

# 黄河上游西柳沟流域土壤侵蚀对土地利用变化响应

张 洋<sup>1</sup>, 李 鹏<sup>2,3</sup>, 马文东<sup>4</sup>, 张 旭<sup>2,3</sup>, 郭嘉嘉<sup>2,3</sup>, 潘金金<sup>2,3</sup>

(1.西安国际港务区农业农村和水务局, 西安 710026; 2.西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 西安 710048;  
3.旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048, 4.城固县水土保持工作站, 陕西 城固 723200)

**摘 要:**为科学认识土地利用变化对流域土壤侵蚀的影响,研究基于黄河上游西柳沟流域 1980 年、2015 年两期土地利用变化和相应的土壤侵蚀强度变化,研究了土地利用变化对流域土壤侵蚀的影响。结果表明:(1)西柳沟流域草地、林地和耕地 3 种主要的土地利用类型转出面积大小为草地>林地>耕地,耕地主要转化为草地,林地大部分转为未利用土地,草地大部分转为耕地和未利用土地;(2)西柳沟流域 1980 年、2015 年平均土壤侵蚀模数分别为 1946.56, 1 873.55 t/(km<sup>2</sup>·a),其中草地土壤侵蚀模数最大,其次为林地,土壤侵蚀量主要来自于草地;(3)西柳沟流域 35 年间微度侵蚀和轻度侵蚀占主导,土壤侵蚀程度总体上呈降低的趋势,具体表现为草地的部分面积向林地和耕地分别转化了 4.47、17.54 km<sup>2</sup>,说明土地利用结构的改变是影响流域土壤侵蚀变化的关键因素。研究成果以期为黄河上游小流域水土流失治理提供参考。

**关键词:**土壤侵蚀;土地利用;土壤流失修正模型;粗泥沙来源区

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0070-07

## Research on the Response of Soil Erosion to Land Use Change in Xiliugou Watershed of the Upper Yellow River

ZHANG Yang<sup>1</sup>, LI Peng<sup>2,3</sup>, MA Wendong<sup>4</sup>, ZHANG Xu<sup>2,3</sup>, GUO Jiajia<sup>2,3</sup>, PAN Jinjin<sup>2,3</sup>

(1.Agriculture Rural and Water Bureau, Administration Committee of Xi'an International Trade & Logistics Park, Xi'an 710026, China; 2.State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3.Key Laboratory National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048, China; 4.Soil and Water Conservation Workstation in Chenggu County, Chenggu, Shaanxi 723200, China)

**Abstract:** To scientifically understand the impact of land use changes on watershed soil erosion, based on the changes in land use and the corresponding changes in soil erosion intensity in the Xiliugou watershed of the upper reaches of the Yellow River in 1980 and 2015, we studied the impact of land-use changes on soil erosion in the watershed. The results show that: (1) the converted areas of three main land use types of grassland, woodland, and cultivated land in the Xiliugou decreased in the order: grassland>forest land>cultivated land. The cultivated land was mainly converted into grassland, most of the forestland was converted to unused land, and most of the grassland was converted into cultivated land and unused land; (2) the average soil erosion modulus of Xiliugou watershed in 1980 and 2015 were 1 946.56 and 1 873.55 t/(km<sup>2</sup>·a), respectively, of which grassland had the largest soil erosion modulus, followed by forestland, and the amount of soil erosion mainly came from grassland; (3) In the past 35 years, slight erosion and mild erosion dominated in Xiliugou watershed, and the degree of soil erosion showed a downward trend on the whole; specifically, part of the area of grassland was transformed into forestland and cultivated land by 4.47 and 17.54 km<sup>2</sup>, respectively, indicating that the change of land use structure was an inevitable factor affecting the change of soil erosion in Xiliugou watershed. The research results are expected to provide references for soil erosion control in the small watershed of the upper reaches of the Yellow River.

收稿日期:2021-07-26

修回日期:2021-08-24

资助项目:黄河上中游管理局技术咨询项目“2022 年度鄂尔多斯沙换水试点工程沟道冲刷减蚀监测”(LSHS-2021-04)

第一作者:张洋(1986—),男,陕西陇县人,工学博士,工程师,研究方向:雨洪侵蚀与城市水土保持。E-mail:peace-eternity@163.com

通信作者:李鹏(1974—),男,山东烟台人,教授,主要从事旱区水文过程与生态响应关系的研究。E-mail:lipeng74@163.com

**Keywords:** soil erosion; land use; soil loss correction model; source area of coarse sediment

位于黄河上游粗泥沙集中来源区的西柳沟流域,自然条件恶劣,生态环境脆弱,水土流失问题十分突出。每遇强降雨,孔兑洪水挟带大量泥沙,不仅严重淤积黄河内蒙古河段,而且严重制约着周边地区经济社会发展,威胁着人民群众的生命财产安全<sup>[1]</sup>。流域的水土流失会导致河道和水库中大量沉积物沉积、土壤肥力下降以及环境污染等一系列问题<sup>[2-4]</sup>。因此,研究影响水土流失的各种因素十分重要,以便制定和实施有效的水土保持措施。流域侵蚀与诸多因素有关,包括降雨过程和流域下垫面的变化,如土地利用、土壤、地形地貌等<sup>[5-6]</sup>。流域内的降雨量、土壤类型和地形地貌短期内不会发生显著变化,这意味着人类活动引发的土地利用变化,是影响流域侵蚀变化的主要因素<sup>[7]</sup>。正确认识土壤侵蚀与土地利用变化的关系,对于优化流域水土保持具有重要意义<sup>[8]</sup>。

土地利用类型的改变一定程度上影响着流域土壤侵蚀。例如,耕地可能转化为林地和草地,从而减少侵蚀<sup>[9]</sup>。庄建琦等<sup>[10]</sup>揭示了小流域土地利用/土地覆被变化引起的土壤侵蚀变化过程;李成志等<sup>[11]</sup>利用 RMMF 模型评价了喀斯特地区土地利用类型变化对土壤侵蚀的影响;张尚弘等<sup>[12]</sup>通过 SWAT 模型分析了流沙河流域土地利用和景观格局的变化对流域土壤侵蚀的影响。但目前国内对于水土流失较为严重的黄土高原地区典型流域的土地利用类型变化是如何影响流域土壤流失的研究较为少见。因此,本文以黄河上游西柳沟流域为研究区域,分析 1980—2015 年土地利用类型的时空变化过程,并通过土壤流失修正模型(RUSLE)对流域土壤侵蚀进行定量评估,研究土地利用变化对流域土壤侵蚀的影响,为流域水土保持提供参考。

## 1 研究区概况

西柳沟流域为黄河内蒙古段十大孔兑之一,发源于内蒙古鄂尔多斯市东胜区漫赖乡张家山顶,流经三乡一苏木,由昭君坟乡河畔村直接流入黄河,流域总面积 1 191.72 km<sup>2</sup>,全长 106.5 km。流域上游为黄土丘陵沟壑区,面积 876.3 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 73.53%;中游为库布齐沙漠,下游为冲洪积扇。西柳沟属于典型的干旱大陆性季风气候,多年平均降水量 267.7 mm,年均蒸发量 2 200 mm,年平均气温为 6.1℃,年均风速 3.1 m/s,风向多为西北风,风力在 5~8 级。流域上游黄土丘陵区地面物质由砒砂岩组成,极易产生风蚀和水蚀,为西柳沟的主要产沙区域。

据西柳沟龙头拐水文站观测资料,西柳沟多年平均径流量 2 792.5 万 m<sup>3</sup>,实测最大洪峰流量 6 940 m<sup>3</sup>/s,最大含沙量 1 550 kg/m<sup>3</sup>,年最大输沙量 4 750 万 t<sup>[13]</sup>。西柳沟在黄河流域的地理位置见图 1。

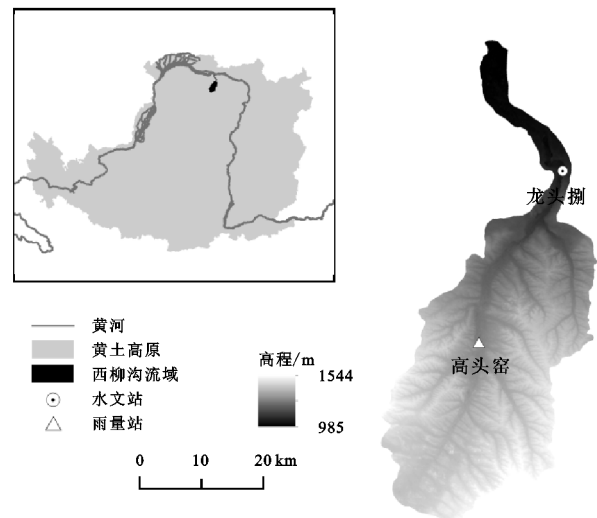


图 1 西柳沟流域地理位置

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

本研究依据西柳沟流域土地利用遥感影像资料,结合流域地形图、区域专题研究资料与图件等其他资料对西柳沟流域土地利用变化信息进行提取,根据土地利用分类系统划分出 6 种土地利用类型,得到西柳沟流域 1980 年和 2015 年两期分辨率为 30 m 的土地利用数据(图 2);数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率 30 m;降雨数据、土壤类型数据及 NDVI 数据来源于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)。

### 2.2 RUSLE 模型

“修订通用土壤流失方程”RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)<sup>[14]</sup>可根据一定的条件计算出区域单位时间单位面积上的土壤流失量,是区域土壤侵蚀定量评价的重要手段。模型以 6 个因子的乘积形式量化土壤侵蚀,方程式表达为:

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

式中:  $A$  为单位面积上的年均土壤流失量[t/(hm<sup>2</sup>·a)];  $R$  为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)];  $K$  为土壤可蚀性因子[t·hm<sup>2</sup>·h/(hm<sup>2</sup>·MJ·mm)];  $LS$  为坡长坡度因子;  $C$  为植被覆盖—管理因子;  $P$  为水土保持措施因子。

2.2.1 降雨侵蚀力因子计算方法 降雨侵蚀力因子反映降雨引起土壤侵蚀的潜在能力。利用获取的

1980—2015 年连续 36 a 的年降雨量数据计算降雨侵蚀力,直接采用多年平均降雨量计算<sup>[15]</sup>:

$$R=0.0483P^{1.61} \qquad P<850\text{ mm}$$
$$R=587.8-1.219P+0.004105P^2 \qquad P\geq 850\text{ mm}$$

(2)

式中: $R$  为降雨侵蚀力 $[\text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})]$ ;  $P$  为年均降水量 $(\text{mm})$ 。

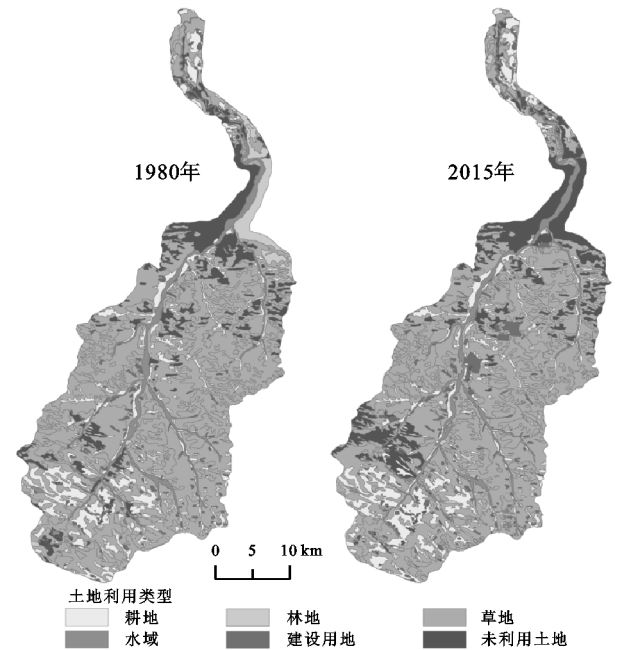


图 2 1980—2015 年西柳沟流域土地利用分布

2.2.2 土壤可蚀性因子计算方法 土壤可蚀性因子是衡量土壤抗蚀性的指标,用于反映土壤对侵蚀的敏感性,表示降雨侵蚀力引起的土壤侵蚀量。利用 EP-IC 模型法<sup>[16]</sup>对不同土壤类型赋予相应的  $K$  值,计算方法如下:

$$K=\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.0256S_a\left(1-\frac{S_i}{100}\right)\right]\right\}$$
$$\left(\frac{S_i}{C_i+S_i}\right)^{0.3}\left[1-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-2.95C)}\right]$$
$$\left[1-\frac{0.7S_n}{S_n+\exp(-5.51+22.9S_n)}\right] \qquad (3)$$

式中: $K$  为土壤可蚀性因子 $[\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h}/(\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})]$ ;  $S_a$  为砂粒含量 $(\%)$ ;  $S_i$  为粉粒含量 $(\%)$ ;  $C_i$  为黏粒含量 $(\%)$ ;  $C$  为有机碳含量 $(\%)$ ;  $S_n=1-S_a/100$ 。

2.2.3 坡度坡长因子计算方法 坡度坡长因子反映地形对土壤侵蚀的影响。坡度因子是特定坡度的坡地土壤流失量与标准径流小区坡度的坡地土壤流失量之比值;坡长因子则是特定坡长的坡地土壤流失量与标准径流小区坡长的坡地土壤流失量之比值,一般认为,土壤流失量与坡度、坡长的之间呈幂函数关系。计算方法如下<sup>[17]</sup>:

$$L=\left(\frac{\lambda}{22.1}\right)m$$
$$\begin{cases} m=0.2 & \theta\leq 1^\circ \\ m=0.3 & 1^\circ<\theta\leq 3^\circ \\ m=0.4 & 3^\circ<\theta\leq 5^\circ \\ m=0.5 & \theta>5^\circ \end{cases} \qquad (4)$$

$$S=10.8\sin\theta+0.03 \quad \theta<5^\circ$$
$$S=16.8\sin\theta-0.50 \quad 5^\circ\leq\theta<10^\circ$$
$$S=21.9\sin\theta-0.96 \quad \theta\geq 10^\circ$$

(5)

式中: $L$  为坡长因子;  $S$  为坡度因子;  $\lambda$  为坡长 $(\text{m})$ ;  $m$  为坡长指数;  $\theta$  为坡度 $(^\circ)$ 。

2.2.4 植被覆盖—管理因子计算方法 植被覆盖—管理因子指一定覆盖和管理水平下,某一区域土壤流失量与该区域连续休闲情况下土壤流失量之比。变化值域为 0~1,根据植被覆盖度和土地利用类型进行赋值,参考等<sup>[18-19]</sup>的研究结果确定  $C$  的取值,见表 1。

表 1  $C$  因子赋值

土地利用类型	植被覆盖度/ $\%$				
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
林地	0.10	0.08	0.06	0.02	0.004
草地	0.25	0.20	0.11	0.09	0.043
耕地	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
其他土地	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

2.2.5 水土保持因子计算方法 水土保持因子指采取水土保持措施(等高耕作、梯田等)后的土壤流失量与顺坡耕作产生的土壤流失量之比。取值范围在 0~1,在实际研究中难以通过实测方法确定  $P$  值,故依据土地利用类型赋值的方法确定取值,赋值结果见表 2。

表 2  $P$  因子赋值表

土地利用类型	林地	草地	建设 用地	其他 用地
$P$ 值	0.25	0.75	0.10	1.00

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用变化特征分析

3.1.1 土地利用变化 通过两期的土地利用对比分析计算得到西柳沟流域不同时期的土地利用类型面积及其占流域总面积的比例统计表(表 3)。从表中可以看出:西柳沟流域的土地利用类型以草地、耕地和未利用地为主,建设用地和水域所占面积较小。1980—2015 年,草地、林地和水域面积呈减小趋势,其中林地的占地面积降幅达到了 57.08%,是变化幅度最大的土地利用类型;水域面积受人类活动的影响略有减小,减小率为 7.78%;耕地、建设用地和未利用地的占地面积逐渐增大,其中建设用地和未利用地的面积增幅分别为 52.32%和 20.91%,总体变化幅度较大。



表 3 西柳沟流域土地利用类型

土地利用 类型	1980 年		2015 年		变化 幅度/%
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	
耕地	128.06	10.75	139.34	11.69	+8.81
林地	48.67	4.08	20.89	1.75	-57.08
草地	805.16	67.56	787.45	66.08	-2.20
水域	63.21	5.30	58.29	4.89	-7.78
建设用地	26.99	2.26	41.11	3.45	+52.32
未利用土地	119.63	10.04	144.64	12.14	+20.91

3.1.2 土地利用格局演变 基于 1980 年和 2015 年的土地利用数据,统计得到西柳沟流域土地利用类型转移矩阵(表 4)。结果显示:1980—2015 年,耕地转出总面积为 10.38 km<sup>2</sup>,其中 65.41%转化为草地,主要是由于 2000 年实施的退耕还林还草工程,进一步防治水土流失;林地转出总面积为 34.90 km<sup>2</sup>,有 86.33%的面积转为未利用土地,转化为其他土地利用类型的面积较少;草地转出总面积为 62.97 km<sup>2</sup>,其中有 17.54 km<sup>2</sup>转为耕地,28.71 km<sup>2</sup>转为未利用土地,10.55 km<sup>2</sup>转为建设用地。3 种主要的土地利用类型转出面积大小为草地>林地>耕地,耕地主要转化为草地,林地大部分转为未利用土地,草地大部分转为耕地和未利用土地。

表 4 西柳沟流域 1980—2015 年土地利用类型转移矩阵

		km <sup>2</sup>					
土地利用 类型		2015 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
1980 年	耕地	117.74	0.84	6.79	1.00	1.52	0.23
	林地	2.24	13.79	2.42	0.09	0.03	30.13
	草地	17.54	4.47	742.61	1.69	10.55	28.71
	水域	0.32	1.70	5.12	55.34	0.07	0.70
	建设用地	0.18	0.01	0.51	0.03	26.26	0.03
	未利用土地	1.38	0.10	30.41	0.18	2.70	84.93

3.2 土壤侵蚀特征及空间分布规律

3.2.1 土壤侵蚀总体变化特征 通过计算各水土流失因子图层在统一投影面积上的乘积,得到西柳沟流域土壤侵蚀模数空间分布见图 3。不同土地利用类型在不同时期的平均土壤侵蚀模数,统计结果见表 5。结果显示,西柳沟流域 1980 年平均土壤侵蚀模数为 1 946.56 t/(km<sup>2</sup> · a),2015 年平均土壤侵蚀模数为 1 873.55 t/(km<sup>2</sup> · a)。流域各地类平均土壤侵蚀模数大小依次为草地>林地>耕地>建设用地>未利用土地>水域。从土壤侵蚀模数大小来看,流域的土壤侵蚀主要来源于草地、林地和耕地。1980 年,西柳沟流域草地、林地和耕地的平均土壤侵蚀模数分别为 2 824.94,739.96,48.82 t/(km<sup>2</sup> · a),侵蚀等级分别达到了中度侵蚀、轻度侵蚀和微度侵蚀;2015 年,

西柳沟流域草地、林地和耕地的平均土壤侵蚀模数分别为 2 799.15,1 042.72,46.06 t/(km<sup>2</sup> · a),侵蚀等级依然为中度侵蚀、轻度侵蚀和微度侵蚀,相比于 1980 年,耕地和草地的平均土壤侵蚀模数有所下降,林地及其他地类的侵蚀模数有所上升。

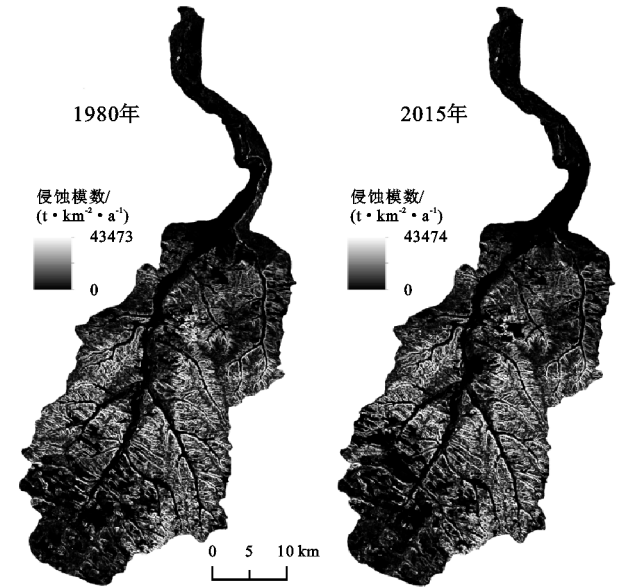


图 3 西柳沟流域 1980—2015 年土壤侵蚀模数空间分布

表 5 不同土地利用类型的平均土壤侵蚀模数

年份	t/(km <sup>2</sup> · a)					
	土地利用类型					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
1980	48.82	739.96	2824.94	0.91	13.35	9.11
2015	46.06	1042.72	2799.15	0.94	14.01	9.99

根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)<sup>[20]</sup>和实际水土流失情况对水蚀强度的分级标准确定土壤侵蚀分级指标,生成了西柳沟流域土壤侵蚀强度等级图(图 4)。统计了西柳沟流域不同土壤侵蚀分类面积分布及侵蚀量的情况,统计结果见表 6。

西柳沟流域 1980 年、2015 年土壤侵蚀面积均为 1 183.41 km<sup>2</sup>,土壤侵蚀强度可以分为微度侵蚀至剧烈侵蚀 6 个等级。从侵蚀面积来看,1980 年和 2015 年西柳沟流域土壤侵蚀以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,均占流域总面积的 77%以上,强度、极强度和剧烈侵蚀面积所占比例较小,三者侵蚀面积占比约 15%。1980 年,不同土壤侵蚀强度所占比重依次为:轻度>微度>强度>中度>极强度>剧烈;2015 年,不同土壤侵蚀强度所占比重依次为:微度>轻度>强度>中度>极强度>剧烈。整体来看,1980—2015 年流域微度侵蚀面积逐渐增加,从 442.76 km<sup>2</sup>增至 472.05 km<sup>2</sup>,其他等级的土壤侵蚀面积逐渐减小。

从土壤侵蚀量来看,1980 年西柳沟流域土壤侵蚀量为 230.35 万 t,主要来源于强度侵蚀和极强度侵

蚀,分别占总侵蚀量的 30%和 28.27%;2015 年土壤侵蚀量为 221.72 万 t,侵蚀来源仍以强度侵蚀和极强度侵蚀为主,分别占总侵蚀量的 29.89%和 28.24%。两个年份的微度侵蚀产沙量最小,仅为 1.49 万 t 和 1.39 万 t,可见流域侵蚀面积虽然以微度侵蚀和轻度侵蚀为主。

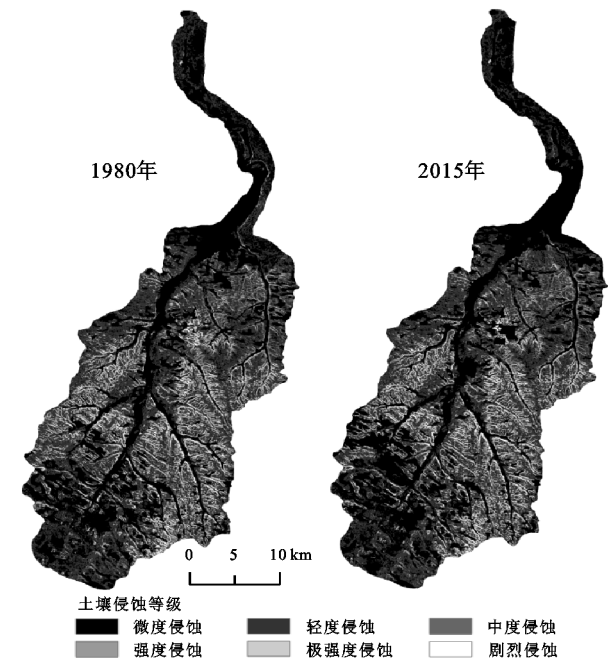


图 4 西柳沟流域 1980—2015 年土壤侵蚀等级空间分布

3.2.2 土壤侵蚀强度等级转移变化 西柳沟土壤侵蚀强度等级的变化利用基本的方法以及转移矩阵进行分析,统计结果见表 7。由表可知,1985—2015 年时

段西柳沟流域土壤侵蚀强度等级发生变化的面积为 97.35 km<sup>2</sup>,占总面积的 8.23%。其中轻度、中度、强度、极强度、剧烈侵蚀均有部分减弱为微度侵蚀,转移面积分别为 48.52,3.90,6.46,2.83,0.33 km<sup>2</sup>,而微度侵蚀转为其他侵蚀强度等级的面积较少,为 32.76 km<sup>2</sup>,致使其总量有所增加。轻度侵蚀的变化部分主要由微度侵蚀(26.60 km<sup>2</sup>)转化而来,占转入面积的 97.29%,而具有 48.52 km<sup>2</sup>的面积转换为微度侵蚀,占转出面积的 98.74%,最终使得轻度侵蚀的总量减小。中度侵蚀由其他侵蚀等级转入共 4.21 km<sup>2</sup>,共有 4.56 km<sup>2</sup>转出,94.77%的面积保持侵蚀强度不变,使得中度侵蚀的总量略有减少,其中绝大部分向侵蚀强度等级低的方向转换,且以转为微度侵蚀最多。强度、极强度、剧烈侵蚀均主要由微度侵蚀转换而来,转入面积大于转出面积,其他侵蚀等级的转换面积极少,因此总量仍在减少。

表 6 西柳沟流域 1980—2015 年不同土壤侵蚀分类面积分布情况

侵蚀等级	1980 年		2015 年	
	面积/km <sup>2</sup>	侵蚀量/万 t	面积/km <sup>2</sup>	侵蚀量/万 t
微度	442.76	1.49	472.05	1.39
轻度	478.62	51.33	456.81	48.67
中度	80.80	28.00	80.45	27.93
强度	108.32	69.09	103.95	66.28
极强度	64.70	65.12	62.22	62.62
剧烈	8.21	15.32	7.93	14.83
总计	1183.41	230.35	1183.41	221.72

表 7 西柳沟流域 1980—2015 年土壤侵蚀强度等级转移矩阵

土壤侵蚀等级		2015 年						总计
		微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈	
1980 年	微度	410.00	26.60	3.18	2.21	0.69	0.08	442.76
	轻度	48.52	429.47	0.37	0.02	0.20	0.03	478.61
	中度	3.90	0.38	76.24	0.22	0.06	0.00	80.81
	强度	6.46	0.01	0.43	101.35	0.07	0.00	108.32
	极强度	2.83	0.32	0.24	0.13	61.18	0.00	64.70
	剧烈	0.33	0.03	0.00	0.01	0.02	7.82	8.21
	总计	472.05	456.81	80.45	103.95	62.21	7.93	1183.41

3.3 土地利用与土壤侵蚀的响应关系

随着人类活动的影响,土壤侵蚀加剧,引起了一系列的环境效应,严重破坏了人类赖以生存的环境,制约着全球经济的可持续发展。

土地利用的空间分布是土壤侵蚀的催化剂,可改变局部地区的微环境,诸如气候、土壤、植被等,进而加剧或减缓土壤侵蚀。因此,探讨土地利用与土壤侵蚀之间的响应关系,对于了解影响土壤侵蚀的主要因素和机制,对合理的土地利用规划以及生态环境保护具有重要的意义。

表 8 显示了西柳沟流域不同土地利用类型土壤侵蚀面积分布情况,从表中可知,1980—2015 年,西柳沟土壤侵蚀面积分布以草地为主,占地面积分别为 800.26,781.36 km<sup>2</sup>。两个时期草地的侵蚀面积分布主要以轻度侵蚀为主,面积分别为 451.35,440.05 km<sup>2</sup>,占草地总面积的 56.40%,56.32%,耕地和未利用地的侵蚀面积相当,分别占总侵蚀面积的 10.77%,9.91%和 11.72%,12.12%,剧烈侵蚀的面积最小。

草地的侵蚀面积呈逐年减少的趋势,土壤侵蚀程度的降低对应的土地利用变化主要是草地转变为林

地和耕地,两者的转移面积分别为 4.47,17.54 km<sup>2</sup>,灌草地转变为林地和耕地,植被覆盖度增加,使土壤主要集中在水域与城镇之间地势平坦的区域,稀疏的侵蚀程度降低。

表 8 西柳沟流域 1980—2015 年不同土地利用类型土壤侵蚀面积特征 km<sup>2</sup>

土地利用类型	年份	土壤侵蚀强度						总计
		微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈	
耕地	1980	121.06	6.44	0	0	0	0	127.50
	2015	132.11	6.54	0	0	0	0	138.65
林地	1980	23.24	20.81	3.37	0.68	0.19	0.002	48.29
	2015	7.03	10.20	2.93	0.48	0.07	0.001	20.71
草地	1980	91.12	451.35	77.43	107.64	64.51	8.21	800.26
	2015	90.24	440.05	77.52	103.47	62.15	7.93	781.36
水域	1980	63.21	0	0	0	0	0	63.21
	2015	58.29	0	0	0	0	0	58.29
建设用地	1980	26.86	0.02	0	0	0	0	26.88
	2015	40.96	0.02	0	0	0	0	40.98
未利用土地	1980	117.27	0	0	0	0	0	117.27
	2015	143.42	0	0	0	0	0	143.42

根据土壤侵蚀量的空间分布情况统计了西柳沟流域不同土地利用类型的土壤侵蚀量。表 9 显示了1980—2015 年西柳沟流域不同土地利用类型土壤侵蚀量的分布情况,表中可知,西柳沟流域两个时期的土壤侵蚀量主要来自于草地,侵蚀量分别为 226.03,218.71 万 t,占总侵蚀量的 98.12%,98.64%;其次为林地,其他地类土壤侵蚀量较少。同时可以清晰的看出,林地土壤侵蚀量主要源于轻度侵蚀和中度侵蚀,未发生剧烈侵蚀的情况,微度侵蚀和极强度侵蚀来源较少;草地土壤侵蚀量主

要源于强度侵蚀和极强度侵蚀,2015 年,草地各个侵蚀等级的土壤侵蚀量均有所减少;耕地土壤侵蚀量均集中在微度侵蚀和轻度侵蚀,到了 2015 年,耕地侵蚀量略有减少,减少了 200 t;1980 年,建设用地、水域和未利用土地的土壤侵蚀量总和仅为 1 340 t,占总侵蚀量的 0.06%,2015 年,3 种地类的土壤侵蚀量增加到 2 100 t,原因是建设用地和未利用地的面积增加,使土壤侵蚀量略有增加,由此可见,城镇化的建设在一定程度上加剧了土壤侵蚀。

表 9 西柳沟流域 1980—2015 年不同土地利用类型土壤侵蚀量特征 万 t

土地利用类型	年份	土壤侵蚀强度						总计
		微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈	
耕地	1980	0.42	0.20	0	0	0	0	0.62
	2015	0.44	0.20	0	0	0	0	0.64
林地	1980	0.23	1.59	1.16	0.41	0.18	0	3.57
	2015	0.05	0.73	1.03	0.28	0.07	0	2.16
草地	1980	0.70	49.54	26.85	68.68	64.94	15.32	226.03
	2015	0.69	47.73	26.90	66.01	62.55	14.83	218.71
水域	1980	0.004	0	0	0	0	0	0.004
	2015	0.01	0	0	0	0	0	0.01
建设用地	1980	0.03	0	0	0	0	0	0.03
	2015	0.06	0	0	0	0	0	0.06
未利用土地	1980	0.10	0	0	0	0	0	0.10
	2015	0.14	0	0	0	0	0	0.14

4 讨论

流域土地利用变化特征表明,1980—2015 年,林地、建设用地和未利用地的面积变化幅度较为明显,其中林地减少的面积大部分转化为未利用土地,其他

转化为未利用地的部分大多位于风沙区,集中在流域出口处的龙头拐水文站附近,说明近年来流域出口附近土地荒漠化较为严重,水土流失程度加剧。

从土壤侵蚀的空间分布来看,流域中部侵蚀较为严重,土壤侵蚀模数较大,且向上下游两端侵蚀强度



逐渐减小,这与降雨强度的分布基本一致。从龙头拐水文站以上流域看,北部沙漠地区土壤侵蚀以风力侵蚀为主,其次由于雨水在沙地中的入渗速度较快,地表难以形成径流,导致沟道稀少,因此受到的水力侵蚀较弱;而中部地区的黄土砒砂岩,覆沙黄土厚度远小于北部地区,有利于沟道的形成发育,且下垫面以草地和耕地为主,平均土壤侵蚀模数较大,水土流失较为严重;南部区域砒砂岩裸露,沟道稀疏,土壤侵蚀强度不及中部地区<sup>[21]</sup>。大部分侵蚀产沙来源于极强度侵蚀和剧烈侵蚀,土壤侵蚀严重的原因可能是土壤抗蚀性较弱、沟头等地形陡峭、重力侵蚀活跃,且侵蚀等级较高的地区降雨量相比于其他地区较多,坡面坡度较大,降雨侵蚀力较大,导致计算得到的土壤侵蚀模数较高,这也是土壤侵蚀量较大的主要原因。

此外,中度侵蚀以上的面积主要分布在草地,少量分布于林地,其他地类均以微度侵蚀为主,可见草地是引发水土流失的主要土地利用类型。王金花等人<sup>[22]</sup>的分析表明,西柳沟流域受人类活动影响,草地、耕地、未利用土地的变化最为显著。草地的部分面积向林地和耕地转化是35 a间土壤侵蚀程度的降低的主要原因,进一步表明土地利用/土地覆被变化是引起流域土壤侵蚀变化的必然因素,这与章影等<sup>[23]</sup>人的研究结论一致。总体来说,近年来水土保持措施工程的建设有一定的成效,流域内土壤侵蚀强度有所降低,在一定程度上得到了控制,但局部地区仍存在着土壤侵蚀强度增加的情况。建议局部地区实施荒山造林政策,优化土地利用空间格局,增加植被覆盖度,降低水土流失严重程度。

## 5 结论

(1) 1980—2015年期间,西柳沟流域草地、林地和水域面积呈减小趋势,耕地、建设用地和未利用地面积呈增加趋势;流域3种主要的土地利用类型转出面积大小为草地>林地>耕地,耕地主要转化为草地,林地大部分转为未利用土地,草地大部分转为耕地和未利用土地。

(2) 西柳沟流域1980年平均土壤侵蚀模数为1 946.56 t/(km<sup>2</sup>·a),2015年平均土壤侵蚀模数降至1 873.55 t/(km<sup>2</sup>·a)。各地类平均土壤侵蚀模数大小依次为草地>林地>耕地>建设用地>未利用土地>水域,其中耕地和草地的平均土壤侵蚀模数有所下降。土壤侵蚀量主要来自于草地,其次为林地;草地土壤侵蚀量主要源于强度侵蚀和极强度侵蚀,林

地土壤侵蚀量主要源于轻度侵蚀和中度侵蚀。

(3) 1980—2015年西柳沟流域土壤侵蚀以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,占流域总面积的77%以上;土壤侵蚀强度等级发生变化的面积为97.35 km<sup>2</sup>,土壤侵蚀程度总体上呈降低的趋势,其中草地部分面积分别转化为林地和耕地是流域土壤侵蚀程度的降低的主要原因,转移面积分别为4.47,17.54 km<sup>2</sup>,说明土地利用结构的改变是影响流域土壤侵蚀变化的必然因素。

### 参考文献:

- [1] 田卫堂,胡维银,李军,等.我国水土流失现状和防治对策分析[J].水土保持研究,2008,15(4):204-209.
- [2] 杨昆,邓熙,李学灵,等.梯级开发对河流生态系统和景观影响研究进展[J].应用生态学报,2011,22(5):1359-1367.
- [3] 曾瑞,李榜晏,朱立波,等.黄土高原地形地貌研究与海绵城市建设[J].绿色科技,2017(1):74-80.
- [4] 张骁,赵文武,刘源鑫.遥感技术在土壤侵蚀研究中的应用述评[J].水土保持通报,2017,37(2):228-238.
- [5] 王芸,刘文兆,李怀有,等.黄土高原沟壑区砚瓦川流域水沙关系及其对流域治理的响应[J].自然资源学报,2015,30(8):1403-1413.
- [6] 吴磊,马孝义.黄土高原水土流失型非点源污染过程模拟研究进展[J].中国科技论文,2015,10(13):1497-1506.
- [7] 王计平,杨磊,卫伟,等.黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响:景观水平与多尺度比较[J].生态学报,2011,31(19):5531-5541.
- [8] 马亚亚,王杰,张超,等.基于CSLE模型的陕北纸坊沟流域土壤侵蚀评价[J].水土保持通报,2018,38(6):95-102.
- [9] 喻锋,李晓兵,王宏.生态安全条件下土地利用格局优化:以皇甫川流域为例[J].生态学报,2014,34(12):3198-3210.
- [10] 庄建琦,葛永刚.土壤侵蚀对土地利用和降雨变化响应和空间分布特征:以金沙江一级支流小江流域为例[J].长江流域资源与环境,2012,21(3):288-295.
- [11] 李成志,连晋姣,陈洪松,等.喀斯特地区县域土壤侵蚀估算及其对土地利用变化的响应[J].中国水土保持科学,2017,15(5):39-47.
- [12] Zhang S, Fan W, Li Y, et al. The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed [J]. Science of the Total Environment, 2017,574:34-45.
- [13] 冉大川,张栋,焦鹏,等.西柳沟流域近期水沙变化归因分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(5):143-149.
- [14] Renard K G, Foster 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)[R]. Agricultural Handbook, 1997.

- [27] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J].水土保持学报,2018,32(2):1-10.
- [28] 郑永林,王海燕,王一格,等.三峡库区笋溪河流域面源污染及其与土壤可蚀性  $K$  值的关系[J].应用与环境生物学报,2021,27(1):208-213.
- [29] 史鹏韬,刘子琦,李开萍.贵州省水土流失时空变化特征[J].地球与环境,2019,47(5):586-593.
- [30] 蔡永明,张科利,李双才.不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究[J].土壤学报,2003,40(4):511-517.
- [31] 黄会前,何腾兵,牟力.贵州母岩(母质)对土壤类型及分布的影响[J].浙江农业科学,2016,57(11):1816-1820.
- [32] Zhang K L, Shu A P, Xu X L, et al. Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008,72(6):1002-1011.
- [33] 冯克义.我国土壤可蚀性  $K$  值研究[J].水利水电技术,2019,50(S2):225-228.
- [34] 王彬,郑粉莉,王玉玺.东北典型薄层黑土区土壤可蚀性模型适用性分析[J].农业工程学报,2012,28(6):126-131.
- [35] 张耀方,赵世伟,王子龙,等.黄土高原土壤团聚体胶结物质的分布及作用综述[J].中国水土保持科学,2015,13(5):145-150.
- [36] 徐香兰,张科利,徐宪立,等.黄土高原地区土壤有机碳估算及其分布规律分析[J].水土保持学报,2003,17(3):13-15.
- [37] 陈晓安,杨洁,熊永,等.红壤区崩岗侵蚀的土壤特性与影响因素研究[J].水利学报,2013,44(10):1175-1181.
- [38] 熊康宁,李晋,龙明忠.典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J].地理学报,2012,67(7):878-888.
- [39] 侯大斌.川渝地区土壤可蚀性评价[D].成都:四川农业大学,2001.
- [40] 荆莎莎,张荣华,张庆红,等.沂蒙山区典型县土壤可蚀性  $K$  值空间变异研究[J].土壤通报,2017,48(2):278-284.
- [41] 李子君,王硕,林锦阔,等.沂河流域土壤可蚀性空间变异研究[J].土壤通报,2019,50(1):45-51.
- [42] 王琳,欧阳华,周才平,等.贡嘎山东坡土壤有机质及氮素分布特征[J].地理学报,2004,59(6):1012-1019.
- [43] 彭新华,李元沅,赵其国.我国中亚热带山地土壤有机质研究[J].山地学报,2001,19(6):489-496.
- [44] Mallick J, Al-Wadi H, Rahman A, et al. Spatial variability of soil erodibility and its correlation with soil properties in semi-arid mountainous watershed, Saudi Arabia[J]. Geocarto International, 2016,31(6):661-681.
- [45] 舒锟,张家春,张珍明,等.不同海拔梯度下梵净山土壤机械组成及养分特征[J].四川农业大学学报,2017,35(1):52-59.
- [46] 陈英,魏兴萍,雷珊.青木关岩溶槽谷流域不同土地利用类型土壤可蚀性分析[J].中国岩溶,2020,39(6):836-844.
- [47] 王敬贵,亢庆,邝高明,等.尖山河小流域土壤可蚀性  $K$  值空间变异研究[J].生态环境学报,2014,23(4):555-560.
- [48] 杨青,杨广斌,赵青松,等.喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征[J].水土保持通报,2020,40(1):9-16.
- [49] 黄凯,李瑞,李勇,等.贵州省黔南区不同侵蚀性雨型条件下生物措施对坡面产流产沙的响应[J].水土保持学报,2020,34(6):14-21.
- [50] 盘礼东,李瑞,黎庆贵,等.黔西喀斯特区秸秆覆盖对坡耕地产流产沙特征的响应[J].水土保持学报,2021,35(1):9-16.
- [51] 黄新君,陈尚洪,刘定辉,等.秸秆覆盖和有机质输入对紫色土土壤可蚀性的影响[J].中国农业气象,2016,37(3):289-296.

(上接第76页)

- [15] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE[J]. Journal of Hydrology, 1994,157:287-306.
- [16] 刘刚,李鹏,张旭,等.西安市水土流失空间分布特征与管控空间划分[J].水土保持学报,2020,34(3):91-97.
- [17] 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.
- [18] 黄金良,洪华生,张路平,等.基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J].水土保持学报,2004,18(5):75-79.
- [19] 王文娟,张树文,李颖,等.基于 GIS 和 USLE 的三江平原土壤侵蚀定量评价[J].干旱区资源与环境,2008,22(9):112-117.
- [20] 水利部. SL 190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[M].北京:中国水利水电出版社,2007:8-9.
- [21] 杨吉山,史学建,侯素珍,等.2016年“8·17”暴雨西柳沟土壤侵蚀产沙量分析[J].人民黄河,2020,42(1):82-85,90.
- [22] 王金花,李占斌,张荣刚,等.水蚀风蚀交错区流域景观格局变化及水沙响应关系[J].中国水土保持科学,2016,14(3):68-75.
- [23] 章影,廖畅,姜庆虎,等.丹江口库区土壤侵蚀对土地利用变化的响应[J].水土保持通报,2017,37(1):104-111,2.