

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.03.042; CSTR:32311.14.rswc.2025.03.042.

王丽鑫, 陈卓鑫, 郭明明, 等. 典型黑土区不同土地利用类型侵蚀沟岸土壤可蚀性及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3):18-27, 54.

Wang Lixin, Chen Zhuoxin, Guo Mingming, et al. Soil erodibility and its influencing factors of erosion gully banks under different land use types in the typical black soil region of Northeast China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3):18-27, 54.

典型黑土区不同土地利用类型侵蚀沟 沟岸土壤可蚀性及其影响因素

王丽鑫^{1,2,5}, 陈卓鑫^{1,2,5}, 郭明明³, 张晟旻⁴, 王文龙^{1,2}

(1. 中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 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; 3. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态院重点实验室,
哈尔滨 150081; 4. 吉林农业大学 资源与环境学院, 长春 130118; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 探究典型黑土区发育于不同土地利用类型下侵蚀沟沟岸土壤的可蚀性及其主要影响因素, 明确关键因子的作用机制, 为黑土区水土流失治理提供科学依据。[方法] 以典型黑土区发育于农地、林地和草地的侵蚀沟为研究对象, 通过野外调查取样与室内试验相结合的方法, 沿侵蚀沟沟岸采集 0—30 cm, 30—60 cm, 60—100 cm, 100—150 cm, 150—200 cm 土层的土壤样品和根系样品, 测定和计算土壤各项理化性质和根系密度(RBD), 土壤可蚀性参数选择土壤可蚀性因子 K 、 >0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量($WSA_{>0.25}$)、崩解速率(SDR)、抗剪强度(τ_f)。[结果] 各侵蚀沟沟岸根系主要集中在 0—30 cm 土层, 其 RBD 均随土层深度的增加而显著降低, 其中林地沟 RBD 分别是草地沟和农地沟的 2.56 倍和 5.75 倍。土壤容重(SBD)和饱和导水率(SHC)均表现为农地沟>林地沟>草地沟, 含水量(SWC)与之相反; 草地沟的有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量分别是林地沟的 1.87 倍、2.20 倍和 1.33 倍, 是农地沟的 2.01 倍、1.65 倍和 1.08 倍。SBD, SHC 呈现出随土层增加而增大的趋势, 而 SWC, SOC, TN 和 TP 均随土层增加而降低。 K 和 τ_f 表现为农地沟>林地沟>草地沟, 呈现出随土层增加而增大的趋势, $WSA_{>0.25}$ 则与之完全相反, SDR 表现为农地沟>草地沟>林地沟, 随土层增加而增大。相关性分析结果表明 SBD, SWC, SHC、粉粒含量(Silt)、SOC, TN, TP 和 RBD 对土壤可蚀性参数有显著影响, 冗余分析进一步表明, SOC 对土壤可蚀性的解释率高达 46.1%, 是影响土壤可蚀性的最重要因素, 其次分别是 Silt(11.5%)>RBD(6.0%)>SHC(5.5%)>SWC(2.6%)>TP(2.4%)>SBD(1.4%)。[结论] 侵蚀沟沟岸土壤可蚀性受到植被类型、土壤有机质含量及土壤质地等多种因素的控制, 植被覆盖的增加通过提升有机质含量和优化土壤质地显著降低了土壤可蚀性。

关键词: 黑土区; 侵蚀沟; 土壤可蚀性; 土壤理化性质; 根系密度

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)03-0018-10

Soil erodibility and its influencing factors of erosion gully banks under different land use types in the typical black soil region of Northeast China

Wang Lixin^{1,2,5}, Chen Zhuoxin^{1,2,5}, Guo Mingming³, Zhang Shengmin⁴, Wang Wenlong^{1,2}

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 4. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] To investigate the erodibility of soils on the banks of erosion gullies developed under different land uses in the typical black soil region, and to identify the key influencing factors and their mechanisms. The findings are intended to provide a scientific basis for soil and water conservation in black soil regions.

收稿日期: 2024-07-17

修回日期: 2024-09-16

接受日期: 2024-10-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(42107356); 中国科学院东北地理与农业生态研究所青年科学家小组项目(22023QNXXZ03)。

第一作者: 王丽鑫(1998—), 女, 河北省承德市人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: s210201001@neau.edu.cn

通信作者: 王文龙(1964—), 男, 陕西省大荔县人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀和水土保持方面的研究。E-mail: wliwang@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

[**Methods**] Erosion gullies developed on farmland, woodland, and grassland in the typical black soil region were selected as the study sites. A combination of field sampling and laboratory testing methods was employed to collect soil and root samples from soils layers of 0—30 cm, 30—60 cm, 60—100 cm, 100—150 cm, and 150—200 cm along the banks of the erosion gullies. The physical and chemical properties of the soil, root biomass density (RBD), and soil erodibility parameters were determined. These parameters included the soil erodibility factor K , the content of water stable aggregates > 0.25 mm ($WSA_{>0.25}$), disintegration rate (SDR), and shear strength (τ_f). [**Results**] The RBD on the erosion gully banks was primarily concentrated in the 0—30 cm soil layer, and RBD significantly decreased with increasing soil depth. The RBD in the forest gully was 2.56 times and 5.75 times higher than that in the grassland gully and the farmland gully, respectively. The soil bulk density (SBD) and saturated hydraulic conductivity (SHC) were in the order of farmland gully $>$ woodland gully $>$ grassland gully, with water content (SWC) showing opposite trend. The contents of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) of grassland gully were 1.87, 2.20 and 1.33 times higher than those of woodland gully, and 2.01, 1.65 and 1.08 times higher than those of farmland gully, respectively. SBD and SHC increased with increasing soil layer, while SWC, SOC, TN and TP decreased with increasing soil layer. The K and τ_f of farmland gully $>$ woodland gully $>$ grassland gully, showing a trend of increasing with the soil depth, while $WSA_{>0.25}$ was completely opposite. The SDR of farmland gully $>$ grassland gully $>$ woodland gully, and increased with the soil depth. Correlation analysis results showed that SBD, SWC, SHC, silt content, SOC, TN, TP and RBD had significant effects on soil erodibility parameters. Redundancy analysis further showed that SOC explained 46.1% of the variation in soil erodibility, making it the most significant factor, followed by Silt (11.5%) $>$ RBD (6.0%) $>$ SHC (5.5%) $>$ SWC (2.6%) $>$ TP (2.4%) $>$ SBD (1.4%). [**Conclusion**] Soil erodibility of gully banks is controlled by factors such as vegetation type, soil organic matter content, and soil texture. Increased vegetation cover significantly reduces soil erodibility by enhancing organic matter content and optimizing soil texture.

Keywords: black soil region; erosion gully; soil erodibility; soil physical and chemical properties; root biomass density

土壤侵蚀及其导致的土地退化,已成为21世纪以来全球面临的重大环境挑战之一^[1]。作为土壤侵蚀的重要类型之一,沟道侵蚀对农田、基础设施和生态环境的破坏尤为严重。东北黑土区是我国重要的粮食产区^[2-3],受长期大规模耕作及特殊的地貌和气候的影响,该区域内土壤侵蚀问题严重,土壤侵蚀面积占土地总面积的36.7%,强烈的水土流失导致黑土厚度年均下降0.3~2 mm^[4-5]。据统计,黑土区已形成超过29.5万条侵蚀沟,且89%为活跃侵蚀沟,沟道侵蚀尤为严重^[6]。土壤可蚀性反映了土壤对降雨侵蚀及径流冲刷等抗蚀能力的高低,常用土壤可蚀性因子 K 值表示, K 值越大,则土壤抗侵蚀能力越弱^[7]。土壤抗蚀能力的高低很大程度上与土壤内在理化性质联系密切,但不同的土地利用类型土壤性质具有很大的差异^[8]。分析发育于不同土地利用类型侵蚀沟土壤可蚀性的差异特征,明确影响土壤可蚀性的因素及各因素间的影响机制,为揭示黑土区沟道侵蚀机制及防治途径提供科学依据。

国外众多学者自20世纪30年代就已经逐渐开始

了对土壤可蚀性的研究,其研究方向主要为土壤可蚀性与土壤结构系数、土壤分散率等内在理化性质之间的联系^[9-11]。相对而言我国对于土壤可蚀性的研究起步较晚,在20世纪50年代开始展开相关研究,针对我国不同区域进行研究,发现土壤抗蚀性主要是通过粒径大于0.25 mm的水稳性团粒含量来体现,而土壤基本的理化性质(土壤质地、容重、有机碳含量、抗冲性等)和根系分布特征等显著影响土壤可蚀性^[12-14],大多数研究主要聚焦于坡地土壤可蚀性,针对侵蚀沟土壤可蚀性的研究较少且主要探讨侵蚀沟不同部位间浅层(0—30 cm)土壤可蚀性差异^[15-16],而关于不同土地利用上的侵蚀沟岸土壤可蚀性及其影响因素的研究相对较少。而侵蚀沟发育过程中沟岸扩张占据主导地位,沟岸土壤剖面根系分布、土壤性质及可蚀性状况是影响沟岸扩张的重要因素,但目前研究很少关注不同土地利用发育的侵蚀沟岸不同土层深度植被根系分布特征及土壤可蚀性差异。因此,分析发育于不同土地利用上的侵蚀沟岸剖面土壤可蚀性特征,探讨不同类型侵蚀沟的土壤可蚀性与影响因子之间的关系,

对于指导侵蚀沟岸防护具有重要意义。

鉴于此,选取东北典型黑土区发育于农地、林地和草地的 3 种类型侵蚀沟,沿侵蚀沟岸采集不同土层的土壤样品和根系样品,对不同土地利用类型侵蚀沟的土壤可蚀性差异及影响 K 值的主要因素进行分析,探讨土壤可蚀性因子 K 与各影响因子之间的关系,为东北黑土区侵蚀沟防治提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究所选流域为黑龙江省海伦市海南乡东进小

表 1 试验样地基本信息

Table 1 Basic information of each experimental site

| 样地类型 | 坡度/(°) | 坡向 | 经度 E/(°) | 纬度 N/(°) | 海拔/m | 植被盖度/% | 优势种 |
|------|--------|----|----------|----------|-------|--------|-----|
| 林地沟 | 3 | 西南 | 126.9351 | 47.21997 | 215.7 | 86 | 柳树 |
| 农地沟 | 2 | 南 | 126.8468 | 47.23021 | 227.6 | 68 | 玉米 |
| 草地沟 | 3 | 南 | 126.7926 | 47.23681 | 217.2 | 87 | 碱草 |

1.2 土壤样品采集与处理

在东进小流域中分别选定耕地、林地和草地 3 个类型的侵蚀沟后,于 2021 年 9—10 月进行土壤样品采集及室内试验。沿每条侵蚀沟岸布设 3 个点位分别挖取宽 1 m 深 2.5 m 的土壤剖面,按 0—30 cm, 30—60 cm, 60—100 cm, 100—150 cm, 150—200 cm 分为 5 层,每个剖面各个土层的样品取 3 个重复。用体积为 100 cm³ 的环刀沿剖面自上而下取样,同时在各土层用长 20 cm、宽 20 cm、深 10 cm 的根系取样盒取 3 个根系样品,并用小铁铲在各个土层挖取 500 g 原状土装入自封袋带回室内,进行风干处理。将野外取得的土样放在塑料布上置于室内通风阴干,在土样半干时需将大土块捏碎,样品风干后,拣去动植物残体和石块,然后混匀,用四分法保留 500 g 土壤样品,然后将样品分成三份,用来测定土壤水稳性团聚体、土壤颗粒组成、土壤有机碳和养分指标。

将取得的根系土壤样品浸泡在带有 2 mm 孔径筛网的过滤桶中浸泡 24 h,然后用低压水流进行多次洗涤并用镊子挑选出所有的活根,放入 65 °C 下的烘箱干燥 24 h 然后称重计算根重密度;土壤容重和含水量采用烘干法测定;土壤总孔隙度采用环刀浸泡法测定;土壤质地采用 MasterSizer 2000 测定,土壤颗粒分级采用美国制;土壤饱和导水率采用常水头法测定;土壤抗剪强度使用十字板剪切仪测定,将十字板头压入土壤中,以均匀速度转动,直至土体破坏,得出每层土壤抗剪强度;土壤崩解速率采用蒋定生等^[17]提出的方法进行测定,崩解时间为 30 min;土壤水稳性团聚体利用土壤团聚体分析仪(DIK-2012)采用真空慢速浸提和湿筛法测定;土壤有机碳和全氮使用元素分析仪

流域,共选择发育于林地、农地和草地 3 种土地利用条件的侵蚀沟。林地的郁闭度为 0.86,草地植被覆盖度为 87%,农地开垦时间早于 20 世纪 60 年代,样地的基本信息如表 1 所示。该区域属于典型的漫川漫岗黑土区,该区域内年平均降雨量为 530 mm,90% 以上的降水量集中分布在 5—8 月,年平均气温 1.5 °C,气候属北温带大陆性季风气候。研究区内平均坡度 < 5°、平均坡长 > 100 m,作物以大豆玉米轮作为主,耕作方式多为顺坡和横坡起垄。该小流域沟道侵蚀严重,沟蚀贡献了该区域内 65% 的水土流失,沟壑密度为 1.39 km/km²,割裂程度为 4%,使得原有平整完整的坡耕地破碎化。

(EA3000, EuroVector, Italy)测定,土壤全磷含量用高氯酸—浓硫酸法消解—钼锑抗比色法测定。

根据已有研究认为土壤崩解速率、>0.25 mm 水稳性团聚体含量、抗剪强度和土壤可蚀性因子 K 是表征土壤可蚀性的参数^[18-20],本研究选择这 4 个参数作为可蚀性因子。

1.3 指标计算

根重密度(RBD, kg/m³)的计算公式为:

$$RBD = \frac{M_r}{l \cdot w \cdot h} \quad (1)$$

式中: M_r 为根系烘干质量(kg); l , w , h 分别代表根系取样盒的长、宽、高(m)

土壤崩解速率(SDR, g/min)的计算公式为:

$$SDR = \frac{M_0 - M_e}{t_d} \quad (2)$$

式中: M_0 代表土壤样品浸入水中时天平的初始测量值(g); M_e 代表土壤样品崩解完全或第 30 分钟时的天平测量值(g); t_d 代表土壤样品完全崩解时所需的时间,或在土壤样品未完全崩解的情况下,第 30 分钟的时间。

饱和土壤导水率(SHC, mm/min)的计算公式为:

$$SHC = \frac{2.3aL \cdot \frac{\lg h_1}{h_2}}{At} \quad (3)$$

式中: a 为变水头管的横截面积(mm²); L 为入渗环刀的高度(mm); h_1 为水的初始高度(mm); h_2 为水的最终高度; t 为渗透时间(h); A 为入渗环刀的截面积(mm²)。

>0.25 mm 水稳性团聚体含量(WSA_{>0.25}, %)的计算公式为:

$$WSA_{>0.25} = \frac{M_w}{M_T} \times 100\% \quad (4)$$

式中: M_w 为 >0.25 mm水稳性团聚体的质量(g); M_T 为团聚体总质量(g)。

土壤可蚀性因子 K 采用EPIC法来估算,计算公式为:

$$K_{\text{epic}} = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 \text{SAN} \left(1.0 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \times \left[\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right]^{0.3} \left\{ 1.0 - \frac{0.25C}{\left[\exp(3.72 - 2.95c) \right]} \right\} \times \left\{ 1.0 - \frac{0.7\text{SN}_1}{\left[\text{SN}_1 + \exp(-5.51 + 22.9\text{SN}_1) \right]} \right\} \quad (5)$$

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(%); $C=0.583 \times \text{SOM}$,SOM为土壤有机质含量(%); $\text{SN}_1=1-\text{SAN}/100$; $K=K_{\text{epic}} \times 0.1317$ 。

1.4 数据分析与处理

本研究利用Excel 2020和SPSS 26.0软件对数据进行处理与分析,包括经典统计方法中的描述性统计参数(如变量的平均值、最大值、最小值、标准

差、变异系数等)、单因素方差分析、Pearson相关性分析,利用Canoco 5软件进行冗余分析(RDA),采用Origin 2021软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同类型侵蚀沟根系特征及土壤性质

2.1.1 土壤根系分布特征 林地沟、农地沟和草地沟的根重密度(RBD)分别在 $0.09 \sim 1.38 \text{ kg/m}^3$, $0.01 \sim 0.95 \text{ kg/m}^3$, $0.32 \sim 0.90 \text{ kg/m}^3$ 之间变化,变异系数分别为102%,155%,175%,表现出强烈的变异程度(表2)。由图1可知,RBD在土壤各个层次中的分布情况表现为在林地沟最大,草地沟次之,农地沟最低。在垂直深度上,各侵蚀沟RBD均表现为随土层深度的增加而减小,且表层土壤(0—30 cm)的RBD显著高于其他土层($p < 0.05$),占总根系重量的55.94%,73.67%,74.29%。对于不同类型的侵蚀沟而言,林地沟内各个土层的RBD显著高于其他类型侵蚀沟($p < 0.05$)。整体上,林地沟沟岸0—200 cm土壤剖面上RBD最大(0.46 kg/m^3),分别是农地沟和草地沟的2.56倍和5.75倍。

表2 土壤理化性质描述性统计特征

Table 2 Descriptive statistical characteristics of soil physical and chemical properties

| 沟类型 | 统计量 | SWC/ % | SBD/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | SOC/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | TN/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | TP/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | RBD/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | SHC/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) | WSA $_{>0.25}$ / % | K/ ($\text{t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$) | SDR/ ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$) | τ / (kPa) |
|-----|------|-----------|---|---|--|--|---|---|-----------------------|---|--|-------------------|
| 林地沟 | max | 27.72 | 1.42 | 30.28 | 2.07 | 0.66 | 1.38 | 1.03 | 78.76 | 0.06 | 2.93 | 24.83 |
| | min | 22.78 | 1.24 | 4.40 | 0.44 | 0.24 | 0.09 | 0.00 | 11.18 | 0.04 | 0.03 | 15.48 |
| | Mean | 25.54b | 1.34a | 13.08b | 0.81b | 0.43b | 0.46a | 0.37a | 39.27a | 0.05ab | 1.91b | 18.69b |
| | SD | 1.37 | 0.05 | 8.69 | 0.58 | 0.12 | 0.47 | 0.29 | 27.70 | 0.01 | 1.15 | 4.15 |
| | CV/% | 5.36 | 3.73 | 66.44 | 71.60 | 27.91 | 102 | 78.38 | 70.54 | 20.00 | 60.21 | 22.23 |
| 农地沟 | max | 30.71 | 1.62 | 30.56 | 2.29 | 0.83 | 0.95 | 1.07 | 65.58 | 0.06 | 16.51 | 45.86 |
| | min | 16.81 | 1.20 | 2.90 | 0.37 | 0.39 | 0.01 | 0.01 | 17.68 | 0.03 | 0.02 | 17.25 |
| | Mean | 24.11b | 1.42a | 12.21b | 1.08b | 0.53ab | 0.18b | 0.42a | 34.41a | 0.05a | 9.24a | 26.50a |
| | SD | 4.60 | 0.15 | 10.48 | 0.76 | 0.14 | 0.28 | 0.31 | 15.87 | 0.01 | 6.73 | 11.77 |
| | CV/% | 19.08 | 10.56 | 85.83 | 70.37 | 26.42 | 155 | 73.81 | 46.12 | 20.00 | 72.84 | 44.40 |
| 草地沟 | max | 47.39 | 1.43 | 47.51 | 3.62 | 0.90 | 0.50 | 0.97 | 70.06 | 0.06 | 3.27 | 22.15 |
| | min | 23.72 | 1.00 | 5.42 | 0.48 | 0.32 | 0.001 | 0.001 | 20.30 | 0.03 | 0.02 | 12.09 |
| | Mean | 32.87a | 1.24b | 24.52a | 1.78a | 0.57a | 0.08b | 0.25a | 51.85a | 0.04b | 1.96b | 17.78b |
| | SD | 7.56 | 0.14 | 14.73 | 1.15 | 0.20 | 0.14 | 0.30 | 17.97 | 0.01 | 1.12 | 3.66 |
| | CV/% | 23.00 | 11.29 | 60.07 | 64.61 | 35.09 | 175.00 | 120.00 | 34.66 | 25.00 | 57.14 | 20.58 |

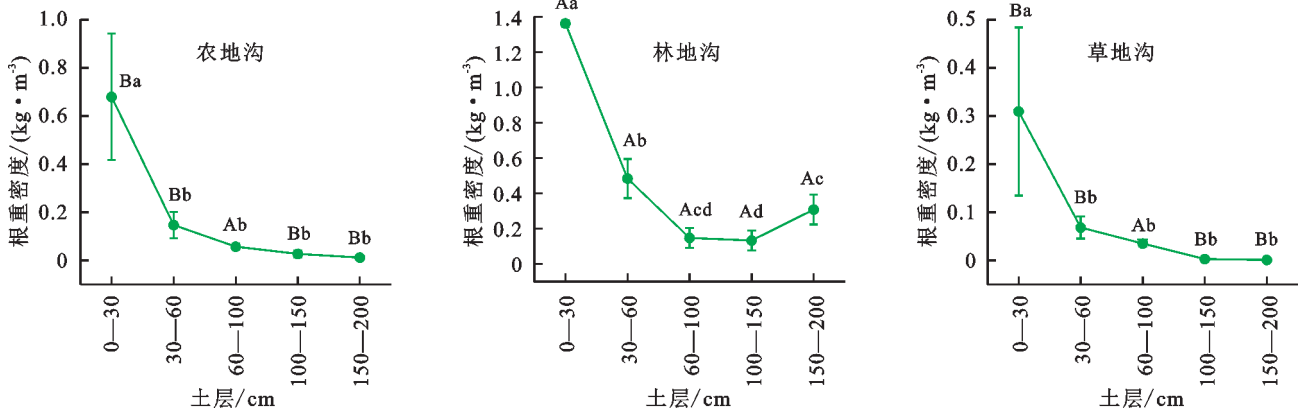
注:SWC表示土壤含水量;SBD表示土壤容重;SOC表示土壤有机碳;TN表示土壤全氮;TP表示土壤全磷;RBD表示根重密度;SHC表示饱和导水率;WSA $_{>0.25}$ 表示 >0.25 mm水稳性团聚体含量;K表示土壤可蚀性 K 值;SDR表示土壤崩解速率; τ 表示抗剪强度;max表示最大值;min表示最小值;Mean表示平均值;SD表示标准差;CV表示变异系数。下表同。

2.1.2 土壤基本理化性质特征 由表2可知,土壤容重(SBD)在林地沟、农地沟和草地沟的变异系数分别为3.73%,10.56%,11.29%,变异性较小,农地沟100—200 cm土层的SBD显著高于林地沟和草地沟($p < 0.05$),垂直深度上,SBD均表现为先减小后增大的趋势,且各个侵蚀沟内100—200 cm土层的SBD均显著高于其他土层($p < 0.05$)(图1)。林地沟、农地沟、草地沟的土壤含水量(SWC)分别在22.28%~

27.72%,16.81%~30.71%,23.72%~47.49%间变化,整体表现(除0—30 cm)为草地沟最大,且显著高于其他类型侵蚀沟($p < 0.05$),0—30 cm土层的SWC显著低于其他侵蚀沟($p < 0.05$),在0—60 cm土层上农地沟的SWC高于林地沟,60—100 cm土层则相反,总体来看,各个侵蚀沟的SWC在垂直深度上表现出随土层深度的增加而减小的趋势。饱和导水率(SHC)在草地沟表现出较强的变异性(变异系数为120%),在林地沟

和农地沟表现为中等强度变异(变异系数分别为 78.38%, 73.81%), 但不同类型侵蚀沟间的 SHC 差异不明显; 由图 2 可看出, 各侵蚀沟内的 SHC 表现出随土层深度的增加而增加的趋势。平均有机碳含量(SOC) 表现为草地沟(24.52 g/kg) > 林地沟(13.08 g/kg) > 农地沟(12.21 g/kg), 30—60 cm 土层的 SOC 在林地沟、农地沟和草地沟具有显著性差异($p < 0.05$), 在林地沟和农地沟的 SOC 均随土层深度增加而逐渐减小,

但在草地沟表现出先增大后减小的趋势, 30—60 cm 土层 SOC 显著高于其他土层($p < 0.05$); 不同侵蚀沟及不同土层内的土壤全氮含量(TN)表现出与 SOC 高度相似的分布状况; 土壤全磷(TP)在林地沟的平均含量最低(表 2), 在 60—100 cm 和 100—150 cm 土层, 林地沟的 TP 高于农地沟和草地沟, 土壤 TP 在林地沟整体表现出随土层加深逐渐减小的趋势, 但在农地沟和草地沟表现出先减小后增大的趋势。



注: 不同大写字母表示同一土层不同侵蚀沟的差异显著, 不同小写字母表示同一侵蚀沟不同土层的差异显著, 下同。

图 1 土壤 RBD 变化特征

Fig. 1 Variation characteristics of RBD

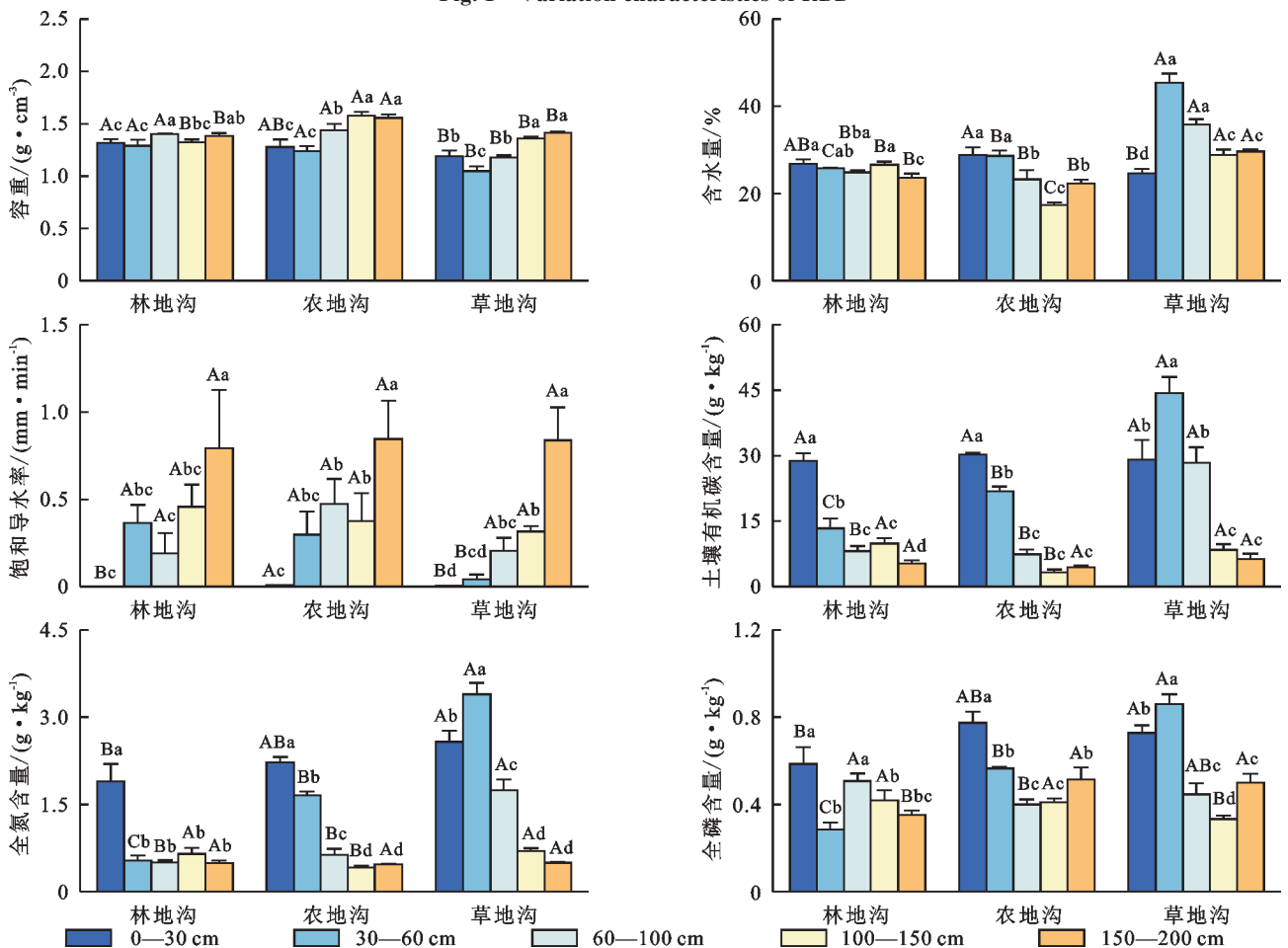


图 2 土壤理化性质变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of soil physical and chemical properties

2.2 土壤可蚀性变化特征

草地沟的 >0.25 mm水稳性团聚体含量($WSA_{>0.25}$)高于林地沟 32.03%、高于农地沟 50.68%;在 30—60 cm 土层内, $WSA_{>0.25}$ 在林地沟和草地沟要显著高于农地沟($p < 0.05$),在 100—200 cm 土层内,草地沟的 $WSA_{>0.25}$ 要显著高于林地沟和农地沟($p < 0.05$),在其余土层,各侵蚀沟内 $WSA_{>0.25}$ 差异不显著。由图 3 可知,在不同的侵蚀沟内土壤可蚀性 K 值表现出随土层加深而增大的趋势。林地沟和农地沟的表层土壤(0—30 cm 和 30—60 cm)的 K 值显著低于深层土壤($p < 0.05$),草地沟内深层土壤(150—200 cm)的 K 值显著高于 0—150 cm 土层($p < 0.05$),农地沟内深层土壤(60—100 cm, 100—150 cm, 150—200 cm)之

间的 K 值无显著差异($p > 0.05$);土壤可蚀性因子 K 在不同侵蚀沟间的差异不大,不同类型侵蚀沟的 K 值在 0.042 7~0.050 3 ($t \cdot h$)/($MJ \cdot mm$)之间变化,平均 K 值表现为农地沟 $>$ 林地沟 $>$ 草地沟,说明农地沟岸更容易发生土壤侵蚀。土壤崩解速率(SDR)在不同侵蚀沟内表现为农地沟(9.24 g/min) $>$ 草地沟(1.96 g/min) $>$ 林地沟(1.91 g/min),且在各侵蚀沟内表层(0—30 cm)显著低于其他土层,农地沟各个土层(除 0—30 cm)的 SDR 都显著高于林地沟和草地沟($p < 0.05$)。农地沟的土壤抗剪强度(τ_f)要高于林地沟和草地沟,在垂直深度上,草地沟各土层的 τ_f 显著低于林地沟和农地沟($p < 0.05$),林地沟和农地沟 150—200 cm 土层的 τ_f 显著高于其他土层($p < 0.05$)。

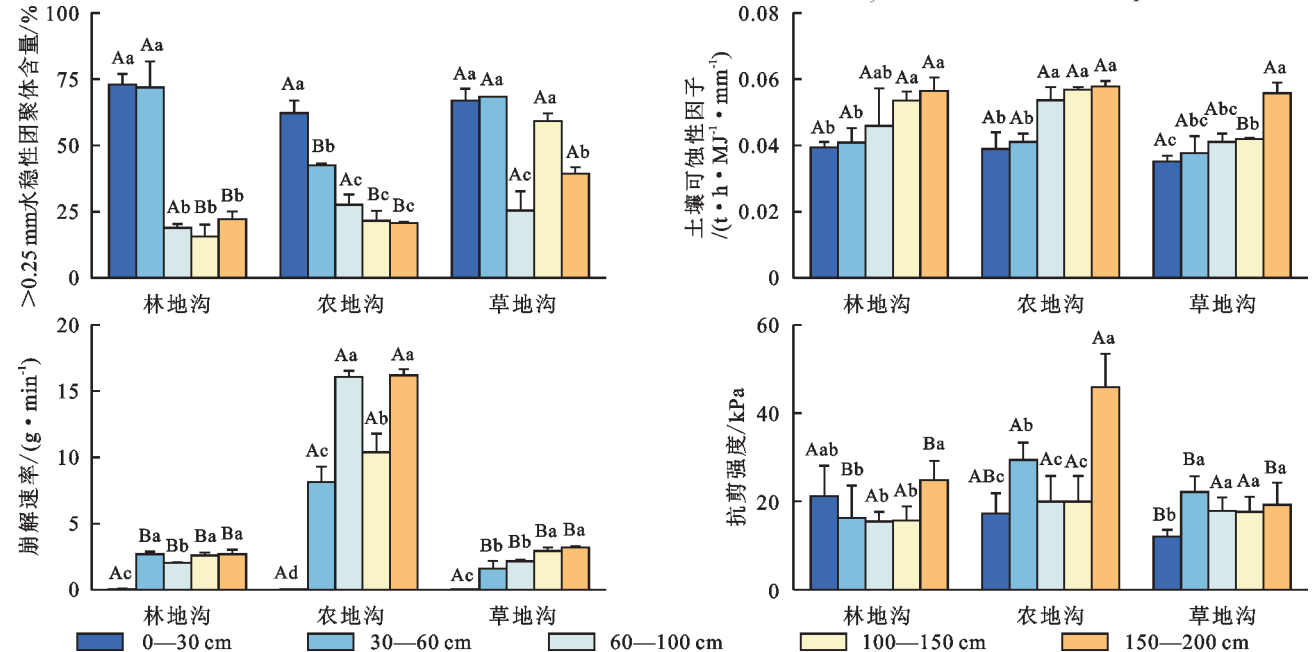


图 3 土壤可蚀性变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of soil erodibility

2.3 土壤可蚀性与环境因子的关系

对土壤可蚀性指标与土壤性质进行 Pearson 相关分析(表 3)。结果表明, $WSA_{>0.25}$ 与 SBD,SHC 存在极显著负相关关系($p < 0.01$),与粉粒含量(Silt)存在显著负相关关系($p < 0.05$),与 SOC 和 TN 存在极显著正相关关系($p < 0.01$),与 RBD 存在显著正相关关系($p < 0.05$),进一步分析发现 $WSA_{>0.25}$ 与 SBD,SHC, Silt,SOC 和 TN 呈显著线性关系,与 RBD 呈指数函数关系(图 4)。土壤可蚀性因子 K 除与 RBD 的相关性没有达到显著水平外,与其他各土壤性质之间均存在着显著或极显著的相关关系($p < 0.05$),其中与 SBD,SHC 和 Silt 呈极显著正相关($p < 0.01$),与 SWC, SOC, TN, TP 的相关性达显著水平($p < 0.05$),回归分析发现土壤可蚀性因子 K 值随 SBD,SHC 和 Silt 的增加呈线性增加,随 SOC, TN 和 TP 呈指数函数递减。

SDR 与 SBD,SHC 及 Silt 存在显著的正相关关系,回归分析表明 SDR 随 SBD 和 SHC 的增加呈线性增加,随 Silt 的增加呈指数递增。而 τ_f 仅与 SHC 存在显著的相关关系($p < 0.05$),二者呈显著的线性相关关系。

表 3 土壤可蚀性因子与影响因素的 Pearson 相关性分析
Table 3 Pearson correlation analysis of soil erodibility factors and influencing factors

| 指标 | $WSA_{>0.25}$ | K factor | SDR | τ_f |
|------|---------------|------------|---------|----------|
| SBD | -0.647** | 0.811** | 0.549* | 0.373 |
| SWC | 0.380 | -0.533* | -0.389 | -0.118 |
| SHC | -0.528** | 0.761** | 0.718** | 0.613* |
| Silt | -0.567* | 0.777** | 0.519* | 0.505 |
| SOC | 0.754** | -0.825** | -0.439 | -0.203 |
| TN | 0.728** | -0.771** | -0.387 | -0.169 |
| TP | 0.479 | -0.523* | -0.237 | 0.002 |
| RBD | 0.535* | -0.446 | -0.466 | -0.200 |

注:**表示指标之间在 0.01 水平上显著相关,*表示指标之间在 0.05 水平上显著相关。

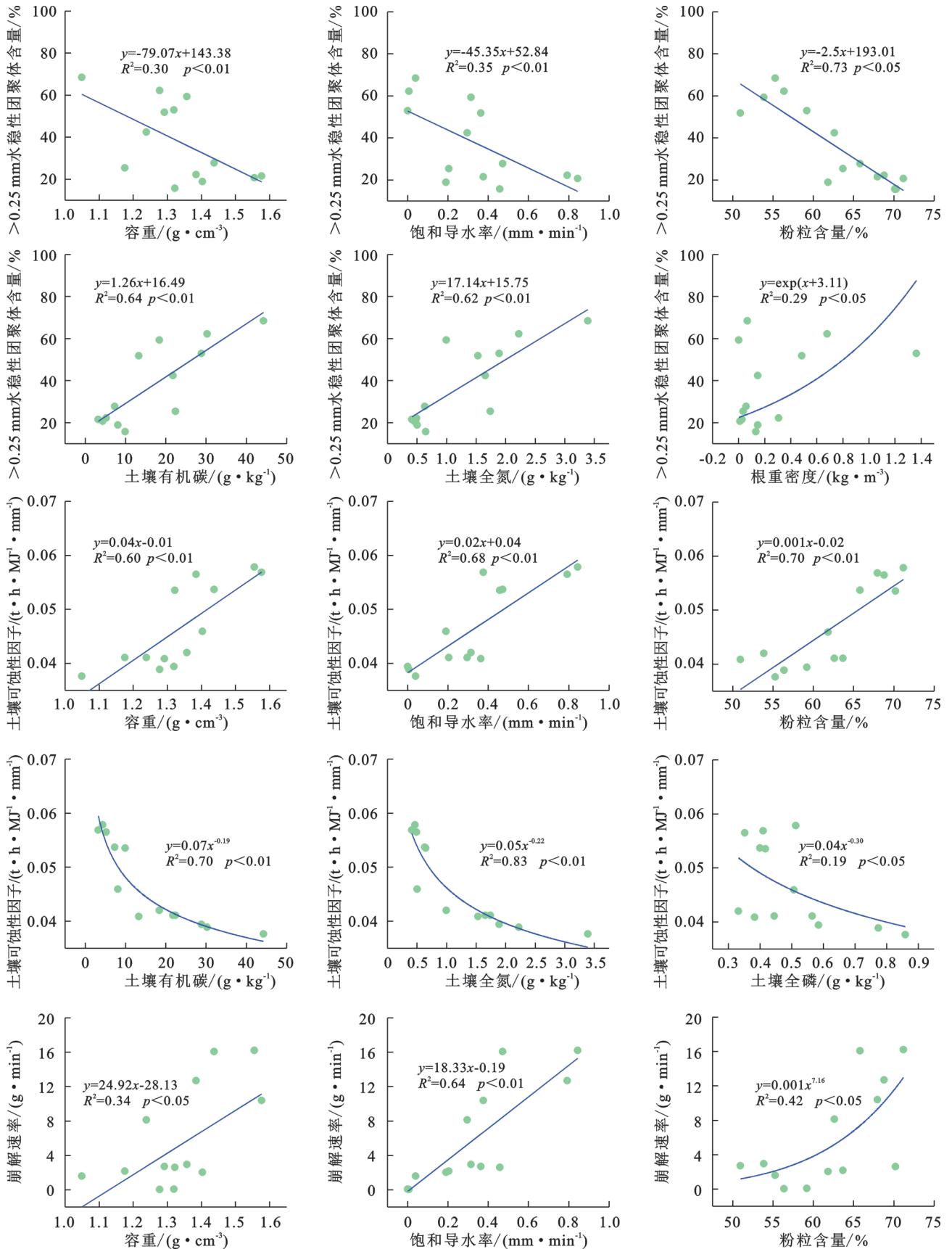


图 4 土壤可蚀性因子与土壤及根系性质的关系

Fig. 4 Relationship between soil erodibility factors and soil and root properties

2.4 冗余分析

在相关性分析的基础上,选取 SOC, Silt, SHC,

RBD, TP, SWC 和 SBD 共 7 个指标作为解释变量,在 K, SDR, τ_f 和 $WSA_{>0.25}$ 作为响应变量,进行冗余分析

(RDA),结果如图5所示。结果表明,RDA的第一排序轴和第二排序轴对土壤可蚀性的解释率分别为65.43%和9.10%,累计解释率为74.53%, $WSA_{>0.25}$ 分布在第一象限, K, SDR, τ_f 这3个指标分布在第二象限。各因子对土壤可蚀性的解释度如图5所示, SOC 对土壤可蚀性的影响达极显著水平($p < 0.01$),解释度为46.1%,是影响

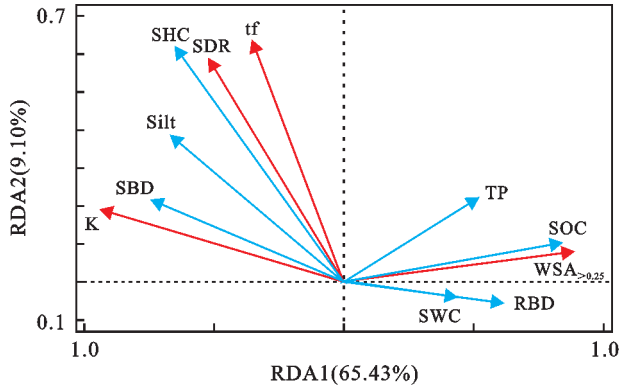


图5 土壤可蚀性与土壤性质间的冗余分析(RDA)及因子贡献

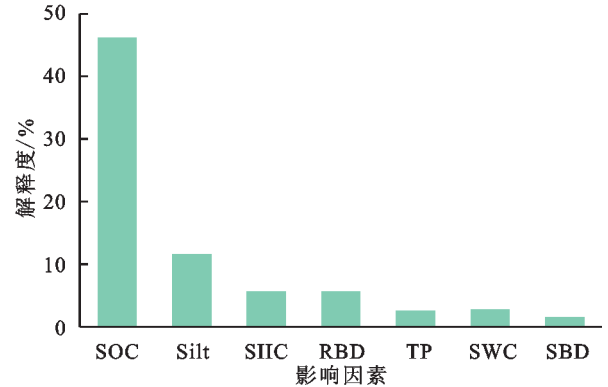
Fig. 5 Redundancy analysis (RDA) and factor contributions between soil erodibility and soil properties

3 讨论

3.1 不同类型侵蚀沟土壤性质的差异

本研究结果显示,不同类型侵蚀沟的平均根重密度呈现出以下顺序:林地沟>农地沟>草地沟(图1),而平均土壤容重表现为农地沟>林地沟>草地沟,含水量反之。这是由于林地沟和草地沟容重相对较小且含水量相对较高,植被生长发育状况良好。但是草地沟表层土壤(0—30 cm)的含水量显著低于30—60 cm土层,这与植物根系的作用有关^[21],草地沟表层的土壤水分由于植被根系的影响而被吸收。土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,其稳定性影响着土壤抗侵蚀能力,粒径>0.25 mm的水稳性团聚体含量常被用作评价团聚体稳定性的指标之一。本研究中>0.25 mm水稳性团聚体含量表现为草地沟>林地沟>农地沟,这是因为根系在土壤中的穿插交织,形成网络状的根群结构,这种结构能够将土壤紧密包裹,使土壤具有较高的团聚体稳定性和抗侵蚀性^[22],由于草本植物覆盖度高,从而使得草地沟相比于林地沟和农地沟,具有较好的土壤抗蚀性和土壤稳定性特征。林地人为扰动较少且地表植被丰富表层土壤根系发达,根系的盘绕固结作用增强了土壤团聚体稳定性,土壤有机碳和全氮含量表现为在0—30 cm土层,农地沟大于林地沟和草地沟,更深土层则呈现农地沟<林地沟<草地沟(图2),农地在耕作过程中会施加有机肥,从而使得农地表层土壤中具有较高的养分含量;同时,农作物根系也主要集中在0—30 cm土层,其可通过根系分泌物与土壤相互作

土壤可蚀性的主要因素;其余各指标对土壤可蚀性的影响程度由高到低排序为Silt>SHC>RBD>TP>SWC>SBD。 SOC, TP, SWC 和RBD对 $WSA_{>0.25}$ 有着正向影响, SOC 的正向影响程度最大,其次分别是RBD,TP和SWC。 $SHC, Silt$ 和SBD对 K, SDR 和 τ_f 产生正向影响,其中SHC的正向影响程度最大。



用改善土壤有机质含量^[23]。而在深层土壤,传统的田间管理措施破坏了土壤表层的自然土体结构,在一定程度上降低了植物根系的稳定作用,机械耕作导致孔隙空间增加,空气交换增加了有机物微生物腐烂的氧气利用率,导致深层土壤有机碳、全氮和全磷的含量低于草地沟和林地沟^[24]。土壤可蚀性反映了土壤对降雨侵蚀及径流冲刷等抗蚀能力的高低^[25]。本研究土壤可蚀性因子K值在0.033 1~0.059 5 t·h/(MJ·mm)间,具有中等到强度的土壤可蚀性。各侵蚀沟平均土壤可蚀性K值表现为农地沟>林地沟>草地沟,相比于草地沟和林地沟,农地沟的K值较大,说明更容易发生土壤侵蚀。

3.2 影响土壤可蚀性的因素

本研究发现土壤可蚀性与土壤理化性质之间存在显著的相关关系(表3)。土壤容重反映出土壤的紧实程度,可以直接影响土壤颗粒被径流分散的难易程度,进而影响土壤的抗侵蚀能力^[26]。相关性分析表明土壤容重与>0.25 mm水稳性团聚体含量、土壤可蚀性因子K和崩解速率存在着显著的相关关系,由图5可知,容重对>0.25 mm水稳性团聚体含量有着显著的负向影响,对土壤可蚀性因子K和崩解速率存在显著的正向影响。径流对土壤的冲刷与剥蚀作用使得土壤结构变差,土壤总孔隙数量随着容重的增加而减少,土体蓄水能力降低,从而降低土壤抗冲性能、增加土壤可蚀性。饱和导水率对土壤可蚀性因子K、崩解速率和抗剪强度存在显著的负向影响,其反映了土壤中水分的入渗速度,当土壤饱和导水率较低时,表层水分下渗困难导致土壤表面水分积聚,土壤结构变

差,容易被径流剥蚀。粉粒含量与土壤可蚀性因子 K 、崩解速率和抗剪强度间存在负相关关系,粉粒易堆积形成紧密的结构,增加土壤容重,从而降低土壤的孔隙度和通气性,且粉粒含量较高的土壤在侵蚀发生时易被剥落^[27],进而降低土壤抗侵蚀的能力。

土壤有机碳是导致土壤可蚀性变化的最主要因素,其对 >0.25 mm水稳性团聚体含量有着正向影响,而对土壤可蚀性因子 K 、崩解速率和抗剪强度产生负向影响,土壤有机质可以粘结土壤颗粒形成稳定团聚体,从而增强土壤抗侵蚀能力^[28]。根重密度可以解释土壤可蚀性变化的6%,对土壤可蚀性因子 K 、崩解速率和抗剪强度间产生负向影响(图5),根系间相互缠绕形成发达的网络结构可以有效固结土壤,降低土壤容重,提高土壤的抗冲刷能力^[22];而且根土黏结作用和根系生物化学作用能够提高土壤有机质含量,使得土壤团聚体稳定性增强,减弱降雨和地表径流对表土的冲刷,进而降低土壤可蚀性^[29-30]。

4 结论

(1) 不同侵蚀沟沟岸土壤理化性质和根系性质差异显著。各侵蚀沟沟岸根系主要集中在0—30 cm土层,林地沟的根系密度显著高于草地沟和农地沟;土壤容重和饱和导水率均表现为农地沟 $>$ 林地沟 $>$ 草地沟,含水量与之相反;草地沟的有机碳、全氮和全磷含量分别是林地沟的1.87倍、2.20倍和1.33倍,是农地沟的2.01倍、1.65倍和1.08倍。在垂直深度上,容重、饱和导水率均随土层增加而增大,而含水量、有机碳、全氮和全磷均随土层增加而降低。

(2) 各侵蚀沟沟岸土壤可蚀性具有显著差异。农地沟的土壤可蚀性因子 K 和抗剪强度、崩解速率均高于林地沟和草地沟,在垂直深度上均呈现出随土层增加而增大的趋势;而 >0.25 mm土壤水稳性团聚体含量则呈现出与之完全相反的趋势,说明农地沟更容易被侵蚀。

(3) 土壤性质和植物根系条件差异是导致土壤可蚀性变化的主要原因。土壤性质和根重密度对土壤可视性的解释度为74.53%,土壤有机碳和粉粒含量是影响土壤可蚀性变化的主要因素,有机碳对 >0.25 mm土壤水稳性团聚体含量存在正向影响,而对土壤可蚀性因子 K 、崩解速率和抗剪强度存在负向影响,粉粒含量对土壤可蚀性指标的影响与有机碳相反;植物根系可以固结土壤从而增加土壤抗侵蚀性。

参考文献(References):

[1] Hao H X, Cheng L, Guo Z L, et al. Plant community characteristics and functional traits as drivers of soil erod-

ibility mitigation along a land degradation gradient[J]. Land Degradation & Development, 2020,31(14):1851-1863.

- [2] 刘宝元,张甘霖,谢云,等.东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J].科学通报,2021,66(1):96-106.
Liu B Y, Zhang G L, Xie Y, et al. Delineating the black soil region and typical black soil region of northeastern China [J]. Chinese Science Bulletin, 2021,66(1):96-106.
- [3] 张兴义,刘晓冰.东北黑土区沟道侵蚀现状及其防治对策[J].农业工程学报,2021,37(3):320-326.
Zhang X Y, Liu X B. Current scenario of gully erosion and its control strategy in Mollisols areas of Northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(3):320-326.
- [4] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等.东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J].水土保持学报,2022,36(2):1-12.
Zhang G H, Yang Y, Liu Y N, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of Northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):1-12.
- [5] 顾治家,谢云,李鹭,等.利用CSLE模型的东北漫川漫岗区土壤侵蚀评价[J].农业工程学报,2020,36(11):49-56.
Gu Z J, Xie Y, Li A, et al. Assessment of soil erosion in rolling Hilly region of Northeast China using Chinese Soil Loss Equation (CSLE) model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11):49-56.
- [6] Zhang S M, Han X, Cruse R M, et al. Morphological characteristics and influencing factors of permanent gully and its contribution to regional soil loss based on a field investigation of 393 km² in Mollisols Region of Northeast China[J]. Catena, 2022,217:106467.
- [7] 范家伟,朱广宇,上官周平,等.黄土丘陵区刺槐林土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性动态变化[J].水土保持学报,2023,37(3):19-26.
Fan J W, Zhu G Y, Shangguan Z P, et al. Dynamics changes of soil aggregate stability and soil erodibility of *Robinia pseudoacacia* plantations in hilly region of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(3):19-26.
- [8] 海春兴,赵焯,陈志凡,等.河北省坝上不同土地利用方式土壤可蚀性研究:以河北省丰宁县大滩乡三道河为例[J].中国生态农业学报,2005,13(1):146-147.
Hai C X, Zhao Y, Chen Z F, et al. Studies on soil erosion to the different lands with different utilizations in Bashang, Hebei Province: a case study from Sandaohu, Datan Town, Fengning County, Hebei Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005,13(1):146-147.
- [9] Bryan R B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope [J]. Geomorphology, 2000, 32 (3/4) : 385-415.
- [10] Flanagan D C, Gilley J E, Franti T G. Water erosion prediction project (WEPP) : Development history,

- model capabilities, and future enhancements[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(5):1603-1612.
- [11] Vanwalleghem T, Gómez J A, Infante Amate J, et al. Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene[J]. Anthropocene, 2017, 17:13-29.
- [12] 梁音,刘宪春,曹龙熹,等.中国水蚀区土壤可蚀性K值计算与宏观分布[J].中国水土保持,2013(10):35-40.
Liang Y, Liu X C, Cao L X, et al. K Value calculation of soil erodibility of China water erosion areas and its macro-distribution[J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(10):35-40.
- [13] 陆银梅,李忠武,聂小东,等.红壤缓坡地径流与土壤可蚀性对土壤有机碳流失的影响[J].农业工程学报, 2015, 31(19):135-141.
Lu Y M, Li Z W, Nie X D, et al. Effects of overland flow and soil erodibility on soil organic carbon loss in red soil sloping land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(19):135-141.
- [14] 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.
Wang B, Zheng F L, Wang Y X. Adaptability analysis on soil erodibility models in typical thin layer black soil area of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6):126-131.
- [15] 张加子琦,贾燕锋,王佳楠,等.东北黑土区长缓复合侵蚀坡面土壤可蚀性参数特征[J].土壤学报,2020, 57(3):590-599.
Zhang J Z Q, Jia Y F, Wang J N, Qi X, et al. Parameter characteristics of soil erodibility of long gentle slopes under composite erosion in the black soil region of northeast China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3):590-599.
- [16] 于博威,张晴雯,郝卓,等.东北黑土区长缓坡耕地横坡垄作与地形对土壤可蚀性的交互作用[J].中国农业科学,2023, 56(23):4706-4716.
Yu B W, Zhang Q W, Hao Z, et al. Interaction between transverse ridge tillage and topography on soil erodibility along the long gentle slope in a typical black soil region of Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(23):4706-4716.
- [17] 蒋定生,李新华,范兴科,等.黄土高原土壤崩解速率变化规律及影响因素研究[J].水土保持通报,1995, 15(3):20-27.
Jiang D S, Li X H, Fan X K, et al. Research on the law of soil disintegration rate change and It's effect factors on the Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995, 15(3):20-27.
- [18] Guo M M, Chen Z X, Wang W L, et al. Revegetation induced change in soil erodibility as influenced by slope situation on the Loess Plateau[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 772:145540.
- [19] Zhang B J, Zhang G H, Zhu P Z, et al. Temporal variations in soil erodibility indicators of vegetation-restored steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 286:106661.
- [20] Chen S Q, Zhang G H, Luo Y F, et al. Soil erodibility indicators as affected by water level fluctuations in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Catena, 2021, 207:105692.
- [21] 葛芳红,周正朝,刘俊娥,等.黄土丘陵区4种典型植物根系分布特征及对土壤分离速率的影响[J].水土保持学报,2017, 31(6):164-169.
Ge F H, Zhou C, Liu J E, et al. Distribution characteristics of root and their effect on soil separation rate of four typical plants in Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6):164-169.
- [22] 李强,刘国彬,许明祥,等.黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J].农业工程学报,2013, 29(10): 153-159.
Li Q, Li Q, Xu M X, et al. Soil anti-scourability and its related physical properties on abandoned land in the Hilly Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(10): 153-159.
- [23] 娄义宝,康宏亮,王文龙,等.黄土高原沟壑区沟头植被根系垂直分布及其对土壤抗侵蚀性的影响[J].中国农业科学,2023, 56(1):90-103.
Lou Y B, Kang H L, Wang W L, et al. Vertical distribution of vegetation roots and its influence on soil erosion resistance of gully heads on the gullied Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(1):90-103.
- [24] Ye L P, Tan W F, Fang L C, et al. Spatial analysis of soil aggregate stability in a small catchment of the Loess Plateau, China: I. Spatial variability[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 179:71-81.
- [25] 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.
Wei H, Zhao W W, Wang J. Research progress on soil erodibility [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8):2749-2759.
- [26] 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.
Guo M, Xiong D H, Zhang B J, et al. Study on soil water-physical properties of different gully positions in dry-hot valley[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(3):635-640.
- [27] 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,2018, 38(6):121-126.
Qiao F, Wang M G, Li J, et al. Soil erodibility of typical climate types in shergyla mountain [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2018, 38(6):121-126.

- Jin Z X, Yu P T, Wan Y F, et al. Characteristics of surface runoff and sediment yield from the typical vegetation forms in the Diediegou Watershed of Liupan Mountains [J]. *Terrestrial Ecosystem and Conservation*, 2022, 2(2):20-28.
- [28] 李子君, 刘家圆, 王海军. 北方土石山区坡面水土流失特征研究[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(1):1-9.
- Li Z J, Liu J Y, Wang H J. Study on the characteristics of soil and water loss on the slopes in northern rocky mountain area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(1):1-9.
- [29] 朱锐鹏, 刘殿君, 张世豪, 等. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型水土流失效应[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4):10-17.
- Zhu R P, Liu D J, Zhang S H, et al. Characteristics of runoff and sediment yield in different land use types in hilly and Gully Region of the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4):10-17.
- [30] Wei W, Feng X R, Yang L, et al. The effects of terracing and vegetation on soil moisture retention in a dry hilly catchment in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647:1323-1332.
- ~~~~~
- (上接第 27 页)
- [28] 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.
- Rao L Y, Xu Y Q, Hu J R, et al. Study on soil erodibility factor K on soil cover area of pisha sandstone region [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(4):763-773.
- [29] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2005, 29(2):189-217.
- [30] Zhou Z C, Gan Z T, Shangguan Z P, et al. Effects of grazing on soil physical properties and soil erodibility in semiarid grassland of the Northern Loess Plateau (China)[J]. *Catena*, 2010, 82(2):87-91.
- ~~~~~
- (上接第 35 页)
- [22] Bracken L J, Croke J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(13):1749-1763.
- [23] Li Y, Huang S L. Landscape ecological risk responses to land use change in the Luanhe River Basin, China [J]. *Sustainability*, 2015, 7(12):16631-16652.
- [24] 李莹, 黄岁樑. 滦河流域景观格局变化对水沙过程的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(7):2463-2475.
- Li Y, Huang S L. Effects of landscape pattern change on flow and sediment processes in the Luanhe River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7):2463-2475.
- [25] Zhang T, Wang L H, Li J Z, et al. Prediction of the soil water content in the Luanhe river basin based on CMIP6 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 425:138852.
- [26] 王波, 王夏晖. 推动山水林田湖生态保护修复示范工程落地出成效:以河北围场县为例[J]. *环境与可持续发展*, 2017, 42(4):11-14.
- Wang B, Wang X H. Promote the demonstration project of ecological protection and restoration of mountains, rivers, forests, farmland and lakes implementation and improve its effectiveness, based on Weichang County, Hebei Province [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2017, 42(4):11-14.
- [27] Xia Y, Fang C Y, Lin H, et al. Spatiotemporal evolution of wetland eco-hydrological connectivity in the Poyang Lake area based on long time-series remote sensing images[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(23):4812.
- ~~~~~
- (上接第 44 页)
- [27] 梁鹏飞, 辛惠娟, 李宗省, 等. 祁连山黑河径流变化特征及影响因素研究[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(5):1460-1471.
- Liang P F, Xin H J, Li Z X, et al. Runoff variation characteristics and influencing factors in the Heihe River Basin in the Qilian Mountains [J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(5):1460-1471.
- [28] 赵美亮, 曹广超, 曹生奎, 等. 1956—2016 年大通河温度和降水及其与径流变化的关系[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3):111-117, 125.
- Zhao M L, Cao G C, Cao S K, et al. Temperature and precipitation and their relationship with runoff change in Datong River from 1956 to 2016 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3):111-117, 125.
- [29] 温得平, 历明月, 弋博. 大通河流域径流演变特征及其影响因素[J]. *中南民族大学学报:自然科学版*, 2024, 43(5):593-602.
- Wen D P, Li M Y, Yi B. Runoff evolution characteristics and influence factors in the Datong River Basin [J]. *Journal of South-Central Minzu University: Natural Science Edition*, 2024, 43(5):593-602.
- [30] 王大超. 大通河径流变化特征及其影响因素探析[D]. 兰州:兰州大学, 2019.
- Wang D C. Characteristics of runoff change and its influencing factors in Datong River [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.