

基于 GIS 与 RUSLE 的榆林市土壤侵蚀空间分布研究

李奎¹, 岳大鹏¹, 刘鹏¹, 易浪¹

(陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

摘要: 利用 3S 技术, 采用美国通用的水土流失方程(RUSLE), 对榆林市 2001 和 2010 年的土壤侵蚀状况及其空间分布特征进行了计算分析。结果表明, 榆林市 2001 年平均土壤侵蚀模数为 4 411 t/(km² · a), 年均侵蚀总量为 1.93×10⁸ t; 2010 年的平均土壤侵蚀模数为 6 237 t/(km² · a), 年均侵蚀总量为 2.72×10⁸ t。2001—2010 年榆林市各区县的土壤侵蚀变化状况有着明显的空间差异, 府谷、神木、榆阳、横山、靖边、佳县和子洲 7 个区县的土壤侵蚀类型发生了由中强度向高强度侵蚀的转化, 土壤状况不断恶化。而定边、米脂、吴堡、绥德和清涧 5 县的土壤侵蚀类型由高强度向低强度侵蚀转变, 水土流失状况得到有效遏制。

关键词: RUSLE; 土壤侵蚀; 空间分布; 榆林市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2014)06-0172-07

中图分类号: S157.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.039

Spatial Distribution of Soil Erosion Analyzed Based on GIS and RUSLE in Yulin City

LI Kui, YUE Da-peng, LIU Peng, YI Lang

(College of Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

Abstract: Based on the technologies of 3S(RS, GPS and GIS) and universal soil loss equation(RUSLE), soil erosion and its spatial distribution in Yulin City in 2001 and 2010 was calculated and analyzed. The results showed that mean soil erosion rate was 4 411 t/(km² · a) and annual average sediment yield was 1.93×10⁸ t in Yulin City in 2001, mean soil erosion rate was 6 237 t/(km² · a) and annual average sediment yield was 2.72×10⁸ t in 2010. During the period from 2001 to 2010, there was an obvious spatial difference between various regions in the soil erosion change, the soil erosion intensity changed from medium to high in Fugu, Shenmu, Yuyang, Hengshan, Jingbian, Jiaxian and Zizhou County(District), which indicated that soil condition deteriorated continuously. While, the soil erosion intensity changed from high to low in Dingbian, Mizhi, Wubu, Suide and Qingjian Counties, showing soil and water loss was effectively controlled.

Keywords: RUSLE; soil erosion; spatial distribution; Yulin City

土壤侵蚀是导致土地资源和土壤质量退化, 威胁生态安全的主要因素之一, 土壤侵蚀不仅影响侵蚀区的土地利用变化, 同样对侵蚀区外的相关区域产生重要影响^[1-3]。众多研究^[4]表明, 土壤侵蚀是自然和人为因素共同作用的结果, 并且在较短的时期内, 人类活动对区域土壤侵蚀起着重要的作用。在黄土高原地区, 土壤侵蚀的危害尤为明显^[5], 该地区是我国典型的水土流失区和生态脆弱区, 水土流失的治理研究一直受到国内外学者的关注。近 10 a 来地处于黄土高原北部的榆林市土地利用状况发生了巨大的变化。通过选取榆林市进行土壤侵蚀对该区土地利用变化

的响应研究, 对于区域土地利用结构的调整过程中水土保持的理论探索和实践具有一定的指导意义。与传统的土壤侵蚀调查方法相比, 利用 3S 技术进行各类地理信息的搜集与分析, 以及进行地理过程的模拟, 在很大程度上降低了工作量, 提高了工作效率, 并且提高了准确性和科学性。美国通用水土流失方程(RUSLE)的成功应用为 3S 技术进行土壤流失估算提供了可行的思路^[6-7]。该方程是通过大量的土壤侵蚀试验和定量观测数据, 在此基础上不断完善而形成的经验坡面土壤侵蚀预报模型, 许多学者应用该模型对土壤侵蚀做了大量的研究^[7-21]。本研究在 3S 技术

收稿日期: 2013-10-31

修回日期: 2013-12-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“陕北黄土高原典型小流域近 500 年来产沙量变化研究”(41071012); 陕西省水土流失补偿费项目

作者简介: 李奎(1986—), 男(汉族), 云南省玉溪市华宁县人, 硕士研究生, 研究方向为水土资源评价与规划。E-mail: likuic@163.com。

通信作者: 岳大鹏(1964—), 男(汉族), 陕西省兴平市人, 博士, 教授, 主要从事自然地理、土地利用、水土保持研究。E-mail: yuedp@snnu.edu.cn。

的支持下,利用 RUSLE 模型对黄土高原北部的榆林市进行土壤侵蚀强度的定量研究分析,探讨区域土壤侵蚀的总体变化趋势和空间分布规律,为榆林市水土流失治理提供有效的依据,同时针对性的提出了水土流失的控制措施。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

榆林市位于陕西省的最北部,属于干旱半干旱地区,介于东经 $107^{\circ}28'$ — $111^{\circ}15'$,北纬 $36^{\circ}57'$ — $39^{\circ}34'$ 之间,总土地面积为 $43\,578\text{ km}^2$,占陕西省土地总面积的 21.17%。地貌大致可分为 3 类:风沙草滩区、黄土丘陵沟壑区和梁状低山丘陵区。大体上以长城为界,北部为大漠风沙草滩区,南部为黄土高原丘陵沟壑区,西南部为梁状低山丘陵区。气候属于暖温带和温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温约为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,自南向北、自东向西逐渐的降低,年平均降水量在 400 mm 左右,降水由东南向西北逐渐递减,年内分布极其不均匀,降雨主要集中在 7—9 月份。榆林市矿产资源十分丰富,是我国煤炭、石油、天然气以及岩盐等资源的高度富集区域,是我国 21 世纪重点开发的能源基地。榆林市辖 1 区 11 县 222 个乡镇,总人口为 353.41 万。

1.2 数据来源

土壤类型数据和土地类型数据均来自于中国科学院西部环境与生态科学数据中心 1:100 万土壤数据集,其中土壤类型数据的分类由南京土壤研究所完成^[8]。NDVI 数据采用 SPOT VEGETATION 数据集的旬值数据,数据来自于比利时的弗莱芒技术研究所(Flemish Institute for Technological Research, Vito)VEGETATION 影像处理中心(Vegetation Processing Centre, CTIV)负责预处理成的逐日 1 km 全球数据,其中预处理包括大气校正、几何校正和辐射校正,生产 10 d 最大化合成的 NDVI 数据。气象数据来源于国家气象局气候数据共享网,选取 2001 和 2010 年榆林市及周边完整且均匀分布的 9 个气象站点的旬值降水量数据,DEM 数据选取自中国科学院国际科学数据服务平台 ASTER GDEM30 m 分辨率产品。其他相关统计数据来源于相关年份的《榆林市统计年鉴》。

1.3 研究方法

采用目前广泛应用的改进通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)来计算,该模型是建立在土壤侵蚀理论和大量实地观测数据的统计分析基础之上,其计算公式为^[6-7,20-21]:

$$A=f \cdot R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

式中: A ——单位时间和面积上的土壤侵蚀量 [$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; f ——单位转换系数(224.2); R ——降雨及径流因子 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; K ——土壤侵蚀性因子 [$\text{t} \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm})$]; L ——坡长因子; S ——坡度因子; C ——地表植被覆盖因子; P ——土壤保持措施因子。各因子统一为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 大小的栅格单元,利用 ArcGIS 的空间分析功能计算并分析。

1.3.1 降雨侵蚀力因子 R 降雨及径流因子 R 指由降水引起的潜在侵蚀能力,它是导致土壤流失最为重要的因子,国内外众多研究学者提出了关于 R 值的简易计算公式^[9]。本研究采用比较适合黄土高原地区且较广泛应用的 Wischmeier 等提出的经验公式^[10]:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (1.735 \times 10^{1.5 \times \lg \frac{P_i^2}{P} - 0.8088})$$

式中: P_i ——第 i 个月的降水量(mm); P ——年降水量(mm)。根据 2001 和 2010 年榆林市及周边完整且均匀分布的 9 个气象站点的气象数据,利用普通克里格插值的方法对站点的月降雨量进行空间插值,将所生成的月降雨量栅格图进行投影的转换,然后运用上面的公式计算出 2001 和 2010 年榆林市的年降雨侵蚀力栅格图。

1.3.2 土壤可侵蚀因子 K 土壤侵蚀的主要对象指的是土壤本身及其母质,它们是土壤侵蚀发生的主体。土壤可侵蚀性因子是用于反映土壤侵蚀性的敏感程度,或土壤被降雨侵蚀力分离、流水冲刷和搬运难易的程度。针对不同的研究区域,许多学者对土壤可侵蚀性因子的计算做了大量的研究,得到了许多有关 K 值的计算方法。这里采用 Willams 和 Arnold 建立的侵蚀/生产力影响模型 EPIC(erosion-productivity impact calculator)公式来计算土壤可蚀性^[11]。该方法的土壤理化性质测定方法具有成熟方便、成本低、土壤可蚀性稳定的特点。EPIC 公式为:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 S_{AN} \left(1 - \frac{S_{IL}}{100} \right) \right] \right\} \left(\frac{S_{IL}}{C_{LA} + S_{IL}} \right)^{0.3} \cdot \left[1.0 - \frac{2.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \left[1.0 - \frac{0.7SN_1}{SN_1 + \exp(-5.51 + 2.95SN_1)} \right]$$

式中: K ——土壤可侵蚀性因子 [$t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} / (\text{MJ} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{mm})$]; S_{AN}, S_{IL}, C_{LA} 和 C ——砂粒、粉粒、黏粒和有机碳含量(%); $SN_1 = 1 - S_{AN}/100$ 。

1.3.3 坡度坡长因子(LS) 坡度和坡长因子 LS 也称为地形因子,是反映地形地貌特征对土壤侵蚀的作用。在 RUSLE 模型中 LS 因子的获得相对比较复杂,虽然 Wischmeier 等^[12], Meeool 等^[13] 结合 GIS 分别提出了计算 LS 因子的方法,但是都并不太适用于地形支离破碎、沟壑纵横的黄土高原地区,江忠善等^[14] 通过选取坡长为 20 m, 宽为 5 m, 坡度为 10° 的坡面作为标准样区进行实验,通过实验对美式的算法做了一定的修改,从而得出适合计算黄土高原 LS 因子的简单算式:

$$LS = 1.07 \left(\frac{\lambda}{20} \right)^{0.28} \left(\frac{\alpha}{10^\circ} \right)^{1.45}$$

式中: λ ——坡长; α ——DEM 提取的坡度值。

1.3.4 地表植被覆盖因子 C 植被具有截留降雨、减缓地表的径流、保持水土等重要的生态功能,同时植物的根系对抑制土壤的侵蚀起到相当重要的作用。地表植被覆盖因子指在其他同等条件下,某一特定的作物或植被覆盖的土壤流失量与裸土之间土壤流失量的比值,它反映了植被或作物对土壤流失量的影响,其值

在 0~1 之间^[15]。由于 C 值与植被覆盖度具有良好的相关性。因此,本文利用 NDVI 的最大值来计算榆林市的植被覆盖度,根据蔡崇法等^[16] 建立的植被覆盖度与 C 值的关系得出 C 值。其计算公式为:

$$f = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}}$$

$$C = \begin{cases} 1 & (0 \leq f_c \leq 0.1\%) \\ 0.6508 - 0.3436 \lg(f_c) & (0.1\% \leq f_c \leq 78.3\%) \\ 0 & (f_c \geq 78.3\%) \end{cases}$$

式中: f_c ——植被覆盖度(%); C ——地表植被覆盖因子; NDVI——归一化植被指数; $NDVI_{\min}$, $NDVI_{\max}$ ——研究区域内 NDVI 的最小值和最大值。根据公式,使用 ArcGIS 9.3 空间分析模块里的栅格计算器,编写上述公式计算出 C 值,从而得到 2001 年和 2010 年 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的 C 因子的栅格图层。

1.3.5 土壤保持措施因子 P 土壤保持措施因子 P 是指采用专门措施后,土壤流失量与采用顺坡种植时土壤流失量的比值。国内学者根据区域特点对土地的不同利用方式赋 P 值。参考前人的研究成果^[17-19],针对不同土地利用类型的 P 值进行赋值(表 1),结合土地利用图得到 2001 和 2010 年的 P 值栅格图。

表 1 不同土地利用类型的土壤保持措施因子 P 值

土地利用类型	林地	草地	水浇地	旱地	水域	城镇用地	未利用地
P 值	1	1	0.15	0.35	0	0	1

2 结果分析

2.1 土壤侵蚀概况及总体变化

根据中华人民共和国水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》,在 ArcGIS 9.3 的支持下对 2001 和 2010 年两期的土壤侵蚀模数进行分级,从而得到榆林市两个时期的土壤侵蚀强度分布图(附图 1),并分析得到榆林市两个时期各侵蚀强度的面积及分布情况表(表 2)。由表 2 可知,2001 年微度侵蚀以上的土壤侵蚀面积为 $32\,526 \text{ km}^2$, 占总面积的 74.76%, 土壤侵蚀状况相当严峻。其中中度、强度和极强度的侵蚀面积分别占到了总面积的 16.97%, 10.16% 和 9.56%, 而剧烈侵蚀的面积为 $2\,848 \text{ km}^2$, 占总面积的 6.55%。2010 年榆林市微度以上的土壤侵蚀面积为 $30\,814 \text{ km}^2$, 相比 2001 年下降了 5.26%。其中剧烈侵蚀面积为 $5\,326 \text{ km}^2$, 占总面积的 12.24%, 中度、强度和极强度侵蚀面积分别为 $6\,233$, $4\,242$ 和 $5\,188 \text{ km}^2$, 分别占总面积的 14.33%, 9.76% 和 11.93%。由表 2 可以看出,2001 和 2010 年榆林市的土壤侵蚀

类型主要以中度及中度侵蚀以下为主。而 2001—2010 年,微度、极强度和剧烈的侵蚀面积都有所增长,其增长比例分别为 15.33%, 24.77% 和 87.01%, 特别是剧烈侵蚀面积急剧增长。而轻度、中度和强度的侵蚀面积有所下降,下降幅度分别为 28.36%, 15.6% 和 4.05%。榆林市的土壤侵蚀呈现出中等强度侵蚀面积减少,低强度和高强度侵蚀面积增加的两极分化状况。许多地区土壤侵蚀由中强度向高强度转变,水土流失状况恶化。自 1999 年开始实施退耕还林还草工程,榆林市的生态环境按理应该得到极大的改善,植被覆盖度的提高有利于水土流失的治理,但榆林市许多区县的土壤侵蚀不但没有得到有效的控制,相反其土壤侵蚀状况进一步的恶化,其中缘由值得探究。

从各侵蚀强度的面积变化情况来看,2001—2010 年研究区极强度和剧烈侵蚀的变化幅度最为显著。极强度侵蚀由 2001 年的 $4\,158 \text{ km}^2$ 增加到 2010 年的 $5\,188 \text{ km}^2$, 增加了 $1\,030 \text{ km}^2$, 面积净变化率为 24.77%; 剧烈侵蚀由 2001 年的 $2\,848 \text{ km}^2$ 增加到

2010 年的 5 326 km², 面积猛增了 2 478 km², 面积净变化率高达 87.01%。其次是微度侵蚀, 面积从 2001 年的 10 983 km² 增加到 2010 年的 12 667 km², 增加了 1 984 km², 面积净变化率达到 15.33%, 极强度侵

蚀类型的增加幅度也比较大; 而中度、轻度和强度侵蚀面积相对于 2001 年都有所减少, 面积分别减少了 3 889, 1 152 和 179 km², 面积净变化率分别为 -28.36%, -15.6% 和 -4.05%。

表 2 榆林市 2001—2010 年土壤侵蚀组成总体变化

侵蚀等级	侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	2001 年		2010 年		面积净 变化/km ²	面积净 变化率/%
		面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%		
微度	<500	10 983	25.24	12 667	29.12	1 984	15.33
轻度	500~2 500	13 714	31.52	9 825	22.60	-3 889	-28.36
中度	2 500~5 000	7 385	16.97	6 233	14.33	-1 152	-15.60
强度	5 000~8 000	4 421	10.16	4 242	9.76	-179	-4.05
极强度	8 000~15 000	4 158	9.56	5 188	11.93	1 030	24.77
剧烈	>15 000	2 848	6.55	5 326	12.24	2 478	87.01

从总体变化趋势来看, 自 2001 年以来, 轻度、中度和强度的侵蚀状况的到了改善, 而微度、极强度和剧烈侵蚀面积有所增加, 特别是剧烈侵蚀的增加最为显著。说明榆林市水土流失的治理初步见到成效, 但是局部地区的水土流失情况更趋严重。

2.2 土壤侵蚀空间变化

从榆林市 2 个时期的土壤侵蚀强度图(附图 1)来看, 该地区土壤侵蚀强度的空间分布特征较为明显, 主要表现在西北部和北部土壤侵蚀以微度、轻度和中度侵蚀为主, 南部和东南部总体土壤侵蚀强度较高, 基本上处于中等强度以上, 且极强度和剧烈侵蚀面积分布比例大。这种地区的空间差异主要来源于地形的差异, 西北部和北部地区属于风沙草滩区, 地形相对比较平坦, 土壤的潜在侵蚀量较小, 而南部和东南部地区基本属于黄土高原丘陵沟壑区, 地形崎岖, 土壤的潜在侵蚀量相对较大。

对比 2001 年的土壤侵蚀强度分布图(附图 1), 可以看出该时期榆林市的土壤侵蚀空间分布在总体上呈现出一定的规律性。其中中度及中度以下的土壤侵蚀主要集中在榆林市坡度较小、地势相对平缓的地段, 榆林市北部和西北部地区的分布最为显著, 该地区属于风沙草滩区, 地形相对比较平坦, 土壤的潜在侵蚀量较小, 并且轻度和中度侵蚀多围绕微度侵蚀分布, 同时在小流域的河道周边也有轻度和中度侵蚀分布; 而强度及强度以上的土壤侵蚀主要集中在坡度较大、地形起伏大和植被覆盖度较低的区域, 尤以南部和东南部地区最为显著, 该地区属于黄土高原丘陵沟壑区和梁状低山丘陵区, 地形崎岖, 土壤的潜在侵蚀量相对较大。从 2010 年的土壤侵蚀强度分布图(附图 1)可以看出, 该时期的土壤侵蚀类型的空间分布相比 2001 年有了明显的变化, 主要表现在榆

林市的长城沿线及以北地区土壤侵蚀情况恶化, 侵蚀类型由中度、强度向极强度和剧烈转变, 特别是中南部的横山、靖边地区土壤侵蚀恶化情况十分明显, 而东南部的大部分地区如绥德、米脂县等, 土壤侵蚀情况得到了明显的改善, 土壤严重侵蚀区大面积减少, 土壤侵蚀类型发生了相反的转变, 由极强度、剧烈侵蚀向微度、轻度侵蚀类型转变, 生态环境有了明显的好转。究其原因, 榆林市开始实施大范围的退耕还林还草工程之后, 该地区土地利用的方式发生了巨大的变化, 坡耕地大幅度退耕, 林地草地面积增加, 植被覆盖度有了明显的提高, 这使得原有的极强度和剧烈的土壤侵蚀开始慢慢的向低强度的土壤侵蚀类型转变, 但是那些土壤侵蚀恶化的地区, 人为活动影响剧烈, 在城市发展建设过程中, 水土保持的措施不尽完善, 管理措施也未到位, 因此致使该地区土壤侵蚀向高强度土壤侵蚀的转变。

综合分析 2001 和 2010 年的土壤侵蚀强度空间分布, 可以发现在土壤条件和降雨条件相同或变化不大的区域, 植被覆盖度以及人类活动的影响是研究区土壤侵蚀强度变化的主要因素。

榆林市共有 12 个区县, 各区县之间土壤类型、植被覆盖情况、地形条件和土地利用方式都不尽相同, 因此不同区县之间的土壤侵蚀状况各异。利用 ArcGIS 9.3 的交叉列表功能将榆林市行政区划图和 2001 年土壤侵蚀强度分类图, 2010 年土壤侵蚀强度分类图进行交叉分析, 从而得到榆林市各区县 2 个时期土壤侵蚀强度分级面积及比例状况(表 3)。由表 3 可以看出, 2001—2010 年榆林市各区县的土壤侵蚀变化状况有着明显的空间差异, 榆林市的府谷、神木、榆阳、横山、靖边、佳县和子洲 7 个区县的土壤侵蚀状况不断恶化, 这些区县中度及中度以下的土壤侵蚀面

积比例有所下降,强度及强度以上的土壤侵蚀面积呈现相反的增加趋势,特别是极强度和剧烈侵蚀面积上升幅度特别大,这些区县的土壤侵蚀类型发生了由中强度向高强度侵蚀的转化,土壤侵蚀状况向差的方向发展。特别是府谷、神木、横山、子洲和佳县五县,极强度和剧烈侵蚀的面积比例猛增,说明这些地区土壤侵蚀日益严重。定边、米脂、吴堡、绥德和清涧 5 县的

土壤侵蚀状况相反得到了明显的改善,其中微度和轻度侵蚀面积增加,极强度和剧烈侵蚀比例下降,这些区县的土壤侵蚀类型有高强度向低强度侵蚀转变,土壤侵蚀状况不断好转。特别是米脂、吴堡、绥德和清涧 4 县微度侵蚀面积上升比例相当大,说明这些地区的生态环境较 2001 年有了根本性的转变,水土流失治理取得巨大的成就。

表 3 榆林市各区县土壤侵蚀类型分布情况统计

地区	年份	微度		轻度		中度		强度		极强度		剧烈	
		面积/ km ²	比例/ %										
府谷	2001	87.2	2.7	1 438.8	44.6	941.8	29.2	343.4	10.6	338.3	10.5	78.7	2.4
	2010	106.2	3.2	1 316.2	40.1	490.1	14.9	363.1	11.1	560.7	17.1	443.9	13.5
神木	2001	1 947.8	28.1	3 077.8	44.4	1 046.3	15.1	366.2	5.3	329.3	4.8	163.3	2.4
	2010	1 825.6	26.8	1 611.4	23.6	1 100.0	16.1	337.1	4.9	1 129.2	16.6	815.7	12.0
榆阳	2001	4 490.7	56.5	1 987.9	25.0	703.4	8.8	388.0	4.9	245.4	3.1	137.2	1.7
	2010	3 903.2	54.6	1 897.2	26.5	448.1	6.3	359.1	5.0	295.6	4.1	246.9	3.5
横山	2001	619.3	15.7	1 516.4	38.3	931.4	23.5	325.6	8.2	385.3	9.7	178.7	4.5
	2010	407.3	10.2	1 118.1	28.0	668.1	16.8	347.1	8.7	448.9	11.3	996.9	25.0
靖边	2001	1 220.4	26.2	1 646.9	35.4	555.9	11.9	355.0	7.6	366.7	7.9	509.3	10.9
	2010	1 081.5	22.1	1 462.1	29.8	508.1	10.4	447.1	9.1	737.4	15.0	668.1	13.6
定边	2001	2 488.7	37.2	1 946.7	29.1	553.3	8.3	376.4	5.7	475.7	7.1	847.7	12.7
	2010	2 678.4	38.7	2 046.1	29.6	873.3	12.6	386.5	5.8	440.8	6.4	493.3	7.1
佳县	2001	13.1	0.7	598.3	30.4	635.2	32.3	354.3	17.1	235.5	12.0	131.0	6.7
	2010	86.9	4.3	329.7	16.2	398.0	19.6	486.9	23.9	394.0	19.4	339.4	16.7
米脂	2001	35.1	3.0	207.5	17.9	216.0	18.7	238.8	20.6	214.7	18.5	245.9	21.2
	2010	234.4	20.2	327.9	28.3	119.0	10.3	124.0	10.7	157.5	13.6	195.0	16.8
吴堡	2001	0.0	0.0	105.7	24.1	103.7	23.6	55.7	12.7	57.3	13.1	116.6	26.6
	2010	183.9	35.4	129.2	24.9	35.3	6.8	36.1	8.0	36.2	7.0	98.2	18.9
绥德	2001	9.5	0.5	209.6	11.8	501.0	28.3	458.8	25.9	429.1	24.2	163.9	9.2
	2010	686.6	36.9	247.8	13.3	217.0	11.7	215.0	12.2	293.0	15.8	199.4	10.7
子洲	2001	8.0	0.4	243.9	12.8	500.2	26.3	535.7	28.2	451.3	23.7	163.9	8.6
	2010	298.1	15.2	108.4	5.5	199.9	10.2	318.9	16.2	610.4	31.1	428.2	21.8
清涧	2001	4.1	0.2	171.0	9.7	391.9	22.2	421.6	23.8	517.7	29.3	262.3	14.8
	2010	690.5	39.0	195.0	11.0	128.6	7.3	181.6	10.3	275.8	15.6	297.2	16.8

自 1999 年以来,榆林市大力开展退耕还林还草工程,开展水土保持综合治理工作,生态环境不断的改善。但是在 2001—2010 年不同地区的水土保持效果不尽相同,像府谷、神木、榆阳、横山、靖边、佳县和子洲 7 个区县的土壤侵蚀状况不但没有得到改善,相反呈现恶化的状况,土壤侵蚀类型向高强度转变,这些区域的水土流失日益严重,而定边、米脂、吴堡、绥德和清涧 5 县大豆位于黄土高原丘陵沟壑区和梁状低山丘陵区,地形崎岖,而这些地区的土壤侵蚀在 10 a 间得到极大的治理,水土流失得到有效的控制,

土壤侵蚀由 2001 年中度及中度以上土壤侵蚀向微度和轻度侵蚀转变,这些地区的生态环境建设和水土保持工作取得了良好的成效。

不同地区在相同的背景下,土壤侵蚀治理的结果不一样,这与当地的经济建设,资源能源的大量开采造成生态环境的破坏不无关系,榆林市作为国家能源基地,大量的能源物资被开采开发,在开发过程中不可避免的造成生态的破坏,同时这些地区属于生态脆弱区,人类活动对当地生态环境的有着强烈的干扰作用,人类活动的正影响和负影响都直接关系着该地区

生态环境质量的好坏。由附图 1 可以看出,府谷、神木、榆阳、横山、靖边、佳县和子洲 7 个区县能源开发区富集,分布着大量的煤炭、石油和天然气的开发开采区,在能源的开采过程中,不可避免的造成了地被植被和地下水体系统的破坏。植被是控制土壤侵蚀的重要因素之一,植被冠层能够截留雨水,降低雨水的动能,减轻雨滴对土壤的冲击,减缓土壤的侵蚀,而榆林地区位于干旱半干旱区,地下水是植被生长发水分条件的主要来源,而能源开发开采过程中不可避免的对地下水体造成不同程度的破坏,从而对植被的生长起到了的抑制作用,而地表植被覆盖度越小,土壤侵蚀量和侵蚀强度就更大,因此植被覆盖度的高低与土壤侵蚀量高度相关。因此这些地区由于经济发展,建设用地的大量增加、资源能源的开采和土地利用方式的不合理导致该地区土壤侵蚀状况恶化。而定边、米脂、吴堡、绥德和清涧 5 县境内能源开发开采区面积不大,对地表植被的破坏程度有限,加之近年来响应政府的生态环境建设的政策,大力开展退耕还林还草工程,使生态环境大幅度改善,地表植被覆盖度大幅度提高,使这些地区的土壤侵蚀得到明显的改善,水土流失治理成果十分显著。

3 结果讨论

经过多年的发展,USLE 模型作为经验统计模型具有广泛的实用性,但是也存在精度不高和误差等问题,由于黄土丘陵区地形起伏大,坡度大而坡长相对短,对坡度坡长因子估算时时,其 LS 因子的值会相对比较大,因此采用江忠善等^[14]提出的较适合与计算黄土高原 LS 因子的简单算式,然而在对黄土丘陵区土壤侵蚀模拟时,仍存在其模拟的结果存在与一般的实测值相对偏大的情况,但是对研究区域土壤侵蚀的空间分布趋势时,其模拟的结果对该地区土壤侵蚀空间分析的影响不大,仍能够较好地分析区域土壤侵蚀的空间差异,与此同时,通过对比较分析,2001 和 2010 年榆林市土壤侵蚀模拟结果存在的误差仍能够满足空间分析的要求。同时在估算土壤侵蚀模数时,将 USLE 模型中相应的因子进行本地化修正,将会得到更加精确和实用的效果。对于降雨侵蚀力因子,降雨侵蚀力因子在年内随时间不断变化的,而 R 因子普遍使用的 Wischmeier 经验公式,仅能针对年的尺度,显然全年的累加值与全年各月的降水分项过程是存在较大差异的。对于 R 因子,应该尽量布设雨量采集站,进行准确地跟踪记录,精确计算降雨的数据,来提高该因子的精度。此外在模型中,水土保持措施因子仍还没有统一的计算方法,这在一定程度上对模型的

计算精度产生影响。土壤侵蚀强度分级标准因其制定的具有广泛的适用性,不能完全反映当地土壤侵蚀的强弱和危害,因此有待于根据研究区的实际情况,制定更加符合当地实际情况的土壤侵蚀分级标准。

土壤侵蚀是一个相当复杂的现象,它是自然因素和人文因素共同作用的结果,任何一个土壤侵蚀估算模型都不是万能的,尤其是定量描述侵蚀程度的模型尤为如此,在不同时间和区域范围之内,其侵蚀因素会存在显著的差异。USLE 模型作为经验统计模型,其得出的土壤侵蚀模数是一个模拟值,与实测值存在一定的误差,在实际应用中该模型估算的土壤侵蚀可以作为参考和借鉴,但并不能完全代替实测值,可以作为一种技术手段应用于水土流失治理的工作当中,为水土保持工作提供比较科学的参考依据。

4 结论

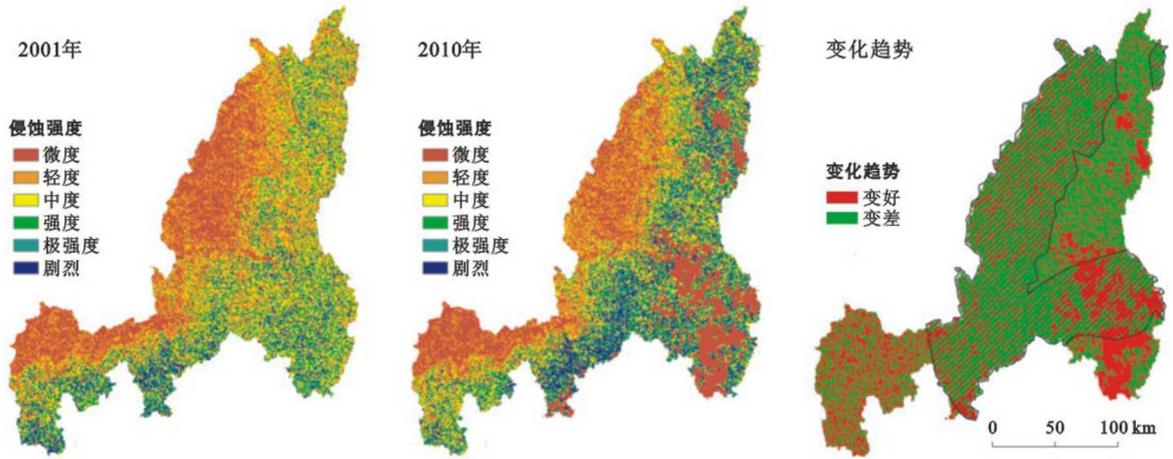
(1) 2001 年榆林地区平均土壤侵蚀模数为 $4\ 411\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,年侵蚀总量为 $1.93 \times 10^8\ \text{t}$;2010 年的平均土壤侵蚀模数为 $6\ 237\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,年侵蚀总量为 $2.72 \times 10^8\ \text{t}$ 。与 2001 年相比,2010 年的平均土壤侵蚀模数明显增加,侵蚀总量也增加了 $7.9 \times 10^7\ \text{t}$ 。从土壤侵蚀强度上来看,2001 年榆林市的土壤侵蚀类型主要以中度及中度侵蚀以下为主,其中微度侵蚀比例最高,剧烈侵蚀比例最低。而到 2010 年,榆林市土壤侵蚀类型发生了明显的变化,中度及中度侵蚀以下的比例下降,而极强度和剧烈的侵蚀比例快速上升,中度侵蚀的比例降低,低强度和高强度侵蚀的比例有所上升,侵蚀强度分别向低强度和高强度发展,侵蚀类型呈现出两极分化的格局。

(2) 2001—2010 年榆林市各区县的土壤侵蚀变化状况有着明显的空间差异,榆林市的府谷、神木、榆阳、横山、靖边、佳县和子洲 7 个区县的土壤侵蚀状况不断恶化,这些区县中度及中度以下的土壤侵蚀面积比例有所下降,强度及强度以上的土壤侵蚀面积呈现相反的增加趋势,特别是极强度和剧烈侵蚀面积上升幅度特别大,这些区县的土壤侵蚀类型发生了由中强度向高强度侵蚀的转化,土壤侵蚀状况向差的方向发展。定边、米脂、吴堡、绥德和清涧 5 县的土壤侵蚀状况则得到了明显的改善,其中微度和轻度侵蚀面积增加,极强度和剧烈侵蚀比例下降,这些区县的土壤侵蚀类型有高强度向低强度侵蚀转变,土壤侵蚀状况不断好转。特别是米脂、吴堡、绥德和清涧 4 县微度侵蚀面积上升比例超过 40%,说明这些地区的生态环境较 2001 年有了根本性的转变,水土流失治理取得巨大的成就。

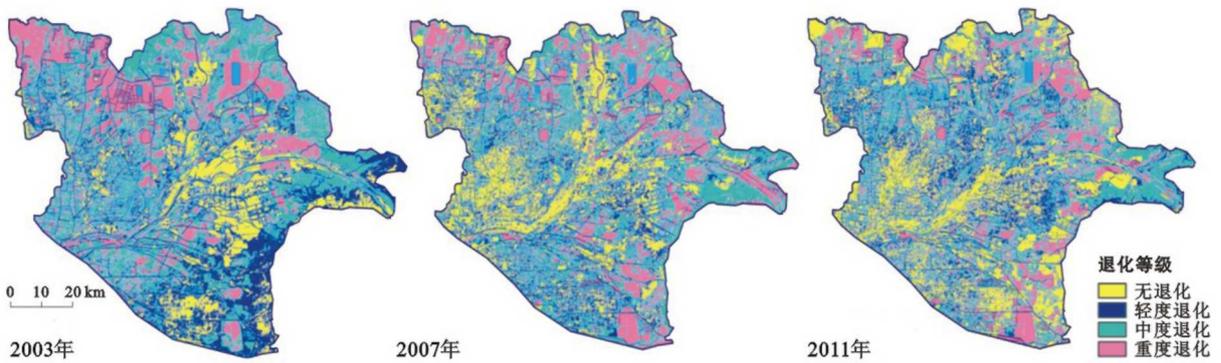
(3) 人类的社会经济活动与土壤侵蚀存在着密切的关系。人类开发利用资源的方式和方法直接影响着土壤侵蚀的发生与否。自 2001 年以来,榆林市人口不断增长,经济发展水平的提高,工业化和城镇化建设的步伐加快,城市建设用地比例大幅增加;同时,榆林市作为能源开发基地,大量的资源能源被开发,而这些城镇建设区和能源开发区在建设的同时没有采取合理的土壤侵蚀防护措施,也会导致建设区本身即周边区域的土地资源遭到严重的破坏,从而使土壤侵蚀状况不断恶化;特别是能源开发开采区,2001—2010 年,土壤侵蚀强度由低强度向高强度转变。而榆林市的南部 4 县和定边县,由于近年的退耕还林还草工程,使该地区的植被覆盖度极大的提高,生态环境得到明显的好转,使土壤侵蚀由之前的高强度慢慢的向中强度和低强度转变。总体而言,自然环境因素对土壤侵蚀的干扰存在着低频、缓慢和潜在性,而人类活动对土壤侵蚀的干扰则是高频的、持续的、显著的。人类活动的影响在导致土壤侵蚀上起着主导作用,对水土流失和生态系统的退化起着加速的作用。因此,在有限的资源、不断增长的人口压力和快速发展的经济环境下,合理的经济建设和城市发展方案,有序的资源开发方案,继续深入退耕还林还草工程的开展对保护生态环境,治理水土流失至关重要。

[参 考 文 献]

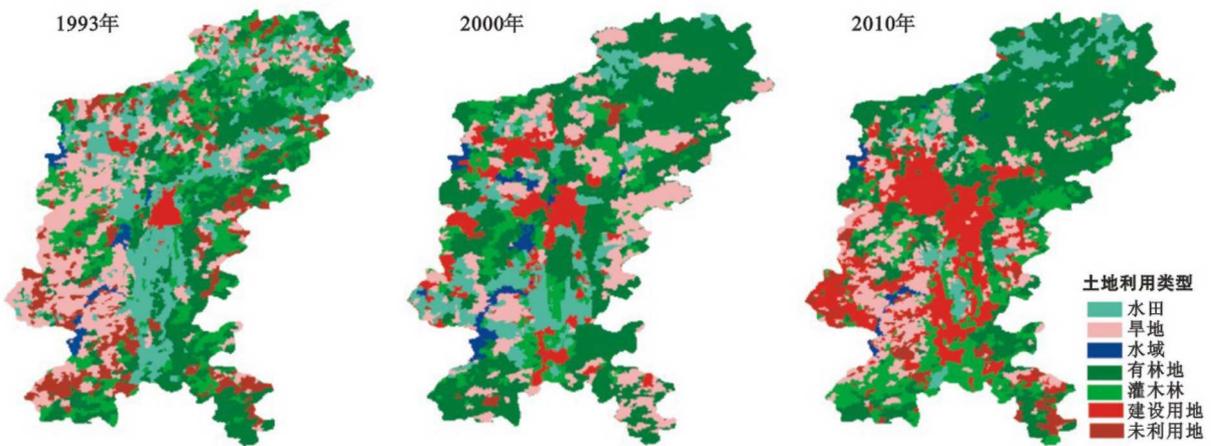
- [1] Stolte J, Ritsema C J, Bouma J. Developing interactive land use scenarios on the Loess Plateau in China, presenting risk analyses and economic impacts[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 105(1/2): 387-399.
- [2] 史培军, 刘宝元, 张科利, 等. 土壤侵蚀过程与模型研究[J]. *资源科学*, 1999, 21(5): 9-18.
- [3] 李晶, 任志远. 基于 GIS 的陕北黄土高原土地生态系统水土保持价值评价[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(12): 2796-2803.
- [4] 冷疏影, 冯仁国, 李锐, 等. 土壤侵蚀与水土保持科学重点研究领域与问题[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 1-6.
- [5] 傅伯杰, 陈利顶, 邱扬, 等. 黄土丘陵沟壑区土地利用结构与生态过程[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 185-232.
- [6] Meyer L D. Evolution of the universal soil loss equation[J]. *J. Soil and Water Cons.*, 1984, 32(2): 99-104.
- [7] 谢云, 林燕, 张岩. 通用土壤流失方程的发展与应用[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(3): 279-287.
- [8] Shi Xuezheng, Dong Shengyu, Warner E D, et al. Cross reference system for translating between genetic soil classification of China and soil taxonomy[J]. *Soil Science Society of America*, 2006, 70(1): 78-83.
- [9] 潘美慧, 伍永秋, 任斐鹏, 等. 基于 USLE 的东江流域土壤侵蚀量估算[J]. *自然资源学报* 2010, 25(12): 2154-2164.
- [10] Wischmeier W H. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1971, 26(5): 189-193.
- [11] Williams J R, Arnold J G. A system of erosion—sediment yield models[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1997, 11(1): 43-55.
- [12] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning[M]. Washington D C: US Department of Agriculture, 1978.
- [13] Meeool D K, Foster G R. Revised slope length factor for the universal soil equation [J]. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 1989, 32(5): 1571-1576.
- [14] 江志善, 李秀英. 黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究[J]. *西北水土保持研究所集刊*, 1988(7): 40-45.
- [15] 张岩, 袁建平, 刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 1033-1036.
- [16] 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.
- [17] 李若东, 刘德俊, 冯玲正, 等. 基于 GIS 下的西宁市土壤侵蚀预测[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(2): 1-3.
- [18] 李新宇, 唐海萍, 张新时, 等. 基于多因子层次覆盖模型的潜在土壤侵蚀等级评价[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(4): 154-167.
- [19] 李京, 李晓兵, 宫阿都. 基于遥感方法的小流域土壤侵蚀研究[J]. *自然灾害学报*, 2008, 17(6): 77-81.
- [20] 任志远, 刘焱序. 西北地区植被保持土壤效应评估[J]. *资源科学*, 2013, 35(3): 610-617.
- [21] 周自翔, 任志远, 李晶. 秦巴山区植被土壤保持生态价值研究[J]. *干旱区研究*, 2006, 23(1): 144-148.



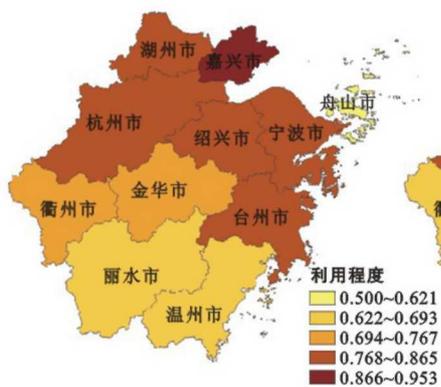
附图1 榆林地区2001和2010年土壤侵蚀强度及变化趋势



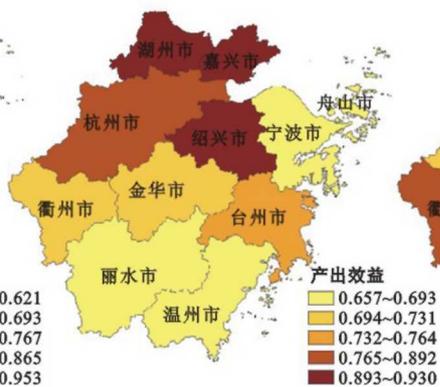
附图2 黄河三角洲2003, 2007, 2011年土地退化等级



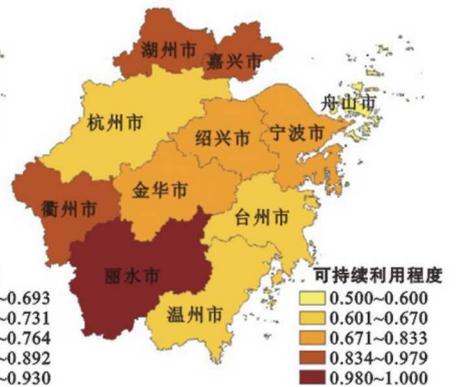
附图3 贵阳市1993, 2000和2010年土地利用/覆被现状



附图4 浙江省耕地利用程度评价



附图5 浙江省耕地产出效益评价



附图6 浙江省耕地可持续状况评价