

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

杨寒月^{1,2} 张光辉^{1,2†} 张宝军³

(1. 北京师范大学 地理科学学部, 100875, 北京; 2. 地表过程与资源生态国家重点实验室 北京师范大学, 100875, 北京;
3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌)

摘要: 为探讨黄土丘陵区植被恢复后沟坡植物群落枯落物蓄积状况及其水文功能,以纸坊沟小流域沟坡7个典型植物群落为调查对象,采用野外调查、全收获法和室内浸泡的方法,对其枯落物蓄积量、盖度、持水性能进行系统研究。结果表明:枯落物盖度表现为草本群落均值(43.1%) > 灌木群落(39.8%),且赖草群落显著大于其他植物群落($P < 0.05$);枯落物蓄积量表现为灌木群落(486.94 g/m²) 显著大于草本群落(230.87 g/m²) ($P < 0.05$);枯落物有效拦蓄量灌木群落均值(567.40 g/m²) 显著大于草本群落(323.90 g/m²)。柠条群落最大(685.26 g/m²),白羊草群落最小(149.11 g/m²)。通过对植物群落枯落物持水量与浸泡时间进行分析拟合,得到该时段二者之间的函数关系式 $U = a \ln t + b$ 。

关键词: 沟坡; 枯落物蓄积量; 吸湿化; 持水量; 有效拦蓄量

中图分类号: S714.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-2673(2019)03-0083-08

DOI: 10.16843/j.sswc.2019.03.011

Litter and its water-holding properties of typical plant communities distributed on gully steep slopes in the loess hilly-gully region

YANG Hanyue^{1,2}, ZHANG Guanghui^{1,2}, ZHANG Baojun³

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2. State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

Abstract [Background] Gully steep slopes is the geomorphic position where soil erosion is the most serious in the Loess Plateau, in which soil and water conservation has always been paid more attention to. The litter layer presents many functions effectively, such as capturing precipitation, regulating surface runoff, and preserving soil and water from erosion. However, compared with hilly slopes, relative few studies have been conducted to quantify the accumulative amount and water-holding capacity of plant litters on gully steep slopes. Moreover, the comparative study of litter on hilly slopes and gully slopes is less. **[Methods]** To clarify the eco-hydrological functions of plant litters located on gully steep slopes of the loess hilly-gully region, seven typical vegetation communities were selected in Zhifanggou small

收稿日期: 2018-07-27 修回日期: 2018-10-09

项目名称: “十三五”国家重大研发计划“黄土丘陵沟壑区坡体-植被系统稳定性及生态灾害阻控技术”(2017YFC05044702); 国家自然科学基金“退耕驱动近地表特性变化对侵蚀过程的影响及其动力机制”(41530858); 国家自然科学基金创新研究群体项目“地表过程模型与模拟”(41621061)

第一作者简介: 杨寒月(1995—)女, 硕士研究生。主要研究方向: 土壤侵蚀研究。E-mail: 18153999820@163.com

† 通信作者简介: 张光辉(1969—)男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn

watershed in Ansai district, Shaanxi province. The accumulative amount of litter was determined by harvesting method. Water-holding capacity and absorption rate was measured by the immersion method. Litter coverage was estimated by sighting estimation. [Results] 1) The mean litter accumulation of shrub communities (486.94 g/m²) was significantly greater than that of herb communities (230.87 g/m²) ($P < 0.05$). 2) The mean litter coverage of herb communities (43.1%) was higher than that of shrub communities (39.8%). The litter coverage of *Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel. community was obviously greater than other communities ($P < 0.05$). 3) The mean litter effective interception capacity of shrub communities (567.4 g/m²) was notably greater than that of herb communities (323.9 g/m²) and the largest was in *Caragana korshinskii* Kom. community (685.26 g/m²), while the smallest was in *Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng (149.11 g/m²). 4) By analyzing and fitting the water-holding capacity and soaking time of different communities, the relationship between water-holding capacity and soaking time was obtained as: $U = a \ln t + b$. [Conclusions] The shrub litter is more effective than herbaceous litter in reducing runoff and conserving soil and water on the gully slopes. The accumulative amount, coverage and effective water-holding capacity of the typical vegetation litters on gully steep slopes were lower than those of hilly slope in the same small watershed. *C. Korshinskii* Kom. and *Hippophae rhamnoides* are the better choice for sunny slope to control erosion, *L. secalinus* (Georgi) Tzvel. is the preferable plant for shadow slope. The results are conducive to assessing the hydrological benefits of litter layer and allocation of soil conservation measures on gully steep slopes in the hilly-gully region.

Keywords: gully steep slope; litter volume; water absorption ratio; water-holding capacity; effective interception capacity

枯落物又称凋落物,包括落枝、落叶、落皮、枯落的繁殖器官及枯死的根等,它对植被生态系统的物质循环、能量流动、信息传递具有重要作用^[1]。枯落物可以有效减少地表径流和减缓土壤侵蚀,覆盖地表可降低雨滴对表层土壤的直接打击、截持降水,亦可改变地表微地形、显著减缓径流流速;枯落物混入土壤可提高土壤抗侵蚀性能^[2]。枯落物的水文功能取决于其蓄积量、种类、厚度、湿润状况以及自身的持水性能^[3]。在过去几十年内,众多学者对枯落物的水文水保功能开展了大量卓有成效的研究。王佑民^[4]认为枯落物具有很强的吸收降水和径流的作用,最多可吸持自身干质量的2~3倍,部分阔叶树种枯落物可超过4倍。王云琦等^[5]发现枯落物的持水作用主要表现在降雨前期的2h以内,特别是在前30min以内,6h后其持水量变化很小。赵鸿雁等^[6]认为枯落物的截留量与自身干燥程度有关,同时受立地条件、蓄积量和降水情况的综合影响。上述研究对理解和模拟枯落物生态水文功能,具有重要的理论和实践意义。

黄土丘陵区地形破碎,土壤水分、养分亏缺,天然植被恢复缓慢;枯枝落叶层的生态水文效益就显得尤为重要,尤其是在减少土壤侵蚀方面。目前已有学者针对黄土高原区枯落物的蓄积量、持水特性、

水土保持功能等进行了深入研究,例如:栾莉莉等^[2]研究了典型乔木、灌木和草本群落枯落物蓄积量及持水性能的空间变化特征;叶海英等^[7]研究了4种不同人工水土保持林的枯落物储量及持水特性;Sun等^[8]和李兆松等^[9]研究了枯落物混入和覆盖对土壤侵蚀的影响。沟坡是黄土丘陵沟壑区沟缘线以下、沟道以上的区域,一般由沟道的下切侵蚀形成。沟坡地面破碎,坡陡沟深,可达30°~60°,是黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀发育最为强烈的地貌部位。唐克利^[10]分析多年实测资料发现,梁峁坡侵蚀产沙占流域总产沙量的17.8%~47.6%,而以沟坡为主的沟谷侵蚀产沙占流域总侵蚀产沙的52.4%~82.2%。蒋德麒等^[11]发现黄土丘陵沟壑区第1、3副区典型小流域侵蚀泥沙来源以沟坡为主,沟坡贡献率分别为61.0%和41.5%。可见沟坡是黄土丘陵沟壑区小流域侵蚀产沙的主要策源地,也是该流域综合治理最为关键的地貌单元。受立地条件制约,特别是土壤水分和肥力水平的影响,沟坡植物群落枯落物的蓄积量与持水性能与梁峁坡植物群落间存在差异。寇萌等^[12]研究发现沟坡草种枯落物蓄积量显著高于梁峁坡,且不同草种枯落物持水能力在沟坡与梁峁坡间存在差异。但目前针对沟坡植被枯落物的研究还相对较少,且缺乏对灌木群落与草

本群落的对比研究。自生态环境建设工程实施以来,黄土丘陵区植被覆盖与生长特征发生了巨大变化。在此背景下进一步研究该区沟坡典型植物群落枯落物层的蓄积和持水性能,对于系统评价退耕还林(草)工程及生态环境建设的生态水文功能,量化枯落物的水土保持效益具有重大的理论和生产意义。

1 研究区概况

研究区位于陕西省安塞区的纸坊沟小流域(E 109°13'46"~109°16'03", N 36°46'28"~36°46'42")。该区属黄土高原丘陵沟壑区第2副区,流域面积8.27 km²,海拔1 038~1 414 m。流域内梁峁起伏、地形破碎、沟壑纵横,沟壑密度高达8.06 km/km²。该区位于暖温带半湿润气候向半干旱气候的过渡区域,年均温8.8℃,年均降水量549.1 mm,季节分配极不均匀,6—9月降水量占全年降水量的70%以上,且多短历时暴雨^[13]。流域现存表土为黄绵土,占全区65.5%,其次为红胶土和二色土,占21.5%。黄绵土质地均一,机械组成以粉粒为主,有机质含量低,结构松散,抗蚀能力差。植被处于森林草原带,天然植被主要为半旱生的草灌类。经过多

年生态恢复,目前流域内乔木和灌木以刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、小叶杨(*Populus simonii* Carr.)、柠条(*Caragana Korshinskii* Kom.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)为主,而草本以铁杆蒿(*Artemisia gmelinii* Web.)、芨蒿(*Artemisia giraldii* Pamp.)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng)等为主。

2 研究方法

2.1 样地选择

2017年7—8月对纸坊沟流域沟坡典型植物群落枯落物进行了野外调查与采样。野外勘察发现,受土层深度、立地条件、水热及肥力条件限制,沟坡无乔木生长且灌木群落较少,最终在沟坡选择了2个灌木群落和5个草本群落(最小样地面积为30 m×20 m)样地。灌木群落分别为沙棘和柠条,草本群落分别为披针叶苔草(*Carex lanceolata* Boott)、赖草(*Leymus secalium* (Georgi) Tzvel.)、铁杆蒿、芨蒿和白羊草(注:为方便图文描述,文中披针叶苔草均简称为苔草)。样地海拔、经纬度、坡度、坡向等信息详见表1。

表1 调查植物群落样地信息表

Tab. 1 Basic information of plant community survey sites

植物群落 Plant community	土壤类型 Soil type	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Altitude/m	坡向 Aspect/(°)	坡度 Gradient/(°)
苔草 <i>Carex lanceolata</i> Boott	黄绵土 Loessal soil	E 109°15'6.5" N 36°45'16.6"	1 125	350	35.8
赖草 <i>Leymus Secalium</i> (Georgi) Tzvel.	黄绵土 Loessal soil	E 109°15'6.5" N 36°45'16.6"	1 124	350	35.8
铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> Web.	黄绵土 Loessal soil	E 109°14'27.2" N 36°43'46.2"	1 320	103	37.0
芨蒿 <i>Artemisia giraldii</i> Pamp.	黄绵土 Loessal soil	E 109°14'27" N 36°44'7"	1 250	80	27.2
白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i> (L.) Keng	黄绵土 + 红胶土 Loessal soil + red puddle	E 109°14'40" N 36°44'8"	1 230	101	33.0
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> L.	黄绵土 Loessal soil	E 109°15'5.0" N 36°45'19.4"	1 180	110	25.2
柠条 <i>Caragana korshinskii</i> Kom.	黄绵土 Loessal soil	E 109°14'31" N 36°43'40"	1 330	105	34.4

2.2 研究方法

每个样地选择3个样方(草本1 m×1 m,灌木2 m×2 m)。枯落物测定指标包括盖度、蓄积量、最大持水量和有效拦蓄量。枯落物盖度采用50 cm×50 cm盖度框多次人工目估后取平均值得到,蓄积量采用全收获法测定。

采用室内浸泡法测定枯落物持水能力与过程。采集样方内枯落物后装袋,剔除枯落物中的泥土砾石、动物粪便等杂质,将枯落物放入鼓风干燥箱烘干(65℃,24 h),以保证浸泡前含水量

一致。将烘干后的枯落物选取50 g(叶和茎秆各占50%),放入预先做好的细孔纱网袋(预先称重并编号),再将装有枯落物的纱网袋完全浸没于盛有清水的容器中,待浸水5、10、15 min,0.5、1、2、4、6、8、12和24 h后,将枯落物连同纱网袋一并取出,静置约5 min,保证枯落物不滴水后,迅速称取湿质量,记录每次结果^[2]。不同浸水时间枯落物持水量为相应时间称取的枯落物湿质量与浸水前干质量(包括枯落物和纱网袋)的差值除以干质量,单位为g/g;持水量与浸水时间的

比值为该时段枯落物的吸水速率。以样方内枯落物浸水 24 h 后的持水量作为枯落物最大持水量 g/m^2 。而将此时枯落物湿质量与干质量的比值称为最大吸湿比,用以表征枯落物持水能力的大小。

2.3 数据处理

通常采用有效拦蓄量估算枯落物对降雨的实际拦蓄量,计算公式^[14]如下:

$$W = (0.85R_m - R_0)M \quad (1)$$

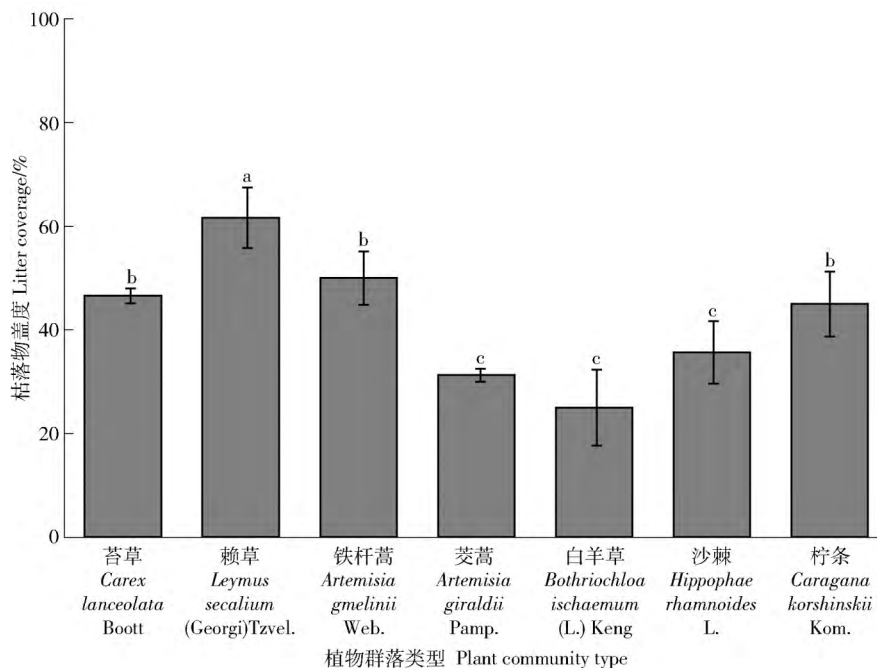
式中: W 为有效拦蓄量 g/m^2 ; R_m 和 R_0 分别为最大持水率和初始含水量,%; M 是枯落物蓄积量 g/m^2 。采用 Excel 2010 进行数据处理,用 SPSS 20.0 统计

分析软件进行不同植物群落枯落物蓄积量、盖度、最大持水量等指标的差异显著性检验。

3 结果

3.1 沟坡植物群落枯落物盖度及其蓄积量

1) 枯落物盖度。沟坡不同植物群落枯落物盖度表现为赖草(61.7%) > 铁杆蒿(50.0%) > 苔草(46.6%) > 柠条(45.0%) > 沙棘(35.7%) > 芨蒿(31.3%) > 白羊草(25.0%) (图 1)。赖草群落枯落物盖度显著大于其他群落($P < 0.05$)。苔草、铁杆蒿、柠条群落的枯落物盖度与芨蒿、白羊草、沙棘群落也存在显著差异($P < 0.05$)。



字母 a、b、c、d 表示被检验指标在不同群落间差异性显著, a 表示最小,由 a 到 d 依次递增。下同。The letter a, b, c, and d indicates that the tested indexes are significantly different among different communities, a is the smallest, and increasing order from a to d. The same below.

图 1 沟坡典型植物群落枯落物盖度

Fig. 1 Litter coverage of plant communities on the gully steep slopes

2) 枯落物蓄积量。沟坡不同植物群落枯落物蓄积量整体表现为灌木群落($486.94 g/m^2$)显著大于草本群落($230.87 g/m^2$) ($P < 0.01$) (图 2),具体表现为柠条($658.00 g/m^2$) > 赖草($383.14 g/m^2$) > 沙棘($315.88 g/m^2$) > 铁杆蒿($288.37 g/m^2$) > 芨蒿($216.90 g/m^2$) > 苔草($168.76 g/m^2$) > 白羊草($97.17 g/m^2$)。柠条群落枯落物蓄积量最大,与其他群落差异显著($P < 0.01$) (图 3); 草本群落中,赖草群落枯落物蓄积量是白羊草群落的 3.95 倍,二者差异显著($P < 0.05$)。

3.2 沟坡植物群落枯落物持水性能

1) 最大持水量和最大吸湿比。7 种植物群落枯落物最大持水量依次为柠条($1764.58 g/m^2$) > 赖草($1152.92 g/m^2$) > 沙棘($919.29 g/m^2$) > 铁杆蒿($679.46 g/m^2$) > 芨蒿($572.13 g/m^2$) > 苔草($515.34 g/m^2$) > 白羊草($283.42 g/m^2$)。灌木群落最大持水量($1341.93 g/m^2$)显著大于草本群落($640.65 g/m^2$) ($P < 0.01$)。赖草群落与其他草本群落差异显著($P < 0.05$) (图 3)。不同植物群落枯落物最大吸湿比表现为苔草 > 赖草 > 沙棘 > 白羊草 >

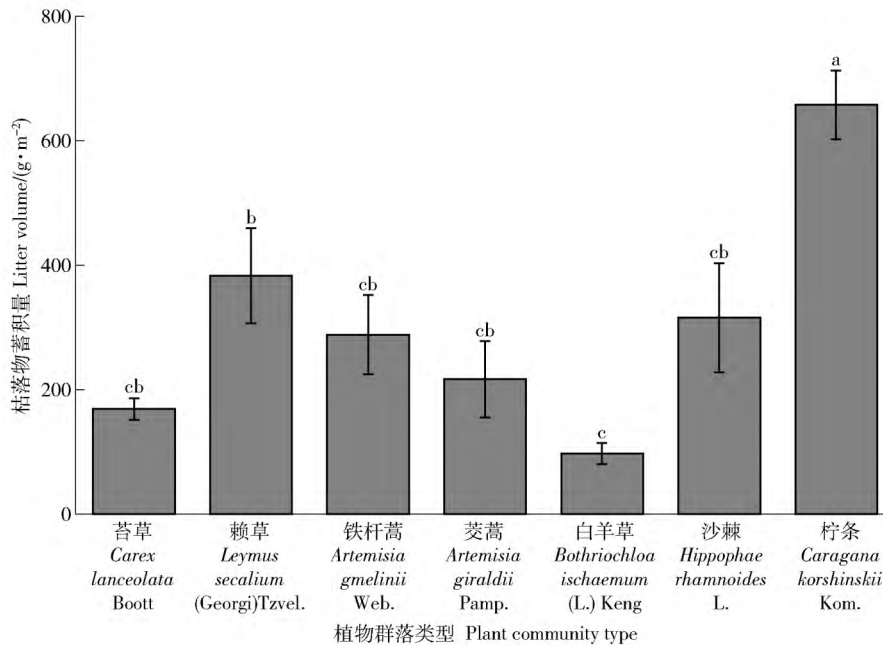


图 2 沟坡典型植物群落枯落物蓄积量

Fig. 2 Litters volume of plant communities on the gully steep slopes

柠条 > 芨芨草 > 铁杆蒿, 苔草群落最大 (4.05), 蒿类群落最小 (芨芨草和铁杆蒿分别是 3.65 和 3.34)。

2) 枯落物对降雨的有效拦蓄量。枯落物有效拦蓄量与蓄积量具有相同的变化趋势, 顺序为柠条 (685.26 g/m²) > 赖草 (614.62 g/m²) > 沙棘 (449.45 g/m²) > 铁杆蒿 (300.18 g/m²) > 芨芨草

(279.93 g/m²) > 苔草 (275.67 g/m²) > 白羊草 (149.11 g/m²)。统计检验结果显示, 柠条群落枯落物有效拦蓄量显著大于其他群落 ($P < 0.05$), 其拦蓄量是白羊草群落的 4.95 倍, 赖草与除铁杆蒿之外的其他草本群落也存在显著差异 ($P < 0.05$)。整体而言, 灌木群落 (567.35 g/m²) 对降雨的有效拦蓄显

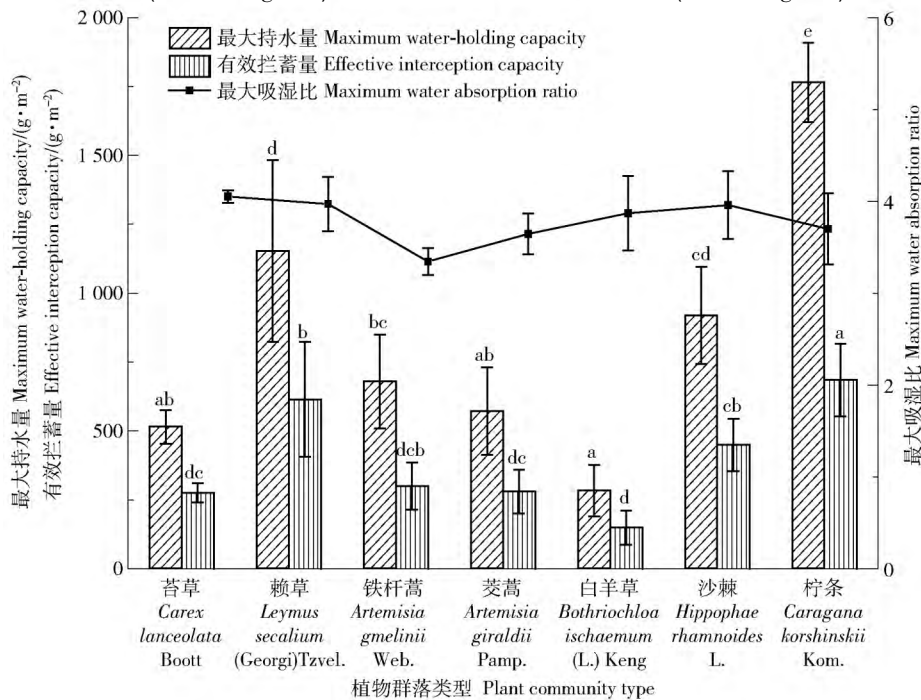


图 3 沟坡典型植物群落枯落物有效拦蓄量、最大吸湿比

Fig. 3 Effective interception capacity and maximum water absorption ratio of litters in plant communities on the gully steep slopes

著优于草本群落(323.90 g/m²)。

3) 枯落物持水过程。沟坡枯落物持水量可达自身干质量的2.34~3.05倍。如图4示,不同群落枯落物持水量变化规律基本相似,均呈现出随浸泡时间增长而增大的趋势。随着时间的推移,单位时间内持水量逐渐减小并趋于稳定。枯落物在浸泡2h之内持水量迅速增加,达到最大持水量的85%左右。在浸泡2~10h之间,持水量增幅缓慢,12h基本达到最大持水量,之后趋于稳定。通过对不同植物群落持水量与浸泡时间进行分析拟合,发现两者均呈较好的对数函数关系($U = a \ln t + b$, $R^2 > 0.99$)。不同植物群落吸水过程相关性高,阴坡草本群落持水性能最好,灌木群落次之,铁杆蒿群落最差。铁杆蒿群落持水曲线明显低于其他群落,与苔草、赖草以及沙棘群落持水过程差异显著($P < 0.05$)。

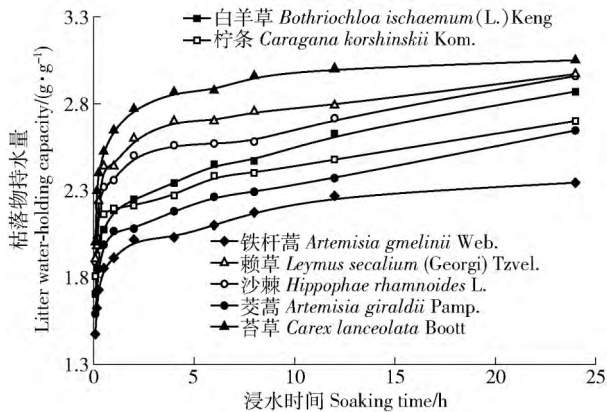


图4 沟坡典型植物群落枯落物持水过程

Fig. 4 Water-holding process of litters in plant communities on the gully steep slopes

4 讨论

4.1 枯落物蓄积状况分析

沟坡植物群落间枯落物盖度差异较大,其原因与植被类型、地上生长状况及叶片形态特征有关^[15]。赖草和苔草群落处于阴坡下部,水分条件好,枯落物蓄积量大、盖度高,且样地处于背风坡,枯落物易于蓄积和保存。白羊草群落枯落物盖度最低,可能原因是该样地土壤为红胶土,水肥条件差,植被长势差且白羊草簇生枯而不落,影响枯落物覆盖与积存。芨芨单株生长、叶片表面积小且易被风力水力搬运是其蓄积量小、盖度低的主要原因。齐治军等^[15]在同流域梁卯坡研究得出的枯落物盖度均值约为44.4%,略高于本研究均值42.2%,无显著差异。

阴坡赖草群落与阳坡白羊草群落差异显著说明枯落物蓄积量与植被类型及立地条件有关。与栾莉莉等^[2]、师阳阳等^[16]在同流域研究结论相比,沟坡枯落物蓄积量均值(304 g/m²)低于梁卯坡(346 g/m²)。受立地条件限制,沟坡基本无乔木生长,植被生活型少;受坡面汇水影响,沟坡枯落物极易被水力搬运;沟坡侵蚀剧烈,表层土壤养分易流失,限制植被生长;沟坡光照条件较差,特别是在生长季^[17]。这些都是沟坡植被生长发育、枯落物蓄积的限制性因素。

为探讨沟坡植物群落枯落物蓄积量的影响因素,对7个群落枯落物与植被地上生长特征进行相关分析(表2),结果表明:枯落物蓄积量与地上生物

表2 枯落物蓄积量与植被地上生长特征相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis between litter volume and characteristics of above-ground plant

指标 Factor	枯落物蓄积量 Litter volume	地上生物量 Above-ground biomass	植被盖度 Plant coverage	Simpson 多样性 S-diversity index	丰富度指数 Margelef index	均匀度指数 Pielou index
枯落物蓄积量 Litter volume	1					
地上生物量 Above-ground biomass	0.886**	1				
植被盖度 Plant coverage	-0.061	-0.094	1			
Simpson 多样性 S-diversity index	0.011	0.110	0.586	1		
丰富度指数 Margelef index	-0.472	-0.624	0.511	0.301	1	
均匀度指数 Pielou index	0.272	0.446	0.461	0.840*	-0.223	1

注: * 是指在0.05水平上显著相关,**是指在0.01水平上显著相关。Notes: * refers to a significant correlation at the 0.05 level, and **refers to a significant correlation at the 0.01 level.

量呈显著正相关($P < 0.01$),相关系数达0.89,而与其他指标均无显著相关性。这说明地上生物量是影响沟坡枯落物蓄积量的主要因素,进一步拟合发现

两者呈显著幂函数关系(图5)。

4.2 枯落物持水性能分析

赖草叶面积大、蓄积量多,持水量大。铁杆蒿与

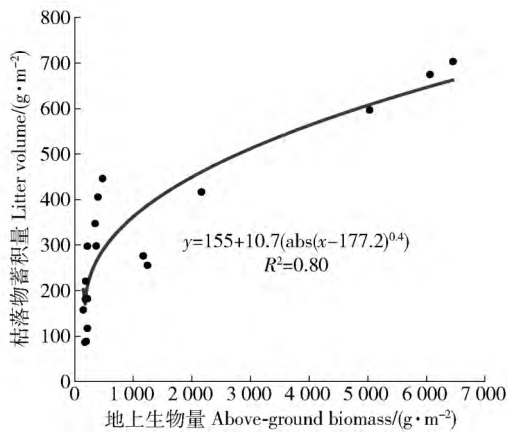


图5 枯落物蓄积量与地上生物量间的关系

Fig. 5 Relationship between above-ground and litter volume

芨芨群落叶片小且茎干木质化,吸水持水能力差;苔草与白羊草枯落物吸湿能力强,但其蓄积量小,因而持水量最小。可见,本研究中枯落物持水量差异主要与自身形态结构及蓄积量有关。

苔草群落枯落物吸湿比最大,而铁杆蒿群落最小,这与植物本身形态结构与生长状况直接相关。苔草在双子叶植物中角质层最厚,具气腔结构,储水能力强;铁杆蒿虽为全栅型植被,但生长于坡度较大的干热环境,叶片稀疏且叶面积小,枯落物不易分解,持水能力弱^[18]。相比栾莉莉等^[2]的研究结论,沟坡典型群落枯落物有效拦蓄量显著低于梁峁坡($P < 0.05$),而最大持水量与梁峁坡无显著差异。

枯落物持水量在浸泡 25 min 之内达到最大持水量的 75% 左右,表明枯落物在 25 min 之内对于短历时暴雨有一定的拦蓄作用。沟坡枯落物吸水速率 30 min 以内明显大于梁峁坡,持水曲线持续呈上升趋势直至 12 h 后趋于稳定,而梁峁坡持水曲线至 6 h 后则基本无变化^[2, 42]。这可能与枯落物不同器官在不同坡位的分布差异有关。

5 结论

沟坡植物群落枯落物盖度表现为草本群落均值(43.1%)大于灌木群落(39.8%),赖草群落显著大于其他群落($P < 0.05$)。枯落物蓄积量和有效拦蓄量表现为灌木群落(486.94 g/m²和 567.40 g/m²)显著大于草本群落(270.87 g/m²和 323.90 g/m²)($P < 0.05$),且枯落物蓄积量与地上生物量显著正相关($P < 0.01$)。不同群落枯落物持水量随浸泡时间均呈现出先增大、后趋于稳定的变化趋势。与同一流域梁峁坡枯落物研究比较,沟坡典型植被枯落物盖度、蓄积量、有效拦蓄量均低于梁峁坡。本研究

结论对量化和评价沟坡枯落物水文效益及沟坡水土保持林草措施的差异配置有着重要的研究意义。

6 参考文献

- [1] 刘强,彭少麟. 植物凋落物生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1.
LIU Qiang, PENG Shaolin. Plant litter ecology [M]. Beijing: Science Press 2010: 1.
- [2] 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.
LUAN Lili, ZHANG Guanghui, SUN Long, et al. Spatial variation in water-holding properties of typical plant litters in the Loess Plateau [J]. Science of Soil and Water Conservation 2015, 29(3): 225.
- [3] 林波,刘庆,吴彦,等. 森林凋落物研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 60.
LIN Bo, LIU Qing, WU Yan, et al. Research progress of forest litter [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(1): 60.
- [4] 王佑民. 中国林地枯落物持水保土作用研究概况[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 108.
WANG Youmin. Summary of researches on water and soil conservative function of litter in forestland in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(4): 108.
- [5] 王云琦,王玉杰,张洪江,等. 重庆缙云山几种典型植被枯落物水文特性研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 41.
WANG Yunqi, WANG Yujie, ZHANG Hongjiang, et al. Research on litter hydrology characteristic of typical vegetation in Jinyun Mountain in Chongqing City [J]. Journal of Soil and Water Conservation 2004, 18(3): 41.
- [6] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬. 黄土高原人工油松林枯落物层的水土保持功能研究[J]. 林业科学, 2003, 39(1): 168.
ZHAO Hongyan, WU Qingxiao, LIU Guobin. Study on soil and water conservation function of litter layer of artificial Chinese pine in Loess Plateau [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(1): 168.
- [7] 叶海英,赵廷宁,赵陟峰. 半干旱黄土丘陵沟壑区几种不同人工水土保持林枯落物储量及持水特性研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 121.
YE Haiying, ZHAO Tingning, ZHAO Zhifeng. The litter storage and its water capacity characteristics in different artificial soil and water conservation forest stands of hilly and gully regions on the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(1): 121.

- [8] SUN L ,ZHANG G H ,LUAN L L , et al. Temporal variation in soil resistance to flowing water erosion for soil incorporated with plant litters in the Loess Plateau of China [J]. *Catena* ,2016(145) : 239.
- [9] 李兆松,王兵,汪建芳,等. 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[J]. *农业工程学报* ,2018 ,34(17) : 151.
LI Zhaosong ,WANG Bing ,WANG Jianfang ,et al. Effects of *Artemisia gmelinii* and *Bothriochloa ischcemum* litter mass coverage on hydrodynamic characteristics of loess overland flow [J]. *Transactions of the CSAE* ,2018 ,34 (17) : 151.
- [10] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 144.
TANG Keli. *Soil and water conservation in China* [M]. Beijing: Science Press 2004: 144.
- [11] 蒋德麒,赵诚信,陈章霖. 黄河中游小流域径流泥沙来源初步分析[J]. *地理学报* ,1966 ,32(1) : 22.
JIANG Deqi ,ZHAO Chengxin ,CHEN Zhanglin. The preliminary analysis on the source of runoff sediment in the middle reaches of Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica* ,1966 ,32(1) : 22.
- [12] 寇萌,焦菊英,尹秋龙,等. 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[J]. *生态学报* ,2015 ,35(5) : 1337.
KOU Meng ,JIAO Juying ,YIN Qiulong ,et al. Water holding capacity and potential nutrient return capacity of main herb species litter in the hill-gully Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica* ,2015 ,35(5) : 133.
- [13] 江忠善,郑粉莉. 纸坊沟流域水土流失综合治理减沙效益评价[J]. *泥沙研究* ,2004 ,29(2) : 56.
JIANG Zhongshan ,ZHENG Fenli. Assessment on benefit of sediment reduction by comprehensive controls in the Zhifangou Watershed [J]. *Journal of Sediment Research* 2004 29(2) : 56.
- [14] 吴钦孝,刘向东. 山杨次生林枯枝落叶蓄积量及其水文作用[J]. *水土保持学报* ,1992 ,6(1) : 71.
WU Qinxiao ,LIU Xiangdong. Litter reserves and their hydrological function in the secondary-forest of *Populus davidiana* [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* , 1992 ,6(1) : 71.
- [15] 齐治军,许明祥. 黄土丘陵区小流域土地覆被物空间分布特征及影响因素研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)* ,2010 ,38(8) : 75.
QI Zhijun ,XU Mingxiang. Spatial distribution characteristics of landcover of small watershed and its influencing factors in hilly-gullied region of Loess Plateau in China [J]. *Journal of Northwest A & F University (Nat. Sci. Ed)* ,2010 ,38(8) : 75.
- [16] 师阳阳,张光辉,陈云明,等. 黄土丘陵区不同退耕模式林下草本变化特征[J]. *中国水土保持科学* ,2012 ,10(5) : 64.
SHI Yangyang ,ZHANG Guanghui ,CHEN Yunming ,et al. Characteristics of undergrowth herbage of different restoration models in the loess hilly region [J]. *Science of Soil and Water Conservation* 2012 ,10(5) : 64.
- [17] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵小流域沟壑水热条件及其生态修复初探[J]. *自然资源学报* ,2004 ,1(2) : 183.
HUANG Yilong ,CHEN Liding ,FU Bojie ,et al. The water and heat condition and the ecological rehabilitation in the hilly-gully catchment of Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources* 2004 ,1(2) : 183.
- [18] 杜华栋. 陕北黄土高原优势物种叶片结构与生理特性不同立地环境的生态响应[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学,2010: 25.
DU Huadong. Ecological responses of foliar anatomical structure and physiological characteristics of dominant plants at different site conditions in North Shaanxi Loess Plateau [D]. Yangling ,Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University 2010: 25.