

DOI: 10.5846/stxb202202030287

刘见波, 高光耀, 傅伯杰. 黄土区草地不同组分与土壤侵蚀关系及其对降雨情景的响应. 生态学报, 2023, 43(4): 1496-1505.

Liu J B, Gao G Y, Fu B J. Study on the relationship between grassland components and soil erosion and its responses to rainfall scenarios in the loess region. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1496-1505.

黄土区草地不同组分与土壤侵蚀关系及其对降雨情景的响应

刘见波¹, 高光耀^{2,3,*}, 傅伯杰^{2,3}

1 天津师范大学, 天津市水资源与水环境重点实验室, 天津 300387

2 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

3 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: 随着气候变化黄土高原植被与坡面侵蚀关系面临更多复杂和极端降雨情景的挑战。以黄土丘陵区草地坡面为对象, 选择 3 场当地典型降雨事件, 研究植物冠层、枯落物和根系与土壤侵蚀的关系及其对不同降雨情景的响应规律。事件-I 为短历时、高强度和大雨量, 事件-II 为中等历时、强度和雨量, 事件-III 为长历时、低强度和小雨量, 3 场事件分别代表 2015—2017 年侵蚀性降雨事件聚类分析后的 3 种情景。从多年次降雨事件尺度来看, 冠层主要作用于降低泥沙浓度, 减少了 48.20% 的径流含沙量, 占总贡献率的 53.03%, 并贡献了约 1/3 的减流和减沙效应; 枯落物的减流效应最高, 减少了 28.43% 的径流量, 占总贡献率的 50.75%, 其减沙的相对贡献率仅为 26.41%; 根系的减沙效应最高, 减少了 36.33% 的土壤流失量, 占总贡献的 37.95%, 远高于其减流相对贡献率 (15.58%)。说明草地植物对土壤侵蚀的作用机制受到冠层、枯落物和根系的影响, 各组分越完整, 减流减沙能力越高。单次事件分析表明, 由事件-I、事件-II 到事件-III, 冠层的减流率和减沙率均为负值 (-77.97% 至 -0.91%), 相对贡献呈逐渐减小趋势; 而枯落物和根系的减流率和减沙率却分别高达 12.05%—57.70% 和 86.90%—95.51%, 相对贡献则逐渐增大。说明草地不同组分控制土壤侵蚀的主要途径受到降雨情景的影响, 长时间尺度的统计性结论不一定适用于特定降雨情景。研究对比分析了草地植物在单次和多年尺度降雨事件中的保水保土功能, 可为黄土高原植被恢复和气候变化加剧背景下, 降雨-植物-侵蚀关系研究提供科学依据。

关键词: 黄土高原; 水土流失; 降雨型; 植物垂直结构; 减流减沙

Study on the relationship between grassland components and soil erosion and its responses to rainfall scenarios in the loess region

LIU Jianbo¹, GAO Guangyao^{2,3,*}, FU Bojie^{2,3}

1 Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

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

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

Abstract: The relationship between vegetation and slope erosion in the Loess Plateau will face challenges of more complex and extreme rainfall scenarios with the climate change. This study selected the grassland slope in the loess hilly area as the experimental subject. Three typical rainfall events in the local area were used to research the relationship between plant canopy, litter and roots and soil erosion, and their response regularity to different rainfall scenarios. Event-I had short

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41991233, 42041004); 城市与区域生态国家重点实验室开放基金 (SKLURE2020-2-3); 天津市教委科研计划项目 (2019KJ091)

收稿日期: 2022-02-03; **网络出版日期:** 2022-10-13

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

duration, high intensity and large rainfall amount; event-Ⅱ had moderate duration, intensity, and rainfall amount; and event-Ⅲ had long duration, low intensity and small rainfall amount. The three events represented the three scenarios which classified by the k-means clustering analysis of erosive rainfall events during 2015—2017. At the scale of multi-year rainfall events, the canopy mainly affected the reduction of sediment concentration, which reduced 48.20% of sediment concentration and accounted for 53.03% of the total contribution, and the canopy also contributed about 1/3 of the total reduction of runoff and soil loss; the litter showed the highest effects on runoff reduction, which reduced 28.43% of runoff and accounted for 50.75% of the total contribution, but the relative contribution rate of the litter on soil loss reduction was only 26.41%; and the roots had the highest effects on soil loss reduction, reducing soil loss by 36.33% and contributing 37.95% of the total contribution, which was much higher than its relative contribution rate of runoff reduction (15.58%). It indicated that the influencing mechanism of grassland plant on soil erosion was controlled by the canopy, litter and roots, where the more complete of components, the higher capacity of reducing runoff and soil loss. The single event analysis showed that with the change of event-I, event-Ⅱ to event-Ⅲ, the contribution of canopy to reducing runoff and soil loss were both negative values (from -77.97% to -0.91%), and the relative contribution gradually decreased; while the contribution of litter and roots to reducing runoff and soil loss reached 12.05%—57.70% and 86.90%—95.51%, and the relative contribution gradually increased. It indicated that the main approaches of different grassland components controlling soil erosion were influenced by rainfall scenarios. The statistical conclusions of rainfall at a long time scale were not necessarily applicable to specific rainfall scenarios. This study compared and analyzed the soil and water conservation functions of grassland plant in both the event-and multi-year-scale rainfall, which could provide a scientific basis for studying the relationship between rainfall, vegetation and erosion under the background of vegetation recovery and severe climate change in the Loess Plateau.

Key Words: the Loess Plateau; soil and water loss; rainfall regime; vegetation vertical structure; runoff and soil loss reduction

黄土高原是世界上土壤侵蚀最严重的地区之一,为黄河提供了近 90% 的泥沙来源^[1]。土壤侵蚀诱发了黄土高原地区一系列社会和生态问题,是限制黄河流域生态保护与高质量发展的重要环境问题。1999 年以来实施的“退耕还林(草)工程”使该地区 90% 以上区域得到良好的植被恢复,极大改善了土壤侵蚀状况,将黄河年输沙量降低至约 3 亿吨/年,减少了 57% 的泥沙沉积量,因此植被措施成为土壤保持的主要贡献者^[1-2]。植被控制土壤侵蚀过程主要取决于植物垂直结构各组分(地上冠层、地表枯落物和地下根系)的水文功能^[3-5]。地上冠层和地表枯落物更多作用于地表径流以及溅蚀和细沟间侵蚀,而地下根系则主要控制土壤分离和流失,尤其对细沟侵蚀和沟蚀具有显著作用^[3,6-7]。因此,在机理上研究植物与侵蚀关系需要系统性认识垂直结构各组分对产流产沙的相对贡献。

降雨是黄土高原地区坡面侵蚀的主要诱发因子,深入认识植物对土壤侵蚀的影响机理,必须纳入降雨因子的作用,将“降雨-植物-侵蚀”作为一个整体进行综合研究。植物与土壤侵蚀关系受到广泛关注,以往研究更多采用模拟降雨手段,设置不同雨强的降雨情景,分析不同植被覆盖下侵蚀过程的变化^[8-12]。例如,孙飞达等^[11]在甘肃定西设置了 5 种雨强模拟不同降雨情景,研究林地、草地、人工草地和耕地的侵蚀过程。陈洪松等^[12]对裸地和荒草地设置了不同的降雨强度,分析植被覆盖对降雨入渗过程的影响。自然降雨事件,由于降雨过程的波动性较大,难以利用单一降雨变量进行降雨情景划分。常采用降雨量、历时和降雨强度等指标划分不同降雨类型(情景),从而研究土壤侵蚀对不同降雨情景的响应规律^[3,13-14]。宫渊波等^[15]在嘉陵江上游选择 3 场典型降雨事件代表不同的降雨情景,发现不同植被类型覆盖的小流域侵蚀特征对 3 种降雨情景的响应规律有所差异。黄土高原地区的降雨事件根据降雨量、历时和最大 30 min 雨强(I_{30})可划分为三种降雨型(情景),不同植被类型之间土壤侵蚀差异性在短历时、高强度和小雨量时最大,长历时、低强度和大雨量时

最小^[3,13]。此外,当降雨事件特征更加多样化时,应划分成更多的降雨情景进行研究,尤其是我国南方湿润地区^[14,16-17]。然而,目前关于降雨-植物-侵蚀过程关系的研究仍集中于不同植被类型和降雨情景的分析阶段,对植物垂直结构的侵蚀特征响应不同降雨情景的深入研究仍旧不足。

鉴于此,本研究利用自然降雨野外观测实验,选择3场降雨事件分别代表黄土高原地区3种典型降雨情景,即短历时、高强度和大雨量(事件-I),中等历时、强度和雨量(事件-II),长历时、低强度和小雨量(事件-III),分析植物冠层、枯落物和根系各组分对土壤保持的相对贡献,及其对不同降雨情景的响应规律,对气候变化和极端降雨频发背景下,黄土高原植被恢复和土壤侵蚀控制具有重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区选择黄土丘陵沟壑区羊圈沟小流域(36°42'N,109°31'E)(图1),位于陕西省延安市宝塔区,属于延河流域的支流碾庄沟流域。总面积约为2.02 km²,坡谷的海拔高度为1050 m至1295 m之间。该地区属于温带半湿润半干旱地带性大陆季风气候,年均太阳总辐射量为5800 KJ/cm²,年均气温为9.8℃。降雨量年际波动较大且年内分配不均,多年平均降雨量为536 mm,每年70%以上降雨发生于6—9月。根据国家气象局颁布的降雨等级标准,小流域内约80%的降雨事件为小雨,14%的事件为中雨,大雨及以上等级降雨事件频率低,但是其占全年总降雨量的35%左右。草地是羊圈沟小流域实施退耕还林还草工程以后的主要植被恢复类型,广泛分布于坡面中部和下部。

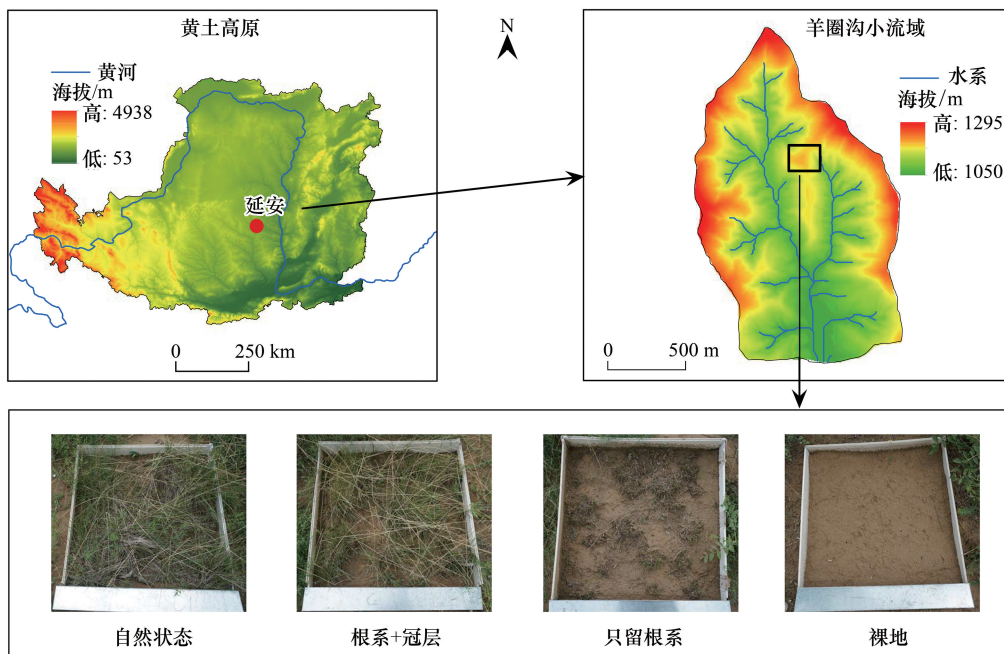


图1 研究区位置图与不同处理微型小区图

Fig.1 The location of study area and the microplots with different treatments

1.2 实验方案

选择黄土丘陵区广泛分布的典型坡面草地植被——须芒草(*Andropogon yunnanensis*)作为研究对象,为研究草地植物冠层、枯落物和根系各组分对土壤侵蚀的影响,在立地条件相似坡面建立了3种不同处理的微型小区,分别是只留根系处理(Only roots, OR),即剪除冠层和清除枯落物;根系+冠层处理(Roots+canopy, RC),即去除枯落物,只保留根系和冠层;自然状态处理(Initial condition, IC),并建立裸地小区作为对照(图1)。每种类型的微型小区均布设3个重复,共12个,坡度约为21°,坡向为西北坡。

于 2015—2017 年 6—9 月进行降雨侵蚀过程监测,次降雨事件发生后,利用量筒测量产流量,并采集混合均匀后的径流样品,静置 24 h 后去除上层清液,剩余样品 105℃ 烘干后测量泥沙量,根据泥沙浓度计算总的产沙量。降雨数据利用自记雨量计(RG3-M)进行连续自动测量,雨量计精度为 0.2 mm,放置在微型小区旁的空地。

根据降雨量、历时和最大 30 min 雨强(I_{30}),利用 K 均值聚类分析方法,将 2015—2017 年的侵蚀性降雨事件分为三种降雨类型(情景)。根据划分的三种降雨类型,选择 3 场降雨事件分别代表不同降雨情景,用于分析不同降雨事件情景下草地对土壤侵蚀的影响。

1.3 数据分析

(1) 减少土壤侵蚀的贡献率(%)计算,指不同处理小区与裸地小区相比,土壤侵蚀减少量的百分比,表示不同处理草地减少土壤侵蚀的能力。

$$CR_i = \frac{(R_b - R_i)}{R_b} \times 100\% \quad (1)$$

式中, CR_i 表示草地第 i 种处理小区(OR、RC 和 IC)的减流率(%), R_i 和 R_b 分别表示第 i 种处理和裸地小区的产流量(mm)。同理,可计算出草地不同处理小区的减沙率(%)和泥沙浓度减少率(%)。

(2) 冠层、枯落物和根系的贡献率(%)计算,指草地各组分所能减少的土壤侵蚀量与裸地土壤侵蚀量的百分比,表示草地各组分减少土壤侵蚀的能力。

$$E_{\text{canopy}} = CR(RC) - CR(OR) \quad (2)$$

$$E_{\text{litter}} = CR(IC) - CR(RC) \quad (3)$$

$$E_{\text{roots}} = CR(OR) \quad (4)$$

$$E_{\text{total}} = E_{\text{canopy}} + E_{\text{litter}} + E_{\text{roots}} = CR(IC) \quad (5)$$

式中, E_{canopy} 、 E_{litter} 、 E_{roots} 和 E_{total} 分别表示草地冠层、枯落物、根系和总体的减流率(%), $CR(IC)$ 、 $CR(OR)$ 和 $CR(RC)$ 分别表示草地不同处理小区(IC、OR 和 RC)的减流率(%)。同理,可计算出草地各组分的减沙率(%)和泥沙浓度减少率(%),其方程式可参考公式(2—5)形式。

(3) 植物各组分的相对贡献率(%)计算,指冠层、枯落物和根系减少土壤侵蚀的贡献率,在植物总贡献率中所占的比例,表示各组分的相对贡献。

$$RE_i = \frac{E_i}{E_{\text{total}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中, RE_i 表示草地第 i 种组分(冠层、枯落物和根系)减流的相对贡献率(%), E_i 表示草地第 i 种组分(E_{canopy} 、 E_{litter} 和 E_{roots})的减流率(%)。同理,可计算出各组分的减沙和减泥沙浓度的相对贡献率(%)。

不同处理的产流产沙特征及减流减沙贡献率采用平均值进行比较,数据的统计分析利用 SPSS 19.0 进行实现,正态性检验利用 Shapiro-Wilk 检验,利用方差分析(ANOVA)判定各组数据之间的差异性,并根据组样本量选择合适的多重比较方法,检验的标准为 $P=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 降雨情景特征分析

如表 1 所示,本研究选取的 3 场降雨事件具备黄土高原地区典型降雨特征,事件-I 的降雨量最小,仅有 4.2 mm;历时最短,为 1.58 h;平均雨强和最大 30 min 雨强最高,分别为 2.65 mm/h 和 8.00 mm/h,呈现短历时、高强度和小雨量的情景特征,是黄土丘陵区发生严重土壤侵蚀的主要降雨类型。事件-II 的降雨量为 18.6 mm,历时为 13.4 h,平均雨强为 1.39 mm/h,仅约为事件-I 的一半,最大 30 min 雨强为 6.42 mm/h,呈现中等历时、强度和雨量的情景特征。事件-III 具有最大的降雨量(23.4 mm)和历时(58.04 h),约为事件-I 的 5.6 倍和 33 倍,导致其平均雨强仅约为事件-I 和事件-II 的 1/6 和 1/3,最大 30 min 雨强也最小,仅为 3.6 mm/h,其

降雨情景呈现出长历时、低强度和大雨量的特征。

表 1 3 场典型次降雨事件的情景特征

Table 1 The features of rainfall scenarios of three typical rainfall events

降雨事件 Rainfall events	降雨量 Rainfall amount/mm	历时 Duration/h	平均雨强 Average rainfall intensity/(mm/h)	最大 30 min 雨强 Maximum 30 min intensity/(mm/h)	降雨情景 Rainfall scenarios
事件-I Event-I	4.2	1.58	2.65	8.00	短历时、高强度和小雨量
事件-II Event-II	18.6	13.40	1.39	6.42	中等历时、强度和雨量
事件-III Event-III	23.4	52.04	0.45	3.60	长历时、低强度和大雨量

2.2 草地不同处理小区的土壤侵蚀特征

表 2 展示了草地不同处理小区在 3 种降雨情景以及全部侵蚀性降雨事件(事件-all 情景)中的平均产流量、产沙量和泥沙浓度。事件-all 情景反映了多年次降雨事件的平均状况,在长时间尺度上更具有代表性。结果表明,裸地的产流量(3.39 mm)、产沙量(204.17 g/m²)和泥沙浓度(45.06 g/L)均最大,只留根系、根系+冠层和自然状态处理后的产流量分别为 3.10 mm、2.46 mm 和 1.49 mm,产沙量分别为 129.17 g/m²、60.31 g/m²和 8.68 g/m²,泥沙浓度分别为 37.33 g/L、15.61 g/L 和 4.10 g/L,均呈现依次降低的趋势。

表 2 不同降雨事件情景下各处理小区的平均产流量、产沙量和泥沙浓度

Table 2 The mean runoff, soil loss and sediment concentration of different treatments under different rainfall scenarios

降雨情景 Rainfall scenarios	处理类型 Treatment types	产流量 Runoff depth/mm	产沙量 Soil loss rate/(g/m ²)	泥沙浓度 Sediment concentration/(g/L)
事件-all Event-all	裸地	3.39	204.17	45.06
	只留根系	3.10	129.98	37.33
	根系+冠层	2.46	60.31	15.61
	自然状态	1.49	8.68	4.10
事件-I (短历时、高雨强) Event-I (short duration, high intensity)	裸地	0.33	14.21	55.24
	只留根系	0.01	0.96	36.77
	根系+冠层	0.06	1.09	18.57
	自然状态	0.02	0.11	2.83
事件-II (中等历时和雨强) Event-II (medium duration and intensity)	裸地	0.34	3.27	10.09
	只留根系	0.02	0.19	4.34
	根系+冠层	0.28	1.08	4.23
	自然状态	0.08	0.23	2.08
事件-III (长历时、低雨强) Event-III (long duration, low intensity)	裸地	0.12	0.84	23.75
	只留根系	0.02	0.11	4.40
	根系+冠层	0.11	0.43	6.75
	自然状态	0.08	0.20	4.32

不同处理小区的土壤侵蚀特征受到降雨情景的影响,表现出独有的变化趋势。在 3 种降雨情景下,裸地的产流量(0.12—0.34 mm)、产沙量(0.84—14.21 g/m²)和泥沙浓度(10.09—55.24 g/L)仍最高。产流量呈现出:根系+冠层(0.06—0.28 mm)>自然状态(0.02—0.08 mm)>只留根系(0.01—0.02 mm);产沙量在事件-II 和事件-III 情景下,与产流量变化趋势相同,但在事件-I 情景下却变为只留根系(0.96 g/m²)>自然状态(0.11 g/m²);泥沙浓度在事件-I 和事件-II 情景下,与事件-all 变化趋势相同,在事件-III 情景下根系+冠层处理具有较高的泥沙浓度值 6.75 g/L。

2.3 草地不同处理小区控制土壤侵蚀的能力

2.3.1 土壤侵蚀减少量分析

图 2 展示了不同降雨情景下,各处理小区的减流量、减沙量和泥沙浓度减少量。减流量 3 种降雨情景下

(图2),均表现为只留根系(0.10—0.33 mm)>自然状态(0.04—0.31 mm)>根系+冠层(0.007—0.27 mm),并且仅在事件-II情景下根系+冠层处理与其它处理之间存在显著性差异($P<0.05$),说明高雨强的事件-I情景和大雨量的事件-III情景均会减弱不同处理之间减流量的差异显著性。

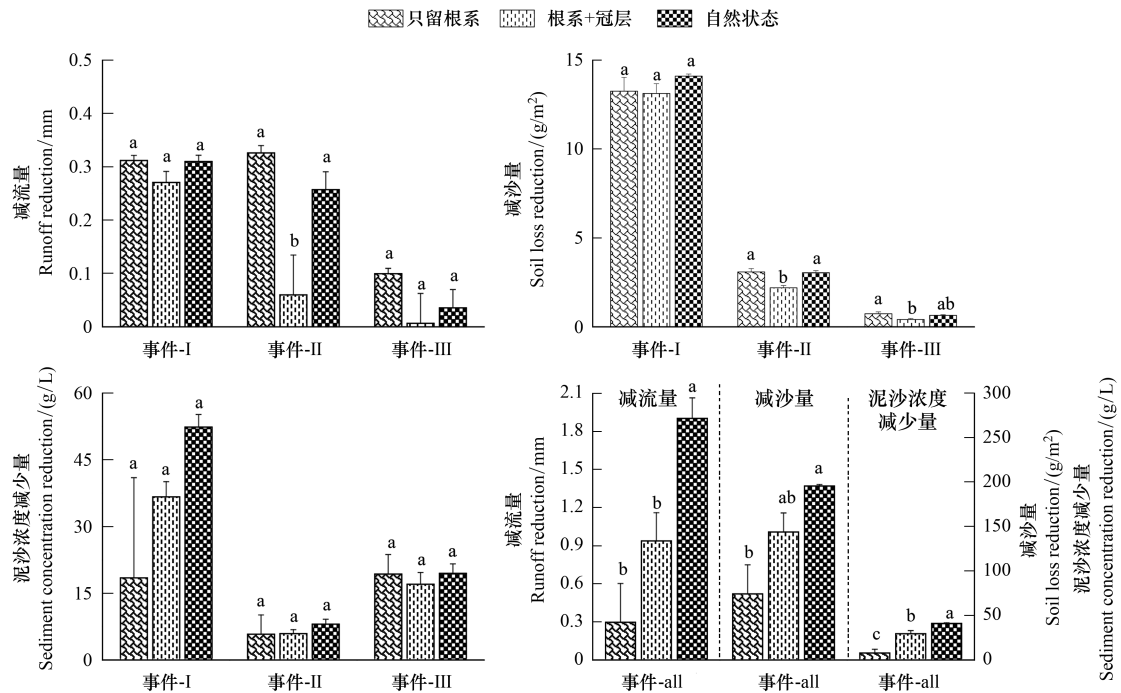


图2 不同降雨情景下各处理小区的减流量、减沙量和泥沙浓度减少量

Fig.2 The reduction of runoff, soil loss and sediment concentration of different treatments under different rainfall scenarios

不同小写字母表示同一降雨情景下不同处理间差异显著($P<0.05$)

如图2所示,事件-I情景下减沙量表现为自然状态(14.10 g/m^2)>只留根系(13.25 g/m^2)>根系+冠层(13.12 g/m^2),各处理间的差异未达到显著性水平($P>0.05$)。事件-II和事件-III情景下,减沙量均呈现出只留根系(3.08 g/m^2 和 0.73 g/m^2)>自然状态(3.04 g/m^2 和 0.64 g/m^2)>根系+冠层(2.19 g/m^2 和 0.41 g/m^2),并且自然状态处理与根系+冠层处理之间存在显著性差异($P<0.05$)。不同处理之间的泥沙浓度减少量在事件-I(18.47 — 52.40 g/L)、事件-II(5.57 — 8.01 g/L)和事件-III(17.00 — 19.43 g/L)情景下均无显著性差异($P>0.05$)。

图2结果表明,事件-all情景下,减流量、减沙量和泥沙浓度减少量均呈现出自然状态(1.9 mm 、 0.20 g/m^2 和 40.96 g/L)>根系+冠层(0.94 mm 、 143.85 g/m^2 和 29.45 g/L)>只留根系(0.30 mm 、 74.18 g/m^2 和 7.73 g/L)($P<0.05$)。其中,自然状态的减流量和减沙量与只留根系处理之间存在显著性差异,不同处理之间的泥沙浓度减少量均存在显著性差异。与3场典型事件相比,多年次降雨事件统计的减流量、减沙量和泥沙浓度减少量的变化趋势存在明显不同。

2.3.2 土壤保持贡献率的分析

图3将重点展示各处理小区减少土壤侵蚀的贡献率对不同降雨情景的响应。如图3所示,降雨情景从事件-I到事件-III,各处理减流率的变化趋势一致,均表现为事件-I>事件-II>事件-III($P>0.05$),只留根系的减流率变化最小,为 86.96% — 95.51% ,根系+冠层的减流率变化范围最大,为 6.09% — 82.87% ;各处理减沙率的变化趋势不同,只留根系的减沙率(86.90% — 94.29%)无显著性差异,而根系+冠层和自然状态的减沙率分别从 92.33% 和 99.20% (事件-I),降低至 48.41% 和 76.19% (事件-III)($P<0.05$);各处理泥沙浓度减少率

变化趋势均不一致,且均无显著性差异($P>0.05$)。

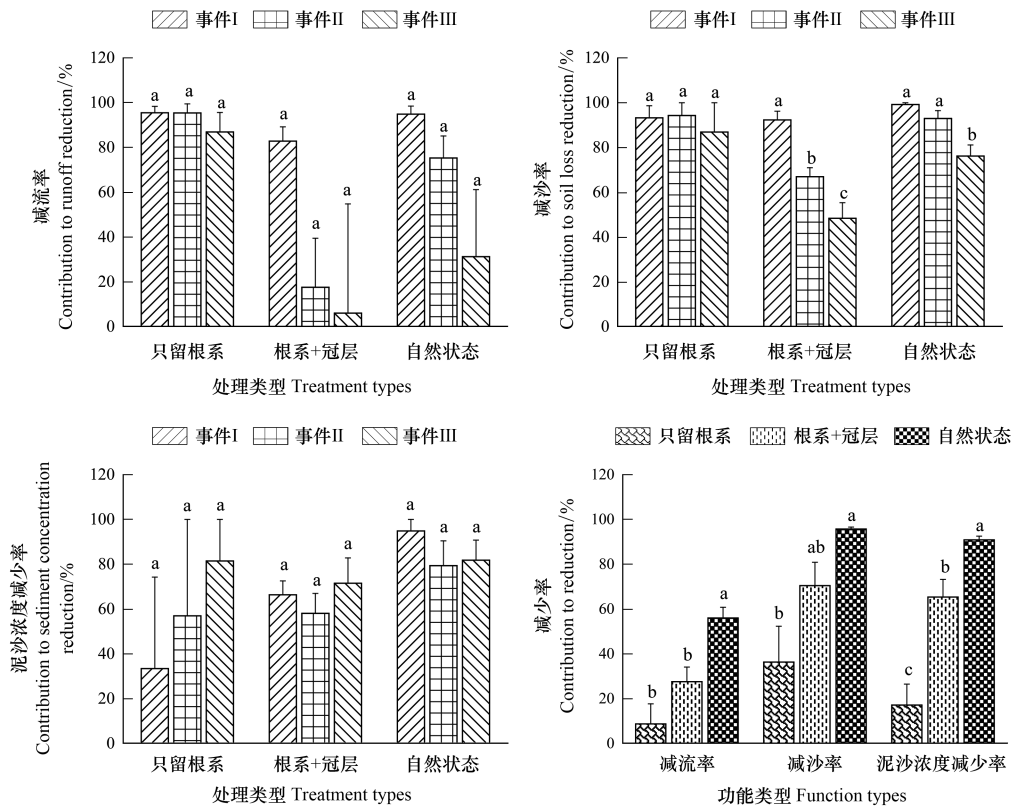


图3 不同降雨情景下各处理小区的减流率、减沙率和泥沙浓度减少率

Fig.3 The contribution of different treatments to runoff reduction, soil loss reduction and sediment reduction under different rainfall scenarios

不同小写字母表示同一处理下不同降雨情景间差异显著以及事件-all 情景下不同处理间差异显著($P<0.05$)

如图3所示,事件-all 情景下各处理的减流率、减沙率和泥沙浓度减少率,与相应减少量(图2)的变化趋势相同,均呈现出自然状态(56.01%、95.75%和90.9%)>根系+冠层(27.58%、70.46%和65.36%)>只留根系(8.73%、36.33%和17.16%)。从长期来看,草地各处理的减沙率(36.33%—95.75%)>泥沙浓度减少率(17.16%—90.9%)>减流率(8.73%—56.01%)。

2.4 草地冠层、枯落物和根系控制土壤侵蚀的贡献

表3和图4展示了草地冠层、枯落物和根系各组分的减流率、减沙率和泥沙浓度减少率及对应的相对贡献率。从表3和图4可知,事件-all 情景下草地冠层主要作用于降低泥沙浓度,枯落物主要作用于减少产流,根系则对减沙的贡献更大。其中,冠层的泥沙浓度减少率最高(48.2%),占总贡献率的53.03%,高于枯落物和根系的相对贡献率(28.10%和18.88%)的总和;枯落物的减流率最高(28.43%),约占总贡献率的一半(50.75%),其次为冠层(18.85%),相对贡献率为33.66%,根系的减流率最低(8.73%),仅占总的15.58%;然而,根系的减沙率最高(36.33%),占总贡献率的37.95%,冠层减沙的相对贡献率(35.64%)略低于根系,枯落物的相对贡献率最低,为26.41%。

表3对不同降雨情景的比较发现,草地各组分控制土壤侵蚀的能力在某一具体降雨事件中发生很大变化。根系成为草地保水保土能力的主要决定因子,而冠层甚至有促进土壤侵蚀发生的作用。其中,根系的减流率和减沙率分别高达86.96%—95.51%和86.90%—94.29%,远高于枯落物的贡献率12.05%—57.70%和6.87%—27.78%,冠层的贡献率均为负值,−77.97%至−12.64%和−34.13%至−0.91%。

表 3 草地垂直结构各组分水土保持功能的贡献率

Table 3 The contribution of different vertical structure components in grassland to soil and water conservation

功能类型 Function types	降雨事件 Rainfall events	各组分贡献率 The contribution of different components/%			
		根系 Roots	枯落物 Litter	冠层 Canopy	总体 Total
减流 Runoff reduction	事件-all	8.73b	28.43ab	18.85b	56.01a
	事件-I	95.51a	12.05b	-12.64c	94.92a
	事件-II	95.46a	57.70a	-77.82b	75.34a
	事件-III	86.96a	25.22ab	-77.97b	31.30ab
减沙 Soil loss reduction	事件-all	36.33b	25.29b	34.12b	95.75a
	事件-I	93.24a	6.87b	-0.91b	99.20a
	事件-II	94.29a	25.99b	-27.32c	92.97a
	事件-III	86.90a	27.78b	-34.13c	76.19a
减少泥沙浓度 Sediment concentration reduction	事件-all	17.16c	25.54bc	48.20b	90.90a
	事件-I	33.43a	28.50a	32.94a	94.87a
	事件-II	56.99a	21.31a	1.10a	79.40a
	事件-III	81.47a	10.27b	-3.74b	81.83a

不同小写字母表示同一降雨情景下不同组分间差异显著 ($P<0.05$)

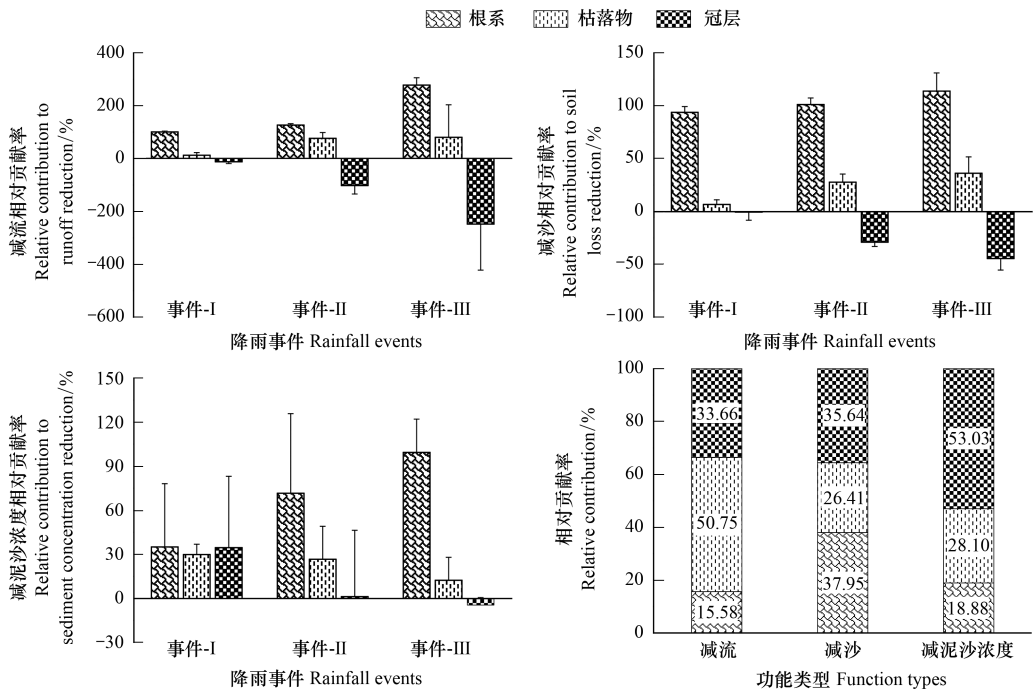


图 4 草地植物各组分在不同降雨事件情景中减流、减沙和减泥沙浓度的相对贡献率

Fig.4 The relative contribution of different grassland components to runoff reduction, soil loss reduction and sediment concentration reduction under different rainfall scenarios

从图 4 也可以看出,随着降雨量增大和强度减弱,降雨情景由事件-I、事件-II 到事件-III,根系减流、减沙和减泥沙浓度的相对贡献率均逐渐增大,变化范围分别为 100.62%—277.78%、93.99%—114.06% 和 35.24—99.57%;枯落物减流和减沙的相对贡献率也呈增大趋势,变化范围分别为 12.69%—80.56% 和 6.93—36.46%,而减泥沙浓度的相对贡献率变化趋势却相反,由 30.04% 逐渐降低至 12.55%;冠层减流、减沙和减泥沙浓度的相对贡献率则与根系呈相反趋势,均逐渐减小,变化范围分别为 -13.32% 至 -249.07%、-0.92% 至 -44.79% 和 34.72% 至 -4.57%。

3 讨论

3.1 植物冠层、枯落物和根系与土壤侵蚀关系

植物冠层、枯落物和根系各组分是草地控制土壤侵蚀的基本单元。本研究通过对 2015—2017 年长时间尺度下侵蚀性次降雨事件统计发现,草地不同处理后的减流减沙效益均呈现出自然状态>根系+冠层>只留根系($P<0.05$) (图 2 和图 3),说明植物垂直结构各组分越完整,草地控制土壤侵蚀的功能越强,与以往研究的结论一致^[7,16]。

草地植物各组分对土壤侵蚀过程的主要作用方式不同^[3-7]。本研究发现冠层最大的作用在于降低了径流含沙量,占总贡献的 53.03%,直接减流和减沙的相对贡献也达到 33%—36% (图 4),Zhao 等^[18]研究中也发现草地冠层的减沙相对贡献约为 34%。这与冠层截留降雨、削弱雨滴动能、减少溅蚀和延缓径流等功能有关^[3,5,7]。枯落物直接覆盖土壤,能有效降低径流携沙能力和冲刷潜力,延缓和拦蓄径流功能更加明显,是水源涵养和水土保持的主要作用层^[19-21]。Findeling 等^[22]发现作物残存枯落物覆盖能降低 50% 的径流系数。随着时间延长、积累和覆盖量增大,枯落物拦蓄径流能力逐渐增强^[22-24],图 4 多年尺度的研究发现枯落物的减流相对贡献超过 50%,高于冠层的贡献,这也解释了与研究区较短时间结论的略微差异^[25]。根系是减少产沙的主要贡献者,占总贡献率的 37.95%,对减流和减泥沙浓度的相对贡献均在 20% 以下 (图 4)。说明根系能够直接固持土壤、减少泥沙冲刷量,也能够间接改善土壤性质、增加土壤水分入渗,减少径流量和降低泥沙浓度^[26-29]。大量研究也证实根系的减沙效应不弱于地上冠层^[6-7,30]。

3.2 坡面植物与土壤侵蚀关系对降雨情景的响应规律

降雨情景对植物与坡面土壤侵蚀关系具有重要作用^[3,13,15]。本研究发现,降雨情景变化将导致草地总减流率和减沙率分别在 31.3%—94.92% 和 76.19%—99.2% 范围内变化 (表 3),说明不同降雨情景下草地的减流减沙机制发生变化。

不同降雨情景下根系的减流率和减沙率均达到 86% 以上,而冠层均为负值 (表 3)。说明在某一特定场次降雨事件中,根系的减流减沙作用得到极大加强,而冠层却促进了产流产沙过程,这与以往研究结论有所差异^[5,7,18]。此外,随着雨强减弱和雨量增大,根系和枯落物减流减沙的相对贡献逐渐增大,冠层的相对贡献逐渐减小 (图 4),也说明了草地不同组分的功能与降雨量、历时和雨强等有关,长期的次降雨事件统计结论不完全适用于任一场次降雨的土壤侵蚀过程。Bochet 等^[23]也发现干旱半干旱地区,某些物种下的产沙量高于裸地。机理上来讲,冠层也有促进雨滴汇聚、增大侵蚀量的可能性,但一般发生于林地^[31]。草地冠层的差异性表现可能是以下几方面造成:一是须芒草叶片呈长条形贴于地面,与枯落物一起产生径流通道,促进了径流传输和路径上土壤的冲蚀^[3,22,24];二是降雨事件本身雨量和雨强具有复杂而剧烈的波动特征,对水文和侵蚀过程具有重要影响^[32-33];三是以往研究集中于多场次的统计均值结论^[13,16],缺少对各种特定场次降雨的研究,难以阐明植物组分控制土壤侵蚀的机制的不确定性。因此,在未来研究中亟需揭示植物各组分的水土保持功能对不同降雨情景的响应规律,否则极易将大量统计数据得到的长时间尺度效应,错误地拓展到短时间尺度的次降雨事件。

4 结论

本研究选择黄土丘陵沟壑区典型小流域草地坡面,通过不同人工处理后的草地微型小区,在自然降雨条件下,分析了草地植物冠层、枯落物和根系,在多年次降雨事件尺度和 3 场不同情景的典型降雨事件下,对土壤侵蚀的影响及各组分相对贡献率的变化,得出以下结论:

(1) 在多年次降雨事件尺度,草地冠层、枯落物和根系各组分越完整,减流减沙能力越高,自然状态、根系+冠层、只留根系处理的减流率和减沙率分别为 56.01% 和 95.75%、27.57% 和 70.46%、8.73% 和 36.33%。

(2) 次降雨事件多年尺度上,草地植物各组分影响着不同的土壤侵蚀过程。其中,冠层主要作用于降低

泥沙浓度,占总贡献率的 53.03%;枯落物主要作用于减少产流,占总贡献率的 50.75%;根系则对减沙的贡献更大,占总贡献率的 37.95%。

(3)降雨情景的变化将影响植物各组分与土壤侵蚀的关系。随着降雨情景由短历时、高强度和小雨量向着长历时、低强度和大雨量转变,冠层减流减沙的相对贡献率逐渐减小,而枯落物和根系减流减沙的相对贡献率逐渐增大。

(4)多年次降雨事件尺度下,草地植物各组分与土壤侵蚀的关系得到了较为一致性的结论,但并不完全适用于任一降雨事件,尤其是不同降雨情景之间差别较大,冠层在某些降雨事件中可能反而有促进产流产沙的趋势。

参考文献 (References):

- [1] Wang S, Fu B, Piao S, Lü Y, Ciais P, Feng X, Wang Y. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [2] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223-243.
- [3] Liu J B, Gao G Y, Wang S, Jiao L, Wu X, Fu B J. The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(1): 59-78.
- [4] Pan D L, Gao X D, Wang J, Yang M, Wu P T, Huang J, Dyck M, Zhao X N. Vegetative filter strips—Effect of vegetation type and shape of strip on Run-off and sediment trapping. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(11): 3917-3927.
- [5] 郑粉莉, 白红英, 安韶山. 草被地上和地下部分拦蓄径流和减少泥沙的效益分析. *水土保持研究*, 2005, 12(5): 86-87, 111.
- [6] Gysels G, Poesen J, Bochet E, Li Y. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2005, 29(2): 189-217.
- [7] 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.
- [8] 陈晓安, 蔡强国, 张利超, 郑明国, 蔡俊谕, 李君兰. 黄土丘陵沟壑区不同雨强下坡长对坡面土壤侵蚀的影响. *土壤通报*, 2011, 42(3): 721-725.
- [9] 王文欣, 庄义琳, 庄家尧, 吕晓宁, 吴胡强. 不同降雨强度下坡地覆盖对土壤有机碳流失的影响. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 62-66.
- [10] 郑粉莉, 边锋, 卢嘉, 覃超, 徐锡蒙. 雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 90-97.
- [11] 孙飞达, 王立, 龙瑞军, 路承香, 包正育. 黄土丘陵区不同降雨强度对农地土壤侵蚀的影响. *水土保持研究*, 2007, 14(2): 16-18.
- [12] 陈洪松, 邵明安, 张兴昌, 王克林. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 5-8.
- [13] Wei W, Chen L D, Fu B J, Huang Z L, Wu D P, Gui L D. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. *Journal of Hydrology*, 2007, 335(3/4): 247-258.
- [14] 王小博, 朱永清, 吴宜进, 刘晴日, 葛咏, 吴曼. 不同植被下降雨类型对红壤坡地土壤侵蚀特征的影响. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 6-11.
- [15] 宫渊波, 张君, 陈林武, 张健, 王巧红. 嘉陵江上游不同植被类型小流域典型降雨产流特征分析. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 35-39.
- [16] Liu Y J, Yang J, Hu J M, Tang C J, Zheng H J. Characteristics of the surface-subsurface flow generation and sediment yield to the rainfall regime and land-cover by long-term *in situ* observation in the red soil region, Southern China. *Journal of Hydrology*, 2016, 539: 457-467.
- [17] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on Karst slopes in southwest China. *CATENA*, 2012, 90: 53-62.
- [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] Li X, Niu J Z, Xie B Y. Study on hydrological functions of litter layers in North China. *PLoS One*, 2013, 8(7): e70328.
- [20] Pannkuk C D, Robichaud P R. Effectiveness of needle cast at reducing erosion after forest fires. *Water Resources Research*, 2003, 39(12): 1333.
- [21] 吴钦孝, 赵鸿雁, 刘向东, 韩冰. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998(2): 23-28.
- [22] Findeling A, Ruy S, Scopel E. Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. *Journal of Hydrology*, 2003, 275(1/2): 49-66.
- [23] Bochet E, Rubio J L, Poesen J. Relative efficiency of three representative matorral species in reducing water erosion at the microscale in a semi-arid climate (Valencia, Spain). *Geomorphology*, 1998, 23(2/3/4): 139-150.
- [24] Li X, Niu J Z, Xie B Y. The effect of leaf litter cover on surface runoff and soil erosion in Northern China. *PLoS One*, 2014, 9(9): e107789.
- [25] 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.
- [26] Reubens B, Poesen J, Danjon F, Geudens G, Muys B. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees*, 2007, 21(4): 385-402.
- [27] 李鹏, 李占斌, 鲁克新. 黄土区草本植被根系与土壤垂直侵蚀产沙关系研究. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 302-306.
- [28] Mamo M, Bubenzer G D. Detachment rate, soil erodibility, and soil strength as influenced by living plant roots part I: laboratory study. *Transactions of the ASAE*, 2001, 44(5): 1167-1174.
- [29] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 34-37, 117.
- [30] 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.
- [31] 游珍, 李占斌, 蒋庆丰. 植被对降雨的再分配分析. *中国水土保持科学*, 2003, 1(3): 102-105.
- [32] Dunkerley D. Intra-event intermittency of rainfall: an analysis of the metrics of rain and no-rain periods. *Hydrological Processes*, 2015, 29(15): 3294-3305.
- [33] Liu J B, Liang Y, Gao G Y, Dunkerley D, Fu B J. Quantifying the effects of rainfall intensity fluctuation on runoff and soil loss: from indicators to models. *Journal of Hydrology*, 2022, 607: 127494.