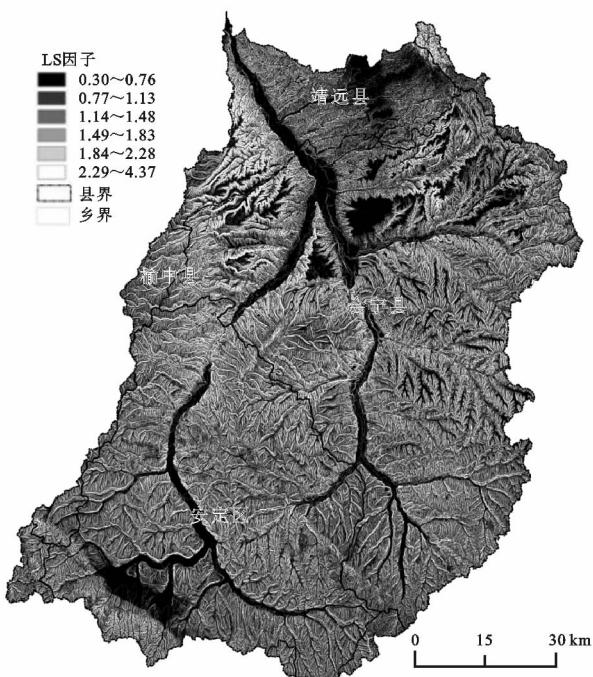


图 1 祖厉河流域 LS 因子分布

2.3.2 降雨侵蚀力因子 R 估算 降雨侵蚀力 R (Rainfall Erosivity) 是进行土壤侵蚀预报的重要因子^[12]。本文选用 Wischmeier 模型^[13]计算 2001—2010 年的逐年降雨侵蚀力,其公式为:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{[(1.5 \times \lg \frac{p_i^2}{p})]^{0.8188}} \quad (3)$$

式中: p_i 为月平均降雨量 (mm); p 为年平均降雨量 (mm)。依据模型计算和相关参考文献^[1-2], 得到 1995 年、2005 年、2015 年降雨侵蚀力因子值分别为 400.379, 437.547, 503.742 ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{km}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$)。

2.3.3 土壤可蚀性因子 K 估算 土壤可蚀性因子 K 不仅体现出土壤对侵蚀介质剥蚀和搬运(即雨滴击溅或地表径流等)的敏感程度,同时也体现了土壤抵抗侵蚀的能力与降雨、径流、渗透作用间的相关关系^[13]。根据研究特点,本研究选用侵蚀/生产力影响模型 EPIC^[14]:

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 \text{SAN}(1 - \frac{\text{SIL}}{100})]\} \times \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \times \left(1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \times \left(1.0 - \frac{0.7SN}{SN + \exp(22.9SN - 5.51)} \right) \quad (4)$$

式中: SAN 为砂粒含量 (%); SIL 为粉砂含量 (%); CLA 为粘粒含量 (%); C 为有机碳的含量 (%); SN = 1 - SAN/100。本研究通过 1:100 万的土壤数据库, 提取表层土壤的 SAN、SIL、CLA 和 C 字段, 计算出项目区的 K 因子值为 $0.49 \text{ t} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{km}^2)$ 。

2.3.4 植被覆盖度与管理因子 C 估算 为表示植

被覆盖对水土流失的抑制程度的同时,也体现植被覆盖对保持水土的作用,因此选用植被覆盖与管理因子 (C), 其取值范围为 $0 \sim 1$ ^[15]。计算 C 因子值与植被覆盖度之间的回归方程有很多,根据研究特点本文选用蔡崇法^[16]计算 C 值,其公式如下:

$$\begin{cases} C=1 & c=0 \\ C=0.6508-0.3436lgc & 0 < c \leq 78.3\% \\ C=0 & c > 78.3\% \end{cases} \quad (5)$$

式中: c 为植被覆盖度 (%). 计算植被覆盖度,需要计算研究区范围内的 NDVI 值,并提取最大和最小 NDVI 值,从而计算出研究区范围内的植被覆盖度。植被覆盖度的计算公式如下

$$c = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_0}{\text{NDVI}_g - \text{NDVI}_0} \quad (6)$$

$$\text{Landsat5 和 Landsat7: NDVI} = \frac{b4 - b3}{b4 + b3} \quad (7)$$

$$\text{Landsat8: NDVI} = \frac{b5 - b4}{b5 + b4} \quad (8)$$

式中: NDVI_0 为无植被或裸土覆盖地区像元的 NDVI 值; NDVI_g 为所有被植被覆盖地区像元的 NDVI 值; b 为卫星波段。

同时根据计算得到的 C 因子分布(图 2)以及研究区土地利用类型图将 C 因子值赋予相应的土地利用类型。计算得到林地 C 因子值为 0.007, 草地 C 因子值为 0.05, 建设用地 C 因子值为 0.4, 水域 C 因子值为 0.18。

2.3.5 水土保持措施因子 P 估算 将无侵蚀区用 0 表示,未采取任何水土保持措施的区域用 1 表示。本研究采用坡度权重对 P 因子进行分级赋值的方法^[17] 不同土地利用类型下的 P 因子值详见表 2, P 因子分布见图 3。

2.3.6 模型的运算 利用 GIS 中的相关技术,形成研究区土壤侵蚀量等级分布步骤如下:第一,将各网格的因子值相乘,计算每个栅格的土壤侵蚀量;第二,根据土壤侵蚀分类标准对其结果进行重分类(Reclassify),形成土壤侵蚀量图;第三,参考中国土壤侵蚀强度等级划分标准,形成研究区土壤侵蚀量等级图。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀时间变化特征

从侵蚀面积来看(表 3 和图 4),1995 年土壤侵蚀中度及以上所占面积为 3788 km^2 , 占流域总面积的 36%, 而微度侵蚀面积占 26%。到 2005 年其中度及以上侵蚀面积增加到 4448 km^2 , 占流域总面积的 43%, 比 1995 年净增 660 km^2 。2015 年中度及以上侵蚀面积为 4812 km^2 , 占流域总面积的 46%, 比 2005 年增加 364 km^2 , 比 1995 年增加了 1024 km^2 。可见,流域 20 年来土壤侵蚀面积不断扩大,中度以上

侵蚀面积 20 年间年均增长近 51 km^2 , 占研究区总面积将近 0.5%; 强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀面积均逐年上升, 表明流域总侵蚀面积不断上升同时, 较为严重侵蚀的面积也在逐年加剧。从侵蚀量来看, 1995 年侵蚀总量为 $29\ 608\ 397 \text{ t/a}$, 年均侵蚀模数为 $2\ 877 \text{ t/(km}^2 \cdot \text{a)}$

($\text{km}^2 \cdot \text{a}$), 2005 年侵蚀总量增加到 $34\ 694\ 588 \text{ t/a}$, 年均侵蚀模数为 $3\ 372 \text{ t/(\text{km}^2 \cdot \text{a})}$, 2015 年侵蚀总量进一步增加为 $38\ 202\ 817 \text{ t/a}$, 年均侵蚀模数也增加到 $3\ 713 \text{ t/(\text{km}^2 \cdot \text{a})}$, 根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007)来看, 属于中度侵蚀。

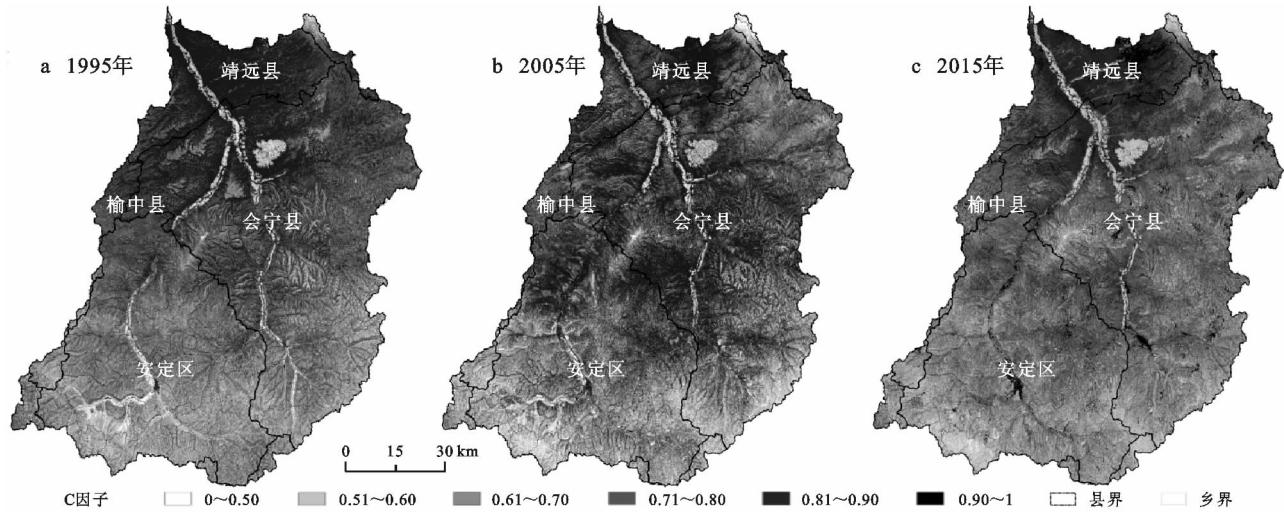


图 2 祖厉河流域 C 因子分布(a:1995 年;b:2005 年;c:2015 年)

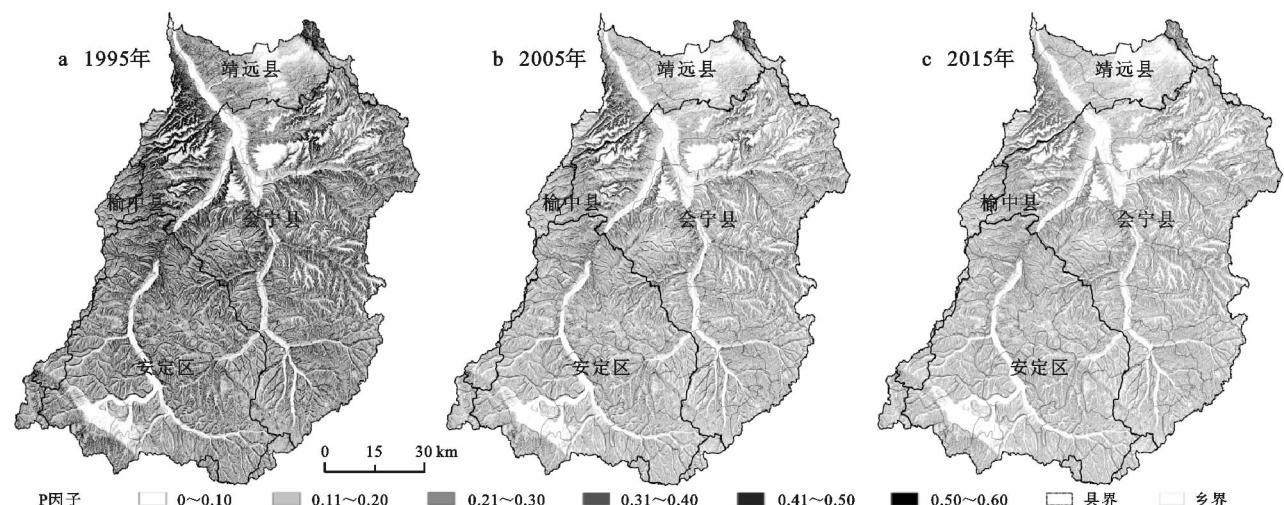


图 3 祖厉河流域 P 因子分布(a:1995 年;b:2005 年;c:2015 年)

表 2 不同土地利用类型下的 P 因子值

坡度/ (°)	等高带状 耕作	草田带状 耕作	水平 梯田	水平沟	等高沟垄 种植	等高 垄作
≤5	0.3	0.1	0.02	0.01	0.3	0.1
5~10	0.5	0.1	0.03	0.05	0.4	0.1
≥10	0.6	0.2	0.09	0.1	0.7	0.3

3.2 土壤侵蚀空间变化特征

从流域土壤侵蚀强度空间特征来看(图 5), 极强烈侵蚀区和剧烈侵蚀区主要分布在会宁县西北部的新庄乡、头寨子镇、东北部草滩乡、土高山乡, 还有定西市安定区的北部白录乡、鲁家镇沟、东北部石峡湾乡、新集乡以及靖远县的西南部若笠乡, 东北部等广大区域, 这些地区植被覆盖较低, 瞬时雨强大, 生态脆弱, 因此其侵蚀强度不断增加。相比极强烈和剧烈侵蚀区, 轻度和微度侵蚀区主要分布在靖远县东北部的

高湾乡以及会宁县北部大部分地区, 涉及郭城驿镇、白草原乡、河畔镇及刘家寨子乡等地。此外, 安定区南部的内官营镇、团结镇及香泉镇其侵蚀程度也较低。通过统计不同县区的侵蚀量发现, 1995—2005 年会宁县年平均土壤侵蚀量增加了 $2\ 546\ 509 \text{ t}$, 安定区增加了 $1\ 732\ 883 \text{ t}$, 靖远县增加了 $534\ 843 \text{ t}$, 榆中县增加了 $138\ 922 \text{ t}$, 临洮县增加了 $46\ 430 \text{ t}$, 通渭县增加了 $31\ 267 \text{ t}$, 平川区增加了 $42\ 523 \text{ t}$, 陇西县增加了 $12\ 470 \text{ t}$ 。从 1995—2015 年 20 年间会宁县年平均

土壤侵蚀量增加了4302930 t,安定区增加了2928117 t,靖远县增加了903744 t,榆中县增加了234741 t,临洮县增加了78454 t,通渭县增加了31267 t,平川区增加了71853 t,陇西县增加了21071 t。从土壤侵蚀空间变化来看,研究区土壤侵蚀度呈现南北低、中部高,河流深切区低,高山林立区高的特点。

祖厉河流域的土壤主要类型为黑垆土、灰钙土和黄绵土3种,南部主要以黑垆土为主,北部则以灰钙土为主,土壤类型由南向北呈过渡特点^[2-4]。而从流域的主要植被类别类型看,其主要为针茅、冰草、蒿类等群落。因此该区土质松软,缺乏水分,加之植被根系不发达,生命最弱。将模型计算数据结果与甘肃省土壤普查办公

室提供的实测数据^[18]以及祖厉河流域年鉴及流域相关研究成果^[19]计算的结果进行了精度对比与验证,侵蚀模数的精度均在90%以上,侵蚀面积的精度为85%。

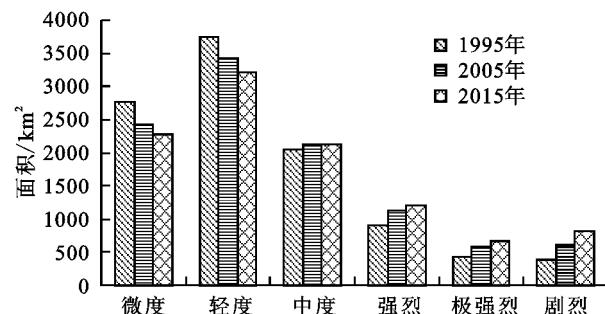


图4 祖厉河流域1995—2015年土壤侵蚀等级统计值

表3 祖厉河流域1995—2015年土壤侵蚀面积

侵蚀等级	侵蚀模数/ $(t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1})$	1995年			2005年			2015年		
		面积/ km^2	面积比/ %	侵蚀量/ $(t \cdot a^{-1})$	面积/ km^2	面积比/ %	侵蚀量/ $(t \cdot a^{-1})$	面积/ km^2	面积比/ %	侵蚀量/ $(t \cdot a^{-1})$
微度	<1000	2759.89	26.83	7942612.00	2417.08	23.49	8150982.43	2268.24	22.05	8422512.73
轻度	1000~3000	3740.18	36.35	10763774.88	3422.79	33.27	11541777.50	3207.69	31.18	11910900.83
中度	3000~5000	2055.35	19.98	5915046.24	2126.01	20.66	7169417.24	2120.10	20.61	7872427.84
强烈	5000~7000	914.07	8.88	2630568.82	1137.34	11.05	3836050.84	1205.16	11.71	4475049.94
极强烈	7000~9000	433.06	4.21	1246279.34	573.18	5.57	1932916.75	666.09	6.47	2473340.09
剧烈	>9000	385.74	3.75	1110115.95	611.89	5.95	2063443.89	821.01	7.98	3048586.21
合计		10288.29	100.00	29608397.23	10288.29	100.00	34694588.64	10288.29	100.00	38202817.65

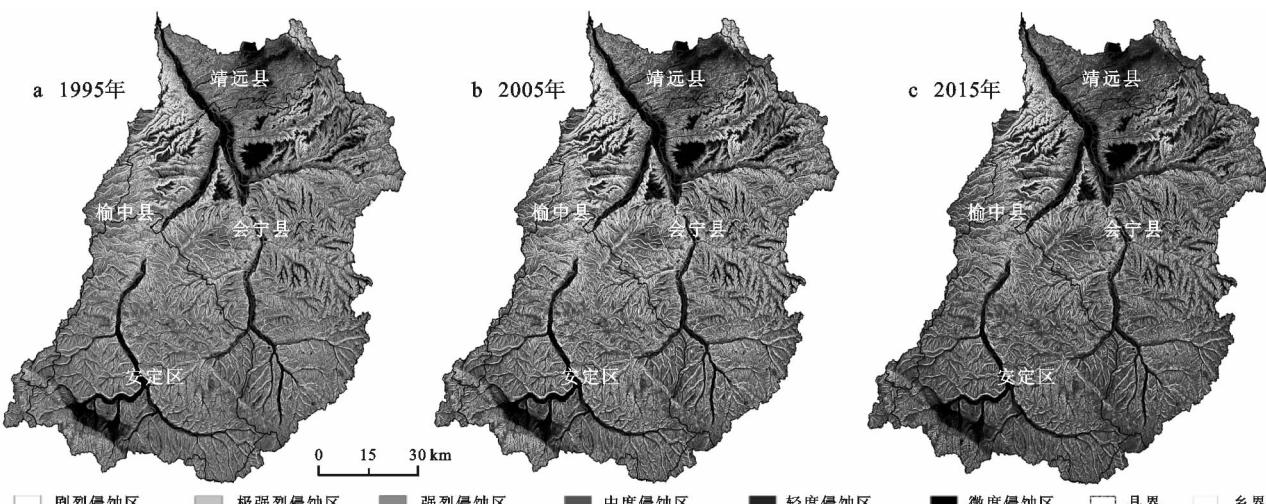


图5 土壤侵蚀结果空间分布(a:1995年;b:2005年;c:2015年)

4 土壤侵蚀模拟治理模式

4.1 原理与方法

根据祖厉河流域的自然条件与发展特点以及土壤侵蚀现状,结合模型的方程参数本次研究拟采用下列模式进行模拟研究:(a)高效治理模式(Efficient governance model)完全采取人工造林提升林区植被增长速度,主要包括全力发展坡地退耕还林还草,最大化治理土壤侵蚀。(b)稳步推进模式(Steady impel model)针对祖厉河流域具体的生态环境,有计划地增加该区植被覆盖面积,稳步推进坡地还林还草,加速治理土壤侵蚀。(c)逐步改善模式(Gradually improving model)针对

祖厉河流域的土地利用现状,科学调整农用地、林地、建设用地结构,进行坡地治理,使生态环境与经济发展相协调。(d)自然发展模式(Natural development model)对祖厉河流域的土地利用情况和自然环境情况保持现状,不进行人为干扰,使其自行发展。

可将R、K因子视为常数应用于方程中,因此在模拟研究中主要分析C、P因子。通过对祖厉河流域地貌发育、地质构造等资料的分析和研究,该研究区处于流域地貌发育阶段的早期。地表切割和河流深切侵蚀使祖厉河流域呈支离破碎、千沟万壑的景观^[4]。祖厉河流域目前水土流失严重,土壤侵蚀是地貌自然演化的必然途径,这一过程中自然规律处于相

对主导地位,人类活动次之^[12-15],但人为扰动加速了该区的土壤侵蚀强度。本研究对土壤流失较为严重的关键源区进行重点治理,该措施对水土流失的加剧

具有抑制作用。在对C、P因子值通过4种模式下不同土地利用类型比较,对各取值作了调整,最后得到较为理想的治理模式模拟值(表4)。

表4 研究区不同治理模式C、P模拟值

土地利用 类型	面积/km ²	面积比/%	C因子				P因子			
			a	b	c	d	a	b	c	d
林地	265.58	2.58	0.004	0.006	0.006	0.007	1	1	1	1
草地	3812.04	37.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.4	0.5	0.5	0.7
旱地	5940.11	57.68	0.2	0.3	0.35	0.4	0.02	0.03	0.09	0.09
建设用地	122.75	1.19	0.23	0.3	0.37	0.4	1	1	1	1
水域	2.23	0.02	0.12	0.15	0.16	0.18	0.9	0.9	0.9	0.9
未利用地	155.55	1.51	0.57	0.66	0.74	0.86	0.5	0.5	0.5	0.5

4.2 4种治理模式的模拟结果分析

对4种治理结果进行计算后发现(表5),高效治理模式平均土壤流失模数为2656 t/(km²·a),其微度流失面积最大,为2930 km²,占到流失总面积的28%,剧烈流失面积最小,仅有283 km²,占流失总面积的3%,其它流失面积为7074 km²,面积占总流失面积的68%;稳步推进模式平均土壤流失模数为295 t/(km²·a),微度流失较极速治理型有所减少,为2691 km²,占到了流失总面积的26%,而剧烈有所增加,面积达到414 km²,占到了流失总面积的4%;逐步改善模式平均土壤流失模数为3541 t/(km²·a),微度流失面积为2349 km²,占到流失总面积的22%,剧烈流失面积也最小,占流失总面积的7%,其它流失类型土壤流失面积占总流失面积的70%;自然发展模式平均土壤流失模数为3713 t/(km²·a),微度流失面积为2268 km²占到流失总面积的22%,剧烈流失面积为820 km²,占流失总面积的8%,其它流失类型土壤流失面积占总流失面积的70%。从结

果来看(图6),高效治理模式效果最好,其流失模数最小,微度流失面积最大,剧烈面积最小;稳步推进和逐步改善模式次之;自然发展模式效果最差,其流失模数最大,微度流失面积最小,剧烈面积最大。

表5 4种治理模式的模拟结果

模式	流失等级	微度	轻度	中度	强烈
	像元数/个	3256263	4391343	2125693	937136
	面积/km ²	2930.64	3952.21	1913.12	843.42
a	百分比/%	28.49	38.42	18.6	8.2
	像元数/个	2990213	4111783	2322125	1047051
b	面积/km ²	2691.19	3700.6	2089.91	942.35
	百分比/%	26.16	35.97	20.31	9.16
	像元数/个	2610298	3682088	2345598	1298886
c	面积/km ²	2349.27	3313.88	2111.04	1169
	百分比/%	22.83	32.21	20.52	11.36
	像元数/个	2520270	3564101	2355668	1339070
d	面积/km ²	2268.24	3207.69	2120.1	1205.16
	百分比/%	22.05	31.18	20.61	11.71

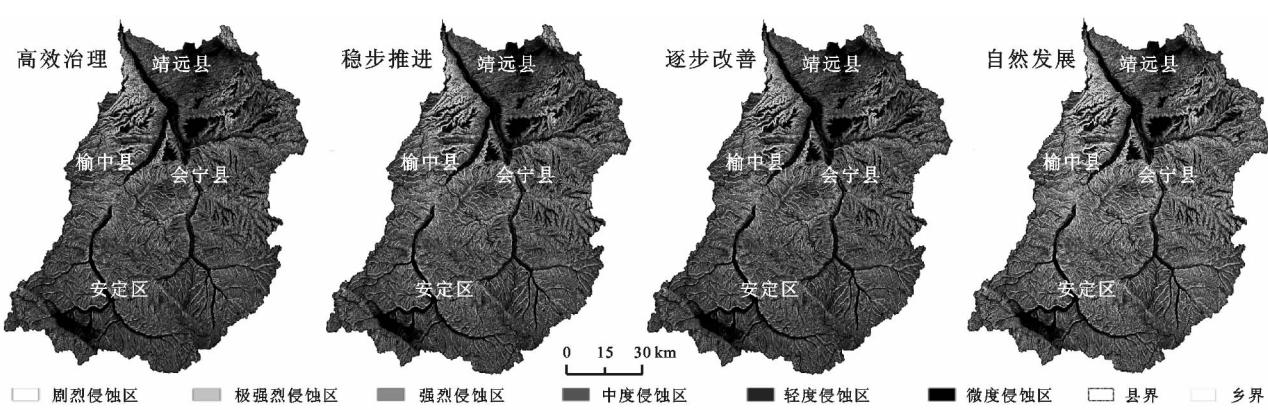


图6 祖厉河流域不同治理模式的模拟结果(a:高效治理模式;b:稳步推进模式;c:逐步改善模式;d:自然发展模式)

4.3 4种模式的模拟结果变化分析

经过以上模型计算分析发现(表6),4种模式下不同等级土壤流失面积有较大差异,以自然发展型为参考模型,对比发现,高效治理模型微度与轻度流失面积有所增加,其它等级流失面积大幅度减少,减少的面积为1406 km²,占变化面积的50%。稳步推进型模型微度与轻度流失面积也有所增加,其它等级流

失面积大幅度减少,减少的面积为187 km²,占变化面积的50%。以上2种模式效果均比较明显,有效改善了研究区的土壤侵蚀程度。逐步改善模式的微度与轻度流失面积增加较大,其它等级流失面积有所减少,减少的面积为916 km²,占变化面积的50%。对比其余2种模型,其改善程度明显较弱。

以上结果主要是由于在模拟过程中高效与稳定

治理模式人为对林地草地进行干预,同时在坡地实行全面退耕还林还草,因此植被得到极大保护。而逐步改善模式则是逐步进行调整,有选择性地加强植被覆盖度,因此治理效果不太明显。

表6 不同治理模式的模拟变化分析

模式	流失等级	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
a	像元数/个	735993.00	827242.00	-229975.00	-401934.00	-333683.00	-597643.00
	面积/ hm^2	662.39	744.52	-206.98	-361.74	-300.41	-537.78
	百分比%	23.54	26.46	-7.36	-12.86	-10.68	-19.11
b	像元数/个	469943	547682	-33543	-292019	-240542	-451521
	面积/ km^2	422.94	492.91	-30.18	-262.81	-216.58	-406.27
	百分比%	23.09	26.91	-1.65	-14.35	-11.82	-22.18
c	像元数/个	90028	117987	-10070	-40184	-49856	-107905
	面积/ km^2	81.02	106.18	-9.06	-36.16	-44.96	-97.01
	百分比%	21.64	28.36	-2.42	-9.66	-12.01	-25.91
d	像元数/个	0	0	0	0	0	0
	面积/ km^2	0	0	0	0	0	0
	百分比%	-	-	-	-	-	-

4.4 不同治理模式的模拟结果综合评价

4种模式模拟结果的多目标综合评价表明,优化顺序为高效治理模式、稳步推进模式、逐步改善模式、自然发展模式。这是因为自然发展型导致后期生态环境恶化,潜在危害大,土壤流失等因素具有滞后效应,治理的近期效益不明显;逐步改善模式仅能保持循序渐近的总体效益,传统经营对环境的影响近期亦不显著;稳步推进模式有显著的社会经济与环境效益,对土壤保持快速可持续利用起到积极效果;高效治理模式则全面支持环境效益的维护。所以,高效治理模式是研究区生态可持续发展的最优模式。

综合4种治理模式分析发现(图7),高效治理模式下微度面积迅速增大,剧烈流失面积减少,轻度有较为明显的下降趋势。对高效治理型而言,随着各种人为干扰措施,中度、强烈、极强烈、剧烈流失面积向低一层次转换,最后逐渐趋于稳定状态,这与综合分析结果基本吻合。

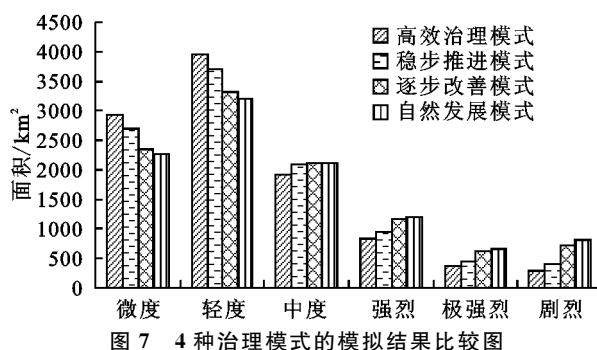


图7 4种治理模式的模拟结果比较图

5 结论

(1)祖厉河流域土壤侵蚀量不断增大,1995年、2005年、2015年土壤侵蚀模数分别为2 877, 3 372, 3 713 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;从侵蚀量变化来看,1995年总土壤流失总量为29 608 397 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 2005年总土壤流失总量为34 694 588 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 2015年总土壤流失总量为38 202 817 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 年平均流失

改善模式则是逐步进行调整,有选择性地加强植被覆盖度,因此治理效果不太明显。

模数为3 713 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

(2)从土壤侵蚀时空变化来看,土壤侵蚀最严重的区域主要分布在会宁县西部、靖远县南部及安定区北部地区;相比而言,会宁县东北部、靖远县东南部土壤侵蚀程度较低。总体来看,流域土壤侵蚀度呈现南北低、中部高;河流深切区低,高山林立区高的特点。

(3)在祖厉河流域内R、K因子相同的情况下,主要由C因子和LS因子决定其土壤侵蚀程度,由此得出治理该区土壤侵蚀应将重点放在C、LS因子的宏观调控上。依照该区现实情况,提出4模拟治理并进行验证,经模拟分析得出高效治理模式是该区最佳治理模式,可有效改善土壤流失状况,使平均土壤侵蚀模数降为2 656 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。经模拟研究,实施退耕还林可将C值减少至0.004,减少土壤流失10%以上;实施坡改梯可将P值减少至0.02,减少土壤流失20%以上。

(4)祖厉河流域土壤侵蚀程度现阶段处于中度向强烈转化。分析变化原因,主要是其本身自然地理因素影响,其次是人类土地不合理利用以及土壤侵蚀治理措施的缺失。现代社会经济发展与环境发展是一种相互制约相互促进的关系,人类不同程度的不合理利用土地,加剧了祖厉河流域的土壤侵蚀,使该区生态环境恶化。而实施高效治理模式可使土壤侵蚀程度降到最低,是祖厉河流域进行生态可持续发展,土壤逐步改善的最佳模式。

参考文献:

- [1] 张小文.遥感和GIS辅助下的祖厉河流域土壤侵蚀空间变化分析[J].遥感技术与应用,2009,24(6):772-776.
- [2] 赵传燕,冯兆东,南忠仁,等.黄土高原祖厉河流域潜在植被分布模拟研究[J].地理学报,2007,62(1):52-61.
- [3] 景可,焦菊英.黄土丘陵沟壑区水土流失治理模式、治理成本及效益分析:以米脂县高西沟流域为例[J].中国水土保持科学,2009,7(4):20-25,43.

(下转第123页)