

# 延安市退耕还林前后土壤保持生态服务功能评价

王森<sup>1,2</sup>, 王海燕<sup>3</sup>, 谢永生<sup>1,4</sup>, 骆汉<sup>1,4</sup>

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 水利部 水土保持监测中心, 北京 100053; 4. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为更好地探究延安市退耕还林前后土地利用变化对区域土壤保持生态服务功能的影响,采用了InVEST模型对延安市退耕还林前后2000年和2015年的土地利用变化及土壤侵蚀量、土壤保持量进行了评估,该模型在计算生态系统土壤保持服务功能时,考虑了地块泥沙输移、沉积这一重要水文过程,在计算土壤保持量时更为精确。结果表明:(1)15年间各地类面积均发生了不同程度的变化,其中林地面积的增加量(主要来源为耕地和草地)和耕地面积的减少量(主要流向为林地和草地)分别达到了3 142.25 km<sup>2</sup>及3 011.27 km<sup>2</sup>,退耕还林工程取得了巨大成效。(2)延安市2000年和2015年的土壤侵蚀强度均以轻度及中度侵蚀为主,侵蚀总量分别为2.20亿t和1.38亿t,15年间各侵蚀强度类型均有向低等级侵蚀强度类型转换的趋势。(3)延安市2000年与2015年土壤保持总量分别为7.72亿t和8.50亿t,且土壤保持量呈东北向西南增加的趋势,各地类中林地和草地的土壤保持效果最佳,说明退耕还林工程的推进是增加区域土壤保持功能的重要途径。

**关键词:**退耕还林工程;生态服务功能;土壤侵蚀;土壤保持;延安市

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0280-07

## Evaluation of Ecological Service Function of Soil Conservation Before and After Grain for Green Project in Yan'an City

WANG Sen<sup>1,2</sup>, WANG Haiyan<sup>3</sup>, XIE Yongsheng<sup>1,4</sup>, LUO Han<sup>1,4</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Monitoring Center of Soil and Water Conservation, ministry of Water Resources, Beijing 100053, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To better explore the effects of land use change on ecosystem service of regional soil conservation before and after Grain for Green Project (GFGP) in Yan'an, the InVEST model was used to evaluate the change of land use, soil erosion and soil retention from 2000 to 2015. The model took into consideration of such important hydrological processes as sediment delivery and deposition when computing soil conservation, therefore, it is accurate in terms of soil retention. The results showed that: (1) over the past 15 years, all types of land use underwent change at various degrees, the woodland had increased by 3 142.25 km<sup>2</sup>, which mainly derived from farmland and grassland; the farmland had decreased by 3 011.27 km<sup>2</sup> because most of farmland changed into woodland and grassland; (2) most areas in Yan'an belonged to the slight or moderate degree of erosion; the total soil erosion rates in 2000 and 2015 were 220 million tons and 138 million tons, respectively; over the 15-year period, all types of erosion intensity had the tendency of change towards the lower degree; (3) the amounts of soil retention in 2000 and 2010 were 772 million tons and 850 million tons, respectively, and the amounts of soil retention tended to increase from northeast to southwest. Woodland and grassland had the best abilities to conserve soil, which indicated that the advancement of GFGP was the important way to increase the function of regional soil conservation.

**Keywords:** Grain for Green Project; ecological service function; soil erosion; soil conservation; Yan'an city

生态系统服务是指人类从生态系统获得的各种惠益,包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务<sup>[1]</sup>,这些服务是人类生活的必需品和人类生活质量的保证,是人类生存与现代文明的基础<sup>[2-3]</sup>。水土资源作为人类赖以生存的重要物质基础,侵蚀控制和保持土壤也是生态系统服务的重要功能<sup>[4]</sup>。延安市是我国水土流失较为严重的地区之一,同时也是陕北黄土丘陵沟壑土壤保持功能区的一部分,在控制侵蚀和减缓水土流失上有较高要求。近年来,随着国家的重视和人们生态意识的觉醒,在黄土高原地区开展了由上而下的水土保持工作,尤其是“国家水土保持重点工程”及“退耕还林”等生态建设工程在一定程度上遏制了水土流失,改善了生态环境,这也引起了区域土地利用状况的改变,进而改变了生态系统的土壤保持功能。因此,定量地分析延安市退耕还林前后土壤保持功能的变化,对于认识土壤保持功能现状、提高生态保护意识、保障生态系统功能具有重大意义;同时,也能反映退耕还林等生态修复工程的效果,为工程的下一步实施提供科学合理的参考依据。

目前国内外学者主要利用 USLE 或 RUSLE 模型对区域土壤保持服务功能进行评价,采用的方式多为潜在土壤流失量(RKLS)减去实际土壤流失量(USLE)<sup>[5-8]</sup>,从而得到生态系统的土壤保持量,然而该方法忽略了土壤输移过程中的沉积,使得计算结果存在偏差<sup>[9]</sup>。InVEST 模型(生态系统服务和交易的综合评估模型)是美国斯坦福大学、大自然保护协会与世界自然基金会联合开发的,可用于模拟不同土地利用情境下生态系统服务功能物质和价值量变化的生态系统服务评估模型<sup>[10-11]</sup>。泥沙输移比模型是该 InVEST 模型中的服务功能模块之一,其在计算生态系统土壤保持服务功能时,考虑了地块泥沙输移、沉积这一重要水文过程,在计算土壤保持量时更为精确,故本研究使用 InVEST 模型中的“泥沙输移比”模块,结合延安市退耕还林前后的 2000 年和 2015 年的土地利用状况,分析退耕还林背景下,区域土壤侵蚀及土壤保持功能的变化情况,以期延安市土地利用结构的调整和生态补偿提供依据。

## 1 研究区概况

延安市地处 35°20′37″—37°29′59″N,107°38′57″—110°32′44″E,位于陕西省的中北部,全境面积 37 028.66 km<sup>2</sup>,下辖 2 区 11 县。属于陕北黄土高原丘陵沟壑区,全市地貌形态以黄土塬和丘陵为主,广泛分布着 10~100 m 厚的黄土,长期的土壤侵蚀使得该地地面切割破碎,沟壑密布,区域内缓坡和陡坡占全区面积

的 60%以上,坡耕地较多,水土流失严重。延安市地势西北高东南低,三面环山、中间隆起,平均海拔在 1 200 m 左右,北部的白于山是延安市洛河、延河、清涧河等主要河流的发源地,河流沿地形呈东西向延伸,西部的子午岭呈北北西—南南东向伸展,是洛河和泾河的分水岭。东南部的黄龙山海拔在 1 500 m 左右,地势由主脊向东南两侧缓倾,是石堡川、淤水、猴儿川、白水川、大南川、小南川和蔡家川等的发源地,水系呈放射状。贯穿中部的崂山海拔在 1 400 m 左右,呈北北东—南南西走向。延安市是大陆性干旱半干旱气候,平均气温为 7.6~10.7℃,降水年平均 500 mm 左右,且集中于 6—9 月份,以季节性和局部性的大暴雨为主。植被景观具有典型过渡性,沿子长—安塞—志丹一线,以北为温带森林灌丛草原,以南为暖温带落叶阔叶林,东部黄河沿岸为暖温带落叶阔叶林。延安由于其沟壑纵横的地貌条件、暴雨集中的降水因素以及疏松多孔的土壤类型,加之坡耕地为主的农业耕作条件,使得该区域成为我国水土流失最严重的地区之一。2000 年以来,延安市积极开展以退耕还林为主的生态建设,对于遏制延安市水土流失,提高森林覆盖度,改善生态环境起到了积极的作用。

## 2 研究方法及数据处理

### 2.1 模型说明及计算原理

InVEST 泥沙输移比模型描述了坡面的土壤侵蚀和流域输沙的空间过程,对于一个流域来说,生态系统的土壤保持功能不仅体现在对某一地块土壤侵蚀的减缓效应,还体现在侵蚀泥沙的输移过程中,由于植被等拦截而产生的沉积作用。InVEST 模型在 USLE 模型的基础上,考虑了基于水文连通性指数的泥沙输移比,其计算过程如下:

(1) 首先计算基于地形和气候条件下的潜在土壤侵蚀量及潜在产沙量:

$$RKLS_i = R_i K_i LS_i$$

$$S_i = R_i K_i LS_i \cdot SDR_{bare_i}$$

式中:RKLS<sub>*i*</sub>是栅格 *i* 的潜在土壤侵蚀量;*S<sub>i</sub>*为栅格 *i* 的潜在产沙量;*R<sub>i</sub>*,*K<sub>i</sub>*,*LS<sub>i</sub>*分别是栅格 *i* 的降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、坡长坡度因子;*SDR<sub>bare\_i</sub>*是裸地条件下的栅格泥沙输移比。

(2) 计算基于存在植被覆盖因子及水土保持措施条件下的实际土壤侵蚀量及实际产沙量:

$$USLE_i = R_i K_i LS_i C_i P_i$$

$$E_i = USLE_i \cdot SDR_i$$

式中:USLE<sub>*i*</sub>为栅格 *i* 的实际土壤侵蚀量;*E<sub>i</sub>*为栅格

$i$  的实际产沙量;  $C_i$  为植被覆盖和管理因子;  $P_i$  为水土保持措施因子;  $SDR_i$  为存在植被覆盖因子及水土保持措施条件下的泥沙输移比。

(3) 计算流域内栅格的土壤保持量:

$$SEDRET_i = S_i - E_i$$

式中:  $SEDRET_i$  为栅格  $i$  的土壤保持量。

模型中用水文连通性来解释泥沙在坡面和沟道中的邻接转移,对于泥沙输移比和水文连通性指数的关系,Borselli<sup>[12]</sup>认为其呈波尔兹曼 s 型曲线并给出了关系式。

$$SDR_i = \frac{SDR_{max}}{1 + \exp(\frac{IC_0 - IC_i}{k})}$$
$$IC_i = \lg\left(\frac{D_{up}}{D_{dn}}\right) = \lg\left[\frac{\overline{CS} \sqrt{A}}{\sum_i \frac{d_i}{C_i S_i}}\right]$$

式中:  $SDR_{max}$  为最大理论 SDR 值;  $IC_0$  与  $K$  是 SDR— $IC$  关系的校准参数;  $IC_i$  表示流域内每个栅格  $i$  上的单位泥沙从流域中到达河道的可能性;  $D_{up}$  表示上游

泥沙向下游河道输送的潜能;  $\overline{C}$  表示上坡产沙区域面积  $C$  的平均值;  $\overline{S}$  表示上坡产沙区域的平均坡度;  $A$  表示上坡产沙面积(使用 D8 流向算法生成上坡产沙区域);  $D_{dn}$  表示泥沙经过水流路径到达汇点的可能性;  $d_i$  表示按水流方向计算的栅格单元坡长;  $C_i$  和  $S_i$  分别表示栅格单元  $i$  的植被覆盖因子  $C$  和坡度。

2.2 数据来源及处理

InVEST 模型泥沙输移比模块是基于像元尺度的,结合了降雨、土壤、地形、土地利用等信息,以栅格为单元进行运算,并产生基于栅格单元和子流域/流域两种尺度的评价计算结果。目前,该模型在流域尺度上的评估结果已经相对成熟,输出的结果为流域尺度上的均值或总和,而在像元尺度上,模型提供的模拟结果仅供验证或校正,其结果不能为决策提供可靠依据<sup>[13]</sup>。模型的运行需要提供相同投影和分辨率的矢量、栅格图层,本试验采取 30 m 分辨率,WGS\_1984\_UTM\_ZONE\_48 N 投影坐标系统的栅格数据,模型所需数据及处理见表 1。

表 1 模型所需数据来源及处理

| 数据需求           | 数据处理   | 数据来源及说明   |
|----------------|--|---|
| 30 mDEM        | 填注,为保证流向准确,DEM 范围应大于研究区  | 地理空间数据云   |
| 流域与子流域         | 基于 DEM 及汇流累积量生成河网和小流域,参照宋向阳 <sup>[14]</sup> 的研究及延安市地形图,确定汇流累积量为 5 万个栅格,生成 614 个小流域   | 已填注的 DEM 数据   |
| 降雨侵蚀力因子 R      | 根据章文波 <sup>[15]</sup> 建立的基于日降雨量的降雨侵蚀力算法,采用 1960—2016 年的日降雨数据计算各站点的 $\alpha$ 、 $\beta$ 值,取 1998—2002 年的平均侵蚀力值作为 2000 年的降雨侵蚀力,2012—2016 年的平均降雨侵蚀力作为 2015 年的降雨侵蚀力 | 中国气象科学数据共享服务网,延安市及周边 27 站点 1960—2016 年 56a 间的每日降雨量            |
| 土壤可蚀性因子 K      | 采用 EPIC 模型,并根据张科利等 <sup>[16]</sup> 的研究进行校正   | 西部数据中心共享平台  |
| 地形因子 LS        | 坡长因子采用 Desmet <sup>[17]</sup> 的提出的考虑汇流对坡长因子的影响公式,坡度因子采用 D. K. McCool <sup>[18]</sup> 的公式   | DEM 数据,模型自动生成   |
| 植被覆盖因子 C       | 参考张岩 <sup>[19-20]</sup> 、江忠善 <sup>[21]</sup> 等的研究,耕地赋值为 0.23,城镇与居民用地赋值为 0,水域为 0,裸地为 1,参照高海东 <sup>[22]</sup> 的研究,林地和草地按植被覆盖度分级赋值                                | 模型以生物物理系数表输入  |
| 水土保持措施因子 P     | 参照谢红霞 <sup>[23]</sup> 的研究,对耕地按坡度分级赋值,其余地类赋值为 1   | 模型以生物物理系数表输入  |
| 土地利用数据         | 对遥感影像进行大气校正、几何校正,并结合高分一号高精度参考影像及野外 GPS 点实地勘测,监督分类输出 6 个一级分类和根据植被覆盖度、坡度等划分的 19 个二级分类  | 2000 年遥感影像采用 landsatTM 影像,2015 年采用 landsatOLI 影像,数据来源于地理空间数据云 |
| $K_b$ 和 $IC_0$ | 采用模型默认值, $K_b=2$ , $IC_0=0.5$  | 决定流域水文连通性指数与泥沙输移比关系形态的参数                                      |
| $SDR_{max}$    | 采用模型默认值, $SDR_{max}=0.8$   | 栅格最大泥沙输移比   |

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

分析 2000 年、2015 年两期延安市的各土地利用类型面积及变化,见表 2,可以发现延安市的土地利用类型以林地、草地和耕地为主,三者占全市面积的 90% 以上。其中林地是延安市最主要的土地利用类型,集中分布在西南和东南部的子午岭—梁山山系,

植被覆盖度较高;草地主要分布在北部的吴起、延长、延川等县,但从总体来看,北部草地面积大,覆盖度低,南部草地面积小,覆盖度较高;耕地以旱地为主,且大多为坡耕地,以北部和西北部的子长、安塞、志丹和吴起县分布最广,南部洛川、黄陵、富县等县是全市的主要塬面区,分布有较大面积的塬耕地。15 a 间延安市各土地利用类型发生了显著的变化,林地、草地、城镇、水域及裸地的面积比例均有不同程度的增加,

分别由 2000 年的 43.94%, 34.43%, 2.17%, 0.05%, 0.08% 增加到 2015 年的 52.50%, 34.94%, 3.63%, 0.13%, 0.14%。其中林地增加的幅度最小,但面积却最大,达到了 2 242.25 km<sup>2</sup>,这对区域生态环境的修复起了决定性作用;草地的面积增加了 186.52 km<sup>2</sup>,变化幅度不大;水域面积的增幅最大,达到了 134.55%,更多的水源也为区域生态环境的良性发展提供了有力保障。与此同时,耕地面积减少了 3 011.27 km<sup>2</sup>,面积比例由 2000 年的 19.32% 减少到 2015 年的 11.12%。从土地利用变化的空间分布上来看,林地面积的增加主要沿中北部和东部的延河一带分布,草地面积在西北和北部增加较多,而西北和北部地区林地面积增加较少,且北部有部分草地退化成裸地,这说明了生态环境相对脆弱的地区,生态恢复与治理的难度较高。耕地面积的急剧减少体现了退耕还林工程的巨大成效,但随着城市的扩张和人口的增加,如何提高农业生产以维持生态环境的建设成果也是值得关注的问题。

为进一步研究延安市土地利用类型之间的转换关系,将两期土地利用图叠加,得到 2000—2015 年各土地利用类型的转移矩阵,见表 3。可知延安市各土地利用类型均有不同程度的转移,其中林地主要转向草地和耕地,它的补充来源也主要为草地和耕地,分别占补充来源的 71.62% 和 26.70%,林地的转入量远大于转出量;草地主要转向林地,占其原有面积的 31%,其补充量主要为耕地,占补充来源的 63.82%,草地的转入量与转出量基本持平;耕地主要转向草地和林地,分别占其原有面积的 44.68% 和 20.83%,耕地的流出量远大于流入量;城镇的补给主要来自于草地和农田,分别占补给来源的 49.04% 与 37.56%;裸地的增加主要来自于部分退化的草地和弃耕的农田,水域的补给来源在各地类中相对均匀。

综合分析,15 a 间延安市退耕还林取得了重大成就,林地面积显著增加,生态环境得到了改善,分析土地利用类型之间的相互转换,发现退耕还林工作主要经历退耕还草、退耕还林、草地逐渐转为林地的循序渐进过程。在城市化进程上,城镇用地的增加以开垦草地和减少耕地为代价,因此在推进坡耕地还林的同时,也需要补充可利用耕地、提高农业生产能力来支撑社会经济的发展。

3.2 土壤侵蚀评价

模型运行结果会输出根据 USLE 方程计算的每个小流域栅格单元的土壤侵蚀总量,输出图层为 usle\_tot(t/小流域),计算得到延安市 2000 年土壤侵蚀总量为 2.20 亿 t,2015 年土壤侵蚀量为 1.38 亿 t,相

较于 2000 年减少了 37.27%,土壤侵蚀状况有较明显的改善。根据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007),对延安市的土壤侵蚀强度进行分级,见图 1,并计算各侵蚀强度等级面积,见表 4。延安市在各侵蚀强度等级均有分布,微度侵蚀、轻度侵蚀主要集中在南部植被覆盖较高、水热条件较好的地区,强度、极强度及剧烈侵蚀主要分布在东北和西北的丘陵沟壑区。

表 2 延安市土地利用类型及其变化

| 土地利用<br>类型 | 2000 年             |       | 2015 年             |       | Δ2000—2015         |        |
|------------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|--------|
|            | 面积/km <sup>2</sup> | 比例/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 比例/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 比例/%   |
| 林地         | 16121.29           | 43.94 | 18363.54           | 50.05 | 2242.25            | 13.91  |
| 草地         | 12633.43           | 34.43 | 11919.95           | 34.94 | 186.52             | 1.48   |
| 耕地         | 7089.64            | 19.32 | 4078.38            | 11.12 | -3011.27           | -42.47 |
| 城镇         | 796.97             | 2.17  | 1331.98            | 3.63  | 535.02             | 67.13  |
| 水域         | 19.92              | 0.05  | 46.72              | 0.13  | 26.80              | 134.55 |
| 裸地         | 29.18              | 0.08  | 49.86              | 0.14  | 20.67              | 70.82  |

表 3 土地利用转移矩阵 km<sup>2</sup>

| 土地利用<br>类型 |    | 2000 年   |         |         |        |       |       |
|------------|----|----------|---------|---------|--------|-------|-------|
|            |    | 林地       | 草地      | 耕地      | 城镇     | 水域    | 裸地    |
| 2015 年     | 林地 | 13732.53 | 3061.43 | 1476.57 | 82.13  | 2.46  | 8.41  |
|            | 草地 | 1700.52  | 7856.26 | 3167.71 | 78.55  | 1.20  | 15.72 |
|            | 耕地 | 575.11   | 1308.67 | 2130.67 | 57.05  | 2.86  | 4.03  |
|            | 城镇 | 98.80    | 373.88  | 286.37  | 569.59 | 2.82  | 0.53  |
|            | 水域 | 4.31     | 13.15   | 10.23   | 8.43   | 10.54 | 0.07  |
|            | 裸地 | 10.03    | 20.05   | 18.10   | 1.22   | 0     | 0.42  |

2000 年延安市微度和中度侵蚀面积最大,分别占全区总面积的 24.13% 和 18.71%。极强度和剧烈侵蚀强度面积占全区总面积的 26.9%,但对侵蚀总量的贡献最大,侵蚀量达到了总侵蚀量的 63.08%。2015 年微度和中度侵蚀面积也占主导地位,分别为 27.38% 和 29.39%,而强度、极强度、剧烈侵蚀面积大幅减少,占全区总面积的 11.99%,6.91% 和 2.69%,较 2000 年分别减少了 25.96%,60.66% 和 71.19%,轻度侵蚀和中度侵蚀面积与 2000 年相比增加显著,分别增加了 53.87% 和 57.12%。为进一步研究区域不同土壤侵蚀强度的变化关系,对两期土壤侵蚀强度空间分布图进行叠加计算,得到 15 a 来土壤侵蚀强度的转换矩阵,见表 5。2000—2015 年,共有 18 792.22 km<sup>2</sup> 的土壤侵蚀级别面积发生了转换,约占区域面积的 51.21%,整体来看,15 a 间各侵蚀强度类型均有向低等级侵蚀强度类型转换的趋势。其中,轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀向较低等级侵蚀强度类型转换的面积分别占原有面积的 32.56%,53.87%,80.54%,80.05%,71.19%。对于面积显著增加的轻度和中度侵蚀类型来说,来源于高

等级侵蚀强度的转入量占全部转入量的 90.12%和 93.64%，这说明了 15 a 间延安市土壤侵蚀强度有明显减缓的趋势,强度侵蚀以上等级面积显著减少,土壤侵蚀状况显著改善。

表 4 2000 年、2015 年土壤侵蚀强度面积统计

| 年份        | 侵蚀级别                 | 微度       | 轻度      | 中度       | 强度       | 极强度     | 剧烈       |
|-----------|----------------------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|
| 2000 年    | 侵蚀面积/km <sup>2</sup> | 8854.19  | 5161.55 | 6864.20  | 5941.98  | 6449.06 | 3425.16  |
|           | 比例/%                 | 24.13    | 14.07   | 18.71    | 16.19    | 17.57   | 9.33     |
| 2015 年    | 侵蚀面积/km <sup>2</sup> | 10045.81 | 7942.22 | 10785.11 | 4399.28  | 2537.06 | 986.65   |
|           | 比例/%                 | 27.38    | 21.64   | 29.39    | 11.99    | 6.91    | 2.69     |
| 2000—2015 | 变化量/km <sup>2</sup>  | 1391.62  | 2780.67 | 3920.91  | −1542.69 | −3912   | −2438.51 |
|           | 变化率/%                | 15.72    | 53.87   | 57.12    | −25.96   | −60.66  | −71.19   |

表 5 土壤侵蚀强度转移矩阵

| 年 份    | 2000 年 |         |         |         |         |         | km <sup>2</sup> |
|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------|
|        | 微度     | 轻度      | 中度      | 强度      | 极强度     | 剧烈      |                 |
| 2015 年 | 微度     | 8365.26 | 1680.51 | 0.04    |         |         |                 |
|        | 轻度     | 488.93  | 2995.25 | 3697.52 | 720.72  | 34.86   | 4.95            |
|        | 中度     |         | 485.79  | 3152.78 | 4065.22 | 2590.38 | 490.94          |
|        | 强度     |         |         | 13.87   | 1117.48 | 2537.32 | 730.61          |
|        | 极强度    |         |         |         | 38.55   | 1286.5  | 1212.01         |
|        | 剧烈     |         |         |         |         |         | 986.65          |

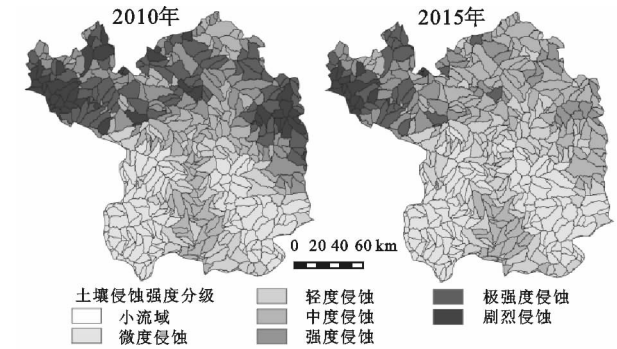


图 1 延安市土壤侵蚀强度分级

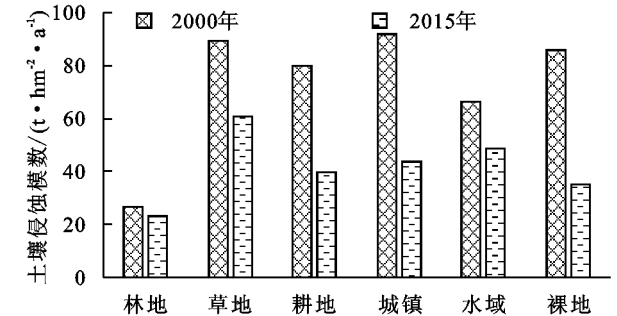


图 2 不同土地利用类型的土壤侵蚀模数

对延安市的土地利用图与土壤侵蚀量图进行叠加计算,得到各地类的土壤侵蚀强度,见图 2,可以看出不同土地利用类型的土壤侵蚀强度差异较大,但 2015 年各地类的土壤侵蚀强度较 2000 年均有一定程度的减弱。2000 年各土地利用类型土壤侵蚀模数大小排序为:城镇>草地>裸地>耕地>水域>林地;2015 年各土地利用类型土壤侵蚀模数大小排序为:草地>水域>城镇>耕地>裸地>林地。总体来看,林地的土壤侵蚀强度显著低于其余地类,其中,耕地、城镇等土地利用类型的水土流失受人为活动影响较大,水域由于水流

的汇集而对周边造成一定程度的侵蚀<sup>[24]</sup>,而对于草地来说,草地本身是具有水土保持功能的,然而草地多分布在延安市北部的丘陵沟壑区,地形支离破碎、坡度陡、暴雨集中,且北部草地覆盖度较低,因而土壤侵蚀强度较大。这说明土壤侵蚀不仅受人为活动的影响,更多的是受降雨、地形等自然条件的作用,此外在水土保持工作中也应该加强植被的覆盖度。

为了探究各土地利用类型变化对土壤侵蚀强度变化的影响,计算各地类面积变化对各侵蚀强度面积变化的贡献率(正值代表各土地利用类型对各侵蚀强度面积增加的贡献率,负值表示各土地利用类型对各侵蚀强度面积减少的贡献率),见图 3,可知各地类的微度、轻度侵蚀面积均有增加,除水域外,其余地类极强度和剧烈侵蚀面积均有减少。其中林地对区域整体微度侵蚀和轻度侵蚀面积的增加占主导作用,贡献率分别达 72.25%和 53.49%;耕地和草地对强度、极强度、剧烈侵蚀面积的减少占主导作用,其中耕地对强度、极强度、剧烈侵蚀面积减少的贡献率分别为 67.23%,38.63%,35.96%,草地对强度、极强度、剧烈侵蚀面积减少的贡献率分别为 43.12%,48.45%,50.21%。这说明了林地面积的增加和耕地、草地面积的减少是该区域水土流失状况改善的主要原因和动力。因此,优化土地利用结构,合理地安排坡耕地还林、还草,提高植被覆盖度是治理水土流失较为有效的一种方式。

3.3 土壤保持服务功能评价

土壤保持服务功能是以生态系统减少土壤侵蚀的量来评价的,传统土壤保持量的计算是利用潜在土壤侵蚀量减去实际土壤侵蚀量,然而 InVEST 模型

考虑了泥沙的输移过程中由于植被等拦截而产生的沉积作用,从而使得生态系统的土壤保持量计算更为准确。模型运行结果会生成小流域尺度和栅格尺度的土壤保持量。经计算,2000 年及 2015 年的土壤保持总量分别为 7.72 亿 t 和 8.50 亿 t,15 a 来的增幅为 10.1%。对小流域的土壤保持量进行分级,见图 4,可知延安市 2000 年和 2015 年各子流域的平均土壤保持量在 70.49~781.02 t/hm<sup>2</sup>,83.24~852.22 t/hm<sup>2</sup>,且集中分布在 100~200 t/hm<sup>2</sup>,200~300 t/hm<sup>2</sup> 两个等级。分析其各等级的面积,发现土壤保持量在 200~300 t/hm<sup>2</sup>,300~400 t/hm<sup>2</sup>,400~500 t/hm<sup>2</sup>,500~600 t/hm<sup>2</sup>,600~700 t/hm<sup>2</sup>,700~800 t/hm<sup>2</sup> 的面积比例由 2000 年的 35.31%,8.97%,2.05%,0.87%,0.27%,0.03%,增加到了 2015 年的 42.16%,11.81%,3.48%,1.34%,0.38%,0.07%,15 a 间土壤保持量较高等级(>200 t/hm<sup>2</sup>)的面积均有不同程度增加。说明延安市生态系统的土壤保持功能整体有了较大提升,土壤保持总量增加显著。

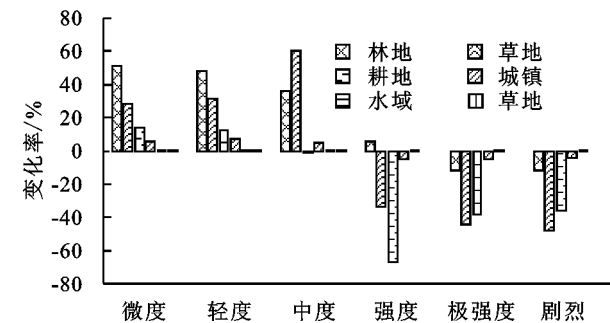


图 3 各地类面积变化对各侵蚀强度面积变化贡献率

从空间分布上看,研究区的土壤保持量由东北向西南呈增加趋势,较高值出现在西南的黄陵县、东南的黄龙、宜川县等土壤侵蚀强度较低的地区以及西北的吴起县和志丹县等土壤侵蚀强度较高的地区,这表明土壤侵蚀强度和土壤保持功能并不是相对立的关系,从计算公式来看,土壤保持功能受土地利用类型和土壤潜在侵蚀因子即降雨、土壤理化性质和地形地貌的双重影响。因而在自然环境条件恶劣的地区,由于土壤潜在侵蚀因子的值较大,做好退耕还林等水土保持工作可以带来更大的生态效益。

4 结论

(1) 延安市 2000 年与 2015 年的土地利用类型均以林地、草地和耕地为主,15 a 间各地类面积变化

延安市自退耕还林以来各土地利用类型发生了较大的转变,不同的土地利用类型不仅能够影响下垫面的性质,对降雨的再分配及径流产沙的过程也有很大的影响<sup>[7]</sup>,因此不同地类的土壤保持量能够客观地反映不同覆盖条件下的生态系统保土过程(表 6)。对于延安市各土地利用类型来说,2000 年林地、草地、耕地、水域、城镇及裸地的土壤保持量分别占总量的 49.38%,34.54%,15.18%,0.85%,0.02%和 0.03%;而 2015 年林地、草地、耕地、水域、城镇及裸地的土壤保持量分别占总量的 57.51%,31.74%,9.08%,1.56%,0.05%和 0.05%,林地、草地和耕地的土壤保持量占据绝对优势,这与他们的面积比例是相对应的,各地类土壤保持量的增减,也与土地利用类型面积的变化有关。分析 2000 年及 2015 年各地类单位面积的土壤保持量,均为林地>草地>耕地>水域>城镇>裸地,同一地类内部的土壤保持量也有较大差异,这可能与某一地类生态系统内部不同的结构组成相关,以林地为例,林地的植被覆盖度、植被种类、生长年限、林下植被等都会影响林地生态系统的土壤保持功能。对延安市各土地利用类型来说,林地、草地和耕地的单位面积土壤保持量显著大于其余地类,且林地和草地的土壤保持效果最佳,均在 200 t/hm<sup>2</sup> 以上,说明土地利用类型对延安市的土壤保持功能有着重要影响,调整土地利用结构,推进退耕还林还草工程是增强区域土壤保持功能的重要途径。与 2000 年相比,2015 年各地类的土壤保持模数均有不同程度的增加,也是该区域生态环境状况向好发展的体现。

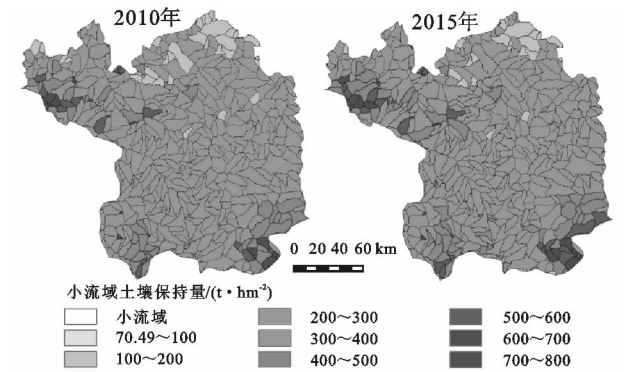


图 4 延安市子流域土壤保持量

表 6 延安市各地类的土壤保持量

| 土壤保持量                              | 年份     | 林地     | 草地     | 耕地     | 城镇    | 水域    | 裸地    |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 单位面积土壤保持量<br>(t·hm <sup>-2</sup> ) | 2000 年 | 236.33 | 210.93 | 165.26 | 82.28 | 95.94 | 70.65 |
|                                    | 2015 年 | 253.58 | 226.19 | 189.15 | 99.24 | 98.34 | 81.52 |
| 各地类土壤保持总量<br>10 <sup>6</sup> t     | 2000 年 | 380.99 | 266.48 | 117.16 | 6.56  | 0.19  | 0.21  |
|                                    | 2015 年 | 488.48 | 269.62 | 77.14  | 13.22 | 0.46  | 0.41  |

的绝对值大小排序为耕地>林地>城镇>草地>裸地>水域,其中林地面积的增加量和耕地面积的减少量分别达到了 2 242.25 km<sup>2</sup>,3 011.27 km<sup>2</sup>,退耕还林成效显著。15 a 间延安市各地类之间转换较为频

繁,退耕还林工程主要经历了退耕还林、退耕还草、部分草地逐渐转变为林地的循序渐进过程。

(2) 延安市 2000 年与 2015 年土壤侵蚀强度以微度和中度侵蚀为主,侵蚀总量分别为 2.20 亿 t 和 1.38 亿 t,15 a 间各侵蚀强度类型均有向低等级侵蚀强度类型转换的趋势。对于各土地利用类型来说,2000 年各土地利用类型土壤侵蚀模数大小排序为:城镇>草地>裸地>耕地>水域>林地;2015 年各土地利用类型土壤侵蚀模数大小排序为:草地>水域>城镇>耕地>裸地>林地。林地内的土壤侵蚀模数显著小于其他地类,且林地的增加和耕地面积的减少是该区域水土流失状况改善的主要原因和动力。

(3) 延安市 2000 年与 2015 年土壤保持总量分别为 7.72 亿 t 和 8.50 亿 t,各地类的单位面积土壤保持量均为林地>草地>耕地>水域>城镇>裸地,且 15 a 来各地类的土壤保持模数均有不同程度的增加,林地和草地的土壤保持效果最佳,均在 200 t/hm<sup>2</sup> 以上,说明退耕还林还草工程的推进是增强区域土壤保持功能的重要途径。

(4) InVEST 模型是以通用土壤流失方程 (USLE) 为基础的,引入了与水文连通性指数相关联的泥沙输移比,考虑了泥沙输移的物理过程以及过程中地形地貌和植被覆盖因子对泥沙的沉积作用,使得土壤保持量的计算结果更加准确、科学。而该模型 3.0 版本之前的“土壤保持模块”以泥沙持留率来表示泥沙输移过程中的各栅格单元对泥沙的拦截、沉积作用,且模型中的泥沙持留率对某一固定地类来说采取统一固定值,也没有考虑地形这一因素,使得计算结果产生误差。本研究中参考大量前人研究的工作,对模型的相关参数进行了本地化,使得结果更具有准确性。目前国内关于水文连通性及泥沙输移比关系的研究较少,故本研究中对二者关系形态的校准参数采用模型的默认值,这也是模型结果误差的主要来源。因此在研究区根据实际试验或观测数据对模型的参数值进行校正也是下一步模型的应用急需完善的问题。

#### 参考文献:

- [1] 赵士洞,张永民. 千年生态系统评估报告集. 1[M]. 北京:环境科学出版社,2007.
- [2] Costanza R, D'Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *World Environment*, 1989,387(1):3-15.
- [3] 曹顺爱,冯科,江华. 经济发达地区土地利用生态服务价值评价研究:以广州市为例[J]. *资源开发与市场*, 2009, 25(6):510-512.
- [4] 盛莉,金艳,黄敬峰. 中国水土保持生态服务功能价值估算及其空间分布[J]. *自然资源学报*, 2010,25(7):1105-1113.
- [5] 杨波,王全九,董莉丽. 榆林市还林还草后土壤保持功能和经济价值评价[J]. *干旱区研究*, 2017,34(6):1313-1322.
- [6] 张雪峰,牛建明,张庆,等. 内蒙古锡林河流域草地生态系统土壤保持功能及其空间分布[J]. *草业学报*, 2015, 24(1):12-20.
- [7] 卞鸿雁,庞奖励,任志远,等. 基于土地利用变化的土壤保持效益时空动态:以黄土高原南部为例[J]. *生态学报*, 2012,31(9):2391-2396.
- [8] 韩永伟,高吉喜,王宝良,等. 黄土高原生态功能区土壤保持功能及其价值[J]. *农业工程学报*, 2012,28(17):78-85,294.
- [9] 张晓明,曹文洪,周利军. 泥沙输移比及其尺度依存研究进展[J]. *生态学报*, 2014,34(24):7475-7485.
- [10] 李敏. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能评价研究[D]. 北京:北京林业大学,2016.
- [11] Nelson E J, Daily G C. Modelling ecosystem services in terrestrial systems[R]. *F1000 Biol Rep*, 2010.
- [12] Borselli L, Cassi P, Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment[J]. *Catena*, 2008,75(3):268-277.
- [13] 李婷,刘康,马力阳,等. 秦岭山地丹江流域土地利用变化的土壤侵蚀效应评价[J]. *自然资源学报*, 2016,31(4):583-595.
- [14] 宋向阳,吴发启,赵龙山,等. 基于 DEM 的延河流域水文特征提取与分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2012,30(4):200-206.
- [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] 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.
- [17] Vol. N. A. GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1996,51(5):427-433.
- [18] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. *Transactions of the Asae-American Society of Agricultural Engineers(Usa)*, 1987,30(5):1387-1396.
- [19] Zhang Y, Liu B, Zhang Q, et al. Effect of different vegetation types on soil erosion by water[J]. *植物学报:英文版*, 2003,45(10):1204-1209.
- [20] 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*, 2001,21(7):1050-1056.
- [21] 江忠善,王志强. 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.
- [22] 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*, 2015,70(9):1503-1515.
- [23] 谢红霞,杨勤科,李锐,等. 延河流域水土保持措施减蚀效应分析[J]. *中国水土保持科学*, 2010,8(4):13-19.
- [24] 董起广,韩霖昌,张卫华,等. 延安市土地利用与土壤侵蚀关系研究[J]. *人民黄河*, 2016,38(4):79-81,128.