DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.019
丁贵惠,任忠政,胡伟,等.侵蚀性降雨对黑土坡耕地土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):47-56.
DING Guihui, REN Zhongzheng, HU Wei, et al. Effects of erosive rainfall on soil erosion characteristics of black sloping farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(2):47-56.

侵蚀性降雨对黑土坡耕地土壤侵蚀特征的影响

丁贵惠[1],任忠政[1],胡 伟[2],陈 渊[2],张兴义[1,2]
(1.东北农业大学资源与环境学院,哈尔滨 150030;
2.中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土地保护与利用全国重点实验室,哈尔滨 150081)

摘 要:[目的] 降雨是黑土坡耕地水力侵蚀的动力来源,研究天然降雨条件下坡耕地土壤侵蚀特征对水土流失防治具有重要意义。**[方法]**基于黑龙江省海伦市光荣小流域 2021—2022 年不同坡度(3°,5°和 7°)顺坡垄作径流小区观测的 43 场次侵蚀性降雨事件,采用 K-Mean 聚类法对比分析不同雨型和坡度下径流与输沙特征,并探讨影响坡耕地径流与输沙的影响因素。**[结果]**研究区以短历时、大雨强、小雨量的降雨(雨型 3)为主,其次是中等历时、中等雨强、中等雨量的降雨(雨型 2),长历时、小雨强、大雨量的降雨(雨型 1)极少发生。相同雨型下,累积径流深和输沙量均随坡度的增加而增大。相同坡度下,不同雨型对累积径流深响应不同,累积输沙量整体表现为雨型 3 贡献最高(50.90%~57.90%),雨型 2 次之(37.60%~44.10%),雨型 1 最低。雨型 2 事件降雨侵蚀力和坡度对径流深产生直接影响,径流深和坡度对输沙量产生直接影响。雨型 3 事件降雨侵蚀力通过直接和间接作用影响径流深,进而影响输沙量。**[结论]**对所有雨型事件,降雨侵蚀力和坡度是影响坡耕地径流深的主控因子,径流深和坡度是影响坡耕地输沙量的主控因子。

关键词: 雨型;坡度;黑土;坡耕地;土壤侵蚀
中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242-(2024)02-0047-10

Effects of Erosive Rainfall on Soil Erosion Characteristics of Black Sloping Farmland

DING Guihui[1], REN Zhongzheng[1], HU Wei[2], CHEN Yuan[2], ZHANG Xingyi[1,2]
(1.*School of Resources and Environment*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*;
2. *State Key Laboratory of Black Soils Conservation and Utilization*, *Northeast Institute of Geography and Agroecology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Harbin* 150081, *China*)

Abstract: [**Objective**] Rainfall is the driving force of hydraulic erosion in black soil sloping farmland. It is of great significance to study soil erosion characteristics under natural rainfall conditions for soil erosion control. [**Methods**] Based on 43 erosive rainfall events observed at different ridge-row runoff plots (3°, 5° and 7°) along the slope in Guangrong Small Watershed, Hailun City, Heilongjiang Province during 2021—2022, K-Mean clustering method was used to compare the characteristics of runoff and sediment transport under different rain patterns and slopes, and the influencing factors on runoff and sediment transport were discussed. [**Results**] The rainfall of short duration, heavy rain and light rainfall (rain type 3) is the main one, followed by the rainfall of medium duration, medium rain intensity and medium rainfall (rain type 2), and the rainfall of long duration, light rain intensity and heavy rainfall (rain type 1) rarely occurs. Under the same rain pattern, the cumulative runoff depth and sediment transport increased with the increase of slope. Under the same slope, different rainfall types have different responses to cumulative runoff depth. Overall, rainfall type 3 has the highest contribution (50.90%~57.90%), rainfall type 2 has the second contribution (37.60%~44.10%), and rainfall type 1 has the lowest. In the event of rain type 2, rainfall erosivity and slope have direct influence on runoff depth, and runoff depth and slope have direct influence on sediment

收稿日期:2023-08-19 **修回日期:**2023-10-05 **录用日期:**2023-11-10 **网络首发日期(**www.cnki.net**):**2024-01-25
资助项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1500800);国家自然科学基金项目(41701313)
第一作者:丁贵惠(1997—),女,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: S210201007@neau.edu.cn
通信作者:张兴义(1966—),男,博士,研究员,主要从事黑土侵蚀研究。E-mail: zhangxy@iga.ac.cn

transport. In the event of rain type 3, rainfall erosivity affects runoff depth and then sediment transport through direct and indirect effects. [**Conclusion**] For all rainfall-type events, rainfall erosivity and slope are the main controlling factors affecting the runoff depth, and the runoff depth and slope are the main controlling factors affecting the sediment transport.

Keywords: rain pattern; slope; black earth; sloping land; soil erosion

Received: 2023-08-19 **Revised**: 2023-10-05 **Accepted**: 2023-11-10 **Online**(www.cnki.net): 2024-01-25

土壤侵蚀作为世界性的环境问题,是导致土地退化的直接原因[1]。降雨是影响土壤侵蚀最根本的动力来源[2]。天然降雨条件下,次降雨过程中降雨强度随降雨历时不断变化,形成不同的降雨类型[3-4]。现有研究多采用野外径流小区监测的方法研究不同降雨类型与土壤侵蚀的关系,Wei 等[3]和马星等[5]在黄土高原地区和紫色土区的研究结果表明,高强度和短历时的降雨事件是造成当地土壤侵蚀的主要雨型;秦伟等[6]和陈磊等[7]在南方红壤区和喀斯特地区的研究结果表明,短历时、大雨强、小雨量的雨型对土壤侵蚀贡献最大;而邬铃莉等[8]在北方土石山区的研究结果发现,长历时、大雨量和中雨强的雨型对土壤侵蚀的贡献最大。因此,在不同地区影响土壤侵蚀过程的主要雨型存在较大差异。除降雨外,地形因素也是影响坡面土壤侵蚀重要的因素,其中坡度主要通过影响土壤入渗、径流流速和土壤稳定性等方面影响土壤产流和输沙[9-10]。在黄土高原[11]和紫色土区[12]的研究结果显示,坡面径流和输沙量随坡度的增加呈先增加后减少的趋势,存在临界坡度。而在黑土坡耕地的研究[13-14]结果却发现,径流和侵蚀量均随坡度的增加而增大。由此可见,坡度对土壤侵蚀过程具有显著影响,但其定量关系存在区域差异性。

东北黑土区是我国重要的粮食生产基地,近年来土壤侵蚀日益加重[15-16]。有研究[17]指出,黑土坡耕地年平均变薄速率为 2～3 mm。据《中国水土保持公报(2021 年)》[18]显示,东北黑土区水土流失面积达 21.41 万 km^2,其中水力侵蚀面积占水土流失总面积的 63.71%。该区年平均降水量为 500～600 mm,且近 80%的降水集中在夏季[17]。地形主要为山前波状起伏台地或漫川漫岗地,坡长且缓[19],加之该区农田管理措施多以顺坡垄作为主,形成的"垄—沟"系统,促使坡面汇流更加集中,加快土壤侵蚀的发生[20]。研究[17]已证实,独特的降雨类型和地形特征是东北黑土区土壤侵蚀过程的主要驱动因素。然而,目前关于雨型对黑土坡耕地土壤侵蚀的研究多基于模拟降雨试验[21],室内模拟试验并不能完全揭示自然降雨的真实规律,相关研究有待进一步加强。因此,本研究基于典型黑土区光荣小流域不同坡度径流小区 2021—2022 年的次降雨观测资料,划分确定造成土壤侵蚀的主要降雨类型,分析黑土区坡耕地径流和输沙规律,探究影响不同降雨类型事件中坡耕地径流和输沙的关键因素,以期为典型黑土区水土流失的防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区布设在中国科学院海伦黑土水土保持监测研究站(47°21′16.95″N,126°49′56.43″E),位于黑龙江省海伦市前进乡光荣村。该区属寒温带大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨。该区年平均降水量为 500～600 mm[22],降雨主要分布在 6—8 月,占全年降雨量的 65%以上,多年平均气温为 1.5 ℃,年平均日照时间为 2 600～2 800 h,年平均总辐射为 113 MJ/cm^2,全年有效积温(≥10 ℃))为 2 450 ℃。地形为典型的漫川漫岗,坡度介于 3°～8°,海拔约 210 m。土壤类型为典型黑土,土壤分层明显,黑土层厚度约为 30 cm,有机质含量为 42.1 g/kg,0—20 cm 土层的黏粒、砂粒和粉粒含量分别为 37.60%,31.60%和30.80%。作物类型主要以玉米和大豆轮作为主,耕作方式以顺坡垄作为主。

1.2 试验设计与方法

本研究在黑土坡耕地上布设 20.0 m×4.5 m 的顺坡垄作径流小区。由于东北典型黑土区坡长且缓的地形特点,3°是研究区坡耕地的代表性坡度[19],5°是坡耕地发生严重侵蚀的代表性坡度,7°是坡耕地发生极端侵蚀的代表性坡度(中国科学院东北地理与农业生态研究所资料)。因此,本研究设置 3°,5°和 7°坡度处理,其中 5°和 7°小区设置 3 组重复,3°因场地原因未设置重复。小区实行玉米大豆轮作。

为明确降雨特征对黑土坡耕地土壤侵蚀过程的影响,本研究系统观测 2021—2022 年雨季(6—9 月)的次降雨事件。降雨量使用 FDY 系列翻斗式雨量传感器观测,通过 RainRecord 1.06 软件包计算获取次降雨过程、次降雨量(P)、降雨历时(D)、30 min 内最大降雨强度(I_{30})、平均雨强(I)、次降雨侵蚀力(R)等降雨特征参数。次降雨过程中,径流和泥沙过程的实时监测使用中国科学院东北地理与农业生态研究所自主研发的无动力水土流失过程自动监测装置(XYZ－III),径流收集为翻斗式[23],自动取样瓶体积

为 1 L。次降雨结束后，使用 HOBO 数据记录仪导出径流过程数据。将取样瓶中的径流泥沙带回室内在 105 ℃下烘干称重，计算泥沙浓度和输沙量。次降雨结束后更换新的取样瓶便于下次观测。雨前土壤含水量(θ)采用 TDR－300 测定，测量深度为 20 cm，作物盖度(v_c)采用大疆精灵 3 无人机进行拍照，垂直高度 4 m，测量时间为每年 5 月 1 日至 9 月 30 日，测量间隔为 15 天。

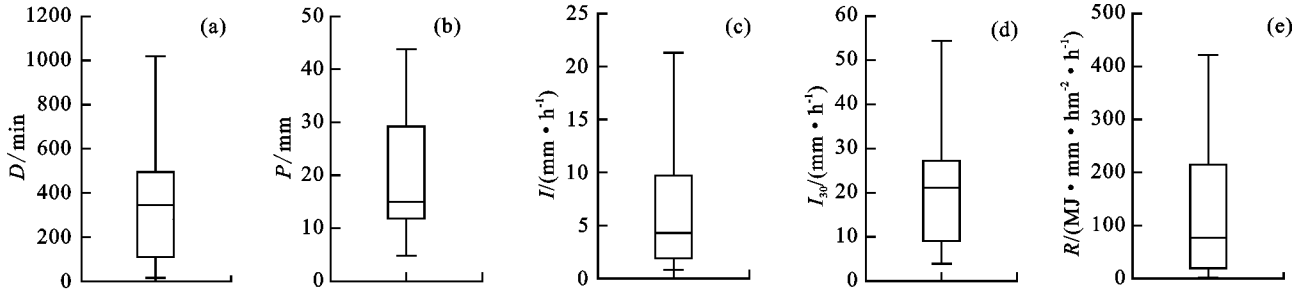
1.3　数据处理与分析

本文使用 IBM SPSS Statistics 20 软件进行描述性统计分析，对侵蚀性降雨观测资料进行 K－Mean 聚类分析；采用逐步回归分析构建径流和输沙与各影响因素间的最佳数学关系；采用通径分析，探究影响不同雨型径流和输沙的主导因素；使用 OriginPro 2021 软件绘制相关图件。

2　结果与分析

2.1　侵蚀性降雨特征

观测期内，2021 年和 2022 年降雨量分别为 764.90，552.60 mm，共发生 157 场次降雨，主要集中在 6—8 月(76.70%)，其中有 43 场次侵蚀性降雨事件，占总降雨次数的 27.40%。D 为 15～3 085 min，P 为 4.80～72.60 mm，I 为 0.80～36.80 mm/h，I_{30} 为 3.93～72.10 mm/h，R 为 1.81～1 159.00 (MJ・mm)/(hm²・h)(图 1)。



注：长方形式箱体表示上下四分位数 25%～75%；上下须线表示 1.5IQR 内得范围；—横线表示中位数。

图 1　43 场次侵蚀性降雨指标

Fig. 1　Erosion rainfall index of 43 events

根据 P、D 和 I_{30} 3 个降雨特征参数，采用 K－Mean 聚类法将 43 场次侵蚀性降雨事件划分为 3 种降雨类型，方差分析结果表明，各雨型的降雨特征参数在存在显著差异($p<0.001$)(表 1)。

表 1　基于 K－Mean 聚类的不同降雨类型的统计特征

Table 1　Statistical features of different rainfall patterns based on K－Mean cluster

雨型	项目	P	D	I	R	I_{30}
1	平均值	55.85	2 640	1.25	190.64	15.31
	标准差					
	变异系数					
	总和	111.70	5 280	381.27		
	频次			2		
2	平均值	27.12	575.53	2.96	190.64	22.93
	标准差	15.53	198.24	2.01	272.37	16.72
	变异系数	0.58	0.34	0.68	1.43	0.73
	总和	515.30	10 938		3 622.19	
	频次			19		
3	平均值	14.47	121.44	10.80	113.99	21.60
	标准差	9.60	91.99	8.41	152.73	14.74
	变异系数	0.66	0.75	0.78	1.34	0.68
	总和	318.40	2 665		2 507.76	
	频次			22		

注：P 为降水量(mm)；D 为降雨历时(min)；I 为平均雨强(mm/h)；R 为降雨侵蚀力[MJ/(mm・hm²・h)]；I_{30} 为 30 min 内最大降雨强度(mm/h)。

其中，雨型 1 为大雨量、长历时、小雨强的偶发性暴雨事件(仅发生 2 次)；雨型 2 为中等雨量、中等历时、中等雨强的降雨事件；雨型 3 为该区主要的降雨类型，共计发生 22 次，占总量的 51%，表现为短历时、小雨量、大雨强的降雨事件。统计结果显示，雨型 2 和雨型 3 的 I_{30} 接近，为雨型 1 的 1.50 倍，雨型 1 和雨型 2 的 R 相同，为雨型 3 的 1.70 倍。

2.2　坡耕地次降雨土壤侵蚀特征

2.2.1　*径流与输沙特征*　不同坡度间次降雨平均径流深存在显著差异($p<0.05$)，当坡度从 3°增加到 5°和 7°时，平均径流深分别增加 1.21，1.67 倍。不同雨型间次降雨平均径流深存在显著差异($p<0.05$)，雨型 1 的平均径流深分别是雨型 2 和雨型 3 的 2.95，4.07倍。不同坡度下次降雨平均输沙量存在显著差异($p<0.05$)。当坡度从 3°和 5°增加到 7°时，平均径流深分别增加 16.09，3.19 倍。不同雨型间次降雨平均输沙量差异不显著($p>0.05$)(图 2)。

相同坡度下，累积径流深对雨型的响应不同，而累积输沙量对雨型的响应相同(图 3)。不同雨型对坡面累积径流深的贡献不同。当坡度为 3 时，雨型 3 对径流深的贡献最大(56.30%)，其次为雨型 2 (42.20%)和雨型 1(1.50%)。而当坡度为 5°和 7°时，雨型 2 对径流深的贡献最大(46.90%和 47.40%)，其

次为雨型 3(34.00%和 37.80%),雨型 1 贡献最小(19.10%和 14.80%)。相同坡度下,不同雨型对坡面累积输沙量的贡献相同,雨型 3 对输沙量贡献最大(50.90%～57.90%),其次为雨型 2(37.60%～44.10%),雨型 1 贡献最小(0.70%～10.70%)。相同雨型下,累积径流深和累积输沙量对坡度的响应相同。随着坡度的增加,径流深增加 0.50～34.30 倍,输沙量增加 3.00～155.00 倍。

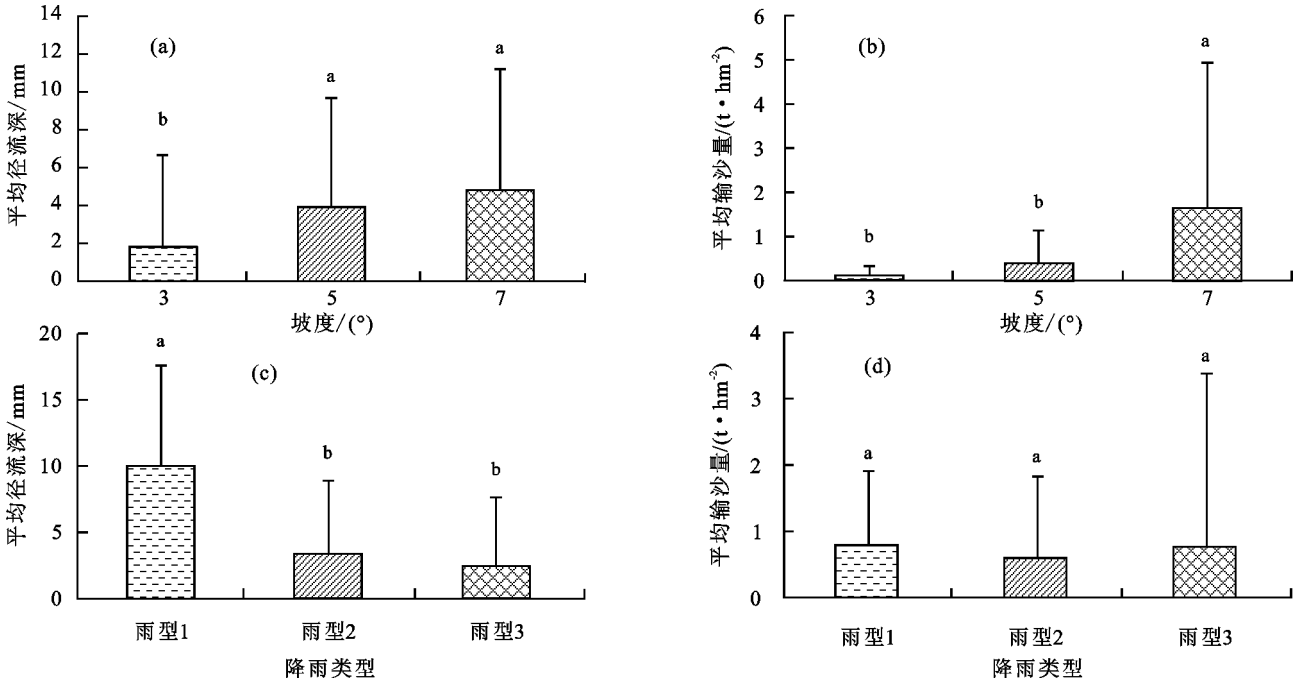


图 2 不同降雨事件平均产流产沙特征

Fig. 2 Average sediment yield characteristics of different rainfall events

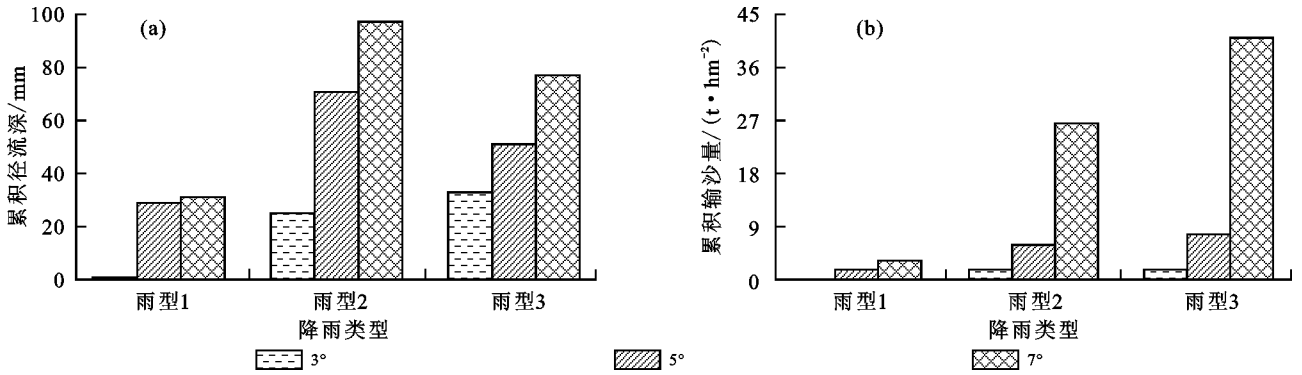


图 3 不同降雨事件累积产流产沙特征

Fig. 3 Characteristics of cumulative sediment yield and loss from different rainfall events

2.2.2 径流与输沙过程 选择具有代表性的降雨事件分析不同雨型下的产流产沙过程(图 4)。

雨型 1 选取 2021 年 8 月 21 日 2:40 至 8 月 23 日 3:05 的次降雨,D 为 3 085 min,P 为 72.60 mm。降雨量在 8 月 21 日出现 3 个峰值,第 1 个峰值出现在 10:40,瞬时雨量和雨强为 8.30 mm 和 99.60 mm/h;第 2 个峰值出现在 15:45,瞬时雨量和雨强为 2.50 mm 和 30 mm/h;第 3 个峰值出现在 19:10,瞬时雨量和雨强为 2.00 mm 和 24 mm/h。3°小区产流记录在 8 月 21 日 10:40,历时 565 min,在当日 19:20 出现 1 个峰值,滞后降雨第 3 个峰值 10 min,瞬时径流深为 0.16 mm,输沙量为 0.006 t/hm^2;5°小区产流记录在 8 月 21 日 10:40,历时 565 min,在当日 19:15 出现 1 个峰值,滞后降雨第 3 个峰值 5 min,瞬时径流深为 1.03 mm,输沙量为 0.04 t/hm^2;7°小区产流记录发生在 8 月 21 日 10:40,历时 2 415 min,径流和输沙峰值与降雨峰值同步,第 1 个峰值时的径流深为 1.03 mm,输沙量为 0.26 t/hm^2;第 2 个峰值时的径流深为 0.93 mm,输沙量为 0.18 t/hm^2;第 3 个峰值时的径流深为 0.98 mm,输沙量为 0.17 t/hm^2。

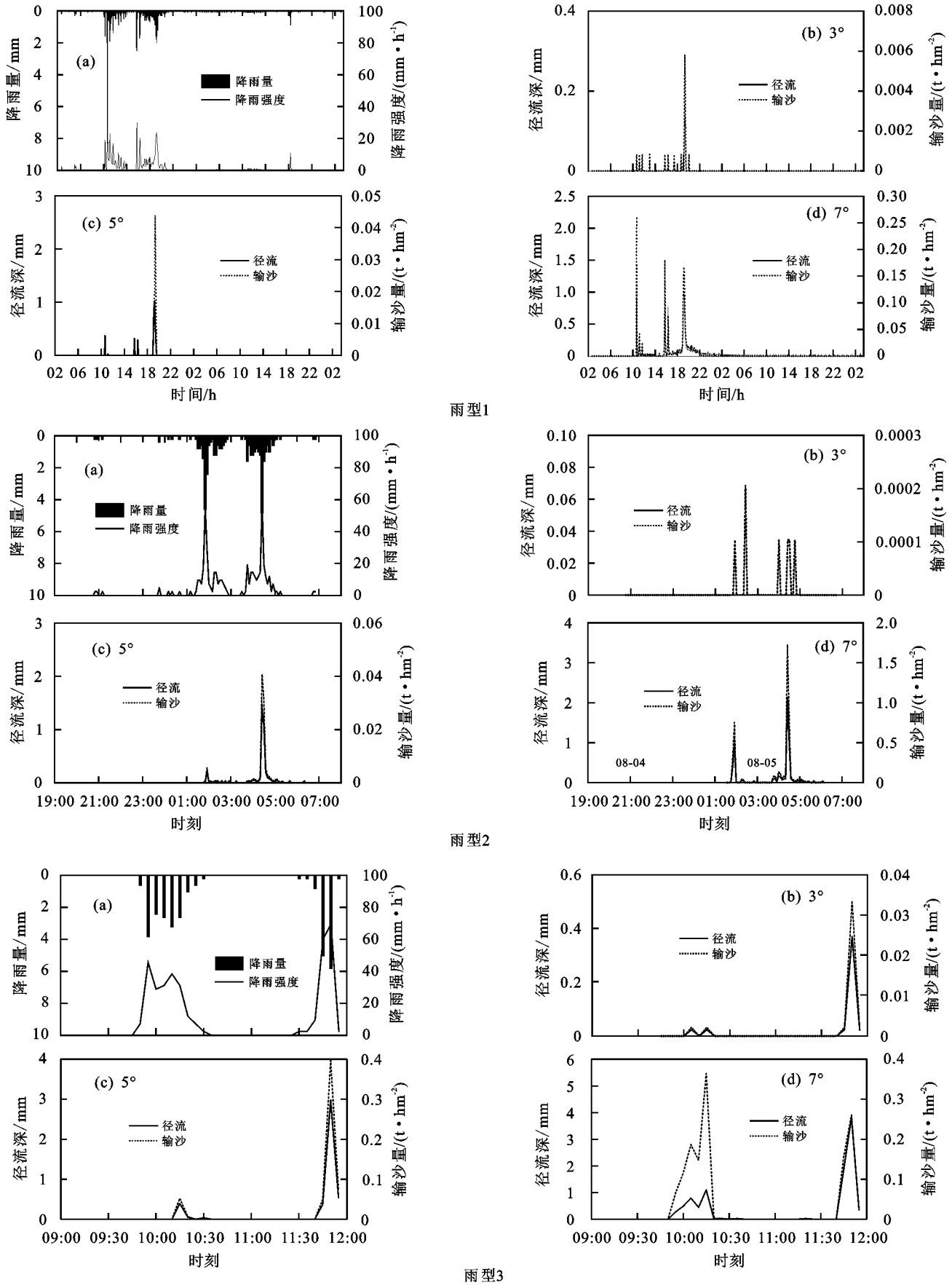


图 4　次降雨条件下不同处理坡面产流输沙特征

Fig. 4　Runoff and sediment yield processes during rainfall event

雨型2选取2022年8月4日20:45至8月5日6:50的次降雨，D为605 min，P为39.40 mm。降雨量在8月5日出现2次峰值，第1个峰值出现1:50，瞬时雨量和雨强为4.60 mm和55.2 mm/h；第2个峰值出现在4:25，瞬时雨量和雨强为4.80 mm和57.60 mm/h。3°小区产流记录出现在8月5日1:55，历时170 min，在当日2:25出现1次峰值，滞后降雨第1个峰值35 min，瞬时径流深为0.05 mm，输沙量为0.000 21 t/hm^2。5°小区产流记录出现在8月5日1:50，历时270 min，在当日1:55出现第1个峰值，滞后降雨第1个峰值5 min，瞬时径流深为0.20 mm，输沙量为0.006 t/hm^2，在当日4:25出现第2个峰值，同降雨第2个峰值同步，瞬时径流深为1.41 mm，输沙量为0.04 t/hm^2。7°小区产流记录出现在8月5日1:50，历时255 min，在当日1:55出现第1个峰值，滞后降雨第1个峰值5 min，瞬时径流深为0.93 mm，输沙量为0.75 t/hm^2，在当日4:25出现第2个峰值，同降雨第2个峰值同步，瞬时径流深为2.15 mm，输沙量为1.73 t/hm^2。

雨型3选取2022年7月2的9:45—11:55的次降雨，D为130 min，P为29.20 mm。降雨量2个峰值，第1个峰值出现在9:55，瞬时雨量和雨强为3.80 mm和45.60 mm/h；第2个峰值出现在11:50，瞬时雨量和雨强为5.80 mm和69.60 mm/h。

3°小区产流记录出现在10:05，历时110 min，在当日11:50出现1次峰值，与降雨第2个峰值同步，瞬时径流深为0.37 mm，输沙量为0.03 t/hm^2。5°小区产流记录出现在10:15，历时100 min，在当日10:20出现第1次峰值，滞后降雨第1个峰值25 min，瞬时径流深为0.05 mm，输沙量为0.01 t/hm^2。在当日11:50出现第2次峰值，同降雨第2个峰值同步，瞬时径流深为2.97 mm，输沙量为0.40 t/hm^2。7°小区产流记录出现在9:55，历时120 min，在当日10:15出现第1次峰值，滞后降雨第1个峰值20 min，瞬时径流深为1.10 mm，输沙量为0.36 t/hm^2。在当日11:50出现第2次峰值，同降雨第2个峰值同步，瞬时径流深为3.83 mm，输沙量为0.26 t/hm^2。

2.3 影响因素分析

将径流深和输沙量作为因变量，坡度、D、P、I、I_{30}、R、作物盖度、雨前土壤含水量和径流深等影响因素作为自变量建立逐步回归方程(表2)。所有雨型的径流回归方程包括R、坡度、D、雨前土壤含水量4个因素。雨型2的径流回归方程包括R和坡度2个因素，雨型3径流回归方程包括R、I、I_{30}、坡度和D这5个因素。所有雨型的输沙回归方程包括径流深和坡度2个因素。雨型2的输沙回归方程包括径流深和坡度2个因素，雨型3的输沙回归方程包括径流深和雨前含水量2个因素。

表2 小区产流产沙逐步回归模型

Table 2 Stepwise regression model of runoff and sediment of slope farmland

雨型	因变量	逐步回归方程	R^2	p	n
雨型2	径流深	$y=-4.494+0.016x_6+0.955x_1$	0.71	<0.001	57
	输沙量	$y=-0.868+0.145x_9+0.194x_1$	0.58	<0.01	57
雨型3	径流深	$y=3.098+0.053x_6-0.326x_4-0.202x_5+0.505x_1-0.011x_2$	0.81	<0.05	66
	输沙量	$y=3.551+0.297x_9-0.019x_8$	0.41	<0.05	66
所有雨型	径流深	$y=-13.387+0.019x_6+1.253x_1+0.002x_2+0.173x_8$	0.61	<0.01	129
	输沙量	$y=-1.082+0.188x_9+0.234x_1$	0.35	<0.05	129

注：x_1为坡度；x_2为降雨历时；x_3为降雨量；x_4为平均雨强；x_5为I_{30}；x_6为降雨侵蚀力；x_7为植被盖度；x_8为雨前土壤含水量；x_9为径流深。下同。

2.3.1 影响径流的因素 不同雨型下的径流深对各因素的响应见表3。对于所有雨型，各影响因素的直接通径系数大小依次为R、坡度、D和雨前土壤含水量；雨前土壤含水量通过坡度(−0.20)和R(−0.16)的间接效应大于直接效应(0.21)，因此雨前含水量对坡面径流表现为抑制作用。对于雨型2，各影响因素的直接通径系数大小依次为R和坡度，均表现为正效应。对于雨型3，各影响因素的直接通径系数依次为R、I_{30}、I、坡度和D。I_{30}、I和D的直接通径系数为负值，但I_{30}和I通过以R为主要途径的间接正效应为主，且I_{30}通过R的间接正效应(1.44)远大于I_{30}的直接通经系数(−0.57)，I的直接效应和间接效应相差不大，而D通过I的间接正效应(0.31)远大于其直接效应(−0.20)。因此，在雨型3中，R、I_{30}、I和D之间存在较强的相互作用，且I和I_{30}均通过R产生间接正效应影响坡面径流。雨型3是短历时、高强度的暴雨事件，在I_{30}和I的间接正效应与R的直接效应叠加情况下，使R与径流深的相关系数较大。综上所述，R是影响坡面径流的主要决定因子，其次是坡度对坡面径流直接影响较大。

2.3.2 影响输沙的因素 不同雨型下的输沙量对各因素的响应见表4。对所有雨型，各影响因素的直接通径系数大小依次为径流深、坡度，径流深和坡度，均以直接效应为主影响坡面产沙，坡度还通过径流深产生间接效应影响坡面产沙。对于雨型2，各影响因素的直接通径系数依次为径流深和坡度，均以正效应为主，且坡度通过径流深的间接正效应(0.18)和直接正效应(0.26)叠加影响坡面产沙。对于雨型3，各影响因素的直接通径系数依次为径流深和雨前土壤含水量，且从直接通经系数来看雨前土壤含水量是影响坡面产沙的限制因子。所有雨型、雨型2和雨型3的影

响因子径流深的直接通经系数分别为 0.52，0.65 和 0.59，均为正效应，且直接影响较大。综上所述，径流深和坡度是影响坡耕地土壤侵蚀的影响产沙的主要决定因子，且为直接正效应。

表 3　次降雨事件中影响径流深的因素的通径分析

Table 3　Path analysis of erosion factors and runoff depth in all rainfall events

降雨类型	自变量	相关系数	直接通径系数	间接通径系数						
				x_6	x_4	x_5	x_1	x_2	x_8	总和
雨型 2	x_6	0.79**	0.79**				0			0
	x_1	0.29*	0.29**	0						0
雨型 3	x_6	0.76**	1.55**		−0.25	−0.53	0	−0.01		−0.79
	x_4	0.02	−0.52**	0.74		−0.32	0	0.12		0.54
	x_5	0.59**	−0.57**	1.44	−0.29		0	0		1.15
	x_1	0.16	0.16**	0	0	0		0		0
	x_2	0.21*	−0.20*	0.09	0.31	0.01	0			0.41
所有雨型	x_6	0.70**	0.72**				0	0.02	−0.05	−0.02
	x_1	0.25**	0.37**	0				0	−0.12	−0.12
	x_2	0.26**	0.21**	0.09			0		−0.03	0.05
	x_8	−0.19*	0.21**	−0.16			−0.20	−0.03		−0.40

注：* 表示相关性或直接影响达显著水平（$p<0.05$）；* * 表示相关性或直接影响达极显著水平（$p<0.01$）。下同。

表 4　侵蚀因子与输沙量的通径分析结果

Table 4　Path analysis of sediment yield factors

降雨类型	自变量	相关系数	直径通径系数	间接通径系数			
				x_9	x_1	x_8	总和
雨型 2	x_9	0.72**	0.65**		0.07		0.07
	x_1	0.44**	0.26**	0.18			0.18
雨型 3	x_9	0.60**	0.59**			0.01	0.01
	x_8	−0.26*	−0.23*	−0.03			−0.03
所有雨型	x_9	0.56**	0.52**		0.05		0.05
	x_1	0.32**	0.19*	0.13			0.13

3　讨 论

降雨是坡面侵蚀发生的主要驱动力。因 P、I 和 D 等特征参数的不同，不同的降雨类型势必导致土壤侵蚀过程的差异。目前，中国雨型研究主要集中在黄土高原地区和南方红壤区[24-25]。如曹美晨等[26]、秦伟等[6]、陈磊等[7]在黄土高原地区、红壤区和喀斯特地区的研究结果发现，短历时、大雨强、小雨量雨型是造成当地水土流失的主要雨型。本研究将降雨类型划分为 3 种类型，其中，雨型 1 表现为大雨量、长历时、小雨强的降雨，在观测期的发生频率为 4%，产沙能力弱，对累积输沙的贡献最低。可能是长时间间歇性的小雨强降雨，促使表层结皮形成和土壤入渗速率的稳定，从而发生少量的土壤侵蚀[27]。雨型 3 表现为短历时、小雨量、大雨强的降雨事件，对累积输沙量贡献在 50%以上。说明短历时、高强度、小雨量的降雨是导致该区土壤侵蚀的主要雨型。因为大雨强下通常产生较大的降雨动能，从而具有很强的侵蚀力[28]，坡面径流的剪切、剥蚀作用得到加强，产生能够搬运土壤颗粒的径流，土壤流失量也随之增加[29]。张宪奎等[30]的研究结果同样发现，导致黑土区土壤流失的主要雨型为短历时、高雨强降雨，但是并未提及降雨量的大小。然而，邬铃莉等[8]在北方土石山区的研究结果显示长历时、大雨量和中雨强的雨型对土壤侵蚀的贡献最大。造成这种差异的原因可能是不同地区的土壤黏粒和粉粒含量不同、坡度和坡长等的区域差异性[31]。

坡度通过改变雨滴对土壤颗粒的打击作用，改变径流流速和径流挟沙力，进而影响坡面侵蚀过程[10,32]。研究[9]发现，在坡度较大的区域，相同时间及相同投影面积的情况下，单位面积的斜坡面接受的降雨量比平面少，导致地表径流量和侵蚀动能减小；同时土体间下滑的摩擦阻力不随坡度的增大而无限增大，当达到临界摩擦阻力时，土壤流失量即达到最大值，之后土壤流失量有所减少。王照润等[11]和倪九派等[33]在黄土高原和紫色土区的研究结果均表明，坡面径流量和输沙量均随着坡度的增加呈先增加后减小的变化趋势。临界坡度不是一个定值，受降雨、土壤结构和类型等因素影响而不同。然而，本研究发现，黑土坡耕地径流和输沙量随着坡度的增加而增大，这与侯淑艳等[13]和李桂芳等[14]在黑土区的研究结果一致。这主要是由于黑土区坡度缓的地形特征，坡度大多分布范围为 1°～5°，相同降雨条件下，随着坡度的增加，坡面水流的流速增大，入渗能力降低，有多余的雨水转化为地表径流，导致径流量增加[31]。此外，随着坡度的增加，垄台倾斜度增加，垄台斜面土壤在重力作用下黏结力减弱，坡面物质稳定性降低。加之雨滴侧向剪切分力增加，致使土壤抗蚀性减弱，输沙量增大[34]。

P、I、D、I_{30}、R 等特征参数是影响坡耕地径流的

重要降雨因子[35]。本研究中通径分析结果显示,影响坡耕地径流的主要决定因子是 R。随着 R 的增加,通常导致单位时间内径流流速增大,入渗量减少,径流量增加[36]。不同地区降雨侵蚀力指标不同,本研究选用的是 EI_{30},可能原因是 R 计算所需记录的次降雨过程资料不易获得[37]。此外,各降雨因子间还存在交互作用,本研究中雨型3降雨事件中 I_{30} 和 I 通过以 R 为主要途径的间接正效应为主,D 是通过 I 的间接正效应,所以 R、I_{30}、I 和 D 之间存在较强的相互作用,它们最终都是通过 R 来影响坡耕地产流过程。降雨产生的地表径流是坡面侵蚀发生的载体[38]。通过对产沙量影响因素的分析发现,影响坡耕地输沙量的主要决定因子是径流深,这跟大多数研究[7,35,39]的结果一致,输沙量与径流呈指数或者幂函数关系。主要是由于在雨滴打击作用下,地表径流紊动强度增加,挟沙能力增强,搬运走更多的土壤颗粒。坡度通过径流产生间接正效应和直接正效应叠加影响坡面产沙,即坡度促进径流量对产沙量的作用。综上所述,径流量对输沙量起到主要控制作用。

4 结 论

(1)研究区侵蚀性降雨事件以短历时、大雨强、小雨量的降雨为主(雨型3),占总量的51%,其次是中等历时、中等雨强、中等雨量的降雨(雨型2),长历时、大雨量、小雨强的降雨极少发生(雨型1)。

(2)相同雨型下,黑土坡耕地径流和输沙均表现为随坡度的增加呈增大趋势。相同坡度条件下,黑土坡耕地径流和输沙特征对雨型的响应不同,不同雨型对累积输沙量的贡献表现为雨型3贡献最大(50.90%~57.90%),雨型2次之(37.60%~44.10%),雨型1最小。说明雨型3是研究区土壤流失的主要贡献者。

(3)降雨侵蚀力和坡度在雨型2中直接影响径流深,径流深和坡度直接影响输沙量。降雨侵蚀力在雨型3中通过直接和间接效应影响径流深进而影响输沙量。降雨侵蚀力和坡度是坡耕地径流深的主控因子,而径流深和坡度是影响坡耕地输沙量的主控因子。研究结果可为黑土区坡耕地土壤侵蚀研究提供理论支撑。

参考文献:

[1] 常松果,胡雪琴,史东梅,等.不同土壤管理措施下坡耕地产流产沙和氮磷流失特征[J].水土保持学报,2016,30(5):34-40.
CHANG S G, HU X Q, SHI D M, et al. Characteristics of runoff and sediment, nitrogen and phosphorus losses under soil management measures in sloping farmland[J].Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(5):34-40.

[2] 郭岩松,毕曼.土壤侵蚀影响因素研究进展[J].河南科技,2021,40(20):136-140.
GUO Y S, BI M. Research progress on influencing factors of soil erosion[J].Henan Science and Technology,2021,40(20):136-140.

[3] WEI W, CHEN L D, FU B, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J].Journal of Hydrology,2007,335:247-258.

[4] PENG T, WANG S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on Karst slopes in southwest China[J].Catena,2012,90:53-62.

[5] 马星,郑江坤,王文武,等.不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].水土保持学报,2017,31(2):17-21.
MA X, ZHENG J K, WANG W W, et al. Characteristics of the runoff and sediment yield of sloping farmland in the purple soil area under different rainfall patterns[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2):17-21.

[6] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.
QIN W, ZUO C Q, YAN Q H, et al. Regularity of individual rainfall soil erosion in bare slope land of red soil[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(2):124-132.

[7] 陈磊,张科利,马芊红,等.喀斯特土石异质坡面产流产沙规律[J].水土保持学报,2022,36(5):82-89.
CHEN L, ZHANG K L, MA Q H, et al. Law of runoff and sediment yield on Karst heterogeneous slope of soil and rock[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(5):82-89.

[8] 邬铃莉,王云琦,王晨沣,等.降雨类型对北方土石山区坡面土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):157-164.
WU L L, WANG Y Q, WANG C F, et al. Effect of rainfall patterns on hillslope soil erosion in rocky mountain area of North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(24):157-164.

[9] 田风霞,王占礼,牛振华,等.黄土坡面土壤侵蚀过程试验研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(6):141-146.
TIAN F X, WANG Z L, NIU Z H, et al. Experimental research on soil erosion process in Loess hill slope[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(6):141-146.

[10] 何丙辉,缪驰远,吴咏,等.遂宁组紫色土坡耕地土壤侵蚀规律研究[J].水土保持学报,2004,18(3):9-11,15.
HE B H, MIAO C Y, WU Y, et al. Study on soil erosion regularity of sloping farmland in Suining group

purple soil[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004,18(3):9-11,15.

[11] 王照润.坡度和坡长对坡面降雨径流侵蚀不平衡输沙的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2022.
WANG Z R. Effects of slope gradient and slope length on the unbalanced sediment transport by rainfall-runoff erosion on slope surface[D].Northwest Agriculture and Forestry University,2022.

[12] 陈正维,刘兴年,朱波.基于 SCS-CN 模型的紫色土坡地径流预测[J].农业工程学报,2014,30(7):72-81.
CHEN Z W, LIU X N, ZHU B. Runoff estimation in hillslope cropland of purple soil based on SCS-CN model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2014,30(7):72-81.

[13] 侯淑艳,刘绪军,刘建新,等.水土保持措施对黑土坡耕地产流产沙的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(4):26-33.
HOU S Y, LIU X J, LIU J X, et al. Effects of soil and water conservation measures on the runoff and sediment yield in black sloping farmland[J].Science of Soil and Water Conservation,2022,20(4):26-33.

[14] 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.
LI G F, ZHENG F L, LU J, et al. Effects of rainfall and topography on soil erosion processes of black soil hillslope[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(4):147-154,182.

[15] 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.

[16] 刘兴土,阎百兴.东北黑土区水土流失与粮食安全[J].中国水土保持,2009(1):17-19.
LIU X T, YAN B X. Soil erosion and food security in black soil region of Northeast China[J].Soil and Water Conservation in China,2009(1):17-19.

[17] 姜艳艳,常诚,张大伟,等.东北黑土区水土流失现状及成因分析[J].黑龙江科学,2020,11(18):152-153.
JIANG Y Y, CHANG C, ZHANG D W, et al. Present situation and cause analysis of soil erosion in the black soil region of Northeast China[J]. Heilongjiang Science,2020,11(18):152-153.

[18] 中华人民共和国水利部.中国水土保持公报(2021 年)[EB/OD].(2022-07-13)[2023-07-05]. http://www.swcc.org.cn/qgstbcgg/.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Soil and Water Conservation Bulletin (2021)[EB/OL]. (2022-07-13)[2023-07-05]. http://www.swcc.org.cn/qgstbcgg/.

[19] 张晓平,梁爱珍,申艳,等.东北黑土水土流失特点[J].地理科学,2006,26(6):687-692.
ZHANG X P, LIANG A Z, SHEN Y, et al. Erosion characteristics of black soils in Northeast China[J].Scientia Geographica Sinica,2006,26(6):687-692.

[20] 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.

[21] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等.雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报,2016,47(2):90-97.
ZHENG F L, BIAN F, LU J, et al. Effects of rainfall patterns on hillslope erosion with longitudinal ridge in typical black soil region of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(2):90-97.

[22] 李浩.黑土区典型小流域水土流失演变与输移特征研究[D].长春:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所),2012.
LI H. Research on the evolution and transport characteristics of soil and water loss in typical small watersheds in the black soil region[D].Changchun: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Northeast Geography and Agroecology),2012.

[23] SUN T, CRUSE R M, CHEN Q, et al. Design and initial evaluation of a portable *in situ* runoff and sediment monitoring device[J].Journal of Hydrology,2014,519:1141-1148.

[24] 王改玲,王青杵,石生新.晋北黄土区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2013,27(1):1-5.
WANG G L, WANG Q C, SHI S X. Rainfall characters and its effect on loess slopeland erosion in northern Shanxi Province[J].Journal of Soil and Water Conservation,2013,27(1):1-5.

[25] FANG H Y, CAI Q G, CHEN H, et al. Effect of rainfall regime and slope on runoff in a gullied loess region on the loess plateau in China[J]. Environmental Management,2008,42(3):402-411.

[26] 曹美晨,辛艳,任正龑,等.半干旱黄土丘陵沟壑区不同土地利用坡面的降雨侵蚀特征[J].泥沙研究,2022,47(6):43-50.
CAO M C, XIN Y, REN Z Y, et al. Characteristics of rainfall erosion on different land use slopes in semi-arid

loess hilly and gully region[J].Journal of Sediment Research,2022,47(6):43-50.

[27] 琚彤军,刘普灵,徐学选,等.不同次降雨条件对黄土区主要地类水沙动态过程的影响及其机理研究[J].泥沙研究,2007(4):65-71.
JU T J, LIU P L, XU X X, et al. Experimental study on runoff and sediment process in primary-lands in loess hilly regions under different rainfall conditions[J]. Journal of Sediment Research,2007(4):65-71.

[28] 蔡强国,刘纪根,刘前进.岔巴沟流域次暴雨产沙统计模型[J].地理研究,2004,23(4):433-439.
CAI Q G, LIU J G, LIU Q J. Research of sediment yield statistical model for single rainstorm in Chabagou drainage basin[J].Geographical Research,2004,23(4):433-439.

[29] 温永福,高鹏,穆兴民,等.黄土高原丘陵沟壑区梯田边坡侵蚀过程对雨强的响应[J].泥沙研究,2017,42(6):46-51.
WEN Y F, GAO P, MU X M, et al. Response of soil erosion to rainfall intensity in terraced slope in the Loess Plateau[J].Journal of Sediment Research,2017,42(6):46-51.

[30] 张宪奎,许靖华,卢秀琴,等.黑龙江省土壤流失方程的研究[J].水土保持通报,1992(4):1-9,18.
ZHANG X K, XU J H, LU X Q, et al. A study on the soil loss equation in Heilongjiang Province[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,1992,12(4):1-9,18.

[31] 张小娜,冯杰,高永波,等.不同雨强条件下坡度对坡地产汇流及溶质运移的影响[J].水土保持通报,2010,30(2):119-123.
ZHANG X N, FENG J, GAO Y B, et al. Influences of slope on runoff and concentration and solute transport under different rainfall intensities[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2010,30(2):119-123.

[32] 张兴义,乔宝玲,李健宇,等.降雨强度和坡度对东北黑土区顺坡垄体溅蚀特征的影响[J].农业工程学报,2020,36(16):110-117.
ZHANG X Y, QIAO B L, LI J Y, et al. Effects of rainfall intensity and slope on splash erosion characteristics of downslope ridge on farmland in black soil areas of Northeast China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(16):110-117.

[33] 倪九派,魏朝富,谢德体,等.坡度对三峡库区紫色土坡面径流侵蚀的影响分析[J].泥沙研究,2009(2):29-33.
NI J P, WEI C F, XIE D T, et al. Influence of slope gradient on runoff erosion of purple soil slope in the Three Gorges Reservoir area[J].Journal of Sediment Research,2009(2):29-33.

[34] 沈海鸥,肖培青,李洪丽,等.黑土坡面不同粒级泥沙流失特征分析[J].农业工程学报,2019,35(20):111-117.
SHEN H O, XIAO P Q, LI H L, et al. Analysis of sediment particle loss at different gradations on Mollisol hillslopes[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(20):111-117.

[35] 朱燕琴,赵志斌,齐广平,等.黄土丘陵区坡面产流产沙的影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(8):173-178.
ZHU Y Q, ZHAO Z B, QI G P, et al. Analysis of factors influencing runoff and sediment yield on slopes of loess hilly and gully region[J].Journal of Arid Land Resources and Environment,2020,34(8):173-178.

[36] 宋月君,谢颂华,廖凯涛.基于不同降雨特征的空闲坡耕地产流产沙特征解析[J].水资源与水工程学报,2021,32(2):16-22.
SONG Y J, XIE S H, LIAO K T. Characteristics of runoff and sediment yield in vacant sloping farmlands under different rainfall conditions[J].Journal of Water Resources and Water Engineering,2021,32(2):16-22.

[37] 陈晓安,蔡强国,郑明国,等.黄土丘陵沟壑区的岔巴沟流域次降雨侵蚀力的研究[J].泥沙研究,2010(1):5-10.
CHEN X A, CAI Q G, ZHENG M G, et al. Study on rainfall erosivity of Chabagou watershed in a hilly loess region on the Loess Plateau[J].Journal of Sediment Research,2010(1):5-10.

[38] 鲁建功,郭成久,魏英林.土壤侵蚀产沙的影响因素研究[J].中国科技信息,2008(4):21-23.
LU J G, GUO C J, WEI Y L. Study on influencing factors of soil erosion and sediment yield[J].China Science and Technology Information,2008(4):21-23.

[39] 彭琼,刘宝元,曹琦,等.作物覆盖度对土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2022,36(5):97-103.
PENG Q, LIU B Y, CAO Q, et al. Effect of crop coverage on soil erosion[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(5):97-103.