

宁南山区侵蚀沟不同部位土壤理化性质及可蚀性研究

王亚娟¹, 陈云明^{1,2}, 孙亚荣¹, 赵敏¹

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨陵 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨陵 712100)

摘要: 侵蚀沟沟头前进,沟岸扩张,沟床下切严重影响区域粮食生产和环境质量。以宁夏彭阳县玉洼流域 3 个稳定侵蚀沟的沟头、沟床、沟岸为对象,通过野外调查取样与室内试验相结合的方法,分析了侵蚀沟不同部位(沟头、沟床、沟岸)的土壤理化性质及可蚀性 K 值,采集 0—10, 10—25, 25—40, 40—55, 55—70 cm 土壤,测定并计算土壤质量含水量(θ)、土壤容重(ρ)、土壤总孔隙度(φ)、土壤黏粒(CLA)、粉粒(SIL)、砂粒(SAN)含量、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量($R_{0.25}$)、土壤平均重量直径(MWD)、土壤几何平均直径(GMD)及土壤有机质(SOM)含量,利用 EPIC 模型计算土壤可蚀性 K 值。结果表明:(1)侵蚀沟各部位平均质量含水量、总孔隙度、有机质、粉粒含量、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量、平均重量直径、几何平均直径的大小顺序均为沟床 $>$ 沟岸 $>$ 沟头,各部位平均土壤容重、砂粒含量为沟头 $>$ 沟岸 $>$ 沟床,平均土壤黏粒含量为沟岸 $>$ 沟头 $>$ 沟床,各部位土壤机械组成均为粉粒含量 $>$ 砂粒含量 $>$ 黏粒含量;(2)侵蚀沟各部位土壤可蚀性 K 值在 0.032 9~0.039 5($t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$),属于中可蚀性,平均可蚀性 K 值表现为沟头 $>$ 沟岸 $>$ 沟床;(3)侵蚀沟各部位土壤可蚀性 K 值与土壤粉粒、黏粒含量呈显著负相关,与土壤砂粒、有机质含量、质量含水量呈显著正相关,沟床土壤可蚀性 K 与 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 呈极显著负相关($p < 0.01$)。沟头作为侵蚀沟发育最活跃的部位,通过提高土壤有机质含量、粉粒含量来增加团聚体的数量和稳定性,从而降低土壤可蚀性。研究结果可为侵蚀沟生态稳定性及评估提供依据。

关键词: 宁南山区; 侵蚀沟; 沟头; 沟床; 沟岸; 土壤可蚀性 K 值; 土壤理化性质

中图分类号: S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)02-0011-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.02.002

Study on Physical and Chemical Properties and Erodibility of Soil in Different Parts of Erosion Gully in the Mountainous Area of South Ningxia

WANG Yajuan¹, CHEN Yunming^{1,2}, SUN Yarong¹, ZHAO Min¹

(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; 2.Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: The erosion of gully head forward, gully bank expansion, and gully bed cutting seriously affect regional grain production and environmental quality. Taking the gully head, gully bed, and gully bank of three stable eroded gullies in Yuwa Watershed of Pengyang County, Ningxia as subjects, this study combined field survey sampling with laboratory experiment. The soil physicochemical properties and erodibility K values of different parts of erosion gully (gully head, gully bed and gully bank) were analyzed. The 0—10, 10—25, 25—40, 40—55, 55—70 cm soil, soil mass water content (θ), soil bulk density (ρ), soil total porosity (φ), soil clay (CLA), soil silt (SIL), sand (SAN) content, >0.25 mm water-stable aggregate content ($R_{0.25}$), soil mean weight diameter (MWD), soil geometric mean diameter (GMD) and soil organic matter (SOM) content were collected, and EPIC model was used to calculate K value of soil erodibility. The results showed that: (1) The quality of each part of the erosion gully average moisture content, total porosity, organic matter, silt content, aggregate content of water stability > 0.25 mm, average weight diameter and geometric mean diameter of the size of the order of gully bed $>$ gully bank $>$ gully head, the average soil bulk density and sand content of each part were gully head $>$ gully bank $>$ gully bed,

the average soil clay content was gully bank > gully head > gully bed, the mechanical composition of the soil in each part was silt > sand > clay. (2) The K value of soil erodibility in each part of the erosion gully ranges from 0.032 9 to 0.039 5 ($\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$, which belonged to the medium erodibility. The average K value of erodibility was gully head > gully bank > gully bed. (3) The K value of soil erodibility was significantly negatively correlated with soil silt and clay content, and significantly positively correlated with soil sand content, organic matter and mass water content. Soil erodibility K value in gully bed was significantly negatively correlated with $R_{0.25}$, MWD and GMD ($p < 0.01$). As the most active part of erosion gully, the number and stability of aggregates were increased by increasing soil organic matter content and silt content, thus reducing soil erodibility. The results can provide basis for ecological stability and evaluation of erosion gully.

Keywords: Mountainous Area of South Ningxia; erosion gully; gully head; gully bed; gully bank; K value of soil erodibility; physical and chemical properties of soil

土壤侵蚀导致土壤退化,引起土壤肥力与质量下降^[1],制约着粮食生产、环境质量及土地生产可持续发展,已成为全球性的重大环境问题之一^[2]。宁夏南部是黄土高原土壤侵蚀较严重的地区之一,沟蚀是该区土壤侵蚀的主要类型^[3],侵蚀沟是水土流失的集中表现形式之一。沟头、沟床、沟岸是侵蚀沟的重要组成部分,三者地貌特征明显不同,沟头的溯源侵蚀、沟床的下切作用和沟岸的冲刷崩塌作用致使沟壑纵横,地表破碎,水土流失严重^[4]。土壤侵蚀因受其理化性质影响,可用土壤可蚀性 K 值评价抗侵蚀性能^[5],而土壤可蚀性 K 值很大程度上取决于土壤颗粒组成、土壤容重、孔隙度、土壤有机质含量等^[6]。地貌形态与土壤理化性质关系密切^[7],因此,地貌特征的差异会对土壤可蚀性有重要影响^[8],进而使得沟头、沟床和沟岸的抗侵蚀性能具有一定差异。分析侵蚀沟土壤可蚀性 K 值与土壤理化性质间的关系及其主要影响因素,对制定有效的预防保护措施、减弱土壤侵蚀带来的不利影响、改善土壤质量和提高区域水土保持能力具有重要意义^[9]。

目前报道的关于侵蚀沟的研究多侧重于其演变过程、发展方式、侵蚀临界条件和监测方法等方面^[10],针对土壤理化性质及可蚀性的研究主要集中在侵蚀沟沟头、集水区、沟床等单一部位或多个部位部分指标展开^[11],而对于侵蚀沟各部位土壤理化性质与可蚀性关系的对比研究相对较少。因此,分析侵蚀沟沟头、沟床和沟岸的土壤理化性质,对科学认识侵蚀沟不同部位土壤可蚀性与影响因子之间的关系极其重要,对促进侵蚀沟植物生长、防止土壤退化具有重要意义^[12]。

鉴于此,本研究以宁夏彭阳县玉洼流域稳定侵蚀沟不同部位(沟头、沟床、沟岸)为研究对象,通过对 3 个侵蚀沟不同部位共 9 个样点的不同土层进行土壤

取样,利用 EPIC 模型计算土壤可蚀性 K 值,对不同部位土壤可蚀性差异及其关键因素进行分析,明确侵蚀沟不同微地形的抗侵蚀能力,探讨土壤理化性质对土壤侵蚀的影响,为黄土高原侵蚀沟的防护及治理提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原西部、宁南山区彭阳县玉洼流域($35^{\circ}04'—36^{\circ}17'N, 106^{\circ}32'—106^{\circ}58'E$),属温带半干旱大陆性季风气候区。年均降水量 450~550 mm,年均气温 $7.4\sim 8.5^{\circ}\text{C}$,年均日照时间 2 311.2 h,海拔 1 292~2 486 m,年无霜期 140~170 天。土壤以黑垆土和黄绵土为主,植被稀疏,生态环境比较脆弱,水土流失严重。由于自然条件和人类活动等的影响,森林面积较小,灌木和草本植物分布较为广泛。主要乔木物种有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、杨树(*Populus*)等;灌木有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等;草本植物有长芒草(*Stipa bungeana*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)和鹅观草(*Roegneria kamoji*)等。

1.2 样地选择与调查

在室内分析研究区 2020 年高分 2 号遥感影像的基础上,于 2021 年 7 月采用 GPS 定位、野外实地测量及记录的方法,对研究区侵蚀沟的土壤类型、沟深、沟宽、沟长及沟内主要植被生长状况等基本情况进行调查,最后选取 3 条同一坡面且人为干扰较小的稳定侵蚀沟作为研究对象^[13]。选取样地时,运用“空间代替时间”的方法,选择同一坡向、同一土质,坡度、海拔差异较小,植被类型尽可能相同且长势均匀稳定的侵蚀沟作为研究样地,最大限度地缩小立地条件的差异。样地基本信息见表 1。

表 1 样地基本情况

侵蚀沟	沟长/ m	沟宽/ m	沟深/ m	坡向	部位	经度	纬度	海拔/ m	植被 盖度/%	优势种
1 号沟	15.5	16.6	5.0	阳坡	沟头	35°57′19″N	106°41′26″E	1609.8	65	猪毛蒿
					沟床	35°57′20″N	106°41′25″E	1603.7	58	赖草
					沟岸	35°57′19″N	106°41′25″E	1613.1	63	鹅观草
2 号沟	19.3	10.4	4.0	阳坡	沟头	35°57′30″N	106°41′32″E	1606.1	59	长芒草
					沟床	35°57′28″N	106°41′32″E	1695.6	43	赖草
					沟岸	35°57′29″N	106°41′33″E	1596.1	62	鹅观草
3 号沟	18.3	11.9	3.3	阳坡	沟头	35°57′32″N	106°41′34″E	1612.4	58	长芒草
					沟床	35°57′30″N	106°41′34″E	1602.9	47	赖草
					沟岸	35°57′31″N	106°41′35″E	1604.1	64	鹅观草

1.3 土壤样品采集与处理

于 2022 年 3 月,在所选取的 3 个稳定侵蚀沟的沟头、沟床、沟岸,共 9 个点位进行土壤样品采集。在距离沟头和沟岸 0.5~1.0 m 的位置分别挖 3 个 1.0 m×1.0 m 的土壤剖面,沟床随机挖 3 个 1 m×1 m 的土壤剖面,按 0—10,10—25,25—40,40—55,55—70 cm 分 5 层,用体积 100 cm³ 的环刀自下而上取样,土样用于土壤容重、质量含水量、总孔隙度的测定;用小铁铲在各土层挖取约 150 g 原状土,削去边缘受挤压的土壤后装入自封袋带回室内,每个点位各土层的样品均为 3 个重复,测定相关指标,取平均值,并以该平均值进行后续相关分析。风干时,将原状土沿土壤纹路掰分成小土块,去除植物残体及石块,风干后,分成 2 个亚样本,其中 50 g 土样用于团聚体的测定,另外分取 50 g,磨碎,过 2 mm 筛后用于土壤机械组成及有机质的测定。因此,共获得 405 份土壤样品用于土壤理化性质等指标的室内测定。

采用环刀法进行土壤容重和总孔隙度的测定,烘干法进行土壤质量含水量的测定,重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳,土壤颗粒组成采用 SM2000 型激光粒度仪测定,且分级依据美国制,土壤水稳性团聚体采用湿筛法测定,分别得到>5,5~2,2~1,1~0.5,0.5~0.25,<0.25 mm 粒级团聚体。

1.4 指标计算

土壤平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、>0.25 mm 水稳性团聚体含量($R_{0.25}$)计算公式分别为^[14]:

$$MWD = \sum X_i W_i / \sum W_i$$
$$GMD = \exp(\sum W_i \ln X_i / \sum W_i)$$
$$R_{0.25} = M_{r>0.25} / M_T \times 100\%$$

式中: X_i 为团聚体各粒径的平均直径(mm); W_i 为团聚体各粒径的百分含量; $M_{r>0.25}$ 为>0.25 mm 团聚体质量(g); M_T 为团聚体总质量(g)。

依据 EPIC 模型计算土壤可蚀性 K 值,公式为^[15]:
 $K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 \text{ SAN}(1.0 - \text{SIL}/100)]\} \times$

$$[\text{SIL}/(\text{CLA} + \text{SIL})]^{0.3} \times \{1.0 - 0.25C/[\text{C} + \exp(3.72 - 2.95C)]\} \times \{1.0 - 0.7\text{SN}_1/[\text{SN}_1 + \exp(-5.51 + 22.95\text{SN}_1)]\}$$

式中:SAN 为砂粒含量(%);SIL 为粉粒含量(%);CLA 为黏粒含量(%);C 为有机碳含量(%); $\text{SN}_1 = 1 - \text{SAN}/100$;K 值单位为美国制,计算后乘以 0.131 7 将其转化为国际制单位($\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ 。

1.5 数据分析与处理

数据经过 Excel 整理后,统计学分析运用 SPSS.25 软件进行。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较的方法(Duncan, $p < 0.05$)分析侵蚀沟不同部位同一土层和同一部位不同土层土壤理化性质及可蚀性 K 值之间的差异;采用 Pearson 相关分析法分析沟头、沟床和沟岸土壤可蚀性因子 K 及土壤理化性质之间的相关性;使用 Origin 2018 软件制图。

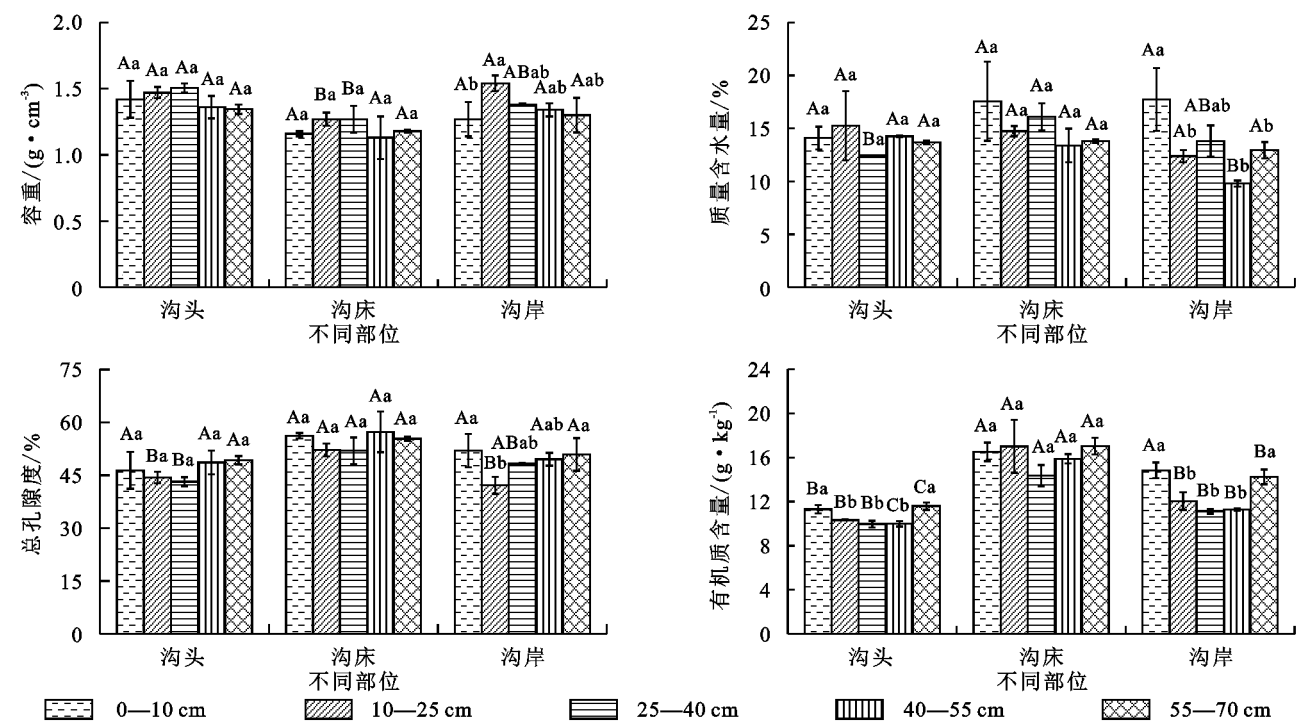
2 结果与分析

2.1 典型侵蚀沟不同部位土壤理化性质

由图 1 可知,侵蚀沟各部位土壤容重随土层深度先上升后下降,沟头(1.36~1.51 g/cm³)和沟床(1.13~1.27 g/cm³)各土层容重均无显著变化,沟岸表层(0—10 cm)明显低于其他土层($p < 0.05$),中层土壤容重沟床显著低于沟头和沟岸($p < 0.05$),平均土壤容重表现为沟头>沟岸>沟床;侵蚀沟沟床各土层土壤质量含水量无显著变化(13.40%~17.57%),沟头中层(10—55 cm)明显低于表层和深层(55—70 cm),沟岸表层显著高于其他土层($p < 0.05$),平均土壤质量含水量表现为沟床>沟岸>沟头;沟头(43.17%~49.30%)和沟床(52.02%~57.32%)各土层土壤总孔隙度均无显著变化,沟岸中层明显低于表层和深层,中层土壤总孔隙度沟床显著高于沟头和沟岸($p < 0.05$),平均土壤总孔隙度表现为沟床>沟岸>沟头;沟头、沟岸中层土壤有机质含量显著低于表层和深层($p < 0.05$),沟床各土层土壤有机质含量均无显著变化(14.35~17.03 g/kg)。表层土壤有机

质沟头显著低于沟床和沟岸,中层沟床显著高于沟头和沟岸,深层各部位土壤有机质含量差异显著,沟床

最高,沟头最低($p<0.05$),侵蚀沟各部位平均土壤有机质含量表现为沟床>沟岸>沟头。



注:不同大写字母表示同一土层不同部位差异显著;不同小写字母表示同一部位不同土层差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 侵蚀沟不同部位土壤容重、质量含水量、总孔隙度及有机质的变化

由图 2 可知,沟床各土层 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、黏粒、粉粒、砂粒含量均无显著差异,沟头、沟岸深层 $R_{0.25}$ 显著高于其他土层 ($p<0.05$),沟头各土层 MWD、粉粒、砂粒含量均无显著差异,沟岸表层 MWD、GMD 显著高于中层 ($p<0.05$),但各土层土壤黏粒、粉粒、砂粒含量均无显著差异,沟头深层 GMD 显著高于表层,而表层黏粒含量显著低于中层 ($p<0.05$)。表层 $R_{0.25}$ 、GMD 沟头显著低于沟床和沟岸,深层 MWD、GMD、黏粒含量沟岸显著高于沟头和沟床 ($p<0.05$),40—55 cm 粉粒含量沟床显著高于沟头和沟岸,而砂粒含量显著低于沟头和沟岸,深层粉粒含量沟头显著低于沟岸和沟床 ($p<0.05$)。总体来说,侵蚀沟各部位平均 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、粉粒含量均表现为沟床>沟岸>沟头,平均砂粒含量为沟头>沟岸>沟床,平均黏粒含量为沟岸>沟头>沟床,各部位土壤机械组成均为粉粒含量>砂粒含量>黏粒含量。沟头土壤水稳性团聚体的数量较小且稳定性较差,侵蚀沟各部位土壤细小颗粒较少,导致有机质含量少,抵抗侵蚀的能力较弱。

2.2 典型侵蚀沟不同部位土壤可蚀性 K 值

由图 3 可知,沟头表层土壤可蚀性因子(K)显著高于中层 ($p<0.05$),沟床、沟岸各土层 K 值均无显著性差异。中层 K 值沟头显著高于沟岸,而深层沟头显著高于沟床和沟岸 ($p<0.05$)。侵蚀沟各部位 K 值在 0.032 9~0.039 5($t\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot$

$\text{hm}^2)$,各部位平均 K 值表现为沟头>沟岸>沟床,说明相比沟岸和沟床,沟头越易发生土壤侵蚀。

2.3 典型侵蚀沟不同部位土壤理化性质及可蚀性因子(K)的相关性

2.3.1 侵蚀沟沟头土壤理化性质及可蚀性因子(K)间的相关性 由表 2 可知,沟头土壤可蚀性(K)值与土壤砂粒、有机质呈极显著正相关 ($p<0.01$),土壤有机质与土壤黏粒呈显著负相关、与砂粒呈显著正相关,土壤几何平均直径与>0.25 mm 水稳性团聚体含量呈显著正相关 ($p<0.05$),土壤容重与土壤总孔隙度呈极显著负相关 ($p<0.01$)。由于沟头地形地貌显著不同于沟床和沟岸,水土流失严重,因此,可通过降低沟头土壤颗粒中粉粒含量增加抗侵蚀能力,因为黏粒比粉粒胶结能力强,砂粒颗粒大,抵抗侵蚀介质剥蚀和搬运能力比粉粒强。

2.3.2 侵蚀沟沟床土壤理化性质及可蚀性因子(K)间的相关性 由表 3 可知,沟床土壤容重与总孔隙度呈极显著负相关,土壤有机质与土壤平均重量直径呈显著负相关,>0.25 mm 水稳性团聚体含量与土壤平均重量直径、土壤几何平均直径呈极显著正相关 ($p<0.01$),与土壤可蚀性 K 值、砂粒呈极显著负相关,与土壤黏、粉粒呈显著正相关;土壤平均重量直径与土壤几何平均直径、土壤黏粒呈极显著正相关,与土壤可蚀性 K 值呈极显著负相关,土壤几何平均直

径与土壤黏、粉粒呈显著正相关($p<0.05$),与 K 值、砂粒呈极显著负相关;土壤可蚀性 K 值与黏、粉粒呈显著负相关,与砂粒呈极显著正相关,粉粒与砂粒呈

极显著负相关($p<0.01$)。说明沟床砂粒含量随黏粒含量的增加而减少,有机质含量增加,土壤团聚体越稳定,土壤越不易被侵蚀。

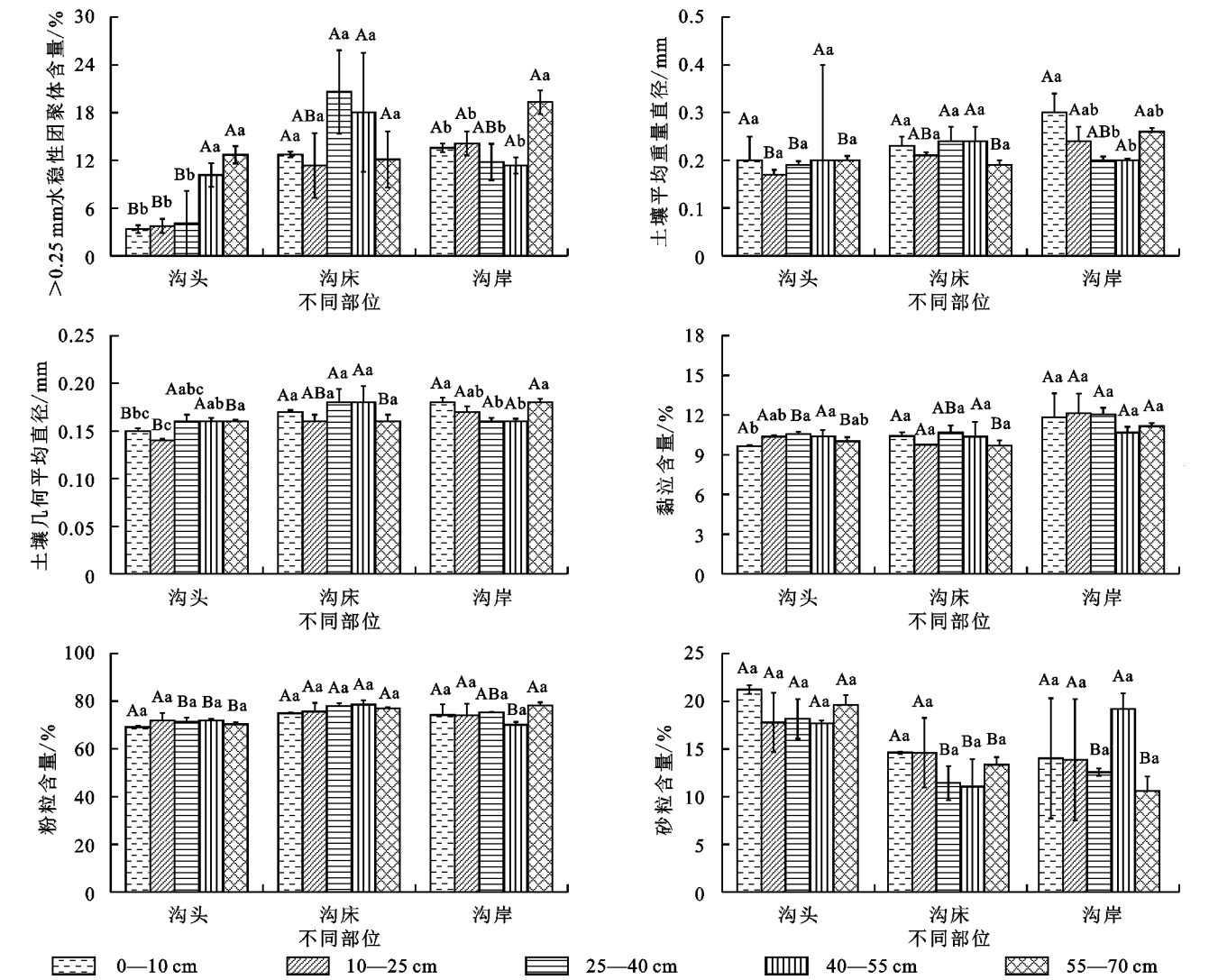


图 2 侵蚀沟不同部位土壤机械组成及团聚体稳定性特征的变化

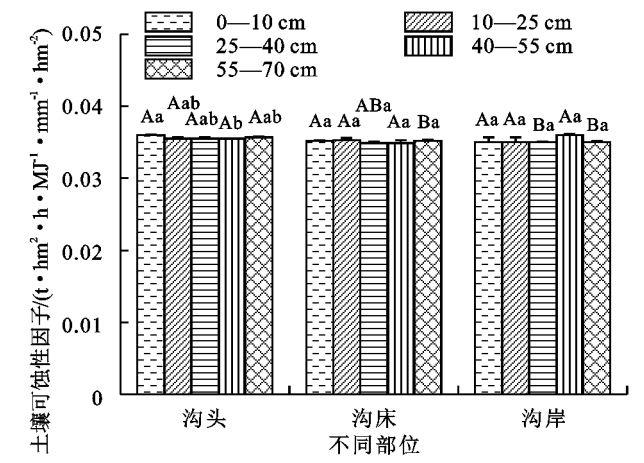


图 3 侵蚀沟不同部位土壤可蚀性因子的变化

2.3.3 侵蚀沟沟岸土壤理化性质及可蚀性因子(K)间的相关性 由表 4 可知,沟岸土壤容重与总孔隙度呈极显著负相关,土壤质量含水量与土壤平均重量直径呈极显著正相关,土壤有机质与土壤平均重量直径

呈显著正相关($p<0.05$),与土壤几何平均直径呈极显著正相关, >0.25 mm 水稳性团聚体含量、土壤平均重量直径与土壤几何平均直径呈极显著正相关,土壤可蚀性 K 值与土壤黏粒呈显著负相关,与粉粒呈极显著负相关,与砂粒呈极显著正相关,土壤黏粒与粉粒呈显著正相关,与砂粒呈极显著负相关,土壤粉粒与砂粒呈极显著负相关($p<0.01$)。相比沟头和沟床,沟岸植被盖度较大,土壤结构能够得到较好改善,土壤几何平均直径、平均重量直径、 >0.25 mm 水稳性团聚体和有机质含量增加,土壤抗侵蚀能力增强。

3 讨论

3.1 典型侵蚀沟不同部位土壤理化性质及可蚀性因子(K)研究 本研究侵蚀沟各部位平均土壤容重表现为沟头 $>$ 沟岸 $>$ 沟床,这与前人的研究^[16]结果并不一致。一定程度上,土壤容重可反映侵蚀沟的侵蚀与泥沙沉积情况,

沟头土壤容重较大主要是因为沟头沟壁崩裂坍塌程度小,产生少量的崩积物,并且在径流的推移作用下,也有较少的冲积物,土壤较紧实,而由于上游径流的冲刷,带给沟床一定的冲、淤积物,且沟床有一定植被覆盖,容重相对较小。侵蚀沟各部位平均土壤质量含水量和总孔隙度均表现为沟床>沟岸>沟头,这与吴汉等^[11]的研究结果不完全一致,主要是由于研究区沟头植被生长发育较好,盖度较大,对土壤水分需求更大,导致质量含水量

较低。沟岸表层(10 cm)土壤质量含水量显著高于中层(25,40,55 cm)和深层(70 cm),因为受植物根系影响,中层和深层大量的土壤水分被植物吸收,导致土壤剖面出现明显的水分亏缺层^[11]。土壤总孔隙度在 50%左右时,通常具有比较协调的透水性、通气性和持水性^[17]。本研究沟头和沟岸土壤总孔隙度均小于 50%,而沟床大于 50%,说明沟床土壤透水性和持水能力相对协调,沟头和沟岸则较差。

表 2 侵蚀沟沟头各指标之间的相关性

指标	ρ	θ	φ	SOM	$R_{0.25}$	MWD	GMD	K	CLA	SIL	SAN
ρ	1										
θ	-0.093	1									
φ	-1.000**	0.093	1								
SOM	-0.259	0.067	0.277	1							
$R_{0.25}$	-0.583	-0.060	0.585	0.206	1						
MWD	0.264	-0.073	-0.251	0.298	0.310	1					
GMD	-0.165	-0.348	0.170	0.089	0.662*	0.512	1				
K	0.004	-0.275	0.011	0.766**	-0.138	0.349	-0.036	1			
CLA	0.136	-0.172	-0.146	-0.718*	0.023	-0.240	0.133	-0.787	1		
SIL	-0.091	0.512	0.076	-0.622	0.172	-0.343	-0.049	-0.912	0.465	1	
SAN	0.052	-0.419	-0.037	0.700*	-0.158	0.354	0.016	0.972**	-0.620	-0.983	1

注: * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$ 。下同。

表 3 侵蚀沟沟床各指标之间的相关性

指标	ρ	θ	φ	SOM	$R_{0.25}$	MWD	GMD	K	CLA	SIL	SAN
ρ	1										
θ	-0.064	1									
φ	-1.000**	0.059	1								
SOM	-0.088	-0.140	0.085	1							
$R_{0.25}$	-0.417	0.154	0.420	-0.544	1						
MWD	-0.397	0.222	0.396	-0.649*	0.869**	1					
GMD	-0.502	0.080	0.504	-0.522	0.953**	0.866**	1				
K	0.538	-0.155	-0.543	0.570	-0.889**	-0.791**	-0.913**	1			
CLA	-0.472	0.558	0.469	-0.495	0.742*	0.782**	0.716*	-0.810**	1		
SIL	-0.415	-0.276	0.419	-0.036	0.757*	0.468	0.701*	-0.649*	0.397	1	
SAN	0.484	0.092	-0.486	0.161	-0.851**	-0.611	-0.795**	0.774**	-0.606	-0.971**	1

表 4 侵蚀沟沟岸各指标之间的相关性

指标	ρ	θ	φ	SOM	$R_{0.25}$	MWD	GMD	K	CLA	SIL	SAN
ρ	1										
θ	-0.438	1									
φ	-1.000**	0.445	1								
SOM	-0.399	0.561	0.395	1							
$R_{0.25}$	-0.106	0.159	0.106	0.539	1						
MWD	-0.373	0.788**	0.371	0.697*	0.466	1					
GMD	-0.298	0.510	0.295	0.810**	0.808**	0.795**	1				
K	0.124	-0.386	-0.134	-0.186	-0.339	-0.093	-0.393	1			
CLA	0.109	0.519	-0.105	0.009	-0.064	0.218	0.195	-0.703*	1		
SIL	-0.179	0.403	0.184	0.409	0.519	0.244	0.609	-0.945**	0.645*	1	
SAN	0.123	-0.457	-0.128	-0.342	-0.417	-0.253	-0.552	0.952**	-0.771**	-0.984**	1

$R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 可反映土壤团聚体大小分布状况,其值越大,土壤结构越好,团聚度越高,抗侵蚀能力越强^[18]。本研究中,侵蚀沟各部位平均 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 均为沟床>沟岸>沟头。相比沟床、沟岸,沟头受到多种形式的侵蚀,这将影响植物的生长及有机物质的积累,导致土壤水稳性团聚体的数量和稳定性降低,从而使得土壤抵抗侵蚀的能力减弱。王文鑫等^[19]研究的黄土高原沟壑区沟头 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 大于本文,是由于与丘陵区相比,其土壤水分、质地、侵蚀沟微地形等方面有较大不同。本研究侵蚀沟各部位土壤机械组成为粉粒含量>砂粒含量>黏粒含量,这与张素等^[20]研究的金沙江干热河谷冲沟发育区砂粒含量>粉粒含量>黏粒含量不完全一致,主要是因为研究区沟头有一定的植被覆盖,溯源侵蚀减缓,径流对土壤的冲刷作用较小,且侵蚀沟经过多年的发育,在物理风化及生物作用下,土壤颗粒分布相对较均匀、质地较好。

研究区各部位平均土壤有机质含量表现为沟床>沟岸>沟头,沟床和沟岸明显大于沟头,说明这2个部位土壤砂化程度较低,黏结性较好,土壤中的细小颗粒不易流失,团粒间有较强的胶结作用,水稳性团聚体的数量和稳定性提高,土壤可蚀性降低^[19]。本研究侵蚀沟土壤有机质含量整体偏低(9.97~17.03 g/kg),影响有机质含量的因素有植被类型、有机质矿化速率、人类活动等。研究^[21]表明,通过提高地表枯落物的储存量可增加土壤有机质,促进团聚体的形成。本研究区植被盖度偏低,且以灌草为主,又由于人类活动的影响,导致有机质来源减少,加之干旱少雨的气候条件,使得土壤微生物活动量小,枯枝落叶分解速度慢,淋溶速度减缓,从而致使土壤有机质含量偏低。

土壤可蚀性反映其抗侵蚀能力, K 值越小,土壤具有越强的抗侵蚀能力^[22]。本研究侵蚀沟各部位土壤可蚀性 K 值在 0.032 9~0.039 5($t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}$)/(MJ $\cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2$),属于中可蚀性^[23],与王文鑫等^[19]研究的黄土高原沟壑区沟头土壤可蚀性 K 值相比,本研究区 K 值较小,主要是因为侵蚀沟相对稳定,发育较缓,侵蚀区有一定的植被覆盖。各部位平均土壤可蚀性 K 值为沟头>沟岸>沟床,相比沟床和沟岸,沟头 K 值较大,说明越易发生侵蚀, K 值的减小,需要侵蚀沟经历长久的发育,所以对沟头水土流失的治理至关重要^[19]。

3.2 典型侵蚀沟不同部位土壤可蚀性因子(K)与土壤理化性质的相关性分析

本研究中土壤可蚀性 K 与理化性质表现出显著相关性,沟头 K 与 SAN 呈极显著正相关,沟床 K 与 CLA 呈极显著负相关,与 SIL 呈显著负相关,与 SAN 呈极显

著正相关,沟岸 K 与 CLA 呈显著负相关,与 SIL 呈极显著负相关,与 SAN 呈极显著正相关($p<0.01$)。表明侵蚀沟各部位土壤可蚀性 K 值随砂粒含量的增加而增大,随粉粒和黏粒含量的增加而减小,这与前人^[24]研究结果并不一致,主要是因为受土壤质地及海拔的影响,乔锋等^[24]的研究区土壤为粉壤土,海拔在 4 000 m 左右,与本研究区海拔 1 600 m 左右,主要为黄绵土、黑垆土差距较大。由于高海拔,低温度,土壤风化程度弱,又温差较大导致土壤热胀冷缩,深层土壤砾石到达地表,因风化而破碎,形成土壤粉、砂粒,山高坡陡使高处土壤细小颗粒被冲刷至低处,土壤中粗颗粒物质增加,抗侵蚀性能增强, K 值减小。研究^[25]表明,很大程度上, K 值取决于土壤颗粒和有机质的共同耦合作用,有机质含量越多,能够更好地促进土壤大粒径颗粒形成,致使土壤孔隙结构越好,抗侵蚀能力越强。

沟床土壤可蚀性 K 与 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 呈极显著负相关($p<0.01$),这与前人^[19]的研究结果相符。本研究选取的稳定侵蚀沟各部位均有一定植被覆盖,研究^[26]证实,随着侵蚀沟的发育,各侵蚀部位植被生长,地上生物量增加,枯落物也因此增加,有机质的胶结作用随枯落物分解增加的有机质含量而加强,所以增强了土壤的团聚作用;枯落物的增加导致更多黏合剂的产生,利于形成土壤团聚体^[27]。此外,侵蚀沟各部位植被恢复,根系生物量及分泌物的增加改善土壤结构,促进土壤团聚体的形成,从而使土壤抗侵蚀能力增加^[28]。本研究沟头土壤可蚀性 K 值与有机质含量呈极显著正相关,主要是因为研究区地质历史年轻,土壤风化程度低,以粉砂粒为主,而黏粒是有机质的主要来源,受砂粒的影响,使有机质胶结能力降低,从而土壤抵抗侵蚀的能力减弱, K 值增大,然而这并不能说明土壤侵蚀较严重的地区,有机质含量较高,对于该区土壤可蚀性与有机质的关系还有待进一步深入研究。

4 结论

(1)侵蚀沟各部位平均质量含水量、总孔隙度、有机质、 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、粉粒含量均为沟床>沟岸>沟头,平均土壤容重、砂粒含量为沟头>沟岸>沟床,平均黏粒含量为沟岸>沟头>沟床,各部位土壤机械组成均为粉粒含量>砂粒含量>黏粒含量,土壤质地偏砂性。

(2)侵蚀沟各部位土壤可蚀性 K 值在 0.032 9~0.039 5($t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}$)/(MJ $\cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2$),属于中可蚀性,平均可蚀性 K 值表现为沟头>沟岸>沟床,沟头越易发生土壤侵蚀。土壤有机质含量在 9.97~

17.03 g/kg,该区土壤肥力较低。

(3)侵蚀沟各部位土壤可蚀性 K 值与粉粒、黏粒含量呈负相关,与砂粒含量呈正相关。土壤可蚀性 K 值与有机质、质量含水量呈正相关关系,沟床土壤可蚀性 K 与 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 呈极显著负相关。

参考文献:

- [1] Mendonca R, Mvller R, Clow D, et al. Organic carbon burial in global lakes and reservoirs[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: e1694.
- [2] 陈卓鑫,王文龙,郭明明,等.黄土高原沟壑区植被恢复对不同地貌部位土壤可蚀性的影响[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 387-398.
- [3] 陈琦,曹建军,汤国安,等.基于 EEMD-瞬时频率变换的黄土高原典型地貌沟蚀活跃区识别研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(3): 9-15.
- [4] Guo M M, Wang W L, Liang K H, et al. Changes in soil properties and erodibility of gully heads induced by vegetation restoration on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(5): 712-725.
- [5] 鲍恩侯,熊康宁,刘子琦,等.喀斯特不同侵蚀场地土壤颗粒分布及可蚀性特征[J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(2): 156-163.
- [6] 梁博,聂晓刚,万丹,等.喜马拉雅山脉南麓典型林地对土壤理化性质及可蚀性 K 值影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(6): 1377-1388.
- [7] Gao X D, Wu P T, Zhao X N, et al. Soil moisture variability along transects over a well-developed gully in the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2011, 87: 357-367.
- [8] Ziadat F M, Taimeh A Y, Hattar B I. Variation of soil physical properties and moisture content along toposequences in the arid to semiarid area[J]. *Arid Land Research and Management*, 2010, 24: 81-97.
- [9] 孙宝洋,李占斌,肖俊波,等.冻融作用对土壤理化性质及风水蚀影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(1): 337-347.
- [10] 姜芸,王军,张莉.东北典型黑土区侵蚀沟形态及分布特征[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 157-165.
- [11] 吴汉,熊东红,张宝军,等.金沙江干热河谷冲沟发育区不同部位土壤水分的时空变化特征[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(2): 384-392.
- [12] 唐骏,党廷辉,薛江,等.植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 5067-5077.
- [13] 王文娟,邓荣鑫,张树文.东北典型黑土区沟蚀发生风险评价研究[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(12): 2058-2067.
- [14] Yves L B et al. Soil aggregate stability in Mediterranean and tropical agro-ecosystems: Effect of plant roots and soil characteristics[J]. *Plant and Soil*, 2018, 424(1/2): 303-317.
- [15] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38(5): 381-383.
- [16] 郭敏,熊东红,张宝军,等.干热河谷冲沟不同部位土壤水分物理性质研究[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(3): 635-640.
- [17] 丁新新,洪伟,陈建忠,等.不同经营模式下毛竹林土壤水分物理性质比较[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(3): 74-78.
- [18] Totsche K U, Amelung W, Gerzabek M H, et al. Microaggregates in soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, 181(1): 104-136.
- [19] 王文鑫,王文龙,郭明明,等.黄土高原沟壑区植被恢复对沟头土壤团聚体特征及土壤可蚀性的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(16): 2845-2857.
- [20] 张素,熊东红,校亮,等.冲沟不同部位土壤机械组成及抗冲性差异[J]. *土壤*, 2016, 48(6): 1270-1276.
- [21] 胡阳,邓艳,蒋忠诚,等.典型岩溶山区植被恢复对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 61-67.
- [22] 魏慧,赵文武,王晶.土壤可蚀性研究述评[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2749-2759.
- [23] 饶良懿,徐也钦,胡剑汝,等.砒砂岩覆土区小流域土壤可蚀性 K 值研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(4): 763-773.
- [24] 乔锋,王明刚,李晶,等.色季拉山垂直气候带土壤可蚀性研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(6): 121-126.
- [25] 白秀梅,韩有志,郭汉清.关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 79-84.
- [26] 马建辉,叶旭红,韩冰,等.膜下滴灌不同灌水控制下限对设施土壤团聚体分布特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(18): 3561-3571.
- [27] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.
- [28] 徐红伟,吴阳,乔磊磊,等.不同植被带生态恢复过程土壤团聚体及其稳定性:以黄土高原为例[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(6): 2223-2232.