

DOI: 10.5846/stxb202012313330

赵炯昌, 王伟, 段兴武. 模拟降雨下黄土坡面水沙过程对 3 种灌草植被垂直结构变化的响应. 生态学报, 2021, 41(21): 8602-8611.

Zhao J C, Wei W, Duan X W. Response of the runoff and sediment process on loess slope to the vertical structure changes of three shrub and grass vegetations under simulated rainfall. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8602-8611.

模拟降雨下黄土坡面水沙过程对 3 种灌草植被垂直结构变化的响应

赵炯昌^{1,2}, 卫 伟^{1,3,*}, 段兴武²

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 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650591

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 植被对坡面产流产沙过程的影响随植被类型及其垂直结构组分的变化而变化, 然而这些因素如何影响坡面水沙过程却缺乏定量分析。利用野外径流小区和人工模拟降雨试验, 研究了黄土丘陵区 3 种典型灌草(沙棘、柠条、苜蓿)及其不同垂直结构组分(叶、茎、枯落物、根系)对坡面产流和产沙过程的影响。结果表明: 3 种灌草均具有较好的减流减沙效益, 且减沙作用强于减流作用, 与裸地相比, 灌草植被减少径流量 32.49%—44.86%, 减少侵蚀量 72.99%—80.63%, 降低坡面流速 29.17%—45.83%。苜蓿的减流效益最佳, 为 44.86%, 柠条的减沙效益最佳, 为 80.63%。3 种植被的减流效益在不同产流时期差异明显, 从产流初期到中期和后期逐渐减少, 减沙效益在不同产流时期则没有明显变化。植被垂直结构不同组分对于减流减沙效益的相对贡献与其形态特征以及其空间分布方式有着密切的关系。地上部分对于减流效益和减速效益有较大的相对贡献率, 平均为 75.42% 和 68.38%, 而不同植被茎、叶和枯落物的相对贡献具有一定的差异。根系则发挥较大的减沙作用, 平均相对贡献为 78.44%。植被垂直结构组分越完整, 减流减沙效益越显著。研究对黄土丘陵区水土保持、植被恢复和建设提供重要的科学依据和理论指导。

关键词: 植被垂直结构; 根系; 径流; 泥沙; 模拟降雨; 黄土坡面

Response of the runoff and sediment process on loess slope to the vertical structure changes of three shrub and grass vegetations under simulated rainfall

ZHAO Jiongchang^{1,2}, WEI Wei^{1,3,*}, DUAN Xingwu²

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

2 Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650591, China

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

Abstract: The effect of vegetation on the processes of runoff and sediment production on slopes varies with vegetation types and their vertical structural components. However, there are few quantitative analysis on how these factors affect runoff and sediment yield processes on the slope. In this study, based on field runoff plots and artificial simulated rainfall experiments, the effects of three different typical shrubs (*Hippophae rhamnoides*, *Caragana korshinskii*, and *Medicago sativa*) and their different vertical structural components (leaf, stem, litter, and root) on runoff and sediment yield processes in the loess hilly region were studied. The experiment was carried out in Anjiagou catchment of Dingxi, Gansu Province and the runoff and sediment reduction of these three shrubs were apparent. Compared with the bare slope, runoff and sediment reduction

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971129, 41991233); 中科院青年创新促进会优秀会员项目(Y201812)

收稿日期: 2020-12-31; **采用日期:** 2021-08-03

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

ratios of three shrub and grass vegetations were from 32.49%—44.86% and from 72.99%—80.63%, and the flow rate reduction was about 29.17%—45.83%, respectively, indicating the better sediment reduction effects. Amongst three shrub and grass vegetations, *M. sativa* has the best flow reduction benefit, which was about 44.86%, and *C. korshinskii* has the best sediment reduction benefit, which was 80.63%. The runoff reduction benefits of the three types of vegetation differed are significantly at different runoff generation periods, and gradually decreased in the early, middle and late runoff periods; while the sediment reduction benefits had no obvious changes in different runoff periods. The relative contribution of different components of the vegetation vertical structure to the benefits of flow reduction, and sediment reduction was closely related to its morphological characteristics and its spatial distribution. The contribution rate of the above-ground part to the flow reduction benefit and deceleration benefit was 75.42% and 68.38% on average, respectively, while the relative contributions of different vegetation stems, leaves and litter have some differences. Compared with the Aboveground part of vegetation, the root system played a greater role in reducing sediment, with a relative contribution of 78.44%. The more complete the vertical structure of vegetation, the more significant the benefits of vegetation reduction and sediment reduction. This paper provides an important scientific basis and theoretical guidance for soil and water conservation, plant restoration and construction in the loess hilly areas.

Key Words: vegetation vertical structure; roots; runoff; sediment; simulated rainfall; loess slope

植被恢复与建设是干旱半干旱地区防治水土流失的重要措施^[1-2]。植被对土壤侵蚀的影响主要取决于植被类型^[3-4]、植被覆盖度^[5]、植被格局^[6-8]以及植被地上部分的冠层(叶和茎)、枯落物^[9-10]和地下部分的根系^[11]等方面。冠层和枯落物能够有效截留降雨、消减雨滴动能和延缓产流时间^[12-13];根系能够促进土壤团聚体稳定性及其有机碳固定,改善土壤结构^[14-16]。植被垂直结构指植被从冠层叶、茎到地表枯落物再到地下根系的垂直分布与配置^[17],植被垂直结构不同组分均直接或间接影响降雨再分配、土壤水分入渗、产流汇流和产沙输沙等水文过程。

植被与水土流失之间的研究以往多集中在植被全株或地上部分,而且许多相关研究并未对根系采取相应的处理,仅以地上部分来代表植被整体状况,这在不同程度上忽略或低估了根系在水沙过程中发挥的作用。Zhao 等^[18]发现沙打旺通过根系和冠层的共同作用来控制土壤侵蚀,而且根系的作用大于冠层。不同的植被由于其分层结构和形态特征(如植被高度、叶面积、根直径等)之间差异显著,对水土流失的影响也不同^[19]。通常认为草本植物的地上部分在减少径流方面发挥较大作用,而根系则在控制侵蚀方面发挥着较大作用^[20-23]。然而,也有研究认为草地地上部分和根系在减少径流方面的贡献基本相同,森林根系对减流和减沙的相对贡献均大于地上部分^[24]。目前,关于植被垂直结构不同组分对减流减沙效益相对贡献方面的研究并没有形成较为一致的结论。

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区之一,也是典型的生态脆弱区^[25]。退耕还林还草工程实施以来,植被生态系统结构和功能明显提升,并且驱动着土壤近地表特性发生相应的变化,主要体现在植被茎秆覆盖、枯落物、结皮和植物根系系统等方面^[26]。草本和灌木是黄土高原地区分布最典型的生态系统类型。基于此,本研究选取该地区典型人工草灌植被(沙棘、柠条、苜蓿),从上至下逐层去除近地表因子(叶、茎、枯落物、根系),定量分析植被垂直结构各组分减流减沙效益的相对贡献,探究植被地上和地下各部分调控坡面侵蚀的机理。本研究能够更好地理解植被及其垂直结构组分在坡面水沙过程中发挥的作用,为定量评价黄土丘陵区植被水土保持效益和选择适宜的水土保持物种提供相应的科学依据和理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市安家沟小流域(35°33'—35°36'N, 104°38'—104°41'E),地处黄土高原西南缘,

属于黄河流域祖厉河水系,流域面积 8.54 km²,海拔 1917—2234 m(图 1)。流域内年均温 6.8℃,多年平均降雨量 421 mm,降雨主要集中在 7—9 月,并且多以暴雨形式发生。流域地貌主要包括梁峁坡、沟谷及阶坪地三大类型,地形支离破碎,沟壑纵横。流域土壤质地单一,有机质含量低,抗蚀抗冲性差,易发生水土流失。流域内现有植被以人工种植为主,主要包括油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、苜蓿(*Medicago sativa*)等。

1.2 试验设计

根据坡地形态和模拟降雨装置,试验小区设置为长 3 m、宽 1.5 m,共 4.5 m²,坡度为黄土高原常见退耕坡度 15°,共设四个试验小区,地表植被分别为沙棘、柠条、苜蓿以及裸地作为对照参考,不同试验小区的表层(0—20 cm)土壤属性见表 1。小区边界由 30 cm 铁皮围成,入土深度为 10 cm。为避免土壤性质和坡向对试验结果的影响,小区布设在同一坡面,并且在小区建立之前,进行人工平整以减少微地形变化对试验的影响。

沙棘、柠条和苜蓿均从上至下依次去除叶、茎和枯落物,具体分为:全株、除叶、除茎叶、仅留根系四种处理。试验开始前调查植被参数,并分别收集去除的叶、茎和枯落物,带回实验室称重,不同试验小区地表植被参数见表 2。

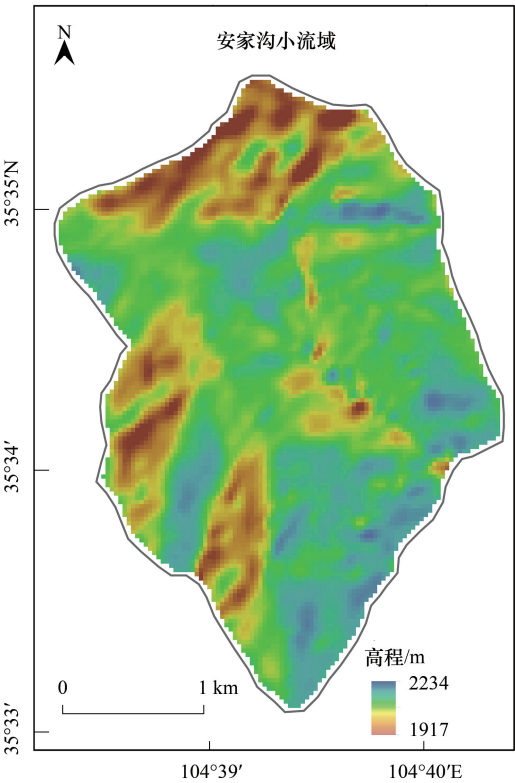


图 1 研究区位置示意图
Fig.1 Location of study area

表 1 不同试验小区表层(0—20 cm)土壤属性
Table 1 The properties of the surface soil in 0—20 cm for different experimental plots

地表覆被 Ground cover	粘粒 Clay/%	粉粒 Site/%	砂粒 Sand/%	土壤容重 Bulk density/ (g/cm ³)	前期土壤 含水量 Antecedent soil moisture/%	土壤孔隙度 Soil porosity/%	土壤有机质 Soil origin matter/ (g/kg)
裸地 Bare land	8.03±1.16a	68.70±2.31a	23.27±3.23a	1.26±0.16a	14.88±1.48a	40.98±3.86b	6.86±2.03b
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	8.27±1.21a	72.19±0.98a	19.54±1.34a	1.25±0.20a	15.24±3.23a	48.06±2.86a	13.07±3.16a
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	9.72±1.37a	69.53±3.26a	20.75±4.03a	1.22±0.04a	15.98±4.06a	46.93±1.79a	10.88±3.11ab
苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	9.43±1.01a	70.27±2.38a	20.30±2.76a	1.23±0.08a	15.03±1.89a	49.71±4.68a	14.38±4.23a

表中数据为平均值±标准差;不同字母代表在 P<0.05 水平上差异性显著

表 2 不同试验小区地表植被参数
Table 2 Surface vegetation parameters of different experimental plots

植被 Vegetation	株高 Height/m	冠幅 Crown diameter/m ²	盖度 Coverage/%	叶面积指数 Leaf area index	生物量鲜重 Fresh weight of biomass/g		
					叶	茎	枯落物
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	1.17±0.17	1.28±0.48	78.53	1.17	147.60	1192.80	70.25
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	1.14±0.30	1.06±0.28	79.10	0.96	140.80	1287.85	88.70
苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	0.82±0.28	0.48±0.16	70.87	0.87	122.60	591.60	23.23

1.3 试验过程

模拟降雨系统由美国农业部国家土壤侵蚀研究实验室研发,采用先进的振荡式原理模拟自然降雨过程,

其主要组成部件包括喷头、控制器、水阀、水泵和脚架^[27]。喷头离地面 4 m,以保证系统产生的雨滴分布和动能近似自然降雨。通过水阀调节水压及控制器调整喷嘴转动频率,从而改变降雨强度。根据黄土高原侵蚀性降雨标准并结合当地气象资料分析,雨强设定为典型暴雨雨强 90 mm/h。

模拟降雨试验于 2020 年 7—8 月晴朗无风的白天开展,每个处理均进行两次重复,共计 26 场降雨。每次降雨之前进行降雨强度和降雨均匀度的率定,保证雨强达到 (90±3) mm/h 且降雨均匀度大于 85%,保证试验过程中降雨的均匀性和稳定性。与此同时,采用便携式 TDR—Uni1000 土壤水分速测仪在试验小区的上、中、下三个部位测定土壤含水量,控制前期土壤含水量在 (15±1)%,从而消除其对产流产沙过程的影响。每次试验自坡面开始产流后持续 60 min,每隔 2 min 接取 1 次地表径流泥沙样品,每次接取 30 s,共接取 30 个样品,静置一段时间后将所取样品在室内进行称重、烘干,计算产流产沙量。每隔 0.5 m 设置一个断面,自产流开始后,每 10 min 使用 KMnO₄ 溶液测定每个断面的流速。为比较不同产流时期水土流失过程的变化,将产流后 0—20 min、20—40 min、40—60 min 分别定义为产流初期、中期、后期。

1.4 指标测算

研究认为染色示踪法测定的流速为坡面流表层优势流速,实际中通常乘校正系数得到坡面流平均流速^[20],计算公式如下:

$$V = \alpha \times V_s \quad (1)$$

式中, V 为坡面流平均流速 (cm/s); V_s 为坡面表层优势流速,即本研究 KMnO₄ 溶液测定的流速 (cm/s); α 为校正系数,其中 $0 < \alpha \leq 1$,实际中根据坡面流流态 α 取不同值,层流为 0.67,过渡流为 0.7,紊流为 0.8,本研究 α 取 0.67。

由于坡面水层极薄以及下垫面条件等方面的限制,难以直接测量水深,研究中常假定水流在坡面上均匀分布,计算公式如下:

$$h = \frac{q}{V} = \frac{Q}{V \times B \times t} \quad (2)$$

式中, h 为水深 (cm); q 为单宽流量 (cm³/s); V 为坡面流平均流速 (cm/s); Q 为 t 时间段内的径流量 (mL); B 为过水断面宽度 (cm); t 为径流取样历时 (s)。

3 种植被 (i = 沙棘、柠条、苜蓿) 四种不同垂直结构 (j = 全株、除叶、除茎叶、根系) 的减流效益计算公式如下:

$$CS_{ij} = \frac{(S_b - S_{ij})}{S_b} \times 100\% \quad (3)$$

式中, CS_{ij} 为植被不同垂直结构的减流效益; S_{ij} 为植被不同垂直结构的产流量; S_b 为裸地的产流量。同理,可推导出不同植被垂直结构的减沙效益和降低流速效益。

不同植被垂直结构组分减流效益的相对贡献,其计算公式如下:

$$RC_{\text{叶}} = \frac{CS_{i(\text{全株})} - CS_{i(\text{除叶})}}{CS_{i(\text{全株})}} \times 100\% \quad (4)$$

$$RC_{\text{茎}} = \frac{CS_{i(\text{除叶})} - CS_{i(\text{除茎叶})}}{CS_{i(\text{全株})}} \times 100\% \quad (5)$$

$$RC_{\text{枯落物}} = \frac{CS_{i(\text{除茎叶})} - CS_{i(\text{根系})}}{CS_{i(\text{全株})}} \times 100\% \quad (6)$$

$$RC_{\text{根系}} = \frac{CS_{i(\text{根系})}}{CS_{i(\text{全株})}} \times 100\% \quad (7)$$

式中, $RC_{\text{叶}}$ 、 $RC_{\text{茎}}$ 、 $RC_{\text{枯落物}}$ 、 $RC_{\text{根系}}$ 分别为叶、茎、凋落物、根系减流效益的相对贡献; $CS_{i(\text{全株})}$ 、 $CS_{i(\text{除叶})}$ 、 $CS_{i(\text{除茎叶})}$ 、 $CS_{i(\text{根系})}$ 分别为全株、去叶、去茎叶、根系的减流效益。同理,可推导出不同植被垂直结构减沙效益和降低流速效益的相对贡献。

1.5 数据分析

使用 SPSS 25.0 软件对数据进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差数法(LSD)进行差异显著性检验($P=0.05$)。使用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同植被垂直结构产流过程

沙棘、柠条和苜蓿不同植被垂直结构及裸地产流率随产流时间的变化如图 2 所示。在满足前期土壤含水量和试验雨强基本一致的条件下,3 种植被不同垂直结构及裸地的坡面产流过程存在明显差异,总体上均呈现出产流率在产流初期迅速上升、中后期缓慢增加趋于稳定的变化趋势,而且裸地产流率的增加速度高于植被小区。相较于沙棘和苜蓿,柠条的产流过程变化更加平稳。以裸地作为对照,沙棘、柠条和苜蓿全株均显著降低了径流量($P<0.05$),分别降低了 35.15%、32.49%和 44.86%(表 3)。沙棘、柠条和苜蓿的减流效益在产流初期为 73.04%、70.91%和 82.71%,产流中期为 48.06%、32.89%和 60.43%,产流后期为 37.61%、26.11%和 48.62%。3 种植被的减流效益均在产流初期最高,且随着产流时间的增加,减流效益逐渐降低(表 4)。

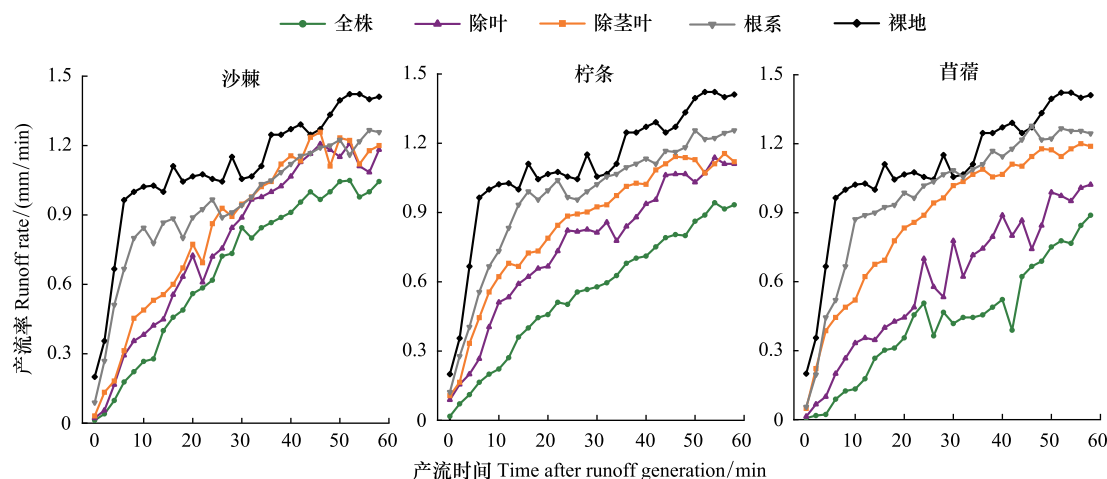


图 2 不同植被垂直结构产流率变化

Fig.2 Runoff rate under different vegetation vertical structure

流速和径流深是坡面流最重要的两个水动力学参数,也是计算其他水动力学参数的基础。坡面径流的流速直接关系到坡面侵蚀的土壤分离、泥沙输移和沉积过程。如表 3 所示,裸地的流速和径流深分别为 0.24 mm/s 和 0.24 mm,而沙棘、柠条和苜蓿的流速分别为 0.18、0.18、0.13 mm/s,径流深分别 0.21、0.19、0.16 mm,3 种植被的流速和径流深均显著低于裸地($P<0.05$)。沙棘、柠条和苜蓿全株、除叶、除茎叶及仅留根系四种处理的流速和径流深平均分别为 0.16、0.17、0.20、0.21 mm/s 和 0.17、0.21、0.22、0.23 mm,流速和径流深均随着叶、茎及枯落物的依次去除而增加。

2.2 不同植被垂直结构产沙过程

沙棘、柠条和苜蓿不同植被垂直结构及裸地产沙率随产流时间的变化如图 3 所示。产沙过程相较于产流过程比较复杂,波动起伏变化更加剧烈。其中,裸地产沙过程的波动最为强烈,波动范围为 22.14—78.30 $\text{g m}^{-1} \text{min}^{-1}$,产沙率也一直处于较高水平。如图 4 所示,相较于裸地对照,沙棘、柠条和苜蓿均显著降低了侵蚀量($P<0.05$),减沙效益分别为 72.99%、80.63%和 75.25%,且 3 种植被全株的减沙效益均高于减流效益(表 3)。不同于沙棘、柠条和苜蓿在不同产流时期的减流效益变化的一致性,3 种植被在不同产流时期的减沙效益有所差异,沙棘在产流初期、中期及后期的减沙效益逐渐降低,分别为 80.00%、70.49%和 61.42%,苜蓿在产流初期、中期及后期的减沙效益先增加后降低,分别为 75.05%、79.74%、69.35%,而柠条在产流初期、中期及

后期的减沙效益没有明显变化,分别为 80.70%、80.00%和 81.36%(表 4)。

表 3 不同植被垂直结构的坡面径流侵蚀相关参数
Table 3 Runoff hydrodynamic parameters under the different vertical vegetation

地表覆被 Ground cover	垂直结构 Vertical structure	径流量 Runoff/L	侵蚀量 Sediment yield/g	径流含沙量 Sediment content/(g/L)	流速 Flow depth/(mm/s)	径流深 Flow depth/mm	减流效益 Runoff reduction/%	减沙效益 Sediment yield reduction/%
裸地	—	296.28	10409.40	35.13	0.24	0.24	—	—
沙棘	全株	147.94	2812.05	19.01	0.17	0.16	35.15	72.99
	除叶	204.12	3077.33	15.08	0.18	0.21	26.80	70.44
	除茎叶	227.70	3213.36	14.11	0.20	0.21	19.47	69.13
	根系	258.82	3699.54	14.29	0.22	0.22	8.81	64.46
柠条	全株	178.67	2016.54	11.29	0.17	0.19	32.49	80.63
	除叶	210.00	2880.18	13.72	0.18	0.21	25.92	72.33
	除茎叶	225.62	3659.04	16.22	0.19	0.22	20.41	64.85
	根系	253.22	4725.00	18.66	0.20	0.23	10.67	54.61
苜蓿	全株	114.92	2576.70	22.42	0.13	0.16	44.86	75.25
	除叶	161.96	2884.86	17.81	0.16	0.19	37.08	72.29
	除茎叶	235.06	3229.74	13.74	0.19	0.22	17.08	68.97
	根系	263.34	4201.02	15.95	0.22	0.23	7.11	59.64

表 4 不同产流时期植被减流减沙效益
Table 4 Runoff reduction and sediment yield reduction in different runoff periods

植被 Vegetation	减流效益 Runoff reduction/%			减沙效益 Sediment yield reduction/%		
	初期	中期	后期	初期	中期	后期
	Early stage	Middle stage	Late stage	Early stage	Middle stage	Late stage
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	73.04	48.06	37.61	80.00	70.49	61.42
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	70.91	32.89	26.11	80.70	80.00	81.36
苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	82.71	60.43	48.62	75.05	79.75	69.35

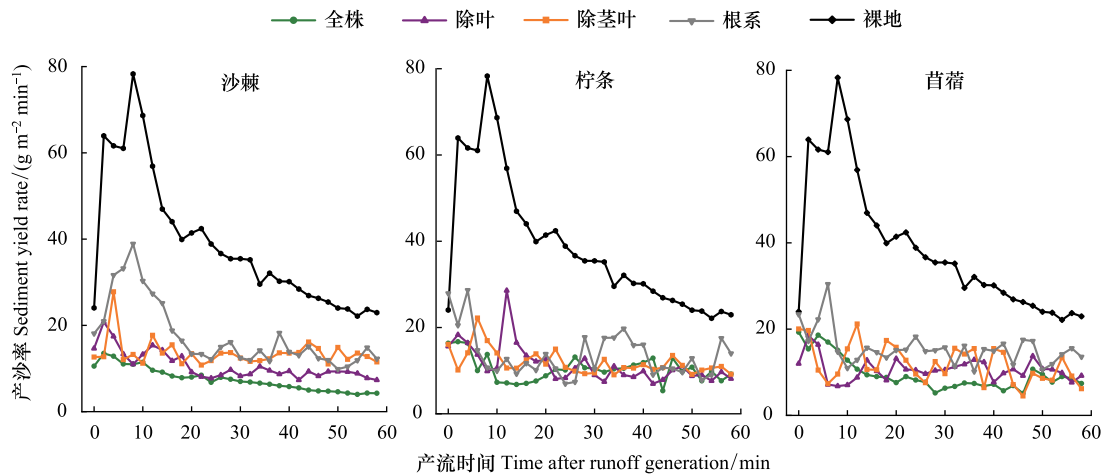


图 3 不同植被垂直结构产沙率变化
Fig.3 Sediment yield rate under different vegetation vertical structure

如表 3 所示,坡面径流含沙量由降雨期间的径流量和侵蚀量共同决定。裸地的径流含沙量最高,为

35.134 g/L, 径流含沙量从高到低为柠条 (15.076 g/L)、沙棘 (11.286 g/L) 和苜蓿 (22.422 g/L), 相较于裸地对照, 3 种植被均显著降低 ($P < 0.05$), 而苜蓿的径流含沙量显著高于沙棘和柠条 ($P < 0.05$)。

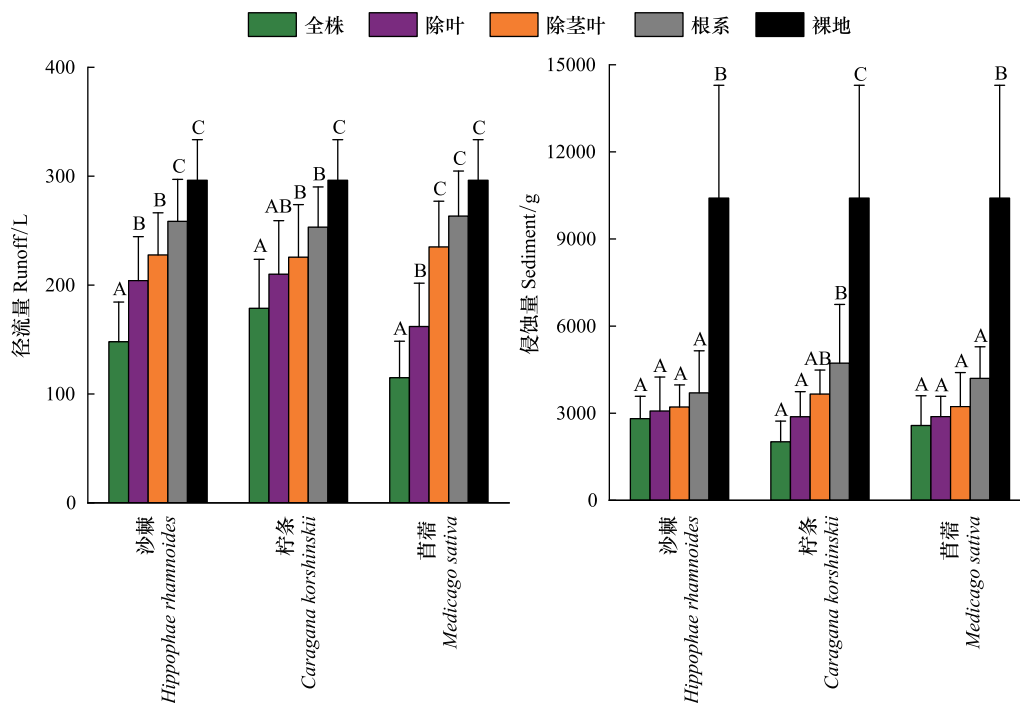


图 4 不同植被垂直结构径流量和侵蚀量

Fig. 4 Runoff and sediment under different vegetation vertical structure

不同字母表示相同植被不同垂直结构间差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 不同植被垂直结构的相对贡献

沙棘、柠条及苜蓿不同植被垂直结构对于减流和减沙的相对贡献如图 5 所示。沙棘、柠条和苜蓿地上部分减流的相对贡献分别为 75%、67% 和 84%，根系的相对贡献为 25%、33% 和 16%；而对于减沙效益而言，地上部分的相对贡献为 13%、32% 和 21%，根系的相对贡献为 87%、68% 和 79%。总体来说，植被地上部分对径流的减少发挥更重要的作用，平均相对贡献度为 75%；而根系对侵蚀量减少的贡献更大，平均相对贡献度为 78%。对于植被地上部分不同组分（叶、茎和枯落物）而言，沙棘、柠条和苜蓿对于减流相对贡献具有一定的差异，沙棘和柠条的枯落物相对贡献较大，而苜蓿的茎则发挥更大的作用；而对于减沙效益的相对贡献而言，叶、茎和枯落物的相对贡献均较小。

3 讨论

相较于裸地，沙棘、柠条和苜蓿 3 种植被类型下的坡面径流量、流速和侵蚀量均显著减少，一方面是由于裸地缺乏植被地上部分的保护作用，使得降雨直接冲击地表，较大的雨滴动能易造成土壤孔隙堵塞，进而导致坡面入渗减少、产流增加；另一方面，植被冠层及其根系对径流和泥沙具有一定的拦截作用，能够延缓地表径流，降低坡面径流速率、防止土壤侵蚀^[28-29]。此外，植被改善了土壤的孔隙度、团粒结构和有机质含量等方面，从而提高了土壤对于径流侵蚀的抵抗力^[15]。

沙棘、柠条和苜蓿在不同产流时期的产流过程变化趋势基本一致，而且减流效益均在产流初期、中期和后期逐渐下降。分析认为在产流初期，受植被冠层截留降雨作用的影响，各处理产流率均较小，随降雨历时的增加，各处理产流率迅速增加。3 种植被类型的坡面产沙过程均有不同程度的变化，但总体呈现侵蚀峰值基本出现在产流初期，之后迅速降低，产流中后期趋于波动稳定的趋势。这可能是由于降雨开始前地表表层疏松

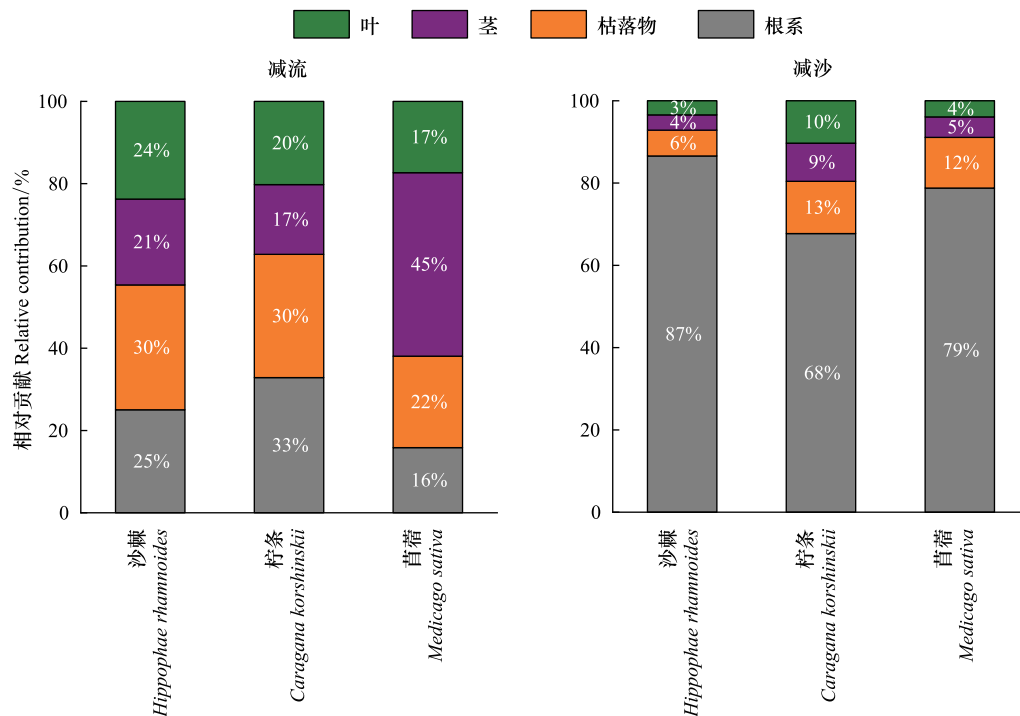


图 5 不同植被垂直结构减流和减沙的相对贡献

Fig.5 Relative contributions of different vegetation vertical structure in runoff reduction and erosion reduction

或结皮的影响使得产流初期出现峰值,随后在雨滴的持续打击下,土壤表面被压实以及出现薄层水流,使得侵蚀速率逐渐减小或趋于稳定^[30]。裸地产沙过程的波动最大,且出现有更多的局部极值。试验过程中观察到裸地发育有大量的细沟,强度高、历时长的降雨导致沟头塌陷、边壁滑塌,细沟内会发生短暂的沉积-侵蚀交替现象^[31],从而导致产沙过程发生较大的起伏。

研究发现植被地上部分和根系都在减少水土流失方面都发挥着重要作用,但是它们各自的相对贡献度不同,地上部分对于减少径流的相对贡献较大,而根系对于减少侵蚀的相对贡献较大,这与许多学者的研究结果较为一致。张冠华^[20]通过剪除不同格局分布的茵陈蒿地上部分,发现其地上部分减流贡献率较大,而地下部分减沙贡献率较大。张思毅等^[21]研究发现白三叶根系减沙效益显著高于冠层。甘卓亭等^[32]通过研究黑麦草和红豆草不同生长阶段的产流产沙过程,对比分析二者根系和冠层对于减流减沙的相对贡献,发现二者的根系都对减少侵蚀产沙有较大的贡献,但二者对坡面径流的调控途径不同。然而, Li 等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^[22]。秦东远等^[33]认为植被覆盖结构减流减沙能力从大到小依次为地表结皮层>地下根系层>植被冠层。坡面产流产沙过程受降雨条件、坡面特征、植被冠层、地表结皮、根系特征和土壤理化性状等因素影响,植被垂直结构不同组分对于坡面的减流、减沙作用不同。

沙棘、柠条和苜蓿随着叶、茎和枯落物的依次去除,减流减沙效益也随之降低。植被垂直结构越完整,植被的减流减沙效益越显著^[34-35],植被垂直结构的缺失往往会导致植被的水土保持效益降低^[36]。3种植被类型的垂直结构不同组分的减流减沙效益相对贡献不同。沙棘、柠条和苜蓿根系对于减沙效益的相对贡献度均较高,分析认为这3种植被类型作为干旱半干旱地区典型生态系统,为有效地利用土壤水分,在地下形成广大的根系网络,这显著地改善了土壤结构,减少了土壤流失^[37]。韩勇等^[38]以2013年陕北富县“7·21”特大暴雨为例,分析了子午岭林区浅层滑坡侵蚀与植被的关系,认为植被根系是影响暴雨滑坡侵蚀强度的主控因素。沙棘和柠条叶的减流效益相对贡献较高,分析认为沙棘和柠条的冠层为倒圆锥形,枝干由冠层中心向外辐射分布,冠幅较大^[39],这使得沙棘和柠条的叶片能够在降雨过程中发挥更大的截留作用。苜蓿的茎在3种植被中的减流效益相对贡献最大,这是由于苜蓿的茎为直立生长、分布密集,能够有效拦截径流、延缓径流流速。3

种植物的枯落物均对减流效益均具有一定的贡献,沙棘、柠条和苜蓿之间枯落物相对贡献的差异可能是枯落物生物量的差异。当雨滴到达地面时,枯落物能够减少防止土壤溅蚀、拦蓄渗透降水、补充土壤水分,其截留降雨的能力主要取决于枯落物的厚度、湿润状况和持水能力等因素^[40-41]。植被垂直结构不同组分对于减流减沙效益的相对贡献与其形态特征以及其空间分布方式有着密切的关系。

4 结论

植被垂直结构可显著影响坡面产流产沙过程,本文通过人工模拟降雨试验,系统研究了沙棘、柠条和苜蓿垂直结构不同组分对坡面产流、产沙过程的影响,主要结论为:

(1)相比裸地对照,沙棘、柠条和苜蓿使径流量、侵蚀量和流速平均减少 37.50%、76.29% 和 32.11%。3 种植物的减流效益在不同产流时期差异显著,产流初期、中期和后期逐渐减少;减沙效益在不同产流时期则没有明显变化。

(2) 3 种植物中苜蓿的减流效益最佳,柠条的减沙效益最佳。苜蓿的茎通过延缓径流,沙棘和柠条的叶通过有效截留降雨对径流减少发挥较大作用,而 3 种植物的枯落物也对于减流效益有不同程度的贡献。

(3) 植被地上部分和根系对水土流速的控制均有一定的作用,但是二者对于减流减沙的相对贡献具有差异。冠层对于减少径流方面发生较大作用,而根系对于控制侵蚀方面发挥较大作用。植被垂直结构越完整,减流减沙效益越显著。

参考文献 (References):

- [1] Zuazo V H D, Pleguezuelo C R R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28 (1): 65-86.
- [2] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 刘宇, 王帅, 周继. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(1): 12-22.
- [3] 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.
- [4] Yu Y, Wei W, Chen L D, Feng T J, Daryanto S. Quantifying the effects of precipitation, vegetation, and land preparation techniques on runoff and soil erosion in a Loess watershed of China. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 755-764.
- [5] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 游珍. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究. *土壤学报*, 2010, 47(3): 401-407.
- [6] Wei W, Jia F Y, Yang L, Chen L D, Zhang H D, Yu Y. Effects of surficial condition and rainfall intensity on runoff in a loess hilly area, China. *Journal of Hydrology*, 2014, 513: 115-126.
- [7] Pan D L, Gao X D, Dyck M, Song Y Q, Wu P T, Zhao X N. Dynamics of runoff and sediment trapping performance of vegetative filter strips: runoff experiments and modeling. *Science of the Total Environment*, 2017, 593-594: 54-64.
- [8] Sun W Y, Mu X M, Gao P, Zhao G J, Li J Y, Zhang Y Q, Francis C. Landscape patches influencing hillslope erosion processes and flow hydrodynamics. *Geoderma*, 2019, 353: 391-400.
- [9] 孙佳美, 余新晓, 李瀚之, 樊登星. 模拟降雨下枯落物调控坡面产流产沙过程及特征研究. *水利学报*, 2017, 48(3): 341-350.
- [10] Sun L, Zhang G H, Luan L L, Liu F. Temporal variation in soil resistance to flowing water erosion for soil incorporated with plant litters in the Loess Plateau of China. *CATENA*, 2016, 145: 239-245.
- [11] Gysels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(4): 371-384.
- [12] 肖培青, 李艳霞, 苏广旭, 吕锡芝. 植被坡面产流特征及其侵蚀动力研究进展. *人民黄河*, 2016, 38(10): 115-118.
- [13] 李兆松, 王兵, 汪建芳, 王忠禹. 铁杆蒿与白羊草枯落物覆盖量对黄土坡面流水动力特性的影响. *农业工程学报*, 2018, 34(17): 151-157.
- [14] 周正朝, 上官周平. 子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性. *生态学报*, 2006, 26(10): 3270-3275.
- [15] 赵富王, 王宁, 苏雪萌, 李秋嘉. 黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 105-113.
- [16] Li J Y, Yuan X L, Ge L, Li Q, Li Z G, Wang L, Liu Y. Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 304: 107126.
- [17] 徐宪立, 马克明, 傅伯杰, 刘宪春, 黄勇, 祁建. 植被与水土流失关系研究进展. *生态学报*, 2006, 26(9): 3137-3143.

- [18] 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.
- [19] 王晶, 赵文武, 刘月, 贾立志. 植物功能性状对土壤保持的影响研究述评. *生态学报*, 2019, 39(9): 3355-3364.
- [20] 张冠华. 茵陈蒿群落分布格局对坡面侵蚀及坡面流水动力学特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 宋亚倩. 黄土坡面草被措施降雨径流调控效应试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [24] 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.
- [25] Chen L, Wei W, Fu B, Lü Y. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: review and perspective. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2007, 31(4): 389-403.
- [26] 张光辉. 退耕驱动的局地地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响. *中国水土保持科学*, 2017, 15(4): 143-154.
- [27] Feng T J, Wei W, Chen L D, Rodrigo-Comino J, Chen D, Feng X R, Ren K M, Brevik E C, Yu Y. Assessment of the impact of different vegetation patterns on soil erosion processes on semiarid loess slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(9): 1860-1870.
- [28] 于国强, 李占斌, 李鹏, 张霞, 陈磊, 贾莲莲. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究. *水科学进展*, 2010, 21(5): 593-599.
- [29] 赵春红, 高建恩, 徐震. 牧草调控绵沙土坡面侵蚀机理. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 113-121.
- [30] 王子豪, 张凤宝, 杨明义, 任瑞雪, 邓鑫欣, 曹晓娟, 李占斌. 水蚀风蚀交错区退耕坡面植被利用对产流产沙的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 3907-3916.
- [31] 和继军, 宫辉力, 李小娟, 蔡强国. 细沟形成对坡面产流产沙过程的影响. *水科学进展*, 2014, 25(1): 90-97.
- [32] 甘卓亭, 叶佳, 周旗, 周正朝, 上官周平. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程. *生态学报*, 2010, 30(9): 2387-2396.
- [33] 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.
- [34] 李鹏, 崔文斌, 郑良勇, 茹华南. 草本植被覆盖结构对径流侵蚀动力的作用机制. *中国水土保持科学*, 2006, 4(1): 55-59.
- [35] 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.
- [36] 张海东, 于东升, 董林林, 史学正, 王宁. 侵蚀红壤恢复区植被垂直结构对土壤恢复特征的影响. *土壤*, 2014, 46(6): 1142-1148.
- [37] Vannoppen W, Vanmaercke M, De Baets S, Poesen J. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 666-678.
- [38] 韩勇, 郑粉莉, 徐锡蒙, 盛贺伟. 子午岭林区浅层滑坡侵蚀与植被的关系——以富县“7·21”特大暴雨为例. *生态学报*, 2016, 36(15): 4635-4643.
- [39] Wang X P, Zhang Y F, Wang Z N, Pan Y X, Hu R, Li X J, Zhang H. Influence of shrub canopy morphology and rainfall characteristics on stemflow within a revegetated sand dune in the Tengger Desert, NW China. *Hydrological Processes*, 2013, 27(10): 1501-1509.
- [40] 程积民, 李香兰. 子午岭植被类型特征与枯枝落叶层保水作用的研究. *武汉植物学研究*, 1992, 10(1): 55-64.
- [41] 寇萌, 焦菊英, 尹秋龙, 杜华栋, 王东丽. 黄土丘陵沟壑区主要草种枯落物的持水能力与养分潜在归还能力. *生态学报*, 2015, 35(5): 1337-1349.