

# 黄土高原不同立地条件下枯落物蓄积量及持水特征

张 缓<sup>1</sup>, 穆兴民<sup>1,2</sup>, 高 鹏<sup>1,2,3</sup>

(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:**枯落物具有重要的水源涵养和拦蓄径流的功能,研究不同立地条件对枯落物蓄积量及水文功能的影响对于评价黄土高原生态恢复过程中枯落物的水土保持功能具有重要的意义。选择黄土高原典型植被带为调查样点,以不同立地条件下草本群落枯落物为研究对象,对枯落物的蓄积量及水文特征进行了相关研究。结果表明:(1)不同植被带枯落物蓄积量表现为森林带(154.25~392.95 g/m<sup>2</sup>)>森林草原带(151.27~287.58 g/m<sup>2</sup>)>草原带(109.24~174.81 g/m<sup>2</sup>),枯落物蓄积量总体表现为阴坡>阳坡,沟坡>梁坡;(2)不同立地条件下枯落物自然含水率、最大持水量、最大吸湿比均具有一定的差异性。森林带、森林草原带、草原带枯落物自然含水率的变化趋势分别为28%~54.5%,26.8%~41%和20.7%~31.3%,最大持水量分别为自身的3.26~3.64,2.94~3.2,1.63~1.92倍,最大吸湿比分别为3.26~3.64,2.94~3.21,2.63~2.92。(3)不同立地条件下枯落物持水量和浸水时间存在显著对数函数关系( $R^2>0.91$ ),吸水速率和浸泡时间存在幂函数关系( $R^2>0.99$ );(4)枯落物有效拦蓄量表现为森林带(219.86~787.09 g/m<sup>2</sup>)>森林草原带(188.15~437.7 g/m<sup>2</sup>)>草原带(99.89~181.22 g/m<sup>2</sup>),表明森林带对径流拦蓄的贡献率最大,其次为森林草原带和草原带。立地条件对枯落物蓄积量和持水性能影响显著,研究结果可为科学评价黄土高原生态恢复过程中枯落物水土保持效益提供一定的理论依据。

**关键词:**黄土高原;立地条件;枯落物蓄积量;持水能力;不同植被带

**中图分类号:**S715.7

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2021)03-0045-08

## Variation of Litter Accumulation and Water Holding Capacity at Different Site Conditions in the Loess Plateau

ZHANG Huan<sup>1</sup>, MU Xingmin<sup>1,2</sup>, GAO Peng<sup>1,2,3</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Litter plays an important role in water conservation and runoff regulation, which has great significance for evaluating the water and soil conservation function of litter during the ecological restoration of the Loess Plateau. In order to investigate the properties of the litter layer of the herb communities, three typical vegetation zones were chosen at different site conditions in the Loess Plateau, and effect of litter on hydrological functioning was assessed. The results show that: (1) the litter accumulation in different vegetation zones decreased in the order: forest (154.25~392.95 g/m<sup>2</sup>)> forest-steppe (151.27~287.58 g/m<sup>2</sup>)> grassland (109.24~174.81 g/m<sup>2</sup>), and the litter accumulation in the shady slope was generally higher than that in the sunny slope, and higher on the gully slope than that on the ridge slope; (2) the natural moisture contents of litter in forest zone, forest-steppe zone and grassland zone were 28%~54.5%, 26.8%~41% and 20.7%~31.3%, respectively; the maximum water-holding capacities of litter were 3.26~3.64, 2.94~3.2 and 1.63~1.92 times of litter mass, respectively, and the maximum moisture absorption ratios were 3.26~3.64, 2.94~3.21 and 2.63~2.92, respectively; (3) the relationship between the obtained values of water holding capacity

收稿日期:2020-11-16

修回日期:2020-11-27

资助项目:国家重点研发计划专题计划“黄土高原水土流失治理与生态产业协同发展技术集成与模式”(2016YFC0501707)

第一作者:张缓(1994—),女,河南夏邑人,硕士研究生,研究方向为流域生态水文与水土保持。E-mail:1585702413@qq.com

通信作者:高鹏(1976—),男,陕西扶风人,研究员,博士,博士生导师,主要从事流域生态水文和水土保持研究工作。E-mail:gaopeng@ms.iswc.ac.cn

and soaking time of litter followed the logarithmic function well ( $R^2 > 0.91$ ), and the relationship between the water absorption rate and soaking time could be described by power function well ( $R^2 > 0.99$ ); (4) the effective runoff interception of litter followed the order: forest ( $219.86 \sim 787.09 \text{ g/m}^2$ ) > forest-steppe ( $188.15 \sim 437.7 \text{ g/m}^2$ ) > grassland ( $99.89 \sim 181.22 \text{ g/m}^2$ ), indicating that the forest zone had the largest contribution to runoff interception, followed by forest grassland and grassland. Overall, different site conditions had significant impacts on litter accumulation and water holding capacity.

**Keywords:** Loess Plateau; site condition; litter volume; water-holding capability; different vegetation zones

枯落物(也称凋落物)是指在陆地生态系统内,植物生长过程中部分器官、组织因自然死亡或脱落归还到地表的产物,对于维持土壤有效肥力、生态系统的物质循环和能量流动具有重要的作用<sup>[1]</sup>。枯落物作为地表的重要产物,具有截留降水、降低雨滴动能、延缓地表径流、保护地表免受冲刷和抑制土壤蒸发等<sup>[2-4]</sup>功能;同时,枯落物可以通过分解作用为土壤提供大量的有机质,对于改善土壤孔隙结构、提高土壤抗蚀性具有重要的作用<sup>[5]</sup>。枯落物因其本身具有较大的比表面积和结构疏松的特性,可以大量吸持水分,具有很强的水源涵养和蓄水保土的功能<sup>[6]</sup>。而枯落物的水文功能通常由蓄积量、厚度、植被类型、立地条件、密度等因素决定<sup>[7]</sup>。

黄土高原地区地形破碎、土壤养分匮乏,天然植被的覆盖率较低,因此研究枯落物层的水文涵养功能显得尤为重要。自退耕还林(草)工程实施以来,黄土高原的生态环境得到了极大的恢复,植被覆盖率及地上生物量显著增加<sup>[8]</sup>,进一步影响了枯落物的蓄积特征及其水文功能<sup>[9]</sup>。目前为止,众多学者对枯落物的蓄积量及水文功能开展了大量研究。栾莉莉等<sup>[10]</sup>研究发现黄土丘陵区枯落物蓄积量沿纬度变化从南到北呈减少趋势,且蓄积量表现为乔木群落>灌木群落>草本群落,最大持水量和有效拦蓄量的变化趋势与之一致;王忠禹等<sup>[11]</sup>研究黄土丘陵区4种典型植被枯落物蓄积量发现,枯落物蓄积量、盖度和厚度在坡面的变化均表现为刺槐>柠条>铁杆蒿>白羊草,且枯落物蓄积量随盖度的增加呈指数函数增长;寇萌等<sup>[12]</sup>研究不同立地条件下枯落物蓄积量发现,枯落物蓄积量表现为阴沟坡>峁顶>阳沟坡>阴梁峁坡>阳梁峁坡,且不同立地条件下差异显著( $p < 0.05$ )。目前针对黄土高原地区枯落物蓄积量的研究多集中在对不同的林分类型<sup>[13]</sup>、不同的空间尺度<sup>[10]</sup>、不同密度等<sup>[14]</sup>方面的研究,但对不同立地条件下草本群落枯落物蓄积量分布及水文特征方面的研究较少。基于此,本研究以黄土高原地区典型植被带不同立地条件下的草本群落枯落物为研究对象,通过测定不同

立地条件下枯落物蓄积量和持水特性,分析枯落物蓄积量、持水性能与坡向、坡度等因子的关系,为评价黄土高原生态恢复过程中枯落物水土保持效益提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

根据黄土高原植被带分区<sup>[15]</sup>,按照黄土高原纬度变化从南到北依次选择森林带(旬邑)、森林草原带(安塞)、草原带(神木)3个植被带为研究区。旬邑县位于陕西省中部,东经  $108^{\circ}08' - 108^{\circ}52'$ ,北纬  $34^{\circ}57' - 35^{\circ}33'$ ,属暖温带大陆性季风气候,年均温  $9.1^{\circ}\text{C}$ ,年极端最高温度  $35.0^{\circ}\text{C}$ ,最低气温  $-21.3^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $612.9 \text{ mm}$ ,降水年内分布不均,降水主要集中在春夏两季,占全年降水量的  $66.8\%$ 。土壤类型以褐土为主,植被类型分区为森林带;安塞县位于陕西省北部,东经  $108^{\circ}5' - 109^{\circ}26'$ ,北纬  $36^{\circ}30' - 37^{\circ}19'$ ,属中温带大陆性半干旱季风气候,年均温  $8.8^{\circ}\text{C}$ ,年极端最高温度  $36.8^{\circ}\text{C}$ ,极端最低温度  $-23.6^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $505.3 \text{ mm}$ ,降水年际变化较大且年内分布不均,暴雨多集中在7—9月,占全年降水量的  $60\%$ 以上。土壤类型以风沙土、黄绵土为主,植被类型分区为森林草原带;神木县位于陕西省北部,东经  $109^{\circ}40' - 110^{\circ}54'$ ,北纬  $38^{\circ}13' - 39^{\circ}27'$ ,属中温带大陆性半干旱季风气候,年均温  $8.9^{\circ}\text{C}$ ,年极端最高气温  $38.9^{\circ}\text{C}$ ,最低气温  $-28.1^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $440.8 \text{ mm}$ ,降水年内分布不均,多集中在6—9月,占全年降水量的  $77.4\%$ 。土壤类型以风沙土、黄绵土为主,植被类型分区为森林草原和沙化草原带<sup>[16]</sup>。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与调查 2020年5—6月通过野外走访、调查,在黄土高原地区3个典型植被带分别选取2~3对阴阳沟坡系统,分别在阳坡中部、阳坡下部、坡顶、阴坡中部、阴坡下部5个立地条件下设置标准样地,由于实际样地条件的限制,共调查样地34个,3个植被带样地调查的顺序依次为森林草原带(安塞)、草原带(神木)、森林带(旬邑)。其中,乔木样方大小为  $10 \text{ m} \times$

10 m,灌木样方为 5 m×5 m,草本样方为 1 m×1 m,调查内容主要包括物种名、高度、冠幅、盖度、地上生物量等,同时记录样地的经纬度、海拔、坡度、坡位、坡向及土壤类型等,研究区基本情况见表 1。

1.2.2 枯落物蓄积量调查 在每块样地内按照对角线原则设置 3 个 0.5 m×0.5 m 样方,用钢板尺和网格法现场测量枯落物层的厚度和盖度,每个样方重复 5 次。清扫收集样方内全部枯落物,装入带有编号的档案袋,立即称量鲜重,然后带回实验室烘干称重(65℃,24 h),计算其自然含水量(率)和地表枯落物蓄积量,用单位面积地表枯落物烘干质量表示地表枯落物蓄积量(g/m<sup>2</sup>)。

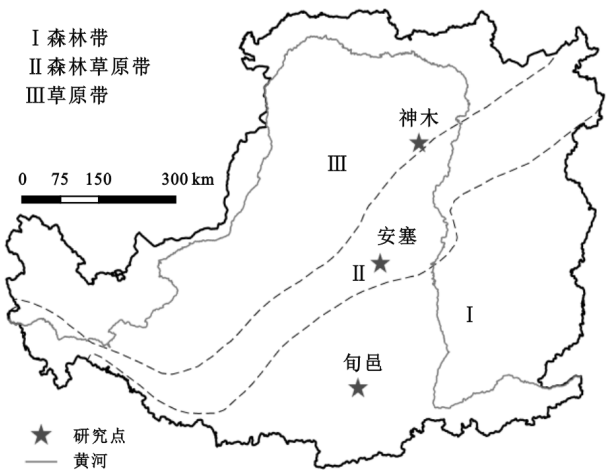


图 1 样地地理位置示意图

表 1 研究区基本情况

植被带	海拔/ m	坡度/ (°)	土壤类型	主要草本 物种	高度/ m	盖度/ %	地上生物量/ (g·m <sup>-2</sup> )
森林带	1015~1222	20~35	褐土	长芒草、远志、猪毛蒿	0.18~0.28	42.17~69.50	65.33~90.46
森林草原带	1040~1335	15~40	黄绵土	铁杆蒿、芨蒿、白羊草	0.30~0.50	25.53~40.00	21.42~52.98
草原带	1127~1225	15~35	黄绵土、风沙土	长芒草、米蒿、紫花苜蓿	0.22~0.32	25.00~59.00	31.53~68.15

1.2.3 枯落物持水性能测定 利用室内浸水法测定枯落物持水能力与过程。将烘干的枯落物取每份 20 g 装入细纱网袋中(提前进行编号和称重),然后将装有枯落物的细纱网袋完全浸入于盛有清水的容器中,分别在浸水 5 min,10 min,15 min,0.5 h,1 h,2 h,4 h,6 h,8 h,12 h,24 h 时,取出悬挂至不滴水时称重,并记录每次称量结果,每个样品 3 个重复。为减少试验误差,纱网的持水量需要提前考虑和剔除。以枯落物的湿重与烘干重的差值为相应时间的枯落物持水量,以浸泡 24 h 后的持水量为枯落物最大持水量(率),以枯落物湿重与干重的比值为枯落物最大吸湿比,用以表征枯落物持水能力的大小。枯落物自然含水量(率)、最大持水量(率)、有效拦蓄量(率)计算公式如下:

自然含水量(率)

$$M_0 = W_1 - W_2 \tag{1}$$

$$R_0 = (W_1 - W_2) / W_2 \times 100\% \tag{2}$$

最大持水量(率)

$$R_1 = W_3 - W_2 \tag{3}$$

$$R_m = (W_3 - W_2) / W_2 \times 100\% \tag{4}$$

有效拦蓄量(率)

$$W_m = (R_m - R_0) \times M \tag{5}$$

$$W = (0.85R_m - R_0) \times M \tag{6}$$

最大吸湿比

$$N = W_3 / W_2 \tag{7}$$

式中: $M_0$  为自然含水量(g); $R_0$  为自然含水率(%); $W_1$  为枯落物鲜重(g); $W_2$  为枯落物烘干重(g); $R_1$  为

最大持水量(g); $R_m$  为最大持水率(%); $W_3$  为枯落物浸水 24 h 后重量(g); $W_m$  为最大拦蓄量(g/m<sup>2</sup>); $W$  为有效拦蓄量(g/m<sup>2</sup>); $M$  为枯落物的蓄积量(g/m<sup>2</sup>); $N$  为最大吸湿比。

1.2.4 数据处理和统计分析 利用 Excel 2010 进行数据的处理和计算,Origin 2018 进行相关图表的绘制。通过 SPSS 25.0 进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和 Duncan 多重比较法比较不同立地条件下枯落物蓄积量、最大持水量、有效拦蓄量的差异性,通过曲线回归方程拟合分析枯落物持水量、吸水速率和浸水时间的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 枯落物蓄积量分布特征

2.1.1 不同植被带枯落物蓄积量 枯落物蓄积量受光照、水分和不同植被类型的生长状况等因素的共同影响<sup>[17]</sup>。不同植被带枯落物蓄积量表现为森林带(154.25~392.95 g/m<sup>2</sup>)>森林草原带(151.27~287.58 g/m<sup>2</sup>)>草原带(109.24~174.81 g/m<sup>2</sup>),与枯落物的厚度和盖度变化一致(图 2)。森林带枯落物的厚度范围为 0.79~2.5 cm,盖度范围为 60%~81%;森林草原带枯落物的厚度范围为 0.38~1.08 cm,盖度范围为 49.33%~74.5%;草原带枯落物的厚度范围为 0.1~0.28 cm,盖度范围为 38%~51.67%(表 2)。整体而言,枯落物蓄积量表现为森林带>森林草原带>草原带,不同植被带枯落物厚度、盖度变化不同,这是因为不同植被带水热条件、土壤养分状况存在差异,



导致地上植被生长状况不一致,从而影响了枯落物的产量<sup>[18]</sup>。栾丽丽等<sup>[10]</sup>研究了黄土高原地区枯落物蓄积量的空间变化规律,发现不同乔灌草植物群落的枯落物蓄积量随纬度变化由南到北呈减少趋势,与本试验的研究结果一致。不同植被带枯落物的蓄积量分布不同,本研究枯落物蓄积量的调查结果总体

偏低,一方面是因为地上枯落物的累积受植物的生长周期控制,一般在植物体的生命末期激增<sup>[19]</sup>,本次野外调查的时间在 5—6 月份,正值植物群落的生长期,枯落物的累积较少,导致整体枯落物蓄积量偏小;另一方面是草本层的枯落物量较小,这与植物群落的物种组成有关。

表 2 不同立地条件下枯落物厚度、盖度变化

立地条件	森林带		森林草原带		草原带	
	盖度/%	厚度/cm	盖度/%	厚度/cm	盖度/%	厚度/cm
阳坡中部	60.00±18.59b	0.94±0.38c	49.33±14.15a	0.51±0.25ab	42.75±11.59bc	0.16±0.05a
阳坡下部	61.00±7.18b	0.79±0.21c	74.50±10.02a	1.08±0.69a	46.00±16.52c	0.13±0.06a
坡顶	81.00±14.70a	1.78±0.36b	60.00±23.66a	0.38±0.31b	51.67±7.64c	0.10±0.00a
阴坡中部	80.50±12.69a	1.96±0.17b	72.60±8.88a	0.81±0.29ab	38.00±11.83a	0.28±0.07a
阴坡下部	76.83±10.15a	2.50±0.09a	69.00±17.91a	0.83±0.34ab	43.60±13.22ab	0.26±0.09a

2.1.2 不同立地条件下枯落物蓄积量 由图 2 可知,立地条件对枯落物蓄积量影响显著。森林带枯落物蓄积量表现为坡顶>阴坡下部>阴坡中部>阳坡下部>阳坡中部,坡顶的蓄积量最大为 392.95 g/m<sup>2</sup>,与其他立地条件蓄积量存在极显著差异( $p<0.01$ )。枯落物层的厚度范围为 0.79~2.5 cm,其中阴坡下部和中部较高,坡顶和阳坡中部次之,阳坡下部最低,且差异性显著( $p<0.05$ )。枯落物层的盖度范围为 60%~81%,坡顶盖度最大为 81%,与其他立地条件差异显著( $p<0.05$ );森林草原带蓄积量表现为阴坡下部>阳坡下部>阴坡中部>阳坡中部>坡顶,阴坡下部的蓄积量最大为 287.58 g/m<sup>2</sup>,与其他立地条件蓄积量存在显著差异( $p<0.05$ )。枯落物层的厚度范围为 0.38~1.08 cm,阳坡下部最大,阴坡下部和中部、阳坡中部次之,坡顶最低,且差异性显著( $p<0.05$ )。枯落物层的盖度比较稳定,分布在 49.33%~74.5%,无显著差异;草原带蓄积量表现为阳坡下部>阳坡中部>坡顶>阴坡中部>阴坡下部,阳坡下部最大为 174.81 g/m<sup>2</sup>,与其他立地条件蓄积量无显著差异。枯落物层的厚度范围为 0.1~0.28 cm,在不同立地条件下分布较为平均,无显著差异。盖度变化范围在 38.00%~51.67%,坡顶的盖度最大为 51.67%,与其他立地条件差异显著。不同立地条件下枯落物的蓄积量差异显著,一方面是因为不同立地条件下植物群落组成不同,阴坡与阳坡相比具有较好的土壤、水分条件,物种数和丰富度指数往往更高,枯落物的产量也相对较高<sup>[20]</sup>;另一方面是外部环境的土壤、水分和光照条件的影响导致生境差异,从而引起枯落物蓄积量分布的差异<sup>[21]</sup>。

整体而言,坡向与枯落物蓄积量关系密切。不同植被带阴坡枯落物蓄积量的平均值比阳坡分别多 90.7%, 8.9%,阴坡下部枯落物量比阳坡下部分别多 90.5%, 3.6%,阴坡中部枯落物量比阳坡中部分别多 91.1%,

15.3%。原因是阴坡相对于阳坡,光照时间更短,蒸发量较小,土壤水分条件更高,植物群落固定的有机物效率和产量更多,因而阴坡的蓄积量相对大于阳坡<sup>[20]</sup>。坡位对蓄积量也有一定影响,不同植被带沟坡蓄积量的平均值大于梁坡,坡下整体比坡中分别多 32.8%,14%。其中阴坡下部蓄积量比中部分别多 32.7%,8.3%,阳坡下部蓄积量比中部分别多 24.7%,14%。这是由于不同立地条件下径流对枯落物产生的冲推作用不同,同时微地形地貌影响枯落物的流动和堆积,从而引起不同坡位枯落物蓄积量分布的差异<sup>[21]</sup>。

2.1.3 枯落物蓄积量和厚度的关系 大量研究表明,枯落物蓄积量受物种组成、水热条件、植被的生长状况以及枯落物本身特性等多种因素的影响<sup>[22]</sup>。一般情况下,枯落物蓄积量和厚度密切相关,厚度越大,蓄积量越大<sup>[23]</sup>。本研究结果显示,研究区枯落物蓄积量与厚度呈显著正相关关系(图 3)。3 个植被带枯落物蓄积量随厚度的增加均呈显著上升趋势。森林带枯落物蓄积量随厚度的变化上升最快( $R^2=0.51$ ,  $p<0.01$ ,  $n=29$ ),森林草原带枯落物蓄积量随厚度的变化也显著增加( $R^2=0.16$ ,  $p<0.05$ ,  $n=21$ ),森林草原带枯落物蓄积量和厚度没有显著的相关性( $R^2=0.04$ ,  $p=0.18$ ,  $n=21$ )。

2.2 枯落物持水性能

2.2.1 枯落物自然含水率 由图 4 可以看出,不同立地条件下枯落物自然含水率存在显著差异。森林带不同立地条件下自然含水率为 28%~54.5%,阳坡中部最大,阴坡下部最小,自然含水率的大小依次为阳坡中部>阳坡下部>阴坡中部>坡顶>阴坡下部,不同立地条件下差异性显著;森林草原带不同立地条件下自然含水率为 26.8%~41%,坡顶最大,阴坡下部最小,自然含水率的大小依次为坡顶>阳坡中部>阳坡下部>阴坡中部>阴坡下部,不同立地条件下差

异性显著;草原带不同立地条件下自然含水率为20.7%~31.3%,阴坡中部最大,阳坡下部最小,自然含水率的大小依次为阴坡中部>阴坡下部>坡顶>阳坡中部>阳坡下部,不同立地条件下差异性显著。

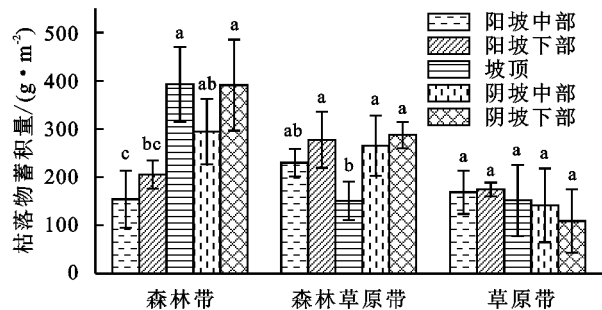


图2 不同立地条件下枯落物蓄积量特征

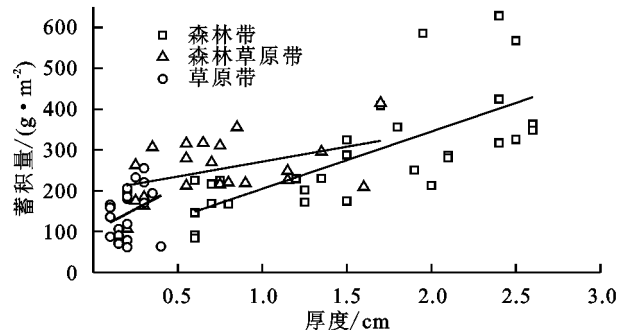


图3 枯落物蓄积量和厚度的关系

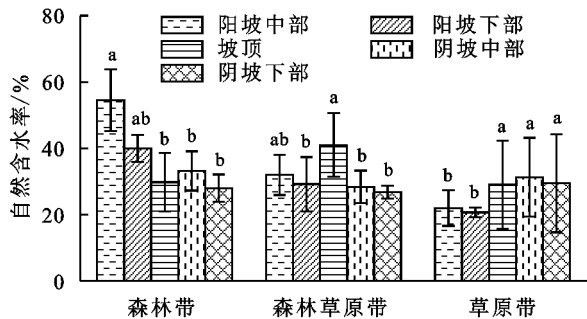


图4 不同立地条件下枯落物自然含水率

### 2.2.2 枯落物最大持水量和最大吸湿比

(1) 枯落物最大持水量。最大持水量通常指枯落物在实际状态下能够吸持的最大水量。不同植被带枯落物最大持水量见图5,森林带枯落物最大持水量的范围为348.61~1 032.37 g/m<sup>2</sup>,最大吸持水量为自身干重的3.26~3.64倍,表现为阴坡下部>坡顶>阴坡中部>阳坡下部>阳坡中部;森林草原带最大持水量的范围为293.46~610.65 g/m<sup>2</sup>,最大持水量约为自身干重的2.94~3.2倍,表现为阳坡下部>阴坡下部>阴坡中部>阳坡中部>坡顶;草原带最大持水量的范围为209.74~295.24 g/m<sup>2</sup>,最大持水量为自身的2.63~2.92倍,表现为阳坡中部>阳坡下部>坡顶>阴坡中部>阴坡下部。可以看出森林带的枯落物最大持水量明显大于森林草原带和草原带,这是因为枯落物的持水量不仅与枯落物本身的含水

量有关,还与枯落物蓄积量密切相关。

(2) 枯落物最大吸湿比。枯落物最大吸湿比是评价枯落物持水能力的重要指标之一。由图5可知,森林带枯落物最大吸湿比3.26~3.64,森林草原带为2.94~3.21,草原带为2.63~2.92,各立地条件下没有表现出明显的规律,原因是不同立地条件下草本植物群落的组成不同,同时枯落物的吸水性受枯落物的紧实程度、比表面积以及形态结构功能的影响<sup>[9]</sup>。

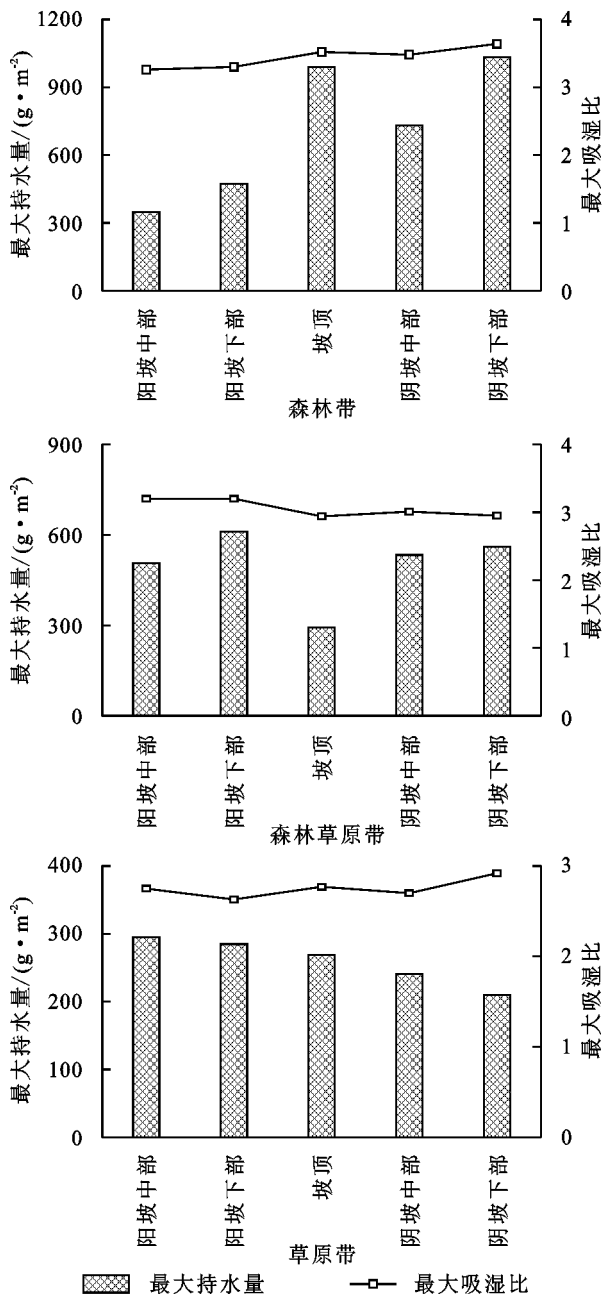


图5 不同立地条件下枯落物的最大持水量和最大吸湿比

2.2.3 枯落物持水过程 枯落物的持水过程见图6,不同植被带枯落物持水量的变化趋势基本一致,均呈现浸水前期持水量迅速增长,伴随着浸水时间的延长,枯落物持水量增幅渐缓直至趋于稳定。分析不同植被带枯落物的持水过程发现,森林带枯落物在浸泡

1 h 后增幅明显,达到自身干重的 1.68~2.29 倍,6 h 后趋于稳定,基本达到最大持水量。可以明显观察到阴坡下部枯落物吸水较快,且吸水量较大,其次是阴坡中部和坡顶,阳坡下部、阳坡中部次之,这可能与枯落物的形态特征和自然含水量有关;森林草原带与森林带相似,枯落物在浸水 2 h 内持水量迅速增加,达到自身干重的 1.44~1.95 倍,8 h 后趋于稳定,基本达到最大持水量,不同立地条件下枯落物持水量不

同,其中阳坡中部和下部较大,坡顶和阴坡下部次之,阴坡中部最低。草原带枯落物在浸泡 0.5 h 内迅速增加,达到自身干重的 1.1~1.43 倍,0.5~6 h 内呈缓慢上升趋势,之后达到基本稳定。不同立地条件下枯落物持水量的变化趋势为阴坡下部最大,前 4 h 内阴坡中部大于阳坡中部和坡顶,但是之后阴坡中部的持水量变化渐缓而阳坡中部和坡顶变化较快,阳坡下部的持水量变化最小。

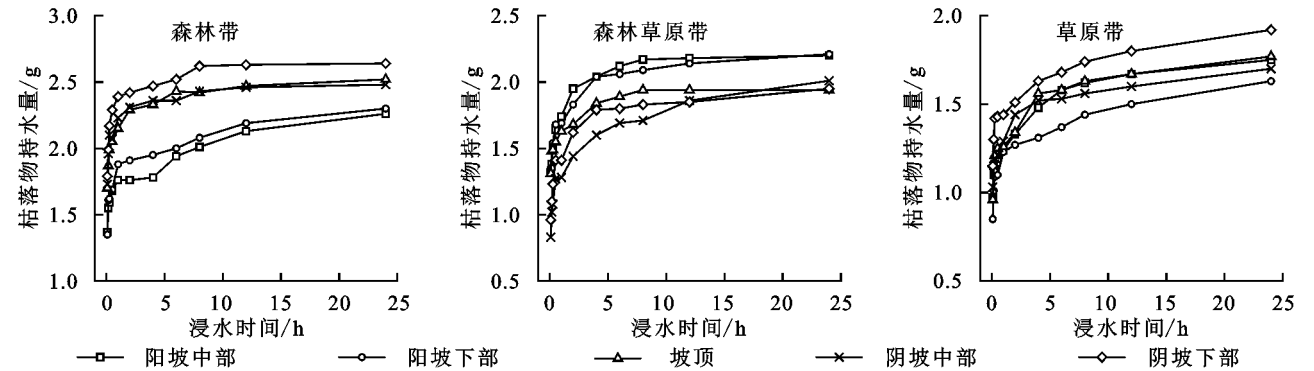


图 6 典型植被带枯落物持水过程

对 3 个植被带不同立地条件下枯落物持水量与浸水时间进行拟合分析,得出不同浸水时间和持水量的拟合函数:

$$Y=a\ln t+b, \quad R^2>0.91$$

式中: $Y$  为枯落物持水量( $g/g$ ); $t$  为浸泡时间( $h$ ); $a, b$  为方程系数。

3 个植被带不同立地条件下持水量和浸泡时间的拟合方程见表 3。

表 3 不同植被带持水量与浸泡时间拟合方程

立地条件	森林带		森林草原带		草原带	
	回归方程	$R^2$	回归方程	$R^2$	回归方程	$R^2$
阳坡中部	$Y=1.739\ln t+0.735$	0.93	$Y=1.757\ln t+0.175$	0.97	$Y=1.303\ln t+0.138$	0.98
阳坡下部	$Y=1.801\ln t+0.146$	0.96	$Y=1.738\ln t+0.164$	0.97	$Y=1.197\ln t+0.120$	0.97
坡顶	$Y=2.135\ln t+0.141$	0.97	$Y=1.644\ln t+0.117$	0.96	$Y=1.336\ln t+0.133$	0.96
阴坡中部	$Y=2.169\ln t+0.121$	0.92	$Y=1.342\ln t+0.197$	0.99	$Y=1.325\ln t+0.116$	0.99
阴坡下部	$Y=2.290\ln t+0.140$	0.91	$Y=1.457\ln t+0.177$	0.97	$Y=1.491\ln t+0.119$	0.95

不用立地条件下的枯落物吸水速率随时间变化的趋势基本一致,均表现为在浸水初期吸水速率最大,0~1 h 之内吸水速率迅速降低,之后呈缓慢下降趋势,浸水 8 h 之后处于基本稳定状态。对 3 个植被带不同立地条件下枯落物吸水速率和浸泡时间进行拟合分析,得出不同浸水时刻与吸水速率存在幂函数关系:

$$V=kt^n \quad (R^2>0.99)$$

式中: $V$  为不同时刻吸水速率 [ $g/(g \cdot h)$ ]; $k$  为方程系数; $t$  为浸水时间; $n$  为方程指数。3 个植被带不同立地条件下吸水速率与浸泡时间的拟合方程见表 4。各个拟合方程的系数  $R^2$  均在 0.99 以上,与杨寒月<sup>[24]</sup>、刘宇<sup>[25]</sup>等的研究结果一致。

2.2.4 枯落物拦蓄能力 枯落物持水能力是反映植被持水能力的重要指标,通常用持水量、持水速率、最大持水量等指标表示,但是用最大持水量表示枯落物的拦蓄能力会导致结果偏大,实际情况下一般用有效拦蓄量反映枯落物在野外条件下对实际降雨的

拦蓄能力。由图 7 看出,3 个植被带不同立地条件下枯落物的有效拦蓄量存在差异性。整体来看,枯落物有效拦蓄量表现为森林带>森林草原带>草原带。森林带枯落物有效拦蓄量的范围为 219.86~787.09  $g/m^2$ ,不同立地条件下差异显著,从大到小依次为阴坡下部(787.09  $g/m^2$ )>坡顶(743.22  $g/m^2$ )>阴坡中部(538.02  $g/m^2$ )>阳坡下部(329.61  $g/m^2$ )>阳坡中部(219.86  $g/m^2$ );森林草原带枯落物有效拦蓄量的范围为 188.15~437.7  $g/m^2$ ,不同立地条件下差异显著,从大到小依次为阳坡下部(437.7  $g/m^2$ )>阴坡下部(399.08  $g/m^2$ )>阴坡中部(376.57  $g/m^2$ )>阳坡中部(353.85  $g/m^2$ )>坡顶(188.15  $g/m^2$ );草原带枯落物有效拦蓄量的范围为 99.89~181.22  $g/m^2$ ,不同立地条件下无明显差异,从大到小依次为阳坡中部(181.22  $g/m^2$ )>阳坡下部(175.04  $g/m^2$ )>坡顶(159.34  $g/m^2$ )>阴坡下部(101.93  $g/m^2$ )>阴坡中部(99.89  $g/m^2$ )。



表 4 不同植被带持水速率与浸泡时间拟合方程

立地条件	森林带		森林草原带		草原带	
	回归方程	$R^2$	回归方程	$R^2$	回归方程	$R^2$
阳坡中部	$V=1.921t^{-0.889}$	0.99	$V=1.724t^{-0.903}$	0.99	$V=1.281t^{-0.897}$	0.99
阳坡下部	$V=1.987t^{-0.884}$	0.99	$V=1.712t^{-0.906}$	0.99	$V=1.178t^{-0.901}$	0.99
坡顶	$V=2.362t^{-0.898}$	0.99	$V=1.630t^{-0.930}$	0.99	$V=1.314t^{-0.902}$	0.99
阴坡中部	$V=2.404t^{-0.908}$	0.99	$V=1.296t^{-0.855}$	0.99	$V=1.309t^{-0.913}$	0.99
阴坡下部	$V=2.535t^{-0.902}$	0.99	$V=1.419t^{-0.877}$	0.99	$V=1.475t^{-0.922}$	0.99

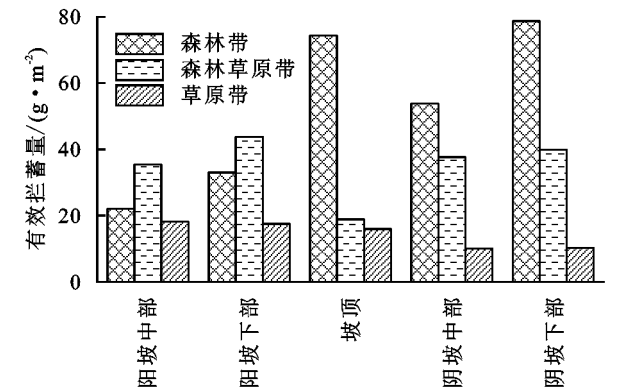


图 7 不同立地条件下枯落物有效拦蓄量

对枯落物蓄积量、最大持水量、最大吸湿比、自然含水率、有效拦蓄量进行相关性分析,结果见表 5。枯落物蓄积量与最大持水量、最大吸湿比、有效拦蓄量呈极显著正相关关系,说明枯落物蓄积量对枯落物蓄水拦蓄能力有直接影响;自然含水量和蓄积量、最大持水量、最大吸湿比、有效拦蓄量呈负相关关系。

表 5 枯落物蓄积量、最大持水量、最大吸湿比、自然含水率、有效拦蓄量的相关性分析

项目	最大持水量	最大吸湿比	自然含水量	有效拦蓄量
蓄积量	0.804**	0.756**	-0.801**	0.980**
最大持水量	—	0.543*	-0.508	0.781**
最大吸湿比		—	-0.573*	0.858**
自然含水量			—	-0.770**
有效拦蓄量				—

注: \* 表示在  $p=0.05$  水平上显著相关, \*\* 表示在  $p=0.01$  水平上显著相关。

3 结论

(1) 3 个植被带枯落物蓄积量存在明显差异,依次表现为森林带(154.25~392.95 g/m<sup>2</sup>)>森林草原带(151.27~287.58 g/m<sup>2</sup>)>草原带(109.24~174.81 g/m<sup>2</sup>),枯落物层的厚度和盖度的总体变化趋势与之一致。立地条件对枯落物蓄积量影响显著,森林带蓄积量表现为坡顶>阴坡下部>阴坡中部>阳坡下部>阳坡中部,森林草原带蓄积量表现为阴坡下部>阳坡下部>阴坡中部>阳坡中部>坡顶,草原带蓄积量表现为阳坡下部>阳坡中部>坡顶>阴坡中部>阴坡下部,且不同立地条件下枯落物的厚度和盖度差异

显著,枯落物蓄积量与厚度呈正相关关系。

(2) 不同立地条件下枯落物自然含水率、最大持水量、最大吸湿比均具有一定的差异性。森林带、森林草原带、草原带枯落物自然含水率的变化趋势分别为 28%~54.5%,26.8%~41%和 20.7%~31.3%,且不同立地条件下差异显著( $p<0.05$ );最大持水量分别为自身的 3.26~3.64,2.94~3.2,1.63~1.92 倍,最大吸湿比分别为 3.26~3.64,2.94~3.21,2.63~2.92。

(3) 对枯落物持水量、吸水速率和浸水时间进行拟合发现,不同立地条件下枯落物持水量和浸水时间存在显著对数函数关系: $Y=a\ln t+b(R^2>0.91)$ ,吸水速率和浸泡时间存在幂函数关系: $V=kt^n(R^2>0.99)$ ,两者均表现出较好的相关性。

(4) 枯落物有效拦蓄量表现为森林带>森林草原带>草原带。有效拦蓄量的范围依次为 219.86~787.09 g/m<sup>2</sup>,188.15~437.7 g/m<sup>2</sup>,99.89~181.22 g/m<sup>2</sup>。说明森林带对径流拦蓄的贡献率最大,其次为森林草原带和草原带。

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.

[2] Shi Z H, Yue B J, Wang L, et al. Effects of mulch cover rate on interrill erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013,77(1):257-267.

[3] 吴钦孝,赵鸿雁,韩冰.黄土高原森林枯枝落叶层保持水土的有效性[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2001,29(5):95-98.

[4] 吴钦孝,赵鸿雁,刘向东,等.森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(2):24-29.

[5] 李强,周道玮,陈笑莹.地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J].生态学报,2014,34(14):3807-3819.

[6] 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):108-113.

[7] 牛勇,刘洪禄,张志强.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.

- [8] 孙龙,张光辉,王兵,等.黄土高原不同退耕年限刺槐林地土壤侵蚀阻力[J].农业工程学报,2017,33(10):191-197.
- [9] 王忠禹,刘国彬,王兵,等.黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性[J].生态学报,2019,39(7):2416-2425.
- [10] 栾莉莉,张光辉,孙龙,等.黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J].中国水土保持科学,2015,13(6):48-53.
- [11] 王忠禹,王兵,刘国彬,等.黄土丘陵区典型植被枯落物坡面分布及混入土壤对土壤性状的影响[J].自然资源学报,2018,33(11):2020-2031.
- [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):1337-1349.
- [13] 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.
- [14] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等.黄土残塬沟壑区3种林地枯落物和土壤水源涵养功能[J].水土保持学报,2018,32(2):357-363.
- [15] 邹厚远.陕北黄土高原植被区划及与林草建设的关系[J].水土保持研究,2000,7(2):96-101.
- [16] 谭学进.黄土高原草地恢复对土壤物理性质的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [17] 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.
- [18] 李鑫,马瑞萍,安韶山,等.黄土高原不同植被带土壤团聚体有机碳和酶活性的粒径分布特征[J].应用生态学报,2015,26(8):2282-2290.
- [19] 占峰,杨冬梅.光照条件、植株冠层结构和枝条寿命的关系:以桂花和水杉为例[J].生态学报,2012,6(28):2486-2492.
- [20] 寇萌,焦菊英,杜华栋,等.黄土丘陵沟壑区不同立地条件草本群落物种多样性与生物量研究[J].西北林学院学报,2013,28(1):12-18.
- [21] 刘中奇,朱清科,邝高明,等.半干旱黄土丘陵沟壑区封禁流域植被枯落物分布规律研究[J].草业科学,2010,27(4):20-24.
- [22] 塔莉,张丽茹.冀北山地天然次生林枯落物层水文生态功能对不同林分密度的响应[J].水土保持研究,2020,27(6):46-51,59.
- [23] 马正锐,程积民,班松涛,等.宁夏森林枯落物储量与持水性能分析[J].水土保持学报,2012,26(4):199-203,238.
- [24] 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.
- [25] 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.

(上接第44页)

- [20] Zhang H C, Ming Q Z, Lei G L, et al. Dilemma of dating on lacustrine deposits in an hyperarid inland basin of NW China[J]. Radiocarbon, 2006,48(2):219-226.
- [21] 迟振卿,王永,姚培毅,等.内蒙古额济纳旗地貌特征及其构造,气候事件[J].地质论评,2006,52(3):370-378.
- [22] Krumbein W C. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles[J]. Journal of Sedimentary Research, 1941,11(2):64-72.
- [23] 贾建军,高抒,薛允传.图解法与矩法沉积物粒度参数的对比[J].海洋与湖沼,2002,33(6):577-582.
- [24] 徐树建,潘保田,张慧,等.末次冰期旋回风成沉积物图解法与矩法粒度参数的对比[J].干旱区地理,2005,28(2):194-198.
- [25] 毛龙江,庞奖励,刘晓燕.南京下蜀黄土图解法与矩法粒度参数对比研究[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2007,35(3):95-99.
- [26] 徐兴永,易亮,于洪军,等.图解法和矩法估计海岸带沉积物粒度参数的差异[J].海洋学报,2009,32(2):80-86.
- [27] 刘志杰,龙海燕.南海沉积物图解法和矩法粒度参数计算及对比[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2009,39(2):313-316.
- [28] 陶敏,邓山,王婷乐,等.矩值法和图解法计算山区河流沉积物粒度参数的差异[J].三峡大学学报:自然科学版,2012,33(6):27-32.
- [29] 刘志杰,公衍芬,周松望,等.海洋沉积物粒度参数3种计算方法的对比研究[J].海洋学报,2013,35(3):179-188.
- [30] McManus J. Grain size determination and interpretation[R]. Techniques, in Sedimentology, 1988.
- [31] Blott S J, Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2010,26(11):1237-1248.
- [32] 屈建军,黄宁,拓万全,等.戈壁风沙流结构特性及其意义[J].地球科学进展,2005,20(1):19-23.
- [33] 雷国良.额济纳盆地晚更新世以来湖相沉积记录与环境演变[D].兰州:兰州大学,2009.
- [34] 王飞燕,王富葆,王雪瑜.地貌学与第四纪地质学[M].北京:高等教育出版社,1990.