

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.010.

王静, 王兵, 张智键, 等. 纸坊沟小流域近 80 年来土地利用变化及其土壤保持效应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 90-100.

Wang Jing, Wang Bing, Zhang Zhijian, et al. Land Use Change and Soil Conservation Effect in Zhifanggou Watershed in Recent 80 Years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 90-100.

纸坊沟小流域近 80 年来土地利用变化及其土壤保持效应

王静¹, 王兵^{1,2}, 张智键¹, 白洁¹

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,
陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 小流域综合治理驱动的土地利用变化可显著影响流域产沙过程, 探究纸坊沟小流域不同治理阶段土地利用动态变化特征及土壤保持效应, 为黄土高原生态服务功能的改善提供科学支撑。 [方法] 基于 CSLE 模型, 系统评估纸坊沟小流域近 80 年 5 个治理时段土地利用变化及其土壤保持效应的时空特征。 [结果] (1) 1938 年植被破坏前流域林草植被占 88.55%, 植被破坏后 1958 年林草植被占比降为 32%, 林地、草地和耕地比例为 1:244:433, 1978 年土地利用变化平缓; 小流域综合治理实施后, 1999 年和 2020 年林草植被占比分别为 64.73% 和 86.55%, 2020 年林草植被占比与 1938 年破坏前基本持平, 但林地占比还是略小, 草地略高, 林地、草地和耕地比例为 7.6:5:1。 (2) 流域 5 个时期土壤保持量分别为 24.85 万 t, 18.86 万 t, 22.88 万 t, 23.62 万 t, 24.60 万 t, 植被破坏后土壤保持量有所下降, 小流域综合治理后土壤保持量有所增加, 由于林地面积仍低于破坏前, 2020 年土壤保持量仍低于 1938 年 0.01%。 (3) 受土地流转驱动, 不同时期林地、草地和耕地土壤保持量分别较 1938 年增加或减少了一 99.80%~一 17.86%, 23.90%~69.18% 和一 25.06%~664.66%, 园地土壤保持量在 1999 年达到最大值, 后于 2020 年降至 7 511.14 t。 [结论] 纸坊沟小流域的植被覆盖已基本恢复至 1938 年破坏前的水平, 说明黄土高原生态恢复在纸坊沟小流域取得了显著成效。

关键词: 土壤保持; 时空变化; 土地利用; 治理阶段

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0090-11

Land Use Change and Soil Conservation Effect in Zhifanggou Watershed in Recent 80 Years

Wang Jing¹, Wang Bing^{1,2}, Zhang Zhijian¹, Bai Jie¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] The land use change driven by comprehensive management of small watershed can significantly affect the process of sediment yield in the watershed. The aims of this study are to explore the characteristics of land use dynamic change and soil conservation effect in different management stages of Zhifanggou small watershed, and to provide scientific support for the improvement of ecological service function in the Loess Plateau. [Methods] Based on the CSLE model, the spatial and temporal characteristics of land use change and soil conservation effect in the five management periods of the Zhifanggou watershed in the past 80 years were systematically evaluated. [Results] (1) Before the vegetation destruction in 1938, the forestland and grassland in the watershed accounted for 88.55%. In 1958, the proportion of forest and grass vegetation decreased by only 32%. In 1978, the land use change was gentle. After the implementation of

收稿日期: 2023-06-06

修回日期: 2023-06-20

资助项目: 十四五国家重点研发计划专题(2022YFF1300405); 国家自然科学基金重点项目课题(42130717)

第一作者: 王静(1997—), 女, 甘肃定西人, 在读博士, 研究方向为 GIS 与土壤侵蚀。E-mail: 1647427523@qq.com

通信作者: 王兵(1982—), 男, 陕西咸阳人, 博士, 研究员, 研究方向为植被恢复与土壤侵蚀。E-mail: bwang@ms.iswc.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

comprehensive management of small watersheds, the proportion of forest and grass vegetation in 1999 and 2020 was 64.73% and 86.55%, respectively. The proportion of forest and grass vegetation in 2020 was basically the same as that before the destruction in 1938, but the proportion of forestland was still slightly smaller. (2) The amount of soil conservation in the five periods of the watershed was 2.485×10^5 t, 1.886×10^5 t, 2.288×10^5 t, 2.362×10^5 t and 2.460×10^5 t, respectively. The amount of soil conservation decreased after vegetation destruction, and the amount of soil conservation increased after comprehensive management of small watersheds. Because the area of forestland was still lower than that before destruction, the amount of soil conservation in 2020 was still lower than 0.01% in 1938. (3) Driven by land transfer, the soil conservation of woodland, grassland and cultivated land in different periods increased or decreased by $-99.80\% \sim -17.86\%$, $23.90\% \sim 69.18\%$ and $-25.06\% \sim 664.66\%$, respectively, compared with that in 1938. [Conclusions] The vegetation coverage of Zhifanggou watershed has been basically restored to the level before the destruction in 1938, indicating that the ecological restoration of the Loess Plateau has achieved remarkable results in Zhifanggou.

Keywords: soil conservation; temporal and spatial variation; land use; control stage of soil erosion

土壤保持是生态系统为防止土壤侵蚀、泥沙输移以及沉积提供的一项重要调节服务功能,对抑制区域土地退化,水土流失有重要意义^[1]。人类对土地利用的需求日益增强,在人类活动驱动下土地利用方式及利用程度发生着深刻变化,对土壤保持等生态功能产生了重要影响^[2]。目前,土壤保持的评估主要采用实地调查和模型模拟2种方法,随着模型和信息技术的发展,“3S”技术和USLE、RUSLE等侵蚀模型的结合,是目前研究区域土壤侵蚀与水土保持功能的主流方式^[3-4]。而在土地利用动态变化背景下,土壤侵蚀与水土保持效益成为了土壤侵蚀学者所关注的问题^[5]。

黄土高原是我国“三区四带”生态建设的重点生态屏障区,也是世界上土壤侵蚀最严重的地区之一^[6]。多年来,由于历史、毁林开荒等原因,该区的土地利用发生了较大变化,生态环境急剧恶化,对我国的生态环境造成了威胁。针对严重的水土流失问题,政府早在20世纪50年代就开展了水土保持理论、技术研究和水土保持试验站建设^[7]。经过“治沟治坡”“小流域综合治理”“退耕还林/草”等70多年的治理,黄土高原入黄泥沙锐减至每年2亿~3亿吨,植被覆盖率达到65%,生态环境发生了重大改变^[8]。

纸坊沟小流域地处黄土高原丘陵沟壑区第Ⅱ副区,流域内梁峁纵横,地形破碎,水土流失十分严重。近几十年来,退耕还林/草工程实施以及以调整土地利用结构为主的流域综合治理的不断推进,导致流域内土地利用变化剧烈。目前就流域的土地利用变化及其环境、生态效应等已取得较多的研究成果。温仲明等^[9-10]对纸坊沟流域60年来的土地利用变化格局进行了研究,同时对土地利用景观变化下的环境效应进行了评价。杜娜等^[11]基于单一动态度指数和

土地利用综合指数分析了纸坊沟小流域1938—2008年农用地的动态变化过程。上述研究对纸坊沟的土地利用变化研究已取得一定的进展,但是在不同典型治理阶段特别是近年来纸坊沟小流域的土地利用恢复状况研究较少。同时,关于黄土高原的水土保持生态服务功能研究也取得了显著成果:王鹭等^[12]应用InVEST模型、地理探测器,研究了延河流域在典型治理阶段的土壤保持功能;孙应龙等^[13]基于USLE方程,研究了黄土高原地区2000年以来土壤保持量时空变化特征。而针对土地利用变化的土壤保持效应目前研究较少。

因此,本文借助CSLE模型,基于纸坊沟小流域近80年不同时段土地利用空间分布及动态变化特征,对土壤保持进行定量评估,分析土壤保持的时空及动态变化特征,对流域近80年的生态恢复状况进行评估,以期对黄土高原的生态屏障建设和生态服务功能的改善提供科学支撑。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

纸坊沟小流域(109°19′30″E, 36°51′30″N)位于陕西省延安市安塞区,属黄土高原丘陵沟壑区第Ⅱ副区,面积8.27 km²,流域内沟壑纵横,地形破碎,沟壑密度高达8.06 km/km²,海拔在1 040~1 425 m(图1)。气候属暖温带半湿润向半干旱过度的气候区,在植被区划上属于森林草原区,年平均气温为8.8℃,年平均降水549.1 mm,全年降水季节分布不均,主要集中在每年的6—9月份,夏秋季多暴雨并伴随冰雹等自然灾害现象。研究区土壤类型较为单一,地带性土壤为黑垆土,因长期遭受侵蚀,已流失殆尽,现如今土

壤类型为黄绵土,结构疏松,土性绵软,极易被侵蚀。资料显示 1938 年纸坊沟流域林草覆盖率 76.5%,之后随着农耕地不断开垦,植被破坏殆尽,到 1958 年仅存果树和灌木 0.35 km²,土壤侵蚀模数高达 14 000

t/(km²·a),生态系统极度恶化。“七五”计划以来,国家大力开展黄土高原水土流失综合治理研究,经过 80 多年的发展,初步形成了以刺槐、油松等为主的人工林植被景观^[14]。

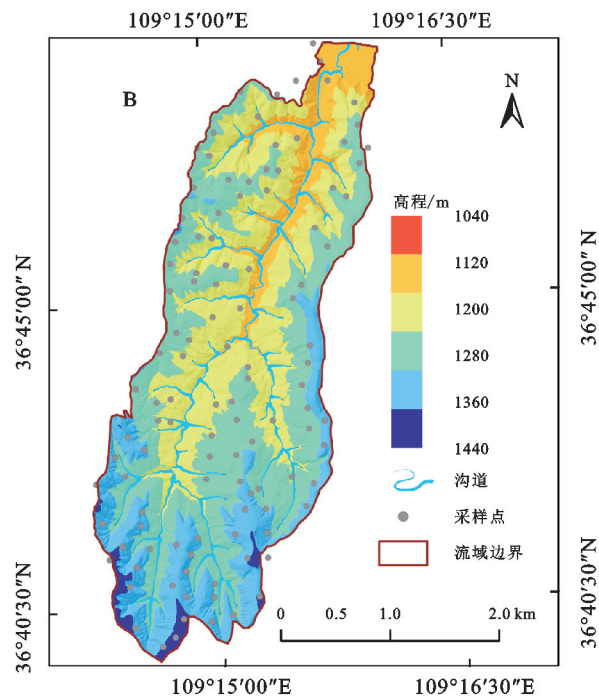
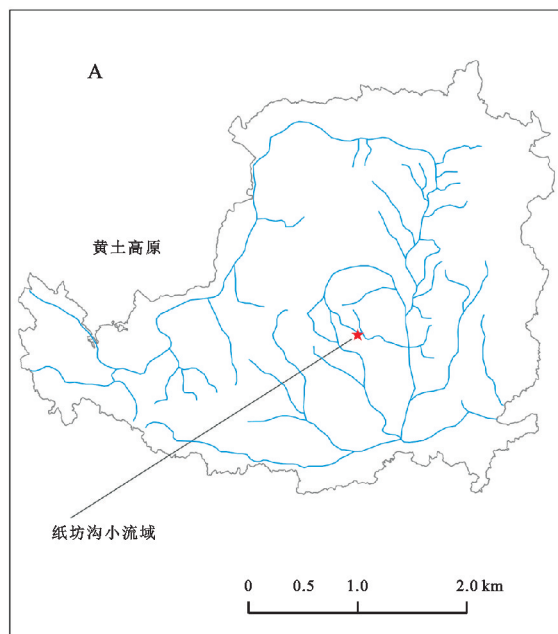


图 1 研究区地理位置概况

Fig. 1 Geographical location of study area

1.2 数据来源与处理

根据 CSLE 方程的基本框架,本研究的数据包括:

(1) 纸坊沟小流域 1938—2020 年共 5 期土地利用图,其中 1938 年、1958 年、1978 年、1999 年四期土地利用图来源于地球科学数据共享平台—黄土高原科学数据共享平台(<http://loess.geodata.cn/>),数据精度为 1:10 000;2020 年土地利用图基于航空遥感影像(1:10 000),采用目视解译的方法,再结合 Google earth 平台、野外调查进行校正;

(2) 1938—1999 年的生物措施因子是基于不同时期的土地利用,对其进行相应赋值计算可得,2020 年的生物措施因子是根据高分遥感影像(高分 2 号、2 m 空间分辨率)计算得到。

(3) 降雨数据为研究区纸坊沟小流域水文监测站及安塞水土保持试验站监测记录,由于流域内降雨空间异质性差异不大,降雨特征在空间分布上整体比较均匀,故研究区降雨侵蚀力的大小由现有数据计算得到。

(4) DEM 数据基于研究区实地测量,分辨率为 1 m;

(5) 根据纸流域主要植被类型和地形地貌采集共计 96 个土壤样点,将新鲜土样送至室内实验室,经过风干、磨碎、过筛等一系列操作后室内分析测定表

层土壤 0—20 cm 深得土壤机械组成及有机碳含量,借助 ArcGIS 进行空间插值获取 CSLE 公式中的土壤可蚀性 K 因子。

1.3 土壤保持量计算

采用中国土壤流失方程(CSLE),基于流域尺度估算纸坊沟小流域的土壤保持量。具体计算公式如下:

$$RKLS_i = R_i \cdot K_i \cdot L \cdot S_i \quad (1)$$

$$CSLE_i = R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot B_i \cdot E_i \cdot T_i \quad (2)$$

$$SR_i = RKLS_i - CSLE_i = R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot (1 - B_i \cdot E_i \cdot T_i) \quad (3)$$

式中: $RKLS_i$ 、 $CSLE_i$ 和 SR_i 分别为栅格 i 的潜在、实际土壤流失量及保持量 t/(hm²·a); R_i 为栅格 i 降雨侵蚀力因子[MJ·mm·(hm²·h·a)]; K_i 为栅格 i 土壤可蚀性因子[t·hm²·h/(hm²·MJ·mm)]; LS_i 为地形坡长、坡度因子; B_i 、 E_i 、 T_i 分别为水土保持生物、工程和耕作措施因子,三者单位均为无量纲。

(1) 降雨侵蚀力因子。降雨是土壤侵蚀的主要驱动因子,本研究基于日侵蚀性降雨资料,用章文波等^[15]改进的理查德森方法,计算研究区的降雨侵蚀力。主要计算方法如下:

$$R = \alpha \sum_{k=1}^m (P_k)^\beta \quad (4)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (5)$$

$$\beta=0.8363+\frac{18.144}{P_{d12}}+\frac{24.455}{P_{y12}} \tag{6}$$

式中： P_{d12} 、 P_{y12} 分别为日降雨量 ≥ 12 mm 的日平均降雨量及年平均降雨量(mm)， m 为侵蚀性降雨天数(d)， P_k 为第 k 天 ≥ 12 mm 的日侵蚀性降雨量(mm)， R 为降雨侵蚀力 MJ·mm·(hm²·h·a)。

(2) 土壤可蚀性因子。本研究综合考虑纸坊沟小流域地形地貌特征,野外布设采样点 96 处(图 1),采集土壤表层 0—20 cm 新鲜的土样,室内分析测定其土壤有机碳百分含量(Ca)、颗粒组成砂粒(SAN)、粉粒(SIL)及黏粒(CLA)百分含量,在张科利等^[16]学者对 EPIC 模型进行参数校正的基础上,应用其校正公式计算每个采样点土壤可蚀性 K 因子。具体的计算公式如下:

$$K_0=\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.0256SAN\frac{(1-SIL)}{100}\right]\right\}\times\left(\frac{SIL}{CLA+AIL}\right)^{0.3}\times\left[1.0-\frac{0.25C_a}{C_a+\exp(3.72-2.95C_a)}\right]\times\frac{1.0-\frac{0.75SNI}{SNI+\exp(-5.51+22.9SNI)}}{SNI+\exp(-5.51+22.9SNI)} \tag{7}$$

$$K=(-0.01383+0.51575K_0)\times0.1317 \tag{8}$$

式中:SAN 为沙粒含量;SIL 为粉粒含量;CLA 为黏粒含量; C_a 土壤有机碳百分含量; $SNI=1-\frac{SAN}{100}$ 。

(3) 坡长坡度因子。结合流域实际情况本研究采用刘宝元等^[17-18]提出的计算公式,借助符素华等^[19]研发的“土壤侵蚀模型地形因子计算工具”进行 LS 因子栅格图层的提取。具体的计算公式如下:

$$S=\begin{cases} 10.8\sin\theta+0.03 & \theta\leq 5^\circ \\ 16.8\sin\theta-0.50 & 5^\circ<\theta<10^\circ \\ 21.91\sin\theta-0.96 & \theta>10^\circ \end{cases} \tag{9}$$

$$L_i=\frac{\lambda_i^{m+1}-\lambda_{i-1}^{m+1}}{(\lambda_i-\lambda_{i-1})\times22.13^m}\lambda_i-\lambda_{i-1}>0 \tag{10}$$

$$L_i=(\lambda_i/22.1)^m\lambda_i-\lambda_{i-1}<0 \tag{11}$$

$$L_i=0 \quad \lambda_i-\lambda_{i-1}=0 \tag{12}$$

$$m=\begin{cases} 0.2 & \theta<0.5^\circ \\ 0.3 & 0.5^\circ\leq\theta<1.5^\circ \\ 0.4 & 1.5^\circ\leq\theta<2.5^\circ \\ 0.5 & \theta\geq2.5^\circ \end{cases} \tag{13}$$

式中: S 为坡度因子; L_i 为栅格 i 坡长因子; θ 为研究区坡度; m 为指数,通对不同的坡度梯度采用不同参数; λ_i 、 λ_{i-1} 为栅格 i 和栅格 $i-1$ 坡段坡长。

(4) 生物措施因子。本研究根据研究实际需要及数据所限,基于研究区不同时期土地利用数据,对其生物措施因子进行相应赋值计算^[14,20-21],同时采用蔡崇法等^[22]人的方法计算植被覆盖度(表 1)。

表 1 水土保持生物措施因子赋值
Table 1 B factor assignment table

项目	不同植被覆盖度林地/%					耕地	园地	水域
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100			
B 值	0.1	0.08	0.06	0.02	0.004	0.45	0.297	0

项目	不同植被覆盖度草地/%					未利用地	建设用地
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100		
B 值	0.45	0.24	0.15	0.09	0.043	0.24	1

(5) 工程措施因子。纸坊沟小流域水土保持工程措施主要有水平梯田及淤地坝,由于研究的实际需要及数据所限,结合研究区的土地利用地形图及前人研究成果,对流域水平梯田该因子赋值为 0.084,其他地形赋值为 1;淤地坝默认为没有侵蚀发生,故该值为 0。

表 2 水土保持耕作措施因子赋值表
Table 2 T factor assignment table

坡度范围 $\theta/(^\circ)$	0	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	>25
T 因子值	1	0.100	0.221	0.305	0.575	0.735	0.800

2 结果与分析

2.1 土地利用变化

2.1.1 时空分布及动态变化特征 分析纸坊沟流域 1938—2020 年研究区土地利用分布及面积变化情况(图 2,表 3),可以看出:1938 年全流域土地利用结构

(6) 耕作措施因子。该因子值在土壤侵蚀评价的实际应用中,获取比较困难,通常基于农耕地所对应的实际坡度,进行相应梯度的赋值。故本研究根据流域的实际情况及前人的研究成果^[23],基于研究区耕地坡度所对应的地形特征,对该因子进行赋值(表 2)。

较为简单,主要以林地和草地为主,耕地次之,仅有少量建设用地的分布,林草地广泛地分布在流域各个地方。1958 年流域土地利用结构发生剧变,林地几乎全部开垦毁坏,耕地面积大幅度增加,草地较上一时期空间分布变化也较大,基本沿沟道在沟坡分布,同时流域沟底出现了少许的未利用地,园地及水域零星

分布。1978 年流域土地利用变化较为平缓,与 1958 年相似,基本上处于稳定状态。1999 年,耕地明显呈下降趋势,主要分布在流域中下部,沟底的未利用消失殆尽,同时林地、草地、园地面积呈上升趋势,土地

利用结构日渐合理化。2020 年,流域综合治理实施 40 a,林草地大面积分布在全流域,是此时主要的用地类型,耕地面积进一步减少,园地较上一时期略有减少,集中在流域中下部。

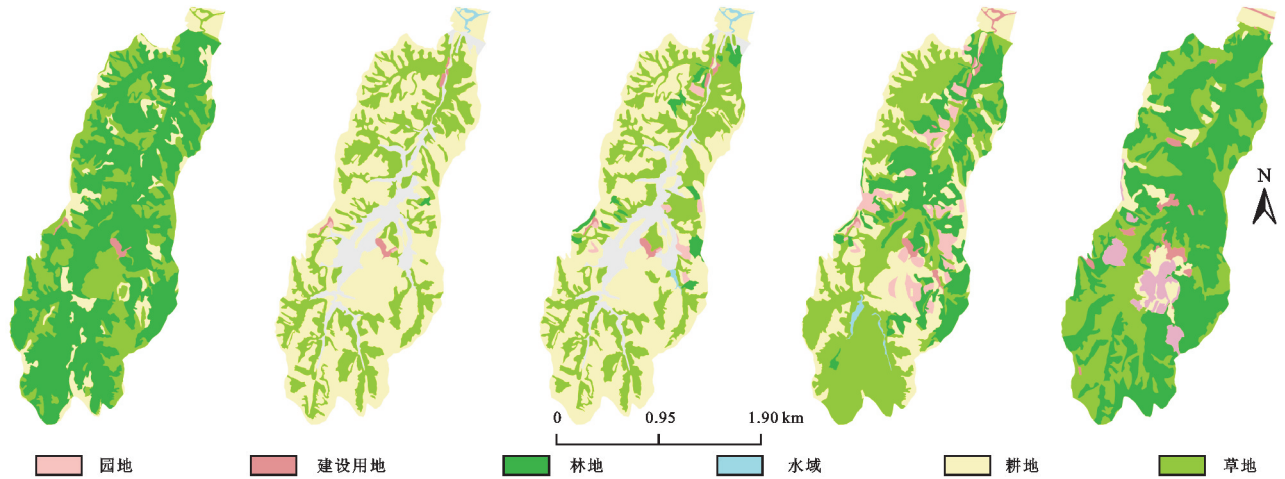


图 2 研究区 1938—2020 年土地利用空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of land use in the study area from 1938 to 2020

表 3 1938—2020 年纸坊沟流域土地利用数量变化

Table 3 The change table of land use quantity in the study area from 1938 to 2020

土地利用 类型	1938 年		1958 年		1978 年		1999 年		2020 年	
	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%
耕地	92.34	11.00	472.76	56.32	434.09	51.72	228.42	27.21	56.93	6.87
林地	513.98	61.23	1.09	0.13	23.35	2.78	196.85	23.45	433.24	52.30
园地	0.00	0.00	0.82	0.10	10.07	1.20	50.96	6.07	37.35	4.51
草地	229.34	27.32	266.69	31.77	275.31	32.80	346.47	41.28	283.68	34.25
水域	0.00	0.00	3.31	0.39	4.76	0.57	4.78	0.57	0.00	0.00
建设用地	3.71	0.44	5.22	0.62	5.76	0.69	11.88	1.42	17.15	2.07
未利用地	0.00	0.00	89.47	10.66	86.04	10.25	0.00	0.00	0.00	0.00

各时期土地利用类型面积进行统计发现(表 3), 1938 年林草地面积占流域总面积的 88.56%,耕地仅占 11%。1958 年,流域林地大幅度破坏,面积骤减 512.89 hm²,减幅 99.8%,而耕地面积从 92.34 hm²急剧增加到 472.76 hm²,增幅 411.98%,草地、园地、未利用地、水域、建设用地分别增加 37.35,0.82,89.47, 3.31,1.51 hm²。1978 年土地利用结构同之前相似,林地、园地、草地、水域、建设用地较上一时期分别增加 22.26,9.25,8.62,1.45,0.53 hm²,耕地和未利用地分别减少 38.68 hm²,3.44 hm²。1999 年,林草地面积开始恢复至占流域总面积的 64.73%,耕地面积从 434.09 hm²减少至 228.42 hm²,园地增加 40.89 hm²,未利用地消失。到 2020 年,林草地面积恢复至占流域总面积的 85.41%,基本与 1938 年持平,成为主要的用地类型,耕地由 1999 年的 228.42 hm²再次下降至 56.93 hm²。

2.1.2 土地利用转移分析 通过对研究区各时段土地利用进行转移矩阵分析(图 3),可以看出:不同时段,研究区各地类均发生了面积转换,从变化数量上

看,1938—1958 年林地转出面积最大,为 427.97 hm²;而转入类型面积最大的是耕地,达 472.76 hm²,主要由林地和草地转化而来,变化程度较为剧烈;草地数量变化虽小,但其空间变化最为强烈。从空间转化过程看,林地主要转向草地和耕地,转移率高达 83.27%;草地主要转换为耕地,其中草地表现出双向增减变化,一方面原有草地的 90.99%转化为耕地,另一方面,林地又大面积转为了草地。

1958—1978 年,是研究区土地流转最稳定的时期,总转化面积约 91.99 hm²。从变化数量上看,耕地的转出面积最大,草地的转入面积最大。从空间转化过程看,耕地向园地、林地、草地转出的面积分别为 9.25, 18.24,34.75 hm²,林地向草地转出 1.09 hm²,而草地向耕地和林地的转换面积为 23.55 hm²,5.11 hm²,总体来看这一时期研究区的土地利用类型变化不大。

1978—1999 年,流域综合治理初显成效,耕地开始缓慢转出为林地、草地和园地,转出面积共达 222.36 hm²,占流域面积的 27.44%;林草地也有向园

地转化的趋势,转化面积分别为 0.50,7.17 hm²,园地总体的变化强度不大。同时草地向林地的转化面积为 99.75 hm²,占流域面积的 11.89%。

1999—2020 年,国家退耕还林还草政策实施近 20 年,土地利用转化方向基本趋于稳定,从转化数量上看,草地和耕地的转出面积相当,均为 175 hm²,林

地的转入面积最大,为 273.61 hm²。从空间转化过程看,草地、耕地、果园和林地其未发生面积转化的土地分别为 156.82,31.36,5.29,147.48 hm²;耕地中有 64.52,83.09 hm²的土地分别转向了草地和林地,草地中有 169.74 hm²的土地转向了林地,林草地成为了流域主要的土地利用类型。



图 3 1938—2020 年纸坊沟流域土地利用转移

Fig. 3 Land use transfer in the study area from 1938 to 2020

2.2 基于土地利用动态变化的水土保持时空变化

2.2.1 水土保持时空变化 为充分了解纸坊沟流域不同治理阶段的水土保持时空变化特征,本文以水土保持总量、水土保持强度(单位面积水土保持量)为指标,量化评估研究区水土保持的变化(图 4)。从空间分布来看,流域 5 个时期水土保持量具有明显的空间异质性,但其空间分布格局基本一致,水土保持较弱的地方都集中在中部及沟口位置,沟底的土壤保持也较弱。从时间变化上来看,纸坊沟流域 1938 年、1958

年、1978 年、1999 年、2020 年的水土保持强度分别为 307.08,232.82,282.76,291.87,303.96 t/(hm²·a),呈现先减小后增加的趋势。

2.2.2 基于土地利用变化的水土保持 按土地利用类型对流域 5 个时期的水土保持量进行统计(表 4),结果表明:水土保持在不同土地利用类型间具有明显差异,在不同时期内,林地的水土保持强度始终最大,最大达到 340.80 t/(hm²·a),其次为草地,草地的水土保持强度在 280~310 t/(hm²·a)之间波动变化,耕地

的土壤保持能力呈现一个先增加后减小的趋势,同时园地和未利用地也有较高的土壤保持能力。从土壤保持量上看,5 个时期土壤保持总量分别为 24.85 万,18.86 万,22.88 万,23.62 万,24.60 万 t,呈现先减小后增加的趋势,直至 2020 年,纸坊沟流域的土壤保持总量基本与 1938 年持平,说明生态恢复在纸坊沟取得了显著成效。5 个时期林地的土壤保持量占研究区土壤保持总量的 68.85%,0.16%,3.15%,25.37% 和 57.14%,草地分别占比 24.87%,40.64%,34.63%,

44.26%,34.97%,耕地分别占 6.28%,48.12%,52.21%,23.76%,4.76%。由此可见,虽然草地的土壤保持能力弱于林地,但其土壤保持量高于林地。不同时期,保持土壤的主体土地利用方式具有明显差异,1938 年,林草地土壤保持占比高达 93.7%;1958—1978 年,耕地和草地对土壤保持的贡献达 85% 以上,是这一时期保持土壤的主要用地类型;1999 年,耕地和草地对土壤保持的贡献相当,且低于林地;至 2020 年,研究区林草地土壤保持恢复至占总量的 92.11%。

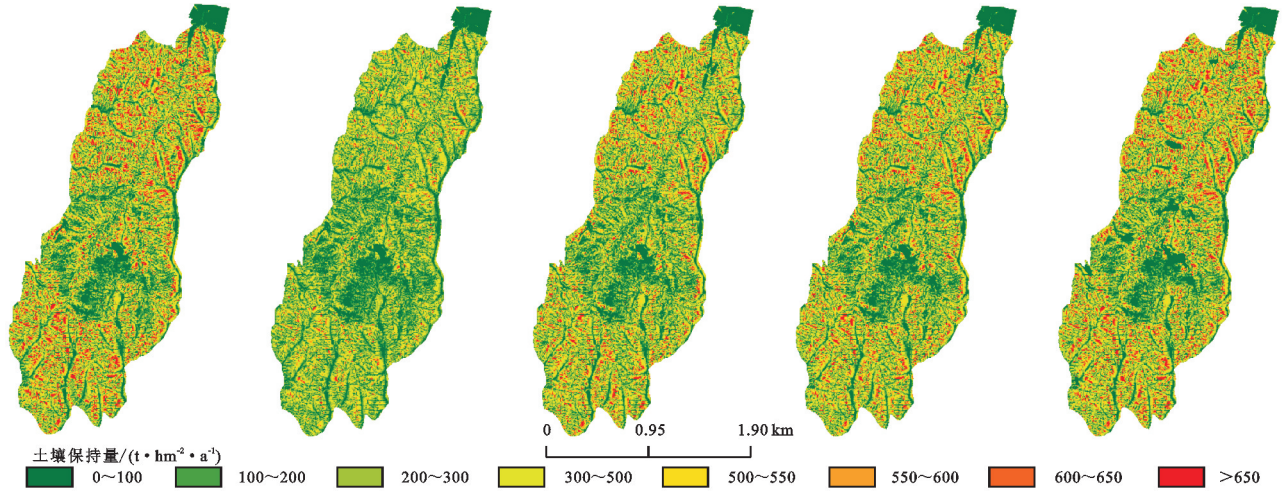


图 4 研究区 1938—2020 年土壤保持量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of soil conservation in the study area from 1938 to 2020

表 4 纸坊沟流域不同土地利用类型的土壤保持量

Table 4 Soil conservation amount of different land use types in the study area

年份	指标土地利用类型	林地	草地	耕地	园地	建设用地	水域	未利用地
1938	面积占比/%	61.98	26.93	10.65	0.00	0.45	0.00	0.00
	土壤保持强度/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	341.80	284.13	181.49	0.00	4.84	0.00	0.00
	总量/t	171102.77	61793.20	15613.71	0.00	17.42	0.00	0.00
1958	面积占比/%	0.13	32.38	55.61	0.10	0.63	0.32	10.83
	土壤保持强度/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	319.24	292.73	201.91	186.74	8.01	38.34	236.55
	总量/t	335.20	76562.94	90697.70	143.79	40.76	98.52	20693.47
1978	面积占比/%	2.80	33.46	50.90	1.23	0.69	0.50	10.41
	土壤保持强度/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	320.48	293.04	290.50	266.51	19.88	104.12	236.11
	总量/t	7242.79	79176.89	119391.49	2649.06	111.32	418.55	19847.74
1999	面积占比/%	23.65	41.81	26.43	6.18	1.35	0.58	0.00
	土壤保持强度/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	313.71	309.69	262.94	272.58	28.00	365.15	0.00
	总量/t	59891.23	104542.58	56106.15	13607.24	305.81	1712.55	0.00
2020 年	面积占比/%	52.73	33.98	6.73	4.53	2.03	0.00	0.00
	土壤保持强度/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	330.00	313.54	215.13	205.28	12.19	0.00	0.00
	总量/t	140538.81	86039.68	11700.95	7511.14	199.84	0.00	0.00

3 讨论

3.1 土地利用变化

研究区 1938—2020 年典型时段主要用地类型差异显著,流域生态破坏前也就是 1938 年以前,主要以林地草地为主,林草面积高达 88.56%,该区地处安塞,是典型的森林草原区,林草地优势度极大,这与

温仲明等^[9]对纸坊沟流域 60 年来土地利用格局变化的研究一致。1938 年往后,随着人口的增加,大量原始植被被破坏,直到 1958 年,纸坊沟土地利用方式发生巨变,林地几乎全部被开垦殆尽,转化为草地和耕地。而草地呈现一个双向增减变化,一方面原有草地的 90.99% 转化为耕地,另一方面,林地又大面积转为草地,两者的同时转化致使纸坊沟耕地面积骤增,同

时出现了园地、未利用地和水域新的用地类型,类似山琳昕、庞国伟等^[14,24]也得出了同样的结论。1958—1978年流域主要用地类型基本稳定,仍然保持以耕地为主体的格局,有少量的林地恢复,虽然从1973年政府开始着手治理,但是四五年间变化不大^[25]。随着生态治理工作的逐渐深入,直至1999年,流域生态恢复态势较好,林草地面积开始恢复至占流域总面积的64.73%,耕地面积持续减少,未利用地消失,温仲明的研究表明,至1997年坡耕地的优势地位完全丧失,被林草地取而代之^[10]。2020年,流域综合治理实施40a,纸坊沟土地利用较生态破坏前,恢复效益显著,林草地大面积分布在全流域,是此时主要的用地类型,耕地面积较1938年更少,同时园地较1999年略有减少。耕地是最容易发生土壤侵蚀的地类,纸坊沟实施造林种草综合治理,将坡度 $>25^\circ$ 的耕地退耕还林(草),至2020年,纸坊沟耕地面积共 56.9 hm^2 ,土地利用结构的日趋合理化。

通过土地利用转移矩阵分析,我们得知研究区4个典型时间段土地利用地发生了明显的转入转出,应用单一土地利用动态度量化纸坊沟典型时段土地利用类型的变化速度,发现1938—1958年耕地、林地、草地主要土地利用变化动态度分别为0.21, -0.05, 0.01;1958—1978年耕地、林地、草地和园地土地利用变化动态度分别为1.025, 0.002, -0.004, 0.565;1978—1999年农耕地、林地、园地、草地的土地利用动态变化度分别为-0.023, 0.354, 0.193, 0.012;1999—2020年这20年间,耕地、林地、园地、草地的土地利用动态变化度分别为-0.038, 0.06, -0.013和-0.009,足以说明纸坊沟流域1938年以来,土地利用的剧烈变化(图5)。

3.2 水土保持时空变化

纸坊沟流域水土保持量呈现先减小后增大的趋势,与韩鹏和张彩霞等^[25-26]的结论一致。1938—2020年,纸坊沟水土保持强度分别为307.08, 232.82, 282.76, 291.87, 303.96 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,与孙应龙等^[13]关于黄土高原2000—2018年的水土保持量的研究一个量级。1938—2020年纸坊沟的水土保持强度呈先减小后增加的趋势,类似杨阳等^[27]也得到相同的研究结果。从土地利用变化归因,1938—1958年纸坊沟土地利用剧烈变化,由于战争、人口增长等原因,农户生计策略从自然型向扩张型大转变^[28],水土保持严重下降,从1973年开始,国家在安塞茶坊村建立水土保持试验站,对纸坊沟流域进行水土流失综合治理,以此该区的土壤保持逐渐恢复。

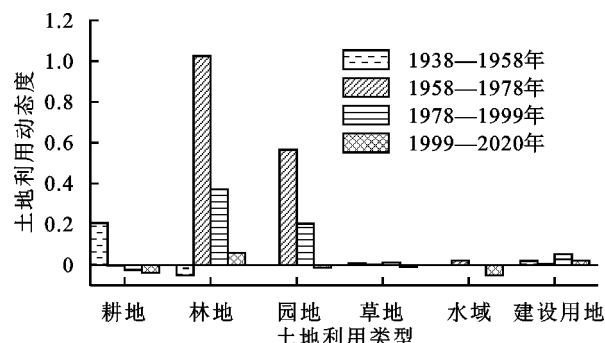


图5 1938—2020年研究区典型土地利用动态变化度

Fig. 5 The dynamic change degree of typical land use in the study area from 1938 to 2020

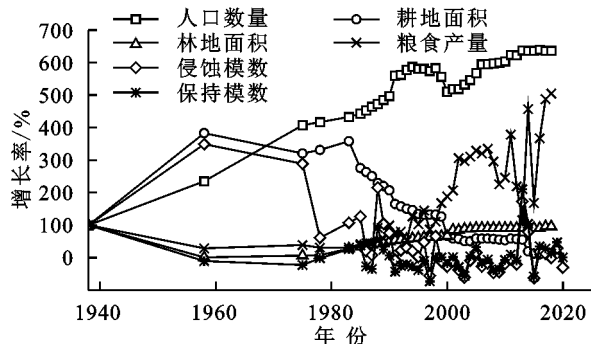
从空间分布来看,流域5个时期水土保持量具有明显的空间异质性,但其空间分布格局基本一致,水土保持较弱的地方都集中在中部及沟口位置,沟底的土壤保持也较弱。结合土地利用图,发现纸坊沟中部及沟口为建设用地和园地以及水域的聚集区,同时沟底的植被覆盖低,中间有段时间为未利用地,极易发生水土流失。庞国伟等^[14]关于纸坊沟土壤侵蚀评价的研究表明流域沟口区易发生极强烈和剧烈侵蚀,土壤流失比较严重,流域的中部以中度侵蚀为主,也进一步表明这些区域的土壤保持能力较弱。

通过搜集纸坊沟近80年来人口、耕地及土壤侵蚀的变化数据(图6),我们发现流域土壤侵蚀模数从1958年以后整体上随时间变化呈下降趋势,在某种程度上表明流域土壤保持呈不断增强的趋势。同时研究区土壤保持不断增强的一大主要原因是水土保持综合治理度的显著上升^[29]。纸坊沟流域从1973年开始逐步实施水土流失综合治理,通过整合多年来的水保措施监测数据发现,流域水土流失综合治理度随年限变化呈明显上升趋势,由1981年17.0%增加到2016年的76.7%,增幅达77.84%。

3.3 基于土地利用变化的水土保持

不同土地利用方式土壤保持差异显著。纸坊沟流域不同土地利用方式下土壤保持具有明显差异,不同时期总体趋势均为林地 $>$ 草地 $>$ 耕地 $>$ 园地,但是1999年研究区的园地土壤保持能力略高于耕地。在不同时期内,林地的土壤保持能力始终最大,最大达到 $346.18\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,其次为草地,耕地的土壤保持能力略强于园地,与王鹭等^[12]关于延河流域不同土地类型下的土壤保持研究结果一致。5个时期林地的土壤保持强度均在 $310\sim 340\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 波动变化,草地在 $280\sim 310\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 变化,而耕地有一个明显的先增加后减小的趋势。从土壤保持量上看,5个时期土壤保持总量分别为24.85万t, 18.86万t, 22.88万t, 23.62万t, 24.60万t,呈现先减小后增加的趋势。土壤保持

在第一阶段 1938 年较好,在第二段 1958 年纸坊沟由于人口增长等原因,资源不合理开发,导致水土流失严重,这一时期水土保持较弱,同时 1973 年后国家开始进行生态恢复,到 1978 年往后水土保持开始逐步增加。结合土地利用变化分析,1938—1958 年林草地大面积转为耕地,使得水土保持量下降,1978—1999 年耕地面积持续下降,林草地面积逐步恢复,水土保持量开始上升^[24],直至 2020 年,纸坊沟流域的水土保持总量基本与 1938 年持平,说明生态恢复在纸坊沟取得了显著成效。



注:图中数据整合于流域年度监测报告及相关文献:(王占礼、邵明安等 1999;江忠善、郑粉莉 2004)

图 6 纸坊沟流域近 80 年来人口、耕地及土壤侵蚀变化

Fig. 6 The changes of population, cultivated land and soil erosion in the study area in the past 80 years

纸坊沟流域经过多年的综合治理,截至 2020 年,林地面积恢复至占流域面积的 52.30%,草地占 34.25%,与 1938 年林草面积占比的 88.55%相比,2020 年林草占比达到了 86.55%,说明流域植被已完全恢复至生态破坏前水平。王鹭等^[12]关于黄土高原延河流域的植被恢复研究表明,截至 2017 年延河流域植被覆盖度明显提高,安塞—志丹一带草地明显增加。同时 2020 年前相比 1938 年耕地面积下降的同时,新增了园地的用地类型,通过对不同用地类型的土壤保持进行分析我们得知,在纸坊沟流域园地的土壤保持能力和耕地相当,所以是一种新型固持土壤的用地类型。纸坊沟流域 1985 年开始大力发展水土保持型生态农业,主要特点之一就是家庭果园普遍,同时流域平均土壤侵蚀模数减少一半还多,充分说明了园地在水土保持中的重要角色^[30]。

4 结论

(1) 1938 年植被破坏前流域林草植被占 88.55%,植被破坏后 1958 年林草植被占比降为 32%,林地、草地和耕地比例为 1:244:433,1978 年土地利用变化平缓;小流域综合治理实施后,1999 年和 2020 年林草植被占比分别为 64.73%和 86.55%,2020 年林草植被占比与

1938 年破坏前基本持平,但林地占比还是略小,草地略高,林地、草地和耕地比例为 7.6:5:1。

(2) 流域 5 个时期水土保持量分别为 24.85 万 t, 18.86 万 t, 22.88 万 t, 23.62 万 t, 24.60 万 t, 植被破坏后水土保持量有所下降,小流域综合治理后水土保持量有所增加,由于林地面积仍低于破坏前,2020 年水土保持量仍低于 1938 年 0.01%。

(3) 受土地流转驱动,不同时期林地、草地和耕地水土保持量分别较 1938 年增加或减少了一 99.80%~ -17.86%, 23.90%~69.18%和 -25.06%~664.66%,园地水土保持量在 1999 年达到最大值,后于 2020 年降至 7 511.14 t。

参考文献 (References):

- [1] 刘月,赵文武,贾立志.水土保持服务:概念、评估与展望[J].生态学报,2019,39(2):432-440.
Liu Y, Zhao W W, Jia L Z. Soil conservation service: Concept, assessment, and outlook[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(2):432-440.
- [2] 徐秋,雷国平,杨厚翔,等.土壤侵蚀下黑龙江省人地系统适应性研究[J].农业机械学报,2020,51(9):201-210.
Xu Q, Lei G P, Yang H X, et al. Adaptability of human-land system under disturbance of soil erosion of Heilongjiang Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(9):201-210.
- [3] Yin S Q, Zhu Z Y, Wang L, et al. Regional soil erosion assessment based on a sample survey and geostatistics[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018,22(3):1695-1712.
- [4] Liu X Y, Xin L J, Lu Y H. National scale assessment of the soil erosion and conservation function of terraces in China[J]. Ecological Indicators, 2021,129:107940.
- [5] 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.
Bian H Y, Pang J L, Ren Z Y, et al. Effects of land use change on soil conservation value in southern Loess Plateau of Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012,31(9):2391-2396.
- [6] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
Liu G B, Shanguan Z P, Yao W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017,32(1):11-19.
- [7] 肖金成.黄河生态保护,黄土高原是重点[J].小康,2022(31):20-21.
Xiao J C. The Yellow River ecological protection, the Loess Plateau is the focus[J]. Insight China, 2022(31):20-21.

- [8] 胡春宏,张晓明,赵阳.黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J].水科学进展,2020,31(5):725-733.
Hu C H, Zhang X M, Zhao Y. Cause analysis of the centennial trend and recent fluctuation of the Yellow River sediment load[J]. Advances in Water Science, 2020,31(5):725-733.
- [9] 温仲明,焦峰,张晓萍,等.黄土丘陵区纸坊沟流域60年来土地利用格局变化研究[J].水土保持学报,2004,18(5):125-128.
Wen Z M, Jiao F, Zhang X P, et al. Changes in land use patterns in small catchment in past 60 years in Loess Hilly Region on Loess Plateau[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004,18(5):125-128,133.
- [10] 温仲明,焦峰,张晓萍,等.纸坊沟流域近60年来土地利用景观变化的环境效应[J].生态学报,2004,24(9):1903-1909.
Wen Z M, Jiao F, Zhang X P, et al. Impact of landscape changes on environment due to 60 year's land use in a small catchment in Loess Hilly Region on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004,24(9):1903-1909.
- [11] 杜娜,段菊卿,王继军.黄土丘陵区纸坊沟流域农用地功能变化动态分析[J].水土保持通报,2011,31(4):130-133.
Du N, Duan J Q, Wang J J. Dynamics of agriculture land function of Zhifanggou watershed in Loess Hilly Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011,31(4):130-133.
- [12] 王鹭,高建恩,龙韶博,等.延河流域典型治理阶段的土壤保持功能时空变化及驱动因素分析[J].水土保持研究,2023,30(3):94-102.
Wang L, Gao Jianen, Long S B, et al. Temporal and spatial variation of soil conservation function and its driving factors in typical reclamation stage in Yanhe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(3):94-102.
- [13] 孙应龙,李娜,黄斌斌,等.2000—2019年黄土高原地区土壤保持时空变化及影响因素分析[J].水土保持研究,2022,29(6):290-297.
Sun Y L, Li N, Huang B B, et al. Analysis of temporal and spatial changes and influencing factors of soil conservation in the Loess Plateau from 2000 to 2019[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(6):290-297.
- [14] 庞国伟,谢红霞,李锐,等.70多年来纸坊沟小流域土壤侵蚀演变过程[J].中国水土保持科学,2012,10(3):1-8.
Pang G W, Xie H X, Li R, et al. Soil erosion dynamics of Zhifanggou Watershed during the past 70 years[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012,10(3):1-8.
- [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.
Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. Scientia Geographica Sinica, 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.
Zhang K L, Peng W Y, Yang H L. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007,44(1):7-13.
- [17] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994,37(6):1835-1840.
- [18] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(5):1759-1763.
- [19] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].中国水土保持科学,2015,13(5):105-110.
Fu S H, Liu B Y, Zhou G Y, et al. Calculation tool of topographic factors[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015,13(5):105-110.
- [20] 程琳,杨勤科,谢红霞,等.基于GIS和CSLE的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J].水土保持学报,2009,23(5):61-66.
Cheng L, Yang Q K, Xie H X, et al. GIS and CSLE based quantitative assessment of soil erosion in Shaanxi, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(5):61-66.
- [21] Huang C L, Yang Q K, Cao X Y, et al. Assessment of the soil erosion response to land use and slope in the Loess Plateau: A case study of Jiuyuangou[J]. Water, 2020,12(2):529.
- [22] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
Cai C F, Ding S W, Shi Z H, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000,14(2):19-24.
- [23] 谢红霞.延河流域土壤侵蚀时空变化及水土保持环境效应评价研究[D].西安:陕西师范大学,2008.
Xie H X. Study on the spatio-temporal change of soil loss and on the assessment of impacts on environment of soil and water conservation in Yanhe basin[D]. Xi'an: Master Dissertation of Shaanxi Normal University, 2008.
- [24] 山琳昕,庞国伟.70多年来纸坊沟小流域土地利用变化及驱动力分析[J].科学技术创新,2018(3):13-14.
Shan L X, Pang G W. Analysis of land use change and

- driving forces in Zhifanggou small watershed in recent 70 years[J]. Scientific and Technological Innovation, 2018(3):13-14.
- [25] 张彩霞, 谢高地, 杨勤科, 等. 黄土丘陵区水土保持服务价值动态变化及评价: 以纸坊沟流域为例(英文)[J]. 自然资源学报, 2008, 23(6):1035-1043.
- Zhang C X, Xie G D, Yang Q K, et al. Assessment of human activities on soil conservation value in hilly and Gully Region of Loess Plateau: A case study of Zhifanggou watershed[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(6):1035-1043.
- [26] 韩鹏, 司今, 王应刚. 生态服务价值计算方法对比分析: 以黄土丘陵区纸坊沟流域为例[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(S1):102-112.
- Han P, Si J, Wang Y G. Contrastive analysis of valuation methods of ecosystem services value: A case study of Zhifanggou watershed in a hilly and Gully Region of Loess Plateau[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(S1):102-112.
- [27] 杨阳, 窦艳星, 王云强, 等. 黄土丘陵沟壑区典型小流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 生态学报, 2022, 42(20):8152-8168.
- Yang Y, Dou Y X, Wang Y Q, et al. Ecosystem service tradeoffs and synergies in typical small watersheds of the hilly and Gully Region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20):8152-8168.
- [28] 成思敏, 王继军, 李茂森, 等. 退耕区农户生计策略与农业产业—资源系统耦合机制的演化过程分析: 以纸坊沟流域为例[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5):242-249.
- Cheng S M, Wang J J, Li M S, et al. Analysis on the evolutionary process of farmers' livelihood strategy and the agricultural industry-resources system coupling mechanism in de-farming regions: A case study of Zhifanggou watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5):242-249.
- [29] 江忠善, 郑粉莉. 纸坊沟流域水土流失综合治理减沙效益评价[J]. 泥沙研究, 2004(2):56-61.
- Jiang Z S, Zheng F L. Assessment on benefit of sediment reduction by comprehensive controls in the Zhifanggou Watershed[J]. Journal of Sediment Research, 2004(2):56-61.
- [30] 卢宗凡, 曹清玉, 苏敏. 建设水土保持型生态农业十年巨变: 对黄土丘陵沟壑区农户两次调查结果的分析[J]. 水土保持研究, 1996(02):116-119.
- Lu Z F, Cao Q Y, Su M. The Huge Change of Ten years about the Construction of the Ecological Agriculture with Soil and Water Conservation: Analysing the two investigations of peasant household in loess hilly and Gully Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1996(02):116-119.

(上接第89页)

- [28] 张发民, 杜兰兰, 袁瀛, 等. 土壤侵蚀和沉积对土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6):161-167.
- Zhang F M, Du L L, Yuan Y, et al. Effects of soil erosion and deposition on soil physical and biochemical properties[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6):161-167.
- [29] 郝佳欣. 涪江流域水沙变化及其对气候和 LULC 变化的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- Hao J X. Effects of climate and land use and land cover change on streamflow and sediment in Fu River Watershed[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.
- [30] 刘卫林, 李香, 吴滨, 等. 修河中上游流域土地利用变化对径流的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3):111-120.
- Liu W L, L X, Wu B, et al. Impact of land use change on runoff in the middle and upper reaches of Xiuhe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3):111-120.
- [31] 张晔, 侯精明, 龚佳辉, 等. 1980—2020 年渭河中上游流域土地利用演变及其对径流的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5):231-237.
- Zhang Y, Hou J M, Gong J H, et al. Land use evolution and its impact on runoff response in middle and upper reaches of Weihe River Basin during 1980—2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5):231-237.
- [32] 王磊, 刘亭亭, 谢建治. 基于 SWAT 模型的张家口清水河流域土地利用情景变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4):245-251.
- Wang L, Liu T T, Xie J Z. Study on the effect of different land use scenarios on runoff in Qingshuihe Basin of Zhangjiakou Based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4):245-251.
- [33] 曹灿, 孙瑞, 吴志祥, 等. 基于 SWAT 模型的南渡江流域土地利用/覆被变化的径流响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4):167-175.
- Cao C, Sun R, Wu Z X, et al. Responses of streamflow to land use/cover changes in Nandu River Basin Based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4):167-175.