

伊犁河谷不同管理草地产流产沙对降雨与土壤类型的响应

李 政, 胡桂清, 瞿 涛, 张鹤鑫, 张文太, 李燕刚, 艾克拜尔·伊拉洪

(新疆农业大学 新疆土壤与植物生态过程自治区级重点实验室/草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052)

摘 要:为科学防控新疆草地水土流失以及揭示不同草地管理措施的侵蚀调控机理,选取新疆伊犁河谷两种土壤类型(灰钙土、棕红土)草地,于 2019—2020 年监测 4 种坡面管理小区(退化草地、水平沟、增渗孔、枯草覆盖)的产流产沙数据,探讨不同措施的产流产沙规律以及对降雨、土壤类型的响应特征。结果表明:(1)短历时、高强度的偶然性暴雨(C 雨型)是草地水土流失的主导侵蚀性降雨,高降雨量、长历时的大雨(B 雨型)出现频次最多,但对草地水土流失影响最小,连续降雨条件下,即使雨量、雨强(A 雨型)较低,也会对草地造成较大侵蚀;(2)各措施在 C 雨型下的产流产沙量显著高于 A、B 雨型,增渗孔和退化草地在 A 雨型下的平均产流量大于 B 雨型,枯草覆盖和水平沟表现出相反结果,产沙量在不同雨型条件下均为退化草地>增渗孔>水平沟>枯草覆盖;(3)不同措施的侵蚀调控效果因土壤类型而异,枯草覆盖在棕红土草地的减流效果最好,水平沟可更好地削减灰钙土草地产流,各措施在棕红土草地的产沙量均大于灰钙土草地。因此,对退化草地进行辅助管理可有效减缓水土流失,枯草覆盖和水平沟的减流抑沙效果优良,可在新疆草地水土流失防控中推广与应用。

关键词:产流产沙;草地管理措施;降雨类型;土壤类型

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0062-08

Responses of Runoff and Sediment Yield to Rainfall, Soil Types Under Different Managed Grasslands in Yili Valley

LI Zheng, HU Guiqing, QU Tao, ZHANG Hexin, ZHANG Wentai,

LI Yangang, AIKEBAIER Yilahong,

(Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes/College of Grassland and
Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to prevent and control water erosion of grassland in Xinjiang and reveal the erosion control mechanism of different grassland management measures, we selected two kinds of soil (gray calcareous soil, brown-red soil) grasslands in Yili Valley of Xinjiang, and measured runoff and sediment yields of four management measures (degraded grassland, level trench, infiltration hole and grass mulching) from 2019 to 2020. The characteristics of runoff and sediment yield and responses to rainfall, soil types under different measures were discussed. The results showed that: (1) short duration and high intensity occasional rain-storm (C-type rainfall) was the dominant erosive rainfall of grassland erosion; the frequency of heavy rain (B-type rainfall) with high rainfall and long duration was the most, but it had the least impact on soil erosion; under the condition of continuous rainfall, even if the rainfall and rainfall intensity (A-type rainfall) were low, the grassland could be seriously eroded; (2) the runoff and sediment yield of each measure under C-type rainfall was significantly higher than that of A-type and B-type rainfalls; the average runoff yield of infiltration hole and degraded grassland under A-type rainfall was higher than that of B-type rainfall, while the results of grass mulching and level trench were opposite; the order of sediment yield was degraded grass-

收稿日期:2021-07-11

修回日期:2021-08-08

资助项目:国家自然科学基金项目(41761059);自治区科技援疆计划项目(2020E0205);南京农业大学—新疆农业大学联合资助项目(KYYJ201903)

第一作者:李政(1994—),男,山西临汾人,博士研究生,研究方向为水土保持与生态恢复。E-mail:liz_94@163.com

通信作者:胡桂清(1982—),女,山东省泰安人,讲师,主要从事水肥资源高效利用、旱区集水农业研究。E-mail:gqhu@163.com

land>infiltration hole>level trench>grass mulching under any rainfalls; (3) the erosion control effect of different measures varied with different soil types, the runoff reduction effect of grass mulching on brown-red soil grassland was the best, and level trench reduced runoff yield of gray calcareous soil grassland better; the sediment yield of each measure in brown-red soil grassland was greater than that in gray calcareous soil grassland. Therefore, the auxiliary management of degraded grassland can effectively reduce soil and water loss. The effect of reducing runoff and sediment is excellent in grass mulching and level trench, which can be popularized and applied in the prevention soil and water loss of grassland in Xinjiang.

Keywords:runoff and sediment yield; grassland management measures; rainfall types; soil types

新疆是我国五大牧区之一,受气候变化、超载过牧等影响,全区 30% 以上的草地出现不同程度退化^[1],面临严重水土流失。据统计,新疆草地侵蚀面积已达到 26.5 万 km²,占全区水土流失总面积的 1/3^[2]。由于新疆地处内陆干旱区,草地生态系统十分脆弱,水土流失将进一步加剧草地退化,降低草地生产力与载畜能力,造成土地荒漠化,进而威胁生态安全,制约社会经济的可持续发展。因此,草地水土流失的防治工作对实现区域绿色发展显得迫切而重要。

新疆水土流失的研究起步较晚、工作基础相对薄弱^[3]。先前研究表明坡面整地^[4](如水平沟、鱼鳞坑)、覆盖^[5]、地表植被调控等^[6]一系列措施可有效减缓新疆草地的水土流失,但研究手段大多基于模拟降雨试验,缺乏自然观测及验证。仅有少数研究采用径流小区对坡面水土流失进行观测,但也只是着重关注侵蚀的时间动态变化^[7-8]。不同管理措施在自然条件下产流产沙过程和侵蚀调控机制尚不清楚,仍需掌握更多实测资料进行进一步的探究。相比于模拟降雨单一的降雨条件,自然降雨更加复杂多变,降雨类型呈多样化。已有众多学者证实,不同降雨的雨量、强度及降雨历时等因子差异会显著影响坡面产流产沙规律^[9-11]。不同管理措施对坡面侵蚀的调控机理不一,其产流产沙对不同降雨类型的响应特征存在差异^[12-13]。除降雨因子外,土壤作为降雨的承受体,土壤质地、结构会直接影响土壤入渗性能与抗蚀性,进而影响坡面侵蚀过程。Wawer 等^[14]比较了 9 种土壤质地类型的草地侵蚀过程,证明土壤质地差异可显著影响草地侵蚀强度。郑鹏^[15]采取模拟降雨研究褐土和棕壤的侵蚀特征,发现土壤类型对坡面产沙量影响程度甚至大于降雨强度。此外,水土保持措施的作用

效果也会因土壤不同而发生变化^[16-17]。新疆干旱少雨的气候及脆弱的地表条件,致使草地坡面水土流失过程与规律明显区别于其他地区,研究不同坡面管理措施的产流产沙调控规律以及对不同降雨、土壤的响应特征,对于区域水土保持措施科学布控以及进一步揭示不同措施的侵蚀调控机理等具有实际意义。

鉴于此,本研究以新疆水土流失最为严重的伊犁河谷草地为研究对象,于 2019—2020 年监测 4 种坡面管理措施下的草地产流产沙规律以及对不同降雨条件的响应特征,为提高措施的可推广性,进一步通过 2 种土壤类型测试不同措施的水土流失阻控效应,以期为新疆草地水土流失防控以及生态恢复提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于伊宁市北部丘陵带(81°03′—81°18′ E, 43°57′—44°08′ N),海拔 700~1 180 m,属于温带大陆性气候,年平均气温 9.4℃,年平均日照时数 2 870 h,年蒸发量达 1 600 mm,但年均降水量仅 230~450 mm,且主要集中于 4—7 月。草地是该区主要的土地利用类型,由于对草地资源的过度开发及利用,草地出现大幅度退化,水土流失极为严重。研究区主要土壤类型为灰钙土和棕红土,灰钙土由第四纪黄土母质发育而来,分布区域广泛。棕红土发育在第三纪砂页岩红土母质上,埋藏于灰钙土及各类疏松堆积物下,经地质作用及外力侵蚀后棕红土土层出露地表^[18]。相比于灰钙土,棕红土分布比较零散,分布面积也小于灰钙土。两种土壤的成土母质不同,土壤理化性质(表 1)及地表植被存在较大差异。

表 1 表层 0—20 cm 土壤理化性质

| 土壤 类型 | 容重/ (g·cm ⁻³) | 砂粒 (0.05~2 mm)/% | 粉粒 (0.002~0.05 mm)/% | 黏粒 (<0.002 mm)/% | pH | 有机质/ (g·kg ⁻¹) | 电导率/ (μS·cm ⁻¹) |
|----------|------------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|------|-------------------------------|--------------------------------|
| 灰钙土 | 1.13 | 29.8 | 47.9 | 22.3 | 8.58 | 15.6 | 121 |
| 棕红土 | 1.51 | 21.3 | 33.5 | 45.2 | 8.38 | 20.3 | 568 |

1.2 径流小区布设

在灰钙土、棕红土地上各设置 4 个径流小区(2 m×8 m),分别采用退化草地、增渗孔、枯草覆盖、水平沟等 4 种坡面管理措施(表 2)。8 个小区坡度相同,约为 13°,坡位均处于上坡位。灰钙土草地主要植物为伊犁绢蒿

(*Seriphidium transiliense*),覆盖度为 20%~40%,棕红土草地主要植物为猪毛菜(*Salsola affinis*),覆盖度为 5%~20%。各小区均用混凝土板与周边隔绝,小区底部设有捕获径流的集流槽,集流槽下部连接有大型集流桶以承接各小区产生的径流。

表 2 不同坡面管理措施说明

| 管理措施 | 说明 |
|------|--|
| 退化草地 | 坡面不做任何干扰,维持草地点状 |
| 枯草覆盖 | 在小区覆盖干枯的秸秆、稻草,覆盖度为 70%,覆盖量为 200 g/m ² |
| 水平沟 | 在小区内布设 3 条间隔均匀的横沟,沟深 20 cm,宽 15 cm,并在沟下沿筑 10 cm 高的低垄 |
| 增渗孔 | 与水平沟对应位置,竖直向下交错开凿两排间距 20 cm,直径 5 cm,深 15 cm 的孔洞 |

1.3 研究方法

本研究于 2019—2020 年用小型气象站记录次降雨的雨量、历时等参数信息。当同一日内出现两次及多次降雨时,两场降雨时间间隔若小于 6 h,记为一次降雨,大于 6 h 则记为多次降雨。在次降雨过程中,坡面产生径流且发生土壤侵蚀,视该次降雨为一次侵蚀性降雨。在降雨产流后,用量筒精确测量集流桶中的径流体积,径流体积除以小区面积可计算出小区径流深,见公式(1):

$$R=\frac{V}{S}$$

(1)

式中: R 为径流深(mm); V 为集流桶收集的径流体积(L); S 为小区面积(m²)。

将集流桶中径流混匀,收集 3 份 50 ml 的径流样品,通过烘干法测定径流中的泥沙含量,根据公式(2)将测得的含沙量与总径流体积相乘获取次降雨的土壤侵蚀量。

$$E=V\times\frac{C}{S}$$

(2)

式中: E 为土壤侵蚀量(t/km²); C 为径流的泥沙含量(g/L); V 为径流体积(L); S 为小区面积(m²)。

1.4 数据处理

用 Excel 2016 对数据进行汇总整理,在 SPSS

22.0 中用系统聚类结合 K-均值聚类对所有侵蚀性次降雨进行雨型划分,采用方差分析对分类结果进行显著性检验,通过 Pearson 相关分析对降雨因子和各径流小区产流产沙的关系进行分析。

2 结果与分析

2.1 3 种降雨类型划分及其参数特征

2019—2020 年累计 73 场降雨,侵蚀性降雨仅 15 场,占比 20.54%。选取次降雨的降雨量、降雨历时以及平均雨强作为分类参数,将所有侵蚀性降雨分为 3 类(表 3):A 雨型(低降雨量、较长降雨历时、低雨强),B 雨型(高降雨量、长降雨历时、低雨强),C 雨型(高降雨量、短降雨历时、高雨强)。经显著性检验,3 种雨型间的降雨量、降雨历时以及平均雨强均在 $p<0.01$ 水平上差异显著,达到分类要求。由于新疆降水稀缺,使得侵蚀性降雨的降雨频次、降雨量、平均雨强等特征均远小于我国其他地区,这也说明新疆降雨对草地的水土流失影响具有其独特的地域性特点。A 雨型的平均降雨量虽然仅有 5.47 mm,根据新疆降雨标准划分^[19],却达到中雨标准,B 雨型为大雨标准,C 雨型达到暴雨标准。伊犁河谷侵蚀性降雨主要以 B 雨型的形式出现,占总频次的 50%以上,C 雨型出现频次最低,仅为每年一次的频率。

表 3 3 种降雨类型的参数特征

| 雨型 | 平均 降雨量/mm | 平均 历时/h | 平均雨强/ (mm·h ⁻¹) | 前 48 h 累积 降雨量/mm | 频次/次 | 占总场次 比重/% |
|------|--------------|-------------|--------------------------------|---------------------|------|--------------|
| A 雨型 | 5.47±1.73c | 6.62±2.71b | 0.73±0.31b | 6.04±1.01a | 5 | 30.00 |
| B 雨型 | 9.01±1.31b | 10.68±1.82a | 0.90±0.38b | 1.55±1.15b | 8 | 56.67 |
| C 雨型 | 15.20a | 2.81c | 5.47a | 3.71b | 2 | 13.33 |

注:小写字母表示不同雨型间差异在 $p<0.05$ 水平上显著。

2.2 不同坡面管理小区的累积产流、产沙特征

对比各小区的总产流产沙量,通过枯草覆盖、水平沟以及增渗孔对坡面进行管理可有效减缓草地水土流失(表 4)。枯草覆盖的减流减沙效果最优,可使累积

径流量减少 73.47%~81.16%,累积土壤侵蚀量减少 90.11%~96.99%,其次为水平沟,累积减流减沙效益分别在 65.91%~77.02%,74.19%~74.72%,效果最弱的增渗孔,也可使累积产流产沙量分别降低 20.77%~

37.43%,23.67%~27.43%。因土壤类型不同,各管理措施的水土保持效果有所差异。灰钙土草地各措施累积减流效益呈水平沟>枯草覆盖>增渗孔,棕红土草地呈枯草覆盖>水平沟>增渗孔。在灰钙土草地上,增渗孔

和水平沟的径流深小于二者在棕红土的径流深,退化草地和枯草覆盖则表现出相反结果。各管理措施在两种土壤的减沙效果均为枯草覆盖>水平沟>增渗孔,且棕红土草地的累积产沙量均大于灰钙土草地。

表 4 各径流小区累积径流深、土壤侵蚀量

| 土壤类型 | 管理措施 | 产流次数 | 累积径流深/mm | 减流效益/% | 累积土壤侵蚀量/(t·km ⁻²) | 减沙效益/% |
|------|------|------|----------|--------|-------------------------------|--------|
| 灰钙土 | 退化草地 | 15 | 5.05 | — | 47.32 | — |
| | 增渗孔 | 14 | 3.16 | 37.43 | 36.12 | 23.67 |
| | 水平沟 | 14 | 1.16 | 77.02 | 11.96 | 74.72 |
| | 枯草覆盖 | 14 | 1.34 | 73.47 | 4.68 | 90.11 |
| 棕红土 | 退化草地 | 15 | 4.43 | — | 257.73 | — |
| | 增渗孔 | 14 | 3.51 | 20.77 | 187.04 | 27.43 |
| | 水平沟 | 13 | 1.51 | 65.91 | 66.53 | 74.19 |
| | 枯草覆盖 | 13 | 0.83 | 81.16 | 7.76 | 96.99 |

2.3 降雨类型对各管理小区总产流深及侵蚀量的影响程度

不同雨型对坡面累积产流产沙量的贡献程度因坡面管理措施而异,总体而言,雨型对各小区径流深的贡献程度均为 C 雨型>B 雨型>A 雨型,对总侵蚀量的贡献程度有所变化,呈现出 C 雨型>A 雨型>B 雨型。

C 雨型仅占总侵蚀性降雨场次的 13.33%,但对研究区草地的累积产流量、产沙量的贡献程度分别达到 44.63%~62.18%,48.25%~75.38%。由此可见,虽然 C 雨型出现频率最低,却对伊犁河谷草地侵蚀

作用最为剧烈,在水土保持以及防洪减灾工作中应重点防范。

相反,出现频率最高的 B 雨型,对总径流深的贡献程度仅次于 C 雨型,而对草地总侵蚀量的贡献率仅在 13.37%~22.08%。

A 雨型降雨量低,对径流深贡献程度较小,但依旧产生较大的土壤侵蚀量。除此之外,C 雨型对棕红土草地侵蚀量的贡献程度明显高于灰钙土草地,而 B 雨型的贡献程度却低于灰钙土草地,A,B,C 这 3 种雨型对两种土壤草地侵蚀的影响程度表现出较大差异性(图 1)。

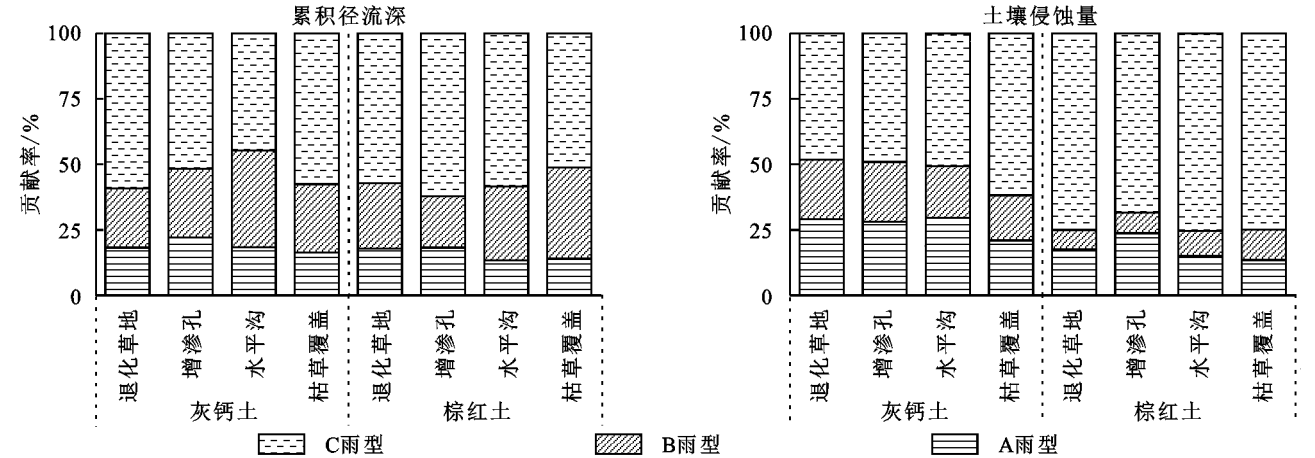


图 1 不同雨型对于各径流小区累积径流深、土壤侵蚀量贡献率

2.4 不同雨型下各径流小区平均产流产沙特征

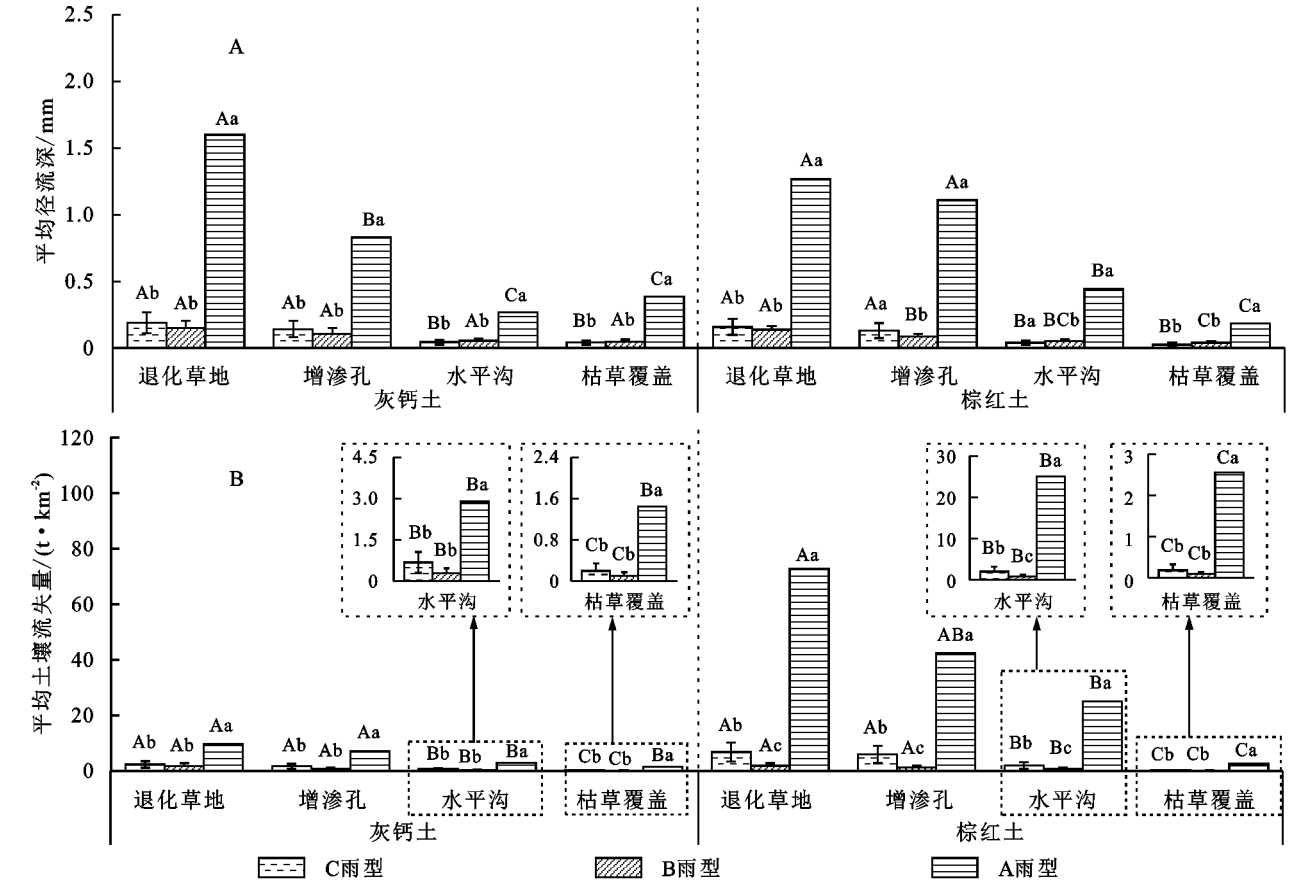
不同措施的产流规律对降雨、土壤类型的响应程度存在差异(图 2A)。C 雨型下的各小区的平均产流量显著高于 A,B 雨型,增渗孔和退化草地在两种土壤草地上均表现为 A 雨型>B 雨型,而水平沟和枯草覆盖表现为 B 雨型>A 雨型,说明不同措施对径流调控能力因雨型而发生变化。无论何种雨型,增渗

孔、水平沟以及枯草覆盖相较于退化草地均起到较好的减流作用。在 A,B 雨型条件下,各措施的平均径流深呈退化草地(0.14~0.19 mm)>增渗孔(0.09~0.14 mm)>水平沟(0.04~0.06 mm)>枯草覆盖(0.03~0.05 mm),灰钙土草地平均产流量大于棕红土草地。C 雨型条件下,各措施在棕红土草地平均产流量排序无变化,均为退化草地(1.27 mm)>增渗孔

(1.11 mm) > 水平沟 (0.44 mm) > 枯草覆盖 (0.18 mm), 在灰钙土草地却呈退化草地 (1.60 mm) > 增渗孔 (0.83 mm) > 枯草覆盖 (0.39 mm) > 水平沟 (0.27 mm)。增渗孔和水平沟对灰钙土草地径流的调控能力优于棕红土草地, 这也使二者在 C 雨型条件下产流量均小于棕红土草地。

相较于产流过程, 各措施产沙量的变异趋势相对较小 (图 2B), 平均土壤侵蚀量从大到小依次呈退化

草地 (2.31 ~ 72.67 t/km²) > 增渗孔 (0.73 ~ 42.32 t/km²) > 水平沟 (0.28 ~ 25.08 t/km²) > 枯草覆盖 (0.10 ~ 2.56 t/km²), 棕红土草地的产沙量均大于灰钙土草地, 在 C 雨型下尤为明显。不同雨型下, 各措施的土壤侵蚀量依旧是 C 雨型最大, 其次为 A 雨型、B 雨型。A、B 雨型的产沙量在灰钙土草地上相差较小, 而 A 雨型对棕红土草地的侵蚀量明显高于 B 雨型。



注: 相同土壤草地上, 不同大写字母表示同一雨型条件下不同措施间产流量或产沙量差异在 $p < 0.05$ 水平上显著; 不同小写字母表示相同措施下不同雨型间产流量或产沙量的差异在 $p < 0.05$ 水平上显著。

图 2 不同雨型下各径流小区平均产流量、产沙量

2.5 降雨参数与各径流小区产流产沙的相关关系

不同径流小区的产流产沙对各降雨参数的响应特征表现出不同的结果 (表 5)。综合所有因子可发现, 雨强是驱动坡面侵蚀的主控因子, 与各小区径流及泥沙量均达到极显著相关水平 ($p < 0.01$)。降雨量与降雨历时也对小区产流产沙起重要作用, 降雨量对于棕红土草地各小区产沙的影响程度大于灰钙土草地, 且均达到极显著水平 ($p < 0.01$), 前 48 h 累积降雨量对坡面侵蚀的影响最小。灰钙土草地上, 除水平沟外其余小区的径流深与土壤侵蚀量的相关性均达到显著水平 ($p < 0.05$), 棕红土草地仅枯草覆盖小区的径流量与泥沙量达到极显著相关 ($p < 0.01$)。由此可见,

草地坡面产流产沙关系受土壤类型、管理措施及降雨因子等共同驱动, 致使各小区的水沙关系相对复杂, 径流深对土壤侵蚀量的影响程度存在差异。

3 讨论

3.1 不同坡面管理措施对草地产流产沙的调控效果

不同管理措施对坡面的侵蚀调控原理不一, 直接影响各小区水土流失程度。不加以对坡面进行干预, 退化草地对径流及泥沙的调控能力最弱, 水土流失严重。水平沟和增渗孔主要通过人为扰动地表微地形条件, 增加地表粗糙度, 改善表层土壤的结构与水力学性质, 强化径流下渗, 使坡面实现就地蓄水拦沙。先前有

研究表明,水平沟可以显著提高草地坡面的入渗速率,将入渗量提高 5 倍以上,大幅度削减坡面径流与泥沙的流失速率^[4,20-21]。本研究中,水平沟的“沟—垄”结构相比增渗孔分散的孔洞可以更好地捕获坡面径流,减流减沙效益也明显优于增渗孔。覆盖是一项侵蚀防控效果极佳的管理措施,广泛应用于世界各地^[22]。坡面侵蚀过

程中,覆盖物通过吸收径流的动能,延长径流在坡面的滞留时间,增加径流的下渗量,同时粘滞径流中携带的少许泥沙,达到减流抑沙效果。在本研究区,地表植被状况较差,相比其他措施,枯草覆盖有效避免雨滴直接落入地表,同时未对地表土壤造成扰动,减弱雨水和径流对坡面的侵蚀力,减沙效果最优。

表 5 各径流小区产流产沙规律与降雨参数的相关性

| 土壤类型 | 管理措施 | 侵蚀参数 | 降雨量 | 历时 | 平均雨强 | 前 48 h 累积降雨量 | 径流深 |
|------|------|-------|----------|-----------|----------|--------------|----------|
| 灰钙土 | 退化草地 | 径流深 | 0.472 | -0.536 * | 0.872 ** | -0.051 | — |
| | | 土壤流失量 | 0.413 | -0.524 * | 0.761 ** | -0.098 | 0.812 ** |
| | 增渗孔 | 径流深 | 0.541 * | -0.535 | 0.875 ** | 0.011 | — |
| | | 土壤流失量 | 0.473 | -0.534 | 0.791 ** | -0.111 | 0.739 ** |
| | 水平沟 | 径流深 | 0.789 ** | -0.400 | 0.799 ** | 0.143 | — |
| | | 土壤流失量 | 0.282 | -0.488 | 0.700 ** | -0.103 | 0.321 |
| | 枯草覆盖 | 径流深 | 0.576 * | -0.510 | 0.905 ** | 0.050 | — |
| | | 土壤流失量 | 0.680 ** | -0.473 | 0.776 ** | 0.186 | 0.638 * |
| | 退化草地 | 径流深 | 0.443 ** | -0.556 * | 0.861 ** | -0.034 | — |
| | | 土壤流失量 | 0.708 ** | -0.410 * | 0.706 ** | 0.240 | 0.356 |
| 棕红土 | 增渗孔 | 径流深 | 0.394 | -0.569 | 0.838 ** | -0.041 | — |
| | | 土壤流失量 | 0.705 ** | -0.433 | 0.726 ** | 0.242 | 0.407 |
| | 水平沟 | 径流深 | 0.452 | -0.504 | 0.837 ** | -0.113 | — |
| | | 土壤流失量 | 0.719 ** | -0.442 | 0.754 ** | 0.223 | 0.341 |
| | 枯草覆盖 | 径流深 | 0.747 ** | -0.245 | 0.714 ** | 0.102 | — |
| | | 土壤流失量 | 0.700 ** | -0.543 ** | 0.940 ** | 0.107 | 0.796 ** |

注: * 表示在 $p<0.05$ 水平上显著, ** 表示在 $p<0.01$ 水平上显著。

3.3 各径流小区产流产沙规律对降雨类型的响应

降雨类型显著影响各管理小区的产流产沙规律,与其他学者在东北黑土区、黄土高原及喀斯特丘陵带等地区的研究结果相似^[10-11,23],短历时、高强度的降雨是各小区水土流失的主导侵蚀性降雨类型。C 雨型的雨量、雨强标准均小于我国其他地区,但由于草地退化,坡面植被稀疏,土壤渗透性和抗蚀性较差,脆弱的下垫面难以承受短时强降雨带来的破坏,造成严重的水土流失。在 A、B 雨型下,虽然水平沟和增渗孔在灰钙土草地的平均径流深大于棕红土草地,但二者在 C 雨型条件下大幅削减了灰钙土草地产流,使总径流深小于棕红土草地。B 雨型出现频次占总侵蚀性降雨场次的 56.67%,对各小区总径流深的贡献程度仅次于 C 雨型。本研究中,B 雨型的雨量达到新疆大雨标准,由于降雨历时较长,雨强较小,对土壤颗粒的打击、分离能力较弱,进而导致较低的土壤侵蚀量。A、B 雨型的区别在于 A 雨型的前期降雨量较高,前期的降水直接提高草地的雨前土壤含水量。干旱区坡面产流对于雨前土壤含水量变化极为敏感,当

土壤处于湿润状态时,即使降雨强度较小,也容易发生水土流失^[24-25]。A 雨型的降雨量低于 B 雨型,但受雨前土壤含水量驱动,退化草地和增渗孔在 A 雨型的平均径流深均大于 B 雨型。水平沟和枯草覆盖的侵蚀调控能力显著优于退化草地和增渗孔,减弱土壤含水量对产流的影响,二者表现为 A 雨型的平均产流小于 B 雨型。前期土壤含水量通过影响产流过程间接影响产沙外,还会直接降低土壤抗蚀性^[26],各小区的土壤侵蚀量均表现为 A 雨型高于 B 雨型。草地坡面的产流产沙特征与前 48 h 累积降雨量相关性较差,可能原因是雨前土壤含水量对坡面侵蚀的作用受雨强及管理措施等因子的共同驱动而减弱^[23,27]。

3.2 各径流小区产流产沙规律对土壤类型的响应

两种土壤草地的产流产沙规律存在明显差异性,其原因是降雨过程中两种土壤因质地、结构差异而产生的结皮特点不同,进而引起侵蚀过程发生差异。黏粒含量高的土壤,土壤中胶结物质含量较高,易形成大团粒结构,土壤结构相对稳定,从而抑制降雨过程中结皮的发育^[28-29]。灰钙土土壤颗粒多粉砂,黏粒含

量是仅为棕红土的1/2,降雨过程中灰钙土比棕红土更易形成结皮,进而提高坡面产流量,坡面产沙容易受径流驱动,这也使灰钙土草地侵蚀量与径流深相关性显著(除水平沟外)。在侵蚀过程中,棕红土不易形成地表结皮,地表可侵蚀、搬运的土壤颗粒多于灰钙土。棕红土的产流虽小于灰钙土,但径流的挟沙量却大于灰钙土坡面,且径流会优先富集细颗粒^[30],造成灰钙土比棕红土易产流,棕红土比灰钙土易产沙的结果。徐铭泽等^[31]对不同母质红壤产流产沙特征的研究表明,质地偏粉砂的花岗岩红壤产流量大,而质地黏重的第四纪红壤产沙量大,该结果与本研究相似。两种土壤的侵蚀过程与机制不同,直接导致各措施在两种土壤草地的作用效果也存在差异。灰钙土草地上,水平沟和增渗孔对坡面进行扰动,打破了坡面土壤结皮,强化地表径流入渗,在C雨型这种高雨强条件下减流效果极为明显。枯草覆盖也可有效抑制产流,由于没有扰动地表,减流效果略弱于水平沟。相反对于土壤结构相对稳定的棕红土草地,水平沟和增渗孔减流效果下降,而枯草覆盖的减流效果依然保持稳定。

4 结论

(1) 短历时、高雨强的C雨型是伊犁河谷草地的主导侵蚀性雨型,对草地的累积侵蚀量贡献率达到48.25%~75.38%。高雨量、长历时的B雨型在伊犁河谷出现频次最多,但对草地侵蚀作用却最小。此外,在连续降雨条件下,即使雨量、雨强(A雨型)较低,也会对草地造成较大侵蚀。

(2) 不同坡面管理措施的径流调控能力因雨型而异,增渗孔和退化草地在A雨型下的平均径流深大于B雨型,枯草覆盖和水平沟表现出相反结果。C雨型下,水平沟在灰钙土草地的减流作用最佳,其次为枯草覆盖和增渗孔;在棕红土草地上,枯草覆盖减流率最高,其次为水平沟和增渗孔。各措施对草地产沙的调控能力比较稳定,平均产沙量均呈退化草地($2.31 \sim 72.67 \text{ t/km}^2$) > 增渗孔($0.73 \sim 42.32 \text{ t/km}^2$) > 水平沟($0.28 \sim 25.08 \text{ t/km}^2$) > 枯草覆盖($0.10 \sim 2.56 \text{ t/km}^2$)。

(3) 灰钙土与棕红土的产流产沙过程和机制不同,各措施的侵蚀调控效果因土壤类型而产生差异。增渗孔和水平沟对灰钙土草地减流效益明显优于棕红土草地,尤其是在C雨型条件下。在棕红土草地上,枯草覆盖的减流效果最好,且棕红土草地各小区的土壤侵蚀量均大于灰钙土草地。

综上所述,对草地坡面进行辅助管理可有效减缓草

地侵蚀强度,各措施的产流产沙规律在不同降雨、土壤条件下存在差异。枯草覆盖和水平沟的对草地侵蚀阻控效应较好,累积减流率分别在73.47%~81.26%和65.91%~77.02%之间,累积减沙率分别在90.11%~96.99%和74.19%~74.72%之间,可在新疆草地水土流失防控以及区域防洪减灾工作中推广和应用。

参考文献:

- [1] 阿依努尔·达吾提,麦麦提敏·乃依木.新疆草地退化现状、原因及防治对策[J].新疆畜牧业,2015(10):18-21.
- [2] 新疆维吾尔自治区水利厅.2019年水土保持公报[EB/OL].(2020-12-23)[2021-7-10] http://slt.xinjiang.gov.cn/slt/zwgk1/list_pd.shtml.
- [3] 何建村,李玉生,洪传勋,等.新疆水土流失特征及其治理模式[J].中国水土保持科学,2013,11(S1):5-13.
- [4] 李晓原,张文太,李建贵,等.伊犁河谷5种土壤管理措施减流减沙效果分析[J].中国水土保持科学,2017,15(3):51-57.
- [5] 苏悦.伊犁河谷草地水土流失特征及水土保持措施研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2018.
- [6] 张少博,李建贵,黄俊华,等.草地覆盖对伊犁河谷地表产流产沙的影响因素分析[J].江西农业大学学报,2016,38(5):995-1001.
- [7] 仲亚婷.植被及土壤类型对坡面产流产沙特征的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2017.
- [8] 郑贵元,张文太,李建贵,等.伊犁河谷不同植被类型的水土保持效果[J].安徽农业科学,2017,45(1):64-66.
- [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] Huo J Y, Yu X X, Liu C J, et al. Effects of soil and water conservation management and rainfall types on runoff and soil loss for a sloping area in North China[J]. Land Degradation & Development, 2020,31(15):2117-2130.
- [11] 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.
- [12] 张真真,单延功,吴明洲,等.南京市丘陵区不同农耕措施水土保持效益[J].水土保持研究,2021,28(1):80-84.
- [13] Chen X A, Liang Z W, Zhang Z Y, et al. Effects of soil and water conservation measures on runoff and sediment yield in red soil slope farmland under natural rainfall[J]. Sustainability, 2020,12(8):3417.
- [14] Wawer R, Nowociei E, Podolski B, et al. Protective role of grassland against soil water erosion caused by extreme rainfall events as compared to black fallow[J].

Journal of Food, Agriculture and Environment, 2013, 11(1):1069-1071.

[15] 郑鹏.降水强度及坡度对不同土壤产流产沙影响[J].水土保持应用技术,2020(4):15-16.

[16] Liao K H, Lv L G, Yang G S, et al. Sensitivity of simulated hillslope subsurface flow to rainfall patterns, soil texture and land use[J]. Soil Use and Management, 2016,32:422-432.

[17] 彭浩,李忠武,刘春,等.湘中低山丘陵区坡面产流输沙对降雨、土壤类型及水土保持措施的综合响应特征[J].水土保持学报,2019,33(2):60-67.

[18] 吴荣镇,权志城.新疆伊犁地区土壤[R].新疆伊宁:伊犁地区土壤土壤普查办公室,1985.

[19] 肖开提·多莱特.新疆降水量级标准的划分[J].新疆气象,2005,28(3):7-8.

[20] 蔡进军,李生宝,蒋齐,等.半干旱黄土丘陵区典型抗旱造林整地技术集流效果研究[J].水土保持研究,2009,16(5):127-130.

[21] 宿婷婷,韩丙芳,马红彬,等.水平沟整地措施对黄土丘陵区草原土壤水分动态平衡的影响[J].农业工程学报,2019,35(21):125-134.

[22] Prosdocimi M, Tarolli P, Cerda A. Mulching practices for reducing soil water erosion;a review[J]. Earth-Science Reviews, 2016,161:191-203.

[23] 何琪琳,李斌斌,张风宝,等.东北黑土区坡耕地土壤侵蚀对影响因素响应的定量分析[J].地理学报,2021,76(5):1218-1230.

[24] Ziadat F M, Taimeh A Y. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment[J]. Land Degradation & Development, 2013,24:582-590.

[25] Zhang Y, Wei H, Nearing M A. Effects of antecedent soil moisture on runoff modeling in small semiarid watersheds of southeastern Arizona[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2011,15:3171-3179.

[26] 胡国锋,王济,蔡雄飞,等.初始含水量对土壤侵蚀的影响研究进展[J].贵州农业科学,2013,41(5):100-103.

[27] 洪雨馨,姚蕊,孙鹏,等.降雨和前期含水量对大别山区不同作物坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):53-59.

[28] 程琴娟,蔡强国,马文军.我国水土流失典型区土壤表土结皮敏感性[J].地理研究,2008,27(6):1290-1298.

[29] 程圣东,李占斌,李强.干热河谷地区土壤物理特性对土壤侵蚀的影响[J].水资源与水工程学报,2008,19(5):38-41.

[30] 杨伟,张琪,李朝霞,等.几种典型红壤模拟降雨条件下的泥沙特征研究[J].长江流域资源与环境,2016,25(3):439-444.

[31] 徐铭泽,杨洁,刘窑军,等.不同母质红壤坡面产流产沙特征比较[J].水土保持学报,2018,32(2):34-39.



(上接第 61 页)

[24] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等.坡面水流速度与坡面含砂量的关系[J].农业工程学报,2011,27(3):73-78.

[25] 王秋霞,丁树文,邓羽松,等.人工模拟降雨下花岗岩崩岗区不同层次土体产流产沙特征[J].水土保持学报,2016,30(6):7-12.

[26] 张光辉,卫海燕,刘宝元.坡面流水动力学特性研究[J].水土保持学报,2001,15(1):58-61.

[27] Ni S M, Zhang D Q, Wen H, et al. Erosion processes and features for a coarse-textured soil with different horizons;A laboratory simulation [J]. Journal of Soils and Sediments, 2020,20(7):2997-3012.

[28] 吴秋菊,吴发启,王林华.土壤结皮坡面流水动力学特征[J].农业工程学报,2014,30(1):73-80.

[29] 崔文滨,李鹏,李占斌,等.径流功率理论在黄土坡面侵蚀产沙计算中的应用[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(9):103-107.

[30] Nearing M A, Bradford J M, Parker S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991,55(2):339-344.

[31] Wirtz S, Seeger M, Zell A, et al. Applicability of different hydraulic parameters to describe soil detachment in eroding rills [J]. Plos One, 2013,8(5):e64861.

[32] 张冠华,胡甲均.径流驱动土壤分离过程的影响因素及机制研究进展[J].水科学进展,2019,30(2):294-304.

[33] 王云琦,王玉杰,张洪江,等.重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响[J].农业工程学报,2006,22(3):40-45.

[34] Su Z L, Zhang G H, Yi T, et al. Soil detachment capacity by overland flow for soils of the Beijing region [J]. Soil Science, 2014,179(9):446-453.

[35] Li Z W, Zhang G H, Geng R, et al. Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China [J]. Biosystems Engineering, 2015,129:248-257.