降雨类型对砒砂岩区不同土地利用类型坡面产流产沙的影响

张雨佳[1], 杨振奇[1], 王 鑫[1],
郭建英[1], 王小雪[2], 李 云[3], 马海龙[4], 张志军[5]

(1.水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2.伊金霍洛旗水利事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017299; 3.鄂尔多斯市水利事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017002; 4.呼和浩特市林业和草原保护中心, 内蒙古 呼和浩特 010055; 5.康巴什区林业和草原事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017299)

摘 要: [目的]探明砒砂岩区天然降雨条件下不同土地利用类型坡面产流产沙特征,为该区水土流失防控和流域生态综合治理工作提供理论和数据支撑。[方法]以内蒙古伊金霍洛旗砒砂岩区小流域为研究区,基于该区2018—2023年天然降雨产流产沙观测数据,对该区降雨类型进行划分,研究天然降雨特征与不同地类产流产沙量的关系,以降雨特征和坡度建立不同地类产流产沙模型。[结果]①降雨类型可划为3类。Ⅰ类降雨为短历时中雨,是研究区主要的降雨形式,占降雨总次数的80.6%;Ⅱ类降雨为中历时大雨,降雨发生频率较低,占降雨总次数的18.6%;Ⅲ类降雨为长历时中雨,发生频率最低,占降雨总次数的0.8%;Ⅰ型和Ⅱ型降雨分别占研究区坡面径流总量的39%和40%,是研究区坡面径流的主要来源。Ⅰ型降雨占研究区坡面产沙总量的81%,是研究区坡面产沙的主要来源;②不同雨型下,5°和10°坡面产沙规律整体呈:Ⅰ型降雨>Ⅱ型降雨>Ⅲ型降雨的规律,产流规律整体呈:Ⅱ型降雨>Ⅰ型降雨>Ⅲ型降雨的规律。15°坡面产流产沙规律整体呈:Ⅰ型降雨>Ⅱ型降雨>Ⅲ型降雨的规律。不同地类坡面产流产沙规律整体呈:裸地>耕地>草地>林地的规律。[结论]土地利用类型和坡度的交互作用是影响Ⅰ型降雨产流量的主要因素;土地利用类型、坡度单因素和交互作用对Ⅱ型降雨产流产沙量均有影响;土地利用类型是影响Ⅲ型降雨产流量的主要因素。构建的不同土地利用类型下降雨与产流产沙量模型,可运用于砒砂岩不同土地利用类型土壤侵蚀模拟研究。

关键词: 砒砂岩区; 坡面产流产沙; 土地利用类型; 天然降雨

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0032-09 **中图分类号:** S157.1

文献参数: 张雨佳, 杨振奇, 王鑫, 等.降雨类型对砒砂岩区不同土地利用类型坡面产流产沙的影响[J].水土保持通报,2026,46(3):32-40. Zhang Yujia, Yang Zhenqi, Wang Xin, et al. Impacts of rainfall types on slope runoff and sediment yield under different land use types in Pisha sandstone area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):32-40.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.011 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.011**

Impacts of rainfall types on slope runoff and sediment yield under different land use types in Pisha sandstone area

Zhang Yujia[1], Yang Zhenqi[1], Wang Xin[1],
Guo Jianying[1], Wang Xiaoxue[2], Li Yun[3], Ma Hailong[4], Zhang Zhijun[5]

(1.*Institute of Water Conservancy Science in Pastoral Areas, Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia* 010020, *China*; 2.*Yijinhuoluo Banner Water Conservancy Development Center, Ordos, Inner Mongolia* 017299, *China*; 3.*Ordos City Water Conservancy Development Center, Ordos,*

收稿日期:2025-10-18 **修回日期:**2025-12-25 **采用日期:**2025-12-26

资助项目:鄂尔多斯市水利科技项目"重点水土流失区生态系统(西黑岱流域)水土保持综合整治技术集成效益评估项目"(MK22205031);内蒙古自治区"科技兴蒙"行动重点专项(2022EEDSKJXM003);中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(MKYW2024JK002);内蒙古自治区"英才兴蒙"工程青年拔尖人才专项培养计划项目

第一作者:张雨佳(2000—),女(汉族),内蒙古自治区赤峰市人,硕士研究生,研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email:1492210404@qq.com。

通信作者:杨振奇(1993—),男(汉族),内蒙古自治区赤峰市人,博士,硕士生导师,高级工程师,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。Email:843296578@qq.com。

Inner Mongolia 017002, *China*; 4.*Hohhot Forestry and Grassland Protection Center*, *Hohhot*, *Inner Mongolia* 010055, *China*; 5.*Kangbashi Forestry and Grassland Development Center*, *Ordos*, *Inner Mongolia* 017299, *China*)

Abstract: [Objective] The characteristics of slope runoff and sediment yield of different land use types under natural rainfall conditions in the Pisha sandstone area were explored, in order to provide theoretical and data support for the prevention and control of soil erosion and the comprehensive ecological management of watersheds in this area. [Methods] Taking the small watershed of the Pisha sandstone area in Yijinhuoluo Banner of Inner Mongolia as a study area, based on the observation data of natural rainfall runoff and sediment yield in this area from 2018 to 2023, the rainfall types in this area were classified, the relationship between natural rainfall characteristics and runoff and sediment yield of different land use types was analyzed, and the runoff and sediment yield models of different land use types were established based on rainfall characteristics and slope gradient. [Results] ① The rainfall types were classified into three categories. Type Ⅰ rainfall was short-duration moderate rainfall, which was the dominant rainfall type in the study area, accounting for 80.6% of the total rainfall events. Type Ⅱ rainfall was medium-duration heavy rainfall, with a relatively low frequency, accounting for 18.6% of the total rainfall events. Type Ⅲ rainfall was long-duration moderate rainfall, with the lowest frequency, accounting for 0.8% of the total rainfall events. Type Ⅰ and Type Ⅱ rainfall accounted for 39% and 40% of the total slope runoff in the study area, respectively, serving as the main sources of slope runoff. Type Ⅰ rainfall accounted for 81% of the total slope sediment yield in the study area, which was the main source of slope sediment yield. ② Under different rainfall types, the sediment yield patterns on 5° and 10° slopes followed the overall order of Type Ⅰ rainfall > Type Ⅱ rainfall > Type Ⅲ rainfall, while the runoff patterns followed the order of Type Ⅱ rainfall > Type Ⅰ rainfall > Type Ⅲ rainfall. The runoff and sediment yield patterns on a 15° slope both followed the order of Type I rainfall > Type Ⅱ rainfall > Type Ⅲ rainfall. For different land use types, the slope runoff and sediment yield patterns of different land types ranked as bare land > cultivated land > grassland > forest land. [Conclusion] The interaction between land use type and slope gradient was the main factor affecting the runoff yield of Type Ⅰ rainfall. The single factor and interaction of land use type and slope gradient both had an effect on runoff and sediment yield under Type Ⅱ rainfall. Land use type was the main factor affecting runoff under Type Ⅲ rainfall. The established models of rainfall and corresponding runoff and sediment yield of different land use types can be applied to soil erosion simulation studies for different land use types in Pisha sandstone area.

Keywords: **Pisha sandstone area**; **slope runoff and sediment yield**; **land use type**; **natural rainfall**

土壤侵蚀是当今全球最严峻的生态问题之一。土壤侵蚀引发土地资源退化,土壤生产力降低与生态环境恶化,严重制约社会经济的可持续发展[1]。土壤侵蚀过程具有强烈的自然-社会二元属性,因研究尺度的不同,其主导性的影响因素也不同[2]。在干旱半干旱区的坡面尺度,降雨是重塑坡面侵蚀地形,进而影响土壤侵蚀过程的直接因素[3-4],而次降雨的强度、历时、雨量等特征是决定次降雨能否引发土壤侵蚀作用的重要指标,判定侵蚀性降雨是研究土壤侵蚀过程的重要前提[5-6]。影响坡面土壤侵蚀过程的另一重要因素是地表的覆被情况[7],人类活动对于区域的土地覆被有决定性的作用,通过改变土地的利用性质,造成径流在地表入渗-产流-侵蚀搬运过程的差异,有相关研究[8-9]表明,人工栽植植被有助于提升区域地表植被覆盖率,增加区域枯落物积累,提升土壤对径流的拦蓄能力,根系层活动则有助于增加土壤孔隙度和入渗率,减少坡面产流产沙,乔木和灌木在减少径流和泥沙量方面效果最显著。

黄土高原地区是中国乃至全世界水土流失最为剧烈的地区之一,黄河上中游段水沙关系失衡、下游河床淤积等问题尤为突出[10]。砒砂岩区广泛分布于黄河上中游窟野河、皇甫川、十大孔兑等地区,该区降雨时空分布不均,侵蚀性降雨频发,加之基岩成岩程度低,沙粒间胶结程度差,结构松散,基岩抗风化和抗侵蚀能力差,区域水土流失极为严重[11]。该区总面积 1.67×10^4 km^2,仅占黄河流域总面积的 2%,但平均每年向黄河输送的泥沙量却高达 2.00×10^4 t,是黄河粗泥沙的主要来源区之一[3]。国内外专家学者对于砒砂岩区的土壤侵蚀过程已有一定的研究基础,开展了坡面尺度侵蚀产沙规律的研究,揭示了流域尺度土壤侵蚀与区域土地覆被、生态系统结构功能演变的关系,但对于区域降雨、坡度和土地利用覆

被等因素对土壤侵蚀过程的叠加影响仍待深入研究。

因此,本研究以内蒙古伊金霍洛旗砒砂岩区为对象,基于该区2018—2023年径流小区降雨和产流产沙数据,系统分析该区降雨特征和降雨类型,探明不同土地利用类型下产流产沙特征差异,研究降雨、坡度和土地利用/覆被等因素对土壤侵蚀过程的叠加影响,旨在为黄河上中游砒砂岩区水土流失治理提供理论和数据支撑,为指导该区流域综合治理工作提供参考。

1 研究区概况

研究区位于黄河流域4级支流合同庙川流域的上游右岸,径流观测场地处鄂尔多斯市伊金霍洛旗。图1为内蒙古伊金霍洛旗砒砂岩区合同庙川小流域的土地利用和植被覆盖状况。该区属干旱半干旱温带大陆性气候,多年平均降雨量358.2 mm,年降雨量在100.8～642.7 mm,多年平均日照时数2 900 h。≥10 ℃的有效积温为2 751.3 ℃,多年平均蒸发量为2 563 mm。以西北风为主,风力5～8级,年均风速3.6 m/s,最大瞬时风速24 m/s。

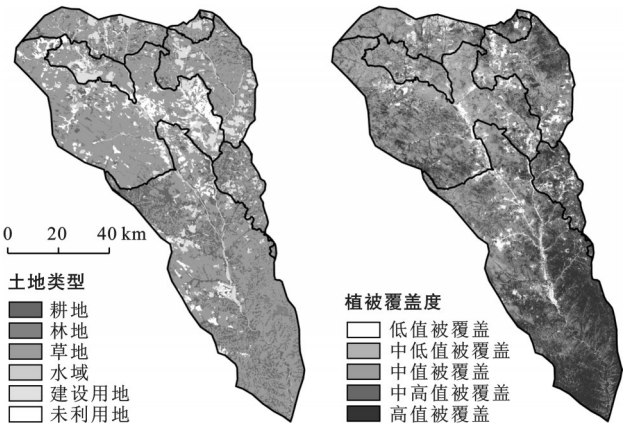


图1 合同庙川小流域土地利用和植被覆盖状况

Fig.1 Land use and vegetation cover in Hetongmiao river small watershed

2 材料与方法

2.1 试验设置

径流小区为投影面积100 m²的径流观测场,设置6种不同土地利用类型,分别为乔木林地、灌木林地、天然草地、人工草地、耕地和裸地。每种类型设置3种坡度,分别为5°,10°,15°,观测天然降雨的产流产沙特征,本研究自2018年开始至2023年结束。径流场基本概况详见表1。

表1 径流场土地利用类型基本概况

Table 1 Basic overview of land use types in runoff fields

配置模式	乔木林地	灌木林地	裸地	天然草地	人工草地	耕地
主要植被	樟子松	沙棘	—	—	紫花苜蓿	玉米
株行距/m	2×3	1×1	—	—	—	—
植被覆盖度/%	46.33±1.25	34.00±1.63	—	43.67±2.62	33.33±1.25	28.12±0.79

注:平均值±标准误。

2.2 降雨特征

采用自动气象站记录次降雨过程,每5 min取1次数据。依据降雨特征,分别计算降雨量(P)、降雨历时(T)、最大30 min雨强(I_{30})、平均雨强(I_{AVG})等参数。

2.3 产流产沙特征

利用自动水沙监测设备(北京天航佳德)与人工监测相结合的形式,自动监测设备以1次/min的频率记录数据,并同时结合人工实地取样进行验证,每次降雨后将集流桶中的水沙充分搅拌,均匀混合后使用1 L的取样瓶进行取样,每个集流桶取3个水样;将取样瓶带回实验室过滤后,放置105 ℃烘箱中烘至恒重,进行称重。试验期间降雨每间隔30 min对径流泥沙进行收集,测定产流产沙量,与自动监测设备对应时间进行校准。

2.4 数据分析

$$R_d = V/A \times 1\,000 \quad (1)$$

式中:R_d为径流深(mm);V为径流体积(L);A为小区面积(m²)。

$$C = R_d/P \times 100\% \quad (2)$$

式中:C为径流系数(%);P为降雨量(mm)。

$$S_1 = M_s/A_h \quad (3)$$

式中:S_1为产沙量(t/hm²);M_s为泥沙总量(t);A_h为小区面积(hm²)。

试验数据采用R语言进行双因素方差分析,探究坡度与土地利用类型二者的交互作用对产流产沙量的影响,采用聚类分析对研究区降雨类型进行划分和相关性分析,探究降雨特征与不同土地利用类型的产流产沙量之间的相关性,并生成对应的分析图。

3　结果与分析

3.1　降雨特征及分类

图 2 为研究区 2018—2023 年月降水总量平均值、中位数、标准差。由图 2 可以看出,研究区年降雨过程主要集中在 4—9 月,7 月和 8 月降水总量分别为 110.3 和 131 mm,总量约占全年降水量的 65.2%,且 7—9 月,降雨差异性较大。该区降雨特征与黄土高原第Ⅱ副区基本一致。年内降雨分布不均,差异性较大,降雨集中在 7—9 月,且以暴雨形式为主[12]。

由表 2 可知,研究区 2018—2023 年共监测有效产流的侵蚀性降雨 247 场,降雨量在 208.6～456 mm,总降雨历时在 8 145～23 460 min,其中以 2022 年降雨总降雨量最大为 456 mm,以 2019 年总降雨历时最长为 23 460 min。单次最大降雨量 72.4 mm(2022年),最小降雨量27.6 mm(2019年)。最大30 min降雨强度 13.49～67.04 mm/h,其中以 2021 年最大 30 min降雨强度最大。研究区 2018—2023 年最大降雨侵蚀力分别为 136.94,56.16,766.91,819.27,929.81,1 092.75 mm/h。

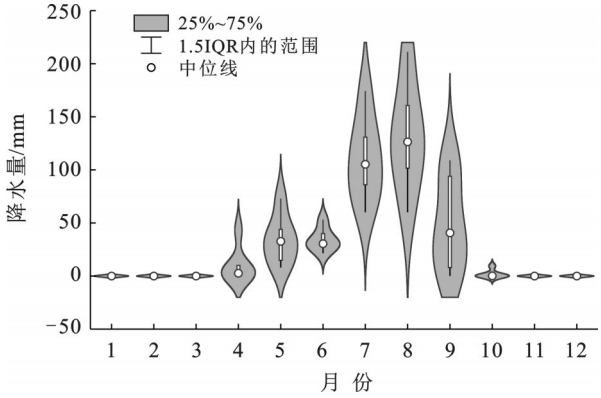


图 2　研究区月平均降雨量特征

Fig.2　Characteristics of monthly average rainfall in study area

表 2　研究区 2018—2023 年降雨特征

Table 2　Rainfall characteristics in study area (2018—2023)

年份	P/mm	T/min	P_{max}/mm	I_{30}/(mm·h^{-1})	R_{max}/(MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1})
2018	388.0	8 145	58.5	26.00	136.94
2019	208.6	23 460	27.6	13.49	56.16
2020	363.2	12 810	44.6	62.55	766.91
2021	367.2	11 470	69.4	67.04	819.27
2022	456.0	10 090	72.4	55.24	929.81
2023	438.6	11 107	59.0	59.62	1 092.75

注:P为降水量;T为总降雨历时;P_{max}表示最大次降雨量;I_{30}为30 min最大雨强;R_{max}表示最大降雨侵蚀力。下同。

为了更准确研究降雨对侵蚀过程的影响,需对降雨类型进行划分,选择 12 h降雨量、降雨历时、平均降雨强度和最大 30 min降雨强度作为特征指标[13],通过聚类分析对研究区的 247 场侵蚀性降雨的类型进一步归纳划分(表 3),划分结果表明,研究区降雨类型基本可划分为3类,Ⅰ类降雨可定义为短历时中雨,该型降雨 12 h内降雨量为 6.97 mm,平均降雨历时 153.08 min,平均最大 30 min雨强 8.26 mm/h,发生频率最高,是该研究区主要的降雨形式,共有 199 次,占降雨总次数的 80.6%;Ⅱ类降雨可定义为中历时大雨,该类型降雨 12 h内降雨量为 16.55 mm,平均降雨历时 893.26 min,平均最大 30 min雨强 10.09 mm/h,降雨发生频率较低,共出现 46 次,占降雨总次数的 18.6%;Ⅲ类降雨可定义为长历时中雨,发生频率最低,仅有 2 次,占降雨总次数的 0.8%。

表 3　研究区降雨类型特征

Table 3　Characteristics of rainfall types in study area

降雨类型	P/mm	T/min	I_{30}/(mm·h^{-1})	I_{avg}/(mm·h^{-1})	频数
Ⅰ型	6.97±2.16	153.08±30.48	8.26±2.08	1.58±1.03	199
Ⅱ型	16.55±5.87	893.26±395.27	10.09±3.31	2.57±1.14	46
Ⅲ型	6.10±2.20	2 765±504.13	0.61±0.19	0.63±0.37	2

注:I_{avg}表示平均降雨强度。

3.2 不同降雨类型下各土地利用类型的产流产沙特征

图3为研究区不同降雨类型的产流产沙特征。由图3可知,当坡度条件均为5°时,不同地类的产流量整体表现为裸地的产流产沙量显著高于其他地类,不同降雨类型表现为Ⅰ型降雨的产流产沙量要显著高于Ⅱ型和Ⅲ型。然而,相同地类条件在不同降雨类型下的产流规律不同,裸地在不同降雨类型下均产流,但天然草地在Ⅰ型和Ⅲ型降雨下不产流,在Ⅱ型降雨条件下却有较大产流量,而地表植被同为草本的人工草地也表现出类似特征,说明草地虽然植被覆盖度较高,但是在面对雨强较大的大雨时,可能无法有效对降雨进行拦蓄入渗,发生过饱和产流的现象。而对比耕地与人工草地同为人工种植类型坡面来看,耕地却表现出相反规律,在Ⅱ降雨下不产流,在Ⅲ型降雨条件下产流,表明定期的施肥除草,松土等耕作措施显著改变了土壤的疏松程度,使得耕地在面对历时较短的大雨时能存续更多降雨减少产流,而人工草地自播种未实施额外管理,其对降雨过程的响应接近于天然草地。坡度为10°时,耕地的产流量要高于其他地类。不同雨型下的产流和产沙规律表现为:Ⅰ型>Ⅱ型>Ⅲ型,这可能与耕地耕作层深度有关,径流小区内耕作层由人工翻地,翻动深度约为30 cm,下层土壤仍质密紧实,遇到历时相对较短的中雨大雨,耕作层水分饱和后产生较大径流;裸地则表现为相反规律,产流量呈:Ⅲ型>Ⅰ型>Ⅱ型,表明裸地在面对长历时中雨时易因土壤水分过饱和蓄满产流,产沙量则呈:Ⅱ型>Ⅰ型>Ⅲ型的规律,表明裸地产沙的主要来源与历时相对较少的中到大雨有关;草地的产流产沙量则与5°坡面规律一致,表现为:Ⅱ型>Ⅰ型>Ⅲ型。坡度为15°时,随着坡度的增加,不同雨型,不同土地利用类型的产流产沙量都呈增加趋势。不同地类的产流量大小依次为:裸地、耕地、人工草地、天然草地、灌木林地、乔木林地。不同雨型产流规律整体呈:Ⅰ型>Ⅱ型>Ⅲ型,表明随着坡度的增加,更利于地表径流汇集,历时相对较短,雨量较大的降雨更容易产流,径流也带动更大的产沙,相应的产沙量也呈:Ⅰ型>Ⅱ型>Ⅲ型。

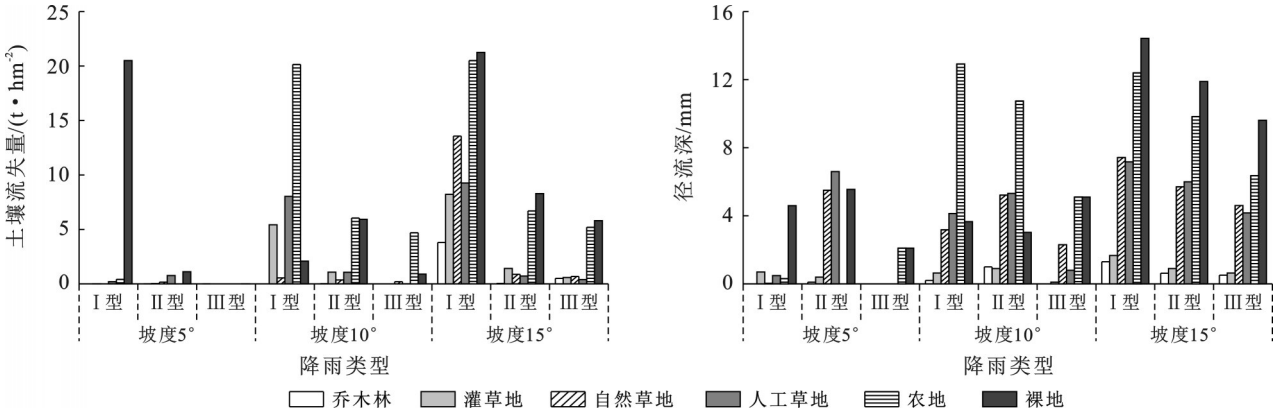


图3 不同降雨类型下各土地利用类型产流产沙特征

Fig.3 Characteristics of runoff and sediment yield of different land use types under different rainfall types

3.3 不同土地利用类型下径流产沙影响因素分析

由表4可知,各土地利用类型均表现为降雨量与产流产沙量间呈显著($p<0.05$)正相关关系;T, I_{30}与I_{avg}对不同土地利用类型的产流量和产沙量无显著影响($p>0.05$)。坡度对产流量和产沙量的影响在灌木林地和人工草地无显著相关性($p>0.05$);天然草地、裸地表现为坡度与产流量显著($p<0.05$)正相关,乔木林地、耕地表现为坡度与产流量极显著($p<0.01$)正相关;裸地表现为坡度与产沙量极显著($p<0.01$)正相关,乔木林地、耕地表现为坡度与产沙量显著($p<0.05$)正相关。由此可知,降雨量是决定研究区产流产沙量的主导因素,坡度对于侵蚀过程有叠加作用,但受土地利用方式的影响,乔木林地、天然草地、耕地和裸地的产流产沙量与坡度有一定的正相关关系,但灌木林地、天然草地和人工草地产流产沙量与坡度的相关性不明显,表明灌木林和草地等林下草本及枯落物覆盖度较高,植被覆盖结构更为紧密的地表的覆被形式有助于减少坡度对于侵蚀过程的叠加作用。

3.4 不同土地利用类型下径流产沙差异分析

双因素方差分析(表5)表明,在Ⅰ型降雨条件下,土地利用类型和坡度对产流量和产沙量均无显著影响($p>0.05$),而两者交互作用仅对产流量有显著影响($p<0.05$);当降雨类型同为Ⅱ型降雨时,土

地利用类型和坡度对产沙量均有显著影响($p<0.05$),两者交互作用的影响对产流量和产沙量也具有显著影响($p<0.05$);当降雨类型同为Ⅲ型降雨时,仅有土地利用类型对产流量有显著影响($p<0.05$),坡度、坡度-土地利用类型交互对产流量无显著影响($p>0.05$)。

3.5　不同土地利用类型下产流产沙模型

采用逐步回归分析方法,引入降雨量、降雨持续时间、降雨平均强度、最大 30 min 降雨强度和坡度作为解释变量,建立产流量和产沙量模型。首先,引入全部解释变量得到调整前的回归模型,发现各解释变量影响下产流量已达到$p<0.05$的显著水平,但产沙量的回归模型$p>0.05$,因此剔除不重要的潜在解释变量($p>0.05$)后,确定最佳回归模型,如表 6—7 中调整后模型所示,此时产流量的总模型和潜在变量的偏回归系数得到改进,产沙量的总模型和潜在变量的偏回归系数达到显著水平($p<0.05$)。

表 4　不同土地利用类型下径流泥沙的影响因素分析

Table 4　Analysis of influencing factors of runoff and sediment under different land use types

土地利用类型	参数	P	T	I_{30}	I_{avg}	Gd
乔木林地	R_d	0.538*	0.169	0.144	0.212	0.999**
	S_1	0.750**	0.013	0.406	0.217	0.504*
灌木林地	R_d	0.762**	0.192	0.367	0.052	0.281
	S_1	0.611**	0.033	0.357	0.151	0.294
天然草地	R_d	0.510*	0.125	0.115	0.123	0.576*
	S_1	0.449*	0.017	0.243	0.118	0.315
人工草地	R_d	0.575*	0.392	0.143	0.141	0.362
	S_1	0.652**	0.038	0.35	0.16	0.342
耕 地	R_d	0.494*	0.086	0.164	0.093	0.717**
	S_1	0.557*	0.018	0.263	0.163	0.426*
裸 地	R_d	0.530*	0.092	0.145	0.118	0.498*
	S_1	0.588*	0.008	0.325	0.211	0.816**

注:①R_d为径流深;S_1为产沙量;Gd表示坡度。下同。②*代表$p<0.05$水平显著相关,**代表$p<0.01$水平显著相关。

表 5　产流量和产沙量的影响因子方差分析

Table 5　Analysis of variance of influencing factors of runoff and sediment yield

参数变异源	降雨类型	SS		df		Ms		F		p	
		R_d	S_1	R_d	S_1	R_d	S_1	R_d	S_1	R_d	S_1
坡 度	Ⅰ	3.904	38.38	2	2	1.952	19.19	1.89	1.01	$p>0.05$	$p>0.05$
	Ⅱ	0.818	0.001	2	2	0.409	0.001	0.901	9.333	$p>0.05$	$p<0.05$
	Ⅲ	0.087	0.082	2	2	0.043	0.041	1	0.98	$p>0.05$	$p>0.05$
土地利用类型	Ⅰ	599.582	961.554	5	5	119.916	192.311	2.255	0.409	$p>0.05$	$p>0.05$
	Ⅱ	224.721	116.357	5	5	44.944	23.271	3.083	41.095	$p>0.05$	$p<0.05$
	Ⅲ	67.539	15.368	5	5	13.508	3.074	1.75	1.083	$p<0.05$	$p>0.05$
坡度×土地利	Ⅰ	458.637	1 320.466	5	5	91.727	264.093	2.944	1.051	$p<0.05$	$p>0.05$
	Ⅱ	214.846	111.438	5	5	42.969	22.288	2.894	6.041	$p<0.05$	$p<0.05$
	Ⅲ	59.067	15.368	5	5	11.813	3.074	2.151	1.083	$p>0.05$	$p>0.05$

注:SS为平方和;df为自由度;MS为均方;F值用于检验因素的显著性。

表 6　各土地利用类型的产流量预测模型

Table 6　Runoff prediction models for different land use types

土地利用类型	预测模型	自由度	R	R_a^2	F	sig
乔木林	$R_d=-1.351+0.03P+0.101$Gd	17	0.711	0.505	7.653	0.005
灌木林地	$R_d=-3.512+0.054P+0.082I_{30}+0.022$Gd	17	0.852	0.727	12.407	0
天然草地	$R_d=-5.304+0.175P+0.427$Gd	17	0.679	0.461	6.426	0.010
人工草地	$R_d=-7.212+0.159P+0.006$T$+0.427$Gd	17	0.742	0.551	5.728	0.009
耕 地	$R_d=-18.429+0.334P+1.984$Gd	17	0.912	0.832	17.353	0.002
裸 地	$R_d=-7.829+0.201P+0.867$Gd	17	0.688	0.474	6.747	0.008

注:R为相关系数;R_a^2为调整决定系数;F统计量;sig为显著性概率。

表7 各土地利用类型的产沙量预测模型

Table 7 Sediment yield prediction models for different land use types

土地利用类型	预测模型	自由度	R	R_a^2	F	sig
乔木林	$S_1=-6.71+0.184P+0.088I_{30}$	17	0.808	0.653	14.137	0
灌木林地	$S_1=-12.988+0.321P+0.591Gd$	17	0.680	0.463	6.458	0.009
天然草地	$S_1=-17.582+0.37P+0.931Gd$	17	0.583	0.340	3.870	0.044
人工草地	$S_1=-15.628+0.427P+0.602Gd$	17	0.694	0.481	6.965	0.007
耕 地	$S_1=-32.267+0.577P+2.789Gd$	17	0.701	0.492	4.350	0.048
裸 地	$S_1=-15.425+0.742P+0.289Gd$	17	0.587	0.345	3.947	0.042

4 讨 论

4.1 不同降雨类型对产流产沙的影响

大量研究[14-16]证实,黄土高原地区降雨年内时空分布不均,年内主要侵蚀产沙过程来源于夏秋季节少数几场降雨,李静等[17]对黄土高原不同地貌类型区降雨侵蚀力的研究结果表明,黄土高原降雨侵蚀力年内分布都集中在7—8月,9月有少量暴雨形式。土石山区降雨侵蚀力的最高值出现在7月,高塬沟壑区7月和8月降雨侵蚀力相近,北部丘陵沟壑区降雨侵蚀力最高值出现在8月。研究区属黄土高原北部丘陵沟壑区,研究结果也证实了上述观点。王万忠[18]研究认为历时短,雨强大,雨量多的降雨类型更容易引起侵蚀,雨强大于土壤下渗能力,且历时短,易产生超渗产流,其雨量在短时间内提供充足水源和强大的输送能力,将被击散的泥沙带走,导致出现快速产流、强烈冲刷的结果;王承书等[19]对黄土丘陵沟壑区降雨类型的分类结果也表明,短历时中雨强降雨入渗时间段,产流快,是丘陵沟壑区产流产沙的主要雨型,长历时大的中小型雨强具入渗时间长,湿润深度大,大部分雨水渗入土壤,产流产沙相对较少。证实了本研究结果:产流量和产沙量的总体规律呈:Ⅰ型>Ⅱ型>Ⅲ型。与前人研究成果不同之处有两点:①本研究区地处黄土高原最北部,极端降雨过程相对较少,因此无法验证极端降雨对区域产流产沙过程的影响。②本研究侧重于研究不同土地利用类型和坡度的叠加作用,降雨类型对产流产沙过程的影响也有所区别,特别是在5°的草地和裸地坡面上,Ⅱ型降雨的产流作用要强于Ⅰ型,表明灌木林和草地等地表植被覆盖度极高,植被覆盖结构更为紧密的地表的覆被形式有助于减少坡度对侵蚀过程的叠加作用。

4.2 土地利用类型对产流产沙的影响

研究[13,20]表明,土地利用是影响干旱半干旱区土壤侵蚀过程的重要因素之一。大部分学者均认为林地和草地具有较强的减流减沙作用,有助于控制区域水土流失强度[21-23],本研究得出的结果也证实了上述的观点。但是已有的研究成果尚存在争议,关于乔木和灌木减流减沙能力的差异,黄土高原南部的部分研究[24]结果表明,乔木因地表覆盖度、枯落物输入量和根系活动量等因素使其水土保持作用要强于灌木。但本研究结果显示,不同雨型和不同坡度影响下,乔木林和灌木林的产流量略有差异,但产沙量差异并不显著,这可能与树种特性和研究区气候条件有关[25],在气候相对干旱的黄土高原北部地区,水资源短缺,土壤养分贫瘠,樟子松等树种生长相对缓慢,而沙棘等灌木树种生长快速,其林下草本覆盖结构和枯落物组成更为紧密的地表的覆被形式有助于减少坡度对于侵蚀过程的叠加作用,而人工草地自播种之后无额外的管理措施,其对降雨过程的响应与天然草地接近,因此针对黄土高原北部干旱半干旱区的生态修复工作,从经济适用和节约水资源角度,本研究建议栽植灌木林和人工草地。

4.3 降雨与土地利用类型坡面产流产沙的相关性

国内外关于坡面尺度土壤侵蚀过程的研究均表明坡面产流产沙量与降雨特征指标存在紧密联系[26-27],常见产流量产沙量与降雨量、降雨历时、最大30 min雨强、平均雨强等指标呈线性函数关系,如李澳等[28]学者分析了黄土高原区31个径流观测场数据结果显示,产流产沙量与降雨量等因素间呈正相关关系,这与本文得出的研究结果接近。砒砂岩中的蒙脱石吸水极易膨胀堵塞孔隙,导致入渗过程缓慢,则产流产沙量与I_{30}相关性较弱。与前人研究有所区别的是,本研究在分析产流产沙量与降雨特征的关系中,增加了土地利用与坡度间的交互影响作用[29-30],在不同降雨类型下,土地利用类型和坡度对产流产沙的影响作用存在明显区别,Ⅰ型降雨虽为短历时降雨,但其降雨量较小,可以较充分地进行入渗,故土地利用类型、坡度单因素对其影响较小,土地利用类型和坡度的交互作用是影响Ⅰ型降雨产流

量的主要因素;Ⅱ型降雨属于高强度降雨,降雨超过土壤入渗能力,形成地表径流,且水流冲刷力强,能快速剥离土壤颗粒,故土地利用类型、坡度单因素和交互作用对其产流产沙量均有影响;Ⅲ型降雨属于长历时、低强度降雨,则更多下渗补充地下水,故坡度对其影响较小,土地利用类型是影响其产流量的主要因素。因此,本研究将坡度因子引入产流产沙模型中,分别构建了不同土地利用类型下产流产沙量与降雨特征的关系模型。

5　结　论

(1)研究区降雨年内主要集中在7—8月,降雨类型可划分为3类。Ⅰ类降雨为短历时中雨,是研究区主要的降雨形式;Ⅱ类降雨为中历时大雨;Ⅲ类降雨为长历时中雨,发生频率较低。Ⅰ型降雨单次降雨历时短,但发生频率高,叠加后累计产流量(75.21 mm)较高,中雨的强度通常超过土壤入渗能力,容易形成地表径流。Ⅱ型降雨累积产流量79.30 mm,大雨量易超过入渗能力,且中历时意味着降雨持续时间较长,单次产流量大,虽发生频率低于Ⅰ型,但单次贡献高,故Ⅰ型和Ⅱ型降雨是研究区坡面径流的主要来源;Ⅰ型降雨发生频率高且雨强集中,累积产沙量最高(133.95 t/hm^2),是研究区坡面产沙的主要来源。

(2)耕地在Ⅰ型和Ⅱ型降雨下易产生径流,从防控水土流失角度,建议耕地水保措施除放缓坡度外还应采取深耕措施,增加土壤层对降雨的入渗和蓄存;人工草地与天然草地在天然降雨条件下产流产沙特征基本一致,可以作为未来研究区恢复植被的重要生物措施之一。灌木林和草地等地表植被覆盖度较高,植被覆盖结构更为紧密的地表的覆被形式有助于减少坡度对于侵蚀过程的叠加作用,从经济适用和节约水资源角度建议栽植灌木林和人工草地。

(3)土地利用类型和坡度的交互作用是影响Ⅰ型降雨产流量的主要因素;土地利用类型、坡度单因素和交互作用对Ⅱ型降雨产流产沙量均有影响;土地利用类型是影响Ⅲ型降雨产流量的主要因素。本研究构建了不同土地利用类型下降雨-产流产沙量关系模型,可运用于砒砂岩区不同土地利用类型土壤侵蚀模拟研究。

参考文献(References)

[1] 丁琳,黄婷婷,秦伟,等.西南高山峡谷区土壤侵蚀空间分异特征[J].泥沙研究,2023,48(6):51-58.
Ding Lin, Huang Tingting, Qin Wei, et al. Spatial variation of soil erosion in southwest alpine canyon area [J]. Journal of Sediment Research, 2023,48(6):51-58.

[2] 梁止水,陈煜,孙悦,等.砒砂岩坡面侵蚀产沙规律及多元回归估算模型研究[J].水土保持研究,2024,31(2):11-17.
Liang Zhishui, Chen Yu, Sun Yue, et al. Study on the pattern of erosion and sediment yield and multiple regression estimation model of Pisha sandstone slope [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(2):11-17.

[3] 张若曦,秦富仓,李龙,等.砒砂岩区坡面微地貌变化与侵蚀产沙的响应关系[J].水土保持研究,2022,29(6):21-27.
Zhang Ruoxi, Qin Fucang, Li Long, et al. Responses of slope micro-geomorphology to erosion and sediment yield in arsenic sandstone area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(6):21-27.

[4] 韩勇.侵蚀性降雨雨型对黄土区浅沟坡面侵蚀特征的影响[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2016.
Han Yong. Effects of rainfall regime on soil and water loss at loessial hillslope with ephemeral gully [D]. Yangling, Shaanxi: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, 2016.

[5] 常志勇,杨以翠,卢宝鹏,等.模拟降雨条件下坡度和降雨强度对桂南崩积体侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):118-125.
Chang Zhiyong, Yang Yicui, Lu Baopeng, et al. Effects of slope gradient and rainfall intensity on sediment yield in the colluvial deposits of southern Guangxi under simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(2):118-125.

[6] 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 Lingli, Wang Yunqi, Wang Chenfeng, 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.

[7] 杨坪坪,李勇,宋涛,等.典型喀斯特区侵蚀性降雨特征及坡面生物措施水土流失防控效应[J].生态环境学报,2021,30(1):53-62.
Yang Pingping, Li Yong, Song Tao, et al. Characteristics of erosive rainfall patterns and benefit of soil and water conservation for biological measures on slope in Karst region [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021,30(1):53-62.

[8] Vásquez-Méndez R, Ventura-Ramos E, Oleschko K, et al. Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid central Mexico [J]. Catena, 2010,80(3):162-169.

[9] Mongil-Manso J, Navarro-Hevia J, San Martín R. Does forest restoration influence soil infiltrability? A case study in the restored woodland of Sierra de Ávila (central Spain) [J]. Journal of Mountain Science, 2021,18(7):1778-1793.

[10] 李华华,张茂省,冯立,等.砒砂岩区水土流失机制及防治措施研究现状与展望[J].西北地质,2023,56(3):109-120.
Li Huahua, Zhang Maosheng, Feng Li, et al. Research status and prospect of soil and water loss mechanism and prevention measures in Pisha sandstone area [J]. Northwestern Geology, 2023,56(3):109-120.

[11] 王愿昌,吴永红,寇权,等.砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J].中国水土保持科学,2007,5(1):14-18.
Wang Yuanchang, Wu Yonghong, Kou Quan, et al. Definition of arsenic rock zone borderline and its classification [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007,5(1):14-18.

[12] 万龙.黄土高原地区53年来降水量时空演变特征分析[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2011.
Wan Long. Spatial and temporal trend of precipitation on the Loess Plateau during the past 53 years [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2011.

[13] 石默杰,杨光,薛艳春,等.黄土丘陵沟壑区降雨特征对不同土地利用类型坡面产流产沙的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(10):101-109.
Shi Mojie, Yang Guang, Xue Yanchun, et al. Effects of rainfall characteristics in loess hilly and gully areas on runoff and sediment production on slopes of different land use types [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2024,52(10):101-109.

[14] 杨振奇,郭建英,秦富仓,等.天然降雨条件下裸露砒砂岩区人工植被的减流减沙效应[J].水土保持研究,2022,29(1):100-104.
Yang Zhenqi, Guo Jianying, Qin Fucang, et al. Effects of artificial vegetation on runoff and sediment reduction by in exposed feldspathic sandstone region under natural rainfall [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(1):100-104.

[15] 郭小雪,田鹏,杜敏,等.黄土高塬沟壑区典型小流域不同雨型水沙关系特征[J].中国水土保持科学,2022,20(6):1-7.
Guo Xiaoxue, Tian Peng, Du Min, et al. Relationship between runoff and sediment under different rainfall patterns in the small watershed on the tableland-gully region of the Loess Plateau [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(6):1-7.

[16] 张志旭,宋孝玉,李蓝君,等.黄土高原沟壑区典型草地小流域水沙特征对不同雨型的响应[J].干旱区资源与环境,2020,34(9):108-115.
Zhang Zhixu, Song Xiaoyu, Li Lanjun, et al. Response of water and sediment characteristics to different rainfall regime in a typical grassland watershed in the gully region of the Loess Plateau [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020,34(9):108-115.

[17] 李静,刘志红,李锐.黄土高原不同地貌类型区降雨侵蚀力时空特征研究[J].水土保持通报,2008,28(3):124-127.
Li Jing, Liu Zhihong, Li Rui. Temporal and spatial characteristics of rainfall erosivity with different geomorphology types on the Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008,28(3):124-127.

[18] 王万忠,焦菊英.黄土高原坡面降雨产流产沙过程变化的统计分析[J].水土保持通报,1996,16(5):21-28.
Wang Wanzhong, Jiao Juying. Statistic analysis on variation of rainfall and runoff-sediment yeild process on slope surface in Loess Plateau region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996,16(5):21-28.

[19] 王承书,高峰,孙文义,等.黄土丘陵沟壑区坡沟系统不同降雨类型的土壤入渗特征[J].生态学报,2021,41(8):3111-3122.
Wang Chengshu, Gao Feng, Sun Wenyi, et al. Rainfall-infiltration process and characteristics of slope-gully system in the hilly and gully region of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(8):3111-3122.

[20] 魏艳红,焦菊英.黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式下小流域侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2021,35(3):96-103.
Wei Yanhong, Jiao Juying. Characteristics of erosion and sediment yield in small watersheds under different land use patterns in hilly and gully region of the Loess Plateau in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(3):96-103.

[21] Zhao Yang, Cao Wenhong, Hu Chunhong, et al. Analysis of changes in characteristics of flood and sediment yield in typical basins of the Yellow River under extreme rainfall events [J]. Catena, 2019,177:31-40.

[22] Morbidelli R, Saltalippi C, Flammini A, et al. Role of slope on infiltration: A review [J]. Journal of Hydrology, 2018,557:878-886.

[23] Bettoni M, Maerker M, Bosino A, et al. Land use effects on surface runoff and soil erosion in a southern Alpine valley [J]. Geoderma, 2023,435:116505.

(下转第96页)