

黄土高原草地灌丛化对潜在植被截留和土壤蓄水能力的影响

乔文英^{1,2}, 安琪琪^{1,2}, 常小峰¹, 郑纪勇¹, 李维军³

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100;

2.西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100; 3.宁夏云雾山国家级自然保护区管理局, 宁夏 固原 756000)

摘要: [目的] 分析灌丛化后草地生态系统植被截留和土壤蓄水特征, 为系统评价灌丛化后草地生态系统的水土保持能力提供参考。[方法] 以黄土高原未灌丛化草地和灌丛化草地(包括禾草斑块、半灌木斑块、灌木斑块)为研究对象, 系统研究了植被(包括冠层与枯落物)截留量与土壤饱和蓄水量的变化特征。[结果] ①灌丛化通过增加草地上生物量使植被冠层截留量增加了 0.3 mm, 通过减少枯落物量使枯落物截留量减少了 0.5 mm; ②草地灌丛化过程中, 只有灌木斑块显著增加了 0—40 cm 土壤饱和蓄水量。而且, 灌木斑块与半灌木斑块土壤饱和蓄水量显著不同, 灌木斑块较半灌木斑块土壤饱和蓄水量增加 12.8 mm, 主要发生在 0—20 cm 土层。[结论] 灌丛化没有降低草地生态系统土壤饱和蓄水能力, 但若灌木继续扩张, 可能会削弱草地生态系统植被截留能力。

关键词: 灌丛化; 冠层截留; 枯落物层; 土壤蓄水量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)01-0069-08

中图分类号: S714.7

文献参数: 乔文英, 安琪琪, 常小峰, 等. 黄土高原草地灌丛化对潜在植被截留和土壤蓄水能力的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 69-76. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.010; Qiao Wenyong, An Qiqi, Chang Xiaofeng, et al. Effects of shrub encroachment on potential vegetation interception and soil water-holding capacity of grasslands on Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 69-76.

Effects of Shrub Encroachment on Potential Vegetation Interception and Soil Water-Holding Capacity of Grasslands on Loess Plateau

Qiao Wenyong^{1,2}, An Qiqi^{1,2}, Chang Xiaofeng¹, Zheng Jiyong¹, Li Weijun³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 3. Department of Yunwu Mountain Natural Reserve, Guyuan, Ningxia 756000, China)

Abstract: [Objective] Vegetation interception and soil water-holding capacity were analyzed in order to provide a scientific basis for systematically evaluating the soil and water conservation functions of semi-arid shrub-encroached grasslands. [Methods] Characteristics of vegetation interception (including canopy and litter layer), soil water-holding capacity of the primary grassland and shrub-encroached grassland (including grass patch, sub-shrub patch, and shrub patch) were measured on the Loess Plateau. [Results] ① The capacity of canopy interception in shrub patches was increased by 0.3 mm with the increasing of aboveground biomass, while the capacity of litter interception was decreased by 0.5 mm through reduction in the litter biomass. ② During shrub encroachment, only shrub patches significantly improved soil water-holding capacity. Moreover, there were significant differences in soil water-holding capacity between sub-shrub and shrub patches. Compared with sub-shrub patches, the capacity of shrub patches was enhanced by 12.8 mm, and the increase mainly occurred in the surface soil (0—20 cm). [Conclusion] Shrub encroachment did not reduce the potential soil water-holding capacity. However, if shrubs continue to expand in area coverage, the interception

收稿日期: 2021-08-09

修回日期: 2021-09-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原半干旱区草地灌丛化形成机制”(42177451)

第一作者: 乔文英(1995—), 女(汉族), 山西省运城市人, 硕士研究生, 研究方向为流域生态水文研究。Email: qwy2019050570@nwfau.edu.cn.

通信作者: 常小峰(1984—), 男(汉族), 陕西省米脂县人, 博士, 副研究员, 主要从事恢复生态学研究工作。Email: changxf@nwfau.edu.cn.

ability of grassland ecosystem by canopy and litter layer might be weaken.

Keywords: shrub encroachment; vegetation interception; litter layer; soil water-holding capacity

草地是陆地生态系统的重要组成部分,具有调节气候、涵养水源、维持生物多样性等多种生态功能^[1]。中国草地资源丰富,其中,北方草地面积约 $3.00 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 占全国天然草地面积的 85%,是中国北方地区重要的生态安全屏障^[1]。近年来,中国北方草地普遍出现灌丛化现象,主要表现为草地上灌木或木本植物的密度、盖度、生物量增加^[2]。灌丛化使植物群落组成或优势种发生改变,影响草地生产力^[3],改变土壤水分养分的分布,增加土壤异质性^[4],同时还影响生态水文过程^[5],进而影响草地生态系统的水土保持功能。

研究表明,植被覆盖能够有效防止水土流失^[6]。草地生态系统通过植被截留、土壤入渗蓄水等途径调控降水再分配,减少土壤溅蚀、增加径流阻力、有效减弱降水侵蚀力,从而发挥水土保持功能^[7]。植被对降水的截留可以减小雨滴的下落速度,延缓雨滴降落到地面的时间,减弱雨滴对表层土壤的直接打击强度^[8]。同时,植被截留作用可以让植物和土壤充分吸收降水,促进植物生长,形成植被降水截留与植物生长之间的正反馈效应^[8],更好的植物生长还可以通过枯落物积累来改善土壤性质,控制径流产生,形成一个良性循环^[9]。植被结构特征是影响植被截留最重要的因素^[10]。枯落物能够增加地表的粗糙度,减缓地表径流速度,减缓地表径流对表层土壤的冲击,同时,枯落物能吸收部分降水,增加土壤入渗,减少地表径流^[11]。土壤本身就是巨大的蓄水库,土壤物理结构能够直接影响土壤的蓄水能力。改善土壤结构,提高土壤水分下渗能力,可以提高土壤涵养水分能力,减少地表径流引发的水土流失^[12]。

灌丛化改变了草地生态系统的植物群落结构、枯落物性质及土壤结构,进而影响草地生态系统对降水的调控。许多研究认为草地灌丛化会导致地表径流增加和土壤侵蚀加剧^[12]。而 Wei 等^[9]认为由于灌木比草本具有更高的植株、更发达的枝、更密集的冠层,且灌木冠层下的土壤还受到草本植物的覆盖,地表有效覆盖度更高,因此灌木对径流产生时间的延迟比草本更有效,灌木在减少径流产生等方面起着更强有力的缓冲作用。加之灌木群落覆盖下的枯落物储量大于草本群落,导致灌木群落覆盖下的枯落物对降水的截留量高于草本群落^[11],因而灌木群落在减少地表径流产生等方面要优于草本群落。灌丛化后,植被类型由于植物种类组成、物种生物学特性和空间结构不同,导致土壤理化性质存在较大差异,影响土壤对降水的截蓄。Zhang 等^[4]的研究表明灌木扩张改善了

土壤的物理性状和土壤养分,灌木冠层下的土壤出现大孔隙,能将降水快速输送到土壤中。以往的研究认为灌木扩张抑制了冠层下方植被生长,降低物种多样性,改变生态系统结构和功能,导致土地沙化,甚至造成土地荒漠化,然而,最近的研究表明灌丛可以改善土壤理化性质、促进草本植物多样性和生态系统恢复^[12],因此,不能简单地认为灌丛化就是土地退化的标志,灌丛化对草地生态系统植被截留和土壤蓄水的影响还需要进一步研究。

黄土高原天然草地面积约为 $2.32 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占土地面积的 33%^[13]。其中,云雾山国家级自然保护区是黄土高原保留最完整,最具有代表的典型草原,也是中国西部地区最早采取封育措施恢复的草地之一。在封育 30 a 多后,发现草地中灌木生物量、密度、盖度显著增加,形成明显的灌丛斑块^[3]。但灌丛化对草地生态系统植被截留和土壤蓄水的影响尚未可知。因此,本研究以黄土高原长期封育草地为研究对象,从植被冠层、枯落物层、土壤层等对比分析未灌丛化草地与灌丛化草地对降水潜在调控的影响,系统评价灌丛化草地的植被截留和土壤蓄水能力。

1 研究区概况

云雾山国家级自然保护区(地理位置 $106^{\circ}21' - 106^{\circ}27' \text{ E}$, $36^{\circ}10' - 36^{\circ}17' \text{ N}$,海拔 1 800~2 100 m),位于宁夏回族自治区固原市原州区,属暖温带半干旱气候,年均温 $6.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量 425.4 mm。其中,植物生长季(5—10月)降水占全年降水量的 70%。土壤类型主要以山地灰褐土和黑垆土为主。保护区自 1982 年起实施封育。草地植物物种组成主要有长芒草(*Stipa bungeana*)、大针茅(*Stipa grandis*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)等。近年来,封育草地植物群落中灌木的生物量、密度增加,呈团块状散布在草地基质上,形成明显的半灌木/灌木斑块与禾草斑块镶嵌分布的灌丛化景观。以灌木矮脚锦鸡儿和半灌木白莲蒿冠层垂直投影范围确定灌木和半灌木斑块,其余草地基质称为禾草斑块。半灌木/灌木斑块植物群落主要建群种为半灌木白莲蒿(*Artemisia sacrorum*),灌木矮脚锦鸡儿(*Caragana brachypoda*)等。

2 材料与方法

2.1 样地设置与试验方法

2019 年 8 月,在保护区选取坡度相近($15^{\circ} \sim$

23°),坡向一致(54°~68°NE)的未灌丛化草地和灌丛化草地(灌丛盖度 43.3%~48.5%)。根据植物群落中禾草、半灌木、灌木的相对多度,进一步将灌丛化草地分为禾草斑块、半灌木斑块和灌木斑块(表 1)。随机法确定 5 个采样点,并且每个采样点有 1 组禾草斑块、半灌木斑块和灌木斑块以进行斑块间植被截留和土壤蓄水能力的比较。半灌木/灌木斑块近似椭圆状,以每斑块长轴与短轴交点为中心,设置 50 cm×50 cm 的样方,确保采样样方位于灌丛斑块中心

位置;禾草斑块形状并不规则,在其中心处(最长径与最短径的交点)设置 50 cm×50 cm 的样方。分别在未灌丛化草地、灌丛化草地的禾草斑块、半灌木斑块、灌木斑块样方的 4 个角及中心位置用直尺测量枯落物厚度,并收集枯落物装入信封。然后,将选定样方内植物齐地面收割,装入塑料袋(尽量保持植物形态)。待地上植物和枯落物收获后,挖掘土壤剖面。用环刀(100 cm³)取 0—20 cm 和 20—40 cm 土壤原状土。

表 1 黄土高原草地未灌丛化草地和灌丛化草地植物群落特征

植物群落类型	未灌丛草地	灌丛化草地		
		禾草斑块	半灌木斑块	灌木斑块
优势植物种	长芒草、大针茅	长芒草、大针茅	白莲蒿	矮脚锦鸡儿
物种丰富度	12.0±1.3	8.0±1.0	8.0±1.2	9.0±1.4
禾草生物量/(g·m ⁻²)	242.6±37.3	261.0±45.1	68.2±8.4	120.5±10.3
半灌木生物量/(g·m ⁻²)	—	14.2±2.5	345.7±42.3	26.2±2.2
灌木生物量/(g·m ⁻²)	—	12.4±2.1	20.2±2.5	702.9±60.0

注:表中数值为平均值±标准差。

将植物样品带回实验室后(采集 24 h 内),用天平称量每个样方内植物鲜重,将植物样品浸没水中 30 min,轻轻捞出,待重力水滴净后,迅速称重,计算植被冠层截留量及截留率^[8,10]。将枯落物样品经 65 °C 烘干至恒重(48 h),称重后放置于圆形漏筛(直径 25 cm),浸入水中 24 h 后取出沥水直至不再滴水,迅速称重计算枯落物截留量及截留率^[14]。土壤样品在 105 °C 烘干至恒重(48 h),称重计算土壤总孔隙度,根据土壤总孔隙度计算土壤饱和和蓄水量^[15]。待植物样品和枯落物样品浸水试验结束后,将植物样品和枯落物样品分别放入烘箱 65 °C 烘干至恒重,称重计算地上生物量和枯落物量。潜在植被截留和土壤饱和和蓄水计算过程如下:

$$I_1 = \frac{(M_2 - M_1) / \rho}{A} \times 10 \quad (1)$$

$$I_r = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \quad (2)$$

$$W = 10\ 000 \times T_p \times H \quad (3)$$

式中: I_1 表示植被(冠层或枯落物层)截留量(mm); I_r 表示截留率(%); M_2 表示浸水后的重量(g); M_1 表示浸水前的重量(植物样品用鲜重计算,g;枯落物样品用干重计算,g); ρ 表示水的密度(g/cm³); A 表示样方面积(cm²); W 表示土壤饱和和蓄水量(t/hm²); T_p 表示土壤总孔隙度(%); H 表示土层厚度(m)。

2.2 数据处理

本文采用单因素方差分析法和 LSD 显著性检验,对未灌丛化草地和灌丛化草地的禾草斑块、半灌

木斑块、灌木斑块的植被截留和土壤蓄水能力进行统计分析(R version 4.0.3)。用 Origin 2020 (Origin-Lab, Corp., Northampton, MA, USA)软件绘图。

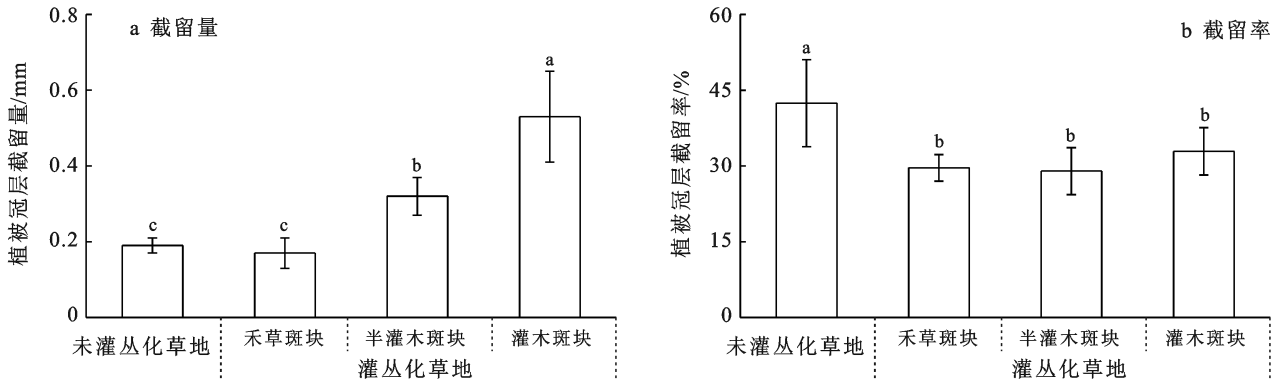
3 结果与分析

3.1 植被冠层截留量和截留率

灌丛化显著增加了草地植被冠层的截留作用($p < 0.05$,图 1a)。半灌木斑块和灌木斑块植被冠层截留量较未灌丛化草地分别提高了 68.4% ($p < 0.001$) 和 179.0% ($p < 0.001$)。植被冠层截留量与地上生物量呈现出显著的正相关关系($R^2 = 0.85$, $p < 0.001$,图 2)。但植被冠层截留率呈现出与截留量相反的变化趋势,灌丛化显著降低了草地植被冠层截留率($p = 0.028$,图 1b)。禾草斑块、半灌木斑块、灌木斑块植被冠层截留率较未灌丛化草地分别降低了 30.2% ($p = 0.038$), 31.7% ($p = 0.032$) 和 22.5% ($p = 0.048$)。

3.2 枯落物层截留量与截留率

灌丛化显著降低了草地枯落物层的截留量($p = 0.022$,图 3a)和截留率($p = 0.002$,图 3b)。灌木斑块枯落物层截留量较未灌丛化草地降低 35.5% ($p = 0.004$),禾草斑块、半灌木斑块与未灌丛化草地枯落物层截留量差异不显著($p = 0.602$)。半灌木斑块和灌木斑块枯落物层截留率较未灌丛化草地分别降低 22.1% ($p = 0.026$) 和 20.8% ($p = 0.006$)。枯落物层截留量与枯落物层厚度和储量存在显著正相关关系(厚度: $R^2 = 0.72$, $p < 0.001$;储量: $R^2 = 0.65$, $p < 0.001$,图 4)。



注:不同字母表示不同斑块植被冠层截留量与截留率在 $p < 0.05$ 水平上有显著差异。下同。

图 1 黄土高原草地地上植被冠层截留量与截留率

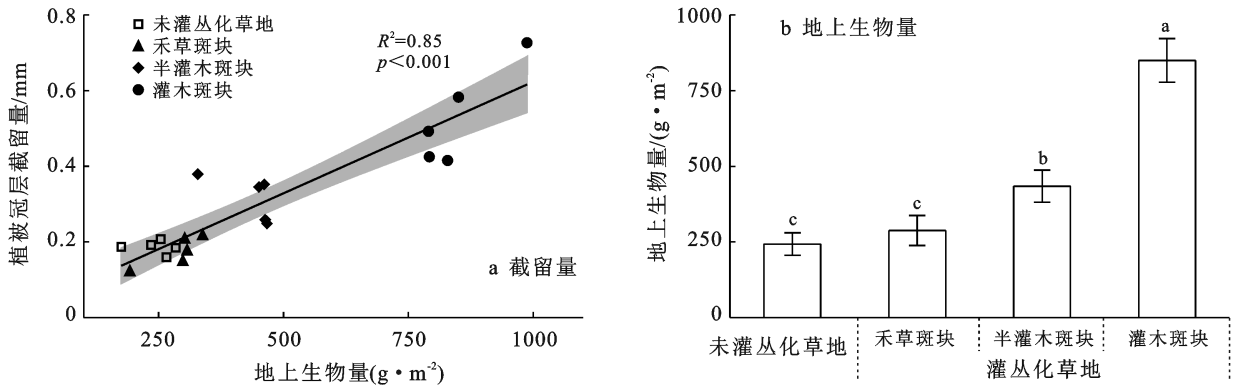
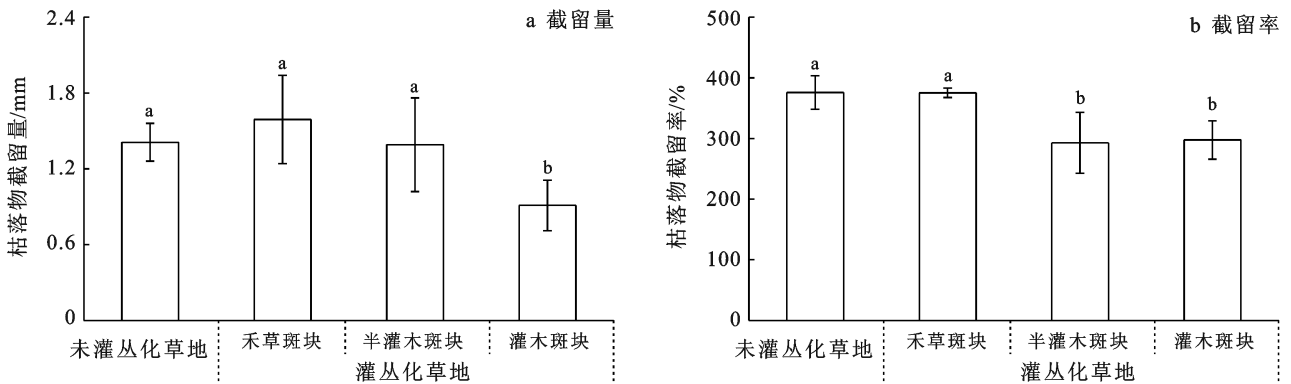


图 2 黄土高原植被冠层截留量与地上生物量的关系



注:不同字母表示不同斑块枯落物截留量与截留率在 $p < 0.05$ 水平上有显著差异。

图 3 黄土高原草地枯落物层截留量与截留率

3.3 土壤饱和蓄水量

如图 5a 所示,在 0—20 cm 土层,未灌丛化草地的平均土壤饱和蓄水量为 131.3 mm。灌木斑块较半灌木斑块土壤饱和蓄水量显著增加(增加了 9.8 mm, $p = 0.003$)。未灌丛化草地、禾草斑块和灌木斑块之间土壤饱和蓄水量没有显著差异($p = 0.305$)。在 20—40 cm 土层,草地土壤平均饱和蓄水量为 122.7 mm。

如图 5b 所示,在草地灌丛化过程中,只有灌木

斑块的 0—40 cm 的土壤饱和蓄水量显著增加。灌木斑块土壤饱和蓄水量较未灌丛化草地和半灌木斑块分别增加了 9.0 mm ($p = 0.019$)和 12.8 mm ($p = 0.015$),灌木斑块与禾草斑块的土壤饱和蓄水量差异不显著($p = 0.145$)。而且,土壤饱和蓄水量与土壤孔隙度呈现显著正相关关系(0—20 cm: $R^2 = 0.88$, $p < 0.001$; 20—40 cm: $R^2 = 0.54$, $p < 0.001$, 图 6)。

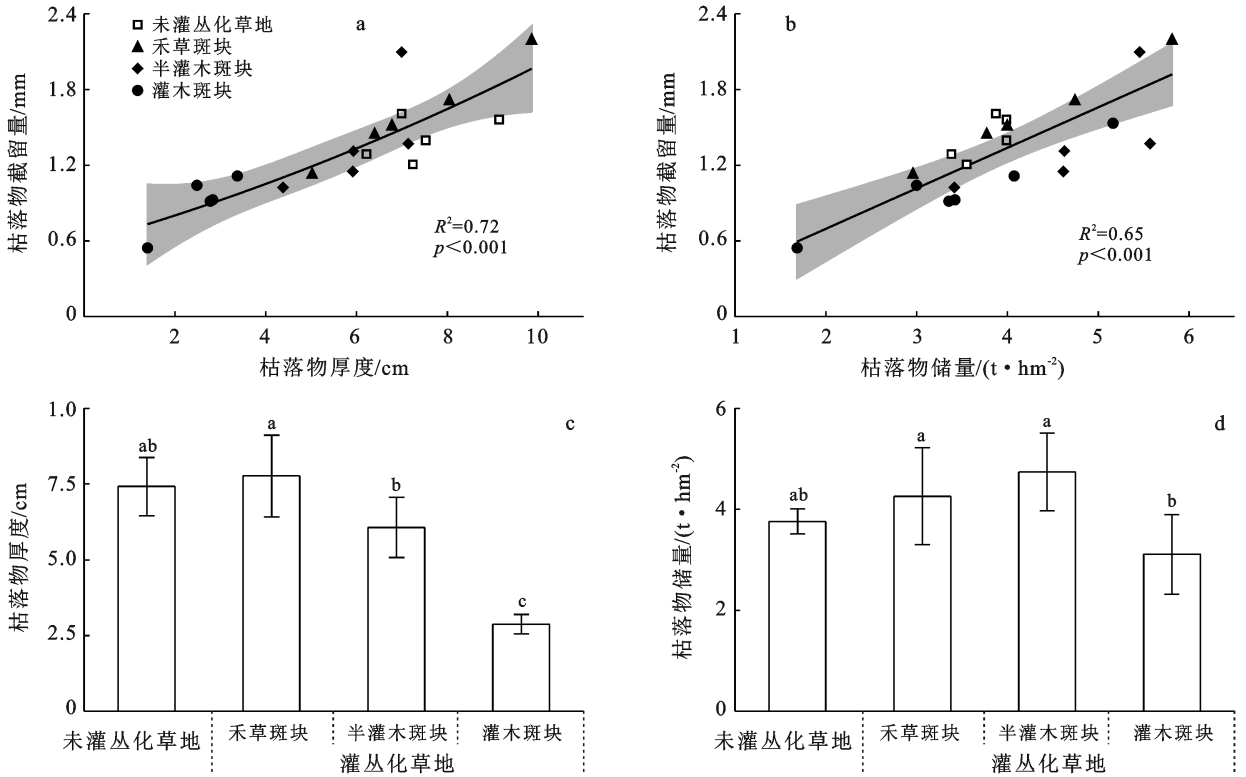
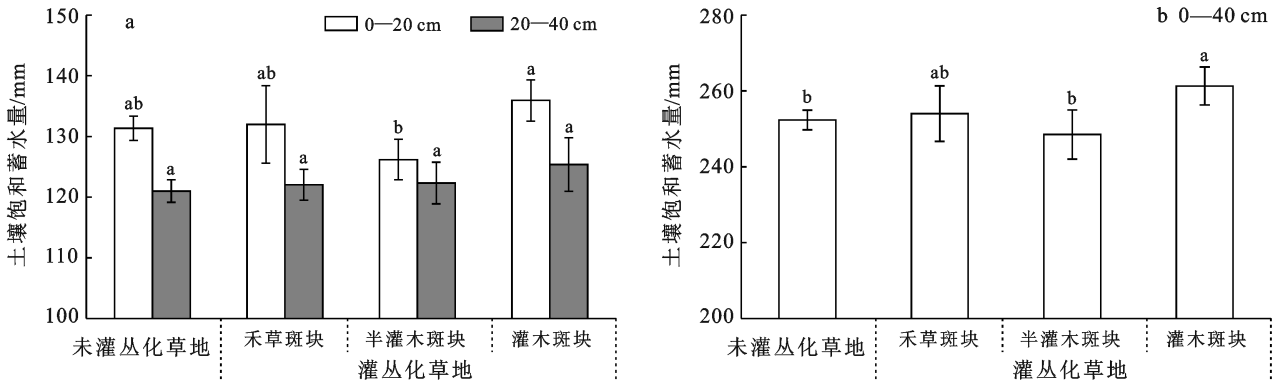


图 4 黄土高原枯落物截留量与枯落物厚度及储量的关系



注:不同字母表示不同斑块土壤饱和和蓄水量在 $p<0.05$ 水平上有显著差异。

图 5 黄土高原草地土壤饱和和蓄水量

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 灌丛化对草地植被冠层截留的影响。灌丛化改变草地植物群落结构,影响草地植被冠层截留能力。植被结构特征,如植被盖度、植物生物量、冠层构型等可以直观的预测植被冠层截留量^[16]。本研究表明,灌丛化显著增加草地植被冠层对降水的截留作用,且冠层截留量与地上生物量有显著正相关关系。这与杨全^[17]认为植被冠层截留量随地上生物量增加的观点一致。灌丛化草地中,半灌木斑块和灌木斑块的地上生物量分别增加了 191.5 和 607.1 g/m^2 ,植被冠层截留量分别增加 0.1 和 0.3 mm。灌丛化增加了草

地植物生物量,使得有更多的植物体能够直接对降水进行拦截,从而导致植被冠层截留量增加^[17]。值得注意的是,灌丛化显著降低了草地植被冠层截留率,这可能与草地植物的特性相关。半灌木斑块优势种白莲蒿冠层开阔,叶呈齿状羽状分裂,灌木斑块优势种矮脚锦鸡儿是一种多年生的多茎灌木,其茎部光滑,叶子呈卵形且较小,叶和茎上都有蜡质层的存在^[18],疏水性强,不利于对降水进行截留。刘艳丽等^[8]指出植物茎和叶的截留特性不同,叶片在植物截留中起到主要作用。半灌木斑块和灌木斑块的植物叶生物量占比较未灌丛化草地分别降低了 49.3% 和 68.4%,茎生物量占比分别增加了 270.9% 和 381.5%,从而导致植物截留能力下降。

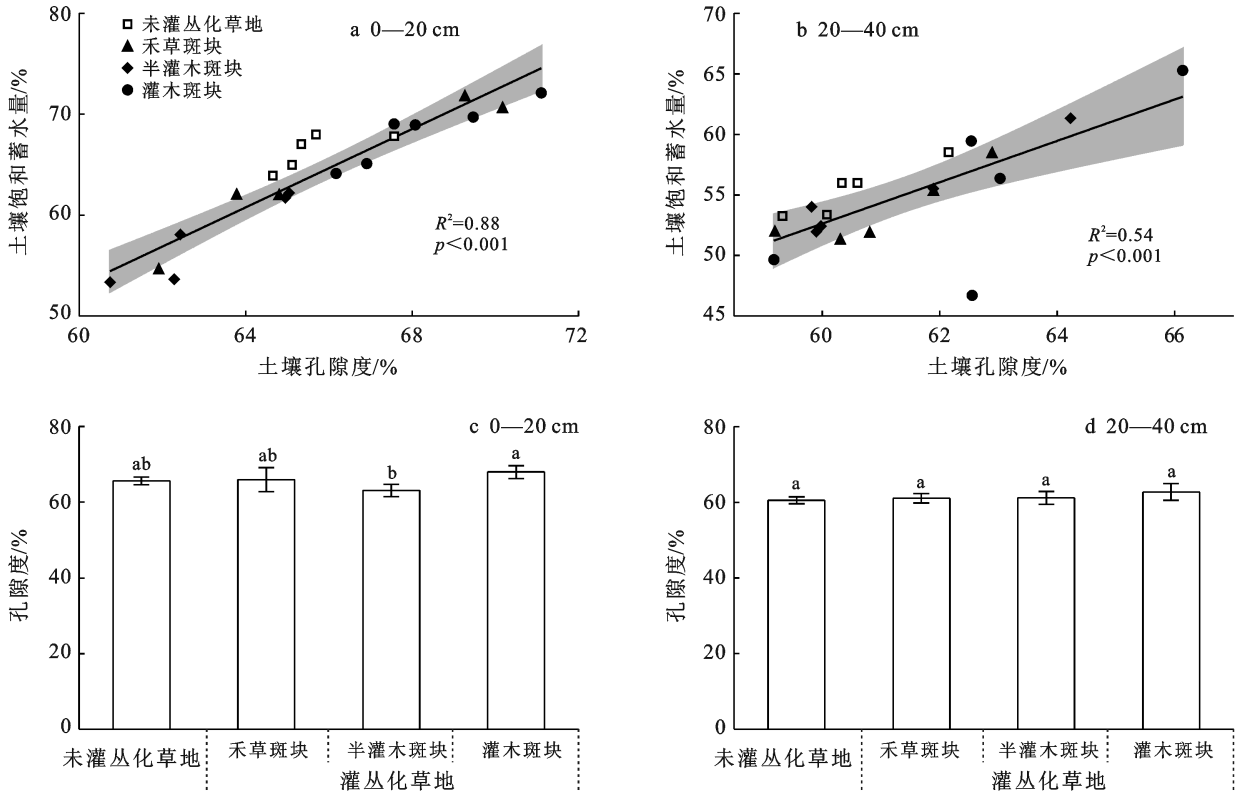


图 6 黄土高原土壤饱和和蓄水量与土壤孔隙度的关系

浸泡法与人工降雨法两种不同测量方法也会使植物截留存在一定的差异。樊才睿等^[10]对草地植被冠层截留量进行观测,结果表明人工模拟降雨法下的草地植被冠层截留量约为浸泡法下的 2 倍。Jian 等^[19]对灌丛截留量进行研究,结果表明浸泡法测得的灌丛截留量比人工模拟降雨法高 20%。刘艳丽等^[8]进一步对两种观测方法下,植物的茎叶截留特性进行研究,结果表明人工模拟降雨法测量的植物叶截留量大于浸泡法,浸泡法测量的茎截留量却大于人工模拟降雨法,这是因为浸泡法使植物充分吸收水分,而植物茎比植物叶更易于吸收水分,茎截留量以茎吸收的水分为主,叶截留量以叶表面附着水分为主^[8]。因此,与自然降雨相比,我们研究中未灌丛化草地和灌丛化草地的植物叶截留量可能被低估,而植物茎截留量可能被高估。需要进一步说明的是,由于植物茎叶截留特性不同,未灌丛化草地和禾草斑块的优势种为长芒草等禾本科植物,植物叶生物量占比分别高达 84.6% 和 84.8%,而半灌木斑块和灌木斑块的优势种分别为白莲蒿和矮脚锦鸡儿,植物茎生物量占比分别高达 57.1% 和 74.1%。因此,与自然降雨相比,采用浸泡法观测的未灌丛化草地和禾草斑块的植被冠层截留量很可能被低估,而半灌木斑块和灌木斑块的冠层截留量可能被高估。

(2) 灌丛化对草地枯落物层截留的影响。枯落

物具有良好的透水性及持水性,枯落物截留量能达到自身储量的 2~3 倍^[11]。枯落物储量可以很好的预测枯落物的截留量。本研究表明,灌丛化显著降低了枯落物层的截留量。灌木斑块的枯落物储量比未灌丛化草地降低了 0.7 t/hm²,因此,枯落物截留量降低了 0.5 mm。但杨寒月等^[11]的研究表明灌木群落枯落物层的截留量大于草本群落枯落物层的截留量,造成差异的原因在于枯落物储量的不同。在杨寒月等^[11]的研究中灌木群落枯落物的储量显著高于草本群落,而本研究中灌木斑块枯落物的储量低于未灌丛化草地,但二者的结果都表明枯落物的截留量与枯落物的储量呈正相关。枯落物的储量与枯落物的周转率密切相关^[20]。灌丛化草地中,灌木斑块的枯落物周转率分别是未灌丛化草地和禾草斑块的 2.7 倍和 2.5 倍。在同一草地生态系统中,枯落物的理化性质是影响枯落物的分解速率的主要因素,营养成分含量高的枯落物更能激发分解者的活性,加速枯落物的分解^[21]。未灌丛化草地和禾草斑块的优势种为长芒草,含有较低的 N、P 等营养元素,C/N(32.5)最高,分解速率最低,而灌木斑块的优势种矮脚锦鸡儿含有较高的 N、P 等营养元素,C/N(12.2)最低,其分解速率是最高的,因而随着灌木的扩张,枯落物储量降低。随着灌丛化程度的加深,灌木枯落物储量不断减少,最终导致灌木斑块枯落物截留量进一步下降。研究

表明,保护土壤减少侵蚀作用的主要是地表的枯落物层,而不是植被冠层^[22]。半灌木/灌木斑块枯落物的减少将削弱草地土壤抗蚀性。

(3) 灌丛化对草地土壤蓄水的影响。土壤蓄水性是评价草地生态系统涵养水源和水土保持的重要指标,反映了土壤调节水分的潜在能力,蓄水量越大表明土壤调控降水再分配潜力越大^[15]。本研究表明灌丛化显著影响草地土壤饱和蓄水量,土壤孔隙度是影响土壤蓄水量的主要影响因素。土壤饱和蓄水量是土壤孔隙充满水分的代用指标,土壤孔隙度在一定程度上表征了土壤蓄水量的大小^[15]。一方面灌丛化形成斑块沃岛效应,灌木斑块土壤养分和有机质聚集,促进团聚体的形成,使小团聚体比例增加,提高团聚体粒径分布的均匀性,同时,稳定的团聚体又会保护有机质不易分解,二者对土壤性质的改善呈现出正反馈效应,最终促进土壤孔隙的发育,影响土壤饱和蓄水量^[23];另一方面植物群落优势种灌木矮脚锦鸡儿根系为直根系,主根发达,促使灌丛覆盖下的土壤大孔隙呈网络状垂直延伸^[24]。随着灌木生长,灌木斑块的土壤容易发育大孔隙,易于形成优势流,促进降水的快速下渗,增强土壤对降水的容纳能力^[5]。

草地生态系统的水土保持能力不仅包括植被冠层截留能力和枯落物层截留能力,也包括土壤潜在蓄水能力。尽管土壤饱和蓄水量远大于植被截留量,但我们不能忽视植被冠层和枯落物层截留削弱雨滴动能的重要作用。虽然植被冠层和枯落物截留水量很少,但它们的覆盖减少了表土裸露,削减雨滴动能,延缓降水入渗时间,增加地表入渗,减少降水对地表的冲刷和地表径流的产生,对土壤起到了保护作用^[25-26]。本研究中,半灌木白莲蒿斑块对土壤饱和蓄水量没有显著影响,而灌木矮脚锦鸡儿斑块显著增加了土壤饱和蓄水量,表明灌丛化没有降低草地生态系统土壤潜在蓄水能力。如果灌木继续扩张,半灌木/灌木斑块的叶面积指数、叶生物量占比和枯落物储量减少,灌丛化对草地植被冠层和枯落物层的截留能力将会削弱。

4.2 结论

(1) 灌丛化显著增加了草地植被冠层截留量,降低了冠层截留率。灌木斑块植被冠层截留量较未灌丛化草地增加了 0.3 mm,冠层截留率较未灌丛化草地降低了 22.5%。灌丛化显著降低了草地枯落物层的截留量和截留率。灌木斑块枯落物层截留量较未灌丛化草地降低 0.5 mm,截留率较未灌丛化草地降低 16.4%。

(2) 灌木斑块土壤饱和蓄水量较未灌丛化草地显著增加了 9.0 mm。灌丛化没有降低草地生态系统

土壤饱和蓄水能力,但若灌木继续扩张,可能会削弱草地生态系统植被截留能力。

[参 考 文 献]

- [1] 白永飞,赵玉金,王扬,等.中国北方草地生态系统服务评估和功能区划助力生态安全屏障建设[J].中国科学院院刊,2020,35(6):675-689.
- [2] Van Auken O W. Causes and consequences of woody plant encroachment into western North American grasslands [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009,90(10):2931-2942.
- [3] 赵凌平,梁方晖,魏楠,等.短脚锦鸡儿扩张对典型草原植被与土壤的影响[J].中国草地学报,2020,42(2):169-174.
- [4] Zhang Zhihua, Li Xiaoyan, Yang Xitian, et al. Changes in soil properties following shrub encroachment in the semiarid Inner Mongolian grasslands of China [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2020,66(2):369-378.
- [5] 彭海英,童绍玉,李小雁.内蒙古典型草原土壤及其水文过程对灌丛化的响应[J].自然资源学报,2017,32(4):642-653.
- [6] 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.
- [7] Gerrits A M J, Pfister L, Savenije H H G. Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest [J]. *Hydrological Processes*, 2010,24(21):3011-3025.
- [8] 刘艳丽,王全九,杨婷,等.不同植物截留特征的比较研究[J].水土保持学报,2015,29(3):172-177.
- [9] Wei Wei, Jia Fuyan, Yang Lei, 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.
- [10] 樊才睿,李畅游,贾克力,等.不同放牧制度下呼伦湖流域草原植被冠层截留[J].生态学报,2015,35(14):4716-4724.
- [11] 杨寒月,张光辉,张宝军.黄土丘陵区沟坡典型植物群落枯落物蓄积量及其持水性能[J].中国水土保持科学,2019,17(3):83-90.
- [12] 高琼,刘婷.干旱半干旱区草原灌丛化的原因及影响—争议与进展[J].干旱区地理,2015,38(6):1202-1212.
- [13] Lu Yihe, Fu Bojie, Feng Xiaoming, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China [J]. *PLoS One*, 2012,7(2):e31782.
- [14] Xie Jingjie, Su Derong. Water-holding characteristics of litter in meadow steppes with different years of fencing in Inner Mongolia, China [J]. *Water*, 2020,12(9):2374.
- [15] Xia Jiangbao, Zhao Ziguang, Fang Ying. Soil hydro-physical characteristics and water retention function of typical

- cal shrubbery stands in the Yellow River Delta of China [J]. *Catena*, 2017, 156:315-324.
- [16] Magliano P N, Whitworth-Hulse J I, Florio E L, et al. Interception loss, throughfall and stemflow by *Larrea divaricata*: The role of rainfall characteristics and plant morphological attributes [J]. *Ecological Research*, 2019, 34(6):753-764.
- [17] 杨全.黄土丘陵区典型草地群落冠层降雨截留容量特征及其影响因素[D].陕西 杨凌:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2020.
- [18] Zhang Yafeng, Wang Xinping, Hu Rui, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, Northwestern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527:1084-1095.
- [19] Jian Shengqi, Hu Caihong, Zhang Guodong, et al. Study on the throughfall, stemflow, and interception of two shrubs in the semiarid Loess region of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 279:1077-13.
- [20] O'Halloran L R, Borer E T, Seabloom E W, et al. Regional contingencies in the relationship between aboveground biomass and litter in the world's grasslands [J]. *Plos One*, 2013, 8(2):e54988.
- [21] 吴艳芹.云雾山典型草原枯落物分解特性及影响因子研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [22] Brady N C, Weil R R. The nature and properties of soils (14 th edition)[M]. Englewood:Prentice Hall, 2007.
- [23] Cheng Man, Xiang Yun, Xue Zhijing, et al. Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2015, 124:77-84.
- [24] Hu Xia, Li Xiaoyan, Wang Pei, et al. Influence of enclosure on CT-measured soil macropores and root architecture in a shrub-encroached grassland in Northern China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 21-30.
- [25] Sutanto S J, Wenninger J, Coenders-Gerrits A M J, et al. Partitioning of evaporation into transpiration, soil evaporation and interception: A comparison between isotope measurements and a HYDRUS-1 D model [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8): 2605-2616.
- [26] Peng Huanhua, Zhao Chuanyan, Feng Zhaodong, et al. Canopy interception by a spruce forest in the upper reach of Heihe River basin, Northwestern China [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(4):1734-1741.
- (上接第 68 页)
- [6] Rodriguez-Caballero E, Reyes A, Kratz A, et al. Effects of climate change and land use intensification on regional biological soil crust cover and composition in Southern Africa [J]. *Geoderma*, 2022, 406:115508.
- [7] 方海燕,屈建军,俎瑞平,等.防沙工程的结皮效应研究[J].*水土保持学报*,2005,19(2):17-20.
- [8] 袁丹婷.VAc-MA 共聚物固沙抑尘剂的合成与研究[D].北京:北京化工大学,2012.
- [9] 蔡强国,吴淑安,陈浩,等.坡耕地地表土结皮对降雨径流和侵蚀产沙过程的影响[C]//陈永宗,等.晋西黄土高原土壤侵蚀规律试验研究文集.北京:水利电力出版社,1990.48-57.
- [10] 吴发启,范文波.土壤结皮与降雨溅蚀的关系研究[J].*水土保持学报*,2001,15(3):1-3.
- [11] 段争虎,刘新民,屈建军.沙坡头地区土壤结皮形成机理的研究[J].*干旱区研究*,1996,13(2):31-36.
- [12] 袁利,张春强,张芷温,等.淮河流域黄泛平原风沙区水土流失格局[J].*中国水土保持*,2019(12):10-13.
- [13] Ekwue E I. Effects of peat content, rainfall duration and aggregate size on soil crust strength [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 16(6):485-498.
- [14] Ahmad N, Roblin A J. Crusting of river estate soil, Trinidad, and its effect on gaseous diffusion, percolation, and seedling emergence [J]. *Journal of Soil Science*, 1971, 22(1):23-31.
- [15] Hussain S M, Smillie G W, Collins J F. Laboratory studies of crust development in Irish and Iraqi soils (I): Moisture content, penetration resistance, aggregate size and seedling emergence of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) [J]. *Soil and Tillage Research*, 1985, 5(1):33-53.
- [16] 吴发启,范文波.坡耕地黄壤土结皮的理化性质分析[J].*水土保持通报*,2001,21(4):22-24.
- [17] 李元元.化学材料对风蚀调控试验研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [18] 王军,陈世正.四川紫色水稻土胶体比表面及其主要影响因素研究[J].*西南农业大学学报*,1991,13(3):64-69.
- [19] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J].*水土保持学报*,2020,34(3): 267-273,298.
- [20] 赵富王,王宁,苏雪萌,等.黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J].*水土保持学报*,2019, 33(5):105-113.