

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.028.

张瑞豪, 肖洋, 徐金忠, 等. 坡耕地黑土侵蚀沟演变对土壤结构及抗蚀性的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 69-75.

ZHANG Ruihao, XIAO Yang, XU Jinzhong, et al. Effect of Black Soil Erosion Gully Evolution on Soil Structural Features and Anti-erodibility in Sloping Farmland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 69-75.

# 坡耕地黑土侵蚀沟演变对土壤结构及抗蚀性的影响

张瑞豪<sup>1</sup>, 肖洋<sup>1</sup>, 徐金忠<sup>2</sup>, 王艳<sup>1</sup>, 张振烨<sup>1</sup>, 王嘉浩<sup>1</sup>, 牛羽萱<sup>1</sup>

(1. 黑龙江大学 现代农业与生态环境学院, 哈尔滨 150080; 2. 黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨 150080)

**摘要:** [目的] 阐明侵蚀作用对黑土区坡耕地侵蚀沟土壤结构及抗蚀性的影响机制, 为黑土区坡耕地侵蚀沟道演变提供基础数据和理论支撑。[方法] 以哈尔滨市延寿县不同发育程度侵蚀沟为研究对象, 对切沟的沟头、沟坡和沟底土壤进行系统采样, 采用常规方法测定土壤的结构及抗蚀性特征。[结果] (1) 各沟道间 WSA(10~0.25 mm 水稳性团聚体含量)、MWD(水稳性团聚体平均重量直径)、GMD(水稳性团聚体几何平均直径)、分形维数均差异性显著 ( $p < 0.05$ )。随着侵蚀沟发育, MWD, GMD, 分形维数在 0—20 cm 土层均呈 CK(对照) > A<sub>1</sub>(稳定沟) > A<sub>2</sub>(半稳定沟前期) > A<sub>3</sub>(半稳定沟后期) > A<sub>4</sub>(发展沟), 为递减趋势; 随着土层加深, 大颗粒水稳性团聚体含量下降, 结构恶化。(2) 各沟道间分散系数、<0.05 mm 分散率差异性显著 ( $p < 0.05$ )。二者在 0—40 cm 土层总体呈递增趋势; 主成分分析表明 0—20 cm 与 20—40 cm 土层的抗蚀性综合得分表现为 CK > A<sub>1</sub> > A<sub>2</sub> > A<sub>3</sub> > A<sub>4</sub>。[结论] 侵蚀沟发育是造成黑土土壤结构与抗蚀性差异的主要原因, 0—40 cm 土层中土壤结构趋于恶化, 土壤抗蚀性减弱, 可蚀性增强。

**关键词:** 土壤侵蚀; 黑土区; 坡耕地; 抗蚀性

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0069-07

## Effect of Black Soil Erosion Gully Evolution on Soil Structural Features and Anti-erodibility in Sloping Farmland

ZHANG Ruihao<sup>1</sup>, XIAO Yang<sup>1</sup>, XU Jinzhong<sup>2</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>,  
ZHANG Zhenye<sup>1</sup>, WANG Jiahao<sup>1</sup>, NIU Yuxuan<sup>1</sup>

(1. College of Modern Agriculture and Ecology, Heilongjiang University, Harbin 150080, China,

2. Institute of Hydro-science of Heilongjiang, Harbin 150080, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to elucidate the mechanism of erosion gully on the soil structure and anti-erodibility in sloping farmland in black soil area, and to provide basic data and theoretical support for the evolution of erosion gullies in black soil area. [Methods] Erosion gullies of different development degrees in Yanshou County, Harbin City were used as the study object, soil samples were systematically collected from the head, slope and bottom of these gullies, the structural and anti-erodibility of the soil were analyzed using conventional methods. [Results] (1) WSA, MWD, GMD, and fractal dimension were significantly different among the gullies ( $p < 0.05$ ). With the development of erosion gullies, MWD, GMD and fractal dimension all showed the decreasing trend, following the order: CK (control group) > A<sub>1</sub> (stable gully) > A<sub>2</sub> (early semi-stable gully) > A<sub>3</sub> (later semi-stable gully) > A<sub>4</sub> (developing gully) at the 0—20 cm layer. With the soil layer deepening, the large water-stable aggregates decreased and the structure deteriorated. (2) Dispersive coefficient and <0.05 mm dispersion rate were significantly different among the gullies ( $p < 0.05$ ),

收稿日期: 2022-06-28

修回日期: 2022-07-19

资助项目: 黑龙江省自然科学基金项目“黑土区切沟变化特征对融雪侵蚀的响应”(LH2020D018); 公路交通环境保护技术交通行业重点实验室开放课题“北方高寒区高速公路边坡植被快速恢复技术研究”(2014-8801); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“用于道路工程创面生态防护的植物纤维复合材料研发”(2017—9058)

第一作者: 张瑞豪(1994—), 男, 浙江嘉兴人, 硕士, 主要从事农业水土保持方面的研究。E-mail: zrh1994zjxx@163.com

通信作者: 肖洋(1978—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 博士, 主要从事农业水土保持方面的研究。E-mail: xiaoyang@hlju.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

both show an overall increasing trend in the 0—40 cm layer. The principal component analysis showed that the composite score of anti-erodibility of 0—20 cm and 20—40 cm layers both showed the order:  $CK > A_1 > A_2 > A_3 > A_4$ . [Conclusion] Development of erosion gully is the main reason for the differences in soil structure and anti-erodibility in black soils. Soil structure tends to deteriorate in the 0—40 cm soil layer, while anti-erodibility weakens and erodibility increases.

**Keywords:** soil erosion; black soil area; sloping farmland; anti-erodibility

东北黑土区历经百余年的垦荒耕种,现已发展成为我国重要的粮食产区,然而长期高强度耕作下的黑土正面临着严峻的土壤侵蚀问题,每年因土壤侵蚀及土壤质量退化所导致的粮食减产就高达总产量的23%<sup>[1]</sup>。据调查,东北黑土区内沟长在100 m至5 000 m间的侵蚀沟约有29.57万条,占地36.48 hm<sup>2</sup>,其中88.7%的侵蚀沟为发展沟,发育时间相对较短但发展活跃,且其发展呈加剧的态势<sup>[2]</sup>。其中坡耕地侵蚀沟的面积占据总面积的80%以上<sup>[3]</sup>,是受侵蚀影响的重灾区。数十年来,坡耕地侵蚀沟密度、面积均显著增加<sup>[4]</sup>,侵蚀沟已广布于耕作区全域,尤其在低丘漫岗带呈高密度分布,人类耕作活动显著加速了侵蚀沟的形成<sup>[5]</sup>。这一现状已严重危害了我国的粮食安全,因此对坡耕地侵蚀沟治理已经刻不容缓。

黑土区坡耕地侵蚀主要以坡面侵蚀(含细沟)和中轻度的沟蚀为主<sup>[6]</sup>,二者是互为作用,恶性循环的共同体,降雨及衍生的坡面水流是侵蚀作用的主要驱动力<sup>[7]</sup>。早期坡面侵蚀与降雨量关系不大,与降雨强度关系显著<sup>[8]</sup>。而东北顺垄耕作的旧习使得坡面具有天然的细沟雏形,这扩大了径流的搬运能力<sup>[9]</sup>。当降雨强度超过土壤入渗能力时,坡面径流以不规则湍流形式沿顺垄集流槽行进并对周围土壤施加剪切应力<sup>[10]</sup>,且当径流剪切力大于土壤临界剪切力时,就会冲刷沿途土壤和造成沟道下切,将细沟演变成浅沟<sup>[11]</sup>,并逐步发育为切沟、冲沟。这一过程中,在降水、地形、土壤类型等因素共同影响下,侵蚀作用使得坡耕地上的水分、结构等在空间上呈现异质性<sup>[12]</sup>,使得水道过程和形态的平衡被打破,又反过来加剧了沟道的形成<sup>[13]</sup>。其中土壤结构是土壤内部机械位移,化学和生物反应的基石,它能较好地反映土壤紧实度<sup>[14]</sup>、透水性<sup>[15]</sup>和抗侵蚀状态<sup>[16]</sup>,是我们研究土壤侵蚀现象的重要参照。土壤结构在空间上的变异性和由环境变化带来的影响常以团聚体含量、分形维数等指标表征<sup>[17]</sup>,它们为侵蚀土壤的量化工作提供了理论和工具。

自“十四五”以来,随着“东北黑土区侵蚀沟治理专项”等重大工程的开展,国内外学者也在黑土区侵

蚀沟分布现状<sup>[18-19]</sup>、特征<sup>[20]</sup>、侵蚀发展趋势<sup>[21-22]</sup>、形成机制等<sup>[23-24]</sup>方面进行了一些研究,然而有关侵蚀作用对土壤结构及抗蚀性影响方面的研究还较少。本文通过分析不同发育程度侵蚀沟在0—40 cm土层的土壤结构及抗蚀性特征变化,系统阐述侵蚀作用对沟道表层土壤的影响,为黑土区坡耕地侵蚀沟演变的模型提供理论支撑和数据基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区设在取黑龙江省哈尔滨市延寿县双安村(东经128.22'47",北纬45.39'12"),属寒温带大陆性季风气候,全年年均相对湿度73%,年均气温2.3°,年均降水量571.7 mm,其中70%以上集中在7—8月。地貌为小兴安岭余脉与松嫩平原的过渡地带,海拔145~300 m,为典型的漫川漫岗和台地低丘地形,坡度较小,多在3°~8°区间内,坡面较长,多为0.5~1 km<sup>[25]</sup>,汇水面积大,径流冲刷能力较强。研究区土壤存在较为明显的分层,表层土质为黑土,腐殖质含量高,表层孔隙度高,土质疏松;底层成土母质为第四纪黄土状亚土,质地黏重,掺杂较多砂土、砾石;介于二者间为的过渡层颜色、较浅,质地紧实,是表土层中细小土粒位移沉淀形成。研究区为缓坡耕地,用地性质单一,主要种植一年一熟的玉米作物,春季翻耕深度为20~25 cm。

### 1.2 侵蚀沟的野外调查与数据获取

依照Randolph等<sup>[26]</sup>对流域空间尺度的界定,侵蚀沟的选取范围限制于小流域级(0.13~1.3 km<sup>2</sup>),确保选取切沟及周边地质变量相近。利用谷歌地球高分影像中切沟的分布影像,结合历年历史影像推算各侵蚀沟发育年限后,确定试验区为“延寿县双安村双奎河样区”,再对试验区实地考察并进行无人机航拍测绘(大疆精灵4RTK),建立试验区流域DEM数据。经对比谷歌地球影像与实地DEM影像差异后,在确保实地数据采集可靠性的前提下,依照《黑龙江省侵蚀沟分级与分类》(DB23/T2412)的分级,从样区中选出4条符合试验要求的侵蚀沟(图1)。

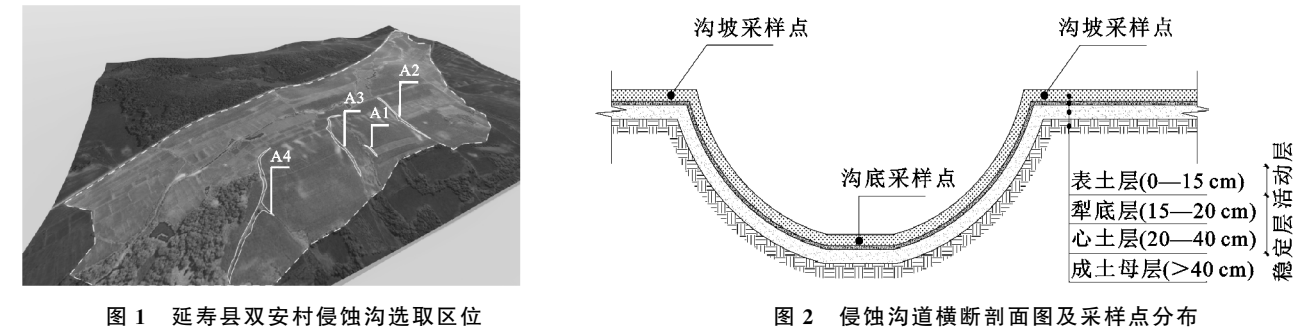


图 1 延寿县双安村侵蚀沟选取区位

图 2 侵蚀沟道横断剖面图及采样点分布

1.3 侵野外土壤采集

于 2021 年 5 月 1 日在研究区 1 km×1 km 范围内选取 4 条不同发育程度小型侵蚀沟,分别记为 A<sub>1</sub> (稳定沟),A<sub>2</sub> (半稳定沟前期),A<sub>3</sub> (半稳定沟后期),A<sub>4</sub> (发展沟)四组,在各侵蚀沟道中沟头的沟底和两侧沟坡 0.5 m×0.5 m 范围内,沿一侧对角线布置 3 个采样点,各采样点除去未腐解的枯枝败叶后,以地

表为界限,通过机械分层法垂直坡面分别采集 0—20 cm 和 20—40 cm 两个土层土样(图 2),其中在沟道底部采样时先撤去 3 cm 表层浮土砂砾。另在 A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> 沟头段右侧 5 m 处各设置一处坡耕空地采样点作为空白对照(CK<sub>1</sub> 和 CK<sub>2</sub>)并对其进行基础指标进行测算,所得供试土壤基本情况如表 1 所示。

表 1 供试土壤基本情况

编号	坡度/ (°)	采样点 个数	沟长/ m	均深/ m	占地 面积/hm <sup>2</sup>	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	颗粒机械组成/(g·kg <sup>-1</sup> )			土壤 质地	发育 程度
							砂粒含量	粉粒含量	黏粒含量		
A <sub>1</sub>	5.22	6	17.4	0.18	0.001	1.45	355.96	301.38	241.15	黏壤土	小型稳定侵蚀沟
A <sub>2</sub>	4.82	6	223.4	0.72	0.05	1.44	353.58	314.22	236.80		小型半稳定侵蚀沟
A <sub>3</sub>	5.23	6	300.9	1.17	0.08	1.45	382.50	285.04	244.10		小型半稳定侵蚀沟
A <sub>4</sub>	5.57	6	319.8	2.03	0.18	1.45	387.43	279.64	221.23		小型发展侵蚀沟
CK <sub>1</sub>	5.10	2	—	—	—	1.42	407.20	321.00	177.35	壤土	坡耕地
CK <sub>2</sub>	5.48	2	—	—	—						坡耕地

注:对照组 CK<sub>1</sub>与 CK<sub>2</sub>毗邻,故做混样处理。

1.4 样品分析

土样采集后带回室内,按照试验设计分类处理,其中环刀法( $v=100\text{ cm}^3$ )测定容重、孔隙度、毛管持水量、土壤入渗速率、质地;吸管法测定土壤机械组成;干筛、湿筛法测定大团聚体、分散系数、 $<0.05\text{ mm}$  分散率等<sup>[27-30]</sup>。

1.5 数据分析与处理

完成试验数据采集后,利用 SPSS 25,Excel 2020 等软件对原始数据进行描述性等分析。

(1) 土壤抗蚀性特征分析。土壤的抗蚀性通常由土壤分散系数、结构系数、 $<0.05\text{ mm}$  分散率所反映<sup>[29]</sup>,分散系数越小,则土壤抗蚀性越强,反之则差。 $<0.05\text{ mm}$  分散率可反映可蚀性强弱及潜在产沙量的多少<sup>[31]</sup>。

$$\text{分散系数}=\frac{a}{b}\times 100\%$$

(1)

式中: $a$  为土壤微团聚体 $<0.002\text{ mm}$  粒级含量(g/kg); $b$  为土壤颗粒分析中 $<0.002\text{ mm}$  粒级含量(g/kg)。

$$<0.05\text{ mm 分散率}=\frac{c}{d}\times 100\%$$

(2)

式中: $c$  为 $<0.05\text{ mm}$  微团聚体含量(g/kg); $d$  为 $0.05\text{ mm}$  机械组成成分含量(g/kg)。

(2) 土壤结构特征分析。土壤的结构特征通常由土壤团聚体的数量和分形维数组成所反映<sup>[32-34]</sup>,其计算公式如下:

$$\text{WSA}=\text{直径在 } 10\sim 0.25\text{ mm 之间的水稳性团聚体的含量}$$

(3)

$$\text{MWD}=\sum_{i=1}^n \overline{x}_i \cdot W_i$$

(4)

式中:MWD 为水稳性团聚体平均重量直径(mm); $\overline{x}_i$  为每一粒级的平均直径(mm); $W_i$  为每一粒级水稳性团聚体的含量(%); $i$  为粒级; $n$  为粒径分级的总个数;MWD 越大,颗粒粒径越粗,结构越好,可蚀性越低,反之则差。

$$\text{GMD}=\exp\left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n W_i \lg \overline{x}_i\right)}{\left(\sum_{i=1}^n W_i\right)}\right]$$

(5)

式中:GMD 为水稳性团聚体几何平均直径(mm); $W_i$  为平土壤样品的总重量(g);MWD 与 GMD 越小,结构越差。

分形维数是用来描述具有自相似性但外观不规



则且表面粗糙土壤颗粒的指标,可量化描述土壤结构特征和土壤在空间上的变异<sup>[35]</sup>,分形维数越小,结构越稳定。

$$\frac{M(r < \bar{X}_n)}{M_t} = \left( \frac{\bar{X}_n}{M_{\max}} \right)^{3-D} \quad (6)$$

式中: $M(r < \bar{X}_n)$ 为粒径 $< \bar{X}_n$ 的团聚体重量(g); $M_t$ 为团聚体总重量(g); $M_{\max}$ 为团聚体的最大粒径,(mm); $D$ 为分形维数。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同发育程度侵蚀沟的土壤结构特征

由图3可知,不同侵蚀程度沟道间WSA差异性显著( $p < 0.05$ )。在0—20 cm土层, $A_1—A_4$ 的WSA在53.01%~63.98%,各沟道间呈 $A_2 > A_3 > CK > A_1 > A_4$ ,最小值在 $A_4$ ;在20—40 cm土层 $A_1—A_4$ 的WSA在49.93%~59.21%,各沟道间呈 $A_1 > A_2 > A_3 > A_4 > CK$ ,为先上升,后下降趋势。 $A_2$ 与 $A_4$ 的WSA在0—20 cm与20—40 cm均差异显著( $p < 0.05$ ),侵蚀作用加剧了沟道WSA的分布差异,尤以20—40 cm土层更为明显。各沟道土层间WSA总体平均值均呈0—20 cm > 20—40 cm且差异极显著( $p < 0.01$ ),WSA随土层加深逐渐减小,土壤可蚀性增强。

不同侵蚀程度沟道间MWD差异性显著( $p < 0.05$ )。在0—20 cm土层, $A_1—A_4$ 的MWD在0.98~1.48 mm间,各沟道间呈 $CK > A_1 > A_2 > A_3 > A_4$ ,为递减趋势;在20—40 cm土层, $A_1—A_4$ 的MWD在1.01~1.67 mm间,呈 $A_1 > CK > A_2 > A_3 > A_4$ ,为先上升,后下降趋势。多元回归线性分析表明(表2),土层加深对MWD变化的beta值为0.092且不显著。0—20 cm与20—40 cm土层的 $A_1$ 与 $A_4$ 间均差异性显著( $p < 0.05$ ), $A_4$ 较 $A_1$ 分别下降了33.78%和39.52%,侵蚀沟发育对MWD变化的beta值为0.546且极显著。说明侵蚀沟的发育是造成MWD变化的主要原因,随侵蚀沟的发育,各层土壤结构恶化,可蚀性增强。

MWD与GMD间相关性极显著( $p < 0.01$ ),二者在各层间变化趋势相近。在0—20 cm土层,GMD在1.06~1.20 mm, $A_1—A_4$ 较CK分别下降5.62%,12.68%,14.51%,16.95%,呈递减趋势;在20—40 cm土层,GMD在1.12~1.29 mm, $A_1—A_4$ 较CK分别下降-6.61%,4.59%,6.34%,7.25%。各沟道土层间GMD总体平均值均呈0—20 cm > 20—40 cm且差异显著( $p < 0.05$ ),土层加深对GMD变化的beta值为0.176且不显著,对GMD变化影响不大。各层 $A_1$ 与 $A_4$

间均差异性显著( $p < 0.05$ ),分别下降了11.67%和13.18%。侵蚀沟发育对GMD变化的贡献系数为0.398且极显著,是影响其变化的主要原因。随着侵蚀沟的发育,各层土壤结构恶化,可蚀性增强。

不同侵蚀程度沟道间分形维数差异性显著( $p < 0.05$ )。在0—20 cm土层, $A_1—A_4$ 的分形维数在2.24~2.42间,呈 $A_4 > CK > A_3 > A_2 > A_1$ ;在20—40 cm土层, $A_1—A_4$ 的分形维数在2.10~2.57间,呈 $CK > A_4 > A_3 > A_2 > A_1$ ,两层均为先减小,后增大趋势。各层 $A_1$ 与 $A_4$ 间均差异性显著( $p < 0.05$ ),分别提升7.22%和16.10%。侵蚀沟发育对分形维数变化的beta值为0.243且显著,随着侵蚀沟的发育,各层土壤结构性趋于恶化。

### 2.2 不同发育程度侵蚀沟的土壤结构特征

由图4可知,不同侵蚀程度沟道间分散系数差异性显著( $p < 0.05$ )。在0—20 cm土层, $A_1—A_4$ 的分散系数在9.34%~19.81%间,呈 $CK > A_1 > A_2 > A_3 > A_4$ ,为递增趋势;在20—40 cm土层, $A_1—A_4$ 的分散系数在13.52%~28.40%间,呈 $A_1 > CK > A_2 > A_3 > A_4$ ,为先下降,后上升趋势。由表3可知,土层加深对分散系数变化的beta值为0.451且极显著,各沟道土层间分散系数总体平均值呈0—20 cm < 20—40 cm土层且差异极显著( $p < 0.01$ ),分散系数随土层加深逐渐增大,抗蚀性减弱。各层 $A_1$ 与 $A_4$ 均差异性显著( $p < 0.05$ ),分别上升了112.10%和110.06%。侵蚀沟发育对分散系数变化的beta值为0.621且极显著,是影响其变化的主要原因。侵蚀沟的发育和土层加深的共同作用是造成分散系数增大,土壤抗蚀性减弱的原因。

不同侵蚀程度沟道间 $< 0.05$  mm分散率差异性显著( $p < 0.05$ )。在0—40 cm土层, $A_1—A_4$ 的 $< 0.05$  mm分散率在38.82%~69.29%,总体呈递增趋势。侵蚀沟发育对 $< 0.05$  mm分散率变化的beta值为0.567且极显著,是影响其变化的主要原因。0—20 cm层 $A_1$ 与 $A_4$ 间差异性显著( $p < 0.05$ ),上升了99.74%。随着侵蚀沟的发育,土壤可蚀性增强,潜在产沙量增大。

土壤抗蚀性与土壤颗粒机械组成、孔隙结构、团粒结构等相关性显著,因此以容重、砂粒含量、黏粒含量、WSA、GMD、分维系数、分散系数、 $< 0.05$  mm分散率这7项指标为评价指标进行主成分分析,综合评价各层土壤抗蚀性能。

由表4可知,在0—20 cm土层中,第一主成分贡献率30.313%,第二主成分贡献率28.063%,第三主

成分贡献率 14.79%,第四主成分贡献率 14.247%,累计贡献率已达 87.412%,根据初始因子荷载矩阵,得公式: $F_{0-20}=0.303F_1+0.281F_2+0.148F_3+0.142F_4$ 。在 20—40 cm 土层中,第一主成分贡献率 29.198%,第二主成分贡献率 23.936%,第三主成分贡献率 16.54%,第四主成分贡献率 14.698%,累计贡献率已达 84.372%,根据初始因子荷载矩阵,得公式:

$F_{20-40}=0.292F_1+0.239F_2+0.165F_3+0.147F_4$ 。通过公式计算不同土层抗蚀性能得表 5,可知在 0—20 cm 土层中侵蚀作用对土壤抗蚀性的综合评价为  $CK>A_1>A_2>A_3>A_4$ ,在 20—40 cm 土层中排序为  $CK_2>A_1>A_2>A_3>A_4$ ,二者均呈递减趋势,说明随侵蚀沟的发育,在 0—20 cm 与 20—40 cm 土层中土壤抗蚀性减弱。

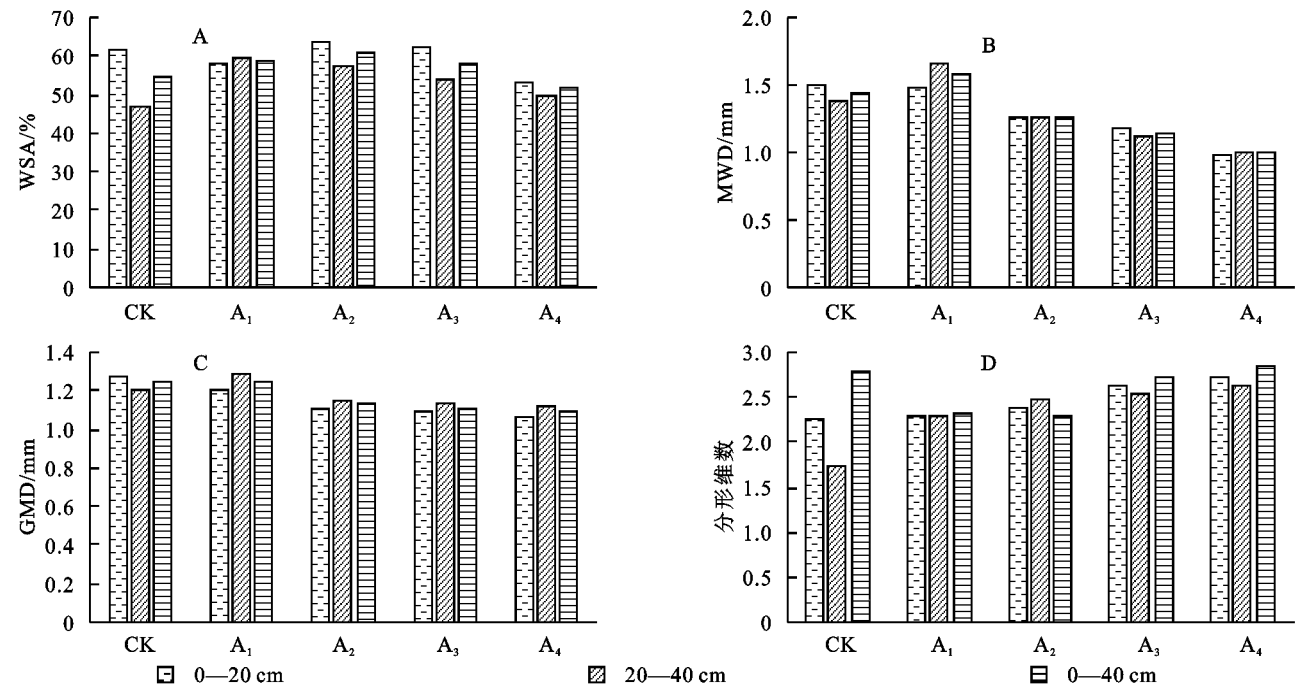


图 3 供试土壤结构特性变化特征

表 2 供试土壤结构特征回归分析

指标	影响因子	调整后 $R^2$	DW 值	标准化系数(Beta)	显著性	VIF
WSA	发育差异	0.174	1.341	0.260	0.063	1.28
	深度差异			-0.261	0.035	1.00
MWD	发育差异	0.341	1.510	-0.546	0.000	1.28
	深度差异			0.092	0.483	1.00
GMD	发育差异	0.331	1.605	-0.398	0.001	1.28
	深度差异			0.176	0.094	1.00
分形维数	发育差异	0.278	1.535	0.333	0.016	1.28
	深度差异			0.131	0.273	1.00

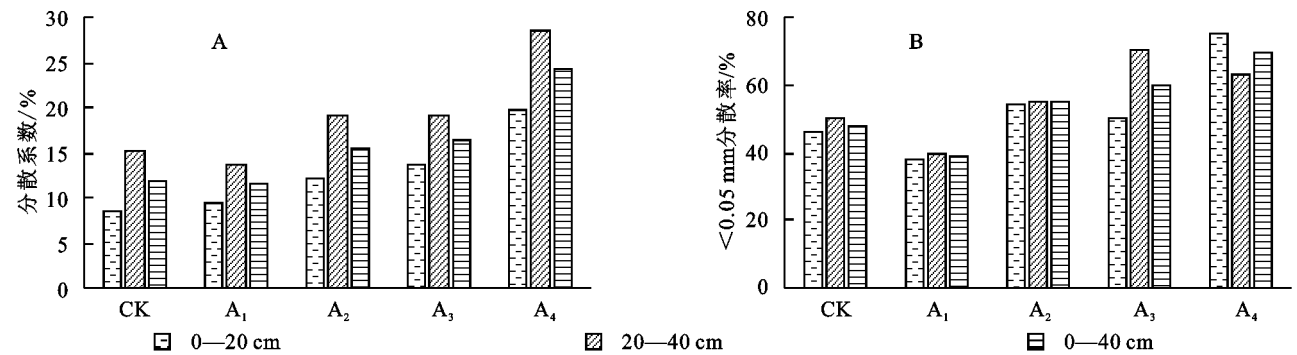


图 4 供试土壤抗蚀性能特征

表3 供试土壤结构特征回归分析

指标	影响因子	调整后 $R^2$	DW 值	标准化系数(Beta)	显著性	VIF
分散系数	发育差异	0.579	1.339	0.621	0.000	1.28
	深度差异			0.451	0.000	1.00
<0.05 mm 分散率	发育差异	0.226	2.256	0.567	0.000	1.28
	深度差异			0.086	0.443	1.00

表4 不同侵蚀程度下各层土壤抗蚀性能主成分分析

成分	0—20 cm 初始特征值			20—40 cm 初始特征值		
	总计	方差/%	累积%	总计	方差/%	累积/%
1	2.425	30.313	30.313	2.336	29.198	29.198
2	2.245	28.063	58.376	1.915	23.936	53.134
3	1.183	14.790	73.165	1.323	16.540	69.675
4	1.140	14.247	87.412	1.176	14.698	84.372
5	0.497	6.208	93.620	0.622	7.780	92.152
6	0.385	4.814	98.434	0.578	7.229	99.381
7	0.096	1.195	99.629	0.045	0.558	99.939
8	0.030	0.371	100.000	0.005	0.061	100.000

注:表内数据均经过 KMO 检验 $>0.6$ , $p<0.01$ ,符合主成分分析条件。

表5 不同土层土壤抗蚀性综合得分

土层/cm	CK	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
0—20	29.91	29.56	28.90	25.09	24.55
20—40	25.55	24.72	22.96	22.72	19.63

### 3 结论

(1) 不同侵蚀程度沟道间 WSA, MWD, GMD、分形维数均差异性显著( $p<0.05$ )。随着侵蚀沟的发育, MWD, GMD、分形维数在 0—20 cm 土层均呈  $CK>A_1>A_2>A_3>A_4$ , 为递减趋势, 土壤结构恶化; 侵蚀沟的发育对三者变化的 beta 值分别为 0.546, 0.398, 0.243 且显著, 是造成土壤结构恶化的主要原因。随着土层加深, 大颗粒水稳性团聚体含量下降, 可蚀性增大。

(2) 不同侵蚀程度沟道间分散系数、<0.05 mm 分散率差异性显著( $p<0.05$ )。分散系数、<0.05 mm 分散率在 0—40 cm 土层总体呈递增趋势; 侵蚀沟的发育对分散系数、<0.05 mm 分散率变化的 beta 值分别为 0.621, 0.567 且显著。据主成分分析, 0—20 mm 与 20—40 cm 土层的抗蚀性综合得分均呈  $CK>A_1>A_2>A_3>A_4$ , 随侵蚀沟的发育, 土壤抗蚀性减弱, 可蚀性增强, 产沙量增大。

#### 参考文献:

- [1] 吴艳玲. 水土保持工程建设与国家粮食安全: 基于东北黑土区县级面板数据的经验分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S2): 304-309.
- [2] 李智广, 王岩松, 刘宪春, 等. 我国东北黑土区侵蚀沟道的普查方法与成果[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(5): 9-13.

- [3] 江娜, 史东梅, 蒋光毅, 等. 土壤侵蚀对紫色土坡耕地耕层物理及力学特性的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(9): 1845-1859.
- [4] 王文娟, 邓荣鑫, 张树文. 东北典型黑土区讷谟尔河流域土地利用变化对沟蚀影响研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(5): 833-844.
- [5] 李全峰, 李吉程, 于明鹏, 等. 黑土耕作区侵蚀沟治理紧迫度空间分布特征[J]. 地理科学进展, 2021, 40(7): 1208-1219.
- [6] 甄怀才. 典型黑土区坡耕地浅沟侵蚀特征及其影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
- [7] 温云浩, 刘铁军, 马林芊, 等. 东北黑土区横垄坡耕地的产流产沙过程[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 63-70.
- [8] 李桂芳, 郑粉莉, 卢嘉, 等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 147-154, 182.
- [9] 郑粉莉. 黄土高原坡耕地的细沟侵蚀及其防治途径[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988(1): 19-25.
- [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.
- [11] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Geological society of America bulletin, 1945, 56(3): 275-370.
- [12] 苏松锦, 刘金福, 陈文伟, 等. 戴云山黄山松林土壤水分物理性质空间变异特征与格局[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2423-2430.
- [13] Hudson N W. Soil conservation[M]. California: Scientific Publishers, 2015.
- [14] 杨佳宇, 谷思玉, 李宇航, 等. 深翻—旋耕轮耕与有机肥配施对黑土农田土壤物理性质的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 789-795.

- 2021,52(6):1290-1298.
- [15] 何苗苗,刘芝芹,王克勤,等.滇池流域不同植被覆盖土壤的入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2022,36(3):181-187.
- [16] 吕宸,宫渊波,车明轩,等.川西高寒山地灌丛草甸土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2020,34(2):9-17.
- [17] 宋孝玉,李亚娟,李怀有,等.不同地貌类型及土地利用方式下土壤粒径的分形特征[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(9):155-160,167.
- [18] 杜书立,李浩,陈强,等.典型黑土区侵蚀沟空间分布特征及主要影响因子分析:以黑龙江省引龙河农场为例[J].土壤与作物,2013,2(4):177-182.
- [19] 刘宝元,刘刚,王大安,等.区域沟蚀野外调查方法:以东北地区为例[J].中国水土保持科学,2018,16(4):34-40.
- [20] Zhang T, Liu G, Duan X, et al. Spatial distribution and morphologic characteristics of gullies in the Black Soil Region of Northeast China: Hebei watershed[J]. Physical Geography, 2016,37(3/4):228-250.
- [21] 闫业超,张树文,岳书平.近40年黑土典型区坡沟侵蚀动态变化[J].农业工程学报,2010,26(2):109-115.
- [22] Li H, Cruse R M, Liu X, et al. Effects of topography and land use change on gully development in typical mollisol region of Northeast China[J]. Chinese Geographical Science, 2016,26:779-788.
- [23] 黄彦,孟岩,郑文生,等.降雨强度和坡度对黑土区坡面径流侵蚀及入渗的影响研究[J].灌溉排水学报,2016,35(S1):73-76.
- [24] 姜义亮,郑粉莉,温磊磊,等.降雨和汇流对黑土区坡面土壤侵蚀的影响试验研究[J].生态学报,2017,37(24):8207-8215.
- [25] 范昊明,蔡强国,王红闪.中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J].水土保持学报,2004,18(2):66-70.
- [26] Randolph J. Environmental land use planning and management [J]. Journal of Planning Education and Research, 2005,24(4):452-453.
- [27] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:科学技术出版社,1978.
- [28] 张甘霖.土壤调查实验室分析方法[M].上海:科学技术出版社,2012.
- [29] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996.
- [30] 国家林业局.中华人民共和国林业行业标准:森林土壤分析方法[S]. LY/T1210-1275-1999,林业出版社,1999.
- [31] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles-ScienceDirect[J]. Journal of Hydrology, 1970,10(3):282-290.
- [32] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,1999.
- [33] 洪宗文,温娅檬,刘一霖,等.川西亚高山不同彩叶林土壤水稳性团聚体特征[J].应用与环境生物学报,2021,27(3):601-607.
- [34] 朱家琪,满秀玲,王飞.我国寒温带4种森林植被类型下土壤团聚体粒级组成及其稳定性比较研究[J].土壤通报,2020,51(3):606-613.
- [35] Perfect E, Kay B D. Applications of fractals in soil and tillage research: a review [J]. Soil and Tillage Research, 1995,36(1/2):1-20.

(上接第68页)

- [25] 齐星圆,高照良,张翔,等.黄土堆积体变坡长坡面细沟动态发育过程[J].水土保持研究,2019,26(3):42-48.
- [26] 刘森,杨明义,张凤宝.黄土坡面细沟发育及细沟与细沟间侵蚀比率研究[J].水土保持学报,2015,29(1):12-16.
- [27] 吕刚,刘雅卓,陈鸿,等.褐土和棕壤坡耕地细沟侵蚀过程及侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2019,33(3):64-69.
- [28] 王小燕,王天巍,蔡崇法,等.含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程[J].水科学进展,2014,25(2):189-195.
- [29] Sun L Y, Zhou J L, Cai Q G, et al. Comparing surface erosion processes in four soils from the Loess Plateau under extreme rainfall events [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021,9(4):520-531.
- [30] Luo J, Zheng Z V, Li T X, et al. Quantifying the contributions of soil surface microtopography and sediment concentration to rill erosion [J]. Science of the Total Environment, 2020,752:141886.
- [31] 戎玉博,骆汉,谢永生,等.雨强对工程堆积体侵蚀规律和细沟发育的影响[J].泥沙研究,2016(6):12-18.
- [32] Lou Y C, Gao Z L, Sun G F, et al. Runoff scouring experimental study of rill erosion of spoil tips. [J]. Catena, 2022,214:106249.
- [33] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. An experimental study of rill erosion and morphology [J]. Geomorphology, 2015,231:193-201.
- [34] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J].农业工程学报,2014,30(11):110-117.