

中国东北黑土区耕地浅沟形态特征及其与地形和作物的关系

魏继龙^{1,2},王春梅^{1,2*},王伟³,中华珍^{1,2},王强^{1,2},
孙智博^{1,2},麻磊^{1,2},龙永清^{1,2},庞国伟^{1,2},王雷^{1,2}

(1. 西北大学城市与环境学院,陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,陕西 西安 710127;2. 旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室,陕西 西安 710048;3. 西安科技大学地质与环境学院,陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 浅沟侵蚀是目前东北黑土区耕地面临的重要生态问题,明确浅沟发育规律和影响因素是浅沟侵蚀治理的关键,对浅沟从坡顶至坡脚的发育特征及其相关因子的认识是精准定位坡面尺度浅沟进一步发育风险点的重要理论支撑,也是从源头上解决黑土地沟毁耕地问题的前提.[方法] 选取黑龙江嫩江市鹤北小流域不同作物和垄向的 4 条典型浅沟,基于高精度全球导航卫星系统实时动态(global navigation satellite system-real time kinematic, GNSS-RTK)野外实测和无人机航测,量化浅沟形态参数从坡顶至坡脚的变化,分析地形和作物类型对这一变化的影响.[结果] 1) 自浅沟坡顶至坡脚,沟深、沟宽和横截面积均先快速增大,之后呈波动变化,到坡脚处浅沟变宽变浅,横截面积逐渐减小;2) 浅沟横断面形态特征与地形因子存在显著相关关系,浅沟沟深与沿垄沟方向的坡度呈显著正相关($P < 0.05$),沟宽和汇水面积呈显著正相关($P < 0.05$);3) 玉米地抵御浅沟侵蚀的能力优于大豆地.相似的坡度和汇水面积条件下,大豆地浅沟沟深、沟宽和横截面积分别是玉米地的 1.81、1.76 和 2.46 倍.[结论] 坡面尺度上浅沟宽、深等形态参数呈规律性变化,并受地形和作物类型的影响,研究结果深化了对坡面尺度东北黑土耕地浅沟发育规律的认识,对未来防治结合型黑土地侵蚀沟治理策略具有重要科学意义.

关键词: 黑土区;中国东北;坡耕地;浅沟;形态特征;地形;作物

中图分类号:S157.1

文献标志码:A

文章编号:0438-0479(2025)03-0518-10

Morphological characteristics of ephemeral gullies in the cultivated land of the Mollisol region of Northeast China and their relationship with topography and crops

WEI Jilong^{1,2}, WANG Chunmei^{1,2*}, WANG Wei³, SHEN Huazhen^{1,2}, WANG Qiang^{1,2},
SUN Zhibo^{1,2}, MA Lei^{1,2}, LONG Yongqing^{1,2}, PANG Guowei^{1,2}, WANG Lei^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Key Laboratory of Ecohydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, China; 3. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: [Objective] Ephemeral gully (EG) erosion poses a significant ecological challenge to cultivated land in the Mollisol region of Northeast China. Elucidating the development laws and influencing factors of EGs is crucial for managing this form of erosion.

收稿日期:2024-10-15 录用日期:2025-01-13

基金项目:国家重点研发计划(2021YFD1500600)

*通信作者:cmwang@nwu.edu.cn

引文格式:魏继龙,王春梅,王伟,等.中国东北黑土区耕地浅沟形态特征及其与地形和作物的关系[J].厦门大学学报(自然科学版),2025,64(3):518-527.

Citation: WEI J L, WANG C M, WANG W, et al. Morphological characteristics of ephemeral gullies in the cultivated land of the Mollisol region of Northeast China and their relationship with topography and crops[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(3): 518-527. (in Chinese)



Understanding the development characteristics and related factors of EGs from the top to the bottom of hillslopes provides important theoretical support for accurately identifying potential gully risk points at the slope scale. Addressing the issue of cultivated land degradation caused by gully erosion in the Mollisol region is crucial for sustaining agricultural productivity and maintaining ecological balance in this important farming area. [Methods] Four typical EGs in the Hebei small watershed of Nenjiang City, Heilongjiang Province, were selected. A total of 113 fixed measurement sections were established along the EGs. High-precision global navigation satellite system-real time kinematic (GNSS-RTK) measurements and unmanned aerial vehicle (UAV) aerial surveys were conducted to obtain EG width and depth data during the 2023 snowmelt and rainfall seasons. An analysis was conducted to investigate the laws of variation in EG depth and width from the top to the bottom of hillslopes. Utilizing decimeter-level digital elevation models and centimeter-level digital orthophotos, digital terrain analysis and hydrological analysis methods were employed to derive catchment areas and slope gradients along ridges (ridge slope) for the EGs. The relationships between these factors and the morphological parameters of the EGs were analyzed. Additionally, the differences in EG morphological parameters under corn and soybean planting conditions were compared. [Results] 1) From the EG head to the bottom of the hillslope, gully width, depth and cross-sectional area increased rapidly, then fluctuated, becoming wider and shallower near the bottom of the slope. This fluctuation was influenced by forest belt, topography, and crops. Upstream of the forest belt, EG width increased, while within the forest belt, depth increased significantly and width decreased. The width of the EG increased, whereas its depth decreased under tributary inflow conditions. Crop type also influenced EG width and depth. 2) There was a significant correlation between EG cross-sectional morphological characteristics and two topographic factors: ridge slope and catchment area. Ridge slope had a substantial impact on gully depth, with the depth of the EGs increasing positively with the ridge slope ($R=0.60, P<0.05$). Catchment area primarily affected gully width, with an increase in the width of the EGs corresponding to an increase in the catchment area. A significant positive correlation was observed between these two variables ($P<0.05$), with a correlation coefficient of 0.56. 3) Corn fields exhibited greater resistance to EG erosion compared to soybean fields, with significant differences in EG morphological parameters between the two crop types. Under similar slope and catchment area conditions, the depth, width, and cross-sectional area of EGs in soybean fields were 1.81, 1.76, and 2.46 times of those in corn fields, respectively. [Conclusion] The morphological parameters of EGs, such as width and depth, exhibited regular changes on the slope scale and were influenced by topography and crop types. These findings enhance the understanding of the development patterns of EGs in Mollisol-cultivated land in Northeast China, provide theoretical and technical support for accurately identifying the risk points of the transformation from EGs to permanent gullies, and hold significant scientific implications for future EG control strategies in the Mollisol region. At present, research in this field is still at an early stage. This study only clarifies the situation of typical watersheds in the rolling hilly region of Northeast China. Future research should further explore these patterns under different climate, soil, parent material and other environmental conditions.

Keywords: Mollisol region; Northeast China; sloping farmland; ephemeral gully; morphological characteristic; topography; crop

沟毁耕地问题是东北黑土地保护国家战略中面临的最严峻挑战之一,浅沟和切沟是两种主要侵蚀沟类型,是黑土地生态问题的集中反映.其中浅沟被称为临时性沟道(ephemeral gully),指坡面上能被普通耕作工具横跨但不能被完全消除的侵蚀沟,会随着耕作在同一位置周期性出现^[1],也可发展为切沟,造成更严重的水土流失和耕地损毁,治理成本也大大增加,严重威胁东北黑土地粮食和生态安全^[2].东北黑土区浅沟发育广泛,每年有大量浅沟向切沟发育,认识浅沟的发育规律是遏制浅沟发育及其向切沟转变的核心,是从源头上解决沟毁耕地问题的关键,对黑土地农业可持续发展具有重要意义.目前已有学者对浅沟的形态特征和影响因素开展研究.对浅沟形态特征的研究方法主要有两种:一种是基于室内实验的模拟研究^[3-5],其优点是通过控制实验对沟蚀机理与过程有较为系统的认识,但实验结果亟需与浅沟实地发

育规律进行对比分析;另一种是基于野外实地调查方法的浅沟形态特征研究,已有研究者在浅沟发育特征季节性差异^[6]、侵蚀量估计^[7]、浅沟影响因素^[8]方面进行了初步探索,但总体来说基于野外实地调查的规律认识仍显不足.浅沟的形态特征受降雨^[9-11]、地形^[10,12-13]、耕作^[14-16]、植被类型^[17-19]等多因素影响.地形主要控制径流流速和流量,影响水流剪切能力,是浅沟侵蚀的决定性因素之一.研究者普遍认为坡度和汇水面积是浅沟发生的重要地形因子^[20],并基于这两个因子构建了侵蚀沟发生位置的地形临界阈值模型^[21-22],该模型也被应用于黑土耕地侵蚀沟的研究^[16,23-24];此外,研究者还发现汇水面积与浅沟长度和体积有较好的相关关系^[25].作物类型对浅沟侵蚀也具有显著影响,植物根系通过根系串联、根土黏结等方式稳定土壤结构,在水土保持中作用显著^[26-27].不同作物由于根密度、须根数量等差异,其水土保持效益

存在差异. 另外作物在生长期其地表冠层及根茎具有截流和再分配作用, 具备一定的水土保持能力, 但由于冠幅、根茎粗细等的差异, 不同作物固土效益也有较明显区别^[28-29].

在浅沟形态特征及其影响因素方面虽取得上述认识, 但目前对浅沟从坡顶至坡脚的形态变化规律方面的研究较为缺乏, 对于地形、作物类型如何影响这一变化规律也未较为明确的认识. 当前黑土地侵蚀沟治理受到广泛重视, 上述问题的科学回答成为精准识别坡面尺度浅沟防护的关键点及防治浅沟向切沟发展的前提. 因此本研究在东北漫川漫岗区小流域内选择典型浅沟, 基于高精度、固定断面的浅沟实测和无人机航测技术, 明确浅沟深度和宽度从坡顶至坡脚

的变化规律, 分析坡度、汇水面积对浅沟形态参数的影响, 对比不同作物种植条件下浅沟形态参数的差异, 以期为黑土农田浅沟侵蚀精准防治提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区

研究区为黑龙江省嫩江市鹤北流域(48°59'3.3"~49°02'35.7" N, 125°15'45.71"~125°20'46.79" E), 属北大荒集团九三农垦分局鹤山农场有限公司管辖, 总面积为 27.6 km²[图 1(a)和(b)], 处于丘陵漫岗区, 坡度范围为 1°~6°. 属典型黑土区, 黑土厚度为 0.2~

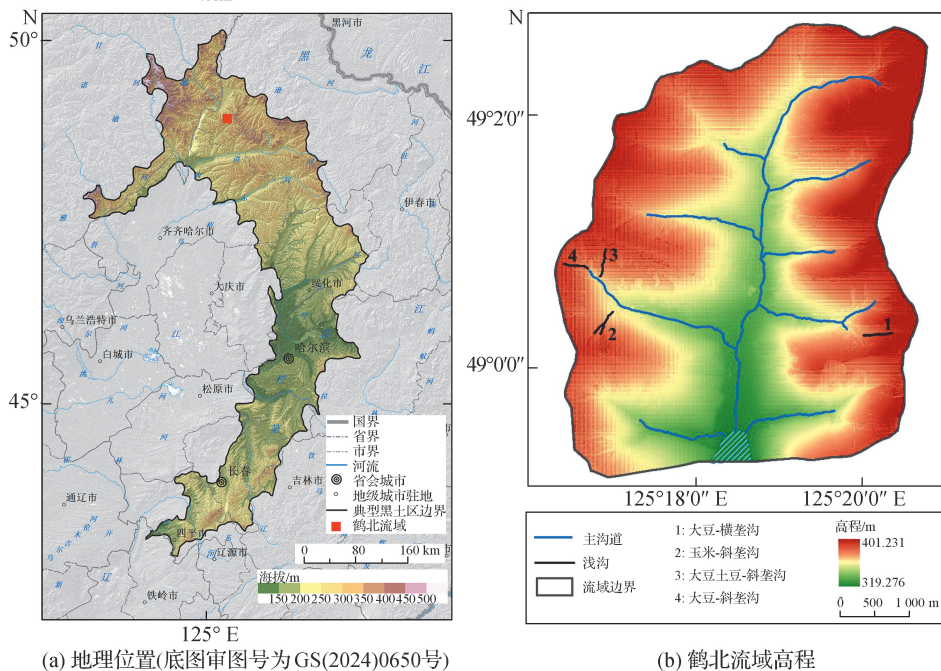


图 1 研究区位置和月降水量、月平均温度

Fig. 1 Location of the study area and monthly precipitation, monthly average temperature

0.9 m,平均厚度为0.4 m,黏土、粉砂、砂粒的质量分数分别为29%,44%和27%,平均有机质质量分数为4.85%^[30]。气候属于寒温带大陆性气候,冬夏温差大,夏季短暂炎热,冬季寒冷漫长。降水年际差异大,多集中在5—9月,近50年年均降水量558.8 mm。2022年1月—2023年12月的月降水量与月平均温度变化如图1(c)所示,期间年均降水量563.2 mm,最低温度-23.1℃,最高温度21.2℃(据鹤山农场气象站资料)。土地利用类型以耕地为主,作物以大豆和玉米为主,是典型的现代化机耕小流域,耕作时间一般为4—5月,整地时间为10—11月,垄作方向以横垄和斜垄为主。

本研究在鹤北流域选择了4条垄向和作物不同的典型浅沟,分别为大豆-横垄沟、玉米-斜垄沟、大豆土豆-斜垄沟和大豆-斜垄沟(图2),其中大豆土豆-斜垄沟所在坡面为组合坡,坡上部分为大豆,坡下部分为土豆,大豆与土豆的作物面积比约为1:1,地块中大豆与土豆的浅沟沟长比为5:9。每条浅沟间隔10 m布设横断面监测点对,共布设113个断面监测浅沟宽度和深度,4条沟坡度依次为2.34°,2.10°,2.32°和2.35°,汇水面积分别为16.70,22.92,12.45和17.02 hm²。

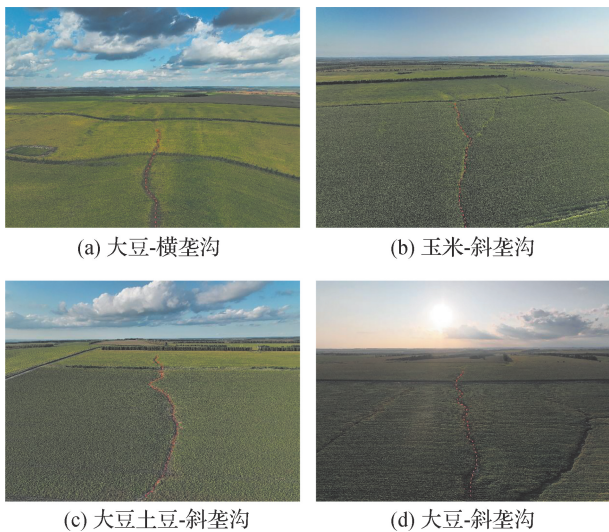


图2 典型浅沟照片

Fig. 2 Photos of the typical ephemeral gullies

1.2 基础数据

本研究中的基础数据包括由无人机获取的低空摄影影像数据和野外浅沟实测数据。坡度和汇水面积数据来源于2023年4月采集的无人机影像,该时间段的影像不受作物影响。采用大疆Mavic 3M无人机进行低空摄影测量,飞行航高为100 m,航向重叠率为80%,旁向重叠率为70%,通过Pix4d mapper软件对

原始航摄照片处理后得到空间分辨率为3 cm的数字正射影像(digital orthophoto map, DOM)及数字表面模型(digital surface model, DSM)。在DSM数据的建立过程中,为减少噪声对数据精度造成的误差,采用高斯滤波算法对DSM数据进行降噪处理,得到该区域的数字高程模型(digital elevation model, DEM)。分辨率过高时,地面微地形对坡度提取影响较大,因此将DEM重采样至0.20 m。

利用全球导航卫星系统实时动态(global navigation satellite system-real time kinematic, GNSS-RTK)进行侵蚀沟形态参数的高精度实测,该仪器由基准站和移动站台组成,水平精度为 $0.8 \text{ cm} + 10^{-6}x$,垂直精度为 $1.5 \text{ cm} + 10^{-6}x$ (x 表示测量距离)。通过GNSS-RTK定位布点[图3(a)],从沟头至沟尾每间隔10 m布设一个断面[图3(b)],利用卷尺(测量精度0.1 cm)在每次降雨后对浅沟横断面的顶宽和底宽进行测量,在横断面1/4、1/2和3/4处测量3个深度[图3(c)和(d)]。野外实测数据采集时间为2023年4月和9月,2023年4月的数据主要用于分析当耕地无作物覆盖时浅沟形态参数之间是否存在差异,2023年9月的数据用于分析浅沟形态参数从坡顶到坡脚的变化规律及与地形的相关关系。

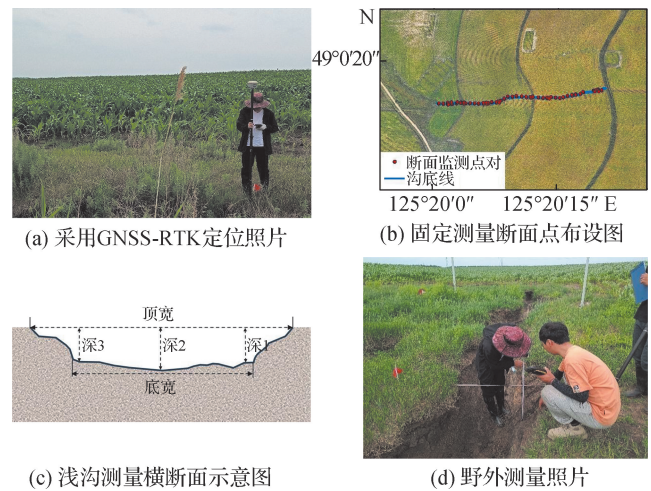


图3 测量方法示意图

Fig. 3 Illustration of measurement methods

1.3 地形指标提取方法

汇水面积计算:基于DEM数据,借助ArcGIS 10.5中的水文分析模块,计算浅沟流量,再通过识别工具提取每个断面的栅格数,换算得到汇水面积。

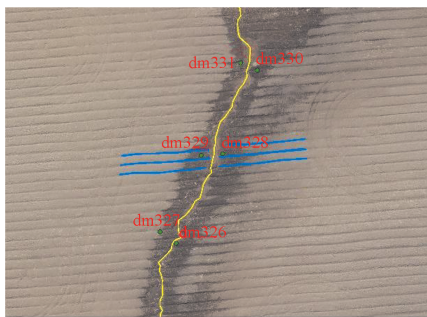
坡度计算:本研究中各条侵蚀沟所在地块均为起垄耕作,垄向坡度(即沿垄沟方向的坡度)对于侵蚀沟的发生发育比沿汇水线坡度更为重要。垄向坡度是通

过 DOM 识别垄沟位置,在 DEM 上沿垄沟从沟底向沟两侧各绘制 3 条 10 m 的坡面线(图 4,坡面线长度根据野外考察确定,以能代表水流路径方向近沟底直行坡为准),以坡面线上各栅格高程为 Y ,各高程栅格距坡面线起点距离为 X ,制作散点图并进行线性拟合,拟合线斜率 K 为坡度 θ_1 的正切值(式 1),再通过反三角函数计算坡度 θ_1 并转化为角度制 θ_2 [式(2)和(3)],最后取左右垄向坡度的均值为垄向坡度. 计算公式如下:

$$K = \tan \theta_1, \tag{1}$$

$$\theta_1 = \arctan K, \tag{2}$$

$$\theta_2 = 180\theta_1 / \pi. \tag{3}$$



• 横断面监测点对 — 坡面线 — 浅沟沟底线

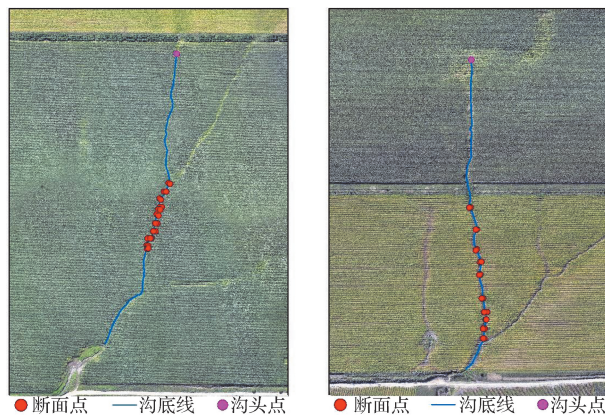
图 4 垄向坡度提取示意图

Fig. 4 Schematic diagram of ridge slope acquisition

1.4 不同类型作物浅沟形态参数差异对比方法

玉米和大豆是东北黑土区最主要的作物类型,本研究选择同一小流域内距离最近的玉米-斜垄沟和大豆-斜垄沟分析不同类型作物对浅沟侵蚀的影响,假设其气候和土壤之间不存在明显差异,由于同属鹤山农场管理,其农艺管理措施也基本相同. 在对比不同作物时,为减小坡度和汇水面积对浅沟侵蚀差异产生的影响,对浅沟每个断面处的坡度和汇水面积进行分级,选择同级别坡度和汇水面积的断面点进行差异性分析. 将坡度分为 $0.5^\circ \sim <1.5^\circ$ (1 级)、 $1.5^\circ \sim <2.5^\circ$ (2 级)、 $2.5^\circ \sim <3.5^\circ$ (3 级)、 $3.5^\circ \sim <4.5^\circ$ (4 级) 和 $4.5^\circ \sim 5.5^\circ$ (5 级) 共 5 个等级,汇水面积分为 $0 \sim <5 \text{ hm}^2$ (1 级)、 $5 \sim <10 \text{ hm}^2$ (2 级)、 $10 \sim <15 \text{ hm}^2$ (3 级)、 $15 \sim <20 \text{ hm}^2$ (4 级) 和 $20 \sim 25 \text{ hm}^2$ (5 级) 共 5 个等级. 在以上等级内通过分析发现,玉米-斜垄沟和大豆-斜垄沟均有 10 个断面其坡度同时介于 $2.5^\circ \sim <3.5^\circ$ (3 级),汇水面积同时介于 $15 \sim <20 \text{ hm}^2$ (4 级),因此选择该 20 个断面,断面位置如图 5 所示,基于 2023 年秋季浅沟断面实测结果分析不同作物的浅

沟形态参数差异,以量化玉米和大豆对浅沟发育影响的差异. 为进一步说明所筛选断面对比的可靠性,同步分析两个坡面上上述 20 个断面在 2023 年春季无作物覆盖情况下的浅沟形态参数差异.



(a) 玉米-斜垄沟

(b) 大豆-斜垄沟

图 5 断面点对位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the position of the cross-section point pair

2 结果与分析

2.1 典型浅沟沟深和沟宽从坡顶至坡脚的变化

以距分水岭的距离为横轴,以沟深(D)、沟宽(W)和横截面积(A_{cs})为纵轴进行多项式拟合,结果如图 6 所示. 可以看出:浅沟自沟头位置沿下坡方向延伸的起始段,其沟深、沟宽和横截面积均呈增大趋势,且变化幅度较大;随后在沟中间段沟深、沟宽和横截面积呈上下波动变化;到沟尾段沟宽增大,而沟深和横截面积显著减小. 此外,在林带上方,沟宽呈增大趋势;在林带中,沟宽减小而沟深增大. 玉米-斜垄沟呈“Y”型,当两支流汇合时,沟宽会突然增大,而沟深则有所减小,表明径流量对沟宽有较大影响. 可见,林带和汇流均对浅沟形态参数产生明显影响.

2.2 地形与浅沟形态特征的相关性

浅沟沟深、沟宽等断面形态参数与垄向坡度(S)、汇水面积(A)等地形参数之间的相关关系如图 7 所示. 沟深随垄向坡度的增大而增大,呈显著正相关($P < 0.05$),相关系数 R 均值为 0.60 [图 7(a)]; 沟宽随汇水面积的增大而增大,呈显著正相关($P < 0.05$),相关系数 R 均值为 0.56 [图 7(d)]; 而沟深与汇水面积之间、沟宽与坡度之间不存在显著相关关系($P > 0.05$) [图 7(b)和(c)]. 由此可见,垄向坡度和汇水面

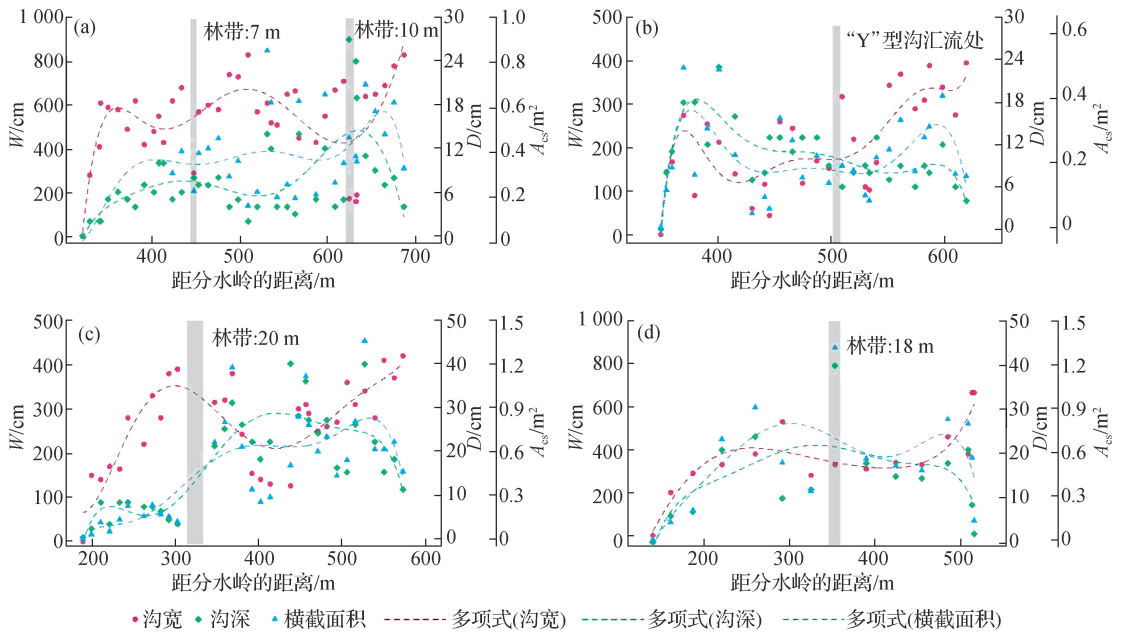


图 6 浅沟沟深、沟宽和横截面积从沟头到沟尾的沿程变化

Fig. 6 Variation of depth, width and cross-sectional area of the ephemeral gullies from head to tail

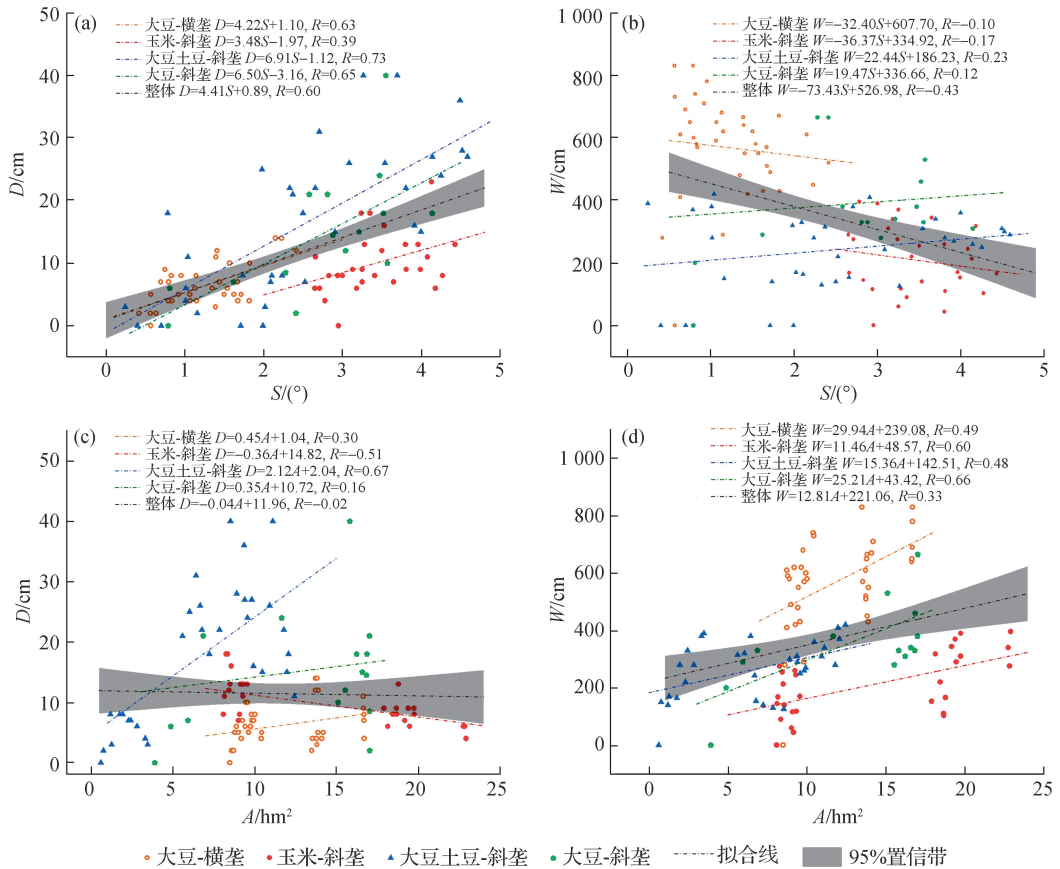


图 7 断面形态参数和地形的关系

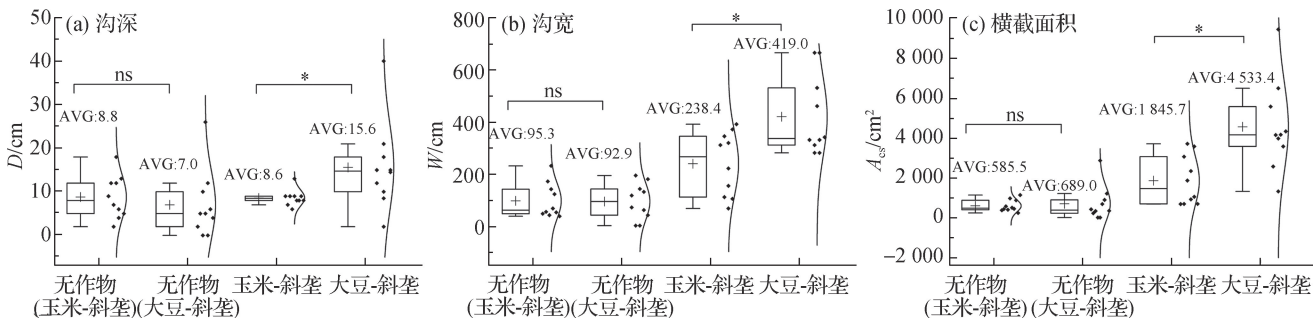
Fig. 7 Relationship between sectional morphological parameters and topography

积均影响浅沟断面特征,其中垄向坡度更多的是控制沟深的发育,而汇水面积则是影响沟宽的发育.

2.3 不同类型作物浅沟形态参数差异

在玉米-斜垄沟和大豆-斜垄沟中,选择坡度和汇水面积分级一致的断面,通过比较雨季后不同作物类型条件下的浅沟断面形态参数,分析作物类型对浅沟侵蚀的影响.图 8 为符合对比条件的浅沟断面深、宽和横截面积的箱线图.2023 年雨季后收获前的浅沟形态测量结果表明,不同作物间浅沟的沟深、沟宽和横截面积均存在显著性差异($P < 0.05$),玉米-斜垄沟和

大豆-斜垄沟的沟深均值分别为 8.6 和 15.6 cm,沟宽均值分别为 238.4 和 419.0 cm,横截面积均值分别为 1 845.7 和 4 533.4 cm^2 ,大豆地的沟深、沟宽和横截面积均值分别为玉米地的 1.81,1.76 和 2.46 倍.同时,补充了同年融雪后耕作前(此时呈裸地状态)上述两条浅沟断面形态特征.经统计分析表明,春季融雪季后裸地状态下,两条沟的沟深、沟宽和横截面积均无显著差异($P > 0.05$),从而进一步证明上述差异主要受作物类型影响.结果表明,不同作物对浅沟的形态参数影响较为明显,大豆地中的浅沟沟深、沟宽和横截面积均远大于玉米地.



—中位数,+均值,AVG表示均值,*表明二者之间存在显著差异($P < 0.05$),ns表示二者之间不存在显著差异($P > 0.05$).

图 8 玉米-斜垄沟和大豆-斜垄沟形态参数对比箱线图

Fig. 8 Comparison box plot of corn-oblique ridge and soybean-oblique ridge ephemeral gullies morphological characteristics

3 讨论

近年来国家高度重视东北黑土区的侵蚀沟治理,“十四五”以来治理侵蚀沟 2.11 万条^[31],以保护被誉为“耕地中的大熊猫”的黑土资源.但当前治理主要针对切沟,对浅沟的重视程度不足,每年仍有浅沟转变为切沟^[24].切沟的治理成本往往远高于浅沟,若在浅沟发育为切沟之前采取措施,防患于未然,则可有效降低侵蚀沟治理的整体成本.本研究探索了从坡顶到坡脚浅沟形态参数的变化特征,这一规律的认识是精准定位浅沟向切沟发展位置的关键.

3.1 浅沟宽度和深度从坡顶到坡脚的变化规律

本研究发现浅沟的形态特征在坡面上呈规律变化,自沟头位置沿下坡方向宽度和深度快速增大,而后沟宽和沟深开始波动变化,总体上沟深逐渐波动减小,沟宽逐渐波动增大.张永光等^[6]在鹤北流域发现浅沟侵蚀量从坡顶到坡脚呈波动变化;范昊明等^[32]在东北典型黑土区发现,融雪期切沟的宽度、深度、面积和体积从沟头至沟尾也呈波动变化,且沟头和沟中部

变化更剧烈,其结果均与本研究一致,但均未分析形态参数的变化与地形之间的关系.本研究发现浅沟宽度和深度的变化规律受到垄向坡度和汇水面积变化的影响,沟深与垄向坡度的沿程变化趋势相似,而沟宽和汇水面积的总体变化趋势一致.

浅沟形态参数规律性变化还可能与泥沙的搬运和沉积过程有关,水流含沙量从坡顶至坡脚明显变化,影响水流挟沙能力,从而影响浅沟发育.沟头处径流含沙量小,侵蚀能力大,浅沟发育速率快.到沟中部以下,泥沙含量的增加影响坡面径流的侵蚀力,径流在坡面从上往下的流动过程中,径流含沙量逐渐增大并趋于饱和,此时径流主要以泥沙的搬运和沉积为主,侵蚀能力减弱;当径流含沙量超过其挟沙能力时泥沙开始沉积,沉积一段距离后,径流含沙量减少,径流侵蚀力又会变大,如此往复便在坡面上呈现出一个强弱交替的土壤侵蚀过程^[33],这也是沟宽和沟深呈波动变化的另一个可能原因.而浅沟沟尾一般位于坡脚,坡脚处坡度变缓,径流中挟沙量趋于饱和,其侵蚀动力较弱,但坡脚径流流量最大,使得浅沟加宽,并出现泥沙淤积,导致浅沟深度逐渐减小.

3.2 浅沟形态参数和地形因子的相关性

本研究发现浅沟沟深和沟宽受坡度和汇水面积的影响,其中沟深和坡度呈正相关关系,沟宽和汇水面积呈正相关关系.在垄作耕作中,垄沟改变了坡面的水流路径,使得径流先沿垄沟汇聚到坡面凹地形中,再沿着凹地形从坡上往坡下流动.径流是坡面上水蚀过程中土壤颗粒分散与搬运、团聚体破碎与迁移的关键驱动力^[34-35],坡度和径流流量共同决定了径流剪切力的大小^[36-37].坡度通过改变径流汇集及侵蚀能量影响坡面浅沟侵蚀^[3].垄向坡度越大,垄沟内径流加速度越大,流速增大,水流下切分量也会增加,径流顺着垄沟快速汇聚到浅沟所在凹地,产生下切侵蚀,使得沟深快速增加.汇水面积是影响径流流量的主要因素^[38],汇水面积对沟宽的影响实质为径流流量对沟宽的影响^[23].径流首先是在垄沟内积聚,并在一定位置冲破垄台沿坡面向下垂直等高线流动,这一部位多位于凹地形最低处,即往往为浅沟沟底位置.越往坡脚方向,径流流量通常越大,在沟道中无法容纳上方径流时会向两侧加宽,且沟尾处一般坡度会变小,径流动力会明显减弱,但径流流量依然很大,因此在沟尾处的加宽更加明显.已有研究发现横垄耕作对径流具有更好的拦蓄作用^[39],可降低流速,但横垄也可在凹地汇集更多的径流,因此在横垄耕作地块中产生的浅沟比斜垄更宽.其次林带对径流有蓄积作用,经过林带后径流流量明显增大,因而沟宽在林带后短距离内也呈现出增大趋势.在玉米-斜垄沟两支流汇流后,其沟宽也随之迅速增大,以上发现也进一步印证了沟宽和径流流量或汇水面积之间的正相关关系.

3.3 不同类型作物对浅沟侵蚀的影响

本研究发现大豆地的沟深、沟宽和横截面积分别是玉米地的1.81,1.76和2.46倍,说明不同类型作物对土壤侵蚀的影响有较大差异,这与其他学者的研究结果^[29]相似.对大豆地和玉米地中浅沟单位汇水面积的侵蚀量进行估算,发现大豆地是玉米地的2.32倍(表1),不同作物之间浅沟侵蚀的差异较为明显.这是因为不同类型的作物对径流和泥沙的调节效率不同^[40].玉米秸秆较粗,叶片较大,在雨季来临时,通常已具备有效抵御降雨冲刷的能力,其枝叶能够对降雨起缓冲作用,减小雨滴对地面土壤表层的击溅^[41];此外,玉米粗壮的秸秆能阻滞泥沙迁移,减小径流流速,有效增大入渗时间和入渗量,减小径流流量^[42-44].大豆冠幅较大,郁闭程度较高,较玉米能够截留更多的雨水,但是大豆茎、叶较为细弱,当降雨强度较大时沟

底的大豆易倒伏,平铺在沟道内,削弱径流速度的同时也会使得浅沟更宽;在经历多次降雨后,大豆地中平铺在浅沟沟底的作物大多数干枯或者被冲走,地表接近于裸露状态,而玉米地的浅沟仍有较多作物覆盖,此后再降雨时大豆地的浅沟快速加深,而玉米地中仍有植被起截留作用,这导致经历整个降雨期后大豆地中的浅沟较玉米地的更宽更深.植物根系在稳定土壤结构、提高土壤抗冲性、防治土壤侵蚀方面也具有不可忽视的作用,是改善土壤侵蚀环境的重要因素^[45].土壤稳定性与植物根量关系密切,根量越大抗剪能力也越大,其主要是通过根系网络串联、根土黏结及根系生物化学作用固结土壤,强化土壤抗冲性能^[46].玉米根系较大豆更为发达,玉米根分支数多于大豆且各径级根系分布更均匀^[47],这也是大豆地浅沟侵蚀更为严重的原因之一.综上,玉米粗壮的秸秆及发达的根系使其保水固土作用优于大豆.

表1 大豆地和玉米地中浅沟侵蚀量对比

Tab.1 Comparison of ephemeral gully erosion in soybean and corn fields

浅沟	沟长/m	体积/m ³	侵蚀量 t/hm ²
玉米-斜垄	390	66.25	6.42
大豆-斜垄	420	181.33	14.92

4 结 论

东北黑土区耕地中的浅沟形态参数在坡面上呈规律性变化,浅沟沟深、沟宽和横截面积自沟头向坡下快速增加,到坡中部位置呈波动变化,到坡脚后逐渐趋于稳定,浅沟逐渐变宽变浅,横截面积逐渐减小.浅沟形态参数受地形影响,与垄向坡度和汇水面积两个地形因子存在显著相关关系,沟深和垄向坡度呈显著正相关($P < 0.05$),相关系数为0.60,而沟宽和汇水面积呈显著正相关($P < 0.05$),相关系数为0.56.浅沟形态参数还受作物类型影响,不同类型的作物之间浅沟形态参数存在明显差异,玉米的保土抗蚀作用明显优于大豆,大豆地中浅沟的深度、宽度和横截面积分别是玉米地的1.81,1.76和2.46倍.

本研究从鹤北小流域典型坡面尺度阐述了浅沟形态特征从坡顶到坡脚的变化规律,明确了这一变化与地形因子之间的关系,对比分析了不同作物对浅沟发育影响的差异,这为下一步浅沟治理及浅沟向切沟

发展的预防提供了重要参考. 目前这方面研究尚在初级阶段, 本研究仅代表松嫩黑土区北部漫川漫岗丘陵地区典型流域的情况, 未来研究中需进一步在不同气候、土壤、母质等条件下针对这一变化规律进行更为深入和系统的探讨.

致谢: 黑龙江九三土壤侵蚀教育部野外科学观测研究站和北大荒集团九三分公司黑龙江鹤山农场有限公司为本研究开展提供了重要支持, 特此致谢.

参考文献:

- [1] 刘宝元, 杨扬, 陆绍娟. 几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(1): 9-16.
- [2] 阎百兴, 杨育红, 刘兴土, 等. 东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J]. 中国水土保持, 2008(12): 26-30.
- [3] 耿华杰, 郑粉莉, 赵录友, 等. 降雨、汇流和坡度对黑土浅沟坡面侵蚀影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 57-67, 75.
- [4] 龚家国, 庞金城, 贾仰文, 等. 黄土区浅沟侵蚀影响因素对其侵蚀速率影响的模拟试验研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 7-11.
- [5] 徐锡蒙, 郑粉莉, 武敏. 雨强和坡度对黄土陡坡地浅沟形态特征影响的定量研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 124-132.
- [6] 张永光, 伍永秋, 汪言在, 等. 典型黑土区小流域浅沟侵蚀季节差异分析[J]. 地理研究, 2008, 27(1): 145-154.
- [7] 崔明, 蔡强国, 张永光, 等. 漫岗黑土区坡耕地中雨季浅沟发育机制[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 59-65.
- [8] TANG J, LIU G, XIE Y, et al. Annual variation of ephemeral gully erosion in a cultivated catchment [J]. *Geoderma*, 2021, 401: 115166.
- [9] YU Y, WEI W, CHEN L D, et al. Quantifying the effects of precipitation, vegetation, and land preparation techniques on runoff and soil erosion in a Loess watershed of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 755-764.
- [10] TANG J, XIE Y, WU Y Q, et al. Influence of precipitation change and topography characteristics on the development of farmland gully in the black soil region of Northeast China [J]. *Catena*, 2023, 224: 106999.
- [11] HUO J Y, LIU C J, YU X X, et al. Direct and indirect effects of rainfall and vegetation coverage on runoff, soil loss, and nutrient loss in a semi-humid climate [J]. *Hydrological Processes*, 2021, 35(1): e13985.
- [12] LI C H, SHI W H, HUANG M B. Effects of crop rotation and topography on soil erosion and nutrient loss under natural rainfall conditions on the Chinese Loess Plateau [J]. *Land*, 2023, 12(2): 265.

- [13] LI Y K, LU X Y, WASHINGTON-ALLEN R A, et al. Microtopographic controls on erosion and deposition of a rilled hillslope in eastern Tennessee, USA [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(6): 1315.
- [14] RONG L, DUAN X W, ZHANG G L, et al. Impacts of tillage practices on ephemeral gully erosion in a dry-hot valley region in southwestern China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 72-84.
- [15] 沈海鸥, 温磊磊, 武佳龙, 等. 垄作与垄间区田技术对黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的研究进展 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(22): 52-62.
- [16] TANG J, XIE Y, LIU C, et al. Effects of rainfall characteristics and contour tillage on ephemeral gully development in a field in northeastern China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 218: 105312.
- [17] ZHANG Y, ZHAO Y Y, LIU B Y, et al. Rill and gully erosion on unpaved roads under heavy rainfall in agricultural watersheds on China's Loess Plateau [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 284: 106580.
- [18] WU G L, LIU Y F, CUI Z, et al. Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: a meta-analysis [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(5): 875-885.
- [19] GUO M M, WANG W L, WANG T C, et al. Impacts of different vegetation restoration options on gully head soil resistance and soil erosion in loess tablelands [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45(4): 1038-1050.
- [20] DESMET P J J, POESEN J, GOVERS G, et al. Importance of slope gradient and contributing area for optimal prediction of the initiation and trajectory of ephemeral gullies [J]. *Catena*, 1999, 37(3/4): 377-392.
- [21] GUAN Y B, YANG S T, ZHAO C S, et al. Monitoring long-term gully erosion and topographic thresholds in the marginal zone of the Chinese Loess Plateau [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104800.
- [22] LIU X, GUO M M, ZHANG X Y, et al. Morphological characteristics and volume estimation model of permanent gullies and topographic threshold of gullying in the rolling hilly Mollisols region of Northeast China [J]. *Catena*, 2023, 231: 107323.
- [23] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 东北漫川漫岗黑土区浅沟和切沟发生的地貌临界模型探讨 [J]. 地理科学, 2006, 26(4): 4449-4454.
- [24] 李珊珊, 王春梅, 唐杰, 等. 东北黑土区典型小流域浅沟向切沟发育及其地形临界研究 [J/OL]. 武汉大学学报(信息科学报), 2024 [2024-08-23]. <https://doi.org/10.>

- 13203/j.whugis20230493.
- [25] 张永光,伍永秋,刘洪鹄,等. 东北漫岗黑土区地形因子对浅沟侵蚀的影响分析[J]. 水土保持学报, 2007(1): 35-38,49.
- [26] BURYLO M, HUDEK C, REY F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France)[J]. *Catena*, 2011, 84(1/2): 70-78.
- [27] 熊燕梅,夏汉平,李志安,等. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 895-904.
- [28] MUONI T, KOOMSON E, ÖBORN I, et al. Reducing soil erosion in smallholder farming systems in East Africa through the introduction of different crop types [J]. *Experimental Agriculture*, 2020, 56(2): 183-195.
- [29] 吴限,魏永霞,王敏,等. 不同农田植被条件下黑土坡耕地产流和产沙特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3): 101-104, 111.
- [30] ZHANG T Y, LIU G, DUAN X W, 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.
- [31] 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): 157.
- [32] 范昊明,王岩松,樊向国,等. 东北黑土区典型流域融雪期切沟发育特征研究[J]. 中国水土保持, 2018(5): 64-69.
- [33] 李勉,杨剑锋,侯建才,等. ^{137}Cs 示踪法研究黄土丘陵区坡面侵蚀空间变化特征[J]. 核技术, 2009, 32(1): 50-54.
- [34] LE BISSONNAIS Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4): 425-437.
- [35] ZHENG F L, MERRILL S D, HUANG C H, et al. Runoff, soil erosion, and erodibility of conservation reserve program land under crop and hay production[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(4): 1332-1341.
- [36] POESEN J W A, TORRI D B, VANWALLEGHEM T. Gully erosion: procedures to adopt when modelling soil erosion in landscapes affected by gully [M] // *Handbook of erosion modelling*. [S. l.]: Blackwell Publishing Ltd, 2010: 360-386.
- [37] TORRI D, POESEN J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 130: 73-85.
- [38] 沈影利. 风水复合侵蚀对不同坡型黑土坡耕地土壤质量的影响研究[D]. 陕西:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2023: 1-76.
- [39] 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.
- [40] 张平,王树森,马迎梅,等. 黄土丘陵沟壑区不同草本植物生长期植物纤维毯对沟道边坡产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 49-55.
- [41] YAO J J, CHENG J H, ZHOU Z D, et al. Effects of herbaceous vegetation coverage and rainfall intensity on splash characteristics in northern China [J]. *Catena*, 2018, 167: 411-421.
- [42] LIU Y, FU B J, LÜ Y H, et al. Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China[J]. *Geomorphology*, 2012, 138(1): 404-414.
- [43] MUÑOZ-ROBLES C, REID N, TIGHE M, et al. Soil hydrological and erosional responses in patches and inter-patches in vegetation states in semi-arid Australia [J]. *Geoderma*, 2011, 160(3/4): 524-534.
- [44] WU S F, WU P T, FENG H, et al. Effects of alfalfa coverage on runoff, erosion and hydraulic characteristics of overland flow on loess slope plots[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2011, 5(1): 76-83.
- [45] 刘定辉,李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34-37, 117.
- [46] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 93-96.
- [47] 张立芸,段青松,范茂攀,等. 玉米和大豆根系对滇中地区坡耕地红黏土抗剪强度的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(6): 1527-1539.

(责任编辑:曾礼娜)