

# 黑土缓坡耕地全生育期作物对自然降雨 径流泥沙特征的影响

周天赐, 王中华, 耿佟佟, 王军光, 蔡崇法

(华中农业大学 水土保持研究中心, 农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** [目的] 探究黑土缓坡耕地全生育期作物对自然降雨径流泥沙特征的影响, 为黑土缓坡耕地侵蚀防治工作提供理论依据。[方法] 2023—2024 年对不同坡位(上坡、中坡、下坡)和作物种类(大豆、玉米)原位径流小区进行了自然降雨观测试验, 分析了裸地与作物覆盖区的水土流失特征。[结果] (1) 降雨类型对土壤侵蚀的影响显著, 尤其是大雨强和长历时降雨(雨型 III)导致的土壤流失量最大, 而小雨强和短历时降雨(雨型 I)虽频繁, 但其土壤侵蚀强度较小。(2) 土壤侵蚀在不同坡面位置存在显著差异, 下坡侵蚀敏感性高于中坡和上坡。(3) 不同作物种类下, 玉米对土壤侵蚀的抑制作用明显优于大豆, 表明作物种类在水土保持中发挥着关键作用。(4) 通径分析结果指出, 相比作物, 降雨和径流对土壤侵蚀的影响更为显著。[结论] 降雨和径流对作物覆盖坡面下土壤侵蚀的影响显著, 为有效防治黑土缓坡耕地的土壤侵蚀, 需特别考虑大雨强和长历时降雨的影响。

**关键词:** 黑土; 缓坡耕地; 降雨侵蚀; 作物覆盖

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0018-09

## Effects of crops during entire growth season on runoff and sediment characteristics under natural rainfall in black soil gentle slope cropland

Zhou Tianci, Wang Zhonghua, Geng Tongtong, Wang Junguang, Cai Chongfa

(Key Laboratory of Cultivated Land Conservation in the Middle and Lower Reaches

of the Yangtze River of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Soil and Water

Conservation Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the effects of crops during the entire growth season on runoff and sediment characteristics under natural rainfall conditions in black soil gentle slope cropland, providing a theoretical basis for soil erosion prevention and control in these areas. [Methods] From 2023 to 2024, natural rainfall observation experiments were conducted on in-situ runoff plots at different slope positions (upper, middle, and lower slopes) and with different crop types (soybean and maize). Soil and water loss characteristics in bare land and crop-covered plots were analyzed. [Results] (1) Rainfall patterns significantly affected soil erosion. In particular, high-intensity and long-duration rainfall (Rainfall Pattern III) caused the greatest soil loss, while low-intensity and short-duration rainfall (Rainfall Pattern I), though frequent, resulted in relatively low erosion intensity. (2) Significant differences in soil erosion were observed at different slope positions. The lower slope was more susceptible to erosion than the middle and upper slopes. (3) Among different crop types, maize exhibited a better inhibitory effect on soil erosion than soybean, indicating that crop type played a crucial role in soil and water conservation. (4) Path analysis results indicated that rainfall and runoff had a more significant impact on soil

收稿日期: 2025-06-19

修回日期: 2025-07-04

接受日期: 2025-07-25

资助项目: 国家自然科学基金项目(42177317); 国家重点研发计划项目(2021YFD1500703)

第一作者: 周天赐(1999—), 男, 湖北荆州人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀机理。E-mail: 1604146936@qq.com

通信作者: 王军光(1984—), 男, 河南新乡人, 博士, 教授, 研究方向为土壤结构、侵蚀机理与过程。E-mail: jgwang@mail.hzau.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

erosion than crop type. [Conclusion] Rainfall and runoff significantly affect soil erosion on crop-covered slopes. To effectively control soil erosion in black soil gentle slope cropland, the impact of high-intensity and long-duration rainfall should be given special consideration.

**Keywords:** black soil; gentle slope cropland; rainfall erosion; crop cover

水土流失已成为全球土地退化的主要原因之一,严重影响全球生态系统和人类可持续发展<sup>[1-2]</sup>。降雨是引发坡面产流和泥沙输出的主要驱动因素,直接影响了土壤颗粒的分离以及侵蚀泥沙的输移和沉积<sup>[3]</sup>。降雨类型决定了降雨特征,包括降雨的时间分布、雨强、降雨历时和降雨侵蚀力,进而影响径流泥沙的产生<sup>[4]</sup>。同时,植被对维持土壤的结构稳定性和抵抗侵蚀起着至关重要的作用,通过增加土壤的入渗能力,植被能够影响径流的初始产生时间和持续时间并发挥重要的水文功能,从而降低侵蚀过程中的径流和泥沙量<sup>[5-6]</sup>。作物种类在农田土壤侵蚀过程中具有重要作用,不同作物的冠层结构及根系形态对坡面土壤抗蚀性影响显著<sup>[7-8]</sup>。当前研究表明,林地和草地生态系统在防治水土流失方面取得了显著成效,其作用机制主要包括树冠对降水的截留、降低雨滴冲击力以及枯枝落叶的蓄水效应<sup>[7,9]</sup>。因此,不同降雨类型对径流和土壤侵蚀的影响可以通过土地利用条件等因素进行调节。

东北黑土区是我国重要的粮食基地,资源优势和战略意义极为突出<sup>[10-11]</sup>。该区域位于温带大陆性季风气候区,年降水量350~1 000 mm,季节性降雨集中,其地形主要以长缓坡为主,坡度通常低于5°,坡面长度为500~2 000 m<sup>[11]</sup>。在这一地区,水力侵蚀对坡耕地的影响最大,同时长坡径流汇水面积较大,长缓坡面可能导致侵蚀泥沙沿坡面进行再分布,在不同坡面位置发生沉积<sup>[12]</sup>,而这种状况导致不同位置土壤理化性质和微地形条件存在较大差异。研究显示,不同的微地形条件会对降雨的强度、频率和分布产生不同的响应<sup>[13]</sup>。因此,在研究过程中,不同坡位所带来的影响不可忽视。

目前,已有大量研究探讨了作物覆盖对降雨侵蚀下径流泥沙的影响<sup>[8,14]</sup>,但针对作物全生育期和缓坡不同空间位置变化的研究相对较少。因此,为了探究作物全生育期内不同坡面位置对黑土缓坡耕地土壤侵蚀的影响,本研究于2023—2024年在研究区域开展一系列野外小区定位观测试验。重点分析裸地和当地典型作物(大豆和玉米)在不同坡面位置上的土壤侵蚀特征,特别是在不同降雨类型条件下的表现。研究探讨自然降雨过程中不同作物对土壤水蚀的影响,旨在为该区域农业的可持续发展提供一定的数据参考和理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省哈尔滨市宾县一块典型缓坡耕地(45°47′23.92 N;127°15′07.84 E),是东北地区典型漫川漫岗丘陵区,海拔182~251 m,属于温带大陆季风性气候。研究区年平均温度为3.9℃,气温年较差大,平均无霜期148 d;年平均降雨量为581 mm,降雨量年际间变化明显且分布不均,降雨主要集中在6—8月,占全年降水量的75%以上<sup>[15]</sup>。

区域土壤类型为典型黑土,土壤腐殖质层较厚,表层有机质含量丰富,潜在肥力较高。研究区不同坡面位置黑土层厚度20~40 cm,其中上坡位置20~25 cm,中坡位置25~30 cm,下坡位置35~40 cm,黑土层厚度在研究区坡面上、中、下位置变化明显。研究区主要种植作物为玉米(*Zea mays* L.)和大豆[*Glycine max* (L.) Merr.],耕作方式为大豆玉米混作,以玉米为主。研究区土壤基本性质如表1所示。

表1 研究区不同坡位土壤基本理化性状

Table 1 Basic physicochemical properties of soil at different slope positions in study area

坡位	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/ %	土壤机械组成			平均重量直径 MWD/mm	pH	有机碳 SOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )
			砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%			
上坡	1.27±0.06	48.38±3.97	19.35±3.80	61.94±2.88	18.71±0.94	1.54±0.09	5.48±0.06	17.70±3.00
中坡	1.36±0.10	50.01±7.89	17.65±7.89	67.81±7.50	14.64±3.00	1.28±0.15	5.83±0.23	20.62±1.53
下坡	1.39±0.05	47.91±5.98	23.38±7.73	60.27±8.29	16.35±3.46	1.22±0.09	5.57±0.09	23.27±1.91

### 1.2 研究方法

基于坡面侵蚀程度差异,在区域内选取一条坡长520 m、坡度3%的单向斜坡,在坡面的上坡、中坡

和下坡位置分别设置面积为5 m×1 m的径流小区,每个坡位分别设置裸地、大豆和玉米3种处理,每种处理设置两个重复,共计18个径流小区。大豆和玉

米处理小区内均沿小区出口方向种植两行,大豆品种选用“黑农96”,株距为10 cm,种植密度约为18万株/hm<sup>2</sup>;玉米品种选用“协玉250”,株距为35 cm,种植密度约为6万株/hm<sup>2</sup>。此外,为排除耕作方式的影响,小区并未起垄,同时施肥方式保持与当地农民一致。小区布设示意图如图1所示。

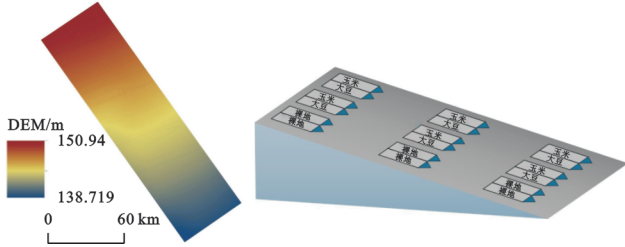


图1 径流小区布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram of runoff plot layout

自然观测从2023年5月同步开始,直至2024年10月作物收获为止。植被覆盖度采用“照相法”进行测定<sup>[16]</sup>,作物生长旺盛期每7 d,其余时间每15 d测定一次各径流监测小区的植被盖度。植株高度则在植被盖度测定同时,在每个小区随机选取10株作物用卷尺进行测定,其平均值为该小区株高。降雨数据通过设置小型气象站(RS-QXYL-M-3-fg,建大仁科)获取,利用设备上的翻斗式雨量传感器获取次降雨量和次降雨历时,通过气象站云平台获取实时降雨数据。同时,在次降雨事件发生后,观测每个小区是否有径流产生,若有,则待产流现象停止后,收集径流和泥沙。

部分特征参数通过以下公式计算:

(1) 降雨强度。

$$I = P/D \quad (1)$$

式中: $I$ 为降雨强度(mm/h); $P$ 为降雨量(mm); $D$ 为降雨历时(h)。

(2) 降雨侵蚀力。根据张宪奎等的研究<sup>[17]</sup>,东北黑土区较适用的降雨侵蚀力公式为:

$$R = E_{60} I_{30} \quad (2)$$

式中: $R$ 为降雨侵蚀力[MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h)]; $E_{60}$ 为次降雨60 min最大降雨产生的降雨动能(J/m<sup>2</sup>); $I_{30}$ 为30 min最大降雨强度(mm/h)。

(3) 降雨动能。

$$E = ep \quad (3)$$

$$\begin{cases} e = 210.35 + 89.041gi & i \leq 76 \\ e = 289 & i > 76 \end{cases}$$

式中: $E$ 为某时段的降雨动能(J/m<sup>2</sup>); $p$ 为某时段的降雨雨量(mm); $e$ 为单位降雨能量[J/(m<sup>2</sup>·mm)]; $i$ 为单位时间的降雨强度(mm/h)。

(4) 径流深度。

$$RD = \frac{1}{4} \frac{\pi d^2 h}{1000LW} \quad (4)$$

式中: $RD$ 为径流深度(mm); $d$ 为径流桶直径(cm); $h$ 为液面深度(cm); $L$ 和 $W$ 分别为小区的长(m)和宽(m)。

(5) 单位泥沙侵蚀量。

$$S = GRD/v \quad (5)$$

式中: $S$ 为单位侵蚀量(t/km<sup>2</sup>); $RD$ 为径流深度(mm); $G$ 为取样瓶内泥沙质量(g); $v$ 为取样瓶体积(L)。

(6) 减流效益。

$$RRB = 100 \times \frac{RD_B - RD_C}{RD_B} \quad (6)$$

式中: $RRB$ 为减流效益(%); $RD_B$ 为裸地径流深度(mm); $RD_C$ 为作物地径流深度(mm)。

(7) 减沙效益。

$$SRB = 100 \times \frac{S_B - S_C}{S_B} \quad (7)$$

式中: $SRB$ 为减沙效益(%); $S_B$ 为裸地产沙量(t/km<sup>2</sup>); $S_C$ 为作物地产沙量(t/km<sup>2</sup>)。

### 1.3 数据处理与分析

利用Excel 2019进行数据的基本处理与计算,利用SPSS 22.0进行数据的分析,包括不同处理之间的显著性分析、相关性分析、通径分析等,利用Origin 2022进行图表的绘制。

## 2 结果与分析

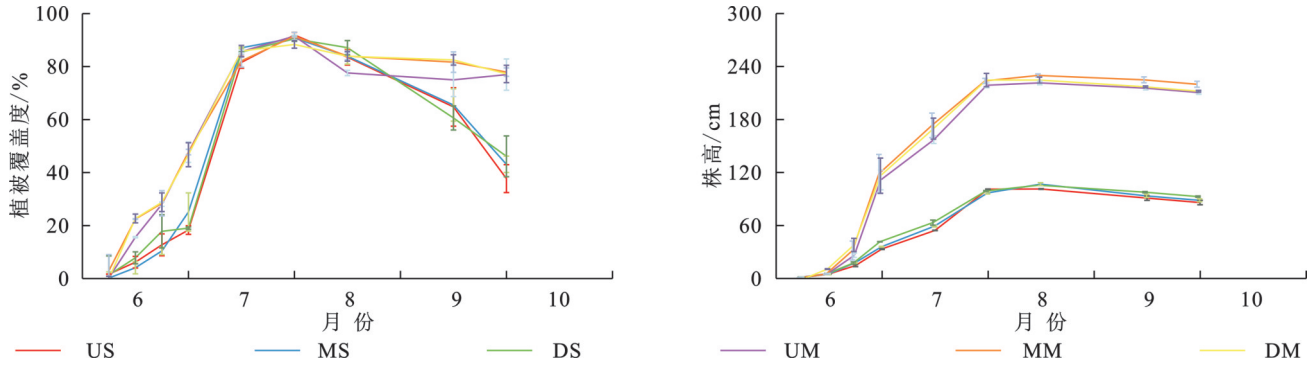
### 2.1 全生育期作物覆盖及降雨特征

作物的生长动态是其环境适应能力的综合体现,其中植被盖度和株高是反映作物生长状况的重要指标。图2显示了不同坡面位置下作物植被盖度和高度的时间变化趋势。总体来看,大豆和玉米的植被盖度和株高均呈现“S”型生长曲线。在幼苗期和快速生长期,玉米的植被盖度显著高于大豆,这表明玉米在早期生长阶段具有明显的竞争优势。在7月17日之后,玉米和大豆的盖度逐渐接近,最终均完全郁蔽。此外,玉米株高在6月25日之后因拔节作用显著提高,明显高于大豆。大豆作物在8月17日之后的生长周期中,由于结荚和结粒阶段叶片掉落,其植被盖度迅速下降,在收获时植被盖度甚至降至50%以下,远低于玉米。

如图3所示的本研究区2023—2024年5—10月的降雨量分布情况,研究区次降雨量0.6~86.2 mm,年均雨量为574.3 mm,主要降雨出现在6—8月,占全年降水量的75%以上。同时,如图3和表2所示,在2023—2024年的作物生育期间(5—9月),共监测到36次侵蚀性降雨事件。在36次侵蚀性降雨中,裸

地、大豆和玉米小区的产流次数分别为36次、32次和32次。侵蚀性降雨的单次降雨量范围从10.4 mm到86.2 mm不等。在生育期间,侵蚀性降雨的平均强度和30分钟最大雨强分别为0.43~13.26 mm/h, 2~90.8 mm/h;降雨历时为0.0~2.0 h,降雨侵蚀力为0.3~90.8 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h)。研究区的侵蚀性降

雨主要集中在6—8月,共发生31次降雨事件,占总事件和降水量的86.1%和85.6%。值得注意的是,研究区2024年的总降雨历时仅为2023年的71.54%,但降雨量和降雨侵蚀力分别达到了2023年的1.15倍和2.81倍,表明该区域的降雨年际分布变化较大,且土壤侵蚀受极端降雨的影响显著。



注:US为上坡大豆小区;MS为中坡大豆小区;DS为下坡大豆小区;UM为上坡玉米小区;MM为中坡玉米小区;DM为下坡玉米小区。

图2 不同坡面位置和作物种类下植被盖度、高度的时间变化

Fig. 2 Temporal changes in vegetation cover and height under different slope positions and crop types

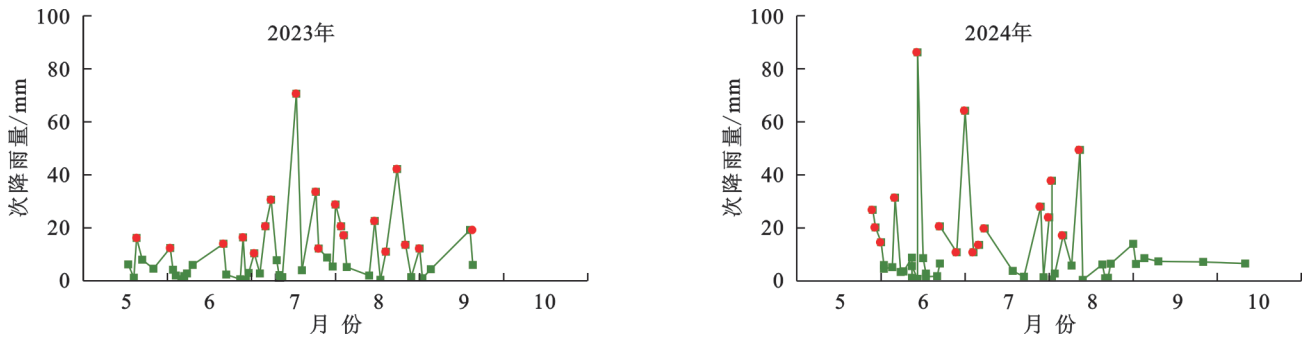


图3 研究区2023—2024年生育期次降雨分布情况

Fig. 3 Distribution of individual rainfall events during growing seasons in study area (2023—2024)

采用k-均值聚类方法,对2023—2024年观测期内的天然降雨进行聚类分析。对观测期内收集到的36场有效侵蚀性降雨,基于降雨量( $P$ )、降雨历时( $D$ )和最大30分钟雨强( $I_{30}$ ),将其划分为3种雨型,分类结果如表3所示。雨型I表现为小雨量、中等历时和小雨强,共发生24场,频次为66.67%,总降雨量为408.2 mm,变异系数为0.35。雨型II为中等雨量、短历时和中等雨强,共发生9场,频次为25.00%,总降雨量为284.6 mm,变异系数为0.30。雨型III则表现为大雨量、长历时及大雨强,属于暴雨事件,仅发生3次,频次最低,为8.33%,但总降雨量达到221.0 mm,变异系数为0.13。不同类型下降雨频次和降雨特征存在显著差异。

## 2.2 不同雨型下的径流泥沙特征

从表4可以看出,不同坡面位置下裸地的累积径流深度和径流系数是大豆和玉米的1.38~1.69倍。作物和裸地小区的径流深度和径流系数对不同雨型降雨事件的反应存在差异(图4)。在几乎所有的侵

蚀性降雨事件中,裸地的径流深度和径流系数均为最高。此外,在雨型I下,裸地和两种作物的径流深度只有雨型II和III的0.63~0.94倍和0.48~0.82倍,而径流深度在雨型II和III下裸地小区之间没有明显差异,在作物小区差异显著。同一小区内,不同雨型下的径流系数差异显著;相同雨型下,两种作物在不同坡面位置下的径流系数差异显著( $p < 0.05$ ),但两种作物之间差异不显著。此外,对于两种作物而言,3种雨型之间的减流效益在DM以外的所有小区之间均存在显著差异( $p < 0.05$ );在所有坡位,玉米的减流效益均高于大豆。

如表4所示,2023—2024年作物全生育期,不同坡面位置下裸地的累计土壤侵蚀量为大豆和玉米的1.67~1.94倍。裸地、大豆和玉米在不同坡面位置的土壤侵蚀量分别为0.21~231.17, 0.20~391.79, 0.24~522.81, 0.12~209.73, 0.15~341.68, 0.30~481.67 t/km<sup>2</sup>,表现出极强的变异性(图5)。同一降雨事件下,不同坡面位置下裸地的次降雨平均土壤

侵蚀量分别为大豆和玉米的 1.13~15.27 倍和 1.20~27.93 倍。值得注意的是,裸地和两种作物的土壤侵蚀 96% 发生在 6—8 月,与径流结果一致。同时,不同雨型下各小区土壤侵蚀量存在显著差异。在雨型 II 和 III 下,裸地和两种作物的次降雨平均土壤侵蚀量是雨型 I 的 5.86~42.59 倍;在雨型 III 下,裸地和两种作物的平均土壤侵蚀量也达到雨型 I 和 II 的 2.93~40.62 倍。此外,在相同雨型下,同一坡面

位置两种作物的平均土壤侵蚀量差异不大,大豆略高于玉米,但两种作物相较于裸地明显降低;而在不同坡面位置下,两种作物的平均土壤侵蚀量变化显著(下坡/中坡>上坡)。与裸地相比,两种作物在雨型 I, II 和 III 下的减沙效益分别为 57.72%~64.72%, 60.7%~68.84% 和 40.82%~50.93%,且作物的减沙效益在中短雨量和历时的降雨下更为显著(雨型 I 和 II)。

表 2 研究区 2023—2024 年生育期侵蚀性次降雨情况

Table 2 Characteristics of erosive rainfall events during growing seasons in study area (2023—2024)

降雨日期	2023 年					2024 年					
	$P/mm$	$D/h$	$I/(mm \cdot h^{-1})$	$I_{30}/(mm \cdot h^{-1})$	$R/(MJ \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1})$	降雨日期	$P/mm$	$D/h$	$I/(mm \cdot h^{-1})$	$I_{30}/(mm \cdot h^{-1})$	$R/(MJ \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1})$
05-19	16.2	11.5	1.4	7.2	2.2	05-26	0.8	26.8	33.0	0.8	2.0
06-01	12.4	9.5	1.3	9.2	2.3	05-27	4.3	20.2	22.5	0.9	10.8
06-02	14.0	9.0	1.6	9.2	2.4	05-30	0.9	14.6	13.5	1.1	3.6
06-27	16.4	15.0	1.1	15.6	5.4	06-05	16.8	31.4	5.5	5.7	23.2
07-01	10.4	11.0	1.0	15.6	3.2	06-13	221.4	86.2	6.5	13.3	90.8
07-05	20.6	8.0	2.6	7.6	3.1	06-21	15.1	20.6	3.5	5.9	31.2
07-06	30.6	7.0	4.4	28.4	21.2	06-26	3.5	10.8	8.5	1.3	16.0
07-14	70.6	50.0	1.4	9.2	13.2	06-30	74.9	64.2	13.0	4.9	44.0
07-22	33.6	16.0	2.1	6.8	4.4	07-03	0.5	10.8	9.5	1.1	2.8
07-23	12.2	12.0	1.0	12.0	3.0	07-05	2.1	13.6	6.5	2.1	8.0
07-30	28.8	6.0	4.8	44.8	31.2	07-07	14.2	19.8	3.0	6.6	30.4
08-02	20.6	12.5	1.7	9.2	3.7	07-26	4.5	28.0	19.5	1.4	8.0
08-03	17.2	3.5	4.9	18.0	6.9	07-30	14.3	24.0	2.0	12.0	25.2
08-12	22.6	32.0	0.7	5.6	2.3	07-30	13.7	37.8	18.0	2.1	16.4
08-18	11.0	10.0	1.1	12.0	2.5	08-04	7.9	17.2	4.5	3.8	20.4
08-21	42.2	9.5	4.4	42.0	43.8	08-10	40.6	49.4	22.3	2.2	32.4
08-25	13.6	4.5	3.0	11.6	3.2	08-30	4.0	14.0	9.0	1.6	14.4
08-29	12.2	28.5	0.4	2.0	0.3	—	—	—	—	—	—
09-18	19.2	24.5	0.8	6.4	2.2	—	—	—	—	—	—
合计	424.4	280.0	—	—	156.5	合计	489.4	200.3	—	—	439.5

注:  $P$  为降雨量,  $D$  为降雨历时,  $I$  为平均雨强,  $I_{30}$  为 30 min 最大雨强。下表同。

表 3 研究区侵蚀性降雨的雨型划分

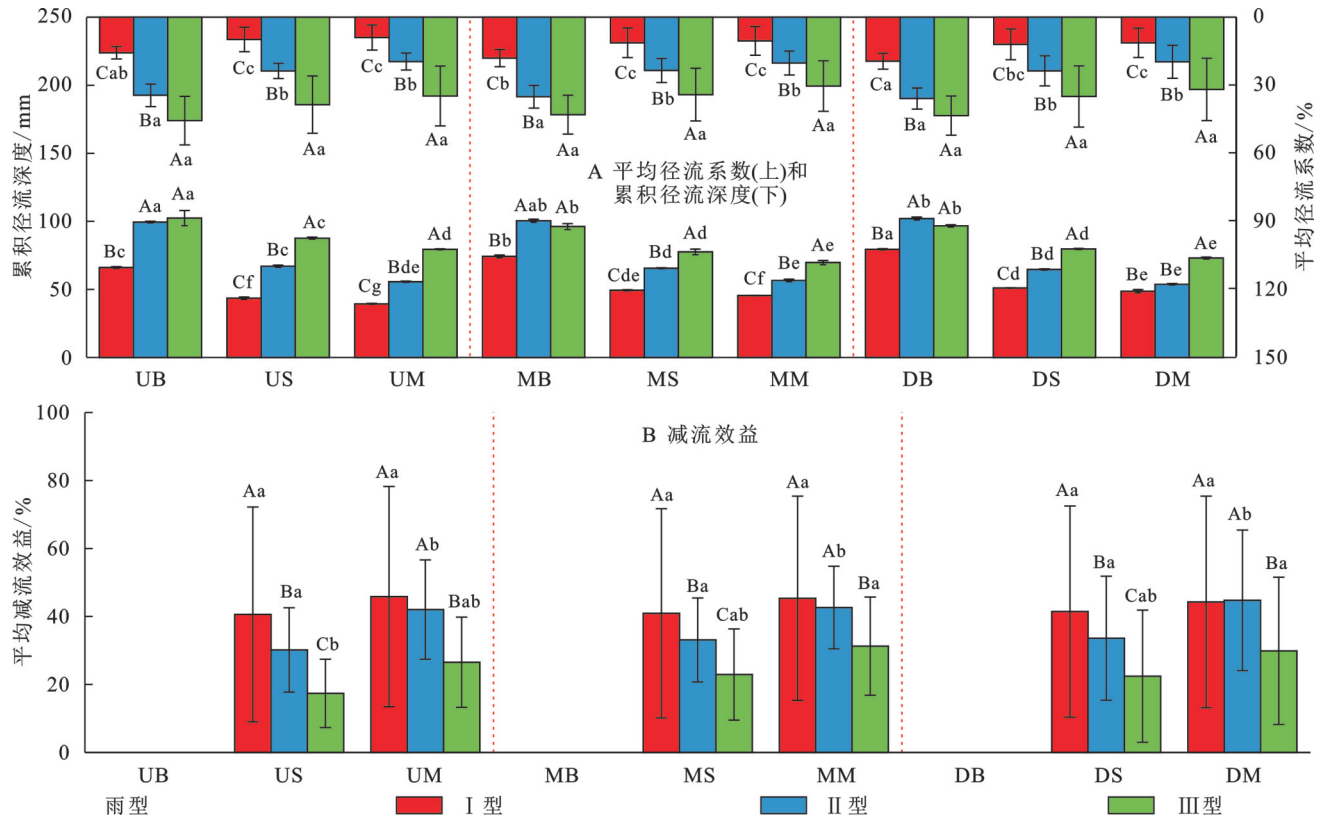
Table 3 Classification of erosive rainfall patterns in study area

雨型	降雨特征	范围	均值	标准偏差	变异系数	总量	频次
I	$P/mm$	10.4~33.6	17.01	5.90	0.35	408.2	24
	$D/h$	4.5~28.5	13.92	8.30	0.60	334.0	
	$I_{30}/(mm \cdot h^{-1})$	2.0~20.4	9.45	4.80	0.51	—	
II	$P/mm$	19.8~49.4	31.62	9.40	0.30	284.6	9
	$D/h$	2.0~22.3	8.53	6.63	0.78	76.8	
	$I_{30}/(mm \cdot h^{-1})$	16.4~44.8	30.44	8.34	0.27	—	
III	$P/mm$	64.2~86.2	73.67	9.24	0.13	221.0	3
	$D/h$	6.5~50.0	23.17	19.16	0.83	69.5.0	
	$I_{30}/(mm \cdot h^{-1})$	9.2~90.8	48.00	33.43	0.70	—	

表 4 研究区各径流小区 2023—2024 年径流泥沙情况  
Table 4 Runoff and sediment yield in each runoff plot of study area (2023—2024)

小区	累积径流深度/mm	径流系数	减流效益/%	单位累积侵蚀量/(t·km <sup>-2</sup> )	减沙效益/%
上坡裸地小区 UB	267.86±0.61b	0.29±0.01b	—	1267.56±11.31c	—
上坡大豆小区 US	198.20±0.75c	0.22±0.01c	27.55±0.23e	624.81±1.3i	51.57±0.08c
上坡玉米小区 UM	174.36±0.43d	0.19±0.01d	37.44±0.19b	536.37±0.81h	55.34±0.07b
中坡裸地小区 MB	270.80±4.40b	0.29±0.00b	—	1808.86±39.42b	—
中坡大豆小区 MS	192.40±2.94c	0.21±0.03c	30.29±0.84d	907.24±11.00f	52.05±0.46c
中坡玉米小区 MM	171.75±2.37d	0.19±0.03d	38.29±0.82b	780.06±3.00g	58.70±0.28a
下坡裸地小区 DB	278.16±2.40a	0.31±0.03a	—	2444.22±25.84a	—
下坡大豆小区 DS	195.26±0.70c	0.21±0.01c	32.59±0.20c	1191.73±1.92d	52.19±0.04c
下坡玉米小区 DM	175.36±0.01d	0.19±0.00d	40.88±0.27a	1024.94±17.02e	59.10±0.59a

注:不同小写字母表示不同小区处理之间存在显著差异( $p < 0.05$ )。



注:不同大写字母表示相同小区在不同雨型下存在显著差异;不同小写字母表示不同小区在特定雨型下存在显著差异( $p < 0.05$ )。

图 4 不同坡面位置下各小区不同雨型累积径流深度和产流系数的差异以及不同雨型下的平均减流效益

Fig. 4 Differences in cumulative runoff depth and runoff coefficient of each plot under different rainfall patterns at different slope positions and average runoff reduction benefits under different rainfall patterns

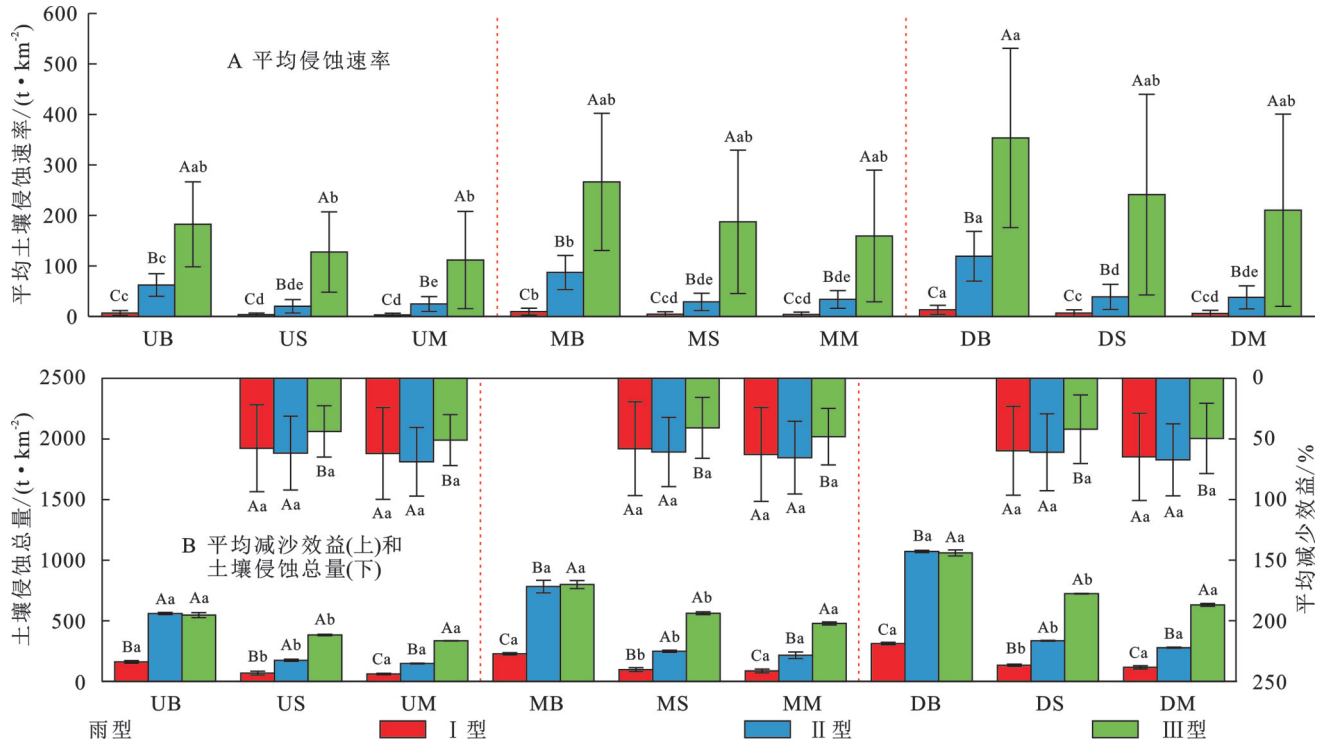
### 2.3 径流泥沙对作物覆盖和降雨的响应

对大豆和玉米的径流泥沙、植被特征和降雨特征进行相关性分析,结果如图 6 所示。大豆和玉米的径流泥沙与除降雨历时外的 5 个降雨特征参数均呈极显著相关( $p < 0.01$ )。其中,降雨侵蚀力与径流和泥沙的相关性最高,与径流的相关系数分别达到 0.95 和 0.96,与泥沙的相关系数则分别为 0.92 和

0.91。此外,植被盖度和株高对作物坡面径流泥沙的减少均存在显著正向影响( $p < 0.01$ ),全生育期内,植被盖度与株高随生长阶段增加,这导致作物小区的径流量和泥沙侵蚀量也随之变化。此外,为了更好地了解径流泥沙对降雨和植被特征的响应,本文对 11 个相关性指数进行了筛选,并通过通径分析建立

了作物径流和泥沙之间的定量关系(图 7)。通径分析结果显示,主导径流产生的直接因素为降雨侵蚀力,路径系数为 0.935,而植被覆盖度和株高主要通过降雨入渗影响径流,其路径系数分别为-0.072 和 -0.026。对于泥沙侵蚀量的路径分析结果表明,径流深度(路径系数为 1.347)是影响泥沙侵蚀量的关键

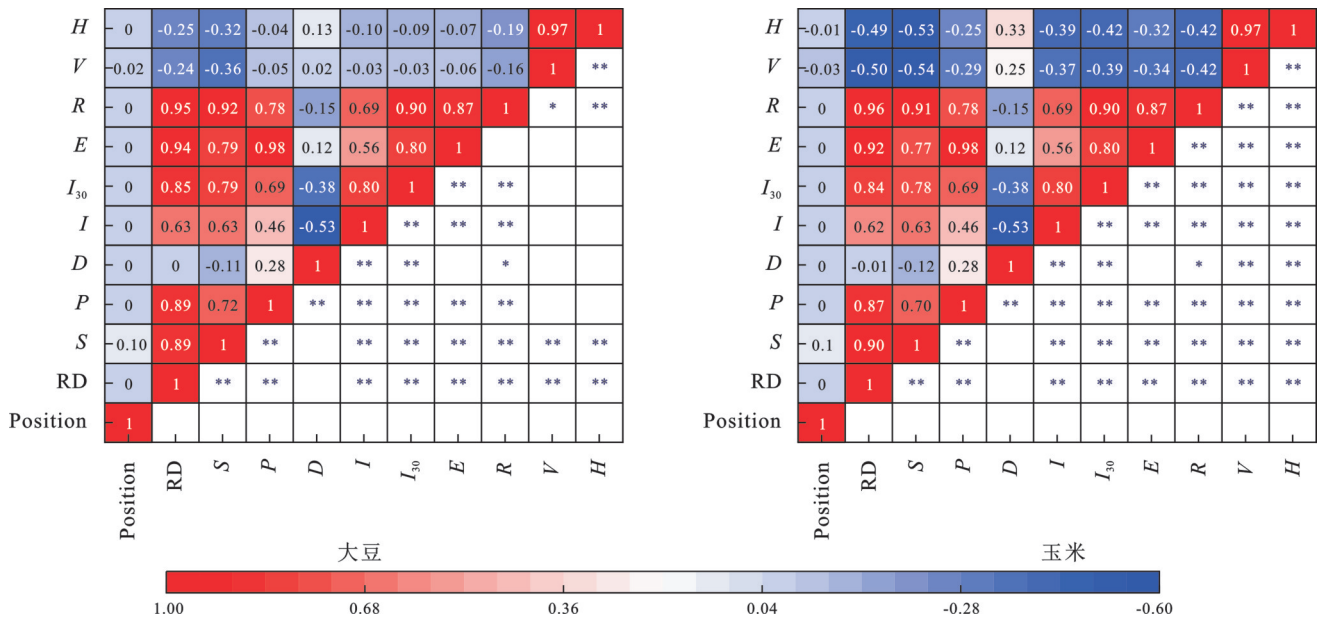
因子,其次是降雨量,路径系数为 0.438,降雨特征因子( $R, P$ )和植被覆盖因子( $V, H$ )主要通过径流间接影响泥沙侵蚀。总体而言,降雨因素和植被因素对径流泥沙的影响是相互关联的:降雨量和降雨侵蚀力能够显著增加径流,进而影响泥沙侵蚀量,而植被覆盖度和株高则显著减少径流。



注:不同大写字母表示相同小区在不同雨型下存在显著差异;不同小写字母表示不同小区在特定雨型下存在显著差异( $p < 0.05$ )。

图 5 不同坡面位置下各小区不同雨型平均土壤侵蚀量的差异以及不同雨型下的土壤侵蚀总量和平均减沙效益

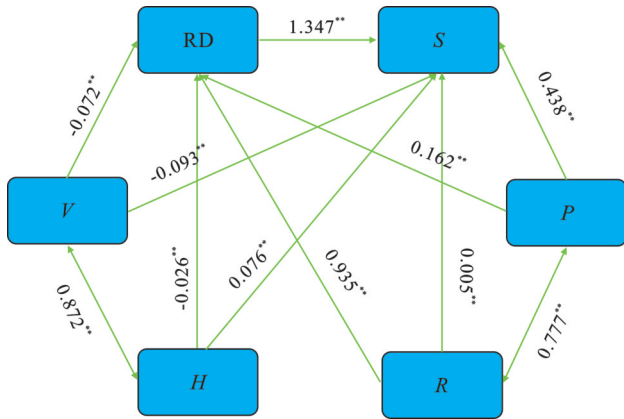
Fig. 5 Differences in average soil erosion amount of each plot under different rainfall patterns at different slope positions and total soil erosion amount and average sediment reduction benefits under different rainfall patterns



注:Position为坡面位置,RD为径流深度,S为泥沙侵蚀量,P为降雨量,I为雨强, $I_{30}$ 为 30 min 最大雨强,E为降雨动能,R为降雨侵蚀力,V为植被覆盖度,H为株高.\*\*表示显著性 $p < 0.01$ ,\*表示显著性 $p < 0.05$ 。

图 6 径流、泥沙、降雨和作物之间的相关关系

Fig. 6 Correlation relationships among runoff, sediment, rainfall, and crop



注:RD为径流深度,S为泥沙侵蚀量,P为降雨量,R为降雨侵蚀力,V为植被覆盖度,H为株高。\*\*表示显著性 $p < 0.01$ ,\*表示显著性 $p < 0.05$ 。

图7 自然降雨下泥沙、径流、作物和降雨特征的路径分析

Fig. 7 Path analysis of sediment, runoff, crop, and rainfall characteristics under natural rainfall conditions

### 3 讨论

本研究结果表明,降雨类型对水土流失存在显著影响。在所有类型的侵蚀性降雨中,尽管I型降雨的发生频率最高且累积降雨量最大,其所导致的土壤侵蚀程度却最轻。与此相反,虽然III型降雨仅由3次降雨事件组成,其单次降雨量和30分钟最大雨强( $I_{30}$ )均为最高(表2),导致土壤流失速率和土壤流失量也达到了最大值(图5)。此外,尽管II型和III型降雨的累积径流深度相近,但II型降雨下的土壤侵蚀量明显低于III型降雨。这一结果表明,不同降雨类型是导致水土流失差异的重要因素<sup>[4]</sup>。在本试验研究区域,6—8月降雨频繁(表2和图3),导致该地区在雨季保持了较高的土壤湿度,进而影响了土壤的入渗性能。因此,在大中雨,特别是6—8月的III型暴雨侵蚀作用下,更容易产生径流,从而导致更严重的水土流失现象<sup>[18]</sup>。除了降雨类型之外,小区之间的差异主要归因于覆盖度、作物种类、下垫面粗糙度等与植被特性相关的因素<sup>[19]</sup>,本研究的结果也证明了这一观点(图6和图7)。大豆和玉米在生长过程中,植被盖度和株高发生了显著差异和变化(图2),作物地上部分对降雨能量和土壤穿透性的耗散作用也随之改变<sup>[20]</sup>,而作物的这种变化直接影响其调节径流和泥沙的能力。研究发现,玉米对径流和泥沙的抑制作用均高于大豆,这与部分学者在黄土高原的研究结果一致<sup>[21-22]</sup>,而这一结果产生的原因与两种作物间地上植被特性的差异密不可分。

在不同坡面位置,全生育期内大豆和玉米在控制产流和土壤侵蚀方面的作用存在一定差异。在相同降雨和作物条件下,土壤物理性质的空间变异性是影

响水分入渗和坡面径流的重要因素<sup>[23]</sup>。坡面侵蚀沉积导致了不同坡位土壤容重与孔隙结构的差异,从而影响土壤的入渗能力。如表1所示,下坡的土壤容重最高( $1.39 \text{ g/cm}^3$ )、总孔隙度最低(47.91%),毛管孔隙连通性较差;而上坡的容重最小( $1.27 \text{ g/cm}^3$ )、孔隙度较高(48.38%)。这种入渗能力的差异导致下坡小区的径流系数显著高于上坡(表4)。此外,土壤机械组成与平均重量直径(Mean Weight Diameter, MWD)直接影响产沙过程。上坡的黏粒含量最高(18.71%),MWD达到1.54 mm,团聚体大且分散性小,抗侵蚀性显著高于中下坡位;而中坡和下坡黏粒含量和MWD较低,导致团聚体易被径流分散(表1)。在入渗能力较差的中下坡面,侵蚀性降雨产生的地表径流极大增加了土壤侵蚀风险<sup>[24-25]</sup>,使得下坡的土壤侵蚀量( $2\,444.22 \text{ t/km}^2$ )是上坡( $1\,267.56 \text{ t/km}^2$ )的1.93倍(表4)。这一结果表明,对不同坡位进行研究在黑土缓坡耕地土壤侵蚀中具有重要意义。

雨型决定了一系列降雨特性,如降雨量、雨强、30分钟最大降雨强度、降雨历时、降雨能量和降雨侵蚀力,并通过结合某些作物特性(如植被盖度和株高)进一步影响径流和土壤侵蚀<sup>[7]</sup>。研究结果表明,裸地与大豆和玉米的径流和土壤侵蚀与降雨特性及植物特性之间存在不同程度的相关性。在这些特性中,降雨量和降雨侵蚀力对径流和泥沙的影响最大,而30 min降雨强度与径流及泥沙呈显著正相关关系(图6)。这一结果与之前的研究一致,证实了降雨量和雨强的共同效应对水土流失至关重要<sup>[14]</sup>。在本研究中,大多数降雨事件(66.7%)属于雨型I,其特点为较低的降雨强度和降雨量,因此对产流和土壤流失的影响有限<sup>[26]</sup>,只有当降雨强度超过土壤入渗速率时,高强度和高能量的降雨才会对产流和土壤侵蚀产生显著影响。这一结果强调了不同类型降雨与土壤和植被特性之间的相互作用,在黑土缓坡耕地侵蚀防治中应充分考虑它们的综合影响。

### 4 结论

本研究通过36个侵蚀性降雨事件下的18个径流小区探讨了东北黑土区自然降雨不同雨型下缓坡耕地不同坡面位置作物覆盖对土壤侵蚀的影响,结果表明:

(1) 降雨类型对水土流失的影响显著。在侵蚀性降雨中,雨型I最频繁且累积降雨量最大,但土壤侵蚀有限;雨型III尽管发生次数少,但降雨强度( $I_{30}$ )和单次降雨量最大,导致的土壤侵蚀量最高。

(2) 不同坡面位置径流深度和泥沙侵蚀量差异

显著,在不同坡位呈现下坡>中坡>上坡。坡面位置导致的土壤性质变化是径流深度和泥沙变化的重要影响因素,尤其在雨型Ⅱ和Ⅲ中表现更明显,不同坡位侵蚀敏感性表现为下坡>中坡>上坡。

(3) 作物特性对水土流失调控至关重要,作物盖度和株高对土壤侵蚀具有重要调节作用。研究表明,玉米在抑制径流和泥沙方面均优于大豆,且其防护作用随生育期显著变化,植被盖度和株高越大,对径流和侵蚀的抑制作用越明显。本研究结果可为黑土区缓坡耕地的作物配置及农田水土保持技术措施优化提供一定的科学依据。

#### 参考文献(References):

- [1] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2017,8(1):2013.
- [2] 史志华,王玲,刘前进,等.土壤侵蚀:从综合治理到生态调控[J].中国科学院院刊,2018,33(2):198-205.  
Shi Z H, Wang L, Liu Q J, et al. Soil erosion: From comprehensive control to ecological regulation[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018,33(2):198-205.
- [3] Meng X M, Zhu Y, Yin M S, et al. The impact of land use and rainfall patterns on the soil loss of the hillslope [J]. *Scientific Reports*, 2021,11:16341.
- [4] Liang Y, Jiao J Y, Tang B Z, et al. Response of runoff and soil erosion to erosive rainstorm events and vegetation restoration on abandoned slope farmland in the Loess Plateau region, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 584:124694.
- [5] Dan C X, Liu G, Zhao Y G, et al. The effects of typical grass cover combined with biocrusts on slope hydrology and soil erosion during rainstorms on the Loess Plateau of China: An experimental study [J]. *Hydrological Processes*, 2023,37(1):e14794.
- [6] Hu Y T, Zhang F, Luo Z Z, et al. Soil and water conservation effects of different types of vegetation cover on runoff and erosion driven by climate and underlying surface conditions [J]. *Catena*, 2023,231:107347.
- [7] Yan Y, Jiang Y Y, Guo M M, et al. Effects of grain-forage crop type and natural rainfall regime on sloped runoff and soil erosion in the Mollisols region of Northeast China [J]. *Catena*, 2023,222:106888.
- [8] 张哲,方政,董智,等.鲁中南山区侵蚀性降雨及典型作物对坡面产流产沙影响研究[J].西南大学学报:自然科学版,2024,46(1):69-76.  
Zhang Z, Fang Z, Dong Z, et al. Effects of erosive rainfall and typical crops on slope runoff and sediment yield in mountainous area of central-south of Shandong Province [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2024,46(1):69-76.
- [9] 韦美敬,黄艳荟,杨浩宇,等.不同坡度下蔗地土壤侵蚀及氮素流失对雨型和甘蔗生育期的响应[J].水土保持研究,2024,31(5):35-44.  
Wei M J, Huang Y H, Yang H Y, et al. Response of soil erosion and nitrogen loss to rainfall pattern and sugarcane growth period at different slopes [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(5):35-44.
- [10] 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 north-eastern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(1):96-106.
- [11] 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.
- [12] 郑粉莉,张加琼,刘刚,等.东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点[J].水土保持通报,2019,39(4):314-319.  
Zheng F L, Zhang J Q, Liu G, et al. Characteristics of soil erosion on sloping farmlands and key fields for studying compound soil erosion caused by multi-forces in mollisol region of Northeast China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019,39(4):314-319.
- [13] 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.
- [14] 赵娅君,吴发启,徐宁,等.不同雨强下各生育期玉米坡耕地的侵蚀产沙研究[J].水土保持通报,2020,40(6):23-28,35.  
Zhao Y J, Wu F Q, Xu N, et al. Runoff and sediment yield of corn plots in different growth stages under different rainfall intensities [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(6):23-28,35.
- [15] 姜义亮.黑土区坡耕地土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.  
Jiang Y L. Effect of soil erosion on soil organic carbon loss in sloping farmlands of Chinese Mollisol Region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [16] 随金明,宋乃平,薛毅,等.基于照相法的荒漠草原植被覆盖度测定方法[J].中国草地学报,2019,41(2):58-64.  
Sui J M, Song N P, Xue Y, et al. The method of extracting vegetation coverage in the desert steppe based on photographic [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2019,41(2):58-64.