

# 基于生态承载力预警的土壤侵蚀敏感红线划分研究 ——以陕西省为例

马 琪<sup>1</sup>, 李 婷<sup>2</sup>, 贺成民<sup>3</sup>

(1.西安外国语大学 旅游学院·人文地理研究所, 西安 710128;

2.西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054; 3.陕西省水文水资源勘测中心, 西安 710068)

**摘 要:**土壤侵蚀敏感红线是生态保护红线体系的重要构成,土壤侵蚀敏感红线划分过程中过度概括性或简单化的阈值判定,对区域土壤侵蚀风险的承载能力考虑不足。为科学准确地划定区域土壤侵蚀敏感红线,以陕西省为例,基于不同侵蚀类型区生态承载力预警评估,综合判定并划分形成科学的土壤侵蚀敏感红线方案。结果表明:(1) 陕西省土壤侵蚀整体呈现出由北向南逐渐加剧的特征,生态承载力以预警和临界预警为主,预警区总面积约 105 108.83 km<sup>2</sup>,占陕西省国土面积的 51.13%。(2) 陕西省土壤侵蚀敏感红线总面积为 19 641.66 km<sup>2</sup>,以草地和耕地为主,占到全省国土面积的 9.67%,集中分布于渭北塬区及其北部的黄土丘陵沟壑区,零星分散于陕南秦巴山区的东南部。(3) 基于生态承载力预警的土壤侵蚀敏感红线划分技术框架,提高了生态保护红线划定的科学性和准确性,可适用于不同自然地域单元以生态敏感性识别为基础的生态保护红线划定。研究结果将对国土空间规划中生态保护红线的划定、各类区划及规划边界的优化衔接提供科学参考。

**关键词:**生态承载力; 土壤侵蚀; 敏感性; 生态保护红线; 陕西省

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0093-07

## Zoning the Sensitivity Red-line of Soil Erosion Based on an Early-warning System of Ecological Carrying Capacity — A Case Study of Shaanxi Province

MA Qi<sup>1</sup>, LI Ting<sup>2</sup>, HE Chengmin<sup>3</sup>

(1.School of Tourism & Research Institute of Human Geography, Xi'an International Studies University, Xi'an 710128, China; 2.College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3.Hydrology and Water Resources Investigation Center of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** Sensitivity redline of soil erosion is one of the key components of Ecological Red Line (ERL). At present, an overgeneralization as well as simplification of threshold method is a very common in research of zoning the sensitivity redline of soil erosion, which is lack of the consideration of ecological carrying capacity. Therefore, taking Shaanxi Province as an example, we comprehensively divided the sensitive red-line of soil and water loss on provincial scale based on the regional ecological carrying capacity. The results show that: (1) soil erosion in Shaanxi Province as a whole is gradually intensifying from north to south; most areas are characterized by early-warning and critical early-warning for their ecological carrying capacity, but the total area of the early-warning zone is 105 108.83 km<sup>2</sup>, accounting for 51.13% of the land area of this province; (2) the total area of the ERL of soil and water loss in Shaanxi Province is 19 641.66 km<sup>2</sup>, which mainly consists of grassland and farmland, accounting for 9.67% of the land area of this province; they are clustered together in the Qinba mountains of southeast Shaanxi and the Weibei rainfed tableland of the Loess Plateau; (3) the technical framework of the demarcation of sensitive red-line of soil and water loss based on ecological carrying capacity of early-warning can be conducive to the reasonability and accuracy of the ERL; this criterion can be applied to the demarcation of the ERL based on the identification of ecological importance and

收稿日期:2021-07-13

修回日期:2021-09-21

资助项目:陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2021JQ-769);2022 年度陕西省哲学社会科学重大理论与现实问题研究项目(2022ND0284)

第一作者:马琪(1987—),男,陕西榆林人,博士,讲师,研究方向为生态保护红线划定与区域生态安全预警评估。E-mail:maqi86@126.com

sensitivity in different natural areas. This research can provide a scientific reference for the demarcation of the ERL, and for the optimization and connection of various divisions and planning boundaries.

**Keywords:** ecological carrying capacity; soil erosion; sensitive; ecological red-line; Shaanxi Province

生态保护红线是我国生态环境保护的重要制度创新。土壤侵蚀敏感红线作为生态保护红线体系的重要构成,对国土空间各类规划、区划的有序融合和衔接具有重要作用<sup>[1]</sup>,其关键环节在于土壤侵蚀敏感性评价和阈值判定。土壤侵蚀敏感性评价是土壤侵蚀发生的可能性以及在考虑自然因素时形成的易受土壤侵蚀影响区域的识别<sup>[2]</sup>。国内外土壤侵蚀模型主要分为经验模型(USLE, RUSLE, CSLE)<sup>[3-5]</sup>和物理模型(WEPP, EUROSEM, ANSWERS, LISEM)两类<sup>[6-10]</sup>。目前,在生态保护红线划定中土壤侵蚀敏感红线划分多根据经验模型为理论基础<sup>[11-12]</sup>,选择研究区适宜的敏感评价因子,采用几何平均数或加权叠加进行区域土壤侵蚀敏感性综合评价<sup>[13]</sup>,最终根据《生态功能区划暂行规程》或《生态保护红线划定指南》等规范文件,确定敏感评价因子分级和阈值设置,将评价结果中极敏感区划分为红线<sup>[11,14]</sup>。该方法因机制简单,参数容易获取,应用广泛<sup>[15]</sup>。然而,面对地理环境复杂的地区,由于敏感评价指标选择和因子图层绘制的不确定性,加之分级标准不完全统一,若不加甄别地采用自然断点法或累积阈值法,过度概括或阈值简单化判定敏感性级别,忽略生态标准的时空局限性<sup>[16-17]</sup>,将导致评价结果存在误差,与实际不符。徐卫华等指出生态承载力是预防土地沙化、水土流失和石漠化等生态问题的能力<sup>[18]</sup>。目前,“生态承载力”的概念被越来越多地纳入各类空间规划与发展研究当中,并为其提供科学指引。例如,周侃等通过综合考虑水资源承载力能够为宁夏西海固地区空间规划与发展提供科学建议<sup>[19]</sup>;刘孟浩等通过地区生态承载力核算,服务于多类型保护地经济建设规模、结构与布局的优化<sup>[20]</sup>;张学渊等基于对生态承载力的动态评估开展对西北干旱地区的生态安全区划分研究<sup>[21]</sup>。上述研究表明,将生态承载力预警评估纳入生态保护红线划定过程,能够为提高红线划分的科学性和准确性提供一定思路。

当前,我国正处在新一轮国土空间规划体系构建的关键时期,生态保护红线的科学划分成为提升国土空间治理体系和治理能力的核心关键。本研究以陕西省土壤侵蚀敏感红线划分为例,基于生态承载力预警的空间指引,形成具有推广应用价值的土壤侵蚀敏感红线划分技术框架,以期对生态保护红线中土壤侵蚀敏感红线的划定及国土空间规划提供科学参考。

## 1 研究区概况

陕西省地处中国内陆中心,是全国水土流失最严重的省份之一。境内地貌复杂,整体呈南北高、中间低的特征,由北向南依次为黄土高原、关中平原和秦巴山地,素有“三秦大地”之称,秦岭是黄河与长江两大流域中游的分水岭。秦岭以北属于黄河流域,以温带大陆性季风气候为主,主要有子午岭生物多样性保护优先区;秦岭以南属于长江流域,属于北亚热带季风气候,境内生物多样性极其丰富。全省年均降水量约 653 mm,年均气温为 11.6℃<sup>[22]</sup>。全国土壤侵蚀类型分区显示,陕南秦巴山地属于西南土石山水力侵蚀区,其余地区属于西北黄土高原水力侵蚀区。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 技术流程

一定时间范围内生态阈值判定取决于空间尺度的选择,生态承载力预警评估可为特定空间尺度下土壤侵蚀敏感红线的阈值确定提供依据<sup>[19,23]</sup>。本文“生态承载力”的概念即狭义的水土承载力,表征土壤水力侵蚀风险的大小。国家和省域国土空间规划以生态安全格局构建为主要目标,可在生态承载力预警评估和土壤侵蚀敏感性评价的基础上综合辨识土壤侵蚀敏感红线备选区。区域生态承载力与土壤侵蚀敏感红线划分关联的生态学过程和相互作用机理为:生态承载力低的区域,土壤侵蚀风险高,土壤侵蚀强度大,需要预警并划定土壤侵蚀敏感红线以严格保护脆弱的生态系统;生态承载力中等的区域,土壤侵蚀风险中等,土壤侵蚀强度中等,为临界预警,需重视土壤侵蚀敏感问题以遏制脆弱环境的恶化;生态承载力高的区域,土壤侵蚀风险低,土壤侵蚀强度低、土壤保持功能强,则无需预警且无需划定土壤侵蚀敏感红线<sup>[18]</sup>。土壤侵蚀敏感红线备选区需要进一步综合其他类型红线,衔接其他区划、规划形成生态保护红线落地方案,研究框图详见图 1。

### 2.2 研究方法

(1) 土壤侵蚀敏感性评估方法。土壤侵蚀敏感性指在自然状况下发生土壤侵蚀的潜在可能性及其程度<sup>[24]</sup>。本文利用通用土壤流失方程估算土壤侵蚀<sup>[3]</sup>。公式如下:

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

式中: $A$  为实际土壤侵蚀量 $[t/(km^2 \cdot a)]$ ;  $R$  为降雨侵蚀力因子 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$ ;  $K$  为土壤可蚀性因子 $[t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$ ;  $LS$  表示坡长坡度因子;  $C$  为植被覆盖与管理因子;  $P$  为水土保持措施因子。

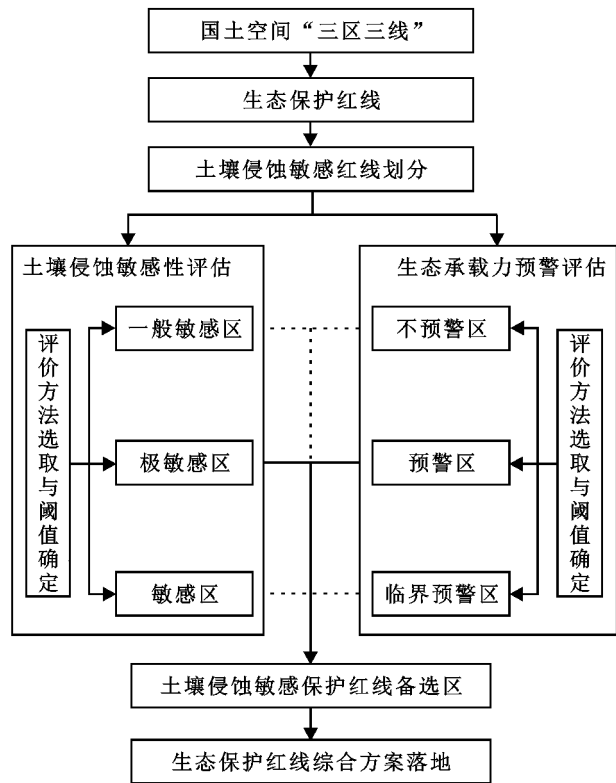


图 1 基于生态承载力的土壤侵蚀敏感红线划分流程

(2) 生态承载力预警评估方法。本文采用水土流失指数作为生态承载力预警指标进行评估,单位面积土壤侵蚀量与该区域的容许土壤流失量比值为水土流失指数,表征土壤侵蚀风险,根据水土流失指数的大小进行承载力预警等级划分<sup>[18]</sup>。

$$S_i = \frac{A}{A_r} \tag{2}$$

式中: $S_i$  为水土流失指数; $A$  为土壤侵蚀量 $[t/(km^2 \cdot a)]$ ;  $A_r$  为容许土壤流失量 $[t/(km^2 \cdot a)]$ 。陕北黄土高原区和陕南土石山区 $A_r$ 取值见表 1。

(3) 分级标准。土壤侵蚀敏感性分级参考《生态保护红线划定指南》中阈值划分,按照不同侵蚀类型区分别对土壤侵蚀量由大到小排序后计算栅格的累加侵蚀量,将累加侵蚀量占土壤侵蚀总量比例的 50% 与 80% 所对应的栅格值,作为极敏感、敏感和一

般敏感的分界点<sup>[25]</sup>。

生态承载力预警分级阈值参考《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)<sup>[26]</sup> 中不同侵蚀类型区土壤侵蚀强度分级和文献[18]中的预警分级阈值确定(表 1)。土壤侵蚀强度 $[t/(km^2 \cdot a)]$ 分级按水力侵蚀强度分级标准进行划分,中度(2500,5000]、强烈(5000,8000]、极强烈(8000,15000]、剧烈(15000,+∞); 陕北黄土高原区:微度[0,1000]、轻度(1000,2500]; 陕南土石山区:微度[0,500]、轻度(500,2500]。坡度分级按土壤侵蚀强度面蚀分级指标进行划分,坡度(°)区间依次划分为:[0,5],(5,8],(8,15],(15,25],(25,35],(35,90]。

类型区	容许土壤流失量/ ( $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ )	水土承载力预警分级		
		不预警	临界预警	预警
陕北黄土高原区	1000	$\leq 1.0$	1~5.0	$> 5.0$
陕南土石山区	500	$\leq 1.0$	1~10.0	$> 10.0$

2.3 数据来源及预处理

降雨侵蚀力因子( $R$ )值利用基于日降雨资料的年降雨侵蚀力计算方法<sup>[27]</sup>,利用 2000—2010 年陕西省及周边 45 个站点逐日降雨量数据计算各站点降雨侵蚀力,然后经过空间插值生成  $R$  因子图层。

土壤可蚀性因子( $K$ )依据中国土志、中国土壤、第二次土壤普查数据集等资料采用 EPIC 模型中的  $K$  值公式估算<sup>[28]</sup>,然后根据张科利等<sup>[29]</sup>的研究结合实测值进行订正。

地形因子坡长( $L$ )、坡度( $S$ )根据杨勤科等<sup>[30]</sup>开发的  $LS$  计算工具(LS-Reg)实现陕西省坡度坡长因子专题图层的自动计算。数字高程数据为水平分辨率约 90 m 的 SRTM 数据来源于国际地球科学共享中心。

植被覆盖与管理因子( $C$ )用来表示植被覆盖和管理措施对土壤侵蚀的影响<sup>[31]</sup>;水土保持措施因子( $P$ )为采取水土保持措施后土壤流失量与顺坡种植时土壤流失量比值<sup>[9]</sup>。在前人研究基础上<sup>[9-10,32]</sup>,结合大尺度的土壤侵蚀研究和陕西实际,依据土地利用数据分别对  $C$  和  $P$  进行赋值(表 2)。2010 年土地利用分类数据来源于陕西省生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查与评估数据集。

表 2 不同土地利用类型的  $C$  值和  $P$  值

土地利用类型	林地	灌丛	草地	园地	旱地	水田	城镇	水域	裸地
$C$ 值	0.005	0.099	0.112	0.18	0.228	0.18	0	0	1
$P$ 值	1	1	1	0.69	0.352	0.15	0.01	0	1



cn),2015 年土地利用类型包括 6 个一级类型(耕地、林地、草地、水域、城乡居民工矿用地、未利用地)以及 25 个二级类型,空间分辨率为 30 m。

各因子专题图层统一坐标系后按 50 m 空间分辨率重采样后参与模型最终运算。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤侵蚀强度的空间异质性特征

通用土壤流失方程估算结果显示(图 2),全省土壤侵蚀强度以微度和轻度侵蚀为主,占到全省国土面积的 55.15%,中度侵蚀以上面积占比为 44.95%;其中陕北黄土高原区各强度等级比例依次为:微度(36.01%)>中度(17.65%)>轻度(15.32%)>强烈(12.72%)>极强烈(11.89%)>剧烈(6.41%);陕南土石山区轻度侵蚀面积最大,占比为 34.86%;其次是微度侵蚀,面积占比达 26.92%,中度侵蚀以上面积占比为 38.22%。空间上看,陕西省南北土壤侵蚀强度差异较大,整体呈现出由北向南逐渐加剧的特征,与降雨侵蚀力空间格局相匹配。水力侵蚀强度微弱的区域集中分布于陕北风沙滩区、关中平原以及西秦岭的中高山地区;强烈侵蚀以上的区域广布于陕北黄土丘陵沟壑区,其中渭北塬区一带较为突出,涉及宝鸡市、咸阳市、渭南市的北部以及铜川市的大部分区域;陕南秦巴土石山区以微度和轻度侵蚀为主,但东南部的中低山区土壤侵蚀强度较大,其中安康市尤为明显。

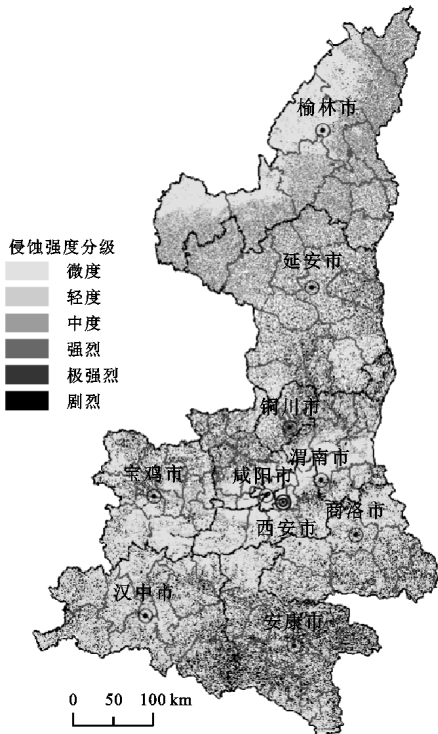


图 2 陕西省土壤侵蚀强度分级

#### 3.2 土壤侵蚀敏感分级结果

土壤侵蚀敏感性分级结果显示(图 3),陕西省土壤侵蚀敏感性以一般敏感性为主,面积为 151 115.97 km<sup>2</sup>,占全省国土面积的 74.40%,主要分布于关中平原以南的大部分地区,其次集中于榆林市北部风沙滩区。极敏感和敏感区面积分别为 24 148.62 km<sup>2</sup>,27 852.80 km<sup>2</sup>,占比分别为 11.89%和 13.71%,二者在空间上整体分布趋势一致,呈现相互交错分布状。其中,73.44%的极敏感区主要位于陕北黄土高原地区的延安市,其次是渭北塬区,涉及宝鸡市、咸阳市、渭南市的北部以及铜川市的大部,榆林市东南部的黄土丘陵沟壑区有少量分布。陕南秦巴土石山区极敏感区面积占全省极敏感区的 26.56%,零散分布于汉丹江河谷低山丘陵区。从各侵蚀类型分区来看,面积分布均呈现一般敏感区>敏感区>极敏感区的特征;陕北黄土高原极敏感区面积 17 734.36 km<sup>2</sup>,占到该区域总面积的 13.76%;陕南土石山区极敏感区面积6 414.26 km<sup>2</sup>,仅占到 8.64%;陕北黄土高原极敏感区面积占比明显大于陕南土石山区。

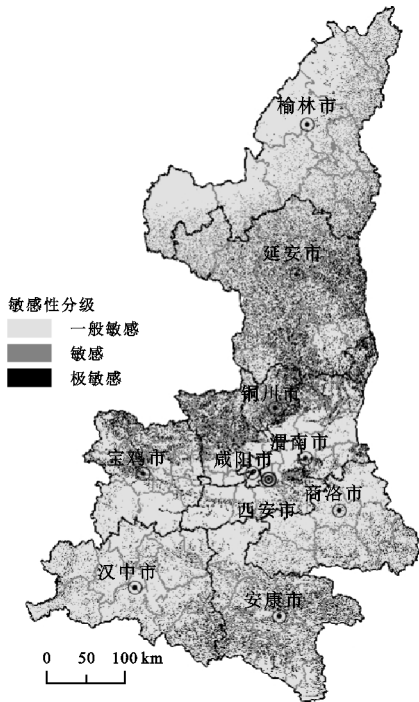


图 3 陕西省土壤侵蚀敏感分级

#### 3.3 生态承载力预警评估结果

生态承载力预警评估结果显示(图 4),陕西省生态承载力预警状态格局分明,分为预警、临界预警、不预警 3 个级别,且以预警和临界预警状态为主;不预警区分布较少,仅分布于关中平原,涉及西安市北部区县以及西咸新区等地。陕西省一半以上县区处于预警状态,水土承载力低、土壤侵蚀风险高,土壤侵蚀

强度大,总面积约 105 108.83 km<sup>2</sup>, 占全省国土面积的 51.13%。其中,陕北黄土高原呈预警状态县区主要包括榆林市的清涧县和吴堡县,以及延安市黄陵县和黄龙县除外的大部分区域;渭北塬区呈预警状态县区涉及铜川市全部,以及宝鸡市、咸阳市和渭南市的北部区县;秦巴山区的东南部,涉及商洛市的南部、汉中市的东部以及安康市的大部分地区亦呈预警状态。此外,陕西省近 40%的县区处于临界预警状况,这些县区土壤保持功能及水土承载力均属中等水平,总面积 97 989.09 km<sup>2</sup>,面积占比为 47.67%;陕北地区临界预警区涉及延安市北部的吴起县和子长县,以及榆林市的大部;陕南临界预警区主要涉及秦岭分水岭两侧及汉中盆地周围的区县,关中平原大部分县区均处于临界预警状态。

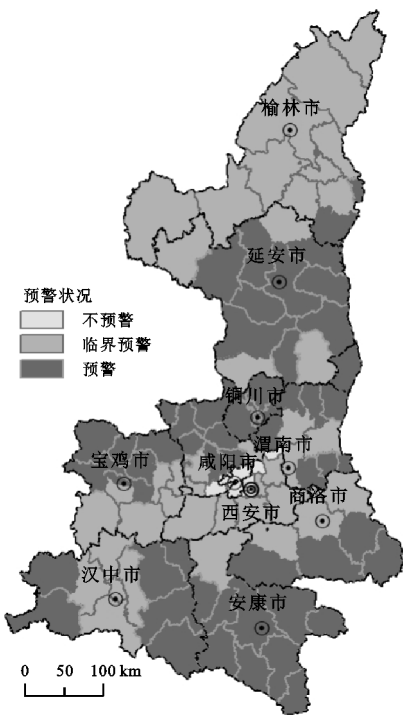


图 4 陕西省生态承载力预警分布

3.4 土壤侵蚀敏感红线

基于生态承载力预警评估结果划分得到的土壤侵蚀敏感红线备选区见图 5,总面积为 19 641.66 km<sup>2</sup>,占陕西省国土面积的 9.67%,红线空间分布集中在黄土高原的渭北塬区及延安市的大部,陕南土石山区主要集中于秦巴山区的东南区域。从各地市土壤侵蚀敏感红线面积大小来看,延安市(6 274.23 km<sup>2</sup>)>安康市(3 300.16 km<sup>2</sup>)>渭南市(2 148.02 km<sup>2</sup>)>宝鸡市(2 042.11 km<sup>2</sup>)>咸阳市(1 996.97 km<sup>2</sup>)>汉中市(1 435.17 km<sup>2</sup>)>铜川市(1 168.98 km<sup>2</sup>)>商洛市(922.75 km<sup>2</sup>)。进一步分析红线内土地利用、坡度状况发现,从土地利用类型上来看,红线

内以草地和耕地为主,分别占到整个红线的 45.79%和 33.03%;林地面积占比约 20.01%,其他用地均不足 1%,可见土壤侵蚀敏感程度与农牧业活动关系密切。从地形上来看,红线内坡度主要介于 8°~15°和 15°~25°,面积占比分别达到 34.77%和 29.43%;约 70%位于陕北丘陵沟壑区,可见陕北丘陵沟壑区是土壤侵蚀敏感性的高发区。

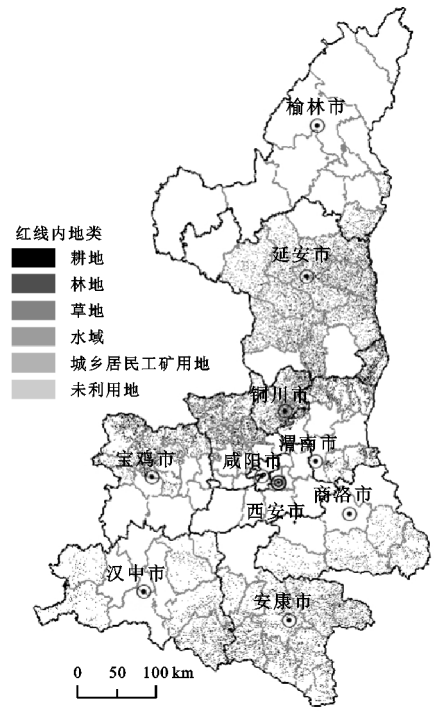


图 5 陕西省土壤侵蚀敏感红线分布

4 讨论与结论

4.1 讨论

基于生态承载力预警状况进行土壤侵蚀敏感红线的划分实质是区域生态阈值的判定问题。生态阈值判定是生态保护红线划定的关键,若未考虑区域生态承载力,生态保护红线划分的阈值在生态学描述中就没有意义<sup>[16]</sup>。面对各省及各地区存在生态保护红线阈值精准识别的困难,若生态保护红线的阈值设定忽略生态承载力所限定的空间范围,可能会造成红线落地具有较大误差难以有效实施,或对国土空间各类规划衔接融合产生反作用<sup>[17]</sup>。本研究结果分析显示,土壤侵蚀极敏感区面积为 24 148.62 km<sup>2</sup>,最终划定的土壤侵蚀敏感红线备选区面积为 19 641.66 km<sup>2</sup>。考虑区域水土承载力状况与土壤侵蚀风险后土壤侵蚀敏感红线备选区的面积较未考虑水土承载力减少了 4 506.96 km<sup>2</sup>,减少的区域主要分布于土壤侵蚀风险较低,无需预警和临界预警的区域。由此可见,将生态承载力的预警评估纳入土壤侵蚀敏感性红

线划定过程可有效避免不预警和临界预警区域红线划定过程中产生的“过度保护”问题,亦可规避仅依靠专家经验确定红线阈值的主观问题,为提高土壤侵蚀敏感红线划分的科学性和准确性提供了思路。此外,该方法在约束、规范和引导国土空间各类规划布局的同时,也有助于有限生态保护资金的精准投放。

研究中生态承载力预警区内土壤侵蚀敏感红线空间分布与《全国生态功能区划(修编版)》中陕西生态敏感性综合特征基本一致,与《全国主体功能区规划》、《陕西省主体功能区规划》相得益彰。生态保护红线划分是主体功能区战略的具体落实和区域国土空间规划的重要基础性工作,市县尺度重在土壤侵蚀敏感红线备选区的勘界落地,这就需要进一步综合国土开发适宜性评价结果、全国第三次土地调查结果进行红线边界的修正和优化。生态承载力预警区土壤侵蚀敏感红线斑块破碎化严重,从不预警区和临界预警区极敏感斑块形态分析来看,生态斑块大小平均为 $0.018\text{ km}^2$ , $64.28\%$ 的面积属于较低斑块集中度水平;按照生态重要性、生态敏感性斑块越大,集中度越高,破碎化程度越低,生态保护价值越大的评价准则<sup>[33]</sup>,不预警和临界预警区内大部分极敏感斑块不适宜纳入生态保护红线的体系中。因此,需进一步在国土开发适宜性评价结果基础上通过人工目视优化修正,甚至公众参与,以保证土壤侵蚀敏感红线内部具有良好的联通性和合理的外部边界<sup>[34]</sup>。

陕西省土壤侵蚀敏感红线在黄河中上游生态安全方面起到至关重要的作用,红线内分布着 $33.03\%$ 的耕地,农用地向来被认为是侵蚀产沙的主要来源<sup>[34-35]</sup>,黄土高原农牧业活动频繁,农田的土壤侵蚀潜在危险度最高;加之地形破碎,且是国家煤炭和油气资源储量丰富地区,土壤侵蚀风险较高,人类的生产建设项目很容易扰动原生地表,进而引发水土流失和泥石流灾害。因此,国土空间规划开发中需要限制大规模的城镇化和工业化,避免土地利用强烈变化和扰动,在基本农田保障粮食安全的前提下,土壤侵蚀敏感红线内耕地需继续开展生态恢复工程,提高土壤保持功能。生产建设项目水土保持措施需严格实行“三同时”制度,注重施工前的表土剥离,施工过程中需加大水土流失监测的频次,加强生物措施,避免大规模的工程措施,降低土壤侵蚀潜在风险的发生。虽然陕西重大生态恢复工程的生态效益已逐渐有所显现,土壤侵蚀模数整体减弱<sup>[35]</sup>,但不预警和临界预警区内仍存在 $4\,506.96\text{ km}^2$ 的土壤侵蚀极敏感区,需要

水利部门予以重点关注、实地核查,做好必要的水土流失预防和治理。

## 4.2 结论

(1) 陕西省土壤侵蚀以微度和轻度侵蚀为主,占比 $55.15\%$ ,空间上土壤侵蚀南北差异较大,整体呈现出由北向南逐渐加剧特征;全省生态承载力以预警和临界预警为主,一半以上县区生态承载力低,土壤侵蚀风险高,处于预警状态,临界预警区主要分布于关中平原及黄土高原的北部。

(2) 陕西省土壤侵蚀敏感红线总面积为 $19\,641.66\text{ km}^2$ ,集中分布于渭北塬以北的黄土高原,并零散分布于陕南秦巴土石山区的东南部,占全省国土面积的 $9.67\%$ ;红线内以草地和耕地为主,占比分别为 $45.79\%$ 和 $33.03\%$ ,红线内的坡度主要介于 $8^\circ\sim 25^\circ$ ,是陕北黄土高原土壤侵蚀高发坡度范围。

(3) 科学合理的生态承载力预警评估有助于提高国土空间规划中土壤侵蚀敏感红线划分的准确性。基于生态承载力预警的土壤侵蚀敏感红线划分技术框架可适用于不同自然地域单元以生态敏感性识别为基础的生态保护红线划分。

致谢:本文部分数据成果来源于西北大学和陕西省生态环境厅联合实施的“陕西省生态环境十年变化(2000—2010)遥感调查与评估”项目,感谢项目组共享数据成果。

## 参考文献:

- [1] Ding Z M, Yao S B. Theoretical analysis and model design of search for ecological conservation redlines based on the sensitivity assessment of ecosystem services[J]. Land Use Policy, 2020,97:104745.
- [2] 陈锐银,严冬春,王安邦,等.基于GIS/CSLE的四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀研究[J].水土保持学报, 2020,34(1):17-26.
- [3] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning[M]. Washington DC: U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbok, 1978.
- [4] 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.
- [5] Renard K G, Foser G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [M]. Washington DC: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1997.
- [6] Zheng F L, Zhang X C, Wang J X, et al. Assessing applica-



- bility of the WEPP hillslope model to steep landscapes in the northern Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020,197:104492.
- [7] Khaleghpanah N, Shorafa M, Asadi H, et al. Modeling soil loss at plot scale with EUROSEM and RUSLE2 at stony soils of Khamesan watershed, Iran[J]. *Catena*, 2016,147:773-788.
- [8] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning[J]. *Transactions of the ASAE*,1980,23(4):938-944.
- [9] 魏健美,李常斌,武磊,等.基于 USLE 的甘南川西北土壤侵蚀研究[J].*水土保持学报*,2021,35(2):31-37,46.
- [10] 刘孟竹,张红娟,任贺宇,等.退耕还林背景下北方农牧交错带土壤保持功能时空变化[J].*水土保持研究*, 2021,28(5):172-178.
- [11] Yang Y J, Song G, Lu S. Study on the ecological protection redline(EPR)demarcation process and the ecosystem service value(ESV)of the EPR zone: A case study on the city of Qiqihaer in China[J]. *Ecological Indicators*, 2020,109:105754.
- [12] Wang Y, Gao J X, Zou C X, et al. Identifying ecologically valuable and sensitive areas: A case study analysis from China[J]. *Journal for Nature Conservation*, 2017,40:49-63.
- [13] 冉涛,邓伟.北方生态脆弱区土壤侵蚀敏感性空间分异[J].*水土保持研究*,2017,24(4):182-186,190.
- [14] 孔令桥,王雅晴,郑华,等.流域生态空间与生态保护红线规划方法:以长江流域为例[J].*生态学报*,2019,39(3):835-843.
- [15] Qin W, Guo Q, Cao W, et al. A new RUSLE slope length factor and its application to soil erosion assessment in a Loess Plateau watershed[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018,182:10-24.
- [16] 范小杉,何萍,侯利萍,等.国外生态阈值研究进展及启示[J].*环境科学研究*,2020,33(3):691-699.
- [17] 姚岚,丁庆龙,俞振宁,等.生态保护红线研究评述及框架体系构建[J].*中国土地科学*,2019,33(7):11-18.
- [18] 徐卫华,杨琰琰,张路,等.区域生态承载力预警评估方法及案例研究[J].*地理科学进展*,2017,36(3):306-312.
- [19] 周侃,樊杰,王亚飞,等.干旱半干旱区水资源承载力评价及空间规划指引:以宁夏西海固地区为例[J].*地理科学*,2019,39(2):232-241.
- [20] 刘孟浩,席建超,陈思宏.多类型保护地生态承载力核算模型及应用[J].*生态学报*,2020,40(14):4794-4802.
- [21] 张学渊,魏伟,颀斌斌,等.西北干旱区生态承载力监测及安全格局构建[J].*自然资源学报*,2019,34(11):2389-2402.
- [22] 马琪,潘秋玲,涂纯.生物多样性维护功能评估及其空间尺度效应分析:以陕西省为例[J].*自然资源学报*, 2021,36(8):1937-1948.
- [23] Levin S. The problem of pattern and scale in ecology [J]. *Ecology*, 1992,73(6):1943-1967.
- [24] 王钧,周平,宫清华,等.基于 RUSLE 的广东南岭土壤侵蚀敏感性研究[J].*热带地理*,2018,38(3):347-355.
- [25] 中华人民共和国生态环境部.关于印发《生态保护红线划定指南》的通知[EB/OL].(2017-5-27)[2022-3-20]  
[http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728\\_418679.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm).
- [26] 中华人民共和国水利部. SL190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [27] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J].*资源科学*,2003,25(1):35-41.
- [28] Williams J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case history [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences*, 1990,329(1255):421-428.
- [29] 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.
- [30] 杨勤科,郭伟玲,张宏鸣,等.基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法初报[J].*水土保持通报*,2010,30(2):203-206.
- [31] 冯强,赵文武. USLE/RUSLE 中植被覆盖与管理因子研究进展[J].*生态学报*,2014,34(16):4461-4472.
- [32] 张岩,刘宝元,史培军,等.黄土高原土壤侵蚀作物覆盖因子计算[J].*生态学报*,2001,31(7):1050-1056.
- [33] 樊杰.资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价方法指南[M].北京:科学出版社,2019.
- [34] Bai Y, Wong C P, Jiang B, et al. Developing China's ecological redline policy using ecosystem services assessments for land use planning[J]. *Nature Communications*, 2018,9(1):3034,DOI:10.1038/s41467-018-05306-1.
- [35] 刘文超,刘纪远,匡文慧.陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征[J].*地理学报*,2019,74(9):1835-1852.