

黄土丘陵沟壑区典型灌木林地枯落物的蓄积特征及持水性能

张宝琦¹, 王忠禹¹, 杨艳芬^{1,2}, 张娜娜¹, 李永宁¹

(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 712700; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712700)

摘要: [目的] 对黄土丘陵区不同植被枯落物层持水效能进行研究, 为该区域植被恢复和水土流失防治提供理论基础。[方法] 以柠条、沙棘、狼牙刺、杠柳 4 种典型灌木林地枯落物层为研究对象, 采用室内浸泡法对其水文效应特征进行分析。[结果] ①沙棘林地地表枯落物蓄积量最大(1.048 kg/m²); 沙棘林地土壤中枯落物量最大(0.674 kg/m²); 土壤中枯落物占枯落物总蓄积量的 20.15%~68.75%, 其中柠条和狼牙刺土壤中枯落物高于地表枯落物。②地表枯落物和混入土壤枯落物的持水量均随浸泡时间呈极显著对数函数关系($R^2 \geq 0.745, p < 0.01$), 地表枯落物 5 min 持水量可以达到最大持水量的 40%, 且与最大持水量存在显著的幂函数关系($R^2 = 0.38, p < 0.01$), 可以通过 5 min 持水量来拟合最大持水量, 而混入土壤枯落物并没有呈现这一规律。混入土壤枯落物的持水量显著大于地表, 其中地表枯落物有效持水量杠柳最大(2.13 g/g), 土壤中枯落物有效持水量柠条最大(1.90 g/g)。③地表枯落物有效拦蓄量沙棘林地最大, 为 21.16 t/hm²; 土壤中枯落物有效拦蓄量柠条林地最大, 为 10.01 t/hm²; 土壤中枯落物拦蓄量的校正系数变化范围在 0.18~0.42 之间。[结论] 土壤中枯落物不容忽视, 其混入量占枯落物总蓄积量的 1/5 甚至 2/3 以上; 柠条总有效持水量最大, 而受枯落物类型和积累量的影响, 沙棘总拦蓄能力最大, 具有较强的水源涵养和水土保持功能。

关键词: 土壤中枯落物; 蓄积量; 持水量; 黄土丘陵区; 灌木

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)04-0076-06

中图分类号: S714.7

文献参数: 张宝琦, 王忠禹, 杨艳芬, 等. 黄土丘陵沟壑区典型灌木林地枯落物的蓄积特征及持水性能[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 76-81. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.012; Zhang Baoqi, Wang Zhongyu, Yang Yanfen, et al. Accumulation and water-holding capacity of typical shrub woodland litters in loess hilly region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 76-81.

Accumulation and Water-holding Capacity of Typical Shrub Woodland Litters in Loess Hilly Region

Zhang Baoqi¹, Wang Zhongyu¹, Yang Yanfen^{1,2}, Zhang Nana¹, Li Yongning¹

(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, China; 2. Institute Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The water-holding efficiency of different vegetation litter was studied in order to provide a theoretical basis for vegetation restoration and soil erosion control in loess hilly region. [Methods] The hydrological effect of the litter layers of four typical shrub woodlands (*Caragana korshinskii*, *Hippophae rhamnoides*, *Sophora viciifolia* and *Periploca sepium*) were studied, using indoor immersion method. [Results] ① The stock of the litter surface in *Hippophae rhamnoides* was the largest (1.048 kg/m²). The

收稿日期: 2019-02-23

修回日期: 2019-03-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于 RUSLE 模型的黄土高原草地植被覆盖因子研究”(41771555); 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), “黄土高原气候和土地利用变化对土壤侵蚀的影响及不确定性分析”(41501301)

第一作者: 张宝琦(1994—), 女(汉族), 甘肃省会宁县人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与植被恢复相关研究。E-mail: 18829489183@163.com.

通讯作者: 杨艳芬(1984—), 女(汉族), 宁夏回族自治区银川市人, 助理研究员, 主要从事土壤侵蚀与水文模拟相关研究。E-mail: yfyang@ms.iswc.ac.cn.

amount of litter in the soil of *Caragana korshinskii* was the largest(0.769 kg/m²). In addition, the litter in the soil accounted for 20.15 %~55.92 % of the total accumulated amount of litter, and the litter in the soil of *Caragana korshinskii* and *Sophora vicifolia* was higher than that of the surface litter. ② The water-holding capacity of litter on the surface and the litter in the soil showed a very significant logarithmic function with the immersion time($R^2 \geq 0.745$, $p < 0.01$). The water-holding capacity of surface litter could reach 40% of the maximum water holding capacity in 5 min, and there was a significant power function relationship with the maximum water holding capacity($R^2 = 0.38$, $p < 0.01$), that was to say, the maximum water-holding capacity of the surface litter could be fitted by the water holding capacity of 5 min, but this rule was not found for the litter in the soil. The water-holding capacity of the litter in the soil was significantly higher than the surface. The surface litter of the *Periploca sepium* had the highest effective water-holding capacity(2.13 g/g). What's more, the litter in the soil of *Caragana korshinskii* had the highest effective water-holding capacity(1.90 g/g). ③ The surface litter of *Hippophae rhamnoides* had the largest effective retaining content of 21.16 t/hm². The litter in the soil of *Caragana korshinskii* had the highest effective retaining capacity(10.01 t/hm²). The correction coefficient of litter retaining content in soil varied from 0.18 to 0.42. [Conclusion] The litter in soil could not be ignored, the mixed amount of litter accounted for more than 1/5 or even 2/3 of the total volume of litter. The total effective water-holding capacity of *Caragana korshinskii* was the largest, while under the influence of litter type and accumulation amount, the total holding capacity of *Hippophae rhamnoides* was the largest, with strong water conservation and soil and water conservation functions.

Keywords: soil litter; storage; water-holding capacity; loess hilly region; shrub

枯落物作为典型的地表覆被物,是生态系统的重要结构和功能单位,也是植物生长的重要能量来源。枯落物可有效降低雨滴动能,减小溅蚀和减轻地表径流对土壤的侵蚀^[1-2]。同时,枯落物层还有吸收和阻延地表径流,抑制土壤蒸发,增加降水入渗,增强土壤抗冲能力等功能,而枯落物蓄积量是影响其功能有效发挥的重要影响因素^[3-4]。大量研究^[5-7]表明,枯落物蓄积量可减少土壤水分蒸发,减轻径流泥沙的产生,保护地面免遭雨水的冲刷,增加土壤入渗能力,提高土壤抗冲性。不同植被类型枯落物蓄积量条件下土壤的初渗速率与稳渗速率之间存在着幂函数关系^[8]。同时,由于受枯落物类型差异,其减少水土流失,增加入渗性能和维持林地生态系统养分循环的作用也会有所不同。例如,田野宏等人^[9]对大兴安岭北部天然次生林枯落物的抑制土壤蒸发能力研究结果表明,白桦+落叶松林枯落物抑制土壤蒸发的能力要高于其它林型,其次是白桦林略高于山杨+白桦林,山杨林枯落物抑制土壤蒸发能力相对较差。李学斌等^[10]人对荒漠草原 4 种主要植物群落枯落物层水土保持功能的研究,表明 4 种植物群落年截留率依次为:蒙古冰草群落>甘草群落>赖草群落>沙蒿群落。说明蒙古冰草群落对降雨的截留作用效果最好。同时,也有研究表明枯落物往往随土壤侵蚀过程而混入表层土壤中,从而增强土体稳定性、改善土壤孔隙结构、影响土壤入渗过程^[11]。

黄土高原自 20 世纪 90 年代末实施退耕还林(草)以来,植被覆盖度得到显著提升,枯落物蓄积量也显著增加。灌木林地是黄土高原尤其是黄土高原丘陵沟壑区(森林草原区)的主要植被类型,占黄土高原总面积的 16.4%^[12-13]。然而,以往枯落物相关研究虽有涉及灌木林地,但大多集中于地表,有关土壤中枯落物蓄积量及水文效应少有报道。基于此,本研究选取黄土高原丘陵沟壑区典型灌木林地,系统研究灌木类型间枯落物地表蓄积量和土壤中混入量,探讨其持水特征差异,以期研究黄土丘陵区的水文效应提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验在西北农林科技大学安塞水土保持综合试验站进行,研究区位于黄土高原的中部,平均海拔 1 100~1 400 m,属暖温带半湿润气候向半干旱气候过度区,年日照时间 2 415.6 h,年平均气温 8.8 ℃,无霜期 157~194 d,年平均降雨量为 502 mm 左右,主要集中在 7—9 月,占全年降雨总量的 70%以上,年均蒸发量远大于降水量,使得土壤水分成为该地区限制植物种类的主要因子。土壤主要以黄绵土和红胶土为主,土层深厚,加之植被覆盖度低,使得该地区易发生土壤侵蚀。植被主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hip-*

poph rhamnoides)、狼牙刺(*Sophora vicii folia*)、杠柳(*Periploca sepium*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)等。

1.2 样地选区

于 2017 年 6 月选取具有相似坡度、坡向的柠条、沙棘、狼牙刺、杠柳 4 种典型灌木林地且植被恢复年限均大于 2 a 的成熟林为研究样地,其中柠条和沙棘样地为人工种植林,杠柳和狼牙刺为自然演替物种,样地内植被生长良好,人为干扰少(表 1)。在每个采样点,设置 50 cm×50 cm 的样方来调查地表枯落物和土壤中枯落物的蓄积量、持水量及拦蓄量(3 个重复)。

表 1 研究区样地基本信息

样地名称	经纬度	坡度/ (°)	海拔/ m	坡向	植被覆 盖度/%
柠条	109°14'30"E,36°44'36"N	25	1 266	东北	94
沙棘	109°18'57"E,36°51'18"N	28	1 245	东北	94
狼牙刺	109°15'14"E,36°45'3"N	29	1 171	南	72
杠柳	109°14'58"E,36°44'52"N	13	1 177	东	50

1.3 枯落物的收集

(1) 地表枯落物收集。采用直尺法和网格法来测定地表枯落物的厚度和盖度,之后全部收取地表枯落物,编号、清洗、烘干(65 ℃,24 h)、称重并计算地表枯落物蓄积量(kg/m²)。

(2) 土壤中枯落物收集。收集地表枯落物后,去样方挖取深度为 10 cm,宽度为 50 cm 的土壤剖面,通过观察土壤剖面颜色的差异及枯落物形态特征来判断枯落物混入土壤深度,重复测 10 次将其平均值作为该样方混入土壤枯落物深度。在样地对角线上采用环刀(内径 9.8 cm,高 5 cm)法采取 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。为了避免土壤中杂质的影响,考虑到枯落物混入土壤深度总体小于 5 cm,将 5—10 cm 的土壤采用相同的方法来获取土壤冲洗物,两层冲洗物相减后得到表层 0—5 cm 土壤中枯落物混入量。

1.4 枯落物持水量的测定及计算

将收集的地表枯落物和混入土壤中的枯落物分别在自然条件下阴干、称重,而后置于烘箱烘干(65 ℃,24 h)、称重,计算地表和混入土壤中枯落物自然持水量(W_N , g/g)。

枯落物持水量的测定是将 20 g 地表枯落物装入网纱袋完全浸入水中测定其持水性,按照时间间隔 5,15,30 min,1,2,4,4,8,12,12,12,12 h 定时取出,悬挂静止不滴水(约 5 min)时迅速取出称重,累计浸

泡时间 72 h,得到最大持水量(W_{72} , g/g)。对于土壤中混入枯落物,考虑到其尺寸较小,取 4 g 装入茶叶袋中测定其持水性,测定过程和地表枯落物相同。对于每个样地,地表枯落物和土壤中枯落物持水量测定均重复 3 次。浸泡结束后,将枯落物取出烘干(65 ℃,24 h)、称重,用以计算枯落物有效持水量(W_E , g/g)和有效拦蓄量(W_I , g/g):

$$W_E = W_{72} - W_N$$

$$W_I = (\alpha W_{72} - W_N) \times M$$

式中: M ——样方内枯落物蓄积量(kg/m²); α ——枯落物拦蓄校正系数($\alpha=0.85^{[14]}$)。

对于土壤中枯落物,由于枯落物和土壤混为一体,若采用直接测定的有效持水量计算有效拦蓄量可能不能真实反映其拦蓄能力。因而本研究将 10 g 自然阴干枯落物与 440 g 干土混合填入 400 cm³ 的环刀内,同时将 440 g 干土填入相同尺寸的环刀内作为对照,浸泡 12 h,控水 2~3 h 后称重,用以计算土壤中混入枯落物有效拦蓄量。

1.5 数据处理

采用 Excel 对数据进行整理与处理,用 Origin 2018 对有关图形进行绘制,并对枯落物持水量与浸泡时间和 5 min 持水量与最大持水量进行回归方程的显著性检验($p<0.01$ 表示极显著相关)。

2 结果分析

2.1 枯落物的蓄积量

枯落物蓄积量与其凋落量、组成分解速率及群落类型关系密切^[15]。受上述因素的影响,本研究中 4 种灌木林地地表枯落物盖度和蓄积厚度分别为 50%~94% 和 1.25~2.5 cm,土壤中枯落物混入深度为 1.64~2.25 cm。地表枯落物蓄积量沙棘林地最大,为 1.048 kg/m²,分别是柠条、狼牙刺和杠柳的 2.13, 5.35, 2.15 倍。土壤中枯落物混入量沙棘林地最大,为 0.674 kg/m²,分别是柠条、狼牙刺和杠柳的 1.23, 1.56, 5.07 倍。此外,柠条和狼牙刺土壤中枯落物混入量所占比重相对较大,占枯落物总蓄积量的 53% 和 69%,而沙棘和杠柳土壤中枯落物相对较少,占枯落物总蓄积量的 39% 和 20%。枯落物的年凋落量是地表和土壤中枯落物的重要来源,凋落量的多少很大程度上决定了地表枯落物的蓄积量和土壤中枯落物的混入量。沙棘相对于其他灌木具有较大的株体、生物量和枯落物凋落量,其地表蓄积量显著高于其他灌木样地;而对于土壤中枯落物,沙棘林地土壤中枯落物混入量低于最高的柠条林地,这主要是由于柠条枯落物中木质素和多酚类物质含量较高,不易被分解,并且柠条的枝干坚硬,落叶比较尖锐,有短尖刺,随着

径流泥沙的运移更容易混入土壤。与柠条类似,狼牙刺枯落物也较容易混入土壤,这也是柠条和狼牙刺土壤中枯落物占枯落物总蓄积量比重较高、甚至高于其地表枯落物的原因(表 2,图 1)。

表 2 研究区不同植被类型枯落物蓄积量及分布特征

植被样地	地表枯落物			土壤枯落物	
	蓄积量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	厚度/ cm	盖度/ %	混入量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	混入 深度/cm
柠条	0.492	2.35	94	0.547	1.64
沙棘	1.048	2.5	94	0.674	1.92
狼牙刺	0.196	1.25	72	0.431	2.25
杠柳	0.487	—	50	0.133	—

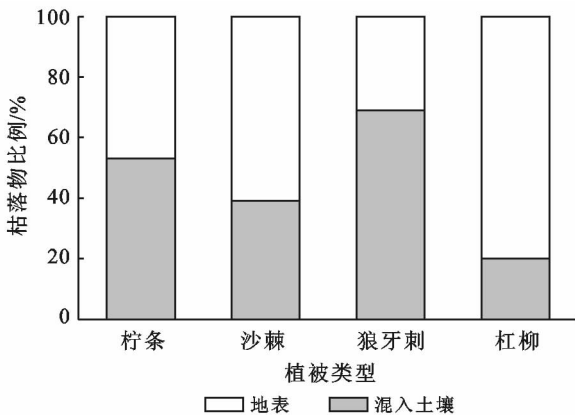


图 1 研究区不同植被样地地表和混入土壤枯落物比例

2.2 枯落物持水过程

4 种典型灌木林地地表枯落物和土壤中枯落物持水量均与浸泡时间呈极显著对数函数关系 ($R^2 \geq 0.745, p < 0.01$), 且土壤中枯落物持水量均不同程度高于地表枯落物, 这主要是因为混入土壤枯落物虽基本保留了枯落物的形态, 但大都是半降解状态, 具有较强的亲水性, 有利于枯落物对水分的吸收; 这也在一定程度上解释了土壤中枯落物持水量在前 2 h 迅速增加, 占最大持水量的 74.77%~92.64%。而地表枯落物结构相对完整, 水分只能从表面的一些孔隙进入, 因而持水过程相对较缓, 持水量也相对较小。王忠禹等^[16] 研究表明, 凋落物在充分浸水 5 min 后持水量可接近最大持水量的 50% 以上, 且 5 min 中持水量和最大持水量存在幂函数关系。本研究中, 地表枯落物 5 min 持水量占最大持水量的 40% 以上, 且与最大持水量存在显著幂函数关系 ($p < 0.01, R^2 = 0.38$) (图 2), 一定程度表明可以用 5 min 持水量拟合最大持水量, 缩减持水量测定时间。而对于土壤中枯落物, 5 min 持水量与最大持水量并没有发现显著函数关系。最大持水量一般只能反映枯落物层持水性能的优劣, 并不能反映枯落物对降雨的实际截持情况^[17]。而自

然含水量是反映植物枯落物吸持水分能力的重要指标之一, 其数值的大小, 表征着枯落物吸持水分能力强弱和保水、涵养水源功效的显著与否^[18-19], 因此将最大持水量与自然含水量的差值作为枯落物实际吸持水分的大小(有效持水量)(图 3, 表 3)。地表枯落物有效持水量杠柳最大, 为 2.13 g/g, 是柠条、沙棘和狼牙刺的 1.37, 1.07, 1.03 倍; 土壤中枯落物有效持水量柠条最大, 为 1.90 g/g, 是沙棘、狼牙刺和杠柳的 1.39, 2.04, 1.43 倍。虽然土壤中枯落物具有较大的最大持水量, 但其有效持水量均低于地表枯落物(柠条地表枯落物与土壤中枯落物有效持水量基本持平)。

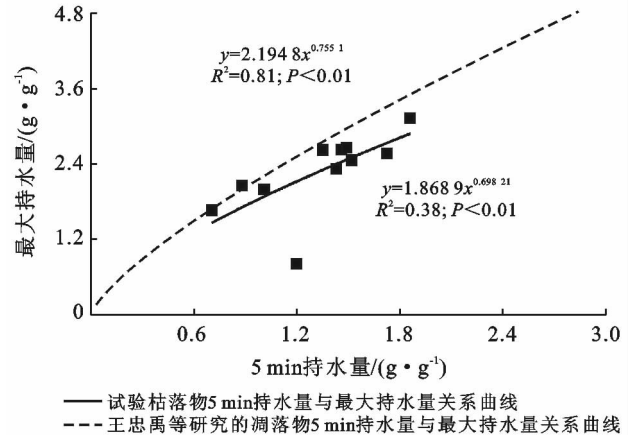


图 2 研究区枯落物 5 min 持水量与最大持水量的关系

表 3 研究区不同植被枯落物的持水量 g/g

植被类型	地表枯落物		混入土壤枯落物	
	最大持水量	有效持水量	最大持水量	有效持水量
柠条	1.91	1.62	4.52	1.90
沙棘	2.44	2.10	3.95	1.37
狼牙刺	2.47	2.07	5.07	0.93
杠柳	2.51	2.13	3.87	1.33

2.3 枯落物有效拦蓄量

枯落物的拦蓄量是反映枯落物蓄水能力的重要指标, 主要取决于枯落物的组成、质地、结构和分解程度等^[19]。枯落物的最大持水量一般只能反映枯落物持水能力大小, 无法直接反映枯落物层的蓄水能力, 而自然状态下直接测量枯落物持水过程的难度和误差较大, 因此有效拦蓄量是反映枯落物层对降水拦蓄能力的指标^[20-21]。对于本研究四种灌木林地, 沙棘林地地表枯落物有效拦蓄量最大, 为 21.16 t/hm², 狼牙刺的拦蓄量最小, 为 3.94 t/hm²; 柠条林地土壤中枯落物有效拦蓄量最大, 为 10.01 t/hm², 其他依次为沙棘、狼牙刺和杠柳(表 4)。尽管 4 种灌木地表枯落物和土壤中枯落物有效持水量存在一定差异, 但有

效拦蓄能力主要受枯落物蓄积量的影响,随蓄积量的增加而增大。总体而言,4种灌木林地其地表枯落物有效拦蓄量与土壤中枯落物有效拦蓄量的比值为0.76~6.05,其中杠柳比值最大,柠条比值最小。可能是因为杠柳林地的分解速率要低于其他3种灌木林地,但杠柳一般生长在沟底中,并且枝条软而繁多,容易堆积在地表,不易混入土壤中。考虑到自然状态下土壤中枯落物往往混有一定比例的土壤,因此将枯落物混入土壤装入环刀中浸泡(环刀法),以此来获得

自然状态下土壤中枯落物有效持水量和有效拦蓄量。结果表明,四种灌木林地土壤中枯落物有效持水量变化范围为0.93~1.9 g/g,较传统的浸泡法减少了2.48~4.07 g/g;有效拦蓄量变化范围为1.67~10.01 t/hm²。由于枯落物混入土壤,测定其有效持水量更接近自然状态,而该方法较于传统方法测定过程相对复杂,因此,将两种方法测定的土壤中枯落物有效持水量比值作为传统方法的校正系数,校正系数变化范围在0.18~0.42之间。

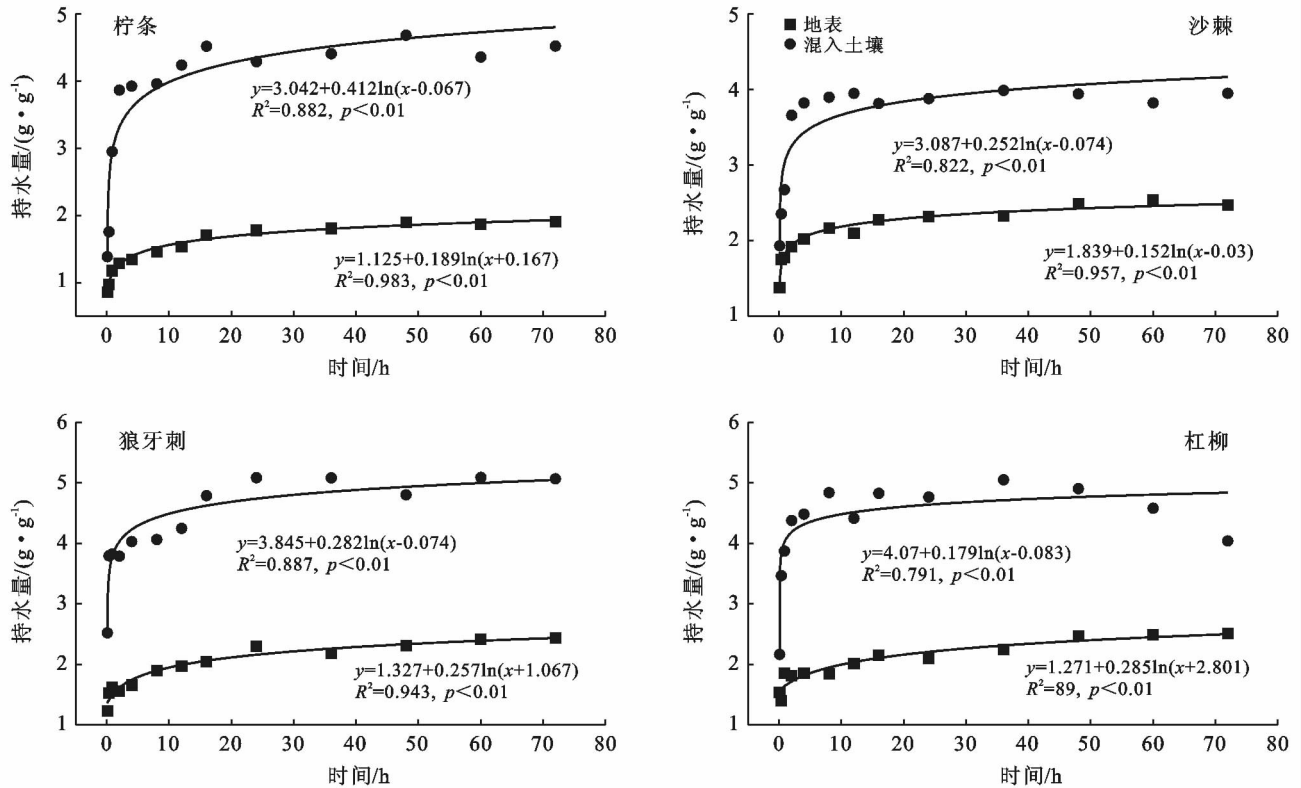


图 3 研究区枯落物持水量与时间的变化关系

表 4 研究区枯落物拦蓄能力

样地名称	地表枯落物有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)	混入土壤枯落物有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)	混入土壤枯落物有效拦蓄量校正系数 α	地表枯落物有效拦蓄量与混入土壤枯落物有效拦蓄量比值
柠条	7.64	10.01	0.42	0.76
沙棘	21.16	8.89	0.35	2.38
狼牙刺	3.94	3.63	0.18	1.09
杠柳	10.10	1.67	0.34	6.05

3 结论

(1) 典型灌木林地枯落物地表蓄积量(0.196~1.048 kg/m²)和土壤中混入量(0.133~0.674 kg/m²)

存在显著差异,土壤中混入的枯落物需引起重视,其混入量占枯落物总量的1/5甚至2/3。

(2) 地表枯落物最大持水量与5 min持水量存在幂函数关系,可用5 min持水量估算。受枯落物类型的差异,杠柳地表枯落物持水量最大,柠条土壤中枯落物持水量最大,基于此提出了土壤中混入枯落物有效拦蓄量的校正系数,可有效表征植被类型间土壤中混入枯落物持水性能差异。

(3) 受枯落物受类型和积累量的影响,沙棘总拦蓄能力最大,具有较强的水源涵养和水土保持功能,是黄土高原植被恢复较为适宜的林地类型。上述研究结果可为系统评估黄土高原枯落物生态水文效应提供理论基础。

[参 考 文 献]

- [1] 宋小帅,康峰峰,韩海荣,等. 太岳山不同郁闭度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持通报,2014,34(3):102-108.
- [2] 余新晓. 水文与水资源学[M]. 北京:中国林业出版社,1999.
- [3] 叶晶,吴家森,张金池,等. 不同经营年限山核桃林地枯落物和土壤的水文效应[J]. 水土保持通报,2014,34(3):87-91.
- [4] 贾剑波,刘文娜,余新晓,等. 半城子流域3种林地枯落物的持水能力[J]. 中国水土保持科学,2015,13(6):26-32.
- [5] 姜海燕,赵雨森,陈祥伟,等. 大兴安岭岭南几种主要森林类型土壤水文功能研究[J]. 水土保持学报,2007,21(3):149-153,187.
- [6] 宣立辉,康凡,谷建才,等. 冀北地区典型林分枯落物层与土壤层的水文效应[J]. 水土保持研究,2018,25(4):86-91.
- [7] 余新晓. 贡嘎山冷杉纯林地被物及土壤持水特性[J]. 北京林业大学学报,2002,24(3):45-49.
- [8] 王会京,王红霞,谢宇光. 太行山不同林型枯落物持水性及生态水文效应研究[J]. 水土保持研究,2016,23(6):135-139,144.
- [9] 田野宏,满秀玲,李奕,等. 大兴安岭北部天然次生林枯落物及土壤水文功能研究[J]. 水土保持学报,2013,27(6):113-139,144.
- [10] 李学斌,吴秀玲,陈林,等. 荒漠草原4种主要植物群落枯落物层水土保持功能[J]. 水土保持学报,2012,26(4):189-193.
- [11] 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.
- [12] Zhou Decheng, Zhao Shuqing, Zhu Chao. The grain for green project induced land cover change in the Loess Plateau: A case study with Ansai County, Shaanxi Province, China [J]. Ecological Indicators, 2012, 23(4):88-94.
- [13] Chen Yiping, Wang Kaibo, Shan Linyi. Balancing green and grain trade[J]. Nature Geoscience, 2015, 10(8):739-741.
- [14] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator(2): User Manual[M]. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture 4. 4, 1990.
- [15] 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.
- [16] 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特征[J]. 生态学报,2019,39(7):1-9.
- [17] 杨荣,杨宏伟,刘丽英,等. 不同林分山杏灌木林枯落物持水性能研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2017,45(2):104-110,118.
- [18] 王卫军,赵婵璞,张绍轩,等. 不同经营措施对油松林枯落物持水性能的影响研究[J]. 水土保持通报,2013,33(6):103-106.
- [19] 徐学华,崔立志,王锡武,等. 不同经营措施对冀北山地华北落叶松林枯落物持水性能的影响[J]. 水土保持研究,2010,17(3):157-161.
- [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] 石媛,鲁绍伟,陈波,等. 河北雾灵山不同密度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持学报,2014,28(3):92-97.
- [30] Wang Hao, Zhang Guanghui, Li Ningning, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2018, 325(9):18-27.
- [31] 沈艳,马红彬,谢应忠,等. 宁夏典型草原土壤理化性状对不同管理方式的响应[J]. 水土保持学报,2012,26(5):84-89.
- [32] 刘映良. 喀斯特典型山地退化生态系统植被恢复研究[D]. 江苏南京:南京林业大学,2005.
- [33] 刘警鉴,卢远,刘斌涛,等. 广西壮族自治区土地利用与土壤侵蚀的关系[J]. 水土保持通报,2018,38(1):41-46,2.
- [34] Gao Liqian, Bowker M A, Xu Mingxiang, et al. Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2017, 105(2):49-58.
- [35] 谢斐,杨再超,林长松,等. 藓类生物结皮的生态适应及在石漠化修复中的作用研究[J]. 六盘水师范学院学报,2014,26(1):40-43.

(上接第35页)