

黄土高原丘陵区人工灌草生态系统水土保持功能评估

刘宥延, 刘兴元, 张博, 李妙莹

(兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州大学农业农村部草原牧业创新重点实验室,
兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730020)

摘要: 人工灌草复合植被是黄土高原植被恢复与重建的主要植被类型,在该区域水土保持中发挥着重要的作用。以定西市安定区为例,基于 InVEST 模型对该区人工灌草生态系统的水土保持功能进行量化评估,以为黄土高原丘陵区生态恢复与水土资源的可持续利用提供决策支撑。评估结果为:(1)人工灌草地单位面积的水源涵养量为 $369.25 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,是草地的 90.5%、林地的 134%和耕地的 110%;该区的水源涵养总量为 $3\,970.99 \times 10^4 \text{ m}^3$,人工灌草地水源涵养量占该区总水源涵养量的 29.9%。(2)人工灌草地单位面积的 N 保持量为 $2.4 \text{ kg}/\text{hm}^2$,净化率为 72.21%,P 保持量为 $0.12 \text{ kg}/\text{hm}^2$,净化率为 71.07%。(3)人工灌草地单位面积的土壤保持量为 $308.76 \text{ t}/\text{hm}^2$,比草地、林地和耕地分别高 1.88、1.44、6.01 倍,该区的土壤保持总量为 $3\,310.21 \times 10^4 \text{ t}$,人工灌草地土壤保持量占总土壤保持量的 54.82%。结果表明,人工灌草地的水源涵养能力仅次于草地,高于其他土地利用类型,但土壤保持能力是 6 种土地类型中最强的,具有较好的水土保持功能,是黄土高原丘陵区适宜的植被类型和土地利用方式。

关键词: 人工灌草系统; 水土保持; 功能评估; InVEST 模型; 黄土高原丘陵区

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0084-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.014

Evaluation of Soil and Water Conservation Function of Artificial Shrub-Grassland Ecosystem in Hilly Region of the Loess Plateau

LIU Youyan, LIU Xingyuan, ZHANG Bo, LI Miaoying

(State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020)

Abstract: Artificial shrub-grass composite vegetation is the main vegetation type of restoration and reconstruction in the Loess Plateau, which plays an important role in soil and water conservation in this region. As a case study in the Anding district of Dingxiin Gansu Province, the water and soil conservation function of the artificial shrub-grassland ecosystem was quantitatively evaluated based on InVEST model, and the results would provide decision support for ecological restoration and sustainable utilization of water and soil resources in the hilly region of the Loess Plateau. The assessment results were as follows (1) the water conservation amount per unit area of artificial shrub-grassland was $369.25 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, which was 90.5% of grassland, 134% of forest and 110% of cultivated land. The total water conservation amount of Anding district was $3\,970.99 \times 10^4 \text{ m}^3$, and artificial shrub-grassland accounted for 29.9% of the total water conservation in this area. (2) Nitrogen retention per unit area of shrub-grass land was $2.4 \text{ kg}/\text{hm}^2$, the purification rate was 72.21%, and the phosphorus retention of artificial shrub-grassland was $0.12 \text{ kg}/\text{hm}^2$, the purification rate was 71.07%. (3) The amount of soil conservation per unit area of artificial shrub-grassland was $308.76 \text{ t}/\text{hm}^2$, which were 1.88 times, 1.44 times and 6.01 times higher than that of grassland, forestland cultivated land, respectively. The total soil conservation amount was $3\,310.21 \times 10^4 \text{ t}$ of Anding district, and artificial shrub-grassland accounted for 54.82% of the total soil conservation. The results showed that the water conservation capacity of artificial shrub-grassland was just lower than that of grassland, but higher than that of other land types, but the soil conservation capacity was the strongest in the six land types. Therefore,

收稿日期: 2019-09-09

资助项目: 国家重点研发计划项目“宽梁缓坡丘陵区人工灌草稳定性维持与功能提升技术和示范”(2017YFC0504603)

第一作者: 刘宥延(1992—), 女, 博士研究生, 主要从事生态服务功能评估研究。E-mail: liuyy19@lzu.edu.cn

通信作者: 刘兴元(1965—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事生态经济分析与评价教学与研究。E-mail: liuxingyuan@lzu.edu.cn

artificial shrub-grassland had better soil and water conservation function, which was the suitable vegetation type and land use mode in hilly region of the Loess Plateau.

Keywords: artificial shrub-grassland system; soil and water conservation; function evaluation; InVEST model; hilly region of the Loess Plateau

黄土高原丘陵区是我国生态脆弱和水土流失严重的地区^[1],是我国“两屏三带”生态安全战略格局的重要组成部分,严重的水土流失不仅对该地区及黄河下游地区产生了一系列的生态环境问题,也影响和制约着区域经济的可持续发展与农牧民的生计,成为区域生态经济恶性循环的主要根源^[2-3]。恢复该区域的生态系统服务功能是国家生态文明战略实施的优先主题。自20世纪80年代以来,国家在黄土高原开展了大规模的生态建设,通过封山育林工程、水土保持工程、退耕还林还草工程、草地生态奖补政策等一系列生态治理与恢复和重建项目的实施,区域的植被覆盖度显著提高,水土流失治理取得了显著的成效^[4],生态系统的调节、支持、供给和社会服务功能得到了较大的提升,对可持续的利用自然资源,实现黄土高原丘陵区生态、经济和社会的可持续和谐发展具有重要的意义^[5]。

水土保持功能是黄土高原地区生态服务的主导功能。经过多年的实践,人工灌草复合植被结构是黄土高原地区水土保持和植被恢复与重建的主要植被类型,在该区域的生态系统服务中具有重要的地位^[6]。鉴于该地区对植被多功能需求不断升高和维持群落结构与生产力稳定的要求,基于区域的生态条件,经过长期努力,已建立了以苜蓿、冰草、无芒雀麦和柠条、刺槐、油松等混交的人工灌草生态系统,不仅能生产优质的牧草,还提升了水源涵养和土壤保持功能,改善了景观格局,对提高生态系统服务水平发挥了巨大作用^[7]。采取科学的评估方法,定量化评估人工灌草生态系统水土保持功能的变化,分析人工灌草系统与其他植被覆盖类型的水土保持功能差异,可为深刻认识人工灌草系统在黄土高原丘陵区生态系统服务中的作用与价值和可持续管理提供基础支撑。

生态系统服务功能评估的核心是准确性,精度对土地利用的管理决策具有重要的影响,但评估精度的高低取决于选择的评估方法与数据。国内外研发了多种量化生态系统服务功能的评估方法和模型^[8-11],如物质转换法、能值转换法、价值转换法、InVEST(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型、ARIES (artificial intelligence for ecosystem services)模型、SOLVES (social values for ecosystem services)模型、MIMES (multi-scale integrated models of ecosystem services)模型和 EPM (ecosystem portfolio model)模型等,已在流域或景观

尺度生态系统服务功能评估中得到了较广泛的应用。特别是 InVEST 模型在模拟土地利用/覆被变化情景下生态系统服务功能变化方面,适用范围很广,模型最为成熟,是目前生态系统服务功能评估中应用最多的模型^[12]。本研究以黄土高原典型区甘肃省定西市安定区为例,针对该区人工灌草复合生态系统的特征,基于 InVEST 模型,综合土地利用、植被、土壤类型、气象、生态环境和社会经济等多源数据,在栅格单元水平上对建植已29年的人工灌草生态系统的水源涵养和土壤保持功能进行评估,并对不同土地利用类型的水源涵养和土壤保持功能进行比较分析,揭示在相同生态条件下不同植被类型水土保持功能的差异及空间分布特征,为黄土高原丘陵区科学合理的制定土地利用管理和生态恢复与建设提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

定西市安定区位于黄土高原西部,地处黄河的中上游(35°17'54"—36°02'40"N, 104°12'48"—105°01'06"E)(图1),海拔1 662~2 570 m,地貌以梁峁、沟壑、丘陵等黄土地貌为主,境内沟壑纵横,自然条件差,水分短缺,是典型的干旱半干旱区。多年平均气温6.3℃,年均降水量380 mm,蒸发量达1 500 mm以上,降水多集中在7—9月,降水量占全年降水量的50%以上^[13]。全区总土地面积3 638.7 km²。境内河流分布有北部的关川河,西部的称沟河,西南部的西河,东南部的东河,东部的西巩河,其中,关川河为境内最大河流,干流全长180 km。该区多年平均土壤侵蚀模数达到3 500~6 000 t/(km²·a)以上,水土流失面积达3 652.4 km²,占土地总面积的80.64%,是我国水土流失最严重的区域之一^[14]。经过多年的水土流失治理,建立了大面积的人工灌草植被,至2015年人工灌草面积已达3.8万hm²,水土流失治理程度达75.1%,林草覆盖率达35.5%^[15]。

1.2 数据来源与处理

研究数据主要包括土地利用/覆被数据、土壤与水分数据、气象数据、DEM数据及社会经济数据等:(1)土地利用/覆被数据下载自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)的 Landsat-8 影像数据,获取的研究区多波段遥感影像经过几何纠正、去霾处理、色彩增强后进行监督分类得到,空间分辨率为30 m。(2)土壤与水分数据主要来自FAO和IIASA的土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD,

http://westdc.westgis.ac.cn/data/844010ba-d359-4020-bf76-2b58806f9205)和样区试验数据;土壤可蚀性图层由中国科学院西部环境与生态科学数据中心土壤数据集经过 WGS1984Albers 投影坐标系得到栅格数据。试验数据获取是 2016 年 10 月开始在研究区阳坡和阴坡沿顺坡方向分别设置 3 条样带(间隔 15 m),采用网格布点法在每条样带设置 5 个水分和土壤监测点,平均每 15 天测定 1 次,使用时域反射仪 TDR (TRIME, IMKO Micromoduletechnik, Germany)测定 0—180 cm 土层的土壤水分。(3)流域边界、子流域、降雨侵蚀力和土壤可蚀性在 ArcGIS 10.5 平台通过对 DEM 进行水文分析提取。(4)气象数据,降水、温度、日照时间等来源于中国气象科学数据共享网(<http://data.cma.cn>)和安定区内 33 个均匀分布的气象台站数据。其中,多年平均降水用 ANUSPLIN42 模型进行空间插值得到降水量空间栅格数据,温度和日照选用日值通过 FAO56 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散后进行空间插值处理。(5)DEM 数据下载自地理空间数据云,空间分辨率为 30 m。(6)社会经济数据,来源于《定西市统计年鉴》。(7)其余行政区域、道路、水系等矢量数据,来自国家基础地理数据库。(8)参数本地化是依据在定西市安定区龙滩和丁家山小流域实验区数据。

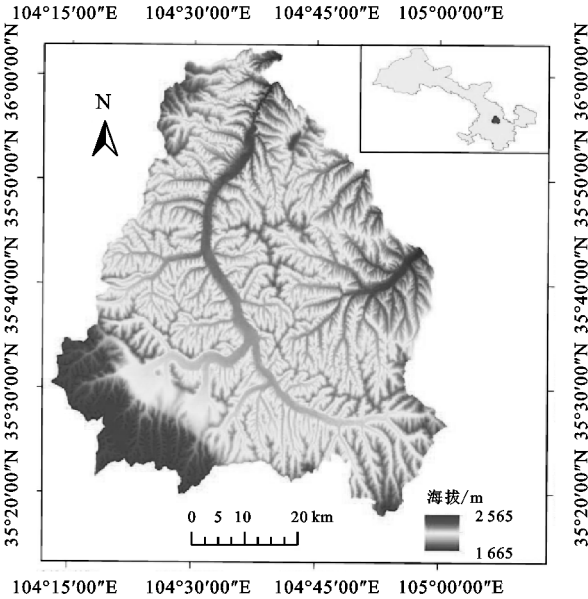


图 1 研究区地理位置

1.3 研究方法

本研究采用 InVEST 模型中的水源涵养量模型和土壤保持模型进行评估。

1.3.1 水源涵养量模型 根据降水、植物蒸腾、地表蒸发、根系深度和土壤深度等参数先计算出产水量,再结合研究区的地形指数、土壤饱和导水率和流速系数对产水量进行修正后计算出研究区的水源涵养量,计算公式^[16]为:

$$Y_x = (1 - \frac{AET_x}{P_x}) \times P_x \tag{1}$$

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + (\frac{PET(x)}{P(x)})^\omega \right]^{\frac{1}{\omega}} \tag{2}$$

$$PET(x) = Kc(l_x) \times ET_0(x) \tag{3}$$

$$Retention = \text{Min}(1, \frac{249}{Velocity}) \times \text{Min}(1, \frac{0.9 \times TI}{3}) \times \text{Min}(1, \frac{Ksat}{300}) \times Y_x \tag{4}$$

式中: Y_x 为年产水量; P_x 为栅格单元 x 的年降水量; AET_x 为栅格单元 x 的年平均蒸散量; $PET(x)$ 表示栅格单元 x 的年平均潜在蒸散量; $Retention$ 为水源涵养量; $Velocity$ 表示流速系数; $Ksat$ 为土壤饱和导水率; TI 为地形指数; $\omega(x)$ 表示自然气候—土壤性质的非物理参数; $ET_0(x)$ 表示栅格单元 x 的参考作物蒸散; $Kc(l_x)$ 表示植被系数。

1.3.2 土壤保持模型 根据地貌、气候条件的潜在土壤流失量、实施管理和工程措施后的实际土壤侵蚀量及拦截上游区的泥沙量 3 方面计算土壤保持量,计算公式^[17]为

$$SEDRET_a = (RKLS_a - USLE_a) + sed_export_a \tag{5}$$

$$RKLS_a = R_a \times K_a \times LS_a \tag{6}$$

$$USLE_a = R_a \times K_a \times LS_a \times C_a \times P_a \tag{7}$$

式中: $SEDRET_a$ 为土壤保持量; $RKLS_a$ 为潜在土壤侵蚀量; $USLE_a$ 为实际土壤侵蚀量; sed_export_a 为拦截上游区的泥沙量; R_a 为降雨侵蚀力因子; K_a 为土壤可蚀性因子; LS_a 为坡长坡度因子; C_a 为植被覆盖和管理因子; P_a 为土壤保持措施因子。

1.3.3 数据预处理与关键参数计算及校正

(1)数据预处理。功能评估首先要生成所需的基础空间图层。在 ArcGIS 10.5 软件中通过水文分析工具(Hydrology)确定流域图和 DEM 图;利用遥感影像解译得到土地利用类型图;应用 ANUSPLIN 软件对定西市 33 个气象台站的气象数据进行空间插值生成年均温度、降水、潜在蒸发、降雨侵蚀力和土壤可蚀性空间分布图。本研究将投影坐标系设置为 WGS_1984_Albers,成像时间为 2017 年 9 月 29 日。

(2)关键参数计算及校正。InVEST 模型对水土保持功能评估包括水源涵养模块和土壤保持模块 2 部分,涉及的关键参数有地形指数、Zhang 系数、降雨侵蚀力因子、地表覆盖管理因子等 12 个关键参数(表 1)。通过定西市安定区丁家山和龙滩小流域实验区获取的气象、植被、土壤等方面的原始数据对关键参数进行校正,以使评估结果符合研究区的实际情况。

表 1 关键参数计算及校正^[18-21]

关键参数	计算公式	校正依据
地形指数(TI)	$TI=(\frac{Drainagearea}{Soildepth\times Percentslope})$	利用研究区小流域单元集水区的栅格数量、土壤深度和百分比坡度数据,由 ArcGIS 计算得出
参考作物蒸散($ET_0(x)$)	$ET_0=0.0013\times0.408\times RA\times (T_{avg}+17)\times(TD-0.0123P)^{0.76}$	由 Penman-Monteith 公式计算得到,辐射项校正由研究区太阳大气顶层辐射(RA)、日最高与最低温的平均值(T_{avg})及日最高与最低温均值的差值(TD)计算得出
植被系数(K_c)	—	根据研究区叶面积指数计算获得
Zhang 系数(Z)	—	利用水量平衡法对 Zhang 系数进行校验,确定 Z 值为 5
气候土壤非物理参数($\omega(x)$)	$\omega_x=Z\frac{AWC_x}{P_x}$	由研究区经验常数(Z)、土壤有效含水量(AWC_x)和年降水量(P_x)计算获得
土壤有效含水量(AWC_x)	$AWC_x=Min(Rest.layer.depth, Root.depth)\times PAWC$	由研究区的土壤最大根系埋藏深度、植物根系深度、植物有效可利用水及土壤的砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量和有机质含量计算获得
土壤饱和导水率(K_{sat})	$K_{sat}=2.91\times10^{-5}\times10^{(0.869+0.049sand-0.0322clay)}$	由研究区的土壤砂粒含量和黏粒含量数据,利用 Cosby 模型计算得出
降雨侵蚀力因子(R_a)	$R_a=\sum_{i=1}^{12}\{1.735\times10^{(1.5lg\frac{Pia^2}{Pa}-0.8188)}\}$	由研究区 33 个气象站数据,利用 Wischmeier 月尺度公式计算获得
土壤可蚀性因子(K_a)	$K_a=(-0.01383+0.51575K_{epic})\times0.1318$	由研究区土壤沙粒、粉粒、黏粒及有机碳数据,利用 EPIC 模型计算获得
地形因子(LS)	—	按 25°的坡度将研究区坡度阈值设为 46.63%
植被覆盖管理因子(C)	—	根据研究区植被盖度结合相关文献确定不同土地利用类型的 C 值
水土保持措施因子(P)	—	根据研究区的测定数据结合相关文献确定不同土地利用类型的 P 值

2 结果与分析

2.1 水源涵养量评估

定西市安定区主要的土地利用类型为耕地、林地、草地、人工灌草地、建设用地和未利用土地 6 种类型。利用 InVEST 模型的公式(1)~(4)计算出 2017 年定西市安定区的产水量和水源涵养量(表 2)。评估结果为基于栅格单元的平均产水能力为 0~460.825 mm,单位面积产水量为 292.67 m³/hm²,总产水量为 34 100×10⁴m³。基于栅格单元的水源涵养能力为 0~364.541 mm,流域单元平均水源涵养能力 36.37 mm,单位面积水源涵养量为 102.13 m³/hm²,总的水源涵养量为 13 270.13×10⁴m³。产水量栅格图反映了西南部地

区产水量较高,中部偏东地区产水量较低,水源涵养量在空间分布上由西南向东北逐渐减少,与产水量的空间分布状况基本一致(图 2)。

人工灌草地面积占总土地面积的 29.7%,水源涵养能力为 33.23 mm,单位面积的水源涵养量为 369.25 m³/hm²,总水源涵养量为 3 970.99×10⁴ m³,占总水源涵养量的 29.9%。与其他 5 种土地利用类型相比,草地的水源涵养能力最强,达 36.71 mm,人工灌草地次之,达 33.23 mm,最弱的是建设用地和未利用土地,仅为 16.34,16.62 mm;单位面积的水源涵养量人工灌草地是草地的 90.5%、林地的 134%和耕地的 110%。按水源涵养能力大小排序为:草地>人工灌草地>林地>耕地>未利用土地>建设用地(表 2)。

表 2 2017 年定西市安定区各土地利用类型水源涵养功能

土地利用类型	面积/km ²	占总面积比例/%	水源涵养能力/mm	单位面积水源涵养量/(m ³ ·hm ⁻²)	总水源涵养量/m ³	占总水源涵养量比例/%
耕地	1181.82	32.8	30.30	336.71	3989.91×10 ⁴	30.10
林地	10.99	0.3	24.84	275.96	30.83×10 ⁴	0.23
草地	1244.05	34.5	36.71	407.90	5099.47×10 ⁴	38.40
人工灌草地	1072.10	29.7	33.23	369.25	3970.99×10 ⁴	29.90
建设用地	78.10	2.2	16.34	181.53	142.13×10 ⁴	1.10
未利用地	19.95	0.6	16.62	184.67	36.80×10 ⁴	0.30
合计	3607.01	100	—	—	13270.13×10 ⁴	100

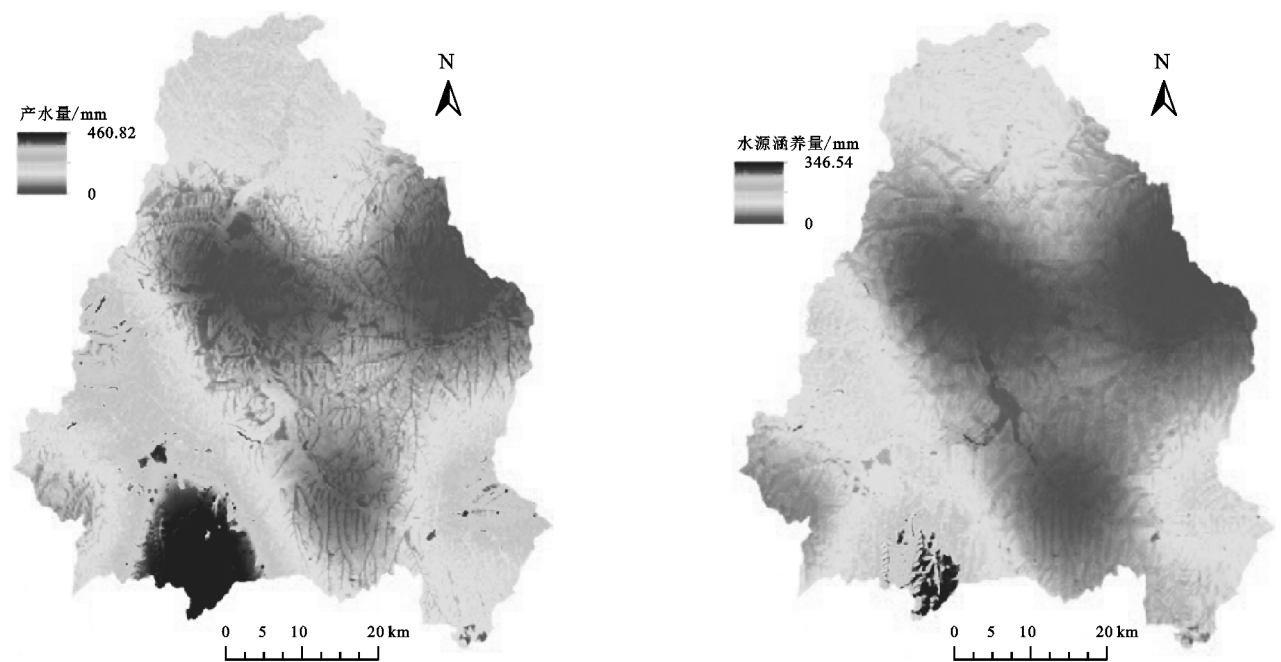


图 2 2017 年定西市安定区水源涵养量空间分布

2.2 水质净化评估

定西市安定区的 N、P 输出量在东部地区分布较低,在河流周边输出量较高,主要是河流沿岸分布着大量耕地施用化肥造成的(图 3)。人工灌草地单位面积的 N 保持量为 2.4 kg/hm²,净化率为 72.21%,P 保持量为 0.12 kg/hm²,净化率为 71.07%。N、P 净化率低于林地

(85.85%,79.13%)和草地(72.24%,72.26%)(表 3)。人工灌草地具有较高的 N、P 净化功能,N、P 输出量仅占耕地的 21.6%和 4.3%,按 N 净化率大小排序为:林地>草地>人工灌草地>未利用土地>建设用地>耕地;按 P 净化率大小排序为:林地>草地>人工灌草地>未利用土地>耕地>建设用地。

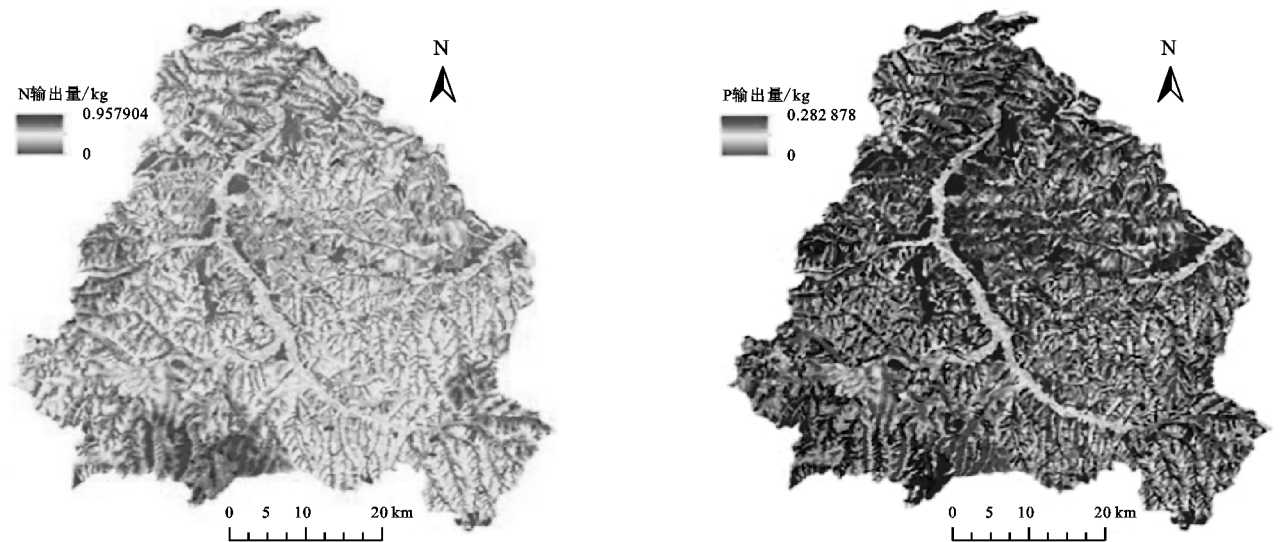


图 3 2017 年定西市安定区 N、P 输出量

表 3 2017 年定西市安定区各土地利用类型水质净化能力

土地利用类型	面积/ km ²	单位面积 N 保持量/ (kg · hm ⁻²)	N 保持总量/ t	N 净化率/ %	单位面积 P 保持量/ (kg · hm ⁻²)	P 保持总量/ t	P 净化率/ %
耕地	1181.82	7.66	907.12	59.47	2.90	343.60	68.00
林地	10.99	2.14	2.39	85.85	0.13	0.14	79.13
草地	1244.05	10.73	1340.87	72.24	1.50	187.77	72.26
人工灌草地	1072.10	2.40	258.54	72.21	0.12	13.35	71.07
建设用地	78.10	8.91	69.76	65.24	2.48	19.45	65.52
未利用地	19.95	4.06	8.10	68.92	0.12	0.25	69.06

2.3 土壤保持量评估

利用 InVEST 模型的公式(5)~(7)计算出 2017 年定西市安定区土壤保持量,其空间分布呈南高北低的态势(图 4)。评估结果实际土壤侵蚀量为 9.53×10^6 t,单位面积平均土壤保持量为 167.3 t/hm^2 ,总土壤保持量为 6.04×10^7 t(表 4)。人工灌草地与其他 5 种土地利用类型相比较,单位面积的土壤保持量最高,达到 308.76 t/hm^2 ,比草地、林地和耕地分别高 1.88,1.44,6.01 倍;未利用地单位面积的土壤保持量最

低,仅 22.81 t/hm^2 ,人工灌草地是未利用地的 13.54 倍。人工灌草地面积占总土地面积的 29.7%,土壤保持总量最高,占总土壤保持量的 54.82%;耕地面积占总土地面积的 32.7%,但土壤保持量仅占总土壤保持量的 10.05%;草地和林地的总土壤保持量与所占总面积比例大致相当。按单位面积土壤保持量大小排序为:人工灌草地>林地>草地>耕地>建设用地>未利用土地。结果表明人工灌草地的土壤侵蚀低、土壤保持能力最强。

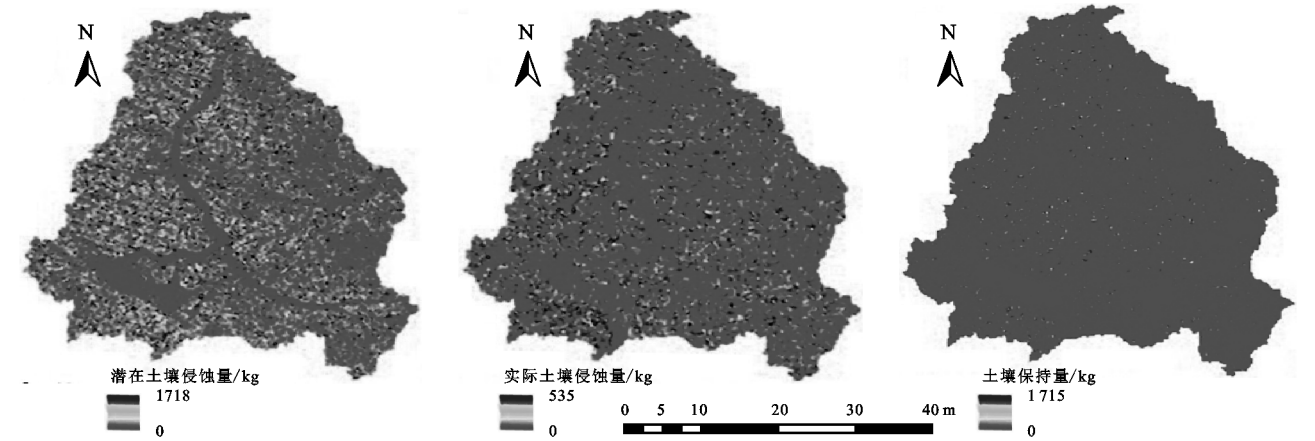


图 4 2017 年定西市安定区土壤侵蚀与保持量空间分布

表 4 2017 年定西市安定区各土地利用类型土壤保持功能比较

土地利用类型	面积/ km ²	土壤侵蚀强度/ (t·hm ⁻²)	实际土壤 侵蚀量/10 ⁴ t	单位面积土壤保持量/ (t·hm ⁻²)	总土壤保持量/ 10 ⁴ t	占总土壤 保持量比例/%
耕地	1181.82	64.99	768.07	51.35	606.90	10.05
林地	10.99	10.57	1.162	214.38	23.56	0.39
草地	1244.05	10.39	129.19	164.14	2042.03	33.82
人工灌草地	1072.10	0.90	9.69	308.76	3310.21	54.82
建设用地	78.10	38.54	30.10	64.24	50.17	0.83
未利用地	19.95	74.04	14.77	22.81	4.55	0.08
合计	3607.01	—	952.98	—	6037.96	100

3 讨论

在黄土高原地区的各类生态服务功能中,水土保持是居于首位的服务功能。由于干旱脆弱的生态地理条件及生态环境保护与经济社会发展的客观需求,要实现生态与生产双赢的目标,需要从地形地貌、水热分布及自然植被特征出发,调整产业结构和植被结构,建立生态与生产兼顾的草牧产业发展模式,达到控制水土流失、涵养水源、保持土壤、改善景观、发展经济的多重目的^[22]。黄土高原地区自 20 世纪 80 年代开始种草种树,到 90 年代末国家实施退耕还林还草工程以来,建立了大面积的具有生态与生产兼用的人工灌草系统,人工灌草复合结构面积占到总面积的 30%左右,已成为该地区主要的植被类型,在水土保持中发挥着重要的作用^[23]。

不同土地利用类型的水源涵养量、水质净化率和土壤保持量一直是研究的热点问题^[24-25]。大量的研

究^[26-27]采用不同的方法对不同土地利用类型的水土保持功能及其空间分布格局进行了评估与分析,对流域的水土保持、土地利用结构调整、退耕还林还草提供了科学的决策支持。

本研究基于 InVEST 模型对定西市安定区人工灌草生态系统的水土保持功能进行量化评估,并与其他 5 种不同土地利用类型进行了比较。评估结果较客观地反映了定西市安定区水土保持功能的实际情况。评估结果的精度高低取决于选择模型的可靠性,由于 InVEST 模型具有精细、定量、空间表达和综合性强的优点,能够基于不同土地利用情景对生态系统服务及其价值变化进行分析和评估,在国内外得到了广泛的应用并取得了较好的应用效果^[17,20,28]。但 InVEST 模型在运行过程中受自然状态、模型结构、参数取值等因素的影响,评估结果会产生一定的不确定性^[29]。此外,模型假设到达出水口的水分是

减去蒸腾散发后的水分,并没有考虑人类直接消耗的水分,也没有对地表水与地下水进行区分,在这些方面还需要加强,以提高评估结果的准确性。本研究是对人工灌草系统水土保持功能的静态评估,在以后的研究中应该加强对人工灌草生态系统的动态监测,对其水土保持功能开展动态评估,以便更加客观地反映生态系统服务功能的变化,使生态保护、资源利用与经济决策更加科学有效。

4 结论

(1)定西市安定区基于栅格单元的水源涵养能力为 0~364.541 mm,流域单元平均水源涵养能力为 36.37 mm,单位面积水源涵养量为 102.13 m³/hm²,总水源涵养量为 13 270.13×10⁴m³,水源涵养量的空间分布呈由西南向东北逐渐减少的态势。人工灌草地单位面积的水源涵养量为 369.25 m³/hm²,总水源涵养量为 3 970.99×10⁴m³,占总水源涵养量的 29.9%,与其他 5 种土地利用类型相比,水源涵养能力是草地的 90.5%、林地的 134%和耕地的 110%。按水源涵养能力大小排序为:草地>人工灌草地>林地>耕地>未利用土地>建设用地。

(2)定西市安定区人工灌草地单位面积的 N 保持量为 2.4 kg/hm²,净化率为 72.21%,P 保持量为 0.12 kg/hm²,净化率为 71.07%。N、P 输出量高于草地和林地,但仅占耕地的 21.6%和 4.3%。按 N 净化率大小排序为:林地>草地>人工灌草地>未利用土地>建设用地>耕地;按 P 净化率大小排序为:林地>草地>人工灌草地>未利用土地>耕地>建设用地。

(3)定西市安定区实际土壤侵蚀量为 9.53×10⁶ t,单位面积平均土壤保持量为 167.3 t/hm²,总土壤保持量为 6.04×10⁷t。人工灌草地单位面积的土壤保持量达 308.76 t/hm²,土壤保持总量达 3 310.21×10⁴t,占总土壤保持量的 54.82%。与其他 5 种土地利用类型相比,单位面积的土壤保持量比草地、林地和耕地分别高 1.88,1.44,6.01 倍。按单位面积土壤保持量大小排序为:人工灌草地>林地>草地>耕地>建设用地>未利用土地。

评估结果表明人工灌草地的水源涵养能力次于草地和林地,但土壤保持能力强于林地和草地,具有较好的土壤保持功能,是黄土高原丘陵区适宜的植被类型和土地利用方式。

参考文献:

[1] 张瑜,赵晓丽,左丽君,等.黄土高原生态系统服务价值动态评估与分析[J].水土保持研究,2018,25(3):170-176.
[2] 王川,刘春芳,乌亚汗,等.黄土丘陵区生态系统服务空间格局及权衡与协同关系:以榆中县为例[J].生态学报,2019,38(2):521-531.

[3] 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.
[4] 邓景成,高鹏,穆兴民,等.黄土高原退耕还林工程对生态环境的影响及对策建议[J].水土保持研究,2017,24(5):63-68.
[5] 高旺盛,陈源泉,董孝斌.黄土高原生态系统服务功能的重要性与恢复对策探讨[J].水土保持学报,2003,17(2):59-61.
[6] 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].生态学杂志,2012,31(9):2391-2396.
[7] 莫保儒,蔡国军,赵廷宁,等.甘肃半干旱黄土丘陵沟壑区人工植被土壤水分研究[J].水土保持研究,2009,16(6):125-128.
[8] 黄从红,杨军,张文娟.生态系统服务功能评估模型研究进展[J].生态学杂志,2013,32(12):3360-3367.
[9] Plummer M L. Assessing benefit transfer for the valuation of ecosystem services[J].Frontiers in Ecology and the Environment,2009,7:38-45.
[10] Vigerstol K L, Aukema J E. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services[J].Journal of Environmental Management,2011,92:2403-2409.
[11] 唐尧,祝炜平,张慧,等. InVEST 模型原理及其应用研究进展[J].生态科学,2015,34(3):204-208.
[12] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, et al. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale[J].Science of the Total Environment,2016,569:1418-1426.
[13] 张影.社会生态复合系统视角下的陇中黄土丘陵区土地利用多功能评价[D].兰州:兰州大学,2017.
[14] 刘彬彬,邸利,马晓燕,等.定西市安定区不同水土保持措施结构下综合效益评价[J].水土保持研究,2014,21(3):152-156.
[15] 魏静.定西市生态文明建设现状及对策研究[J].甘肃农业,2014(17):52-54.
[16] 包玉斌,李婷,柳辉,等.基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J].地理研究,2016,35(4):664-676.
[17] 胡胜,曹明明,刘琪,等.不同视角下 InVEST 模型的土壤保持功能对比[J].地理研究,2014,33(12):2393-2406.
[18] 党虹,葛丽娟,赵传燕,等.基于 InVEST 模型的称钩河流域土壤保持功能研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2018,54(5):633-639.
[19] 李屹峰,罗跃初,刘纲,等.土地利用变化对生态系统服务功能的影响:以密云水库流域为例[J].生态学报,2013,33(3):726-736.
[20] 余新晓,周彬,吕锡芝,等.基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J].林业科学,2012,48(10):1-5.

[5] 滕明君.快速城市化地区生态安全格局构建研究[D].武汉:华中农业大学,2011.

[6] Wang L Y, XiaoY, Rao E M, et al. An assessment of the impact of urbanization on soil erosion in Inner Mongolia[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2018,15(3):550-562.

[7] Dudit O P, Derek V, Stephan P. Impact of peri-urban agriculture on runoff and soil erosion in the rapidly developing metropolitan area of Jakarta, Indonesia[J]. Regional Environmental Change,2018,18 (7):2129-2143.

[8] Napoleon G E, Trent W B, Carlos C, et al. Measuring ephemeral gully erosion rates and topographical thresholds in an urban watershed using unmanned aerial systems and structure from motion photogrammetric techniques[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29 (6):1896-1905.

[9] 胡彦婷,王守俊,张富,等.城市型县级水土流失重点防治区复核划分研究[J].水土保持通报,2017,37(6):291-298.

[10] 刘济云,杨亚珠.浅谈“海绵城市”理念在城市水利工程水土保持设计中的应用[J].水土保持应用技术,2018 (1):48-49.

[11] Yang M A. The impact of urban building planning on soil and water loss in the peripheral eco-environment [J].Ekoloji,2019,28(107):2521-2531.

[12] 侯雷,吴发启,吴秉校,等.陕西省西安市水土保持区划研究[J].水土保持通报,2017,37(1):315-318,324.

[13] 任文,刘莹.西安市城市水土保持工作实践与探索[J].中国水土保持,2017(9):59-61.

[14] 仲艳维.潮白河流域水土保持效益评价及生态补偿制度构建研究[D].北京:北京林业大学,2014.

[15] Wischmeier W H, Smith D D. Agricultural Hand-book: Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[R].United States Department of Agriculture,1978.

[16] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Agricultural Handbook: Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[R].United States Department of Agriculture,1997.

[17] 李铖,李俊祥,朱飞鸽,等.基于 RUSLE 的环杭州湾地区土壤侵蚀敏感性评价及关键敏感因子识别[J].应用生态学报,2009,20(7):1577-1585.

[18] 刘秉正.渭北地区 R 的估算及分布[J].西北林学院学报,1993(2):21-29.

[19] 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].西北大学学报(自然科学版),2010,40(3):545-549.

[20] 郑海金.赣北红壤坡面水土保持措施保水减沙作用研究[D].北京:北京林业大学,2012.

[21] 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, 1987, 30 (5): 1387-1396.

[22] 姬翠翠,李晓松,曾源,等.基于遥感和 GIS 的宣化县水土流失定量空间特征分析[J].国土资源遥感,2010,22 (2):107-112,117.

[23] 钟德燕.基于 USLE 模型的黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.

[24] 水利部.SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2007:8-9.

[25] 刘文平.基于景观服务的绿色基础设施规划与设计研究[D].北京:中国农业大学,2014.

(上接第 90 页)

[21] 陈姗姗,刘康,李婷,等.基于 InVEST 模型的商洛市水土保持生态服务功能研究[J].土壤学报,2016,53(3): 800-807.

[22] 王国宏,张新时.从生态地理背景论草地畜牧业产业在黄土高原农业可持续发展中的战略地位[J].生态学报, 2003,23(10):2018-2025.

[23] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等.黄土残塬沟壑区刺槐林枯落物水源涵养功能综合评价[J].水土保持学报,2019,33 (2):251-257.

[24] 任志远,刘焱序.西北地区植被保持土壤效应评估[J].资源科学,2013,35(3):610-617.

[25] Shukla A K, Pathak S, Pal L, et al. Spatio-temporal assessment of annual water balance models for upper Ganga Basin[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018,22(10):5357-5371.

[26] 张敏,刘爽,刘勇,等.黄土丘陵缓坡风沙区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J].水土保持学报,2019,33 (3):115-128.

[27] 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].生态学杂志,2012,31(9):2391-2396.

[28] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等.黄土残塬沟壑区 3 种林地枯落物和土壤水源涵养功能[J].水土保持学报,2018,32 (2):357-363.

[29] 邓景成,高鹏,穆兴民,等.黄土高原退耕还林工程对生态环境的影响及对策建议[J].水土保持研究,2017,24 (5):63-68.