

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.002.

朱谡远, 武小飞, 李晨辉, 等. 黄土高原陡坡地不同植被类型及恢复过程对径流泥沙的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 57-66.

Zhu Miyuan, Wu Xiaofei, Li Chenhui, et al. Effects of Different Vegetation Types and Restoration Processes on Runoff and Sediment on Steep Slopes on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 57-66.

黄土高原陡坡地不同植被类型及恢复过程对径流泥沙的影响

朱谡远^{1,2}, 武小飞^{1,2}, 李晨辉^{1,2}, 郭天崎^{1,2}, 张锐^{1,2}, 黄明斌²

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:[目的]探究不同植被类型及其恢复过程对陡坡地水土流失的影响差异,寻找可以更好地控制陡坡地水土流失的植被类型,进而为黄土高原流域生态环境治理提供理论指导。[方法]基于黄土高原沟壑区王东沟流域坡地 9 种不同植被类型的径流小区 14 a(2008—2021 年)的降雨、LAI 和径流泥沙数据,采用单因素方差分析和线性回归分析的方法,研究了不同植被类型的径流泥沙随植被恢复的变化。[结果]不同植被类型减少径流泥沙效果存在差异,侧柏林多年地表径流和土壤侵蚀模数显著高于其他植被类型($p < 0.05$),其余 8 种植被间不存在显著差异($p > 0.05$),白羊草与沙棘林的平均值较低。随着植被恢复,各植被 LAI 逐渐提高,地表径流与土壤流失显著降低,但不同植被类型表现出的递减规律具有差异,在 2021 年,白羊草、沙棘、沙棘×刺槐和刺槐林的地表径流和土壤侵蚀模数低于其他植被类型。各植被类型的地表径流与土壤侵蚀模数均符合线性关系($p < 0.01$),函数系数代表单位径流导致的土壤流失,反映了植被控制土壤侵蚀的能力,白羊草的效果最佳。[结论]草、灌及其混交林的植被恢复措施较纯乔木林可以更好地控制黄土高原陡坡地的水土流失。

关键词:植被恢复; 植被类型; 地表径流; 土壤侵蚀; 叶面积指数

中图分类号:S157.2; P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)06-0057-10

Effects of Different Vegetation Types and Restoration Processes on Runoff and Sediment on Steep Slopes of the Loess Plateau

Zhu Miyuan^{1,2}, Wu Xiaofei^{1,2}, Li Chenhui^{1,2}, Guo Tianqi^{1,2}, Zhang Rui^{1,2}, Huang Mingbin²

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:[Objective] The aim of this study is to explore the impacts of different vegetation types and restoration processes on soil and water loss on steep slopes, to find the vegetation types that can better control soil and water loss on steep slopes, and then to provide theoretical guidance. [Methods] Based on the long-term observation data of rainfall, LAI (leaf area index), surface runoff and soil erosion in 9 runoff plots from 2008 to 2021, conducted in the Wangdonggou watershed of the Loess Plateau, the changes of surface runoff and soil erosion with vegetation restoration in different vegetation types were studied using one-way ANOVA method and linear regression method. [Results] There were significant differences in the impacts of different vegetation types on reducing runoff and sediment on steep slopes. The annual average surface runoff and soil erosion modulus under *Platycladus orientalis* were significantly higher than those of other vegetation types ($p < 0.05$), without significant differences among the other 8 vegetation types ($p > 0.05$). The average annual

收稿日期:2022-10-21

修回日期:2022-11-10

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项子课题“黄土高原植被-水相互关系及其对气候变化的响应过程”(XDB20020202)

第一作者:朱谡远(1998—),男,河南安阳人,硕士生,研究方向为土壤物理。E-mail:zmyd0017@163.com

通信作者:黄明斌(1968—),男,湖北荆门人,博士,研究员,主要从事生态水文和土壤物理研究。E-mail:hmbd@nwfau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

runoff and erosion modulus under *Bothriochloa ischaemum* and *Hippophae rhamnoides* were at a low level. With the restoration of vegetation, the LAI of each vegetation type increased gradually, the surface runoff and soil loss decreased significantly, and the declining trends of different vegetation types were different. Comparatively, the decreasing rates of surface runoff and soil loss under *Platycladus orientalis* were significantly greater than those under other vegetation types ($p < 0.05$). In 2021, the surface runoff and soil erosion modulus under *Bothriochloa ischaemum*, *Hippophae rhamnoides*, *Hippophae rhamnoides* \times *Robinia pseudoacacia* and *Robinia pseudoacacia* were lower than those under other vegetation types. The surface runoff and soil erosion modulus of each vegetation type were linearly related ($p < 0.01$), and the coefficient of the linear function represented the soil loss per unit of surface runoff, reflected the ability of vegetation to control soil erosion. [Conclusion] Among the 9 vegetation types, the impact of *Bothriochloa ischaemum* was the largest. The vegetation restoration measures in grasses, shrubs and mixed forests were better to reduce soil erosion on steep slopes of the Loess Plateau than pure arbor forests.

Keywords: vegetation restoration; vegetation types; surface runoff; soil erosion; leaf area index

黄土高原的地貌类型复杂多样,区内坡地占比高,植被条件差,且降雨集中,水土流失面积约占该区域总面积的68%^[1],其中大部分地区的土壤侵蚀模数高于1 000 t/(km² · a),严重威胁该区域土壤资源利用与可持续发展^[2]。为治理黄土高原严重的水土流失,优化该区的生态环境,国家于1999年开始在黄土高原大力实施以“退耕还林(草)”为核心的生态建设措施,经过20余年的治理,黄土高原的植被覆盖度大幅提高,同时,区内水土流失得到有效遏制,黄河输沙量不断降低^[3]。

陡坡地是水土流失最严重的地貌类型,是黄土高原水土流失防治的核心。陡坡地土壤侵蚀主要受降雨、地表植被等因素的影响,其中,降雨是坡地土壤侵蚀的动力来源,而植被可以有效减少坡地土壤侵蚀^[4-5]。不同植被类型及其不同生长阶段由于冠层结构、盖度、地上生物量、根系密度等方面的不同,水土保持效果差异显著^[6-7]。朱燕琴等^[8]在甘肃省清水河的研究结果表明,草地和乔木林小区的水土流失强度低于灌丛小区,乔灌混交林土壤侵蚀强度最大。而Huang等^[9]在甘肃省小流域对比4种土地利用类型的相对减蚀效率,结果表明自然恢复草地和人工沙棘灌木林的水土保持效益优于人工油松林地。李钢等^[10]研究林下植被恢复措施的水土保持效益,结果表明,具有乔草或乔灌的复合冠层相比纯林可以减少50%~60%的地表径流和65%~70%的土壤流失。造成这种差异的一个重要原因就是植被冠层结构的不同,植被冠层通过拦截降雨有效削弱了雨滴的动能,从而降低土壤流失。Chen^[5]、李鹏^[11]等研究表明,冠层结构复杂的植被在减少坡地产流产沙方面的效果优于单一分层结构。

此外,花东文等^[12]研究几种典型植被在不同恢复

阶段对产流产沙的影响,他们的结果表明,随着植被恢复,天然草地、人工柠条林地与刺槐林地的产流产沙均明显降低。Wei等^[6]的研究表明,在相同降雨条件下,灌木林与乔木林地的径流量和土壤侵蚀模数在最开始的3~4 a仍保持较高水平,随后显著下降并保持相对较低的水平。流域径流泥沙量在长时间尺度上受植被结构的影响,如刘晓燕等^[13]研究表明,随植被有效覆盖率的逐年增加,流域的产沙量呈现指数函数式递减。叶面积指数(LAI)作为分析植物群体生长的重要冠层结构参数,其动态变化可以较好地反映植被冠层结构和数量特征^[14],因此,可以结合植被的LAI动态变化探究产流产沙对植被恢复过程的响应。

以往关于降水特征、植被类型、地形条件等对径流泥沙的影响已开展大量研究。然而,由于野外长期观测受人力物力的限制,过去的研究主要集中纯灌木、乔木林或者草地,缺少不同类型的乔灌混交林及其长期恢复过程对径流和土壤侵蚀的影响。另外,黄土高原的降雨年际变化大、年内分布不均,短时间尺度的观测结果很难区分降水特性、植被类型和恢复阶段对坡地产流产沙过程的影响。为此,我们选择在自然降雨条件下,基于2008—2021年野外观测的76次产流产沙事件,研究陡坡地不同植被类型及其恢复过程对产流和产沙的影响,探究适合控制黄土高原陡坡地水土流失的植被类型,为黄土高原生态环境建设提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区在陕西省长武县的王东沟小流域(35°14'N, 107°41'E),位于陕西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站附近。小流域面积为8.3 km²,海拔

946~1 226 m,小流域所在地区的地貌类型复杂多样,主要由塬面、沟坡和沟谷三大类型组成,属于典型的黄土高原沟壑区。该区属暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均温度为 9.1℃,无霜期 171 d,降雨量为 584 mm,其中有超过 58%是发生在 7—9 月份^[15],年均潜在蒸发量为 967 mm,地下水距地表深 50~80 m。参考粮农组织-教科文组织土壤分类系统,小流域地带性土壤类型为黑垆土,质地为粉质黏壤土^[16]。目前,流域内主要的优势植被类型有白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等。

1.2 试验设置

为定位监测坡地的植被演变对地表径流、土壤流失、土壤水分的变化及其生态水文效应,陕西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站于 2003 年在烧塬湾自然坡面建立了 9 个标准水土流失观测小区,水平投影面积均为 100 m²(长 20 m,宽 5 m),长边与坡顶到坡底方向一致。所有小区的坡位无明显差异,坡向均为西南方向,坡度统一为 35°,环境条件基本一致。边界均围有高出地面 10~20 cm 的混凝土石板,使小区内产流产沙与外部分离,保证了水土流失数据的准确性。底部均设有集水槽、输水槽、二级径流桶

(桶上部有固定盖子,确保收集的径流不会蒸发损失),每年都会对这三部分检查与维修,防止小区内径流泥沙的泄漏,造成观测数据不准确。

在小区建立同年,选择黄土高原 5 种典型植被以不同模式在 9 个小区栽种,分别为白羊草(BOI)、沙棘(SEB)、油松(CHP)、油松×刺槐(CHP×LOC)、油松×沙棘(CHP×SEB)、刺槐×沙棘(LOC×SEB)、刺槐(LOC)、刺槐×侧柏(LOC×CHA)、侧柏(CHA)。其中,白羊草是通过移植天然草方块建成,其他所有乔灌木种在栽种时已有 2~3 龄,在 2021 年时已有 20 龄。此外,所有小区内的植被在栽种后没有任何人工管理及整地措施。各小区内林下植被有白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、野古草(*Arundinella hirta*)、异叶败酱(*Patrinia heterophylla*)、翻白草(*Potentilla discolor*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)、赖草(*Leymus secalinus*)等禾本科草种^[15]。

2021 年 7 月采用样方法调查了各小区的基本植被生长指标,每个小区均分 4 个 5 m×5 m 的样方调查植被的平均株高、平均胸径以及植被覆盖度(表 1)。在所有小区中部随机选点,分 0—20 cm 和 20—40 cm 土层采集土壤样品,带回室内分析基本理化性质,包括土壤有机质、土壤容重、土壤总孔隙度、饱和持水量、饱和导水率等(表 1)。

表 1 各试验小区植被与土壤基础性质

Table 1 Vegetation and soil foundation properties in each experimental community

植被类型	植被性质					土壤性质									
	间距	龄/a	平均株高/cm	胸径/cm	覆盖度/%	有机质/(g·kg ⁻¹)		容重/(g·cm ⁻³)		总孔隙度/%		饱和持水量/(cm ³ ·cm ⁻³)		饱和导水率/(cm·h ⁻¹)	
						0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
BOI	1×1	18	60	0	75.5	13.00	8.33	1.21	1.20	54.26	54.41	0.53	0.53	0.12	0.16
SEB	1×2	18	276	2.41	46.3	17.04	9.66	1.14	1.25	57.04	52.91	0.56	0.53	0.23	0.18
CHP	1×2	18	433	8.05	45.3	13.52	7.02	1.01	1.17	58.95	55.88	0.57	0.57	0.18	0.19
CHP×LOC	1×1	18	490/409	7.6/3.2	64.3	17.53	12.58	1.10	1.17	58.54	55.86	0.57	0.54	0.26	0.20
CHP×SEB	1×1	18	467/292	9.5/2.6	68.0	10.92	9.43	1.15	1.14	56.71	56.83	0.53	0.57	0.18	0.19
LOC×SEB	1×1	18	391/229	2.9/1.9	73.5	18.85	10.43	1.15	1.25	56.59	52.93	0.52	0.52	0.18	0.16
LOC	1×2	18	405	3.23	31.3	15.12	11.33	1.12	1.21	57.68	54.40	0.54	0.51	0.14	0.10
LOC×CHA	1×1	18	506/316	4.28	71.8	12.12	12.14	1.19	1.17	54.99	56.01	0.52	0.51	0.21	0.20
CHA	1×2	18	394	2.58	35.6	8.85	7.32	1.26	1.32	52.47	50.31	0.50	0.48	0.18	0.21

1.3 测定指标与方法

降雨:采用陕西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站内自动气象站监测的 2008—2021 年降雨数据,气象站距试验区 1 km。

叶面积指数(LAI):采用 LAI-2200 冠层分析仪测定 5—10 月叶面积指数,在测定过程中保持探头与坡面平行,并使用 45°遮光帽排除小区以外植被的影响。

径流和土壤侵蚀:在 2008 年 1 月—2021 年 12 月观测期间,每一次侵蚀性降雨结束后,用 1.5 m 钢

尺读取径流桶内壁水位高度(H),结合径流桶横截面积与试验小区面积计算地表径流深(R);紧接着将径流桶内水沙搅拌均匀,立即打开径流桶底部的阀门,并使用 2 个 1 000 ml 塑料瓶接取径流泥沙样,取样完成后,将径流桶内清理干净,承接下一次径流泥沙样。把径流泥沙样带回室内静置沉淀后过滤,将沉淀物在 105℃ 条件下干燥 8 h 后称重得沉积物质量(m),通过地表径流总量换算出小区土壤流失量(SL),结合小区面积计算侵蚀模数(SM)。

地表径流(R)和土壤侵蚀模数(SM)计算如下:

$$R = \frac{H \cdot S}{A \times 10^4} \times 10 \quad (1)$$

$$SM = \frac{SL \times 10^{-3}}{A \times 10^{-4}} \quad (2)$$

式中: R 为地表径流深(mm); S 为径流桶横截面积(cm^2); H 为二级径流桶内壁水位高度(cm); A 为径流小区投影面积(100 m^2); SM 为土壤侵蚀模数(t/km^2); SL 为侵蚀性降雨土壤流失量(g)。

1.4 数据分析

采用单因素方差分析(ANOVA)的最小显著性差异(LSD)在 $p < 0.05$ 的水平上检验不同植被类型下地表径流深和土壤侵蚀模数的差异。应用线性回归方法分析地表径流深与土壤侵蚀模数的关系,通过皮尔逊相关系数和决定系数(R^2)评估关系的良好性。

以上所有数据均在 Excel 2010 中汇总整理,采用 IBM SPSS 软件(20.0 版本)进行数据分析,Origin 2021 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 降雨量变化

研究区在 2008—2021 年的日降雨量分布如图 1 所示,研究区日降雨量多小于 20 mm,日降雨量在 60 mm

以上的共有 7 次,大于 100 mm 的有 3 次,分别发生在 2010 年 7 月 23 日、2013 年 7 月 22 日、2016 年 8 月 25 日,每年的降雨多集中在 7—9 月。由表 2 可知,在 2008—2021 年连续 14 个观测年期间,研究区年降雨量呈现出明显的波动趋势,范围在 414.0~757.6 mm,平均为 554.4 mm,其中,2014 年最少,2021 年最多,2010 年、2011 年、2018 年、2019 年、2021 年的年降雨量高于研究区多年平均降雨量 584.0 mm。在研究期内,共记录有 76 场产生地表径流的侵蚀性降雨事件,年侵蚀性降雨量范围为 150.2~496.0 mm,侵蚀性降雨量的变化趋势与年降雨量大体一致,其中 2017 年的侵蚀性降雨量最少,2021 年的侵蚀性降雨量及降雨次数最多。

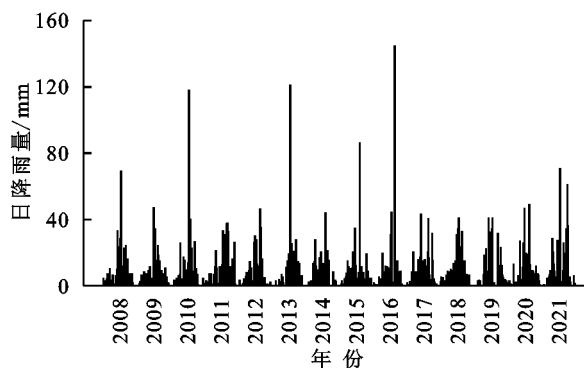


图 1 2008—2021 年期间日降雨量变化

Fig. 1 The change of day rain during 2008—2021

表 2 2008—2021 年期间年降雨量与侵蚀性降雨量

Table 2 Annual rainfall and erosive rainfall during 2008—2021

年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
总降雨量/mm	492.9	490.4	588.1	644.6	482.0	527.0	414.0	520.2	490.6	560.4	586.4	674.0	522.8	757.6
次数/次	7	4	6	4	7	5	5	4	4	4	4	6	7	9
侵蚀降雨 降雨量/mm	245.0	167.8	305.9	287.6	237.8	325.4	315.9	213.6	247.4	150.2	309.2	309.9	353.3	496.0

2.2 叶面积指数变化

2008—2021 年试验期间不同植被类型的叶面积指数(LAI)变化特征如图 2 所示。由表 3 可知,9 种植被类型的 LAI 存在显著性差异($p < 0.05$),其中 LOC×CHA 的平均 LAI 显著高于其他植被($p < 0.05$),是其他植被类型的 1.18~2.11 倍,而 BOI 与 CHA 的平均 LAI 最低,均为 1.38。此外,各植被类型的 LAI 随着植被恢复均呈逐渐增加的趋势,不同植被类型间的增加幅度存在显著性差异($p < 0.05$),BOI 的 LAI 最大值较最小值提升了 331.6%,虽然 LOC×CHA 的 LAI 最大值达 4.07,相较于其最小值增幅为 151.2%,而 LOC 的 LAI 最大值较最小值的提升最小,仅为 58.6%,各植被 LAI 的变异系数与增幅变化呈现出一致的趋势。

2.3 不同植被类型地表径流和土壤侵蚀的差异

通过对 9 种植被类型小区在 2008—2021 年的地表径流与土壤侵蚀模数进行平均,结果表明,各植被

类型小区的地表径流(图 3A)与土壤侵蚀模数(图 3B)存在差异,说明地表径流与土壤侵蚀模数受植被类型影响。在连续 14 a 的观测结果中,BOI 的地表径流最小,为 0.3~7.0 mm,平均值为 2.6 mm,显著低于 CHP 和 CHA($p < 0.05$);SEB 的地表径流量次之,为 0.9~7.8 mm,平均值为 3.2 mm;CHA 的地表径流最大,为 3.9~40.3 mm,平均值为 15.4 mm,显著高于其他 8 个小区($p < 0.05$);CHP 的地表径流量略低于 CHA,是第二高,为 2.1~16.1 mm,平均值为 5.6 mm。CHP×LOC,CHP×SEB,LOC×SEB,LOC 与 LOC×CHA 的地表径流量没有显著性差异($p > 0.05$),主要分布在 1.2~12.8 mm。与地表径流情况相似,BOI 的土壤侵蚀模数最小,为 0.2~15.5 t/km^2 ,平均值为 4.9 t/km^2 ;SEB 次之,为 0.4~33.8 t/km^2 ,平均值为 7.1 t/km^2 ;CHA 的土壤侵蚀模数仍是最大的,为 6.6~1 010.0 t/km^2 ,平均值为 277.2 t/km^2 ,显

著高于其他小区($p<0.05$);CHP 的土壤侵蚀模数低于 CHA,是第二高,为 $1.4\sim 222.0\text{ t/km}^2$,平均值为 48.8 t/km^2 。除 CHA 以外,其余 8 个小区的土壤侵蚀模数没有显著性差异($p>0.05$)。总的来看,与各

乔木及混交林相比,BOI 与 SEB 小区在 2008—2021 年总的水土流失量较低,与 CHA 相比平均年地表径流量分别减少了 83.2%,79.1%,年土壤侵蚀模数分别减少了 98.2%,97.4%。

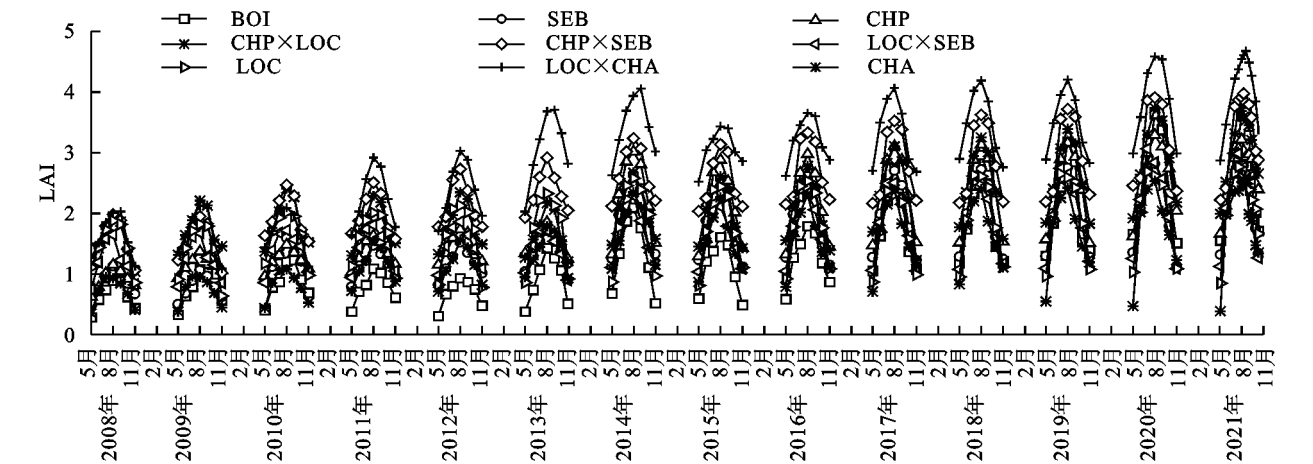


图 2 不同植被处理的 LAI 在 2008—2021 年生长季的变化

Fig. 2 Changes in LAI with different vegetation treatments in the 2008—2021 growing season

表 3 各植被类型叶面积指数的统计特征

Table 3 Statistical characteristics of leaf area index for each vegetation type

植被类型	最小值	最大值	平均值	SD	CV/%
BOI	0.63	2.74	1.38 ^d	0.70	50.6
SEB	0.79	2.27	1.61 ^{cd}	0.50	31.0
CHP	0.90	2.70	1.87 ^{cd}	0.58	31.1
CHP×LOC	1.51	3.13	2.14 ^{bc}	0.48	22.4
CHP×SEB	1.52	3.39	2.47 ^{ab}	0.57	23.1
LOC×SEB	1.19	2.31	1.66 ^{cd}	0.34	20.4
LOC	1.39	2.20	1.76 ^{cd}	0.22	12.4
LOC×CHA	1.62	4.07	2.91 ^a	0.82	28.2
CHA	0.70	1.94	1.38 ^d	0.41	29.5

注:同一列不同字母表示差异显著($p<0.05$)。

2.4 不同小区植被恢复过程对径流和土壤侵蚀的影响

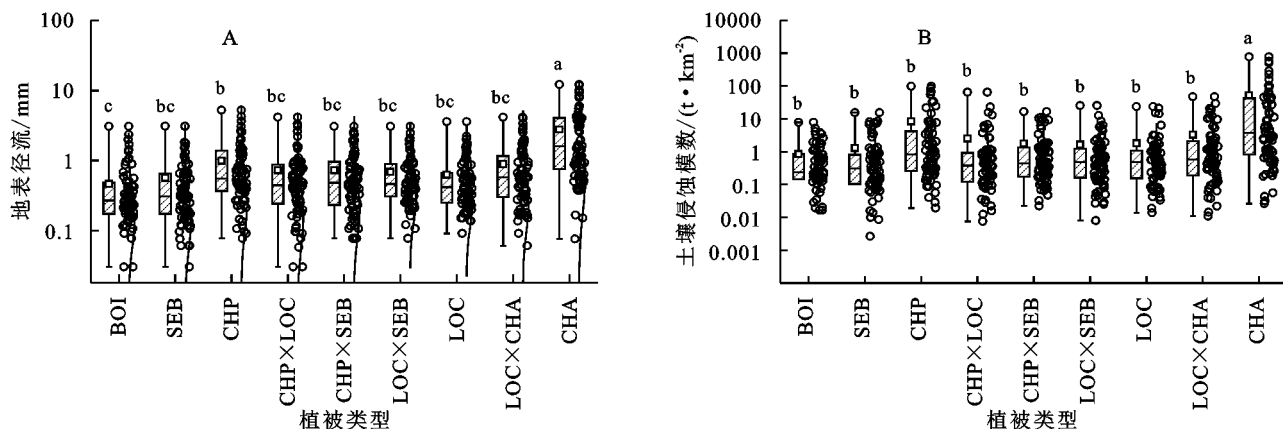
各植被类型在连续 14 a 间的地表径流和土壤侵蚀模数如图 4 所示,受降水特性的影响,随着植被恢复,各植被类型下的地表径流与土壤侵蚀模数呈明显的波动,且二者的波动趋势较为一致,基本呈现为先增加后降低并趋于稳定。在 2015 年、2016 年、2021 年时,各植被类型的径流量和土壤侵蚀模数大于其他年份,这与 2015 年、2016 年、2021 年有较高的侵蚀性降雨量相关,这三年的侵蚀性降雨量分别是 213.6, 247.4, 496.0 mm, 占年总降雨量的比例分别是 41.1%, 50.4%, 65.5%。随着植被恢复,在 2019 年、2020 年时,各植被类型的径流量和土壤侵蚀模数均是观测期内最低的,年总地表径流量分别是 28.6 mm, 20.3 mm, 年总侵蚀模数分别是 14.3 t/km^2 , 17.1 t/km^2 。此外,不同植被类型在恢复过程中,地表径流与土壤侵蚀模数变化趋势存在差异,这一结果与 Wei 等^[6]

结论一致,如在 2010 年,SEB 的地表径流(3.3 mm)和土壤侵蚀模数(2.9 t/km^2)高于 CHP×SEB 的 2.2 mm, 1.8 t/km^2 , 然而,这种情况在 2019 年产生了变化,SEB 的地表径流(0.88 mm)和土壤侵蚀模数(0.4 t/km^2)低于 CHP×SEB 的 3.8 mm, 0.9 t/km^2 。这说明随着植被恢复,SEB 减少水土流失的效果逐渐优于 CHP×SEB。

为了揭示植被恢复过程对径流和泥沙的影响,我们比较相同降水条件下不同植被恢复期各小区径流和泥沙产量,结果如图 5 所示。对比 4 个日降雨量条件(12, 30, 60, 90 mm)下不同植被类型的地表径流与土壤侵蚀模数随植被恢复的变化可以发现,各植被类型小区的产流产沙均呈现出随植被恢复逐渐减少并趋于稳定的趋势,不同植被类型间存在差异。日降雨量为 12 mm 时,仅 CHP 在 2021 年的径流量(0.5 mm)较 2012 年的 0.1 mm 有一定增加,其他小区在 2021 年的径流量与土壤侵蚀模数较 2012 年时降幅分别在 6.4%~89.4%, 55.3%~99.0%, 其中 CHA 的径流量与土壤侵蚀模数降幅分别达 89.4%, 98.9% (图 5A)。日降雨量为 30 mm 时,CHP×LOC 与 CHP×SEB 在 2021 年的径流量(0.2 mm, 0.4 mm)较 2010 年的 0.1 mm, 0.1 mm 有一定增加,其他小区在 2021 年的径流量与土壤侵蚀模数较 2010 年降幅分别在 21.9%, 83.8% 以上(图 5B)。日降雨量为 60 mm 的条件下,在 2021 年,CHP×SEB 的径流量(0.7 mm)较 2009 年的 0.6 mm 有所提高,BOI 的土壤侵蚀模数(0.2 t/km^2)较 2009 年的 0.1 t/km^2 提高明显,其余小区的径流量与土壤侵蚀模数较植被恢复初

期的降幅分别在 2.9%, 29.4% 以上, 其中 SEB 的径流量与土壤侵蚀模数降幅分别达 89.1%, 90.3% (图 5C)。在日降雨量为 90 mm 时, 各植被类型在 2021

年的径流量与土壤侵蚀模数较植被恢复初期的降幅分别在 44.4%~89.1%, 68.4%~99.9% (图 5D)。此外, 整体上, 各植被类型的减沙效益优于其减流效益。



注: 不同小写字母表示不同植被类型存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

图 3 2008—2021 年不同植被处理下的地表径流和土壤侵蚀模数

Fig. 3 Surface runoff and soil erosion modulus under each vegetation type from 2008 to 2021

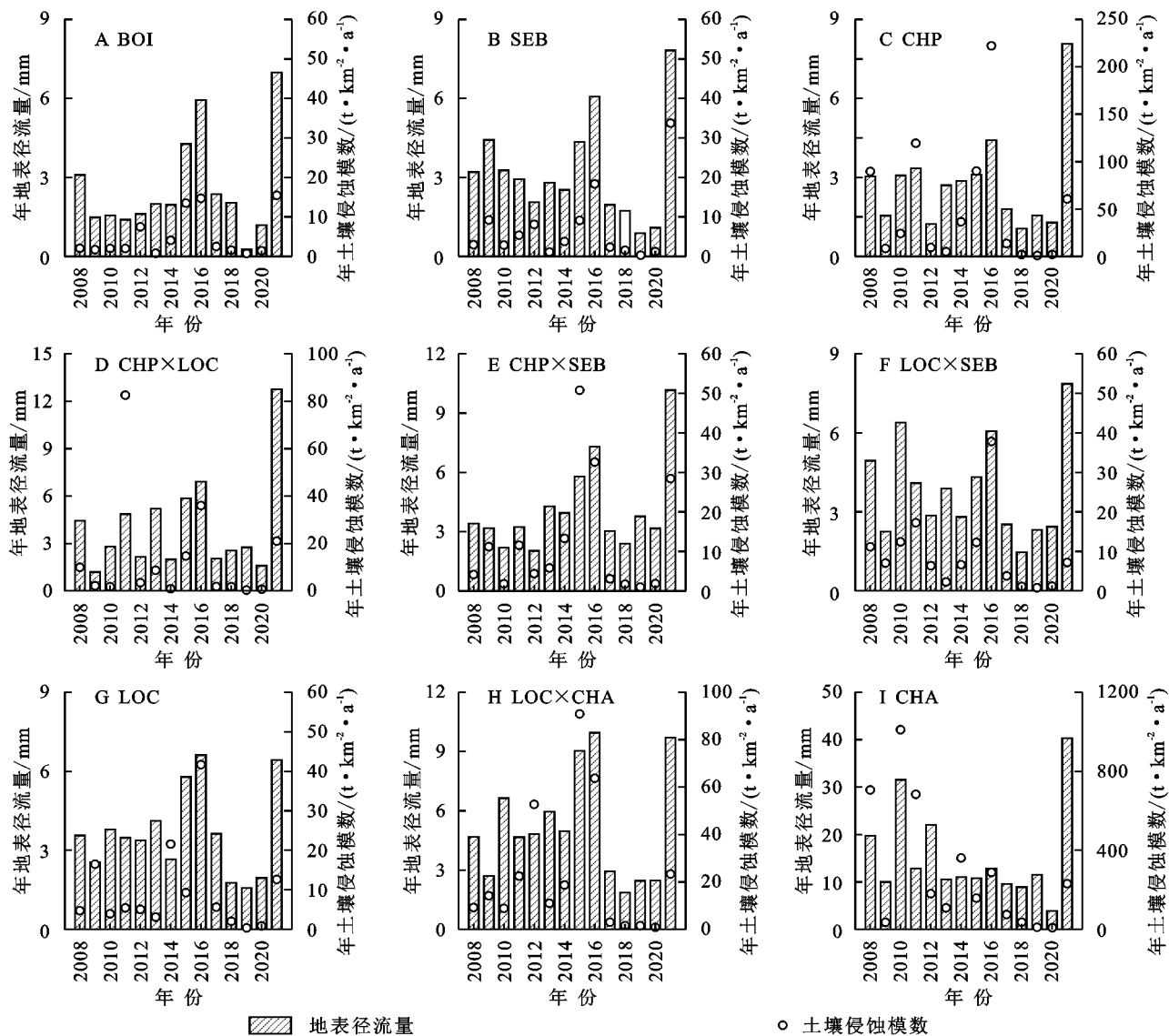
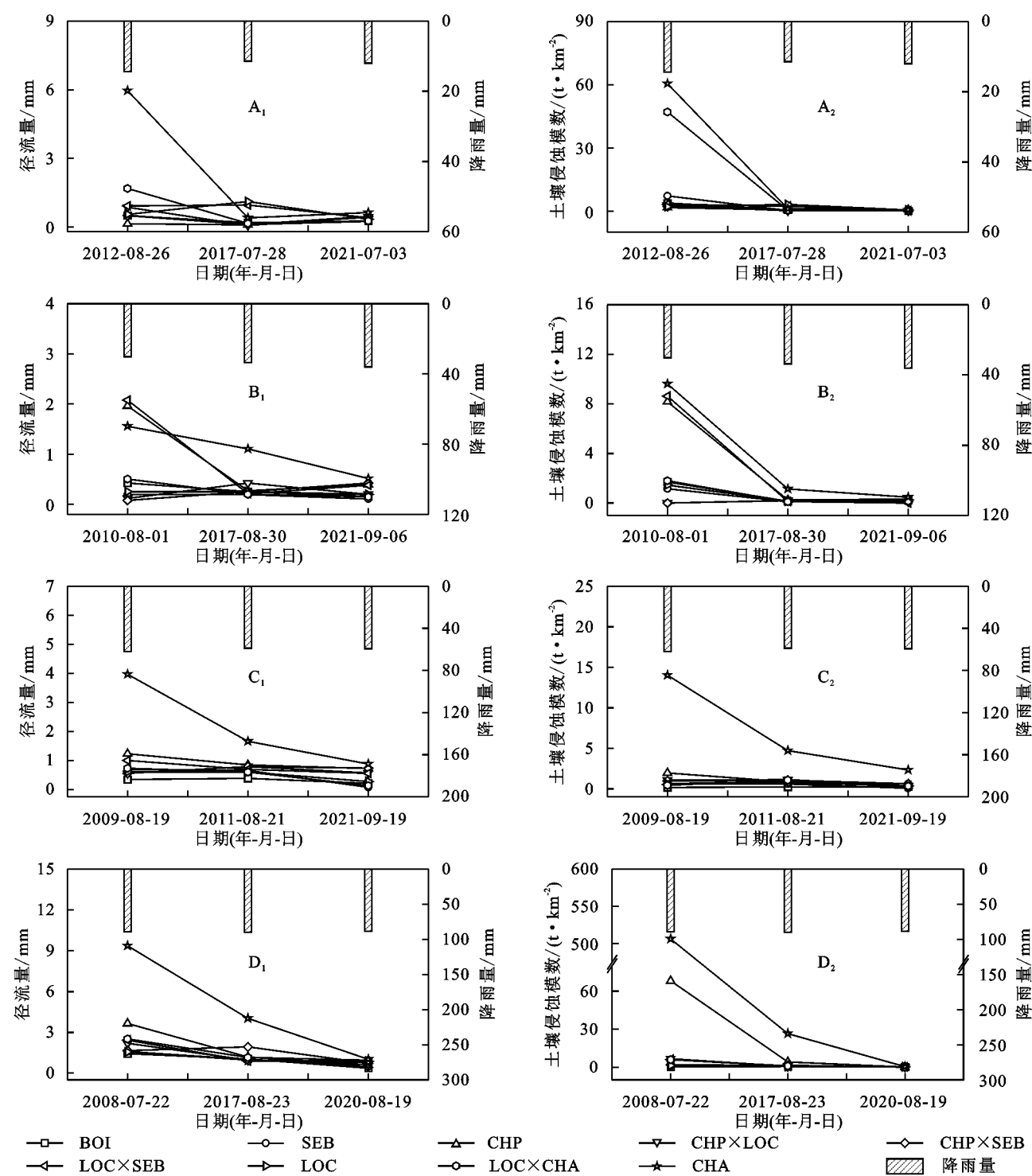


图 4 不同植被处理的地表径流与土壤侵蚀模数随植被恢复的变化

Fig. 4 The change of surface runoff and soil erosion modulus for different vegetation types with vegetation restoration



注:图 A、B、C、D 分别是日降雨量为 12 mm,30 mm,60 mm,90 mm 的条件。

图 5 相似降雨条件下不同植被处理的地表径流与土壤侵蚀随植被恢复的变化

Fig. 5 Changes of surface runoff and soil erosion of different vegetation types under similar rainfall conditions with vegetation restoration

2.5 不同植被类型径流与泥沙关系

表 4 显示了各植被类型地表径流和土壤侵蚀模数之间的关系,在自然降雨条件下,它们都很好地符合一次线性函数关系($p<0.01$)。地表径流与土壤侵蚀模数之间的线性回归系数,常常被视为径流产生土壤流失的指标,是解释不同植被类型对土壤侵蚀影响

的重要参数^[17]。本研究中,各植被类型的地表径流与土壤侵蚀模数之间的回归系数存在差异,系数的大小依次为:CHA>CHP>LOC>LOC×CHA>CHP×SEB>LOC×SEB>SEB>CHP×LOC>BOI。其中,BOI 与 CHP×LOC 的回归系数分别为 1.93,1.94,说明这 2 个小区在控制土壤侵蚀方面的效果优于其他

植被类型;而 CHA 的系数高达 28.37,其控制土壤侵蚀效果最差,这一结果与 Duan 等^[15]在相同区域的研究结论一致。

表 4 不同植被处理地表径流(R)与土壤侵蚀模数(SM)的关系

Table 4 Relationship between surface runoff (R) and soil erosion modulus (SM) of different vegetation types

植被类型	回归方程	R^2	p
BOI	$SM=1.93R-0.034$	0.60	<0.01
SEB	$SM=2.48R-0.42$	0.75	<0.01
CHP	$SM=16.00R-7.57$	0.66	<0.01
CHP×LOC	$SM=1.94R-0.19$	0.64	<0.01
CHP×SEB	$SM=3.79R-1.05$	0.63	<0.01
LOC×SEB	$SM=2.48R-0.46$	0.71	<0.01
LOC	$SM=6.33R-2.91$	0.75	<0.01
LOC×CHA	$SM=4.36R-1.32$	0.60	<0.01
CHA	$SM=28.37R-34.92$	0.46	<0.01

3 讨论

3.1 地表径流和土壤侵蚀对降雨量的响应

大气降雨是干旱半干旱地区土壤水分补充的重要途径,也是产生径流泥沙的关键驱动力,降雨量以及降雨的时空异质性深刻影响了区域生态水文过程^[6]。本研究中,同一植被类型的地表径流与土壤侵蚀模数在不同年份时不一样(图 3),2008—2021 年期间研究区年总降雨量呈现明显的波动(图 1),各年的侵蚀性降雨量占年总降雨量比重均较高,9 种植被类型下地表径流及土壤侵蚀模数与年侵蚀性降雨量的波动变化趋势较为一致,说明地表径流和土壤流失受侵蚀性降雨量的影响^[6]。例如,2009 年的侵蚀性降雨量较 2008 年有明显降低,各植被类型的地表径流和土壤侵蚀模数呈现不同程度的减小,而 2013 年、2015 以及 2016 年降雨较为集中,且均有超 80 mm 的日降雨量,各植被类型的地表径流和土壤侵蚀模数较上一年显著增加,特别是 2021 年时年降雨量与侵蚀性降雨量均是观测期间最高的,各植被类型下的地表径流与土壤侵蚀较 2020 年增加显著。这与江忠善等^[18]的研究结论一致,他们的研究认为高强度短历时的降雨动能是普通降雨的 1.24 倍,高强度的侵蚀性降雨具有较大的降雨侵蚀力。

3.2 植被类型对地表径流和土壤侵蚀的影响

植被通过冠层、枯枝落叶、根系等影响了区域水文和土壤侵蚀过程。在这项研究中,我们发现不同植被类型的地表径流与土壤侵蚀模数存在差异(图 2)。相比之下,BOI 与 SEB 的平均地表径流、土壤侵蚀模数较小,而 CHA 的平均地表径流与土壤侵蚀模数显著高于其他几种植被类型($p<0.05$)。从水文角度来

看,植被冠层拦截大气降雨,降低雨滴的动能,不仅减少了到达土壤的降雨量,还削弱了雨滴对土壤的侵蚀力^[19];植被凋落物也可以削弱雨滴动能、保存雨水量,并通过增加地表粗糙度进而减缓地表径流速率^[6],减少土壤侵蚀。有研究指出,乔木冠层距地面较高反而会增强降雨对土壤的侵蚀力^[20],增加陡坡地区土壤侵蚀发生的可能性。具有近地面冠层特征的草丛、灌木丛以及厚重的枯落物层可以更有效地减少地表径流和土壤侵蚀,其效果优于单一植被群落^[21]。在本研究中,BOI 与 SEB 的近地面覆盖较高,且地表枯落物数量较多,这两个小区总的地表径流与土壤侵蚀模数低于其他植被类型。而 CHA 的长势差,植被覆盖度低,缺乏林下植被的保护,且土壤物理性质差(表 1),其水土保持效果是几种植被恢复类型中最差的。

从表 3 可以看出,在自然降雨条件下,不同植被类型的土壤侵蚀模数均随地表径流的增加而增加,这与 Duan 等^[15]的研究结论一致,地表径流与土壤侵蚀模数之间的函数关系的系数表示了各植被类型抗侵蚀能力,较低的系数代表植被控制土壤侵蚀效果好。除冠层结构的影响,发达的浅层草本须根系统可以增强表层土壤的抗侵蚀能力^[22-23],本研究中 BOI 的回归系数最小,土壤侵蚀敏感性最低,表明其控制土壤侵蚀效果最佳,而 CHP 与 CHA 因缺乏林下植被,回归系数较大,控制土壤侵蚀效果不如其他植被类型。朱燕琴等^[8]在 15° 的缓坡区域研究不同植被恢复模式下次降雨产流产沙特征的结果也表明,草地的径流含沙量较灌木、乔木林更低。同时,Chen 等^[5]研究表明,植被控制土壤侵蚀效果也会随着土壤性质的改善而提高。另外,SEB 与 LOC 的土壤侵蚀模数与地表径流之间的相关性最好, R^2 值高达 0.75,这表明可以通过地表径流量有效估算这两个小区的土壤侵蚀模数,而 CHA 的土壤侵蚀模数与地表径流之间的相关性较差, R^2 仅为 0.46,不能通过地表径流准确推算其土壤侵蚀模数。

3.3 地表径流和土壤侵蚀随植被恢复的变化

本研究结果表明,各植被类型下的水土流失量随着植被恢复均呈逐渐降低的趋势(图 3),这一结果支持了黄博文等^[24]的研究结论,即在自然降雨条件下,较缓坡面的水土流失量随着植被恢复而显著下降,不同植被类型的减流效益达 20.7%~79.0%,减沙效益达 97.4%~99.4%。甘卓亭等^[25]通过模拟降雨研究牧草在不同生长阶段的减流减沙效益也得出相似结论,在 15° 的坡面上,红豆草的减流、减沙效益分别由第 12 周的 10.8% 与 24.5% 提升至第 27 周的 43.2%

与99.8%。这一方面是因为植被冠层的逐渐复杂增强了对降雨的拦截;另一方面,各植被类型通过增加枯落物以及根系分泌物等途径增加了土壤中的有机物质,进而改善土壤物理结构,增强了土壤的抗侵蚀能力。如图5所示,在相似的降雨量条件下,随着植被恢复,各植被类型的径流泥沙量基本呈现为逐渐降低并稳定在较低水平,这也符合了吴蕾等^[26]的研究结论,即在黄土高原地区开展植被恢复,当植被盖度达到70%~80%后,植被的减流减沙效益不再随盖度的增加而增加。不同植被类型下径流泥沙数量表现出的减少规律存在差异,艾宁等^[27]在12°~29°相对较缓坡地的研究指出,随着植被恢复,灌木林与乔木林减少径流泥沙效果优于草地。而本研究中,虽然CHA的减流减沙效益较其他植被类型更明显,但在2021年时,年地表径流量最低的是LOC(6.4 mm),年土壤侵蚀模数最低的是SEB×LOC(7.2 t/km²),这一方面是随着植被恢复,LOC与SEB×LOC逐渐复杂的冠层结构减弱了降水的侵蚀力,另一方面是这两个小区的林下草本种类和数量逐渐丰富,降低了地表裸露程度,可以更有效地减少陡坡地区的产流产沙。此外,各植被类型的减沙效益优于减流效益,黄博文等^[24]研究得出一致结论,主要原因是随着植被恢复,根系的物理固结作用与根系分泌物的生物化学作用逐渐提高有利于增强土体结构的稳定性,提高土壤的抗侵蚀能力。

4 结论

(1) 侵蚀性降雨量的增加会导致较高的地表径流和土壤侵蚀模数;(2) 侧柏林的平均地表径流与土壤侵蚀最高,而白羊草和沙棘灌丛地表径流与土壤侵蚀均较低,与侧柏林相比,二者的平均年地表径流量分别减少了83.2%,79.1%,年土壤侵蚀模数分别减少了98.2%,97.4%;(3) 各植被类型的地表径流与土壤侵蚀模数均符合线性关系,其系数反映了植被控制土壤侵蚀的效果,草地、油松×刺槐林的地表径流与土壤侵蚀模数之间的回归系数较小,分别为1.93,1.94,控制土壤侵蚀效果较优;(4) 随着植被恢复,各植被类型的产流产沙量均表现出逐渐降低的趋势,但各植被类型的降幅存在差异,侧柏林较植被恢复初期的降幅均高于67.1%,但经18 a植被恢复后,白羊草、沙棘灌丛、沙棘×刺槐和刺槐林的水土流失量较低。根据上述研究,我们得出在采取植被恢复措施控制黄土高原陡坡地水土流失的过程中,初期应以草、灌及其混交林为主,不适合种植单一乔木。

参考文献:

- [1] Fu B, Gulinck H, Masum M Z. Loess erosion in relation to land-use changes in the Ganspoel catchment, central Belgium[J]. *Land Degradation & Development*, 1994,5(4):261-270.
- [2] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].*生态学报*,2019,39(20):7398-7409.
Li Z S, Yang L, Wang G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(20):7398-7409.
- [3] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].*水科学进展*,2013,24(5):607-616.
Yao W Y, Ran D C, Chen J N, et al. Recent changes in runoff and sediment regimes and future projections in the Yellow River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2013,24(5):607-616.
- [4] Wei W, Jia F Y, Yang L, et al. Effects of surficial condition and rainfall intensity on runoff in a loess hilly area, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,513:115-126.
- [5] Chen H, Zhang X P, Abia M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2018,170:141-149.
- [6] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2007,335:247-258.
- [7] Wang L J, Zhang G H, Zhu P Z, et al. Comparison of the effects of litter covering and incorporation on infiltration and soil erosion under simulated rainfall [J]. *Hydrological Processes*, 2020,34(13):2911-2922.
- [8] 朱燕琴,赵志斌,齐广平,等.陇中黄土高原丘陵沟壑区不同植被恢复模式下次降雨产流产沙特征[J].*干旱区地理*,2020,43(4):920-927.
Zhu Y Q, Zhao Z B, Qi G P, et al. Characteristics of slope runoff and sediment of different vegetation restoration patterns under individual rainfall events in hilly and gully loess region in middle Gansu Province [J]. *Arid Land Geography*, 2020,43(4):920-927.
- [9] Huang Z L, Chen L D, Fu B J, et al. The relative efficiency of four representative cropland conversions in reducing water erosion: Evidence from long-term plots in the Loess Plateau, China[J]. *Land Degradation & Development*, 2006,17(6):615-627.
- [10] 李钢,梁音,曹龙熹.次生马尾松林下植被恢复措施的水土保持效益[J].*中国水土保持科学*,2012,10(6):25-31.
Li G, Liang Y, Cao L X. Effects of different vegetation restoration patterns on soil erosion in secondary

- Pinus massoniana* pure forest[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(6): 25-31.
- [11] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 植被保持水土有效性研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 76-80.
- Li P, Li Z B, Zheng L Y. Advances in researches of the effectiveness for vegetation conserving soil and water[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 76-80.
- [12] 花东文, 温仲明. 黄土丘陵区不同植被恢复阶段下的暴雨产流产沙研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 27-31, 90.
- Hua D W, Wen Z M. Study on runoff and sediment under simulated rainstorm condition of different stages of vegetation restoration in Loess Hilly Region, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4): 27-31, 90.
- [13] 刘晓燕, 党素珍, 高云飞, 等. 黄土丘陵沟壑区林草变化对流域产沙影响的规律及阈值[J]. 水利学报, 2020, 51(5): 505-518.
- Liu X Y, Dang S Z, Gao Y F, et al. The rule and threshold of the effect of vegetation change on sediment yield in the loess hilly region, China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(5): 505-518.
- [14] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(5): 537-541.
- Wang X Q, Ma L Y, Jia Z K, et al. Research and application advances in leaf area index[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(5): 537-541.
- [15] Duan L X, Huang M B, Zhang L D. Use of a state-space approach to predict soil water storage at the hill-slope scale on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2016, 137: 563-571.
- [16] Huang M B, Gallichand J. Use of the SHAW model to assess soil water recovery after apple trees in the gully region of the Loess Plateau, China[J]. Agriculture Water Management, 2006, 85: 67-76.
- [17] Vasquez-Mendez R, Ventura-Ramos E, Oleschko K, et al. Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico[J]. Catena, 2010, 80(3): 162-169.
- [18] 江忠善, 宋文经, 李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究[J]. 中国水土保持, 1983(3): 34-38.
- Jiang Z S, Song W J, Li X Y. Study on the characteristics of natural rainfall and raindrops in loess area[J]. Soil and Water Conservation in China, 1983(3): 34-38.
- [19] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘国彬. 黄土高原森林植被水土保持机理研究[J]. 林业科学, 2001, 37(5): 140-144.
- Zhao H Y, Wu Q X, Liu G B. Mechanism on soil and water conservation of forest vegetation on the Loess Plateau[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(5): 140-144.
- [20] 汪有科, 吴钦孝, 韩冰, 等. 森林植被水土保持功能评价[J]. 水土保持研究, 1994, 1(3): 24-30.
- Wang Y K, Wu Q X, Han B, et al. Appraising the function of forest vegetation on soil and water conservation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1994, 1(3): 24-30.
- [21] Mohammad A G, Adam M A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses[J]. Catena, 2010, 81(2): 97-103.
- [22] 李勉, 姚文艺, 李占斌. 黄土高原草本植被水土保持作用研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 74-80.
- Li M, Yao W Y, Li Z B. Progress of the effect of grassland vegetation for conserving soil and water on Loess Plateau[J]. Advance in Earth Sciences, 2005, 20(1): 74-80.
- [23] Li Q, Liu G B, Zhang Z, et al. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the Loess soil[J]. Catena, 2017, 153: 61-65.
- [24] 黄博文, 查瑞波, 毛兰花, 等. 红壤侵蚀退化坡面植被恢复过程中的水土保持效益演变[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 135-142.
- Huang B W, Cha R B, Mao L H, et al. Evolution of soil and water conservation benefits in the process of vegetation restoration on slope of eroded and degraded red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 135-142.
- [25] 甘卓亭, 叶佳, 周旗, 等. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2387-2396.
- Gan Z T, Ye J, Zhou Q, et al. Effects of grass vegetations on the processes of soil erosion over slope lands in simulated rainfalls[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(9): 2387-2396.
- [26] 吴蕾, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土高原地区植被盖度对产流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 133-138.
- Wu L, Mu X M, Gao P, et al. Effects of vegetation coverage on runoff and sediment yield in the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 133-138.
- [27] 艾宁, 魏天兴, 朱清科. 陕北黄土高原不同植被类型下降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 26-30, 35.
- Ai N, Wei T X, Zhu Q K. The effect of rainfall for runoff-erosion-sediment yield under the different vegetation types in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 26-30, 35.