

# 基于 RUSLE 的陕南地区土壤侵蚀时空变化特征

苏 嫒<sup>1</sup>, 王志杰<sup>2</sup>, 杨 瑞<sup>1</sup>, 姚 静<sup>3</sup>

(1. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学 生命科学学院, 贵阳 550025;

3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 基于 GIS 和 RS 技术, 采用遥感影像、DEM 数据、土壤类型数据、降雨数据以及植被覆盖和土地利用等数据, 运用 RUSLE 模型, 计算并分析了陕南地区 1995—2014 年近 20 年土壤侵蚀强度的时空动态变化特征。结果表明: (1) 5 个时期土壤侵蚀模数分别为  $787.86 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,  $1\,362.97 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,  $1\,627.75 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,  $1\,684.41 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,  $1\,571.79 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 呈先快速增加后缓慢减小的趋势。土壤侵蚀类型整体上以微度和轻度侵蚀为主, 随时间变化微度侵蚀呈降低趋势, 其他 5 个等级侵蚀均呈波动增加趋势; (2) 土壤侵蚀较严重的区域主要分布在中部和大巴山的北部, 以紫阳县和镇巴县为主, 两县平均土壤侵蚀强度分别为  $2\,935.47 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,  $3\,327.45 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 属于中度侵蚀; (3) 不同海拔梯度上, 土壤侵蚀随海拔升高整体呈先增加后降低的趋势, 中山区 ( $800 \sim 2\,000 \text{ m}$ ) 分布面积最广, 侵蚀强度大, 其次是低山区 ( $500 \sim 800 \text{ m}$ ), 丘陵和高山区分布面积均较少, 侵蚀强度小; (4) 不同坡度梯度上, 表现出坡度越大, 土壤侵蚀越严重的特征, 且坡度  $> 25^\circ$  的区域是研究区主要的土壤侵蚀坡度段, 是陕南地区土壤侵蚀防治的主要区域。

**关键词:** 土壤侵蚀; 时空变化; RUSLE; 陕南地区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)05-0001-11

## SpatioTemporal Variation Characteristics of Soil Erosion in Southern Shaanxi Region Based on RUSLE

SU Yuan<sup>1</sup>, WANG Zhijie<sup>2</sup>, YAN G Rui<sup>1</sup>, YAO Jing<sup>3</sup>

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Institute of

Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** With the help of GIS and RS technology, based on remote sensing image data, DEM data, soil type data, rainfall data, vegetation coverage data and land use data, RUSLE as the evaluation model was used to calculate and analyze the spatial and temporal dynamic characteristics of soil erosion intensity in southern Shaanxi Region in recent 20 years from 1995 to 2014. The results showed that: (1) the soil erosion modulus in 5 periods were  $787.86 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,  $1\,362.97 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,  $1\,627.75 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,  $1\,684.41 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  and  $1\,571.79 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , respectively, the tendency was to increase rapidly at first and then decrease slowly, the soil erosion types were micro and slight erosion. The micro erosion decreased with time change, the other 5 grades increased volatility; (2) the soil erosion in the central region and the northern of Daba Mountain of study area was more severe, especially in Ziyang County and Zhenba County; the average soil erosion intensities were  $2\,935.47 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  and  $3\,327.45 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , respectively, which belonged to moderate erosion; (3) for different altitude, the soil erosion increased first and then decreased with elevation rise; the soil erosion distributed most widely in middle-mountain area ( $800 \sim 2\,000 \text{ m}$ ), its erosion intensity was large, and low-mountain area ( $500 \sim 800 \text{ m}$ ) was in next; the soil erosion distributed less in hilly and high-mountain area, the erosion intensity was small; (4) for different slope gradients, the soil erosion was more serious with the

收稿日期: 2017-10-23

修回日期: 2017-11-17

资助项目: 贵州省科技计划项目(黔科合 SY 字[2013]3165, 黔科合支撑[2017]2854); 国家自然科学基金(41701319)

第一作者: 苏嫒(1986—), 女, 陕西延安人, 硕士, 助理实验师, 主要从事区域水土流失、水土保持研究。E-mail: ysu@gzu.edu.cn

通信作者: 杨瑞(1979—), 男, 贵州六盘水人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 森林经营与森林生态。E-mail: yr553017@163.com

greater slope gradients, and slopping area with greater than  $25^\circ$  was the main soil erosion area in the study area, also was the main area of soil erosion prevention in southern Shaanxi Region.

**Keywords:** southern Shaanxi Region; soil Erosion; spatiotemporal variation; RUSLE

土壤侵蚀是指地球表面的土壤及其母质受水力、风力、冻融、重力等外力的作用,在自然因素和人为因素的影响下发生的各种破坏、分离、搬运和沉积的现象<sup>[1]</sup>。严重的土壤侵蚀会引起土壤退化、土地生产力降低、泥石流等山地灾害以及河道淤积而导致洪涝灾害等,严重制约着生态经济的可持续发展<sup>[2-3]</sup>。目前,土壤侵蚀是我国陆地生态环境的主要危害,也是全球性重要的生态环境问题之一<sup>[4]</sup>。加强土壤侵蚀研究以明晰土壤侵蚀的时空动态变化对评价水土治理、防治水土流失以及更深入指导水土保持建设有着重要意义。

运用模型的方法开展定量测度是土壤侵蚀研究的常用手段<sup>[5]</sup>。近年来,国内外学者在土壤侵蚀模型研究方面做了大量卓有成效的工作,通过试验、观测研究建立了具有不同特色的模型,大致可分为经验模型、物理过程模型和分布式模型<sup>[6-9]</sup>。物理模型以美国的 WEPP 模型<sup>[10]</sup> 最具代表性,分布式模型以 SHE<sup>[11]</sup> 最为典型,由于土壤侵蚀过程的物理模型和分布式模型需要众多参数,实用性有所限制,因此,以 USLE/RUSLE 模型应用最为广泛<sup>[5]</sup>。目前,基于 USLE/RUSLE 模型的区域土壤侵蚀量估算与模拟<sup>[12]</sup>、土壤侵蚀与环境因子的关系<sup>[4]</sup>、土壤侵蚀评价及景观格局分析<sup>[13-14]</sup>、土壤侵蚀时空变化特征/时空分布特征<sup>[2-3,5]</sup> 等方面一直是国内外研究的热点问题。然而,位于我国秦巴山地的陕南地区这方面的研究鲜有报道。众所周知,陕南地区是我国中部生态安全屏障区和南水北调中线工程重要水源涵养区,其不但承担着保证足够水源和合格水质的重要作用,更承担着保持水土、减少河道泥沙淤积的作用,其生态功能的优劣,直接关系到中线工程的水质和安全运行<sup>[15]</sup>。但长期以来,陕南地区经济落后,生态效益变差,生态环境恶化问题突出,加之多次大规模不合理的毁林和过度采伐等人类活动,致使原始森林几乎破坏殆尽,加剧了该地区的土壤侵蚀程度<sup>[16]</sup>。研究表明,陕南地区的汉江流域面积仅占长江流域面积的 4%,但其土壤流失量却占到长江流域的 12%,是长江流域土壤侵蚀最严重的地区<sup>[17]</sup>。因此,土壤侵蚀已成为影响该地区生态安全的关键因子和亟待解决的关键问题,而开展陕南地区土壤侵蚀时空变化特征研究,对该地区生态环境综合治理和水土保持工作实施具有重要指导意义。

基于此,本研究利用 RUSLE 模型计算分析陕南

地区 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年和 2014 年的土壤侵蚀模数,探讨土壤侵蚀强度的时间变化规律和空间分布格局,以期揭示土壤侵蚀的动态变化特征,为陕南地区今后水土流失治理和生态环境建设提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

陕南是指陕西南部地区,北靠秦岭、南倚巴山,汉江自西向东穿流而过,从西往东依次是汉中(东经  $105^\circ30'50''$ — $108^\circ16'45''$ ,北纬  $32^\circ08'54''$ — $33^\circ53'16''$ )、安康(东经  $108^\circ00'58''$ — $110^\circ12'$ ,北纬  $31^\circ42'24''$ — $33^\circ50'34''$ )和商洛(东经  $108^\circ34'20''$ — $111^\circ1'25''$ ,北纬  $33^\circ2'30''$ — $34^\circ24'40''$ )。陕南是国家南水北调工程的重要水源涵养地,西边与甘肃相邻,南部与四川、重庆、湖北相接,东与河南毗邻,北与宝鸡、西安、渭南 3 市接壤,总面积  $6.99$  万  $\text{km}^2$ ,约占陕西省总面积的 35%;境内气候类型具有特殊性,西部属于北亚热带季风气候区,东部为北亚热带与暖温带过度地域;全区气候温和,雨量充沛,四季分明,年平均气温  $12\sim15^\circ\text{C}$ ,年有效积温  $3\ 500\sim4\ 500^\circ\text{C}$ ,年降水量  $700\sim1\ 300\text{ mm}$ ,年日照时数  $1\ 395\sim1\ 729\text{ h}$ <sup>[18-19]</sup>。

境内植被覆盖良好,森林覆盖率达 55.5% 以上,以天然林为主,天然林面积占研究区总面积的 45.1%<sup>[18-19]</sup>。森林覆盖率及天然林覆盖率均居全省之冠。同时,研究区水资源极为丰富,约 96% 的面积属于长江流域,其中汉江和嘉陵江均为长江的一级支流,丹江为汉江的一级支流,黄河流域主要分布在研究区东部的商洛市洛南县,其主要河流为洛河<sup>[18]</sup>。土壤类型以黄棕壤为主,面积为  $3.9$  万  $\text{km}^2$ ,占总面积的 56.06%;棕壤约为  $1.36$  万  $\text{km}^2$ ,占总面积的 19.32%;黄褐土、粗骨土和褐土面积相当,其他土壤类型面积较少<sup>[20]</sup>。

### 1.2 研究方法

基于 GIS 平台,采用修正通用土壤流失方程(RUSLE)进行陕南地区 1995—2014 年土壤侵蚀强度动态分析研究,其表达式为:

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

式中: $A$  为土壤侵蚀量 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ;  $R$  为降雨侵蚀力因子 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ;  $K$  为土壤可侵蚀性因子 $[\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)]$ ;  $LS$  为坡长(无量纲)、坡度因子(无量纲);  $C$  为覆盖与管理因子

(无量纲); $P$  为水土保持措施因子(无量纲)<sup>[21]</sup>。

1.2.1 数据来源与预处理 针对 RUSLE 模型的 5 个因子,本研究所用数据主要包括:1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2014 年 5 个时期的 Landsat TM 遥感影像,由国际空间数据共享平台下载,空间分辨率为 30 m×30 m,坐标系统为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_49N,影像时间在 6—10 月,每景影像含云量均小于 10%,数据质量较好,并对遥感影像依据研究区地形图和矢量边界进行配准、校正和裁剪等预处理;DEM 数据,采用地理空间数据云网站提供的研究区 DEM 数据,空间分辨率为 30 m×30 m,坐标系统为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_49N,对获取的 DEM 数据根据研究区矢量边界进行裁剪;土壤类型数据(由陕南地区土壤类型图获得);降雨数据(由陕南地区气象站和国家气象站获得);植被覆盖和土地利用数据等(根据遥感影像提取获得)。

1.2.2 RUSLE 土壤侵蚀模型各因子的确定

(1) 降雨侵蚀力因子( $R$ )  $R$  反映降水产生的径流对土壤造成侵蚀的动力指标,它受降水量、降水强度等综合影响,是降水特性的函数<sup>[5]</sup>。本研究利用陕南地区气象站点日雨量统计资料生成研究区站点矢量数据,以我国气象站发布的日雨量资料为基础,采用章文波等<sup>[22]</sup>提出的降雨侵蚀力计算公式,根据日降雨数据采用半月逐日雨量模型计算降雨侵蚀力。日雨量估算半月侵蚀模型表达式如下:

$$M_i = \alpha \sum_{j=1}^k (D_j)^\beta \tag{2}$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \tag{3}$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \tag{4}$$

式中: $M_i$  表示  $M_i$  表示第  $i$  个半月时段的侵蚀力值 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot /(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ); $\alpha$  和  $\beta$  是模型参数; $k$  表示该半月时段内的天数; $D_j$  表示半月时段内第  $j$  天的日雨量,要求日雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ ,否则以 0 计算; $12 \text{ mm}$  与侵蚀性降雨标准对应; $P_{d12}$  表示日雨量  $12 \text{ mm}$  的日平均雨量  $P_{y12}$  表示日雨量  $12 \text{ mm}$  的年平均雨量<sup>[23]</sup>。利用上述公式计算逐年各半月的降雨侵蚀力,汇总得到年降雨侵蚀力,通过反距离加权法进行插值处理,获得研究区降雨侵蚀因子  $R$  的空间分布。

(2) 土壤可蚀性因子( $K$ )  $K$  是土壤性质中的一个重要因子,它可评价土壤是否易受侵蚀营力破坏,也可反映土壤对侵蚀营力分离和搬运作用的敏感性<sup>[5]</sup>。本研究利用 ArcGIS 软件,通过对陕西省土壤类型图进行地理配准、矢量化处理等获取陕南地区土壤类型数据,采用 Williams 等<sup>[24]</sup>在侵蚀/生产力影响模型(EPIC)中土壤可蚀性因子  $K$  的计算方法。 $K$  因子计算公式如下:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 \text{SAN} \left( 1 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \left( \frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \left( 1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \left( 1.0 - \frac{0.7\text{SN1}}{\text{SN1} + \exp(-5.51 + 22.95\text{SN1})} \right) \tag{5}$$

式中:SAN,SIL,CLA 和  $C$  是砂粒、粉粒、黏粒和有机碳含量(%); $\text{SN1} = 1 - \text{SAN}/100$ 。

通过上述公式计算各土壤类型的  $K$  值,其单位为国际制  $(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ,见表 1,然后将  $K$  值赋于土壤类型图的属性值,进行数据转换成 30 m 栅格大小的 Grid 格式,得到土壤可蚀性  $K$  值的空间分布。

表 1 陕南地区不同土壤 K 值表

土壤类型	$K$ 值	面积/ $\text{hm}^2$	比例/%	土壤类型	$K$ 值	面积/ $\text{hm}^2$	比例/%
暗棕壤	0.287	29133.45	0.41	黄棕壤	0.306	3945208.00	56.06
潮土	0.295	3060.72	0.04	石灰土	0.242	190301.50	2.70
粗骨土	0.251	397665.36	5.65	石质土	0.257	8735.04	0.12
褐土	0.311	375137.82	5.33	水稻土	0.257	279053.90	3.97
黑垆土	0.307	4689.09	0.07	新积土	0.269	3505.95	0.05
黄褐土	0.333	357514.20	5.08	紫色土	0.313	83308.32	1.18
棕壤	0.276	1359819.00	19.32				

(3) 地形因子 $LS$  地形地貌对土壤侵蚀有着重要的影响,RUSLE 模式中斜坡长度因子( $L$ ),坡度因子( $S$ )在不同的区域有变化。本研究采用刘宝元<sup>[25]</sup>通过试验得到的坡度坡长因子计算公式。

坡度因子( $S$ ):是指在其他条件相同的情况下,任意坡度下的单位面积土壤流失量与标准小区坡度下的单位面积土壤流失量之比。计算公式为:

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8\sin\theta - 0.55 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \tag{6}$$

坡长因子( $L$ ):是指标准小区条件下,任意坡长的单位面积的土壤流失量与标准小区条件下单位面积土壤流失量之比。计算公式为:

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.1} \right)^m \tag{7}$$

式中:  $\lambda$  为坡长( $m$ );  $m$  为坡长指数, 根据不同的坡度选取不同的  $m$  值, 其中  $\theta \leq 1^\circ$  则  $m=0.2$ ,  $1^\circ < \theta \leq 3^\circ$  则  $m=0.3$ ,  $3^\circ < \theta \leq 5^\circ$  则  $m=0.4$ ,  $\theta > 5^\circ$  则  $m=0.5$ 。

利用研究区的 DEM 和 ArcGIS 提取出汇水累积量以及坡度, 结合上述公式即可得到研究区的  $LS$  分布。

(4) 植被覆盖与管理因子( $C$ )  $C$  为一定植被覆盖和管理措施下土壤流失量与同等条件下适时翻耕、连续休闲对照地上土壤流失量之比。它是土壤侵蚀力的抑制因子, 起着水土保持的作用。本文采用蔡崇法等<sup>[26]</sup>的  $C$  因子和植被覆盖度之间的回归方程计算  $C$ , 其中植被覆盖度和  $C$  因子的计算公式分别为:

$$NDVI = \frac{Band_4 - Band_3}{Band_4 + Band_3} \quad (8)$$

$$f = \frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_g - NDVI_0} \quad (9)$$

$$C = \begin{cases} 1 & f=0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f & 0 < f \leq 0.783 \\ 0 & f > 0.783 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $Band_4$  为近红外波段;  $Band_3$  为红光波段;  $NDVI$  为植被归一化指数;  $NDVI_0$  为全裸地或无植被情况下的  $NDVI$  取值;  $NDVI_g$  为全植被覆盖地区的  $NDVI$  值;  $f$  为植被覆盖度。

综上, 可求得研究区的植被覆盖和管理因子  $C$  值空间分布。结果表明: 2005 年植被覆盖与管理因子最小, 其次是 2014 年, 这主要是由于 1995—2005 年植被快速恢复, 到 2005 年植被覆盖达到 20 a 最好状态, 之后稍有退化, 2010—2014 年植被覆盖再次缓慢恢复<sup>[27]</sup>。

(5) 水土保持措施因子( $P$ ) 指特定水土保持措施下的土壤流失量与相应未实施该措施的顺坡种植时的土壤流失量的比值<sup>[28]</sup>。其值在  $0 \sim 1$  之间,  $0$  值表示采取水土措施后没有土壤侵蚀发生;  $1$  值表示水土保持措施完全失效<sup>[5]</sup>。参考王晓峰等<sup>[29]</sup>的研究成果, 并结合陕南土地利用状况确定  $P$  值(表 2), 将  $P$  因子值赋予相应的土地利用类型, 得到水土保持因子空间分布结果表明: 2005 年  $P$  值最小, 说明该时期水土保持措施成效明显。

表 2 陕南地区不同土地类型  $P$  因子值

土地利用类型	林地	草地	裸地	水体	建筑用地	农用地
$P$ 值	1	1	0	0	0	0.4

1.2.3 土壤侵蚀强度分级 按照水利部颁布的土壤侵蚀分类分级标准(SL190—2007)<sup>[30]</sup>(表 3)对土壤侵蚀强度进行分级(2009), 得到研究区土壤侵蚀强度

分布图(图 1)。

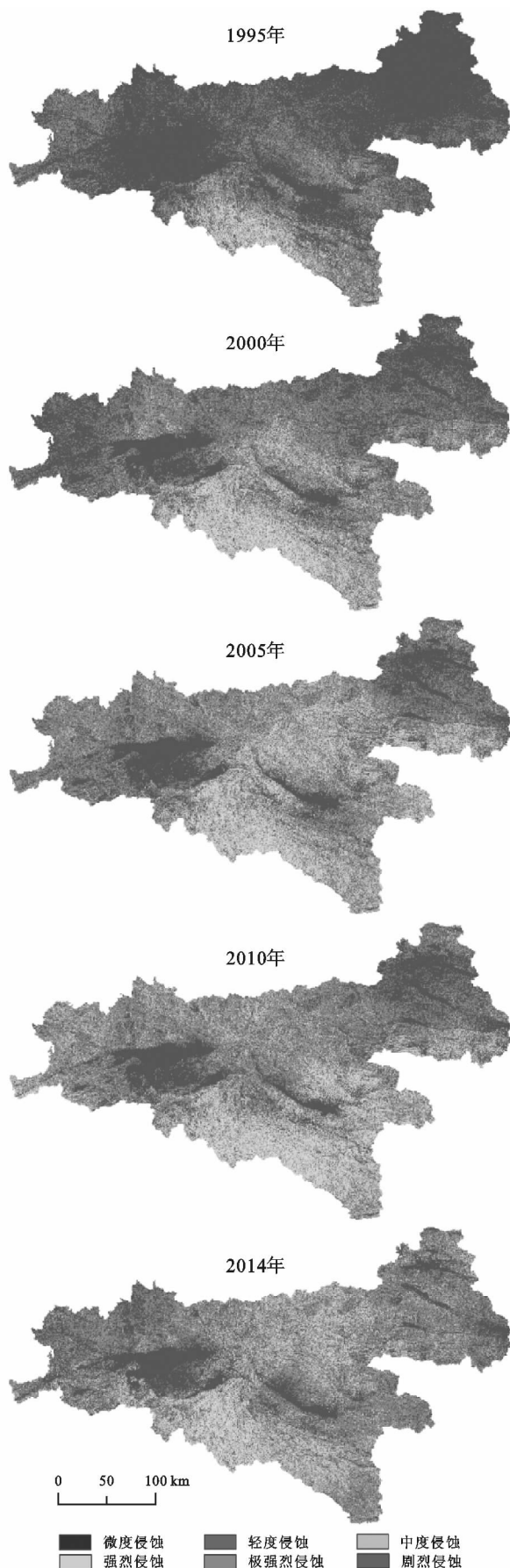


图 1 陕南地区不同年份土壤侵蚀强度分布

表 3 土壤侵蚀强度分级指标

级别	侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
微度侵蚀	<500
轻度侵蚀	500~2500
中度侵蚀	2500~5000
强烈侵蚀	5000~8000
极强烈侵蚀	8000~15000
剧烈侵蚀	>15000

1.2.4 海拔和坡度分级 参考陈志明等<sup>[31]</sup>的地貌类型划分标准,结合研究区海拔分布特征,将陕南地区海拔划分为 5 种类型(附图 1A),即:丘陵(<500 m)、低山(500~800 m)、中山(800~2 000 m)、高中山(2 000~3 000 m)和高山(3 000~5 000 m)。

利用 ArcGIS 软件,在 Spatial Analyst 工具下的表面分析实现研究区坡度的提取,并将坡度分为≤5°,5°~15°,15°~25°,25°~35°,35°~45°,>45°等 6 个等级<sup>[32]</sup>,即:平坡、缓坡、斜坡、陡坡、急坡、险坡(附图 1B)。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀强度的时间变化

研究区 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年和 2014 年的年均土壤侵蚀模数分别为 787.86 t/(km<sup>2</sup>·a),1 362.97 t/(km<sup>2</sup>·a),1 627.75 t/(km<sup>2</sup>·a),1 684.41 t/(km<sup>2</sup>·a),1 571.79 t/(km<sup>2</sup>·a),1995—2010 年增幅为 113.79%,2010—2014 年降幅为 6.69%,可见土壤侵蚀在 1995—2010 年呈现加剧趋势,2010 年之后稍有减缓。

土壤侵蚀类型整体上以微度侵蚀(71.44%~34.83%)和轻度侵蚀(23.64%~45.75%)为主,随时间变化微度侵蚀呈降低趋势,降幅为 51.25%,其他 5 个侵蚀强度等级均呈波动增加趋势(表 4),说明土壤微度侵蚀有向高一强度的侵蚀等级转移的趋势。

为进一步探讨不同等级土壤侵蚀强度随时间内部转移特征,运用面积转移矩阵对 1995—2000 年、2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2014 年 4 个时期不同土壤侵蚀强度面积转移变化进行分析(表 5)。结果表明:1995—2000 年土壤侵蚀在微度、轻度、中度、强烈侵蚀等级上转化明显且向高一级别侵蚀转移,微度侵蚀中 35.29%转化为轻度侵蚀,轻度侵蚀中 35.67%转化为中度侵蚀,中度侵蚀中 33.89%转化为强烈侵蚀,强烈侵蚀中 45.57%转化为极强烈侵蚀。2000—2005 年和 2005—2010 年土壤侵蚀均在微度、轻度、中度侵蚀等级上转化较为明显,微度侵蚀分别有 33.83%和 12.54%转化为轻度

侵蚀,轻度侵蚀分别有 22.97%和 15.15%转化为中度侵蚀,中度侵蚀却有 24.67%和 27.17%转化为轻度侵蚀。2010—2014 年土壤侵蚀在微度、中度、强烈侵蚀等级上转化明显,仅微度侵蚀中 24.60%转化为轻度侵蚀,中度侵蚀和强烈侵蚀均向低一级别侵蚀转移,中度侵蚀中 49.01%转化为轻度侵蚀,强烈侵蚀中 65.68%转化为中度侵蚀。

表 4 陕南地区 1995—2014 年不同土壤侵蚀强度面积比例 %

侵蚀强度	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2014 年
微度	71.44	46.77	34.28	34.26	34.83
轻度	23.64	37.97	43.83	34.26	45.75
中度	4.24	12.71	19.43	20.01	17.20
强烈	0.60	2.12	2.25	2.90	1.93
极强烈	0.07	0.43	0.22	0.40	0.28
剧烈	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01

注:表中的 0 值是由于转化面积比例太小,可忽略不计。

2.2 不同行政区域土壤侵蚀强度的空间分布

叠加分析陕南地区不同时期土壤侵蚀强度分布图与陕南地区行政区划图,获得陕南地区 1995—2014 年各县区土壤侵蚀强度的面积比例(图 2),结果显示:微度和轻度侵蚀在各县区均有分布且分布面积广泛,剧烈侵蚀只有在紫阳和镇巴零星分布(0.01%~0.14%),其他 3 个等级在不同年份的分布特征差异明显。1995 年,中度侵蚀除柞水、丹凤、商州、洛南和汉台区,其他 23 个县区均有分布,其中紫阳和镇巴面积比例较大,分别为 29.46%和 31.45%;强烈侵蚀分布在镇坪、岚皋、平利、紫阳、镇巴、旬阳、西乡和汉滨区 8 个县区,面积比例均较小(0.02%~7.31%);极强烈侵蚀分布在镇坪、岚皋、紫阳、镇巴,面积比例均小于 1.00%。2000 年,中度侵蚀在 28 个县区均有分布,岚皋、紫阳、镇巴的面积比例较大,为 40.50%~45.31%;强烈侵蚀除镇安、柞水、商州和洛南,其他 24 个县区均有分布,紫阳(18.04%)和镇巴(20.71%)的面积比例较大;极强烈侵蚀分布在岚皋、紫阳、镇巴、西乡等 12 个县区,面积比例较少(0.01%~5.47%)。2005 年和 2010 年,中度侵蚀在各县区均有分布,镇巴和岚皋的面积比例较大,分别为 44.29%和 63.84%;强烈侵蚀在商州之外的 27 个县区均有分布,面积比例分别为 0.01%~15.81%和 0.01%~18.81%;极强烈侵蚀均分布在岚皋、紫阳、镇巴、旬阳、山阳等 17 个县区,其中镇巴(2.49%和 4.32%)和紫阳(1.81%和 4.16%)的面积比例较大,其他县区均小于 0.80%。2014 年,中度侵蚀和强烈侵蚀在各个县区均有分布,面积比例分别为 1.38%~42.37%和 0.01%~21.25%,

镇巴的面积比例均最大;极强烈侵蚀分布在岚皋、紫阳、镇巴、西乡等 14 个县区,镇巴的面积比例最大为 4.76%,其他县区均较小(0.01%~0.57%)。

综上所述,1995—2014 年陕南地区土壤侵蚀严重的区域主要分布在中部和大巴山的北部,以紫阳和

镇巴为主,两县平均土壤侵蚀强度分别为 2 935.47 t/(km<sup>2</sup>·a),3 327.45 t/(km<sup>2</sup>·a),属于中度侵蚀。随时间变化,土壤侵蚀呈现 1995—2005 年向东北方向扩散,2005—2010 年向南扩散,2010—2014 年向南和北两端扩散的趋势。

表 5 1995—2000 年不同等级土壤侵蚀面积转移矩阵

								hm <sup>2</sup>
等级		微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	总计
1995 年→2000 年	微度	3126200.31	1771696.53	120892.86	1033.47	16.83	0.27	5019840.27
	轻度	157623.30	882617.67	591645.15	25401.51	1254.69	1.62	1658543.94
	中度	742.95	11535.03	178761.24	100738.17	5408.64	34.20	297220.23
	强烈	73.89	50.04	1230.21	21424.95	19121.94	65.07	41966.10
	极强烈	6.66	0.72	14.58	184.50	4226.49	530.73	4963.68
	剧烈	0.00	0.00	0.00	0.18	5.49	41.85	47.52
	总计	3284647.11	2665899.99	892544.04	148782.78	30034.08	673.74	7022581.74
2000 年→2005 年	微度	2097395.64	1111266.36	74708.73	990.99	43.38	0.36	3284405.46
	轻度	295019.10	1743275.16	612539.46	14992.56	183.06	0.81	2666010.15
	中度	12716.91	220210.29	602648.73	55734.39	1275.12	2.61	892588.05
	强烈	552.69	3622.05	72711.63	68359.59	3532.14	6.93	148785.03
	极强烈	50.85	179.28	2547.36	17529.48	9671.76	55.71	30034.44
	剧烈	1.08	1.80	11.16	60.75	498.06	100.71	673.56
	总计	2405736.27	3078554.94	1365167.07	157667.76	15203.52	167.13	7022496.69
2005 年→2010 年	微度	2092235.31	301657.14	11993.22	140.22	15.12	0.09	2406041.10
	轻度	304356.51	2306807.73	466437.60	1140.75	22.77	0.00	3078765.36
	中度	9829.80	370867.41	872828.01	111248.91	385.56	0.09	1365159.78
	强烈	74.61	876.78	53122.14	88257.60	15325.56	0.27	157656.96
	极强烈	7.83	6.48	103.32	2501.19	12231.81	350.01	15200.64
	剧烈	0.99	0.00	0.00	0.36	9.09	156.15	166.59
	总计	2406505.05	2980215.54	1404484.29	203289.03	27989.91	506.61	7022990.43
2010 年→2014 年	微度	1794835.53	592054.02	19273.14	181.35	27.72	0.09	2406371.85
	轻度	618679.89	1919230.02	437985.72	4214.97	51.57	0.27	2980162.44
	中度	33903.72	688367.88	612205.83	68267.79	1733.31	1.89	1404480.42
	强烈	444.42	11089.80	133510.05	48777.66	9449.55	17.28	203288.76
	极强烈	37.89	178.11	5369.22	14064.21	8149.95	190.53	27989.91
	剧烈	0.99	0.54	4.68	44.64	357.75	98.01	506.61
	总计	2447902.44	3210920.37	1208348.64	135550.62	19769.85	308.07	7022799.99

注:表中的 0 值是由于转化面积太小,可忽略不计。

2.3 不同海拔土壤侵蚀强度的空间分布

基于 ArcGIS 软件平台对不同时期土壤侵蚀强度分布图与陕南地区海拔分级图进行叠加分析,得到不同海拔土壤侵蚀强度分布(表 6),结果表明:不同等级土壤侵蚀随海拔升高整体呈现先增加后降低的趋势,在中山区分布面积最广(53.14%~93.07%),其次是低山区(6.46%~30.15%),丘陵和高山区分布面积均较少(<11.50%),且随时间推移该变化趋势越加明显。随土壤侵蚀级别的升高,各个等级土壤侵蚀所占面积比例变化存在差异。其中,在中山区和高山区均呈现先增加后降低的变化趋势,

中山区的最大值出现在强烈侵蚀或极强烈侵蚀,最小值出现在微度侵蚀,高山区的最大值出现在轻度侵蚀或中度侵蚀,最小值出现在剧烈侵蚀;在低山区则呈现与中山区刚好相反的变化趋势;在丘陵区,1995 年、2010 年、2014 年持续降低,2000 年和 2005 年则先降低后增加,最大值均出现在微度侵蚀,最小值分别出现在剧烈侵蚀和极强烈侵蚀。可见,陕南地区近 20 a 不同海拔梯度上土壤侵蚀分布面积最广、强度最大的区域主要集中在中山区。这主要与中山区人类活动对自然环境破坏较严重以及该区的生态环境脆弱有关<sup>[29]</sup>。

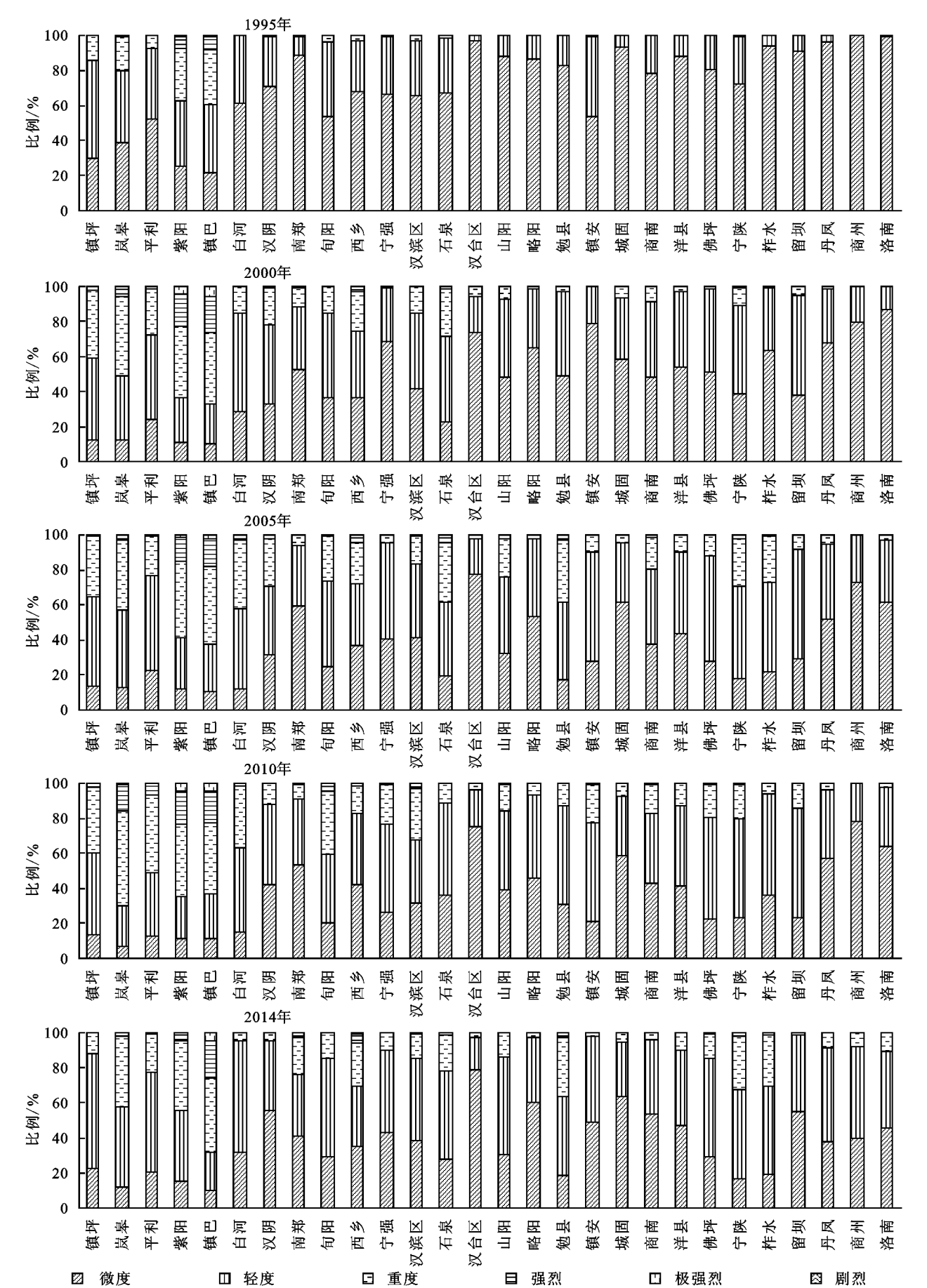


图 2 1995—2014 年陕南地区各县(市)土壤侵蚀强度的面积比例

表 6 陕南地区不同年份不同海拔土壤侵蚀面积比例

年份	海拔/ m	面积/ km <sup>2</sup>	微度		轻度		中度		强烈		极强烈		剧烈	
			面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
1995	丘陵	4259.42	3686.23	7.34	516.72	3.12	51.78	1.74	3.87	0.92	0.66	1.33	0.01	1.32
	低山	15819.70	12314.80	24.53	3087.58	18.62	356.93	12.01	51.02	12.16	7.47	15.05	0.11	22.68
	中山	47910.87	32796.41	65.33	12268.16	73.97	2432.97	81.86	361.76	86.20	41.48	83.57	0.36	75.99
	高中山	2252.21	1405.86	2.80	713.26	4.30	130.54	4.39	3.02	0.72	0.03	0.05	0.00	0.00
	高山	0.16	0.15	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	合计	70242.35	50203.45	100.00	16585.73	100.00	2972.22	100.00	419.66	100.00	49.64	100.00	0.48	100.00
2000	丘陵	4259.99	2914.27	8.87	1013.99	3.80	305.94	3.43	21.90	1.47	3.55	1.18	0.08	1.23
	低山	15820.13	8371.38	25.48	5518.47	20.70	1697.64	19.02	188.65	12.68	42.41	14.12	1.08	15.96
	中山	47914.43	20759.79	63.19	19112.54	71.68	6527.13	73.12	1250.56	84.04	253.47	84.38	5.58	82.81
	高中山	2254.61	809.67	2.46	1019.07	3.82	396.27	4.44	26.98	1.81	0.96	0.32	0.00	0.00
	高山	0.16	0.11	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	合计	70249.31	32855.22	100.00	26664.12	100.00	8926.97	100.00	1488.08	100.00	300.40	100.00	6.74	100.00
2005	丘陵	4259.87	2768.55	11.50	1037.44	3.37	415.48	3.04	36.11	2.29	2.37	1.56	0.04	2.15
	低山	15820.06	7257.65	30.15	5802.90	18.85	2496.16	18.28	240.73	15.27	22.01	14.48	0.28	17.02
	中山	47910.72	13484.37	56.03	22776.32	73.97	10245.62	75.04	1275.69	80.91	126.88	83.45	1.35	80.67
	高中山	2252.56	557.55	2.32	1175.43	3.82	495.55	3.63	24.24	1.54	0.79	0.52	0.00	0.16
	高山	0.16	0.06	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	合计	70243.36	24068.17	100.00	30792.18	100.00	13652.81	100.00	1576.77	100.00	152.04	100.00	1.67	100.00
2010	丘陵	4259.61	2653.15	11.02	997.96	3.35	537.04	3.82	66.20	3.26	5.31	1.90	0.07	1.31
	低山	15820.04	7256.58	30.15	5452.52	18.30	2733.28	19.46	334.05	16.43	41.50	14.83	0.84	16.52
	中山	47910.48	13662.15	56.77	22206.92	74.51	10209.43	72.69	1588.35	78.13	231.48	82.70	4.16	82.15
	高中山	2252.30	495.22	2.06	1145.51	3.84	565.18	4.02	44.30	2.18	1.61	0.58	0.00	0.02
	高山	0.16	0.05	0.00	0.10	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	合计	70242.60	24067.15	100.00	29803.00	100.00	14044.93	100.00	2032.89	100.00	279.90	100.00	5.07	100.00
2014	丘陵	4259.95	2888.93	11.80	1119.43	3.49	240.73	1.99	10.45	0.77	0.30	0.15	0.00	0.15
	低山	15820.62	7928.40	32.37	5961.90	18.56	1777.76	14.71	139.05	10.26	13.39	6.77	0.20	6.46
	中山	47919.14	13015.44	53.14	23868.14	74.31	9669.93	80.01	1179.51	86.99	182.50	92.28	2.88	93.07
	高中山	2255.41	659.15	2.69	1169.11	3.64	397.99	3.29	26.93	1.99	1.59	0.80	0.01	0.32
	高山	0.16	0.12	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	合计	70255.28	24492.05	100.00	32118.61	100.00	12086.40	100.00	1355.94	100.00	197.78	100.00	3.09	100.00

2.4 不同坡度土壤侵蚀强度的空间分布

叠加分析不同时期土壤侵蚀强度分布图与陕南地区坡度分级图,获得不同坡度各土壤侵蚀等级的分布图(表 7),结果表明:陕南地区不同等级的土壤侵蚀在不同坡度范围的分布特征差异明显。5 个不同时期的微度侵蚀均主要分布在缓坡(5°~15°)和斜坡(15°~25°),其所占面积比例分别为 29.33%~50.81%和 25.99%~38.24%;轻度侵蚀主要分布在斜坡(15°~25°)和陡坡(25°~35°),其面积比例分别为 25.30%~49.66%和 30.98%~45.28%;中度侵蚀和强烈侵蚀主要分布在陡

坡(25°~35°)和急坡(35°~45°),其面积比例分别为 25.38%~48.63%和 26.98%~47.44%;极强烈侵蚀主要分布在急坡(35°~45°)和险坡(>45°),其面积比例分别为 37.07%~50.82%和 34.25%~58.34%;剧烈侵蚀主要分布在险坡(>45°),其面积比例高达 89.93%~98.05%,且平坡(<5°)无剧烈侵蚀。可见,研究区近 20 a 来的土壤侵蚀强度分布整体上表现为坡度越大,土壤侵蚀等级越高,土壤侵蚀越严重。中度及以上侵蚀主要分布在陡坡(25°~35°)、急坡(35°~45°)和险坡(>45°),即坡度大于 25°土壤侵蚀明显加剧。



表 7 陕南地区不同年份不同坡度土壤侵蚀面积比例

年份	坡度/ (°)	面积/ km <sup>2</sup>	微度		轻度		中度		强烈		极强烈		剧烈	
			面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
1995	平坡	4368.52	4361.25	8.69	6.96	0.04	0.30	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	缓坡	15235.52	14824.43	29.54	397.27	2.39	13.58	0.46	0.23	0.06	0.01	0.02	0.00	0.00
	斜坡	23851.01	19283.57	38.43	4154.16	25.02	407.36	13.66	5.85	1.39	0.06	0.12	0.00	0.19
	陡坡	18900.56	9911.85	19.75	7656.49	46.11	1215.36	40.77	115.74	27.46	1.11	2.23	0.00	0.38
	急坡	6693.91	1711.45	3.41	3728.08	22.45	1018.53	34.16	219.01	51.96	16.83	33.72	0.01	1.51
	险坡	1192.84	90.77	0.18	662.86	3.99	326.19	10.94	80.64	19.13	31.91	63.92	0.47	97.92
	合计	70242.35	50183.33	100.00	16605.83	100.00	2981.32	100.00	421.49	100.00	49.92	100.00	0.48	100.00
2000	平坡	4369.69	4317.48	13.14	47.85	0.18	4.10	0.05	0.24	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00
	缓坡	15239.49	13267.35	40.38	1823.35	6.84	142.70	1.60	5.75	0.39	0.33	0.11	0.01	0.09
	斜坡	23852.57	11742.88	35.74	10494.11	39.35	1490.19	16.69	121.48	8.17	3.88	1.29	0.03	0.37
	陡坡	18900.77	3309.53	10.07	10827.23	40.59	4139.86	46.36	570.26	38.36	53.77	17.91	0.12	1.72
	急坡	6693.95	207.69	0.63	3169.07	11.88	2621.46	29.35	549.47	36.96	145.63	48.52	0.63	9.31
	险坡	1192.84	8.90	0.03	309.96	1.16	532.13	5.96	239.37	16.10	96.50	32.15	5.99	88.50
	合计	70249.31	32853.82	100.00	26671.58	100.00	8930.44	100.00	1486.57	100.00	300.13	100.00	6.76	100.00
2005	平坡	4368.96	4325.81	17.97	41.29	0.13	1.81	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	缓坡	15236.52	12714.87	52.81	2452.13	7.96	68.64	0.50	0.85	0.05	0.04	0.02	0.00	0.00
	斜坡	23850.85	6409.86	26.62	15549.18	50.51	1867.97	13.69	23.62	1.50	0.21	0.14	0.00	0.11
	陡坡	18900.35	595.52	2.47	11140.20	36.19	6783.30	49.70	376.29	23.86	5.03	3.30	0.00	0.22
	急坡	6693.86	27.87	0.12	1552.83	5.04	4288.89	31.42	770.54	48.86	53.71	35.28	0.03	1.67
	险坡	1192.83	3.21	0.01	50.88	0.17	638.21	4.68	405.62	25.72	93.26	61.25	1.64	98.01
	合计	70243.36	24077.14	100.00	30786.51	100.00	13648.82	100.00	1576.97	100.00	152.26	100.00	1.67	100.00
2010	平坡	4368.74	4321.38	17.96	45.30	0.15	1.98	0.01	0.08	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
	缓坡	15236.10	12496.26	51.93	2630.22	8.83	107.91	0.77	1.61	0.08	0.09	0.03	0.00	0.02
	斜坡	23850.76	6424.51	26.70	14686.07	49.28	2666.83	18.97	72.42	3.56	0.94	0.34	0.00	0.07
	陡坡	18900.34	771.10	3.20	10661.92	35.78	6720.18	47.80	718.20	35.30	28.91	10.33	0.03	0.50
	急坡	6693.83	45.37	0.19	1716.81	5.76	3876.43	27.57	919.06	45.17	136.00	48.59	0.17	3.33
	险坡	1192.82	3.12	0.01	62.32	0.21	685.16	4.87	323.38	15.89	113.95	40.71	4.88	96.08
	合计	70242.60	24061.74	100.00	29802.64	100.00	14058.49	100.00	2034.76	100.00	279.90	100.00	5.08	100.00
2014	平坡	4370.22	4336.30	17.72	32.17	0.10	1.67	0.01	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	缓坡	15242.45	12890.29	52.68	2278.46	7.09	72.23	0.60	1.40	0.10	0.07	0.04	0.00	0.00
	斜坡	23854.49	6215.34	25.40	16149.48	50.25	1455.05	12.03	34.08	2.51	0.54	0.27	0.01	0.20
	陡坡	18901.23	944.62	3.86	11790.36	36.69	5790.44	47.89	366.41	27.03	9.39	4.75	0.01	0.47
	急坡	6694.02	75.90	0.31	1802.43	5.61	4141.83	34.25	599.19	44.20	74.60	37.71	0.07	2.13
	险坡	1192.86	5.53	0.02	86.05	0.27	630.46	5.21	354.59	26.15	113.23	57.23	3.00	97.20
	合计	70255.28	24467.97	100.00	32138.93	100.00	12091.69	100.00	1355.75	100.00	197.84	100.00	3.09	100.00

3 结论与讨论

土壤侵蚀会引起土壤退化、土地生产力降低、泥石流等山地灾害以及河道淤积而导致洪涝灾害等,严重制约着生态经济的可持续发展<sup>[2-3]</sup>。土壤侵蚀时空变化趋势是其自身侵蚀状态、自然条件以及邻域转换

规则共同作用决定<sup>[33]</sup>。加强土壤侵蚀时空动态变化研究对于区域水土流失治理以及深入指导水土保持建设具有重要意义。本研究综合运用“3S”技术和 RUSLE 模型,对陕南地区 1995—2014 年近 20 a 间不同等级土壤侵蚀的时间变化和内部转移特征以及空间分布格局进行分析,揭示了陕南地区土壤侵蚀的

变化规律和分布特征。研究显示,1995年、2000年、2005年、2010年、2014年的土壤侵蚀模数分别为 $787.86 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , $1\,362.97 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , $1\,627.75 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , $1\,684.41 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , $1\,571.79 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,即土壤侵蚀在1995—2010年呈加剧趋势,2010年之后稍有减缓。土壤侵蚀类型整体上以微度侵蚀[ $<500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]和轻度侵蚀[ $500 \sim 2\,500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]为主,随时间变化微度侵蚀呈降低趋势,即有向高一等级别侵蚀的转移,其他5个等级侵蚀均呈波动增加趋势。

陕南地区地处秦巴土山区,水土流失分布广,侵蚀强度大,侵蚀方式复杂多样,人类不合理活动引起的土壤侵蚀日益加剧<sup>[34]</sup>。近20 a来该地区土壤侵蚀严重的区域主要分布在中部和大巴山的北部,以紫阳县和镇巴县为主,两县平均土壤侵蚀强度分别为 $2\,935.47 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , $3\,327.45 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,属于中度侵蚀。赵佐平、贺素娣等<sup>[34-35]</sup>的研究也发现:安康市紫阳县的土壤侵蚀模数[ $2\,671 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]和土壤侵蚀量(588.79万t)均较高,而处在秦巴一带的汉中市镇巴县,水土流失强度基本上也在中度以上,也是重力侵蚀频繁发生区域,土壤侵蚀较为严重。这除了与不可避免的人类活动的不断扩大有关外,陕西汉江谷地及水文过程改变引起的暴雨频次和年暴雨总量的增加将会加剧该地区水土流失<sup>[34,36]</sup>。已有研究表明:陕南地区近50 a紫阳县和镇巴县夏季暴雨日数增加最多,即小雨减少暴雨增加,暴雨灾害趋于严重<sup>[37]</sup>,这也是导致该地区土壤侵蚀严重的重要原因。另外,随时间变化,陕南地区土壤侵蚀呈现1995—2005年向东北方向扩散,2005—2010年向南扩散,2010—2014年向南和北两端扩散的动态趋势。

不同等级土壤侵蚀随海拔升高整体呈先增加后降低的趋势,这与王志杰等<sup>[15]</sup>的研究结果基本一致。具体表现为:海拔在800~2 000 m的中山区分布面积最广,侵蚀强度大,其次是低山区(500~800 m),丘陵和高山区分布面积均较少,侵蚀强度低。而90年代贺素娣等<sup>[17,35]</sup>的研究结果却显示:陕南地区土壤侵蚀主要发生在600~1 200 m的低山丘陵区,随着海拔增加土壤侵蚀强度呈现有规律的减弱趋势。说明陕南地区土壤侵蚀严重区域出现了由低山丘陵区逐渐向中山区转移的变化趋势。这与人类活动范围的不断扩大关系密切。近年来,随着陕南地区社会经济的不断发展,中山区人类活动日益频繁,人口密度较大,乱垦滥伐现象严重,森林基本破坏殆尽,植被

稀疏,坡耕地广布,加之地形起伏度较大,降雨多且集中,土壤侵蚀严重<sup>[29]</sup>。而高山区不仅植被覆盖良好,植被覆盖度75%以上,人类活动也少,几乎无土壤侵蚀发生。但众所周知,陕南地区的秦岭是我国森林保护的生态屏障区,中山区已经接近秦岭腹地,中山区的森林植被一旦被破坏,整个陕南地区乃至全国的生态环境恶化将十分严重。因此,加强中山区的生态环境保护力度,对于陕南地区的整体发展以及我国生态屏障区的保护有着重要作用。

地形决定着地面物质与能量的形成和再分配,是影响水土流失的重要因素之一。而坡度是地形因子中对坡面土壤侵蚀影响最大的因素<sup>[38]</sup>。本研究发现在不同坡度带上,坡度越大,土壤侵蚀等级越大,土壤侵蚀越严重,且坡度 $>25^\circ$ 时土壤侵蚀明显加剧,说明土壤侵蚀过程中存在临界坡度值( $25^\circ$ )。这与我国其他地区的研究结论基本一致<sup>[15,29,35,39]</sup>。但本研究还显示陕南地区土壤侵蚀主要是以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,而中度及以上侵蚀主要分布在陡坡( $25^\circ \sim 35^\circ$ )、急坡( $35^\circ \sim 45^\circ$ )和险坡( $>45^\circ$ ),因此,坡度 $>25^\circ$ 的区域应是陕南地区今后土壤侵蚀防治的重点区域,加强该区域的土壤侵蚀治理措施将会大量减少土壤侵蚀面积与土壤侵蚀总量。

陕南地区1995—2014年土壤侵蚀整体以微度和轻度侵蚀为主,强烈及以上侵蚀等级分布面积较小,且主要分布在坡度大于 $25^\circ$ 的中山区,尤其是紫阳、镇巴等县区,土壤侵蚀较为严重。今后应将陕南地区作为生态环境保护和水土保持的重点区域,加强植被恢复与建设,改善生态环境,控制水土流失,以保障南水北调中线调水工程的安全运行和工程沿线区域的生态环境质量。

#### 参考文献:

- [1] 王占礼. 中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 32-36.
- [2] 姜琳, 边金虎, 李爱农, 等. 岷江上游2000—2010年土壤侵蚀时空格局动态变化[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 18-25, 35.
- [3] 冯凌, 张红, 刘光磊, 等. 汾河源头地区土壤侵蚀时空变化及其空间自相关分析[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 93-99.
- [4] 余芬. 石台县土壤侵蚀空间分布格局及其与环境因子的关系研究[D]. 安徽芜湖: 安徽师范大学, 2010.
- [5] 查良松, 邓国徽, 谷家川. 1992—2013年巢湖流域土壤侵蚀动态变化[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1708-1719.

- [6] 周正朝,上官周平. 土壤侵蚀模型研究综述[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 52-56.
- [7] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1-9.
- [8] 卜兆宏, 孙金庄, 周伏建, 等. 水土流失定量遥感方法及其应用的研究[J]. 土壤学报, 1997, 34(3): 235-245.
- [9] 刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [10] Laflen T M, Lwonard T L, Foster G R. WEPP: a new of erosion generation prediction technology[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46(1): 34-38.
- [11] Baffalt C, Nearing M A, Nicks A D. Impact of gligen parameters on wepp-predicted average annual soil loss [J]. Transactions of the Asae, 1996, 39(2): 447-457.
- [12] 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.
- [13] 程琳, 杨勤科, 谢红霞, 等. 基于 GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 61-66.
- [14] 潘竞虎, 文岩. 基于 RUSLE-SMA 的黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀评价及景观格局分析: 以庆城县蔡家庙流域为例[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 436-444.
- [15] 王志杰, 苏嫻, 王志泰. 基于 GIS 的汉江上游文川河流域土壤侵蚀特征研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(1): 199-205.
- [16] 惠振德, 孙虎, 李晓玲. 陕南土壤侵蚀特征及时空分布规律[J]. 水土保持通报, 1997, 14(2): 1-6.
- [17] 高全成. 汉江流域生态治理存在的问题及对策[J]. 陕西农业科学, 2012, 58(3): 192-195.
- [18] 杨楠, 王小文, 卓悦. 陕南地区生态环境状况综合评价及对策[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 190-194.
- [19] 卓悦, 王小文, 徐杰峰. 陕南地区土地利用与生态承载力动态变化分析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(3): 1266-1270.
- [20] 刘振川, 宿华. 陕西地方志丛书. 汉中市志[M]. 北京: 中共中央党校出版社, 1994.
- [21] Wischmeier W H, Smith D. Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning Agricultural Handbook[M]. Us Department of Agriculture, 1978.
- [22] 章文波, 谢云, 刘宝元. 中国降雨侵蚀力空间变化特征[J]. 山地学报, 2003, 21(1): 33-40.
- [23] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- [24] Williams J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case-history [J]. Philosophical Transaction of the Royal Society B, 1990, 329(1255): 421-428.
- [25] 刘宝元. 西北黄土高原地区土壤侵蚀预报模型开发项目研究成果报告[R]. 北京: 水利部水土保持监测中心, 2006.
- [26] 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.
- [27] 苏嫻, 王志杰. 基于遥感与 GIS 的陕南地区近 20 年植被覆盖时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 250-256.
- [28] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13.
- [29] 王晓峰, 常俊杰, 余正军, 等. 基于 RUSLE 的土壤侵蚀量研究: 以南水北调中线陕西水源区为例[J]. 自然科学学报, 2010, 40(3): 545-549.
- [30] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准 (SL190—2007)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [31] 陈志明. 论中国地貌图的研制原则、内容与方法[J]. 地理学报, 1993, 48(2): 105-113.
- [32] 刘菊, 郑智礼, 孙艳焕. 基于 DEM 的坡度提取与分析[J]. 山西水土保持科技, 2013(3): 12-14.
- [33] 林晨, 周生路, 吴绍华. 基于优化 GeoCA 模型的土壤侵蚀时空变化模拟: 以福建省长汀县为例[J]. 地理科学进展, 2012, 31(7): 911-920.
- [34] 赵佐平, 闫莎, 同延安, 等. 汉江流域上游生态环境现状及治理措施[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 32-36.
- [35] 贺素娣. 汉江流域水土流失特点及防治对策[J]. 长江流域资源与环境, 1997, 6(3): 271-276.
- [36] 王星, 李占斌, 李鹏, 等. 陕西省丹江流域土壤侵蚀经济损失分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(9): 214-220.
- [37] 王晓玲. 近 50 年陕南、关中降水年际变化特征[J]. 陕西气象, 2012(3): 18-21.
- [38] 赖奕卡. 坡面土壤侵蚀影响因子研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2008, 20(1): 12-16.
- [39] 柴宗新. 西南地区水土流失区划[J]. 山地研究, 1995, 13(2): 121-127.