

## 陕西省榆林市土壤侵蚀动态演变及预测

徐云环<sup>1,2</sup>, 李景宜<sup>1,2\*</sup>, 任冲<sup>1,2</sup>, 同英杰<sup>1,2</sup>, 白星亮<sup>1,2</sup>, 马力<sup>1,2</sup>, 马晓武<sup>1,2</sup>

(1. 宝鸡文理学院地理与环境学院, 陕西宝鸡 721013; 2. 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西宝鸡 721013)

**摘要** 为了研究退耕还林后黄土高原地域土壤侵蚀的变化,在 ArcGIS 和 ENVI 软件中,利用土地利用、降雨、地形和植被覆盖度数据,在通用的土壤侵蚀模型的基础上,结合中国土壤流失方程,计算出陕西省榆林市 1988—2013 年土壤侵蚀模数,运用马尔科夫转移矩阵对 1988—2013 年土壤侵蚀变化趋势进行了预测分析,并利用空间分析方法进一步探讨了土壤侵蚀强度空间变化与坡度、土地利用类型等地形因子间的关系。结果表明:1988—2013 年榆林市总体土壤侵蚀平均模数稳定,但在 2000 年和 2001 年出现明显差异,2000 年土壤侵蚀平均模数达到最小值,2001 年土壤侵蚀平均模数达到最大值。1988—2013 年榆林市土壤侵蚀状况明显改善,平均土壤侵蚀由 1988 年 4 368.83 t/(km<sup>2</sup>·a) 减少为 2013 年 2 345.97 t/(km<sup>2</sup>·a),相应的土壤流失总量从 175.94×10<sup>6</sup> t 减少到 68.96×10<sup>6</sup> t。全市微度侵蚀面积增加,其他侵蚀等级转移到剧烈侵蚀的百分比均不足 1%。根据马尔科夫模型预测,未来 40 年榆林市土壤侵蚀状况逐渐减轻,微度土壤侵蚀面积逐渐增加,其他侵蚀等级的面积持续减少。

**关键词** RUSLE; 土壤侵蚀; 马尔科夫模型; 动态变化; 榆林市

中图分类号 S157 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)13-0063-07

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.13.019



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Dynamic Evolution and Predictions of Soil Erosion in Yulin City, Shaanxi Province

XU Yun-huan<sup>1,2</sup>, LI Jing-yi<sup>1,2</sup>, REN Chong<sup>1,2</sup> et al (1. College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721013; 2. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating, Baoji, Shaanxi 721013)

**Abstract** In order to study the changes of soil erosion in the Loess Plateau Region after returning farmland to forest project, using the rainfall, land use, topography and vegetation coverage data to combine Chinese Soil Loss Equation based on the general soil erosion model RUSLE. The loss equation was used to calculate soil erosion modulus from 1988 to 2013 in Yulin City, Shaanxi Province. The Markov transition matrix was used to predict the soil erosion trends from 1988 to 2013, using GIS spatial analysis method to further explore relationship between spatial variation of soil erosion intensity and topographic factors such as slope and land use type. The research showed that the soil erosion average module was generally smooth in Yulin City from 1988 to 2013, but there were jumpy inflection points in 2000 and 2001, the minimum value in 2000 and the maximum value in 2001. The soil erosion situation was improved significantly from 1988 to 2013 in Yulin City, the average soil erosion was decreased from 4 368.83 t/(km<sup>2</sup>·a) in 1988 to 2 345.97 t/(km<sup>2</sup>·a) in 2013, and the corresponding total soil loss was reduced from 175.94×10<sup>6</sup> tons to 68.96×10<sup>6</sup> tons. The city's slightly eroded area increased, and the percentage of other erosion levels shifted to severe erosion was less than 1%. According to the Markov model, soil erosion in Yulin City will gradually decrease in the next 40 years, the area of slightly soil erosion will gradually increase, and the area of other erosion grades will continue to decrease.

**Key words** RUSLE; Soil erosion; Markov Model; Dynamic change; Yulin City

黄土高原是全国土壤侵蚀最为严重的地区,总面积 64 万 km<sup>2</sup>,土壤侵蚀面积 39 万 km<sup>2</sup>,土壤侵蚀模数 ≥ 15 000 t/(km<sup>2</sup>·a) 的剧烈水蚀面积 3.67 万 km<sup>2</sup>,占全国同类面积的 89%<sup>[1]</sup>。陕西省榆林市是黄土高原水土流失核心地区,严重的土壤侵蚀使降水流失、土壤干旱,加剧生态环境恶化;环境日益恶化,植被成长不良,土壤失去保护,侵蚀加剧,如此重复恶性循环<sup>[2]</sup>。为了治理水土流失,改善自然环境,近年来许多学者做了大量相关研究。江忠善等<sup>[3]</sup>根据我国土壤侵蚀的适应性,在加入浅沟侵蚀因子的基础上,利用土壤侵蚀模型对中国坡面水蚀预报模型进行研究;张岩等<sup>[4]</sup>研究了不同植被类型对水土流失的影响;Wu 等<sup>[5]</sup>对中国黄土高原易侵蚀流域的土壤侵蚀变化进行追踪研究。

土壤侵蚀一般使用经验和物理模型,物理模型参数较多,但适用范围有限<sup>[6]</sup>。随着学科的发展,处理土壤侵蚀模型问题常常借助 GIS 技术,学者们对黄土高原王家沟、阳沟小流域<sup>[7-8]</sup>和延河大流域<sup>[9]</sup>进行了土壤侵蚀的研究。

RUSLE 模型(Revised Universal Soil Loss Equation)<sup>[10]</sup>:

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

式(1)中,  $A$  为土壤流失量[t/(km<sup>2</sup>·a)];  $f$  为综合转换常数;  $R$  为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h)];  $L$  为坡长因子,无量纲;  $S$  为坡度因子,无量纲;  $K$  为土壤可蚀性因子[t·h/(MJ·mm)];  $C$  为植被覆盖与管理因子,无量纲;  $P$  为水土保持措施因子,无量纲。

我国黄土高原地区考虑浅沟侵蚀对坡面侵蚀产沙的重要影响,而模型不太适用于黄土高原地区坡面侵蚀的研究。该研究引入浅沟侵蚀因子  $G^{[3]}$ ,建立基于 RUSLE 模型的坡面土壤流失预报模型  $A=f \cdot R \cdot L \cdot S \cdot K \cdot C \cdot P \cdot G^{[3]}$ ,结合 RS、GIS 技术计算了陕西省榆林市 1988、2000、2013 年土壤侵蚀模数,并利用马尔科夫模型预测了未来土壤侵蚀变化趋势。

## 1 材料与方法

**1.1 研究区概况** 榆林市地处于陕西省最北部,西邻甘肃、宁夏,北连内蒙古,东隔黄河与山西相望,南与陕西省延安市接壤,地跨 36°57'~39°36'N,107°28'~110°25'E,处于黄土高原和毛乌素沙地交界处,是黄土高原与内蒙古高原的过渡区。榆林市行政区划图形似三角形,总面积 43 578 km<sup>2</sup>,约占陕西省 21%。地貌大致分为风沙草滩区、黄土丘陵沟壑区、梁状

**基金项目** 陕西省科技厅项目(2017JM4033);陕西省教育厅重点项目(14JJS009)。

**作者简介** 徐云环(1993—),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,研究方向:资源环境地理信息系统。\*通信作者,博士,从事区域环境风险评估与区划研究。

**收稿日期** 2019-10-11; **修回日期** 2019-10-24

低山丘陵区三大类。该区域气候属暖温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温 10℃,年平均降水量 400 mm 左右<sup>[11]</sup>,境内不但有强烈的水蚀,而且有着剧烈的风蚀,因此是黄河中游土壤侵蚀最为严重的地域<sup>[12]</sup>。

## 1.2 数据与方法

**1.2.1 数据来源。**①陕西省 1988、2000 和 2013 年 1:10 万土地利用类型数据;②土壤数据来源于陕西省第二次土壤普查数据集和世界土壤数据库的中国土壤数据集(v1.1)(http://westdc.westgis.ac.cn);③来源于中国气象共享网(http://cdc.cma.gov.cn/)的榆林、神木、靖边、绥德、横山日降雨数据,黄土高原科学数据中心(http://loess.data.ac.cn)的其余 20 个气象站点日降雨资料;④来源于地理空间数据云的分辨率为 30 m 的 DEM 数据和 2000—2013 年分辨率为 250 m 的 NDVI 数据。

**1.2.2 研究方法。**基于 GIS 平台,采用坡面土壤流失预报模型  $A=f \cdot R \cdot L \cdot S \cdot K \cdot C \cdot P \cdot G$ <sup>[3]</sup> 进行榆林市 1988—2013 年土壤侵蚀强度动态分析研究,模型中各因子的确定如下。

**1.2.2.1  $f$  值选取。** $f$  为转换常数,使得最后计算的  $A$  能符合我国的土壤流失情况,我国选用的单位为  $t/(km^2 \cdot a)$  的转换常数为 224.42。

**1.2.2.2 降雨侵蚀力  $R$  因子的确定。**日降雨量超过 12 mm 会发生侵蚀,所以被称为降雨侵蚀<sup>[13]</sup>。运用公式计算降雨侵蚀力:

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

式(2)中, $M_i$  为第  $i$  个半月的降雨侵蚀力值 [ $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)$ ];  $D_j$  是半个月第  $j$  天降雨量,称为侵蚀性降雨的降雨量,谢云等<sup>[14]</sup>在对降雨标准的研究中,要求使  $D_j \geq 12$  mm,若  $\leq 12$  mm 计为 0; $k$  是研究期内半个月的时段数,将每个月 15 d 前视为一个半月时段,剩下为另一个半月时段,全年合计 24 个时段; $\alpha$  和  $\beta$  为模型参数<sup>[15]</sup>,其计算公式为:

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (3)$$

$$\alpha = 21.586 \times \beta^{-7.1891} \quad (4)$$

式(3)中, $P_{d12}$  表示日降雨量  $\geq 12$  mm 的日平均降雨量; $P_{y12}$  表示年平均降雨量。通过对降雨侵蚀力因子计算汇总得出结果(图 1)。

**1.2.2.3 土壤可蚀性  $K$  因子的确定。**土壤可蚀性是土壤自身的抗冲蚀能力。Wang 等<sup>[16]</sup>对比分析了模型、诺漠方程、几何平均粒径模型等,经过研究发现,几何平均粒径结合有机质模型最接近陕西地区真实  $K$  值,计算公式为:

$$Dg = \exp(0.01 \times \sum f_i \ln m_i) \quad (5)$$

$$K = 0.0364 - 0.0013 \times [\ln(OM/Dg) - 5.6706]^2 - 0.015 \times \exp[-28.9589(\log(Dg) + 1.827)]^2 \quad (6)$$

式(5)(6)中, $Dg$  为平均几何粒径(mm); $f_i$  为第  $i$  粒径等级的百分含量(%); $m_i$  为该粒径等级中粒径最大值和粒径最小值的算数平均值;OM 为有机质百分比含量。

**1.2.2.4 坡长  $L$  因子与坡度  $S$  因子的确定。**LS 因子是地形状况对土壤侵蚀的影响,在区域尺度下,一般 LS 因子利用

DEM 计算。汪邦稳等<sup>[17]</sup>利用修正算法在黄土高原地区通过 DEM 提取 LS 因子值,并对其准确性进行了验证。该研究将采用该算法。

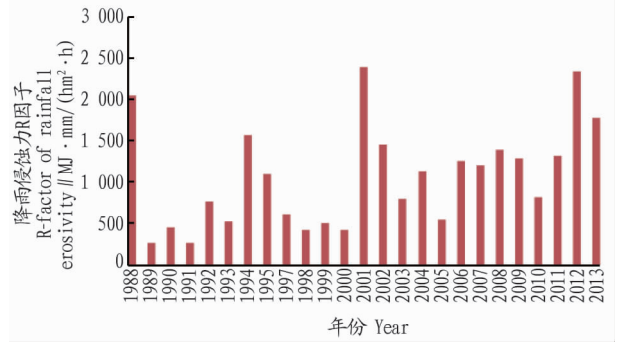


图 1 1988—2013 年降雨侵蚀力 ( $R$  因子) 统计

Fig. 1 Statistical graph ( $R$ -factor) of rainfall erosivity from 1988 to 2013

坡度  $S$  因子修正后的算法:

$$S = \begin{cases} 10.8 \times \sin([\text{slope}]) + 0.036 & [\text{slope}] < 5.1428 \\ 16.8 \times \sin([\text{slope}]) - 0.5 & 5.1428 \leq [\text{slope}] \leq 14.0362 \\ 2.19 \times \sin([\text{slope}]) - 0.96 & [\text{slope}] \geq 14.0362 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, $S$  为坡度因子;  $[\text{slope}]$  为坡度的弧度形式。

坡长  $L$  因子的算法:

$$\begin{cases} L = (\lambda/22.1)^m \\ m = \beta/(\beta+1) \\ \beta = (\sin([\text{slope}])/0.0896)/(3.0 \times \sin([\text{slope}])^8) + 0.56 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, $L$  为坡度因子;  $[\text{slope}]$  为坡度的弧度形式; $m$  为坡长指数; $\lambda$  为水平坡长(m); $\beta$  为细沟和细沟间侵蚀的比例。

**1.2.2.5 植被覆盖与管理  $C$  因子的确定。**植被覆盖与管理  $C$  因子反映了植被、作物等覆盖与管理方法对土壤侵蚀的影响。在黄土高原地区,由于黄土的易蚀性,在裸露的地区极易发生土壤流失,因此,植被覆盖成为预测和评价土壤流失中必不可少的因子<sup>[18]</sup>。当  $C=0$  时,表示没有发生土壤侵蚀,当  $C=1$  时,表示抑制作用完全失效。该研究根据马超飞等<sup>[19]</sup>、蔡崇法等<sup>[20]</sup>计算获得的成果,汇总黄土高原各类土地植被覆盖度,具体如下:耕地为 0.31,林地为 0.006,草地为 0.06,水域、城乡、工矿、居民用地为 0,未利用地、裸地为 0,2000 年以前均按此赋值求得。2000 年以后  $C$  采用的算法是参考蔡崇法等<sup>[20]</sup>研究提出的计算因子的算法,即与植被、作物覆盖度有关:

$$C = \begin{cases} 1 & c = 0 \\ 0.6508 - 0.3436lgc & 0 < c \leq 78.3\% \\ 0 & c > 78.3\% \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中, $c$  为植被覆盖度(%),计算  $c$  参照谭炳香等<sup>[21]</sup>的算法,公式:

$$c = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}) / (\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}) \quad (10)$$

式(10)中,NDVI 为归一化植被指数;  $\text{NDVI}_{\max}$  和  $\text{NDVI}_{\min}$  分

别为研究区域 NDVI 的最大值和最小值。分别对 1988、2000 和 2013 年的覆盖与管理因子计算得出结果(图 2)。

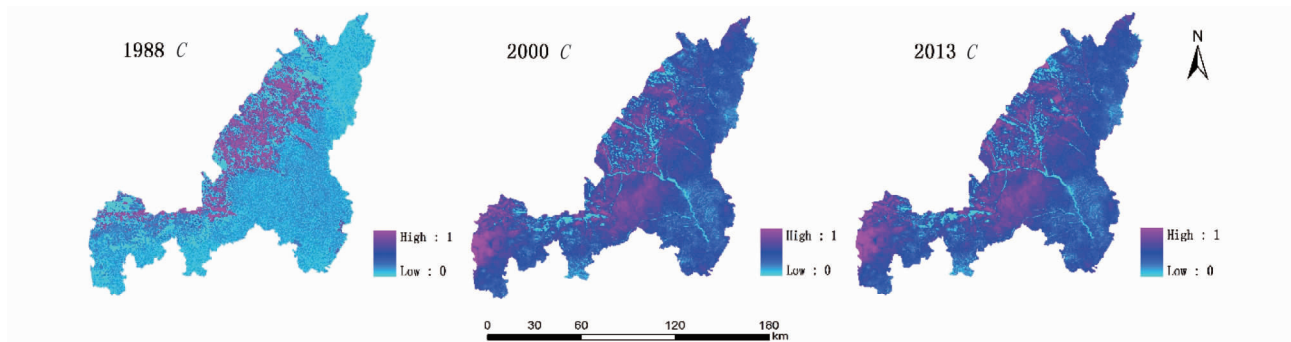


图 2 榆林市 1988、2000 和 2013 年覆盖与管理因子

Fig. 2 Coverage and management factors in Yulin City in 1988, 2000, 2013

**1.2.2.6 水土保持措施  $P$  因子的确定。**水土保持措施因子  $P$  是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>[22]</sup>,  $P$  因子的变化值域在 0~1, 值的大小表示植被覆盖与水土保持措施对土壤侵蚀的抑制作用强弱。当  $P=0$  时, 表示采取水土措施后没有土壤侵蚀; 当  $P=1$  时, 表示未采取任何水保措施的地区。  $P$  因

子的取值情况: 林地、草地、未利用土地为 1, 水域、建筑用地、居民用地为 0,  $>0^\circ \sim 5^\circ$ 、 $>5^\circ \sim 10^\circ$ 、 $>10^\circ \sim 15^\circ$ 、 $>15^\circ \sim 20^\circ$ 、 $>20^\circ \sim 25^\circ$ 、 $>25^\circ$  坡度下的耕地  $P$  分别为 0.100、0.221、0.305、0.575、0.705、0.800,  $P$  取值参照文献[23-24]。分别对 1988、2000 和 2013 年的水土保持措施因子计算得出结果(图 3)。

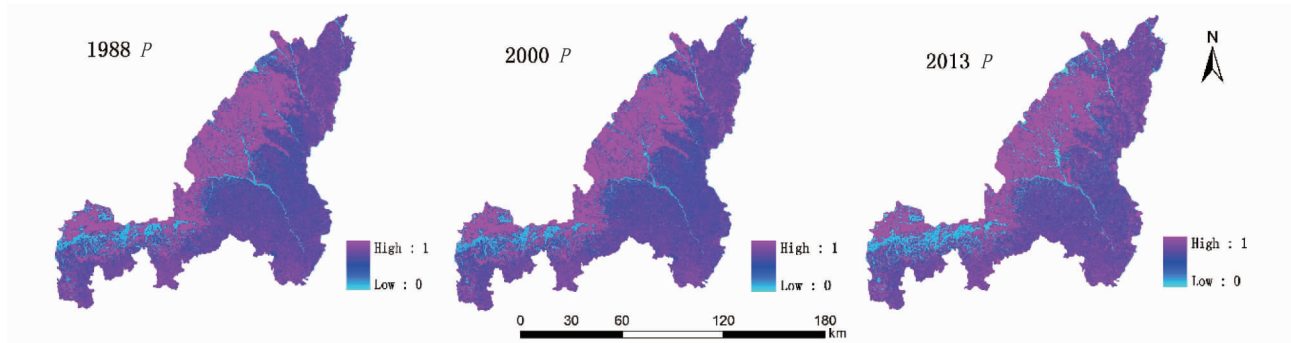


图 3 榆林市 1988、2000 和 2013 年水土保持措施因子

Fig. 3 Soil and water conservation measures factors of Yulin City in 1988, 2000, 2013

**1.2.2.7 浅沟侵蚀因子  $G$  的确定。**浅沟侵蚀  $G$ <sup>[3]</sup> 是一种重要类型的边坡土壤侵蚀过程, 反映了浅水沟侵蚀对流域的影响和泥沙产量, 尤其在黄土高原坡面的土壤侵蚀中起着重要作用。据 Jiang 等<sup>[25]</sup> 研究发现, 浅沟侵蚀因子主要受到降水、收敛强度和土壤属性的影响。当没有浅沟侵蚀时,  $G=1$ 。

$$G = 1 + (\alpha - \theta_c) [1.003(R \cdot I_{30})^{0.103} - 1] / (30 - \theta_c) \quad (11)$$

式(11)中,  $G$  是浅沟侵蚀因子;  $\alpha$  是表面坡度( $^\circ$ );  $R$  是单个降雨量(mm);  $I_{30}$  是最大 30 min 雨强(mm/min)。

**1.2.3 马尔科夫模型。**马尔科夫模型是一种关于事件发生概率的具有“无后效性”的研究方法, 在地理预测中经常被使用<sup>[26]</sup>。用该模型模拟土壤侵蚀动态变化是可行的, 因为在某一研究区域中, 各种侵蚀强度之间是可以相互转化的, 而且在不同时段, 其转移过程受前一时刻状态的影响。在生成榆林市土壤侵蚀转移矩阵的基础上, 用该模型对榆林市的土壤侵蚀演变作出预测。

运用马尔科夫模型预测土壤侵蚀动态变化趋势最重要

的是确立土壤侵蚀强度转移矩阵  $P$ , 数学表达式如下:

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} & P_{16} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} & P_{26} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} & P_{36} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} & P_{46} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} & P_{56} \\ P_{61} & P_{62} & P_{63} & P_{64} & P_{65} & P_{66} \end{pmatrix}$$

式中,  $P_{ij}$  是土壤侵蚀强度类型从  $i$  向  $j$  的转移矩阵,  $P_{ij}$  需要满足:  $0 \leq P_{ij} \leq 1 (i, j = 1, 2, \dots, n)$ , 矩阵横行和为 1。

## 2 结果与分析

**2.1 土壤侵蚀变化分析** RUSLE 模型中, 计算  $A$  值时, 将最终得到的土壤侵蚀强度按以下标准分 6 级: 微度侵蚀 ( $0 < A \leq 500$ )、轻度侵蚀 ( $500 < A \leq 2500$ )、中度侵蚀 ( $2500 < A \leq 5000$ )、强烈侵蚀 ( $5000 < A \leq 8000$ )、极强烈侵蚀 ( $8000 < A \leq 15000$ ) 和剧烈侵蚀 ( $A > 15000$ ), 单位为  $t / (km^2 \cdot a)$ 。各级侵蚀面积占榆林市总面积的比例见表 1、2。

表1 1988—2002年各级土壤侵蚀强度百分比

Table 1 Percentage of soil erosion intensity at various levels from 1988 to 2002

年份 Year	侵蚀强度百分比 Percentage of erosion intensity//%						侵蚀模数 Erosion modulus t/(km <sup>2</sup> ·a)	降雨侵蚀力 Rainfall erosivity MJ·mm/(hm <sup>2</sup> ·h)
	微度 Micro-degree	轻度 Mild	中度 Medium	强烈 Strong	极强烈 Extremely strong	剧烈 Violent		
1988	50.9	15.1	9.4	6.0	8.8	9.8	4 368.83	2 055.26
2000	46.7	29.1	11.2	5.9	4.7	2.4	2 246.56	439.55
2001	25.9	17.0	13.8	10.3	13.5	19.5	9 218.99	2 405.39
2002	28.9	23.6	14.3	9.9	11.9	11.4	5 899.85	1 469.49

表2 2005—2013年各级土壤侵蚀强度百分比

Table 2 Percentage of soil erosion intensity at various levels from 2005 to 2013

年份 Year	侵蚀强度百分比 Percentage of erosion intensity//%						侵蚀模数 Erosion modulus t/(km <sup>2</sup> ·a)	降雨侵蚀力 Rainfall erosivity MJ·mm/(hm <sup>2</sup> ·h)
	微度 Micro-degree	轻度 Mild	中度 Medium	强烈 Strong	极强烈 Extremely strong	剧烈 Violent		
2005	43.5	29.6	11.9	6.8	5.6	2.6	2 413.79	558.89
2007	30.9	24.8	15.1	10.6	11.4	7.2	4 577.39	1 211.94
2010	41.6	32.4	13.4	6.5	4.4	1.7	2 136.29	825.54
2012	38.3	28.9	15.2	8.5	6.4	2.7	2 810.20	2 345.11
2013	42.9	31.2	12.4	6.0	4.9	2.6	2 345.97	1 790.23

1988—2013年降雨侵蚀力年际差异较大。2000、2001年是降雨侵蚀力最小年和最大年,分别为439.55、2 405.39 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h),其余各年份为550~2 350 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h)。2002年和2007年相比,剧烈侵蚀百分比减少了4.2%,约1 891.25 km<sup>2</sup>;极强烈侵蚀百分比减少了0.5%,约225.17 km<sup>2</sup>。在降雨侵蚀力相近的年份,侵蚀强度百分比具有差异性,主要是不同地区的降雨强度不同引

起的。

**2.2 1988—2013年不同侵蚀强度转置分析** 根据侵蚀强度的不同,分为微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀六类。1988和2000年,2000和2013年的土壤侵蚀程度用马尔科夫转移矩阵进行转置分析(表3、4)。

表3 1988—2000年不同侵蚀强度转置

Table 3 Transposition of different erosion intensities from 1988 to 2000

1988年侵蚀强度 Erosion intensity in 1988	2000年侵蚀强度 Erosion intensity in 2000					
	微度 Micro-degree	轻度 Mild	中度 Medium	强烈 Strong	极强烈 Extremely strong	剧烈 Violent
微度 Micro-degree	52.29	28.28	9.69	4.75	3.48	1.51
轻度 Mild	74.33	22.32	2.42	0.63	0.25	0.05
中度 Medium	46.66	41.76	7.56	2.57	1.22	0.23
强烈 Strong	27.77	45.96	15.21	6.42	3.79	0.84
极强烈 Extremely strong	17.67	34.62	23.55	11.34	9.37	3.45
剧烈 Violent	12.10	16.52	22.89	18.04	17.79	12.66

表4 2000—2013年不同侵蚀强度转置

Table 4 Transposition of different erosion intensities from 2000 to 2013

2000年侵蚀强度 Erosion intensity in 2000	2013年侵蚀强度 Erosion intensity in 2013					
	微度 Micro-degree	轻度 Mild	中度 Medium	强烈 Strong	极强烈 Extremely strong	剧烈 Violent
微度 Micro-degree	78.75	18.76	1.80	0.44	0.20	0.05
轻度 Mild	26.88	57.98	12.55	2.06	0.47	0.06
中度 Medium	8.71	48.99	31.71	7.87	2.44	0.28
强烈 Strong	4.42	27.31	43.79	17.34	6.29	0.86
极强烈 Extremely strong	2.94	14.45	30.98	32.55	16.25	2.83
剧烈 Violent	2.04	5.38	11.39	20.73	40.91	19.55

1988—2000年不同侵蚀强度转置中,侵蚀程度未转移情

况:微度52.29%、轻度22.32%、中度7.56%、强烈6.42%、极

强烈 9.37%、剧烈 12.66%。1988 年的降雨侵蚀力为  $2\ 055.26\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ , 2000 年的降雨侵蚀力为  $439.55\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ , 可见降雨侵蚀力明显急剧成倍数减少, 整体侵蚀程度明显降低。1988—2000 年, 剧烈到剧烈以下程度转移 87.34%, 微度、轻度、中度、强烈、极强烈程度向剧烈程度转移 6.08%, 明显侵蚀程度好转。

2000—2013 年不同侵蚀强度转置中, 侵蚀程度未转移情况: 微度 78.75%、轻度 57.98%、中度 31.17%、强烈 17.34%、极强烈 16.25%、剧烈 19.55%。2000 年的降雨侵蚀力为  $439.55\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ , 2013 年的降雨侵蚀力为  $1\ 790.23\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ , 可见降雨侵蚀力明显增大, 相对于 1988—2000 年, 整体的侵蚀程度加剧, 中度转置到强烈、极强烈和剧烈 4.02%; 2000—2013 年, 中度转置到强烈、极强烈和剧烈 10.59%, 侵蚀程度加剧; 1988—2000 年, 极强

烈转置成强烈、中度、轻度和微度 87.18%; 2000—2013 年, 极强烈转置成强烈、中度、轻度和微度 80.92%, 侵蚀程度相对于 1988—2000 年是加剧的。

**2.3 1988—2013 年不同土地利用类型转置分析** 榆林市 1988、2000 和 2013 年土地利用类型根据 1:10 万土地资源分类系统分为耕地、林地、草地、水域、建筑用地(居民地)、未利用土地六类。1988 年和 2000 年, 2000 年和 2013 年的不同土地利用类型用马尔科夫转移矩阵进行转置分析(表 5、6)。自 1988 年以来, 榆林市水土流失日益严重, 土壤侵蚀程度逐年加剧, 政府和相关单位积极采取水土保持措施, 退耕还林, 修建相应的水利工程, 建立相关水保管理组织和规范等。近年来, 随着各种水保措施的实施, 1988—2013 年, 耕地、草地和未利用土地面积减少, 林地、建筑用地面积增加, 榆林市近年来的土壤侵蚀呈现减轻趋势。

表 5 1988—2000 年不同土地类型转置

Table 5 Translocation of different land types from 1988 to 2000

%

1988 年土地类型 Land type in 1988	2000 年土地类型 Land type in 2000					
	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Waters	建筑用地 Building land	未利用土地 Unused land
耕地 Cultivated land	97.42	0.26	1.93	0.04	0.09	0.26
林地 Forest land	1.44	95.78	2.50	0.02	0.03	0.23
草地 Grassland	1.90	0.94	96.51	0.03	0.02	0.60
水域 Waters	1.62	0.15	2.35	95.11	0.03	0.75
建筑用地 Building land	1.94	0.15	0.73	0.08	97.06	0.03
未利用土地 Unused land	0.70	0.66	22.45	0.01	0.05	76.12

表 6 2000—2013 年不同土地类型转置

Table 6 Translocation of different land types from 2000 to 2013

%

2000 年土地类型 Land type in 2000	2013 年土地类型 Land type in 2013					
	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Waters	建筑用地 Building land	未利用土地 Unused land
耕地 Cultivated land	87.79	2.01	9.22	0.10	0.69	0.19
林地 Forest land	3.17	92.39	1.99	0.05	0.78	1.63
草地 Grassland	5.28	0.94	91.74	0.07	0.99	0.98
水域 Waters	4.54	0.36	6.17	85.97	2.24	0.73
建筑用地 Building land	17.65	0.56	3.30	0.75	77.61	0.12
未利用土地 Unused land	2.17	0.17	4.91	0.16	1.71	90.88

2000—2013 年不同土地类型转置中, 土地利用类型未转移情况: 耕地 87.79%、林地 92.39%、草地 91.74%、水域 85.97%、建筑用地 77.61%、未利用土地 90.88%。耕地转置为林地 2.01%, 草地转置为林地 0.94%, 水域转置为林地 0.36%, 建筑用地转置为林地 0.56%, 未利用土地转置为林地 0.17%。表 6 与表 5 相比, 2000—2013 年耕地、草地、水域、建筑用地、未利用土地转置成林地的百分比增加程度大于 1988—2000 年, 表明经过数十年政府及相关水保单位的治理, 榆林市的退耕还林项目有了很大成效, 水土保持取得成效, 土壤侵蚀也逐渐减轻。

**2.4 不同坡度等级下土壤侵蚀变化特征** 根据 1988—2013 年不同坡度下土壤侵蚀统计(表 7), 随着坡度的增加, 1988、2000 和 2013 年的土壤侵蚀模数呈上升趋势, 总侵蚀量也是逐渐增加。0~5° 一般是平原地区, 土壤受人类活动的影响;

0~25° 平原或者坡度不大的地区, 人为活动加剧侵蚀, >25° 的地区, 人类活动减少, 耕地面积也减少, 虽然林地、草地的面积大于耕地面积, 但由于天气等自然现象, 造成风蚀、水蚀等自然灾害, 导致山体滑坡、泥石流、坍塌、山体切沟等后果, 严重影响了地表的完好度, 加剧了土壤侵蚀程度。近年来, 由于政府及相关单位水保措施的实施, 退耕还林已经取得了不错的成效, 所以 2013 年较 1988 年总侵蚀明显减少。

总侵蚀量计算公式:

$$\text{总侵蚀量} = \text{土壤侵蚀模数} \times \text{面积} / 10^6$$

$$\text{面积} = \text{像元数} \times \text{像元大小} (\text{分辨率})$$

**2.5 土壤侵蚀动态变化模拟预测** 根据 1988—2013 年榆林市土壤侵蚀类型面积转移矩阵(表 8), 计算出相应的土壤侵蚀强度转移概率矩阵(表 9), 在此基础上预测出 2013 年的土壤侵蚀面积百分比(表 10)。

表7 1988—2013年不同坡度下土壤侵蚀统计

Table 7 Statistics of soil erosion under different slopes from 1988 to 2013

坡度 Slope gradient/°	土壤侵蚀模数 Soil erosion modulus/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ )			总侵蚀量 Total erosion amount/ $10^6 \text{ t}$		
	1998年	2000年	2013年	1998年	2000年	2013年
0~5	1 249.76	411.07	616.80	21.91	7.20	10.69
>5~8	3 564.84	1 496.82	1 308.31	35.72	15.00	12.55
>8~15	5 679.12	2 846.68	2 536.20	38.35	19.22	15.93
>15~20	7 724.66	4 273.06	4 444.18	31.98	17.69	16.75
>20~25	10 347.95	6 324.41	6 577.80	22.88	13.98	13.04
>25	14 759.74	9 159.60	9 547.35	25.10	15.58	14.58

表8 1988—2013年榆林市土壤侵蚀类型面积转移矩阵

Table 8 Area transfer matrix of soil erosion type in Yulin City from 1988 to 2013

km<sup>2</sup>

1988年侵蚀强度 Erosion intensity in 1988	2013年侵蚀强度 Erosion intensity in 2013					
	微度 Micro-degree	轻度 Mild	中度 Medium	强烈 Strong	极强烈 Extremely strong	剧烈 Violent
微度 Micro-degree	233 072.75	228 325.16	220 712.25	218 126.34	217 660.10	216 702.03
轻度 Mild	81 333.02	76 585.43	68 972.52	66 386.61	65 920.37	64 962.30
中度 Medium	57 359.70	52 612.11	44 999.20	42 413.29	41 947.05	40 988.99
强烈 Strong	42 922.72	38 175.13	30 562.22	27 976.31	27 510.07	26 552.00
极强烈 Extremely strong	54 813.01	50 065.42	42 452.50	39 866.60	39 400.36	38 442.29
剧烈 Violent	58 352.39	53 604.81	45 991.89	43 405.98	42 939.74	41 981.68

表9 1988—2013年榆林市土壤侵蚀强度转移概率矩阵

Table 9 Probability matrix of soil erosion intensity transfer in Yulin City from 1988 to 2013

%

1988年侵蚀强度 Erosion intensity in 1988	2013年侵蚀强度 Erosion intensity in 2013					
	微度 Micro-degree	轻度 Mild	中度 Medium	强烈 Strong	极强烈 Extremely strong	剧烈 Violent
微度 Micro-degree	51.30	31.79	10.91	3.74	1.81	0.45
轻度 Mild	68.76	28.01	2.73	0.39	0.10	0.01
中度 Medium	44.65	43.87	9.35	1.66	0.42	0.05
强烈 Strong	32.45	46.00	16.08	4.09	1.24	0.14
极强烈 Extremely strong	22.30	41.70	23.25	8.61	3.64	0.49
剧烈 Violent	13.91	26.40	25.81	16.61	12.79	4.49

表10 2013年土壤侵蚀类型面积百分比实际值和预测值比较

Table 10 Comparison between actual and predicted values of soil erosion type area in 2013

%

侵蚀强度 Erosion intensity	实际值面积比例 Area ratio of actual value	预测值面积比例 Area ratio of predicted value
微度 Micro-degree	42.95	50.23
轻度 Mild	31.22	16.50
中度 Medium	12.42	9.70
强烈 Strong	6.03	6.03
极强烈 Extremely strong	4.87	8.49
剧烈 Violent	2.51	9.05

该研究引入模型效应系数  $W^{[27-29]}$  判断马尔科夫模拟预测效果,公式如下:

$$W = 1 - \frac{\sum (Q_s - \bar{Q}_s)^2}{\sum (Q_s - \bar{Q}_s)^2} \quad (12)$$

式(12)中,  $Q_s$  为实际面积比例;  $\bar{Q}_s$  为预测面积比例。  $W$  值反映了实际值与预测值的吻合程度,  $W$  越接近 100%, 说明模拟效果越好。通过计算,  $W$  值为 80%。说明榆林市实际侵蚀等级面积对比预测侵蚀等级面积, 一致性良好, 进而说明马尔科夫模拟和预测土壤侵蚀动态变化是可行的。

根据 2000—2013 年不同侵蚀强度转移矩阵(表 4)自乘 3 次可达稳定状态(表 11~13), 也就是说从 2000 年起, 经过  $14 \times 3 = 42$  年, 侵蚀强度转移稳定下来。从整体上来看, 到 2055 年乃至未来, 榆林市微度侵蚀面积逐渐增加, 轻度及以上面积持续减少, 整体呈良性发展趋势。

表11 2013—2027年不同侵蚀强度转移矩阵

Table 11 Transposition of different erosion levels from 2013 to 2027

%

2013年侵蚀强度 Erosion intensity in 2013	2027年侵蚀强度 Erosion intensity in 2027					
	微度 Micro-degree	轻度 Mild	中度 Medium	强烈 Strong	极强烈 Extremely strong	剧烈 Violent
微度 Micro-degree	67.24	26.68	4.60	1.03	0.37	0.07
轻度 Mild	37.95	45.44	12.79	2.82	0.86	0.13
中度 Medium	23.21	48.09	20.59	5.76	2.03	0.31
强烈 Strong	15.60	43.81	27.03	9.26	3.67	0.64
极强烈 Extremely strong	10.87	35.50	31.30	14.27	6.68	1.39
剧烈 Violent	6.56	21.71	28.30	21.98	16.26	5.19

表 12 2027—2041 年不同侵蚀强度转移矩阵

Table 12 Transposition of different erosion levels from 2027 to 2041

%

2027 年侵蚀强度 Erosion intensity in 2027	2041 年侵蚀强度 Erosion intensity in 2041					
	微度 Micro-degree	轻度 Mild	中度 Medium	强烈 Strong	极强烈 Extremely strong	剧烈 Violent
微度 Micro-degree	56.62	32.88	7.87	1.87	0.65	0.11
轻度 Mild	46.28	38.50	11.26	2.82	0.97	0.16
中度 Medium	39.78	41.26	13.74	3.67	1.32	0.22
强烈 Strong	35.28	42.57	15.72	4.48	1.67	0.29
极强烈 Extremely strong	31.09	43.01	17.83	5.50	2.18	0.41
剧烈 Violent	24.76	41.75	21.41	7.81	3.52	0.76

表 13 2041—2055 年不同侵蚀强度转移矩阵

Table 13 Transposition of different erosion levels from 2041 to 2055

%

2041 年侵蚀强度 Erosion intensity in 2041	2055 年侵蚀强度 Erosion intensity in 2055					
	微度 Micro-degree	轻度 Mild	中度 Medium	强烈 Strong	极强烈 Extremely strong	剧烈 Violent
微度 Micro-degree	51.29	35.64	9.68	2.41	0.84	0.14
轻度 Mild	49.84	36.37	10.18	2.56	0.90	0.15
中度 Medium	48.85	36.86	10.53	2.67	0.94	0.16
强烈 Strong	48.10	37.22	10.80	2.75	0.97	0.17
极强烈 Extremely strong	47.31	37.58	11.08	2.85	1.01	0.17
剧烈 Violent	45.89	38.20	11.61	3.03	1.08	0.19

### 3 结论与讨论

通过栅格数据来获取区域内部差异,利用改进的 RUSLE 土壤侵蚀模型,计算降雨侵蚀  $R$  因子、土壤  $K$  因子、坡长坡度  $LS$  因子、植被覆盖  $C$  因子、水土保持  $P$  因子、浅沟侵蚀  $G$  因子,估算 1988—2013 年土壤侵蚀模数,分析了 1988—2013 年侵蚀变化、地类面积变化和不同坡度下的土壤侵蚀变化情况,最后利用马尔科夫转移矩阵预测未来年份土壤侵蚀变化趋势,得出以下结论。

(1) 榆林市土壤侵蚀平均模数总体较稳定。但在 2000、2001 年出现明显差异,2000 年达到历年来最小值,因为 2000 年降雨侵蚀力最小,2001 年土壤侵蚀平均模数达到历年来最大值,其原因是 2001 年降雨侵蚀力最大。1988 年的降雨侵蚀力为  $2\ 055.26\ \text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ ,2000 年的降雨侵蚀力为  $439.55\ \text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ ,降雨侵蚀力急剧成倍数减少,所以整体侵蚀程度明显降低,2013 年的降雨侵蚀力为  $1\ 790.23\ \text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ ,降雨侵蚀力明显增大,相对于 1988—2000 年,整体的侵蚀程度加剧。

(2) 1988—2013 年榆林市土壤侵蚀状况明显改善,平均土壤侵蚀由 1988 年  $4\ 368.83\ \text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$  减少为 2013 年  $2\ 345.97\ \text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ,相应的土壤流失总量从  $175.94\times 10^6\ \text{t}$  减少到  $68.96\times 10^6\ \text{t}$ 。1988—2013 年,中度以上侵蚀全市微度侵蚀面积增加,其他侵蚀等级转移到剧烈侵蚀的百分比均不足 1。耕地、草地和未利用土地面积减少,林地、建筑用地面积增加,退耕还林,爱护自然等保护措施和意识得到加强和提升。随着坡度增加,1988、2000 和 2013 年的土壤侵蚀模数呈上升趋势,总侵蚀量也是逐渐增加。

(3) 根据马尔科夫模型预测,未来 40 年榆林市土壤侵蚀状况逐渐减轻,中度以上土壤侵蚀面积逐渐增加,微度侵蚀面积增加尤其显著,其他侵蚀等级的面积持续减少。

### 参考文献

- [1] 高海东,李占斌,李鹏,等.基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究[J].地理学报:英文版,2016,26(4):457-472.
- [2] 姜永清,王万中,王占礼,等.陕北黄土高原的土壤侵蚀与综合治理[J].水土保持研究,1999,6(2):174-180.
- [3] 江忠善,郑粉莉,武敏.中国坡面水蚀预报模型研究[J].泥沙研究,2005(4):1-6.
- [4] 张岩,刘宝元,张清春,等.不同植被类型对土壤水蚀的影响[J].植物学报:英文版,2003,45(10):1204-1209.
- [5] WU L,LIU X,MA X Y. Tracking soil erosion changes in an easily-eroded watershed of the Chinese loess plateau[J]. Polish journal of environmental studies,2016,25(1):351-363.
- [6] 李天宏,郑丽娜.基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J].自然资源学报,2012,27(7):1164-1175.
- [7] YODER D,LOWN J. The future of RUSLE:Inside the new revised universal soil loss equation[J]. Journal of soil & water conservation,1995,50(5):484-489.
- [8] 陈云明,刘国彬,郑粉莉,等. RUSLE 侵蚀模型的应用及进展[J].水土保持研究,2004,11(4):80-83.
- [9] 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.
- [10] 符素华,刘宝元.土壤侵蚀量预报模型研究进展[J].地球科学进展,2002,17(1):78-84.
- [11] 刘新颜,曹晓仪,董治宝.基于 T-S 模糊神经网络模型的榆林市土壤风蚀危险度评价[J].地理科学,2013,33(6):741-747.
- [12] 贾文锦,朱全有,陈有治,等.榆林专区的土壤侵蚀及其防治[J].土壤通报,1961(1):35-42.
- [13] 王万忠.黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究 III:关于侵蚀性降雨的标准问题[J].水土保持通报,1984(2):58-63.
- [14] 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.
- [15] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
- [16] WANG B,ZHENG F L,PÖMKENS M J M,et al. Comparison of soil erodibility factors in USLE, RUSLE2, EPIC and Dg models based on a Chinese soil erodibility database[J]. Acta agriculturae scandinavica, Section B-Soil and plant science,2013,63(1):69-79.
- [17] 汪邦稳,杨勤科,刘志红,等.基于 DEM 和 GIS 的修正通用土壤流失方程地形因子值的提取[J].中国水土保持科学,2007,5(2):18-23.
- [18] 杨波,王全九.退耕还林后榆林市土壤侵蚀和养分流失功效研究[J].水土保持学报,2016,30(4):57-63.

(下转第 77 页)

## 参考文献

- [1] 秦晓楠,卢小丽,武春友. 国内生态安全研究知识图谱:基于 Citespace 的计量分析[J]. 生态学报,2014,34(13):3693-3703.
- [2] 李宗尧,杨桂山,董雅文. 经济快速发展地区生态安全格局的构建:以安徽沿江地区为例[J]. 自然资源学报,2007,22(1):106-113.
- [3] 宋伟东. 基于生态功能重要性和敏感性的安徽省生态安全格局构建[J]. 阜阳师范学院学报(自然科学版),2019,36(3):103-109.
- [4] 张豆,渠丽萍,张柒漓. 基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化:以长三角地区为例[J]. 生态学报,2019,39(20):7526-7537.
- [5] 陈昕,彭建,刘焱芬,等. 基于“重要性-敏感性-连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J]. 地理研究,2017,36(3):471-484.
- [6] 杜悦悦,胡熠娜,杨扬,等. 基于生态重要性和敏感性的西南山地生态安全格局构建:以云南省大理白族自治州为例[J]. 生态学报,2017,37(24):8241-8253.
- [7] 付刚,白加德,齐月,等. 基于 GIS 的北京市生态脆弱性评价[J]. 生态与农村环境学报,2018,34(9):830-839.
- [8] 谭云凤. 基于 GIS 和 Fragstats 的团结镇景观格局优化研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2014.
- [9] ZHOU D Y, TIAN Y Y, JIANG G H. Spatio-temporal investigation of the interactive relationship between urbanization and ecosystem services: Case study of the Jingjinji urban agglomeration, China[J]. Ecological indicators, 2018, 95:152-164.
- [10] 刘琦,刘世梁,赵清贺,等. 基于移动窗口法的水电开发影响下景观格局梯度分析[J]. 山地学报,2012,30(5):628-635.
- [11] 仇江啸,王效科,逮非,等. 城市景观破碎化格局与城市化及社会发展水平的关系:以北京城区为例[J]. 生态学报,2012,32(9):2659-2669.
- [12] 张琳琳,孔繁花,尹海伟,等. 基于景观空间指标与移动窗口的济南城市空间格局变化[J]. 生态学杂志,2010,29(8):1591-1598.
- [13] 唐建,谭飞,周琳. 景观破碎化对物种多样性的影响探讨[J]. 绿色科技,2018(24):158-161.
- [14] LARSEN L G, CHOI J, NUNGESESSER M K, et al. Directional connectivity in hydrology and ecology[J]. Ecological applications, 2012, 22(8):2204-2220.
- [15] 中华人民共和国生态环境部. 生态保护红线划定指南:环办生态(2017)48号[A]. 2017.
- [16] 安徽省人民政府. 安徽省人民政府关于发布安徽省生态保护红线的通知:皖政秘(2018)120号[A]. 2018.
- [17] 卢一梦. 安徽省湿地生态保护红线划分研究[D]. 合肥:安徽大学, 2019.
- [18] 白育铭. 安徽省生态红线区管控指标体系构建研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2016.
- [19] 王在高,吴楠. 安徽省重点生态功能区保护红线划定方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(10):1412-1415.
- [20] 王在高,吴楠. 基于 GIS 的安徽省生态保护红线划定方法研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2018, 41(3):287-292.
- [21] 王在高,吴楠. 安徽省生态环境敏感区保护红线划定方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(8):1100-1107.
- [22] 宋言奇. 长三角生态安全一体化研究[J]. 南通大学学报(社会科学版), 2005, 21(4):61-66.
- [23] 宋言奇. “长三角”地区生态安全应走一体化综合治理的道路[J]. 科技导报, 2005, 23(12):72.
- [24] 李进华,孙庆业,周立志,等. 安徽生态建设与长三角生态安全[C]//中国生态学会、安徽生态省建设领导小组办公室. 循环·整合·和谐——第二届全国复合生态与循环经济学术讨论会论文集. 北京:中国科学技术出版社, 2005:6.
- [25] 张贝尔,蒋旭东,孙京禄,等. 安徽省区域生态安全动态评价与预警分析[J]. 中国农学通报, 2018, 34(27):142-151.
- [26] 刘晓哲. 改进的通用土壤侵蚀方程在流域水土流失模拟中的运用[J]. 水利规划与设计, 2016(4):69-71.
- [27] 刘海涛. 基于改进通用土壤侵蚀方程的水土流失时空模拟:以淮河流域上游为例[J]. 人民长江, 2016, 47(4):17-19, 26.
- [28] 陈正发. 基于 RUSLE 模型的重庆市土壤流失方程研究[D]. 重庆:西南大学, 2011.
- [29] 方行,方元. 基于 GIS 与 Fragstats 景观水平的空间格局特征分析:以珠江口两岸为例[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(4):841-842.
- [30] 冯永玖,刘艳,周茜,等. 景观格局破碎化的粒度特征及其变异的分形定量研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(3):443-450.
- [31] 洪鸿加,彭晓春,陈志良,等. 长沙市景观破碎化时空分异特征研究[J]. 国土资源遥感, 2011(1):133-137.
- [32] SONG H H, LIU L X, ZHANG Y T, et al. Research on landscape pattern optimization of Xianglan Town based on GIS and fragstats[C]//Proceedings of the 2017 International Conference on Society Science (ICoSS 2017). Paris, France: Atlantis Press, 2017.
- [33] 连艺昕. 基于遥感及 GIS 技术的水土流失信息提取与分级研究:以福建省永春县为例[D]. 南昌:东华理工大学, 2014.
- [34] 连米钧. 水土流失概念及水土流失强度分级标准[J]. 水土保持科技情报, 2001(1):25-27, 44.
- [24] 覃杰香,王兆礼. 基于 GIS 和 RUSLE 的从化市土壤侵蚀量预测研究[J]. 人民珠江, 2011, 32(2):37-41.
- [25] JIANG Z S, ZHENG F L, WU M. China water erosion prediction model [M]. Beijing: Science Press, 2008:200-202.
- [26] 陈彦光. 地理数学方法:基础和应用[M]. 北京:科学出版社, 2008:488-516.
- [27] 刘少佳,任志远,杨文艳,等. 基于马尔科夫模型土壤侵蚀动态变化研究:以西安都市圈为例[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5):14-19, 24.
- [28] 江青龙,谢永生,张应龙,等. 京津水源地小流域土壤侵蚀空间模拟[J]. 生态学杂志, 2011, 30(8):1703-1711.
- [29] 石香琼,查轩,陈世发. 基于马尔科夫模型的红壤退化地水土流失动态变化预测研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4):19-23.

(上接第 69 页)