

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.02.003

CSTR:32310.14.stbcb.2026.02.003

张立波,郭明明,巩子瑞,等.黑土切沟沟头土壤特性分异及其对K值影响[J].水土保持学报,2026,40(2):93-102.

ZHANG Libo, GUO Mingming, GONG Zirui, et al. Differentiation of soil characteristics in gully head of black soil and its influence on K value[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 93-102.

黑土切沟沟头土壤特性分异及其对K值影响

张立波¹, 郭明明², 巩子瑞¹, 鲁文龙¹, 郑阳锐¹, 吴一凡¹,
张源玲¹, 郑晓奕¹, 刘健³, 李冠男³, 杨帆^{1,2}

(1.吉林农业大学资源与环境学院,长春 130118; 2.中国科学院东北地理与农业生态研究所,
哈尔滨 150001; 3.吉林省土壤肥料总站,长春 130012)

摘要: [目的] 探究典型黑土区切沟沟头分层土壤可蚀性K值与理化性质的关系,揭示关键因子作用机制,为黑土区水土流失治理提供理论依据。[方法] 通过对海龙市海南乡发育在农田内的切沟沟头进行调查,选取11个典型黑土切沟沟头剖面,划分土壤层次(A层、B层、C层),采集分层土壤样品,测定土壤理化性质。根据EPIC模型计算土壤可蚀性K值。[结果] 1)不同粒级水稳性团聚体(>5、2~5、1~2、0.5~1、>0.25 mm)均随沟头土层深度增加呈下降趋势,平均重量直径、几何平均直径、土壤总孔隙度、有机质等指标均表现为A层>B层>C层,土壤体积质量与之相反;2)切沟沟头土壤可蚀性K值为0.042 9~0.051 7(t·h)/(MJ·mm),属于高可蚀性,C层可蚀性K值显著高于A、B层;3)相关性分析结果表明,土壤可蚀性K值与土壤体积质量、黏粒质量分数呈极显著正相关,与土壤总孔隙数量、有机质呈极显著负相关。结构方程模型表明,土壤体积质量、黏粒质量分数对可蚀性K值存在显著直接正向影响,有机质对可蚀性K值存在极显著直接负向影响。切沟沟头受成土作用影响分层明显,且土壤理化性质差异显著,C层侵蚀风险高,有机质是影响可蚀性K值的关键因素。[结论] 研究结论可为东北黑土区侵蚀沟治理和揭示土壤侵蚀机制提供科学依据。

关键词: 切沟沟头; 土壤理化性质; 可蚀性K值; 典型黑土

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0093-10

Differentiation of Soil Characteristics in Gully Head of Black Soil and Its Influence on K Value

ZHANG Libo¹, GUO Mingming², GONG Zirui¹, LU Wenlong¹, ZHENG Yangrui¹, WU Yifan¹,
ZHANG Yuanling¹, ZHENG Xiaoyi¹, LIU Jian³, LI Guannan³, YANG Fan^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130061, China; 2.Northeast
Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150001, China;
3.Jilin Soil Fertilizer General Station, Changchun 130012, China)

Abstract: [Objective] Explore the relationship between the K value of soil erodibility and physicochemical properties of stratified soils at the head of the gully in the typical black soil region, reveal the mechanism of key factors, and provide a theoretical basis for soil erosion management in the black soil region. [Methods] By investigating the head of gullies developed in farmland in Hainan Township, Hailun City, 11 typical black soil gullies head profiles were selected, soil layers (A, B, and C layers) were divided, stratified soil samples were collected, and soil physicochemical properties were determined. Soil erodibility K values were calculated according to the EPIC model. [Results] 1) The water stable aggregates of different grain sizes (>5 mm, 2—5 mm, 1—2 mm, 0.5—1 mm, and >0.25 mm) showed a decreasing trend with the increase of soil depth at the head of the gully, and the indicators of mean weight diameter, geometric mean diameter, total soil porosity and organic matter were

收稿日期: 2025-06-27

修回日期: 2025-08-25

录用日期: 2025-09-04

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-11-18

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(42477381); 吉林省自然科学基金面上项目(20250102200JC)

第一作者: 张立波(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: zlb202504@163.com

通信作者: 杨帆(1987—), 男, 博士, 硕士生导师, 主要从事水土保持与区域地质调查研究。E-mail: yangfanjld@163.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

all in the A layer > B layer > C layer, and the soil bulk density was in the opposite direction; 2) Soil erodibility K value ranges from 0.042 9 to 0.051 7 (t·h)/(MJ·mm), which belongs to high erodibility, and the erodibility K value of the C layer is significantly higher than that of the A and B layers; 3) The results of correlation analysis showed that the soil erodibility K value was significantly positively correlated with soil bulk density and clay content, and was significantly negatively correlated with the total number of soil pores and organic matter. Structural equation modeling showed that the soil bulk density and clay content had a significant direct positive effect on the K value of erodibility, and organic matter had a highly significant direct negative effect on the K value of erodibility. The head of the gully is clearly stratified by soil formation and has significant differences in soil physicochemical properties, with a high risk of erosion in the C layer. Organic matter content is the key factor affecting the K value of erodibility. [Conclusion] This study can provide a scientific basis for managing erosion gully and revealing the soil erosion mechanism in the typical black soil region.

Keywords: gully head; soil physical and chemical properties; erodibility K value; typical black soil

Received: 2025-06-27

Revised: 2025-08-25

Accepted: 2025-09-04

Online(www.cnki.net): 2025-11-18

沟蚀作为农业地区土壤退化最严重的表现形式,是气候、地形、土壤、人类活动等多种因素共同作用的结果,已成为一个复杂的全球性环境问题^[1]。沟蚀不仅切割农田,限制农业生产,还严重阻碍经济可持续发展^[2]。沟蚀包括沟头溯源侵蚀、沟岸扩张及沟底下切等过程,沟头溯源侵蚀在沟壑侵蚀中起着关键作用,决定沟壑在早期阶段的侵蚀规模和侵蚀强度^[3],显著影响沟壑侵蚀过程和形态发展^[1],由于径流不断冲刷沟头致其失稳,溯源侵蚀强烈,产生严重水土流失问题。鉴于此,研究沟头侵蚀机制并制定有效控制策略至关重要。

土壤可蚀性 K 值是衡量土壤抗侵蚀能力的重要指标,也是定量研究土壤侵蚀的基础^[4]。 K 值主要受土壤颗粒组成、结构、土壤体积质量、孔隙度和有机质质量分数等理化性质的综合影响^[5],而不同地区的关键控制因素存在差异。QI 等^[6]在东北黑土区针对不同土地利用类型切沟沟头的研究表明,土壤性质对 K 值的影响显著大于根系特征;WANG 等^[7]量化植被恢复对黄土高原 K 因子分布的影响,指出 K 因子主要受土壤有机质、含水量、植物凋落物密度、土壤体积质量及生物结皮厚度等因素的调节;王亚娟等^[5]研究黄土高原西部宁南山侵蚀沟不同部位土壤理化性质和可蚀性得出,沟头 K 值大于沟岸和沟床。

东北黑土区作为我国重要的商品粮基地,从 20 世纪 50 年代至今,由于人们长期对东北黑土区进行高强度的开发利用和掠夺式的经营,使其土壤侵蚀强烈,产生严重的沟蚀^[8]。截至目前,东北黑土区形成约 67 万条侵蚀沟,其中,长度在 100~500 m 的侵蚀沟占比为 69.49%,且以切沟为主要类型^[9]。已有研究^[10]多集中于黑土区沟蚀发育过程与机制、侵蚀临界条件

和监测方法等方面,而对黑土沟蚀区沟头分层土壤理化性质与 K 值的关系研究相对较少。因此,本文采用野外调查结合室内分析的方法,探究沟头分层土壤理化性质差异及其与土壤可蚀性 K 值的关系。研究成果有望深入理解沟头侵蚀机制,提高土壤侵蚀监测精度,为土壤侵蚀治理措施的制定、土壤侵蚀风险评估和可持续土地管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省海伦市海南乡小流域(47°13'~47°17'N, 126°50'~126°53'E),海拔 199~262 m,属温带大陆性季风气候,夏季温暖多雨,冬季寒冷干燥,四季分明(图 1)。年平均气温 2 °C,太阳照射时长 2 600~2 800 h,年平均有效积温(≥ 10 °C)为 2 450 °C,无霜期 110 d,年降水量为 500~550 mm。研究区地处漫川漫岗黑土带核心区,土壤类型以典型黑土为主,辅以少量草甸黑土和冲积土^[11],主要种植作物为玉米和大豆。该区域沟道侵蚀问题突出,70% 以上的切沟发育于农田中,且仍处于持续发展阶段^[12]。目前平均土壤侵蚀厚度约为 1.45 mm/a^[6],沟道侵蚀导致黑土层逐年变薄,土壤有机质流失,耕地日趋破碎化,严重抑制农业的可持续发展。

1.2 沟头土壤层次划分、类型鉴定与样品采集

2023 年对海伦市海南乡发育在农田内的 11 条切沟沟头进行全面调查,观察并记录 11 个典型黑土切沟沟头剖面颜色、根系、砾石、胶膜、土壤结构、侵入体及石灰反应等差异,依据土壤地理学^[13]对沟头土壤层次划分(表 1)。结果表明,沟头剖面均可划分为 A、B、C 3 层:A 层(腐殖质层)厚度约 25~65 cm,呈团粒结构,疏松多孔,植物根系密集;B 层(淀积层)厚度

为 28~45 cm,呈团粒或团块结构,多细小孔隙,可见少量铁锰结核,结构面可见胶膜和少量 SiO₂粉末;C 层(母质层)出露厚度较小,多呈核块结构,无石灰反应。综合上述发生层特征,沟头土壤类型被鉴定为

典型黑土。采样时,修整沟头剖面使其各层次能够充分体现,在每个土层中采集约 500 g 的未扰动原状土,装入密封袋带回实验室内,用于测定土壤团聚体、机械组成、总孔隙度和有机碳等相关指标。

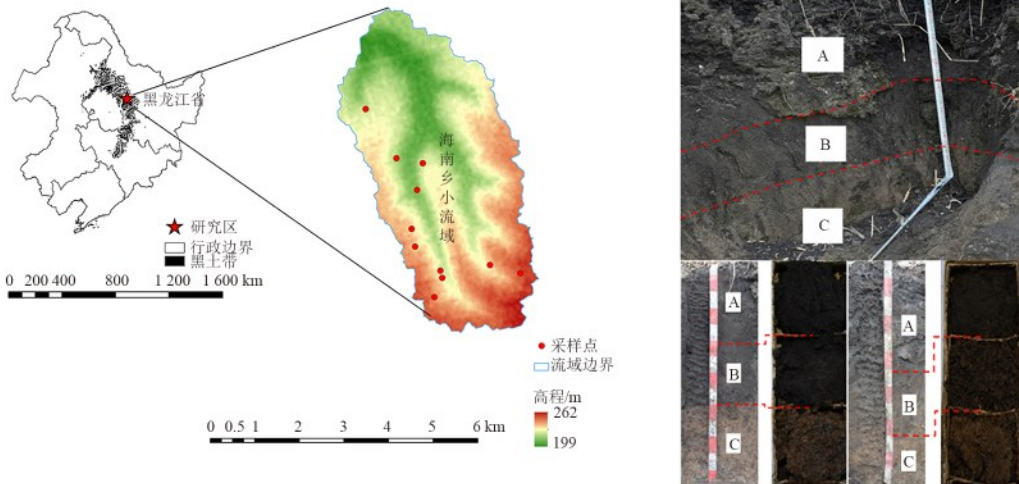


图 1 研究区位置与典型沟头土壤剖面

Fig. 1 Location of study area and soil profile of typical gully head

1.3 样品分析

土样采集后带回实验室内进行理化性质的测定。采用环刀法进行土壤体积质量(S_{BD})测定,CN 分析仪测定土壤有机碳(S_{OC})质量分数,土壤水稳性团聚体采用湿筛法测定,分别得到 >5 ($WSA_{>5}$)、 $2\sim 5$ (WSA_{2-5})、 $1\sim 2$ (WSA_{1-2})、 $0.5\sim 1$ ($WSA_{0.5-1}$)、 $0.25\sim 0.5$ ($WSA_{0.25-0.5}$)、 >0.25 ($WSA_{>0.25}$)mm 粒级团聚体,超景深显微镜获取土壤微观图像,采用 Image-Pro Plus 图像处理软件识别图像中孔隙区域,计算土壤总孔隙度(S_{TP}),土壤质地采用 MasterSizer 2000 测定,土壤颗粒分级采用美国制,分别获得土壤黏粒(CLA)、粉粒(SIL)、砂粒(SAN)质量分数,每个指标测定 3 组,取平均值。

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($WSA_{>0.25}$)^[14]、质

量分形维数(D)^[15]、有机质(SOM)^[16]等指标的计算公式为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n m_i x_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}\right) \quad (2)$$

$$WSA = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \times 100\% \quad (3)$$

$$D = 3 - \log \frac{(r < x_i)m}{m} / \log \frac{x_i}{X_{max}} \quad (4)$$

$$SOM = SOC \times 1.724 \quad (5)$$

式中: x_i 为任意相邻粒级团聚体的平均直径,mm; m_i 为某粒径团聚体质量占比; $M_{r>0.25}$ 为 >0.25 mm 团聚体质量,g; M_T 为团聚体总质量,g; X_{max} 为最大团聚体粒径; $m_{(r < x_i)}$ 为小于 x_i 粒径团聚体的总质量; m 为各粒径团聚体总质量。

根据 EPIC 模型^[17]计算土壤可蚀性 K 值,公式为:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 SAN \left(1 - \frac{SIL}{100} \right) \right] \right\} \left(\frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3} \times \left(1.0 - \frac{0.25 SOC}{SOC + \exp(3.72 - 2.95 SOC)} \right) \left(1.0 - \frac{0.7 SN1}{SN1 + \exp(-5.51 + 22.9 SN1)} \right) \quad (6)$$

式中: K 为使用 EPIC 模型计算出的土壤可蚀性 K 值, $(t \cdot h)/(MJ \cdot mm)$; SAN、SIL 和 CLA 分别为土壤砂粒(0.05~2.0 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)及黏粒(<0.002 mm)质量分数,%;SOC 为有机碳质量分数,%;SN1=1-SAN/100, K 值单位为美国制,乘以 0.1317 转化为国际制单位 $(t \cdot h)/(MJ \cdot mm)$,本文 K 值均采用国际制单位。

1.5 数据分析与处理

数据经 Excel 软件整理后,运用 SPSS 27.0 软件进行统计学分析,采用非参数 Kruskal-Wallis H 检验和 Statregion 的成对比较($p < 0.05$),分析切沟沟头分层土壤理化性质及可蚀性 K 值的差异。

采用斯皮尔曼相关分析法分析切沟沟头土壤可蚀性因子 K 和土壤理化性质之间的相关性。通过

“lavaan”R包进行结构方程模型构建,在构建模型前,对具有非正态分布的变量进行Box-Cox数据转换,并采用最大似然法估计,使用自由度df、卡方(χ^2)、 p

值、均方根误差(RMSEA)、拟合优度指数(GFI)和比较拟合指数(CFI)来验证模型的可行性,采用Origin 2021软件绘图。

表 1 沟头土壤基本信息

Table 1 Basic information of gully head soils

沟号	土壤分层	土层深度/cm	土壤颜色	土壤结构	根系数量	土内砾石/%	土壤结持性	土壤质地
1	A	0~55	10YR2-1	团粒	中	0	疏松	壤土
	B	55~90	10YR2-2	团粒	中	0	疏松	壤土
	C	90~115	10YR3-4	团块	少	0	紧实	黏壤土
2	A	0~25	10YR2-1	团粒	少	0	疏松	黏壤土
	B	25~68	10YR2-2	团粒	少	0	疏松	黏壤土
	C	68~103	10YR3-4	核块	无	0	稍紧实	黏土
3	A	0~37	10YR2-1	团粒	多	0	疏松	壤土
	B	37~70	10YR2-2	团粒	中	0	疏松	壤土
	C	70~110	10YR3-2	团块	少	0	稍紧实	黏壤土
4	A	0~52	10YR2-1	团粒	中	0	疏松	壤土
	B	52~90	10YR2-2	团粒	少	0	疏松	壤土
	C	90~150	10YR3-2	核块	无	0	稍紧实	黏壤土
5	A	0~65	10YR2-1	团粒	中	0	疏松	壤土
	B	65~110	10YR2-2	团粒	少	0	疏松	壤土
	C	110~150	10YR3-2	团块	无	0	稍紧实	黏壤土
6	A	0~50	10YR2-1	团粒	中	0	疏松	黏壤土
	B	50~85	10YR2-2	团块	极少	0	稍紧实	黏壤土
	C	85~100	10YR3-2	核块	无	0	稍紧实	黏土
7	A	0~62	10YR2-1	团粒	少	0	疏松	黏壤土
	B	62~100	10YR2-2	团块	少	0	稍紧实	黏壤土
	C	100~133	10YR3-6	核块	无	0	稍紧实	黏土
8	A	0~37	10YR2-1	团粒	极少	0	疏松	壤土
	B	37~65	10YR2-2	团块	无	0	稍紧实	黏壤土
	C	65~105	10YR3-6	核块	无	0	稍紧实	黏土
9	A	0~55	10YR2-1	团粒	极少	2.24	疏松	壤土
	B	55~97	10YR2-2	团块	极少	0	疏松	黏壤土
	C	97~115	10YR3-4	核块	无	0	稍紧实	黏土
10	A	0~35	10YR2-1	团粒	中	0	疏松	壤土
	B	35~70	10YR2-2	团粒	少	0	疏松	壤土
	C	70~103	10YR3-4	团块	少	0	稍紧实	黏壤土
11	A	0~52	10YR2-1	团粒	中	0	疏松	黏壤土
	B	52~95	10YR2-2	团粒	无	0	稍紧实	黏壤土
	C	95~130	10YR3-2	团块	无	0	稍紧实	黏土

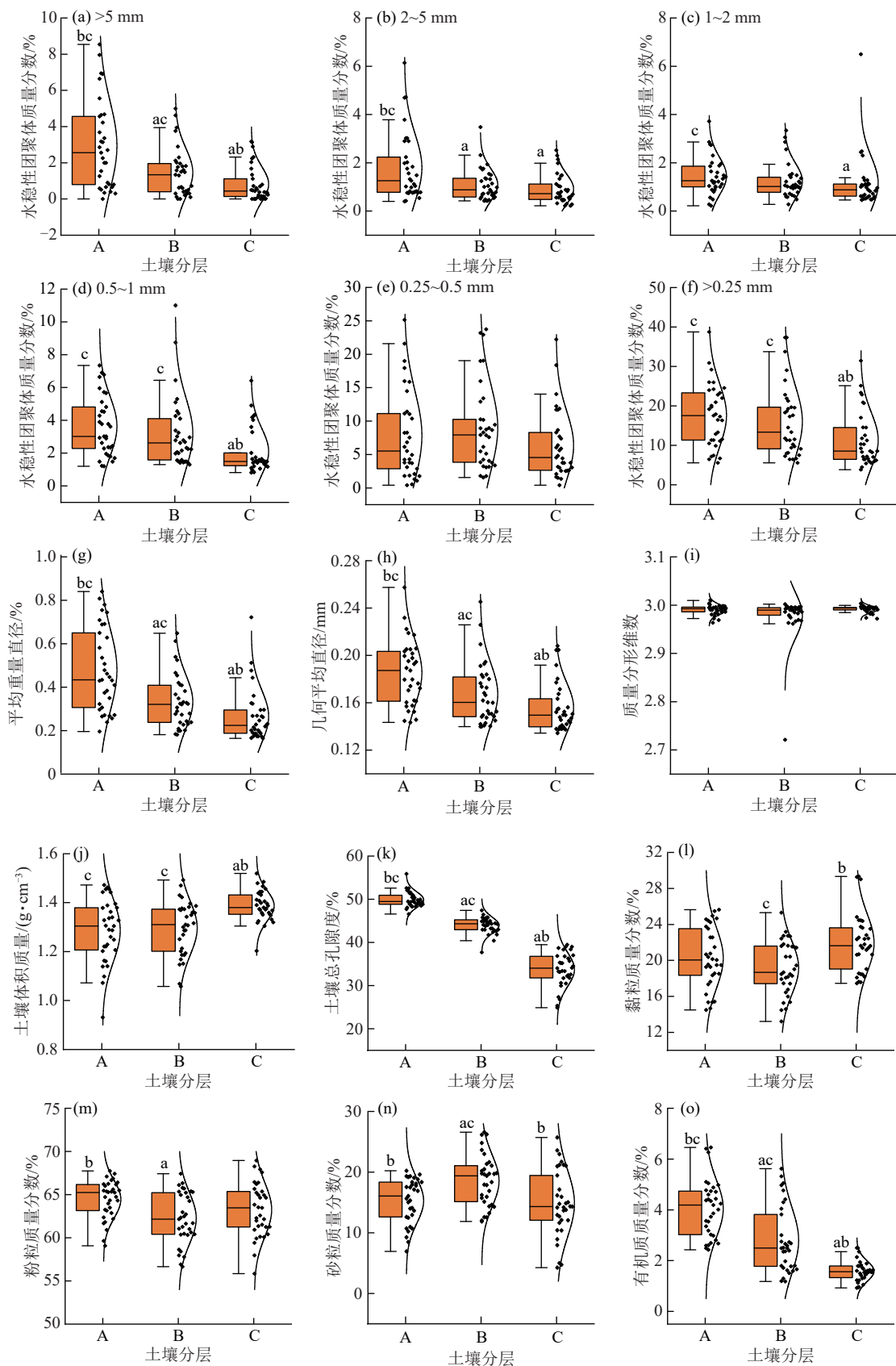
注:根系数量的分级标准为在10 cm×10 cm的样方内,根系数量0~20为“极少”,20~50为“少”,50~200为“中”,>200为“多”。

2 结果与分析

2.1 切沟沟头分层土壤理化性质垂向差异

由图2a~图3d和图3f可知,各粒级(>5、2~5、1~2、0.5~1、>0.25 mm)土壤水稳性团聚体质量分数随沟头土层深度增加呈下降趋势。A层中较大粒级团聚体(>5、2~5 mm)质量分数显著高于中层(B层)和底层(C层)($p<0.05$);对于1~2 mm团聚体,A层质量分数显著高于C层($p<0.05$);0.5~1 mm团聚体在A层和B层的质量分数显著高于C层($p<0.05$),但A层与B层间差异不显著。总体而言,>0.25 mm团聚体总量在A层和B层显著高于C层($p<0.05$),而A层与B层间差异不显著。A层、B层、C层三者间MWD和GMD均存在显著差异(图2g、2h)($p<0.05$),且均表现为A层>B层>C层,但质量分形维数在沟头各土层间无显著差

异(图2i)。沟头分层土壤体积质量随土层加深而增加(图2j),A层、B层和C层的土壤体积质量分别为0.93~1.47、1.06~1.49、1.20~1.52 g/cm³,其中,A层和B层土壤体积质量显著低于C层($p<0.05$);土壤总孔隙度则随土层加深而降低(图2k),A层、B层和C层的总孔隙度平均值表现为A层>B层>C层,且各土层间均存在显著差异($p<0.05$);土壤黏粒和粉粒质量分数均随沟头土层加深呈先降后升趋势(图2l、2m)。C层黏粒质量分数最高且显著高于B层($p<0.05$);粉粒质量分数A层显著高于B层($p<0.05$);砂粒质量分数在不同土层间存在显著差异($p<0.05$,图2n),B层质量分数显著高于A层和C层。沟头土壤有机质质量分数随土层加深逐渐下降,表现为A层>B层>C层(图2o),其中,C层质量分数显著低于A层和B层($p<0.05$)。



注:箱体表示四分位范围(IQR),其中箱体下沿和上沿分别对应第一四分位数(Q1)和第三四分位数(Q3),箱体内横线为中位数(Q2),须线延伸至最小值和最大值;a为与A层相比较差异显著($p < 0.05$);b为与B层相比较差异显著($p < 0.05$);c为与C层相比较差异显著($p < 0.05$);未用字母标记表示各层次间无显著差异。下同。

图 2 切沟沟头分层土壤理化性质变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of stratified soil physicochemical properties at gully heads

2.2 切沟沟头分层土壤可蚀性 K 值

沟头土壤可蚀性 K 值随土层加深呈逐渐上升趋势 (图 3), 其值为 0.042 9~0.051 7(t·h)/(MJ·mm)。各土层平均 K 值表现为 C 层[0.051 7(t·h)/(MJ·mm)]> B 层[0.046 0(t·h)/(MJ·mm)]> A 层[0.042 9(t·h)/(MJ·mm)]; 其中, C 层 K 值显著高于 A 层和 B 层 ($p<0.05$)。表明相比于 A 层和 B 层, C 层具有更高的土壤侵蚀风险。

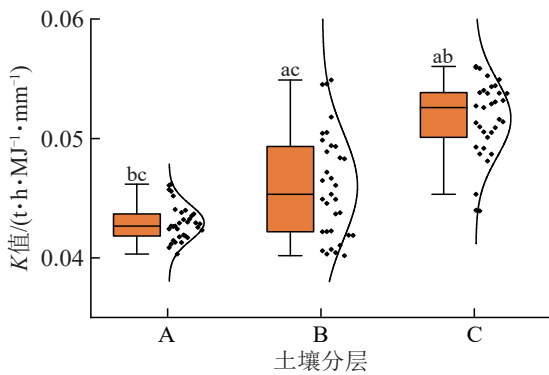
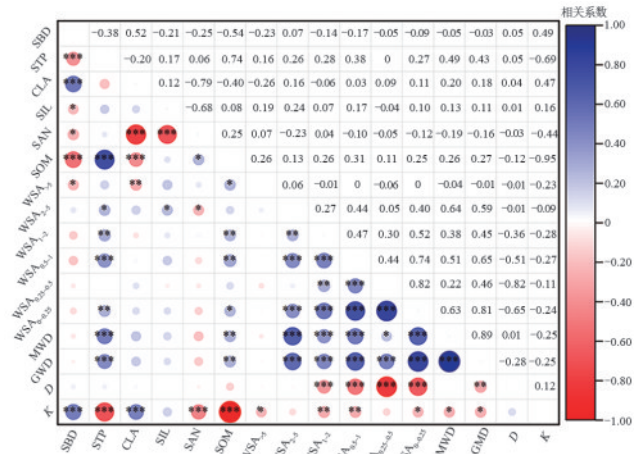


图 3 切沟沟头分层土壤可蚀性 K 值变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of stratified soil erodibility K values at gully heads

2.3 切沟沟头分层土壤可蚀性 K 值影响因素

采用斯皮尔曼相关性分析法, 获取切沟沟头土壤的理化性质和可蚀性 K 值之间的相关性(图 4)。结果表明, 土壤可蚀性 K 值与团聚体相关指标(>5 mm 水稳性团聚体质量分数($WSA_{>5}$)、1~2 mm 水稳性团聚体质量分数(WSA_{1-2})、0.5~1 mm 水稳性团聚体质量分数($WSA_{0.5-1}$)、>0.25 mm 水稳性团聚体质量分数($WSA_{>0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)呈显著负相关关系 ($p<0.05$)。进一步研究发现, 土壤可蚀性 K 值与 $WSA_{>5}$ 、 $WSA_{>1-2}$ 、 $WSA_{0.5-1}$ 、 $WSA_{>0.25}$ 、MWD、GMD、SAN 呈对数函数关系 ($y=\ln x+b, p<0.05$)。随 $WSA_{>5}$ 、 $WSA_{>1-2}$ 、 $WSA_{0.5-1}$ 、 $WSA_{>0.25}$ 、MWD、GMD、SAN 增加呈对数函数递减, K 值变化在低值范围内更加敏感(图 5a~图 5f、图 5j)。土壤可蚀性 K 值与土壤体积质量(SBD)、黏粒质量分数(CLA)呈极显著正相关 ($p<0.001$), 与土壤孔隙(STP)、有机质(SOM)呈极显著负相关 ($p<0.001$), 土壤可蚀性 K 值与 S_{BD} 、 C_{LA} 、 S_{TP} 呈显著线性关系 ($y=ax+b, p<0.01$)。随 SBD、CLA 的增加呈线性增加(图 5g、图 5i), 随 STP 的减少呈线性减少(图 5h), 与 SOM 呈极显著指数函数关系 ($y=ax^b, p<0.001$)。随 SOM 减小呈指数函数递减(图 5k), 表明在较低 SOM 水平下, 土壤可蚀性 K 值增加速率显著加快。



注: *表示在 0.05 级别相关性显著; **表示在 0.01 级别相关性显著; ***表示在 0.001 级别相关性显著。

图 4 切沟沟头土壤理化性质和可蚀性 K 值相关性

Fig. 4 Correlations between soil physicochemical properties and erodibility K values at gully heads

3 讨论

3.1 切沟沟头成土作用与理化性质差异性

中国东北黑土区在第四纪时期处于湖相(松花古湖)沉积环境, 沉积序列自下而上分别以砂粒层、砂黏质混层及黏土层为主^[18], 晚更新世早期的差异性升降使得前期的深厚沉积物质抬升至地表, 上覆的黄土状沉积物作为典型黑土的成土母质, 其性质决定和影响沟头土壤的理化特征^[19]。在冷凉气候和繁茂植被的共同作用下, 腐殖质持续积累, 促进腐殖质层(Ah 层)的形成。同时, 淋溶淀积作用导致有机质($A_{SOC}>B_{SOC}>C_{SOC}$)及铁(Fe)、锰(Mn)等元素向下迁移并富集, 进而形成淀积层(B 层), 随着成土作用的持续进行, 沟头土壤最终发育为具有明显发生层(A-B-C 层)的成熟剖面^[12]。有研究^[20]表明, 成土过程中伴随着原生粉粒矿物(如长石、云母)向黏粒矿物(如伊利石、蒙脱石)的转化, 加之淋溶淀积作用的影响, 不同发生层的土壤质地表现出显著差异(图 2i、图 2m、图 2n)。

沟头土壤团聚体的形成主要源于原生矿物在有机质和黏粒矿物共同作用下的有机-无机复合过程, 由此形成微团聚体及大团聚体。不同类型团聚体的特征主要取决于其所在土层(A、B、C 层)的有机质质量分数和土壤质地^[21], 与已有研究^[22]结果一致, 自 A 层至 C 层, 随着有机质质量分数降低和黏粒质量分数升高, 大团聚体数量显著减少, 且层间差异明显(图 2a~图 2f)。沟头土壤体积质量与孔隙度呈显著负相关(图 4)。随着土层加深, 土壤压实作用增强, 导致土壤体积质量递增(图 2j)而孔隙度递减(图 2k)。

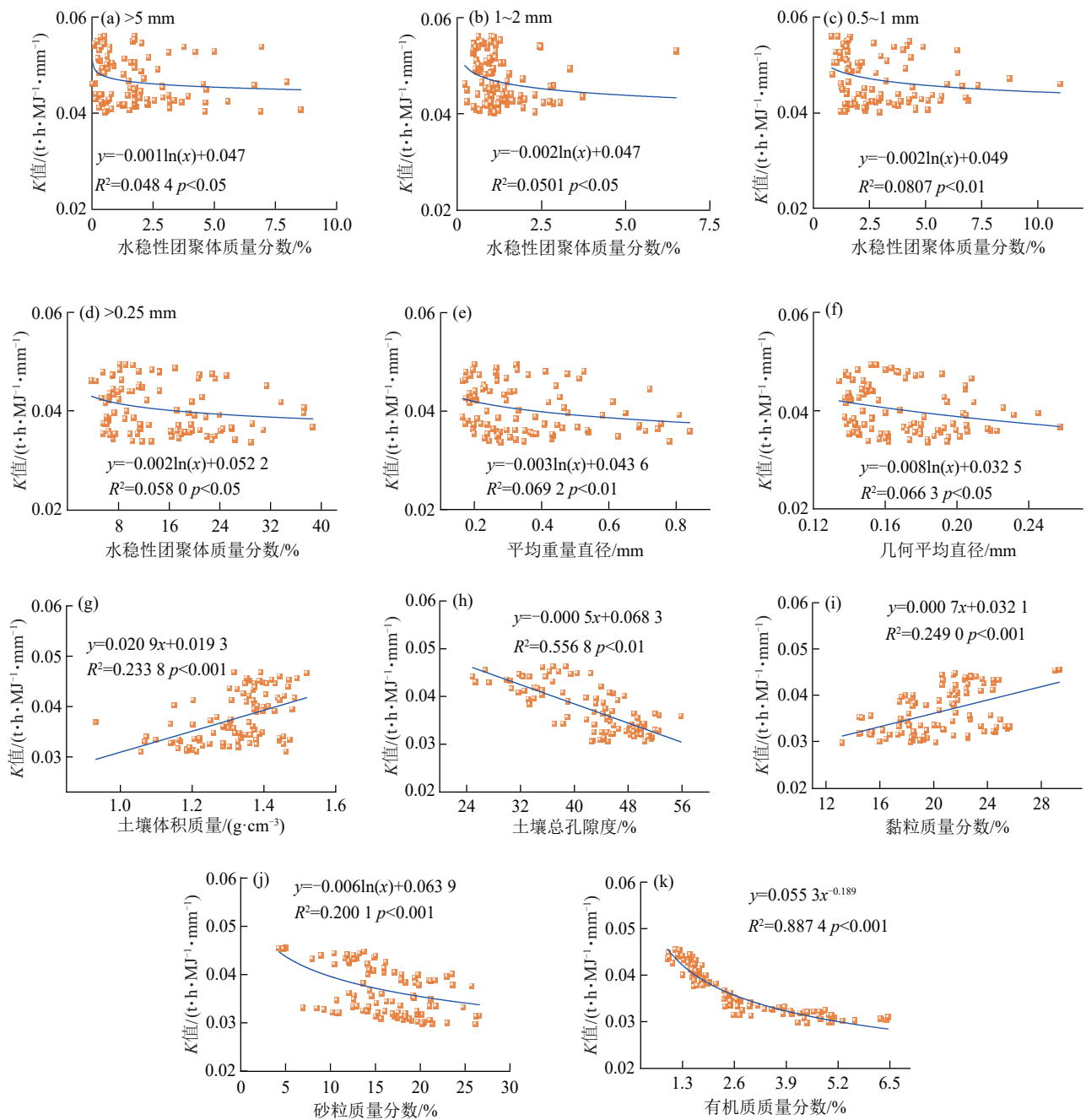


图 5 土壤可蚀性 K 值与土壤理化性质的拟合关系

Fig. 5 Fitting relationships between soil erodibility K values and soil physicochemical properties

3.2 切沟沟头分层土壤理化性质对可蚀性 K 值影响分析

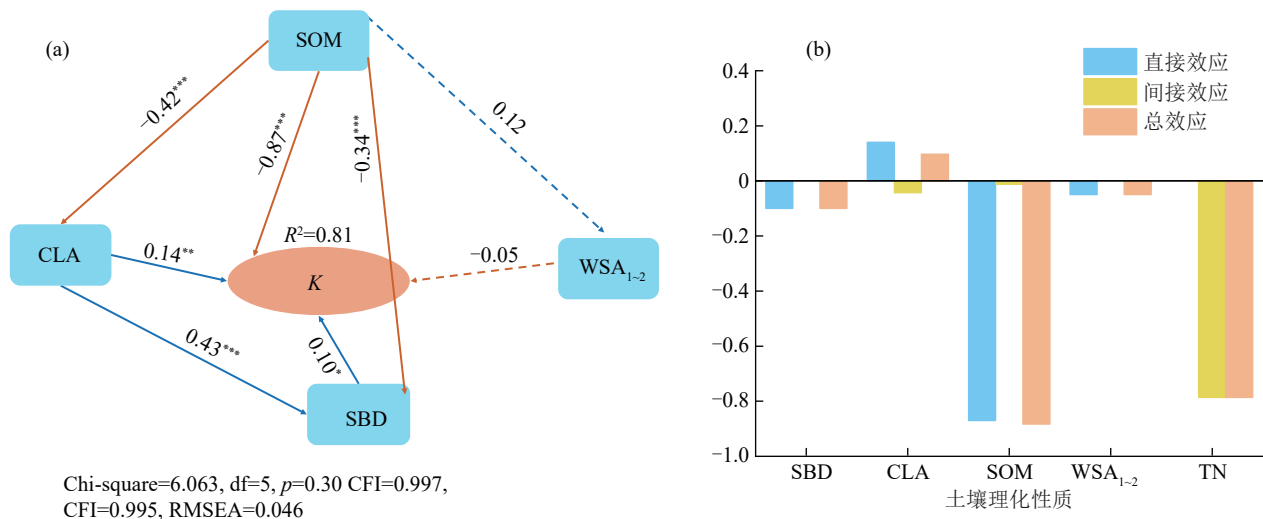
分层明显的沟头土壤中,各发生层土壤可蚀性 K 值可有效表征土壤内在属性对侵蚀过程的影响,针对这一指标,国内外学者^[23-24]已经取得重要研究进展。本研究表明,沟头分层土壤可蚀性 K 值与土壤有机质呈显著负相关,该规律在不同沟蚀地区的多种土壤类型沟头研究中均获验证^[5,25]。结构方程模型(图 6)表明,有机质对可蚀性 K 值存在极显著负影响($p < 0.001$),主要因为土壤有机质作为土壤矿物间

的胶结物质,不仅可以提高土壤矿物颗粒间的凝聚力,同时增强颗粒间的疏水性,有效降低土壤可蚀性 K 值^[26]。有机质还可通过影响黏粒质量分数与黏粒共同调控可蚀性 K 值(图 6),其作用机制在于:有机质通过物理化学作用与黏粒结合^[27],形成有机-无机复合体,该复合体能够促进大团聚形成,有效保护沟头土壤免受侵蚀流失^[28]。沟头土壤黏粒含量对可蚀性 K 值具有显著直接的正向影响(图 5i、图 6),与黏土颗粒的双重作用有关:黏土的絮凝作用促进团聚体形成,而膨胀和分散作用则导致其破裂,随着膨胀

性黏土矿物含量增加,不均匀膨胀效应增强,导致土壤可蚀性增强^[29]。

土壤团聚体作为土壤结构基本构成单位,其稳定性决定土壤可蚀性 K 值。本研究发现,沟头土壤水稳性团聚体相关指标($WSA_{>0.25}$ 、MWD、GMD)对可蚀性 K 值具有负相关(图4、图5a~图5f),这源于稳定团聚结构对土壤抗侵蚀能力的提升作用:土壤团聚度越高,其抗分散能力越强,土壤抗蚀性能也相应增强^[30]。沟头土壤体积质量体现出土壤紧实

程度,可直接影响土壤颗粒被径流分散的难易程度,进而影响沟头土壤可蚀性^[31]。结构方程模型(图6)表明,土壤体积质量对土壤可蚀性 K 值具有正向影响,与前人^[32]的研究结果一致。土壤孔隙度对土壤可蚀性 K 值具有负向影响(图4、图5h),随着土壤体积质量的增加,土壤孔隙度减小,孔隙结构的连通性和复杂性减弱,从而降低黏土矿物对有机质的吸附能力及阳离子交换能力,进而导致土壤可蚀性增强^[33]。



注:箭头的方向表示因果关系,箭头旁边的数字表示路径系数,蓝色箭头表示正向影响,红色箭头表示负向影响;*表示 $p < 0.05$,**表示 $p < 0.01$,***表示 $p < 0.001$;实线表示相关性显著,虚线表示相关性不显著; R 表示已解释变量的比例。

图6 土壤理化性质对土壤可蚀性 K 值的影响路径及直接、间接和总效应分析

Fig. 6 Influence pathways of soil physicochemical properties on soil erodibility K values and analysis of direct, indirect, and total effects

3.3 对策与建议

本研究表明,东北黑土区切沟沟头土壤具有显著的分层特征,各发生层理化性质及可蚀性 K 值差异明显。母质层(C层)有机质质量分数低,团聚体稳定性差,土壤可蚀性 K 值最高,侵蚀风险显著高于腐殖质层(A层)和淀积层(B层)。有机质作为影响土壤可蚀性 K 值的关键因素,其通过与黏粒结合形成有机-无机复合体,增强团聚体稳定性,从而提高土壤抗蚀能力。基于以上研究结果,为有效防控黑土区切沟沟头侵蚀、保护黑土资源,提出的对策与建议为:一是强化耕作层保护,避免淀积层及母质层出露,推行保护性耕作措施,降低高侵蚀风险土层的暴露机会;二是提升土壤有机质质量分数,增强土壤抗蚀性能,推行增施有机肥等措施,不断提高土壤有机质水平,提升土壤抗蚀性能;三是构建沟头综合防护体系,采取工程措施与植被措施相结合的方式,控制沟头溯源,同时恢复植被,增强土壤生物固结和根系抗蚀作用。

4 结论

1)切沟沟头分层土壤理化性质差异显著,不同粒级水稳性团聚体(>5 、 $2\sim5$ 、 $1\sim2$ 、 $0.5\sim1$ 、 >0.25 mm)均随沟头土层深度增加呈下降趋势,A层、B层、C层三者间MWD和GMD均存在显著差异,土壤总孔隙、有机质顺序均为A层 $>$ B层 $>$ C层,土壤体积质量与之相反。 $0.25\sim0.5$ mm水稳性团聚体、砂粒质量分数顺序大小为B层 $>$ A层 $>$ C层,黏粒、粉粒质量分数和分形维数呈现与之相反趋势。

2)切沟沟头分层土壤可蚀性 K 值差异显著,土壤可蚀性 K 值为 $0.0429\sim0.0517$ ($t\cdot h$)/(MJ \cdot mm),C层可蚀性 K 值显著高于A、B层,C层具有更高的土壤侵蚀风险。

3)切沟沟头分层土壤理化性质对可蚀性 K 值具有显著影响,可蚀性 K 值与土壤体积质量、黏粒含量呈极显著正相关,与 >0.25 mm水稳性团聚体含量、平均重量直径、几何平均直径呈显著负相关。分析其影响路径发现,土壤体积质量和黏粒含量对可蚀性 K 值呈显著正向直接影响,有机质表现出极显著负向直接影响,是调控土壤可蚀性 K 值变化的关键影响因素。

参考文献:

- [1] VANMAERCKE M, PANAGOS P, VANWALLEGHEM T, et al. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 218: e103637.
- [2] HAO H X, CHENG L, GUO Z L, et al. Plant community characteristics and functional traits as drivers of soil erodibility mitigation along a land degradation gradient [J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 31(14): 1851-1863.
- [3] KANG H L, WANG W L, GUO M M, et al. The allocation and erosive effects of on-wall flow on loess gully heads[J]. *Catena*, 2024, 246: e108422.
- [4] 刘宝元,张科利,焦菊英.土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J]. *自然资源学报*, 1999, 14(4): 345-350.
LIU B Y, ZHANG K L, JIAO J Y. Soil erodibility and its use in soil erosion prediction model [J]. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(4): 345-350.
- [5] 王亚娟,陈云明,孙亚荣,等.宁南山区侵蚀沟不同部位土壤理化性质及可蚀性研究[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2): 11-18.
WANG Y J, CHEN Y M, SUN Y R, et al. Study on physical and chemical properties and erodibility of soil in different parts of erosion gully in the mountainous area of south Ningxia [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 11-18.
- [6] QI J R, GUO M M, ZHOU P C, et al. Soil erosion resistance factors in different types of gully heads developed in four main land-uses in the Mollisols region of Northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 230: e105697.
- [7] WANG H, ZHANG G H, LI N N, et al. Soil erodibility as impacted by vegetation restoration strategies on the Loess Plateau of China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(3): 796-807.
- [8] 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.
- [9] 李姗.水利部组织完成东北黑土区侵蚀沟调查(节选)[J]. *水利科学与寒区工程*, 2023, 6(8): e157.
LI S. The Ministry of Water Resources organized the investigation of erosion gully in the black soil area of northeast China (excerpt) [J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2023, 6(8): e157.
- [10] 刘晓冰,张兴义.沟道侵蚀的多样性和发生过程及研究展望[J]. *土壤与作物*, 2018, 7(2): 90-102.
LIU X B, ZHANG X Y. Gully erosion: Diversity, processes and prospects [J]. *Soils and Crops*, 2018, 7(2): 90-102.
- [11] 杨帆,巩子瑞,郭明明,等.东北漫川漫岗黑土区典型农业小流域切沟沟头形态特征及其影响因素[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(3): 1-8.
YANG F, GONG Z R, GUO M M, et al. Morphological characteristics and influencing factors of gully heads in a typical agricultural watershed in rolling-hill black soil region of northeast China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(3): 1-8.
- [12] 张兴义,胡伟,李建业,等.水土流失防控是黑土地保护的重点[J]. *科学通报*, 2024, 69(11): 1401-1405.
ZHANG X Y, HU W, LI J Y, et al. Control of soil and water losses is the critical issue for black earth conservation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(11): 1401-1405.
- [13] 张凤荣.土壤地理学[M].北京:中国农业出版社,2016.
ZHANG F R. *Pedogeography* [M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2016.
- [14] LE BISSONNAIS Y, PRIETO I, ROUMET C, 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): 303-317.
- [15] 殷金忠,唐蛟,潘飞飞,等.城市近郊土地利用变化对土壤团聚体及其结合有机碳的影响[J]. *土壤*, 2024, 56(1): 49-55.
YIN J Z, TANG J, PAN F F, et al. Effects of land use changes on soil aggregates and associated organic carbon in urban suburbs [J]. *Soils*, 2024, 56(1): 49-55.
- [16] 张维理, KOLBE H, 张认连, 等.农田土壤有机碳管理与有机质平衡算法[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(2): 332-345.
ZHANG W L, KOLBE H, ZHANG R L, et al. Soil organic carbon management and farmland organic matter balance method [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(2): 332-345.
- [17] SHARPLEY A N, WILLIAMS J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation [A]. Washington D C: United States Department of Agriculture Technical Bulletin, 1990.
- [18] 崔明,张旭东,蔡强国,等.东北典型黑土区气候、地貌演化与黑土发育关系[J]. *地理研究*, 2008, 27(3): 527-535.
CUI M, ZHANG X D, CAI Q G, et al. Relationship between black soil development and climate change and geomorphological evolution in northeast China [J]. *Geographical Research*, 2008, 27(3): 527-535.
- [19] 张新荣,焦洁钰.黑土形成与演化研究现状[J]. *吉林大*

- 学学报(地球科学版),2020,50(2):553-568.
ZHANG X R, JIAO J Y. Formation and evolution of black soil [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(2):553-568.
- [20] YANG F, ZHANG L B, GUO M M, et al. Dissecting vertical variations in soil erodibility of gully headwalls with different soil configurations from the perspective of soil material composition and microstructure [J]. Catena, 2026, 262: e109574.
- [21] 谭文峰, 许运, 史志华, 等. 胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制 [J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1297-1308.
TAN W F, XU Y, SHI Z H, et al. The formation process and stabilization mechanism of soil aggregates driven by binding materials [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1297-1308.
- [22] WANG L X, GUO M M, CHEN Z X, et al. Quantifying the contributions of factors influencing the spatial heterogeneity of soil aggregate stability and erodibility in a mollisol watershed [J]. Catena, 2024, 239: e107941.
- [23] ZHU G Y, TANG Z S, SHANGGUAN Z P, et al. Factors affecting the spatial and temporal variations in soil erodibility of China [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2019, 124(3): 737-749.
- [24] JELOUDAR F T, SEPANLOU M G, EMADI M. Impact of land use change on soil erodibility [J]. Global Journal of Environmental Science and Management, 2017, 4: 59-70.
- [25] 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.
WANG W X, WANG W L, GUO M M, et al. Effects of natural vegetation restoration on characteristics of soil aggregate and soil erodibility of gully heads in gully region of the Loess Plateau [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(16): 2845-2857.
- [26] 刘刚, 闫静雯, 谢云, 等. 黑土坡耕地土壤有机质空间变异及其与土壤侵蚀的关系: 以黑龙江省鹤山农场为例 [J]. 地理科学, 2016, 36(11): 1751-1758.
LIU G, YAN J W, XIE Y, et al. Spatial variation of soil organic matter on black soil sloping cropland and its relationship with soil erosion: A case study of Heshan farm in Heilongjiang Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(11): 1751-1758.
- [27] 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.
- [28] 李少博, 徐英德, 高晓丹, 等. 离子界面行为在土壤有机无机复合体形成中的作用 [J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(11): 1682-1691.
LI S B, XU Y D, GAO X D, et al. The role of ionic interfacial behaviors in formation of soil organic-inorganic complexes [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(11): 1682-1691.
- [29] LI Y, XIONG K N, LIU Z Q, et al. Distribution and influencing factors of soil organic carbon in a typical karst catchment undergoing natural restoration [J]. Catena, 2022, 212: e106078.
- [30] 郑子成, 李廷轩, 张锡洲, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究 [J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 228-231.
ZHENG Z C, LI T X, ZHANG X Z, et al. Study on the composition and stability of soil aggregates under different land use [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 228-231.
- [31] 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.
- [32] 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.
WANG L X, CHEN Z X, GUO M M, 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.
- [33] VAN DAEL T, VERWERFT Q, SMOLDERS E. The soil structural stability determined by the QuantiSlakeTest: Linkage with soil porosity, water-stable aggregate fractions and soil chemical properties [J]. Geoderma, 2025, 457: e117281.