

# 基于 RUSLE 模型的山西省生态系统 土壤保持功能重要性评估

宁婷<sup>1</sup>, 郭新亚<sup>1</sup>, 荣月静<sup>2</sup>, 杜世勋<sup>1</sup>, 李超<sup>1</sup>

(1. 山西省生态环境研究中心, 山西 太原 030009; 2. 北京山海基石信息技术有限公司, 北京 100012)

**摘要:** [目的] 分析山西省生态系统土壤保持服务功能的空间分布格局, 识别山西省土壤保持功能保护的重点区域, 为生态保护红线划定和国土空间规划提供参考。[方法] 采用修正通用水土流失方程(RUSLE)开展山西省土壤保持功能重要性评估。[结果] 山西省土壤保持总量为  $6.52 \times 10^9$  t/a, 单位面积土壤保持强度平均为 416.10 t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )。土壤保持功能总体呈现“西北低、东南高, 盆地低, 丘陵和山地高”的空间分布格局, 极重要区、重要区和一般重要区的面积分别占山西省国土面积的 23.10%, 28.33% 和 48.57%。[结论] 山西省土壤保持功能极重要区主要分布在太行山、吕梁山、恒山、五台山、太岳山、中条山等组成的“多”字形山地地区, 在晋西黄土丘陵沟壑区也有一定分布。

**关键词:** 山西省; 土壤保持功能; 修正通用水土流失方程; 分级标准

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)06-0205-06

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 宁婷, 郭新亚, 荣月静, 等. 基于 RUSLE 模型的山西省生态系统土壤保持功能重要性评估[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 205-210. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.06.030; Ning Ting, Guo Xinya, Rong Yuejing, et al. Evaluation of soil conservation function importance of ecosystems in Shanxi Province based on RUSLE model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 205-210.

## Evaluation of Soil Conservation Function Importance of Ecosystems in Shanxi Province Based on RUSLE Model

Ning Ting<sup>1</sup>, Guo Xinya<sup>1</sup>, Rong Yuejing<sup>2</sup>, Du Shixun<sup>1</sup>, Li Chao<sup>1</sup>

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences in Shanxi, Taiyuan, Shanxi 030009, China;

2. Beijing GISStone Information Technology Co. Ltd., Beijing 100012, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial distribution pattern of soil conservation service function in Shanxi Province was analyzed, and the key areas that need to be protected were identified, in order to provide reference for ecological protection redline delineation and national territorial planning. [Methods] The revised universal soil and water loss equation (RUSLE) was used to analyze the importance of soil conservation function. [Results] The total amount of soil conservation was  $6.52 \times 10^9$  t/a, and the average amount of soil conservation per unit area was 416.10 t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ) during the study period. The spatial distribution pattern of the ecosystem's soil conservation function was low in northwest and high in southeast, as well as low in basin and high in hills and mountains. The areas of extremely important areas, important areas and general important areas accounted for 23.10%, 28.33% and 48.57% of the total area of Shanxi Province, respectively. [Conclusion] The extremely important areas of soil conservation function in Shanxi Province were mainly distributed in Taihang Mountain, Luliang Mountain, Heng Mountain, Wutai Mountain, Taiyue Mountain and Zhongtiao Mountain, and it was also widely distributed in loess hill area of western Shanxi Province.

**Keywords:** Shanxi Province; soil conservation function; RUSLE; grading standard

土壤保持是生态系统(如森林、草地等)通过其结构与过程减少由于水蚀所导致的土壤侵蚀的作用, 是生态系统提供的重要调节服务之一<sup>[1]</sup>。土壤保持功

能重要性评估是指针对典型区域生态系统, 分析区域土壤保持功能分异规律, 明确土壤保持功能的重要区域<sup>[2]</sup>, 可为确定生态保护关键区、开展土壤保持功能

区划、划定土壤保持功能保护红线等提供科学依据。通常以土壤保持量,即潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值,作为生态系统土壤保持功能的评估指标。其中,土壤侵蚀量多采用通用水土流失方程(universal soil and water loss equation, USLE)和修正通用水土流失方程(modified universal soil and water loss equation, RUSLE)进行计算。USLE 和 RUSLE 是美国农业部开发的预报坡地年均土壤流失量的经验模型,随着 GIS 和 RS 技术的发展,现已广泛应用于流域、区域尺度土壤流失预测,适用性与准确性均较强<sup>[3-4]</sup>。国内学者们在黄土高原<sup>[5]</sup>、青海湖<sup>[6]</sup>、三江源<sup>[7]</sup>、三峡库区<sup>[8]</sup>等区域(流域),贵州省<sup>[9]</sup>、辽宁省<sup>[10]</sup>等省份以及一些重点生态功能区<sup>[1]</sup>均开展过生态系统土壤保持功能评估工作,揭示了所在地区土壤保持功能重要性及其时空动态变化,但针对山西省域的相关研究目前还较少,也缺乏对该省土壤保持影响因素的系统分析。山西省地处黄河中游,华北西部的黄土高原地带,担负着维护黄河中游生态状况和保障环京津地区生态安全的任务,生态地位十分重要。但境内 80% 以上的面积为山地、丘陵区,沟壑纵横,山高坡陡,水流湍急,破坏力强,加之大多数地区为黄土覆盖区,土质疏松,极易流失,致使山西成为全国水土流失最为严重的省份之一。严重的水土流失和脆弱的生态环境,始终是制约山西经济社会发展的重要因素,也是山区贫困的根源所在。

当前,全国各地正全面开展“三线一单”(生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和环境准入负面清单)编制和国土空间规划工作。生态功能重要性评估是划定生态保护红线和生态空间的前提,而土壤保持功能保护红线是山西省生态保护红线的重要组成部分。为此,本文基于 RUSLE 模型开展了山西省土壤保持服务功能重要性评估,并对评估分级标准问题进行了一定探讨,以期能为生态保护红线划定及国土空间规划提供参考。

## 1 研究区概况

山西省位于黄河中游东岸,华北平原以西的黄土高原,地理位置为 34°31'—40°44'N 和 110°15'—114°32'E 之间,面积 1.57×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>。地形地貌以山地、丘陵

为主,海拔大都在 1 000 m 以上。境内河流较多,主要包括汾河、沁河、涑水河、桑干河、滹沱河、漳河等,大部分河流为季节性河流。气候属温带半湿润半干旱大陆性季风气候,基本特点为冬季较长且寒冷干燥,夏季炎热雨水集中,春季气候多变,风沙较多;秋季短暂,气温差较大。年降水量 360~660 mm,自西北向东南递增。年均气温在 4~14 ℃ 之间。植被类型以落叶阔叶林、干旱草原和次生落叶灌丛为主,森林覆盖率 20.50%。土壤类型主要是褐土、栗钙土和粗骨土。山西省水土流失面积达 1.08×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,占国土总面积近 70%,共有 76 个县地处国家级水土流失重点治理区。近年来,以晋北风沙区、吕梁山水土流失严重区和汾河流域为重点,山西大力开展集中连片水保生态建设,成效明显。截至 2018 年 9 月底,山西省共治理水土流失面积 6.67×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,水土流失治理度达到 61.8%,水土流失蔓延局面得到有效控制,生态系统土壤保持功能逐年增强。

## 2 数据与方法

### 2.1 评估模型

采用《生态保护红线划定指南》<sup>[11]</sup>推荐的基于修正通用水土流失方程(RUSLE)的土壤保持服务模型开展评价,计算公式为:

$$A_p = R \cdot K \cdot L \cdot S$$

$$A_r = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

$$A_c = A_p - A_r = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot (1 - C \cdot P)$$

式中: $A_c$ ——土壤保持强度[t/(hm<sup>2</sup>·a)]; $A_p$ ——潜在土壤侵蚀量[t/(hm<sup>2</sup>·a)]; $A_r$ ——实际土壤侵蚀量[t/(hm<sup>2</sup>·a)]; $R$ ——降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)]; $K$ ——土壤可蚀性因子[(t·hm<sup>2</sup>·h)/(hm<sup>2</sup>·MJ·mm)]; $L$ , $S$ ——地形因子; $L$ ——坡长因子; $S$ ——坡度因子; $C$ ——植被覆盖因子; $P$ ——土壤保持因子。山西省生态类用地占近 70%,生态系统以自然生态系统为主,本次评估中  $P$  因子统一赋值为 1。

### 2.2 数据来源

根据评估模型,土壤保持功能重要性评估所需数据包括高程数据、气象数据和土壤数据等,其来源和获取方法详见表 1。

表 1 土壤保持功能重要性评估数据

名称	类型	分辨率/m	数据来源
高程数据	栅格	30	地理空间数据云网站
气象数据	文本	—	山西省 2000—2016 年 109 个气象站点逐日降雨资料
土壤数据	矢量/Excel	—	全国生态环境调查数据库;中国 1:100 万土壤数据库
植被数据	栅格	250	山西省生态状况遥感调查与评估成果,并经山西省土地利用现状数据库(2016 年)修正

## 2.3 评估因子计算方法

(1) 降雨侵蚀力因子( $R$ )指降雨引发土壤侵蚀的潜在能力,通过多年平均年降雨侵蚀力因子反映,计算公式为:

$$R = \sum_{k=1}^{24} \bar{R}_{\text{半月}k}$$

$$\bar{R}_{\text{半月}k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m (\alpha \cdot P_{i,j,k}^{\beta})$$

式中: $R$ ——多年平均年降雨侵蚀力; $\bar{R}_{\text{半月}k}$ ——第  $k$  个半月的降雨侵蚀力; $k$ ——一年的 24 个半月, $k=1,2,\dots,24$ ; $i$ ——所用降雨资料的年份, $i=1,2,\dots,n$ ; $j$ ——第  $i$  年第  $k$  个半月侵蚀性降雨日(日降水量  $\geq 12$  mm)的天数, $j=1,2,\dots,m$ ; $P_{i,j,k}$ ——第  $i$  年第

$$K_{\text{EPIC}} = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256m_s(1 - m_{\text{silt}}/100)]\} \times [m_{\text{silt}}/(m_c + m_{\text{silt}})]^{0.3} \times \{1 - 0.25C_{\text{org}}/[C_{\text{org}} + \exp(3.72 - 2.95C_{\text{org}})]\} \times \{1 - 0.7(1 - m_s/100)/\{(1 - m_s/100) + \exp[-5.51 + 22.9(1 - m_s/100)]\}\}$$

式中: $K_{\text{EPIC}}$ ——修正前的土壤可蚀性因子; $K$ ——修正后的土壤可蚀性因子; $m_c$ 、 $m_{\text{silt}}$ 、 $m_s$ 、 $C_{\text{org}}$ ——黏粒( $< 0.002$  mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~2 mm)和有机碳的百分比含量(%),数据来源于中国 1:100 万土壤数据库。

(3) 地形因子( $LS$ ) $L$  表示坡长因子, $S$  表示坡度因子,是反映地形对土壤侵蚀影响的两个因子。对于较大尺度的区域研究,坡度、坡长等地形因子难以计算准确,因此本次评估采用地形起伏度因子( $D$ ),即地面一定距离范围内的最大高差,来反映地形因素对土壤侵蚀的影响。邻域计算单元取  $3 \times 3$ 。

(4) 植被覆盖因子( $C$ )反映了生态系统对土壤侵蚀的影响,是控制土壤侵蚀的积极因素。基于 NDVI 的大尺度植被覆盖因子估算方法可有效反映  $C$  值的时空变异。湿地、城镇和荒漠参照 N-SPECT 模型(non-point source pollution and erosion comparison tool)的参数分别赋值为 0,0.01,0.7。N-SPECT 模型是由美国 NOAA 海岸带服务中心于 2004 年开发的

$k$  个半月第  $j$  个侵蚀性日降雨量(mm)。 $\alpha, \beta$ ——参数,根据以下公式进行估算:

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}}$$

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

式中: $P_{d12}$ ——日降雨量  $\geq 12$  mm 的日平均雨量(mm); $P_{y12}$ ——日降雨量  $\geq 12$  mm 的年侵蚀性雨量(mm)。

(2) 土壤可蚀性因子( $K$ )指土壤颗粒被水力分离和搬运的难易程度,主要与土壤质地、有机质含量、土体结构、渗透性等土壤理化性质有关,计算公式为:

$$K = (-0.01383 + 0.51575K_{\text{EPIC}}) \times 0.1317$$

用于水文—水环境模拟的半分布式集总模型,子模块也是基于 RUSLE 对土壤侵蚀量进行模拟。旱地按植被覆盖度换算,计算公式为:

$$C_{\text{旱}} = 0.221 - 0.5951gc_1$$

式中: $C_{\text{旱}}$ ——旱地的植被覆盖因子; $c_1$ ——小数形式的植被覆盖度。

其余生态系统类型按不同植被覆盖度进行赋值,如表 2 所示。植被覆盖度由归一化植被指数转换得来,计算公式为:

$$c_1 = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) / (\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}})$$

式中: $c_1$ ——植被覆盖度; $\text{NDVI}_{\text{veg}}$ ——完全植被覆盖地表所贡献的信息, $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ ——无植被覆盖地表所贡献的信息。NDVI 数据来自山西省生态环境十年(2000—2010 年)变化遥感调查与评估成果。

将  $R$  因子采用考虑高程的协同克里金法、其他 3 个因子采用克里金法进行空间内插,并重采样为 250 m 分辨率的栅格。在 ArcGIS 10.3 栅格计算器中,根据模型计算生态系统土壤保持量。

表 2 山西省不同生态系统植被覆盖因子赋值

生态系统类型	植被覆盖度/%					
	<10	10~30	30~50	50~70	70~90	>90
森林	0.10	0.08	0.06	0.020	0.004	0.001
灌丛	0.40	0.22	0.14	0.085	0.040	0.011
草地	0.45	0.24	0.15	0.090	0.043	0.011
乔木园地	0.42	0.23	0.14	0.089	0.042	0.011
灌木园地	0.40	0.22	0.14	0.087	0.042	0.011

## 3 结果与分析

### 3.1 评估因子空间分布特征

(1) 降雨侵蚀力因子( $R$ )。降雨是导致土壤侵蚀的主要动力因素<sup>[12]</sup>。山西省降水分布的不均匀性,形

成了降水引发水土流失的能力差异。降雨侵蚀力取值范围在 663.05~2 810.32 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a) 之间,平均为 1 628.71 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)。山西省侵蚀性降雨量的空间分布规律与年降雨量空间分布呈现一致性,整体呈现从东南向西北递减趋

势。晋东南地区年降雨量丰富,其降雨侵蚀力远大于西北地区。此外,山地地区  $R$  值整体较高。

(2) 土壤可蚀性因子( $K$ )。土壤可蚀性是土壤自身性质对外营力、气候等综合作用所反映出的复杂土壤特性<sup>[12]</sup>,物理意义为标准小区单位降雨侵蚀力引起的单位面积上的土壤侵蚀量。其强弱主要取决于土壤机械组成和团聚体含量。一般来说,土壤中黏粒含量越高,土壤抵抗侵蚀的能力越强, $K$  值越小;粉粒含量越高,越易发生侵蚀, $K$  值越大。团聚体含量则与土壤可蚀性成反比。山西省除大同、忻州、太原、临汾、运城、长治等六大盆地  $K$  值相对较低,其他区域  $K$  值均较高。

(3) 地形起伏度因子( $D$ )。地形因子是构成水土流失的动力条件,影响降雨和外营力再分配,改变地表物质的分离、搬运和堆积的过程与速度,决定着地表径流对水土流失的能量分配。山西地处黄土高原地区,地势起伏不平,空间差异明显,河流和谷地横穿而过,

地势东西高,中间低,山地和丘陵等中小起伏地形占多数。本次评估中,山西省地形起伏度在 0~284 m 之间。

(4) 植被覆盖因子( $C$ )。植被覆盖是控制土壤侵蚀的积极因素。RUSLE 模型中只有植被分布是受自然因素和人类活动共同作用的产物,其他因子纯粹是由自然力所控制。 $C$  因子取值范围为 0~1, $C$  值越大说明所对应土地利用类型的土壤侵蚀越严重<sup>[13]</sup>。 $C$  的大小不仅与植被覆盖度直接相关,与生态系统类型也有密切的关系。对于相同的植被覆盖度, $C$  因子赋值规律大致表现为:森林<灌丛<草地<园地。山西省平均  $C$  值为 0.16,植被覆盖情况总体一般。晋西、晋北和六大盆地地区自然植被覆盖度较低, $C$  值较高,林、灌生态系统分布的广大山地地区  $C$  值则较低。

山西省水土保持功能评估因子制备结果如图 1 所示。各评估因子中,以地形因子和植被覆盖因子对水土流失最为敏感,相差 2~3 个数量级,对 RUSLE 模型整体有效性的作用最为显著,这与前人研究结论一致<sup>[14]</sup>。

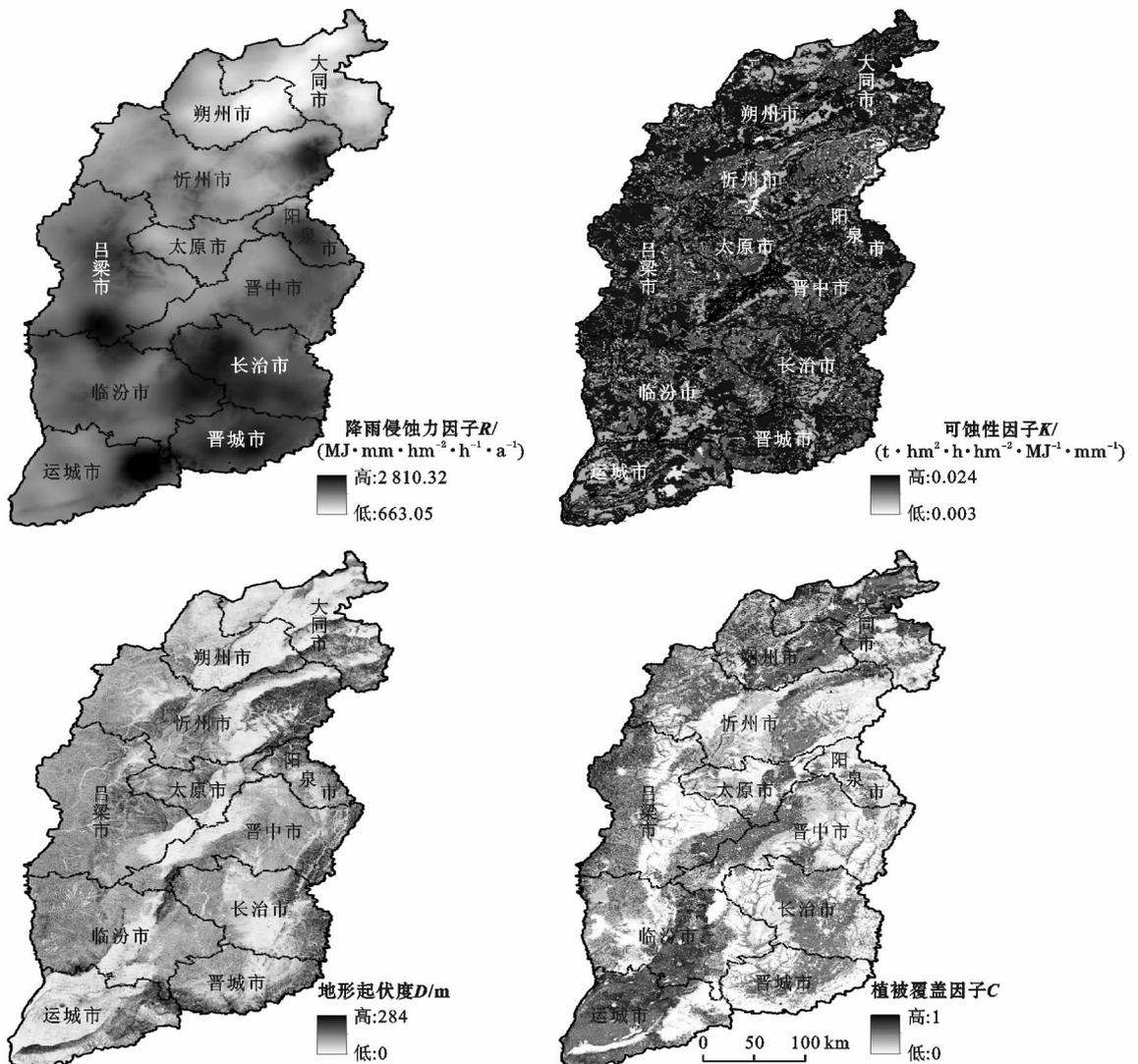


图 1 山西省生态系统水土保持功能评估因子空间分布

### 3.2 土壤保持强度 $A_c$ 及其空间分布特征

山西省生态系统土壤保持强度  $A_c$  取值范围在 0 ~ 10 645.9 t/(hm<sup>2</sup> · a) 之间,绝大多数地区在 20 ~ 1 500 t/(hm<sup>2</sup> · a) 之间,平均约为 416.10 t/(hm<sup>2</sup> · a)(图 2)。山西省土壤保持总量约为 6.52 × 10<sup>9</sup> t/a。土壤保持强度整体表现为“西北低、东南高,盆地低,山区和丘陵高”的空间分布特征。太行山、吕梁山两大山脉  $A_c$  值普遍较高,六大盆地和晋西北地区则较低。这是降水、土壤、地形、植被等共同作用的结果,其中又以地形因子和植被覆盖因子为主导。

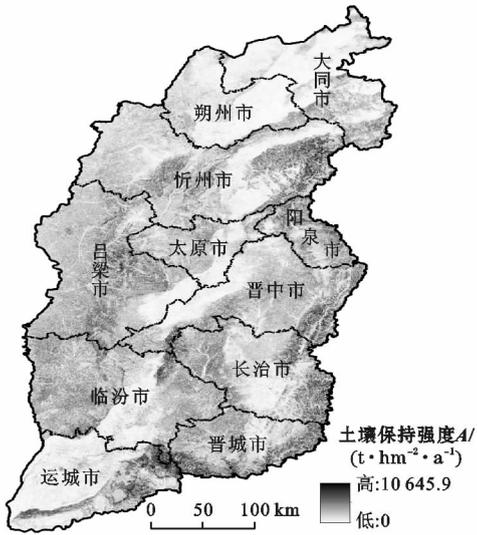


图 2 山西省生态系统土壤保持强度  $A_c$  空间分布

### 3.3 土壤保持功能重要性分级

对土壤保持功能重要性进行分级,核心工作是明确分级标准,得到分界点。将山西省土壤保持强度值按从高到低的顺序排列,得到累加土壤保持量占山西省生态系统土壤保持量比例,记为  $P_1$ ,对应的土壤保持功能极重要区占国土面积的比例记为  $P_2$ 。统计结果显示,当  $P_1 = 1\%$  时,  $P_2$  约为 0.13%,这表示排序以后  $A_c$  数值最高的 0.13% 的区域就可以维持全省 1% 的土壤保持量。当  $P_1$  分别取 5%, 10%, 15%, ..., 90%, 95% 和 100% 时,  $P_1$  与  $P_2$  之间的变化关系如图 3 所示。由图 3 可知,二者之间呈指数函数关系,可用方程  $P_2 = 0.021 6e^{3.939 7P_1}$  表示,相关系数达到 0.933 5。

《生态保护红线划定指南》建议将土壤保持能力值按从高到低的顺序排列后,用累加土壤保持量占生态系统土壤保持量比例的 50% 和 80% 对应的栅格值,作为土壤保持功能评估分级的分界值。考虑到山西省水土流失现状与生态保护需求,依据图 3 中面积

比例关系,本研究将该标准提高至 55% 和 85%,以 624 和 292 t/(hm<sup>2</sup> · a) 为分界值,将山西省生态系统土壤保持功能重要性分为 3 级,分级结果如图 4 所示。

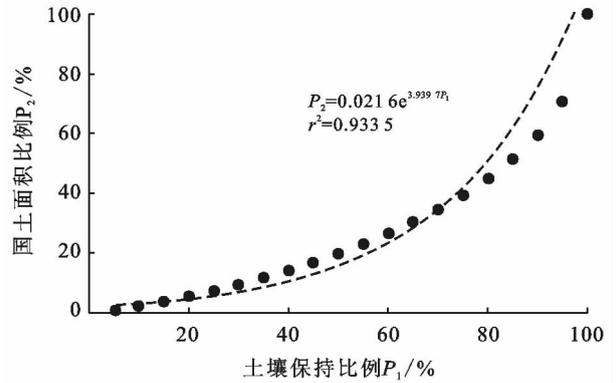


图 3 土壤保持比例 ( $P_1$ ) 与国土面积比例 ( $P_2$ ) 的变化

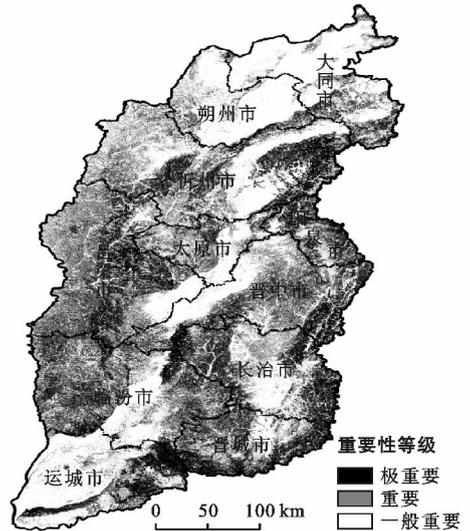


图 4 山西省生态系统土壤保持功能重要性分级

山西省土壤保持功能极重要区、重要区、一般重要区对应面积为 3.62 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>, 4.44 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup> 和 7.61 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>, 分别占山西省国土面积的 23.10%, 28.33% 和 48.57%。其中,极重要区主要分布在太行山、吕梁山、恒山、五台山、太岳山、中条山等组成的“多”字形山地地区。这些山区山高坡陡,植被类型多样,覆盖度高,在保持土壤方面发挥了重要作用。晋西黄土丘陵沟壑区黄土堆积深厚,地表切割破碎<sup>[15]</sup>,水土流失严重,是国家级重点生态功能区,生态系统土壤保持功能也极为重要。重要区则主要分布在上述极重要区周边,以晋西黄土丘陵沟壑区和中南部低山地区分布相对广泛。晋北地区和其他盆地、平原地区为土壤保持功能一般重要区。

## 4 讨论与结论

本文基于 RUSLE 模型的土壤保持功能评估结果与山西省实地相符,以地形因子、植被因子对模型的整体有效性作用最为显著。山西省生态系统土壤保持强度平均为  $416.10 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,土壤保持总量为  $6.52 \times 10^9 \text{ t/a}$ 。土壤保持强度在空间上呈现“西北低、东南高和盆地低、丘陵和山地高”的分布格局。

土壤保持功能重要性的分级必须结合当地水土流失问题的严重程度和生态保护需求情况。将土壤保持强度值按从高到低的顺序排列,用累加土壤保持量占山西省生态系统土壤保持量比例的 55% 和 85% 对应的栅格值作为评估分级的分界值,将山西省生态系统土壤保持功能重要性分为极重要、重要和一般重要 3 级,分别占山西省国土面积的 23.10%、28.33% 和 48.57%。其中,极重要区主要分布在太行山、吕梁山、恒山、五台山、太岳山、中条山等组成的“多”字形山地地区,在晋西黄土丘陵沟壑区也有一定分布。这与《山西省主体功能区规划》、《山西省生态功能区划》中土壤保持生态功能区范围基本一致。对上述区域的良好保护能确保山西省 1/2 以上的生态系统土壤保持功能得到保育。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Zhang Caixia, Zhang Leiming, Li Shimei, et al. Soil conservation of national key ecological function areas [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2015, 6(6): 397-404.
- [2] 李该霞, 宋蒙亚, 谢丽芳, 等. 江苏省水土保持功能的重要性评价[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 236-241.
- [3] Terranova O, Antonico L, Coscarelli R, et al. Soil erosion

risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: An application model for Calabria (Southern Italy)[J]. *Geomorphology*, 2009, 112(3/4): 228-245.

- [4] 方广玲, 香宝, 赵卫, 等. 基于 GIS 和 RUSLE 的拉萨河流域土壤侵蚀研究[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 6-12.
- [5] 冯磊, 王治国, 孙保平, 等. 黄土高原水土保持功能的重要性评价与分区[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(4): 16-21.
- [6] 张静, 曹生奎, 曹广超, 等. 青海湖流域土壤保持量动态变化[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(2): 326-331.
- [7] 刘敏超, 李迪强, 温琰茂, 等. 三江源地区土壤保持功能空间分析及其价值评估[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(5): 627-631.
- [8] 刘睿, 周李磊, 彭瑶, 等. 三峡库区重庆段土壤保持服务时空分布格局研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(6): 932-942.
- [9] 李洋, 兰安军, 钟九生, 等. 贵州省水土保持功能的重要性评价[J]. *贵州农业科学*, 2018, 46(2): 148-151.
- [10] 王治江, 李培军, 万忠成, 等. 辽宁省生态系统服务重要性评价[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(10): 1606-1610.
- [11] 生态环境部, 国家发展改革委. 生态保护红线划定指南[Z]. 北京: 生态环境部, 2017.
- [12] 王彬, 郑粉莉. 水蚀过程的土壤可蚀性研究述评[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 277-286.
- [13] 吴昌广, 李生, 任华东, 等. USLE/RUSLE 模型中植被覆盖管理因子的遥感定量估算研究进展[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1728-1732.
- [14] 王效科, 欧阳志云, 肖寒, 等. 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(1): 14-19.
- [15] 赵乾坤. 山西省水土保持功能分区及生态脆弱性评价[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2014.