

# 土壤结皮对乌拉山矿山废弃地客土坡面侵蚀特征的影响

张馨予<sup>1</sup>, 张晓霞<sup>2</sup>, 王冬<sup>2</sup>, 宋俊玲<sup>3</sup>, 崔轻舟<sup>3</sup>, 张泽宇<sup>1</sup>, 裴益乐<sup>1</sup>, 查同刚<sup>1,4</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.中建一局集团第三建筑有限公司,  
北京 100161;3.北京市八达岭林场,北京 102112;4.北京市水土保持工程技术研究中心(北京林业大学),北京 100083)

**摘要:** 土壤结皮对坡面水分入渗及侵蚀产沙具有重要影响,但其具体作用过程和机理尚存在一定争论。以乌拉山矿山废弃地客土坡面为研究对象,采用原位冲刷试验,研究不同坡长(2,4,6,8,10 m)和产流产沙过程中,土壤结皮对径流泥沙的影响。结果表明:(1)2 m 土壤结皮坡面总径流和泥沙量显著增加,分别是对照坡面的 2.17,1.56 倍;4~10 m 土壤结皮坡面总径流量和总泥沙量降低,其中总径流量为对照坡面的 67.17%~78.45%,总泥沙量为对照坡面的 54.53%~83.56%。(2)土壤结皮坡面与对照坡面产流速率随产流时间变化基本一致,呈现波动稳定或略微提高趋势;产沙速率在对照坡面随产流时间呈下降趋势,而在结皮土壤坡面呈现下降与稳定 2 种趋势。(3)累积径流量、累积泥沙量与产流时间关系均可用线性函数和幂函数表达。随产流时间变化,土壤结皮坡面对累积径流量的影响可分为全程提高、全程降低、先提高后降低 3 种类型,对累积泥沙量的影响可分为提高与降低 2 种类型。因此,土壤结皮对坡面产流产沙过程的抑制或促进作用与坡长和侵蚀发生过程密切相关。

**关键词:** 土壤结皮; 矿山废弃地; 坡长; 产流产沙

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2023)05-0024-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.05.003

## Effects of Soil Crusts on Erosion Characteristics of Alien Soil Slope in Mining Wasteland of Wula Mountain

ZHANG Xinyu<sup>1</sup>, ZHANG Xiangxia<sup>2</sup>, WANG Dong<sup>2</sup>, SONG Junling<sup>3</sup>,  
CUI Qingzhou<sup>3</sup>, ZHANG Zeyu<sup>1</sup>, PEI Yile<sup>1</sup>, ZHA Tonggang<sup>1,4</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. The Third Construction Co., Ltd. of China Construction First Group, Beijing 100161; 3. Beijing Badaling Forest Farm, Beijing 102112;  
4. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

**Abstract:** Soil crust has an important influence on water infiltration and erosion sediment production on slope, but its specific process and mechanism are still under debate. In this study, taking the alien soil slope in mining wasteland of Wula Mountain as the research object, the effects of soil crust on runoff and sediment were investigated by in situ scouring tests on the slopes with different slope lengths (2 m, 4 m, 6 m, 8 m and 10 m) and during flow and sand production process. The results showed that: (1) The total runoff and sediment yield on the 2 m slope increased significantly, which were 2.17 and 1.56 times of that on the control slope. The total runoff and sediment yield on the 4 to 10 m slopes decreased, and the total runoff was 67.17% to 78.45% of that on the control slope and the total sediment yield was 54.53% to 83.56% of that on the control slope. (2) The changes of runoff rate with time on the soil crust slope and the control slope were basically the same, showing a fluctuating and stable or slightly increasing trend. The sediment yield rate on the control slope showed a decreasing trend with time, while on the soil crust slope showed two trends of decreasing and stabilizing. (3) The relationship between cumulative runoff, cumulative sediment yield and runoff generation time could be expressed by linear function and power function. With the change of runoff generation time, the effects of soil crust slope on the accumulated runoff volume could be divided into three

收稿日期:2023-02-18

资助项目:中建股份科技研发计划项目“西北地区生态环境保护修复关键技术研究与应用”(CSCEC-2020-Z-5)

第一作者:张馨予(1999—),女,硕士研究生,主要从事土壤退化与生态修复研究。E-mail:Zhang\_xinyu\_9@bjfu.edu.cn

通信作者:查同刚(1972—),男,博士,副教授,主要从事土壤退化与生态修复研究。E-mail: zhtg73@bjfu.edu.cn

types: increase, decrease, increase firstly and then decrease. And the effects on the accumulated sediment yield could be divided into two types: increase and decrease. Therefore, the inhibiting or promoting effect of soil crust on process of runoff and sediment yield on the slope surface was closely related to the slope length and erosion occurrence process.

**Keywords:** soil crusts; mining wasteland; slope length; runoff and sediment yield

土壤结皮多指物理结皮,指在干旱半干旱降雨汇流过程中,由于土壤表面孔隙被堵塞或携沙水流经过时细小颗粒沉积而形成的一层致密硬壳<sup>[1-6]</sup>。土壤结皮改变土壤表面性质,对坡面水分入渗及侵蚀产沙等过程具有重要影响<sup>[7-15]</sup>。

国内外学者做了大量试验,探究土壤结皮对坡面侵蚀过程径流泥沙的作用,但当前尚未形成统一结论。就侵蚀机理而言,土壤结皮对侵蚀产流产沙的影响争议主要体现在提高土壤抗蚀性与增加径流冲刷力之间<sup>[7-8]</sup>。部分研究者<sup>[5,9-12]</sup>认为,土壤结皮形成时通过压实作用使土壤密度提高,形成的土表致密层增强土壤的抗剪切强度,增加土壤抗蚀性,提高土壤颗粒分离的难度,在冲刷与溅击条件下土壤结皮使土壤流失量减小。也有研究者<sup>[5,13-14]</sup>认为,土壤结皮的存在使坡面下渗速率急剧减小,产流大幅增加,引起强烈冲刷的同时进一步改变径流的水动力学参数,使径流对土壤的剪切与搬运能力上升,导致有结皮坡面的径流泥沙量均大幅提高。目前的研究结果表明,土壤结皮坡面相较于无结皮坡面,增加产流抑制产沙<sup>[4]</sup>、降低产流抑制产沙<sup>[15]</sup>、增加产流提高产沙<sup>[14]</sup>等现象均有发生;也有研究<sup>[2,6]</sup>发现,土壤结皮对坡面产流影响并不显著,对产沙作用明显;高燕等<sup>[6]</sup>研究指出,土壤结皮对产流产沙的抑制或促进作用影响无法单纯定论,需要考虑具体试验条件以及结皮在侵蚀中的被破坏程度。

客土覆盖是矿山废弃地生态修复广泛采用的有效手段,具有改良区域土壤性质、稳定边坡以及促进

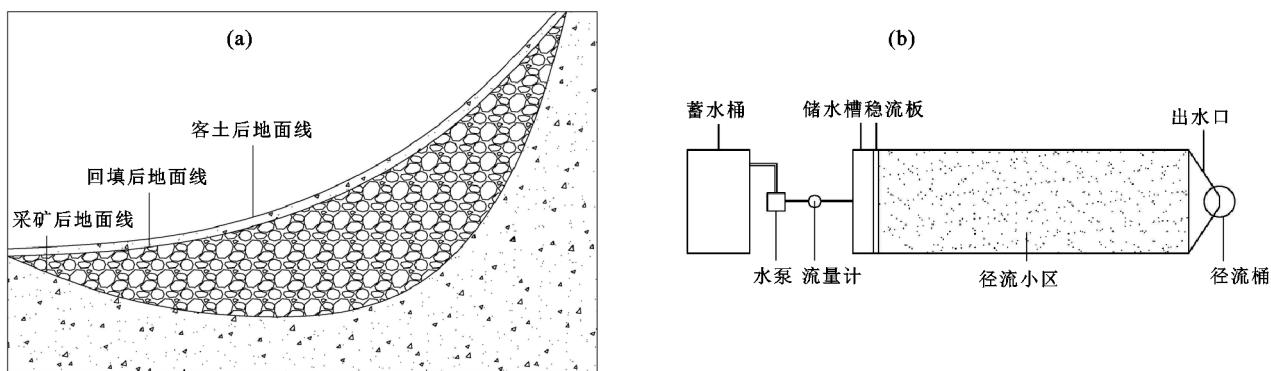
植被恢复等效益<sup>[16]</sup>。但由于我国矿山废弃地多处于西北干旱半干旱区域,该地区生态恢复过程较长,无表面防护的松散堆积客土,极易在短时强降雨作用下发生流失<sup>[17-18]</sup>。土壤结皮是干旱半干旱区裸露客土普遍存在的现象。土壤结皮对土壤侵蚀的作用过程及其机理,已经成为客土流失防治时亟需解决的实际问题。

本研究基于矿山废弃地坡面整治标准,通过结皮坡面和未结皮对照坡面的径流小区冲刷试验,对比分析不同坡长和产流阶段,土壤结皮对坡面产流产沙过程的影响,意在探究干旱半干旱地区土壤结皮对侵蚀过程的作用及其机理,预期可为该区域矿山废弃地客土坡面水土流失防治和生态恢复效果提升提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗( $40^{\circ}45'26''N, 108^{\circ}46'18''E$ ),属于大陆性季风气候,年均气温约 $8.4^{\circ}C$ ,年均降水量约215 mm,降雨主要集中在夏季。乌拉山矿山废弃地是当地“山水林田湖草”生态保护修复工程重点治理区域之一。客土覆盖为坡面整治措施中的一项关键步骤,土源取自矿山采坑处,覆土厚度大于30 cm,土壤质地为砂壤质,土壤有机碳含量约0.66%。矿山采坑回填、覆土后多形成“碗底状”大面积凹形汇流区(图1),客土流失风险严重。该气候环境条件下雨季降雨过后常形成土壤结皮。



注:(a)为废弃矿山治理坡面横截面图;(b)为客土坡面径流小区设置。

图1 废弃矿山地形及径流小区设置示意

### 1.2 径流小区与试验设计

试验于2021年8月进行,坡长依照前期外业调查

及相关坡面整治标准,试验选取坡度为 $20^{\circ}$ ,设置宽1 m,长2,4,6,8,10 m径流小区开展试验。试验设置土壤结

皮坡面组与未结皮坡面对照组,每组设置相同 2 个径流小区进行重复试验,总共布设 20 个径流小区,进行冲刷试验 20 场,数据分析取平均值。依据研究区历史降雨数据设计冲刷流量及产流时间,单位面积设计冲刷流量相当于 60 mm/h 降雨量,2,4,6,8,10 m 坡长径流小区冲刷流量分别为 2,4,6,8,10 L/min<sup>[19-20]</sup>,产流时间设计为 25 min。

表 1 结皮与对照坡面径流小区土壤性质

坡面类型	土壤密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	产流含水率/%
对照坡面	1.26	4.22	28.70	67.05	29.40
结皮坡面	1.32	3.47	24.77	71.76	23.88

注:产流含水率为表层 5 cm 土壤总体含水率。

各径流小区采用储水槽与溢流板,使水流蓄水后呈平面溢出,在径流小区底端设置出水口并挖深坑放置径流桶用以泥沙取样,使用蓄水桶、水泵与流量计供水与控制流量。试验过程中控制流量误差在±5%以内。

### 1.3 样品采集与处理

自产流开始,使用取样瓶每 2.5 min 进行 1 次泥沙样品收集,产流最初 2.5 min 进行 2 次取样。径流量与泥沙量使用天平称量以及烘干法进行处理测定。坡面土壤密度与饱和含水率利用环刀法测量,机械组成利用马尔文激光粒度分析仪测量。

### 1.4 数据计算与分析

$$Q_i = \frac{M_i - m_i}{\rho} \quad (1)$$

$$M_S = \sum_{i=1}^n m_i * \frac{T_i}{t_i} \quad (2)$$

$$M_Q = \sum_{i=1}^n Q_i * \frac{T_i}{t_i} \quad (3)$$

式中: $Q_i$  为第  $i$  次取样中径流体积(L); $m_i$  为第  $i$  次取样烘干后泥沙质量(kg); $M_i$  为第  $i$  次取样泥沙样品总质量(kg); $\rho$  为水密度(kg/L); $M_S$  为累积泥沙量(kg); $n$  为取样次数; $T_i$  为第  $i$  次取样所代表时间; $t_i$  为第  $i$  次取样时间; $M_Q$  为累积径流量(L)。

采用 SPSS 25 软件进行试验数据分析,Origin 2023 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤结皮对坡面总径流泥沙量的影响

试验条件下,结皮坡面与对照坡面径流泥沙量均随坡长的增加而升高,土壤结皮对坡面径流泥沙量的影响可分为提高与降低 2 种类型,其在不同坡长具有差异(图 2)。坡长为 2 m 时,结皮坡面总径流量与总泥沙量分别为 14.17 L 与 2.23 kg,分别是对照坡面的 2.17,1.56 倍,土壤结皮使坡面产流产沙增加。坡长为 4~10 m 时,结皮坡面相对对照坡面产生的径

试验前,对所有径流小区进行翻耕与整平,并依照区域坡面地形进行还原。采用均匀浇水模拟降雨超过 18 mm<sup>[21]</sup> 后自然风干稳定 3 天,依此进行 2 个周期,确保坡面土壤结皮的形成,对照组不做处理。每次冲刷试验前采用均匀洒水至即将产流的方式控制土壤表面达到含水率饱和,结皮与对照坡面径流小区土壤性质见表 1。

流泥沙量减小,其差值随坡长的增加而增大。当坡长由 4 m 增加到 10 m,结皮坡面总径流量由 17.94 L 提高到 58.45 L,分别为相同坡长对照坡面的 73.35%,78.45%,67.17% 和 73.41%,同时总泥沙量由 6.56 kg 提高至 24.35 kg,分别为相同坡长对照坡面的 74.32%,83.56%,66.76% 和 54.53%。可见,在 4~10 m 坡面,土壤结皮对坡面的减沙效益随坡长的增加而提高,而减流效益差异不大。

回归分析表明,结皮坡面总径流量与总泥沙量均随坡长的增加而线性增加,计算公式为:

$$Q = 10.72L - 1.06 \quad (R^2 = 0.92) \quad (4)$$

$$S = 5.86L - 3.80 \quad (R^2 = 0.98) \quad (5)$$

式中: $Q$  为总径流量(L); $S$  为总泥沙量(kg); $L$  为坡长(m)。

结皮坡面与对照坡面总泥沙量与总径流量比值随坡长增加先增大后减小,最大值出现在 8 m(图 2)。土壤结皮对坡面总泥沙径流量比值的影响随坡长的变化有所不同,2,4,6,8,10 m 结皮坡面总泥沙量与总径流量比值分别为对照坡面的 79.69%,102.59%,107.50%,99.47%,74.38%。结皮坡面总泥沙量与总径流量比值在 2,10 m 小于对照坡面,在 4,6 m 坡面大于对照坡面,在 8 m 坡面差异较小。

### 2.2 土壤结皮对坡面产流产沙速率的影响

坡面产流产沙速率变化直观表现径流泥沙在不同时间对坡面侵蚀要素的响应,不同坡面产流速率、产沙速率随产流时间的变化见图 3 和图 4。

结皮坡面与对照坡面产流速率均随坡长增加而总体提高,随产流时间整体呈现小幅波动或轻微升高趋势(图 3)。较长坡面如 8,10 m 坡面产流速率波动性大于坡长较小的 2,4,6 m 坡面。除 8 m 对照坡面产流率由于前期波动较大总体呈下降趋势以外,结皮坡面与对照坡面最终产流速率相对初次产流速率分别提高 0.01~0.88,0.23~0.87 L/min。产沙速率在结皮坡面与对照坡面随时间变化趋势有所不同

(图4)。对照坡面产沙速率随时间呈下降趋势,坡长越长,下降幅度越大且波动性越强。不同坡长对照坡面最终产沙速率相较于初次下降 $0.02\sim1.58\text{ kg/min}$ ,为初次产沙速率的 $25.29\%\sim62.16\%$ 。结皮坡面产沙速率趋势可分为2种情况。其中,2,6,10 m坡面产沙速率随时间呈下降趋势,最终产沙速率相对初

次分别下降 $0.10,0.35,0.42\text{ kg/min}$ ,而4,6 m结皮坡面产沙速率则呈现小幅度不规则波动。总体上,多数结皮与对照坡面产沙速率的差异在产流初期较大,随着产流时间逐渐减小,表明土壤结皮对坡面产沙的影响主要发生在产流前期,随产流的进行影响逐渐减小。

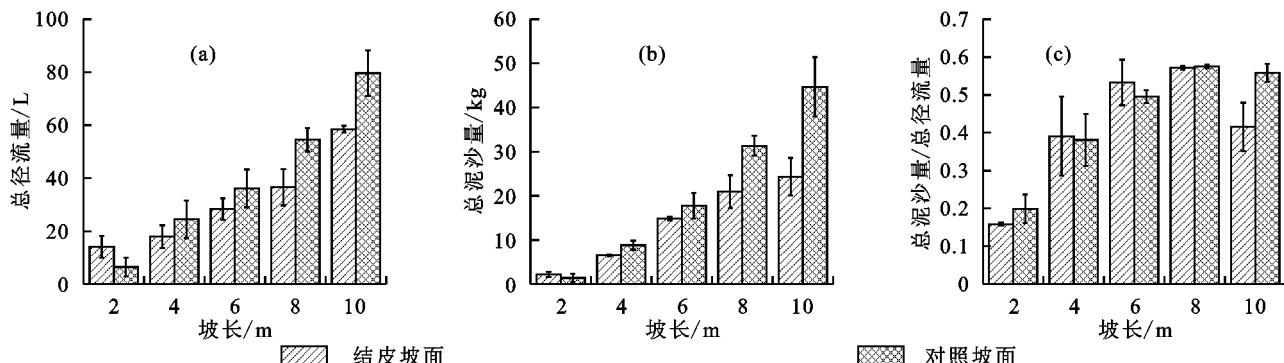


图2 不同坡面径流泥沙特征

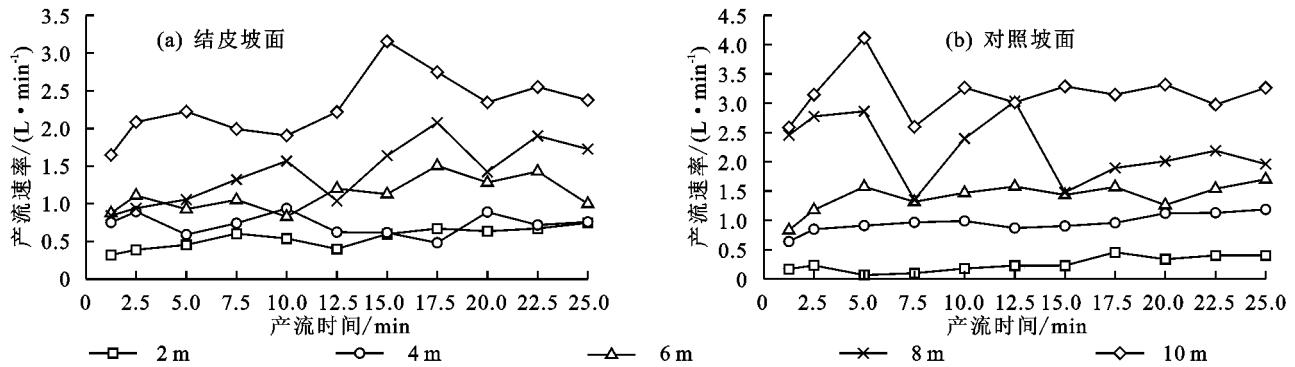


图3 不同坡面产流速率随产流时间变化

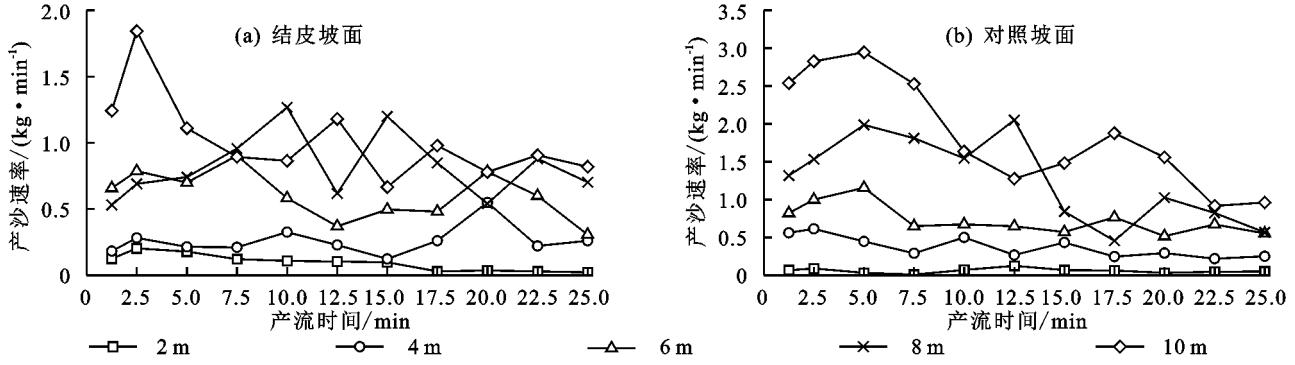


图4 不同坡面产沙速率随产流时间变化

### 2.3 土壤结皮对坡面累积径流泥沙量的影响

累积径流量与累积泥沙量反映产流与产沙在一定产流时间内的累积量。通过与产流时间的拟合,不同坡长结皮坡面与对照坡面累积径流量与累积泥沙量同产流时间关系可用线性函数 $M_Q=at+b$ 与幂函数 $M_S=mt^n$ 形式表示(表2)。式中: $M_Q$ 为累积径流量; $M_S$ 为累积泥沙量; $t$ 为产流时间; $a,b,m,n$ 为系数。累积径流量与产流时间线性函数中, $a$ 随坡长增加而增大,坡长为2 m时, $a_{\text{结皮}} > a_{\text{对照}}$ ,坡长为4,6,8,10 m时, $a_{\text{结皮}} < a_{\text{对照}}$ ,表明随坡长增加,结皮坡面同对照坡面单位时间产流量均增加,坡长为2 m时结

皮坡面产流速率大于对照坡面,坡长为4,6,8,10 m时,对照坡面产流速率大于结皮坡面。累积泥沙量与产流时间幂函数中,对照坡面 $n$ 均小于1,表明在不同坡面产沙速率基本随时间呈现减小趋势。而结皮坡面 $0.86 < n < 1.17$ ,表明产沙趋势在不同坡长有所变化。

### 2.4 土壤结皮对坡面累积径流泥沙过程的影响

冲刷过程中,结皮与对照坡面累积径流量比率( $M_Q_{\text{结皮}}/M_Q_{\text{对照}}$ )或累积泥沙量比率( $M_S_{\text{结皮}}/M_S_{\text{对照}}$ )体现产流起始至当前时间内结皮与对照坡面产生径流或泥沙的相互关系。相同产流时间内,当 $M_Q_{\text{结皮}}/M_Q_{\text{对照}} > 1$ ,表明结皮坡面产流速率大于对照坡面,即结皮对产流有促进作用;当 $M_Q_{\text{结皮}}/M_Q_{\text{对照}} < 1$ ,表明结皮对产流有抑制作用。

$M_{Q\text{对照}} > 1$ , 表明结皮坡面该时间累积径流量大于对照坡面, 土壤结皮对产流具有提高效益, 当  $M_{Q\text{结皮}} / M_{Q\text{对照}} < 1$ , 表明结皮坡面该时间累积径流量小于对照坡面。

照坡面, 土壤结皮对产流具有降低效益,  $M_{Q\text{结皮}} / M_{Q\text{对照}}$  数值分别反映土壤结皮对产流、产沙的提高降低程度,  $M_{S\text{结皮}} / M_{S\text{对照}}$  同理。

表 2 不同坡面累积径流泥沙量与产流时间拟合模型

项目	坡长	结皮坡面		对照坡面	
		拟合公式	$R^2$	拟合公式	$R^2$
累积径流量	2	$M_{Q\text{结皮}} = 0.57t - 0.77$	0.99	$M_{Q\text{对照}} = 0.26t - 0.71$	0.95
	4	$M_{Q\text{结皮}} = 0.70t + 0.20$	0.99	$M_{Q\text{对照}} = 0.98t - 0.78$	0.99
	6	$M_{Q\text{结皮}} = 1.16t - 1.11$	0.99	$M_{Q\text{对照}} = 1.47t - 1.08$	0.99
	8	$M_{Q\text{结皮}} = 1.51t - 2.44$	0.99	$M_{Q\text{对照}} = 2.14t + 1.70$	0.99
	10	$M_{Q\text{结皮}} = 2.40t - 2.25$	0.99	$M_{Q\text{对照}} = 3.19t - 0.05$	0.99
	2	$M_{S\text{结皮}} = 0.17t^{0.86}$	0.95	$M_{S\text{对照}} = 0.07t^{0.95}$	0.98
累积泥沙量	4	$M_{S\text{结皮}} = 0.19t^{1.10}$	0.99	$M_{S\text{对照}} = 0.64t^{0.83}$	0.99
	6	$M_{S\text{结皮}} = 0.74t^{0.95}$	0.99	$M_{S\text{对照}} = 0.97t^{0.92}$	0.99
	8	$M_{S\text{结皮}} = 0.53t^{1.17}$	0.99	$M_{S\text{对照}} = 1.53t^{0.99}$	0.96
	10	$M_{S\text{结皮}} = 1.50t^{0.87}$	0.99	$M_{S\text{对照}} = 3.04t^{0.87}$	0.99

不同坡长  $M_{Q\text{结皮}} / M_{Q\text{对照}}$  随产流时间变化见图 5。依据土壤结皮随时间对累积径流量的影响, 可将不同坡长坡面分为全程提高、初期提高后降低与全程降低 3 种类型。在 2 m 坡长下,  $M_{Q\text{结皮}} / M_{Q\text{对照}}$  随产流时间总体先增加后减小, 在产流过程中均大于 1, 其数值在 1.25, 2.5 min 分别为 1.87, 1.76, 其后迅速升高在 7.5 min 处达到峰值 3.84, 之后逐渐减弱至最终 2.17, 但在此条件下土壤结皮始终对产流具有提高效益。4, 6 m 坡长下  $M_{Q\text{结皮}} / M_{Q\text{对照}}$  总体呈现下降趋势, 在产流 5 min 前出现  $> 1$  的情况, 5 min 后  $< 1$ 。其数值在

2.5 min 与 1.25 min 时分别为 1.11, 1.05, 在 5 min 时分别为 0.85, 0.74。表明在 4, 6 m 坡长下, 土壤结皮在 1.25~5 min 期间具有使累积径流量与对照坡面一致的临界时间点。此临界时间点之前土壤结皮使累积径流量提高, 其后使累积径流量降低。8, 10 m 坡长下,  $M_{Q\text{结皮}} / M_{Q\text{对照}}$  在产流过程中均小于 1, 整体上升, 表明该条件下土壤结皮对产流量影响均为降低, 且土壤结皮对产流的降低作用随产流时间逐渐减弱。8 m 坡面  $M_{Q\text{结皮}} / M_{Q\text{对照}}$  在产流过程中均为最低, 表明土壤结皮在该坡长下对具有最强的减流效益。

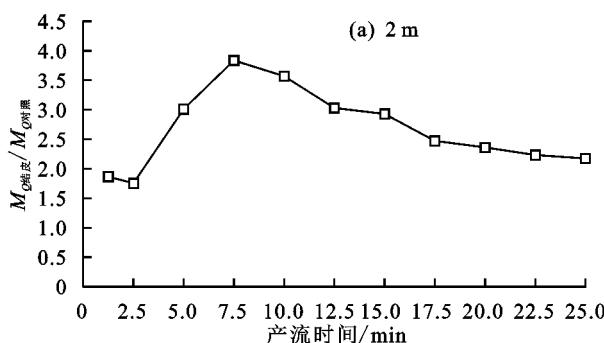
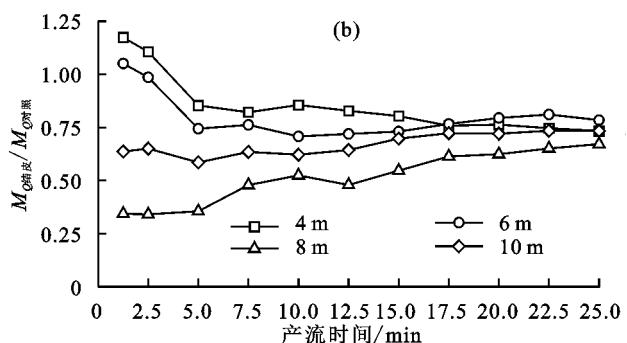


图 5 结皮与对照坡面累积径流量比率随产流时间变化

不同坡长  $M_{S\text{结皮}} / M_{S\text{对照}}$  随产流时间变化见图 6。依据土壤结皮随时间对累积泥沙量的影响, 可分为全程提高与全程降低 2 种类型。在 2 m 坡长下,  $M_{S\text{结皮}} / M_{S\text{对照}}$  均大于 1, 随产流时间先增加后减小, 由 1.25 min 处 1.86 迅速提高至 7.5 min 处 3.90, 其后逐渐减小至最终 1.56。

表明土壤结皮在 2 m 坡长下均增加泥沙量, 且在产流前期迅速增加其后逐渐减小。4, 6, 8, 10 m 坡长条件下,  $M_{S\text{结皮}} / M_{S\text{对照}}$  均小于 1, 表明此条件下土壤结皮在冲刷过程中均减少产沙。整体来看, 4 m 与



8 m 坡长条件下,  $M_{S\text{结皮}} / M_{S\text{对照}}$  随产流时间变化呈上升趋势, 分别由产流最初 0.33 与 0.40 上升至最终 0.74 与 0.67, 表明随冲刷进行, 土壤结皮的减沙效益逐渐降低。6 m 坡面  $M_{S\text{结皮}} / M_{S\text{对照}}$  呈现波动稳定, 且数值在产流过程中均大于其他坡长坡面, 土壤结皮在 6 m 时对泥沙量的减小作用最不明显。10 m 坡面  $M_{S\text{结皮}} / M_{S\text{对照}}$  随时间呈现下降后稳定, 且在产流 15 min 后相比其他坡长数值最小, 表明其减沙效果随时间迅速提高并稳定, 在产流 15 min 后 10 m 坡面土壤结皮具有最强的减沙效益。

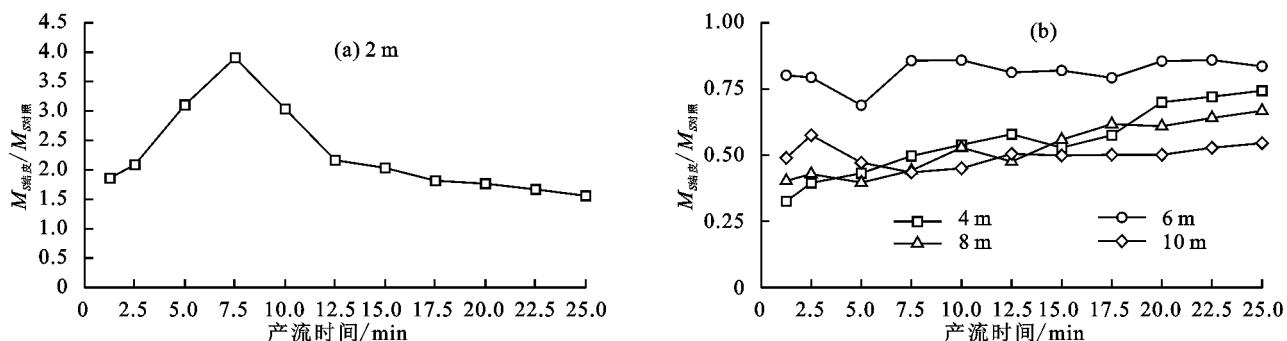


图 6 结皮与对照坡面累积泥沙量比率随产流时间变化

### 3 讨论

#### 3.1 土壤结皮对客土坡面侵蚀的影响

迄今为止,土壤结皮对径流泥沙的影响过程和结果存在分歧<sup>[4,14-15]</sup>。本研究中,土壤结皮出现提高产流产沙、抑制产流产沙以及提高产流抑制产沙等多种结果。这可能由于产流产沙受到多因素影响,基于试验条件很难解释其差异,建议可从水量平衡以及侵蚀过程机理出发进行相应论证。坡面冲刷设计流量等于入渗、蒸发及产流量三者之和<sup>[5]</sup>,土壤结皮对产流的影响主要来源于入渗,对产沙的影响则需要结合冲刷产流过程中结皮破坏与侵蚀沟发育情况。

结合试验观测及已有研究<sup>[13,15,21-23]</sup>,土壤结皮对产流产沙的影响可从产生径流前、结皮打破前、结皮打破初期、结皮打破后期,以及结皮效益取消时期进行分析。研究<sup>[22]</sup>表明,土壤结皮减渗效益可达70~80%,土壤中下层的渗透率是结皮层的5倍<sup>[13]</sup>,这导致产流前使坡面达到即将产流状态所需水量大幅减小,这与本研究中结皮坡面形成产流时土壤含水率更低相应证,在以往研究<sup>[21]</sup>中则体现为初始产流时间的提前。形成产流后,土壤结皮既阻止径流下渗,又隔绝水流与下部松散土壤颗粒的接触,这一阶段结皮效益主要体现为增加产流而减少产沙。由于坡面径流与径流动能的增加,结皮坡面更易产生细沟侵蚀,结皮打破初期,侵蚀沟初步形成,土壤结皮坡面的集中径流作用使坡面产流产沙迅速提高<sup>[22]</sup>,这与本研究中2 m坡长情况下产流前期趋势及整体结果相一致。但随着土壤结皮被进一步打破,结皮坡面下层土壤需要更多水量进行深层入渗,造成产流量的降低,同时由于结皮形成时水分对土壤的压实作用增强土壤整体抗蚀性,使水流侵蚀下切与沟岸扩张较为困难,导致产沙量下降。这与本研究中结皮坡面产流产沙过程基本吻合,也与王辉等<sup>[15]</sup>研究中关于结皮坡面产流产沙强度前期大于无结皮坡面,其后出现拐点,最终小于无结皮坡面的表述相一致;卜崇峰等<sup>[23]</sup>采用人工降雨对黄土结皮的研究也表明,当降雨冲刷到一定程度

时,土壤结皮对产流产沙效益将趋于消失。

#### 3.2 坡长对土壤结皮影响土壤侵蚀的作用

坡长是影响土壤侵蚀的重要地形因子,对其影响也存在一定争议<sup>[24]</sup>。本研究中,土壤结皮坡面产流产沙随坡长增加而增加,但产流产沙情况却因坡长变化有所不同。一般土壤结皮的破坏与侵蚀沟发育均自坡顶向下进行,较短坡面产沙量低,侵蚀情况和结皮打破程度均低于较长坡面,而较长坡面在产流过程中能够同时出现上部侵蚀沟强烈发育,中部结皮初步打破而下部土壤结皮比较完整的情况。本研究中,土壤结皮在2 m坡面促进产流产沙,在4 m及以上坡面体现为抑制产流产沙,且4,8 m与6,10 m坡面产流产沙过程有所不同,也体现坡长增加后内部侵蚀阶段复杂化的现象。

结皮坡面与对照坡面总泥沙量与总径流量比值随坡长增加先增大后减小,最大值出现在8 m。这表明随坡长增加,结皮与未结皮坡面水流在出口的产沙能力均在6~10 m内达到最高。而当坡长由8 m增加到10 m时,结皮坡面总泥沙量与总径流量比值相对未结皮坡面显著下降,意味着土壤结皮在此条件下能够显著影响坡面内部冲刷产沙的侵蚀—沉积过程<sup>[25-26]</sup>。

#### 3.3 土壤结皮在矿山废弃地水土流失防治与研究中的作用

矿山废弃地客土坡面本身具有松散易流失的特征<sup>[18]</sup>,研究土壤结皮对客土坡面侵蚀特征及产流产沙过程的影响,具有重要的理论与现实意义。本研究发现,土壤结皮对较长坡面产流产沙具有更强的抑制作用,因此生产实践中可考虑采用人工促进土壤结皮形成的方式,防止较长坡面的水土流失。土壤结皮可能带来产流量增加,则需要采取植物措施或工程排水措施相结合,构成生态恢复综合防治体系<sup>[27]</sup>。同时应当注意避免牧区牛、羊等牲畜对结皮的踩踏。另外,较长坡面土壤结皮可使总体产沙减少,但应对坡面内部土壤搬运—堆积过程加以关注。西部干旱半

干旱区域多属风蚀水蚀交错区,土壤结皮对于风蚀也具有一定的防治作用<sup>[28-29]</sup>。

## 4 结论

(1)土壤结皮坡面产流量、产沙量、产流速率均随坡长增加而增加。坡长为2 m时,土壤结皮使总泥沙径流量提高,坡长超过2 m时,土壤结皮使总泥沙径流量降低。在8 m坡面土壤结皮具有最强的减流效益。

(2)产流过程中,土壤结皮坡面累积径流量在2 m坡面始终大于对照坡面,在4,6 m坡面产流前期大于对照坡面,产流后期低于对照坡面,在8 m与10 m坡面全程小于对照坡面。产流15 min后,土壤结皮在10 m坡面具有最强的减沙效益。

(3)结皮坡面总泥沙量与总径流量比值随坡长增加先增大后减小,最大值出现在8 m,其值在2,10 m小于对照坡面,在4,6 m坡面大于对照坡面。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 路培,王林华,吴发启.不同降雨强度下土壤结皮强度对侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(8):141-146.
- [3] 吴秋菊,吴佳,王林华,等.黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响[J].土壤学报,2015,52(2):303-311.
- [4] 马金龙,许欢欢,王兵,等.黄土高原坡耕地土壤物理结皮对坡面产流产沙过程的影响[J].水土保持学报,2022,36(1):45-49.
- [5] 程琴娟,蔡强国,李家永.表土结皮发育过程及其侵蚀响应研究进展[J].地理科学进展,2005,24(4):114-122.
- [6] 高燕,郑粉莉,王彬,等.土壤结皮对黑土区坡面产流产沙的影响[J].水土保持研究,2014,21(4):17-20.
- [7] Levy G J, Levin J, Shainberg I. Seal formation and interrill soil erosion[J]. Soil Science Society of America Journal,1994,58(1):203-209.
- [8] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等.雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2004,41(4):632-635.
- [9] Leary D, Dicarlo D A, Hickey C J. Acoustic techniques for studying soil-surface seals and crusts[J]. Ecohydrology,2009,2(3):257-262.
- [10] 卜崇峰,蔡强国,张兴昌,等.土壤结皮的发育特征及其生态功能研究述评[J].地理科学进展,2008,27(2):26-31.
- [11] Bradford J M, Remley P A, Ferris J E, et al. Effect of soil surface sealing on splash from a single waterdrop [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50 (6):1547-1552.
- [12] Moore D C, Singer M J. Crust formation effects on soil erosion processes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(4):1117-1123.
- [13] Tackett J L, Pearson R W. Some characteristics of soil crusts formed by simulated rainfall[J]. Soil Science, 1965, 99(6):407-413.
- [14] 程琴娟,蔡强国,廖义善.土壤表面特性与坡度对产流产沙的影响[J].水土保持学报,2007,21(2):9-11,15.
- [15] 王辉,王全九,邵明安,等.表土结皮影响坡地产流产沙及养分流失的试验研究[J].水土保持学报,2008,22(4):35-38.
- [16] 李永庚,蒋高明.矿山废弃地生态重建研究进展[J].生态学报,2004,24(1):95-100.
- [17] 闫德民,赵方莹,孙建新.铁矿采矿迹地不同恢复年限的植被特征[J].生态学杂志,2013,32(1):1-6.
- [18] 毕银丽,彭苏萍,杜善周.西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J].煤炭学报,2021,46(5):1355-1364.
- [19] 张翔,高照良.不同坡长条件下壤土堆积体坡面产流产沙过程[J].水土保持研究,2018,25(6):79-84,93.
- [20] 李玉亭婷,高照良,李永红,等.坡长对黄土区工程堆积体产流产沙影响的模拟试验研究[J].水土保持通报,2019,39(4):102-106.
- [21] 谢亚茹,程金花,李语晨,等.黄土区土壤结皮和垄高对坡面产流产沙的影响[J].东北农业大学学报,2017,48(10):42-49.
- [22] 路培.土壤结皮形成机制及空间分布对侵蚀的影响研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [23] 卜崇峰,蔡强国,张兴昌,等.黄土结皮的发育机理与侵蚀效应研究[J].土壤学报,2009,46(1):16-23.
- [24] 付兴涛,姚璟.降雨条件下坡长对陡坡产流产沙过程影响的模拟试验研究[J].水土保持学报,2015,29(5):20-24.
- [25] 刘冉,余新晓,蔡强国,等.陕北黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀—沉积过程试验研究[J].水土保持通报,2022,42(2):31-37.
- [26] 张馨予,查同刚,张泽宇,等.乌拉山废弃矿区坡长对客土坡面产流产沙与沟蚀特征的影响[J].水土保持学报,2022,36(6):8-15.
- [27] Lu P, Xie X, Wang L, et al. Effects of different spatial distributions of physical soil crusts on runoff and erosion on the Loess Plateau in China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017, 42(13):2082-2089.
- [28] Yan Y C, Wu L H, Xin X P, et al. How rain-formed soil crust affects wind erosion in a semi-arid steppe in Northern China[J]. Geoderma, 2015, 249/250:79-86.
- [29] 毛旭芮,杨建军,曹月娥,等.土壤结皮面积与结皮分布对风蚀影响的风洞模拟研究[J].水土保持学报,2020,34(3):1-7.