

黄土高原典型植被枯落物坡面分布及持水特征

汪建芳¹, 王兵^{1,3}, 王忠禹¹, 李兆松¹, 肖婧^{2,3}

(1. 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;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 选取黄土高原丘陵沟壑区刺槐、柠条、铁杆蒿、白羊草 4 种典型植被样地, 系统研究枯落物蓄积量、持水量和拦蓄量变化情况。结果表明: (1) 枯落物地表蓄积量 ($0.14 \sim 0.83 \text{ kg/m}^2$) 和土壤中混入量 ($0.18 \sim 0.66 \text{ kg/m}^2$) 均表现为林地 > 灌木林地 > 草地, 而土壤中枯落物所占比重 ($44.1\% \sim 73.5\%$) 则表现为草地 > 灌木林地 > 林地; 林地 (刺槐和柠条) 地表枯落物和土壤中枯落物沿坡长均表现为增加—减少交替的周期性变化, 草地 (白羊草和铁杆蒿) 则随坡长的增大而增加。 (2) 枯落物持水量可表示为浸泡时间的对数函数 ($R^2 \geq 0.89, p < 0.01$); 白羊草样地地表枯落物持水量最高, 刺槐林地土壤中枯落物持水量最高; 土壤中枯落物最大持水量均不同程度地高于地表枯落物 (1.9~2.5 倍)。 (3) 土壤中枯落物有效拦蓄量校正系数为 $0.34 \sim 0.48$, 普遍小于地表枯落物; 地表和土壤中枯落物有效拦蓄量分别为 $2.4 \sim 12.5 \text{ t/hm}^2$ 和 $1.6 \sim 5.8 \text{ t/hm}^2$, 其中林地土壤中枯落物有效拦蓄量低于地表枯落物, 而草地则高于地表枯落物。总体而言, 刺槐样地枯落物总有效拦蓄量最大 (16.4 t/hm^2), 是其他样地的 1.5~4.1 倍。研究结果为评价黄土高原典型植被枯落物持水特征、深入理解植被恢复水文效应提供重要依据。

关键词: 土壤中枯落物; 枯落物蓄积量; 持水性; 拦蓄降雨; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: 175.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0139-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.022

Slope Distribution and Water Holding Characteristics of Typical Vegetation Litter on the Loess Plateau

WANG Jianfang¹, WANG Bing^{1,3}, WANG Zhongyu¹, LI Zhaosong¹, XIAO Jing^{2,3}

(1. 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; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Influenced by vegetation types, there are significant differences in the distribution and water holding characteristics of litter. This study selected four typical vegetation plots of *Robinia pseudoacacia*, *Caragana intermedia*, *Artemisia gmelinii* and *Bothriochloa aischaemum* in the hilly area of the Loess Plateau, and studied the changes of litter volume, water holding capacity and storage capacity. The results showed that: (1) The surface litter volume ($0.14 \sim 0.83 \text{ kg/m}^2$) and soil litter volume ($0.18 \sim 0.66 \text{ kg/m}^2$) were both followed the order of forest land > shrub land > grassland, while the proportion of soil litter to total litter volume ($44.1\% \sim 73.5\%$) was grassland > shrub land > forest land. Surface litters and soil litters in both *R. pseudoacacia* and *C. intermedia* forest lands showed an alternate cycle of increasing and decreasing along the slope. However, the surface litter and soil litter increased with the increasing of slope length. (2) The water holding capacity of the litter was a logarithmic function of soaking time ($R^2 \geq 0.89, p < 0.01$). The water holding capacity of the surface litter of *B. aischaemum* was the highest, and the water holding capacity of the soil litter of *R. pseudoacacia* forest was the highest. The maximum water holding capacity of soil litter was higher than that of surface litter in varying degrees, which was 1.9~2.5 times

收稿日期: 2018-03-20

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“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); 陕西省创新人才推进计划—青年科技新星项目“黄土高原典型草地植物根系对土壤分离过程的影响”(2017KJXX-88); 国家自然科学基金面上项目“基于RUSLE模型的黄土高原草地植被”(K3050217177)

第一作者: 汪建芳(1991—), 女, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: w18691866409@163.com

通信作者: 王兵(1982—), 男, 陕西杨凌人, 博士, 副研究员, 主要从事植被恢复与土壤侵蚀研究。E-mail: bwang@ms.iswc.ac.cn

higher than that of surface litter. (3) The correction coefficient of effective interception of soil litter was 0.34~0.48, which was generally less than that of surface litter. The effective storage capacity of ground litter and soil litter was 2.4~12.5 t/hm² and 1.6~5.8 t/hm², respectively. The effective storage capacity of soil litter was lower than that of surface litter in forest land, while the opposite trend was found in the grassland. In general, the total effective interception of litter in *R. pseudoacacia* plot was the maximum (16.4 t/hm²), which was 1.5~4.1 times that of other plots. The results provided an important basis for evaluating the water-holding characteristics of litter in typical vegetation and understanding the hydrological effects of vegetation restoration on the Loess Plateau.

Keywords: soil litter; litter volume; water holding capacity; arresting rainfall; Loess Hilly region

枯落物是指植物器官或组织凋落并归还到土壤中,作为分解者和某些消费者物质和能量来源的有机物质总称^[1-4],是生态系统的重要结构和功能单位之一。枯落物蓄积量主要取决于枯落物的输入量、分解速度和积累年限,植物种类、所处环境的水热条件也对枯落物蓄积量有着较大的影响^[5]。枯落物层疏松多孔,具有很大的透水能力和持水能力,可以有效拦蓄降雨、防治土壤侵蚀、减少土壤水分蒸发、促进土壤水分入渗^[6-7]。枯落物持水能力是反映植被水文效应的一个重要指标,通常用持水速率、持水量、拦蓄量的等指标表示,与枯落物的蓄积量、种类、组成及初始含水量关系密切^[8-9]。

黄土高原丘陵沟壑区地形破碎,植被稀少,土壤侵蚀严重。自退耕还林(草)工程实施以来,植被大面积恢复,近地表特征发生了显著变化,枯落物蓄积量显著增加,枯落物发挥的作用越来越被关注^[10-12]。国内外有关枯落物蓄积量及持水特性的相关研究大都集中于地表,而对于土壤中枯落物混入量及其持水特性的相关研究鲜有报道^[13-15]。但事实上,枯落物在表层土壤中广泛分布^[16]。基于此,本文选取黄土高原丘陵沟壑区刺槐、柠条、铁杆蒿、白羊草四种典型植被,系统研究地表枯落物蓄积量、土壤中枯落物混入量及坡面分布状况,探讨典型植被地表枯落物和土壤中混入枯落物持水特性的差异,以期研究黄土高原

丘陵沟壑区枯落物的水文效应、评估退耕还林还(草)工程生态成效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在安塞水土保持综合试验站后山山地实验场及纸坊沟流域进行。该区地处黄土高原中部,属于典型的黄土高原丘陵沟壑区,以梁峁坡为主要地形,土壤类型以黄绵土及红胶土为主,土层疏松深厚,易发生土壤侵蚀。研究区平均海拔 1 200 m,多年平均气温 8.8 ℃,多年平均降水量 540 mm,降雨多集中在 6—9 月,占全年降水的 70% 以上。研究区地处暖温带半干旱季风气候区,植被类型为暖温带落叶阔叶林向草原过渡的森林草原区,常见植被类型有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柠条(*Caragana intermedia*)、沙棘(*Hippoph aerrhamnoides*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipabungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等。

1.2 样地选取

于 2017 年 6 月选取具有相似坡度、坡向(阳坡)的刺槐、柠条、铁杆蒿和白羊草 4 种典型植被样地,样地坡长 40~80 m,坡度 15°~30°,样地之前均为坡耕地,刺槐和柠条为人工种植,铁杆蒿和白羊草为自然撂荒,植被恢复年限均大于 25 年,样地内植被生长良好,人为干扰较少,样地基本信息见表 1。

表 1 样地基本信息调查

样地名称	经纬度	海拔/m	坡度/(°)	坡长/m	株高/m	基径/cm
刺槐林地	109°14'30"N,36°44'31"E	1204	29	60	7.75±1.96	13.27±6.31
柠条林地	109°14'25"E,36°44'43"N	1274	16	85	1.30±0.21	1.10±0.03
铁杆蒿草地	109°18'57"N,36°51'28"E	1250	28	55	0.28±0.05	—
白羊草草地	109°20'09"N,36°52'18"E	1193	26	42	0.23±0.08	—

1.3 试验设计

1.3.1 样线布设 同年 6 月在每个所选样地沿坡面选定 2 条间隔 5~10 m 的平行样线,每条样线设置 10 个采样点,每个样点间距 5~10 m,当 2 个采样点之间坡度差值超过 5°时,增加 1 个采样点。

1.3.2 枯落物的收集 在每个采样点,设置 50 cm×

50 cm 的样方,调查样方内地表枯落物厚度、盖度以及土壤中枯落物混入深度,在每个样点收集地表枯落物和土壤中枯落物,并测定其蓄积量混入量、持水速率和持水量。具体测定方法为:

地表枯落物:采用直尺法和网格法分别测定其厚度和盖度,而后清扫样方,收取样方内全部地表枯落

物,编号、清洗、烘干(65℃,24 h)、称重并计算地表枯落物蓄积量(kg/m²)。

土壤中混入枯落物:收集样方地表枯落物后,挖取深度为10 cm和宽度为50 cm的土壤剖面,通过观察土壤剖面上下层颜色差异及枯落物形态特征划分为枯落物混入层和土壤层,沿土壤剖面宽度方向等距测量枯落物混入深度10次,并求平均值作为该样方的枯落物混入深度;在样地对角线上采用环刀法(内径9.8 cm,高5 cm)采集0—5 cm土壤样品(3个重复),编号、水洗(0.5 mm筛)、剔除根系与杂质、烘干(65℃,24 h)称重后得到0—5 cm土壤冲洗物。为消除土壤中杂质的影响,考虑到枯落物混入土壤深度总体小于5 cm,采用同样方法收集5—10 cm土壤并收集冲洗物,两层冲洗物相减后得到表层0—5 cm土壤中枯落物混入量。

1.3.3 枯落物持水性的测定与计算 枯落物自然持水量测定:将收集的枯落物(土壤中枯落物采用水洗法收集)在自然状态下阴干称重,而后烘干(65℃,24 h)称重用以计算地表枯落物和土壤中枯落物的自然持水量。

枯落物持水量测定:对于地表枯落物,取20 g阴干枯落物装入纱网袋中测定其持水量;对于土壤中枯落物,由于其尺寸较小,取4 g阴干枯落物装入茶叶袋中测定其持水量,上述试验重复3次。测定过程中将枯落物完全浸没于水中,按照浸水时间间隔5,15,30 min,1,2,4,4,8,12,12,12,12 h定时取出,悬挂静置至不滴水时(约5 min)迅速称重,累积浸泡时间为72 h。浸泡结束后,将枯落物取出烘干(65℃,24 h)称重用以计算枯落物最大持水量。

基于上述测定枯落物自然持水量和最大持水量,采用公式(1)和公式(2)分别计算地表枯落物和土壤中枯落物的有效持水量和拦蓄能力。

$$W_E = W_M - W_N \quad (1)$$

$$W_I = \alpha W_E M \quad (2)$$

式中: W_E 为枯落物的有效持水量(g/g); W_M 为枯落物的最大持水量(g/g); W_N 为枯落物自然持水量(g/g); W_I 为枯落物的拦蓄能力(t/hm²); M 为样方内枯落物蓄积量(kg/m²)。

对于地表枯落物, $\alpha=0.85^{[17-18]}$;对于土壤中枯落物, α 为枯落物混入土壤条件下和浸泡条件下土壤中枯落物有效持水量的比值($\alpha=W_{ES}/W_E$, W_{ES} 为枯落物混入土壤条件下的有效持水量,g/g)。枯落物混入土壤条件下有效持水量测定方法为:将440 g干土与10 g自然阴干枯落物混合填入400 cm³环刀内

(有下底盖和防漏滤纸),同时将440 g干土填入相同尺寸作为对照,将其浸泡12 h,取出控水2~3 h,称重,按照公式(3)计算枯落物混入土壤条件下有效持水量。

$$W_{ES} = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{M_3} \quad (3)$$

式中: W_{ES} 为枯落物混入土壤条件下的有效持水量(g/g); M_1 为干土与自然阴干枯落物混合样泡水后的重量(g); M_2 为对照干土样泡水后的重量(g); M_3 为环刀内枯落物干重(g)。

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2007对数据进行简单的整理与分析处理,用Origin 2016进行有关图形的绘制,并对枯落物持水量与浸泡时间进行回归方程的显著性检验($p<0.01$ 表示极显著相关)。

2 结果与分析

2.1 枯落物蓄积量及坡面分布特征

枯落物的蓄积量主要取决于枯落物的输入量、累积年限和分解速率,同时植被种类、水热条件对枯落物的蓄积量有一定的影响^[19]。所选4种典型植被样地地表枯落物蓄积量总体表现为林地>灌木林地>草地(表2)。其中刺槐样地地表枯落物蓄积量最大,为0.83 kg/m²,分别是柠条、铁杆蒿和白羊草样地的1.9,3.8,5.8倍。土壤中枯落物混入量总体也表现为林地>灌木林地>草地(除铁杆蒿样地土壤中混入枯落物量较柠条样地高出12.1%),其中刺槐样地土壤中混入枯落物量最大,为0.66 kg/m²,分别是其他样地的1.2,1.1,3.7倍。这表明乔木和灌木相对于草本,具有较大的地上生物量,因而其地表枯落物和土壤中枯落物均有具有较高的蓄积量,这与栾丽丽等^[3]的研究结果一致。然而,不同样地间土壤中枯落物混入量与枯落物蓄积总量的比值存在显著差异,且表现为草地>灌木林地>乔木林地,一定程度表明草地相对于灌木林地和乔木林地,其枯落物更容易混入土壤。尤其对于铁杆蒿草地,土壤中枯落物混入量与枯落物蓄积总量的比值显著高于其他样地,是刺槐林地的1.7倍。这主要是由于铁杆蒿样地枯落物大都以茎秆为主,具有较强的硬度,随径流泥沙迁移过程中更容易混入(扎入)土壤。另外,由于铁杆蒿茎秆中木质素含量较高,混入土壤后不易降解,也在一定程度上导致其土壤中枯落物混入量与枯落物蓄积总量的比值较大^[20]。

降雨过程中径流、泥沙运移是导致地表和土壤中枯落物沿坡面变化的主要驱动因素。本研究中4种典型植被样地地表枯落物和土壤中枯落物蓄积量沿

坡面表现出较强的差异性。对于刺槐样地和柠条样地,其地表枯落物和土壤中枯落物蓄积量沿坡面表现为增加—减少交替的周期性变化(图 1a、图 1b)。刺槐样地由于枯落物蓄积量本身较大,这种交替现象较柠条样地更为频繁,且随着坡长的增加,增加或减少速率有所减小。对于铁杆蒿草地和白羊草草地,其地表枯落物和土壤中枯落物蓄积量随坡长的增大而增加(图 1c、图 1d)。相对于林地和灌木林地,草地枯落物蓄积量相对较少,其对径流的阻力也相对较小,从而导致地表枯落物较容易随径流迁移;而在此过程中,径流因相对较弱的能量消耗,具有较高的侵蚀能力和挟沙能力,从而使得更多的枯落物与泥沙混合,导致土壤中枯落物混入量增大。4 种典型植被土壤中枯落物占总

枯落物的比重沿坡长变化范围为 38.4%~91.3%。此外,随着坡长的增大,土壤中枯落物比重表现出增加—减少交替的周期变化,且呈现下降趋势(图 1a~图 1d)。这也在一定程度上表明枯落物混入土壤可能存在阈值,而不是随地表枯落物蓄积量的增大而持续增加。

表 2 不同样地枯落物的蓄积量

样地名称	地表枯落物/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	土壤枯落物/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	土壤枯落物 比重/%
刺槐人工林	0.830	0.66	44.10
柠条人工林	0.451	0.55	54.99
铁杆蒿群落	0.220	0.61	73.48
白羊草群落	0.140	0.18	55.41

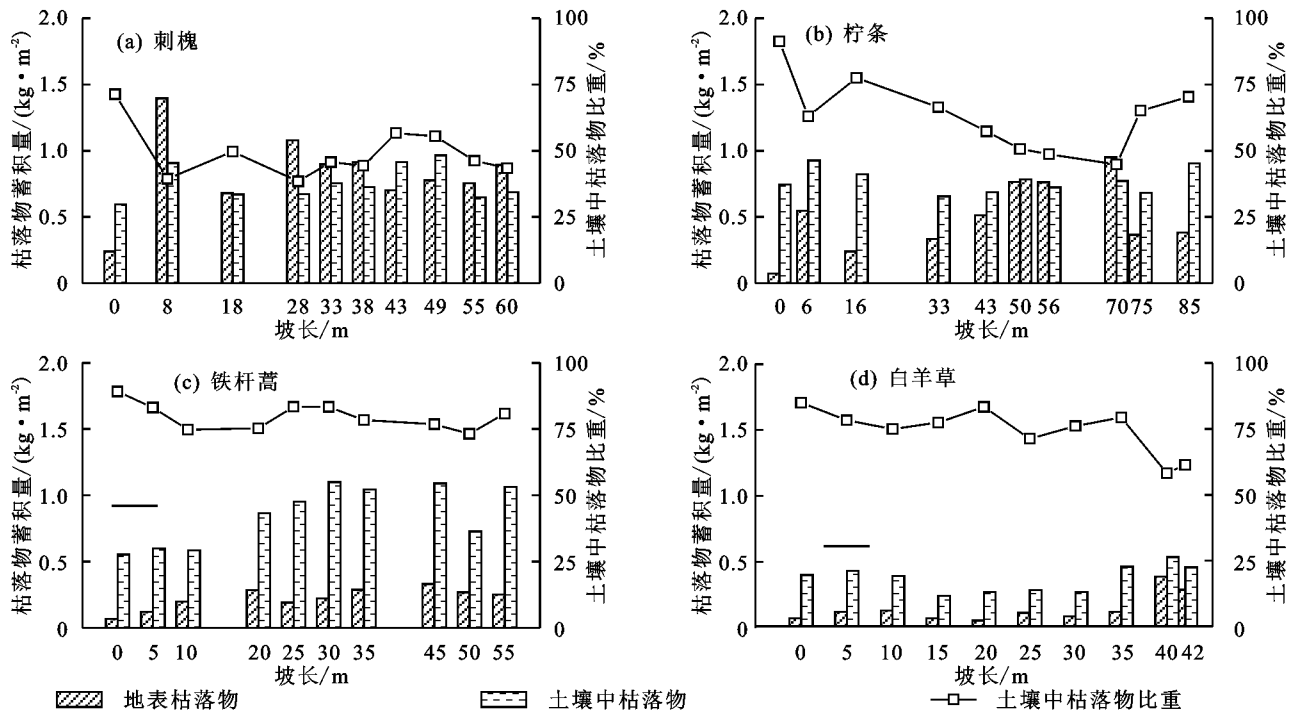


图 1 不同坡位枯落物的蓄积量

2.2 枯落物持水过程及持水量

随着浸水时间的增加,各样地地表枯落物和土壤中枯落物持水量均表现为前 4 h 迅速增加,而后至 12 h 增速减缓,至 72 h 达到稳定状态,即达到最大持水量。地表枯落物和土壤中枯落物持水量均可表示为浸泡时间的对数函数($R^2 \geq 0.89, p < 0.01$ 图 2)。枯落物层的最大持水量取决于枯落物的质和量,同时与枯落物的蓄积量和植物种类有密切的关系^[21]。总体而言,所选 4 种典型植被样地枯落物的最大持水量均为自身干重的 2 倍左右,这与樊登星等^[22]的研究结果一致(枯落物的最大持水量是自身干重的 2~4 倍)。地表枯落物中白羊草样地具有较高的持水量,其最大持水量为 2.31 g/g,分别是刺槐林地、柠条林地和铁杆蒿草地的 1.1, 1.2, 1.1 倍(图 3)。土壤中枯落物则表现为刺槐林地最大,最大持

水量为 5.14 g/g,分别是柠条林地、铁杆蒿草地和白羊草草地的 1.2, 1.1, 1.1 倍。土壤中枯落物最大持水量均不同程度高于地表枯落物最大持水量,分别是地表枯落物最大持水量的 1.9~2.5 倍。这可能是由于混入土壤中的枯落物大多都以半降解状态存在,相对于地表枯落物具有更强的亲水性和比表面积,因而其最大持水量相对较高。这与李超等^[23]对大兴安岭低质林不同皆伐改造后枯落物持水性能的研究结果一致。受枯落物类型和局部环境条件的影响,枯落物自然持水量也存在较大的差异,但最大持水量并不能表征枯落物的这部分差异,因而很多学者提出以枯落物的有效持水量来表征枯落物的持水能力,即最大持水量减去自然持水量(公式 1)。本研究中 4 种典型植被样地地表枯落物有效持水量差异不大,变化范围为 84.6%~85.3%。

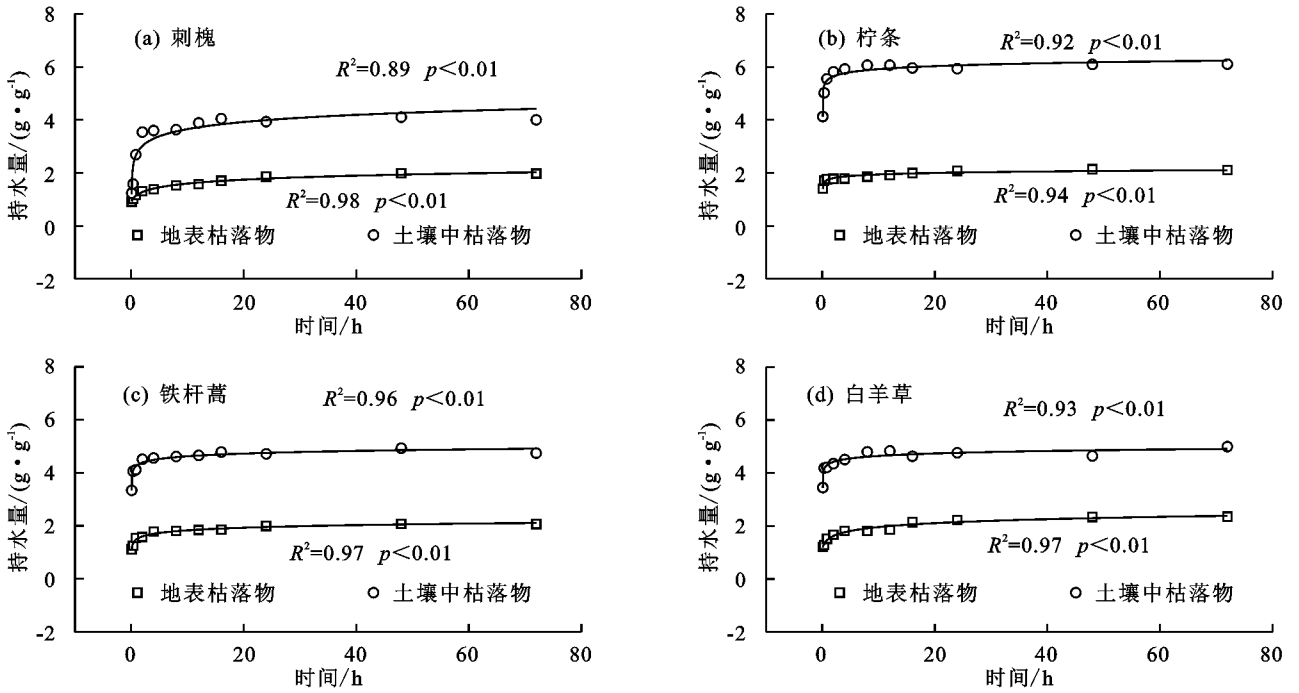


图 2 枯落物持水量随时间的变化

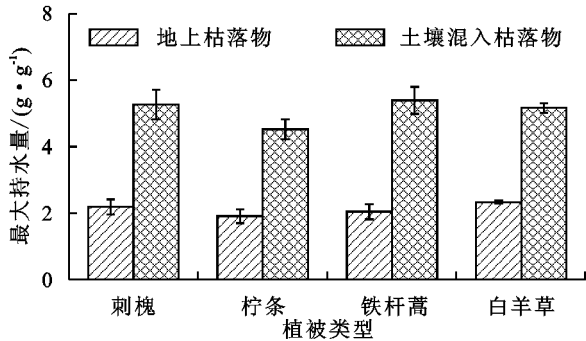


图 3 枯落物的最大持水量

2.3 植被枯落物坡面拦蓄能力分析

枯落物拦蓄能力是指单位面积枯落物的蓄水能力,与枯落物蓄积量密切相关。地表枯落物拦蓄能力通常采用浸水的方式来测定,而自然降雨条件下枯落物往往不会出现较长时间的浸水,因而有学者提出用有效拦蓄量来表征地表枯落物对降雨的拦蓄能力,即拦蓄能力乘以校正系数($\alpha=0.85^{[17-18]}$)。本研究中,刺槐林地地表枯落物有效拦蓄量最大,为 12.5 t/hm^2 ,分别是柠条、铁杆蒿、白羊草样地的 2.0,3.8,5.2 倍。这很大程度上是由于刺槐林地地表枯落物蓄积量较大。有关土壤中枯落物拦蓄能力研究的相对较少,尤

其是其有效拦蓄量校正系数,几乎没有相关研究。本研究通过将收集的土壤中枯落物进行单独浸泡和混入土壤浸泡得到刺槐林地、柠条林地、铁杆蒿草地和白羊草草地土壤中枯落物有效拦蓄量的校正系数(表 3),进而计算土壤中枯落物有效拦蓄能力。结果表明,土壤中枯落物有效拦蓄量校正系数为 $0.34 \sim 0.48$,普遍低于地表枯落物有效拦蓄量的校正系数。土壤中枯落物有效拦蓄量变化范围为 $1.6 \sim 5.8 \text{ t/hm}^2$,其中铁杆蒿草地土壤中枯落物有效拦蓄量表现为最大,为 5.8 t/hm^2 ,分别是其他样地的 1.5,1.2,3.6 倍。此外,刺槐林地和柠条灌木林地土壤中混入枯落物有效拦蓄量低于地表枯落物,而白羊草草地和铁杆蒿草地土壤中枯落物有效拦蓄量则高于地表枯落物。就总有效拦蓄量而言,刺槐样地枯落物总有效拦蓄量最大,为 16.4 t/hm^2 ,分别是柠条、铁杆蒿、白羊草样地的 1.5,1.8,4.1 倍。虽然刺槐样地土壤中枯落物有效拦蓄量的校正系数相对较小(有效拦蓄量校正系数为 0.34,较其他样地减少了 14%,12%,11%),可能是由于其枯落物以叶片为主,混入土壤中较容易降解,结构性较差,但由于其较高的枯落物蓄积量,导致其枯落物总有效拦蓄量最大。

表 3 枯落物的拦蓄能力

样地名称	地表枯落物			土壤中枯落物		
	有效持水量/ ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	α	有效拦蓄量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	有效持水量/ ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	α	有效拦蓄量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
刺槐林地	1.76	0.85	12.5	1.75	0.34	3.9
柠条林地	1.65	0.85	6.3	1.90	0.48	5.0
铁杆蒿草地	1.73	0.85	3.3	2.07	0.46	5.8
白羊草草地	1.97	0.85	2.4	2.04	0.45	1.6

3 结论

(1) 地表枯落物蓄积量和土壤中混入枯落物量均表现为林地 > 灌木林地 > 草地。土壤中混入枯落物的量不容忽视, 占枯落物总蓄积量的 44.1%~73.5%, 且相对于乔木林地和灌木林地, 草地土壤中枯落物所占比重相对较大, 表现为草地 > 灌木林地 > 林地。刺槐林地和柠条灌木林地由于较高的枯落物凋落量, 其枯落物沿坡面均表现为增加—减少交替的周期性变化, 而铁杆蒿草地和白羊草草地枯落物则均随坡长的增大而增加。

(2) 各样地地表枯落物和土壤中枯落物持水量均表现为前 4 h 迅速增加, 而后至 12 h 增速减缓, 至 72 h 达到稳定状态, 枯落物持水量可表示为浸泡时间的对数函数 ($R^2 \geq 0.89, p < 0.01$)。土壤中枯落物最大持水量均不同程度高于地表枯落物最大持水量, 其中白羊草样地地表枯落物持水量最大 (2.31 g/g), 刺槐林地土壤中枯落物持水量最大 (5.14 g/g)。

(3) 通过将收集的土壤中枯落物进行单独浸泡和混入土壤浸泡得到了土壤中枯落物拦蓄量校正系数, 其变化范围为 0.34~0.48, 但均小于地表枯落物拦蓄量校正系数。4 种典型植被样地地表和土壤中枯落物有效拦蓄量分别为 2.4~12.5, 1.6~5.8 t/hm²。总体而言, 刺槐林地由于较高的地表枯落物蓄积量和土壤中混入枯落物量, 其总有效拦蓄量最大 (16.4 t/hm²)。

参考文献:

- [1] Bray J R, Gorham E. Litter production in forests of the world[J]. *Advance in Ecological Research*, 1964, 2(8): 101-157.
- [2] 郝占庆, 王力华. 辽东山区主要森林类型林地土壤蓄水性研究[J]. *应用生态学报*, 1998, 9(3): 237-241.
- [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] 王谦, 孙保平, 丁国栋, 等. 陕西榆林樟子松人工林土壤及枯落物水文效应[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(8): 123-132.
- [5] McCulloch J S G, Robinson M. History of forest hydrology[J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 150(2/4): 189-216.
- [6] 剪文灏, 李淑春, 陈波, 等. 冀北山区 3 种典型森林类型枯落物水文效应研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(5): 144-147.
- [7] 施爽, 郭继勋. 松嫩草原 3 种主要植物群落枯落物层生态水文功能[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1722-1726.
- [8] 牛勇, 刘洪禄, 张志强, 等. 北京地区典型树种及非生物因子对枯落物水文效应的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(8): 183-189.
- [9] 张振明, 于新晓, 牛健值, 等. 不同林分枯落物层的水文功能[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 139-143.
- [10] 王金建, 崔培学, 刘霞, 等. 小流域水土保持修复区森林枯落物的持水性能[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 8(3): 48-52.
- [11] 丁绍兰, 杨乔媚, 赵串串, 等. 黄土丘陵区不同林分类型枯落物层及其林下土壤持水能力研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 104-108.
- [12] Dunkerley D. Percolation through leaf litter: What happens during rainfall level of varying intensity[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 737-746.
- [13] 杨吉华, 张永涛, 李红云, 等. 不同林分枯落物持水性能及对表层土壤理化性状的影响[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 141-144.
- [14] Foster G R. Advances in wind and water erosion prediction[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46(1): 27-29.
- [15] 马雪华, 杨茂瑞, 胡星弼. 亚热带杉木、马尾松人工林水文功能的研究[J]. *林业科学*, 1993, 29(3): 199-206.
- [16] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘国彬. 黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究[J]. *林业科学*, 2003, 29(1): 168-172.
- [17] Williams J R, Sharply A N. EPIC-Erosion productivity impact calculator I. Model documentation[M]. Washington D C: US Department of Agriculture, 1990: 1768.
- [18] 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): 121-125.
- [19] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山主要森林类型枯落物的水文功能[J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(1): 91-99.
- [20] 薛志婧. 黄土丘陵区草地生态系统典型植物枯落物分解特征研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [21] Tsukamoto J. Downhill movement of litter and its implication for ecological studies in three types of forest in Japan[J]. *Ecological Research*, 1991, 6(3): 333-345.
- [22] 樊登星, 余新晓, 岳永杰. 北京西山不同林分枯落物层持水特性研究[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 177-181.
- [23] 李超, 董希斌, 李芝茹. 大兴安岭低质林皆伐改造后枯落物持水性能的研究[J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(4): 92-96.