

# 十大孔兑上游土壤侵蚀空间分布及动态变化

刘璐<sup>1</sup>, 郭月峰<sup>1</sup>, 姚云峰<sup>1</sup>, 刘晓宇<sup>1</sup>, 祁伟<sup>1,2</sup>

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区水利水电勘探设计院, 呼和浩特 010020)

**摘要:**为防治生态脆弱区土壤侵蚀,以十大孔兑上游为研究区域,通过 GIS 软件运用 RUSLE 模型和基于土地类型方法,分别选取 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年及 2018 年 5 个典型年份,研究了十大孔兑上游流域土壤侵蚀空间分布动态变化特征并对比了两种方法有效性。结果表明:十大孔兑上游流域土壤侵蚀以无明显侵蚀和中度侵蚀为主,基于两种方法计算轻度及以上等级侵蚀面积都分别呈现 1980—1990 年增加、1990—2018 年减少趋势,说明该区域土壤侵蚀得到了有效治理。通过两种方法对比发现 RUSLE 方程考虑因子更为全面,模拟更接近实际,同时适用于水土流失定量研究。

**关键词:**十大孔兑; 上游; RUSLE; 土地类型; 土壤侵蚀

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)04-0034-08

## Spatial Distribution and Dynamic Change of Soil Erosion in Ten Tributaries

LIU Lu<sup>1</sup>, GUO Yuefeng<sup>1</sup>, YAO Yunfeng<sup>1</sup>, LIU Xiaoyu<sup>1</sup>, QI Wei<sup>1,2</sup>

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Water Resources and Hydropower Exploration and Design Institute, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** In order to prevent and treat soil erosion in the ecologically fragile area, taking the upstream of the ten tributaries as the research area, we used the RUSLE model and land-based methods through GIS software, selected 5 typical years of 1980, 1990, 2000, 2010 and 2018, respectively, and studied the dynamic characteristics of the spatial distribution of soil erosion in the upstream of the ten tributaries and compared the effectiveness of the two methods. The results show that the soil erosion in the upstream of the top ten tributaries is mainly non-obvious erosion and moderate erosion, and the calculated erosion area of mild or above grade based on the two methods shows a trend of increase in 1980—1990 and decrease in 1990—2018, respectively, indicating that the soil erosion situation in this region is gradually improved. It is found that the factor of RUSLE equation is more comprehensive, the simulation is closer to the reality, and is also applicable to the quantitative study of water and soil loss by comparing the two methods.

**Keywords:** ten tributaries; upstream catchment; RUSLE; land types; soil erosion

土壤侵蚀是土壤在风力、水力、重力等自然营力与人类活动综合作用下被剥蚀、搬运、沉积的过程,其土壤养分流失,土地生产力下降,土壤退化,引起泥沙淤积,加剧洪涝、干旱等灾害发生,严重危及人类生存与发展,是各国关注的环境热点问题之一<sup>[1]</sup>,为此各国学者采用了多种技术对土壤侵蚀进行了大量探索性试验和深入研究,其中土壤侵蚀定量评价是土壤侵蚀研究中的主要方法,尤其是近几十年来,遥感技术

和地理信息系统的快速发展极大地推动了土壤侵蚀定量化研究<sup>[2]</sup>,为土壤侵蚀研究提供了有力的技术支持,已在世界许多国家得到广泛应用和研究<sup>[3-6]</sup>。

国内对 GIS 和 RUSLE 的综合应用始于 20 世纪 80 年代末,RUSLE 是将降雨侵蚀力、土壤可蚀性、植被覆盖、坡长、坡度和水土保持措施作为 6 大因子对土壤侵蚀进行定量评价的水蚀预报经验模型。卜兆宏等<sup>[7]</sup>完善了模型因子算式算法,改进了土壤粒级换

收稿日期: 2020-08-05

修回日期: 2020-09-28

资助项目: 自治区应用技术与开发资金计划项目(201702109); 内蒙古自治区“青年科技英才支持计划”项目(NJYT-17-B19); 国家自然科学基金(31500584); 内蒙古农业大学优秀青年科学基金培养项目(2017XYQ-3)

第一作者: 刘璐(1995—), 女, 内蒙古乌兰察布人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 1321058961@qq.com

通信作者: 郭月峰(1982—)女, 内蒙古乌海人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: guoyuefeng0525@126.com

算方法,在水土流失定量遥感方法中取得新进展,并在太湖流域加以应用,还有其他学者利用 USLE 或 RULSE 模型估算了广东省<sup>[8]</sup>、江西省<sup>[9]</sup>的土壤侵蚀强度及中国的<sup>[10]</sup>年平均土壤侵蚀率,基于 RULSE 模型在不同省份和地区相继出现了一系列研究报告<sup>[11-14]</sup>。基于区域土地类型对其地面坡度、土地利用/覆被类型和植被覆盖数据构建土壤侵蚀遥感反演模型,从而进行土壤水力侵蚀强度定性分析,郭碧云等<sup>[15]</sup>以坡度、植被覆盖度和土地利用方式3个方面作为水力侵蚀的判别指标,结合野外调查和室内分析,对内蒙古农牧交错区土壤水蚀强度进行评价。基于土壤侵蚀经验模型运用 GIS 定量评估土壤侵蚀已成为合理规划、利用区域水土资源的有效手段。

十大孔兑上中游区域土壤侵蚀严重,水土流失面积约占上中游总面积的95%,多年平均输沙量0.27亿t,是黄河河道主要的产沙区之一。区域内土壤类型与地表物质具有较大差异,其水土流失特征及类型也各不相同。上游地处砒砂岩外露区,汛期暴雨集中时,在水力侵蚀的作用下<sup>[16]</sup>,风化物源源不断地输送到中游和下游,是河道粗砂重要的补给,也是下游防汛、取水安全的重要隐患,故水力侵蚀是该区域水土流失的重要原因。

本文选取侵蚀类型为水力侵蚀的十大孔兑上游作为土壤侵蚀演算的研究区,基于GIS采用两种方法分别构建了十大孔兑上游流域1980年、1990年、2000年、2010年及2018年5个典型年份的土壤侵蚀反演模型。第1种方法在土壤侵蚀分类分级标准基础上,基于十大孔兑上游地形、土地利用、植被覆盖度数据对土壤侵蚀强度进行定性分析。第2种方法基于RUSLE演算土壤侵蚀模数并进行土壤侵蚀强度分级,并通过对比两种方法的有效性为生态脆弱区流域治理提供理论依据。

## 1 研究区概况

十大孔兑位于内蒙古鄂尔多斯市境内,地理坐标为 $108^{\circ}47'—110^{\circ}58'E$ , $39^{\circ}47'—40^{\circ}30'N$ ,其发源于鄂尔多斯台地,流经库布齐沙漠,横穿下游冲积平原后汇入黄河的10条一级支流,从西向东依次为毛不拉孔兑、布尔色太沟、黑赖沟、西柳沟、罕台川、壕庆河、哈什拉川、母哈尔河、东柳沟、呼斯太河。研究区属于典型干旱大陆性气候,气候干燥,风大沙多,降水年际变化大,年内分布不均,7—9月的降水量占全年降水量的70%,由南向北逐渐减少,其中风沙区雨量最少。地貌类型以砾质丘陵、沙质丘陵、冲洪积平原为基础,由南向北可分为上游黄土丘陵沟壑区、中游库布齐沙漠风沙区和下

游黄河南岸冲积平原区。上游为鄂尔多斯台地北缘,沟壑纵横,地表支离破碎,以水力侵蚀为主;中游为库布齐沙漠区,横贯东西,西宽东窄,风力侵蚀极为严重;下游为冲洪积平原区,地势平坦,多年平均径流量、输沙量较大。流域内暴雨洪水频繁,水土流失严重,植被稀疏,生态环境十分脆弱(图1)。

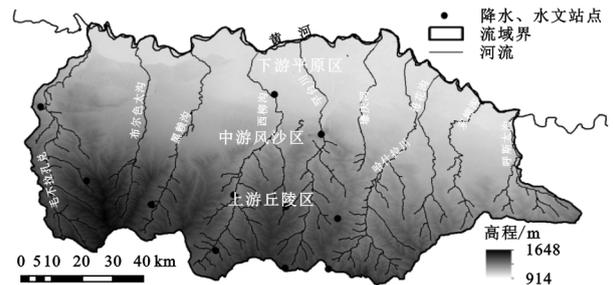


图1 研究区示意图

## 2 数据与方法

### 2.1 基础数据来源与处理

由于十大孔兑在降水、植被、土地利用等方面资料较为匮乏,本研究的基础数据主要依靠遥感技术获取。十大孔兑流域1980年、1990年、2010年、2018年降水数据选用地面测站数据,基于泰森多边形法将测站降水数据插值成面状数据,因2000年地面测站降水数据短缺,选用TRMM降雨数据替代,通过对2000年1—12月的TRMM3B43降雨数据统计计算,获取2000年的年降雨数据。收集覆盖十大孔兑流域1980年、1990年、2000年、2010年、2018年的6—10月Landset MSS/TM/ETM/landsat8影像数据25期,选取影像质量较好的8景影像作为5个典型年份的遥感数据源。收集覆盖十大孔兑流域的DEM数据1套,空间分辨率约为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 。收集覆盖十大孔兑流域的土壤类型数据1套,比例为1:100万。

### 2.2 研究方法

2.2.1 基于土地类型土壤侵蚀研究 基于《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007),利用地面坡度、土地利用/覆被类型和植被覆盖数据,构建土壤侵蚀遥感反演模型,按照土地利用类型、植被覆盖度、地面坡度3种参数在不同类型或区间内的归属不同来划分土壤侵蚀强度,利用ArcGIS软件的Model Builder模块,构建土壤侵蚀模型,针对栅格图像建立3种参数的类型或区间的判断矩阵,满足条件的像元,通过类型合并,获取规定的6类土壤侵蚀强度数据<sup>[17-18]</sup>。

2.2.2 基于RUSLE土壤侵蚀研究 采用RUSLE法对十大孔兑上游近40a来土壤侵蚀模数变化展开定量研究,并结合水土保持措施实施情况分析其产生

的水土保持效益。研究利用 ArcGIS 软件的 Model Builder 模块,分别构建各土壤侵蚀因子计算模型,然后将以上 6 个土壤侵蚀因子和转换常量相乘后获取土壤侵蚀模数结果<sup>[19]</sup>。

水土流失定量测算采用 RUSLE 方程,其表达式如下:

$$A = f \cdot R \cdot K \cdot LS \cdot CP \quad (1)$$

式中: $A$  为年土壤流失量 $[t/(km^2 \cdot a)]$ ;  $f$  为使  $A$  的单位转换为国际通用单位的常数,其值为 224.2<sup>[20]</sup>;  $R$  为降雨侵蚀力因子;  $K$  为土壤可侵蚀性因子;  $LS$  为坡长坡度因子的乘积;  $CP$  为植被覆盖与管理因子、水土保持因子的乘积。  $R, K$  量纲单位与美国通用水土流失方程相同;  $LS, CP$  无量纲单位。

(1) 降雨侵蚀力因子( $R$ )。降雨侵蚀力是降水对土壤造成侵蚀的动力指标<sup>[21]</sup>,是侵蚀的主要驱动力<sup>[22]</sup>,本文  $R$  因子的计算公式为:

$$R = 4.1 \times F - 152 \quad (2)$$

$$F = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_j^2}{p} \quad (3)$$

式中: $F$  为修正参数;  $P_j$  为第  $j$  月的降雨量(mm);  $p$  为年平均降雨量(mm)。将计算所得的各气象站点的年降雨侵蚀力在 ArcGIS 中进行克吕格空间插值<sup>[23-24]</sup>,得到研究区年降雨侵蚀力图。

(2) 土壤可蚀性因子( $K$ )。土壤可蚀性反映了土壤对侵蚀营力分离和搬运作用的敏感性<sup>[25-26]</sup>,  $K$  值越高表示土壤抗蚀能力越弱,反之  $K$  值越低表示土壤抗蚀能力越弱。计算公式如下<sup>[27]</sup>:

$$K = 0.1317 \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 S_a \left( 1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \left( \frac{S_i}{C_1 + S_i} \right)^{0.3} \times \left[ 1 - \frac{0.25 C_0}{C_0 + \exp(3.72 - 2.95 C_0)} \right] \times \left[ 1 - \frac{0.7 S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9 S_n)} \right] \quad (4)$$

$$S_n = 1 - S_a / 100 \quad (5)$$

式中: $S_a$  为砂粒含量百分比(%);  $S_i$  为粉粒含量百分比(%);  $C_1$  为黏粒含量百分比(%);  $C_0$  为有机碳含量百分比(%)。在 ArcGIS 中,以区域土壤类型图为基础,根据  $K$  值对应的土壤类型进行赋值,最后以  $K$  值作为字段进行数据转换。

(3) 坡长坡度因子( $LS$ )。  $LS$  因子是坡长因子和坡度因子叠加相乘的结果,借助于 GIS 技术,对填洼处理后的数字高程模型提取坡长和坡度值<sup>[27]</sup>,利用 ArcGIS 的表面分析来提取坡度,同时运用非累积流量的算法确定坡长,并按格网单元的非累计坡长再进行累加<sup>[28]</sup>。通过运算分别生成坡长、坡度因子图,在

ArcGIS 中使用栅格计算器运算后最后生成  $LS$  空间分布图。计算公式为:

$$S = \begin{cases} 10.08 \sin \theta + 0.3 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (6)$$

$$L = (\lambda / 22.1)^m \quad (7)$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & \theta > 5^\circ \end{cases} \quad (8)$$

式中: $L$  和  $S$  分别为坡长和坡度因子;  $\theta$  为利用数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据提取的坡度值( $^\circ$ );  $m$  为坡长指数;  $\lambda$  为坡长(m)。

(4) 植被覆盖与管理因子( $C$ )。植被覆盖与管理因子表示植被覆盖和管理措施对土壤侵蚀的作用<sup>[29]</sup>。计算公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (9)$$

$$f = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (10)$$

$$C = \begin{cases} 1 & 0\% \leq f < 10\% \\ 0.6508 - 0.3436 \times \lg f & 10\% \leq f < 78.3\% \\ 0 & f \geq 78.3\% \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $NDVI$  为归一化植被指数;  $\rho_{NIR}, \rho_R$  分别为近红外波段和红波段反射率;  $f$  为植被覆盖度(%);  $NDVI_{\max}, NDVI_{\min}$  分别为  $NDVI$  的最大和最小值。

(5) 水土保持措施因子( $P$ )。水土保持措施因子指在特定水土保持措施的土壤流失与起伏地耕作的相应土壤流失之比<sup>[30]</sup>,在 RUSLE 模型中,  $P$  值介于 0~1,其中未采取任何水土保持措施的地块  $P$  值为 1,不发生土壤侵蚀的地块则  $P$  值为 0<sup>[31]</sup>(表 1)。

表 1 不同土地利用/覆被类型  $P$  值

土地利用/覆被类型	坡度/ $^\circ$	$P$
	0~5	0.4
	5~8	0.5
耕地	8~15	0.6
	15~25	0.8
	>25	1
建设用地		0
水域		0
林地		1
草地		0.8

## 3 结果与分析

### 3.1 基于土地类型的土壤侵蚀分析

十大孔兑上游 1980—2018 年土壤侵蚀强度面积

统计结果见表 2、图 2。1980 年十大孔兑上游轻度侵蚀等级及以上侵蚀类型面积 2 436.42 km<sup>2</sup>,1990 年为 2 722.28 km<sup>2</sup>,2000 年为 2 717.23 km<sup>2</sup>,2010 年为 2 638.21 km<sup>2</sup>,2018 年为 2 462.51 km<sup>2</sup>。1980—1990 年十大孔兑上游轻度侵蚀等级及以上侵蚀类型面积增加 285.86 km<sup>2</sup>;1990—2000 年侵蚀类型面积减少 5.05 km<sup>2</sup>;2000—2010 年侵蚀类型面积减少 79.02 km<sup>2</sup>;2010—2018 年侵蚀类型面积减少 175.70 km<sup>2</sup>。

表 2 基于土地类型十大孔兑上游 1980—2018 年

土壤侵蚀强度面积		km <sup>2</sup>				
侵蚀类型	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	2018 年	
无明显侵蚀	2132.28	1842.31	1839.03	1936.76	1986.76	
轻度侵蚀	912.97	336.56	307.58	454.57	536.90	
中度侵蚀	1424.46	2191.29	2209.75	2002.31	1789.21	
强度侵蚀	96.94	190.12	195.52	177.40	135.32	
极强度侵蚀	2.01	4.26	4.32	3.87	1.06	
剧烈侵蚀	0.04	0.06	0.06	0.06	0.02	

### 3.2 基于 RUSLE 的土壤侵蚀研究

3.2.1 十大孔兑上游水土流失情况分析 十大孔兑上游 1980—2018 年土壤侵蚀强度面积统计信息见表 3、图 3。1980 年十大孔兑上游轻度侵蚀等级及以上侵蚀类型面积为 1 721.59 km<sup>2</sup>,1990 年为 2 889.63 km<sup>2</sup>,2000 年为 2 622.81 km<sup>2</sup>,2010 年为 2 783.77 km<sup>2</sup>,2018 年为 2 686.10 km<sup>2</sup>。1980—1990 年十大孔兑上游轻度侵蚀等级及以上侵蚀类型面积增加了 1 168.04 km<sup>2</sup>,1990—2000 年减少了 266.82 km<sup>2</sup>,2000—2010 年增加了 160.96 km<sup>2</sup>,2010—2018 年减少了 97.67 km<sup>2</sup>。

表 3 基于 RUSLE 十大孔兑上游 1980—2018 年

土壤侵蚀强度面积		km <sup>2</sup>				
侵蚀类型	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	2018 年	
无明显侵蚀	2832.52	1674.97	1933.45	1777.21	2305.02	
轻度侵蚀	756.64	559.49	1004.23	941.49	1376.45	
中度侵蚀	414.02	546.75	754.26	798.63	609.38	
强度侵蚀	193.46	383.24	404.19	421.76	357.23	
极强度侵蚀	185.99	466.36	329.73	334.54	239.17	
剧烈侵蚀	171.48	933.78	130.4	287.34	103.87	

1980 年十大孔兑上游平均土壤侵蚀模数为 2 744.88 t/(km<sup>2</sup>·a);1990 年十大孔兑上游平均土壤侵蚀模数为 14 557.51 t/(km<sup>2</sup>·a);2000 年十大孔兑上游平均土壤侵蚀模数为 3 058.06 t/(km<sup>2</sup>·a);2010 年十大孔兑上游平均土壤侵蚀模数为 4 884.66 t/(km<sup>2</sup>·a),2018 年十大孔兑上游平均土壤侵蚀模数为 2 997.03 t/(km<sup>2</sup>·a)。5 个典型年份土壤侵蚀模数由高到低依次为 1990 年、2010 年、2000 年、2018 年、1980 年。1980—1990 年十大孔兑上游平均土壤侵蚀模数增加了 11 812.63 t/(km<sup>2</sup>·a),1990—2000 年减少了

11 499.45 t/(km<sup>2</sup>·a),2000—2010 年增加了 1 826.60 t/(km<sup>2</sup>·a),2010—2018 年减少了 1 887.63 t/(km<sup>2</sup>·a)。

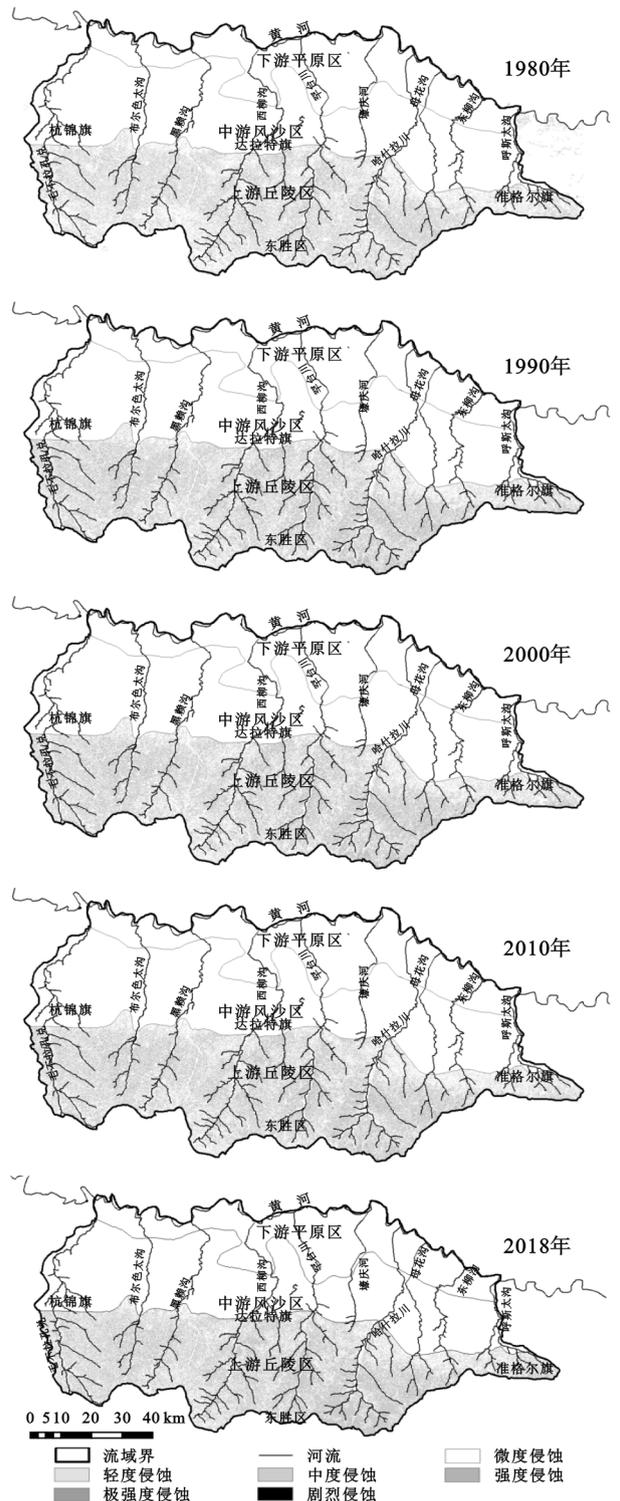


图 2 基于土地类型十大孔兑上游 1980—2018 年土壤侵蚀强度空间分布

综上所述,1990—2018 年十大孔兑上游轻度及以上等级土壤侵蚀面积由 2 889.63 km<sup>2</sup>下降至 2 686.10 km<sup>2</sup>,土壤侵蚀模数由 14 557.51 t/(km<sup>2</sup>·a)下降至 2 997.03 t/(km<sup>2</sup>·a),该区域土壤侵蚀面积减小,土壤侵蚀强度下降。

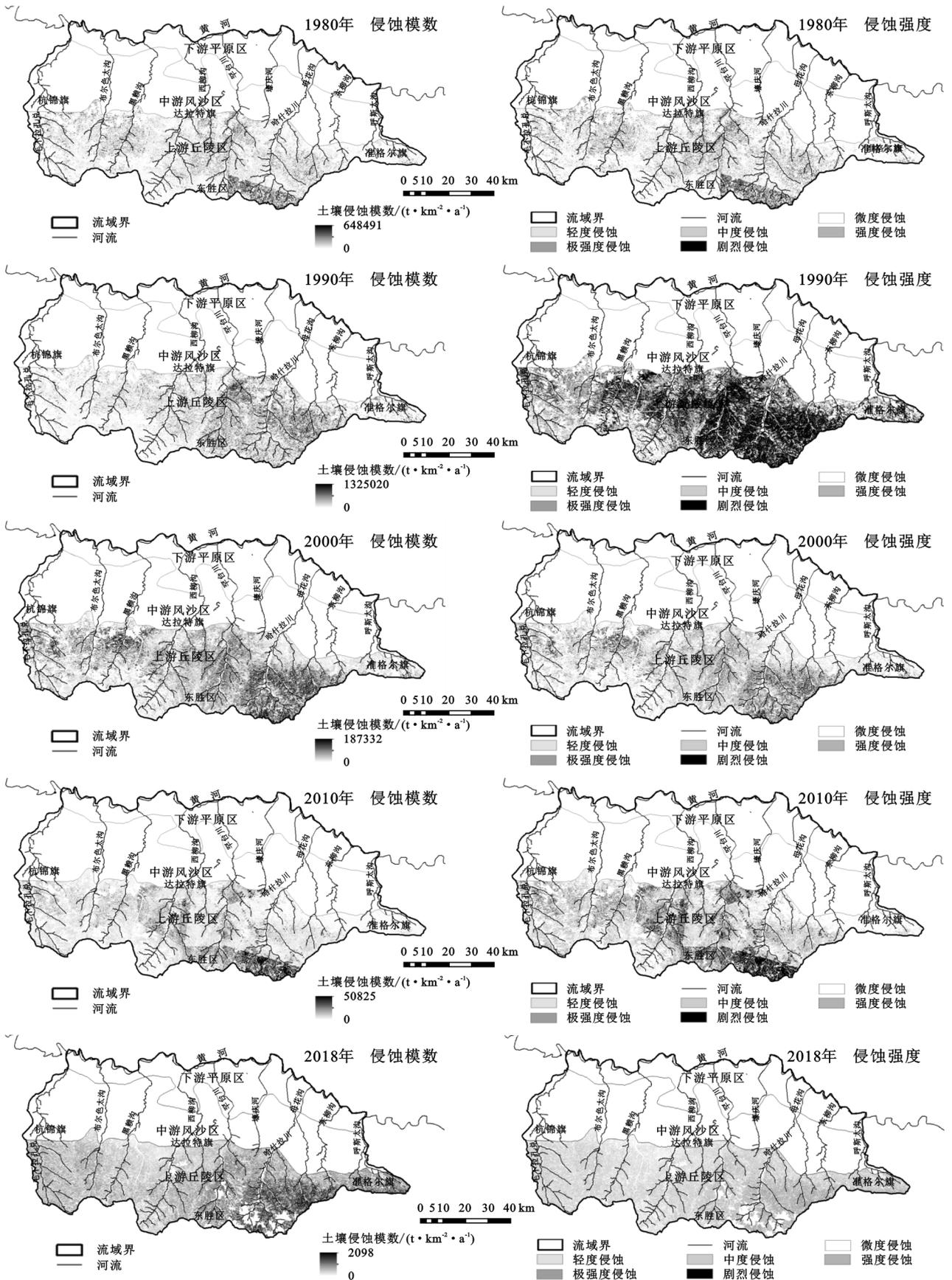


图 3 不同年份十大孔兑上游土壤侵蚀模数及侵蚀强度空间分布

### 3.2.2 十大孔兑上游各孔兑水土流失情况分析 十大孔兑流域内的各孔兑上游平均土壤侵蚀模数统计信

息见表 4。1980 年十大孔兑上游各孔兑土壤侵蚀模数由高到低依次为哈什拉川、罕台川、母哈尔河、布尔色太

沟、黑赖沟、西柳沟、毛不拉孔兑、壕庆河、东柳沟、呼斯太河。1990 年十大孔兑上游各孔兑土壤侵蚀模数由高到低依次为母哈尔河、哈拉川、罕台川、壕庆河、东柳沟、西柳沟、黑赖沟、呼斯太河、布尔色太沟、毛不拉孔兑。2018 年十大孔兑上游各孔兑土壤侵蚀模数由高到低依次为西柳沟、母哈尔河、毛不拉孔兑、呼斯太河、黑赖沟、壕庆河、罕台川、哈拉川、东柳沟、布尔色太沟。

1980—1990 年毛不拉孔兑、布尔色太沟、黑赖沟、西柳沟、罕台川、壕庆河、哈拉川、母哈尔河、东柳沟、呼斯太河的土壤侵蚀模数分别增加了 1 881, 2 797, 4 812, 6 182, 22 449, 18 932, 21 576, 36 725, 11 944, 6 048, 11 813 t/(km<sup>2</sup>·a)。其中母哈尔河土壤侵蚀模数增量最大,毛不拉孔兑相对较小。

表 4 十大孔兑上游各孔兑流域土壤侵蚀模数

孔兑	t/(km <sup>2</sup> ·a)				
	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	2018 年
毛不拉孔兑	1581	3462	2169	2626	1332
布尔色太沟	2363	5161	2415	3568	2629
黑赖沟	2360	7173	2934	4232	4013
西柳沟	1853	8035	2202	5918	4178
罕台川	3946	26395	3690	5855	3076
壕庆河	1495	20427	1835	10808	3056
哈拉川	5103	26679	4870	2799	2578
母哈尔河	2811	39536	5325	2653	2703
东柳沟	923	12867	1831	957	864
呼斯太河	645	6693	1208	551	457
十大孔兑	2745	14558	3058	4885	2997

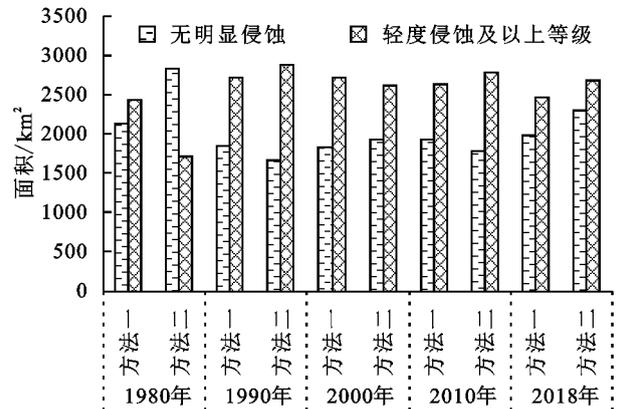
1990—2018 年,毛不拉孔兑、布尔色太沟、黑赖沟、西柳沟、罕台川、壕庆河、哈拉川、母哈尔河、东柳沟、呼斯太河土壤侵蚀模数分别减少了 2 130, 2 532, 3 160, 3 857, 23 319, 17 371, 24 101, 36 833, 11 910, 12 003, 6 236 t/(km<sup>2</sup>·a)。其中母哈尔河土壤侵蚀模数减少量最为显著,毛不拉孔兑减少量最小。

综合 5 个典型年份土壤侵蚀情况,1980—2018 年母哈尔河、哈拉川、罕台川三条孔兑上游土壤侵蚀最为严重,东柳沟、呼斯太河两条孔兑上游土壤侵蚀相对较轻。其中 1990 年土壤侵蚀程度尤为显著,主要是由于 20 世纪 90 年代还未对母哈尔河、哈拉川、罕台川孔兑开展大规模水土保持综合治理等措施,且该区域所发生的“89·7·21”特大暴雨,其最大雨强达 119.1 mm/h,洪峰流量达 3 090 m<sup>3</sup>/s,引发特大洪水造成罕台川水土流失严重。

### 3.3 基于两种方法对比分析

基于土地类型与 RUSLE 方程的 1980—2018 年十大孔兑上游土壤侵蚀强度反演结果如图 4 所示。1990 年、2000 年、2010 年、2018 年两种方法的轻度侵

蚀强度及以上等级的土壤侵蚀反演结果基本相同,1980 年两种方法的轻度侵蚀强度及以上等级的土壤侵蚀反演结果差别较大。基于土壤侵蚀分类分级标准遥感反演的 5 个典型年土壤侵蚀强度以无明显侵蚀和轻度侵蚀为主。基于 RUSLE 方程遥感反演的 5 个典型年无明显侵蚀等级面积最多,且除 1990 年外,其余典型年无明显侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀、极强度侵蚀、剧烈侵蚀所占面积均呈现逐渐减少趋势。



注:方法一为基于土地类型;方法二为基于 RUSLE 方程。

图 4 基于两种方法的十大孔兑上游土壤侵蚀强度面积对照

1980—1990 年十大孔兑上游植被覆盖度呈降低趋势,轻度侵蚀等级及以上侵蚀类型面积、平均土壤侵蚀模数呈增加趋势;1990—2000 年植被覆盖度呈增加趋势,轻度侵蚀等级及以上侵蚀类型面积、土壤侵蚀模数呈较少趋势;2000—2010 年植被覆盖度呈增加趋势,轻度侵蚀等级及以上侵蚀类型面积、土壤侵蚀模数呈增加趋势;2010—2018 年植被覆盖度呈增加趋势,轻度侵蚀等级及以上侵蚀类型面积、土壤侵蚀模数呈减少趋势。

土壤侵蚀和植被覆盖度呈负相关关系,即相同条件下,植被覆盖度越高土壤侵蚀越轻,反之越高。1980—2000 年十大孔兑上游植被覆盖度与轻度侵蚀等级及以上侵蚀类型面积、平均土壤侵蚀模数呈负相关关系,但 2000—2018 年没有呈负相关关系,这是因为土壤侵蚀除受植被覆盖度影响外,还与降雨、土壤类型、地形、实施水土保持措施等因素有关。两种方法对比发现,RUSLE 方程考虑因子更为全面,模拟更接近实际,同时适用于水土流失定量研究。

## 4 讨论

十大孔兑上游从 20 世纪 50,60 年代开始开展了水土保持生态建设,中游开展了防风固沙林带和引洪淤地工程建设;60 年代陆续开展树种种草项目,70 年

代实施“逐步退耕还林还牧,林牧为主,多种经营”的治理方针,80年代贯彻“三种五小”和“资源开发与环境保护并重”两个治理方针,90年代以后进一步加大林草治理力度,在利用柠条改良草场、沙棘治理砒砂岩沟壑等方面取得了显著成就。但在2000年以前,受到人力、财力及管理权限的限制,鄂尔多斯林草的破坏速度大于恢复速度,治理成效甚微,生态环境一直处在局部治理、整体恶化状态,1990年十大孔兑上游土壤侵蚀模数为 $14\,557.51\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,处于5个典型年份中土壤侵蚀模数最大值,侵蚀等级主要以极强度侵蚀与剧烈侵蚀为主。

1999—2012年孔兑的草原植被得到明显的恢复,其平均高度、平均覆盖度呈现上涨趋势。根据鄂尔多斯市草原管理局测定,封禁前退化放牧草场植被平均高度为 $10\sim 28\text{ cm}$ ,覆盖度为 $15\%\sim 30\%$ ,每平方米内一般有 $4\sim 6$ 种植物,而在封禁后,经过一定时间的恢复期,其平均高度可达 $35\sim 60\text{ cm}$ 以上,平均覆盖度可达 $65\%\sim 75\%$ 以上,每 $1\text{ m}^2$ 内物种数可达到 $7\sim 12$ 种以上。此外气候因素(降水、气温、风速等)对林草植被恢复有一定的影响,如2010年由于降水较少,导致其草场返青日期、平均高度、平均覆盖度等各项指标低于2009年。

1990—2018年十大孔兑上游轻度及以上等级土

壤侵蚀面积由 $2\,889.63\text{ km}^2$ 下降至 $2\,686.101\text{ km}^2$ ,土壤侵蚀模数由 $14\,557.51\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 下降至 $2\,997.03\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。由于该区域20世纪80年代先后开展了黄河中游试点小流域、骨干坝工程、沙棘示范区、罕台川水土保持综合治理、黄土高原水土保持世行贷款项目、沙棘拦沙工程等水土保持项目。近年来,鄂尔多斯市推行了封山禁牧制度,生态修复成效显著。十大孔兑上中游水土保持治理措施包括工程措施、林草措施、防风固沙措施、其他水土保持措施等。工程措施包括淤地坝、谷坊、梯田、引洪淤地、沟头防护等;植物措施包括水土保持林(乔木林、灌木林、经济林)、人工种草、封育治理;防风固沙措施包括造林、种草和沙障等,防风固沙措施全部集中在十大孔兑中游的风沙区。截至2017年,流域上中游丘陵风沙区综合措施总面积 $5\,826.15\text{ km}^2$ ,其中人工造林面积 $4\,378.92\text{ km}^2$ ,建设淤地坝511座,控制面积 $984.36\text{ km}^2$ ,总库容 $2.05\text{ 亿 m}^3$ ,拦沙库容 $1.11\text{ 亿 m}^3$ 。由此可见,近些年十大孔兑上游土壤侵蚀得到了有效治理,水土保持治理工作取得了一定成效。如图5—6所示,2000—2018年C值与P值的空间分布有所增加,C值的确定与植被类型、植被覆盖度相关,P值即土地利用/覆被方式能够很好地表征人类活动对地表水土流失的作用效果。

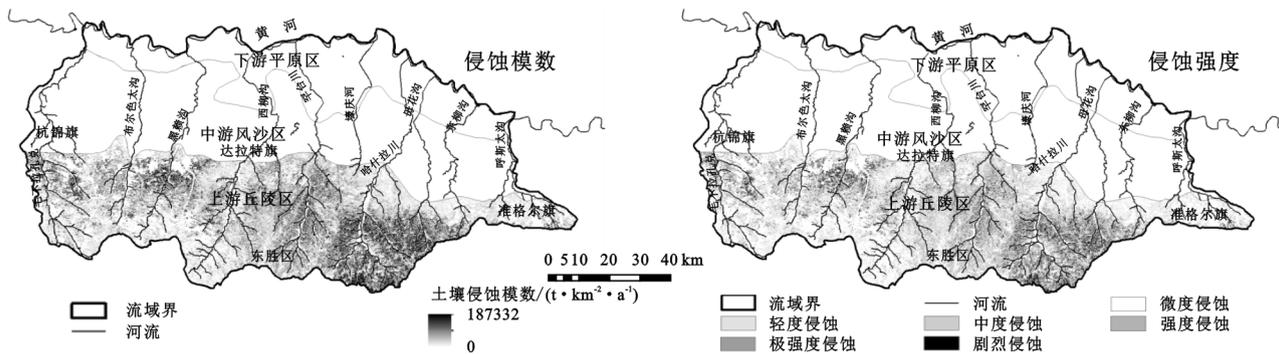


图5 十大孔兑上游2000年与2018年C因子变化

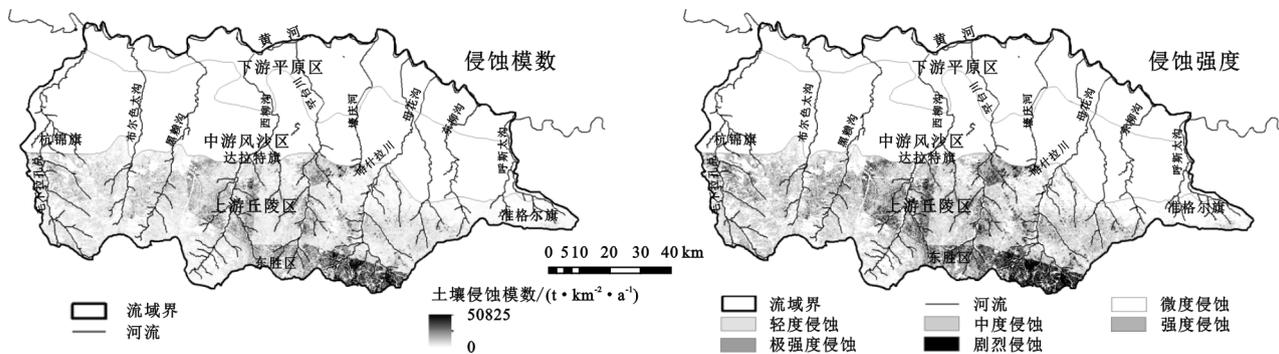


图6 十大孔兑上游2000年与2018年P因子变化

基于两种方法演算不同侵蚀等级面积差异较大,一方面由于两类演算方法机理不同,考虑的影响因子

亦不同。基于土地类型从坡度、植被覆盖度、地类定性划分,方法侧重于定性评价。基于RUSLE方程方

法从水土流失机理出发,考虑多个影响因子(包括降雨、地形、土壤类型、植被覆盖、水土保持措施等),且各影响因子有多种计算方法,各因子不同的计算方法计算结果也有差别,该方法侧重于定量研究。另一方面两种反演方法中使用的遥感影像不可避免会出现云雾、日照等影响,影像的灰度值会有差别,从而带来植被覆盖度反演误差。

## 5 结论

(1) 基于土地类型法 1980 年十大孔兑上游轻度及以上等级土壤侵蚀面积为  $2\,436.42\text{ km}^2$ ,1990 年为  $2\,722.28\text{ km}^2$ ,2000 年为  $2\,717.23\text{ km}^2$ ,2010 年为  $2\,638.21\text{ km}^2$ ,2018 年为  $2\,462.51\text{ km}^2$ 。基于 RUSLE 法 1980 年十大孔兑上游轻度及以上等级土壤侵蚀面积为  $1\,721.59\text{ km}^2$ ,1990 年为  $2\,889.63\text{ km}^2$ ,2000 年为  $2\,622.81\text{ km}^2$ ,2010 年为  $2\,783.77\text{ km}^2$ ,2018 年为  $2\,686.10\text{ km}^2$ 。基于两种方法计算轻度及以上等级土壤侵蚀面积都分别呈现 1980—1990 年增加、1990—2018 年减少趋势。

(2) 基于 RUSLE 法 1980 年十大孔兑上游平均土壤侵蚀模数为  $2\,744.88\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ;1990 年为  $14\,557.51\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ;2000 年为  $3\,058.06\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ;2010 年为  $4\,884.66\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,2018 年为  $2\,997.03\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。十大孔兑上游平均土壤侵蚀模数呈现 1980—1990 年增加、1990—2000 年降低、2000—2010 年增加、2010—2018 年减少趋势,其中母哈尔河、喀什拉川、罕台川三条孔兑上游土壤侵蚀最为严重,东柳沟、呼斯太河两条孔兑上游土壤侵蚀相对较轻。

(3) 两种方法对比发现,RUSLE 方程考虑因子更为全面,模拟更接近实际,同时适用于水土流失定量研究。

### 参考文献:

[1] 李渊,刘子琦.石漠化区不同土地类型土壤侵蚀与理化性质特征[J].森林与环境学报,2019,39(5):515-523.

[2] 杨冉冉,徐涵秋,林娜,等.基于 RUSLE 的福建省长汀县河田盆地区土壤侵蚀定量研究[J].生态学报,2013,33(10):2974-2982.

[3] 李亚平,卢小平,张航,等.基于 GIS 和 RUSLE 的淮河流域土壤侵蚀研究:以信阳市商城县为例[J].国土资源遥感,2019,31(4):243-249.

[4] 李佳蕾,孙然好,熊木齐,等.基于 RUSLE 模型的中国土壤水蚀时空规律研究[J].生态学报,2020,40(10):3473-3485.

[5] 邹雅婧,闫庆武,谭学玲.渭北矿区土壤侵蚀评估及驱动因素分析[J].干旱区地理,2019,42(6):1387-1394.

[6] 梁建方,韦小茶,马龙生,等.基于 RUSLE 模型的贵州省三穗县土壤侵蚀研究[J].人民珠江,2019,40(8):13-18,31.

[7] 卜兆宏,唐万龙,杨林章,等.水土流失定量遥感方法新进展及其在太湖流域的应用[J].土壤学报,2003(1):1-9.

[8] Gao F, Wang Y P, Yang J X. Assessing soil erosion using USLE model and MODIS data in the Guangdong, China [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2017,74(1):1-4.

[9] 周夏飞,马国霞,曹国志,等.基于 USLE 模型的 2001—2015 年江西省土壤侵蚀变化研究[J].水土保持通报,2018,38(1):8-11,17.

[10] Teng H F, Hu J, Zhou Y, et al. Modelling and mapping soil erosion potential in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019,18(2):251-264.

[11] 冯精金,史明昌,姜群鹤.潮白河流域土地利用/覆被变化对土壤侵蚀的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(3):121-132.

[12] 郭思琪,韩磊,赵永华,等.秦岭地区土壤侵蚀时空变化及景观格局[J].生态学杂志,2019,38(7):2167-2176.

[13] 秦伟,朱清科,张岩.基于 GIS 和 RUSLE 的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J].农业工程学报,2009,25(8):157-163.

[14] Shi P, Zhang Y, Zhang Y, et al. Land-use types and slope topography affect the soil labile carbon fractions in the Loess hilly-gully area of Shaanxi, China[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2020,66(5):638-650.

[15] 郭碧云,王光谦,张正峰.内蒙古农牧交错区土地利用/覆被变化及土壤侵蚀:以太仆寺旗为例[J].应用基础与工程科学学报,2011,19(S1):9-16.

[16] 张翔.黄河上游十大孔兑地区风水复合侵蚀产沙过程研究[D].西安:西安理工大学,2016.

[17] Wang M F, Tian F X, He X B, et al. Dry cropland changes in China's Three Gorges Reservoir Region during the period 1990 to 2015[J]. Journal of Mountain Science, 2020,17(3):516-527.

[18] Wen X, Zhen L. Soil erosion control practices in the Chinese Loess Plateau: A systematic review[J]. Environmental Development,2020,34:1-37.

[19] Xu S, Liu Y F, Gong J, et al. Comparing differences among three ecosystem service proxies for soil erosion prevention and their combination characteristics at local scales[J]. Ecological Indicators,2020,110:1-10.

[20] 周来,李艳洁,孙玉军.修正的通用土壤流失方程中各因子单位的确定[J].水土保持通报,2018,38(1):169-174.

[21] 查良松,邓国徽,谷家川.1992—2013 年巢湖流域土壤侵蚀动态变化[J].地理学报,2015,70(11):1708-1719.