

砒砂岩区小流域坡沟系统地形及侵蚀分异规律

谢梦瑶<sup>1</sup>，任宗萍<sup>1</sup>，张晓明<sup>2</sup>，李占斌<sup>1</sup>，马晓妮<sup>1</sup>，李骁政<sup>1</sup>

(1.西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点试验室,西安 710048;  
2.中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

**摘要：**作为黄河流域典型生态脆弱区之一的砒砂岩区，水土流失治理难度大，区域地形、侵蚀在坡沟系统的分布迥异。区域土壤侵蚀研究多集中于刻画侵蚀空间分布及不同地类差异性研究，从坡沟系统细化开展研究工作较少，不能较好地为后续精细化治理提供支撑。因此，选取位于准格尔旗的 3 个典型砒砂岩区小流域，结合目视解译的流域沟沿线，开展了流域地形、水力侵蚀分布规律及其关联性研究。结果表明：流域地形因子分布特征与地貌特征分布一致，高值集中分布在沟道，低值则集中在坡面，且特拉沟小流域(覆沙)沟道处的地形因子统计值最大；砒砂岩典型流域水力侵蚀在坡面、沟道空间分布存在差异，流域坡面以微度侵蚀为主，占比达 87%~97%，沟道微度侵蚀占比较坡面该值下降 54%~72%，什卜尔泰支沟(裸露)沟道处的水力侵蚀模数均值最高，达 97.5 t/(hm<sup>2</sup>·a)；坡度、地表粗糙度、地表切割深度与水力侵蚀模数呈显著正相关关系( $p<0.001$ )，阳坡成为强度侵蚀以上单元的主要分布坡向，占比达 56.8%~75.8%。因此，该区在后续小流域综合治理过程中，沟道及其阳坡是亟待加强的区域。

**关键词：**砒砂岩区；坡沟系统；地形因子；水力侵蚀

**中图分类号：**S157.1      **文献标识码：**A      **文章编号：**1009-2242(2022)05-0112-09

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.016

Topography and Erosion Differentiation of Slope-gully  
System in Small Basin in Pisha Sandstone Area

XIE Mengyao<sup>1</sup>, REN Zongping<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoming<sup>2</sup>, LI Zhanbin<sup>1</sup>, MA Xiaoni<sup>1</sup>, LI Xiaozheng<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an  
University of Technology, Xi'an 710048; 2.State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in  
River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038)

**Abstract:** As one of the typical ecologically fragile areas in the Yellow River Basin, the Pisha sandstone area is difficult to control soil erosion, meanwhile the distribution of topography and erosion in the slope and gully systems is quite different in this area. Most of the studies on regional soil erosion have focused on the spatial distribution of erosion and the differences in erosion between different land types, but less work has been done on regional erosion from the perspective of slope and gully systems, which can't provide theoretical support for subsequent refined management. In this study, three typical small basins located in Jungar Banner were selected as the study area, firstly, the slope and gully system were divided according to the shoulder line extracted by visual interpretation, and then the distribution and correlation between topography and hydraulic erosion based on geostatistics were carried out. The Results showed that the distribution characteristics of topographic factors in the selected basins were consistent with the distribution of geomorphological characteristics, the high values were concentrated in the gully system, while the low values were concentrated in the slope system, meanwhile the maximum statistical values of the topographic factors appeared in the gully system of Telagou small basin (covered with sand). There existed differences in the spatial distribution of water erosion between the slope and gully systems in typical basins, in which the slope

systems were dominated by slight erosion, accounting for 87% to 97%, and the proportion of slight erosion in gully systems were 54% to 72% lower than that in the slope systems, while the highest average soil erosion modulus occurred in the gully system of Shibuertai small basin (bare rock), up to 97.5 t/(hm<sup>2</sup> · a). There was a significant positive correlation between slope, roughness, cutting depth and soil erosion modulus ( $p < 0.001$ ). Sunny slopes were the main distribution direction of the units above the intensity erosion, accounting for 56.8% to 75.8%. To sum up, gully systems and their sunny slopes were the parts that need to be strengthened urgently in the subsequent comprehensive management of small basins in this area.

**Keywords:** Pisha Sandstone Area; slope-gully system; topographic factors; soil erosion

作为我国主要的侵蚀类型,水力侵蚀具有分布广、面积大的特点,是我国水土资源流失的主要成因之一<sup>[1]</sup>。黄河流域晋陕蒙接壤处分布着 1.67 万 km<sup>2</sup> 的砒砂岩,该类岩层结构强度低,极易受到侵蚀外营力作用,受区域雨热同期及岩层遇水成泥特性影响,6—9 月水土流失现象频发,是黄河粗泥沙的主要来源区,与此同时,受降水量、土壤等非生物因子制约,该区生态环境脆弱,综合治理难度高,是黄河流域高质量发展亟需补强的主要短板之一<sup>[2]</sup>。为防治该区水土流失,区域采取系列工程、植被、耕作等水土保持措施,其中以退耕还林还草、梯田、淤地坝建设为主要先锋措施,在区域系统综合治理下,该区整体水土流失状况得到改善,已有研究<sup>[3-6]</sup>表明,区域植被向好、水土流失面积减少、河流输沙量锐减、流域蓄水保土能力提升。在此背景下,该区治理进程正处于从面转点、合理布局的关键转折点,因此细化研究该区生态薄弱区的侵蚀现状对后续因地制宜、有的放矢地科学管控具有重要意义。

坡沟系统作为黄土高原地区小流域治理的最小整体单元,其地形、生物学、侵蚀因子具有较明显的垂直分异性<sup>[7-8]</sup>。目前,坡沟系统的水土流失规律研究多结合植被格局、泥沙来源、侵蚀产沙开展,极大地丰富了坡沟系统水土流失机理及调控方式的认知,但上述研究<sup>[9-11]</sup>大多集中于小区、模拟流域尺度。以完整的流域坡沟系统为不同子系统视角分析地形、侵蚀分布差异性的研究较少,且由于该区退耕还林还草等系列政策的实施,区域生态稳步提升,区域侵蚀近况亟待更新。近年来,随着无人机测绘及处理技术的发展,为精细化分析流域坡沟系统地形、侵蚀分布提供了数据基础。因此,本文选取位于准格尔旗的 3 个典型砒砂岩区小流域调查单元,旨在探明相同气候条件下,典型小流域坡沟系统地形差异性、水力侵蚀分布及其关联性,提升对砒砂岩区小流域地形、侵蚀特征的再认识,促进砒砂岩区后续治理方向的明晰化。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

本研究选用了位于内蒙古自治区准格尔旗的二老虎支沟(39°47′—39°49′N,110°35′—110°37′E)、什卜尔泰支沟(39°47′—39°48′N,110°35′—110°37′E)、特拉沟支沟小流域(39°34′—39°35′N,110°57′—110°58′E)作为典型砒砂岩区小流域调查单元(图 1)。小流域面积分别为 42.9,5.7,2.1 hm<sup>2</sup>,综合流域基岩出露及覆盖类型,将上述小流域作为覆土区、裸露区、覆沙区的代表性小流域。流域隶属于温带大陆性气候带,雨热同期,根据准格尔旗气象站观测数据,研究区多年平均气温、平均降水量、平均风速分别为 7.7 ℃、400.7 mm、1.9 m/s。受限于当地土肥气热条件,区域植被类型多以抗旱物种为主,常见草本为针茅(*Stipa capillata* Linn.)、羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.),常见灌木为沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.),常见乔木为油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、山杏(*Armeniaca sibirica* (L.) Lam.)。

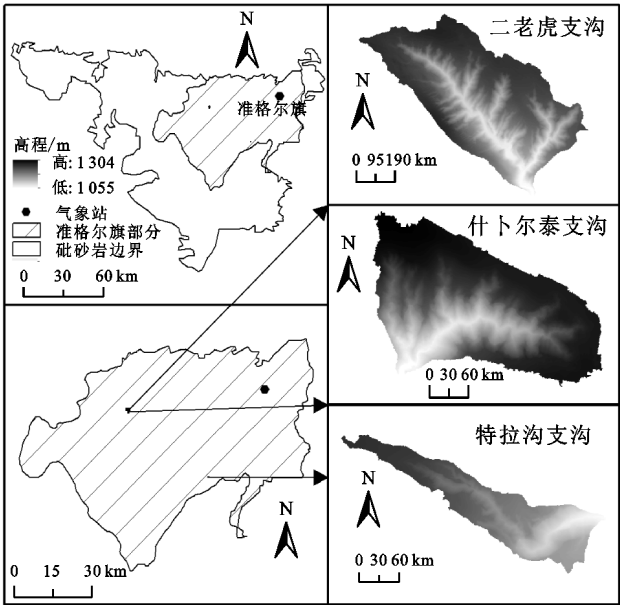


图 1 小流域位置示意

1.2 数据来源与处理

气象数据:准格尔旗 2013—2017 年日降水数据来源于当地气象局;地形数据:基于 Phantom 4 Pro 获取研究区数字图像,结合 Agisoft PhotoScan 对数字图像进行摄影测量处理,生成流域正射影像及高精度 DEM(分辨率

1 m);土地利用数据:根据小流域正射影像,通过目视解译小流域的沟沿线及土地利用分布(图 2);NDVI 数据:使用 ENVI 处理 Landsat 8 数据获取 2017 年数据(分辨率 30 m);土壤属性数据:颗分采用 Mastersizer 2000 测定,有机质采用重铬酸钾容量法<sup>[12]</sup>测定。

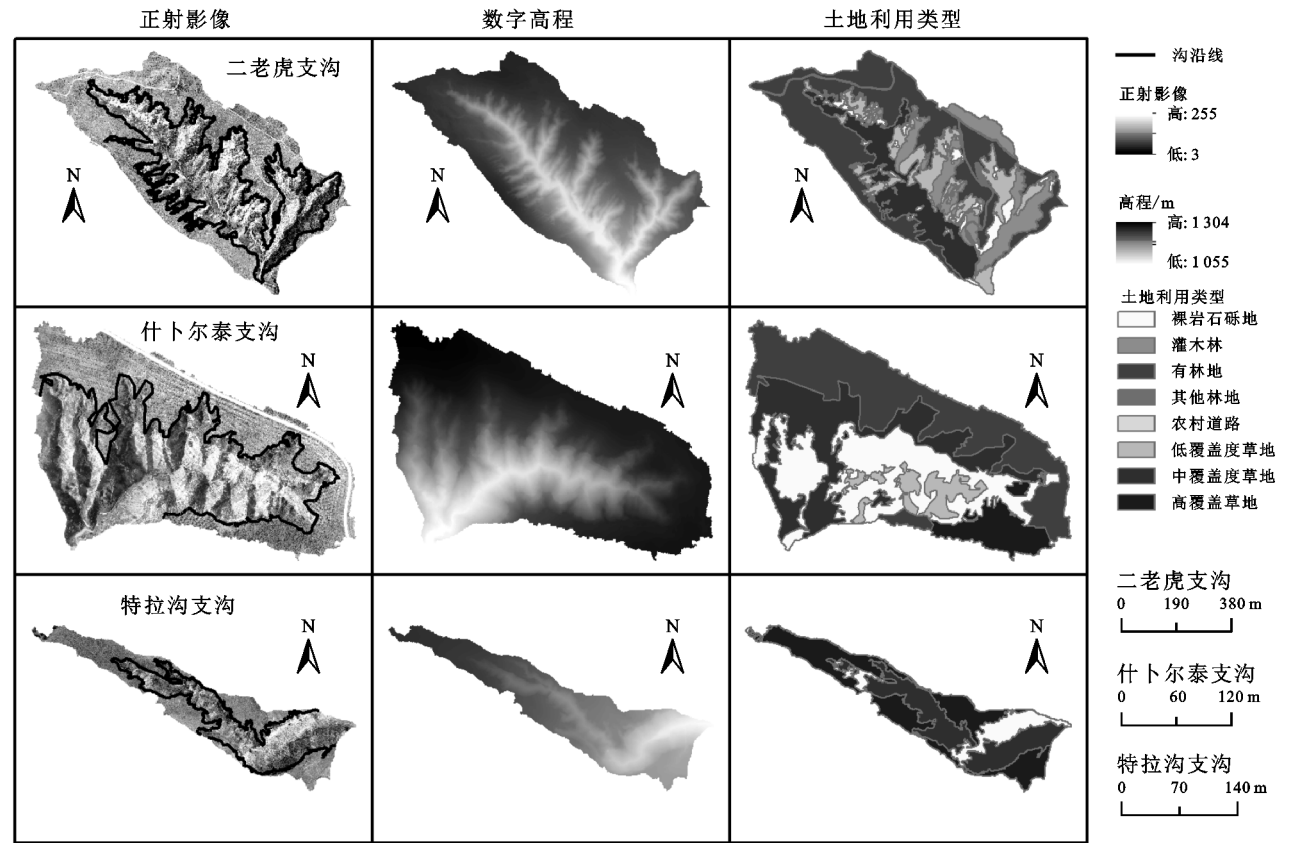


图 2 小流域数字影像

1.3 研究方法

1.3.1 小流域高分辨率地形因子提取与分析 研究使用 ArcGis 10.2 对小流域数字高程进行地形特征参数(坡度、地表粗糙度、地表切割深度、坡向)提取,结合沟沿线这一特殊的地貌结构线划分流域坡、沟系统,基于统计学理论对小流域地形属性的分布规律、统计特征开展相应分析。

1.3.2 CSLE 采用中国土壤流失方程<sup>[13]</sup> (CSLE) 计算小流域水力侵蚀模数,计算公式为:

$$M=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T \tag{1}$$

式中: $M$  为土壤水蚀模数 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ;  $R$  为降雨侵蚀力因子 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ;  $K$  为土壤可蚀性因子 $[(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$ ;  $L$  和  $S$  分别为坡长和坡度因子(无量纲);  $B$  为植被覆盖与生物措施因子(无量纲);  $E$  为工程措施因子(无量纲);  $T$  为耕作措施因子(无量纲)。

(1)降雨侵蚀力因子( $R$ )

采用章文波等<sup>[14]</sup> 公式计算准格尔旗的半月降雨

侵蚀力( $R_{ia}$ ),计算公式为:

$$R_{ia}=\alpha \sum_{j=1}^k D_{ja}^{\beta} \tag{2}$$

式中: $R_{ia}$ 为第  $a$  年第  $i$  个半月的侵蚀力 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$ ;  $\beta$  为模型参数,反映区域降雨特征;  $\alpha$  为再优化参数;  $k$  为第  $i$  个半月时段内的天数;  $D_{ja}$  为第  $a$  年第  $i$  个半月时段内第  $j$  天的侵蚀性日雨量(侵蚀性日降雨量标准为日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ ,否则以 0 计算)。

根据 $R_{ia}$ 推算研究区多年平均半月降雨侵蚀力( $\overline{R}_i$ ):

$$\overline{R}_i=\frac{\sum_{a=1}^N R_{ia}}{N} \tag{3}$$

式中: $\overline{R}_i$ 为第  $i$  个半月的多年平均半月降雨侵蚀力 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ;  $N$  为年数。

则多年平均年降雨侵蚀力( $\overline{R}$ ):

$$\overline{R}=\sum_{i=1}^{24} \overline{R}_i \tag{4}$$

式中: $\overline{R}$  为多年平均半月降雨侵蚀力 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ;  $i$  为半月数。

多年平均半月降雨侵蚀力占年降雨侵蚀力的比例为:

$$R_i = \frac{\overline{R_i}}{\overline{R}} \tag{5}$$

式中: $R_i$  为第  $i$  个半月的多年平均半月降雨侵蚀力占年降雨侵蚀力的比例。

(2)土壤可蚀性因子( $K$ )  
结合实测土壤理化性质,采用 Williams 模型<sup>[15]</sup>计算土壤可蚀性( $K$ ):

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 S_a \left( 1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \left( \frac{S_i}{C_l + S_i} \right)^{0.3} \left[ 1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \left[ 1 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n)} \right] \times 0.1317 \tag{6}$$

式中: $K$  为土壤可蚀性因子 $[(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$ ;  $S_n = 1 - S_a/100$ ;  $S_a$  为砂粒含量(%);  $S_i$  为粉粒含量(%);  $C_l$  为黏粒含量(%);  $C$  为有机碳含量(%); 0.131 7 为  $K$  值由美国制转国际制系数。

(3)坡长和坡度因子( $L$ 、 $S$ )  
坡长和坡度因子基于 LS\_Tool<sup>[16]</sup>提取,计算方法<sup>[13]</sup>为:

$$L_i = \frac{\lambda_i^{m+1} - \lambda_{i-1}^{m+1}}{(\lambda_i - \lambda_{i-1})(22.13)^m} \tag{7}$$

式中: $L_i$  为第  $i$  段坡长因子;  $\lambda_i$  和  $\lambda_{i-1}$  分别为汇流起点到第  $i$  和第  $i-1$  个栅格的累计坡长(m);  $m$  坡长指数,  $m = 0.2 (\theta \leq 1^\circ)$ 、 $m = 0.3 (1^\circ < \theta \leq 3^\circ)$ 、 $m = 0.4 (3^\circ < \theta \leq 5^\circ)$ 、 $m = 0.5 (\theta > 5^\circ)$ 。

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \tag{8}$$

式中: $S$  为坡度因子;  $\theta$  为坡度( $^\circ$ )。

(4)植被覆盖与生物措施因子( $B$ )  
园地、林地、草地  $B$  因子采用计算公式为:

$$B = \sum_{i=1}^{24} \text{SLR}_i \times R_i \tag{9}$$

式中: $B$  为植被覆盖与生物措施因子;  $\text{SLR}_i$  为第  $i$  个半月的土壤流失比率;  $R_i$  为第  $i$  个半月的多年平均半月降雨侵蚀力占年降雨侵蚀力的比例。

灌木林地  $\text{SLR}_i$  计算公式为:

$$\text{SLR}_i = \frac{1}{1.17647 + 0.86242 \times 1.05905^{100 \times \text{FVC}}} \tag{10}$$

果园、有林地、其他林地  $\text{SLR}_i$  计算公式为:  
 $\text{SLR}_i = 0.44468 \times \exp(-3.20096 \times \text{GD}) -$

$$0.04099 \times \exp(\text{FVC} - \text{FVC} \times \text{GD}) + 0.025 \tag{11}$$

草地  $\text{SLR}_i$  计算公式为:

$$\text{SLR}_i = \frac{1}{1.25 + 0.78845 \times 1.05968^{100 \times \text{FVC}}} \tag{12}$$

式中: $\text{SLR}_i$  为第  $i$  个半月的土壤流失比率;  $\text{FVC}$  为植被覆盖度;  $\text{GD}$  为乔木林林下盖度。

(5)区域内主要水土保持工程为鱼鳞坑,故对应的水土保持工程措施因子( $E$ )取值为 0.249<sup>[17]</sup>。

(6)小流域无耕地,因此耕作措施因子( $T$ )取值为 1。

## 2 结果与分析

2.1 砒砂岩区典型小流域地形差异性分析  
选取的典型小流域的坡度、地表粗糙度、地表切割深度、坡向特征见图 3。从小流域、坡面、沟道 3 种范围对上述地形因子进行多视角分析,结果显示,坡度、地表粗糙度、地表切割深度在 3 种范围内排序相一致,小流域上来看各统计值大小依次为特拉沟支沟(覆沙)、什卜尔泰支沟(裸露)、二老虎支沟(覆土),受流域坡面、沟道面积比影响,当统计范围变换至坡面、沟道时,地形因子统计值的大小排序在什卜尔泰支沟、二老虎支沟发生变化(表 1)。与此同时,综合对比各地形因子在 3 种范围内的均值和标准差分布,沟道上述统计值均大于坡面,说明该区坡面地形较平缓,沟道地形破碎且较坡面地形差异较大。以坡度为例,小流域范围内,均值为  $21.8^\circ \sim 27.3^\circ$ ;坡面范围内,均值为  $6.0^\circ \sim 13.2^\circ$ ;沟道范围内,均值上升至  $34.5^\circ \sim 41.6^\circ$ 。根据小流域坡度分级占比(图 4),二老虎支沟、什卜尔泰支沟在小流域及坡面范围内以  $0^\circ \sim 5^\circ$  为主要坡度区间,沟道范围内则以  $35^\circ \sim 40^\circ$  为主要坡度区间;特拉沟支沟在坡面范围内的主要坡度区间为  $5^\circ \sim 10^\circ$ ,小流域及沟道范围内  $> 45^\circ$  的坡度占比大于其他分级下的占比,上述结果主要受区域侵蚀沟发育过程影响,在一定程度上辅证了覆沙小流域的溯源侵蚀较其他覆盖(覆土、裸露)小流域剧烈。根据小流域坡向占比(表 2),二老虎支沟、什卜尔泰支沟以阳坡(东南坡、南坡、西南坡、西坡)为主,占比为  $55.6\% \sim 70.6\%$ ;特拉沟支沟以阴坡(北坡、东北坡、东坡、西北坡)为主,占比为  $54.2\% \sim 55.4\%$ 。

2.2 砒砂岩区典型小流域水力侵蚀评价  
水蚀因子图层经叠置分析得到砒砂岩区典型流域水力侵蚀空间分布(图 5),典型小流域的水力侵



蚀模数在小流域、坡面、沟道 3 种范围内的统计结果(表 3)显示,区域水力侵蚀模数统计值在小流域、沟道范围内排序一致,呈什卜尔泰支沟(裸露)>特拉沟支沟(覆沙)>二老虎支沟(覆土);坡面范围内水力侵蚀模数统计值排序发生变化,大小依次为特拉沟支沟、二老虎支沟、什卜尔泰支沟。总体上,区域典型小流域的水力侵蚀模数高值位于沟道,坡面水力侵蚀模数差异较小,小流域范围内,均值为 24.5~58.5 t/(hm<sup>2</sup>·a);坡面范围内,均值为 1.5~3.9 t/(hm<sup>2</sup>·a);

沟道范围内,均值上升至 49.3~97.5 t/(hm<sup>2</sup>·a)。由小流域水力侵蚀分级占比(表 4)可以得出,小流域及坡面范围内,微度侵蚀为小流域的主要侵蚀分级,占比分别超过 54.7%,87.2%,沟道范围内,流域各侵蚀分级的比重发生变化,微度侵蚀以上的占比增加,达 67.2%。上述研究结果显示,典型流域的水力侵蚀空间分布与地形因子在格局上存在差异,这是由于区域水力侵蚀除了受地形因子影响,亦与岩层上方覆被状况相关。

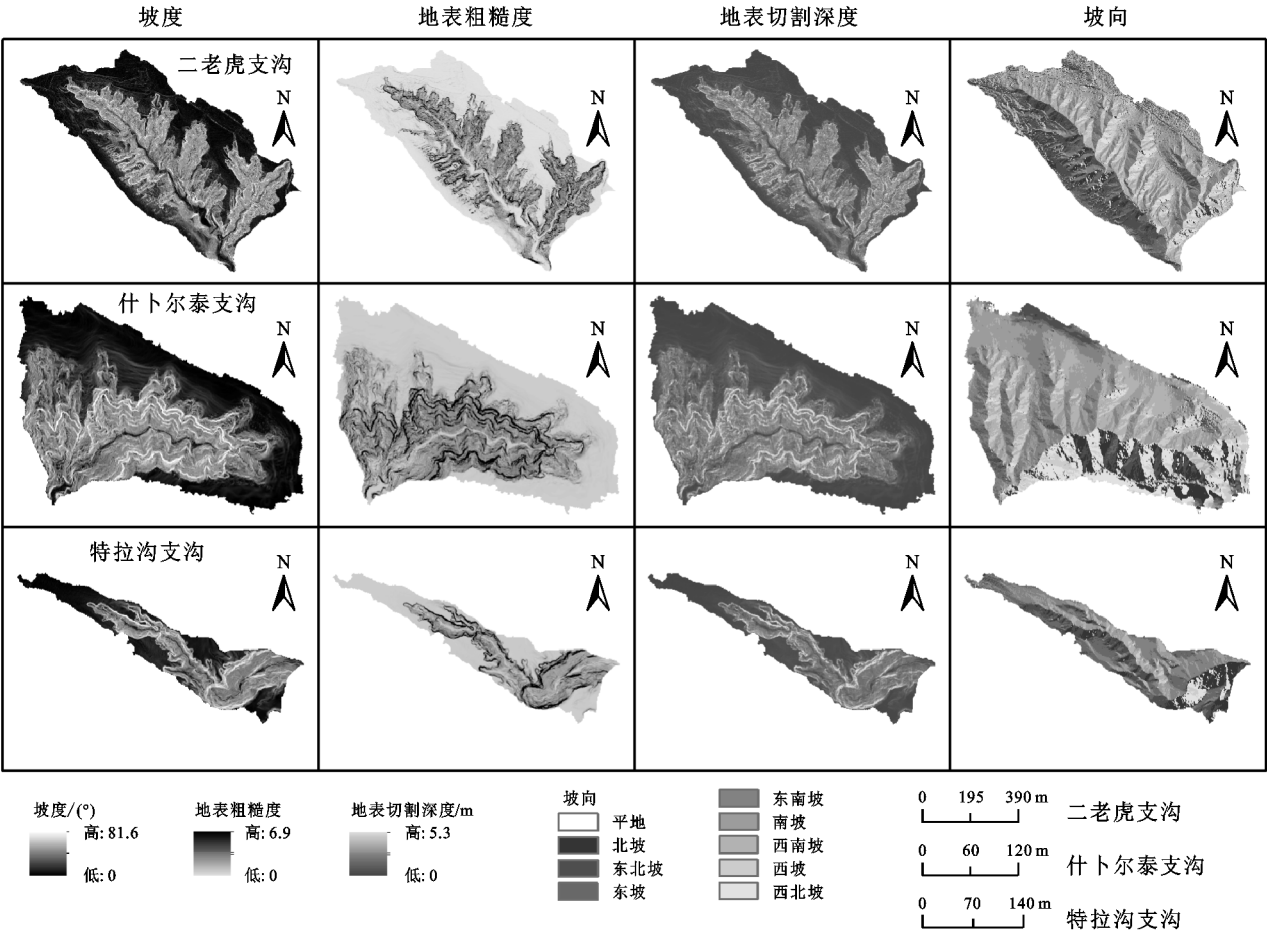


图 3 小流域高分辨率地形因子数据库

2.3 砒砂岩区典型小流域水力侵蚀及其与地形因子关联分析

以坡度、地表粗糙度、地表切割深度为自变量,侵蚀模数为因变量进行两变量相关分析(表 5),分析结果显示,上述 3 类地形指标与水力侵蚀模数呈显著正相关关系( $p<0.001$ ),水力侵蚀模数与各地形因子相关性为  $p_{\text{水力侵蚀模数,坡度}} > p_{\text{水力侵蚀模数,地表切割深度}} > p_{\text{水力侵蚀模数,地表粗糙度}}$ ,与此同时,小流域尺度上各因子的相关性排序一致,大小依次为什卜尔泰支沟(裸露)、二老虎支沟(覆土)、特拉沟支沟(覆沙),说明相比于其他覆盖(覆土、裸露),覆沙小流域的地形除了受水力侵蚀这一重要的地形重塑作用影响,仍存在其余较

显著因素共同作用。

提取了不同侵蚀分级背景下的坡度、地表粗糙度、地表切割深度均值及坡向占比(图 6),结果显示,不同侵蚀分级下,3 个典型小流域坡度、地表粗糙度、地表切割深度均值的分布较一致,总体随侵蚀分级增长而增加;各侵蚀分级在坡向的分布结果显示,当砒砂岩区典型小流域侵蚀达强度侵蚀以上,阳坡成为主要分布坡向,占比达 56.8%~75.8%,其中特拉沟支沟小流域在剧烈及极强度分级下东南坡占比达该类型侵蚀像元的 52.3%,41.2%,结合 2.1 和 2.2 节的分析结果表明,沟道及其阳坡是本次研究流域发生水土流失的关键点位。

表 1 小流域地形因子统计值

| 小流域名称  | 地形因子     | 均值    |       |       | 标准差   |       |       |
|--------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        |          | 小流域   | 坡面    | 沟道    | 小流域   | 坡面    | 沟道    |
| 二老虎支沟  | 坡度/(°)   | 21.84 | 10.32 | 35.22 | 16.59 | 9.93  | 12.13 |
| 什卜尔泰支沟 |          | 22.88 | 6.05  | 34.49 | 17.50 | 6.05  | 12.74 |
| 特拉沟支沟  |          | 27.83 | 13.23 | 41.62 | 19.43 | 13.78 | 12.77 |
| 二老虎支沟  | 地表粗糙度    | 1.15  | 1.04  | 1.29  | 0.22  | 0.10  | 0.25  |
| 什卜尔泰支沟 |          | 1.17  | 1.01  | 1.28  | 0.25  | 0.04  | 0.27  |
| 特拉沟支沟  |          | 1.27  | 1.08  | 1.45  | 0.39  | 0.26  | 0.41  |
| 二老虎支沟  | 地表切割深度/m | 0.29  | 0.13  | 0.49  | 0.27  | 0.24  | 0.10  |
| 什卜尔泰支沟 |          | 0.32  | 0.07  | 0.49  | 0.30  | 0.08  | 0.27  |
| 特拉沟支沟  |          | 0.41  | 0.19  | 0.63  | 0.38  | 0.29  | 0.33  |

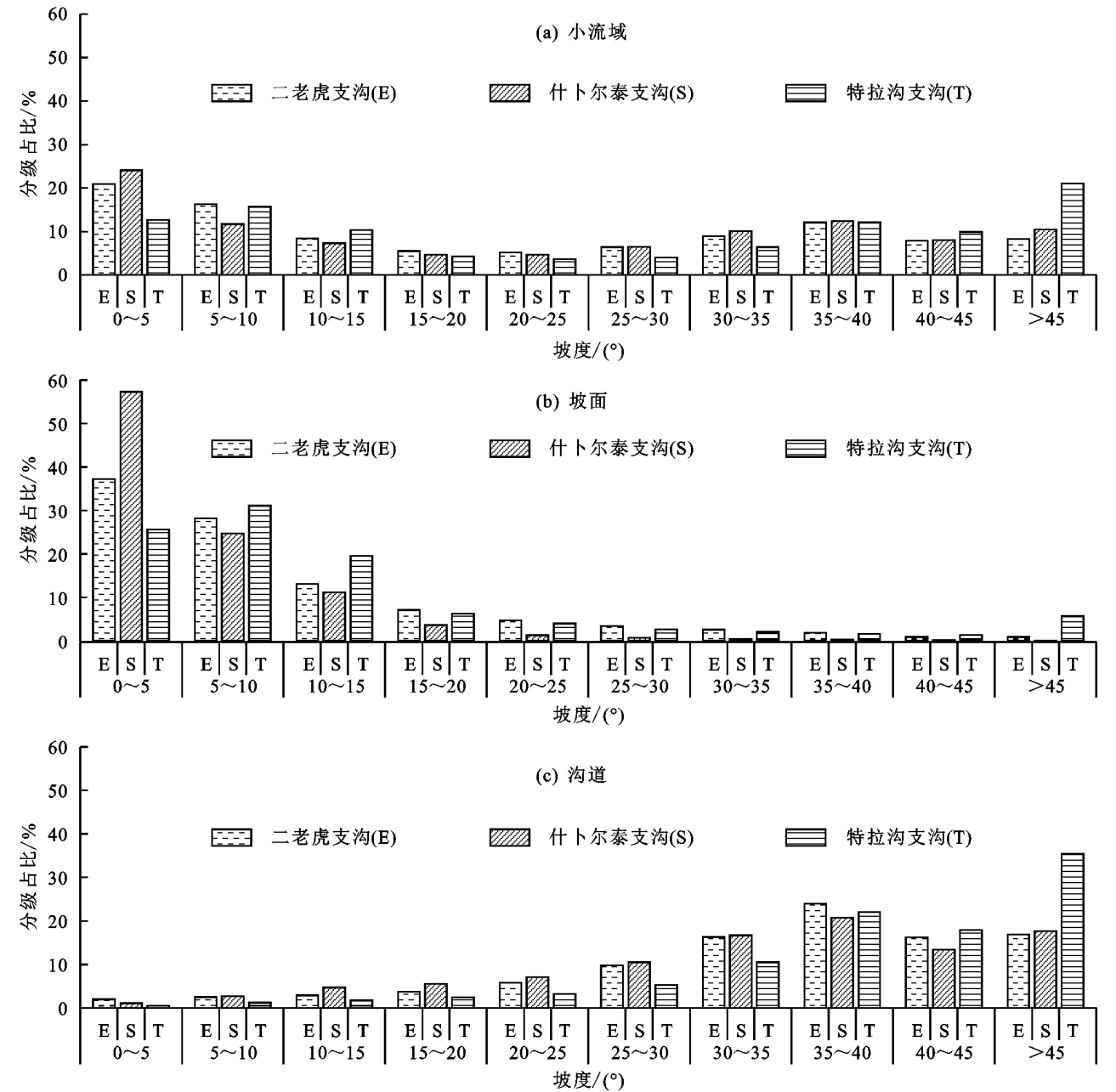


图 4 小流域坡度分级占比

表 2 小流域坡向分级占比

单位: %

| 分类  | 二老虎支沟 |      |      | 什卜尔泰支沟 |      |      | 特拉沟支沟 |      |      |
|-----|-------|------|------|--------|------|------|-------|------|------|
|     | 小流域   | 坡面   | 沟道   | 小流域    | 坡面   | 沟道   | 小流域   | 坡面   | 沟道   |
| 平地  | 0     | 0    | 0    | 0.2    | 0.4  | 0    | 0     | 0    | 0    |
| 北坡  | 7.1   | 6.7  | 7.6  | 8.4    | 7.2  | 9.3  | 13.2  | 7.0  | 19.2 |
| 东北坡 | 15.1  | 19.0 | 10.6 | 6.1    | 6.1  | 6.2  | 15.0  | 13.5 | 16.4 |
| 东坡  | 13.4  | 14.5 | 12.1 | 7.5    | 5.1  | 9.2  | 21.7  | 32.2 | 11.7 |
| 东南坡 | 14.1  | 12.5 | 15.9 | 15.1   | 12.8 | 16.8 | 23.5  | 29.4 | 17.8 |
| 南坡  | 16.2  | 20.1 | 11.5 | 22.3   | 32.1 | 15.6 | 13.4  | 11.2 | 15.5 |
| 西南坡 | 15.4  | 15.6 | 15.1 | 18.0   | 17.4 | 18.2 | 6.4   | 3.2  | 9.5  |
| 西坡  | 11.8  | 7.4  | 16.8 | 10.6   | 8.3  | 12.2 | 1.9   | 0.8  | 3.0  |
| 西北坡 | 7.0   | 4.1  | 10.4 | 11.7   | 10.6 | 12.5 | 4.9   | 2.7  | 7.0  |

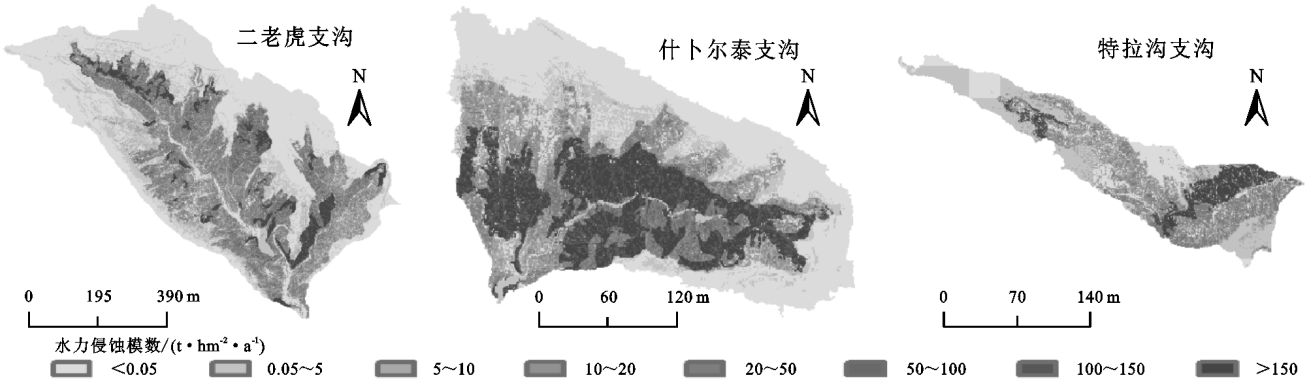


图 5 小流域水力侵蚀模数分布

表 3 小流域水力侵蚀模数统计值

单位: t/(hm<sup>2</sup> · a)

| 小流域名称  | 均值   |     |      | 标准差   |      |       |
|--------|------|-----|------|-------|------|-------|
|        | 小流域  | 坡面  | 沟道   | 小流域   | 坡面   | 沟道    |
| 二老虎支沟  | 24.5 | 3.1 | 49.3 | 64.4  | 15.4 | 86.7  |
| 什卜尔泰支沟 | 58.5 | 1.5 | 97.5 | 103.0 | 10.9 | 118.6 |
| 特拉沟支沟  | 32.1 | 3.9 | 57.9 | 73.3  | 12.3 | 93.6  |

表 4 小流域水力侵蚀分级占比

单位: %

| 分级  | 二老虎支沟 |      |      | 什卜尔泰支沟 |      |      | 特拉沟支沟 |      |      |
|-----|-------|------|------|--------|------|------|-------|------|------|
|     | 小流域   | 坡面   | 沟道   | 小流域    | 坡面   | 沟道   | 小流域   | 坡面   | 沟道   |
| 微度  | 61.1  | 92.9 | 24.6 | 54.7   | 97.3 | 25.3 | 58.7  | 87.2 | 32.8 |
| 轻度  | 18.0  | 4.3  | 33.7 | 12.1   | 1.9  | 19.1 | 20.8  | 9.4  | 31.0 |
| 中度  | 11.8  | 2.2  | 22.8 | 5.5    | 0.3  | 9.2  | 6.8   | 2.9  | 10.1 |
| 强度  | 3.0   | 0.4  | 6.1  | 3.8    | 0.2  | 6.3  | 2.6   | 0.2  | 4.8  |
| 极强度 | 2.1   | 0.1  | 4.4  | 10.1   | 0.3  | 17.0 | 4.7   | 0.2  | 9.0  |
| 剧烈  | 4.0   | 0.2  | 8.4  | 13.7   | 0.1  | 23.1 | 6.5   | 0.1  | 12.4 |

表 5 小流域水力侵蚀模数及其与地形因子的相关性分析

| 小流域名称  | 坡度      | 地表粗糙度   | 地表切割深度  |
|--------|---------|---------|---------|
| 二老虎支沟  | 0.43*** | 0.40*** | 0.42*** |
| 什卜尔泰支沟 | 0.58*** | 0.49*** | 0.55*** |
| 特拉沟支沟  | 0.38*** | 0.31*** | 0.35*** |

注:\*\*\*表示显著性水平为 0.001。

3 讨论

本研究表明,不同覆盖下的砒砂岩区典型小流域地形指标存在差异,覆沙小流域地表较其他覆盖(覆土、裸露)小流域破碎且坡度较陡。有关覆沙坡面的对照试验<sup>[18]</sup>表明,相似降水条件下,覆沙坡面较对照组产沙量增加,且侵蚀沟多以沟壁扩张与溯源侵蚀形

式扩张,上述结论在一定程度上与本研究得到的特拉沟支沟(覆沙)的地形指标统计值较其他覆盖小流域(覆土、裸露)偏大这一结论相互验证。此外,本研究选取的 3 个典型小流域,坡面尺度上,以林草为主要土地利用类型,因此坡面尺度的侵蚀模数与地形因子大小相一致,但沟道尺度上,受基岩出露影响,侵蚀模数量级排序发生变化,什卜尔泰支沟(裸露)的侵蚀模数约为二老虎支沟(覆土)的 2 倍,因此,砒砂岩区综合治理重点亟需向裸露砒砂岩及沟道治理调整。本文中关于典型小流域水力侵蚀与地形因子的关联分析显示,坡度、地表粗糙度、地表切割深度大的地方,

易发生较严重的侵蚀,且因阳坡植被生境(土壤水分限制为主因)弱于阴坡<sup>[19-21]</sup>,该坡向的地貌单元侵蚀剧烈程度较大。相较于仅从流域尺度研究流域侵蚀,本文补充完善了坡面、沟道尺度的侵蚀对照结果,并在此基础上量化了地形因子与侵蚀的互相关关系,以期后续治理提供更精准的科学建议。事实上,侵蚀是一个比本文研究更复杂的系统,受砒砂岩吸水易崩解特性影响,该区诸如崩塌、泻溜等重力侵蚀现象较多,后续进一步研究中,可补充沟道裸露基岩处失稳临界的相关机理性试验深化黄土高原重点薄弱区的侵蚀研究,促进该区科学治理。

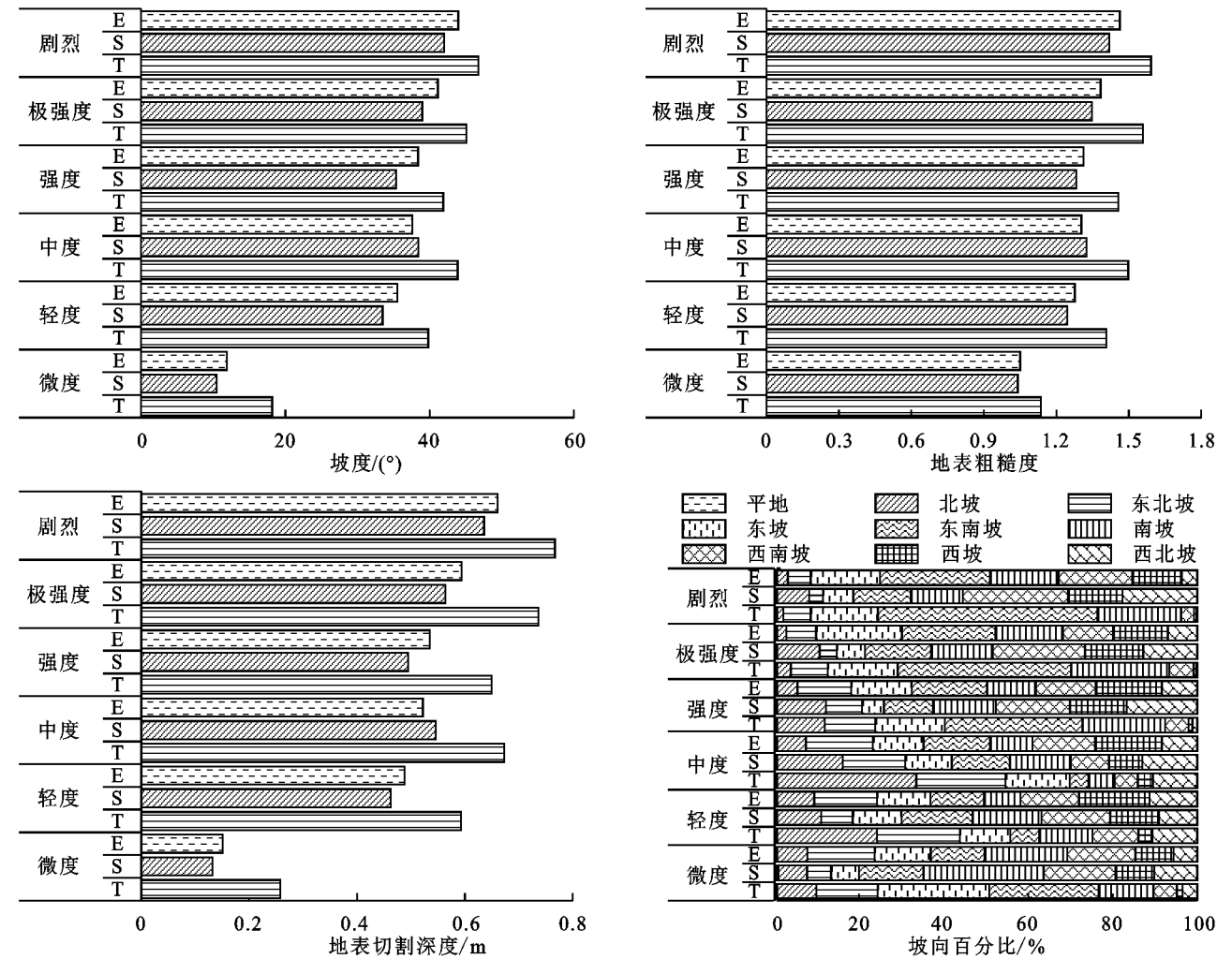


图 6 不同土壤侵蚀分级背景下的地形特征

4 结论

(1)小流域范围内,各地形因子统计值呈特拉沟支沟(覆沙)>什卜尔泰支沟(裸露)>二老虎支沟(覆土);小流域、沟道范围内,水力侵蚀模数统计值呈什卜尔泰支沟(裸露)>特拉沟支沟(覆沙)>二老虎支沟(覆土)。(2)坡面、沟道范围内的地形因子和坡面范围内的水力侵蚀模数统计值变化为特拉沟支沟(覆沙)>二老虎支沟(覆土)>什卜尔泰支沟(裸露),上述地形因子统

计值变化受流域坡面、沟道面积比影响,水力侵蚀模数统计值变化受流域坡面、沟道地形、覆被差异影响。(3)各流域沟道范围内的地形因子和水力侵蚀模数均值均大于坡面范围内的对应值,且较坡面该值差异大,流域坡面以微度侵蚀为主,占比达 87%~97%,沟道微度侵蚀占比较坡面该值下降 54%~72%,是后续小流域治理亟待加强的部分。(4)砒砂岩典型流域坡度、地表粗糙度、地表切割深



度与水力侵蚀模数呈显著正相关关系( $p < 0.001$ ),随着侵蚀分级增加上述地形因子均值总体增加;砭砂岩区典型小流域侵蚀达强度侵蚀以上,阳坡成为主要分布坡向,占比达 56.8%~75.8%。

#### 参考文献:

- [1] Wang H, Zhao W W, Li C J, et al. Vegetation greening partly offsets the water erosion risk in China from 1999 to 2018 [J]. *Geoderma*, 2021, 401: e115319.
- [2] 姚文艺,肖培青,张攀.补强砭砂岩区治理短板筑牢黄河流域生态安全屏障[J]. *中国水土保持*, 2020(9): 61-65.
- [3] 胡春宏.黄河水沙变化与治理方略研究[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(10): 1-11.
- [4] 姚文艺. 新时代黄河流域水土保持发展机遇与科学定位[J]. *人民黄河*, 2019, 41(12): 1-7.
- [5] 马晓妮,任宗萍,谢梦瑶,等.砭砂岩区植被覆盖度环境驱动因子量化分析:基于地理探测器[J]. *生态学报*, 2022, 42(8): 3389-3399.
- [6] Xie M Y, Ren Z P, Li Z B, et al. Changes in runoff and sediment load of the Huangfuchuan River following a water and soil conservation project [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 75(5): 590-600.
- [7] 王承书,高峰,孙文义,等.黄土丘陵沟壑区坡沟系统不同降雨类型的土壤入渗特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(8): 3111-3122.
- [8] 朱冰冰,霍云霁,周正朝.黄土高原坡沟系统植被格局对土壤侵蚀影响研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2021, 19(4): 149-156.
- [9] 张霞,李鹏,李占斌,等.坡面草带分布对坡沟水土流失的防控作用及其优化配置[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(7): 122-128.
- [10] Wang H, Wang J, Zhang G H. Impact of landscape positions on soil erodibility indices in typical vegetation-restored slope-gully systems on the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2021, 201: e105235.
- [11] Zhu P Z, Zhang G H, Wang H X, et al. Effectiveness of typical plant communities in controlling runoff and soil erosion on steep gully slopes on the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: e126714.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社, 2000.
- [13] Liu B Y, Xie Y, Li Z G, et al. The assessment of soil loss by water erosion in China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020, 8(4): 430-439.
- [14] 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.
- [15] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-The erosion/productivity impact calculator: 1. Model Documentation [J]. *U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin*, 1990(1768): e235.
- [16] 杨力华,庞国伟,杨勤科,等.近 50 年来王茂沟流域侵蚀沟变化及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 64-70.
- [17] 白雪莲,郑海颖,王理想,等.砭砂岩黄土区植被盖度对土壤侵蚀的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(11): 3776-3784.
- [18] Ren Z P, Zhang X, Zhang X C, et al. Sand cover enhances rill formation under laboratory rainfall simulation [J]. *Catena*, 2021, 205: e105472.
- [19] Xu Y X, Zhu G F, Wan Q Z, et al. Effect of terrace construction on soil moisture in rain-fed farming area of Loess Plateau [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2021, 37: e100889.
- [20] Su B Q, Su Z X, Shangguan Z P. Trade-off analyses of plant biomass and soil moisture relations on the Loess Plateau [J]. *Catena*, 2021, 197: e104946.
- [21] 徐澜,王云强,孙慧,等.黄土高原水蚀风蚀交错带小流域土壤水分季节变化特征与主控因素[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 122-129.