

DOI: 10.5846/stxb202109172623

邵奕铭, 高光耀, 刘见波, 傅伯杰. 自然降雨下黄土丘陵区草灌植物垂直覆盖结构的减流减沙效应. 生态学报, 2022, 42(1): 322-331.

Shao Y M, Gao G Y, Liu J B, Fu B J. Effects of vertical cover structure of grass and shrub on reducing runoff and soil loss under natural rainfall in the loess hilly region. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 322-331.

# 自然降雨下黄土丘陵区草灌植物垂直覆盖结构的减流减沙效应

邵奕铭<sup>1, 2</sup>, 高光耀<sup>1, 2, 4, \*</sup>, 刘见波<sup>3</sup>, 傅伯杰<sup>1, 2, 4</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 天津师范大学, 天津 300387

4 陕西黄土高原地球关键带国家野外科学观测研究站, 西安 710061

**摘要:**黄土高原是我国水土流失和生态环境问题最为严重的地区之一, 植被恢复是防治水土流失的重要措施。植物垂直覆盖结构包括地上冠层、地表枯落物和地下根系, 各组分具有不同的水土保持作用, 是研究植被与水土流失关系的基本单元。目前, 关于植物垂直覆盖结构不同组分对土壤侵蚀影响的研究主要是基于人工模拟降雨, 缺少自然降雨条件下不同植物的垂直覆盖结构对产流、产沙和入渗等多过程影响的系统研究。本研究以黄土丘陵区典型的草本(须芒草)、半灌木(铁杆蒿)和灌木(绣线菊)为研究对象, 每种植物进行三种处理(自然状态、去除枯落物和仅留根系)以及裸地对照, 观测 2015—2016 年降雨事件的产流产沙量和入渗量, 分析植物不同垂直覆盖结构的减流减沙效益及其相对贡献。结果表明: 三种植物均具有较好的减流(45.9%—73.2%)、减沙效益(87.5%—94.6%)和增加入渗作用(4.7%—10.8%), 灌木的减流效果(73.2%)显著高于草本(45.9%)和半灌木(63.5%), 但三种植物间的减沙效益没有显著性差异。冠层的减流作用最大, 贡献率接近一半(48%—50%), 草本枯落物的减流贡献率与根系基本一致, 而半灌木和灌木枯落物的减流贡献率略高于根系。冠层、枯落物和根系的减沙贡献率基本一致(36%、30%和 34%), 相对而言, 草本的根系对控制侵蚀具有更大作用, 减沙贡献率达到 39%, 而半灌木和灌木的冠层减沙贡献率要略高于枯落物和根系。本研究表明, 冠层是减流的重要因子, 而冠层、枯落物和根系在减沙方面均发挥了重要作用, 植物垂直覆盖结构各组分在不同植物间减流减沙能力的差异主要与植物功能性状有关。上述结果将为黄土丘陵区坡面植被恢复和水土流失治理提供科学依据。

**关键词:** 自然降雨; 垂直覆盖结构; 产流产沙; 入渗; 黄土丘陵区

## Effects of vertical cover structure of grass and shrub on reducing runoff and soil loss under natural rainfall in the loess hilly region

SHAO Yiming<sup>1, 2</sup>, GAO Guangyao<sup>1, 2, 4, \*</sup>, LIU Jianbo<sup>3</sup>, FU Bojie<sup>1, 2, 4</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

4 National Observation and Research Station of Earth Critical Zone on the Loess Plateau in Shaanxi, Xi'an 710061, China

**Abstract:** The Loess Plateau is one of the areas with the most serious soil erosion and ecological environment problems in China. Vegetation restoration is an important measure to prevent and control soil and water loss. The plant vertical cover structure includes aboveground canopy, surface litter, and underground root system. Each component has a different role in

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41991233, 42041004); 中国科学院青年促进会(Y202013)

**收稿日期:** 2021-09-17; **采用日期:** 2021-12-02

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gygao@rcees.ac.cn

soil and water conservation. It is the basic unit to study the relationship between vegetation and soil erosion. At present, the research on the effects of different components of plant vertical cover structure on soil erosion in loess hilly areas is mainly based on artificial rainfall, and there is a lack of systematic research on the effects of different plants vertical cover structure on runoff, sediment and infiltration under the condition of natural rainfall. The research objects of this study were the typical grass (*Andropogon yunnanensis*), sub-shrub (*Artemisia sacrorum*) and shrub (*Spiraea pubescens*) in loess hilly areas. Each plant was treated with three different vertical cover structure compositions (e.g., intact condition, removing litter and only roots) and bare land control treatment. The runoff, sediment yield and infiltration of rainfall events from 2015 to 2016 were observed. The runoff and soil loss reduction and relative contributions of different vertical cover structures were analyzed. The results showed that the three types of plants had great runoff reduction (45.9%—73.2%), soil loss reduction (87.5%—94.6%), and increased infiltration (4.7%—10.8%). The runoff reduction of shrub (73.2%) was significantly higher than that of grass (45.9%) and sub-shrub (63.5%). However, there was no significant difference in soil loss reduction among the three plants. The canopy had the greatest effect of reducing runoff, with a contribution rate close to half (48%—50%). The contribution of grass litter to runoff reduction was basically the same as that of the roots, while the contribution of sub-shrub and shrub litter was slightly higher than that of the roots. The contribution of canopy, litter and roots to soil loss reduction was basically same (36%, 30% and 34%). In specific, the roots of grass had a greater effect on controlling erosion, and the contribution to soil loss reduction rate reached 39%, while the contribution of sub-shrub and shrub canopy to soil loss reduction rate was slightly higher than that of litter and roots. The study shows that the canopy is an important factor in runoff reduction, while the canopy, litter and roots all play an important role in reducing soil loss. The differences in the ability of the vertical cover structure to reduce runoff and soil loss among different plants mainly related to plant functional traits. The above results will provide a scientific basis for vegetation restoration and soil erosion control on slopes in the loess hilly region.

**Key Words:** natural rainfall; vertical cover structure; runoff and soil loss; infiltration; loess hilly region

黄土高原是我国水土流失和生态环境问题最为严重的地区之一<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀导致土壤退化和土地生产力降低,制约社会、经济和生态系统的可持续发展<sup>[2]</sup>。植被恢复是防治水土流失的重要措施<sup>[3]</sup>。植物垂直覆盖结构包括地上冠层、地表枯落物和地下根系,是研究植被与水土流失关系的基本单元,也是造成不同植被水土流失效应差异性的主导因素。地上冠层能够截留降雨,减弱雨滴动能,起到缓冲降雨的作用<sup>[4-6]</sup>。地表枯落物直接覆盖地表,可以拦截降雨、减少蒸发、增加入渗<sup>[7-8]</sup>。根系能够增强土壤水分入渗能力,改善土壤性质,从而减少径流和土壤流失<sup>[9-10]</sup>。植物垂直覆盖结构各组分具有不同的水土保持作用,深刻影响着植被恢复对水土流失治理的总体效果<sup>[11-13]</sup>。因此,有必要系统分析不同植物垂直覆盖结构组分对产流、产沙以及入渗等各过程的影响,深入理解植物垂直覆盖结构对水土流失的影响机理。

植被对水土流失影响的研究大多从植被类型或地表覆被角度开展<sup>[14-15]</sup>。Zhang 等<sup>[15]</sup>利用 meta 分析对黄土高原的 55 个观测点数据进行统计,结果表明在年降雨量为 400—600 mm 的地区,与草地和混交林相比,灌木的年平均径流量(21.36 mm/a)和年土壤流失量(13.36 t hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)最低,植被类型之间的产流产沙差异主要是由植物冠层、枯落物和根系的形态和结构差异所造成。Li 和 Pan<sup>[16]</sup>利用模拟降雨-冲刷实验,研究了三种草本植物的原始状态、去枯落物和去除叶片处理以及仅留根系处理下径流流速、流量和侵蚀状况,结果显示草本地上部分对径流速率和流量减少的贡献率分别为 64% 和 86%,而根系的减沙贡献率达到 84%。Zhang 等<sup>[17]</sup>利用野外模拟降雨实验研究草地根系和地上幼苗的减沙效果,结果表明草地根系和地上幼苗的减沙贡献率大致相等。顾朝军的野外模拟降雨实验结果表明灌木地下根系的减流和减沙贡献率更大,分别为 53.4% 和 90.4%<sup>[18]</sup>。可以看出,目前黄土高原关于植物垂直覆盖结构不同组分对土壤侵蚀影响的研究主要是基于人工模拟降雨,且在不同垂直覆盖结构的减流减沙贡献率上尚未形成一致的结论,缺乏自然降雨条件下不同

植物地上冠层、枯落物和地下根系对产流、产沙和入渗等多过程影响的系统研究。

为此,本文以黄土丘陵区典型的草灌植物为研究对象,通过设置不同垂直覆盖结构处理的坡面微型小区,系统研究自然降雨下不同植物和垂直覆盖结构的产流、产沙和入渗特征及其差异,量化不同垂直覆盖结构对减流减沙的相对贡献,为黄土高原土壤侵蚀控制和植被恢复的可持续管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文研究区为黄土丘陵沟壑区的典型小流域—羊圈沟小流域(36°42′ N,109°31′ E),位于陕西省延安市宝塔区。小流域的流域面积为 2.02 km<sup>2</sup>,海拔在 1025—1250 m 之间,沟壑密度为 2.74 km<sup>2</sup>。小流域属于半干旱大陆性季风气候,年平均气温和降水量分别为 9.8℃ 和 535 mm,年内降雨变化率大,雨季主要集中于 7—9 月。小流域土壤类型以黄绵土为主,质地均一,土质疏松,极易受土壤侵蚀。小流域处于森林草原过渡带,自然植被破坏严重,植被以退耕还林还草工程实施后的人工植被和自然恢复的次生植被为主。草地、灌木和林地是流域内三种典型的土地利用类型,分别占流域面积的 43.7%、22.4% 和 15.1%<sup>[19]</sup>。草本类主要有长芒草(*Stipa bungeana*)和须芒草(*Andropogon yunnanensis*)等,半灌木主要有铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)等,灌木主要有绣线菊(*Spiraea pubescens*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等,乔木主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等。

1.2 试验设计

以草本(须芒草)、半灌木(铁杆蒿)和灌木(绣线菊)作为研究对象,选择立地条件相似、形态结构相似的同物种植株,布设不同垂直覆盖结构的微型小区(长 1.0 m,宽 1.0 m)。草灌植物特征和土壤属性见表 1。试验处理包括自然状态(Intact condition, IC)、去除枯落物(Removing litter, RL)、仅留根系(Only roots, OR)3 种处理,并设置裸地空白对照处理,每种处理设置 3 个重复,共 30 个微型小区(图 1)。自然状态小区的垂直覆盖结构包括地上冠层、地表枯落物和地下根系,去除枯落物小区的垂直覆盖结构包括地上冠层和地下根系,仅留根系小区是将地上冠层和地表枯落物清除形成。

表 1 草灌植物特征和土壤性质

Table 1 Plant and soil properties of grass and shrub

植物种类 Plant species				植物种类 Plant species			

#### 1.4 指标计算

减流率、减沙率、减流减沙比和泥沙浓度减少率均是在次降雨尺度计算后求平均值,用以刻画植物对水土流失的减少程度。减流率、减沙率和泥沙浓度减少率分别为相比裸地小区,各垂直覆盖结构处理小区产流量、产沙量和泥沙浓度减少的比率。减流减沙比为减流率和减沙率的比值。植被控制土壤侵蚀是冠层、枯落物和根系共同作用的结果。冠层的减流减沙量等于去除枯落物小区和仅留根系小区的产流产沙量差值。枯落物的减流减沙量等于自然小区和去除枯落物小区的产流产沙量差值。根系的减流减沙量等于仅留根系小区和裸地小区的产流产沙量差值。

三种植物的不同垂直覆盖结构小区的减流率计算公式为:

$$CR = \frac{(R_b - R)}{R_b} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $CR$  表示某一植物某种垂直覆盖结构处理微型小区的减流率(%), $R_b$ 为裸地微型小区的产流量(mm), $R$ 为某一植物某种垂直覆盖结构处理微型小区的产流量(mm)。同理,可推导出不同植物垂直覆盖结构小区的减沙率(%)。

冠层、枯落物和根系的减流效益分别为:

$$CR_c = CR_{rl} - CR_{or} \quad (2)$$

$$CR_l = CR_{ic} - CR_{rl} \quad (3)$$

$$CR_r = CR_{or} \quad (4)$$

式中, $CR_c$ 、 $CR_l$ 和 $CR_r$ 分别为冠层、枯落物和根系的减流效益(%); $CR_{ic}$ 、 $CR_{rl}$ 、 $CR_{or}$ 分别为自然状态、去除枯落物、仅留根系微型小区的减流率(%)。同理,可推导出冠层、枯落物和根系的减沙效益(%)。

冠层、枯落物和根系的减流贡献率分别为:

$$RCR_c = \frac{CR_c}{(CR_c + CR_l + CR_r)} \quad (5)$$

$$RCR_l = \frac{CR_l}{(CR_c + CR_l + CR_r)} \quad (6)$$

$$RCR_r = \frac{CR_r}{(CR_c + CR_l + CR_r)} \quad (7)$$

式中, $RCR_c$ 、 $RCR_l$ 和 $RCR_r$ 分别为冠层、枯落物和根系的减流贡献率(%)。同理,可推导出冠层、枯落物和根系的减沙贡献率(%)。

#### 1.5 数据处理与分析

利用方差分析方法,分析和比较不同植物和垂直覆盖结构之间产流、产沙和入渗特征及其差异性。使用 SPSS 26.0 软件对数据进行统计分析,采用方差分析(ANOVA)在 0.05 显著水平检验组间差异,采用最小显著差数法(LSD)进行多重比较( $P < 0.05$ )。使用 Origin 2018 软件进行绘图制作。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同植物垂直覆盖结构处理的产流产沙特征

如图 2 所示,垂直覆盖结构可显著影响产流量、产沙量、入渗量和泥沙浓度等土壤侵蚀特征。不同垂直覆

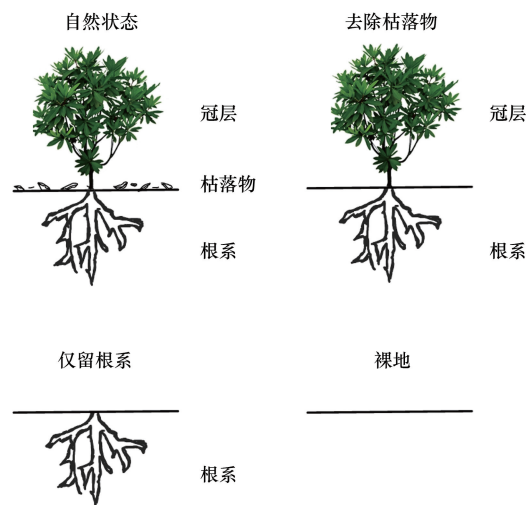


图 1 植物垂直覆盖结构处理示意图

Fig.1 The schematic diagram of plant vertical cover structure treatments including



盖结构处理的产流量存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 在任一植物中均表现为: 自然状态 < 去除枯落物 < 仅留根系 < 裸地。与去除枯落物处理相比, 须芒草、铁杆蒿和绣线菊仅留根系处理的产流量分别增加 1.53 mm、2.09 mm 和 2.48 mm。在同一处理下, 不同植物间产流量的差异较为复杂。自然状态下须芒草、铁杆蒿和绣线菊的平均产流量分别为 3.70 mm、2.51 mm 和 1.84 mm, 差异显著 ( $P < 0.05$ )。去除枯落物处理下, 须芒草的产流量 (4.53 mm) 显著大于铁杆蒿 (3.80 mm) 和绣线菊 (3.43 mm) ( $P < 0.05$ ), 但铁杆蒿和绣线菊之间产流量没有显著性差异 ( $P > 0.05$ )。仅留根系处理下三种植物的产流量没有显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

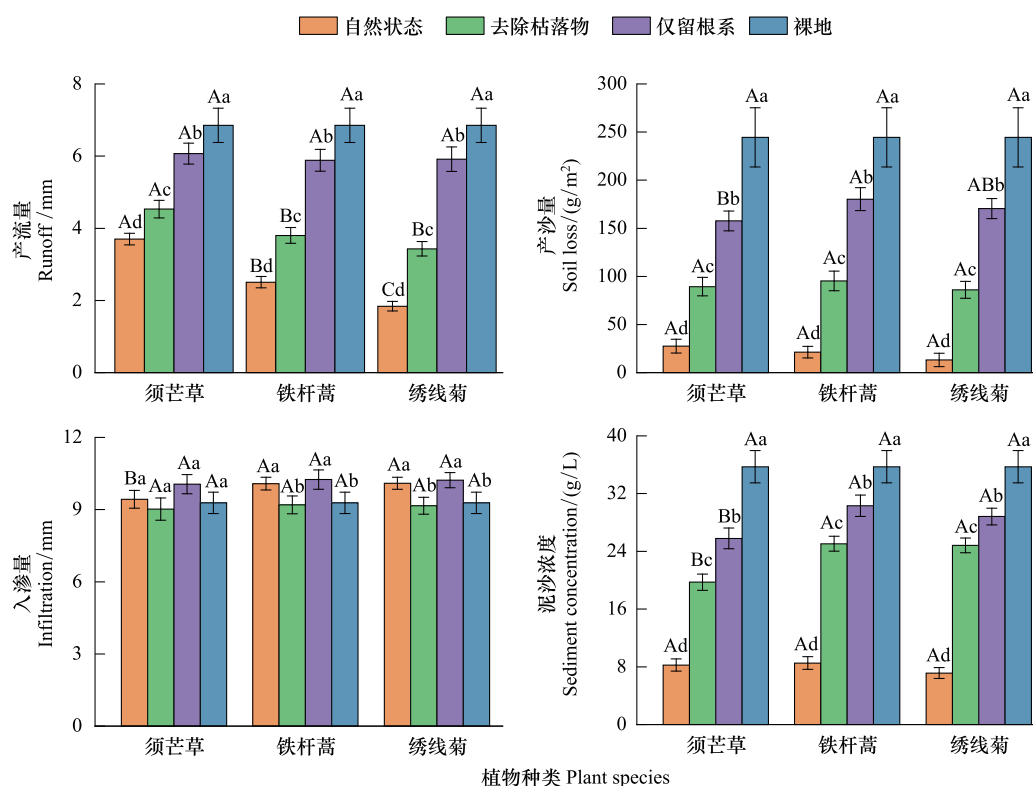


图2 三种植物在不同垂直覆盖结构处理下的次降雨产流量、产沙量、入渗量和泥沙浓度

Fig.2 Comparison of runoff, soil loss, infiltration and sediment concentration under different vertical cover structure treatments for the three plants

不同大写字母表示同一垂直结构处理下不同植被类型间的差异显著 ( $P < 0.05$ )。不同小写字母表示同一植被类型下不同垂直结构处理间的差异显著 ( $P < 0.05$ )

不同处理间产沙量也呈现显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 在任一植物中均表现为: 自然状态 < 去除枯落物 < 仅留根系 < 裸地。在不同处理间, 须芒草的仅留根系与裸地处理间的产沙量差值最大, 为 81.88 g/m<sup>2</sup>, 而铁杆蒿和绣线菊的仅留根系与去除枯落物处理间的产沙量差值最大, 分别为 83.04 g/m<sup>2</sup> 和 84.55 g/m<sup>2</sup>。同一种处理下不同植物间产沙量关系复杂。在自然状态和去除枯落物处理中, 须芒草、铁杆蒿和绣线菊微型小区之间产沙量差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 但在仅留根系处理中, 铁杆蒿小区产沙量 (178.25 g/m<sup>2</sup>) 显著大于须芒草小区产沙量 (162.69 g/m<sup>2</sup>) ( $P < 0.05$ )。

从图2可以看出, 任一植物中各处理入渗量顺序均为: 去除枯落物 < 裸地 < 自然状态 < 仅留根系。在须芒草小区中, 四种处理入渗量的差异性不显著 ( $P > 0.05$ )。在铁杆蒿和绣线菊小区中, 自然状态和仅留根系处理的入渗量显著大于裸地和去除枯落物处理 ( $P < 0.05$ ), 但自然状态和仅留根系处理间、裸地和去除枯落物处理间的差异性不显著 ( $P > 0.05$ )。除自然状态下, 铁杆蒿 (10.08 mm) 和绣线菊 (10.09 mm) 的入渗量显著大于须芒草 (9.53 mm) 外 ( $P < 0.05$ ), 其余处理下不同植物间的入渗量没有显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

不同垂直覆盖结构间泥沙浓度的差异与产流量和产沙量相似,任一植物中均表现为:自然状态<去除枯落物<裸地(图2)。裸地的泥沙浓度最高(35.7 g/L),自然状态下绣线菊小区的泥沙浓度最低(7.1 g/L)。自然状态下,三种植物间泥沙浓度没有显著性差异( $P>0.05$ ),而在去除枯落物和仅留根系处理中,铁杆蒿和绣线菊的泥沙浓度显著大于须芒草( $P<0.05$ )。

## 2.2 不同植物垂直覆盖结构处理的减流减沙率

不同处理下的减流率、减沙率、减流减沙比和泥沙浓度减少率如图3所示。不同植物垂直覆盖结构处理的微型小区减流率和减沙率差异性显著( $P<0.05$ ),在任一植物中均表现为:自然状态>去除枯落物>仅留根系。在同一处理下,不同植物间减流减沙率存在较大差异。自然状态下,须芒草、铁杆蒿和绣线菊的减流率差异性显著( $P<0.05$ ),分别为45.9%、63.8%和73.2%,但各植物的减沙率差异性并不显著( $P>0.05$ ),分别为87.5%、91.3%和94.6%。去除枯落物处理中,铁杆蒿(44.5%)和绣线菊(49.9%)的减流率显著高于须芒草(33.9%)( $P<0.05$ ),但三种植物的减沙率差异性不显著( $P>0.05$ )。仅留根系处理中,各植物的减流率没有显著性差异( $P>0.05$ ),但须芒草(33.8%)的减沙率大于绣线菊(30.2%),而且显著大于铁杆蒿(27.1%)( $P<0.05$ )。

如图3所示,各植物垂直覆盖结构处理的减流减沙比均小于100%,说明各处理减沙效应均大于减流效应。在须芒草和铁杆蒿的垂直覆盖结构处理中,减流减沙比均表现为:去除枯落物>自然状态>仅留根系,而在绣线菊中,减流减沙比表现为:自然状态>去除枯落物>仅留根系,且自然状态和去除枯落物的减流减沙比差异不大,但均显著大于仅留根系处理( $P<0.05$ )。自然状态下绣线菊的减流减沙比最大(77.2%),而最小的减流减沙比出现在去除枯落物处理的须芒草小区(33.9%)。

任一植物中各处理泥沙浓度减少率顺序均为:自然状态>去除枯落物>仅留根系,并且不同处理间差异性

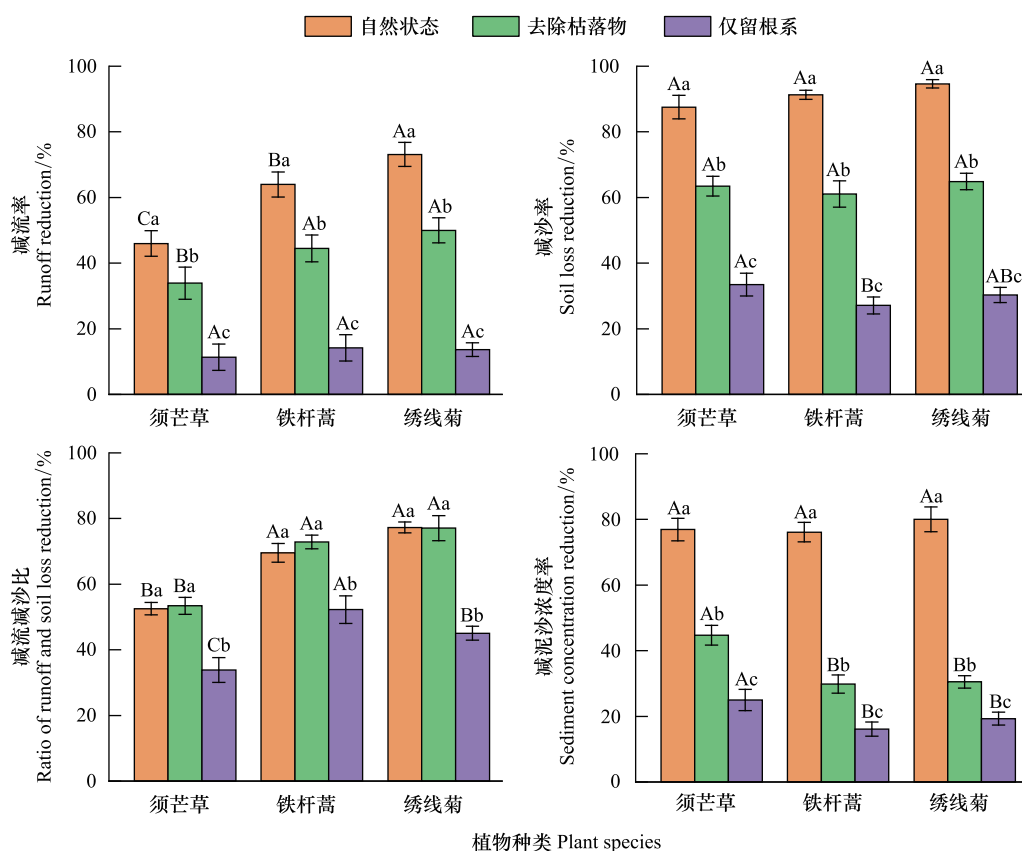


图3 三种植物在不同垂直覆盖结构处理下的减流率、减沙率、减流减沙比和泥沙浓度减少率

Fig.3 The runoff reduction, soil loss reduction, ratio between runoff and soil loss reduction, and sediment concentration reduction under different vertical cover structure treatments for the three plants.

显著 ( $P<0.05$ ) (图 3)。与自然状态相比,须芒草、铁杆蒿和绣线菊去除枯落物处理的泥沙浓度减少率分别降低 32.1%、46.8% 和 49.5%, 仅留根系处理的泥沙浓度减少率分别降低 51.8%、60% 和 60.8%。自然状态下各植物的泥沙浓度减少率没有显著性差异 ( $P>0.05$ ), 而在去除枯落物和仅留根系处理中, 须芒草的泥沙浓度减少率显著大于铁杆蒿和绣线菊 ( $P<0.05$ )。

### 2.3 不同植物垂直覆盖结构对减流减沙的贡献率

须芒草、铁杆蒿和绣线菊不同垂直覆盖结构组分的减流和减沙效益如表 2 所示。各植物冠层、枯落物和根系的减流效益分别在 22.6%—36.3%、12.1%—23.1% 和 11.3%—14.2% 之间。任一植物的冠层减流效益都显著高于枯落物和根系 ( $P<0.05$ )。绣线菊的枯落物减流效益 (23.1%) 显著大于其根系减流效益 (13.7%), 其余两种植物枯落物和根系的减流效益没有显著差异 ( $P>0.05$ )。同一垂直覆盖结构组分的减流效益在不同植物间关系复杂。绣线菊和铁杆蒿的冠层和枯落物减流效益均显著高于须芒草 ( $P<0.05$ ), 但三种植物根系的减流效益没有显著差异 ( $P>0.05$ )。

各植物冠层、枯落物和根系的减沙效益分别在 24.1%—33.5%、27.1%—33.9% 和 29.8%—34.6% 之间。须芒草冠层 (29.9%) 和根系 (33.5%) 的减沙效益显著大于枯落物 (24.1%) ( $P<0.05$ ), 铁杆蒿冠层的减沙效益 (33.9%) 显著大于根系 (27.1%), 而绣线菊三种垂直覆盖结构组分的减沙效益差异不显著 ( $P>0.05$ )。同一垂直覆盖结构组分的减沙效益在不同植物间存在差异。三种植物冠层减沙效益的顺序为: 绣线菊>铁杆蒿>须芒草, 但没有显著差异 ( $P>0.05$ ); 三种植物枯落物减沙效益的顺序为: 铁杆蒿>绣线菊>须芒草, 其中铁杆蒿和绣线菊的枯落物减沙效益显著大于须芒草 ( $P<0.05$ ), 分别为 30.2%、29.8% 和 24.1%; 三种植物根系减沙效益的顺序为: 须芒草>绣线菊>铁杆蒿, 其中须芒草和绣线菊的根系减沙效益没有显著差异 ( $P>0.05$ ), 分别为 33.5% 和 30.3%。

表 2 三种植物不同垂直覆盖结构组分的减流效益和减沙效益

Table 2 Runoff and sediment reduction of different vertical cover structure components for the three plants

植物种类 Plant species	减流效益 Runoff reduction/%			减沙效益 sediment reduction/%		
	冠层 Canopy	枯落物 Litter	根系 Roots	冠层 Canopy	枯落物 Litter	根系 Roots
须芒草 <i>Andropogon yunnanensis</i>	22.6±2.4 Ba	12.1±2.0 Bb	11.3±2.0 Ab	29.9±2.4 Aa	24.1±1.8 Bb	33.5±2.5 Aa
铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i>	30.3±3.2 Aa	18.9±2.3 Ab	14.2±1.8 Ac	33.9±2.7 Aa	30.2±1.6 Aab	27.1±1.6 Bb
绣线菊 <i>Spiraea pubescens</i>	36.3±2.8 Aa	23.1±2.2 Ab	13.7±1.4 Ac	34.6±3.6 Aa	29.8±2.1 Aa	30.3±1.3 Aa

须芒草、铁杆蒿和绣线菊不同垂直覆盖结构组分对减流和减沙的贡献率如图 4 所示。冠层的减流贡献率约占一半, 变化范围从 48%—50%, 在三种植物间差异较小; 枯落物的平均减流贡献率 (29%) 略高于根系 (22%)。枯落物和根系的减流贡献率在不同植物间差异较大, 其变化范围分别为 26%—32% 和 18%—25%。三种植物枯落物的减流贡献率大小顺序为: 绣线菊>铁杆蒿>须芒草, 而三种植物根系的减流贡献率大小顺序与之相反。

各植物的冠层、枯落物和根系的减沙贡献率范围分别为 34%—37%、27%—33% 和 30%—39%, 平均值分别为 36%、30% 和 34% (图 4)。须芒草、铁杆蒿和绣线菊的垂直覆盖结构组分减沙贡献率大小顺序分别为: 根系>冠层>枯落物、冠层>枯落物>根系和冠层>根系>枯落物。与减流贡献率相比, 冠层的减沙贡献率明显降低, 而根系的减沙贡献率明显上升, 同时枯落物的减沙贡献率变化不明显。

### 3 讨论

本研究表明, 各植物均能有效的减少径流和土壤侵蚀 (图 2)。与裸地相比, 自然状态下须芒草、铁杆蒿和绣线菊分别减少了 45.9%、63.5%、73.1% 的产流量和 87.5%、91.3%、94.6% 的产沙量, 这也表明植物控制土壤流失能力大于削弱产流能力 (图 3)。自然状态下须芒草、铁杆蒿和绣线菊的入渗量分别为 9.53 mm、

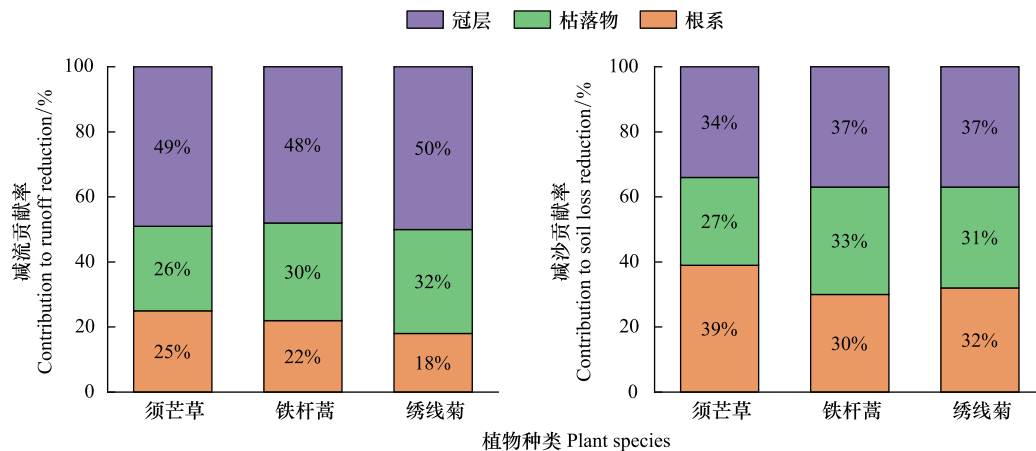


图 4 三种植物不同垂直覆盖结构组分的减流贡献率和减沙贡献率

Fig.4 Contribution rate of different vertical cover structure components to runoff and soil loss reduction for the three plants

10.08 mm和 10.09 mm,较裸地相比分别提高了 4.72%、10.76%和 10.77%。李坤等<sup>[20]</sup>通过实地观测发现不同植被类型增加土壤入渗的顺序为:林地>灌木>草地。这一结果与不同植被类型对坡面入渗的调控作用机制有关:草地的冠幅较小,因此更多的是直接拦沙的功效,而灌木的冠幅更大,可以显著降低雨滴动能,进而增加土壤入渗<sup>[21]</sup>。

冠层、枯落物和根系都具有减少土壤侵蚀的作用,并且各组分的贡献率也不同(图 4)。本研究表明,冠层和枯落物在减少径流中起到了较高的作用,平均减流贡献率为 49%和 29%,这与以往的研究结果相似<sup>[22]</sup>。这是因为植被冠层可以减少降雨动能,改变雨滴直径,延缓径流的发生,同时枯落物可以截留降雨,积累和减缓地表径流,增加入渗。然而,冠层、枯落物、根系的平均减沙贡献率为 36%,30%和 34%,这与之前的研究结果差异较大<sup>[23]</sup>。以往研究表明在去除地表冠层后,坡面侵蚀产沙量增加幅度较大,因而根系具有较高的减沙贡献率<sup>[16]</sup>。Zhao 等<sup>[24]</sup>通过模拟野外降雨实验发现草地根系减少泥沙的贡献率(66%)高于地上冠层,并且根系对临界剪切应力的提升远高于冠层的作用。Zhou 和 Shangguan<sup>[9]</sup>同样利用野外模拟降雨研究也发现根系减少泥沙的能力高于地上部分。然而 Zhang 等<sup>[17]</sup>认为草本冠层和根系在减沙方面发挥的作用几乎是相等的。研究结果之间的差异可能是由于不同研究人员选取的植物种类不同所致,其次模拟降雨的雨强较高,这可能会导致自然状态小区与仅留根系小区的减沙效益差异不显著,因此根系具有较高的减沙贡献率<sup>[25-26]</sup>。此外,有研究表明在植被生长的不同阶段,植物垂直覆盖结构组分的减流减沙能力也不同<sup>[27-28]</sup>。

植物垂直覆盖结构组分在不同植物间减流减沙效益存在差异(表 2),这是由不同植物的功能性状决定。铁杆蒿和绣线菊的冠层减流效益明显高于须芒草,这是因为绣线菊和铁杆蒿植株高度和茎密度更高(表 1),可以有效增加植物表面积,降低地表流速,同时促进土壤水分入渗,而且绣线菊和铁杆蒿的叶片更柔软,分布更密集,从而表现出更高的吸附水的能力,能有效减弱穿透雨的总量和强度<sup>[28]</sup>。三种植物的枯落物对减流效益均有一定的贡献,枯落物在须芒草、铁杆蒿和绣线菊之间的减流减沙贡献率差异可能是由枯落物形状和生物量差异所致(表 1)。枯落物的形状、覆盖率、生物量和厚度等决定其水土保持功能的大小<sup>[29]</sup>。三种植物根系的减沙贡献率均大于减流贡献率(图 4),说明根系对于减少侵蚀的作用较大,这与根系通过改善土壤属性,增加土壤稳定性团聚体数量,稳定土层结构降低土壤侵蚀风险来控制水土流失的方式有关<sup>[30-31]</sup>。对植物种类和垂直覆盖结构组分进行交互作用分析,发现两者间存在显著的交互作用,且简单效应分析得到的结果与表 2 结果一致,需要深入分析植物种类与垂直覆盖结构的交互作用对减流减沙效应的影响机理。同时,在后续的研究中应对不同降雨条件(如降雨强度)下植物各垂直覆盖结构的减流减沙效应进行比较和分析,这有助于进一步理解植物与水土流失之间的关系。



## 4 结论

本研究采用野外微型小区自然降雨监测的方法,通过设置不同植物种类下不同垂直覆盖结构处理,分析了不同植物和垂直覆盖结构对于土壤侵蚀的影响及其差异性,量化植物不同垂直覆盖结构组分对减流减沙的贡献,主要结论如下:

1) 三种植物均能有效地减少径流和土壤侵蚀,且减沙作用强于减流作用。自然状态下,三种植物间的减流率有显著差异(绣线菊>铁杆蒿>须芒草),但三者间的减沙率没有显著差异。与裸地相比,自然状态下须芒草、铁杆蒿和绣线菊分别增加了 4.72%、10.76% 和 10.77% 的入渗量。

2) 植物垂直覆盖结构组分中,冠层对减少径流的作用最大,平均减流贡献率为 49%。三种植物的枯落物减流贡献率为:绣线菊>铁杆蒿>须芒草,根系减流贡献率顺序与之相反。冠层、枯落物和根系的平均减沙贡献率为 36%、30% 和 34%,在减沙方面均有重要作用。须芒草的根系对控制侵蚀方面具有更大作用,而铁杆蒿和绣线菊冠层的减沙贡献率更高。

3) 绣线菊和铁杆蒿的植株高度和茎密度更高,三种植物的叶片和根系形态有较大差异。植物垂直覆盖结构组分在不同植物间减流减沙能力的差异,与植物功能性状密切相关。

## 参考文献(References):

- [1] 史志华, 王玲, 刘前进, 张含玉, 黄萱, 方怒放. 土壤侵蚀: 从综合治理到生态调控. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 198-205.
- [2] Kijowska-strugala M, Bucala-Hrabia A, Demczuk P. Long-term impact of land use changes on soil erosion in an agricultural catchment (in the Western Polish Carpathians). *Land Degradation & Development*, 2018, 29(6): 1871-1884.
- [3] Peng X D, Dai Q H, Ding G J, Shi D M, Li C L. Impact of vegetation restoration on soil properties in near-surface fissures located in karst rocky desertification regions. *Soil and Tillage Research*, 2020, 200: 104620.
- [4] Rungee J, Bales R, Goulden M. Evapotranspiration response to multiyear dry periods in the semiarid western United States. *Hydrological Processes*, 2019, 33(2): 182-194.
- [5] 秦东远, 肖培青, 郝仕龙, 杨春霞. 黄丘区野外坡面产流产沙过程对不同植被覆盖结构的响应. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 73-78.
- [6] Duan L X, Huang M B, Zhang L D. Differences in hydrological responses for different vegetation types on a steep slope on the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2016, 537: 356-366.
- [7] Han D D, Deng J C, Gu C J, Mu X M, Gao P, Gao J J. Effect of shrub-grass vegetation coverage and slope gradient on runoff and sediment yield under simulated rainfall. *International Journal of Sediment Research*, 2021, 36(1): 29-37.
- [8] Adekalu K O, Olorunfemi I A, Osunbitan J A. Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria. *Bioresource Technology*, 2007, 98(4): 912-917.
- [9] Zhou Z C, Shanguan Z P. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall. *CATENA*, 2007, 70(3): 350-355.
- [10] 张志铭, 赵河, 杨建涛, 祝忆伟, 胡启立, 余洁, 赵勇. 太行山南麓山区不同植被恢复类型土壤理化和细根结构特征. *生态学报*, 2018, 38(23): 8363-8370.
- [11] Mohammad A G, Adam M A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses. *CATENA*, 2010, 81(2): 97-103.
- [12] Bochet E, Poesen J, Rubio J L. Runoff and soil loss under individual plants of a semi-arid Mediterranean shrubland: influence of plant morphology and rainfall intensity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(5): 536-549.
- [13] da Silva R M, Santos C A G, Dos Santos J Y G. Evaluation and modeling of runoff and sediment yield for different land covers under simulated rain in a semiarid region of Brazil. *International Journal of Sediment Research*, 2018, 33(2): 117-125.
- [14] Zhang X X, Song J X, Wang Y R, Deng W J, Liu Y F. Effects of land use on slope runoff and soil loss in the Loess Plateau of China: a meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142418.
- [15] Wu G L, Liu Y F, Cui Z, Liu Y, Shi Z H, Yin R, Kardol P. Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(5): 875-885.
- [16] Li C J, Pan C Z. The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hillslope under simulated rainfall. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 90-103.
- [17] Zhang X, Yu G Q, Li Z B, Li P. Experimental study on slope runoff, erosion and sediment under different vegetation types. *Water Resources*

- Management, 2014, 28(9): 2415-2433.
- [18] 顾朝军. 黄土区土壤水文物理特性及流域产汇流机制变化对植被恢复的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [19] Gao G Y, Tuo D F, Han X Y, Jiao L, Li J R, Fu B J. Effects of land-use patterns on soil carbon and nitrogen variations along revegetated hillslopes in the Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2020, 746: 141156.
- [20] 李坤, 姚文艺, 肖培青, 庄宁, 杨春霞, 张浩. 植被对土壤入渗和地表产流过程的影响研究进展. *中国水土保持*, 2017, (3): 27-30.
- [21] 马建业, 李占斌, 马波, 李朝栋, 肖俊波, 张乐涛. 黄土区小流域植被类型对沟坡地土壤水分循环的影响. *生态学报*, 2020, 40(8): 2698-2706.
- [22] 李盼盼, 王兵, 刘国彬, 李文达. 茵陈蒿群落垂直结构对坡面产流产沙过程的影响. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 40-44.
- [23] 张思毅, 梁志权, 谢真越, 卓慕宁, 郭太龙, 廖义善, 韦高玲, 李定强. 白三叶不同部位减沙效应及其对径流水动力学参数的影响. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1306-1314.
- [24] Zhao C H, Gao J E, Huang Y F, Wang G Q, Xu Z. The contribution of *Astragalus adsurgens* roots and canopy to water erosion control in the water-wind crisscrossed erosion region of the Loess Plateau, China. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(1): 265-273.
- [25] 杨春霞, 姚文艺, 肖培青, 秦东远. 植被覆盖结构对坡面产流产沙的影响及调控机制分析. *水利学报*, 2019, 50(9): 1078-1085.
- [26] Kervroëdan L, Armand R, Rey F, Faucon M P. Trait - based sediment retention and runoff control by herbaceous vegetation in agricultural catchments; a review. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(3): 1077-1089.
- [27] Bond S, Kirkby M J, Johnston J, Crowle A, Holden J. Seasonal vegetation and management influence overland flow velocity and roughness in upland grasslands. *Hydrological Processes*, 2020, 34(18): 3777-3791.
- [28] Hou J, Zhu H X, Fu B J, Lu Y H, Zhou J. Functional traits explain seasonal variation effects of plant communities on soil erosion in semiarid grasslands in the Loess Plateau of China. *CATENA*, 2020, 194: 104743.
- [29] Wang D D, Yuan Z J, Cai Y T, Jing D W, Liu F, Tang Y, Song N N, Li Y Y, Zhao C Y, Fu X Y. Characterisation of soil erosion and overland flow on vegetation-growing slopes in fragile ecological regions; a review. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112165.
- [30] 张琪琳, 王占礼, 王栋栋, 刘俊娥. 黄土高原草地植被对土壤侵蚀影响研究进展. *地球科学进展*, 2017, 32(10): 1093-1101.
- [31] Pohl M, Alig D, Körner C, Rixen C. Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems. *Plant and Soil*, 2009, 324(1/2): 91-102.