

黄土高原水蚀风蚀交错区沙地枯落物的水源涵养功能

王盛琦¹, 傅文慧¹, 寇建村¹, 白玛嘎翁¹, 乔千洛¹, 杨文权²

(1.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 明确黄土高原水蚀风蚀交错区枯落物对沙地水文效应的影响, 为该地区退耕还林后生态水文效益的评估提供理论依据。[方法] 以小叶杨(*Populus simonii*)、柠条(*Caragana korshinskii*)和白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)枯落物覆盖样地为研究对象, 并以裸沙地作为对照, 利用熵权法探究枯落物覆盖对沙地水源涵养功能的影响。[结果] ① 枯落物最大持水率、最大拦蓄率、有效拦蓄率和最大吸湿比均表现为: 白羊草>小叶杨>柠条, 但枯落物持水量和拦蓄量则表现为: 小叶杨>柠条>白羊草。② 枯落物覆盖降低了土壤容重, 提高了总孔隙度、饱和持水量、毛管持水量和平均入渗速率。③ 水源涵养功能综合评价表现为: 柠条枯落物覆盖样地(0.889)>小叶杨枯落物覆盖样地(0.484)>白羊草枯落物覆盖样地(0.228)>裸沙地(0.038)。④ 稳渗速率、土壤有效持水量和土壤非毛管孔隙度的水源涵养功能权重比例最高, 分别为15.3%、14.8%和14.8%。[结论] 枯落物有效地改善了沙地水文效应, 在优化水源涵养功能的条件下, 建议适宜种植灌木, 可搭配种植乔木和草本植物。

关键词: 枯落物; 水文效应; 熵权法; 涵养水源

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)05-0030-08

中图分类号: S714, S152.7⁺ 1

文献参数: 王盛琦, 傅文慧, 寇建村, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区沙地枯落物的水源涵养功能[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 30-37. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.005; Wang Shengqi, Fu Wenhui, Kou Jiancun, et al. Water conservation capacity of litters on sandy land in wind-water erosion crisscross region of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 30-37.

Water Conservation Capacity of Litters on Sandy Land in Wind-Water Erosion Crisscross Region of Loess Plateau

Wang Shengqi¹, Fu Wenhui¹, Kou Jiancun¹, Baima Gaweng¹, Qiao Qianluo¹, Yang Wenquan²

(1.College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 2.College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The influence of litters on the hydrological effect of sandy land in the wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau was explored in order to provide a theoretical basis for the evaluation of eco-hydrological benefits after the implementation of the ‘Grain for Green’ project in this area. [Methods] Litter-covered sites of *Populus simonii*, *Caragana korshinskii*, and *Bothriochloa ischaemum* were selected as the research objects, and bare sandy land was taken as the control in order to reveal the effects of litter cover on water conservation capacity in sandy land by using the entropy weight method. [Results] ① The maximum water holding rate, maximum retention rate, effective retention rate and maximum hygroscopicity rate of litter followed the order of *B. ischaemum* > *P. simonii* > *C. korshinskii*. The water holding capacity and retention capacity of litters followed the order of *P. simonii* > *C. korshinskii* > *B. ischaemum*. ② Litter cover reduced the soil bulk density, but increased total porosity, saturated water holding capacity, capillary water holding capacity, and mean infiltration rate. ③ The comprehensive evaluation value of water conservation capacity followed the order of litter-covered sites of *C. korshinskii* (0.889) > litter-covered sites of *P. simonii* (0.484) > litter-covered sites of *B. ischaemum* (0.228) > bare sandy lands

收稿日期: 2021-05-26

修回日期: 2021-06-19

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原水热季节耦合对苹果园白三叶降解形成土壤有机质的影响机理”(31302027)

第一作者: 王盛琦(1997—), 男(汉族), 河北省永年县人, 硕士研究生, 研究方向为草地生态学。Email: wang177529@163.com。

通讯作者: 寇建村(1976—), 女(汉族), 青海省湟中县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事草地资源植物开发与利用、果草复合系统生理生态研究。Email: jiancun02@163.com。

(0.038). ④ Stable infiltration rate, soil effective water holding capacity, and soil non-capillary porosity accounted for the highest water conservation function weights, which accounted for 15.3%, 14.8%, and 14.8%, respectively. [Conclusion] Litters effectively improve the hydrology of sandy land. The results of this study suggest that shrubs be planted to optimize water conservation capacity, and that trees and herbs can be planted together.

Keywords: litters; hydrological effect; entropy weight method; water conservation

黄土高原水蚀风蚀交错区是中国乃至世界上最易发生土壤侵蚀的地区之一。由于地形破碎,土壤水分、养分亏缺以及自然植被恢复缓慢,枯落物的生态水文效益就显得尤为重要^[1]。枯落物层是水文效应的重要活动层,也是植被涵养水源功能的主要作用层^[2]。枯落物的水文作用一方面体现在它的蓄持水分能力,另一方面体现在它对土壤理化性质的影响^[3]。枯落物蓄持的水分可以通过下渗及蒸发作用,改变下层土壤及上层植被的水文状况,其持水能力是反映枯落物层水文效应的重要指标之一。枯落物蓄积量对其持水量有重要影响,Robertson 等^[4]发现,枯落物蓄积量和厚度越大,持水量越多。枯落物类型也很大程度上决定了枯落物的持水量,现有的研究表明,枯落物最大持水量和有效拦蓄量均表现为:乔木>灌木>草本^[3]。不同林龄的枯落物持水能力也有差别,高迪等^[5]发现,随着林龄的增长,林分枯落物的持水和拦蓄能力呈上升趋势,最大持水量表现为:成熟林>中龄林>近熟林>幼龄林。此外,混合枯落物与单一类型枯落物的水文能力也存在差异。枯落物的覆盖作用延缓了土壤水分的蒸发^[6],同时混入土壤中的枯落物通过分解作用,降低土壤容重、增加土壤孔隙度、促进土壤水分入渗,进而增加土壤水文效应^[7]。

目前,关于森林生态系统中枯落物水源涵养能力的综合评价研究较多^[8-9],而关于沙地生态系统中乔木、灌木及草本植物枯落物的水文效应研究较少。基于此,本试验通过野外调查和室内试验,采用对比研究等方法对黄土高原地区 3 种典型植被小叶杨(*Populus simonii*)、柠条(*Caragana korshinskii*)和白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)的枯落物覆盖样地的枯落物层及土壤层水文效应进行量化。选取多个反映水文功能的评价指标,利用熵权法,综合比较

裸沙地及不同枯落物覆盖样地的水源涵养能力,以期更加直观的进行评价和比较,为该地区退耕还林后生态水文效益的评估提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于陕西省神木市六道沟小流域(38°46′—38°51′N,110°21′—110°23′E),该流域地处黄土高原水蚀风蚀交错区,是典型的生态脆弱区;属于中温带半干旱气候,年平均气温 8.4 °C,年平均降水量 437 mm,其中 76.3%发生在 6—9 月;盛行西北风,年平均风速 3.6 m/s。该地区是典型的内陆沙丘生态系统,流动沙丘、半固定沙丘和固定沙丘并存,土壤由黄土变为结构疏松的砂土,砂粒含量 > 97%,粉粒含量 < 2%,黏粒含量 < 1%。因此,冬、春两季易发生风蚀,夏、秋两季易发生水蚀。主要植被类型包括:小叶杨(*Populus simonii*),柠条(*Caragana korshinskii*),白羊草(*Bothriochloa ischaemum*),沙柳(*Salix psammophila*),长芒草(*Stipa bungeana*),紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和本氏针茅(*Stipa bungeana*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

于 2020 年 6 月对六道沟小流域主要植被类型及分布进行调查,选取该地区典型植被小叶杨(乔木)、柠条(灌木)和白羊草(草本)枯落物覆盖样地,并以裸沙地作为对照。其中小叶杨枯落物覆盖样地样方大小为 20 m×20 m,柠条枯落物覆盖样地样方为 10 m×10 m,白羊草枯落物覆盖样地样方为 5 m×5 m,调查内容包括经纬度、海拔、坡度、坡向、株高、冠幅、枯落物盖度和伴生植物,样地调查均做 5 次重复。样地调查信息见表 1。

表 1 典型植被样地基本信息

植被类型	经纬度	海拔/m	坡度/(°)	坡向	株高/m	冠幅/m	枯落物盖度/%	伴生植物
小叶杨	38°47′10″N 110°21′55″E	1 220	17	SE	7.16	4.65	81	中华胡枝子、 野亚麻、鼠尾粟
柠条	38°49′43″N 110°23′46″E	1 200	20	SE	1.84	2.99	65	铁杆蒿
白羊草	38°47′05″N 110°21′37″E	1 211	15	SE	0.78	—	56	中华草沙蚕

2.2 枯落物蓄积量的测定

在 3 种枯落物覆盖样地样方内按“S”形取样法选取 10 个 50 cm×50 cm 的小样方,分别调查枯落物厚度、混入深度及蓄积量。在每个小样方内,地表枯落物蓄积量采用全部收集法;土壤中枯落物蓄积量采用环刀法进行五点取样,环刀为内径 15 cm,高 5 cm 的铁环,过筛去掉沙子及杂质后带回实验室。室内阴干并称重,测定其自然含水率,之后放入 85 °C 烘箱烘干,再次称重,测定其蓄积量。

2.3 枯落物持水和拦蓄能力的测定

枯落物持水和拦蓄能力采用室内浸泡法测定,将收集的枯落物室内阴干,称取相同质量放入尼龙网袋后浸水,在 0.25,0.5,1,2,4,6,8,10,12,24 h 后取出,静置不滴水后称重,结束后放入 85 °C 烘箱烘干后称重。浸水 24 h 后的持水量为最大持水量,此时枯落物湿重与干重的比值为最大吸湿比。相关指标的计算公式为:

$$R_0 = \frac{(W_f - W_d)}{W_d} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_{mh} = \frac{(W_m - W_d)}{W_d} \times 100\% \quad (2)$$

$$R_{mr} = R_{mh} - R_0 \quad (3)$$

$$R_{er} = 0.85 \times R_{mh} - R_0 \quad (4)$$

$$R_h = \frac{W_m}{W_d} \quad (5)$$

$$C_{mh} = R_{mh} \times M \quad (6)$$

$$C_{eh} = R_{er} \times M \quad (7)$$

式中: W_f 为枯落物的鲜重(g); W_d 为枯落物烘干后的重量(g); W_m 为枯落物浸水 24 h 后的重量(g); M 为枯落物蓄积量(g/m²); R_0 为枯落物的自然含水率(%); R_{mh} 为枯落物最大持水率(%); R_{mr} 为枯落物最大拦蓄率(%); R_{er} 为枯落物有效拦蓄率(%); R_h 为枯落物最大吸湿比; C_{mh} 为枯落物最大持水量(g/m²); C_{eh} 为枯落物有效拦蓄量(g/m²),0.85 为有效拦蓄系数。

2.4 土壤水文性质的测定

土壤水文性质的调查采用环刀法,在各标准样地内分别选取代表性样点 3 个,用环刀在 0—5 cm 和 5—10 cm 土层取样,封装后带回实验室称重。用环刀浸泡法测定土壤容重、孔隙度、持水量等水文性质,之后放入烘箱,105 °C 烘干,测定土壤含水量。计算公式为:

$$B_D = \frac{M}{V} \quad (8)$$

$$T_P = \left(1 - \frac{B_D}{d_s}\right) \times 100\% \quad (9)$$

式中: B_D 为土壤容重(g/cm³); M 为土壤干重(g); V 为环刀体积(cm³)。 T_P 为土壤总孔隙度(%); d_s 为土壤密度(g/cm³),本试验取 2.65 g/cm³[10]。

$$W = 10\,000Ph \quad (10)$$

式中: W 为土壤持水量(t/hm²); P 为土壤孔隙度(%); h 为土层厚度(m)。

土壤入渗采用单环法。在各标准样地内分别选取平坦且有代表性的样点 3 个,将内径 20 cm,高 10 cm 的 PVC 环小心打入地下 5 cm,环上方距地表 5 cm,环内标有刻度,并用挡板缓流,防止破坏土壤表层结构。开始时,迅速加水至 3 cm 刻度处,之后水位每降低 1 cm 就记一次时间,并迅速加水至 3 cm 刻度处。当连续 3 次加水时间相同时,停止试验,此时达到稳渗状态[10]。

2.5 水源涵养能力综合评价

为了能够将枯落物层和土壤层的水文效应更加直观地进行比较,利用熵权法对枯落物覆盖样地和裸沙地的水源涵养能力进行综合评价。其中枯落物层指标选择枯落物蓄积量、最大持水量和有效拦蓄量,土壤层指标选择土壤容重、非毛管孔隙度、总孔隙度、毛管持水量、有效持水量、饱和持水量、初渗速率和稳渗速率,共 11 个指标。

对评价指标数据值运用极值法标准化处理[11]。根据公式求各指标的熵值(H_i),进而计算各评价指标权重(ω_i):

$$r_{ij} = \frac{[r'_{ij} - r'_{ij(\min)}]}{[r'_{ij(\max)} - r'_{ij(\min)}]} \quad (11)$$

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}}, \quad k = \frac{1}{\ln n}$$

(假定 $f_{ij} = 0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$) (12)

$$H_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}$$

($i=1,2,\dots,m$; $j=1,2,\dots,n$) (13)

$$\omega_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i} \quad (14)$$

$$V_j = \sum_{i=1}^m \omega_i r_{ij} \quad (15)$$

式中: r'_{ij} 是第 i 个样地在第 j 个指标上的值; $r'_{ij(\max)}$ 和 $r'_{ij(\min)}$ 分别为第 j 个指标中最大和最小的值; r_{ij} 为第 i 个样地在第 j 个指标上的权重; f_{ij} 为在第 j 个评价指标下第 i 个样地类型 H_i 的贡献度; k 为常数; H_i 为各指标的熵值; i 表示样地类型($m=4$); j 表示评价指标数($n=11$)。 ω_i 为各评价指标的权重; V_j 为最终评价得分。

2.6 数据处理

采用 SPSS 26 及 Microsoft Excel 2019 对数据进

行分析。利用单因素方差分析(one-way ANOVA)中的最小显著差异(LSD)法检验枯落物性质和土壤性质的差异显著性,数据表示为平均值±标准错误(Mean±SE)。利用 Origin 2018 对浸水时间和持水量、浸水时间和吸水速率、入渗时间和土壤渗透速率进行非线性回归分析。

3 结果与分析

3.1 枯落物层水文效应

枯落物的主要水文指标包括最大持水率、最大持水量、最大拦蓄率、有效拦蓄率、有效拦蓄量和最大吸湿比,汇总如下(表 2)。地表和土壤中枯落物的最大持水率、最大拦蓄率、有效拦蓄率和最大吸湿比均表现为白羊草枯落物显著大于小叶杨和柠条枯落物($p < 0.05$)。其中,白羊草地表和土壤中总的枯落物最大持水率分别是小叶杨和柠条枯落物的 1.12 倍和 1.23 倍,最大拦蓄率分别是小叶杨和柠条枯落物的

1.19 倍和 1.32 倍,有效拦蓄率分别是小叶杨和柠条枯落物的 1.13 倍和 1.30 倍,最大吸湿比分别是小叶杨和柠条枯落物的 1.08 倍和 1.16 倍。地表枯落物最大持水量表现为:小叶杨($1\ 773.16\ \text{g}/\text{m}^2$)>柠条($754.41\ \text{g}/\text{m}^2$)>白羊草($348.46\ \text{g}/\text{m}^2$)。土壤中枯落物最大持水量表现为:小叶杨($1\ 728.46\ \text{g}/\text{m}^2$)>柠条($1\ 174.79\ \text{g}/\text{m}^2$)>白羊草($346.85\ \text{g}/\text{m}^2$)。柠条枯落物有效拦蓄量表现为土壤中显著高于地表($p < 0.05$),但小叶杨和白羊草枯落物地表和土壤中有效拦蓄量无显著差异($p > 0.05$)。枯落物厚度和蓄积量见表 2。其中,地表枯落物厚度表现为:小叶杨(2.9 cm)>白羊草(2.4 cm)>柠条(1.5 cm),土壤中枯落物厚度表现为:小叶杨(2.3 cm)>柠条(2.2 cm)>白羊草(1.9 cm)。地表枯落物蓄积量表现为:小叶杨($709.66\ \text{g}/\text{m}^2$)>柠条($320.82\ \text{g}/\text{m}^2$)>白羊草($112\ \text{g}/\text{m}^2$),土壤中枯落物蓄积量表现为:小叶杨($601.35\ \text{g}/\text{m}^2$)>柠条($468.07\ \text{g}/\text{m}^2$)>白羊草($110.51\ \text{g}/\text{m}^2$)。

表 2 枯落物厚度、蓄积量和水文指标

枯落物来源	类型	厚度/cm	蓄积量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	最大持水率/%	最大持水量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	最大拦蓄率/%	有效拦蓄率/%	有效拦蓄量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	最大吸湿比
地表	小叶杨	2.9 ± 0.22^a	709.66 ± 77.08^a	249.86 ± 2.15^{bc}	$1\ 773.16 \pm 15.22^a$	236.99 ± 1.24^{bc}	199.51 ± 0.94^{bc}	$1\ 415.88 \pm 6.67^a$	3.50 ± 0.04^{bc}
	柠条	1.5 ± 0.14^c	320.82 ± 35.06^c	235.15 ± 3.27^c	754.41 ± 10.48^c	214.32 ± 4.07^c	179.05 ± 3.62^c	574.42 ± 11.61^c	3.35 ± 0.03^c
	白羊草	2.4 ± 0.25^b	112 ± 15.75^d	294.14 ± 6.96^a	329.44 ± 7.80^d	280.73 ± 6.65^a	236.61 ± 5.61^a	265.00 ± 6.28^d	3.94 ± 0.07^a
土壤	小叶杨	2.3 ± 0.18^b	601.35 ± 101.70^{ab}	286.42 ± 9.42^{ab}	$1\ 722.39 \pm 56.64^a$	268.16 ± 7.84^{ab}	225.2 ± 6.43^{ab}	$1\ 354.24 \pm 38.67^a$	3.86 ± 0.09^{ab}
	柠条	2.2 ± 0.15^b	468.07 ± 62.82^{bc}	249.99 ± 6.89^{bc}	$1\ 170.12 \pm 32.26^b$	229.31 ± 6.66^c	191.81 ± 5.63^c	897.81 ± 26.35^b	3.50 ± 0.07^{bc}
	白羊草	1.9 ± 0.22^{bc}	110.51 ± 27.88^d	304.22 ± 25.27^a	336.20 ± 27.92^d	289.42 ± 26.12^a	243.79 ± 22.33^a	269.42 ± 24.68^d	4.04 ± 0.25^a

注:不同小写字母表明同一指标间存在显著差异($p < 0.05$)。下同。

枯落物的持水量随着浸泡时间的延长而增大,但增加幅度逐渐减小,并趋于稳定(图 1)。其中,土壤中柠条枯落物在浸泡后 0.5 h 就达到了最大持水量的 92.4%;其次是土壤中小叶杨枯落物,在浸泡后 1 h 达到了最大持水量的 90.1%;最慢的是土壤中白羊草枯落物,在浸泡后 10 h 才达到最大持水量的 92.8%。小叶杨和柠条枯落物持水量表现为土壤中快于地表,而白羊草枯落物持水量则表现为地表快于土壤中。

3 种枯落物吸水速率随时间的变化趋势一致。在 0—0.25 h 时,吸水速率最大,为 $6.11 \sim 9.44\ \text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$,在 0.25—0.5 h 时,吸水速率显著降低,为 $0.28 \sim 1.33\ \text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。2 h 后,吸水速率基本维持在 $0.1\ \text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 下。持水量、吸水速率与浸水时间函数拟合关系见表 3,枯落物浸水时间与持水量呈较好的对数函数关系($R^2 > 0.90$),与吸水速率呈较好的幂函数关系($R^2 = 1$)。

表 3 枯落物持水特征与浸水时间的拟合关系

枯落物来源	枯落物类型	持水量与浸水时间			吸水速率与浸水时间		
		关系式	R^2	p	关系式	R^2	p
地表	小叶杨	$y = 0.13 \ln(x) + 2.06$	0.94	***	$y = 0.03 x^{-3.99}$	1	***
	柠条	$y = 0.16 \ln(x) + 1.92$	0.90	***	$y = 0.30 x^{-2.18}$	1	***
	白羊草	$y = 0.24 \ln(x) + 2.22$	0.97	***	$y = 0.13 x^{-2.94}$	1	***
土壤	小叶杨	$y = 0.12 \ln(x) + 2.57$	0.93	***	$y = 0.01 x^{-5.00}$	1	***
	柠条	$y = 0.07 \ln(x) + 2.32$	0.92	***	$y = 0.04 x^{-3.84}$	1	***
	白羊草	$y = 0.27 \ln(x) + 2.18$	0.96	***	$y = 0.25 x^{-2.42}$	1	***

注:***代表 $p < 0.001$ 。

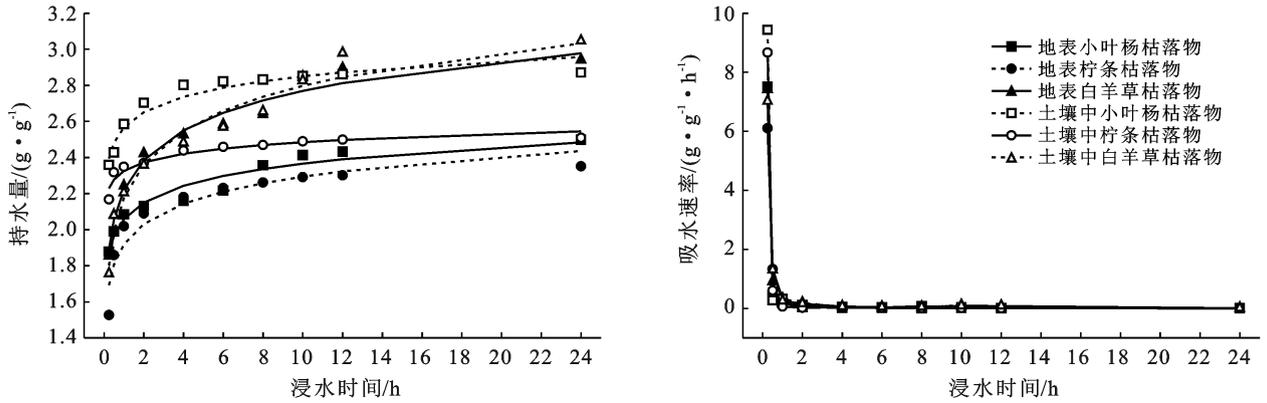


图 1 黄土高原水蚀风蚀交错区沙地枯落物持水特征

3.2 土壤层水文效应

不同植被类型枯落物覆盖样地和裸沙地的土壤物理性质有一定差别(见表 4)。在地表 0—10 cm 土壤层中,裸沙地的土壤容重最高,为 1.64 g/m^3 ,分别是小叶杨、柠条和白羊草的 1.05, 1.09, 1.04 倍。枯落物覆盖下,土壤容重随土层深度增加逐渐增大,而裸沙地 5—10 cm 层土壤容重却小于 0—5 cm 层,但不构成显著差异($p > 0.05$)。在 0—10 cm 土壤层中,土壤毛管孔隙度表现为柠条(35.7%) > 小叶杨(33.5%) > 白羊草(33.5%) > 裸沙地(27.9%),这与总孔隙度的大小顺序一致[柠条(40.1%) > 小叶杨(36.8%) > 白羊草(36.7%) > 裸沙地(31.2%)]。在地表 0—5 cm 土

壤层中,土壤非毛管孔隙度表现为:柠条(4.9%) > 白羊草(3.7%) > 小叶杨(3.6%) > 裸沙地(3.3%)。但在 5—10 cm 土壤层中,土壤非毛管孔隙度表现为:柠条(4.0%) > 裸沙地(3.3%) > 小叶杨(3.1%) > 白羊草(2.7%)。在地表 0—10 cm 土壤层中,土壤饱和持水量表现为:柠条(401.43 t/hm^2) > 小叶杨(368.27 t/hm^2) > 白羊草(366.55 t/hm^2) > 裸沙地(312.1 t/hm^2);土壤毛管持水量也表现为:柠条(356.8 t/hm^2) > 小叶杨(335.03 t/hm^2) > 白羊草(334.72 t/hm^2) > 裸沙地(279.07 t/hm^2)。在地表 0—5 cm 土壤层中,土壤有效持水量表现为:柠条(24.43 t/hm^2) > 白羊草(18.4 t/hm^2) > 小叶杨(17.73 t/hm^2) > 裸沙地(16.48 t/hm^2)。

表 4 黄土高原水蚀风蚀交错区沙地土壤物理性质和持水能力指标

样地类型	厚度/cm	容重/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	总孔隙度/ %	饱和持水量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	毛管持水量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	有效持水量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
小叶杨枯落物 覆盖样地	0—5	$1.56 \pm 0.02^{\text{cd}}$	$34.22 \pm 0.52^{\text{abc}}$	$3.55 \pm 0.03^{\text{cd}}$	$37.77 \pm 0.50^{\text{ab}}$	$188.85 \pm 2.48^{\text{def}}$	$171.12 \pm 2.58^{\text{d}}$	$17.73 \pm 0.15^{\text{de}}$
	5—10	$1.57 \pm 0.02^{\text{bc}}$	$32.78 \pm 1.60^{\text{bc}}$	$3.10 \pm 0.30^{\text{de}}$	$35.88 \pm 1.72^{\text{bc}}$	$179.42 \pm 8.61^{\text{ef}}$	$163.92 \pm 7.99^{\text{d}}$	$15.50 \pm 1.50^{\text{de}}$
	0—10	$1.56 \pm 0.02^{\text{cd}}$	$33.50 \pm 1.00^{\text{abc}}$	$3.32 \pm 0.14^{\text{cde}}$	$36.83 \pm 1.08^{\text{bc}}$	$368.27 \pm 10.82^{\text{b}}$	$335.03 \pm 10.05^{\text{b}}$	$33.23 \pm 1.36^{\text{b}}$
柠条枯落物 覆盖样地	0—5	$1.50 \pm 0.01^{\text{d}}$	$35.86 \pm 0.33^{\text{ab}}$	$4.89 \pm 0.16^{\text{a}}$	$40.39 \pm 0.46^{\text{a}}$	$201.93 \pm 2.31^{\text{d}}$	$177.50 \pm 1.66^{\text{d}}$	$24.43 \pm 0.82^{\text{c}}$
	5—10	$1.52 \pm 0.03^{\text{cd}}$	$35.86 \pm 0.71^{\text{a}}$	$4.04 \pm 0.44^{\text{c}}$	$39.90 \pm 0.52^{\text{a}}$	$199.50 \pm 2.59^{\text{d}}$	$179.30 \pm 3.55^{\text{d}}$	$20.20 \pm 2.22^{\text{cd}}$
	0—10	$1.51 \pm 0.02^{\text{cd}}$	$35.68 \pm 0.25^{\text{ab}}$	$4.46 \pm 0.28^{\text{ab}}$	$40.14 \pm 0.26^{\text{a}}$	$401.43 \pm 2.57^{\text{a}}$	$356.80 \pm 2.50^{\text{a}}$	$44.63 \pm 2.79^{\text{a}}$
白羊草枯落物 覆盖样地	0—5	$1.50 \pm 0.02^{\text{cd}}$	$34.93 \pm 1.26^{\text{abc}}$	$3.68 \pm 0.27^{\text{cd}}$	$38.61 \pm 1.06^{\text{ab}}$	$193.03 \pm 5.29^{\text{de}}$	$174.63 \pm 6.32^{\text{d}}$	$18.40 \pm 1.33^{\text{de}}$
	5—10	$1.64 \pm 0.03^{\text{a}}$	$32.02 \pm 0.75^{\text{c}}$	$2.69 \pm 0.24^{\text{e}}$	$34.70 \pm 0.98^{\text{c}}$	$173.52 \pm 4.90^{\text{fg}}$	$160.08 \pm 3.75^{\text{d}}$	$13.43 \pm 1.18^{\text{e}}$
	0—10	$1.57 \pm 0.01^{\text{bc}}$	$33.47 \pm 0.99^{\text{abc}}$	$3.18 \pm 0.06^{\text{de}}$	$36.66 \pm 0.99^{\text{bc}}$	$366.55 \pm 9.93^{\text{b}}$	$334.72 \pm 9.90^{\text{b}}$	$31.83 \pm 0.65^{\text{b}}$
裸沙地	0—5	$1.65 \pm 0.01^{\text{a}}$	$28.14 \pm 0.58^{\text{d}}$	$3.30 \pm 0.28^{\text{cde}}$	$31.43 \pm 0.37^{\text{d}}$	$157.17 \pm 1.86^{\text{e}}$	$140.68 \pm 2.91^{\text{e}}$	$16.48 \pm 1.38^{\text{de}}$
	5—10	$1.63 \pm 0.03^{\text{ab}}$	$27.68 \pm 1.11^{\text{d}}$	$3.31 \pm 0.22^{\text{cde}}$	$30.99 \pm 1.08^{\text{d}}$	$154.93 \pm 5.41^{\text{e}}$	$138.38 \pm 5.57^{\text{e}}$	$16.55 \pm 1.08^{\text{de}}$
	0—10	$1.64 \pm 0.01^{\text{a}}$	$27.91 \pm 0.82^{\text{d}}$	$3.30 \pm 0.24^{\text{cde}}$	$31.21 \pm 0.72^{\text{d}}$	$312.10 \pm 7.20^{\text{c}}$	$279.07 \pm 8.22^{\text{c}}$	$33.03 \pm 2.43^{\text{b}}$

不同植被类型枯落物覆盖样地和裸沙地的土壤渗透速率与入渗时间存在幂函数关系(表 5)。其中,柠条枯落物覆盖样地的稳渗速率和平均入渗速率均显著高于其他 3 类样地($p < 0.05$)。柠条枯落物覆盖样地的初渗速率最大,为 23.15 mm/min ,其次为小叶杨(20.29 mm/min)和白羊草(15.26 mm/min)枯落

物覆盖样地,裸沙地最小,为 11.31 mm/min 。稳渗速率表现为:柠条枯落物覆盖样地(15.38 mm/min) > 白羊草枯落物覆盖样地(9.39 mm/min) > 裸沙地(9.01 mm/min) > 小叶杨枯落物覆盖样地(8.54 mm/min)。平均入渗速率和初渗速率的规律相同,表现为:柠条枯落物覆盖样(17.25 mm/min) > 小叶杨枯落物覆盖

样地(10.59 mm/min) > 白羊草枯落物覆盖样地(10.2 mm/min) > 裸沙地(9.26 mm/min)。总体上, 枯落物覆盖样地的初渗速率、稳渗速率和平均入渗速率分别是裸沙地的 1.73, 1.23, 1.37 倍。

表 5 黄土高原水蚀风蚀交错区沙地土壤渗透速率及渗透模型

样地类型	初渗速率/ (mm · min ⁻¹)	稳渗速率/ (mm · min ⁻¹)	平均入渗速率/ (mm · min ⁻¹)	回归方程	R ²
小叶杨枯落物覆盖样地	20.29 ± 0.8 ^a	8.54 ± 0.22 ^c	10.59 ± 0.28 ^b	$y = 14.49 x^{-0.28}$	0.85
柠条枯落物覆盖样地	23.15 ± 0.93 ^a	15.38 ± 0 ^a	17.25 ± 0.02 ^a	$y = 19.16 x^{-0.15}$	0.86
白羊草枯落物覆盖样地	15.26 ± 1.02 ^b	9.39 ± 0.22 ^b	10.2 ± 0.14 ^b	$y = 12.93 x^{-0.19}$	0.76
裸沙地	11.31 ± 0.87 ^c	9.01 ± 0.16 ^{bc}	9.26 ± 0.33 ^c	$y = 10.50 x^{-0.10}$	0.51

3.3 水源涵养能力的评价

由表 6 可知, 利用熵权法计算得出的权重大小为: 稳渗速率(0.153) > 有效持水量(0.148) = 非毛管孔隙度(0.148) > 枯落物蓄积量(0.086) > 枯落物有效拦蓄量(0.084) = 枯落物最大持水量(0.084) > 初渗速率(0.068) > 容重(0.061) > 总孔隙度(0.057) = 饱

和持水量(0.057) > 毛管持水量(0.055)。枯落物覆盖样地的综合评价价值是裸沙地的 13.99 倍。其中, 柠条枯落物覆盖样地的水源涵养能力最强, 综合评价价值为 0.889, 其次为小叶杨(0.484) 和白羊草(0.228) 枯落物覆盖样地, 裸沙地的水源涵养能力最差, 综合评价价值为 0.038。

表 6 黄土高原水蚀风蚀交错区沙地枯落物水源涵养能力综合评价

评价指标	权重	水源涵养能力综合评价得分			
		小叶杨枯落物 覆盖样地	柠条枯落物 覆盖样地	白羊草枯落物 覆盖样地	裸沙地
稳渗速率	0.153	0.000	0.153	0.019	0.010
有效持水量	0.148	0.016	0.148	0.000	0.014
非毛管孔隙度	0.148	0.016	0.148	0.000	0.014
枯落物蓄积量	0.086	0.086	0.052	0.015	0.000
枯落物有效拦蓄量	0.084	0.084	0.045	0.016	0.000
枯落物最大持水量	0.084	0.084	0.046	0.016	0.000
初渗速率	0.068	0.051	0.068	0.023	0.000
容重	0.061	0.035	0.061	0.031	0.000
总孔隙度	0.057	0.036	0.057	0.035	0.000
饱和持水量	0.057	0.036	0.057	0.035	0.000
毛管持水量	0.055	0.039	0.055	0.039	0.000
综合评价价值	1.000	0.484	0.889	0.228	0.038
水源涵养能力排序		2	1	3	4

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 枯落物蓄积量与厚度的差异 生态系统中枯落物的积累在一定程度上是枯落物输入和分解之间的平衡关系^[12-13]。乔木枯落物蓄积量最大, 其次是灌木和草本, 这与植被类型、气候和群落结构密切相关^[14]。有研究表明, 在植被生长的不同阶段, 其枯落物凋落动态可分为高值期、平缓期和间歇期 3 个阶段, 且年凋落量在 66.7 ~ 473.5 g/m² 之间, 整体表现为: 乔木 > 灌木 > 草本^[7]。此外, 植被斑块也被认为可以显著提高枯落物的蓄积量。Yan 等^[15] 利用 4 种植被斑块类型和 6 种枯落物类型, 研究了植被斑块对

枯落物迁移和积累的影响。结果表明, 与裸露的地面斑块相比, 植被覆盖斑块的枯落物积累显著增加, 其中灌木斑块类型的枯落物积累量最高。由于土壤层理化性质变化较缓慢, 枯落物层蓄积量的变化直接影响枯落物的水源涵养能力大小。因此, 小叶杨和柠条枯落物覆盖样地的水源涵养能力最强, 均大于白羊草枯落物覆盖样地和裸沙地。在相同的气候条件和植被类型下, 群落的物种组成和多样性可能通过影响地上生产力来决定枯落物蓄积量^[16]。Sato 等^[2] 指出, 枯落物蓄积量的增加可以增加枯落物层的厚度。但由表 2 可以发现, 白羊草枯落物蓄积量最低, 但其厚度却大于柠条枯落物。这是因为柠条枯落物形状较小, 堆积在一起后形成了致密的覆盖层, 导致其厚度

较小。而白羊草的枯落物一部分凋落至地表,形成较薄的覆盖层,另外一部分则倾斜倒立,交叉在一起,形成了稀疏的枯落物层,增加了其厚度,因而表现为白羊草枯落物厚度大于柠条枯落物厚度。

4.1.2 枯落物水文性质的差异 枯落物在初始浸泡的 0.25 h 内吸水速率最高,这是由于枯落物浸水前处于干燥状态,死细胞间或枝叶表面水势差较大,吸水速率较高^[3]。随着吸水量的增加,水势梯度减小,吸水速率随之减慢,并逐渐达到饱和状态。综合考虑地表和土壤中枯落物达到最大持水量的 90% 所用的时间后发现,柠条枯落物在浸水 2 h 后就达到了最大持水量的 91.6%,小叶杨枯落物在浸水 4 h 后达到最大持水量的 92.0%,而白羊草枯落物在浸水 10 h 后才达到最大持水量的 94.8%。我们也可以从中推测,如果仅考虑枯落物持水过程,那么在降雨过程中,白羊草能最大程度的延缓降雨造成的径流侵蚀发生时间,但最终径流侵蚀的强度及发生时间还要综合考虑坡度、枯落物数量、降雨强度、降雨持续时间等因素。

枯落物持水量主要和枯落物的蓄积量有关,持水率也对其有较大影响。虽然小叶杨枯落物的最大持水率低于白羊草,但由于其蓄积量远高于白羊草,最终表现为小叶杨枯落物最大持水量显著高于白羊草枯落物最大持水量($p < 0.05$)。有效拦蓄量可以反映枯落物对降雨的真实拦蓄,它的大小与枯落物蓄积量、枯落物性质、自然含水率以及降雨特性等因素有关^[17]。在 3 种枯落物中,虽然白羊草枯落物的有效拦蓄率和最大拦蓄率均高于小叶杨和柠条枯落物,但蓄积量对有效拦蓄量的大小有至关重要的影响,导致白羊草枯落物的有效拦蓄量明显小于小叶杨和柠条枯落物($p < 0.05$)。枯落物的最大吸湿比反映了枯落物的持水力,而持水力是真实反映枯落物吸持水分能力的重要指标之一^[18]。虽然白羊草枯落物最大持水量明显低于小叶杨和柠条枯落物($p < 0.05$),但其最大吸湿比在 3 种枯落物中最大,说明白羊草枯落物可以蓄积比自身更多的水分。枯落物的最大持水量和最大吸湿比是浸泡 24 h 后得到的,其值会比实际值偏高^[19]。

4.1.3 枯落物对土壤水文性质的影响 土壤水文物理性质与土壤孔隙度和容重密切相关,二者直接影响着土壤蓄水和透气能力。土壤容重是衡量其物理结构、松紧度与通透性的指标之一。土壤容重大,表明土壤紧实板结而缺少团粒结构,反之,则表明土壤疏松多孔,结构性良好。与裸沙地相比,小叶杨、柠条和白羊草枯落物覆盖均降低了地表 0—10 cm 土壤层的容重,说明枯落物覆盖有利于下层土壤结构的改善。

土壤容重随土层深度增加逐渐增大,主要是因为随土层深度的增加,土壤有机质含量逐渐减少,土壤团聚性降低,从而增加了土壤的紧实度。而且同样地下土壤中枯落物组成、分解状况和地下根系的生长发育存在差异,土壤容重与孔隙度受土壤发育状况的影响,从而造成土壤物理性质的差异^[20]。土壤孔隙度是土壤中养分、水分、空气和微生物等的迁移通道、贮存库和活动场所,也是表示土壤蓄水能力的重要参数^[21]。在地表 0—5 cm 土壤层,随着枯落物覆盖后容重的降低,毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度均表现出升高的趋势。毛管持水量是靠土壤中的毛管孔隙所产生的毛管引力保持的水分,属于自由水,能在毛管中自由移动。毛管孔隙中的水分可以长时间保持在土壤中,毛管孔隙度越大,用于植被自身生长发育所需的有效水分的比例就越大,就越有利于植物根系吸收和土壤蒸发。非毛管孔隙能较快吸收降水并及时下渗,非毛管孔隙度越大,土壤通透性越好,越有利于降水下渗,减少地表径流^[22]。土壤有效持水量大小取决于非毛管孔隙度大小,表征土壤滞留水分、削减洪峰、调节径流、涵养水源的能力^[23]。土壤饱和持水量则是指土壤颗粒间所有孔隙全都充满水时的最大含水量,为土壤毛管持水量和有效持水量之和,其大小反映了土壤蓄水和调节水分的潜在能力。在地表 0—10 cm 土壤层,3 种枯落物覆盖样地下土壤饱和持水量均显著大于裸沙地($p < 0.05$),说明枯落物覆盖可以改善土壤层水文功能,增加蓄水能力。土壤层作为水源涵养第三活动层,通过冠层和枯落物层后进行第三次分配,入渗的水分用于根系吸收和地面蒸发,多余的水分渗透到土壤下层成为地下水^[24]。土壤渗透性的高低,直接影响到地表径流的产生,渗透性越高,地表径流越少,土壤侵蚀量也就越少^[25]。

土壤稳渗速率是影响水源涵养能力最显著的指标,这与艾彪等^[26]的结论一致。柠条枯落物由于稳渗速率、有效持水量、非毛管孔隙度等权重较高的指标得分较高,故综合评价价值最高。裸沙样地由于缺乏枯落物层覆盖,故枯落物蓄积量、枯落物最大持水量及有效拦蓄量指标权重得分为 0,且其容重最大、孔隙度较小、初渗速率最小,故综合评价价值最低。枯落物覆盖样地的水源涵养综合评价值为裸沙地的 13.99 倍,说明枯落物覆盖能显著增强沙地的水源涵养能力。本文仅对枯落物层及土壤层的水源涵养能力进行评价,但冠层的功能也是不容忽视的^[9]。

4.2 结论

本文研究了水蚀风蚀交错区 3 种枯落物覆盖样地及裸沙地的水源涵养功能。

(1) 枯落物的持水率表征其吸水能力,但持水量和拦蓄量的大小很大程度上取决于枯落物的蓄积量。

(2) 枯落物覆盖降低了土壤容重,提高了总孔隙度、饱和持水量、毛管持水量和平均入渗速率($p < 0.05$)。

(3) 枯落物覆盖有效改善了水文效应,水源涵养能力综合评价表现为:柠条枯落物覆盖样地 > 小叶杨枯落物覆盖样地 > 白羊草枯落物覆盖样地 > 裸沙地。因此,在优化水源涵养功能的条件下,建议适宜种植灌木,可搭配种植乔木和草本植物。

[参 考 文 献]

- [1] Li Xiang, Niu Jianzhi, Xie Baoyuan. The Effect of Leaf Litter Cover on Surface Runoff and Soil Erosion in Northern China [J]. PLoS One, 2014, 9(9):107789.
- [2] Sato Y, Kumagai T, Kume A, et al. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers—the effects of rainfall conditions and leaf shapes [J]. Hydrological Processes, 2004, 18(16):3007-3018.
- [3] 栾莉莉,张光辉,孙龙,等.黄土丘陵区典型植被枯落物持水性能空间变化特征[J].水土保持学报,2015,29(3):225-230.
- [4] Robertson S M, Hornung M, Kennedy V H. Water chemistry of throughfall and soil water under four tree species at Gisburn, Northwest England, before and after felling [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 129(1/2/3):101-117.
- [5] 高迪,郭建斌,王彦辉,等.宁夏六盘山不同林龄华北落叶松人工林枯落物水文效应[J].林业科学研究,2019,32(4):26-32.
- [6] 刘京晶,马岚,薛孟君,等.不同处理下油松枯落物减流减沙效应试验研究[J].水土保持学报,2019,33(4):126-132.
- [7] 王忠禹.黄土丘陵区典型植被枯落物分布特征及其水文效应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [8] 杨良辰,张春茹.沿坝地区3种典型林分类型枯落物层与土壤层水源涵养能力综合评价[J].水土保持研究,2018,25(6):177-182.
- [9] 杨家慧,谭伟,卯光宪,等.黔中不同龄组柳杉人工林枯落物水源涵养能力综合评价[J].水土保持学报,2020,34(2):296-301.
- [10] Liu Yu, Cui Zeng, Huang Ze, et al. The influence of litter crusts on soil properties and hydrological processes in a sandy ecosystem [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(5):2481-2490.
- [11] 刘军.基于熵权和 TOPSIS 集成的农作物综合评价[J].安徽农业科学,2010,38(12):6078-6079.
- [12] Kumada S, Kawanishi T, Hayashi Y, et al. Effects of different mobilities of leaf and woody litters on litter carbon dynamics in arid ecosystems in Western Australia [J]. Ecological Modelling, 2009, 220(20):2792-2801.
- [13] 曹云生,赵艳玲.不同灌木林分枯落物层与土壤层水源涵养能力研究[J].水土保持研究,2019,26(6):179-183.
- [14] Scherer-Lorenzen M, Bonilla J L, Potvin C. Tree species richness affects litter production and decomposition rates in a tropical biodiversity experiment [J]. Oikos, 2007, 116(12):2108-2124.
- [15] Yan Yuchun, Xin Xiaoping, Xu Xingliang, et al. Vegetation patches increase wind-blown litter accumulation in a semi-arid steppe of Northern China [J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(12):124008.
- [16] Tilman D, Reich P B, Knops J, et al. Diversity and productivity in a long-term grassland experiment [J]. Science, 2001, 294(5543):843-845.
- [17] 王波,张洪江,杜士才,等.三峡库区天然次生林凋落物森林水文效应研究[J].水土保持通报,2009,29(3):83-87.
- [18] 刘宇,张洪江,张友焱,等.晋西黄土丘陵区不同人工林枯落物持水特性研究[J].水土保持通报,2013,33(6):69-74.
- [19] 韩友志,邢兆凯,顾宇书,等.浑河上游白桦冷杉等4种林分枯落物储量及持水特性[J].东北林业大学学报,2011,39(11):15-18.
- [20] 田超,杨新兵,李军,等.冀北山地阴坡枯落物层和土壤层水文效应研究[J].水土保持学报,2011,25(2):97-103.
- [21] 胡淑萍,余新晓,岳永杰.北京百花山森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J].水土保持学报,2008,22(1):146-150.
- [22] 孙昌平,刘贤德,雷蕾,等.祁连山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持通报,2010,30(4):68-72.
- [23] 周巧稚,毕华兴,孔凌霄,等.晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究[J].水土保持学报,2018,32(4):115-121.
- [24] 何文华,张洪江,程金花,等.重庆四面山5种人工林土壤入渗特性对比[J].中国水土保持科学,2015,13(2):50-55.
- [25] 田育新,李锡泉,吴建平,等.小流域森林生态系统林地土壤渗透性能研究[J].水土保持研究,2006,13(4):173-175.
- [26] 艾彪,黄云,朱元皓,等.赣南丘陵区典型林分水源涵养功能评价[J].水土保持通报,2021,41(1):197-205.